



**HAL**  
open science

# Vers l'industrialisation de l'auto-assemblage dirigé des copolymères à blocs : développement de procédés de lithographie compatibles avec les noeuds technologiques sub-10 nm pour des applications de type contacts

Shayma Bouanani

► **To cite this version:**

Shayma Bouanani. Vers l'industrialisation de l'auto-assemblage dirigé des copolymères à blocs : développement de procédés de lithographie compatibles avec les noeuds technologiques sub-10 nm pour des applications de type contacts. Micro et nanotechnologies/Microélectronique. Université Grenoble Alpes, 2017. Français. NNT : 2017GREAT053 . tel-01708895

**HAL Id: tel-01708895**

**<https://theses.hal.science/tel-01708895>**

Submitted on 14 Feb 2018

**HAL** is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

## **THÈSE**

Pour obtenir le grade de

### **DOCTEUR DE LA COMMUNAUTE UNIVERSITE GRENOBLE ALPES**

Spécialité : **Nano électronique et Nano technologies**

Arrêté ministériel : 7 août 2006

Présentée par

**Shayma BOUANANI**

Thèse dirigée par **Raluca TIRON**

préparée au sein du **CEA Leti** et de **STMicroelectronics**  
dans l'**École Doctorale EEATS**

### **Vers l'industrialisation de l'auto-assemblage dirigé des copolymères à blocs : développement de procédés de lithographie compatibles avec les noeuds technologiques sub-10 nm pour des applications de type contacts**

Thèse soutenue publiquement le **06 octobre 2017**,  
devant le jury composé de :

**Mme Jumana BOUSSEY**

Directrice de recherche au CNRS-LTM, Présidente du jury

**M. Olivier SOPPERA**

Directeur de recherche à l'IS2M-CNRS de Mulhouse, Rapporteur

**M. Jérôme PLAIN**

Professeur à l'Université de Technologie de Troyes, Rapporteur

**M. Christophe SINTUREL**

Professeur à l'ICMN (Université d'Orléans), Examineur

**Mme Raluca TIRON**

Ingénieure de recherche au CEA Leti, Directrice de thèse

**M. Ahmed GHARBI**

Ingénieur de recherche au CEA Leti, Co-encadrant de thèse

**M. Alain OSTROVSKY**

Ingénieur à STMicroelectronics Crolles, Co-encadrant de thèse

**M. Ian CAYREFOURCQ**

Ingénieur à Arkema France, Invité





*« Dans la vie, rien n'est à craindre, tout est à comprendre. Il est temps à présent de comprendre davantage, afin que nous puissions avoir moins peur. »*

– Marie Curie, prix Nobel de Physique (1903) et de Chimie (1911).



# Remerciements

Je tiens tout d'abord à remercier Olivier Soppera et Jérôme Plain d'avoir accepté d'être rapporteur de mes travaux de thèse. Merci également à Jumana Boussey qui m'a fait l'honneur d'être présidente de mon jury mais qui m'a également suivie pendant ces trois dernières années en tant que correspondante de ma spécialité à l'école doctorale. Je remercie aussi Christophe Sinturel, dont l'expertise a donné lieu à une discussion fructueuse durant ma soutenance.

Personne ne peut affirmer qu'une thèse de doctorat se réussit seul. C'est pourquoi je souhaite, à travers ces quelques lignes, remercier celles et ceux qui ont contribué à transformer ce qui n'était qu'un exercice de style en une véritable expérience de vie. Ma première pensée va à ma directrice de thèse, Raluca, sans qui cette thèse n'aurait pu aussi bien se passer. Merci de m'avoir fait relativiser dans les moments de doute et de m'avoir soutenue jusqu'au bout. J'ai beaucoup appris à tes côtés et c'est de toi que je tiens la rigueur qui va me suivre dans ma carrière. Merci également à Ahmed, mon encadrant CEA dont le recul et la gentillesse m'ont permis d'avancer sereinement dans mes recherches (je l'ai finalement eu, mon Snickers !). Une partie conséquente de ma thèse est basée sur la métrologie et la défektivité. Merci à Sandra pour m'avoir encadrée sur ces thématiques avec une bienveillance et une patience incroyable. Je repense avec sourire à nos excursions à 6h du matin à ST pour avoir accès aux équipements (et à la perte de mes clés de voiture de manière assez originale...). Je veux également exprimer ma gratitude envers Alain et Cédric, respectivement encadrant et manager côté STMicroelectronics, qui m'ont permis de garder en tête les enjeux industriels de ma thèse et qui m'ont suivie et appuyé dans mes demandes de ressources.

Je remercie également Xavier, Christophe, Célia et Ian de l'équipe Arkema pour leurs expertises en chimie qui sont à l'origine de nombreux échanges fructueux et conseils scientifiques toujours pertinents. Je n'oublie pas les membres du département technologie silicium (DTSI) au CEA Leti, autant côté gravure – Patricia, Aurélien, Marion –, que métrologie – Christiane, Maryline, Cédric, Nicolas, Stéphane. Mais c'est au laboratoire de lithographie (LLIT) du CEA Leti, dans lequel j'ai évolué pendant ces trois ans, que vont mes remerciements les plus sincères : Michaël, Stéfan, Hubert, Marie-Line, Cyril, Marion, Karine, Léo, Seb, Loïc, Jérôme H., Antoine, Jérôme R., Lamia (<3) et tant d'autres que j'ai sans doute maladroitement oublié. Je souhaite adresser un mot particulier à Laurent Pain et à Cyrille Laviron qui m'ont accueilli très chaleureusement au sein du LLIT. Merci de m'avoir fait confiance pour terminer comme il se doit ces travaux de thèse alors que je commençais en parallèle mon nouveau travail à STMicroelectronics. Par ailleurs, un grand merci à Stéphane, mon nouveau manager, et à mes nouveaux collègues de l'équipe WET de m'avoir laissé le temps nécessaire pour clôturer ce chapitre de ma vie d'étudiante.

J'adresse un énorme merci à l'équipe DSA qui s'est agrandie avec l'arrivée de nouvelles têtes. Vous faites la joie et la bonne humeur de cette équipe, ce qui est indispensable à mes yeux : Florian (mon 1<sup>er</sup> co-bureau), Maxime (tout est dans les détails), Gaëlle (Cops Cops !), Anne (you can do it!), Aurélie (co-bureau de quinze jours ☺), Geoffrey (né trop tard), Guillaume T. (SE SE !!), Cheikh (ma révélation de l'année 2015). Une mention particulière à Guillaume C., le meilleur Cookie qui soit : j'ai rarement été aussi en phase avec quelqu'un. Merci d'avoir été mon bol d'air frais, ma dose de gaieté et mon réconfort ces trois années (et quelques mois).

J'aimerais terminer en remerciant tous mes amis qui pour certains n'étaient pas passés par la case « thèse » mais qui comprenaient la place que ce projet pouvait, parfois malgré moi, prendre dans ma vie. Merci pour votre soutien, vous avez été et vous êtes indispensables à mon équilibre. Merci à ma belle-famille qui s'est montrée toujours disponible et intéressée par mes recherches et qui est devenu officiellement ma famille à la fin de cette thèse. Merci mon cher Tonton Hamid, qui n'oubliait jamais de me demander « Alors, l'école, comment ça va ? ». L'école est maintenant terminée et je crois t'avoir rendu fier. Merci à mes deux petites sœurs, Soufia et Djenna, qui ne comprennent toujours pas ce que je fais dans la vie mais qui me démontrent tous les jours un amour sans limite. N'oubliez jamais à quel point je suis fière de celles que vous êtes devenues. A ma maman que j'aime de tout mon cœur, dont le *leitmotiv* résonne en moi depuis toute petite : « Courage ma fille, tu vas y arriver ». C'est grâce à toi si j'en suis là aujourd'hui, et c'est à toi que je dédie ce manuscrit. Enfin, je remercie mon mari, Julien, qui m'a témoigné un soutien sans faille au quotidien.

*I need no science in your arms.*

# Table des matières

<b>GLOSSAIRE ET ABREVIATIONS .....</b>	<b>V</b>
<b>INTRODUCTION GENERALE .....</b>	<b>1</b>
<b>CHAPITRE I : ETAT DE L'ART.....</b>	<b>3</b>
I.1 CONTEXTE GENERAL DE LA MICROELECTRONIQUE.....	7
I.2 LA LITHOGRAPHIE EN MICROELECTRONIQUE .....	9
<i>I2.1 La photolithographie (ou lithographie optique).....</i>	<i>9</i>
<i>I2.1 Les techniques de lithographie émergentes .....</i>	<i>13</i>
<i>I2.1 Bilan.....</i>	<i>17</i>
I.3 L'AUTO-ASSEMBLAGE DIRIGE DES COPOLYMERES A BLOCS.....	19
<i>I3.1 Le copolymère.....</i>	<i>19</i>
<i>I3.2 Les nano-domaines pour la lithographie.....</i>	<i>21</i>
<i>I3.3 Diriger l'auto-assemblage en deux approches.....</i>	<i>26</i>
I.4 LE DSA POUR LE CMOS AVANCE .....	28
<i>I4.1 Les applications type ligne/espace .....</i>	<i>29</i>
<i>I4.2 Les applications type contact.....</i>	<i>31</i>
<i>I4.3 Avantages et contraintes du DSA.....</i>	<i>32</i>
I.5 LE SUJET DE LA THESE EN CONTEXTE .....	35
I.6 CONCLUSION .....	38
BIBLIOGRAPHIE .....	39
<b>CHAPITRE II : MATERIELS ET METHODES.....</b>	<b>47</b>
II.1 LE PROCEDE DSA PAR GRAPHOEPIITAXIE.....	51
<i>III.1 L'empilement technologique .....</i>	<i>51</i>

III.2	Définition des motifs de guidage .....	52
III.3	La fonctionnalisation des surfaces de guidage .....	54
III.4	Le procédé de planarisation.....	57
III.5	Les matériaux .....	58
II.2	PROTOCOLE D’EVALUATION DES PERFORMANCES LITHOGRAPHIQUES.....	61
II.2.1	Les dimensions critiques et leur dispersion.....	61
II.2.2	La défektivité .....	64
II.2.3	L’erreur de placement des contacts DSA .....	70
II.3	CONCLUSION .....	83
	BIBLIOGRAPHIE .....	84

### **CHAPITRE III : ETUDE DU PROCEDE « SHRINK DE CONTACT »... 87**

III.1	ROLE DE L’AFFINITE DE SURFACE SUR LES PERFORMANCES LITHOGRAPHIQUES DU « SHRINK DE CONTACT » .....	91
III.2	TRANSFERT DU PROCEDE DSA VERS LA LIGNE DE PRODUCTION .....	97
III.2.1	Mise en place des motifs de guidage.....	97
III.2.2	Implémentation du procédé DSA avec le polymère C35.....	106
III.2.3	Stratégie de relaxation de la contrainte de résolution des guides.....	120
III.3	ANALYSE DE LA DEFECTIVITE A GRANDE ECHELLE .....	131
III.4	TRANSFERT PAR GRAVURE DU MOTIF DSA .....	134
III.5	BILAN DES PERFORMANCES PAR RAPPORT A L’ETAT DE L’ART .....	138
III.6	CONCLUSION.....	141
	BIBLIOGRAPHIE .....	145

### **CHAPITRE IV : ETUDE DU DEDOUBLEMENT DE CONTACTS PAR DSA..... 147**

IV.1	MOTIVATIONS DE L’ETUDE .....	151
IV.2	METHODOLOGIE DE DETERMINATION DES FENETRES DE PROCEDES DU DEDOUBLEMENT DE CONTACT .....	152
IV.3	DEDOUBLEMENT DE CONTACTS DANS DES GUIDES ELLIPTIQUES AVEC UN COPOLYMERE C35.....	155

IV3.1	<i>Détermination des fenêtres de procédé</i> .....	155
IV3.2	<i>Optimisation du recuit d'auto-assemblage</i> .....	158
IV.4	DEDOUBLEMENT DE CONTACTS DANS DES GUIDES ELLIPTIQUES AVEC UN COPOLYMERE C43.....	161
IV4.1	<i>Détermination des fenêtres de procédés</i> .....	161
IV4.2	<i>Stratégie de relaxation de la contrainte de lithographie sur le guide</i> .....	173
IV4.3	<i>Bilan des performances « shrink » et dédoublement de contact pour le copolymère C43</i> .....	181
IV.5	DEDOUBLEMENT DE CONTACTS DANS DES GUIDES TYPE « PEANUT » .....	183
IV.6	CONCLUSION.....	190
	BIBLIOGRAPHIE .....	192
 <b>CONCLUSION GENERALE</b> .....		<b>195</b>
 <b>CONTRIBUTIONS</b> .....		<b>199</b>



# Glossaire et abréviations

Note : en micro-électronique, beaucoup de termes anglais sont couramment utilisés, leur traduction française étant moins parlante pour les personnes travaillant dans ce domaine. Nous proposons ici une liste d'abréviations et de termes techniques anglais qui seront utilisés par la suite dans ce manuscrit.

## #

---

193i	Lithographie 193 nm à immersion
$3\sigma$	Dispersion autour d'une valeur moyenne. Assimilé à la CDU.

## A, B

---

a	Longueur de segment statistique (en nm)
AFM	( <i>Atomic Force Microscope</i> ) : microscope à force atomique
Averaging	Moyenne (sur les points de la courbe). Similaire à « Sum Line ».
b	Bloc (polymère)
Blend	Mélange de polymères
Bottom-up	Technologie ascendante
Brightfield	Champ clair : méthode d'inspection consistant à illuminer la plaque et récupérer toutes les diffractions liées aux défauts

## C, $\chi$

---

$\chi$	Paramètre de Flory-Huggins
C35	Copolymère à blocs cylindrique de période $L_0=35$ nm
C43	Copolymère à blocs cylindrique de période $L_0=43$ nm
CD	( <i>Critical Dimension</i> ) : dimension critique, résolution
CD-SEM	( <i>Critical Dimension – Scanning Electron Microscope</i> ) : microscope électronique à balayage haute définition
CDU	( <i>Critical Dimension Uniformity</i> ) : dispersion de CD
CHIPS	Procédé de chémo-épitaxie développé par l'imec
CMOS	( <i>Complementary Metal-Oxide-Semiconductor</i> ) : type de transistor
COOL	Procédé de chémo-épitaxie développé par EIDEC
CPI	( <i>Critical Point Inspection</i> ) : coordonnées des défauts à passer en inspection au SEM de revue
Cut-first	Technologie dans laquelle la zone active du transistor est déterminée en amont de la grille

Cut-last Technologie dans laquelle la zone active du transistor est déterminée après la création de la grille

## D

---

$\Delta$	Largeur de la fenêtre de procédé
d	Distance guide – DSA (nm)
DDFT	( <i>Dynamic Density Functional Theory</i> ) : modèle de simulation
D-RAM	( <i>Dynamic Random Access Memory</i> ) : mémoire vive dynamique
DGmage	Logiciel « maison » développé pour la mesure d'erreur de placement pour le « shrink de contact » et de pitch pour le dédoublement de contact
Differential	Dérivée (de la courbe)
DSA	( <i>Directed Self-Assembly</i> ) : auto-assemblage dirigé (des copolymères à blocs)
DUV	( <i>Deep UV</i> ) : rayonnement ultra-violet profond

## E, F

---

E-beam	( <i>Faisceau d'électron</i> ) : lithographie électronique
EUV	(Extreme UV) : rayonnement ultra-violet extrême
f	Fraction volumique
FEM	( <i>Focus Exposure Matrix</i> ) : matrice d'exposition à dose/focus variable
FIB	( <i>Focused ion beam</i> ) : sonde ionique focalisée. Méthode d'imagerie similaire au SEM
Finfet	( <i>fin field-effect transistor</i> ) : transistor multigrille
FOV	( <i>Field Of View</i> ) : taille de l'image ( $\mu\text{m}$ )
FreeCopoCyl	Logiciel « maison » permettant de calculer, par transformée de Fourier, la période intrinsèque des copolymères à blocs
Front-End	Etapes technologiques avant la création des niveaux métalliques

## G, $\gamma$ , H

---

$\gamma$	Energie de surface ( $\text{mJ}\cdot\text{cm}^{-2}$ )
GDS	( <i>Graphic Database System</i> ) : fichier contenant les informations du masque de lithographie
HF	Acide fluorhydrique
High- $\chi$	Copolymère à haute incompatibilité chimique
HOY	( <i>Hole Open Yield</i> ) : taux d'ouvertures de contacts (%)
hPS	Homo-polystyrène
hPS <sub>g</sub>	Homo-polystyrène greffable
hPMMA	Homo-polyméthacrylate de méthyle

## I, K, L, $\lambda$

---

ITRS	<i>International Technology Roadmap for Semiconductors</i>
$k_1$	Paramètre lié aux propriétés de la résine et aux éléments optiques ( $\emptyset$ )
K	Constante de raideur d'un ressort
$\lambda$	Longueur d'onde de la source lumineuse servant à l'insolation (en nm)
$L_0$	Période intrinsèque du polymère

Laboar	Logiciel « maison » développé pour la mesure de défektivité pour le « shrink de contact »
Layout	Ensemble des dessins électroniques des motifs d'un masque de lithographie
LiNe	Procédé de chémo-épitaxie développé par Li et Nealey
LTO	( <i>Low Temperature Oxide</i> ) : oxyde créé à basse températures

## M, N, O

---

$M_w$	Masse molaire ( $\text{kg}\cdot\text{mol}^{-1}$ )
MEMS	( <i>Microelectromechanical systems</i> ) : microsystème électromécanique
Multiple patterning	Lithographie à impressions multiples
$n$	Indice optique du milieu dans lequel se propage la lumière ( $\emptyset$ )
N	Nombre de monomères dans une chaîne de copolymères
NA	( <i>Numerical aperture</i> ) : ouverture numérique du système optique ( $\emptyset$ )
Neck	Resserrement au milieu du guide « peanut »
NIL	( <i>Nano Imprint Lithography</i> ) : lithographie par nanoimpression
NTD	( <i>Negative Tone Development</i> ) : résine à tonalité négative
Offset	Ecart entre les erreurs de placement programmé et mesuré
OK	Ohta-Kawasaki : modèle de simulation
OPC	( <i>Optical Proximity Correction</i> ) : correction d'effet optique de proximité
Overlay	Désalignement entre les différents niveaux de motifs

## P

---

PE	( <i>Placement Error</i> ) : erreur de placement
Peanut(-shape)	Forme des guides utilisés pour le dédoublement de contact (arachide)
Pitch	Pas de répétition du motif
PDMS	Polydiméthylsiloxane
PDMS- <i>b</i> -PMMA	Poly(diméthylsiloxane- <i>bloc</i> -méthacrylate de méthyle)
PGMEA	Propylène Glycol Monométhyl Éther Acétate
PLA	Poly lactide
PLA- <i>b</i> -PDMS	Poly(lactide- <i>bloc</i> -diméthylsiloxane)
PMMA	Polyméthacrylate de méthyle
PS	Polystyrène
PS- <i>b</i> -PDMS	Poly(styrène- <i>bloc</i> -diméthylsiloxane)
PS- <i>b</i> -PEO	Poly(styrène- <i>bloc</i> -éthylène oxyde)
PS- <i>b</i> -PLA	Poly(styrène- <i>bloc</i> -lactide)
PS- <i>b</i> -PMMA	Poly(styrène- <i>bloc</i> -méthacrylate de méthyle)
PtBS- <i>b</i> -P2VP	Poly(4-tert-butylstyrène- <i>bloc</i> -2-vinylpyridine)

## R, S

---

R	( <i>Random</i> ) : statistique (polymère)
Range	Ecart entre les valeurs extrêmes d'erreur de placement mesurées
RED	( <i>Robust Edge Detection</i> ) : algorithme de détection de contour développé par Hitachi

Review SEM	( <i>Review Scanning Electron Microscope</i> ) : outil de revue à résolution nanoscopique (aussi noté SEM de revue)
S-RAM	( <i>Statistic Random Access Memory</i> ) : mémoire vive statique
SADP	( <i>Self-Aligned Double Patterning</i> ) : procédé de structuration auto-aligné par division de pas par deux
SAQP	( <i>Self-Aligned Quadruple Patterning</i> ) : procédé de structuration auto-aligné par division de pas par quatre
SCFT	( <i>Self-Consistent Field Theory</i> ) : simulations utilisant la méthode de calcul quantique prédictive
SEM	( <i>Scanning Electron Microscope</i> ) : microscope électronique à balayage
SEMI	( <i>Semiconductor Equipment and Materials Institute</i> ) : organisme délivrant les normes relatives à l'industrie du semi-conducteur, en particulier en termes de métrologie
Shrink	Réduction des dimensions des contacts
Siarc	( <i>Si contained Anti-Reflective Coating</i> ) : couche anti-réfléctive à base de silicium
SiN	Nitride de silicium
SiO <sub>2</sub>	Oxyde de silicium
SOQP	( <i>Self-Aligned Octuple Patterning</i> ) : procédé de structuration auto-aligné par division de pas par huit
SOC	( <i>Spin-On Carbon</i> ) : couche de matériau carboné
SOG	( <i>Spin-On Glass</i> ) : couche de matériau à base d'oxyde de Si
Spin-coating	Enduction centrifuge (étalement de résine par rotation)
SMART	Procédé de chémo-épitaxie développé par EMD
Smoothing	Lissage (de la courbe)
Sum lines	Moyenne (sur les points de la courbe)

## T, $\theta$ , U, V

---

$\theta$	Demi-angle d'ouverture de la source lumineuse (rad)
T <sub>deg</sub>	Température de dégradation du polymère (°C)
T <sub>g</sub>	Température de transition vitreuse du polymère (°C)
Terminal PC	Logiciel développé par Hitachi permettant de mesurer des CD à partir d'images CD-SEM
Threshold	Seuillage (de la courbe)
T <sub>ODT</sub>	Température de transition ordre-désordre du polymère (°C)
TIGER	Procédé de grapho-épitaxie développée par IBM
TiN	Nitride de titane
Top-down	Technologie descendante
UV	Rayonnement ultra-violet
VIA	( <i>Vertical Interconnection Access</i> ) : interconnexions métalliques

# Introduction générale

La course à la compétitivité que se disputent les grands groupes industriels du semi-conducteur implique d'augmenter le nombre de fonctionnalités par puce ainsi que de réduire leur coût unitaire, ce qui se traduit par une diminution continue de leur taille. Dans cette démarche, la recherche s'est concentrée sur de nouvelles méthodes de lithographie permettant d'accroître la densité des motifs composant les dispositifs et de repousser leur limite de résolution. L'approche « top-down » atteignant le maximum de sa capacité, de nombreux groupes de recherches se sont penchés sur les propriétés « bottom-up » des copolymères à blocs à s'auto-assembler en nano-domaines. Le DSA (Directed Self-Assembly), ou auto-assemblage dirigé des copolymères à blocs associe les techniques de lithographie conventionnelle à la pointe de la recherche avec les propriétés d'organisation à l'échelle moléculaire des copolymères. Le DSA est en soi une technologie innovante car elle permet de pallier au manque de résolution de la lithographie conventionnelle tout en conservant une cadence de production élevée. De plus, les matériaux sont peu coûteux et intégrables dans le schéma actuel de fabrication de la technologie CMOS produite à STMicroelectronics. En particulier, la morphologie des copolymères à blocs cylindriques, particulièrement adaptée à la fabrication des contacts, est pressentie pour une application de type interconnexion pour les nœuds avancés sub-10 nm.

Au sein d'un laboratoire commun, le CEA Leti et STMicroelectronics se sont associés au fabricant de matériau Arkema afin de combiner leur savoir-faire et intégrer le procédé dans une route de production industrielle. Les plaques de silicium structurées sont générées à STMicroelectronics et les procédés DSA sont développés au CEA Leti avec les copolymères à blocs fournis par Arkema. Afin d'être viable pour la mise en production, les procédés DSA doivent répondre à un certain nombre de critères :

- Le DSA doit être intégré sur plaque 300 mm en utilisant la lithographie 193 nm à immersion disponible en salle blanche à STMicroelectronics.
- D'après l'ITRS, l'uniformité des dimensions critiques (CDU) des contacts après l'étape DSA doit être inférieure à 2 nm.
- D'après l'ITRS, la défektivité finale ne doit pas dépasser 0.01 défaut.cm<sup>-2</sup> pour une application CPU/logique.
- D'après l'ITRS, l'erreur de placement finale des contacts par rapport au design doit être inférieure à 4 nm.

Dans ce cadre et dans le but de répondre aux exigences précédemment énumérées, cette thèse de doctorat (thèse CIFRE STMicroelectronics/CEA Leti) est consacrée à la démonstration du

potentiel d'industrialisation d'un procédé DSA compatible avec les outils de production de STMicroelectronics.

Après avoir fait une synthèse des méthodes de lithographie émergentes, le **chapitre I** se consacre à la propriété d'auto-assemblage des copolymères et à son utilisation pour la réalisation de motifs nanométriques. Les propriétés intrinsèques du matériau ainsi que les mécanismes physiques mis en jeu dans l'auto-organisation de ce dernier sont explicités afin de faire ressortir les paramètres clés de la mise en place du procédé DSA. Un état de l'art des techniques d'intégration des procédés DSA et des applications émergentes de cette nouvelle technologie vient introduire le développement des thématiques abordées dans cette thèse.

Le **chapitre II** est dédié à l'explication en détail des moyens mis en œuvre pour implémenter le procédé DSA par grapho-épitaxie et des méthodes d'analyses employées pour évaluer leurs propriétés lithographiques. Dans une première partie, les empilements technologiques et les matériaux utilisés sont présentés ainsi que le procédé DSA mis en place, de la définition des motifs de guidages jusqu'au procédé de planarisation, en passant par la description de l'étape de fonctionnalisation des surfaces des motifs de guidage. La seconde partie de ce chapitre décrit le protocole de mesures des performances DSA mis en œuvre pour évaluer les différents procédés étudiés par la suite. En particulier, la mise en place de la méthodologie de mesure de l'erreur de placement des contacts DSA dans le guide constitue une partie importante des travaux de cette thèse.

Le **chapitre III** est consacré à l'étude du procédé « shrink de contact » par auto-assemblage dirigé des copolymères à blocs. La première partie de l'étude vise à déterminer l'impact des affinités de surface des cavités de guidage sur les performances DSA. A partir de cette étude préliminaire, la deuxième partie se concentre sur la mise en place du procédé de référence sur un masque 193i dédié au DSA. Nous proposons des pistes d'amélioration des performances, tant par l'optimisation du procédé que par la modification des matériaux. Nous présentons ensuite les stratégies de relaxation des contraintes existantes sur la résolution des guides. La troisième partie est dédiée à l'analyse de la défektivité à grande échelle, basée sur notre procédé de référence. Enfin, nous terminons ce chapitre par la quatrième partie consacrée au transfert des motifs DSA par gravure.

Dans le **chapitre IV**, nous traitons de la mise en place du procédé DSA pour application de type dédoublement de contacts. Après un bref rappel de la motivation de cette étude, nous présentons la méthodologie de détermination des fenêtres de procédés puis les résultats obtenus en DSA avec des guides elliptiques pour différents procédés et différents copolymères à blocs. Nous abordons ensuite une autre stratégie mise en place pour le dédoublement de contacts qui est fait à partir de guides de forme complexe (en forme d'arachide dite « peanut ») qui permettent d'adresser des pitches DSA plus grand que la période intrinsèque des copolymères utilisés.

Afin de conclure, un bilan des performances DSA obtenues suite à ces travaux de thèse est dressé et des perspectives d'amélioration du procédé à explorer sont proposées.

# Chapitre I- Etat de l'art

---

Ce chapitre retrace succinctement l'essor de la micro-électronique, depuis l'invention du transistor et du circuit imprimé, jusqu'aux enjeux liés à la miniaturisation des puces électroniques. Pour ce faire, les différentes techniques de lithographie sont explicitées et en particulier l'auto-assemblage dirigé des copolymères à blocs (DSA), méthode de lithographie émergente prometteuse pour les futurs nœuds technologiques. L'exposé se termine sur les applications concrètes de cette technique tout en évoquant les défis technologiques qu'il reste à relever pour que le DSA soit industrialisé à grande échelle. Le sujet de thèse dans le contexte est également présenté en fin de chapitre.

---



<b>CHAPITRE I- ETAT DE L'ART .....</b>	<b>3</b>
I.1 CONTEXTE GENERAL DE LA MICRO-ELECTRONIQUE .....	7
I.2 LA LITHOGRAPHIE EN MICRO-ELECTRONIQUE .....	9
<i>I2.1 La photolithographie (ou lithographie optique) .....</i>	<i>9</i>
I21.A Principe de la lithographie optique .....	9
I21.B Repousser les limites de la lithographie 193nm .....	10
I21.C Extension de la lithographie à immersion .....	10
<i>I2.2 Les techniques de lithographie émergentes .....</i>	<i>13</i>
I22.A La lithographie extrême UV « EUV » .....	13
I22.B La lithographie électronique « e-beam » multi-faisceaux.....	14
I22.C La nano-impression.....	15
I22.D L'auto-assemblage dirigé des copolymères à blocs .....	16
<i>I2.3 Bilan .....</i>	<i>17</i>
I.3 L' AUTO-ASSEMBLAGE DIRIGE DES COPOLYMERES A BLOCS.....	19
<i>I3.1 Le copolymère .....</i>	<i>19</i>
I31.A Les différentes architectures .....	19
I31.B Les morphologies du copolymère à blocs .....	20
<i>I3.2 Les nano-domaines pour la lithographie .....</i>	<i>21</i>
I32.A Organisation en surface libre .....	21
I32.B La résolution des copolymères .....	24
<i>I3.3 Diriger l'auto-assemblage en deux approches .....</i>	<i>26</i>
I33.A Organisation dirigée en chémo-épitaxie .....	26
I33.B Organisation dirigée en graphoépitaxie .....	27
I.4 LE DSA POUR LE CMOS AVANCE.....	28
<i>I4.1 Les applications type ligne/espace .....</i>	<i>29</i>
<i>I4.2 Les applications type contact .....</i>	<i>31</i>
<i>I4.3 Avantages et contraintes du DSA .....</i>	<i>32</i>
I.5 LE SUJET DE LA THESE EN CONTEXTE .....	35
I.6 CONCLUSION.....	38
BIBLIOGRAPHIE.....	39



## I.1 Contexte général de la micro-électronique

Informatique, automobile, spatial, médical : autant de domaines dont la liste n'est pas exhaustive, qui ont pu bénéficier de l'essor de la micro-électronique pour réaliser des progrès. Au commencement, le transistor : nous devons sa conception en 1947 à trois chercheurs des Laboratoires Bell (John Bardeen, William Shockley et Walter Brattain) qui recevront le prix Nobel de physique 9 ans plus tard pour cette découverte. Le transistor (contraction de « **transfer resistor** », résistance de transfert en français) est un dispositif semi-conducteur permettant de moduler le courant à travers deux électrodes (drain et source) via une électrode centrale (la grille) (cf. figure I-1), à l'instar d'une vanne dans un circuit hydraulique. Plus compact, moins cher et plus solide, il remplace alors le tube électronique de l'époque.

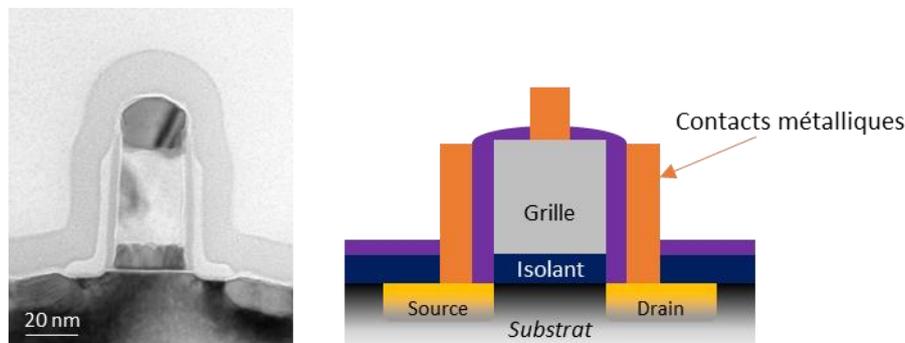


Figure I-1 : Image SEM en vue transverse d'un transistor du nœud technologique 32nm (Panasonic) ainsi qu'un schéma en coupe de l'implantation des contacts métalliques dans un transistor (inspiré de [Solid State Technology 2011]).

Lorsqu'ils sont mis ensemble dans un circuit, les transistors forment de nombreuses fonctions logiques, indispensables au codage et à la transmission de l'information. Cependant, il a fallu attendre l'invention du premier circuit intégré par Jack Kilby en 1958 (prix Nobel de physique en 2000) pour le compte de Texas Instruments pour marquer le commencement de la fabrication des puces électroniques sur silicium à l'échelle industrielle.

Dans une logique de rentabilité, une course à la miniaturisation se met progressivement en place. Gordon Moore, co-fondateur d'Intel, prédit en 1965 le doublement du nombre de transistors dans les micro-processeurs tous les 18 mois, à coût constant. Connue sous le nom de « loi de Moore », cette loi empirique commence à ne plus être vraiment valable car nous arrivons aux limites de la technologie et de fonctionnement du transistor tel que nous le connaissons aujourd'hui. Cependant, elle a servi de ligne directrice au développement de la micro-électronique et est formalisée sous forme de diverses recommandations et attentes futures : l'ITRS (*International Technology Roadmap for Semiconductors*) fait office, jusqu'en 2015, de guide pour les industriels en lice.

Celui-ci est fait sous forme de feuilles de route qui constituent un ensemble d'objectifs à atteindre et un point de comparaison pour les industriels [Neisser 2015] [ITRS 2015]. Depuis, cet organisme connaît une refonte afin de mieux répondre aux besoins de l'industrie. Son but est d'organiser le cahier des charges en sept thématiques : intégration des systèmes, technologies sans fil, intégration hétérogène (par exemple les caméras), composants hétérogènes (comme les MEMS), au-delà du CMOS (spintronique entre autres), intégration pour la production de masse (nouveaux outils et procédés) et « more moore » (réduire les dimensions du CMOS) [Von Trapp 2015].

Au fil des avancées technologiques, la densité de transistors par circuit augmente et la plus petite dimension atteignable sur le circuit diminue. Dans les micro-processeurs d'Intel, les dimensions minimales passent de 10  $\mu\text{m}$  en 1971 à 14 nm en 2016 avec l'« Intel Core Skylake » [Intel 2017]. Ceci a permis d'augmenter la densité de puces par plaque de silicium et donc de diminuer le coût de production et d'améliorer les performances électriques du système (moins d'espace entre les transistors donc moins de pertes par résistance mais aussi une transmission de l'information plus rapide).

Pour diminuer les dimensions, les procédés technologiques ont évolué selon deux voies : l'approche descendante (« top-down ») et l'approche ascendante (« bottom-up »).

L'approche descendante dite « top-down » (*du haut vers le bas*) consiste à transférer et démultiplier à plus petite échelle une information contenue dans un masque sur une plaque. Cela permet une production de masse rapide mais une perte d'information est malheureusement inévitable lors de la réduction des dimensions. C'est la méthode utilisée aujourd'hui dans les usines de production puisque c'est celle qui a été mise en place historiquement. Cette technique présente l'avantage de l'ancienneté : les matériaux sont bien connus et les procédés bien maîtrisés. Cependant, les dimensions atteignables sont limitées par l'avancée technologique faite sur les procédés.

La technologie ascendante dite « bottom-up » (*du bas vers le haut*) repose sur les propriétés chimiques des molécules qui leur permettent de s'auto-assembler, faisant apparaître l'information utile à la fabrication des composants. La création des motifs se fait simultanément sur toute la plaque (écriture parallèle), ce qui fait de l'auto-assemblage une technique plus rentable que le « top-down » où l'écriture se fait puce par puce. Cette méthode permet d'adresser des dimensions très agressives, de l'ordre de la taille des molécules. Il reste cependant à augmenter la complexité des motifs réalisables afin que le « bottom-up » puisse répondre aux demandes futures de la microélectronique.

Dans la suite de ce chapitre, nous allons décrire les différentes techniques de lithographie conventionnelle ainsi que les lithographies émergentes. Enfin, nous nous concentrerons sur l'auto-assemblage dirigé des copolymères à blocs, technique de lithographie émergente, qui permet de combiner les approches « top-down » et « bottom-up ».

## I.2 La lithographie en micro-électronique

La lithographie permet d'imprimer un motif dans un polymère (ou résine) à partir d'un masque ou d'un dessin électronique. Les motifs vont être transférés dans la couche inférieure par gravure. Ensemble, la lithographie et la gravure constituent des étapes technologiques clés dans la réalisation de composants à base de semi-conducteur puisqu'elles vont déterminer les dimensions et le pas de répétition des motifs et donc leur limitation. Elles représentent à elles-deux entre 30 et 40% du coût de fabrication des puces électroniques.

### I2.1 La photolithographie (ou lithographie optique)

#### I21.A Principe de la lithographie optique

La première méthode d'impression des motifs sur plaque développée en microélectronique est la lithographie optique et ce, au début des années 1960. Le principe est analogue à celui d'un pochoir : une source lumineuse d'une certaine longueur d'onde va insoler une résine à travers un masque sur lequel les motifs à imprimer ont été dessinés. Ce masque présente des zones claires que la lumière va traverser et des zones sombres qui empêchent le passage de l'onde lumineuse. La résine photosensible déposée sur la plaque de silicium va changer de solubilité avec la dose lumineuse localement reçue, créant ainsi un contraste chimique à la surface (cf. figure I-2). Ce type de système permet de réduire jusqu'à quatre fois la taille des motifs du masque.

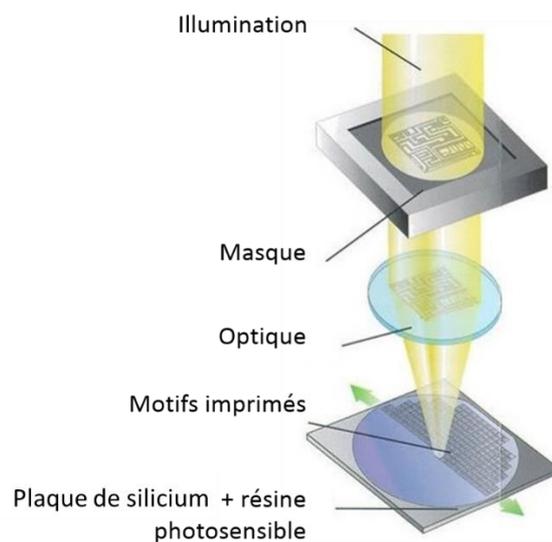


Figure I-2 : Schéma de principe de la lithographie optique.

### I21.B Repousser les limites de la lithographie 193 nm

La lithographie optique utilisant une source lumineuse à une longueur d'onde de 193 nm permet de résoudre des dimensions jusqu'à environ 100 nm. Cette résolution minimale est appelée « dimension critique » (CD), et est donnée par le critère de Rayleigh (cf. équation I-1).

$$CD = \frac{k_1 \cdot \lambda}{NA} \text{ avec } NA = n \cdot \sin\theta$$

Équation I-1 : Critère de Rayleigh.

Où :

- CD : Dimension critique (nm)
- $k_1$  : Paramètre lié aux propriétés de la résine et aux éléments optiques ( $\emptyset$ )
- $\lambda$  : Longueur d'onde de la source lumineuse servant à l'insolation (nm)
- NA : Ouverture numérique (*en anglais : numerical aperture*) du système optique ( $\emptyset$ )
- n : Indice optique du milieu dans lequel se propage la lumière ( $\emptyset$ )
- $\theta$  : Demi-angle d'ouverture de la source lumineuse (rad)

Afin d'atteindre des dimensions critiques de plus en plus petites, les paramètres qui composent ce critère de Rayleigh doivent être optimisés. Les technologues ont commencé par réduire la longueur d'onde de la source optique utilisée. Ainsi, les industriels sont passés de la technologie 436 nm dans les années 1980 aux UV profonds (« *Deep UV* » ou « DUV »), soit  $\lambda=193$  nm, à la fin des années 2000. Pour aller au-delà du nœud technologique 32 nm, les dimensions critiques devaient encore être diminuées. Avant de développer une nouvelle lithographie autour d'une longueur d'onde plus petite que 193 nm, les efforts ont d'abord été concentrés sur l'augmentation de l'ouverture numérique. Celle-ci a été améliorée en modifiant l'indice du milieu entre la lentille de projection et le substrat (en remplaçant l'air par l'eau par exemple) : cette technologie, appelée « **lithographie 193nm à immersion** » (ou 193i), est utilisée actuellement à STMicroelectronics pour la fabrication des circuits CMOS avancés, et en général dans l'industrie micro-électronique [Lin 2004].

### I21.C Extension de la lithographie à immersion

Pour diminuer encore les dimensions et augmenter la densité des motifs tout en utilisant la lithographie 193i, l'industrie a développé un procédé technologique appelé « **Self-Aligned Double Patterning** » (ou SADP), qui pourrait se traduire par « procédé de structuration auto-aligné par division de pas ». Cette technique permet, à partir d'une simple exposition, de doubler le nombre de motifs imprimés et de réduire le pas de répétition de ces derniers en utilisant des espaceurs (*spacers* en anglais). Pour ce faire, une couche de matériau sacrificiel (espaceur) est déposée sur une résine structurée (mandrin). La résine est ensuite enlevée sélectivement au matériau « espaceur »,

révélant un masque dur dont les dimensions sont plus agressives. Le transfert de ces nouveaux motifs dans les couches sous-jacentes peut ensuite se faire par gravure (cf. figure I-3). Ces étapes peuvent être répétées afin de subdiviser davantage les motifs fins mais le contrôle du procédé est à chaque fois plus critique. On parlera ainsi de « quadruple patterning » ou SAQP (répété 2 fois) et de « octuple patterning » ou SOQP (répété 4 fois).

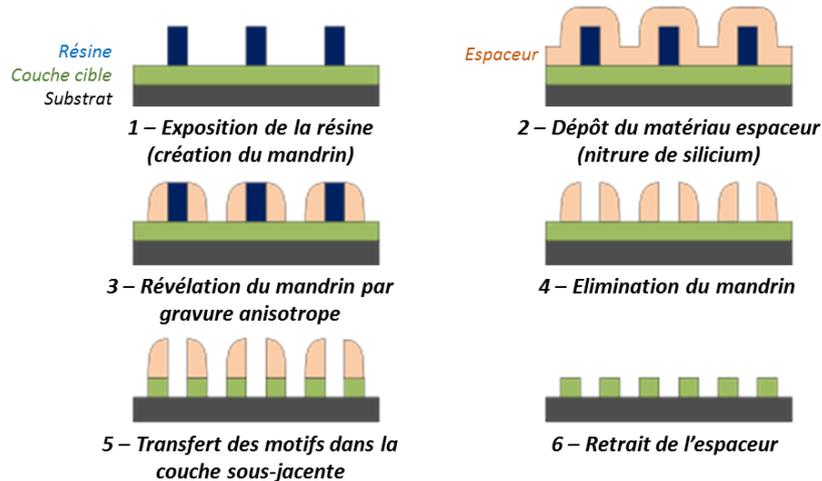


Figure I-3 : Principe de la lithographie « Self-Aligned Double Patterning » avec l'utilisation d'espacesurs (inspiré de [“Mehrfachstrukturierung” 2016]).

Le « multiple patterning » (ou « lithographie à impressions multiples ») permet par expositions successives de reproduire le motif du masque plusieurs fois, réduisant ainsi fortement la période des motifs (appelé aussi *pitch*) (cf. figure I-4). Il peut également s'agir d'un motif complexe subdivisé en plusieurs motifs simples, chacun présent sur un masque. L'utilisation des masques de manière successive permet de reconstituer le motif complexe d'origine (cf. figure I-5). Le « multiple patterning » présente l'avantage certain d'utiliser les machines de lithographie actuellement en production tout en atteignant des dimensions critiques plus agressives. Cependant, cette méthode multiplie le nombre de masques et d'étapes nécessaires à l'impression des motifs sur le substrat, augmentant ainsi le coût total de production des puces. De plus, l'alignement des impressions, assurant un bon placement des motifs, est particulièrement délicat à maîtriser puisqu'un désalignement entre les masques peut engendrer des défauts de fonctionnement des circuits intégrés. Afin de palier à ces limitations, des techniques de lithographie nouvelles ont vu le jour. Ces dernières sont présentées plus en détail dans les paragraphes suivants.

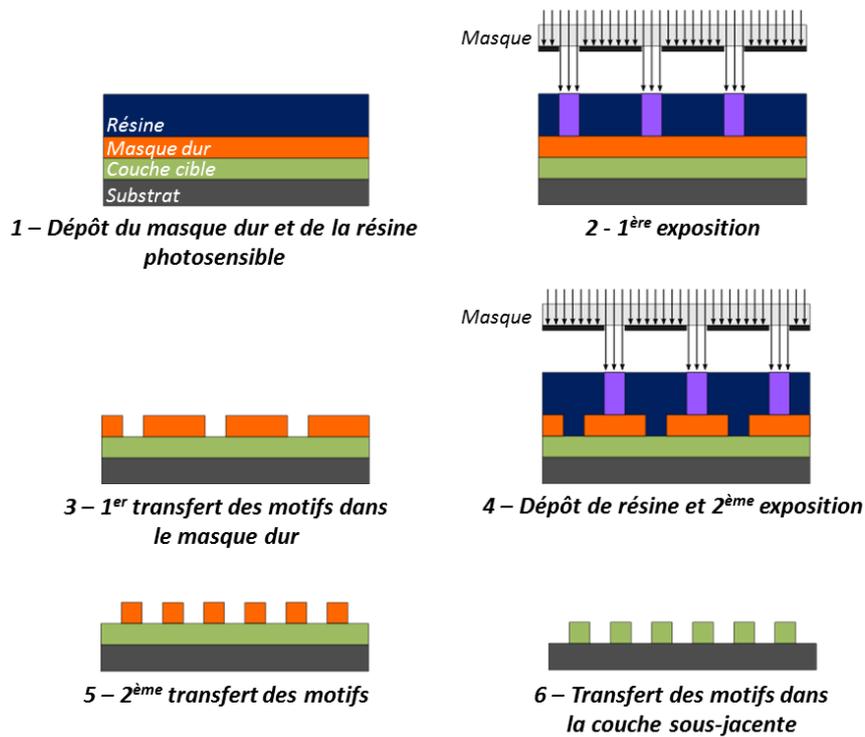


Figure I-4 : Principe de la lithographie « multiple patterning » par double exposition (inspiré de [“Mehrfachstrukturierung” 2016]).

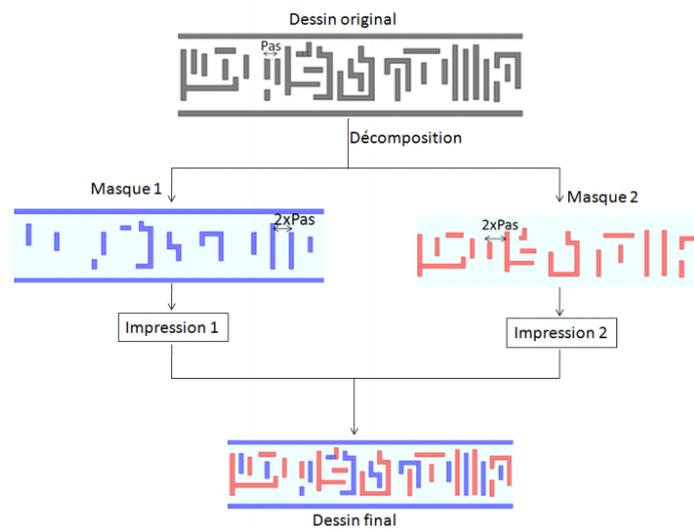


Figure I-5 : Principe de la technique de double impression ([Zeggaoui 2011]).

## I2.2 Les techniques de lithographie émergentes

D'autres approches de lithographie ont été développées pour remplacer ou compléter la lithographie conventionnelle, repoussant ainsi ses limitations. Ces techniques semblent être prometteuses pour réduire davantage le CD et le pitch des circuits intégrés à réaliser. Parmi elles seront présentées succinctement la lithographie extrême UV (EUV), la lithographie électronique (e-beam), la nano-impression (NIL) et l'auto-assemblage dirigé des copolymères à blocs (DSA).

### I2.2.A La lithographie extrême UV « EUV »

La lithographie optique à immersion atteignant ses limites, les industriels ont dû choisir entre deux stratégies de développement pour adresser les nœuds technologiques plus agressifs.

La première se base sur l'utilisation de la technologie 157 nm, suite logique du 193 nm mais solution temporaire puisqu'elle ne permet pas de répondre aux besoins des nœuds technologiques en dessous du 22 nm. De plus, l'incompatibilité des résines utilisées pour les lithographies 248 nm et 193 nm avec la longueur d'onde 157 nm constitue un point bloquant au développement de cette technologie. A cette longueur d'onde, les résines sont absorbantes, ce qui signifie que seule une faible épaisseur de résine en surface de la plaque de silicium est insolée lors de l'étape de lithographie. Ainsi, l'épaisseur maximale du dépôt est limitée, ceci pouvant conduire à des motifs ne débouchant pas sur la couche inférieure et donc des défauts lors du transfert par gravure [Bates 2001].

La deuxième stratégie est celle d'investir dans la recherche de sources optiques émettant à une longueur d'onde de 13.4 nm. Le développement de cette technologie dite « **extrême UV** » (EUV) permet d'avoir des sources dont la longueur d'onde est bien en-dessous du nœud technologique visé, rendant la fenêtre de procédé lithographique plus confortable [Mojarad 2015]. Il reste cependant plusieurs verrous technologiques à lever. Les sources lumineuses à cette longueur d'onde ont une puissance maximale d'environ 40 W, ce qui ne permet pas de tenir la cadence de production de la lithographie conventionnelle. En effet, les sources EUV actuellement utilisées en recherche et développement permettent de produire environ 50 à 100 plaques par heure, là où la lithographie 193i en produit 200 dans le même temps. Les masques sont également très coûteux puisque les motifs qui les composent doivent être imprimés avec un CD de l'ordre de 50 nm. A ce besoin de précision se rajoute une défektivité qui doit être d'environ 0.34 défauts par masque, alors qu'actuellement ce taux est plutôt autour de 40 à 50 défauts par masque [Wu 2014].

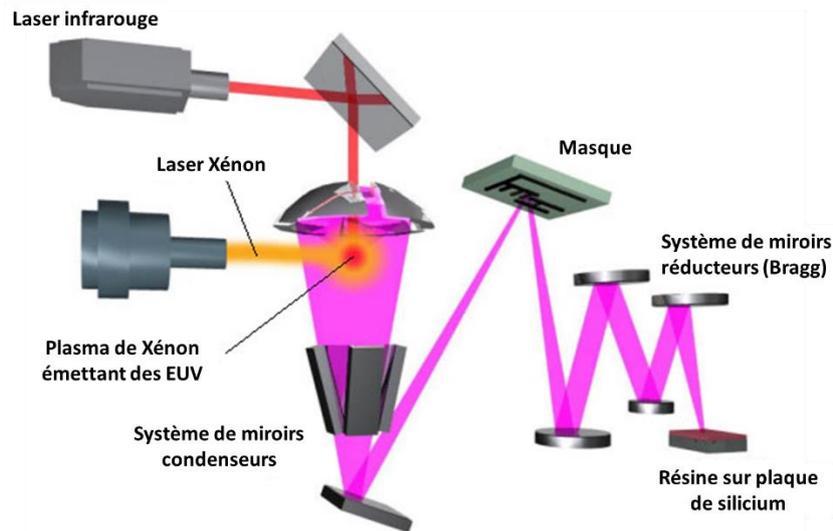


Figure I-6 : Schéma d'un dispositif de lithographie EUV ([Barrett Research Group 2017]).

A une longueur d'onde de 13.4 nm, l'énergie est absorbée par l'air ambiant ainsi que par certains matériaux des optiques composant les dispositifs de lithographie conventionnelle. Il est donc nécessaire de travailler sous ultravide avec un système optique non plus en transmission mais en réflexion (environ 4 à 6 miroirs de Bragg dits « réducteurs ») (cf. figure I-6). Cela en fait une technologie plus complexe que la lithographie 193i : aucun équipement de lithographie EUV est actuellement utilisé pour la production de masse.

## I22.B La lithographie électronique « e-beam » multi-faisceaux

Cette méthode présente la particularité de ne pas nécessiter de masque. Pour transférer un motif sur un substrat, un faisceau d'électrons accélérés balaie la plaque sur laquelle une résine électrosensible a été préalablement déposée : il s'agit donc d'une écriture directe. La **lithographie électronique « e-beam »** présente l'avantage d'être très fortement résolue car la limite de résolution est définie essentiellement par le diamètre du faisceau (pouvant atteindre quelques nanomètres pour les faisceaux gaussiens) (cf. figure I-7). De plus, les motifs à transférer ne dépendant plus d'un masque, cette méthode agrandit les possibilités géométriques des dessins. Elle reste cependant lente et donc de moindre rendement face aux technologies comme la lithographie optique à immersion.

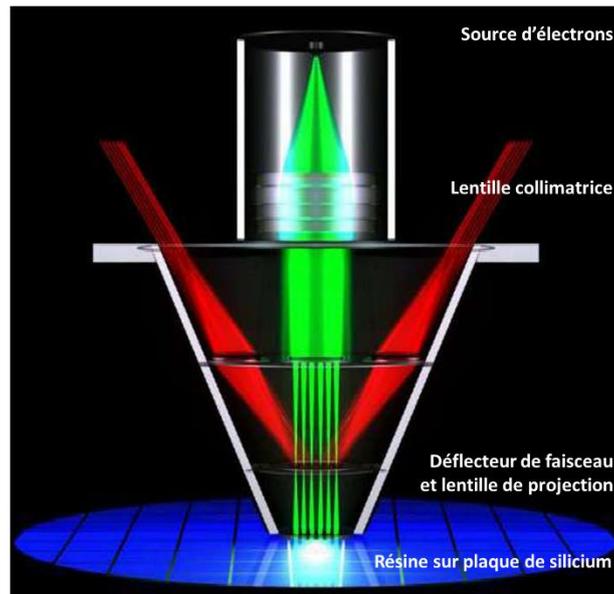


Figure I-7 : Principe de la lithographie multi faisceaux e-beam ([Slot 2008]).

Le système de division de faisceau permet de paralléliser l'écriture simultanée et ainsi d'augmenter nettement le rendement de production. C'est l'approche développée par la société Mapper par exemple [Slot 2008]. Il reste cependant difficile de contrôler correctement tous les sous-faisceaux afin qu'ils aient le même angle et la même puissance.

### I22.C La nano-impression

La **lithographie par nano-impression** (NIL pour *Nano-Imprint Lithography*) est une technologie où le transfert de motif se fait non pas par contraste chimique mais par contraste topographique. Le motif est imprimé en trois dimensions à l'aide d'un moule qui est en contact direct avec la résine. Deux approches se déclinent :

- la **nano-impression thermique** [Chou 1995] (cf. figure I-8 (a)) : la résine et le moule sont chauffés à une température supérieure à la température de transition vitreuse de la résine (notée  $T_g$ ). Le moule est ensuite pressé sur la résine ramollie. La séparation du moule et du substrat se fait à une température plus basse que la température  $T_g$  de la résine afin que cette dernière soit rigide et que les motifs imprimés ne soient pas détériorés.
- la **nano-impression assistée par UV** [Haisma 1996] (cf. figure I-8 (b)) : une résine fluide et photosensible est déposée sur le substrat. Le moule, transparent au rayonnement ultraviolet, est pressé contre la résine. Une insolation UV du moule va permettre de photopolymériser la résine et ainsi la durcir. Le retrait du masque permet de révéler les motifs.

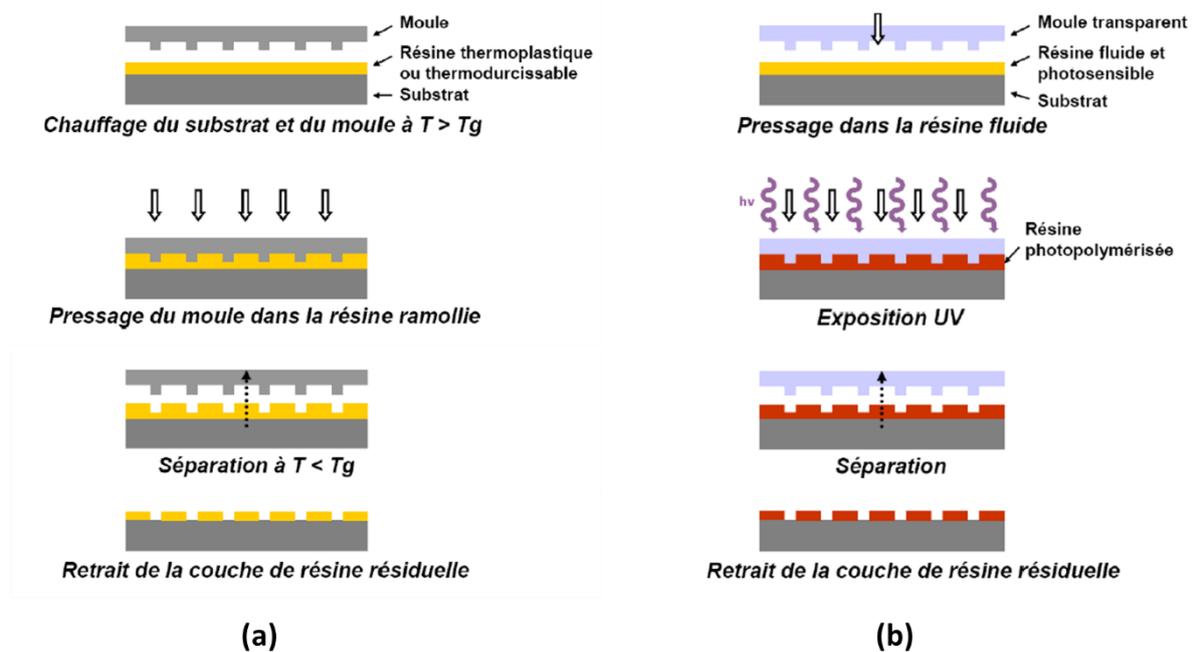


Figure I-8 : Principe de la nano-impression thermique (a) et assistée par UV (b) ([Voisin 2007]).

La lithographie par nano-impression permet d'obtenir des motifs nanométriques sur de grande surface en une seule étape. Les tampons servant à la fabrication des moules sont entre autres fabriqués par « e-beam » qui est une technique coûteuse. Cependant, ces tampons sont réutilisables plusieurs fois ce qui en amorti le coût. Ils doivent néanmoins être améliorés pour résister davantage aux changements thermiques et mécaniques qu'ils subissent lors du procédé. De ce fait, ils ont une durée de vie souvent limitée. Il est à noter que le taux de défauts avoisinant 0.1 défaut/cm<sup>2</sup> est trop élevé pour une application de type CMOS qui requière au maximum 0.001 défaut/cm<sup>2</sup> [Khusnatdinov 2014]. Le désalignement entre les différents niveaux de motifs (*overlay*) est aussi un point limitant de la nano-impression. Une dizaine de nanomètres de désalignement entre niveaux a été mesurée à travers une plaque de silicium dans le meilleur des cas [Higashiki 2011].

## I22.D L'auto-assemblage dirigé des copolymères à blocs

La lithographie par auto-assemblage dirigé des copolymères à blocs (DSA de l'anglais *Directed Self-Assembly*) est une technologie très prometteuse pour les nœuds technologiques sub-20 nm. L'ITRS l'a citée à titre de solution potentielle sérieuse pour la lithographie en industrie micro-électronique dans les années à venir [Neisser 2015]. Ces dernières années, elle a fait l'objet de nombreuses recherches et publications (cf. figure I-9).

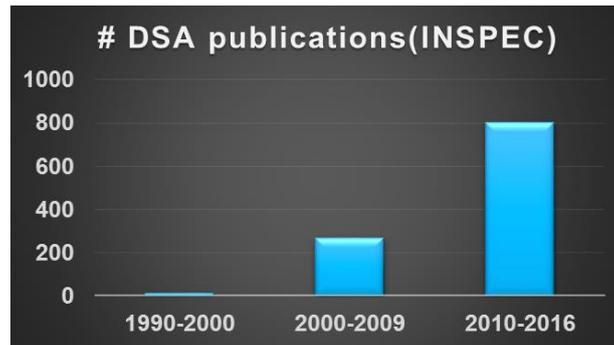


Figure I-9 : Nombre de publications scientifiques autour du DSA ([Sarma 2016] ).

Le DSA est une technique basée sur la capacité de copolymères à blocs à s'auto-assembler en nano-domaines de différentes structures (lamellaire, cylindriques, sphériques...) pour réaliser des motifs de différents types (lignes, contacts) de taille nanométrique. Le procédé DSA est simple, peu coûteux et compatible avec la technologie CMOS tant que certaines conditions sont respectées comme le contrôle de l'alignement et la défektivité. Cette technique de lithographie, qui fait l'objet de cette thèse, sera développée plus précisément au cours de ce manuscrit.

### I2.3 Bilan

Le tableau ci-après résume les avantages et inconvénients par rapport à la lithographie conventionnelle des différentes méthodes de lithographies utilisées dans l'industrie de la micro-électronique (cf. [tableau I-1](#)).

Nom de la technique	Principe	Avantages	Inconvénients
<b>Lithographie à immersion</b>	Lithographie 193 nm + modification de l'indice du milieu (eau)	CD plus petits (CD≈50 nm) par rapport à la lithographie sans immersion (CD≈110 nm)	Limitée en résolution
<b>SAQP</b>	Utilisation d'une couche sacrificielle (espaceur)	Diminution du pas de répétition du motif (pitch)	Augmentation du nombre d'étapes de fabrication
<b>Lithographie « multiple patterning »</b>	Insolations successives ou couche sacrificielle	Diminution du pas de répétition du motif (pitch)	Augmentation du nombre de masque et du nombre d'étapes
<b>EUV</b>	13.5 nm + masque et miroirs (réflexion)	CD plus petits (CD≤32 nm) par rapport à la lithographie 193i (CD≈50 nm)	Augmentation du nombre de défauts et de la rugosité de la résine Puissance nécessaire plus grande Peu de résine compatible
<b>Lithographie « e-beam »</b>	Ecriture directe avec faisceau d'électrons	Très bonne résolution (quelques nanomètres) Pas besoin de masque	Très lente mais améliorée avec multi-faisceaux
<b>Nano-implosion</b>	Moule avec motif 3D sur résine + traitement thermique ou UV	Ordre à grande échelle Peu cher car peu d'étapes et masques réutilisables	Méthode trop peu mature Trop grand nombre de défauts
<b>DSA</b>	Lithographie conventionnelle pour les guides + copolymères à blocs et traitements thermiques	CD et pitch plus petits (CD ≈15-20 nm et pitch≈35 nm) Peu cher car utilise la lithographie conventionnelle Procédé rapide et peu coûteux	Trop grand nombre de défauts CD et pitch dépendants du copolymère impliquant des contraintes sur les règles de dessin électronique

Tableau I-1 : Tableau récapitulatif des différentes méthodes de lithographies existantes ainsi que leurs avantages et inconvénients.

## I.3 L'auto-assemblage dirigé des copolymères à blocs

L'auto-assemblage dirigé (DSA) des copolymères à blocs présente l'avantage d'utiliser à la fois des matériaux bas coût ayant pour propriétés de s'auto-assembler en nano-domaines et les outils de la lithographie conventionnelle actuellement utilisés en production. Cette section détaillera les caractéristiques et propriétés des copolymères à blocs ainsi que les approches mises en place pour diriger l'auto-organisation de ces matériaux.

### I3.1 Le copolymère

#### I3.1.A Les différentes architectures

Un polymère dans sa définition la plus simple est une macromolécule composée d'une succession de plus petites entités appelées monomères, unies par des liaisons covalentes. Lorsque le polymère est composé d'au moins deux monomères différents (nommés ici A et B), il est appelé copolymère. Lorsque le séquençage des blocs est linéaire, la chaîne de polymère ne présente pas de ramification et la configuration du copolymère est donnée par la répartition des blocs le long de cette chaîne. S'il existe une alternance périodique ou aléatoire de monomères dans la chaîne, le copolymère a une structure dite homogène. En particulier, la chaîne d'un copolymère statistique est composée d'une succession aléatoire de monomères A et B dont la répartition finale suit une loi statistique de Bernouilli. Les propriétés finales du copolymère sont la résultante moyenne des propriétés des monomères pris de manière individuelle [Maiez-Tribut 2007].

Dans le cas du copolymère à blocs, les chaînes sont constituées de deux blocs distincts, chacun étant composé d'un seul type de monomère. Il s'agit donc de deux homopolymères liés entre eux par une liaison covalente : la structure est dite hétérogène (cf. figure I-10).

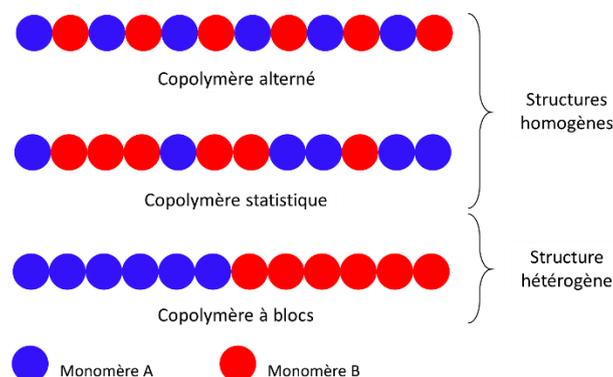


Figure I-10 : Représentation schématique des différentes configurations de copolymères linéaires.

Il existe également des systèmes aux architectures plus complexes (étoile, triangle...) à 3 ou 4 blocs qui présentent l'avantage de s'auto-assembler pour réaliser des structures plus variées [Hadjichristidis 2005][Park 2003].

### I31.B Les morphologies du copolymère à blocs

Le potentiel du copolymère à blocs pour la lithographie réside dans la structure hétérogène de la chaîne de polymère, combinée à l'immiscibilité des deux homopolymères qui la constitue. En effet, lors d'un mélange en solution de deux homopolymères non miscibles, il se produit une macro-séparation de phase, à l'instar de l'eau et de l'huile. Dans le cas du copolymère dibloc, les deux homopolymères sont liés entre eux par une liaison covalente, limitant ainsi la séparation de phase en nano-domaines lorsqu'elle a lieu.

Cette micro-séparation de phases est gouvernée par le produit  $\chi N$  qui est l'énergie d'incompatibilité thermodynamique. Ce produit est propre à chaque copolymère. Le paramètre de Flory-Huggins, noté  $\chi_{AB}$ , est le degré de miscibilité des deux blocs du copolymère [Flory 1953]. Il est inversement proportionnel à la température. A une température donnée, plus  $\chi_{AB}$  est grand, plus la répulsion entre les blocs A et B est grande. Le nombre de monomères dans la chaîne de polymère est noté N. En dessous d'une valeur théorique de  $\chi N = 10.5$ , la limite ordre-désordre est atteinte [Leibler 1980]. Cela signifie que les deux homopolymères ne sont pas assez incompatibles et/ou que les chaînes sont trop courtes pour que la micro-séparation de phases se produise. Pour  $\chi N < 10.5$ , la morphologie est désordonnée.

Pour un copolymère à  $\chi N \geq 10.5$ , la morphologie des nano-domaine dépend de la fraction volumique des deux blocs A et B (notée respectivement  $f_A$  et  $f_B$ ), elle-même dépendante du nombre de monomère composant la chaîne de polymère (cf. équation I-2).

$$f_A = \frac{N_A}{N_A + N_B}$$

$$f_A + f_B = 1$$

Équation I-2 : Lien entre fraction volumique et nombre de monomères de la chaîne.

Où :

$f_A, f_B$  : Fraction volumique ( $\emptyset$ )

$N_A, N_B$  : Nombre de monomères composant la chaîne de copolymère ( $\emptyset$ )

Quand  $f_A = f_B$ , le polymère est symétrique et a une morphologie dite lamellaire. Elle est composée d'une alternance de phases A et B de volume identique. Pour d'autres fractions volumiques, de nouvelles morphologies sont atteintes : sphérique, cylindrique et gyroïde (cf. figure I-11).

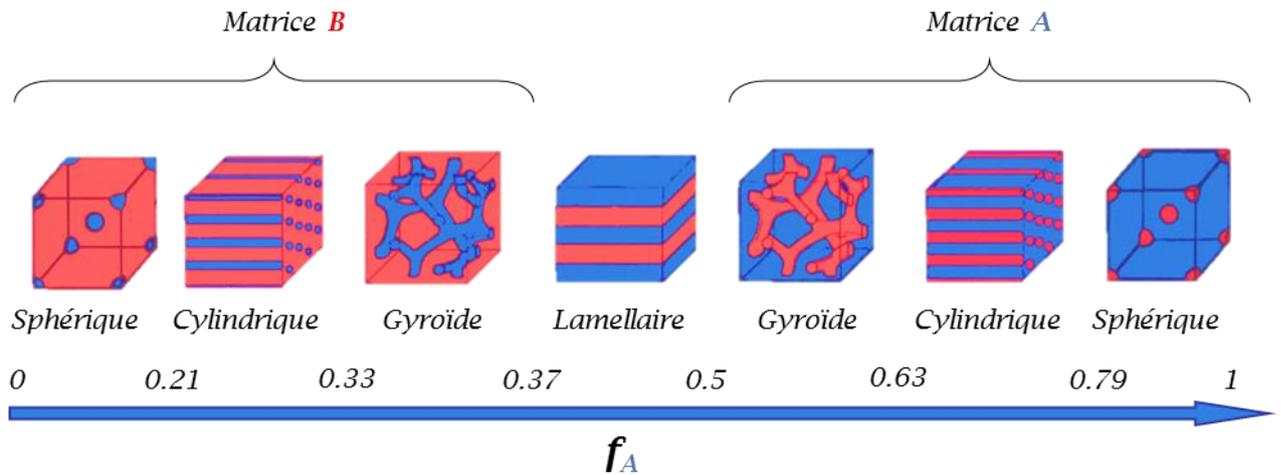


Figure I-11 : Différentes morphologies accessibles des copolymères à blocs en fonction de la proportion du bloc A (inspiré de [Bates 1999] et [Park 2003]).

Les copolymères à blocs ne sont pas systématiquement synthétisés purs. La présence d'homopolymères rentrant dans la composition du copolymère a une influence sur la qualité de l'assemblage. De même, d'un mélange de copolymères de période différente mais de nature identique va résulter un copolymère dit « blend » dont les propriétés seront la combinaison de celles composant le mélange [Chevalier 2014].

## I3.2 Les nano-domaines pour la lithographie

Afin de l'utiliser comme résine pour la lithographie, le copolymère à blocs doit être structuré en film mince. En micro-électronique, le support va être la plaque de silicium dont la surface a pu être ou non structurée, modifiée ou recouverte d'un empilement technologique particulier. En pratique, ce sont surtout les morphologies cylindrique et lamellaire qui vont nous intéresser pour des applications lithographiques. En effet, dans l'approche classique, il est nécessaire de transférer les motifs créés par DSA dans les couches inférieures.

### I32.A Organisation en surface libre

Quand il est déposé en film mince sur plaque de silicium non structuré, nous parlons d'auto-organisation du copolymère à blocs en « surface libre ». L'orientation des nano-domaines dépend de l'épaisseur du film mais également des énergies d'interfaces polymère/substrat et air/polymère.

Souvent, le matériau déposé sur le substrat, qui est donc en contact direct avec le polymère, a une énergie de surface différente pour les deux blocs. Ceci a pour conséquence d'attirer préférentiellement un bloc par rapport à l'autre. La surface est dite « affine » avec le bloc en

question. Dans le cas du copolymère poly(styrène-*bloc*-méthacrylate de méthyle) noté PS-*b*-PMMA, le bloc PMMA est hydrophile alors que le bloc PS est plus hydrophobe car il possède une énergie de surface plus faible. Ainsi, lorsque le PS-*b*-PMMA lamellaire est déposé sur une couche d'oxyde de silicium, plutôt hydrophile, les lamelles seront orientées parallèlement au substrat, avec une couche de mouillage de PMMA sur l'oxyde et une couche de PS à l'interface avec l'air [Kim 2010]. Pour le poly(styrène-*bloc*-diméthylsiloxane) noté PS-*b*-PDMS, le bloc PDMS a une énergie de surface plus faible que le PS (19.9 mN/m contre 40.7 mN/m). Le PDMS forme donc une couche dit de « démouillage » à l'interface air/polymère [Jung 2007].

L'orientation des phases par rapport au substrat est également régie par la différence entre l'épaisseur du film de copolymères et l'espacement entre deux nano-domaines répétitifs appelé « période intrinsèque » du polymère et noté  $L_0$ . Elle varie selon la morphologie du copolymère considéré.

**Polymère lamellaire :** les deux blocs sont présents en proportion égale dans le copolymère.

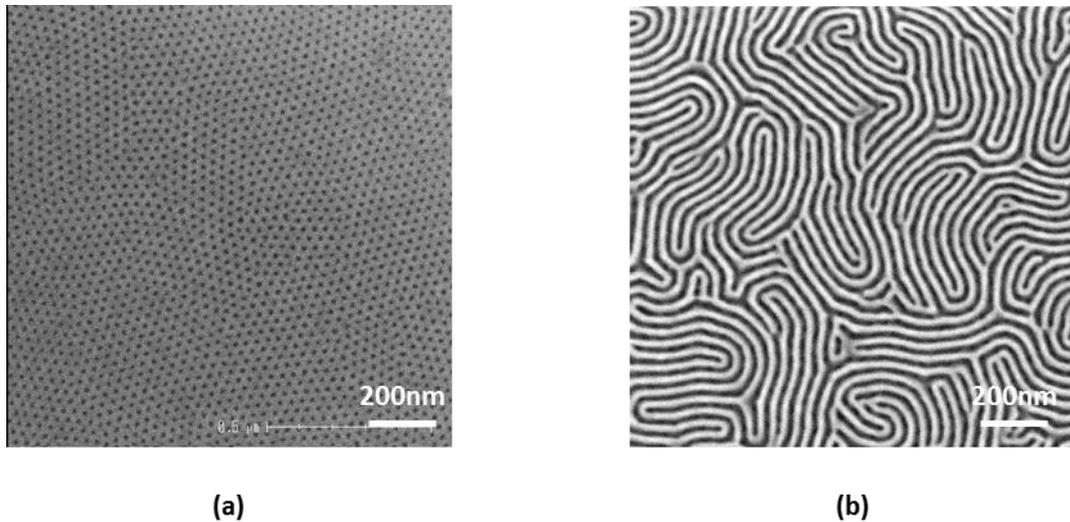
- Dans le cas où un seul des blocs a une affinité préférentielle avec l'air ou le substrat, ou les deux, et que l'épaisseur du film est supérieure à  $L_0$ , une orientation des domaines parallèlement au substrat est observée. Si l'interaction est symétrique (un bloc à la même affinité avec le substrat et l'air), l'épaisseur totale sera un multiple de  $L_0$ . En cas d'interaction asymétrique (affinité d'un bloc avec le substrat et l'autre avec l'air), l'épaisseur sera égale à  $(n+1/2)L_0$  [Kim 2010].  
Quand l'épaisseur du film est inférieure à  $L_0$ , l'orientation des domaines est préférentiellement perpendiculaire au substrat (configuration la moins coûteuse en énergie), bien que les domaines puissent être ponctuellement parallèles à ce dernier [Walton 1994].
- Si aucun des blocs ne présente une affinité particulière avec la surface et/ou l'air, l'interface est dite « neutre ». Les nano-domaines sont orientés perpendiculairement au substrat quelle que soit l'épaisseur du film.

**Polymère cylindrique :** dans la morphologie cylindrique, un des deux blocs est majoritaire dans le copolymère à blocs.

- Comme pour la morphologie lamellaire, lorsque le film a une épaisseur supérieure à  $L_0$ , les cylindres formés par le bloc minoritaire sont couchés (parallèles au substrat) [Van Dijk 1995]. Une couche de démouillage peut se former si le bloc minoritaire a une affinité plus grande avec l'air que l'autre bloc.
- Si les deux constituants du copolymère ont la même affinité avec l'air, des demi-cylindres couchés se forment à l'interface air/polymère.
- Lorsque l'épaisseur de polymère est de l'ordre de  $L_0$ , les cylindres sont perpendiculaires au substrat.

La modification de surface du substrat permet de contrôler l'orientation des nano-domaines. En particulier, le dépôt d'une couche neutre, n'ayant pas d'affinité préférentielle pour un des deux

blocs, permet de créer une organisation perpendiculaire à l'interface substrat/polymère. Si en plus l'air représente une surface neutre pour le copolymère, l'orientation perpendiculaire est indépendante de l'épaisseur de la dite couche. C'est le cas pour le PS-*b*-PMMA (cf. figure I-12).



**Figure I-12 : Images SEM en vue du dessus de copolymères PS-*b*-PMMA (a) cylindrique et (b) lamellaire, structurés afin d'obtenir des domaines perpendiculaires au substrat. Après auto-assemblage, la phase PMMA (en gris foncé) a été retirée afin de révéler les motifs constitués de PS (gris clair).**

La neutralisation de surface peut être induite par le greffage d'une couche de copolymère statistique de même composition que le copolymère à blocs mais en faisant varier la proportion d'un des deux blocs (ou des deux à la fois) (cf. figure I-13) [In 2006][Ryu 2009][Chevalier 2011]. Mansky *et al.* ont démontré que l'énergie de surface du copolymère statistique PS-*r*-PMMA (*r* pour *random*) est identique pour le PS et le PMMA pour un ratio de styrène de 0.57 dans le copolymère statistique mais que la plage de neutralité s'étend d'un ratio de 0.5 à 0.65 (ceci étant valable pour l'assemblage d'un copolymère lamellaire) [Mansky 1997]. Le greffage d'un ou plusieurs homopolymères rentrant dans la composition du copolymère à blocs permet également de neutraliser la surface du substrat [Ji 2008].

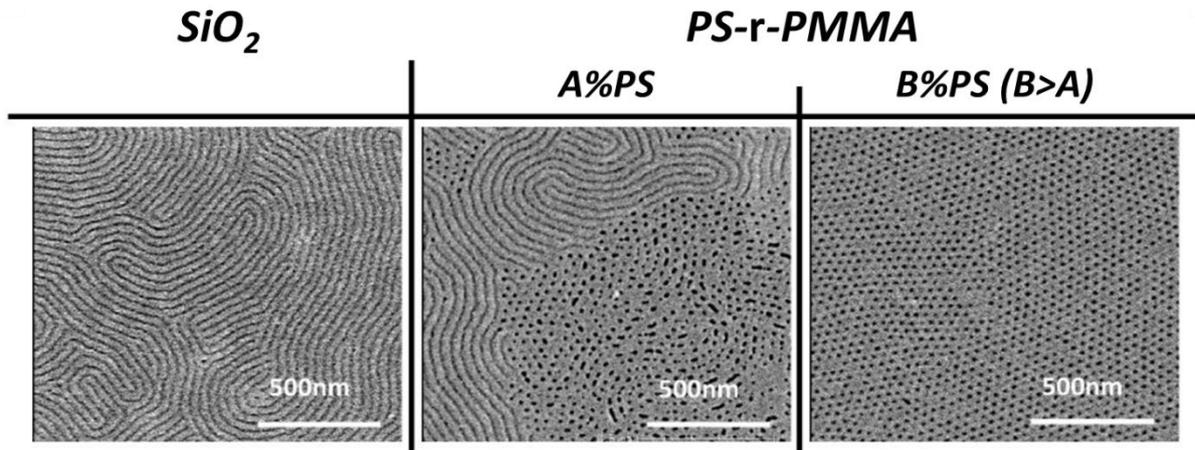


Figure I-13 : Images SEM en vue du dessus d'un copolymère PS-*b*-PMMA cylindrique montrant l'évolution de l'orientation des nano-domaines du copolymère PS-*b*-PMMA en fonction du pourcentage de PS contenu dans la couche de PS-*r*-PMMA ([Chevalier 2011]).

### I32.B La résolution des copolymères

La période intrinsèque du polymère  $L_0$  est directement liée au nombre de monomères  $N$  dans le copolymère ainsi qu'au paramètre de Flory-Huggins  $\chi_{AB}$  selon l'équation suivante [Aissou 2008] (cf. équation I-3) :

$$L_0 \sim aN^{2/3}\chi_{AB}^{1/6}$$

Équation I-3 : Lien entre période intrinsèque et nombre de monomères dans la chaîne du copolymère à blocs.

Où :

- $L_0$  : Période intrinsèque du polymère (nm)
- $a$  : Longueur de segment statistique (nm) [Bates 1985], fixe pour un polymère donné
- $N$  : Nombre de monomères composant la chaîne de copolymère ( $\emptyset$ )
- $\chi_{AB}$  : Paramètre de Flory-Huggins du copolymère A-B ( $\emptyset$ )

De plus, le pas de répétition du motif fait par DSA, appelé aussi « pitch », est équivalent à la longueur intrinsèque du copolymère appelé  $L_0$ . Le pitch est égal à environ deux fois la longueur de la chaîne du copolymère. Cela signifie que pour diminuer le CD et le pitch des motifs finaux, il est nécessaire de diminuer la longueur des chaînes de polymère. Or, afin de maintenir ce dernier dans un régime de ségrégation de phase (apparition de nano-domaine), le produit  $\chi N$  doit être supérieur à 10.5. Le système PS-*b*-PMMA a un paramètre de Flory-Huggins de  $\chi_{PS-PMMA}=0.04$  (à 25°C)

[Russell 1990], ce qui signifie que, pour avoir une apparition de nano-domaine, la longueur de chaîne minimale du polymère doit être de :

$$N = \frac{10.5}{\chi_{PS-b-PMMA}} = \frac{10.5}{0.04} = 263$$

Ceci correspond pour un PS-*b*-PMMA lamellaire par exemple, à une limite de résolution du pitch d'environ  $L_0=22$  nm [Wan 2015].

Certains matériaux sont donc limités de manière intrinsèque quant aux résolutions qu'ils permettent d'atteindre. Pour pallier à cela, une nouvelle génération de polymère dite « high- $\chi$  » a été proposée. Le paramètre d'incompatibilité  $\chi$  est plus important lorsque les deux blocs du copolymère n'ont pas la même polarité. C'est le cas du PS-*b*-PLA qui présente une partie hydrophobe (PS) et une partie hydrophile (PLA), ce qui permet d'avoir une incompatibilité  $\chi_{PS-PLA}$  de 0.233 à 25°C (là où  $\chi_{PS-PMMA}=0.04$  à 25°C) [Keen 2012][Russell 1990]. L'ajout de silicium dans l'une des deux phases permet également d'augmenter l'incompatibilité entre les deux blocs et présente entre autres l'avantage d'accroître la sélectivité lors du transfert par gravure. C'est le cas par exemple du PLA-*b*-PDMS ( $\chi_{PLA-PDMS}=0.94$  à 25°C). Le bloc comprenant du silicium (PDMS) sera plus résistant à la gravure que l'autre bloc, révélant ainsi les motifs créés par la séparation de phase [Rodwogin 2010].

Les copolymères « high- $\chi$  » permettent d'obtenir des résolutions bien meilleures que celles obtenues avec le PS-*b*-PMMA comme répertorié dans le tableau ci-dessous (cf. tableau I-2). Cependant, puisque le but de ces travaux de recherche est de juger du potentiel d'industrialisation du DSA, nous nous concentrerons sur les copolymères PS-*b*-PMMA qui sont plus matures industriellement.

Système	$\chi$ à 150°C		$L_0$ atteignable	
PS- <i>b</i> -PMMA	0.04	[Russell 1990]	22 nm	[Wan 2015]
PS- <i>b</i> -PDMS	0.11	[Sinturel 2015]	17 nm	[Jung 2010]
PS- <i>b</i> -PEO	0.047	[Sinturel 2015]	14 nm	[Park 2008]
PDMS- <i>b</i> -PMMA	0.2	[Luo 2015]	12 nm	[Luo 2015]
PtBS- <i>b</i> -P2VP	0.2	[Sweat 2014]	10 nm	[Sweat 2014]

Tableau I-2 : Tableau répertoriant une liste non exhaustive de copolymère à blocs en rappelant leur paramètre de Fleury-Huggins et la période intrinsèque (pitch) atteignable.

### I3.3 Diriger l'auto-assemblage en deux approches

L'utilisation des copolymères à blocs permet d'atteindre des dimensions de CD et de pitch non résolues par la lithographie conventionnelle. Cependant, lorsque le copolymère est déposé sur surface libre, le placement des nano-domaines est aléatoire et la présence de joints de grain limite l'ordre des motifs sur de grandes distances. Il est donc nécessaire de pouvoir diriger l'auto-assemblage des copolymères. Le DSA (*Directed Self-Assembly* pour Auto-assemblage dirigé) des copolymères est une technique de lithographie associant la propriété de s'auto-assembler des copolymères aux motifs créés par lithographie conventionnelle (appelés motifs de guide). De cette technique résulte à la fois l'auto-alignement des nano-domaines par rapport à un niveau inférieur et leur ordre à longue distance. Il existe deux manières principales de créer des guides pour le DSA : par chémo-épitaxie ou par grapho-épitaxie.

#### I33.A Organisation dirigée en chémo-épitaxie

La chémo-épitaxie résulte en une modification de surface localisée afin de créer une affinité préférentielle avec l'un des deux blocs et ainsi guider l'assemblage du copolymère. Comme expliqué auparavant, l'agencement des micro-domaines est régi par la nécessité de minimiser les énergies de surface. En modifiant partiellement la surface du substrat (en rendant des zones plus hydrophobes que d'autres par exemple), l'assemblage d'un des blocs au-dessus de la zone modifiée est forcé [Liu 2010][Ruiz 2008] (cf figure I-14).

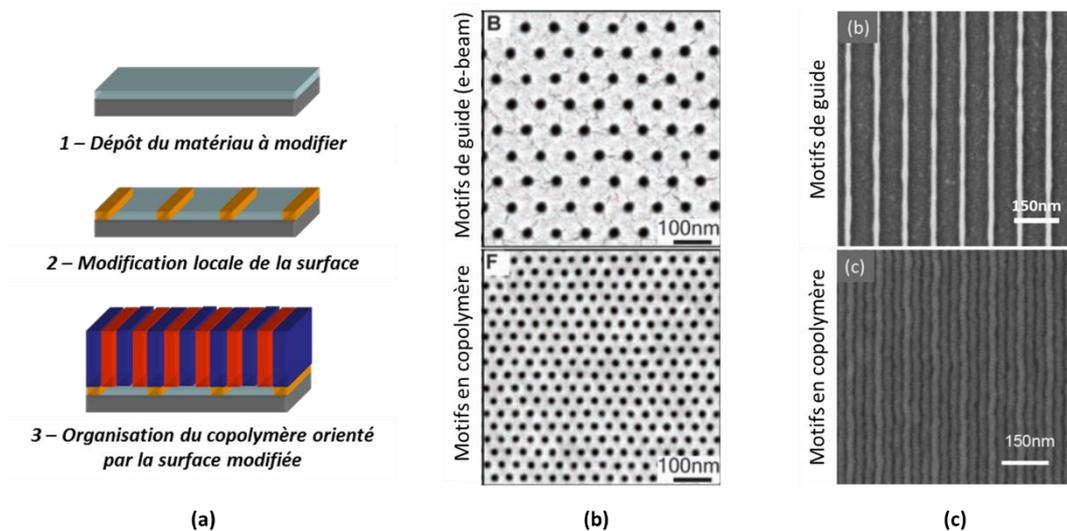


Figure I-14 : Principe de la chémo-épitaxie (a) et images CD-SEM vue du dessus et coupe transverse d'une application type cylindrique (b) [Liu 2010] et lamellaire (c) [Ruiz 2008].

Plusieurs méthodes existent pour la fabrication de ce contraste chimique. L'équipe de Paul Nealey a mis au point un procédé technologique (« LiNe ») utilisant de l'homo-polystyrène (hPS)

réticulable afin de créer des zones d'affinité préférentielles avec le PS [Liu 2010][Seidel 2014]. Dans le même esprit, l'hPS<sub>g</sub> peut également être greffé sur tout le substrat, nous parlons alors de « brosse ». Une lithographie e-beam révèle les zones qui seront modifiées par plasma oxygène [Oria 2013]. La modification peut aussi se faire avec une pointe AFM [Fernández-Regúlez 2014].

Ce contraste chimique permet une organisation ordonnée du copolymère sur de grandes distances, ce qui est particulièrement bien adapté aux applications type « ligne-espace » mais peut tout à fait être utilisé sur un polymère de type cylindrique [Ruiz 2008]. Le procédé CHIPS, développé également à l'IMEC, utilise quant à lui des piliers de PMMA réticulable de 10 nm de hauteur, couplés à une couche supplémentaire de brosse afin de créer de l'ordre à grande échelle tout en limitant les joints de grain [Singh 2016].

Le groupe de recherche DSA chez EMD a développé le procédé SMART permettant de contrôler l'ordre du polymère à grande échelle en ayant au préalable structuré la surface sur 8 nm d'épaisseur à l'aide de la lithographie 193i [Kim 2015]. Le procédé COOL développé par EIDEC est similaire à ce dernier, si ce n'est qu'il est basé sur une topologie positive (en épaisseur), là où SMART repose sur la création de tranchées [Seino 2015].

### I33.B Organisation dirigée en graphoépitaxie

Il s'agit de l'approche choisie dans cette thèse pour le développement du « shrink de contact » (réduction des dimensions). La grapho-épitaxie est une méthode où le guidage des copolymères est fait physiquement par un motif topographique. Cela peut être par exemple un masque dur (*hard mask*) ou encore une résine. Les cavités du motif de guidage sont remplies de copolymères, dont l'assemblage va être dirigé par confinement (cf. figure I-15) [Cheng 2010].

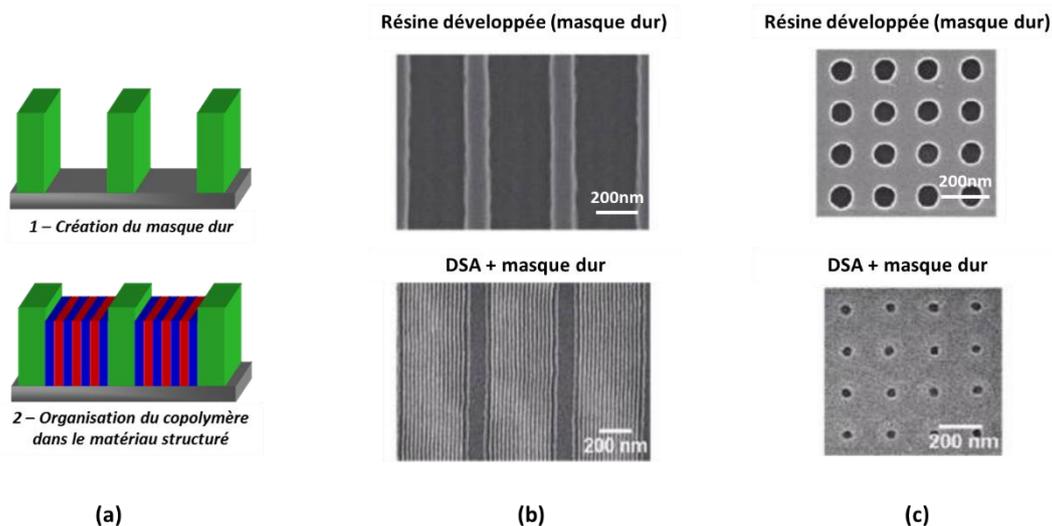


Figure I-15 : Principe de la grapho-épitaxie (a) ainsi les images CD-SEM vue du dessus d'une application type lamellaire (b) et cylindrique (c) ([Cheng 2010]).

Cette méthode, dans le cas d'une application type « shrink de contact », permet de corriger certains défauts inhérents à la fabrication des guides. En effet, les chaînes de polymère ont une certaine flexibilité, ce qui leur permet de s'adapter à la forme du guide et d'absorber une partie de la dispersité de CD (CDU) observées sur le guide [Tiron 2013]. Plusieurs schémas d'intégration sont possibles, en particulier en jouant sur le choix du matériau pour composer le guide. Dans notre cas, et sauf mention contraire, l'étude est faite avec des guides en SOC (spin-on carbon), une couche carbonée régulièrement utilisée comme masque dur et couche anti-réfléctive en lithographie 193i. L'utilisation de guides en oxyde de silicium est également répandue [Bencher 2012][Bekaert 2015].

Une préparation de surface est souvent effectuée afin de mieux contrôler l'affinité d'un des blocs du copolymère avec la surface des guides [Doise 2015][Tiron 2015]. Cet aspect technologique sera davantage explicité dans les prochains chapitres.

## I.4 Le DSA pour le CMOS avancé

Au cours de ces dix dernières années, de nombreux centres de recherches à travers le monde ont concentré leurs efforts sur le DSA, solution prometteuse de lithographie pour les futurs nœuds technologiques. Grâce aux deux types de motifs réalisables (ligne/espace et trou), cette technologie constitue une solution adaptée à la fabrication de circuits logiques dits « CMOS » (*Complementary Metal Oxide Semiconductor*) et en particulier des transistors FinFET (grille en trois dimensions) ou encore de cellules mémoires « S-RAM » (*Statistic Random Access Memory*) ou « D-RAM » (*Dynamic Random Access Memory*) qui sont deux types de mémoires vives [Bao 2011]. En pratique, les puces électroniques sont faites d'un empilement de niveaux métalliques structurés (lignes), reliés entre eux de manière contrôlée par des interconnexions (VIA pour *Vertical Interconnection Access*), le tout alimentant les briques élémentaires des fonctions logiques (les transistors) ou des mémoires (cellule) (cf. figure I-16). Pour les nœuds technologiques sub-10 nm (technologie CMOS dont la largeur de grille est d'environ 10 nm), il s'agit de développer une lithographie capable de créer des VIA distants d'environ 40-60 nm [Yi 2015][Neisser 2015][Gronheid 2016].

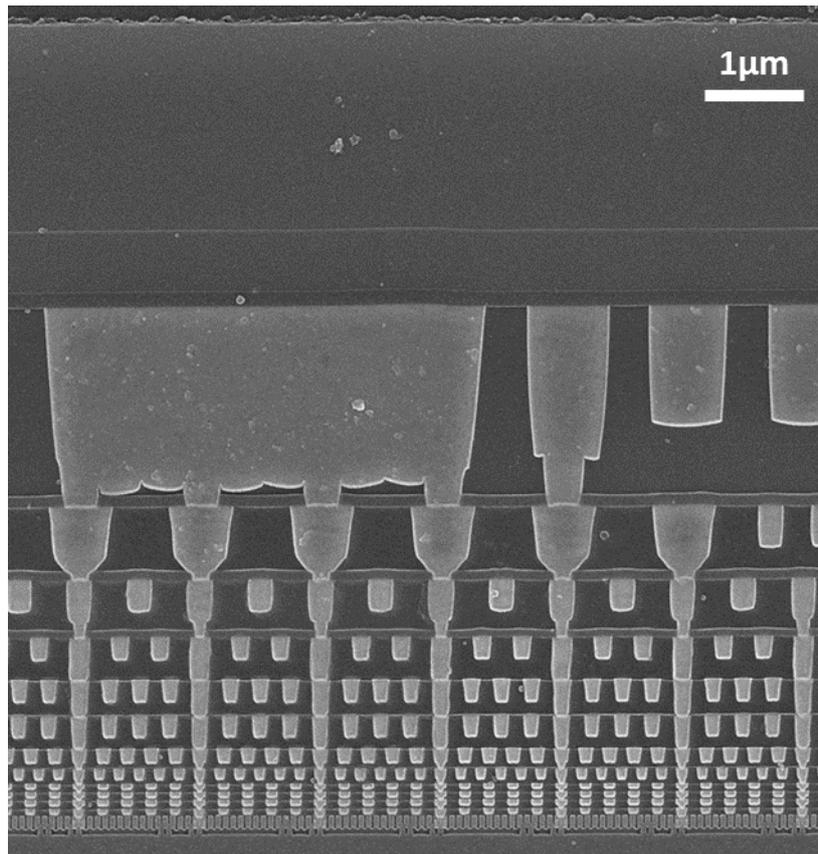


Figure I-16 : Image SEM en coupe d'une puce électronique révélant les interconnexions et les différents niveaux métalliques (inspiré de [Solid State Technology 2014]).

#### I4.1 Les applications type ligne/espace

Les copolymères de type « lamellaire » sont utilisés pour obtenir des alternances de lignes et d'espace qui sont idéales pour la fabrication des transistors nouvelle génération, aussi appelés FinFET (*Fin field-effect transistor*) ou « transistor 3D ». Dans cette catégorie, IBM a déjà montré l'utilité du DSA pour fabriquer en 2011 le premier FinFET utilisant cette technologie [Bourzac 2015][Tsai 2014][Seino 2016][Singh 2016]. Cela a pour conséquence de réduire nettement le courant de fuite du transistor qui est responsable de la baisse de performances et d'éventuels échauffements du dispositif (cf. figure I-17).

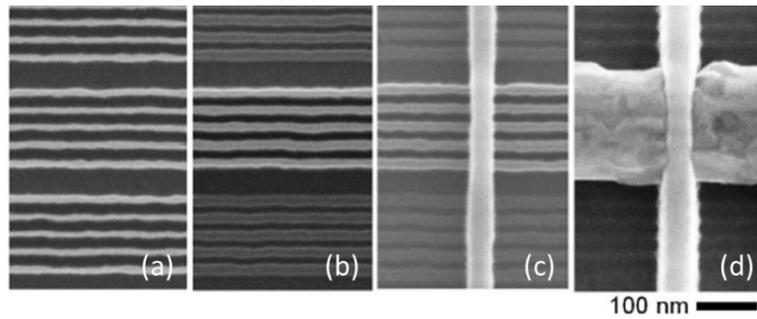


Figure I-17 : Fabrication d’un transistor FINFET en utilisant le procédé DSA dans une approche de grapho-épitaxie (intégration TIGER pour *Tone Inverted GraphoEpitaxy*). Images CD-SEM des étapes du procédé : (a) auto-assemblage du copolymère lamellaire par grapho-épitaxie, (b) exposition sélective (lithographie 193 nm) pour obtenir un plus grand contraste topographique, (c) croissance de la grille et (d) création des « espaceurs » et croissance de Si par épitaxie ([Tsai 2014]).

Dans le même esprit, Intel et IBM ont démontré récemment une nouvelle méthodologie inversant la tendance du « cut first », c’est-à-dire de d’abord dessiner les motifs sur la plaque que le DSA va structurer. Avec l’approche « cut last », une étape de chémo-épitaxie est faite afin d’ordonner les lamelles de copolymères sur une grande distance. Puis, à l’aide d’une lithographie conventionnelle (ou e-beam), la zone active est protégée par la résine et une gravure est faite afin de retirer les motifs DSA obsolètes (cf. figure I-18) [Sayan 2014][Sayan 2016][Liu 2016].

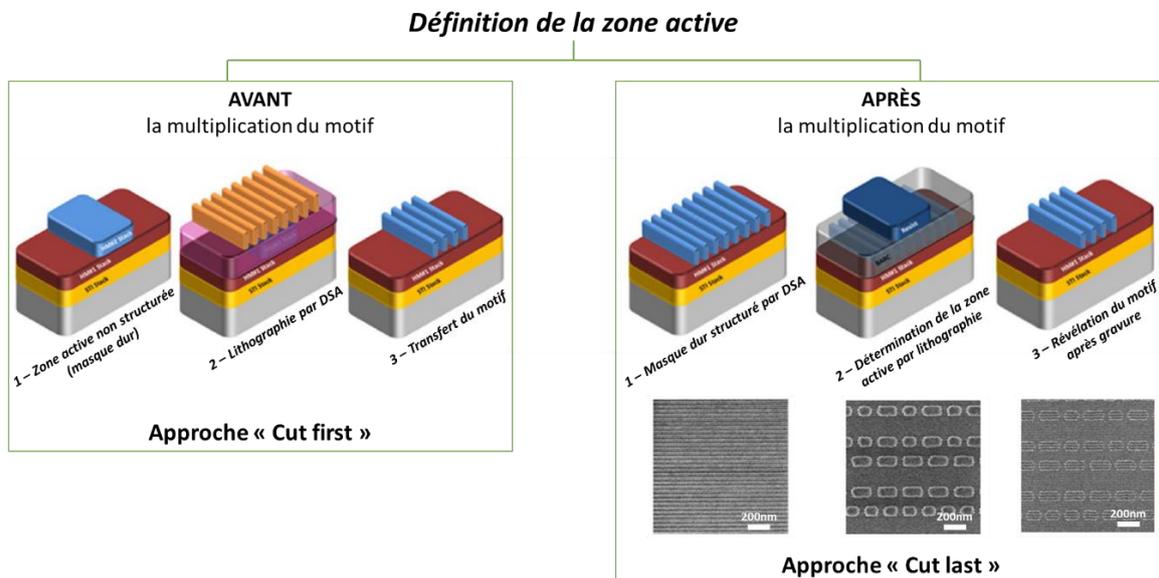


Figure I-18 : Représentations schématiques des principes de « Cut first » (à gauche) et « Cut last » (à droite) pour la détermination de la zone active des FinFET ainsi que quelques images CD-SEM illustrant l’approche « Cut last » (inspiré de [Sayan 2014]).

La même morphologie est accessible avec des copolymères cylindriques dont les cylindres sont couchés dans le plan. Cependant, cette technique présente l'inconvénient de créer des motifs n'ayant pas un assez bon contraste à la gravure.

## I4.2 Les applications type contact

Les applications de type « shrink de contact » (réduction des dimensions) et « multiplication de contacts » (augmentation de la densité) sont essentiellement adressées par des copolymères cylindriques. Le DSA est particulièrement adaptée à ces applications car il permet d'outrepasser la limite de résolution de la taille des contacts faits en lithographie conventionnelle (qui est autour de 55 nm). Avec un polymère de période intrinsèque de 35 nm, le guide d'environ 55 nm va être réduit à un domaine de 20 nm [Gharbi 2015]. L'équipe de Yi a également fait la démonstration du potentiel du DSA pour la fabrication de VIA pour des nœuds sub-10 nm afin de pallier aux problèmes de contacts fusionnés lorsque le pitch est trop agressif pour la lithographie conventionnelle (cf. figure I-19) [Yi 2012].

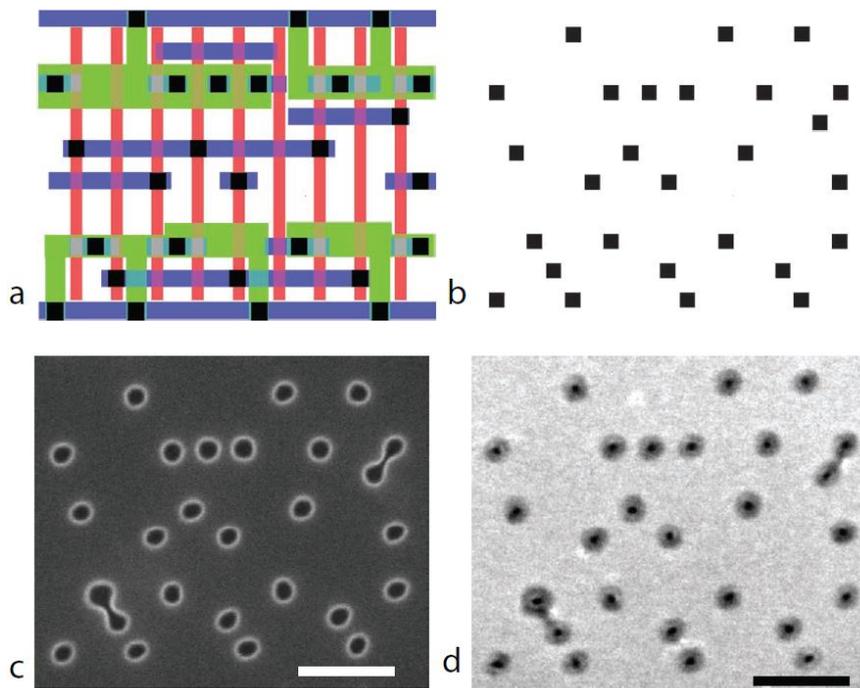


Figure I-19 : Démonstration de l'intégration électrique d'une partie d'une cellule mémoire S-RAM : (a) routage électrique de la partie en question (layout), (b) agencement des contacts, (c) image CD-SEM des motifs de guides faits par lithographie e-beam puis transférés dans une couche de Si, (d) image CD-SEM après assemblage du PS-*b*-PMMA dans les guides (après retrait du PMMA) ([Yi 2012]).

L'élasticité des chaînes de polymères permet également de corriger les défauts des guides, en terme d'uniformité de CD [Gharbi 2015][Jeong 2013]. Ceci est assez flagrant lorsqu'il s'agit de combiner la lithographie 193i poussée à son extrême limite et le DSA. Pour dépasser les limites de la lithographie conventionnelle, des études ont montré des résultats encourageants obtenus en associant l'extrême UV (EUV) et le DSA. Malgré le fait que l'EUV ne soit pas encore mature pour la production de masse, elle permet néanmoins de créer des guides avec moins de rugosité et moins de variation de CD que l'immersion, tout en réduisant la dose d'insolation et donc la puissance de la source afin de garder un rendement acceptable. Ce procédé pourrait être celui correspondant le plus aux exigences des nœuds très avancés (sub-7 nm) [Wuister 2014][Gronheid 2016].

Le « shrink de contact » seul reste un cas d'école puisqu'en pratique, les schémas d'intégration électrique sont plus complexes et font intervenir des pitches très agressifs pour les nœuds très avancés [Yi 2015]. Le DSA permet justement de palier à ce problème en modulant la densité des motifs. Là où la lithographie conventionnelle ne résout pas des contacts proches finissant par fusionner, le DSA permet en une seule étape de multiplier le nombre de contacts. En cela, le DSA est une méthode plus rentable que le « multi-patterning » qui nécessite plusieurs expositions.

Il est possible d'aller au-delà du doublement en multipliant davantage le nombre de domaines dans un seul guide [Tiron 2015]. Cependant, cela ne se fait pas sans l'apparition de défauts dû au relâchement de la contrainte du guide sur le polymère. Le taux de défauts, entre autres, fait partie des critères présent dans le cahier des charges imposé par les industriels, que nous allons détailler dans le prochain paragraphe.

Le « shrink de contact » peut être adressé avec des copolymères lamellaires [Chi 2016]. Néanmoins, la multiplication de contacts avec cette méthode est difficile à contrôler, du moins avec des guides elliptiques.

Il existe également des copolymères cylindriques mais de matrice inversée, c'est-à-dire que la phase majoritaire du copolymère est retirée et non pas la phase minoritaire. Cela donnera, après assemblage du copolymère et développement, l'apparition de plots pouvant par exemple être utilisés pour la réalisation de cristaux photoniques [Park 2003].

### I4.3 Avantages et contraintes du DSA

Les avantages du DSA sont nombreux par rapport aux autres méthodes évoquées précédemment. Tout d'abord, les copolymères à blocs sont compatibles avec les procédés de micro-électronique (sous réserve d'avoir effectué une décontamination métallique préalablement). En effet, les polymères rentrent dans la composition des résines utilisées en lithographie conventionnelle et les solvants utilisés pour la dissolution du copolymère sont déjà présents dans les salles blanches. De plus, le recuit des copolymères à blocs est équivalent à celui fait sur les résines standards : le rendement d'environ 200 plaques par heure est conservé.

Le DSA, lorsqu'il est compatible avec le procédé CMOS standard (notamment en termes de contamination métallique), permet d'utiliser les outils de lithographie conventionnelle sans

développement spécifique, ce qui permet une mise en production plus rapide. En comparaison avec le « multiple patterning » qui augmente le nombre de lithographie/gravure successives, le DSA se fait en un nombre plus réduit d'étapes et diminue considérablement le nombre de masques de lithographie utilisés.

Le DSA permet d'aller au-delà des limites de résolutions de la lithographie conventionnelle, tant en termes de dimensions critiques que de densité. Ainsi, cette technique permet de passer d'une ligne de largeur 55 nm, en bord de fenêtre de procédé du 193i, à environ 10 nm pour du PS-*b*-PMMA lamellaire. Le pitch est également amélioré : le DSA permet d'augmenter jusqu'à quatre fois la densité des motifs (passant d'un pitch de 80 nm à 20 nm en utilisant le PS-*b*-PMMA) [Wan 2015]. Certains polymères « high- $\chi$  » permettent d'adresser des densités encore plus grandes car ils s'organisent avec une périodicité de 12-15 nm [Cushen 2012].

Bien que n'étant plus mise à jour depuis 2015, l'ITRS a émis un avis consultatif sur le moyen terme sur l'évolution future des technologies et notamment de lithographie qui reste suivi aujourd'hui [ITRS 2015]. En particulier, plusieurs critères sont à prendre en compte pour juger de l'avancée d'une technologie et de sa maturité pour être adoptée par l'industrie et ce, en termes de dimensions, d'alignement, de latitude de procédé, de fidélité du transfert de motif à la gravure, de pitch, de défauts... Dans le tableau ci-dessous, nous avons positionné le DSA sur ces différents critères en prenant comme point de comparaison les spécifications de l'ITRS et de l'industrie en général (cf. tableau I-3).

	Spécifications de l'industrie pour les applications contacts pour les nœuds sub-10 nm	Etat de l'art du DSA pour le contact
Uniformité de CD (CDU)	<2.0 nm (soit 8% du CD) [ITRS 2013]*	1.4 nm (EUV+DSA) [Gronheid 2016]
Erreur de placement	<4.0 nm (guide + DSA) [ITRS 2013]*	~2 nm ( $3\sigma$ ) pour le DSA [Wuister 2014] [Bouanani 2016]
Défauts	<0.01 défaut/cm <sup>2</sup> [ITRS 2013]*	74 défauts/cm <sup>2</sup> ¥ [Singh 2016]
Rendement	200 plaques/heure	200 plaques/heure
Résolution	13 nm demi-pitch [ITRS 2013]*	6-20 nm demi-pitch (cf. tableau I-2)

\* Spécifications ITRS données pour des applications type logiques pour le nœud technologique 10nm

¥ Approche chémo-épitaxie, 3 milliards de trous inspectés

Tableau I-3 : Résumé des spécifications demandées par l'ITRS et de l'état de l'art du DSA dans ce domaine.

Malgré les avancées prometteuses faites sur le DSA concernant les critères nommés ci-dessus, il reste quelques verrous technologiques à relever afin de passer de l'étape recherche à l'industrialisation de grande masse.

Un copolymère à blocs, de par sa période intrinsèque, ne peut adresser qu'une seule densité lorsqu'il s'agit de multiplication de contacts. Or, les circuits pour les nœuds technologiques très avancés nécessitent l'adressage de plusieurs densités sur un même niveau. Un travail sur les règles de dessins des masques doit se faire en amont du développement du procédé DSA, afin d'adapter au mieux les motifs de guides au polymère et obtenir après l'étape DSA, les densités et les motifs désirés aux bons endroits [Moulis 2014][Yi 2015][Gronheid 2015][Bekaert 2015].

Les performances lithographiques du DSA sont entre autre dépendantes de la qualité de l'assemblage du copolymère. L'apparition de défauts structurels se matérialise sous plusieurs formes. Un motif défectueux peut être :

- mal défini (motif lamellaire discontinu, trou non débouché)
- mal dimensionné (CD non constant sur tous les motifs, rugosité élevée)
- ou encore mal positionné (problème d'erreur de placement par rapport au motif de guidage).

Les causes de ces défauts sont nombreuses et peuvent dépendre du procédé DSA en lui-même. Certains paramètres influent directement sur le taux de défauts final comme la présence de résidus liés à la gravure, la formulation des polymères, le dimensionnement des guides ou encore le budget thermique. Des études en surface libre ont été publiées montrant l'impact du temps et de la température de recuit du polymère sur la fenêtre de procédé (autrement dit, la zone de stabilité de procédé) en termes de défauts et de variation de période intrinsèque [Argoud 2014]. La cinétique de l'assemblage a été également étudiée afin de diminuer le nombre de défauts sur les motifs [Gharbi 2016].

La propriété morphologique intrinsèque des guides dans le cas de la grapho-épitaxie, à la fois en termes de taille et de rugosité, a un impact sur le positionnement des contacts DSA par exemple [Tiron 2015] ou crée une multiplication de contacts non désirée ou des contacts manquants [Gharbi 2015]. Les chaînes de polymère ont une certaine mobilité bien que confinées dans un guide. Cela peut conduire à une erreur de placement : le guide et le trou formé par le copolymère ne sont pas concentriques. Dans le cas d'une application type VIA (*Vertical Interconnection Access*), les contacts risquent de ne pas déboucher sur une ligne métallique du niveau technologique inférieur, ce qui conduit à des courts circuits.

Afin de contrôler les effets des paramètres du procédé sur les performances lithographiques du DSA, un effort particulier est mis sur le développement de nouveaux moyens d'analyses d'images CD-SEM (microscope électronique à balayages haute résolution). Le but de ces études est de déterminer avec la meilleure précision possible la rugosité, la taille, le placement des motifs ainsi que les défauts générés [Kato 2014]. Des reconstructions en 3D de la structure interne du contact DSA dans le guide à partir d'images en coupe permettent par exemple de visualiser des défauts au sein de la structure, non visibles par des images prises du dessus [Okabe 2015]. Ce qui est obtenu par cette méthode peut être aussi anticipé grâce à de la simulation 3D en se basant par exemple sur des méthodes de calcul quantique prédictif [Laachi 2015].

Le développement des outils de simulation dédiés au DSA a permis entre autres de prédire le pitch final des contacts DSA ainsi que le placement de ces derniers [Xiao 2015] mais aussi de mettre en évidence l'influence de la forme du motif de guide sur le pitch final du DSA [Wuister 2014][Fouquet 2015][Ma 2015]. Le modèle Ohta-Kawasaki permet de prédire quelle forme de guides est la plus favorable au DSA et réaliser une cartographie définissant la fenêtre de procédés en terme de dimensions de guide [Muramatsu 2014].

Les performances lithographiques du DSA ne résultent pas seulement en la qualité morphologique de l'assemblage. La défektivité, c'est-à-dire le nombre de défauts par centimètre carré de puces, doit être la plus faible possible afin que le DSA soit considéré comme viable pour une utilisation industrielle. Pour quantifier cela, des outils de défektivité à grande échelle adaptés aux petites dimensions du DSA ont été développé entre autre par KLA Tencor et sont actuellement utilisés pour tester les performances de différents procédés et/ou matériaux [Pathangi 2015][Sanchez 2015].

## I.5 Le sujet de la thèse en contexte

L'objectif global de cette thèse est d'évaluer le potentiel d'industrialisation du DSA par grapho-épitaxie pour des technologiques CMOS avancées (nœuds technologiques sub-14 nm), ayant vocation à être utilisé pour des applications type « shrink de contact » et « multiplication de contact ». Au sein de l'équipe DSA du CEA Leti, et en collaboration avec des industriels comme Arkema et STMicroelectronics, le travail effectué vise à démontrer la capacité de cette technique à répondre au cahier des charges de l'ITRS, notamment en termes de résolution, d'uniformité de CD, de fenêtre de procédé et de précision de positionnement des motifs.

Pour ce faire, nous utilisons des matériaux dont la maturité industrielle permet une compatibilité avec les critères imposés par la micro-électronique, notamment en termes de nature de solvant de dissolution, de contamination métallique (très faible afin de permettre l'utilisation d'équipements de production salle blanche) et de procédé d'assemblage (recuit thermique avec des temps toujours plus réduit). Dans le cadre d'un laboratoire commun avec le CEA Leti, Arkema fournit les matériaux de type « PS-*b*-PMMA » qui présenteront quelques variantes. En effet, plusieurs systèmes seront étudiés, en particulier deux polymères de période différente (C35 et C43, signifiant respectivement Cylindrique de période  $L_0=35$  nm et Cylindrique de période  $L_0=43$  nm). Ces deux périodes ont été choisies afin de couvrir les pitches imposés par les règles de dessins électroniques pour le nœud technologique 14 nm du CMOS avancé (appelé C014 à STMicroelectronics) mais également pour les nœuds sub-14 nm, en particulier lors de la multiplication de contacts (cf. figure I-20).

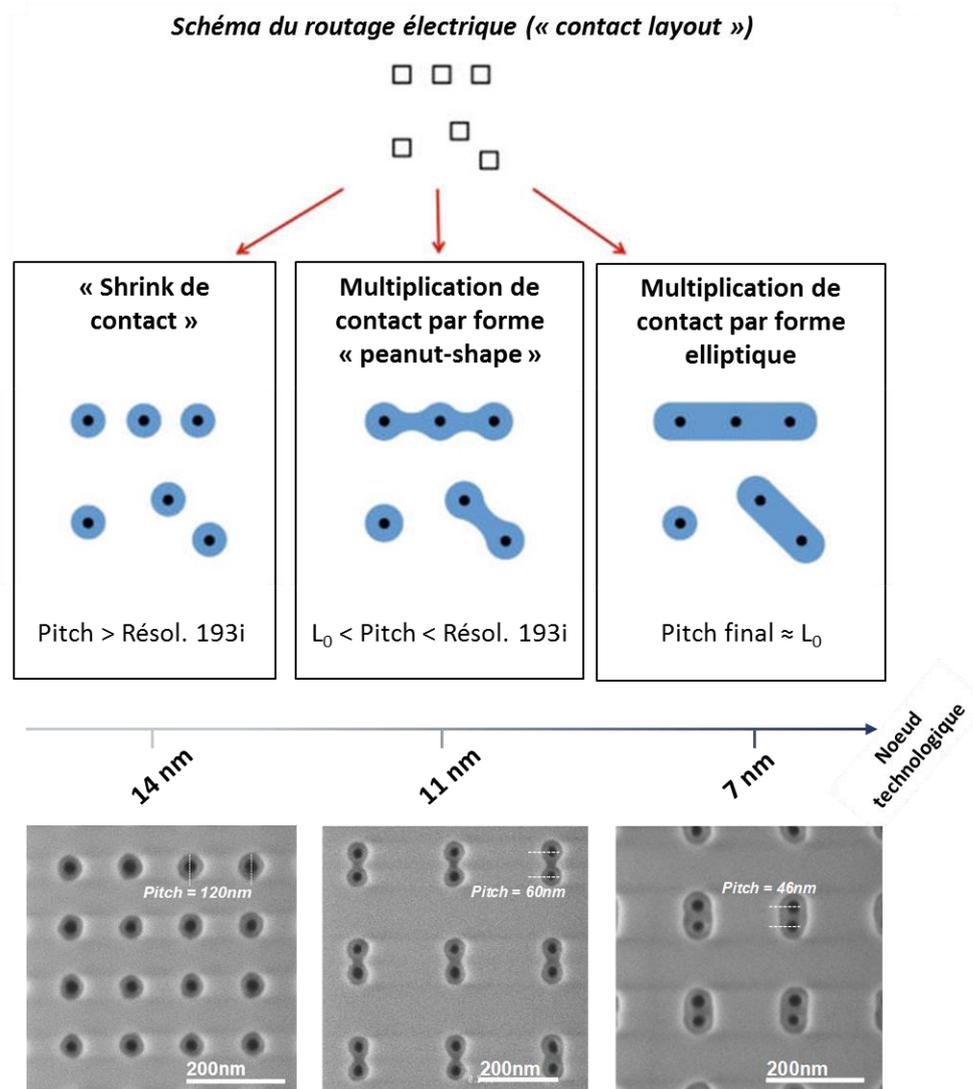


Figure I-20 : Illustrations des différentes stratégies d’intégration du DSA pour des nœuds technologiques avancés, accompagnées d’images CD-SEM d’exemples d’intégration faites au CEA Leti. De gauche à droite : (nœud 14 nm) le pitch minimum à atteindre est plus grand que la résolution de la lithographie conventionnelle, (nœud 11 nm) le pitch minimum à atteindre est plus grand que la période intrinsèque du polymère mais plus petit que la résolution de la lithographie conventionnelle, (nœud 7 nm) le pitch minimum à atteindre est de l’ordre de la période intrinsèque du polymère (inspiré de [Yi 2015]).

Une première étude concernant le « shrink de contact » nous a permis de mieux comprendre les mécanismes qui rentrent en jeu dans l’apparition de défauts d’assemblage. Nous avons étudié en particulier l’impact des propriétés du matériau (composition, masse molaire, présence de résidus d’homopolymères), de la taille des guides et de l’affinité de surface sur le taux de défauts, l’uniformité de CD et le désalignement du domaine formé par le copolymère par rapport au guide.

Tout en représentant un véhicule de test pour les matériaux, le « shrink de contact » ne permet pas de tirer profit de la haute densité des copolymères à blocs. La multiplication de contact, quant à elle, permet à la fois de relâcher la contrainte sur la lithographie conventionnelle et d’obtenir des

densités de motifs très élevées, de l'ordre de la période intrinsèque du polymère. Pour adresser cette application, deux stratégies ont été explorées durant cette thèse. La première, plus adaptée à des nœuds technologiques très avancés (sub-14 nm), consiste en l'élaboration de guides elliptiques relativement facile à mettre en œuvre avec la lithographie 193nm à immersion. L'étude de la fenêtre de procédé en termes de paramètres procédé comme le temps et la température de recuit, mais aussi de commensurabilité a été menée. Une attention particulière a été portée sur l'impact de la variation du guide sur le pitch final obtenu en DSA, dont les données expérimentales ont été corrélées avec des outils de simulation.

La deuxième stratégie, basée sur une autre forme de guides dite « peanut-shape » (en forme de cacahouète), génère également des doubles contacts mais avec un espacement plus relâché que la période intrinsèque du polymère, non accessible avec la lithographie 193i mais plus adapté au nœud C014. En effet, le resserrement entre les deux lobes est difficilement reproductible d'un guide à l'autre. Pour autant, des résultats encourageants présentés dans ce manuscrit montrent le potentiel de cette méthodologie.

Les critères de réussite sont basés sur les performances lithographiques qu'il faut juger à travers une métrologie de pointe. Ainsi, le développement d'une métrologie spécifique a été faite, permettant entre autres de mesurer l'erreur de placement des structures « shrink de contacts » mais également d'évaluer la variation de pitch d'un guide à l'autre lors du dédoublement de contacts.

Ce manuscrit est l'aboutissement d'une thèse avec financement CIFRE pendant laquelle 70 % du temps a été passé au CEA Leti et 30 % à STMicroelectronics. Ce travail résulte d'une collaboration étroite entre ces deux entités. En effet, la lithographie 193 nm à immersion des plaques de silicium est réalisée en salle blanche à STMicroelectronics, les procédés DSA ainsi que les caractérisations morphologiques au CEA Leti et les mesures de défektivité à grande échelle à Crolles (STMicroelectronics).

## I.6 Conclusion

Ce premier chapitre explique comment la course à la miniaturisation des composants électroniques a conduit au développement de nouvelles techniques de lithographie. Parmi celles-ci, l’auto-assemblage dirigé des copolymères à blocs (DSA) se démarque par sa capacité à allier la lithographie conventionnelle (« top-down ») et les propriétés des matériaux (« bottom-up ») pour adresser des dimensions et des pitches très agressifs.

Nous avons vu dans une première partie que les copolymères à blocs permettent de créer différents motifs selon leur morphologie. Dans le cadre de cette thèse, nous allons étudier uniquement les copolymères de type cylindrique afin de réduire les dimensions des contacts (« shrink ») et d’augmenter leur densité (dédoublage de contacts) pour une application type « VIA » (*Vertical Interconnection Access*) pour le nœud technologique C014.

Nous avons également mis l’accent sur les différentes façons de diriger l’auto-assemblage. Afin de se rapprocher au mieux de l’intégration du nœud C014 utilisé à STMicroelectronics, nous avons décidé de nous consacrer à l’approche grapho-épitaxie. La détermination des motifs de guidage se fera tour à tour par lithographie e-beam puis par lithographie 193i dans un souci d’intégration de la méthodologie DSA aux équipements utilisés actuellement en production à STMicroelectronics.

Le travail de groupes de recherche à travers le monde a permis de montrer le potentiel du DSA et sa tangible industrialisation. Cependant, il reste de nombreux verrous technologiques à soulever, notamment en ce qui concerne la reproductibilité des performances lithographiques en termes de CDU et de placement des contacts dans les cavités de guidage, ainsi que de la défektivité du procédé DSA à grande échelle. Ce travail de thèse tente de répondre aux problématiques posées par les contraintes liées à la fabrication des composants CMOS en montrant les performances lithographiques atteignables par le DSA et en les optimisant.

## Bibliographie

- Aissou, K. (2008). *Etude de l'auto-organisation de films minces de copolymères diblocs en vue d'applications pour la microélectronique*. Université Joseph Fourier (Grenoble). Retrieved from <http://www.theses.fr/2008GRE10001>
- Argoud, M., Servin, I., Gharbi, A., Pimenta Barros, P., Jullian, K., Sanche, M., ... Pieczulewski, C. (2014). 300nm pilot line DSA contact hole process stability (Vol. 9049, pp. 904929-904929–11). <http://doi.org/10.1117/12.2046315>
- Bao, X. Y., Yi, H., Bencher, C., Chang, L. W., Dai, H., Chen, Y., ... Wong, H. S. P. (2011). SRAM, NAND, DRAM contact hole patterning using block copolymer directed self-assembly guided by small topographical templates. In *Electron Devices Meeting (IEDM), 2011 IEEE International* (p. 7.7.1-7.7.4). <http://doi.org/10.1109/IEDM.2011.6131510>
- Barrett Research Group. (2017). BRG - A Brief Overview of Nanotechnology. Retrieved from <http://barrett-group.mcgill.ca/tutorials/nanotechnology/nano05.htm>
- Bates, A. K., Rothschild, M., Bloomstein, T. M., Fedynyshyn, T. H., Kunz, R. R., Liberman, V., & Switkes, M. (2001). Review of Technology for 157-nm Lithography. *IBM J. Res. Dev.*, 45(5), 605–614. <http://doi.org/10.1147/rd.455.0605>
- Bates, F. S., & Fredrickson, G. H. (1999). Block Copolymers—Designer Soft Materials. *Physics Today*, 52(2), 32–38. <http://doi.org/10.1063/1.882522>
- Bates, F. S., & Hartney, M. A. (1985). Block copolymers near the microphase separation transition. 3. Small-angle neutron scattering study of the homogeneous melt state. *Macromolecules*, 18(12), 2478–2486. <http://doi.org/10.1021/ma00154a023>
- Bekaert, J., Doise, J., Gronheid, R., Ryckaert, J., Vandenberghe, G., Fenger, G., ... Cao, Y. (2015). N7 logic via patterning using templated DSA: implementation aspects (Vol. 9658, pp. 965804-965804–11). <http://doi.org/10.1117/12.2196524>
- Bencher, C., Yi, H., Zhou, J., Cai, M., Smith, J., Miao, L., ... Holmes, S. (2012). Directed self-assembly defectivity assessment. Part II. In W. M. Tong (Ed.), (p. 83230N–83230N–10). <http://doi.org/10.1117/12.917993>
- Bouanani, S., Tiron, R., Bos, S., Gharbi, A., Barros, P. P., Hazart, J., ... Monget, C. (2016). Placement error in directed self-assembly of block copolymers for contact hole application. *Journal of Micro/Nanolithography, MEMS, and MOEMS*, 15(2), 021407–021407. <http://doi.org/10.1117/1.JMM.15.2.021407>
- Bourzac, K. (2015). Complex Transistors, Self-Assembled. Retrieved October 18, 2016, from <https://www.technologyreview.com/s/534381/3-d-transistors-made-with-molecular-self-assembly/>
- Cheng, J. Y., Sanders, D. P., Truong, H. D., Harrer, S., Friz, A., Holmes, S., ... Hinsberg, W. D. (2010). Simple and Versatile Methods To Integrate Directed Self-Assembly with Optical

- Lithography Using a Polarity-Switched Photoresist. *ACS Nano*, 4(8), 4815–4823. <http://doi.org/10.1021/nm100686v>
- Chevalier, X., Tiron, R., Upreti, T., Gaugiran, S., Navarro, C., Magnet, S., ... Hadziioannou, G. (2011). Study and optimization of the parameters governing the block copolymer self-assembly: toward a future integration in lithographic process. In D. J. C. Herr (Ed.), (p. 79700Q). <http://doi.org/10.1117/12.881481>
- Chevalier, Xavier, Nicolet, C., Tiron, R., Gharbi, A., Argoud, M., Couderc, C., ... Navarro, C. (2014). Improvements of self-assembly properties via homopolymer addition or block-copolymer blends (Vol. 9049, p. 90490T). <http://doi.org/10.1117/12.2046329>
- Chi, C., Liu, C.-C., Meli, L., Schmidt, K., Xu, Y., DeSilva, E. A., ... Colburn, M. (2016). DSA via hole shrink for advanced node applications. In Christopher Bencher & J. Y. Cheng (Eds.), (p. 97770L). <http://doi.org/10.1117/12.2219706>
- Chou, S. Y., Krauss, P. R., & Renstrom, P. J. (1995). Imprint of sub-25 nm vias and trenches in polymers. *Applied Physics Letters*, 67(21), 3114–3116. <http://doi.org/10.1063/1.114851>
- Cushen, J. D., Bates, C. M., Rausch, E. L., Dean, L. M., Zhou, S. X., Willson, C. G., & Ellison, C. J. (2012). Thin Film Self-Assembly of Poly(trimethylsilylstyrene-b-d,l-lactide) with Sub-10 nm Domains. *Macromolecules*, 45(21), 8722–8728. <http://doi.org/10.1021/ma301238j>
- Doise, J., Bekaert, J., Chan, B. T., Gronheid, R., Cao, Y., Hong, S., ... Marzook, T. (2015). Implementation of surface energy modification in graphoepitaxy directed self-assembly for hole multiplication. *Journal of Vacuum Science & Technology B*, 33(6), 06F301. <http://doi.org/10.1116/1.4929884>
- Fernández-Regúlez, M., Evangelio, L., Lorenzoni, M., Fraxedas, J., & Pérez-Murano, F. (2014). Sub-10 nm Resistless Nanolithography for Directed Self-Assembly of Block Copolymers. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 6(23), 21596–21602. <http://doi.org/10.1021/am506600m>
- Flory, P. J. (1953). *Principles of Polymer Chemistry*. Ithaca, NY: Cornell University Press.
- Fouquet, A., Perraud, L., Bérard-Bergery, S., Gharbi, A., Pimenta-Barros, P., Tiron, R., ... Farys, V. (2015). 193i lithography for contact doubling with grapho-epitaxy DSA: a simulation study (Vol. 9423, pp. 942324-942324–9). <http://doi.org/10.1117/12.2085822>
- Gharbi, A., Tiron, R., Argoud, M., Chamiot-Maitral, G., Fouquet, A., Lapeyre, C., ... Pain, L. (2016). Process highlights to enhance directed self-assembly contact patterning performances. *Journal of Micro/Nanolithography, MEMS, and MOEMS*, 15(4), 043503–043503. <http://doi.org/10.1117/1.JMM.15.4.043503>
- Gharbi, A., Tiron, R., Argoud, M., Chevalier, X., Barros, P. P., Nicolet, C., & Navarro, C. (2015). Contact holes patterning by directed self-assembly of block copolymers: process window study. *Journal of Micro/Nanolithography, MEMS, and MOEMS*, 14(2), 023508–023508. <http://doi.org/10.1117/1.JMM.14.2.023508>

- Gronheid, R., Boeckx, C., Doise, J., Bekaert, J., Karageorgos, I., Ruckaert, J., ... Zou, Y. (2016). EUV patterned templates with grapho-epitaxy DSA at the N5/N7 logic nodes. In E. M. Panning & K. A. Goldberg (Eds.), (p. 97761W). <http://doi.org/10.1117/12.2219876>
- Gronheid, R., Doise, J., Bekaert, J., Chan, B. T., Karageorgos, I., Ryckaert, J., ... Fuchimoto, D. (2015). Implementation of templated DSA for via layer patterning at the 7nm node (Vol. 9423, pp. 942305-942305-10). <http://doi.org/10.1117/12.2086090>
- Hadjichristidis, N., Iatrou, H., Pitsikalis, M., Pispas, S., & Avgeropoulos, A. (2005). Linear and non-linear triblock terpolymers. Synthesis, self-assembly in selective solvents and in bulk. *Progress in Polymer Science*, 30(7), 725–782. <http://doi.org/10.1016/j.progpolymsci.2005.04.001>
- Haisma, J., Verheijen, M., Heuvel, K. van den, & Berg, J. van den. (1996). Mold-assisted nanolithography: A process for reliable pattern replication. *Journal of Vacuum Science & Technology B*, 14(6), 4124–4128. <http://doi.org/10.1116/1.588604>
- Higashiki, T., Nakasugi, T., & Yoneda, I. (2011). Nanoimprint lithography for semiconductor devices and future patterning innovation. In D. J. C. Herr (Ed.), (p. 797003). <http://doi.org/10.1117/12.882940>
- In, I., La, Y.-H., Park, S.-M., Nealey, P. F., & Gopalan, P. (2006). Side-Chain-Grafted Random Copolymer Brushes as Neutral Surfaces for Controlling the Orientation of Block Copolymer Microdomains in Thin Films. *Langmuir*, 22(18), 7855–7860. <http://doi.org/10.1021/la060748g>
- Intel. (2017). ARK | Votre source pour les spécifications des produits Intel®. Retrieved January 16, 2017, from <http://ark.intel.com/fr>
- ITRS. (2013). *International Technology Roadmap for Semiconductors - Lithography Tables*. Retrieved from <http://www.itrs2.net/>
- ITRS. (2015). *International Technology Roadmap for Semiconductors - Lithography*. Retrieved from <http://www.itrs2.net/>
- Jeong, S.-J., Kim, J. Y., Kim, B. H., Moon, H.-S., & Kim, S. O. (2013). Directed self-assembly of block copolymers for next generation nanolithography. *Materials Today*, 16(12), 468–476. <http://doi.org/10.1016/j.mattod.2013.11.002>
- Ji, S., Liu, G., Zheng, F., Craig, G. S. W., Himpsel, F. J., & Nealey, P. F. (2008). Preparation of Neutral Wetting Brushes for Block Copolymer Films from Homopolymer Blends. *Advanced Materials*, 20(16), 3054–3060. <http://doi.org/10.1002/adma.200800048>
- Jung, Y. S., Chang, J. B., Verploegen, E., Berggren, K. K., & Ross, C. A. (2010). A Path to Ultranarrow Patterns Using Self-Assembled Lithography. *Nano Letters*, 10(3), 1000–1005. <http://doi.org/10.1021/nl904141r>
- Jung, Y. S., & Ross, C. A. (2007). Orientation-Controlled Self-Assembled Nanolithography Using a Polystyrene–Polydimethylsiloxane Block Copolymer. *Nano Letters*, 7(7), 2046–2050. <http://doi.org/10.1021/nl070924l>

- Kato, T., Sugiyama, A., Ueda, K., Yoshida, H., Miyazaki, S., Tsutsumi, T., ... Lin, G. (2014). Advanced CD-SEM metrology for pattern roughness and local placement of lamellar DSA (Vol. 9050, p. 90501T–90501T–11). <http://doi.org/10.1117/12.2060924>
- Keen, I., Yu, A., Cheng, H.-H., Jack, K. S., Nicholson, T. M., Whittaker, A. K., & Blakey, I. (2012). Control of the Orientation of Symmetric Poly(styrene)-block-poly(d,l-lactide) Block Copolymers Using Statistical Copolymers of Dissimilar Composition. *Langmuir*, 28(45), 15876–15888. <http://doi.org/10.1021/la304141m>
- Khusnatdinov, N., Ye, Z., Luo, K., Stachowiak, T., Lu, X., Irving, J. W., ... Sreenivasan, S. V. (2014). High-throughput jet and flash imprint lithography for advanced semiconductor memory (Vol. 9049, pp. 904910-904910–7). <http://doi.org/10.1117/12.2048189>
- Kim, H.-C., Park, S., & Hinsberg, W. D. (2010). Block Copolymer Based Nanostructures: Materials, Processes, and Applications to Electronics. *Chemical Reviews*, 110(1), 146–177. <http://doi.org/10.1021/cr900159v>
- Kim, J., Yin, J., Cao, Y., Her, Y., Petermann, C., Wu, H., ... Lin, G. (2015). Toward high-performance quality meeting IC device manufacturing requirements with AZ SMART DSA process. In D. J. Resnick & C. Bencher (Eds.), (p. 94230R). <http://doi.org/10.1117/12.2086160>
- Laachi, N., Delaney, K. T., Kim, B., Hur, S.-M., Bristol, R., Shykind, D., ... Fredrickson, G. H. (2015). Self-consistent field theory investigation of directed self-assembly in cylindrical confinement. *Journal of Polymer Science Part B: Polymer Physics*, 53(2), 142–153. <http://doi.org/10.1002/polb.23452>
- Leibler, L. (1980). Theory of Microphase Separation in Block Copolymers. *Macromolecules*, 13(6), 1602–1617. <http://doi.org/10.1021/ma60078a047>
- Lin, B. J. (2004). Immersion lithography and its impact on semiconductor manufacturing. *Journal of Micro/Nanolithography, MEMS, and MOEMS*, 3(3), 377–395. <http://doi.org/10.1117/1.1756917>
- Liu, C.-C. C., Franke, E., Lie, F. L., Sieg, S., Tsai, H., Lai, K., ... Colburn, M. (2016). DSA patterning options for FinFET formation at 7nm node. In Christopher Bencher & J. Y. Cheng (Eds.), (p. 97770R). <http://doi.org/10.1117/12.2219670>
- Liu, C.-C., Nealey, P. F., Raub, A. K., Hakeem, P. J., Brueck, S. R. J., Han, E., & Gopalan, P. (2010). Integration of block copolymer directed assembly with 193 immersion lithography. *Journal of Vacuum Science & Technology B*, 28(6), C6B30–C6B34. <http://doi.org/10.1116/1.3501348>
- Luo, Y., Montarnal, D., Kim, S., Shi, W., Barteau, K. P., Pester, C. W., ... Hawker, C. J. (2015). Poly(dimethylsiloxane-b-methyl methacrylate): A Promising Candidate for Sub-10 nm Patterning. *Macromolecules*, 48(11), 3422–3430. <http://doi.org/10.1021/acs.macromol.5b00518>
- Ma, Y., Lei, J., Andres Torres, J., Hong, L., Word, J., Fenger, G., ... Vanderberghe, G. (2015). Directed self-assembly graphoepitaxy template generation with immersion lithography.

- Journal of Micro/Nanolithography, MEMS, and MOEMS*, 14(3), 031216–031216.  
<http://doi.org/10.1117/1.JMM.14.3.031216>
- Maiez-Tribut, S. (2007). *Relations entre la structure d'un copolymère à blocs et la nanostructuration d'un polymère réticulé*. INSA.
- Mansky, P., Russell, T. P., Hawker, C. J., Pitsikalis, M., & Mays, J. (1997). Ordered Diblock Copolymer Films on Random Copolymer Brushes. *Macromolecules*, 30(22), 6810–6813.  
<http://doi.org/10.1021/ma970675v>
- Mehrfachstrukturierung. (2016). In *Wikipedia*. Retrieved from  
<https://de.wikipedia.org/w/index.php?title=Mehrfachstrukturierung&oldid=160924709>
- Mojarad, N., Hojeij, M., Wang, L., Gobrecht, J., & Ekinici, Y. (2015). Single-digit-resolution nanopatterning with extreme ultraviolet light for the 2.5 nm technology node and beyond. *Nanoscale*, 7(9), 4031–4037. <http://doi.org/10.1039/C4NR07420C>
- Moulis, S. (2014). *Lithographie par division de pas de réseau pour les circuits logiques avancés*. INSA.
- Muramatsu, M., Nakano, T., Tomita, T., Yamamoto, K., Matsuzaki, K., & Kitano, T. (2014). Simulation analysis of directed self-assembly for hole multiplication in guide pattern (Vol. 9049, pp. 904921-904921–14). <http://doi.org/10.1117/12.2045865>
- Neisser, M., & Wurm, S. (2015). ITRS lithography roadmap: 2015 challenges. *Advanced Optical Technologies*, 4(4), 235–240. <http://doi.org/10.1515/aot-2015-0036>
- Okabe, K., Yi, H., Tung, M. C., Tiberio, R., Bekaert, J., Gronheid, R., & Wong, H.-S. P. (2015). Cross-sectional imaging of directed self-assembly block copolymers (Vol. 9423, pp. 942318-942318–9). <http://doi.org/10.1117/12.2087569>
- Oria, L., Ruiz de Luzuriaga, A., Alduncin, J. A., & Perez-Murano, F. (2013). Polystyrene as a brush layer for directed self-assembly of block co-polymers. *Microelectronic Engineering*, 110, 234–240. <http://doi.org/10.1016/j.mee.2012.12.006>
- Park, C., Yoon, J., & Thomas, E. L. (2003). Enabling nanotechnology with self assembled block copolymer patterns. *Polymer*, 44(22), 6725–6760.  
<http://doi.org/10.1016/j.polymer.2003.08.011>
- Park, S.-M., Park, O.-H., Cheng, J. Y., Rettner, C. T., & Kim, H.-C. (2008). Patterning sub-10 nm line patterns from a block copolymer hybrid. *Nanotechnology*, 19(45), 455304.  
<http://doi.org/10.1088/0957-4484/19/45/455304>
- Pathangi, H., Van Den Heuvel, D., Bayana, H., Bouckou, L., Brown, J., Parisi, P., & Gosain, R. (2015). The use of eDR-71xx for DSA defect review and automated classification (Vol. 9424, p. 94242F–94242F–8). <http://doi.org/10.1117/12.2085902>
- Rodwogin, M. D., Spanjers, C. S., Leighton, C., & Hillmyer, M. A. (2010). Poly(lactide)–Poly(dimethylsiloxane)–Poly(lactide) Triblock Copolymers as Multifunctional Materials for Nanolithographic Applications. *ACS Nano*, 4(2), 725–732.  
<http://doi.org/10.1021/nn901190a>

- Ruiz, R., Kang, H., Detcheverry, F. A., Dobisz, E., Kercher, D. S., Albrecht, T. R., ... Nealey, P. F. (2008). Density Multiplication and Improved Lithography by Directed Block Copolymer Assembly. *Science*, 321(5891), 936–939. <http://doi.org/10.1126/science.1157626>
- Russell, T. P., Hjelm, R. P., & Seeger, P. A. (1990). Temperature dependence of the interaction parameter of polystyrene and poly(methyl methacrylate). *Macromolecules*, 23(3), 890–893. <http://doi.org/10.1021/ma00205a033>
- Ryu, D. Y., Ham, S., Kim, E., Jeong, U., Hawker, C. J., & Russell, T. P. (2009). Cylindrical Microdomain Orientation of PS-b-PMMA on the Balanced Interfacial Interactions: Composition Effect of Block Copolymers. *Macromolecules*, 42(13), 4902–4906. <http://doi.org/10.1021/ma900110w>
- Sanchez, D., Hirschberger, B., Bouckou, L., Moreau, O., & Parisi, P. (2015). Accelerated technology development by the use of critical point imaging SEM (Vol. 9424, p. 94242H–94242H–6). <http://doi.org/10.1117/12.2073889>
- Sarma, C. (2016). *LAB to FAB: The DSA Journey*. Presented at the 2nd DSA Symposium.
- Sayan, S., Chan, B. T., Gronheid, R., Van Roey, F., Kim, M.-S., Williamson, L., & Nealey, P. (2014). Directed self-assembly process integration: Fin patterning approaches and challenges. In T. I. Wallow & C. K. Hohle (Eds.), (p. 90510M). <http://doi.org/10.1117/12.2047268>
- Sayan, S., Marzook, T., Chan, B., Vandenbroeck, N., Singh, A., Laidler, D., ... Juncker, A. (2016). Toward sub-20nm pitch Fin patterning and integration with DSA. In C. K. Hohle & T. R. Younkin (Eds.), (p. 97790R). <http://doi.org/10.1117/12.2220120>
- Seidel, R., Rincon Delgadillo, P., Ramirez-Hernandez, A., Wu, H., Her, Y., Yin, J., ... de Pablo, J. (2014). Investigation of cross-linking poly(methyl methacrylate) as a guiding material in block copolymer directed self-assembly (Vol. 9051, p. 90510K–90510K–10). <http://doi.org/10.1117/12.2048179>
- Seino, Y., Kasahara, Y., Sato, H., Kobayashi, K., Miyagi, K., Minegishi, S., ... Azuma, T. (2015). A novel simple sub-15 nm line-and-space patterning process flow using directed self-assembly technology. *Microelectronic Engineering*, 134, 27–32. <http://doi.org/10.1016/j.mee.2015.01.031>
- Seino, Y., Sato, H., Kasahara, Y., Minegishi, S., Miyagi, K., Kubota, H., ... Nomura, S. (2016). Sub-10nm lines and spaces patterning using grapho-epitaxial directed self-assembly of lamellar block copolymers. In Christopher Bencher & J. Y. Cheng (Eds.), (p. 97771T). <http://doi.org/10.1117/12.2218787>
- Singh, A., Nam, J., Lee, J., Chan, B. T., Wu, H., Yin, J., ... Gronheid, R. (2016). Manufacturability of dense hole arrays with directed self-assembly using the CHIPS flow (Vol. 9777, p. 97770P–97770P–9). <http://doi.org/10.1117/12.2219261>
- Sinturel, C., Bates, F. S., & Hillmyer, M. A. (2015). High  $\chi$ –Low N Block Polymers: How Far Can We Go? *ACS Macro Letters*, 4(9), 1044–1050. <http://doi.org/10.1021/acsmacrolett.5b00472>

- Slot, E., Wieland, M. J., de Boer, G., Kruit, P., ten Berge, G. F., Houkes, A. M. C., ... Kampherbeek, B. J. (2008). MAPPER: high throughput maskless lithography (Vol. 6921, p. 69211P–69211P–9). <http://doi.org/10.1117/12.771965>
- Solid State Technology. (2011). Panasonic Gate-First HKMG also First Out of the Gate. Retrieved from [http://electroiq.com/chipworks\\_real\\_chips\\_blog/2011/03/](http://electroiq.com/chipworks_real_chips_blog/2011/03/)
- Solid State Technology. (2014). Intel's 14nm Parts are Finally Here! Retrieved from [http://electroiq.com/chipworks\\_real\\_chips\\_blog/2014/10/27/intels-14nm-parts-are-finally-here/](http://electroiq.com/chipworks_real_chips_blog/2014/10/27/intels-14nm-parts-are-finally-here/)
- Sweat, D. P., Kim, M., Larson, S. R., Choi, J. W., Choo, Y., Osuji, C. O., & Gopalan, P. (2014). Rational Design of a Block Copolymer with a High Interaction Parameter. *Macromolecules*, 47(19), 6687–6696. <http://doi.org/10.1021/ma501597g>
- Tiron, R., Gharbi, A., Argoud, M., Chevalier, X., Belledent, J., Pimenta Barros, P., ... Pieczulewski, C. (2013). The potential of block copolymer's directed self-assembly for contact hole shrink and contact multiplication (Vol. 8680, pp. 868012–868012–11). <http://doi.org/10.1117/12.2011477>
- Tiron, R., Gharbi, A., Pimenta Barros, P., Bouanani, S., Lapeyre, C., Bos, S., ... Fleury, G. (2015). Template affinity role in CH shrink by DSA planarization (Vol. 9423, pp. 942317–942317–11). <http://doi.org/10.1117/12.2085819>
- Tsai, H., Pitera, J. W., Miyazoe, H., Bangsaruntip, S., Engelmann, S. U., Liu, C.-C., ... Guillorn, M. A. (2014). Two-Dimensional Pattern Formation Using Graphoepitaxy of PS-b-PMMA Block Copolymers for Advanced FinFET Device and Circuit Fabrication. *ACS Nano*, 8(5), 5227–5232. <http://doi.org/10.1021/nn501300b>
- Van Dijk, M. A., & Van Den Berg, R. (1995). Ordering Phenomena in Thin Block Copolymer Films Studied Using Atomic Force Microscopy. *Macromolecules*, 28(20), 6773–6778. <http://doi.org/10.1021/ma00124a011>
- Voisin, P. (2007). *Lithographie de nouvelle génération par nanoimpression assistée par UV : étude et développement de matériaux et procédés pour l'application microélectronique*. Université Joseph Fourier de Grenoble.
- Von Trapp, F. (2015). Executive Interview: Bill Bottoms Talks about Revamping the ITRS Roadmap. Retrieved January 16, 2017, from <http://www.3dincites.com/2015/03/executive-interview-bill-bottoms-talks-revamping-itrs-roadmap/>
- Walton, D. G., Kellogg, G. J., Mayes, A. M., Lambooy, P., & Russell, T. P. (1994). A free energy model for confined diblock copolymers. *Macromolecules*, 27(21), 6225–6228.
- Wan, L., Ruiz, R., Gao, H., Patel, K. C., Albrecht, T. R., Yin, J., ... Lin, G. (2015). The Limits of Lamellae-Forming PS-b-PMMA Block Copolymers for Lithography. *ACS Nano*, 9(7), 7506–7514. <http://doi.org/10.1021/acsnano.5b02613>

- Wu, B., & Kumar, A. (2014). Extreme ultraviolet lithography and three dimensional integrated circuit—A review. *Applied Physics Reviews*, 1(1), 011104. <http://doi.org/10.1063/1.4863412>
- Wuister, S., Druzhinina, T., Ambesi, D., Laenens, B., Yi, L. H., & Finders, J. (2014). Influence of litho patterning on DSA placement errors (Vol. 9049, p. 90491O–90491O–13). <http://doi.org/10.1117/12.2048065>
- Wuister, S. F., Ambesi, D., Druzhinina, T. S., Peeters, E., Finders, J., Wolterink, J. K., & Fraaije, J. G. E. M. (Hans). (2014). Fundamental study of placement errors in directed self-assembly. *Journal of Micro/Nanolithography, MEMS, and MOEMS*, 13(3), 033005–033005. <http://doi.org/10.1117/1.JMM.13.3.033005>
- Xiao, Z., Du, Y., Wong, M. D. F., Yi, H., Wong, H. S. P., & Zhang, H. (2015). Contact pitch and location prediction for Directed Self-Assembly template verification. In *The 20th Asia and South Pacific Design Automation Conference* (pp. 644–651). <http://doi.org/10.1109/ASPDAC.2015.7059081>
- Yi, H., Bao, X.-Y., Tiberio, R., & Wong, H.-S. P. (2015). A General Design Strategy for Block Copolymer Directed Self-Assembly Patterning of Integrated Circuits Contact Holes using an Alphabet Approach. *Nano Letters*, 15(2), 805–812. <http://doi.org/10.1021/nl502172m>
- Yi, H., Bao, X.-Y., Zhang, J., Bencher, C., Chang, L.-W., Chen, X., ... Wong, H.-S. P. (2012). Flexible Control of Block Copolymer Directed Self-Assembly using Small, Topographical Templates: Potential Lithography Solution for Integrated Circuit Contact Hole Patterning. *Advanced Materials*, 24(23), 3107–3114. <http://doi.org/10.1002/adma.201200265>
- Zeggaoui, N. (2011). *La lithographie par double impression pour les noeuds technologiques avancés*. Université de Grenoble.

## Chapitre II- Matériels et méthodes

---

Ce chapitre est consacré à l'explication en détail des moyens mis en œuvre pour implémenter le procédé DSA par grapho-épitaxie et des méthodes d'analyses employées pour évaluer leurs propriétés lithographiques. Dans une première partie, les empilements technologiques et les matériaux utilisés sont présentés ainsi que le procédé DSA mis en place, de la définition des motifs de guidages jusqu'au procédé de planarisation, en passant par la description de l'étape de fonctionnalisation des surfaces des motifs de guidage. La seconde partie de ce chapitre décrit le protocole de mesures des performances DSA mis en œuvre pour évaluer les différents procédés étudiés par la suite. En particulier, la mise en place de la méthodologie de mesure de l'erreur de placement des contacts DSA dans le guide constitue une partie importante des travaux de cette thèse.

---



<b>CHAPITRE II- MATERIELS ET METHODES .....</b>	<b>47</b>
II.1 LE PROCEDE DSA PAR GRAPHOEPIITAXIE.....	51
III.1 <i>L'empilement technologique</i> .....	51
III.2 <i>Définition des motifs de guidage</i> .....	52
III.3 <i>La fonctionnalisation des surfaces de guidage</i> .....	54
III.4 <i>Le procédé de planarisation</i> .....	57
III.5 <i>Les matériaux</i> .....	58
II.2 PROTOCOLE D'ÉVALUATION DES PERFORMANCES LITHOGRAPHIQUES.....	61
II2.1 <i>Les dimensions critiques et leur dispersion</i> .....	61
II2.2 <i>La défektivité</i> .....	64
II22.A Détermination du HOY .....	66
II22.B Inspections « mésoscopique » .....	67
II22.C Inspection « CPI » .....	68
II2.3 <i>L'erreur de placement des contacts DSA</i> .....	70
II23.A Algorithme de détection de contour .....	72
II23.B Images de référence .....	75
II23.C Qualification de l'algorithme de détection de contour.....	77
II23.D Résumé des paramètres optimisés de mesure d'erreur de placement .....	81
II23.E Cas du dédoublement de contacts : mesure du pitch DSA .....	82
II.3 CONCLUSION .....	83
BIBLIOGRAPHIE.....	84



## II.1 Le procédé DSA par grapho-épitaxie

Le DSA est l'association d'une technique de lithographie conventionnelle « top-down » pour définir les motifs de guidage et des propriétés « bottom-up » des copolymères à blocs pour réduire leur dimension et augmenter leur densité. Dans le cadre d'une application du DSA pour le niveau « VIA 0x » (*Vertical Interconnection Access*) du nœud C014 développé à STMicroelectronics, l'approche grapho-épitaxie pour diriger l'auto-assemblage des copolymères est privilégiée puisqu'elle se rapproche de ce qui a déjà été développé pour les nœuds technologiques moins avancés. Le procédé DSA implique une succession d'étapes technologiques qui sont décrites dans le schéma suivant (cf. figure II-1). Une première lithographie (1) suivie de deux gravures successives et d'une éventuelle fonctionnalisation de surface (2 et 3) permet de définir les guides dans un masque dur et leur affinité de surface. Le copolymère à blocs PS-*b*-PMMA est ensuite déposé en surépaisseur de la plaque par « spin-coating » (4) puis auto-assemblé par recuit thermique (5). Une dernière étape de rétro-gravure permet à la fois d'enlever la couche de copolymère en surépaisseur et de révéler les motifs DSA par retrait de la phase PMMA dans le guide (6).

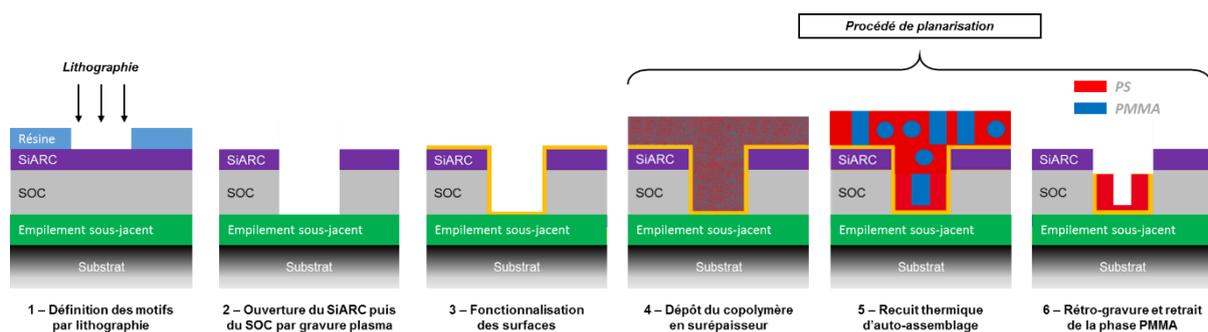


Figure II-1 : Schéma d'intégration du procédé DSA mis en place au CEA Leti.

### II.1.1 L'empilement technologique

En lithographie 193i, la résine est généralement utilisée en faible épaisseur (80-100 nm), ce qui n'est pas suffisant pour transférer entièrement les motifs dessinés par insolation dans les couches sous-jacentes. Le recours à un masque dur est donc nécessaire. Il doit répondre à certains critères spécifiques à la lithographie (propriété anti-réfléctive, résistance au solvant) mais aussi aux contraintes du DSA (résistance à la gravure du copolymère et au recuit d'auto-organisation à haute température). L'empilement « SiARC/SOC » est utilisé de manière courante en lithographie 193i et répond à tous ces critères, c'est pourquoi nous l'avons choisi comme masque dur pour les procédés DSA. Le SiARC et le SOC sont des produits commercialisés fournis par JSR.

Le SiARC est une couche à base de silicium (*Si containing Anti Reflective Coating*) qui sert d'anti-réfléctif : il limite les réflexions multiples du faisceau lumineux sur la résine qui augmentent entre autres la rugosité des motifs imprimés. Le SOC (*Spin-On Carbon*) est une couche de polymères composée principalement de carbone, comme c'est le cas de la résine. Le SiARC est de nature chimique différente de celle de la résine et du SOC : la résine est peu consommée pendant l'ouverture du SiARC, et le SiARC est résistant à la gravure du SOC. Le dépôt de ces matériaux se fait par « spin-coating », ils sont donc très simples d'utilisation [Wei 2011].

Dans le schéma d'intégration des « VIA 0x » du C014 mis en place à STMicroelectronics, les contacts après DSA doivent être transférés dans une double couche de nitrure de titane (TiN) puis d'oxyde de silicium (SiO<sub>2</sub> aussi appelé LTO pour *Low Temperature Oxide*). Cet empilement technologique complet a donc été utilisé pour faire la démonstration du procédé DSA pour l'application type « shrink de contact ». Cependant, les dépôts de TiN et de LTO nécessitent des infrastructures et un procédé plus complexe que les dépôts par « spin-coating » des matériaux SiARC et SOC. Pour les tests morphologiques préliminaires s'arrêtant après l'étape DSA, nous avons donc choisi de travailler sur l'empilement SiARC/SOC, plus simple à mettre en œuvre. Les épaisseurs des couches pour les deux empilements sont résumées dans le tableau ci-dessous (cf. tableau II-1).

<i>De haut en bas</i>		<b>Empilement des guides</b>			<b>Empilement sous-jacent</b>	
<b>Tests morphologiques préliminaires</b>	<i>Composition</i>	Résine	SiARC	SOC	SiARC	SOC
	<i>Épaisseur (nm)</i>	50	30	90	30	90
<b>Intégration « VIA 0x »</b>	<i>Composition</i>	Résine	SiARC	SOC	TiN	LTO
	<i>Épaisseur (nm)</i>	100	35	135	20	30

Tableau II-1 : Récapitulatif des empilements technologiques utilisés (et les épaisseurs associées) dans le procédé DSA par graphoépitaxie.

Comme cela sera explicité par la suite, le changement d'empilement technologique n'a pas de réel impact sur les performances lithographiques du DSA. D'autant plus, le transfert par gravure des motifs DSA en surface libre (c'est-à-dire sur surface non structurée) a été démontré sur les deux empilements sous-jacents (SiARC/SOC et TiN/LTO). Les tests faits avec l'empilement sous-jacent « SiARC/SOC » ont donc servi de références pour développer le procédé DSA sur l'empilement « TiN/LTO ».

## II.1.2 Définition des motifs de guidage

Les premiers tests de procédé DSA ont été menés au CEA Leti sur plaque 300 mm avec une lithographie e-beam pour les guides (avec l'empilement « double SiARC/SOC »). Bien que plus

lente que la lithographie 193i, elle permet de s'affranchir d'un masque coûteux et permet d'atteindre des dimensions plus agressives (résolution minimale :  $CD/pitch_{193i} = [50 \text{ nm} ; 100 \text{ nm}]$  contre  $CD/pitch_{e\text{-beam}} = [30 \text{ nm} ; 60 \text{ nm}]$ ). La lithographie e-beam permet également une liberté plus grande dans la variation des dessins à imprimer d'une campagne de tests à l'autre par rapport à un masque de lithographie 193i. Lorsqu'elle est faite en e-beam, l'étape de lithographie est réalisée au CEA Leti sur l'équipement VISTEC SB3054DW avec une tension d'accélération de 50 kV et une densité de courant de  $20 \text{ A.cm}^{-2}$ . Le temps d'écriture varie entre 1 et 4 h par plaque dans notre cas selon la complexité des dessins à imprimer.

L'analyse de ces premières plaques a conduit à la création d'un masque de lithographie 193i dimensionné en fonction des besoins des procédés DSA développés mais en cohérence avec les règles de dessin pour la lithographie optique. La lithographie 193i faite à STMicroelectronics est celle utilisée pour la fabrication des puces électroniques et remplit donc les besoins de la production de masse en termes de cadence de production. Afin de démontrer le potentiel du procédé DSA et en particulier le transfert des contacts DSA par gravure sur une intégration réelle, le passage à la lithographie 193i est accompagnée du changement d'empilement technologique pour privilégier les couches « TiN/LTO ». La lithographie 193 nm à immersion est réalisée à STMicroelectronics sur un équipement TEL Lithius connecté à un scanner ASML AT. Durant cette étape, une résine à tonalité négative (NTD pour *Negative Tone Development*) est utilisée. Il s'agit d'une résine à amplification chimique dont l'exposition à la lumière entraîne une dé-protection et un changement de la solubilité de la résine exposée. Lorsqu'elle est développée sous solvant, ce qui est exposé est conservé sur la plaque (contrairement à une résine positive). Ce comportement permet d'exposer de grandes zones, d'augmenter à la fois le contraste de la résine et la résolution des motifs en contournant la difficulté à résoudre de petites dimensions [De Simone 2011]. Après développement, les plaques sont contrôlées une première fois au microscope électronique à balayage (CD-SEM pour *Critical Dimension-Scanning Electron Microscope*) par les équipes de lithographie à STMicroelectronics puis envoyées en salle blanche au CEA Leti pour des analyses plus poussées et pour continuer le procédé DSA.

L'ouverture des guides dans le SiARC puis dans le SOC se fait sur un équipement de gravure plasma commercialisé par LamResearch (Kiyo FX) et présent dans la salle blanche du CEA Leti. Les plasmas utilisés permettent une gravure anisotrope (unidirectionnelle) afin d'obtenir un meilleur contrôle dimensionnel. Le détail des recettes de gravure du « SiARC/SOC » (développés dans la thèse de A. Sarrazin) est donné dans le tableau ci-dessous [Sarrazin 2017] (cf. tableau II-2).

	Gaz (débit en sccm)	Temps (s)	Pression (mTorr)	Puissance de la source (W)	Tension d'auto- polarisation (V)
Gravure du SiARC	CH <sub>2</sub> F <sub>2</sub> (20)/CF <sub>4</sub> (40)/ He (240)	18	7	200	600
Gravure du SOC	HBr (35)/O <sub>2</sub> (50)	22	5	533	450

Tableau II-2 : Détails des recettes de gravure plasma permettant la formation de motifs dans le SOC après la lithographie (d'après [Sarrazin 2017]).

### II.3 La fonctionnalisation des surfaces de guidage

L'état de la surface sur laquelle est déposé le copolymère influence l'auto-organisation de ce dernier. En effet, si les guides présentent une affinité préférentielle avec l'une des deux phases du copolymère, c'est cette phase spécifique qui va migrer à l'interface avec le guide. La morphologie finale du copolymère à blocs à l'état d'équilibre ainsi que les conditions de commensurabilité (la taille du guide optimale en fonction de la période intrinsèque du copolymère pour une structure à l'équilibre sans défauts) sont fortement corrélées avec l'affinité de surface des guides. Cette affinité de surface est évaluée quantitativement via la mesure d'énergie de surface par mesure d'angles de goutte. Dans notre cas, nous avons déterminé les énergies de surfaces des matériaux composant les empilements technologiques utilisés pour le DSA soit par des mesures soit en nous basant sur des valeurs publiées dans la littérature. Les mesures sont faites sur plaque de silicium non structurées et préparée dans les mêmes conditions que les échantillons DSA mesurés par la suite (cf. tableau II-3).

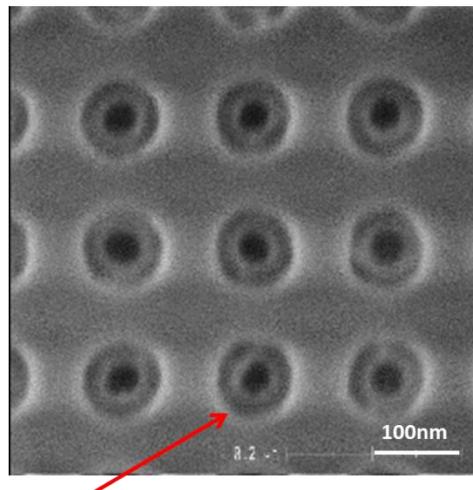
<i>Angle de goutte par rapport à l'eau (à 20°C)</i>	<b>PS</b> [Wu 1970]	<b>PMMA</b> [Wu 1970]	<b>SiARC</b> (mesure)	<b>SOC</b> (mesure)	<b>TiN</b> [Sun 2006]
<b>Composante dispersive</b> $\gamma_s^d$	32.5	29.6	27.8	29.6	13
<b>Composante polaire</b> $\gamma_s^p$	8.1	11.5	16.4	21.2	50.2
<b>Energie de surface</b> $\gamma_s = \gamma_s^p + \gamma_s^d$ (mJ.m <sup>-2</sup> )	40.6	41.1	44.2	50.9	63.2

Tableau II-3 : Mesure des énergies de surface des différents matériaux.

Plus un matériau a une énergie de surface proche de celle d'un des blocs, plus il présente d'affinité avec ce bloc. Le SiARC, le SOC et le TiN présentent tous les trois une énergie de surface plus proche de celle du PMMA que de celle du PS. Ainsi, il s'avère que sans aucun traitement préalable, les parois des guides (les bords et le fond de cavité) sont plutôt d'affinité PMMA. Le procédé le plus simple à mettre en œuvre est donc le procédé que nous appellerons « PMMA-affine » puisqu'aucune préparation de surface n'est nécessaire. Afin d'uniformiser l'état de surface des guides, il aurait été aussi judicieux de greffer à la surface un homo-PMMA. Malheureusement, ce type de produit n'était pas disponible au moment de l'étude. La littérature rapporte plusieurs études autour de l'affinité « PMMA » avec l'utilisation d'un matériau inorganique comme guide (SiO<sub>2</sub> entre autres), plus inerte chimiquement que le SOC [Bencher 2012] [Bekaert 2015]. De plus, l'utilisation d'un matériau inorganique offre la possibilité de faire des « recyclages » : si l'étape DSA n'est pas conforme, il est possible de nettoyer la surface du substrat sans altérer les guides et refaire ensuite l'étape DSA. Une approche avec un oxyde inorganique (SiO<sub>2</sub>) est en cours de développement au CEA Leti mais ne fera pas l'objet de cette thèse.

Le procédé « PMMA-affine », bien que réduisant le nombre d'étapes nécessaires au DSA, présente l'inconvénient de créer une couche de mouillage de PMMA doublée d'une couche de PS

sur les bords et en fond de cavité lors de l'assemblage du copolymère, comme le prédisent les simulations utilisant la méthode de calcul quantique prédictive (*Self-Consistent Field Theory* ou SCFT) [Laachi 2015] ou encore celles basées sur le modèle d'Ohta-Kawasaki (OK) qui traduit les phénomènes de diffusions des deux phases (PS et PMMA) à l'intérieur du guide [Ohta 1986][Gharbi 2016][Fukawatase 2014]. Ainsi, lors du retrait sélectif du PMMA par rapport au PS, la matrice de PS à l'intérieur du guide peut potentiellement se déformer si la couche de PMMA est trop épaisse (cf. figure II-2). De plus, si la couche de PMMA en fond de cavité est trop épaisse, elle peut devenir un obstacle au transfert par gravure du motif DSA dans les couches sous-jacentes. En effet, la matrice de PS devra dans ce cas être entamée par gravure pour ouvrir les motifs jusqu'au substrat, réduisant ainsi le budget d'épaisseur du motif à transférer.

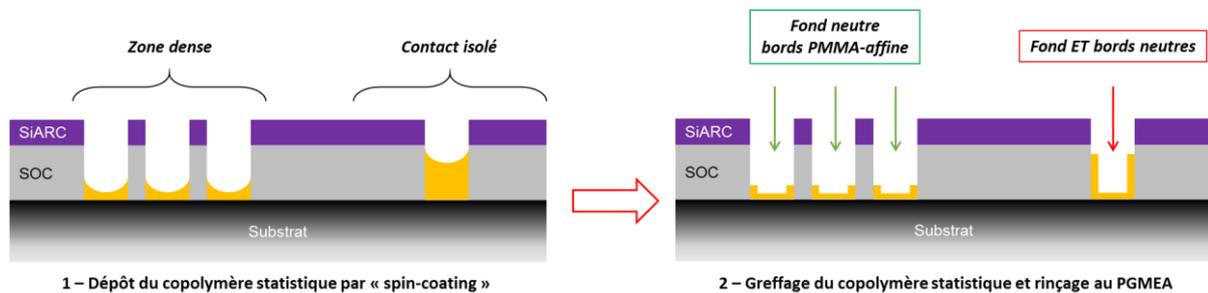


Collerette foncée : le PMMA en bord de cavité a été retiré.

**Figure II-2 : Image CD-SEM en vue de dessus mettant en évidence un décollement de la matrice de PS après le retrait de la phase PMMA pour un copolymère PS-*b*-PMMA cylindrique dans une intégration de type « PMMA-affine ».**

Afin de contrôler davantage l'assemblage du copolymère en fond de cavité et de réduire la couche résiduelle, une des solutions pouvant être adoptées est le dépôt d'un matériau d'affinité « neutre » (pas d'affinité préférentielle avec le PS ou le PMMA) en couche fine seulement en fond de cavité. Pour cela, un copolymère statistique PS-*r*-PMMA très dilué (concentration en solution à 0.5 %) est déposé par « spin-coating », greffé par recuit thermique (10 min à 230 °C) sur la surface structurée puis le surplus est rincé au solvant PGMEA (acétate de l'éther monométhyle du propylène glycol). La composition du copolymère statistique en PS et en PMMA se rapproche de la proportion de ces derniers dans le copolymère à blocs à assembler (environ 70:30 pour un cylindrique). Cette technique permet de différencier l'affinité des bords de celle du fond des cavités. Cependant, l'épaisseur de PS-*r*-PMMA dans les cavités après le « spin-coating » dépend de la densité des motifs qui n'est pas uniforme sur la plaque avec cette concentration massique très faible. Donc après rinçage, le greffage en dépendra aussi puisque là où le copolymère statistique est en grand quantité dans les guides, le greffage se fera aussi en bord de cavité (cf. figure II-3). Ce procédé dit

« d'affinité neutre » permet d'avoir un contact débouchant sur une couche résiduelle d'épaisseur contrôlée mais l'affinité des bords peut, quant à elle, varier d'un contact à l'autre en fonction de la densité et conduire à des défauts d'assemblage comme prédit par simulation (le polymère s'organise perpendiculairement aux bords) comme le prédisent les simulations de Laachi *et al.* [Laachi 2015].



**Figure II-3 : Représentation schématique de l'étape de dépôt de copolymère statistique et son effet sur les variations de densités des motifs sur la plaque. L'affinité des murs reste préférentielle au PMMA pour les contacts dans les zones denses mais est modifiée pour les contacts isolés.**

Ces deux affinités (« PMMA-affine » et « neutre ») nécessitent des tailles de guide relativement larges (environ 2 fois la période intrinsèque du polymère) puisque la distribution des chaînes le long de la cavité est assez similaire dans les deux cas. Afin d'adresser des dimensions plus agressives, une troisième intégration est envisagée : il s'agit d'une approche « PS-affine » où les bords et le fond de cavité ont une affinité préférentielle avec le bloc PS. Pour ce faire, un homopolystyrène (hPS) (concentration en solution à 2.9 %) est déposé en surépaisseur sur tout le substrat structuré afin de contourner le problème iso-dense rencontré avec le procédé « neutre ». Après recuit (10 min à 230 °C) puis rinçage au PGMEA, l'hPS<sub>g</sub> est greffé en couche fine d'environ 8 – 10 nm sur le fond et les bords des cavités de guidage. A son tour, le copolymère à blocs est déposé puis recuit pour amorcer l'auto-assemblage. Dans cette approche, il reste, comme pour l'affinité « PMMA », une couche de polymère en fond de cavité (ici de PS) qui empêche le motif de déboucher sur le substrat. Cependant, cette couche résiduelle est moindre et sera par conséquent moins problématique lors du transfert du motif.

En résumé, nous disposons de trois procédés permettant d'adresser des tailles de guides et des morphologies différentes que nous évaluerons dans les prochains chapitres. La figure suivante présente l'agencement des chaînes de copolymère dans les guides ainsi que les simulations des différentes affinités publiées dans la littérature (cf. figure II-4).

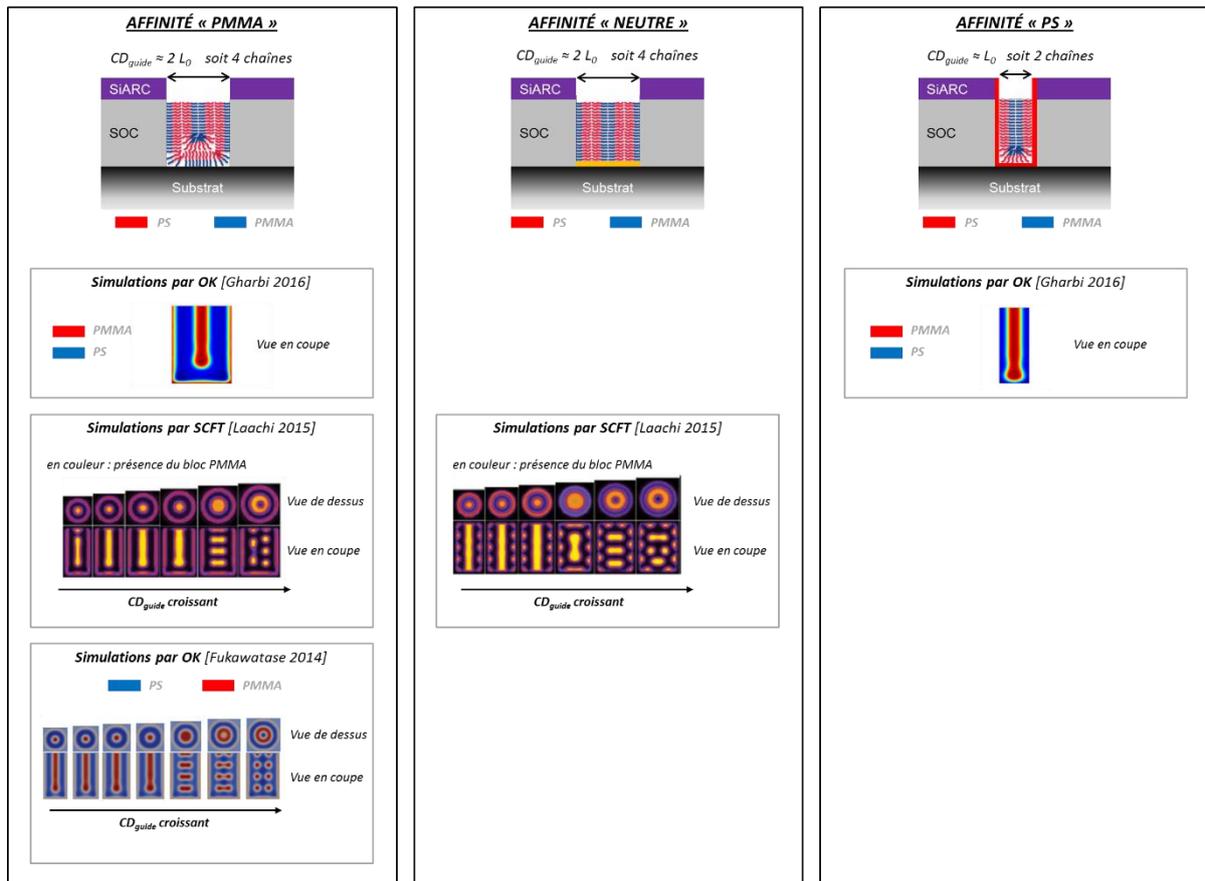


Figure II-4 : Représentation schématique des trois affinités : « PMMA-affine », « neutre » (en orange le copolymère statistique) et « PS-affine » (en rouge l'hPS<sub>g</sub> greffé) ainsi que la distribution des chaînes de copolymères à blocs dans la cavité pour les trois cas, tels que reportés dans la littérature : [Fukawatase 2014][Gharbi 2016][Laachi 2015]. L<sub>0</sub> est la période intrinsèque du copolymère à blocs utilisé.

### II.1.4 Le procédé de planarisation

Après la préparation de surface des guides, le copolymère à blocs est déposé dans les cavités par « spin-coating » et assemblé par recuit thermique. Cependant, la surface structurée n'est pas homogène en termes de densité de motifs. Ainsi, les cavités des zones denses seront moins remplies que les cavités isolées, ce qui entraîne des retards de gravure localisés lors du transfert des motifs DSA dans les couches sous-jacentes. Afin de transférer l'ensemble des motifs DSA de la plaque, les motifs dont le transfert est terminé vont donc être surgravés, ce qui donne lieu à une dégradation de l'uniformité des dimensions des contacts (cf. figure II-5).

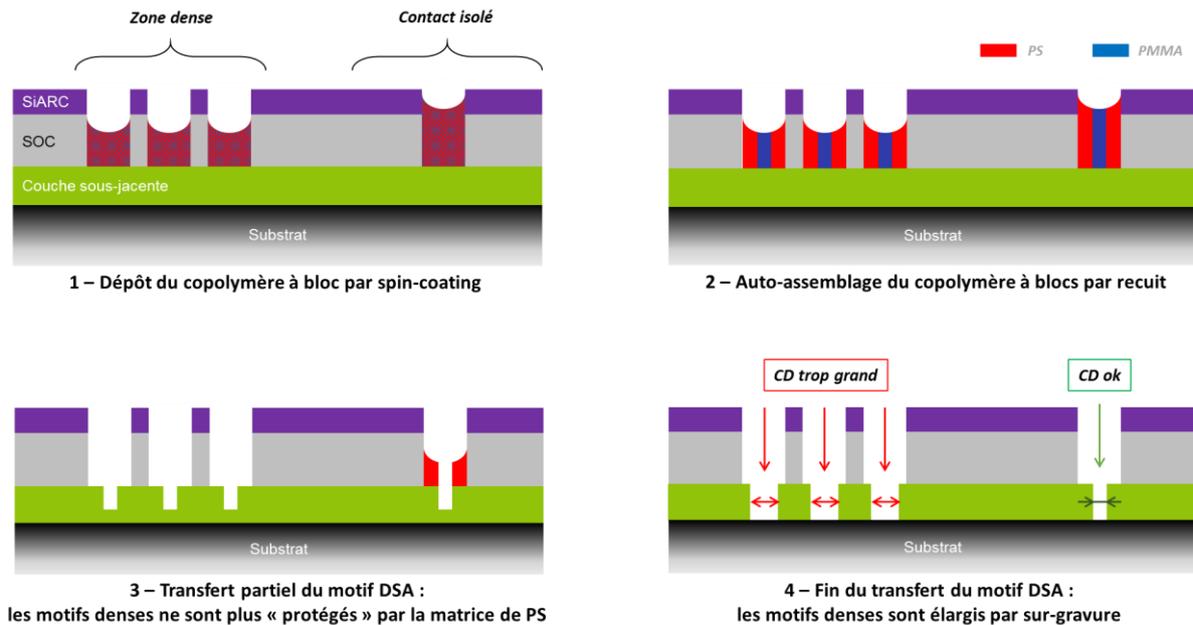


Figure II-5 : Représentation schématique du problème dépendant de la densité lors de l'étape DSA.

Afin de pallier à ce problème de dépendance à la densité, nous avons mis en œuvre un procédé dit de « planarisation » [Pimenta Barros 2015]. Le copolymère à blocs est déposé en surépaisseur sur le substrat structuré, ce qui assure un remplissage total de tous les motifs quelle que soit la densité. Il est ensuite recuit afin d'amorcer son auto-assemblage. Une « rétro-gravure » (*etch-back*) à base de plasma  $O_2$  enlève la surcouche de polymère, révélant ainsi les motifs DSA déjà auto-organisé dans les cavités. Puisqu'elle est légèrement sélective, cette étape permet de retirer en même temps la phase PMMA du copolymère (cf. figure II-1 étapes 4, 5 et 6).

## II.1.5 Les matériaux

Les copolymères à blocs et les sous-couches associées utilisés dans cette étude sont synthétisés par Arkema sous la marque Nanostrength® EO. Tous les matériaux utilisés pour le procédé DSA subissent une décontamination métallique afin d'être conformes aux exigences de la microélectronique et ainsi pouvoir être utilisés sur les pistes 300 mm « Front-End » (étapes technologiques avant la création des niveaux métalliques). Pour le dépôt par « spin-coating », ils sont systématiquement – si ce n'est pas déjà le cas à la réception du produit – dilués dans le solvant PGMEA.

Pour le procédé « PS-affine », un homopolystyrène greffable ( $hPS_g$ ) est utilisé pour fonctionnaliser la surface. Deux  $hPS_g$  différents ont été testé durant cette étude. Pour le procédé « neutre », un copolymère statistique PS-*r*-PMMA est déposé sur la surface. Les épaisseurs d' $hPS_g$  et de PS-*r*-PMMA greffés sont contrôlées sur surface libre par ellipsométrie. Après recuit thermique, un rinçage est fait au PGMEA afin de retirer le surplus de matériau non greffé.

Les caractéristiques des matériaux et du procédé sont résumés dans le tableau ci-dessous (cf. tableau II-4).

	Homopolystyrène (procédés « PS-affine »)		Copolymère statistique (procédé « neutre »)
	$hPS_g^{low}$	$hPS_g^{high}$	$PS-r-PMMA$
Masse molaire (kg.mol <sup>-1</sup> )	12	50	
Ratio PS:PMMA	100:0	100:0	70:30
Concentration en solution (% masse totale)	2.9	2	0.25
Vitesse de dépôt par « spin-coating » (tpm)	800	1000	2000
Temps de recuit (min)	10	10	10
Température de recuit (°C)	230	230	230
Épaisseur greffée (nm)	5 – 7	10 – 12	8

Tableau II-4 : Récapitulatif des propriétés des matériaux ainsi que des procédés de fonctionnalisation de surface.

Les copolymères à blocs poly(styrène-*bloc*-méthacrylate de méthyle) (noté PS-*b*-PMMA) cylindriques ont un ratio PS:PMMA de 70:30 et sont utilisés concentrés à 4 %. Les copolymères à blocs sont purifiés, c'est-à-dire que les homopolymères résiduels de la synthèse des matériaux ont été en grande partie éliminés. Cependant, il peut rester des traces d'homopolymères (en particulier d'hPS) dont la concentration est variable d'une solution à l'autre. Leurs effets sur le procédé feront l'objet d'une étude dans cette thèse.

Deux principaux copolymères à blocs sont étudiés ici : le C35 (cylindrique de période intrinsèque  $L_0=35$  nm environ) et le C43 (cylindrique  $L_0=43$  nm environ). Les périodes intrinsèques sont évaluées en déposant le copolymère à blocs en film mince sur surface libre. Pour ces tests, une fonctionnalisation préalable de la surface avec un copolymère statistique de composition PS:PMMA=70:30 est nécessaire afin d'assurer l'orientation perpendiculaire à la surface des nano domaines. Une dizaine d'images CD-SEM en vue de dessus est analysée par le logiciel « maison » *FreeCopoCyl* afin de mettre en évidence les joints de grains et calculer, par transformée de Fourier, la période intrinsèque du copolymère à blocs (cf. figure II-6).

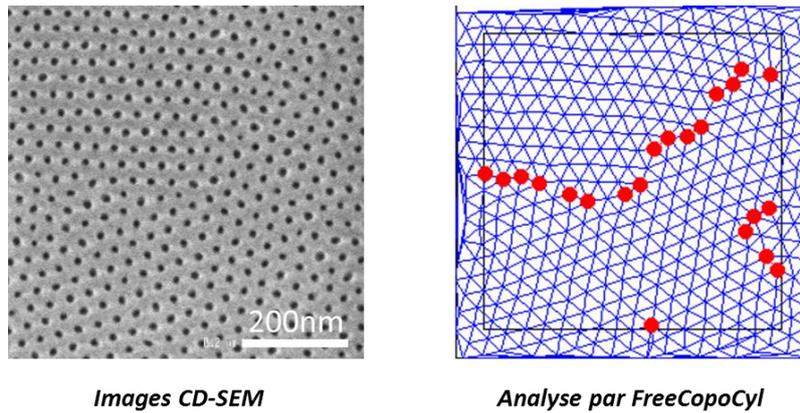


Figure II-6 : Exemples d'une analyse faite avec le logiciel FreeCopoCyl afin de déterminer le maillage intrinsèque du copolymère et en déduire sa période intrinsèque. A gauche : image CD-SEM d'un copolymère C35 sur surface libre. A droite : le résultat d'analyse par FreeCopoCyl avec, en bleu, le maillage hexagonale classique d'un copolymère cylindrique et, en rouge, les défauts (contacts ayant plus ou moins de 6 voisins proches) délimitant les grains.

Lorsqu'il s'agit de copolymères à blocs, plusieurs paramètres sont à considérer pour déterminer à quelle température le recuit doit être fait : la température de transition vitreuse  $T_g$ , la température de transition ordre-désordre  $T_{ODT}$ , et la température de dégradation du polymère  $T_{deg}$ . En dessous de  $T_g$  (autour de 100 °C pour le PS-*b*-PMMA), le polymère est solide et ne peut donc pas s'auto-assembler en nano domaines. La température  $T_{ODT}$  est la température à partir de laquelle une perte d'ordre à grande distance est observée. Elle dépend de la composition du copolymère mais aussi de  $L_0$  : elle est d'environ  $T_{ODT}=270 - 300$  °C pour le PS-*b*-PMMA C35. Au-delà de la température de dégradation, la structure du copolymère est altérée et il ne forme plus de nano domaines. Pour le PS-*b*-PMMA C35, elle est plus basse que la  $T_{ODT}$  et est donc limitante ( $T_{deg}= 260$  °C environ). Cependant, la  $T_{deg}$  peut être repoussée en effectuant des recuits plus courts ou sous atmosphère contrôlée [Harumoto 2017].

La température de recuit doit se situer entre les températures  $T_g$  et  $T_{deg}$ . En prenant en compte ce critère et les résultats d'une étude préliminaire en surface libre, nous avons décidé de fixer dans un premier temps les conditions du recuit thermique à 250 °C pendant 10 min pour le procédé de référence (approche « PS-affine »). La température et la durée du recuit sont deux paramètres à optimiser afin de trouver quelle énergie donner au système pour qu'il s'auto-assemble le mieux. Une étude complète relatant les effets de ces deux variables sur la qualité du procédé DSA est présentée dans les chapitres suivants.

## II.2 Protocole d'évaluation des performances lithographiques

Dans le cadre d'une application type contact pour les nœuds technologiques sub-10 nm, le procédé DSA doit remplir un certain nombre de spécifications dictées par l'ITRS [ITRS 2013] :

- l'uniformité de CD (CDU) des contacts DSA doit être inférieure à 2 nm,
- la défektivité ne doit pas dépasser 0.01 défaut.cm<sup>-2</sup> pour une application CPU/logique
- l'erreur de placement globale (guide et DSA) doit être inférieure à 4 nm

Afin d'évaluer, comparer et optimiser les différents procédés DSA, ces quatre paramètres doivent être contrôlés. Les paragraphes suivants développent la méthodologie associée à l'évaluation de la CDU<sub>DSA</sub>, de la défektivité à travers entre autres le taux d'ouverture de contacts (HOY pour *Hole Open Yield*) et l'analyse des contacts à grande échelle, de l'erreur de placement (PE pour *Placement Error*) pour le « shrink de contact » et du pitch pour le dédoublement de contacts.

### II.2.1 Les dimensions critiques et leur dispersion

La dimension critique (CD pour *Critical Dimension*) des contacts, soit leur diamètre moyen, est mesurée à partir d'images prises à l'aide du CD-SEM Hitachi HCG4000. La mesure peut se faire directement sur le CD-SEM (mesure « online ») ou en post-traitement avec le logiciel Terminal PC (mesure « offline »). Ce logiciel, fourni par Hitachi, est basé sur l'extraction de contours à partir du niveau de gris des images CD-SEM. Il est utilisé pour déterminer la taille des contacts DSA mais également celle des guides (cf. figure II-7). Il est à noter que la détermination du CD de guide n'est pas faite sur des images post-DSA mais sur les images post-ouverture de guide afin de s'affranchir de résidus de copolymères autour du guide qui pourraient masquer les contours de celui-ci et donc fausser l'évaluation de sa taille. Concernant les mesures post-DSA, celles-ci sont faites après retrait de la phase PMMA.

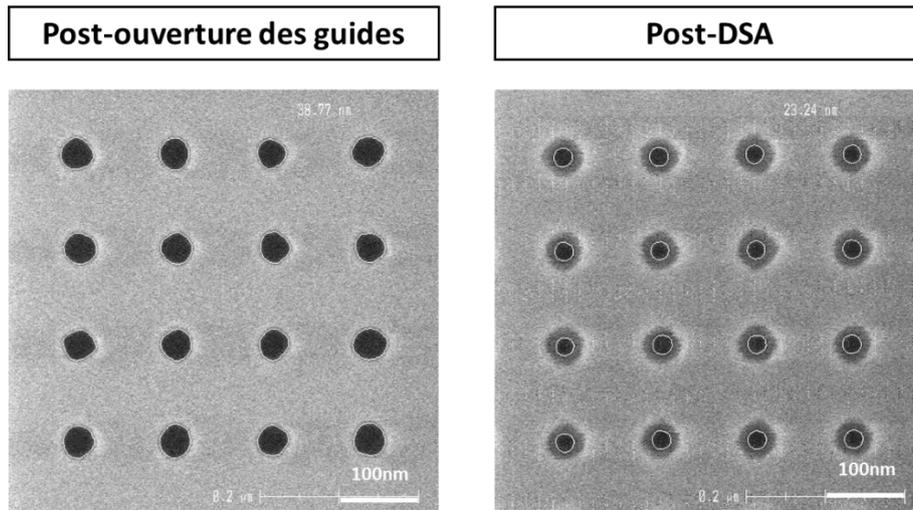


Figure II-7 : Exemple d'extraction de contour des contacts des motifs de guidage (à gauche) et des contacts DSA (à droite) sur des images CD-SEM.

Afin d'automatiser un maximum ces mesures, Terminal PC dispose d'un module de création de recettes de mesures. A partir d'une image de référence, la position des contacts sur l'image ainsi que le type d'objet à déterminer (cercle, ovale, ligne/espace...) sont enregistrés. Le groupe d'images issues de la même série d'acquisition est ensuite passé en revue par le logiciel afin d'en extraire le ou les CD. Le niveau de gris d'un set d'images à l'autre pouvant varier, une recette Terminal PC ne convient en général qu'à une campagne de mesures CD-SEM. Puisque la position des contacts sur l'image est importante pour le logiciel, il est parfois nécessaire lors de l'acquisition de l'image de recentrer les contacts. Pour ce faire, la zone à observer est une nouvelle fois balayée par le faisceau d'électrons ce qui altère un peu le copolymère et donc, dans une moindre mesure, la taille du contact DSA. Le recentrage est donc fait à très faible intégration pour éviter cela.

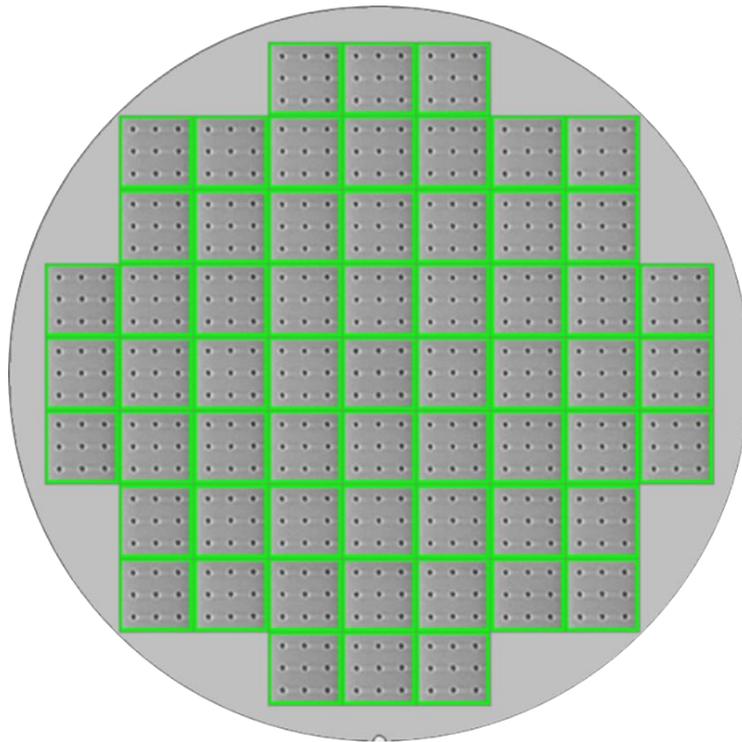
D'après le constructeur, le CD-SEM peut résoudre des objets dont la taille est supérieure à 15 nm. Nous avons évalué l'impact des différents paramètres d'acquisition d'images sur le taux de réussite de la mesure (le nombre de contours correctement déterminés sur le nombre total de contacts inspectés) et sur la reproductibilité de la mesure. Ainsi, en modifiant la tension d'accélération, le grossissement, la taille de pixel, le nombre d'images intégrées et le mode de scan, nous avons trouvé un compromis entre le temps d'acquisition et le besoin de précision sur l'image. L'influence des paramètres du logiciel sur la qualité de la détermination des contours a également été évaluée afin d'optimiser leur réglage. Les paramètres optimaux d'acquisition des images ainsi que le réglage des paramètres logiciel, différent pour la mesure des  $CD_{\text{guide}}$  et des  $CD_{\text{DSA}}$ , sont reportés dans le tableau ci-dessous (cf. tableau II-5). Lors de l'implémentation des procédés sur plaque avec lithographie 193i, le besoin en précision s'est accentué pour la détermination du  $CD_{\text{DSA}}$ , c'est pourquoi nous avons décidé d'augmenter par quatre la résolution des images en augmentant la taille de l'image et le nombre d'intégration.

		Images post-lithographie et gravure des guides	Images post-DSA ( <i>e-beam</i> )	Images post-DSA ( <i>litho. 193i</i> )
Réglage Terminal PC	Méthode d'analyse	Seuillage ( <i>Threshold</i> )	Seuillage ( <i>Threshold</i> )	Seuillage ( <i>Threshold</i> )
	Algorithme	Ellipse	Ellipse	Ellipse
	Sum lines	2	2	2
	Smoothing	7	7	7
	Differential	5	5	5
	Threshold	50 %	30 %	30 %
Acquisition de l'image	Tension d'accélération	500 V	800 V	800 V
	Intégration de l'image	32	32	64
	Grossissement / FOV	250k / 540 nm x 540 nm	250k / 540 nm x 540 nm	250k / 540 nm x 540 nm
	Taille de l'image	512 px x 512 px	512 px x 512 px	1024 px x 1024 px

Tableau II-5 : Récapitulatif des réglages des paramètres de Terminal PC et d'acquisition des images CD-SEM pour la détermination de CD.

L'uniformité de CD (CDU pour *CD Uniformity*) traduit la dispersion des dimensions des motifs DSA d'un contact à l'autre, d'une puce à l'autre voire d'une plaque à l'autre. La « CDU-all » correspond à trois fois l'écart-type ( $3\sigma$ ) calculé sur l'ensemble des contacts pris indépendamment (environ 1200 contacts). Ce paramètre traduit de la réelle dispersion de CD à travers toute la plaque. En première approximation, il est également intéressant de calculer la « CDU-interpuce » qui traduit de la variation de CD d'une puce à l'autre et donc l'uniformité sur la plaque 300 mm. Elle est évaluée en prenant  $3\sigma$  de la moyenne des CD de chaque puce. En général, il s'agit d'une image de 16 contacts par puce, 75 puces par plaque. L'uniformité de CD est illustrée par une cartographie comme présentée sur la [figure II-8](#). **Par défaut et sauf mention contraire, l'analyse des données se fera sur la base de la « CDU-interpuce ».** La « L-CDU » (CDU local) est, quant à elle, similaire au calcul de la « CDU-all » mais à l'échelle d'une puce.

Les paramètres de mesures de la CDU pour le dédoublement de contact sont identiques à ceux du « shrink de contact » si ce n'est que deux trous de contacts dans le guide elliptique sont mesurés au lieu d'un seul. Cela donne lieu à une mesure sur un plus grand nombre de contacts. Le guide n'étant pas circulaire mais ovale, le CD correspond aux axes majeurs et mineurs de l'ellipse et la CDU sur le guide est calculée selon ces deux axes ( $3\sigma_{\text{maj}}$  et  $3\sigma_{\text{min}}$ ).



**Figure II-8 : Exemple d'une cartographie illustrant une bonne uniformité de CD (toutes les puces sont en vert) : tous les  $CD_{DSA}$  sont compris entre +/- 5 % de la spécification (copolymère C35).**

## II.2 La défektivité

L'objectif fixé par l'ITRS concernant la défektivité est d'obtenir un procédé DSA avec un taux de défauts inférieur à  $0.01 \text{ défaut.cm}^{-2}$  pour une application de type logique. Pour évaluer la défektivité d'un procédé, il est nécessaire d'adapter la technique de caractérisation aux types de défauts recherchés et aux statistiques requises en fonction de la maturité du procédé développé. Toutes ces mesures doivent être faites avec une sensibilité optimale afin de nous permettre d'identifier tous les types de défauts possibles. Lors des premiers essais du procédé, la présence d'un grand nombre de défauts sur la plaque peut facilement être détectée par CD-SEM qui nous permet d'inspecter une petite surface suffisante pour valider les grandes améliorations des procédés. Pour les améliorations plus fines, la surface d'inspection doit être élargies afin d'aboutir à des conclusions pertinentes basées sur une analyse statistique. C'est pourquoi nous choisissons le CD-SEM pour le debug initial puis le SEM de revue pour des analyses un peu plus statistiques.

En parallèle de ces mesures, il faut s'assurer que le nombre de défauts de taille « mésoscopique » ne sont pas en nombre trop important sur la plaque. Pour ce faire, des outils d'inspection optique de sensibilité  $>100 \text{ nm}$  (Complus 4I) nous permettent d'identifier des problématiques d'intégration liées aux étapes de dépôt, de lithographie et de gravure des différents matériaux en présence.

Lorsque le procédé atteint un niveau de maturité suffisant et que les statistiques obtenues grâce au SEM de revue ne nous permettent plus de trancher entre différents procédés, des outils d'inspection optique de dernières générations (ex : KLA-Tencor 28xx) seront utilisés. Dans ce cas, une inspection complète des plaques peut être faite. Cela implique de disposer de champs de mesures suffisamment larges, et donc le développement d'un maque spécifique appelé « Bodhi » qui présenté dans le prochain chapitre.

Le choix de la méthode d'inspection n'est pas uniquement lié à la limite de détection des équipements mais également à leur vitesse d'inspection. Il ne serait pas juste d'extrapoler une densité de défauts par  $\text{cm}^2$  à partir d'une mesure unique faite sur  $1 \mu\text{m}^2$  correspondant à environ 40 contacts mesurés par CD-SEM. De même, il est difficilement imaginable d'inspecter  $1 \text{cm}^2$  à l'échelle nanométrique au vu du temps d'acquisition des mesures sur le CD-SEM. Ainsi, la technique de caractérisation adoptée doit être cohérente avec le type de défauts recherchés. Il est à noter que les mesures de défektivité se font après chaque étape critique du procédé, c'est-à-dire après ouverture des guides, après l'étape DSA, puis en théorie après transfert.

Dans le procédé DSA, nous pouvons distinguer deux types de défauts en fonction de leur taille détectables par le Complus 4T qui a une méso-sensibilité (cf. figure II-9). Certains défauts peuvent provenir du substrat (particules à sa surface par exemple), être liés à des contaminations apparues lors du procédé (particules, résidus, rayures) ou être liés aux étapes de lithographie/gravure des guides et se traduisent par des motifs de guide déformés ou manquants sur de larges zones. Ces défauts ont des dimensions allant d'une centaine de nanomètre à plusieurs micromètres, ce qui les rend facilement détectables par des outils de mesures de défektivité « mésoscopiques » qui sont rapides mais peu précis. Les défauts intrinsèques au procédé d'auto-organisation dépendent des propriétés des matériaux et des conditions de procédé. Ils sont d'une dimension de l'ordre du  $\text{CD}_{\text{DSA}}$  (environ 20 nm). Pour ceux-là, il est nécessaire d'utiliser des équipements ayant une limite de détection nanométrique comme un CD-SEM ou un SEM de revue ou des outils d'inspections *brightfield* de dernières générations.

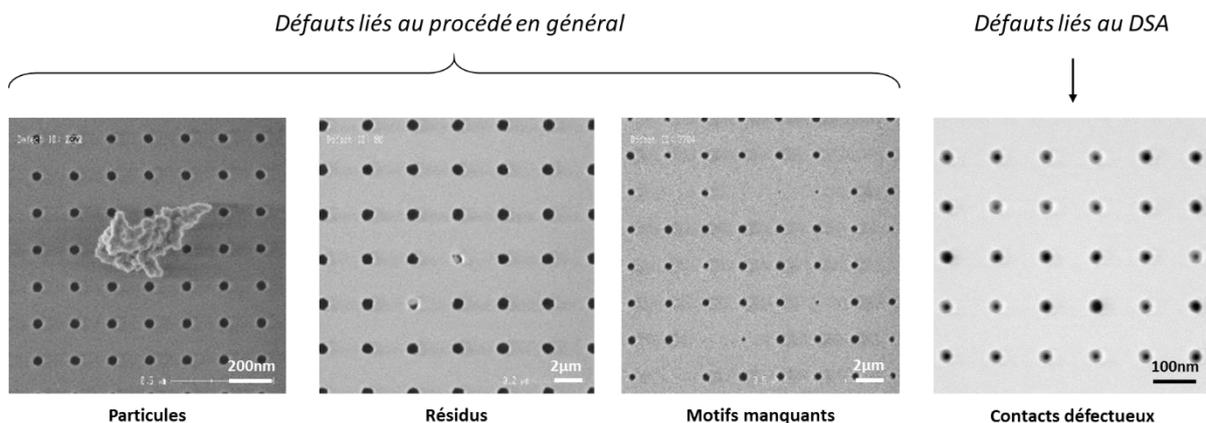


Figure II-9 : Catalogue (non exhaustif) de défauts visibles lors du procédé DSA.

Afin de déterminer le plus justement possible la défektivité sur les procédés DSA que nous étudions, nous avons mis en place une chaîne de mesures mettant en jeu plusieurs équipements.

### II22.A Détermination du taux d'ouverture des contacts

La première étape de l'évaluation de la défektivité du procédé DSA est la détermination de taux d'ouvertures de trous (ou contacts) (HOY pour *Hole Open Yield*). Ce paramètre correspond au nombre de contacts non défectueux sur le nombre total de contacts inspectés et constitue un score entre 0 % (tous les contacts sont défectueux) et 100 % (tous les contacts sont ouverts) (cf. figure II-10). Pour ce faire, l'inspection est réalisée sur le CD-SEM CG4000 d'Hitachi présent dans la salle blanche du CEA Leti qui a une résolution d'environ 15 nm. Un nombre conséquent d'images CD-SEM de 9 à 12 contacts (une image par puce, 75 puces par plaque soit entre 675 et 900 contacts inspectés) sont analysées de manière totalement automatique par le logiciel « maison » *Laboar*. Chaque image est acquise à une tension d'accélération de 800V, mesure 512 par 512 pixels et est intégrée 32 fois à un grossissement de 250k, ce qui correspond aux mêmes conditions que pour la mesure CD (cf. tableau II-5).

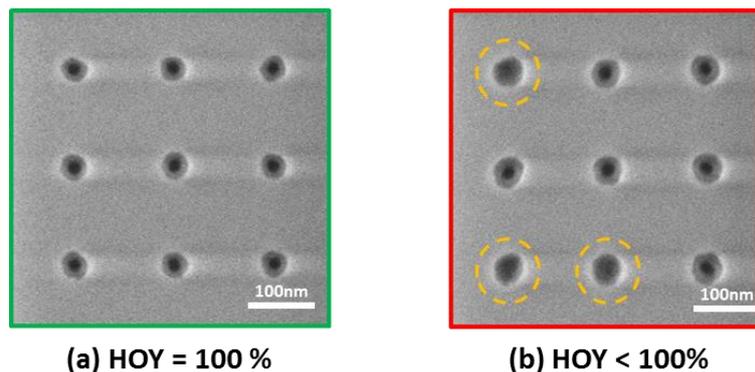


Figure II-10 : Exemple d'images CD-SEM où le HOY est à 100 % (a) et moins de 100 % (b). En orange, les contacts défectueux car « voilés » (le contact DSA à l'intérieur du guide n'est pas distinctement visible).

Le dédoublement de contacts DSA dans un guide elliptique (cf. figure II-11-a) implique d'avoir potentiellement plus de morphologies défectives que pour un contact simple. En plus des trous voilés (un seul ou deux dans le même guide), d'autres types de défauts ont été observés comme la fusion des contacts ou l'apparition d'un troisième contact non désiré (cf. figure II-11-b). Un défaut de dédoublement est défini par une ellipse qui n'a pas exactement 2 contacts DSA. Si ce critère n'est pas rempli, c'est l'ensemble du guide qui est considéré défectueux. Cela permet de ne pas minimiser artificiellement le taux de défauts. Le nombre de guides présentant un ou des contacts DSA défectueux est alors divisé par le nombre de guide total analysé afin d'obtenir le HOY. Les autres formes de défauts (cf. figure II-11-c), comme les CD non uniformes ou des contacts plus ou moins éloignés entre eux par rapport à la moyenne du pitch, ne seront pas comptabilisés dans

le paramètre HOY mais respectivement dans les paramètres CDU et pitch dont l'évaluation fera l'objet d'une partie de ce chapitre. Pour l'instant, le logiciel *Laboar* n'est opérationnel que pour le « shrink de contact », le comptage des défauts pour le dédoublement se fait donc manuellement.

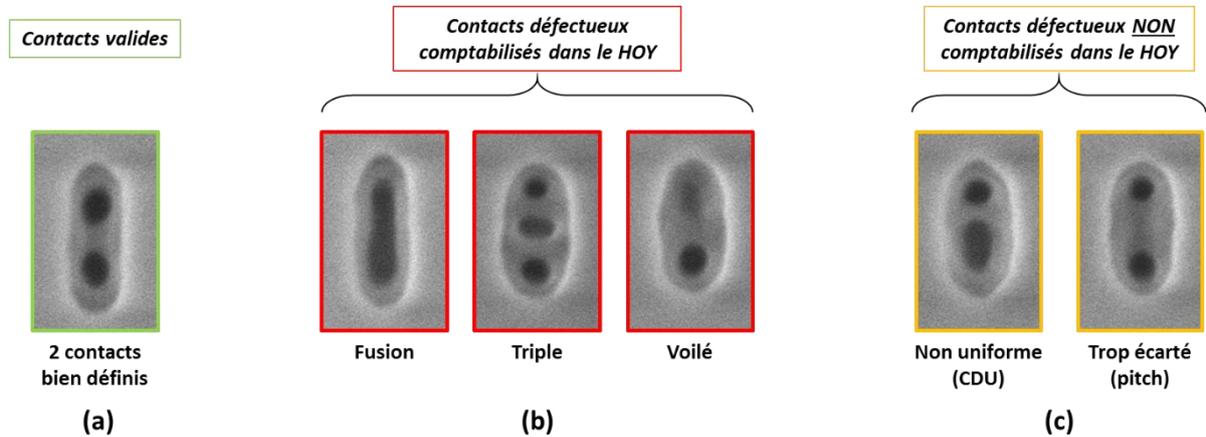


Figure II-11 : Catalogue d'images CD-SEM présentant des défauts sur le dédoublement de contacts.

## II22.B Inspections « mésoscopique »

L'évaluation des défauts via la détermination du HOY par images CD-SEM est limitée puisque la zone inspectée est de l'ordre d'environ  $100 \mu\text{m}^2$ . Cependant, cela reste une manière de faire un premier tri entre les procédés prometteurs et ceux menant à une impasse. En effet, un seul défaut sur  $100 \mu\text{m}^2$  inspectés équivaut à une densité de défaut de plus de  $10^6$  défauts. $\text{cm}^{-2}$  soit  $10^9$  fois plus que la limite fixée par l'ITRS. Lorsque plusieurs procédés ont un HOY de 100 % sur  $100 \mu\text{m}^2$  inspectés, il est nécessaire d'élargir la surface inspectée pour pouvoir les départager davantage. Mais avant cela, il faut s'assurer que les défauts de taille « mésoscopique » ne sont pas en nombre trop important sur la plaque. Pour ce faire, nous inspectons les plaques à l'aide d'un outil d'inspection optique, le Complus 4T d'AMAT présent en salle blanche du CEA Leti. Il s'agit d'un outil d'inspection ayant une méso-sensibilité ( $>100 \text{ nm}$ ). Un laser d'une longueur d'onde de  $532 \text{ nm}$  balaye la surface de la plaque afin de comparer la lumière diffusée pixel à pixel de trois puces adjacentes. Si le signal collecté n'est pas identique sur les trois pixels, celui dont le signal diffère est considéré comme défectueux. Par cette méthode, les objets de moins d'une centaine de nanomètres ne sont pas détectés. Le Complus permet de détecter essentiellement de larges champs défectueux (motifs manquants, particules larges) mais pas les défauts liés directement aux motifs DSA. Une plaque entière est analysée en 10 min environ en recette automatique.

### II22.C Inspection « nanoscopique » à grande échelle

Lorsque l'analyse par le Complus révèle des résultats satisfaisants (peu de gros défauts), la plaque est envoyée dans les salles blanches de STMicroelectronics pour une mesure sur un microscope électronique à balayage de revue (*Review SEM*), le modèle eDR7000 de KLA-Tencor aussi appelé *Ranger*. Initialement, les SEM de revue sont utilisés en industrie pour venir identifier les défauts détectés par les outils d'inspection optique en se repérant avec les coordonnées des défauts préalablement sauvegardées. Pour l'évaluation des procédés DSA, son utilisation est détournée. Des coordonnées CPI (*Critical Point Inspection*) sont créées artificiellement pour forcer le SEM de revue à capturer des images SEM de champs qui nous intéressent (cf. figure II-12).

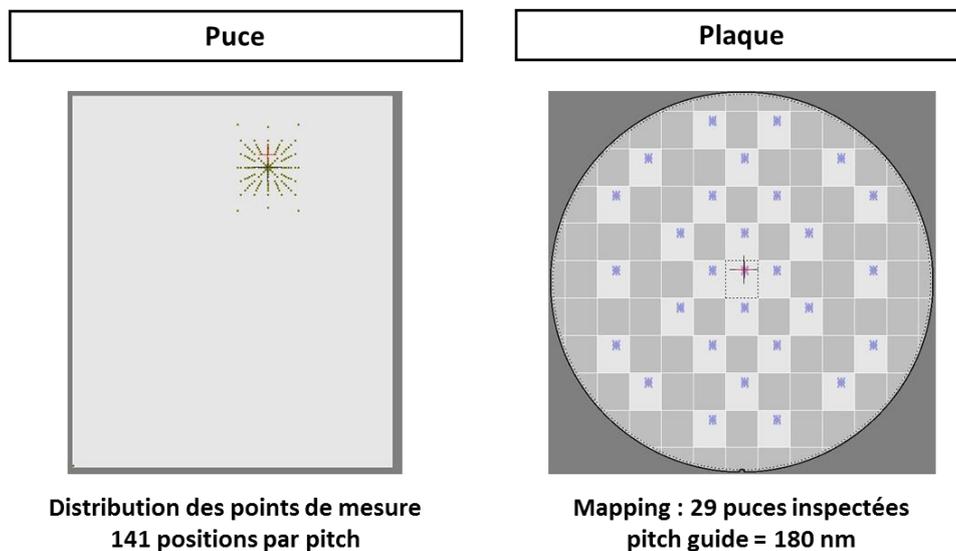


Figure II-12 : Détermination des « CPI » - distribution des points de mesure sur une puce et mapping réalisé sur une plaque pour l'inspection du pitch guide 180 nm.

L'acquisition des images se fait plus rapidement et avec un champ plus large que pour un CD-SEM, ce qui augmente significativement le nombre de contacts inspectés ( $10000 \mu\text{m}^2$  contre  $100 \mu\text{m}^2$  pour le CD-SEM). Comme pour le CD-SEM, la résolution du SEM de revue nous permettra de détecter des défauts de l'ordre de quelques nanomètres.

Il est important de noter ici que le choix de la taille des images (largeur de champ) prises sur le SEM de revue est basé sur l'analyse fine de défauts programmés sur un champ spécifique du masque *Bodhi*. Ces champs sont constitués de contacts de taille identique (32 nm sur masque pour un contact post-lithographie de 56 nm) sauf un seul dont les dimensions varient. Ce dernier est présent régulièrement (tous les  $6 \mu\text{m}$ ) dans la matrice de contacts et mesurent entre 12 nm et 80 nm sur le masque avec un pas de 2 nm en x, en y ou dans les deux directions à la fois (cf. figure II-13).

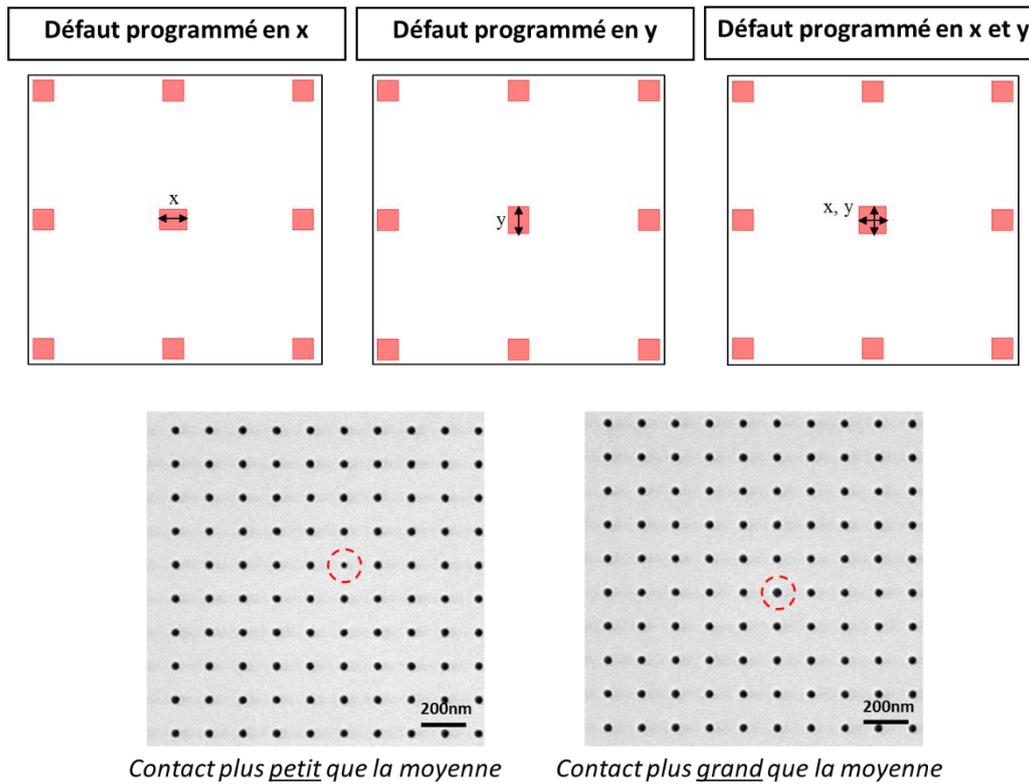


Figure II-13 : Zoom sur la zone de défauts programmés du dessin du masque « Bodhi » (en haut) et des images SEM correspondantes prise par le SEM de revue (en bas). Sur le dessin du masque, les carrés roses représentent les contacts. Sur les images SEM, les défauts programmés sont entourés en rouge.

Nous avons donc pris des images de ces défauts programmés à différents grossissements et nous les avons analysées avec le logiciel « maison » *Laboar* qui permet de détecter les variations de  $CD_{DSA}$  dans une image SEM résolue. L'idée de cette analyse est de trouver un compromis entre la taille du champ inspecté qui doit être la plus grande possible pour avoir plus de statistiques et la sensibilité nécessaire à la détection de défauts.

L'acquisition des images de largeur de champ de  $4\ \mu\text{m}$  après gravure des guides et de  $1\ \mu\text{m}$  après l'étape DSA est le standard que nous avons adopté.

En résumé, les plaques sont inspectées en suivant les étapes résumées dans le tableau suivant (cf. tableau II-6).

	1 – CD-SEM	2 – COMPLUS	3 – SEM de revue
<b>Zone inspectée</b>	100 $\mu\text{m}^2$	100 $\text{cm}^2$	10000 $\mu\text{m}^2$
<b>Vitesse d'inspection</b>	5 $\mu\text{m}^2/\text{min}$	10 $\text{cm}^2/\text{min}$	300 $\mu\text{m}^2/\text{min}$
<b>Détection des défauts liés au DSA</b>	Oui	Non	Oui
<b>Détection des défauts liés à l'intégration</b>	Non	Oui	Seulement s'il y a un gros impact
<b>Type de défauts détectés</b>	Défauts de structuration Variation de CD	Effet de l'intégration à l'échelle de la plaque Défectivité à grande échelle	Défauts de structuration Variation de CD
<b>Défectivité maximale évaluée</b>	10 <sup>6</sup> défauts.cm <sup>-2</sup> (soit 1 défaut sur 100 $\mu\text{m}^2$ )	Pas de limite pour les défauts de taille « mésoscopique »	10 <sup>4</sup> défauts.cm <sup>-2</sup> (soit 1 défaut sur 10000 $\mu\text{m}^2$ )

Tableau II-6 : Résumé de la chaîne de mesures de défectivité ainsi que les caractéristiques principales des équipements utilisés.

### II.2.3 L'erreur de placement des contacts DSA

Le procédé DSA permet de réaliser des contacts auto-alignés, nous avons donc besoin de qualifier la précision de cet alignement. Pour une application type « shrink de contact », il est attendu que le contact DSA garde le même positionnement sur la plaque que le motif de guide tout en étant de dimension inférieure. Afin de s'assurer que le domaine de PMMA se forme au bon endroit dans la cavité, c'est-à-dire bien centré par rapport au guide dans le cas du « shrink de contact », le guide doit être dimensionné en prenant en compte la période intrinsèque du copolymère à blocs et l'affinité des parois du guide. Classiquement, une dispersion de  $\text{CD}_{\text{guide}}$  de 10% par rapport au CD moyen est inévitable lors de la fabrication des guides par lithographie conventionnelle puis gravure. Cette dispersion implique que certains guides peuvent être plus petits ou plus grands par rapport au  $\text{CD}_{\text{guide}}$  optimal, ce qui contraint plus ou moins les chaînes de polymère dans la cavité. Ainsi, l'assemblage peut former un nano domaine mal positionné dans le guide : nous parlons dans ce cas d'une erreur de placement.

Pour valider le procédé d'auto-assemblage en termes de précision d'auto-alignement, nous devons quantifier l'erreur de placement (PE pour *Placement Error*) du contact DSA dans le guide. Dans la littérature, le terme d'« erreur de placement » pour le DSA diffère de celui utilisé

classiquement en lithographie où le terme « overlay » est employé. L'« overlay » tel que défini dans la norme SEMI P18-92 [SEMI International Standards 2004] inclut la notion de désalignement entre les niveaux d'intégration supérieur et inférieur d'un dispositif électronique ou circuit intégré (*layer-to-layer overlay*). L'erreur de placement est ici la quantification du désalignement du motif DSA à l'intérieur de son motif de guidage où les deux motifs sont au même niveau d'intégration. Ainsi, le motif de guidage sera la référence (origine du vecteur PE) et le domaine de PMMA sera le nouveau motif (l'extrémité du vecteur PE). Nous définissons ici l'erreur de placement (PE) comme la norme du vecteur formé par le centre du domaine PMMA de coordonnées  $(x_1, y_1)$  et le centre du motif de guidage de coordonnées  $(x_2, y_2)$  (cf. figure II-14).

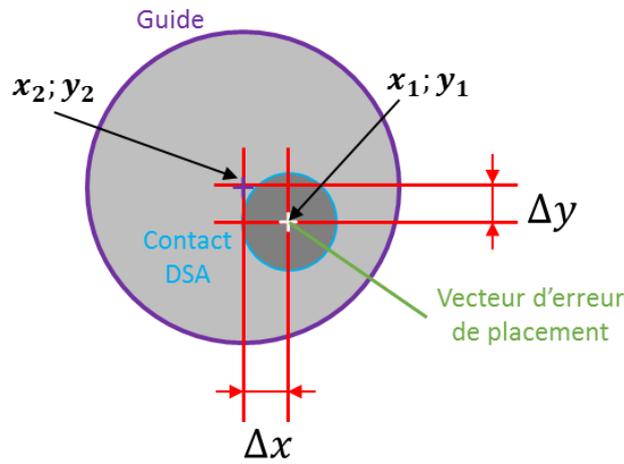


Figure II-14 : Représentation schématique de l'erreur de placement où  $(x_1, y_1)$  sont les coordonnées du contacts DSA (en bleu) et  $(x_2, y_2)$  sont les coordonnées du guide (en violet). Le vecteur d'erreur de placement est tracé en vert sur le schéma.

L'origine des axes est arbitrairement prise au centre de chaque image CD-SEM. Le PE est calculé selon la formule suivante (cf. équation II-1) :

$$PE = \sqrt{(x_2 - x_1)^2 + (y_2 - y_1)^2}$$

Équation II-1 : Définition mathématique de l'erreur de placement.

Le positionnement du contact DSA dans son motif de guidage doit être parfaitement contrôlé afin de garantir un bon alignement entre les niveaux d'intégration afin d'éviter d'éventuels courts-circuits. De nombreux articles traitent de ce sujet dans la littérature. Dans le cas des applications ligne/espace, l'erreur de placement des lamelles de copolymères à blocs par rapport aux motifs de guidage chimiques dans le cas d'une intégration par chemo-épitaxie a été étudiée [Doerk 2012]

[Kato 2014]. D'autres études relient l'erreur de placement au confinement physique des copolymères à l'intérieur des tranchées [Wuister 2012] [Boots 2014].

Dans le cas d'une application de type contact, certains groupes de recherches ont déjà publiés l'évaluation du désalignement entre le guide et le copolymère par simulation et par mesures expérimentales [Wuister 2014][Laachi 2015][Yamaguichi 2014]. Dans le cas de la simulation, l'erreur de placement est extraite grâce au calcul de l'équilibre thermodynamique du système PS-PMMA. La méthode expérimentale est, quant à elle, basée sur l'extraction des contours du guide et du contact DSA à partir d'images CD-SEM. De ces contours sont extrapolés les centres et le désalignement entre les deux centres est calculé.

Avant ce travail de thèse, seuls Yamaguichi *et al.* proposaient un logiciel de mesures d'erreur de placement : RED (*Robust Edge Detection*) est un logiciel commercialisé par Hitachi et vendu en option avec les équipements CD-SEM nouvelle génération [Yamaguichi 2014]. Le fonctionnement en détail de ce logiciel reste la propriété d'Hitachi, ce qui rend la compréhension de son fonctionnement plus complexe et l'interprétation des résultats obtenus plus délicate. Dans le cadre de cette thèse, nous avons donc développé une méthodologie pour la mesure d'erreur de placement des contacts DSA. Le module dédié au PE pour le DSA a été implémenté sur le logiciel *DGmage*, ce qui en fait un logiciel accessible, plus transparent que RED et surtout adaptable à nos besoins puisque compatible avec le CD-SEM présent en salle blanche au Leti.

Par la suite, nous allons dans un premier temps exposer le fonctionnement du logiciel. Le travail suivant consiste en la validation de la mesure PE donnée par le logiciel en termes de stabilité et de robustesse. Pour cela, nous avons créé des images de références qui nous serviront à étalonner le logiciel. Enfin, une méthodologie de mesures basée sur les paramètres optimisés du logiciel sera définie et nous servira pour les tests comparatifs de procédés en complément de la mesure de défektivité et d'uniformité de CD. Ceci a donné lieu à la rédaction d'un manuel d'utilisation en complément du logiciel ainsi que d'une publication dans la revue *Journal of Micro/Nanolithography, MEMS, and MOEMS*.

### II23.A Algorithme de détection de contour

Comme le logiciel de mesures CD Terminal PC, le principe de la mesure PE avec *DGmage* repose sur un algorithme de détermination de contours basé sur le changement de niveau de gris des images CD-SEM (cf. figure II-14).

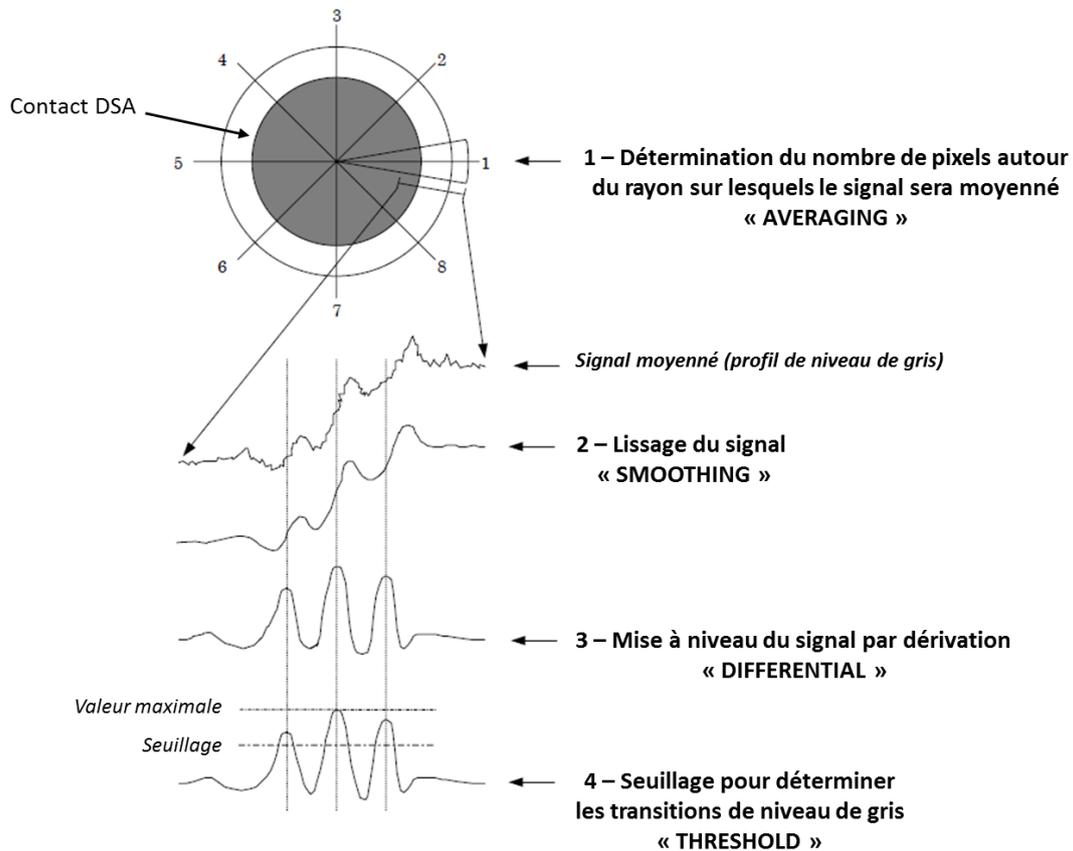


Figure II-15 : Algorithme de détection des contours (extrait du manuel d'utilisation de Terminal PC, logiciel commercialisé par Hitachi).

Le centre de chaque contact DSA est prédéterminé avec l'option « seed generation ». Avec ce mode, DGmage scanne toutes les images recherchant les pixels les plus foncés qui doivent être à l'intérieur des contacts DSA. L'utilisateur peut modifier le paramètre « merging » qui permet la fusion de plusieurs points d'un même contact afin d'avoir un seul point par contact. Cela permet notamment l'exclusion du calcul de PE pour les contacts défectueux.

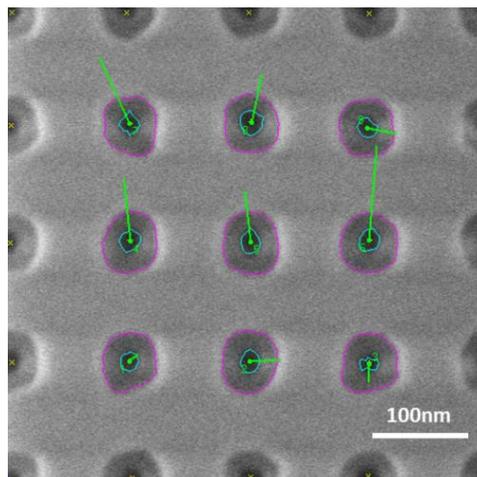
Ce point (appelé « seed ») est le point de départ de la détermination des contours. Le logiciel sait qu'il doit trouver un contour DSA et un contour de guide autour de ce point. Le niveau de gris est analysé afin de déterminer la transition entre les pixels noir et gris foncé (contour DSA) et gris foncé et gris clair (contour guide). Après avoir déterminé une première fois ces contours, le barycentre de chaque point le long des diamètres est recalculé pour déterminer un centre plus précis. Plusieurs étapes sont nécessaires pour obtenir une extraction précise des bords de contact. Quatre paramètres clés doivent être pris en considération pour cette détermination de barycentre :

- (1) "averaging" (A) (moyenne) : le profil du signal est extrait le long du rayon du cercle. Le signal peut être moyenné sur un nombre de rayons proches entre eux.

- (2) “smoothing” (S) (lissage) : le lissage du profil de niveau de gris est ensuite fait afin d’augmenter le rapport signal/bruit et réduire le taux de détection de faux contacts.
- (3) “differential” (D) (dérivée) : les pics de changement de niveau de gris du profil sont déterminés en dérivant le profil.
- (4) “threshold” (T) (seuillage) : la fonction de seuillage est utilisée afin de ne comptabiliser que le pic réel de transition du contact.

Une fois que les bords des contacts sont détectés à de multiples positions, le contour est obtenu en pointillé. Un fit circulaire est utilisé pour fermer le contour. Il diminue également l’erreur sur la position du centre, déterminée avec une précision d’un demi-pixel, ce qui est critique pour évaluer les valeurs de PE.

Un exemple de l’extraction de contour sur une image CD-SEM est présentée ci-dessous (cf. [figure II-16](#)). Sur cette image, le contour du guide est en violet, le contour du contact DSA et le vecteur de PE sont représentés respectivement en bleu et en vert. L’échelle du vecteur PE a été agrandie pour donner aux utilisateurs une vision plus claire.



**Figure II-16 : Image CD-SEM analysée par DGmage pour la mesure d’erreur de placement. En violet : le contour du guide, en bleu : le contour du contact DSA, en vert : le vecteur d’erreur de placement dont l’échelle a été multipliée par 64 pour plus de lisibilité.**

A ce stade, il est difficile de juger la justesse du logiciel en ce qui concerne les valeurs absolues de PE évaluées puisque le désalignement des contacts n’est pas connu d’avance. Pour s’assurer que la détermination de PE est la plus exacte possible, nous nous sommes appuyés sur des images étalons programmées dont la création et les caractéristiques sont décrites dans la partie suivante.

## II23.B Images de référence

Afin de trouver le réglage optimal du logiciel, nous utilisons des images étalons mimant une image CD-SEM avec 9 contacts. Elles sont générées par un script Matlab® qui simule le niveau de gris des images CD-SEM en projetant une fonction gaussienne sur une surface 2D. Toutes les caractéristiques d'une image CD-SEM, comme la position et la taille du contact, le bruit et le désalignement, peuvent être réglées avec précision. Pour le jeu d'images étalon, nous avons fixé le CD de guide à 65 nm et le CD du DSA à 20 nm, dimensions typiques obtenues avec le procédé DSA présentant de l'erreur de placement d'après nos données expérimentales [Tiron 2015]. Les images d'étalonnage sont créées avec un bruit de fond très faible afin de déterminer le bruit intrinsèque du logiciel.

Le set d'étalonnage est constitué de 14 images avec un PE programmé dans une seule direction (x). Les 9 contacts d'une même image sont identiques (ils présentent le même PE). Le désalignement varie d'une image à l'autre, allant d'un parfaite alignement ( $PE=0$  nm) à 8 nm de décalage, avec un pas de 1 nm et un pas plus resserré (0.2 nm) entre 5 nm et 6 nm. Une image supplémentaire est générée avec un PE de 5.5 nm (et donc un pas de 0.1 nm) (cf. figure II-17).

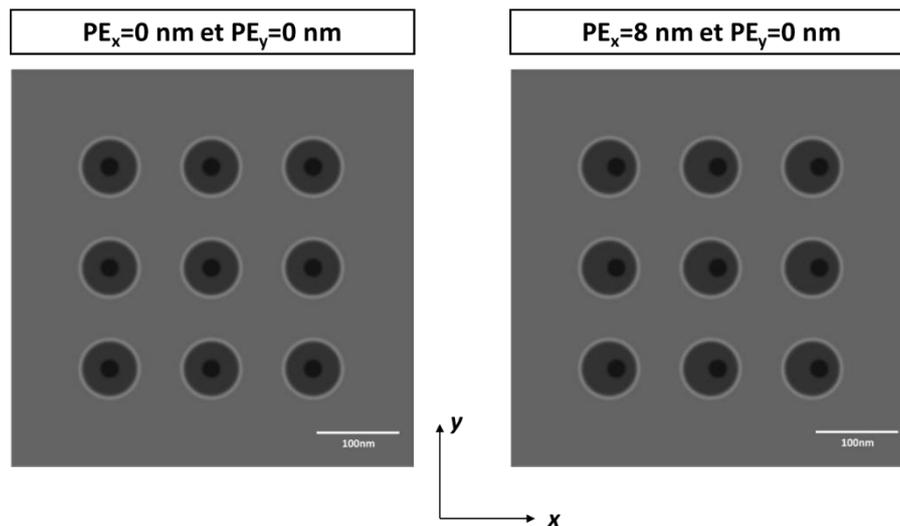


Figure II-17 : Images de références utilisées pour la validation des mesures PE : désalignement de 0 nm (à gauche) à 8 nm (à droite).

Afin de tester la robustesse du logiciel et ainsi vérifier que le résultat du calcul de PE est le même sur un grand nombre de contacts identiques, un autre set d'images étalons composé de 1500 images de référence ayant la même valeur d'erreur de placement mais dont les contacts ne sont pas placés au même endroit de l'image est généré. D'une image à l'autre, les contacts sont déplacés d'un pixel vers la droite. Les images se composent de 3 contacts alignés qui sont déplacés d'un pixel le long de la direction x (cf. figure II-18).

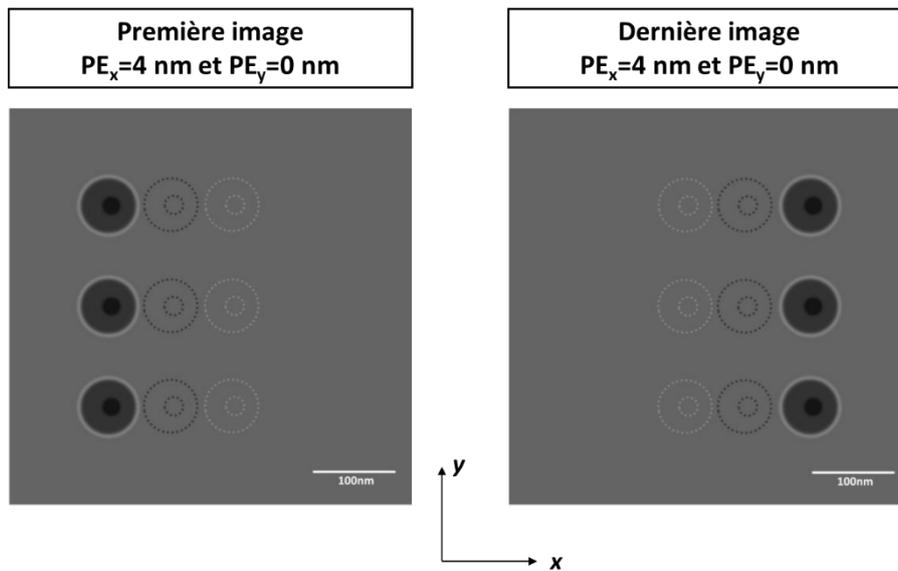


Figure II-18 : Deuxième set d'images de référence utilisé pour la validation des mesures PE (désalignement de 4 nm). En pointillé : illustration des autres images créées.

Une évaluation complémentaire a été effectuée sur les images avec un PE programmé dans la direction y seulement, et sur les directions x et y simultanément. Cette étude n'est pas présentée ici mais a donné des résultats similaires (ce qui est obtenu ici est totalement transposable à la direction y).

Finalement, la détermination des contours pour les images de référence et les vraies images CD-SEM est identique (cf. figure II-19).

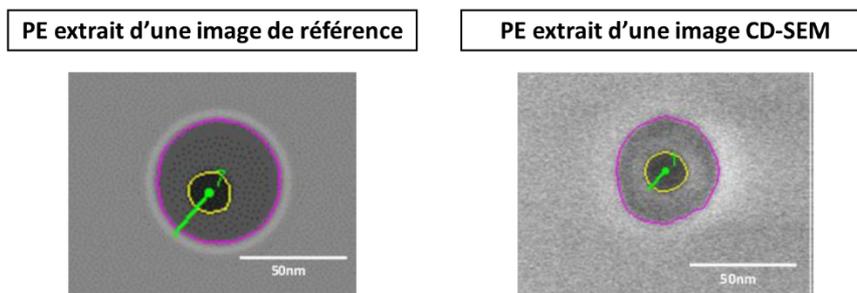


Figure II-19 : Extraction des contours des guides et contacts DSA ainsi que la détermination du vecteur PE à partir de DGmage (à gauche) sur une image de référence et (à droite) sur une image CD-SEM.

### II23.C Qualification de l'algorithme de détection de contour

L'impact des paramètres « Averaging, Smoothing, Differential, Threshold » (A,S,D,T) sur la détermination du PE doit être étudié pour juger du bon fonctionnement du logiciel. Plus précisément, il faut s'assurer que DGmage n'implique pas de décalage entre la valeur réelle de PE et la valeur mesurée, ce qui signifie qu'il doit donner des valeurs de PE précises et que les mesures doivent être répétables. Pour chaque image étalon, nous nous sommes intéressés à deux paramètres :

1. Le paramètre « offset » est la moyenne de la différence entre le PE mesuré et le PE programmé sur l'image. Les deux mesures sont données par les modules des vecteurs de PE et la différence entre les deux modules n'est pas prise en absolu. Ainsi, l'offset peut être positif ou négatif selon que le logiciel a tendance à surestimer ou sous-estimer la valeur de PE. En somme, c'est l' « offset » induit par le logiciel puisqu'idéalement, cette valeur doit être à zéro (le logiciel mesure exactement ce qui est programmé). La résolution du logiciel sera déterminée en utilisant le set d'images avec le PE programmé incrémenté avec un petit pas.

$$Offset_{(A,S,D,T)} = \frac{\sum_1^n (PE_{mesuré} - PE_{programmé})}{n} \text{ avec } n : \text{ nombre de contacts}$$

Équation II-2 : Calcul du paramètre « offset » pour un set de paramètres (A,S,D,T).

2. Le paramètre « range » est la plage entre le PE maximal et le PE minimal mesurés parmi les 9 contacts identiques. Ce paramètre fournit une indication de dispersion statistique.

$$Range_{(A,S,D,T)} = PE_{mesuré\_max} - PE_{mesuré\_min}$$

Équation II-3 : Calcul du paramètre « range » pour un set de paramètres (A,S,D,T).

Nous avons cherché les combinaisons (A,S,D,T) permettant de minimiser à la fois l'offset et le range. Pour dé-corréler tous ces paramètres, nous avons d'abord travaillé sur les valeurs de « Averaging » et « Smoothing » en faisant varier leurs valeurs de 1 à 33 avec un pas de 2. Le « Differential » a d'abord été réglé à 7 qui est le réglage par défaut. Dans une deuxième itération, sa fenêtre de procédé a été étudiée (pour des valeurs comprises entre 1 et 33) afin d'assurer que DGmage soit utilisé dans son intervalle de stabilité.

Il est à noter que la valeur du « Threshold » a un faible impact sur la détermination du PE en raison de la transition relativement abrupte des niveaux de gris dans les images étalons. De plus, la parfaite circularité des contacts implique que le seuil n'a un impact que sur le CD et non sur la

détermination du centre. Par conséquent, la valeur par défaut à 80 % pour le paramètre « Threshold » a été conservé au cours de l'étude.

**Détermination de la plage de stabilité du logiciel :** Afin de qualifier le logiciel, les paramètres (A, S, D) ont été modulés et l'étude de leur impact sur la détermination du PE a permis de déterminer l'envergure de la plage de stabilité du logiciel. Le logiciel permet 256 combinaisons possibles des paramètres « Averaging » et « Smoothing » (abrégés en (A,S)), chacune de ces combinaisons menant à un set de 126 valeurs de PE (9 contacts x 14 images). Pour analyser ce grand nombre de données, plusieurs graphiques 3D sont générés dans lesquels les valeurs des paramètres « offset » ou « range » (en z) sont tracés en fonction de (A,S) (respectivement en x et y) (cf. figure II-20).

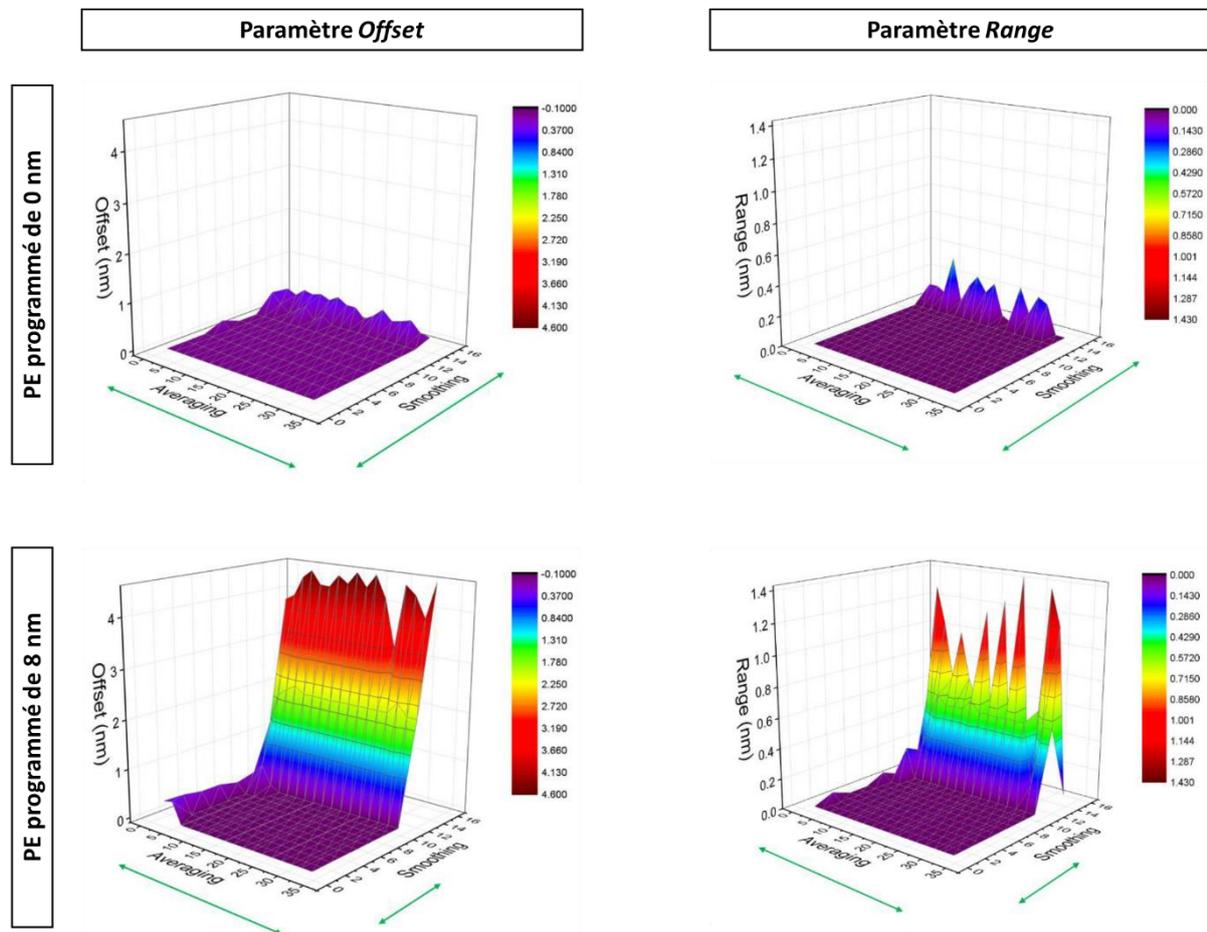


Figure II-20 : Graphiques 3D (surface) représentant les paramètres “offset” et “range” induits par DGmage, en fonction des paramètres « Averaging » et « Smoothing » pour deux valeurs de PE programmé différentes.

L'échelle de couleur est la même pour chaque groupe d'images : de violet (offset=0.1 nm / range=0 nm) à rouge foncé (offset=4.6 nm / range=1.4 nm). Le paramètre « Smoothing » est ici limité à la valeur 15. Passé cette valeur, nous pouvons considérer que le logiciel donne des valeurs aberrantes avec des offsets bien supérieurs aux PE programmés. Au-delà de S=15, le logiciel n'est plus fiable, le lissage de la courbe de niveau de gris est trop important pour détecter le moindre pic.

En analysant les graphiques, nous remarquons que l'erreur de placement programmé a une influence sur le choix du couple (A,S), en particulier pour la valeur de « Smoothing ». Alors que tous les couples (A,S) donnent une valeur de PE juste pour une image sans désalignement, seuls quelques valeurs de « Averaging » et « Smoothing » donnent des PE proches de ceux programmés lorsque ces derniers sont non nuls. Le comportement du paramètre « range » est similaire : la zone de stabilité du logiciel est réduite lorsque l'erreur de placement augmente.

D'un autre côté, le paramètre « Averaging » a un impact faible sur l'évaluation du PE dans le cas des images de référence. Cela est dû au fait que les contacts générés sous Matlab sont parfaitement circulaires : le profil de niveau de gris le long d'un rayon est le même selon toutes les directions. Ainsi, le paramètre « Averaging » est ajusté en utilisant les mesures précédentes faites sur de vraies images CD-SEM.

Le régime de fonctionnement du logiciel est déterminé en trouvant le plateau commun des paramètres (A,S) qui minimise à la fois les paramètres « offset » et « range ». Ce plateau commun est atteint pour des valeurs de « Averaging » compris entre 5 et 15, et de « Smoothing » compris entre 3 et 7.

Par la suite, nous nous intéressons à l'impact du paramètre « Differential ». Une étude similaire à celle présentée précédemment a été faite pour plusieurs valeurs du paramètre D (entre 1 et 33 par pas de 2) en fixant les paramètres (A,S) = (5,7). La [figure II-21](#) montre qu'au-delà de D=11, l'erreur de placement est mal évaluée. D'autres couples (A,S) ont été testés et présentent les mêmes tendances. Finalement, le PE est bien défini pour une valeur du paramètre « Differential » comprise entre 3 et 11.

Un réglage plus fin des paramètres (A,S,D) doit se faire avant l'analyse de chaque set d'images CD-SEM afin d'avoir une détermination de contours la plus juste possible. Ce critère reste subjectif puisqu'il se base sur l'analyse visuelle de l'utilisateur. Cependant, nous remarquons que sur des vraies images CD-SEM, la modification des paramètres (A,S,D) ne changent pas drastiquement la détermination des contours des contacts.

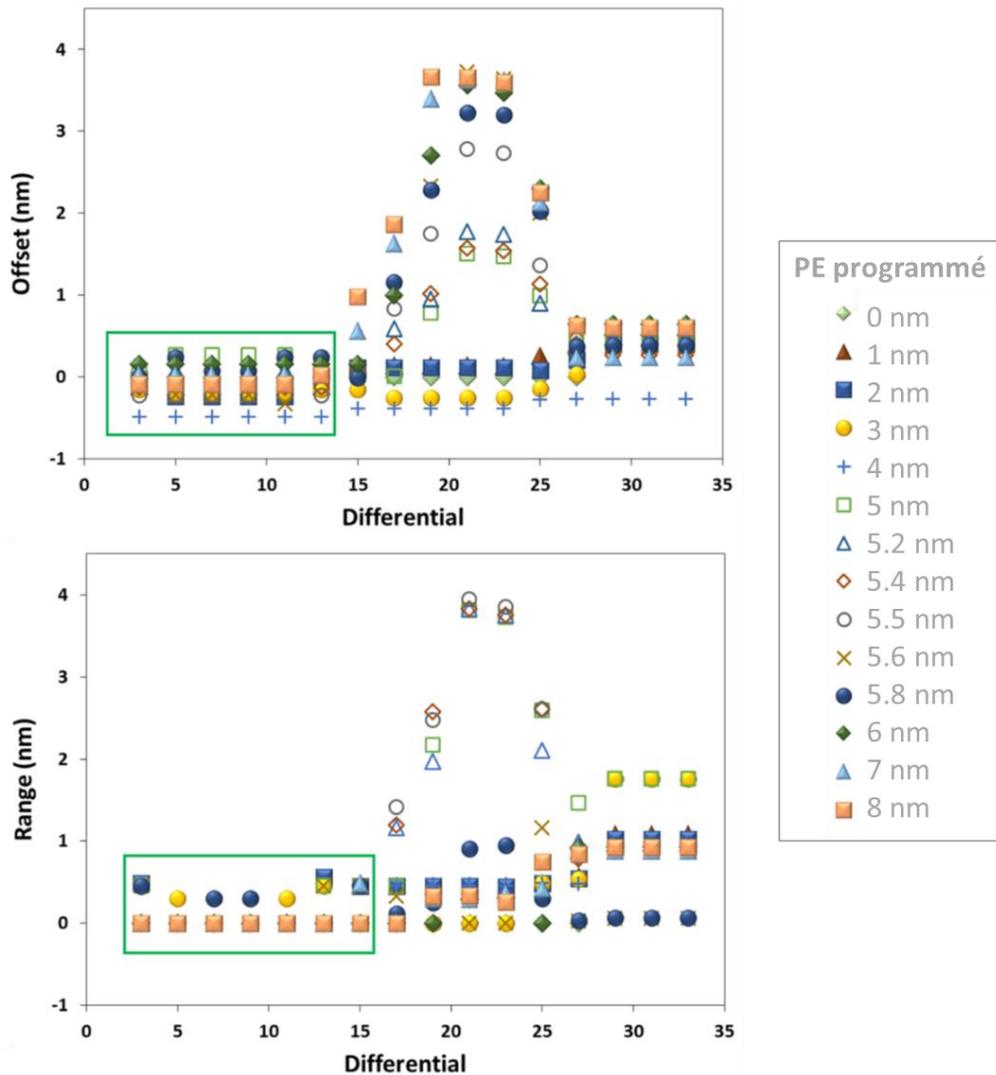


Figure II-21 : Graphiques représentant les paramètres « offset » et « range » pour plusieurs valeurs de PE programmés en fonction du paramètre « Differential » (avec (A,S)=(5,7)).

**Détermination du bruit intrinsèque du logiciel dans la zone de stabilité :** A présent que la fenêtre de fonctionnement du logiciel a été déterminée, il reste à évaluer le bruit intrinsèque du logiciel. Pour ce faire, nous utilisons le deuxième set d'images qui constitue un total de 1500 contacts identiques pour chaque PE programmé. La [figure II-22](#) représente le PE mesuré et le paramètre « range » associé en fonction des PE programmés (entre 0 nm et 8 nm) sur les images étalon.

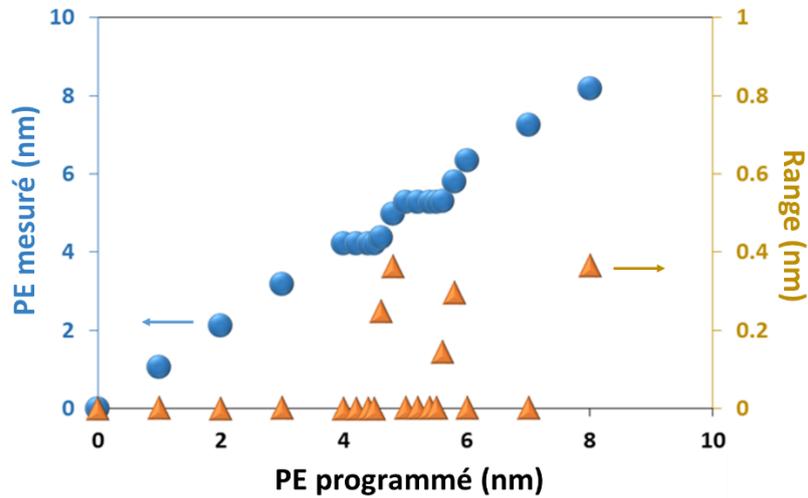


Figure II-22: Graphique représentant l'erreur de placement mesuré et le paramètre « range » en fonction de l'erreur de placement programmé sur les images de référence (réglage de DGmage : (A,S,D)=(5,7,7)).

Il est à noter que l'évaluation de l'erreur de placement n'est pas dépendante du PE programmé sur les images. Pour des valeurs entières de PE programmé, chaque contact est mesuré de la même façon : le paramètre « range » est égal à zéro. Cependant, l'estimation du PE est la même pour les PE programmés entre 4 nm et 5 nm ( $PE_{\text{mesuré}}=4$  nm) et entre 5 nm et 6 nm ( $PE_{\text{mesuré}}=5$  nm), avec une augmentation du paramètre « range ». Cela confirme le fait que la détermination d'erreur de placement est donnée à une précision total d'un pixel (les centres des contacts DSA et guide sont déterminés à un demi-pixel près chacun) (ici, 1 pixel = 0.88 nm). Aussi, pour un PE programmé supérieur à 8 nm, la proximité du contour du guide influence la détermination du contour DSA, ce qui crée une mauvaise mesure de PE traduite par une augmentation du paramètre « range ». Cependant, cette valeur de « range » n'excède jamais un demi-pixel. DGmage est donc stable et robuste dans l'intervalle de travail que nous avons déterminé auparavant.

### II23.D Résumé des paramètres optimisés de mesure d'erreur de placement

La mesure d'erreur de placement est basée sur des images CD-SEM dont la résolution est la même que pour la mesure de CD (cf. tableau II-5). Les paramètres optimaux du logiciel DGmage sont à redéfinir pour chaque set d'images CD-SEM pour déterminer au mieux le contour du guide et celui du contact DSA. D'après notre étude préliminaire de validation du logiciel, ces paramètres doivent se trouver dans les gammes de valeurs résumées dans le tableau suivant (cf. tableau II-7).

Averaging	Smoothing	Differential	Threshold	Taille de l'image (pixel)
Entre 5 et 15	Entre 3 et 7	Entre 3 et 11	80%	1024 par 1024

Tableau II-7 : Récapitulatif des réglages des paramètres du logiciel DGmage pour la mesure de PE.

### II23.E Cas du dédoublement de contacts : mesure du pitch DSA

L'étude du placement de plusieurs contacts DSA dans un guide elliptique se révèle être plus complexe que celle d'un contact unique dans un guide circulaire. Pour l'analyse comparative des procédés, il est plus simple d'évaluer l'espacement entre les deux contacts DSA d'un même guide, appelé aussi « pitch ». Il peut être mesuré dans les deux directions : nous parlerons de « pitch » pour désigner la distance entre les deux contacts DSA dans le sens de la longueur du guide, et de «  $pitch_{mineur}$  » lorsqu'il s'agira du désalignement des deux contacts entre eux (donc dans le sens de la largeur du guide). La mesure du pitch, comme l'erreur de placement, se fait via le logiciel DGMage. Par défaut, il affiche l'erreur de placement par rapport au barycentre de l'ellipse, c'est pourquoi les vecteurs de PE apparaissent en opposition dans les guides (cf. figure II-23).

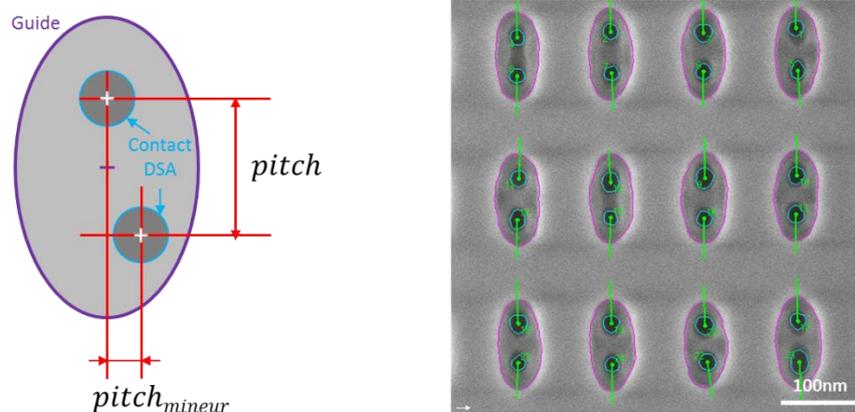


Figure II-23 : Représentation schématique du pitch, accompagnée d'une image CD-SEM analysée par DGMage pour la mesure de pitch. En violet : le contour du guide, en bleu : le contour du contact DSA, en vert : les vecteurs PE de chaque guide en fonction du barycentre de l'ellipse (vecteur PE x64).

Pour une mesure absolue de l'erreur de placement, il est nécessaire de déterminer le placement idéal des contacts DSA dans le guide par simulation et de comparer cette position à la position réelle des contacts DSA dans le guide. Il faut donc superposer le fichier contenant les informations du masque (*Graphic Database System* ou GDS), les résultats de simulation de placement et les images CD-SEM correspondantes afin de calculer un désalignement éventuel des contacts DSA. Cette méthodologie, bien qu'applicable au « shrink de contact » et à la multiplication de contact, implique la mise en place d'une méthode de calcul prédictive qui n'est pas encore développée et qui est potentiellement très demandeuse en ressources (cluster de calculs et temps d'évaluation). A terme et pour une évaluation au niveau production de masse, il sera intéressant d'envisager cette option. Dans le cas d'une étude de viabilité, les véhicules de tests sont trop variés pour mettre en place cette méthodologie.

## II.3 Conclusion

Dans la première partie de ce chapitre, nous avons explicité l'intégration du procédé DSA dans un empilement technologique et un procédé de création de contacts déjà existants pour l'application VIA du C014 à STMicroelectronics. En particulier, l'accent a été mis sur la fonctionnalisation de surface qui joue un rôle essentiel sur la qualité de l'auto-organisation du copolymère à blocs et donc sur les performances lithographiques du procédé DSA. La réflexion autour de ce paramètre nous a mené à considérer trois procédés différents qui seront analysés dans le chapitre suivant :

- le procédé « PS-affine » qui nécessite le greffage d'un hPS<sub>g</sub> sur les motifs de guidage,
- le procédé « neutre » qui comporte une étape de dépôt d'un copolymère statistique de même composition que le copolymère à blocs
- et le procédé « PMMA-affine » qui ne requière aucune préparation de surface préalable.

Nous avons également discuté de l'intérêt de l'utilisation du procédé de planarisation pour pallier aux problèmes liés à la différence de densités des motifs de guidage sur la plaque. Cette étape est systématiquement utilisée pour la suite de cette étude.

La seconde partie de ce chapitre porte sur la mise en place du protocole d'évaluation des performances lithographiques du DSA. A la lumière des critères imposés par l'ITRS, nous avons énuméré les critères évalués afin de comparer les différents procédés DSA ainsi que la méthodologie de mesures associées :

- le CD et leur uniformité sont évalués à partir des images CD-SEM
- l'analyse de la défektivité se décompose en trois étapes : la détermination du HOY par image CD-SEM, l'évaluation des défauts « mésoscopiques » grâce à l'outil d'inspection optique et l'estimation de la défektivité à grande échelle à l'aide du SEM de revue.
- l'erreur de placement est mesurée à partir des images CD-SEM.

La méthodologie de mesure de l'erreur de placement a fait l'objet d'un travail plus poussé dans cette thèse. Cela a été motivé par l'absence de moyens expérimentaux disponibles pour l'évaluation de l'erreur de placement en début de cette thèse. Nous avons qualifié le logiciel « maison » DGmage à l'aide d'images de référence permettant de programmer le désalignement du contact DSA dans sa cavité de guidage. Le logiciel s'est révélé être à la fois robuste et stable pour l'estimation du PE, avec une sensibilité de l'ordre d'un pixel ( $3\sigma < 1$  pixel). Dans le cas d'une application pour le dédoublement de contact, DGmage permet également de mesurer le pitch des contacts DSA dans une ellipse avec la même précision. Toutes les mesures sont faites de manière automatique via des recettes de mesure, ce qui fait de DGmage un outil adapté aux exigences de la métrologie des circuits intégrés.

## Bibliographie

- Bekaert, J., Doise, J., Gronheid, R., Ryckaert, J., Vandenberghe, G., Fenger, G., ... Cao, Y. (2015). N7 logic via patterning using templated DSA: implementation aspects (Vol. 9658, pp. 965804-965804-11). <http://doi.org/10.1117/12.2196524>
- Bencher, C., Yi, H., Zhou, J., Cai, M., Smith, J., Miao, L., ... Holmes, S. (2012). Directed self-assembly defectivity assessment. Part II. In W. M. Tong (Ed.), (p. 83230N-83230N-10). <http://doi.org/10.1117/12.917993>
- Boots, H., de Rooter, J. M., Nguyen, T. T., Brizard, A., Peeters, E., Wuister, S. F., ... Fraaije, J. G. E. M. (Hans). (2014). Pitch variations of self-assembled cylindrical block copolymers in lithographically defined trenches. *Journal of Micro/Nanolithography, MEMS, and MOEMS*, 13(3), 033015-033015. <http://doi.org/10.1117/1.JMM.13.3.033015>
- De Simone, D., Tenaglia, E., Piazza, P., Vaccaro, A., Bollin, M., Capetti, G., ... Canestrari, P. (2011). Potential applications of negative tone development in advanced lithography. *Microelectronic Engineering*, 88(8), 1917-1922. <http://doi.org/10.1016/j.mee.2011.01.064>
- Doerk, G. S., Liu, C.-C., Cheng, J. Y., Rettner, C. T., Pitera, J. W., Krupp, L., ... Sanders, D. P. (2012). Measurement of placement error between self-assembled polymer patterns and guiding chemical prepatterns (Vol. 8323, p. 83230P-83230P-7). <http://doi.org/10.1117/12.916421>
- Fukawatase, K., Yoshimoto, K., Ohshima, M., Naka, Y., Maeda, S., Tanaka, S., ... Mimotogi, S. (2014). DFM for defect-free DSA hole shrink process (Vol. 9049, p. 90491K-90491K-8). <http://doi.org/10.1117/12.2046108>
- Gharbi, A., Tiron, R., Argoud, M., Chamiot-Maitral, G., Fouquet, A., Lapeyre, C., ... Pain, L. (2016). Process highlights to enhance directed self-assembly contact patterning performances. *Journal of Micro/Nanolithography, MEMS, and MOEMS*, 15(4), 043503-043503. <http://doi.org/10.1117/1.JMM.15.4.043503>
- Harumoto, M., Stokes, H., Tanaka, Y., Kaneyama, K., Pieczulewski, C., Asai, M., ... Cayrefourcq, I. (2017). DSA process window expansion with novel DSA track hardware (Vol. 10146, p. 101461X-101461X-6). <http://doi.org/10.1117/12.2257945>
- ITRS. (2013). *International Technology Roadmap for Semiconductors - Lithography Tables*. Retrieved from <http://www.itrs2.net/>
- Kato, T., Sugiyama, A., Ueda, K., Yoshida, H., Miyazaki, S., Tsutsumi, T., ... Lin, G. (2014). Advanced CD-SEM metrology for pattern roughness and local placement of lamellar DSA (Vol. 9050, p. 90501T-90501T-11). <http://doi.org/10.1117/12.2060924>
- Laachi, N., Delaney, K. T., Kim, B., Hur, S.-M., Bristol, R., Shykind, D., ... Fredrickson, G. H. (2015). Self-consistent field theory investigation of directed self-assembly in cylindrical confinement. *Journal of Polymer Science Part B: Polymer Physics*, 53(2), 142-153. <http://doi.org/10.1002/polb.23452>

- Ohta, T., & Kawasaki, K. (1986). Equilibrium morphology of block copolymer melts. *Macromolecules*, 19(10), 2621–2632. <http://doi.org/10.1021/ma00164a028>
- Pimenta Barros, P., Gharbi, A., Sarrazin, A., Tiron, R., Posseme, N., Barnola, S., ... Monget, C. (2015). DSA planarization approach to solve pattern density issue (Vol. 9428, p. 94280D–94280D–10). <http://doi.org/10.1117/12.2086810>
- Sarrazin, A. (2017). *Développement de techniques de patterning avancées pour les filières CMOS sub-10 nm*. Université de Nantes.
- SEMI International Standards. (2004). SEMI P18-92 (Reapproved 1104) - Specification for Overlay Capabilities of Wafer Steppers. Retrieved April 7, 2017, from <http://ams.semi.org/ebusiness/standards/SEMISTandardDetail.aspx?ProductID=211&DownloadID=1071>
- Sun, C.-C., Lee, S.-C., Hwang, W.-C., Hwang, J.-S., Tang, I.-T., & Fu, Y.-S. (2006). Surface free energy of alloy nitride coatings deposited using closed field unbalanced magnetron sputter ion plating. *Materials Transactions*, 47(10), 2533–2539.
- Tiron, R., Gharbi, A., Pimenta Barros, P., Bouanani, S., Lapeyre, C., Bos, S., ... Fleury, G. (2015). Template affinity role in CH shrink by DSA planarization (Vol. 9423, pp. 942317–942317–11). <http://doi.org/10.1117/12.2085819>
- Wei, Y., Glodde, M., Yusuff, H., Lawson, M., Chang, S. Y., Yoon, K. S., ... Kelling, M. (2011). Performance of tri-layer process required for 22 nm and beyond (p. 79722L). Presented at the Advances in Resist Materials and Processing Technology XXVIII, San Jose, California, USA. <http://doi.org/doi:10.1117/12.879301>
- Wu, S. (1970). Surface and interfacial tensions of polymer melts. II. Poly(methyl methacrylate), poly(n-butyl methacrylate), and polystyrene. *The Journal of Physical Chemistry*, 74(3), 632–638. <http://doi.org/10.1021/j100698a026>
- Wuister, S. F., Ambesi, D., Druzhinina, T. S., Peeters, E., Finders, J., Wolterink, J. K., & Fraaije, J. G. E. M. (Hans). (2014). Fundamental study of placement errors in directed self-assembly. *Journal of Micro/Nanolithography, MEMS, and MOEMS*, 13(3), 033005–033005. <http://doi.org/10.1117/1.JMM.13.3.033005>
- Wuister, S. F., Finders, J., Peeters, E., & van Heesch, C. (2012). Lithography assisted self-assembly of contact holes on 300-mm wafer scale. *Journal of Micro/Nanolithography, MEMS, and MOEMS*, 11(3), 031304-1. <http://doi.org/10.1117/1.JMM.11.3.031304>
- Yamaguichi, S., Ueda, K., Kato, T., Hasegawa, N., Yamauchi, T., Kawakami, S., ... Kitano, T. (2014). New robust edge detection methodology for qualifying DSA characteristics by using CD SEM (Vol. 9050, p. 905029). <http://doi.org/10.1117/12.2046136>



## Chapitre III- Etude du procédé « shrink de contact »

---

Ce chapitre est consacré à l'étude du procédé « shrink de contact » par auto-assemblage dirigé des copolymères à blocs. La première partie de l'étude vise à déterminer le rôle des affinités de surface des cavités de guidage sur les performances DSA. A partir de cette étude préliminaire, la deuxième partie se concentre sur la mise en place du procédé de référence sur un masque 193i dédié au DSA. Nous proposons des pistes d'amélioration des performances, tant par l'optimisation du procédé que par la modification des matériaux. Nous présentons ensuite les stratégies de relaxation des contraintes existantes sur la résolution des guides. La troisième partie est dédiée à l'analyse de la défektivité à grande échelle, basée sur notre procédé de référence. Enfin, nous terminons ce chapitre par la quatrième partie consacrée au transfert des motifs DSA par gravure.

---



## CHAPITRE III- ETUDE DU PROCEDE « SHRINK DE CONTACT ».... 87

III.1 ROLE DE L'AFFINITE DE SURFACE SUR LES PERFORMANCES LITHOGRAPHIQUES DU « SHRINK DE CONTACT » .....	91
III.2 TRANSFERT DU PROCEDE DSA VERS LA LIGNE DE PRODUCTION .....	97
<i>III2.1 Mise en place des motifs de guidage</i> .....	97
III21.A Description du masque 193i dédié DSA .....	97
III21.B Evaluation de la lithographie .....	99
III21.C Evaluation de la gravure des guides .....	103
<i>III2.2 Implémentation du procédé DSA avec le polymère C35</i> .....	106
III22.A Optimisation du procédé de planarisation .....	106
III22.B Implémentation du procédé DSA pour le copolymère C35 .....	109
III22.C Optimisation du recuit thermique d'auto-assemblage du copolymère C35 .....	112
III22.D Influence de la formulation des copolymères à blocs sur les performances DSA.....	117
<i>III2.3 Stratégie de relaxation de la contrainte de résolution des guides</i> .....	120
III23.A Utilisation d'un homopolystyrène greffable hPS <sub>g</sub> de masse molaire plus grande .....	120
III23.B Utilisation d'un copolymère à blocs de période intrinsèque plus grande : C43 .....	122
III23.C Optimisation du recuit thermique d'auto-assemblage du copolymère C43 .....	124
III23.D Influence sur les performances lithographiques de l'homopolystyrène résiduel dans la solution de copolymère C43 .....	128
III23.E Récapitulatif des résultats .....	129
III.3 ANALYSE DE LA DEFECTIVITE A GRANDE ECHELLE .....	131
III.4 TRANSFERT PAR GRAVURE DU MOTIF DSA.....	134
III.5 CONCLUSION .....	141
BIBLIOGRAPHIE.....	145



### III.1 Rôle de l'affinité de surface sur les performances lithographiques du « shrink de contact »

Lorsqu'il est combiné avec une technique de lithographie conventionnelle, le DSA permet de résoudre des dimensions très agressives, appropriées aux nœuds technologiques avancés. Afin de démontrer le potentiel d'industrialisation de cette technique, il est nécessaire de déterminer un procédé de référence. Sachant que l'affinité de surface des motifs de guidage joue un rôle important sur la morphologie finale des motifs DSA après auto-organisation du copolymère à blocs (cf. [chapitre II, paragraphe II.3](#)), nous avons décidé d'investiguer trois procédés différents : l'approche « PMMA-affine » qui ne nécessite pas de préparation de surface (bords et fond de cavité d'affinité PMMA), l'approche « neutre » qui permet de différencier les bords de cavités (affinité PMMA) et le fond (même affinité pour le bloc PS que pour le bloc PMMA) et l'approche « PS-affine » en greffant un homopolystyrène (hPS<sub>g</sub>) sur toute la surface des guides (bords et fond de cavité d'affinité PS).

Pour étudier ces trois procédés, nous avons tout d'abord utilisé la lithographie e-beam pour générer, sur plaque 300 mm, des motifs à CD variables afin de déterminer quelles dimensions de guides permettent le meilleur auto-assemblage pour chaque procédé : il s'agit de la fenêtre de procédé DSA. Il est à noter que ces champs sont relativement petits (environ 100  $\mu\text{m}^2$ ), ce qui n'est pas assez pour une étude de défektivité solide car le nombre de motifs est trop faible pour faire de la statistique poussée. L'exploration de ces champs est cependant suffisante pour une première évaluation. Chaque point de mesure correspond à 90 contacts DSA (soit une moyenne sur 10 images CD-SEM de 9 contacts chacune). Chaque procédé est analysé sur environ 7 points de mesures différents (7 CD de guide visés différents), ce qui correspond à un total de plus de 600 contacts inspectés.

Une première étude post-ouverture de guide permet de mesurer les CD de guide réels. En parallèle, des plaques post-DSA sont générées afin de contrôler le taux d'ouverture de contacts (HOY), le  $\text{CD}_{\text{DSA}}$  et la  $\text{CDU}_{\text{DSA}}$  associée ainsi que l'erreur de placement. Nous avons ensuite corrélé ces paramètres avec les  $\text{CD}_{\text{guide}}$  précédemment mesurés pour en déduire les fenêtres de procédés DSA. Afin d'optimiser le temps d'acquisition des images CD-SEM, la résolution des images est limitée à 512 par 512 pixels (intégration 32), tant pour les images post-gravure que post-DSA (ce qui correspond au set d'images post-DSA « e-beam » explicité dans le [tableau II-4 du chapitre II, paragraphe II.5](#)) et ce, pour l'évaluation du HOY, de la  $\text{CDU}_{\text{DSA}}$  et du PE dont les détails sont donnés au [chapitre II, paragraphe II.2](#).

A l'aide d'images CD-SEM, nous avons d'abord cherché les tailles de guide donnant le moins de défauts DSA pour chacun des trois procédés. La figure ci-après présente le taux d'ouvertures de contacts (HOY) en fonction du CD de guide pour les trois procédés étudiés (cf. figure III-1).

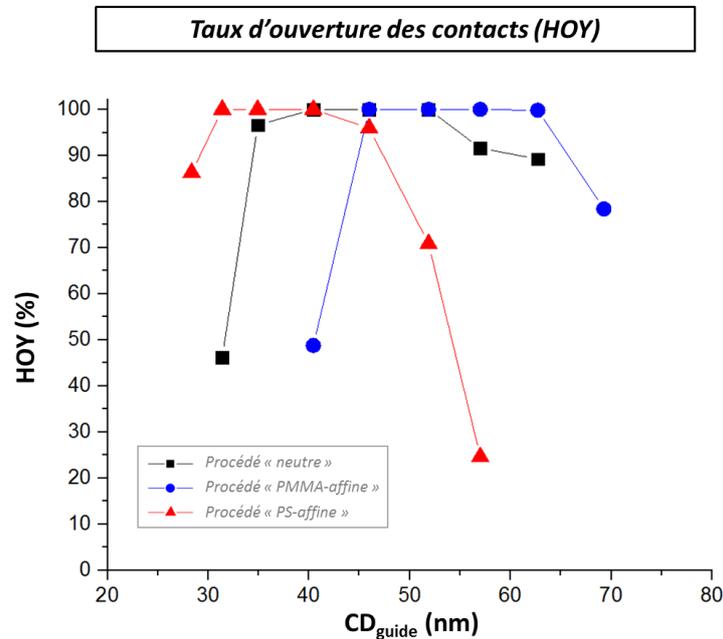


Figure III-1 : Taux d'ouverture de contacts (HOY) en fonction du CD de guide pour les trois procédés avec le copolymère C35 : en rouge l'approche « PS-affine », en noir l'approche « neutre » et en bleu l'approche « PMMA-affine ».

Nous remarquons dans un premier temps que la fenêtre de procédé DSA pour le « shrink de contact » est bien définie pour les trois procédés : il existe un plateau pour lequel le taux d'ouverture HOY est de 100 %. En dehors de ce plateau, le HOY décroît rapidement vers zéro. Pour les CD plus petits que la limite inférieure du plateau, la commensurabilité entre les guides et le copolymère n'est plus optimale et des défauts d'assemblage apparaissent comme des trous voilés comme nous pouvons le voir sur les images CD-SEM dans la figure III-2. Si le guide est trop grand par rapport à la période intrinsèque  $L_0$  du copolymère, ce dernier va avoir trop de degré de liberté et mener à une multiplication de domaines de PMMA voire à une création de défauts en profondeur.

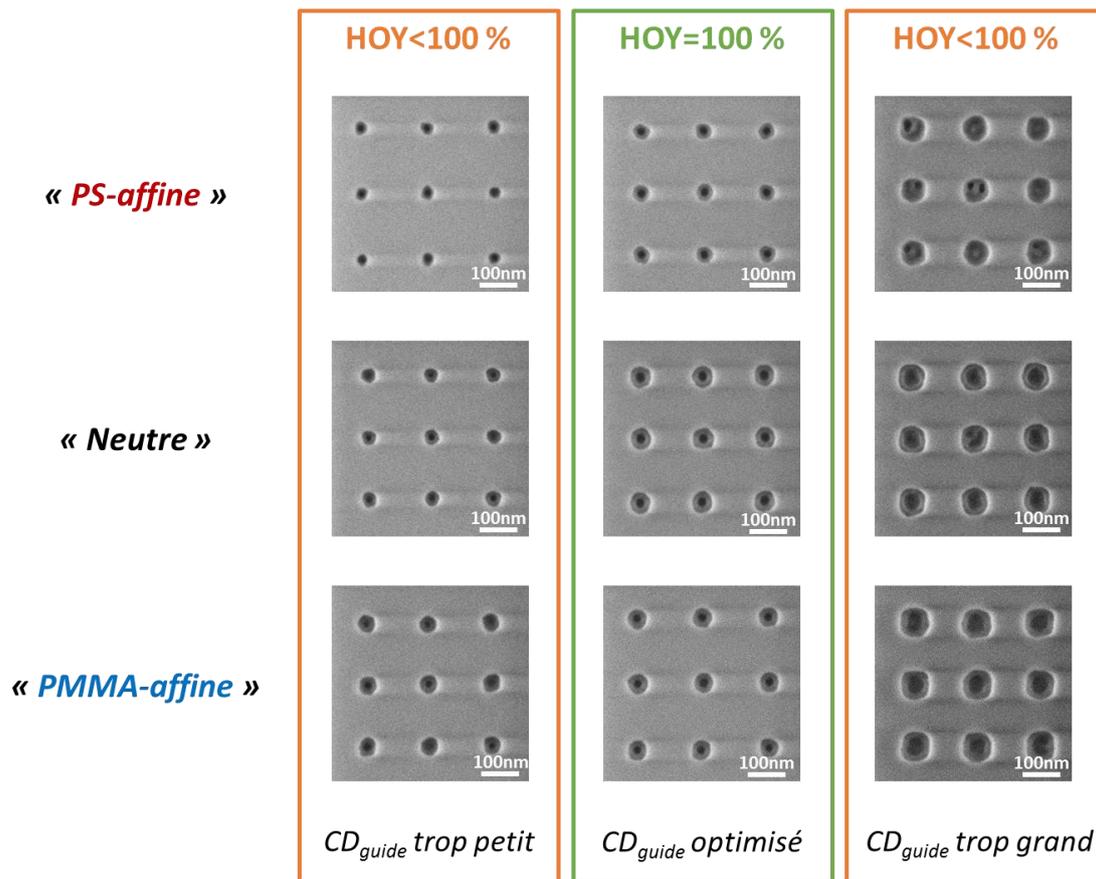


Figure III-2 : Images CD-SEM post-DSA prises pour différentes tailles de CD de guide : en dehors de la fenêtre de procédé (en orange) et dans la fenêtre de procédé (en vert) pour les trois approches pour le copolymère C35.

Comme intuité dans le chapitre II, la taille optimale de guide pour les trois affinités est différente (cf. figure II-4 du chapitre II, paragraphe III.1.3). Pour le procédé « PMMA-affine », la taille optimale des guides est la plus grande : quatre chaînes de copolymères sont alignées dans le guide avec un domaine de PMMA au centre du guide. Pour le procédé « PS-affine », le bloc PS vient en contact de l'hPS<sub>g</sub> greffé, c'est donc l'équivalent d'une période intrinsèque  $L_0$  qui est dans le guide. Le procédé « neutre » a quant à lui une fenêtre de procédé intermédiaire aux deux autres affinités. Le tableau suivant résume la fenêtre de procédé en termes de  $CD_{guide}$  pour les trois affinités (cf. tableau III-1).

C35	$CD_{guide}$ (nm)	Largeur de la fenêtre de procédé (nm)
« PS-affine »	32 – 45	13
« Neutre »	35 – 51	16
« PMMA-affine »	45 – 65	20

Tableau III-1 : Récapitulatif des gammes de CD de guide à l'intérieur de la fenêtre de procédé (HOY=100 %) pour les approches « PS-affine », « neutre » et « PMMA-affine » pour le copolymère C35.

Nous avons ensuite mesuré le  $CD_{DSA}$  en fonction du  $CD$  de guide comme explicité au chapitre précédent (cf. chapitre II, paragraphe II.2.1) : chaque point de mesures est la moyenne des  $CD_{DSA}$  mesurés sur toute la plaque (soit 675 contacts mesurés en tout). Comme le centre des fenêtres de procédé n'est pas le même selon les approches, nous avons normé le  $CD_{DSA}$  par sa valeur nominale obtenue au centre de la fenêtre de procédé pour chacun des procédés (cf. figure III-3).

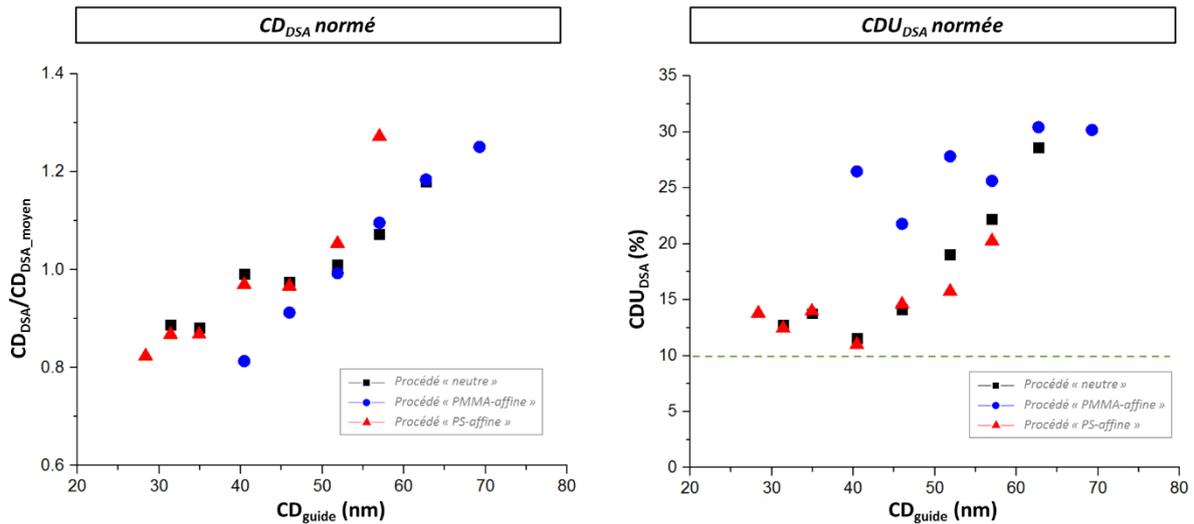


Figure III-3 :  $CD_{DSA}$  (normé par le  $CD_{DSA}$  moyen de chaque approche) (à gauche) et la  $CDU_{DSA}$  associée (à droite) en fonction du  $CD_{guide}$  pour les approches « PMMA-affine » (en rond bleu), « neutre » (en carré noir) et « PS-affine » (en triangle rouge) pour le copolymère C35. En vert en pointillé : la limite de  $CDU_{DSA}=10\%$ .

Tout d'abord, nous remarquons que la taille des contacts DSA augmente avec la taille de guide quelle que soit l'approche implémentée et de manière plus linéaire pour l'approche « PMMA-affine ». Nos résultats expérimentaux sont en accord avec des résultats de simulation, reportés auparavant dans la littérature. Yi *et al.* ont démontré sur le procédé « PMMA-affine » que lorsque le guide est agrandi, le copolymère a plus de degré de liberté dans la cavité et les chaînes s'étirent afin de remplir l'espace dans le guide, à l'instar d'un ressort [Yi 2012]. Basés sur ce modèle, Wuister *et al.* a fait des simulations DDFIT montrant une dépendance de la taille du domaine de PMMA en fonction de la taille de guide : plus le guide est grand, plus le domaine de PMMA est important [Wuister 2014]. Notons ici que les données expérimentales de Wuister *et al.*, générées sur environ 100 contacts ne valident pas les simulations qu'ils ont réalisées, contrairement à nos résultats expérimentaux sans doute plus robustes (environ 600 contacts mesurés).

Pour les procédés « PS-affine » et « neutre », les comportements sont similaires et nous observons un plateau qui n'est pas présent pour le procédé « PMMA-affine ». Le plateau s'étend pour des  $CD_{guide}$  de 40 nm à 50 nm (soit 10 nm de largeur), ce qui correspond à une variation de 11 % autour d'un  $CD_{guide}$  de 45 nm ( $\pm 5$  nm). Or, la variation du  $CD_{guide}$  dû à la lithographie/gravure est d'environ 8 %. La fenêtre de procédé DSA est donc plus grande que la fenêtre de procédé de

la lithographie de guide. Sur ce plateau, comme le  $CD_{DSA}$  est constant, les copolymères à blocs absorbent a fortiori la variation sur le  $CD_{guide}$  pour les approches « PS-affine » et « neutre ». Ainsi, le procédé DSA permet de faire de la correction de motifs de guide. Le procédé « PMMA-affine » ne présente pas cette latitude, sans doute parce que l'affinité de la cavité n'est pas bien contrôlée comme il n'y a pas de traitement spécifique fait au préalable.

L'uniformité de CD des contacts DSA est également impactée par la variation du CD de guide. D'après la [figure III-3](#), la variation de  $CDU_{DSA}$  (normalisée par le  $CD_{DSA}$ ) en fonction du  $CD_{guide}$  présente des sortes de puits de potentiel pour les approches « PS-affine » et « neutre » : la  $CDU_{DSA}$  est minimisée pour les valeurs les plus faibles de  $CD_{guide}$  (autour de 40 nm), là où le polymère est le plus contraint. Le procédé « PMMA-affine » présente une  $CDU_{DSA}$  (normalisée par le  $CD_{DSA}$ ) bien plus élevée et en dehors des spécifications (nous devons atteindre :  $CDU < 10\%$  du  $CD_{DSA}$ ). Cela est potentiellement dû au fait que l'affinité des surfaces du guide n'est pas contrôlée. Bien que la  $CDU_{DSA}$  soit supérieure à la limite acceptable fixée à 10 % pour les trois procédés, ces tests restent préliminaires et il conviendra d'optimiser finement les paramètres procédés afin de diminuer la CDU. Cette étude sera présentée plus loin dans ce chapitre.

L'analyse de l'erreur de placement en fonction du CD de guide permet de consolider l'étude de la fenêtre de procédé. Pour ce faire, nous analysons les mêmes images CD-SEM qui ont servi à l'évaluation du  $CD_{DSA}$  afin de déterminer, via le logiciel DGMage, l'erreur de placement (PE) de chaque contact DSA. Chaque point correspond à une moyenne de PE calculée sur une image par puce (9 contacts par image). Le détail de la méthodologie de mesure est reporté dans le [chapitre II, paragraphe II.2.3](#). Le graphique suivant montre l'évolution de l'erreur de placement en fonction du  $CD_{guide}$  pour les trois approches (cf. [figure III-4](#)).

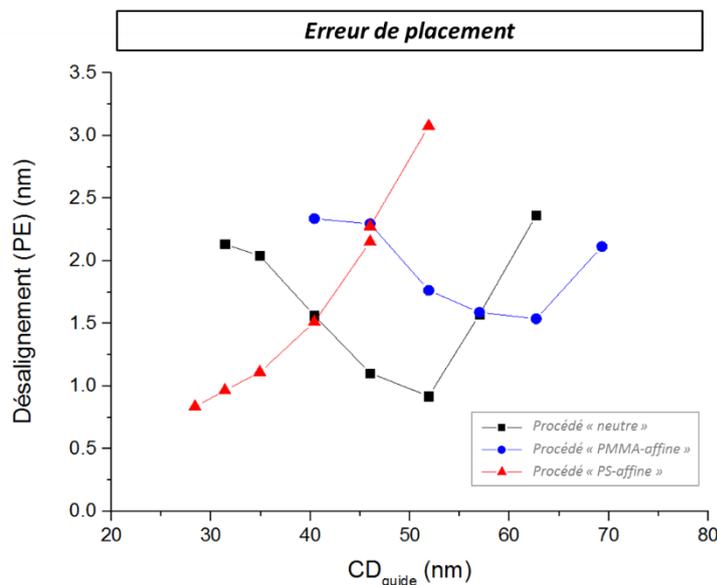


Figure III-4 : Erreur de placement en fonction du CD de guide pour les approches « PMMA-affine » (en rond bleu), « neutre » (en carré noir) et « PS-affine » (en triangle rouge) pour le copolymère C35.

L'évolution de ce paramètre se fait en puits de potentiel pour les trois procédés, avec un décalage du minimum de PE vers les CD de guide les plus grands pour le procédé « PMMA-affine » et vers les plus petits pour le « PS-affine », le procédé « neutre » étant intermédiaire. Rappelons ici que la limite maximale de désalignement généralement autorisée dans l'industrie est de 2 nm [Wuister 2014]. Les trois procédés permettent d'atteindre des PE en-dessous de cette limite. Pour les trois affinités, les plus petites valeurs de PE sont obtenues à l'intérieur de la fenêtre de procédé (où le HOY est de 100 %). Pour le procédé « PS-affine », le PE est le plus faible pour les  $CD_{\text{guide}}$  les plus petits : la contrainte sur les chaînes de copolymères permet de réduire les risques de désalignement. Pour les procédés « neutre » et « PS-affine », le PE et la  $CDU_{\text{DSA}}$  optimaux ne sont pas au même  $CD_{\text{guide}}$  : un compromis entre ces deux paramètres est à trouver puisqu'il n'est pas possible de minimiser les deux à la fois. Le procédé « PMMA-affine » induit une erreur de placement globalement plus grande que les deux autres affinités, le discriminant encore une fois pour son adoption en tant que procédé de référence.

En résumé, le tableau ci-dessous regroupe les meilleures performances DSA obtenues à l'intérieur de la fenêtre de procédé pour les trois procédés : « PS-affine », « neutre » et « PMMA-affine » (cf. [tableau III-2](#)).

<i>C35</i>	HOY (%)	$CD_{\text{DSA}}$ (nm)	$CDU_{\text{DSA}}$ (nm)	PE (nm)	$CD_{\text{guide}}$ (nm)
« PMMA-affine »	100	28.2	6.1 (21.8 %)	2.3	46.0
« Neutre »	100	23.0	2.7 (11.5 %)	1.6	40.4
« PS-affine »	100	25.1	2.8 (11.0 %)	1.5	40.4

*Statistiques sur environ 620 contacts.*

**Tableau III-2 : Résumé des meilleures performances DSA obtenues à l'intérieur de la fenêtre de procédés pour les trois approches, avec le taux d'ouverture de contacts (HOY) et l'erreur de placement (PE) associés avec le copolymère C35.**

En termes de  $CDU_{\text{DSA}}$  et de PE, le procédé « PMMA-affine » est bien moins bon que les deux autres, c'est pourquoi il ne sera pas privilégié pour être adopté en tant que procédé de référence pour le « shrink de contact ». De plus, les procédés « neutre » et « PS-affine » nécessitent des  $CD_{\text{guide}}$  plus faibles donc permettent une densité plus forte. Cependant, comme nous l'avons vu dans le chapitre précédent (cf. [figure II-3](#) du [chapitre II, paragraphe II3](#)), le procédé « neutre » ne permet pas d'adresser toutes les densités. Nous avons donc choisi d'intégrer le procédé « PS-affine » comme ligne de base pour le « shrink de contact ». Néanmoins, la fabrication des faibles  $CD_{\text{guide}}$  nécessaires à l'auto-assemblage pour cette approche est un défi pour la lithographie 193i.

## III.2 Transfert du procédé DSA vers la ligne de production

Nous rappelons ici le but de l'étude qui est d'intégrer le procédé DSA avec la lithographie 193i utilisée en production à STMicroelectronics. Pour démontrer son potentiel d'industrialisation, il faut également démontrer que le taux de défauts de ce procédé est faible. Pour ce faire, nous avons développé un masque dédié à l'étude de la défektivité. Ce masque de lithographie 193i présente de grands champs de contacts permettant de faire des mesures statistiques. De plus, cette technique permet de générer plus facilement un volume conséquent de plaques nécessaires à l'optimisation du procédé et à l'évaluation des performances de la lithographie par DSA.

### III.2.1 Mise en place des motifs de guidage

#### III.2.1.A Description du masque 193i dédié DSA

Le masque intitulé *Bodhi* comporte deux familles de motifs : des champs de défektivité et des champs de tests de motifs à géométries et densités variables que nous appellerons par la suite « champs à CD variables ». Le plan schématique du masque est présenté dans la figure suivante (cf. figure III-5).

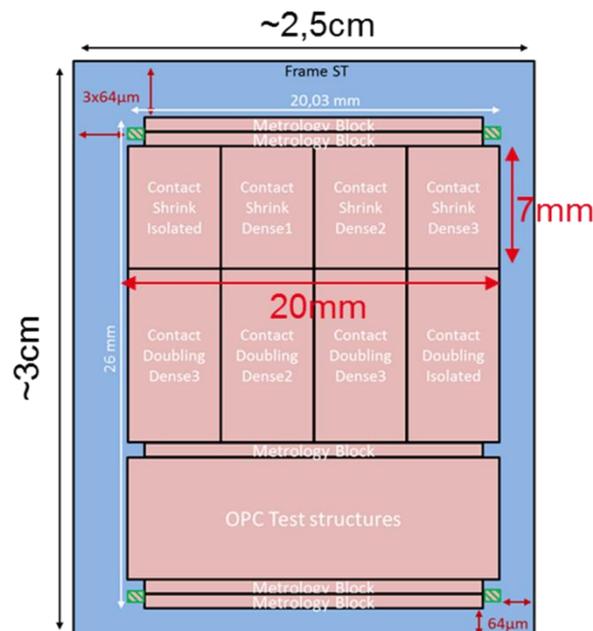


Figure III-5 : Plan schématique du masque Bodhi détaillant les différentes zones.

Sur la [figure III-5](#), les champs de défektivité sont notés « Contact Shrink X » (pour le « shrink de contact » à densité de guide variable) ou « Contact Doubling X » (pour le dédoublement de contacts à densité de guide variable). Les champs à CD variables sont notés « OPC Test structures ». Les blocs « Metrology » sont quant à eux spécifiques à la mise en place de recettes sur les équipements de défektivité et de métrologie.

**Les champs dédiés à la défektivité :** la zone dédiée à la défektivité est composée de grandes matrices de contacts (ou d'ellipses) ayant tous le même CD afin de pouvoir évaluer le DSA sur un grand nombre de contacts DSA. Cette zone se sépare en deux grands champs : une partie est dédiée au « shrink de contact » (« Contact Shrink X » avec X la densité des motifs de guide sur la [figure III-5](#)) et l'autre au dédoublement de contacts (« Contact Doubling X »). Chacun de ces deux champs est subdivisé en quatre parties qui se distinguent par la densité des motifs de guides. Ils sont constitués de contacts espacés respectivement de 120 nm (dense 1), 180 nm (dense 2), 250 nm (dense 3) et 500 nm (isolated) (cf. [figure III-6](#)). Chaque zone forme un grand rectangle de 7 mm par 5 mm. Pour le « shrink de contact », le champ le plus dense représente ainsi plus de 2.4 milliards de contacts (le moins dense, 140 millions).

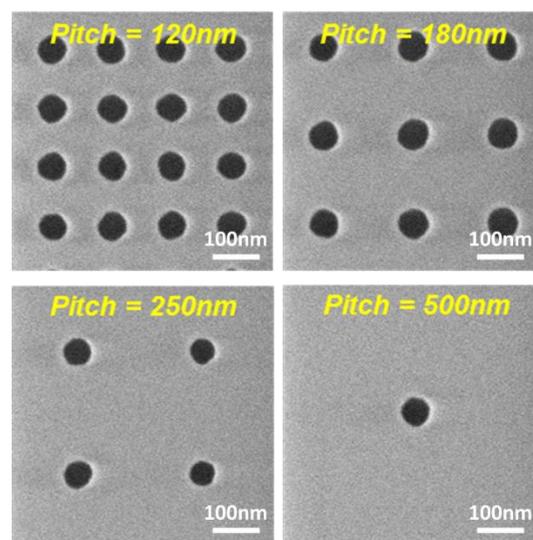


Figure III-6 : Images CD-SEM post-ouverture des guides, prises dans les champs de défektivité pour le « shrink de contact » pour différentes densités.

**Les champs à CD variables :** ils sont issus d'une base e-beam embarquée sur le masque de lithographie 193i (noté « OPC test structure » sur la [figure III-5](#)). Cette base sert à tester la robustesse de certains OPC (*Optical Proximity Correction* pour correction d'effet optique de proximité). L'OPC consiste en l'ajout de figures géométriques placées autour des motifs sur le masque afin d'optimiser la distribution de l'illumination sur la résine. Dans notre cas, une partie de ces champs nous permet d'avoir accès à la fois à des CD et des densités de contacts variables pour

le « shrink » et le dédoublement de contacts. Les matrices de motifs appartenant à ces champs sont beaucoup plus petites que les champs de défektivité et présentent à la fois des contacts simples et des formes elliptiques. Ces matrices font environ  $5\ \mu\text{m}$  par  $5\ \mu\text{m}$ , comprenant donc quelques dizaines de contacts « shrink » par matrice et par puce (42 contacts pour le pitch de guide de 120 nm), ce qui n'est pas suffisant pour réaliser des mesures statistiques à grande échelle. Cependant, ces champs seront utilisés pour évaluer les différents polymères mis à notre disposition, en particulier pour le dédoublement de contacts.

### III21.B Evaluation de la lithographie

L'étude sur le véhicule de tests sur plaques e-beam a permis d'une part d'identifier l'affinité de surface de guidage à utiliser et d'autre part de cibler les dimensions de guide nécessaires pour le « shrink de contact » d'un copolymère à blocs donné. Pour le procédé « PS-affine » que nous allons implémenter sur plaque structurée par lithographie 193i, la taille de guide optimale est évaluée à environ 40 – 50 nm. Cette dimension est en limite de fenêtre de procédé de la lithographie 193i. Pour pallier en partie à cela, nous disposons d'une gravure du masque dur qui permet un biais de -10 nm entre la dimension post-lithographie et la dimension après ouverture du masque dur. Ainsi, la dimension de guide visé post-lithographie est encore relâchée :  $CD_{\text{guide visé}} = 50 - 60\ \text{nm}$ .

La dimension réelle des contacts sur la plaque dépend des conditions d'insolation de la lithographie 193i, et en particulier de deux paramètres : la dose et le focus. La **dose**, exprimée en  $\text{mJ}\cdot\text{cm}^{-2}$ , quantifie l'énergie lumineuse envoyée par unité de surface sur la plaque de silicium. Nous utilisons une résine NTD (cf. chapitre II, paragraphe III.2) : plus la dose est forte, plus les CD finaux sont petits. Le **focus** est la distance focale entre le plan focal de la source lumineuse et la surface du substrat, exprimé en nm. Pendant le procédé de lithographie, le but est de concentrer la puissance lumineuse au bon endroit dans la couche de résine, ni trop en surface, ni trop en profondeur, afin d'optimiser l'impression des motifs et limiter les réflexions parasites. Ce paramètre dépend beaucoup de l'empilement technologique des couches de matériau, de leur épaisseur et de leur indice optique. En pratique, ce que nous appelons focus par la suite est en réalité un décalage en focus : la distance focale est fixée dans l'équipement mais nécessite un réglage plus fin afin de s'adapter à la plaque de silicium sur laquelle l'impression des motifs va être faite. Ce décalage en focus, de l'ordre de quelques nanomètres à quelques microns, va être pris en compte lors de la détermination des conditions optimales d'insolation.

En se basant sur l'étude d'un masque auparavant utilisé pour le « shrink de contact » sur le même empilement technologique (LTO/TiN/SOC/SiARC), il a été choisi comme condition d'insolation nominale :  $dose_{\text{nom}} = 24.7\ \text{mJ}\cdot\text{cm}^{-2}$  et  $focus_{\text{nom}} = -80\ \text{nm}$ . Cependant, des variations de procédés autour de ces valeurs peuvent apparaître puisque les masques, donc les corrections OPC associées, sont différents. Ainsi, il reste à vérifier que les conditions de lithographie 193i restituent au mieux les dimensions visées. Les plaques « FEM » (*Focus Exposure Matrix* pour matrice d'exposition à dose/focus variables) sont des plaques pour lesquelles les conditions d'insolation (dose et focus) sont différentes pour chaque puce. Le focus est constant sur chaque ligne de puces et augmente d'une colonne à l'autre et la dose est constante sur chaque colonne et augmente d'une ligne à l'autre. Nous avons choisi des pas de variation des paramètres dose/focus relativement larges pour une

première évaluation puis nous les avons resserrés pour affiner l'estimation des conditions optimales. Ainsi, nous faisons varier la dose d'une puce à l'autre de  $1 \text{ mJ.cm}^{-2}$  puis dans un second temps de  $0.3 \text{ mJ.cm}^{-2}$  autour de la dose nominale et le focus de  $30 \text{ nm}$  autour de la valeur nominale. Les CD des motifs sont évalués pour chaque puce (donc pour chaque couple dose/focus) et sont résumés dans des courbes dites de « Bossung ». Ces courbes tracent le CD des motifs en fonction du focus pour plusieurs doses. Les points correspondent aux mesures de CD faites sur les plaques via les images CD-SEM (cf. chapitre II, paragraphe II.2.1), les traits pleins sont les courbes théoriques de corrélation (fit) traçant la variation de CD en fonction du focus pour chaque dose (cf. figure III-7). Cette étude est faite pour les quatre densités de motifs de guide sur le même principe afin de trouver une fenêtre de procédé lithographique commune. Seules les courbes de « Bossung » sur le pitch  $120 \text{ nm}$  sont présentées ici.

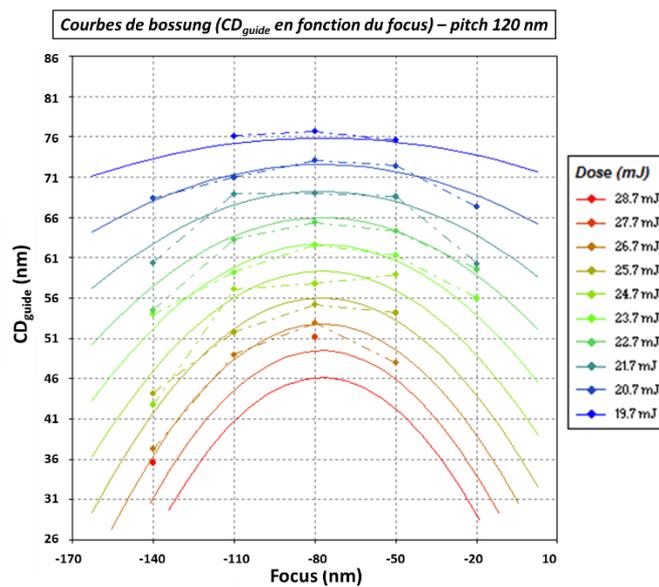


Figure III-7 : Courbe de Bossung ( $CD_{\text{guide}}$  en fonction du focus pour plusieurs doses) pour un motif de pitch=120 nm.

L'ensemble des courbes de « Bossung » sont centrées autour du focus nominal ( $-80 \text{ nm}$ ), également utilisé pour d'autres masques sur le même empilement technologique que celui utilisé ici pour notre étude. En analysant la cartographie de la plaque FEM, nous remarquons que les motifs hors focus présentent de nombreux défauts comme des contacts manquants ou une  $CDU_{\text{guide}}$  visiblement mauvaise (cf. figure III-8). Bien que les focus à  $-50 \text{ nm}$  et  $-110 \text{ nm}$  donnent également de bons résultats, nous décidons de fixer le focus au centre de la fenêtre de procédé pour éviter toute perturbation de l'équipement qui peut entraîner une variation de CD non maîtrisée. **Le focus est donc fixé à  $-80 \text{ nm}$  pour le reste de l'étude.**

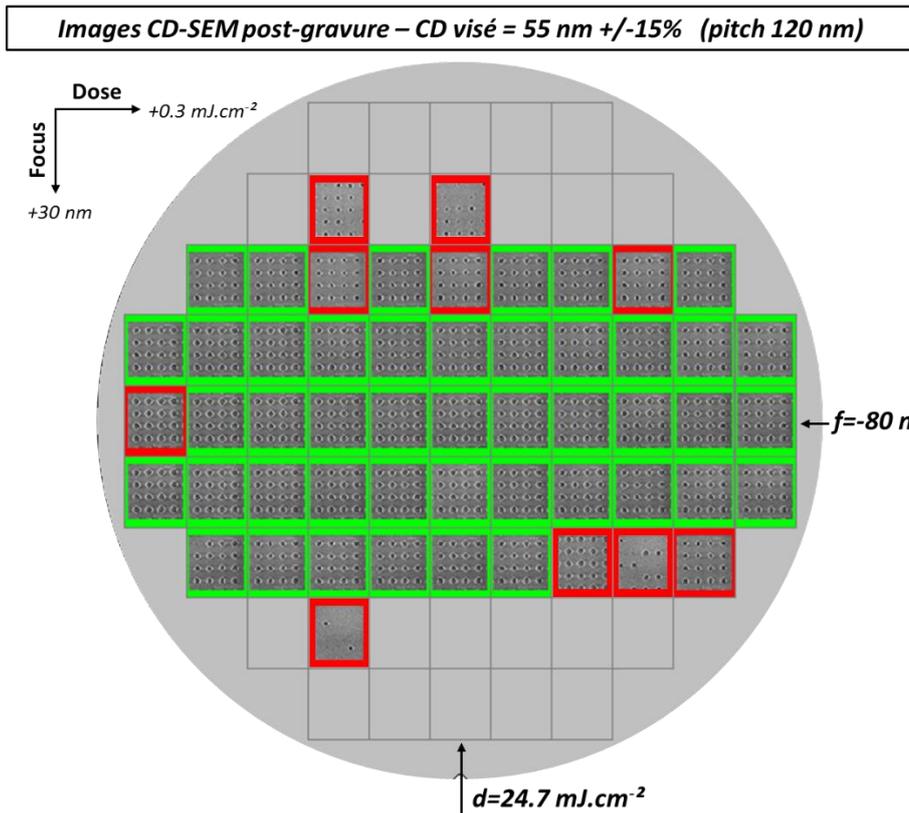


Figure III-8 : Images CD-SEM des motifs 120 nm post-lithographie pour différentes puces (donc différents couples dose/focus). Le  $CD_{\text{guide}}$  visé post-lithographie est de  $55 \text{ nm} \pm 15\%$ . En vert : les CD sont dans les spécifications. En rouge : défauts présents (mauvais CD et/ou motifs manquants).

Le graphique ci-après montre le CD des motifs mesurés post-lithographie en fonction de la dose d'insolation pour le focus fixé à  $-80 \text{ nm}$  (cf. figure III-9).

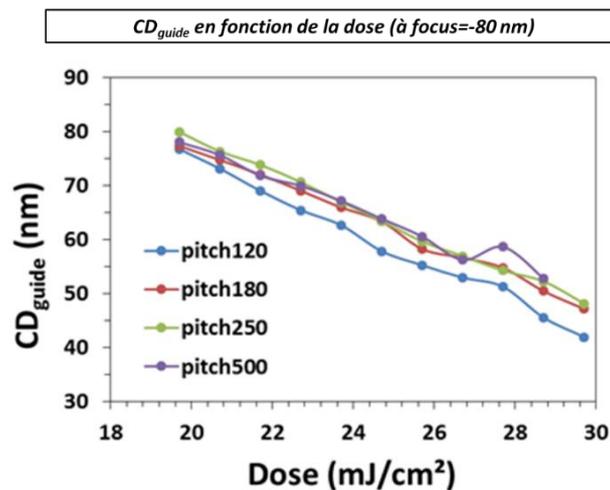


Figure III-9 :  $CD_{\text{guide}}$  en fonction de la dose au focus nominal ( $f = -80 \text{ nm}$ ) pour différents pitches de motifs.

Au focus fixé, nous avons accès à une grande gamme de CD post-lithographie, entre 40 nm et 80 nm. Néanmoins, ces valeurs en extrême limite de fenêtre de procédé peuvent conduire à des défauts d'impression. L'uniformité de CD locale, basée sur les images CD-SEM d'une même zone de contacts et d'une seule puce, a été mesurée sur environ 500 contacts pour chaque dose et chaque pitch (à focus nominal). Elle est de 4 à 5 nm selon le pitch, ce qui correspond à 10 % du CD de guide dans le cas le plus extrême ( $CD_{\text{guide}}=40$  nm) : cette valeur est dans les spécificités requises. **Pour conclure, la dose nous permettant de résoudre les contacts à un CD d'environ 55 nm est à  $24.7 \text{ mJ.cm}^{-2}$ .**

Finalement, avec les conditions de dose et focus fixées, nous obtenons les CD de guide post-lithographie suivants pour différentes densités de motifs (cf. figure III-10) :

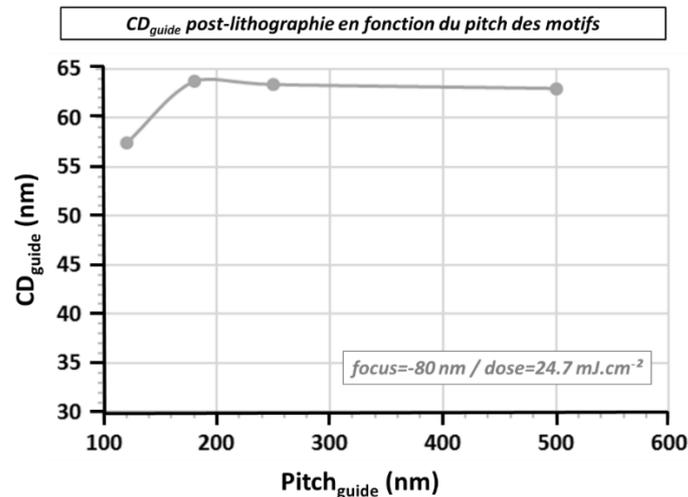


Figure III-10 : CD des motifs post-lithographie en fonction du pitch des guides.

Nous remarquons que le pitch 120 nm présente des contacts en moyenne 5 nm plus petits que les autres pitches. Ceci est expliqué par le fait que l'OPC ne soit pas bien optimisé pour le pitch 120 nm, contrairement aux autres densités pour le CD visé. En effet, les figures géométriques qui forment l'OPC sont placées autour des contacts. Or pour le pitch 120 nm, il n'y a pas assez de places entre les contacts car la densité des motifs est trop importante. Un nouveau OPC serait nécessaire pour sortir toutes les densités au même CD, ce qui impliquerait la fabrication d'un nouveau masque de lithographie 193i.

### III21.C Evaluation de la gravure des guides

Afin d'ouvrir les couches de SiARC et de SOC, nous utilisons des gravures sèches à base de plasma dont le détail est reporté dans le chapitre précédent (cf. [tableau II-2 du chapitre II, paragraphe III.2](#)). Elle présente la particularité de créer un biais négatif contrôlé d'environ 10 nm. Cela signifie que les motifs de guidage sont 10 nm plus petits après ouverture de la tricouche résine/SiARC/SOC qu'après développement de la résine. Ce biais permet de compenser une partie de la limitation de la lithographie optique ( $CD_{\text{guide}}$  environ à 55 nm post-lithographie) et d'atteindre ainsi des CD plus agressif (jusqu'à 30 nm post-gravure), bien qu'en pratique, le CD visé soit autour de 45 nm post-ouverture du masque dur. Nous avons choisi cette gravure en se basant sur la CDU des contacts et l'uniformité bord-centre de plaque. Pour ce faire, deux recettes de gravure ont été explorées. Le détail de ces recettes est résumé dans le tableau suivant (cf. [tableau III-3](#)). Ces deux recettes permettent d'atteindre un taux d'ouverture de motifs de guidage (HOY) de 100 %.

	Recette 1		Recette 2	
	Ouverture du SiARC	Ouverture du SOC	Ouverture du SiARC	Ouverture du SOC
<b>Gaz (débit en sccm)</b>	CH <sub>2</sub> F <sub>2</sub> (26)/ CF <sub>4</sub> (88)/ He (50)/ HBr (30)	HBr (35)/ O <sub>2</sub> (50)	CH <sub>2</sub> F <sub>2</sub> (20)/ CF <sub>4</sub> (40)/ He (240) <sup>Y</sup>	HBr (35)/ O <sub>2</sub> (50)
<b>Temps (s)</b>	45	22	18	22
<b>Pression (mTorr)</b>	5	5	7	5
<b>Puissance de la source (W)</b>	500	533	200	533
<b>Tension d'auto-polarisation (V)</b>	100	450	600	450

<sup>Y</sup> Etape précédé d'une étape de densification de la résine (appelé « cure ») (HBr 30 s)

**Tableau III-3 : Récapitulatif des recettes testées pour l'ouverture des couches SiARC et SOC.**

Les deux recettes de gravure testées sont basées sur la même recette d'ouverture du SOC, seuls les paramètres mis en jeu dans l'ouverture du SiARC diffèrent.

La chimie utilisée va jouer sur la sélectivité de la gravure. Plus le plasma est riche en carbone, plus la gravure sera sélective à la résine. Plus il y a de fluor dans le plasma, plus la gravure de l'oxyde (SiARC ici) sera importante. L'hélium (He) est essentiellement présent pour diluer les espèces réactives. En proportion, la recette 2 a moins de fluor et de carbone que la recette 1 car le mélange est davantage dilué (débit de He environ 5 fois plus important que dans la recette 1). En plus de ces espèces, la recette 1 met en jeu du HBr, souvent utilisé pour durcir la résine. La recette 1 met donc en jeu plus d'espèce chimique que la recette 2, ce qui la rend potentiellement plus isotrope et ce qui pourrait conduire à des CD plus larges.

La puissance de la source est liée à la densité du plasma : plus la puissance est grande, plus les espèces sont dissociées donc les entités réactives (ions, radicaux...) sont présentes dans le plasma. La recette 1 est utilisée avec une puissance plus importante que la recette 2, ce qui la rend davantage réactive.

La tension d'auto-polarisation (aussi appelée « bias ») est la tension appliquée sur la plaque afin d'accélérer les espèces ionisées du plasma. Plus cette tension grande, plus les espèces sont réactives et accélérées de manière unidirectionnelle, plus les ions arrivant sur le substrat sont énergétiques, ce qui contribue à l'anisotropie de la gravure. Ainsi, la recette 2 compense le manque de réactivité chimique par une grande anisotropie. Les CD des motifs transférés avec cette recette devraient donc être plus petits que ceux transférés avec la recette 1.

La pression est du même ordre de grandeur dans les deux recettes et ne sera donc pas significative dans l'analyse des résultats. Le temps de gravure est quant à lui adapté afin d'obtenir une ouverture des contacts identiques pour les deux recettes.

Les figures suivantes représentent les CD de motifs post-lithographie et post-gravure pour les deux gravures, accompagnés de la  $CD_{guide}$  associée pour les quatre pitches (cf. figure III-11).

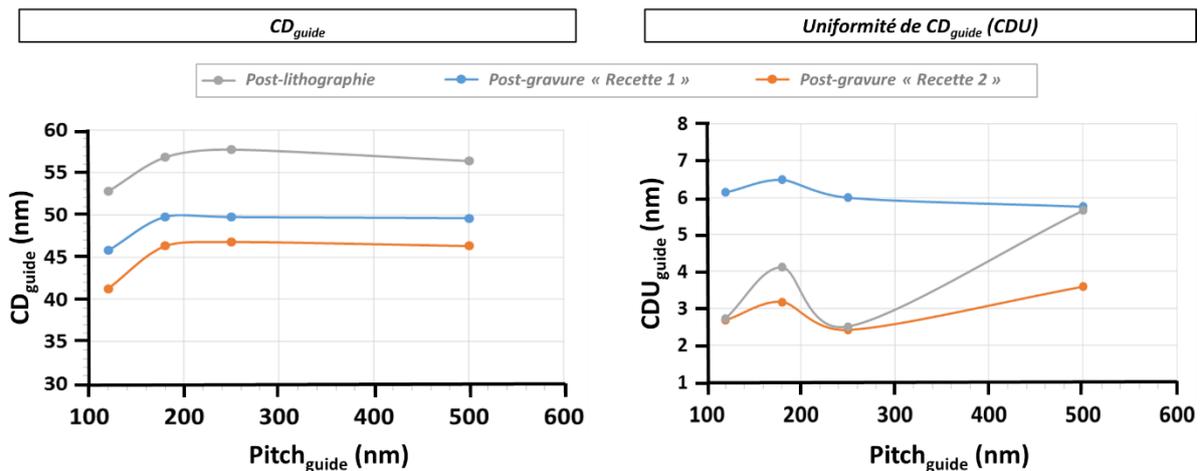


Figure III-11 : CD de guide (à gauche) et CDU associée (à droite) en fonction du pitch pour les contacts post-lithographie (en gris) et post-gravure « Recette 1 » (en bleu) et post-gravure « Recette 2 » (en orange).

Les résultats que nous obtenons en termes de CD confirment bien nos hypothèses : la recette 1 donne des CD plus larges que la recette 2. Les deux gravures permettent d'avoir un biais négatif, qui est plus important pour la recette 2 (10 nm) que la recette 1 (7 nm). Cependant, aucune d'entre elles ne permet de compenser les 5 nm d'écart entre les CD du pitch 120 nm et le CD des autres pitches : le biais induit par la gravure ne dépend pas de la densité des motifs, ce qui est une bonne chose. L'uniformité de CD (CDU) permet de différencier davantage les deux recettes de gravure. La recette 1 dégrade fortement la CDU post-lithographie (6.1 nm en moyenne au lieu de 2.7 nm

post-lithographie pour le pitch 120 nm). En particulier, la CDU dans ce cas correspond à 13 % du CD moyen, ce qui est au-dessus de la limite fixée (10 %). La recette 2 quant à elle permet de conserver la même CDU, voire de l'améliorer pour les pitches 180 nm et 500 nm.

La recette 2 semble être la meilleure pour l'ouverture des guides puisqu'elle permet d'avoir une CDU relativement uniforme quelle que soit la densité des motifs et un biais plus important. Nous cherchons également à vérifier que la gravure est uniforme sur toute une plaque. Pour cela, nous avons insolé deux plaques entières avec les mêmes conditions de lithographie (dose et focus nominaux) : toutes les puces sont au même CD. La première plaque a été gravée avec la recette 1, la deuxième avec la recette 2. Nous avons ensuite pris des images CD-SEM sur cinq puces différentes le long des plaques comme explicité dans le schéma associé à la [figure III-12](#). Le CD mesuré sur environ 500 contacts par puce est évalué (soit 30 images CD-SEM par puce). Nous avons comparé ces résultats avec les mesures de CD post-lithographie des puces correspondantes. La figure suivante présente le CD des motifs mesurés en fonction de la position des puces le long de la plaque pour les deux recettes de gravure (cf. [figure III-12](#)). Cette étude a été menée sur le pitch 120 nm car il présente les CD les plus agressifs donc les plus critiques à reproduire.

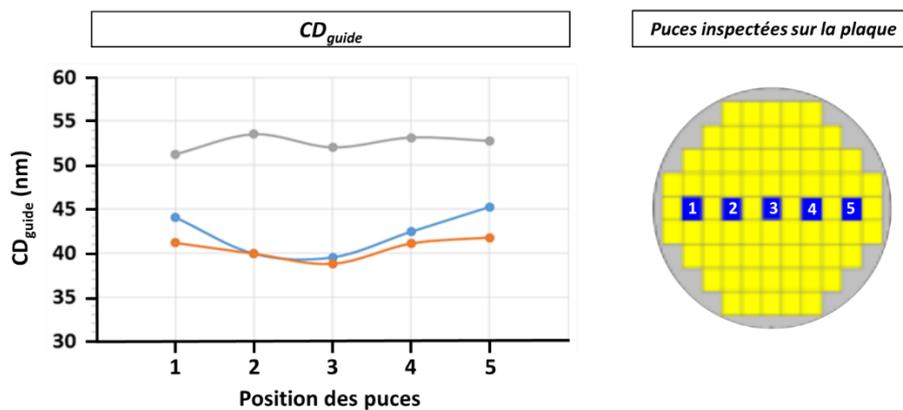


Figure III-12 : CD des motifs après lithographie (en gris) et après l'ouverture des guides avec la « recette 1 » (en bleu) et la « recette 2 » (en orange).

La lithographie est homogène le long de la plaque puisque la variation de CD entre le bord et le centre de la plaque est faible (seulement quelques nanomètres). Cette variation est légèrement supérieure pour les plaques après gravure, en particulier pour la recette 1 qui cumule un écart de 5 nm entre le centre et le bord droit de la puce (position 5). La recette 2 permet un meilleur contrôle des dimensions à travers la plaque puisque l'écart de CD entre le bord et le centre n'est que d'environ 3 nm. Elle est donc inférieure à 10 % qui est la CDU observée généralement à l'issue de l'ouverture des guides. L'uniformité de la gravure peut être davantage améliorée en contrôlant la température de la plaque pendant la gravure.

Le [tableau III-4](#) résume les performances obtenues après optimisation de la lithographie et la gravure des guides pour le procédé DSA. Nous avons obtenu un procédé lithographie/gravure qui

permet d’avoir des dimensions stables sur toute la plaque avec une variabilité de 8 % maximum. La gravure permet de réduire les dimensions d’environ 10 nm. **La recette 2 est donc celle retenue pour la suite de notre étude.**

	Post-lithographie	Post-ouverture SiARC/SOC
<b>CD<sub>guide</sub> (nm)</b>	52.8	41.3
<b>CDU<sub>guide</sub> (nm)</b>	2.7	2.7

Statistique sur environ 1200 contacts (au pitch 120 nm)

**Tableau III-4 : Récapitulatif des dimensions obtenues avec la recette de gravure 2 post-lithographie et post-gravure après optimisation.**

## III2.2 Implémentation du procédé DSA avec le polymère C35

### III2.2.A Optimisation du procédé de planarisation

L’étude précédente nous a permis de déterminer l’approche « PS-affine » comme étant le procédé de référence à implémenter avec la lithographie 193i. Afin de contrer les problèmes de non-uniformité du remplissage du copolymère à blocs dans les cavités dus à la densité variable des motifs sur la plaque, le CEA Leti a mis en place le procédé dit de « planarisation ». Le détail de ce procédé est présenté dans le [chapitre II, paragraphe II.1.4](#). L’étude que nous avons menée ici relève de l’optimisation du temps de rétro-gravure, étape nécessaire pour retirer d’abord la surépaisseur de copolymère à blocs et révéler ensuite le motif DSA en enlevant sélectivement la phase PMMA au centre de la matrice de PS. Pour ce faire, nous avons généré trois plaques avec les mêmes conditions de lithographie et gravure des guides. Ensuite, la première a suivi un procédé classique sans planarisation : après ouverture des guides, le copolymère est déposé par « spin-coating » de telle sorte qu’il n’y ait pas de surépaisseur et qu’il y ait directement l’épaisseur de copolymères nécessaire juste après « spin-coating » pour obtenir des motifs DSA. Les deux autres plaques ont été réalisées avec une planarisation : l’une avec un temps de rétro-gravure de 90 secondes, l’autre de 95 secondes (cf. [figure III-13](#)). Nous avons ensuite mesuré les  $CD_{\text{DSA}}$  et la  $CDU_{\text{DSA}}$  associées ainsi que l’erreur de placement (PE) à partir d’images CD-SEM dont les caractéristiques sont mentionnées dans le [tableau II-5](#) du [chapitre II, paragraphe II.2.1](#).

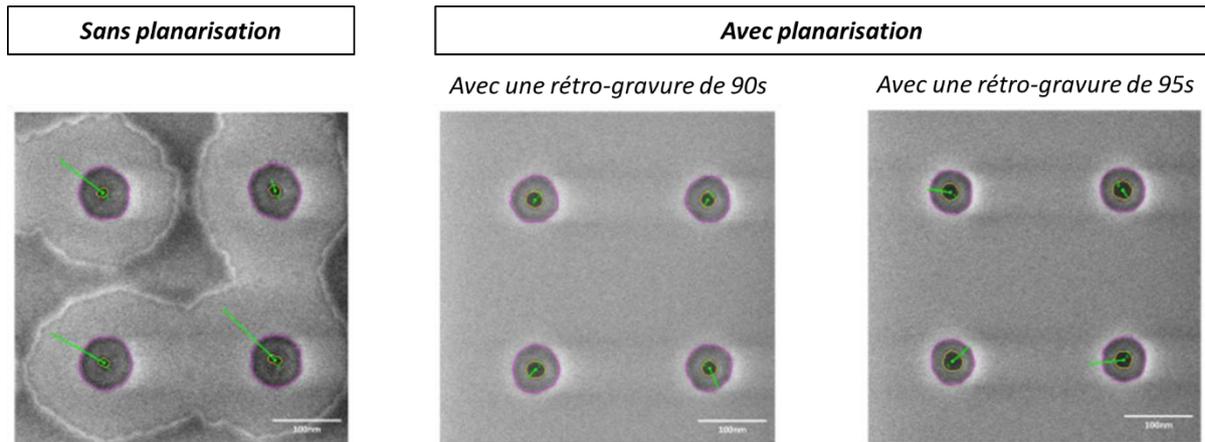


Figure III-13 : Images CD-SEM après analyse par DGmage afin de déterminer l'erreur de placement pour le procédé DSA sans et avec planarisation (à deux temps de rétro-gravure différents). En violet : le contour du guide, en jaune : le contour du contact DSA, en vert : le vecteur d'erreur de placement.

Pour le procédé sans planarisation, nous remarquons une zone grise claire autour des contacts. Il s'agit d'une zone de démouillage : une couche de copolymères est encore présente entre les guides et se caractérise sur les images CD-SEM par la zone grise foncée non uniforme. En comparaison, la couche de polymère sur la partie supérieure des guides n'est pas présente sur les plaques ayant subi le procédé de planarisation. Cette uniformité au pourtour des contacts permet une reconnaissance des motifs plus faciles sur les recettes de métrologie fonctionnant de manière automatique : le taux de réussite de mesures est plus élevé dans ce cas car les images d'un même set de mesures sont plus semblables.

Pour comparer les différents procédés, nous nous sommes assurés par mesure AFM que l'épaisseur du copolymère dans les cavités est la même sur la plaque sans planarisation et sur la plaque avec un temps de rétro-gravure de 90 s (entre 90 et 120 nm pour une hauteur de guide de 170 nm). Lorsque le temps de rétro-gravure augmente (ici de 5 s), l'épaisseur à l'intérieur de la cavité diminue puisque plus de copolymère est consommé par le plasma. L'impact de ce paramètre sur le  $CD_{DSA}$ , la  $CDU_{DSA}$  et l'erreur de placement PE est résumé dans le tableau ci-dessous (cf. tableau III-5).

<i>C35</i>	Sans planarisation	Avec planarisation	
		<i>Avec 90s de rétro-gravure</i>	<i>Avec 95s de rétro-gravure</i>
<b><math>CD_{DSA}</math> (nm)</b>	23.3	22.1	25.2
<b><math>CDU_{DSA}</math> (nm)</b>	5.0	2.0	3.7
<b>PE (nm)</b>	2.0	1.4	1.1
<b>PE – 3<math>\sigma</math> (nm)</b>	3.7	2.4	2.0

Tableau III-5 : Récapitulatif des performances DSA pour le copolymère C35 en termes d'uniformité de  $CD_{DSA}$  ( $CDU_{DSA}$ ) et d'erreur de placement (PE) avec et sans procédé de planarisation.

Nous remarquons que sans planarisation, la  $CDU_{DSA}$  est mauvaise ( $3\sigma > 20\%$  du  $CD_{DSA}$ ). Le  $CD_{DSA}$  et la  $CDU_{DSA}$  associée sont améliorés par la planarisation ( $3\sigma < 15\%$  du  $CD_{DSA}$ ). Lorsque le temps de rétro-gravure augmente, les trous formés par le PMMA s'élargissent et la  $CDU_{DSA}$  associée augmente.

L'erreur de placement et sa dispersion sont quant à elles améliorées. Plus le temps de rétro-gravure est long, plus le désalignement entre le contact DSA et le guide est réduit. Ceci peut s'expliquer par le fait que plus le copolymère est proche de la surface, moins il est confiné dans la cavité. Cela déforme la morphologie cylindrique du domaine de PMMA en surface puisque les chaînes de copolymère ont plus de degré de mobilité. De plus, comme la cavité de guide n'est pas parfaitement droite (CD légèrement plus grand en haut de cavité qu'au fond), le cylindre de PMMA est plus confiné en fond de cavité, ce qui conduit à une erreur de placement au fond de la cavité plus faible que ce qu'elle n'apparaît en vue du dessus lorsqu'il y a davantage de polymère dans les guides (cf. figure III-14).

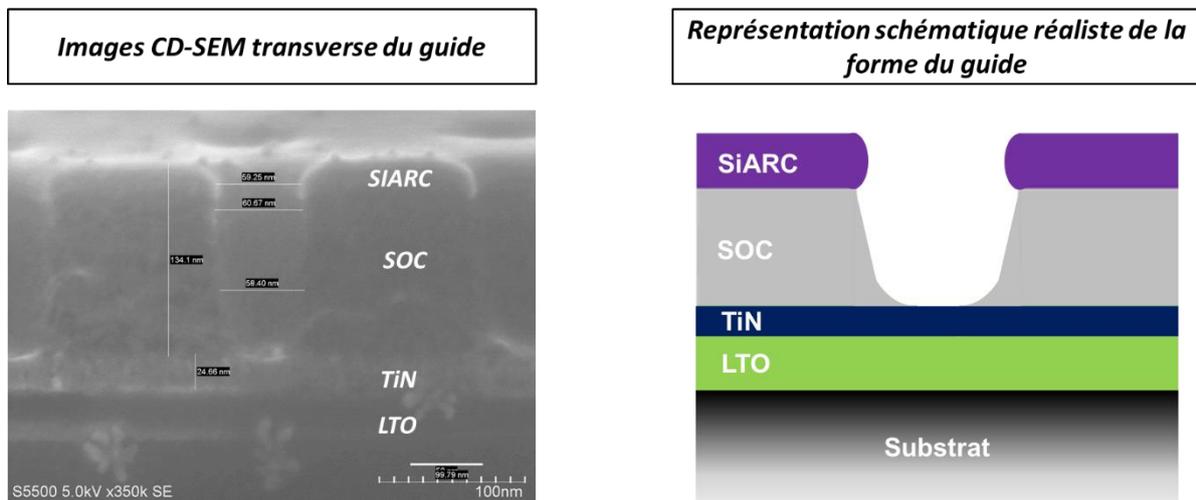


Figure III-14 : Représentation schématique en coupe de la forme des guides (à droite) associées à une image CD-SEM en vue transverse d'un guide (à gauche).

Finalement, il est difficile de minimiser à la fois l'erreur de placement et la CDU. Sachant que l'erreur de placement « réel » (celui qui va être transféré dans les couches inférieures) est celui au fond de cavité, il paraît naturel de chercher à optimiser la CDU en priorité. Entre les deux temps de rétro-gravure étudié, le procédé à 90 s est celui qui minimise la  $CDU_{DSA}$ . Ainsi, **le procédé de planarisation qui sera utilisé par la suite est celui comportant l'étape de rétro-gravure de 90 s**. Il permet de résoudre l'ensemble des densités (d'un pitch de guide de 120 nm à 500 nm) comme l'atteste les images CD-SEM ci-dessous (cf. figure III-15).

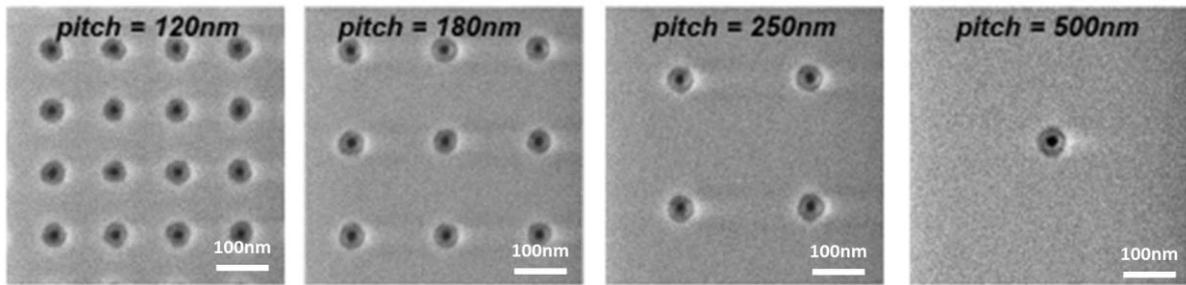


Figure III-15 : Images CD-SEM en vue de dessus du procédé DSA avec un copolymère C35, incluant l'étape de rétro-gravure précédemment optimisée, pour quatre densités de guide différentes.

### III22.B Implémentation du procédé DSA pour le copolymère C35

Tel que décrit dans les paragraphes précédents, nous avons optimisé à la fois la lithographie et l'ouverture des guides par gravure afin d'obtenir les CD de guide nécessaires à un auto-assemblage optimal du copolymère C35 avec l'approche « PS-affine », soit un  $CD_{\text{guide}}$  d'environ 45 nm. Une étude plus fine est nécessaire pour avoir la variation de  $CD_{\text{guide}}$  tolérée par le copolymère, c'est-à-dire la gamme de dimensions pour lesquelles il n'y a pas de défauts d'assemblage. Nous avons donc vérifié le taux d'ouverture de contacts (HOY) sur une plaque FEM afin de faire varier les  $CD_{\text{guide}}$ . La variation de dose d'une puce à l'autre est de  $1 \text{ mJ.cm}^{-2}$  autour de la dose nominale. La figure suivante présente quelques exemples d'images CD-SEM en vue de dessus pour différentes tailles de guide (cf. figure III-16).

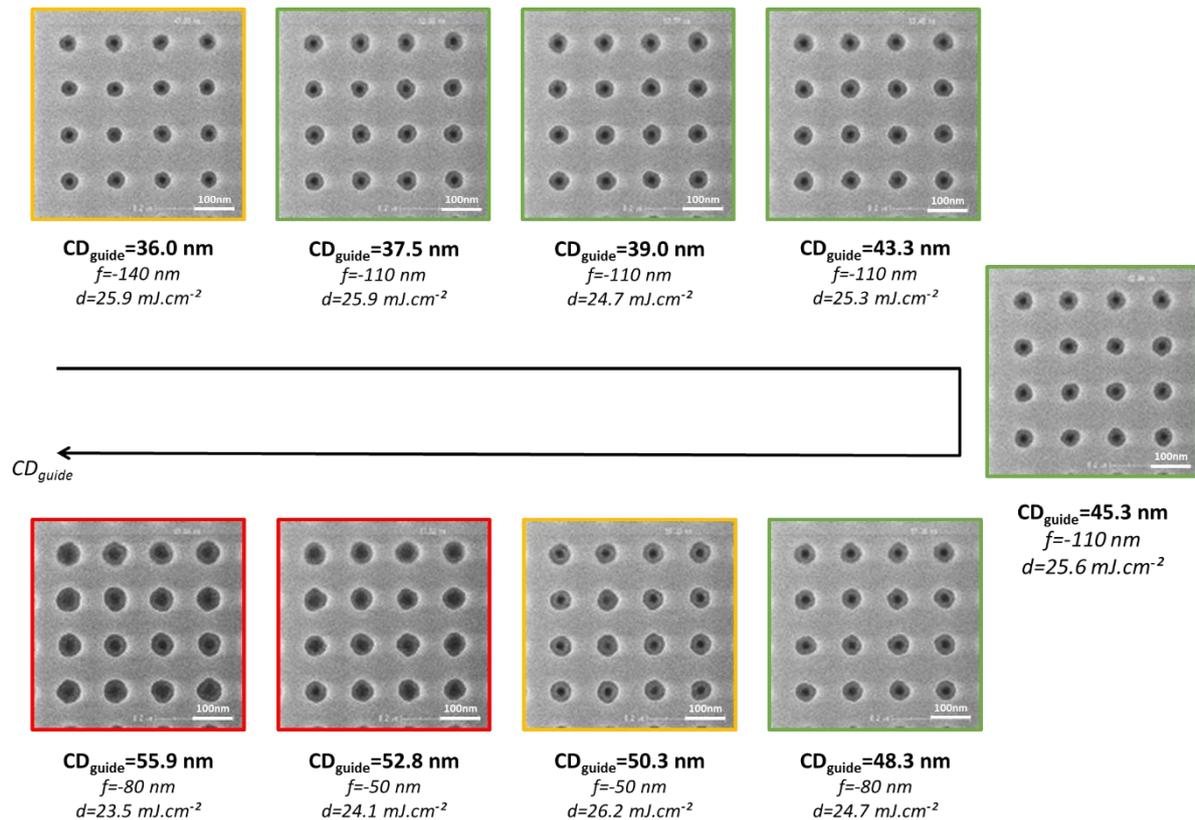


Figure III-16 : Images CD-SEM en vue de dessus de contacts DSA (copolymère C35) au pitch 120 nm pour différents CD de guide (f=focus ; d=dose). En rouge : organisation avec beaucoup de défauts (HOY<50 %), en orange : quelques défauts visibles (50 %<HOY<100 %), en vert : bonne organisation du copolymère (HOY=100 %).

Nous pouvons clairement constater qu'à des doses trop faibles, les CD de guide sont trop larges et dégradent la qualité de l'auto-assemblage. Lorsque la dose est plus forte que la dose nominale, les CD de guide sont plus petits mais permettent également un auto-assemblage correct du copolymère C35. Cependant, ces petites dimensions de guide sont souvent obtenues hors focus. L'étude préliminaire de commensurabilité faite sur plaque e-beam a montré que le CD de guide optimal pour le « shrink » de contact avec un copolymère C35 est autour de 45 nm. Ainsi, nous validons qu'avec les conditions de lithographie prédéterminée (dose et focus nominaux), **nous obtenons un assemblage du copolymère C35 sur le véhicule de test de lithographie 193i, pour des CD<sub>guide</sub>=43 nm ±6 nm**, ce qui est en accord avec l'étude e-beam.

Les figures suivantes résument les performances en termes de CD, CDU locale, PE en fonction du pitch pour les différentes étapes du procédé DSA (post-lithographie, post-ouverture de guide puis post-DSA) (cf. figure III-17). Ces mesures ont été faites sur plaque « FEM » (*Focus Exposure Matrix*) où chaque puce présente des dose/focus différents et donc des CD de guide différents. Ainsi, nous avons dû concentrer nos mesures sur la puce ayant subi l'insolation optimale. Les CDU présentées ci-dessous sont donc des CDU locale : elles sont calculées à partir de la mesure des

contacts sur une dizaine d'images prises à l'intérieur du champ d'une seule puce pour un  $CD_{guide}$  visé d'environ 43 nm.

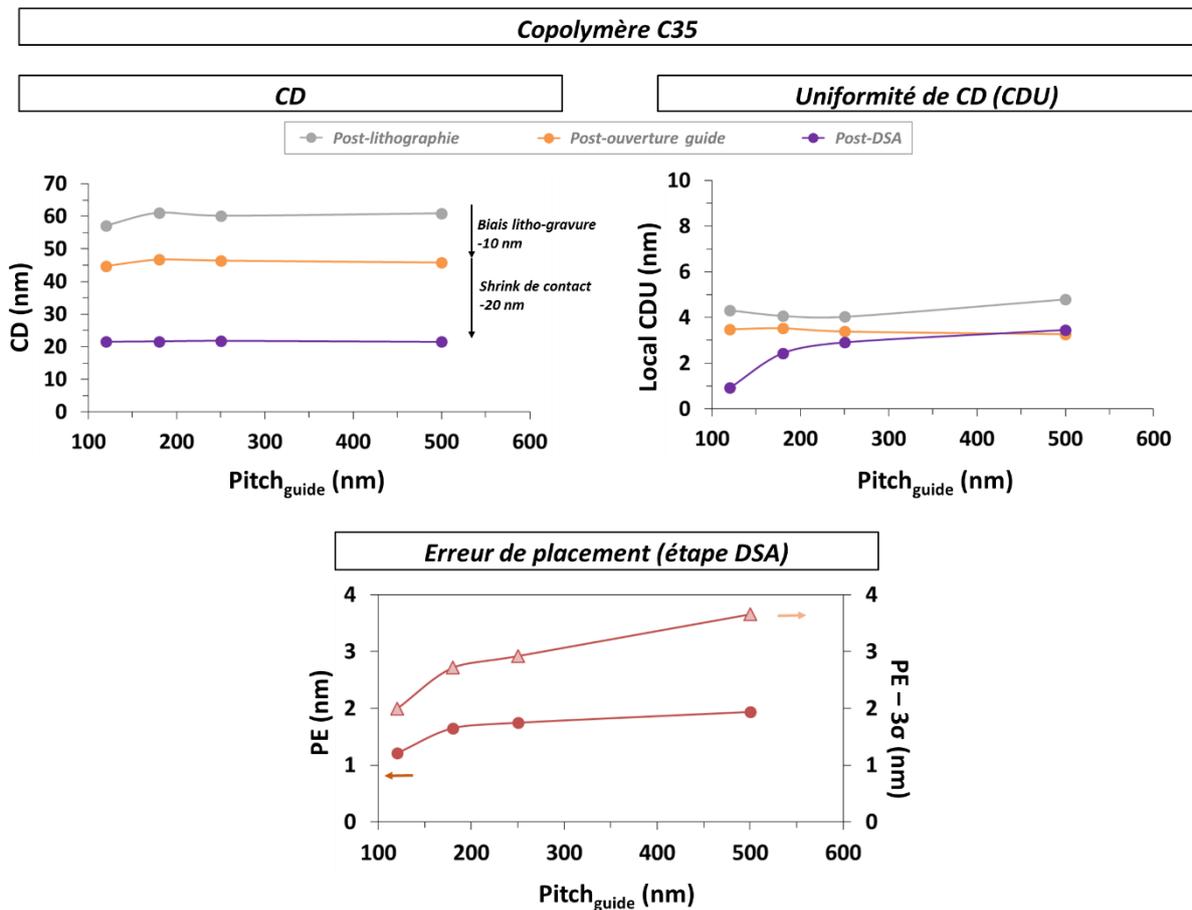


Figure III-17 : La CD et CDU locale associée ainsi que l'erreur de placement en fonction du pitch du guide, mesurés après lithographie, après ouverture des guides et après DSA, pour le copolymère C35.

Pour résumer, la gravure permet de réduire de 10 nm sur le CD de guide post-lithographie pour tous les pitches. Le procédé DSA permet de réduire encore la taille des contacts de 20 nm supplémentaires. La différence de tailles de contacts entre le pitch 120 nm et les autres pitches est moins marquée après l'étape DSA car le polymère absorbe une partie de la variabilité de  $CD_{guide}$ . De plus, la CDU est améliorée grâce au procédé DSA puisqu'elle passe d'une valeur post-lithographie de 4.3 nm à une valeur post-DSA de 0.9 nm pour le pitch de guide de 120 nm. Cette tendance est confirmée pour l'erreur de placement qui est minimisée pour ce même pitch. L'augmentation de la dispersion sur le PE avec la densité des motifs de guide peut s'expliquer par la statistique moins importante au pitch 500 nm. En effet, puisque nous prenons des images CD-SEM au milieu d'un grand champ présentant des contacts très éloignés, il arrive que l'algorithme de détection automatique des motifs sur le CD-SEM ne trouve pas de contacts. Plusieurs images sont donc inexploitable car ne présentant aucun motif. Ainsi, pour le pitch 120 nm, nous

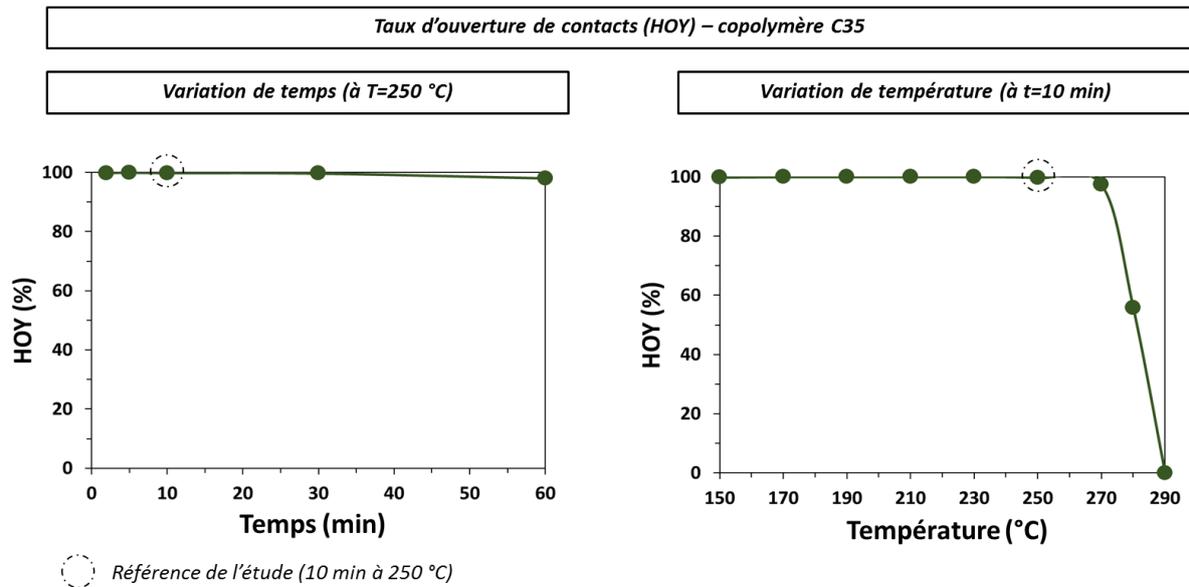
disposons d'une statistique d'environ 600 contacts alors que seulement 70 contacts sont inspectés pour les contacts isolés. En perspective, nous devons faire ces mesures sur plaque dite « CDU », où toutes les puces sont identiques (mêmes conditions de lithographique), afin d'avoir plus de statistiques sur plus d'images et donc sur plus de contacts.

### III22.C Optimisation du recuit thermique d'auto-assemblage du copolymère C35

Après avoir déterminé la fenêtre de fonctionnement du procédé DSA « PS-affine » avec le copolymère C35 en termes de CD de guide, il reste maintenant à optimiser finement le procédé DSA, c'est-à-dire maximiser le HOY et minimiser le  $CDU_{DSA}$  et l'erreur de placement. Pour ce faire, nous allons optimiser le budget thermique du procédé en modifiant à la fois le temps et la température de recuit d'auto-assemblage du copolymère à blocs.

Lors de l'exploration de la fenêtre de procédé du masque *Bodbi*, nous avons fixé les paramètres d'assemblage du copolymère à blocs à des valeurs proches de celles utilisées pour l'assemblage en surface libre, c'est-à-dire **10 min à 250 °C**. Celles-ci correspondront à nos valeurs de référence. Nous avons décidé de faire une étude en temps (à température fixée à 250 °C) – 2, 5, 10, 30 et 60 min –, puis en température (à temps de recuit fixé à 10 min) – 150, 170, 190, 210, 230, 250, 270, 280 et 290 °C. Chaque « plaque CDU » (toutes les puces sont identiques) a donc subi un recuit différent. Nous avons ensuite analysé le HOY, la CDU et le PE à partir d'images CD-SEM prises sur les 75 puces des plaques dans le champ de défektivité à pitch de guide 120 nm afin d'avoir une statistique suffisante (environ 1200 contacts par point de mesure).

Les graphiques ci-après présentent la variation du taux de défektivité (HOY) en fonction de la température (à gauche) et du temps (à droite) de recuit d'auto-organisation du copolymère (cf. [figure III-18](#)).



**Figure III-18 :** Variation du taux d'ouverture de trous (HOY) pour un copolymère C35 en fonction (à gauche) du temps à une température de 250 °C et (à droite) de la température à un temps de recuit de 10 min.

A la température choisie, le temps de recuit joue un rôle mineur sur le taux de défaut final. En effet, pour des temps de recuit courts, 100 % des contacts inspectés sont ouverts (cf. figure III-19). Nous savons qu'au-delà d'un recuit de 10 min, il serait difficile d'implémenter le procédé DSA sur une ligne pilote industrielle, la cadence de production n'étant, dans ce cas, pas assez élevée. Cependant, il reste intéressant de repousser cette limite afin de comprendre les phénomènes cinétiques mis en jeu lors de l'assemblage. Nous pouvons en conclure qu'à 250°C, pour des temps courts (inférieur à 30 min), le temps de recuit joue peu sur la défektivité.

La température a un effet plus significatif sur la qualité de l'auto-assemblage. Pour des températures de recuit en-dessous de 250 °C, nous estimons le HOY à 100 %. Au-delà de 250 °C, le polymère se dégrade, ce qui se traduit par des trous manquants et une augmentation drastique du taux de défauts. A 290 °C, il n'y a presque plus de polymère dans les contacts puisque qu'un recuit à cette température en présence d'oxygène oxyde au moins partiellement le PMMA [Latappy 2014] (cf. figure III-20). Un comportement similaire est observé pour l'auto-assemblage des copolymères en surface libre comme l'ont démontré *Chevalier et al.* dans leur publication [Chevalier 2014].

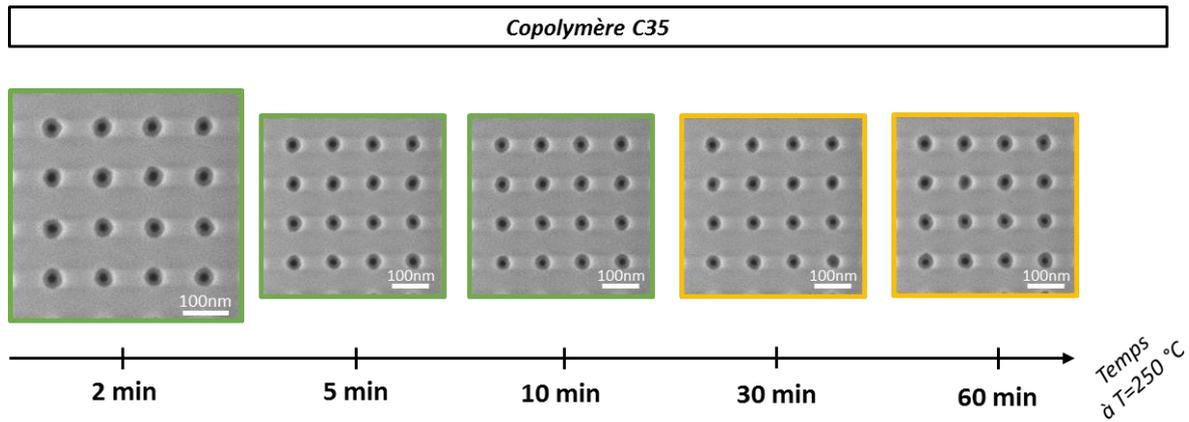


Figure III-19 : Images CD-SEM en vue du dessus de contacts DSA avec un copolymère C35 ayant subi des conditions de recuit différentes (différents temps de recuit à 250 °C).

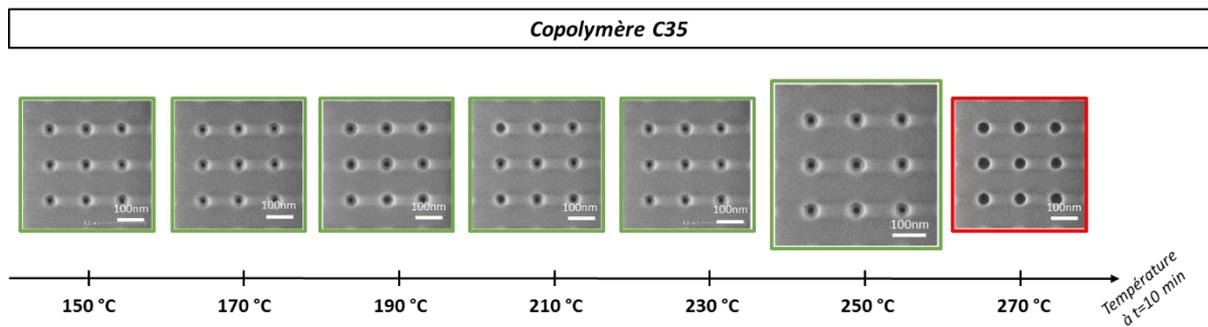


Figure III-20 : Images CD-SEM en vue du dessus de contacts DSA avec un copolymère C35 ayant subi des conditions de recuit différentes (différentes températures de recuit à 10 min)

Nous avons également inspecté la CDU des contacts DSA sur toutes les puces de chaque plaque afin d'étudier l'évolution de celle-ci en fonction du temps de recuit puis de la température de recuit d'auto-assemblage (cf. figure III-21).

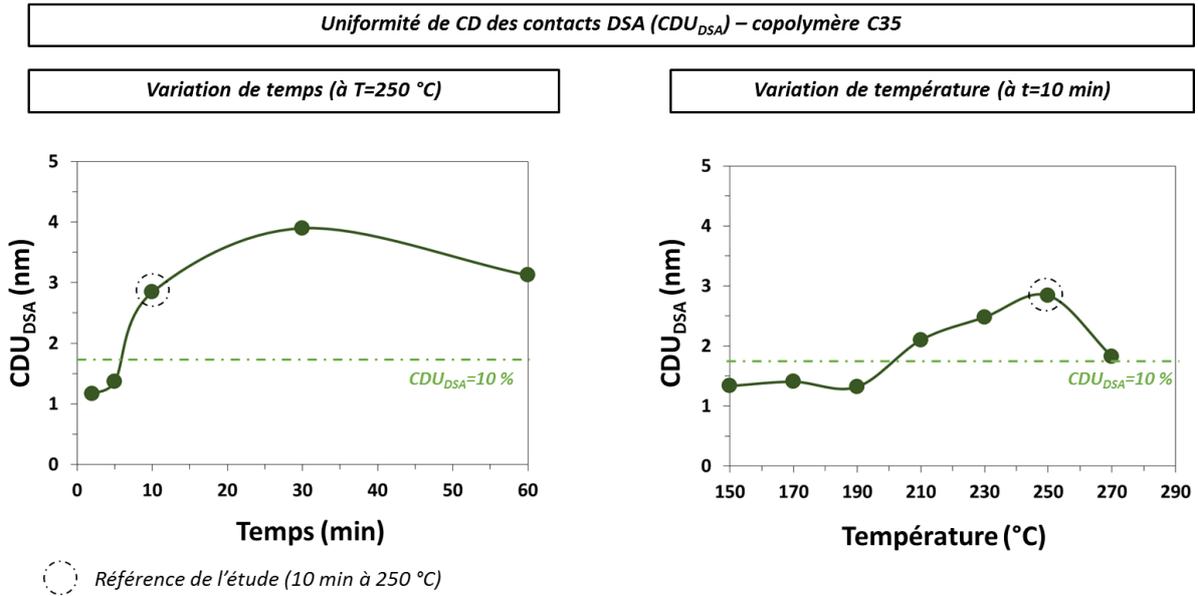


Figure III-21 : Uniformité du CD des contacts DSA pour un copolymère C35 en fonction (à gauche) du temps de recuit (à température fixe de 250 °C) et (à droite) de la température du recuit (à temps fixé à 10 min). En vert en pointillé : la valeur de  $CDU_{DSA}$  correspondant à 10 % du  $CD_{DSA}$  moyen.

Nous remarquons tout d'abord que, à température constante, la  $CDU_{DSA}$  se dégrade avec le temps de recuit. **En passant d'un recuit de 10 min** (qui est notre recuit de référence à ce stade de l'étude) **à un recuit deux fois plus court (5 min), la  $CDU_{DSA}$  est divisée par deux** pour atteindre une valeur dans les spécifications requises ( $CDU_{DSA} < 10\%$  du  $CD_{DSA}$  moyen). **La  $CDU_{DSA}$  est encore améliorée en abaissant le temps du recuit à 2 min**, qui constitue notre meilleure performance DSA.

L'influence de la température de recuit sur la  $CDU_{DSA}$  est moins évidente. La courbe ci-dessus présente la «  $CDU_{DSA}$  interpuce », c'est-à-dire la  $CDU_{DSA}$  calculée à partir de la moyenne des  $CD_{DSA}$  prise pour chaque puce. En regardant ce paramètre seul, nous pourrions penser qu'un recuit à 10 min mais à une température plus basse que notre recuit standard (comme 170 °C par exemple) serait suffisant pour améliorer la  $CDU_{DSA}$ . Cependant, en inspectant plus précisément les images CD-SEM, nous remarquons que la  $CDU$  locale (au sein d'une même puce) est moins bonne dans ce cas par rapport à un recuit à 250 °C (cf. figure III-22). Un recuit à plus haute température (250 °C) est donc nécessaire.

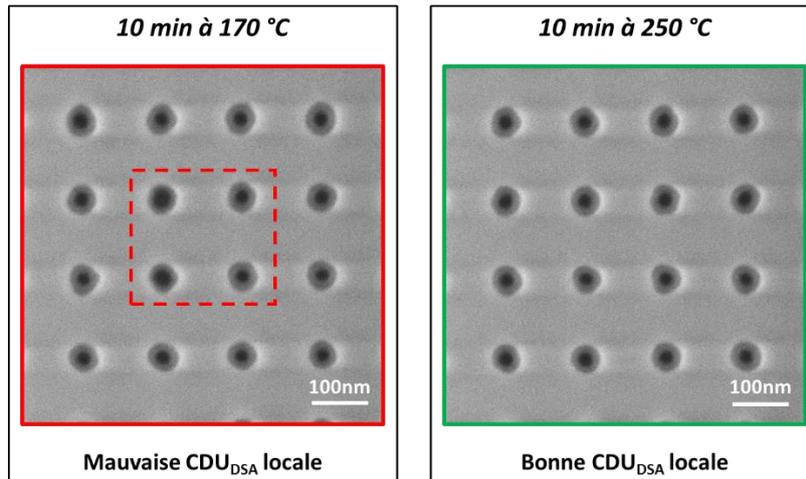


Figure III-22 : Images CD-SEM en vue du dessus mettant en évidence la non-uniformité de  $CD_{DSA}$  dans le cas d'un recuit de 10 min à 170 °C (à gauche) en comparaison avec le recuit de référence de 10 min à 250°C (à droite), pour le copolymère C35.

Nous nous sommes également intéressés à l'erreur de placement. La figure ci-dessous montre à la fois l'erreur de placement et la dispersion associée ( $3\sigma$ ) en fonction du temps et de la température de recuit d'auto-assemblage (cf. figure III-23).

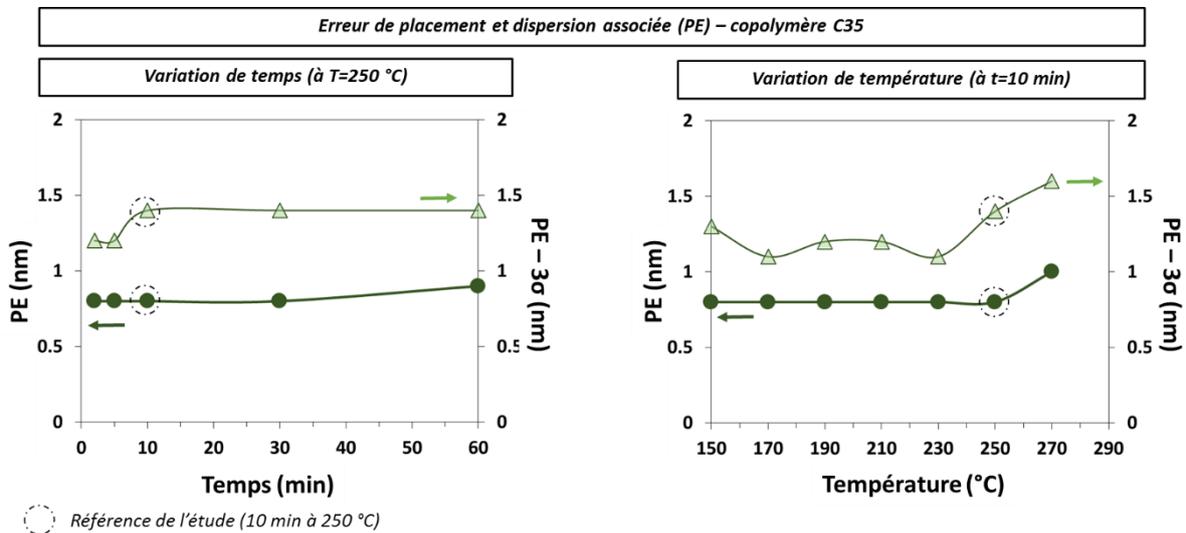


Figure III-23 : Erreur de placement (cercle) et dispersion associée (triangle) en fonction (à gauche) du temps de recuit (à température fixe de 250 °C) et (à droite) de la température du recuit (à temps fixé à 10 min).

Nous pouvons remarquer tout d'abord que la valeur moyenne d'erreur de placement ne permet pas de discriminer certaines conditions de recuit. En effet, quels que soient le temps et la température de recuit, le PE ne dépasse pas 1 nm. La dispersion associée à cette valeur nous donne plus d'information. En effet, il est clair que pour une température de 250 °C, un recuit rapide permet d'améliorer l'uniformité du placement des contacts. En particulier, **un recuit de 2 ou 5 min permet d'atteindre une dispersion d'erreur de placement inférieure au nanomètre.**

Pour un recuit de 10 min, les meilleures valeurs de dispersion de PE sont obtenues pour des températures inférieures au recuit standard de 250 °C. Cependant, nous avons vu précédemment qu'à ces températures « basses », la CDU locale est détériorée. Là encore, il faut mieux privilégier un recuit rapide à « haute » température à un recuit plus long à basse température.

**Finalement, suite à cette étude, le recuit adopté après cette optimisation pour le copolymère C35 est un recuit de 2 min à 250 °C.**

Il est à noter que, d'après les études en surface libre de *Harumoto et al.*, nous savons que la période intrinsèque du copolymère à blocs  $L_0$  augmente avec la température de recuit d'auto-assemblage [Harumoto 2017]. L'hypothèse selon laquelle cette variation de  $L_0$  déplacerait la fenêtre de procédé vers des CD de guide plus grands est peu probable puisque la  $CD_{\text{guide}}$  est plus grande que cette variation de période intrinsèque. En d'autres termes, il n'existe pas de fenêtre de procédés permettant d'atteindre 100 % de HOY pour des températures de recuit d'auto-assemblage supérieures à 250 °C (pour un temps de recuit de 10 min). De plus, nous pouvons nous demander si cette variation de quelques nanomètres sur la période intrinsèque avec la température de recuit a un impact sur le HOY. A l'échelle de mesure de défektivité de cette étude, nous ne voyons pas d'impact significatif puisque pour des températures d'auto-assemblage inférieures à 250 °C, le HOY est de 100 % (cf. figure III-18). Cependant, pour s'affranchir d'une éventuelle variation de procédé et donc de défektivité, il est nécessaire de contrôler la période intrinsèque du copolymère lors du recuit d'auto-assemblage. Pour ce faire, *Harumoto et al.* ont montré qu'un recuit sous atmosphère contrôlé pauvre en oxygène (LOH pour Low Oxygen Hotplate) permet de limiter l'oxydation des chaînes de polymères et conserver la période  $L_0$  constante pour une meilleure reproductibilité du procédé DSA [Harumoto 2017]. Ce type de recuit est en cours d'implémentation sur la piste dédiée au DSA au CEA Leti.

### III22.D Influence de la formulation des copolymères à blocs sur les performances DSA

Dans un souci d'amélioration du procédé DSA, nous avons étudié l'impact de la présence d'homopolystyrène résiduel dans la solution de copolymère à blocs sur les performances DSA. Nous avons également exploré une nouvelle formulation de copolymères à blocs appelés « blends » qui sont issus du mélange de plusieurs copolymères à blocs de période intrinsèque différente. La période intrinsèque finale du mélange est finement optimisée en modifiant les proportions du mélange. Pour étudier les performances DSA selon les différentes formulations de copolymères, nous avons réalisé une plaque 300 mm spécifique pour chacune des solutions à notre disposition avec les mêmes conditions de lithographie/gravure (même  $CD_{\text{guide}}$ ) et les mêmes conditions de recuit d'auto-assemblage. La période intrinsèque des copolymères est mesurée sur surface libre sur

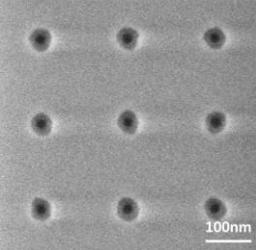
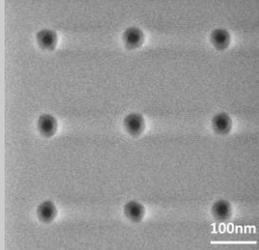
un échantillon d'environ 10 images CD-SEM (cf. chapitre II, paragraphe III.1.5). Afin de déterminer le HOY, la CDU et le PE, les 75 puces de chaque plaque ont été inspectées au CD-SEM pour constituer, pour chaque formulation, une mesure statistique sur 1100 contacts DSA.

**Présence d'homopolystyrène résiduel dans la solution de copolymère C35 :** la présence d'homopolystyrène (hPS) résiduel dans la solution de copolymères à blocs modifie légèrement le ratio PS:PMMA de la solution, ce qui change la période intrinsèque finale du mélange et le taux de défauts en surface libre [Chevalier 2014]. Cet ajout d'hPS peut avoir un impact sur la qualité de l'auto-assemblage et en particulier la CDU et le placement des contacts DSA dans les guides. Les résidus d'hPS présents dans la solution de copolymères à blocs sont issus de la fabrication de ce dernier. Après la synthèse du copolymère, une première purification est faite afin de descendre ce taux à environ 3 % d'hPS en solution. Une seconde purification peut éventuellement être faite afin d'abaisser ce taux à 1 %. Le taux d'homo-PMMA (hPMMA) quant à lui, est de 4 % pour les deux solutions étudiées ici. Le tableau suivant résume les performances DSA des deux copolymères étudiés, notamment en termes de HOY, de  $CDU_{DSA}$  et de PE, ainsi que les caractéristiques de la solution, comme la période intrinsèque et les taux d'homopolymères résiduels (cf. tableau III-6).

	C35 « classique »	C35 purifié	
<i>Caractéristiques de la solution</i>	<b>Période intrinsèque <math>L_0</math> (nm)</b>	35.0	34.5
	<b>Taux d'hPS (%)</b>	3	<1
	<b>Taux d'hPMMA (%)</b>	4	4
<i>Performances DSA pour le « shrink de contact »</i>	<b>HOY (%)</b>	100	100
	<b><math>CD_{DSA}</math> (nm)</b>	22.9	23.4
	<b><math>CDU_{DSA}</math> (nm)</b>	1.5	1.2
	<b>PE (nm)</b>	1.8	2.0
	<b>PE – <math>3\sigma</math> (nm)</b>	0.9	0.8

**Images CD-SEM**

**Tableau III-6 : Récapitulatif des caractéristiques des solutions de copolymères à blocs et des performances DSA pour les copolymères C35 « classique » et C35 purifié.**

La faible variation de période intrinsèque entre les deux polymères (0.5 nm) n'a pas d'impact significatif sur les performances DSA pour le « shrink » de contact puisqu'elle est faible en comparaison à la  $CDU_{guide}$  (autour de 4 nm). De plus, le  $CD_{DSA}$  mesuré n'est pas significativement

différent, tout comme la  $CDU_{DSA}$ , le désalignement ou le taux de défauts qui ne semblent pas être améliorés par cette purification. A l'échelle de mesure de défektivité de cette étude, **un taux d'homopolystyrène résiduel de 3 % dans la solution de copolymère ne modifie pas les performances DSA en grapho-épitaxie**. Des résidus d'hPS dans le copolymère à hauteur de 3% pour le copolymère C35 semblent acceptables au regard des efforts industriels déployés pour purifier le copolymère. Cependant, cette purification n'est pas totalement inutile. En effet, ce taux varie d'un lot de fabrication à l'autre et il est plus facile de rajouter de l'hPS de manière précise à une solution qui n'en contient pas plutôt que de se reposer sur les mesures faites pour déterminer le taux d'hPS, qui comportent une part d'erreur. C'est pour cela que nous avons décidé de travailler par la suite avec des copolymères purifiés deux fois.

**Mélange de copolymères de périodes intrinsèques différentes (copolymère « blend ») :** Il a été démontré que les mélanges de copolymères à blocs (appelés « blend ») de périodes intrinsèques différentes mais de nature chimique identique permettent d'améliorer les performances lithographiques de l'auto-assemblage en surface libre par rapport au polymère pur de même  $L_0$  [Chevalier 2014]. Cela est dû en partie à une mobilité des chaînes de copolymères accrues, ce qui améliore la cinétique d'auto-assemblage et conduit à une défektivité réduite pour des temps de recuit d'auto-assemblage courts. Nous avons voulu vérifier si cette tendance se confirme pour le cas de l'auto-assemblage en surface structurée par grapho-épitaxie pour le « shrink de contact ». Pour ce faire, nous avons comparé les performances DSA en termes de HOY,  $CDU_{DSA}$  et PE du copolymère C35 classique et d'un copolymère « blend » ayant une période intrinsèque proche du copolymère pur. Les résultats sont résumés dans le tableau suivant (cf. tableau III-7).

		C35 « classique »	C35 « blend »
<i>Caractéristiques de la solution</i>	<b>Période intrinsèque <math>L_0</math> (nm)</b>	35.0	34.6
	<b>Taux d'hPS (%)</b>	3	3
	<b>Taux d'hPMMA (%)</b>	4	4
<i>Performances DSA pour le « shrink de contact »</i>	<b>HOY (%)</b>	100	100
	<b><math>CD_{DSA}</math> (nm)</b>	22.9	23.1
	<b><math>CDU_{DSA}</math> (nm)</b>	1.5	1.3
	<b>PE (nm)</b>	1.8	1.7
	<b>PE – <math>3\sigma</math> (nm)</b>	0.9	0.8

**Images CD-SEM**

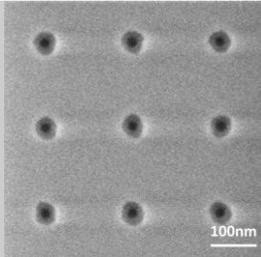
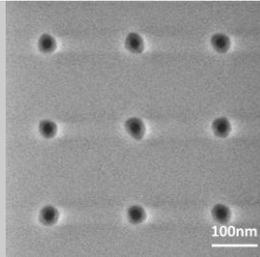



Tableau III-7 : Récapitulatif des caractéristiques des solutions de copolymères à blocs et des performances DSA pour les copolymères C35 « classique » et C35 « blend ».

La période intrinsèque du copolymère « blend » est proche des deux autres copolymères. Pour les deux systèmes, le taux de HOY est de 100 % sur les 1100 contacts inspectés. L'uniformité de  $CD_{DSA}$  ainsi que le placement des contacts sont similaires dans les deux cas : les valeurs sont en dessous des 10 % pour la  $CDU_{DSA}$  et inférieure au nanomètre pour la variation d'erreur de placement. Ainsi, **les performances obtenues avec le copolymère « blend » sont comparables à celles du copolymère classique** et donc du copolymère purifié.

Il est à noter qu'il serait judicieux de faire une étude fine d'optimisation du procédé en temps et température de recuit d'auto-assemblage du copolymère « blend », comme réalisée pour le copolymère C35 classique, afin d'évaluer son potentiel dans son ensemble.

### III.2.3 Stratégie de relaxation de la contrainte de résolution des guides

Les meilleures performances lithographiques pour le « shrink » de contact avec le copolymère C35 en termes de taux de défauts (HOY), de  $CDU_{DSA}$ , et de PE sont obtenues pour des guides relativement petits dont la réalisation se fait en limite de résolution de la lithographie 193i. Nous avons vu précédemment qu'avec le procédé « PMMA-affine », le copolymère nécessite des guides plus larges pour s'auto-assembler sans défauts. Cependant, ce procédé montre de faibles performances et n'est donc pas à privilégier pour une implémentation à grande échelle. Il nous faut donc déployer d'autres stratégies pour relaxer la contrainte sur la taille des guides et permettre au copolymère de s'auto-assembler correctement dans des guides plus larges et ainsi conserver de bonnes performances lithographiques. La première des stratégies explorées consiste à utiliser un homopolystyrène greffable (noté  $hPS_g$ ), de masse molaire plus grande que celle utilisée précédemment pour la fonctionnalisation de la surface des guides. La deuxième est d'utiliser un copolymère à blocs de période intrinsèque plus grande que le C35.

#### III.2.3.A Utilisation d'un homopolystyrène greffable $hPS_g$ de masse molaire plus grande

L'homopolystyrène greffable utilisé dans le procédé « PS-affine » de référence (noté  $hPS_g^{low}$ ) a une masse molaire de  $M_w^{low}=12 \text{ kg}\cdot\text{mol}^{-1}$ . Lorsqu'il est utilisé en surface libre, la couche greffée mesurée est d'environ 5 nm d'épaisseur. Un autre  $hPS_g$  (noté  $hPS_g^{high}$ ) de masse molaire plus grande ( $M_w^{high}=50 \text{ kg}\cdot\text{mol}^{-1}$ ) peut être utilisé pour former une couche greffée plus épaisse (environ 10 nm). Cette approche est notée par la suite « PS-affine modifié ». Dans ce cas, lorsque l' $hPS_g^{high}$  est greffé dans les cavités de guidage, il permettrait de réduire davantage le CD initial de guidage. Ainsi, pour un copolymère C35, les guides devraient être environ 10 nm plus larges que pour le procédé de référence avec un  $hPS_g^{low}$  de  $M_w^{low}$  afin que l'espace à occuper par les chaînes de copolymères soit identiques. Nous avons évalué ces deux procédés sur plaque 300 mm. Pour ce faire, nous avons réalisé trois plaques ayant eu les mêmes conditions de lithographie/gravure et le même recuit d'auto-assemblage du copolymère, la troisième plaque étant pour le procédé « PMMA-affine ». Seule l'étape de fonctionnalisation de surface est différente selon l'approche choisie (cf. [tableau II-](#)

4 du chapitre II, paragraphe III.5). Rappelons ici que le recuit de greffage est le même pour les deux hPS<sub>g</sub> étudiés (10 min à 230 °C) et que le procédé « PMMA-affine » ne requière aucune fonctionnalisation de surface.

La fenêtre de procédé a été évaluée pour chaque approche et le tableau ci-après résume les meilleures performances lithographiques obtenues avec les deux hPS<sub>g</sub> greffés pour les procédés « PS-affine », « PS-affine modifié » et « PMMA-affine » (cf. tableau III-8).

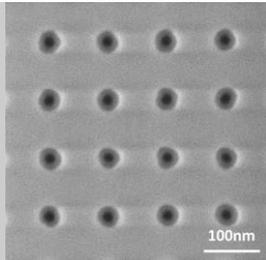
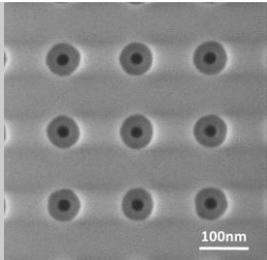
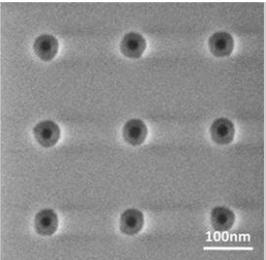
C35	PS-affine (M <sub>w</sub> <sup>low</sup> )	PS-affine modifié (M <sub>w</sub> <sup>high</sup> )	PMMA-affine
Masse molaire d' hPS <sub>g</sub> greffé (kg.mol <sup>-1</sup> )	12	50	–
CD <sub>guide</sub> (nm)	40 – 45	52 – 57	60 – 65
HOY (%)	100	100	100
CD <sub>DSA</sub> (nm)	18.2	18.1	20.4
CDU <sub>DSA</sub> (nm)	1.2	2.7	3.5
CDU <sub>DSA</sub> (% du CD <sub>DSA</sub> )	6.6	14.9	17.2
PE (nm)	0.8	1.2	1.0
PE – 3σ (nm)	1.2	2.1	2.2
Images CD-SEM			

Tableau III-8 : Récapitulatif des performances DSA obtenues avec le copolymère C35.

Les résultats expérimentaux confirment notre hypothèse. **Le copolymère à blocs nécessite des guides en moyenne 12 nm plus grands lorsque la préparation de surface est faite avec l'hPS<sub>g</sub> de grande masse molaire**, ce qui permet de s'éloigner du bord de la fenêtre de procédé lithographique. Cependant, la CDU<sub>DSA</sub> se dégrade et le désalignement s'accroît par rapport aux performances obtenues avec l'hPS<sub>g</sub> de base, se rapprochant ainsi des valeurs caractérisant le procédé « PMMA-affine ». Les chaînes de l'hPS<sub>g</sub><sup>high</sup> sont plus longues que celles de l'hPS<sub>g</sub><sup>low</sup>, elles sont donc moins mobiles. Elle nécessite potentiellement plus d'énergie pour se greffer correctement sur les parois des cavités de guidage. Or, nous avons appliqué les mêmes conditions de recuit de greffage pour les deux hPS<sub>g</sub>. Une amélioration des performances DSA avec l'approche « PS-affine modifié » est sans doute possible en optimisant les conditions de recuit de greffage de l'hPS<sub>g</sub><sup>high</sup>.

Bien que ne donnant pas les meilleurs résultats, l'approche « PS-affine modifié » n'est pas totalement écartée pour le moment puisqu'elle pourrait être utilisée pour l'application de dédoublement de contacts que nous exposerons dans le prochain chapitre. Pour la suite de cette étude, et sauf mention contraire, nous utiliserons l'approche « PS-affine » avec l'hPS<sub>g</sub> de faible masse molaire.

### III23.B Utilisation d'un copolymère à blocs de période intrinsèque plus grande : C43

Afin de relâcher la contrainte sur la lithographie et se rapprocher des dimensions visées pour le nœud technologique 10 nm, nous avons également exploré le potentiel du copolymère cylindrique C43 qui a une période intrinsèque plus grande que celle du C35. Pour ce faire, nous avons travaillé sur une plaque FEM identique à celle utilisée pour l'étude du C35, afin de faire varier la taille des guides dans les champs de défektivité. Nous avons ensuite mis en place le procédé DSA avec planarisation en utilisant le copolymère C43. Le polymère a donc subi un recuit standard de 10 min à 250 °C. Nous avons ensuite vérifié le taux d'ouverture de contacts (HOY) à l'aide d'images CD-SEM qui sont exposées sur la figure suivante (cf. figure III-24).

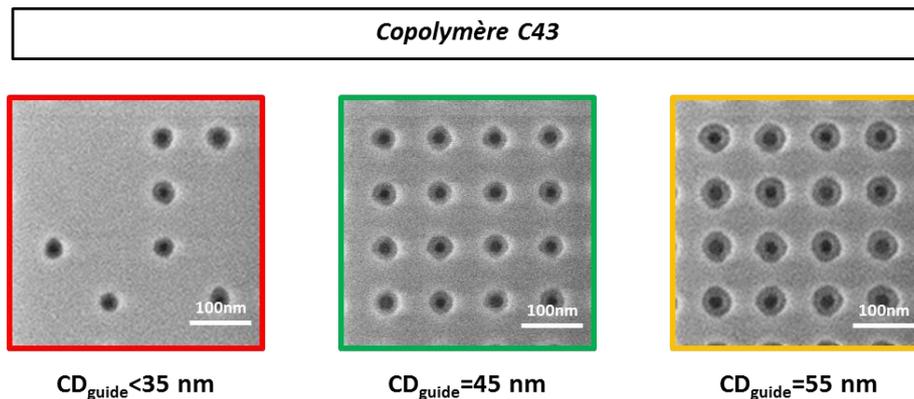


Figure III-24 : Images CD-SEM en vue de dessus de contacts DSA (copolymère C43) au pitch 120 nm pour différents CD de guide. En rouge : organisation avec beaucoup de défauts (HOY < 50 %), en orange : quelques défauts visibles (50 % < HOY < 100 %), en vert : bonne organisation du copolymère (HOY = 100 %).

Nous avons déduit des mesures sur plaque FEM que **le copolymère C43 s'assemble dans des guides de tailles 48 nm ± 6 nm**. La fenêtre de procédé du C43 est aussi large que celle du C35 mais elle est décentrée (CD<sub>guide</sub> = 43 nm pour le C35 contre 48 nm pour le C43) car le polymère C43 est plus grand et s'assemble donc à des CD plus grands. Cependant, le ratio entre le CD<sub>guide</sub> et la période intrinsèque du polymère est très semblable pour les deux matériaux, ce qui montre que les résultats obtenus sont cohérents du point de vue de la commensurabilité (cf. équation III-1).

$$ratio_{C35} = \frac{CD_{guide}}{L_0} = \frac{43}{35} \sim 1.2 \qquad ratio_{C43} = \frac{CD_{guide}}{L_0} = \frac{48}{43} \sim 1.1$$

Équation III-1 : Ratio  $CD_{guide}/L_0$  au centre des fenêtres de procédés pour les copolymères C35 et C43

Notons ici que la tolérance du copolymère sur la taille de guide est supérieure à la  $CDU_{guide}$  (fenêtre de procédé de  $\pm 6$  nm, soit  $\pm 12$  % du  $CD_{guide}$  contre  $CDU_{guide}$ ) ce qui veut dire que cette dernière ne sera pas limitante pour le procédé DSA.

L'optimisation du recuit d'auto-assemblage du copolymère C35 nous a conduit à changer les conditions du procédé pour opter un recuit de 2 min à 250 °C. Nous avons essayé ce recuit sur le copolymère C43 et comparé les performances DSA obtenues avec celles du C35. Le tableau ci-dessous résume ainsi les valeurs de HOY,  $CD_{DSA}$ ,  $CDU_{DSA}$ , PE et la dispersion associée pour les copolymères C35 et C43 pour un recuit d'auto-assemblage de 2 min à 250 °C (cf. tableau III-9).

Recuit de 2 min à 250 °C	C35	C43
<b>Période intrinsèque <math>L_0</math> (nm)</b>	35	43
<b>HOY (%)</b>	100	100
<b><math>CD_{DSA}</math> (nm)</b>	18.2	20.3
<b><math>CDU_{DSA}</math> (nm)</b>	1.2	2.7
<b><math>CDU_{DSA}</math> (% du <math>CD_{DSA}</math>)</b>	6.6	13.3
<b>PE (nm)</b>	0.8	0.8
<b>PE – <math>3\sigma</math> (nm)</b>	1.2	1.4

**Images CD-SEM**

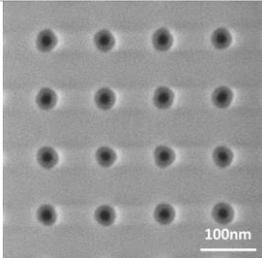
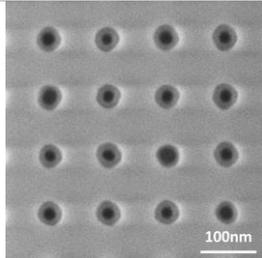



Tableau III-9 : Récapitulatif des performances DSA obtenues avec les copolymères C35 et C43 pour un recuit de 2 min à 250 °C (optimisé pour le C35).

Il s'avère qu'avec un recuit de 2 min à 250 °C, le copolymère C43 a une moins bonne  $CDU_{DSA}$  ( $>10$  % du  $CD_{DSA}$ ) que celle du copolymère C35. Ceci peut être dû à un budget thermique mal adapté : les chaînes de copolymères du C43 étant plus longues que celles du C35, il faut sans doute apporter plus d'énergie au système afin qu'il s'auto-assemble au mieux. Pour les deux copolymères, l'erreur de placement est faible puisqu'il est en dessous de 2 nm pour toutes les densités. Les performances du copolymère C43 sont inférieures à celle du C35 pour les conditions de recuit optimisées pour ce dernier. Ainsi, il est nécessaire de réaliser une étude d'optimisation du recuit

d'auto-assemblage pour le copolymère C43, similaire à celle menée précédemment sur le copolymère C35.

### III23.C Optimisation du recuit thermique d'auto-assemblage du copolymère C43

Afin de trouver les conditions de recuit optimales pour le copolymère C43, nous avons réalisé plusieurs plaques avec les mêmes conditions de lithographie/gravures avec un  $CD_{\text{guide}}$  visé de 48 nm, puis nous avons effectué le procédé planarisation avec le C43 en faisant varier les conditions de recuit d'auto-assemblage d'une plaque à l'autre. Un premier set de plaques a subi un recuit à température constante (250 °C) mais à temps de recuit variable (2, 5, 10, 30 et 60 min). Un deuxième set de plaques est fait à température variable (190, 210, 230, 250 et 270 °C) mais à temps de recuit constant (10 min). Nous avons ensuite inspecté au CD-SEM les champs de défektivité au pitch 120 nm pour chaque puce de chaque plaque afin d'en extraire les  $CD_{\text{DSA}}$ , l'erreur de placement (PE) mais aussi le taux d'ouverture de contacts (HOY). Chaque point de mesure est la moyenne mesurée sur environ 1200 contacts.

Les graphiques ci-dessous présentent le taux de défauts en fonction de la température (à gauche) et du temps (à droite) de recuit d'auto-organisation (cf. figure III-25).

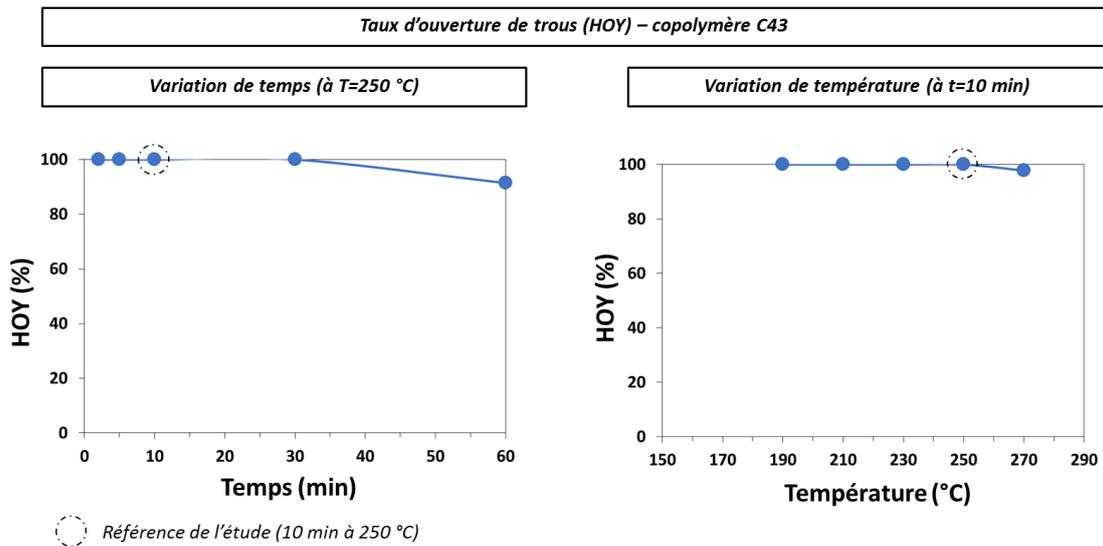


Figure III-25 : Variation du taux d'ouverture de trous (HOY) pour un copolymère C43 en fonction (à gauche) du temps à une température de 250 °C et (à droite) de la température à un temps de recuit de 10 min.

A 250 °C, le temps de recuit joue un rôle mineur sur le taux de défaut final en-dessous de 30 min puisque nous observons un taux d'ouverture de contacts de 100 %. Il est à noter ici que pour un recuit de 60 min, le polymère commence à se dégrader dans les cavités (cf. figure III-26).

Le comportement du copolymère C43 en température est similaire à celui observé pour le C35. Pour des températures de recuit en-dessous de 250 °C, nous estimons le HOY à 100 %. Au-delà de 250 °C, le polymère se dégrade, ce qui se traduit par des contacts manquants et une augmentation du taux de défauts (cf. figure III-27).

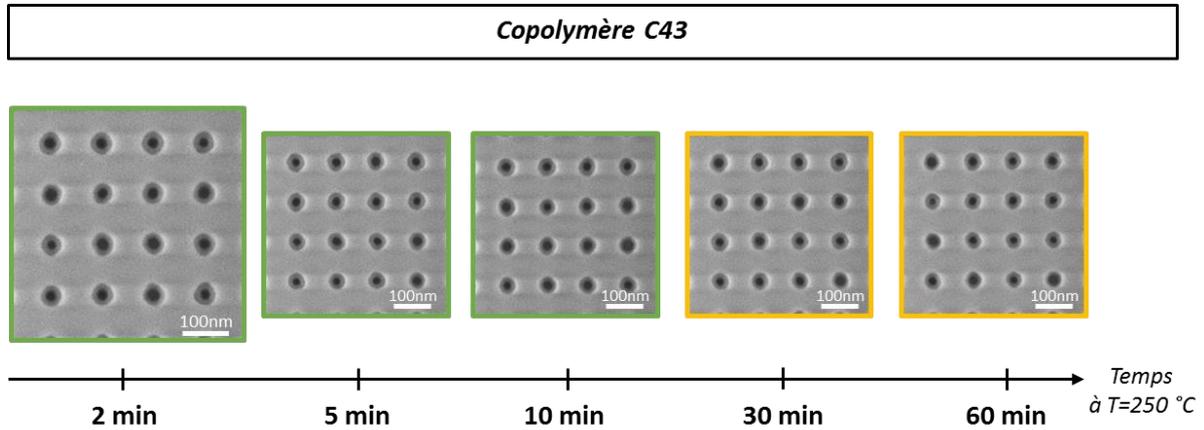


Figure III-26 : Images CD-SEM en vue du dessus de contacts DSA avec un copolymère C43 ayant subi différents temps de recuit d'auto-assemblage pour une température de 250 °C.

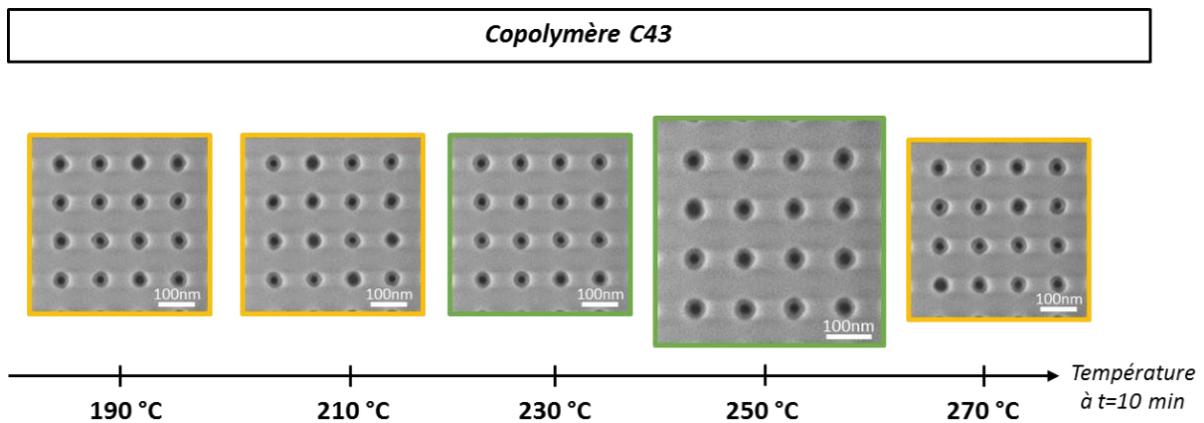


Figure III-27 : Images CD-SEM en vue du dessus de contacts DSA avec un copolymère C43 ayant subi différentes températures de recuit d'auto-assemblage pour un temps de 10 min.

La figure suivante compare la variation de «  $CDU_{\text{DSA}} - \text{all}$  » obtenue avec les copolymères C43 et C35 en fonction des conditions de recuit d'auto-assemblage (cf. figure III-28) (rappel de la définition de la «  $CDU_{\text{DSA}} - \text{all}$  » au chapitre II, paragraphe II.2.1).

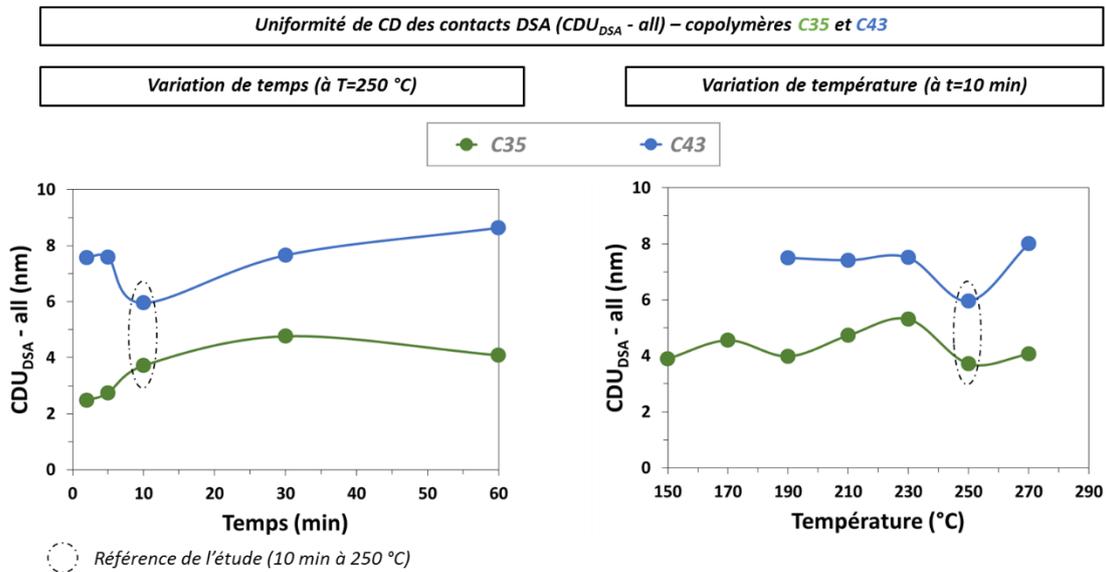


Figure III-28 : Uniformité du CD des contacts DSA mesurée sur tous les contacts ( $CDU_{DSA} - all$ ) pour les copolymères C35 (en vert) et C43 (en bleu) en fonction (à gauche) du temps de recuit (à température fixe de 250 °C) et (à droite) de la température du recuit (à temps fixé à 10 min). En vert en pointillé : la valeur de  $CDU_{DSA}$  correspondant à 10 % du  $CD_{DSA}$  moyen du C43.

La courbe de  $CDU_{DSA} - all$  en fonction du temps présente une sorte de puits de potentiel pour un temps de recuit d'auto-assemblage de 10 min. A 250 °C, le temps de recuit optimal est de 10 min ce qui est la référence prise pour cette étude.

Pour un recuit de 10 min, nous remarquons que la courbe de  $CDU_{DSA} - all$  du copolymère C43 en fonction de la température du recuit d'auto-assemblage présente les meilleurs résultats à 250 °C mais toujours moindre que ceux obtenus avec le copolymère C35. L'optimisation des conditions de recuit du C43 est donc plus sensible que le C35 : l'auto-assemblage du C43 nécessite un apport d'énergie précis pour minimiser la variation de  $CD_{DSA}$  car la fenêtre de procédé en termes de température de recuit (à 10 min) est très étroite.

Globalement, pour tous les recuits d'auto-assemblage analysés, les performances en termes de  $CDU_{DSA} - all$  du C43 sont moindres que celles obtenues avec le C35. Contrairement au cas du copolymère C35, une réduction du temps de recuit ne permet pas d'améliorer la  $CDU_{DSA} - all$  du C43.

Nous avons complété cette étude par l'analyse de l'erreur de placement pour différents temps et températures de recuit (cf. figure III-29).

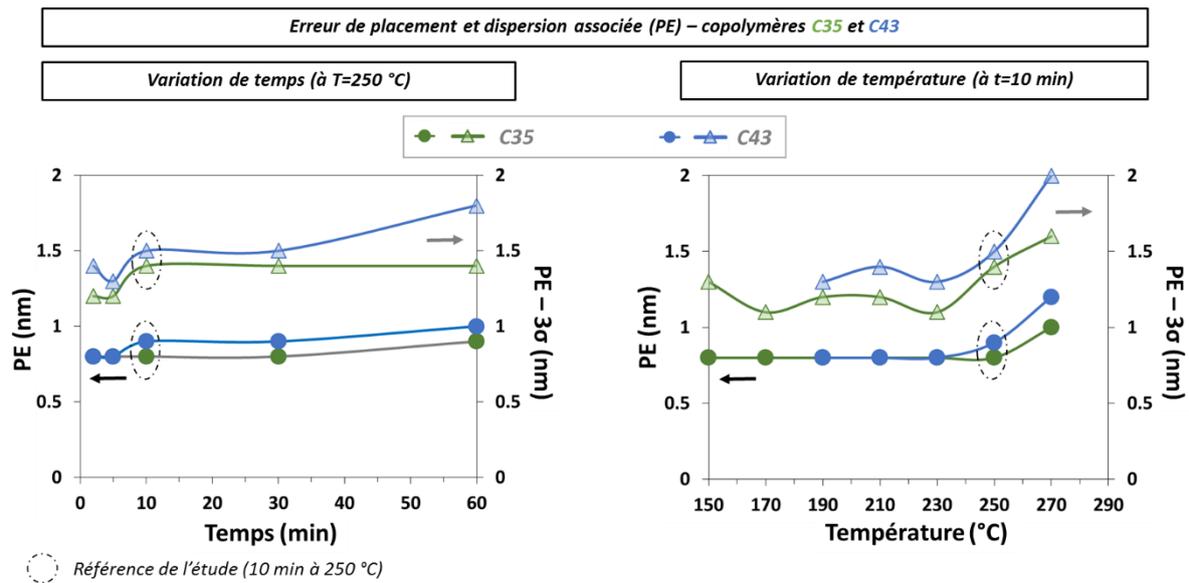


Figure III-29 : Erreur de placement et dispersion associée pour les copolymères C35 (en vert) et C43 (en bleu) en fonction (à gauche) du temps de recuit (à température fixe de 250 °C) et (à droite) de la température du recuit (à temps fixé à 10 min).

Le copolymère C43 présente une variation de l'erreur de placement en fonction du temps et de la température de recuit semblable à celle induite par le C35, en présentant des performances au mieux égales sinon inférieures au C35. Ceci est également le cas pour la dispersion associée. Ceci est potentiellement dû au fait que les chaînes du copolymère C43 sont plus longues que celle du C35 ce qui, par conséquent, diminue la mobilité des chaînes. L'équilibre est plus difficilement atteint puisque la cinétique est plus longue. Ainsi, à même temps et température de recuit d'auto-assemblage, le C43 présente plus de défauts et de désalignement que le C35.

Le tableau ci-dessous résume les performances DSA du copolymère C43 avec le recuit d'auto-assemblage optimisé à 250 °C pendant 10 min (cf. tableau III-10). Afin de compléter ces résultats, il serait intéressant d'étudier l'évolution des performances DSA du C43 en fonction du temps à une autre température où un meilleur optimum peut éventuellement être atteint.

<i>C43</i>	Ancien recuit <i>2 min à 250 °C</i>	Recuit optimisé <i>10 min à 250 °C</i>
<b>HOY (%)</b>	100	100
<b>CD<sub>DSA</sub> (nm)</b>	20.3	22.5
<b>CDU<sub>DSA</sub> (nm)</b>	2.7	2.1
<b>CDU<sub>DSA</sub> (% du CD<sub>DSA</sub>)</b>	13.3	9.3
<b>PE (nm)</b>	0.8	0.9
<b>PE – 3σ (nm)</b>	1.4	1.5

Tableau III-10 : Récapitulatif des performances du C43 pour les anciennes conditions de recuit d'auto-assemblage et les conditions de recuit optimisées.

### III23.D Influence sur les performances lithographiques de l'homopolystyrène résiduel dans la solution de copolymère C43

Un autre moyen d'optimiser les performances, autre que de modifier les conditions du procédé, est de jouer sur les propriétés intrinsèques du matériau. Ainsi, à l'instar de l'étude faite sur le polymère C35, nous avons également comparé les performances DSA de copolymère C43 dont le taux d'hPS en solution varie. Les performances en termes de HOY,  $CDU_{DSA}$  et PE pour les copolymères C35 et C43 sans et avec purification d'hPS sont résumées dans le tableau ci-dessous (cf. tableau III-11). Il est à noter que cette étude a été faite en amont de l'optimisation du recuit d'auto-assemblage du C43, c'est pourquoi les conditions de recuit utilisées ici sont de 2 min à 250 °C.

	C35	C43	C43 purifié
<b>Taux d'hPS (%)</b>	3	1	<0.2
<b>HOY (%)</b>	100	100	100
<b><math>CD_{DSA}</math> (nm)</b>	18.2	20.3	20.3
<b><math>CDU_{DSA}</math> (nm)</b>	1.2	2.7	2.4
<b><math>CDU_{DSA}</math> (%)</b>	6.6	13.3	11.8
<b>PE (nm)</b>	0.8	0.8	0.8
<b>PE – 3<math>\sigma</math> (nm)</b>	1.2	1.4	1.3

**Images CD-SEM**

Tableau III-11 : Récapitulatif des performances DSA obtenues avec les copolymères C35, C43 et C43 purifié pour un recuit de 2 min à 250 °C, avec les images CD-SEM associées.

En poussant davantage la purification du C43 pour atteindre un taux d'hPS inférieur à 0.2 %, nous remarquons que le taux de défauts est inchangé (100 % de HOY sur l'échantillon d'images analysé). La  $CDU_{DSA}$  est légèrement améliorée mais reste en dehors des spécifications (>10 % du  $CD_{DSA}$ ). De plus, nous pouvons voir sur les images CD-SEM que la CDU locale (au sein d'une image) est visiblement mauvaise. L'erreur de placement est quant à lui identique à ce qui est obtenu avec le copolymère avec une seule purification. **La purification supplémentaire du C43 ne permet pas d'atteindre les performances DSA du copolymère C35.**

### III23.E Récapitulatif des résultats

Les études précédentes nous ont conduits à considérer le procédé DSA avec le copolymère C35 dans une approche « PS-affine » comme le procédé de référence puisqu'il présente de meilleures performances comparées à celles obtenues avec le procédé « PMMA-affine ». Pour autant, notre procédé de référence est en limite d'intégration avec la lithographie 193i, c'est pourquoi nous avons cherché à relâcher la contrainte sur les dimensions des cavités de guidage. Pour cela, deux solutions ont été explorées. La première consiste en la modification de la fonctionnalisation de surface en utilisant un hPS<sub>g</sub> greffable de masse molaire plus grande. La seconde est basée sur l'utilisation d'un copolymère à blocs de masse molaire plus grande (le C43). Une troisième solution, combinant l'utilisation d'un hPS<sub>g</sub> greffable de grande masse molaire avec l'utilisation du copolymère C43 est également exploré ici. Le tableau ci-après résume les meilleures performances lithographiques obtenues avec les trois approches différentes (« PS-affine », « PS-affine modifié » et « PMMA-affine ») et deux copolymères à blocs de masse molaire différente (C35 et C43) (cf. tableau III-12). Pour chaque approche, une plaque 300 mm est réalisée puis les 75 puces de chaque plaque sont mesurées (une image par puce) afin d'en extraire le HOY, les CD<sub>DSA</sub> et CDU<sub>DSA</sub> ainsi que l'erreur de placement et la dispersion associée.

	C35			C43		
	PS-affine (référence)	PS- affine modifié	PMMA- affine	PS-affine (référence)	PS- affine modifié	PMMA- affine
<b>Masse molaire d'hPS<sub>g</sub> (kg.mol<sup>-1</sup>)</b>	12	50	–	12	50	–
<b>CD<sub>guide</sub> (nm)</b>	40 – 45	52 – 57	60 – 65	45 – 50	57 – 62	65 – 70
<b>HOY (%)</b>	100	100	100	100	100	100
<b>CD<sub>DSA</sub> (nm)</b>	18.2	18.1	20.4	20.3	24.3	23.7
<b>CDU<sub>DSA</sub> (nm)</b>	1.2	2.7	3.5	2.4	3.4	3.0
<b>CDU<sub>DSA</sub> (% du CD<sub>DSA</sub>)</b>	6.6	14.9	17.2	11.8	14.0	12.7
<b>PE (nm)</b>	0.8	1.2	1.0	0.5	0.6	0.8
<b>PE – 3σ (nm)</b>	1.2	2.1	2.2	2.5	2.1	2.3

Tableau III-12 : Récapitulatif des performances DSA obtenues avec les copolymères C35 et C43 pour les approches « PS-affine », « PS-affine modifiée » et « PMMA-affine ».

Le taux d'ouvertures de contacts (HOY) est à 100 % pour les deux copolymères avec les trois approches. Ce paramètre ne permet donc pas de discriminer les procédés entre eux.

Pour le copolymère C35, l'utilisation d'un hPS<sub>g</sub> greffé de grande masse molaire augmente les CD<sub>guide</sub> adaptés au DSA d'environ 12 nm par rapport à l'utilisation d'un hPS<sub>g</sub> greffé de faible masse molaire. Par rapport au CD<sub>DSA</sub> moyen, la dispersion de CD (CDU<sub>DSA</sub>) est plus de deux fois plus importante dans le cas du procédé « PS-affine modifié », les performances DSA par

rapport au procédé de référence. Cependant, elles restent meilleures que dans le cas du procédé « PMMA-affine » qui présente la moins bonne dispersion de  $CD_{DSA}$ . La dispersion sur l'erreur de placement est bonne pour les trois approches.

Avec le procédé « PS-affine », **l'utilisation du copolymère de masse molaire plus grande C43 à la place du C35 permet de relâcher la contrainte lithographique sur les guides de 5 nm** (passant d'un  $CD_{guide}^{C35}=40 - 45$  nm à  $CD_{guide}^{C43}=45 - 50$  nm). Bien que la dispersion sur l'erreur de placement soit stable, la  $CDU_{DSA}$  est presque doublée (6.6 % contre 11.8 %) avec le copolymère C43 en comparaison avec le C35.

Comme pour le copolymère C35, le C43 atteint ses meilleures performances avec le procédé « PS-affine ». L'utilisation d'un  $hPS_g$  greffé de grande masse molaire augmente les  $CD_{guide}$  adaptée au C43 d'environ 12 nm par rapport à l'utilisation d'un  $hPS_g$  greffé de faible masse molaire. **La combinaison de l'utilisation d'un  $hPS_g$  greffé de grande masse molaire et du copolymère de grande masse molaire C43 permet de relâcher la contrainte lithographique de 17 nm** par rapport à l'utilisation du C35 avec le procédé « PS-affine » de référence. Pour le C43, ce changement d' $hPS_g$  greffé détériore les performances DSA en termes de  $CDU_{DSA}$  mais de manière moins significative que pour le C35 (+126 % pour le C35 et +19 % pour le C43). Avec le procédé « PS-affine modifié », le C43 a des performances DSA proches de celles obtenues avec le procédé « PMMA-affine ».

Finalement, ni l'approche « PMMA-affine » ni l'utilisation d'un  $hPS_g$  greffé de masse molaire plus grande ne permettent de libérer la contrainte sur la lithographie sans détériorer les performances DSA. De plus, quelle que soit le procédé choisi et même après optimisation du recuit d'auto-assemblage, le copolymère C43 que nous avons évalué n'est pas aussi performant que le copolymère C35. Cela peut être dû au procédé de planarisation qui a été optimisé seulement sur le copolymère C35 et dont les améliorations sont à explorer pour le C43. Les propriétés matériaux du C43, qui est un copolymère de grande masse molaire, peuvent aussi rentrer en ligne de compte. Leur optimisation a été menée en parallèle par Arkema. L'utilisation de copolymères de type « blend » de grande masse molaire ou de copolymères « PS-*b*-PMMA modifié » (appelé « Special ») permet d'obtenir des résultats prometteurs en termes de  $CDU_{DSA}$ . Par ailleurs, ces copolymères présentent l'avantage de nécessiter un recuit à plus faible température, ce qui diminue le temps global du procédé DSA (temps de montée en température réduit) [Chevalier 2016].

Il est cependant indispensable de continuer à travailler avec le C43 car sa période intrinsèque est proche du pitch final demandé pour les nœuds technologiques sub-10 nm. Il sera utilisé pour réaliser du dédoublement de contacts dont l'étude sera présentée dans le chapitre 4.

Bien qu'il ne soit pas le meilleur candidat pour l'intégration du nœud visé, nous avons choisi de nous intéresser au copolymère C35 pour l'étude de défektivité à grande échelle car c'est avec ce polymère que nous obtenons les meilleures performances DSA lors des premières évaluations de procédés. Cette étude de défektivité permettra d'avoir une première idée sur le potentiel du procédé DSA à être adopté pour la production de masse.

### III.3 Analyse de la défectivité à grande échelle

Afin d'analyser précisément le taux de défauts sur les plaques que nous générons, nous avons mis en place une méthodologie de mesures de défectivité en plusieurs étapes. Nous avons exposé cette méthode dans le chapitre précédent (cf. [chapitre II, paragraphe II.2.2](#)) dont un résumé est donné ci-après :

- 1- Détermination du HOY au CD-SEM (au CEA Leti)
- 2- Détermination de la défectivité « mésoscopique » à l'aide de l'outil d'inspection optique Complus 4T (au CEA Leti)
- 3- Détermination de la défectivité liée au DSA grâce au SEM de revue (à STMicroelectronics)

La première étape d'analyse de défectivité consiste en l'étude des procédés à l'aide du CD-SEM présent en salle blanche du Leti. Chaque procédé est analysé sur environ 1200 contacts. Toute la partie précédente de ce chapitre entre dans ce cadre. Pour rappel, grâce à l'évaluation menée sur le CD-SEM, nous avons déterminé que notre meilleur procédé est obtenu avec le copolymère C35 dans une approche « PS-affine » avec des dimensions de cavités de guidage d'environ  $CD_{\text{guide}}=40 - 45$  nm, un recuit d'auto-assemblage de 2 min à 250 °C et une étape de planarisation avec une rétro-gravure de 90 secondes.

Après avoir déterminé notre procédé de référence, nous évaluons dans une deuxième étape la « méso-défectivité » sur les plaques après ouverture des guides et après DSA avec le Complus présent en salle blanche au CEA Leti. Cet outil permet dans un premier temps d'avoir accès aux défauts de l'ordre d'une centaine de nanomètres ou plus (particules ou grandes zones de contacts manquants). L'enjeu de ce travail est de déterminer quels sont les paramètres du procédé qui impactent la défectivité et de les optimiser afin de réduire le nombre de défauts final.

Le graphique suivant représente la densité de défauts normalisée pour les différentes plaques analysées (cf. [figure III-30](#)).

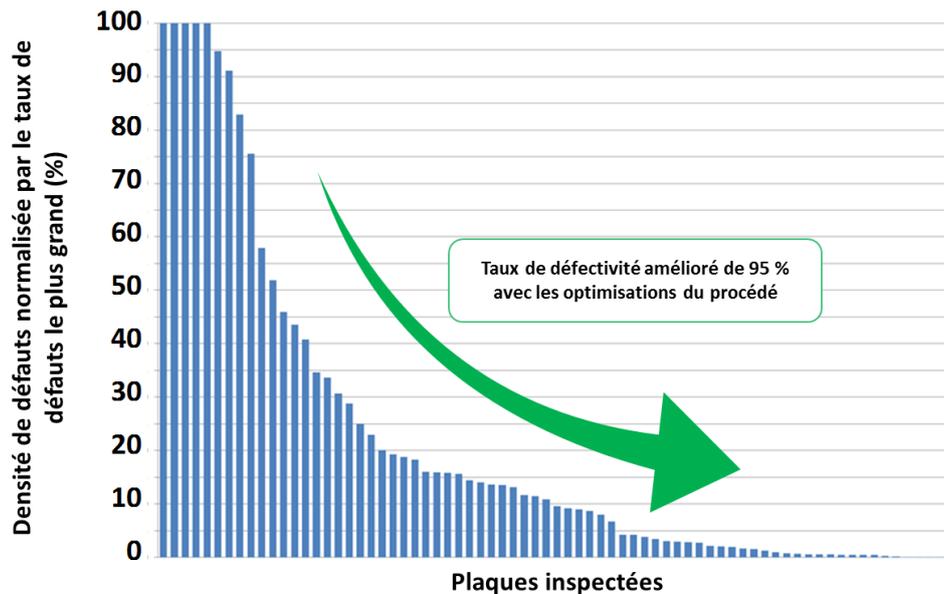


Figure III-30 : Densité de défauts normalisée par le taux de défauts le plus grand, mesurée sur plusieurs plaques.

Les premières plaques analysées présentaient beaucoup de défauts de type particulière (cf. figure III-31). L'ouverture des guides par gravure a ensuite été optimisée afin qu'elle génère le moins de résidus possibles. De plus, les premières expériences en 300 mm ne bénéficiaient pas encore de l'étalement automatique du copolymère à blocs sur la piste d'étalement prévue à cet effet. La distribution automatique de copolymère sur la piste nécessite l'installation d'une ligne de produit dédiée au copolymère C35, associée à un filtre à particules de 10 nm, qui est alimentée par des bouteilles d'un gallon de solution de copolymères. Elle n'a donc été installée qu'après une production de copolymères plus conséquente par Arkema, la stabilisation de la fabrication des copolymères mais aussi après l'établissement du procédé lithographie/gravure sur le masque *Bodbi*. Les premiers étalements ont donc été réalisés de manière « semi-automatique ». Un petit réservoir de quelques centilitres est rempli manuellement dans la piste d'étalement. Aucun filtre n'est installé dans ce cas. Ce mode de distribution du copolymère sur la plaque expose cette dernière à l'air de la salle blanche qui est moins pur que le micro-environnement d'un équipement dédié, ce qui conduit à l'ajout de particules et donc de défauts sur les plaques. L'absence de filtres pour la solution ajoute également des particules.

Un autre type de défauts, lié aux étapes de lithographie/gravure, est également présent sur les plaques. Il s'agit des larges zones contacts manquants (encore appelées « cluster » de défauts). Avec le procédé que nous avons choisi d'étudier, les tailles de guides sont à la limite de la fenêtre de procédé de la lithographie 193i, ce qui implique une forte sensibilité à la moindre variation de cette étape et donc à une forte probabilité d'avoir une mauvaise impression des motifs. Les contacts mal définis en lithographie ne sont ensuite pas transférés dans le masque dur et sont donc absents de la matrice de contacts comme le montre les images CD-SEM ci-dessous (cf. figure III-31).

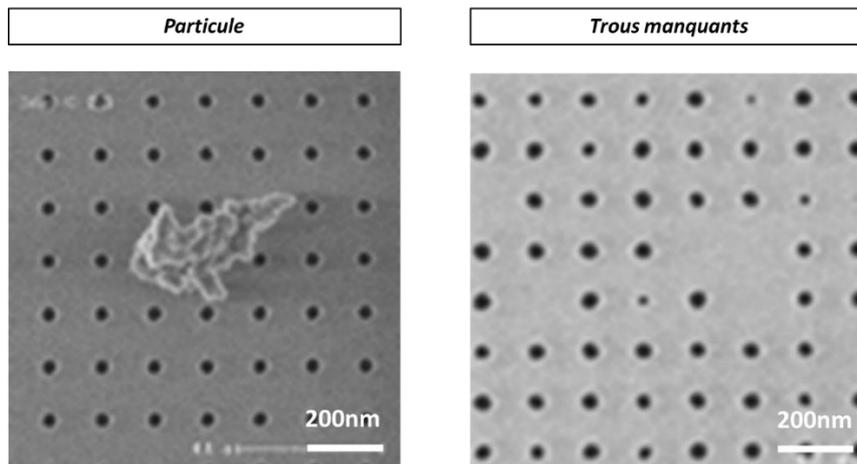


Figure III-31 : Images de SEM de revue prises à la suite de l'inspection de « méso-défektivité » sur le Complus, montrant un défaut de type particule (à gauche) et des motifs de guidage mal imprimés (à droite), à l'étape post-ouverture des guides.

Durant la troisième étape de l'analyse de défektivité, nous cherchons à discriminer les défauts venant du procédé DSA des autres défauts présents sur la plaque. Ainsi, nous inspectons les plaques au SEM de revue, qui a une sensibilité de détection nanométrique, dans les zones ne présentant pas de « cluster » de défauts. Les plaques sont inspectées post-ouverture des guides et post-DSA. Les images collectées sont ensuite traitées avec le logiciel « maison » *Laboar* qui permet, à partir du niveau de gris des images et d'une tolérance de CD choisie par l'utilisateur, de déterminer les contacts défectueux (manquants ou de taille anormale pour les guides et voilés pour les contacts DSA). Un exemple de ces images dans le cas d'une mesure post-DSA est donné dans la figure suivante (cf. figure III-32).

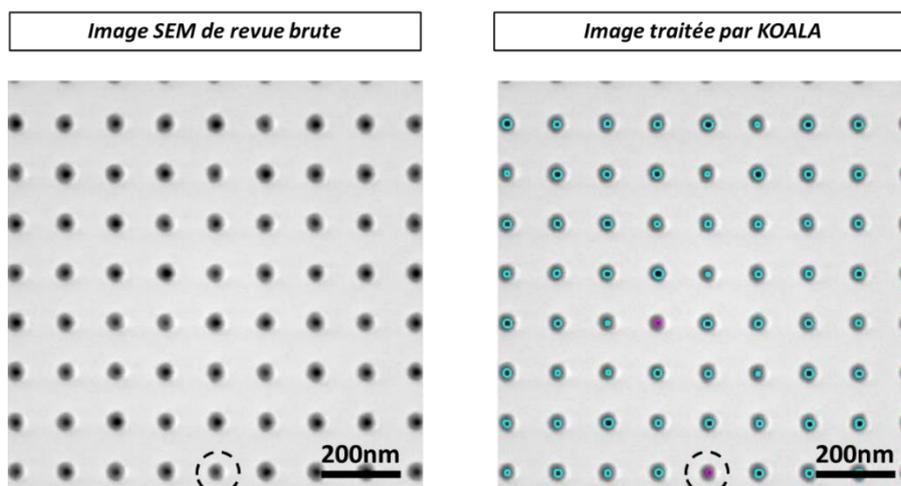


Figure III-32 : Images post-DSA collectées avec le SEM de revue brute (à gauche) et traitée par KOALA (à droite). En turquoise : les contacts DSA considérés comme valide car CD proche de la moyenne. En violet : contacts DSA considérés comme défectueux car CD trop petit.

Comme nous pouvons le remarquer sur les images précédentes, le taux de détection des contacts par le logiciel *Laboar* est de 100 %. Les contacts défectueux sont signalés en violet. Le contact entouré en pointillé sur la [figure III-32](#) en est un exemple : le contact DSA est petit mais visible sur l'image SEM. Il est possible que le cylindre de PMMA soit formé correctement dans le guide malgré un défaut de dimension mais la seule manière de s'en assurer est de transférer les contacts dans la couche sous-jacente. Quelques améliorations peuvent être apportées au logiciel afin d'affiner sa sensibilité pour éventuellement discriminer les contacts voilés des contacts trop petits.

En reprenant les images présentant des défauts de ce type afin de discriminer les quelques « faux positif » présents sur les images, nous avons pu en déduire la densité de défauts liés au DSA. **Pour une surface inspectée de 0.01 mm<sup>2</sup>** (soit 600000 contacts au pitch de guide 120 nm) et ce sur trois plaques identiques, **nous avons obtenu un total de zéro défaut**. Bien que ce résultat soit encourageant, il doit être mis à la lumière du nombre de contacts inspectés qui reste insuffisant pour conclure quant à l'industrialisation proche du procédé DSA. Pour aller plus loin dans l'analyse, il faut inspecter une surface bien plus importante, de l'ordre de 100 cm<sup>2</sup>, et de démontrer qu'un procédé peut à cette échelle être « zéro défaut ». Pour ce faire, l'utilisation d'un outil de défectivité avancé dédié au DSA, combinant à la fois la vitesse et la surface inspectée d'un outil optique et la résolution d'un SEM de revue, se révèle nécessaire à ce stade de l'étude.

## III.4 Transfert par gravure du motif DSA

Le taux de défauts final à l'étape DSA avec le copolymère C35 est encourageant, c'est pourquoi nous avons choisi ce copolymère à blocs pour faire la démonstration du transfert des motifs DSA dans les couches sous-jacentes. Pour cela, un enchaînement technologique dédié a été développé au CEA Leti sur l'empilement « SiARC/SOC/TiN/LTO » utilisé en production à STMicroelectronics pour les contacts de type « VIA 0x » du C014. Le schéma ci-dessous décrit les différentes étapes du transfert des motifs DSA depuis l'étape de planarisation jusqu'au transfert des contacts dans la couche de TiN (cf. [figure III-33](#)).

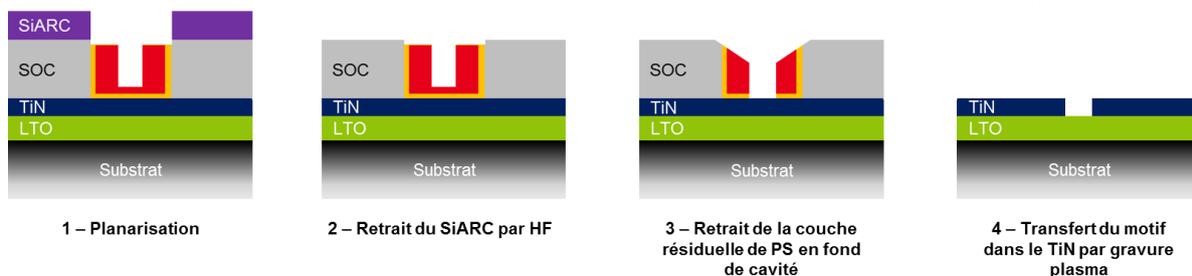


Figure III-33 : Schéma d'intégration du procédé de transfert des motifs DSA mis en place au CEA Leti.

Après l'étape de planarisation, la couche de SiARC est enlevée par gravure humide (acide fluorhydrique HF à 1 %). Avant le transfert du motif DSA, la couche résiduelle de polymère en fond de cavité doit être retiré par plasma Ar/O<sub>2</sub> afin d'ouvrir le motif DSA sur la couche de métal. Le transfert du motif dans le TiN se fait par gravure plasma Cl<sub>2</sub>/Ar. L'étape de retrait du polymère en fond de cavité est la plus critique dans cet enchaînement puisqu'un mauvais retrait peut conduire à l'absence de transfert du motif DSA dans la sous-couche. Nous avons donc cherché à optimiser les conditions de gravure plasma. Pour ce faire, nous avons réalisé les étapes du procédé DSA jusqu'à la planarisation de manière identique sur quatre plaques. Ensuite, chacune des plaques a subi une gravure plasma Ar/O<sub>2</sub> différente comme décrit dans le [tableau III-13](#).

		Recette 1	Recette 2	Recette 3	Recette 4
<b>Retrait de la couche résiduelle de polymère en fond de cavité</b>	Débit Ar (sccm)			50	
	Débit O <sub>2</sub> (sccm)	5	5	5	10
	Pression (mTorr)			10	
	Puissance (W)	220	220	500	500
	Tension d'auto-polarisation (V)	200	200	200	200
	Temps (s)	5	10	10	10
<b>Transfert du motif DSA dans le TiN</b>	Débit Cl <sub>2</sub> (sccm)			150	
	Débit Ar (sccm)			150	
	Pression (mTorr)			15	
	Puissance (W)			500	
	Tension d'auto-polarisation (V)			200	
	Temps (s)			25	

**Tableau III-13 : Récapitulatif des gravures plasma Ar/O<sub>2</sub> expérimentées pour le retrait de la couche de polymère en fond de cavité.**

Nous inspectons les plaques sur les champs de défektivité à pitch de guide 120 nm après ouverture de la couche résiduelle de polymère ce qui nous donne une information sur l'aspect des contacts (en particulier la CDU) mais aussi après transfert dans le TiN, ce qui nous donne une indication sur la présence ou non de la couche de polymère résiduelle en fond de cavité.

La figure suivante présente les images CD-SEM prise après retrait du polymère en fond de cavité et après transfert des motifs dans le TiN pour les différentes conditions de gravure, ainsi que les cartographies de CD<sub>DSA</sub> et CD<sub>transfert</sub> associées (cf. [figures III-34 et III-35](#)).

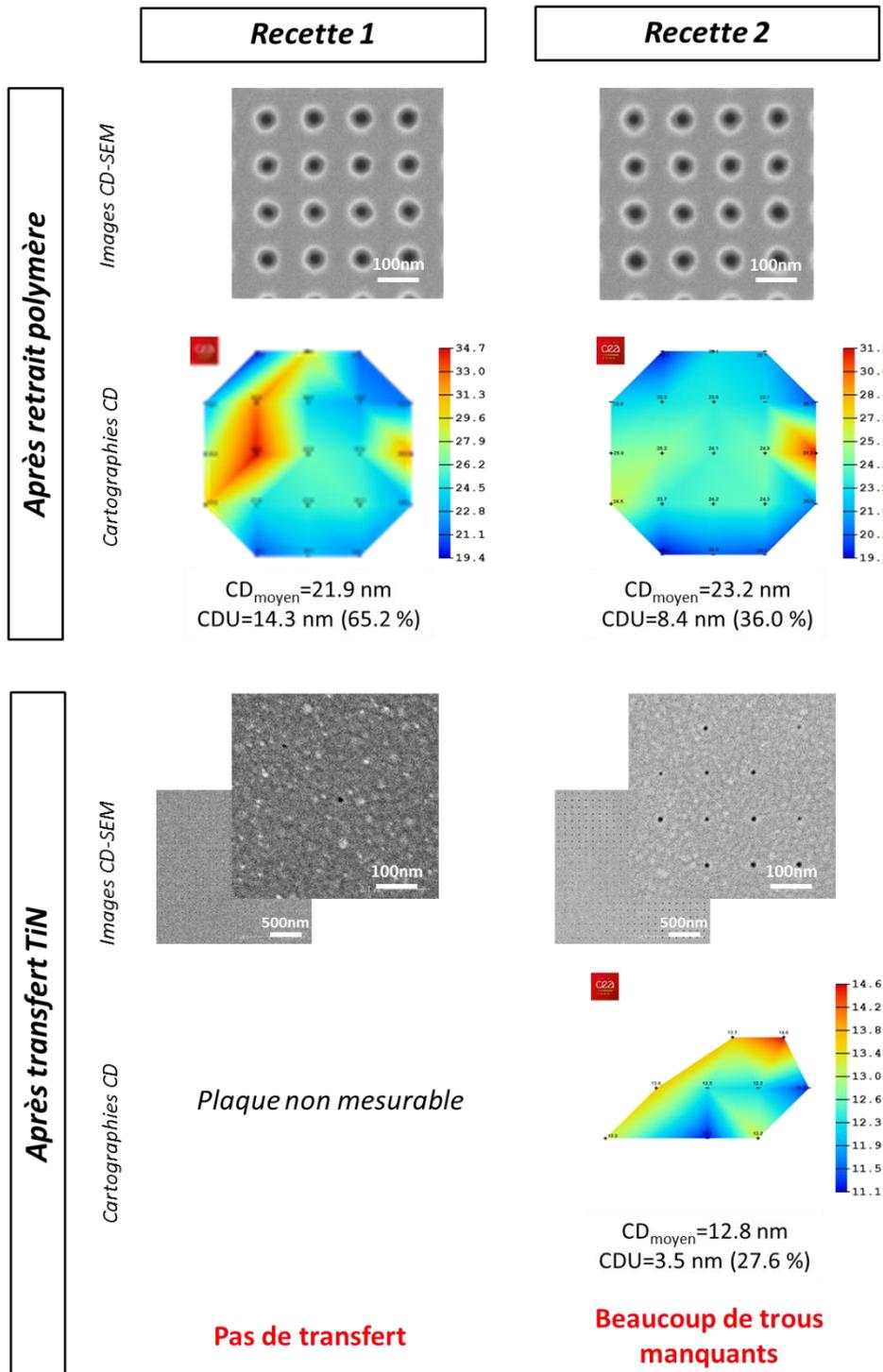


Figure III-34 : Images CD-SEM accompagnées de cartographie de CD des motifs après retrait du polymère en fond de cavité et transfert du motif dans le TiN pour les recettes de gravure #1 et #2. Sur les cartographies : le bleu foncé indique des CD plus petits que la moyenne, le rouge indique des CD plus grands que la moyenne. La CDU est également indiquée en pourcentage par rapport au CD moyen.

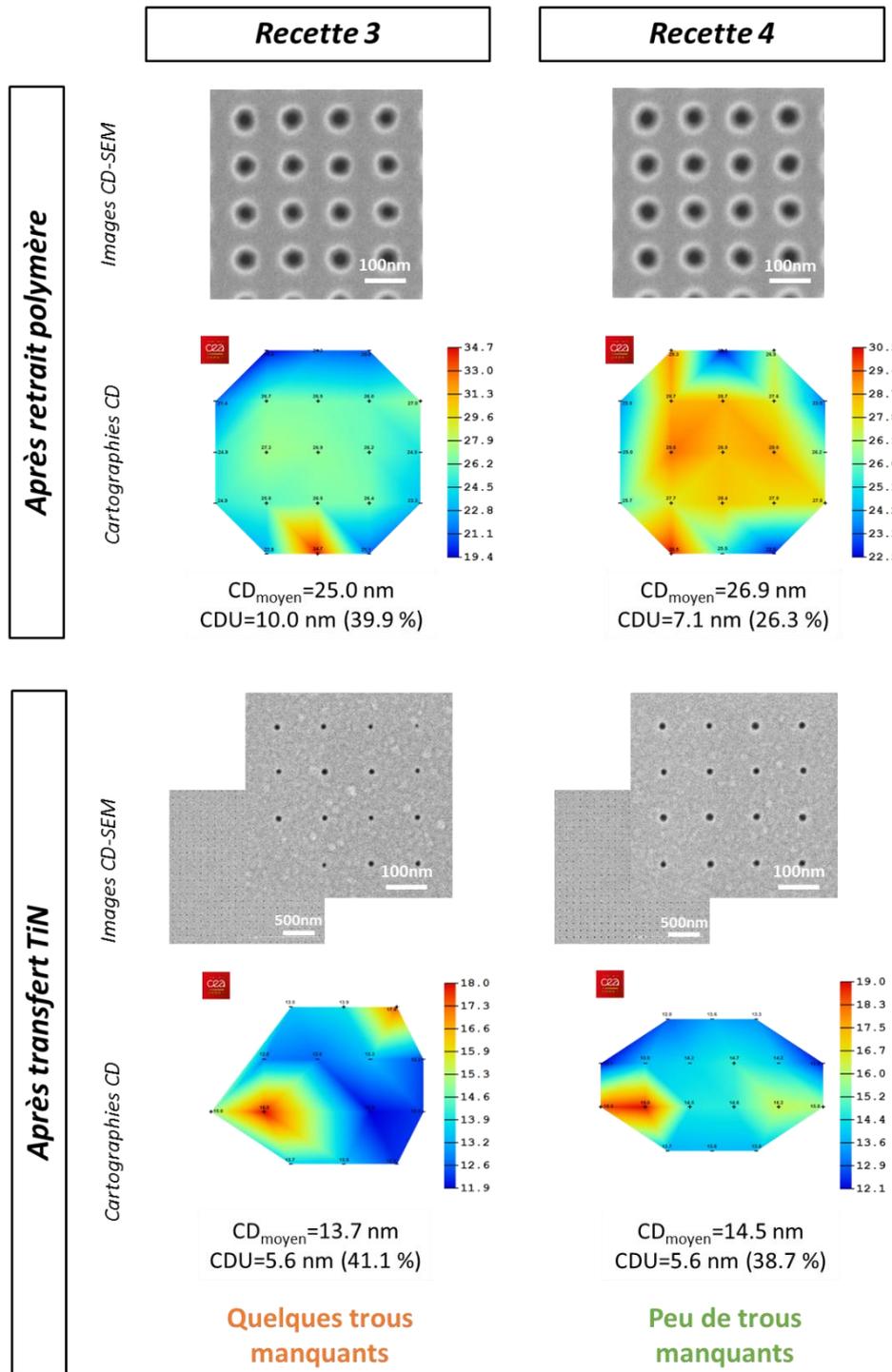


Figure III-35 : Images CD-SEM accompagnées de cartographie de CD des motifs après retrait du polymère en fond de cavité et transfert du motif dans le TiN pour les recettes de gravure #3 et #4. Sur les cartographies : le bleu foncé indique des CD plus petits que la moyenne, le rouge indique des CD plus grands que la moyenne. La CDU est également indiquée en pourcentage par rapport au CD moyen.

Nous remarquons que les deux premières recettes de gravure ne permettent pas d'ouvrir suffisamment les contacts DSA en fond de cavité puisque beaucoup de contacts sont manquants après l'étape de transfert dans le TiN. En doublant le temps de gravure entre les recettes 1 et 2, le taux d'ouverture après transfert est amélioré mais de manière insuffisante. L'association d'un temps de gravure plus long et d'une puissance de plasma plus grande (recette 3) a permis de révéler davantage de contacts. Les contacts manquants attestent de la rémanence de la couche résiduelle. L'augmentation du débit d'oxygène (recette 4) a permis de retirer davantage de polystyrène en fond de cavité. De plus, ceci a potentiellement conduit à la consommation de la matrice de PS formant le motif DSA, ce qui fait que la CDU final des motifs est moins bonne avec la recette 4 qu'avec la recette 3.

A l'instar de Gronheid *et al.*, nous avons fait la démonstration du transfert des contacts DSA dans la couche sous-jacente [Gronheid 2015]. L'optimisation de l'étape de retrait du polymère en fond de cavité a permis d'améliorer significativement le taux d'ouvertures de motifs en fin de procédé. Cependant, la CDU reste instable et un développement supplémentaire sera nécessaire afin d'atteindre le 100 % de contacts transférés sur TiN.

## III.5 Bilan des performances par rapport à l'état de l'art

Les résultats obtenus dans le cadre de l'étude des procédés DSA pour une application « shrink de contact » présentée dans ce chapitre sont à mettre en lumière de ceux publiés dans la littérature par d'autres groupes de recherche. Comme nous l'avons vu dans le chapitre d'introduction, le nombre d'articles portant sur le DSA est en constante augmentation. La figure suivante, extraite de la présentation de D. Jurajda (Brewer Science) au SEMICON Taiwan 2016, répertorie les performances DSA en termes de CDU de quelques résultats présentés aux conférences internationales *SPIE Advanced Lithography* en fonction de l'année de publication (cf. figure III-36) [Jurajda 2016]. La figure rassemble à la fois les données issues de procédés de grapho-épitaxie et de chémo-épitaxie, ainsi que de l'utilisation de copolymères à blocs PS-*b*-PMMA cylindriques et lamellaires pour des applications de type contact. Elle présente notamment les travaux cités dans le chapitre d'introduction dont la liste qui suit n'est pas exhaustive [Yi 2012] [Wuister 2012] [Bekaert 2014] [Gharbi 2015] [Gronheid 2015] [Tiron 2015] [Singh 2016].

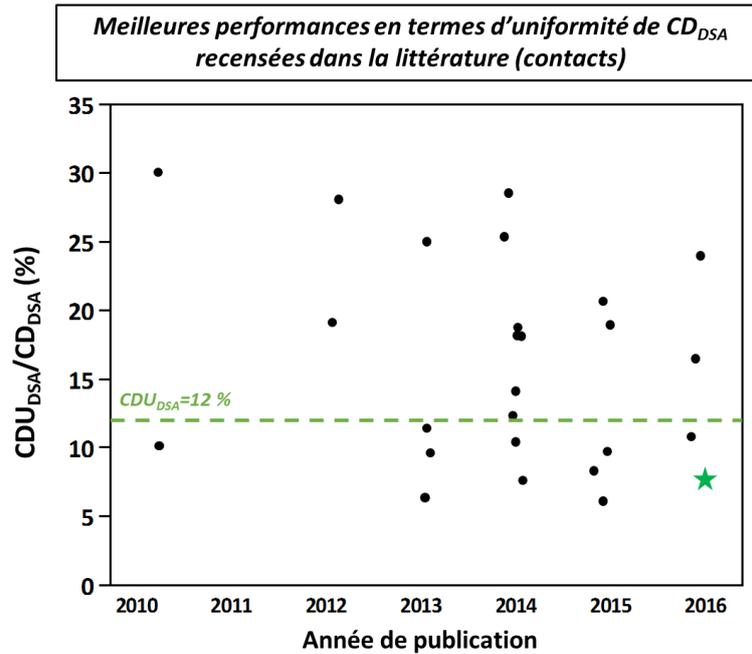


Figure III-36 : Performances DSA en termes de  $CDU_{DSA}$  (normalisée par le  $CD_{DSA}$ ) faisant l'objet d'une communication dans la conférence internationale *SPIE Advanced Lithography* pour différentes années. Est indiqué en pointillé la limite de spécification fixée par l'ITRS :  $CDU_{DSA}=2$  nm soit environ 12 % du  $CD_{DSA}$ . L'étoile correspond à la  $CDU_{DSA}$  obtenue avec notre procédé de référence (C35 « PS-affine ») :  $CDU_{DSA}=6.6$  % (inspiré de [Jurajda 2016]).

La disparité des performances lithographiques communiquées dans la littérature peut être imputée à la fois à la diversité des intégrations mises en place mais également des méthodes de métrologie qui ne sont pas nécessairement utilisées de manière consensuelle. En effet, l'absence d'une métrologie commune tend à rendre difficile toute comparaison entre procédé. L'utilisation sans distinction claire de la  $CDU_{DSA}$  et  $CDU_{DSA-all}$  par exemple, peut porter à confusion puisqu'elle n'est pas toujours explicitée dans les articles du domaine. Toute proportion gardée, nous pouvons observer que de nombreuses publications recensent des valeurs de  $CDU_{DSA}$  en accord avec les recommandations de l'ITRS ( $CDU_{DSA}=2$  nm soit environ 12 % pour un copolymère C35). En particulier, **notre procédé de référence** (C35 avec l'approche « PS-affine ») permet d'atteindre des valeurs de dispersion en-dessous de 7 %, ce qui **constitue une des meilleures performances publiées à ce jour avec un copolymère PS-*b*-PMMA**.

Un référencement similaire a été menée sur les résultats de défektivité et est présenté dans la figure suivante (cf. figure III-37) [Jurajda 2016]. Cette dernière met en valeur les travaux de [Tada 2008], [Bencher 2012], [Cao 2013], [Gronheid 2014], [Argoud 2014] et [Pathangi 2015].

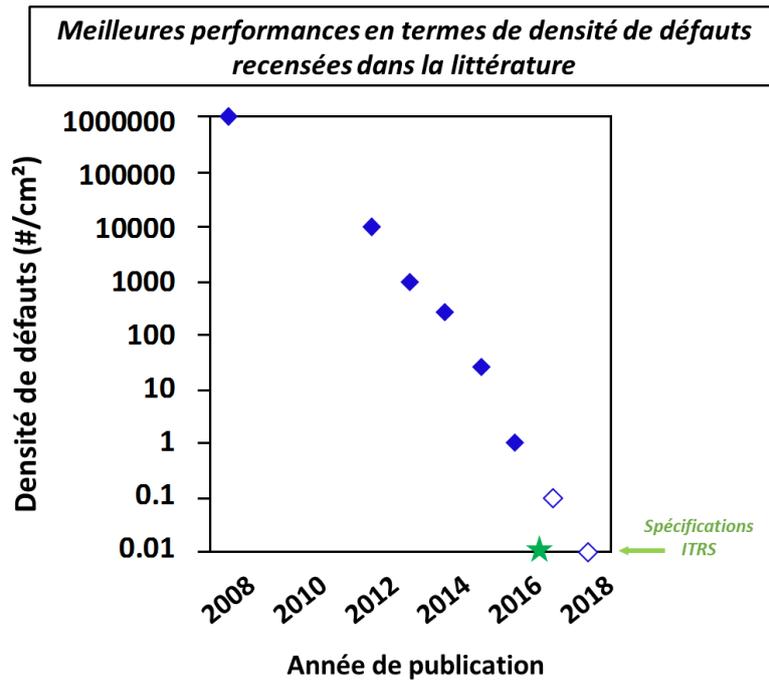


Figure III-37 : Performances DSA en termes de densité de défauts faisant l’objet d’une communication ou d’une publication pour différentes années. La flèche indique la limite de spécification fixée par l’ITRS : densité de défauts égal à 0.01 défauts.cm<sup>-2</sup>. En losange vide : les performances à atteindre en 2017 et 2018 pour être en adéquation avec l’ITRS. L’étoile correspond à la CDU<sub>DSA</sub> obtenue avec notre procédé de référence (C35 « PS-affine ») : ~0 défaut sur 0.01 mm<sup>2</sup> inspectés (inspiré de [Jurajda 2016]).

Les études publiées sur la défektivité liée au DSA montrent que les performances en termes de densité de défauts tendent à s’améliorer pour se rapprocher des recommandations de l’ITRS (0.01 défaut par cm<sup>2</sup>). Ainsi, avec notre procédé de référence (C35 avec l’approche « PS-affine »), nous avons obtenu un total de **0 défaut sur une surface inspectée de 0.01 mm<sup>2</sup>** (soit 600000 contacts au pitch de guide 120 nm) et ce, sur trois plaques identiques. Ce résultat doit tenir compte de la surface inspectée. Ainsi, *Singh et al.* ont obtenu un total de 74 défauts sur un nombre de contacts bien plus conséquents (3 milliards de contacts inspectés), ce qui en fait un résultat plus proche de la réalité [Singh 2016]. Bien qu’évoluant dans le bon sens, la densité de défauts reste cependant deux grandeurs au-dessus de cet objectif à atteindre. Il est donc nécessaire de développer, en parallèle des procédés DSA, des outils d’inspection permettant de scanner des zones plus grandes, voire la plaque entière à l’échelle nanoscopique.

## III.6 Conclusion

Ce chapitre a été dédié à l'étude du « shrink de contact » par DSA pour les nœuds avancés sub-10 nm et en particulier à la création d'une ligne pilote sur un masque dédié qui nous a permis d'implémenter le procédé DSA jusqu'au transfert des motifs DSA dans les couches sous-jacentes.

Le chapitre précédent présente les différents procédés que nous avons développés par la suite et qui se caractérisent par des fonctionnalisations de surface différentes. Une étape préliminaire à l'étude du « shrink de contact » porte donc sur le rôle de l'affinité de surface sur les performances lithographiques du DSA du copolymère C35 qui est notre matériau de référence. Sur plaque 300 mm avec lithographie e-beam, nous avons démontré que les procédés « PS-affine », « neutre » et « PMMA-affine », bien que permettant d'avoir un taux d'ouvertures de contacts de 100 %, présentent des fenêtres de procédés différentes, ce qui impliquent des avantages et inconvénients pour chacun :

- L'approche « PS-affine » permet d'obtenir les meilleurs résultats en termes de  $CDU_{DSA}$  (1.2 nm soit 6.6 % du  $CD_{DSA}$ ) et d'erreur de placement ( $PE=0.8$  nm,  $PE-3\sigma=1.2$  nm) mais nécessite des guides dont les CD sont proches de la limite de résolution de la lithographie 193i ( $CD_{guide}=40-45$  nm soit 50 nm post-lithographie)
- L'approche « PMMA-affine » implique une baisse des performances DSA par rapport au « PS-affine » mais présente l'avantage de relâcher la contrainte sur le CD de guides ( $CD_{guide}=60-65$  nm soit 20 nm plus grand que pour le procédé « PS-affine »).
- L'approche « neutre » a des performances et une fenêtre de procédé en termes de  $CD_{guide}$  à mi-chemin entre les deux autres procédés ce qui est un bon compromis. Cependant, le mauvais contrôle du greffage du copolymère statistique en fond de cavité rend cette approche dépendante du pitch et donc incompatible avec l'intégration visée.

Nous décidons à la suite de cette étude préliminaire de faire de **l'approche « PS-affine » notre procédé de référence** à implémenter avec le masque de lithographie 193i dédié au DSA.

Pour ce faire, nous avons mené un travail d'optimisation du procédé de création des motifs de guidage puis nous avons déterminé la fenêtre de procédé du copolymère C35 avec le procédé « PS-affine » : ce matériau s'auto-organise dans des cavités de guidage à  $CD_{guide}=43$  nm  $\pm$  6 nm.

Nous avons ensuite optimisé le recuit d'auto-assemblage en analysant des plaques ayant subi des températures et temps de recuit différents. A la suite de cette étude, nous avons déterminé que les meilleures performances DSA sont obtenues, pour le copolymère C35, avec un recuit de 2 min à 250 °C.

Les paramètres matériaux ont également été explorés. Ainsi, nous avons déterminé que la présence d'homopolystyrène (hPS) résiduel dans la solution de copolymère n'influe pas sur les performances DSA en termes de HOY,  $CDU_{DSA}$  et PE. L'utilisation d'un copolymère dit « blend » n'améliore a priori pas de manière significative les performances DSA telles qu'elles ont été évaluées

dans ce travail mais permettrait de réaliser des recuits à plus basse température, ce qui diminuerait le temps global du procédé.

Le procédé « PS-affine » avec le copolymère C35 nécessite des guides dont les CD sont en limite de fenêtre de procédé de la lithographie 193i, c'est pourquoi nous avons cherché à relaxer cette contrainte en explorant deux voies permettant d'utiliser le DSA avec des  $CD_{\text{guide}}$  plus grands :

- le greffage d'un  $hPS_g$  de grande masse molaire pour fonctionnaliser la surface des guides. Cela permet d'utiliser des guides environ 12 nm plus grands que ceux actuellement utilisés pour le procédé « PS-affine ». Cependant, les performances DSA obtenues en sont dégradées tout en restant meilleures que celles du procédé « PMMA-affine ».
- l'utilisation du copolymère C43, de masse molaire plus grande que le C35, nécessitant des  $CD_{\text{guide}}$  environ 5 nm plus grand que ce dernier. Une optimisation du recuit d'auto-assemblage a permis une amélioration des performances DSA, en particulier en termes de  $CDU_{\text{DSA}}$  mais ne permet pas d'atteindre les bons résultats du C35. La réduction du taux d'hPS résiduel n'améliore pas les performances globales du copolymère à blocs.

L'évaluation du procédé à grande échelle, et en particulier l'analyse de la défektivité, a été menée sur le procédé et le copolymère nous donnant les meilleures performances DSA, c'est-à-dire le procédé « PS-affine » avec le copolymère à blocs C35. La défektivité, évaluée en trois étapes, a été minimisée au cours des différentes plaques réalisées. Ainsi, pour une surface inspectée de 0.01 mm<sup>2</sup> (soit 600000 contacts au pitch de guide 120 nm) et ce sur trois plaques identiques, nous avons obtenu un total de zéro défaut. Ce résultat est à nuancer au vu de la taille de la surface inspectée, qui doit être augmentée pour que ce taux de défauts soit représentatif.

Le transfert des motifs DSA dans les couches sous-jacentes constitue la dernière étape qui permet de vérifier les performances du procédé DSA. Là encore, nous avons choisi de travailler avec le procédé « PS-affine » et le copolymère C35 afin d'optimiser la gravure du TiN avec le masque dur formé par le guide et la matrice de PS. Le principal défi technologique de cette étape est de retirer correctement la couche de copolymère en fond de cavité afin d'ouvrir le contact sur le TiN pour assurer un transfert du motif homogène à travers la plaque. Finalement, l'association d'un temps de gravure long, d'une puissance de plasma importante et d'un débit d'oxygène élevé permet de retirer le copolymère résiduel en fond de cavité pour transférer les contacts DSA. Des améliorations rester cependant à apporter afin d'atteindre un taux de transfert de contacts de 100 % et une meilleure CDU.

La figure ci-après regroupe les CD et CDU associées mesurés à différentes étapes technologiques, du procédé DSA (C35 avec l'approche « PS-affine ») au transfert des motifs (cf. figure III-38).

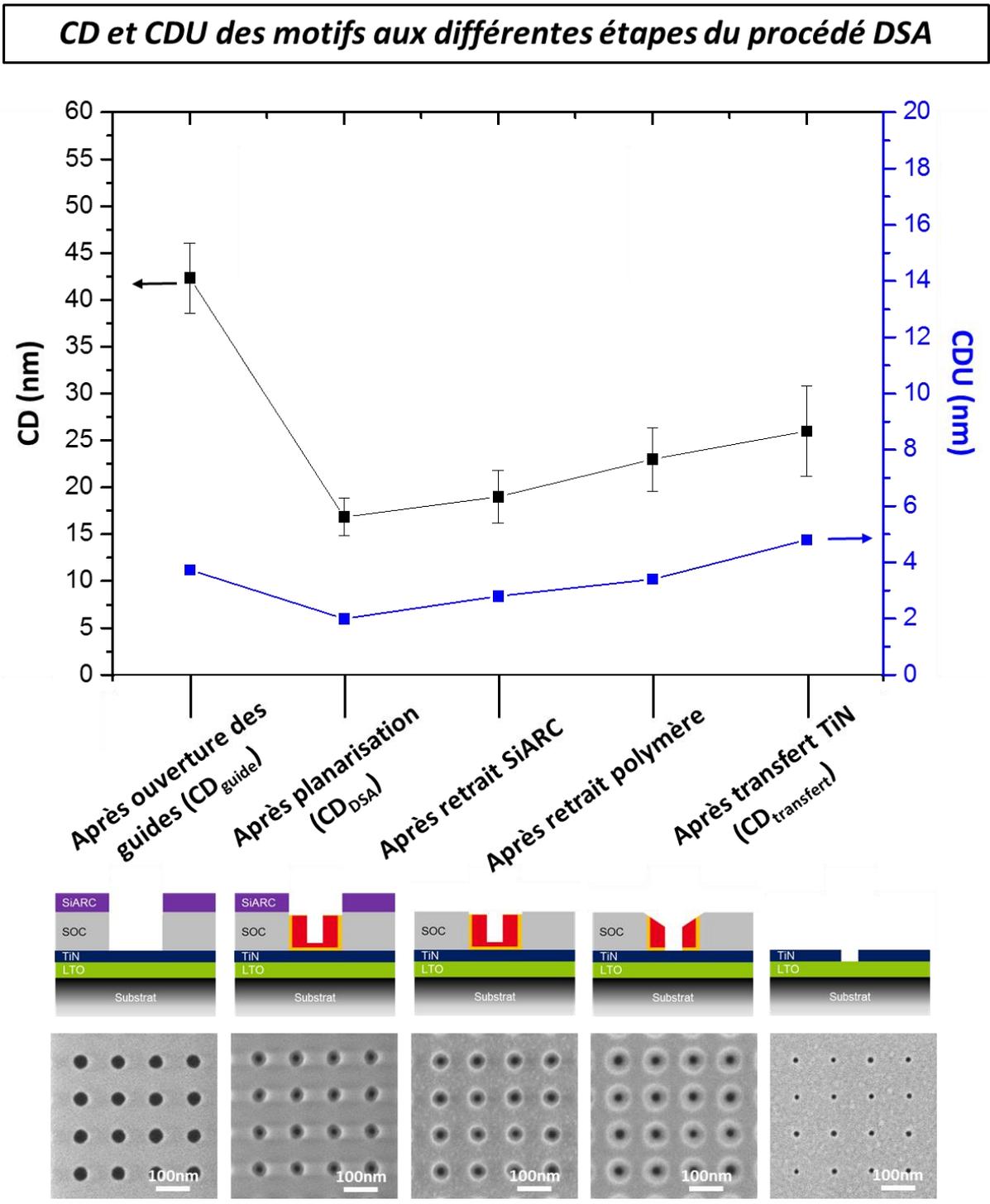


Figure III-38 : CD (en noir) et CDU associées (en bleu) des motifs aux différentes étapes du procédé DSA avec le copolymère C35 et l'approche « PS-affine ».

A partir de guides d'environ 42 nm de diamètre, le procédé DSA permet de réduire les dimensions des contacts en-dessous de 15 nm. Cependant, l'uniformité de CD n'est en pratique

pas améliorée, elle est même détériorée si nous considérons la CDU par rapport au CD moyen de chaque étape.

Un développement du procédé est nécessaire à plusieurs niveaux :

- sur le masque de lithographie 193i afin de créer un OPC plus robuste et des tailles de guide moins disperses
- sur l'empilement technologique afin de mieux contrôler l'état de surface des guides (en utilisant par exemple un masque dur en oxyde de silicium au lieu du SOC)
- sur la fonctionnalisation de surface afin que la couche de polymère résiduelle en fond de cavité soit la moins épaisse possible, voire qu'elle soit inexistante
- sur le matériau pour améliorer les propriétés d'auto-organisation (en particulier sur le C43)
- sur le procédé de planarisation pour que l'étape de rétro-gravure induise le moins de dispersité de CD possible
- sur le transfert dans le TiN afin que tous les motifs DSA soient transférés avec une bonne CDU.

Ce travail a donc permis d'identifier les paramètres procédés, notamment afin d'implémenter un procédé de référence en 300 mm sur la ligne pilote DSA au CEA Leti adapté aux besoins technologiques de STMicroelectronics. Ce procédé de référence a été utilisé par la suite – et en dehors de cette thèse – pour suivre la stabilité du procédé DSA et des matériaux.

## Bibliographie

- Argoud, M., Servin, I., Gharbi, A., Pimenta Barros, P., Jullian, K., Sanche, M., ... Pieczulewski, C. (2014). 300mm pilot line DSA contact hole process stability (Vol. 9049, pp. 904929-904929–11). <http://doi.org/10.1117/12.2046315>
- Bao, X. Y., Yi, H., Bencher, C., Chang, L. W., Dai, H., Chen, Y., ... Wong, H. S. P. (2011). SRAM, NAND, DRAM contact hole patterning using block copolymer directed self-assembly guided by small topographical templates. In *Electron Devices Meeting (IEDM), 2011 IEEE International* (p. 7.7.1-7.7.4). <http://doi.org/10.1109/IEDM.2011.6131510>
- Bekaert, J., Doise, J., Murugesan Kuppaswamy, V.-K., Gronheid, R., Chan, B. T., Vandenberghe, G., ... Her, Y. (2014). Contact hole multiplication using grapho-epitaxy directed self-assembly: process choices, template optimization, and placement accuracy (Vol. 9231, p. 92310R–92310R–11). <http://doi.org/10.1117/12.2066647>
- Bencher, C., Yi, H., Zhou, J., Cai, M., Smith, J., Miao, L., ... Holmes, S. (2012). Directed self-assembly defectivity assessment. Part II (Vol. 8323, p. 83230N–83230N–10). <http://doi.org/10.1117/12.917993>
- Cao, Y., Her, Y., Delgadillo, P. R., Vandebroek, N., Gronheid, R., Chan, T., ... Nealey, P. F. (2013). Using process monitor wafers to understand directed self-assembly defects (Vol. 8680, p. 86801S–86801S–7). <http://doi.org/10.1117/12.2011658>
- Chevalier, X., Coupillaud, P., Lombard, G., Nicolet, C., Beausoleil, J., Fleury, G., ... Cayrefourcq, I. (2016). Design of new block copolymer systems to achieve thick films with defect-free structures for applications of DSA into lithographic large nodes (Vol. 9779, pp. 977913-977913–11). <http://doi.org/10.1117/12.2219214>
- Chevalier, X., Nicolet, C., Tiron, R., Gharbi, A., Chamiot-Maitral, G., Jullian, K., ... Navarro, C. (2014). Self-assembly of high-resolutions PS-b-PMMA block-copolymers: processes capabilities and integration on 300mm track (Vol. 9049, p. 90490Y–90490Y–10). <http://doi.org/10.1117/12.2046313>
- Chevalier, Xavier, Nicolet, C., Tiron, R., Gharbi, A., Argoud, M., Couderc, C., ... Navarro, C. (2014). Improvements of self-assembly properties via homopolymer addition or block-copolymer blends (Vol. 9049, p. 90490T). <http://doi.org/10.1117/12.2046329>
- Doise, J., Bekaert, J., Chan, B. T., Gronheid, R., Cao, Y., Hong, S., ... Marzook, T. (2015). Implementation of surface energy modification in graphoepitaxy directed self-assembly for hole multiplication. *Journal of Vacuum Science & Technology B*, 33(6), 06F301. <http://doi.org/10.1116/1.4929884>
- Gharbi, A., Tiron, R., Argoud, M., Chevalier, X., Barros, P. P., Nicolet, C., & Navarro, C. (2015). Contact holes patterning by directed self-assembly of block copolymers: process window study. *Journal of Micro/Nanolithography, MEMS, and MOEMS*, 14(2), 023508–023508. <http://doi.org/10.1117/1.JMM.14.2.023508>

- Gronheid, R., Doise, J., Bekaert, J., Chan, B. T., Karageorgos, I., Ryckaert, J., ... Fuchimoto, D. (2015). Implementation of templated DSA for via layer patterning at the 7nm node (Vol. 9423, pp. 942305-942305-10). <http://doi.org/10.1117/12.2086090>
- Gronheid, R., Rincon Delgado, P., Pathangi, H., Van den Heuvel, D., Parnell, D., Chan, B. T., ... Nealey, P. (2014). Defect reduction and defect stability in IMEC's 14nm half-pitch chemo-epitaxy DSA flow (Vol. 9049, pp. 904905-904905-10). <http://doi.org/10.1117/12.2047265>
- Harumoto, M., Stokes, H., Tanaka, Y., Kaneyama, K., Pieczulewski, C., Asai, M., ... Cayrefourcq, I. (2017). DSA process window expansion with novel DSA track hardware (Vol. 10146, p. 101461X-101461X-6). <http://doi.org/10.1117/12.2257945>
- Jurajda, D. (2016). *DSA : progress toward manufacturing readiness*. SEMICON Taiwan.
- Latappy, H. (2014). *Etude des COV issus de la dégradation thermique et oxydative des matériaux polymères*. Université Paris Sud-Paris XI. Retrieved from <https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-01059771/>
- Pathangi, H., Chan, B. T., Bayana, H., Vandebroek, N., Van Den Heuvel, D., Van Look, L., ... Nealey, P. (2015). Defect mitigation and root cause studies in IMEC's 14nm half-pitch chemo-epitaxy DSA flow (Vol. 9423, p. 94230M-94230M-15). <http://doi.org/10.1117/12.2085889>
- Singh, A., Nam, J., Lee, J., Chan, B. T., Wu, H., Yin, J., ... Gronheid, R. (2016). Manufacturability of dense hole arrays with directed self-assembly using the CHIPS flow (Vol. 9777, p. 97770P-97770P-9). <http://doi.org/10.1117/12.2219261>
- Tada, Y., Akasaka, S., Yoshida, H., Hasegawa, H., Dobisz, E., Kercher, D., & Takenaka, M. (2008). Directed Self-Assembly of Diblock Copolymer Thin Films on Chemically-Patterned Substrates for Defect-Free Nano-Patterning. *Macromolecules*, 41(23), 9267-9276. <http://doi.org/10.1021/ma801542y>
- Tiron, R., Gharbi, A., Pimenta Barros, P., Bouanani, S., Lapeyre, C., Bos, S., ... Fleury, G. (2015). Template affinity role in CH shrink by DSA planarization (Vol. 9423, pp. 942317-942317-11). <http://doi.org/10.1117/12.2085819>
- Wuister, S. F., Ambesi, D., Druzhinina, T. S., Peeters, E., Finders, J., Wolterink, J. K., & Fraaije, J. G. E. M. (Hans). (2014). Fundamental study of placement errors in directed self-assembly. *Journal of Micro/Nanolithography, MEMS, and MOEMS*, 13(3), 033005-033005. <http://doi.org/10.1117/1.JMM.13.3.033005>
- Wuister, S. F., Finders, J., Peeters, E., & van Heesch, C. (2012). Lithography assisted self-assembly of contact holes on 300-mm wafer scale. *Journal of Micro/Nanolithography, MEMS, and MOEMS*, 11(3), 031304-1. <http://doi.org/10.1117/1.JMM.11.3.031304>
- Yi, H., Bao, X.-Y., Zhang, J., Bencher, C., Chang, L.-W., Chen, X., ... Wong, H.-S. P. (2012). Flexible Control of Block Copolymer Directed Self-Assembly using Small, Topographical Templates: Potential Lithography Solution for Integrated Circuit Contact Hole Patterning. *Advanced Materials*, 24(23), 3107-3114. <http://doi.org/10.1002/adma.201200265>

## Chapitre IV- Etude du dédoublement de contacts par DSA

---

Dans ce chapitre, nous traitons de la mise en place du procédé DSA pour application de type dédoublement de contacts. Après un bref rappel de la motivation de cette étude, nous présentons la méthodologie de détermination des fenêtres de procédés puis les résultats obtenus en DSA avec des guides elliptiques pour différents procédés et différents copolymères à blocs. Nous abordons ensuite une autre stratégie mise en place pour le dédoublement de contacts qui est fait à partir de guides « peanut » qui permettent d'adresser des pitches DSA plus grand que la période intrinsèque des copolymères étudiés.

---



<b>CHAPITRE IV- ETUDE DU DEDOUBLEMENT DE CONTACTS PAR DSA.....</b>	<b>147</b>
IV.1 MOTIVATIONS DE L'ETUDE.....	151
IV.2 METHODOLOGIE DE DETERMINATION DES FENETRES DE PROCEDES DU DEDOUBLEMENT DE CONTACT .....	152
IV.3 DEDOUBLEMENT DE CONTACTS DANS DES GUIDES ELLIPTIQUES AVEC UN COPOLYMERE C35 .....	155
<i>IV3.1 Détermination des fenêtres de procédé .....</i>	<i>155</i>
<i>IV3.2 Optimisation du recuit d'auto-assemblage.....</i>	<i>158</i>
IV.4 DEDOUBLEMENT DE CONTACTS DANS DES GUIDES ELLIPTIQUES AVEC UN COPOLYMERE C43 .....	161
<i>IV4.1 Détermination des fenêtres de procédés.....</i>	<i>161</i>
<i>IV4.2 Stratégie de relaxation de la contrainte de lithographie sur le guide.....</i>	<i>173</i>
<i>IV4.3 Bilan des performances « shrink » et dédoublement de contact pour le copolymère C43.....</i>	<i>181</i>
IV.5 DEDOUBLEMENT DE CONTACTS DANS DES GUIDES TYPE « PEANUT » .....	183
IV.6 CONCLUSION.....	190
BIBLIOGRAPHIE.....	192



## IV.1 Motivations de l'étude

Le « shrink de contact », tel que présenté dans le chapitre III, met en avant un des avantages du procédé DSA : sa forte résolution intrinsèque. Néanmoins, la densité des contacts reste celle de la lithographie conventionnelle. L'intégration du dédoublement de contacts exploite l'ensemble du potentiel du DSA puisqu'elle permet à la fois de réduire les dimensions des contacts mais aussi d'augmenter leur densité. La multiplication de contacts en grapho-épitaxie peut se faire de plusieurs manières. Selon le nœud technologique visé, le pitch visé sur la plaque sera égal ou légèrement différent de la période intrinsèque du copolymère, ce qui donnera lieu à des formes de guide différentes (elliptique ou « peanut-shape ») [Yi 2015] (cf. figure IV-1).

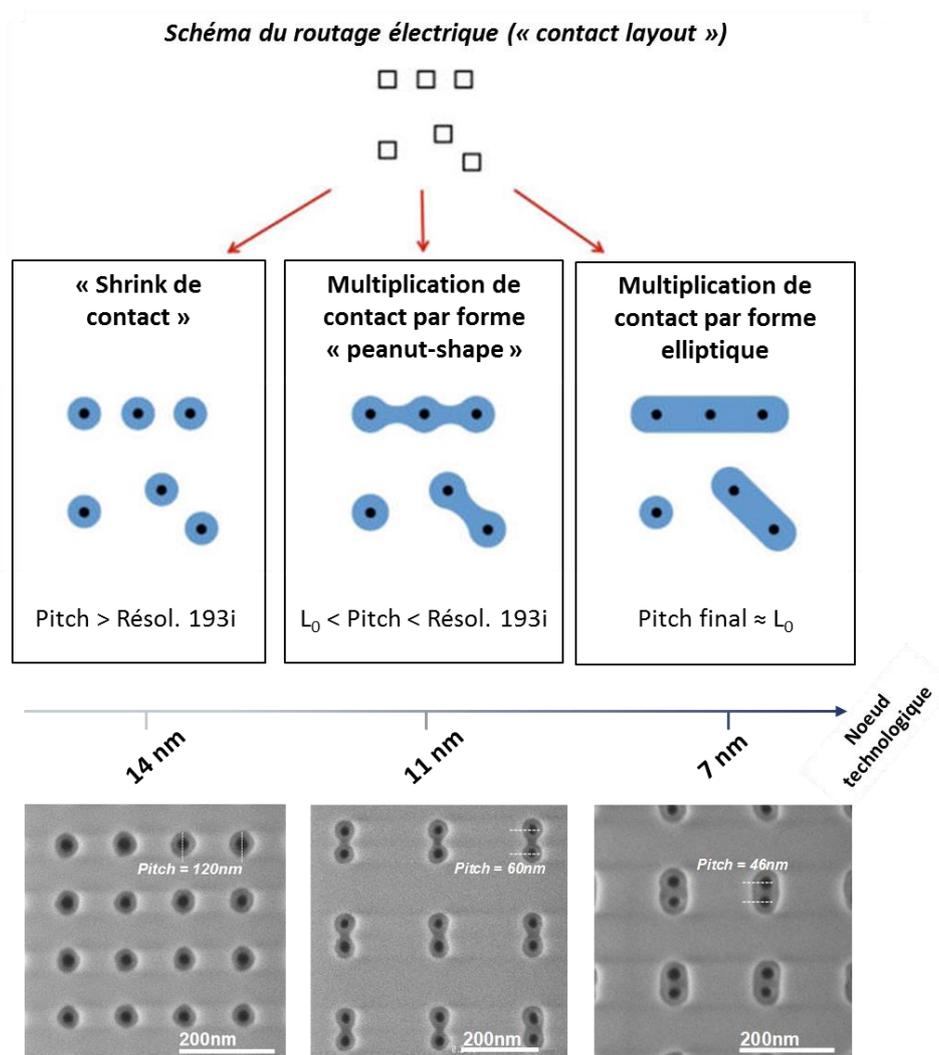


Figure IV-1 : Illustrations des différentes stratégies d'intégration du DSA pour des nœuds technologiques avancés, accompagnées d'images CD-SEM d'exemples d'intégration faites au CEA Leti (inspiré de [Yi 2015]).

Pour le nœud 14 nm, le pitch minimum à atteindre est plus grand que la résolution de la lithographie conventionnelle : le dédoublement de contacts par DSA n'est donc pas nécessaire. Pour adresser les nœuds sub-14 nm, le pitch minimum à atteindre est soit plus grand que la période intrinsèque du polymère mais plus petit que la résolution de la lithographie conventionnelle (nœud 10 nm), soit de l'ordre de la période intrinsèque du polymère (nœud 7 nm). Dans ces cas-là, la lithographie conventionnelle ne peut pas résoudre un pitch aussi agressif. Nous devons donc avoir recours au DSA en utilisant des formes de guides adaptées permettant d'obtenir du dédoublement de contacts au pitch désiré.

La forme elliptique est simple à mettre en œuvre en lithographie 193i, c'est pourquoi nous l'étudions dans un premier temps pour le dédoublement de contacts. Comme le copolymère C35 est notre matériau de référence pour le « shrink de contact », les fenêtres de procédés des approches « PS-affine » et « PMMA-affine » sont tout d'abord déterminées avec ce matériau pour le dédoublement. Cependant, les règles de dessins associés au nœud visé pour cette thèse (sub-14 nm) imposent des dimensions de pitches bien précises : 46 nm, 68 nm et 80 nm, qui ne seront pas atteints avec la lithographie 193i associée au copolymère C35. Le copolymère C43 semble donc être plus adapté à ce besoin puisqu'il adresse directement le pitch 46 nm, proche de la période intrinsèque du copolymère. Une deuxième partie de l'étude porte donc sur la détermination des fenêtres de procédés pour les approches « PS-affine » et « PMMA-affine » avec le copolymère C43 précédemment étudié en « shrink de contact ». Afin de relâcher la contrainte lithographique sur les guides pour encore améliorer la CDU finale, nous avons envisagé une modification du procédé « PS-affine » en considérant un hPS<sub>g</sub> greffé de masse molaire plus grande. Enfin, pour adresser les deux autres pitches (68 nm et 80 nm), nous avons implémenté une forme de guide dite « peanut-shape » (cacahouète) qui permet de contraindre les chaînes de copolymères et donc d'obtenir après étape DSA un pitch final plus grand que la période intrinsèque du copolymère.

Il est à noter qu'il est possible d'exploiter l'ensemble des propriétés du DSA (réduction des dimensions et augmentation de la densité), en créant des contacts réguliers à forte densité sur de grande distance. Pour cela, il est nécessaire d'utiliser une intégration mettant en jeu des copolymères cylindriques dans des tranchées, comme le montre plusieurs exemples dans la littérature [Wuister 2012][Boots 2014], ce qui trouve une application directe pour les VIA des cellules mémoires. Cette application ne fera cependant pas l'objet de cette étude.

## IV.2 Méthodologie de détermination des fenêtres de procédés du dédoublement de contact

Afin de déterminer les fenêtres de procédé DSA pour le dédoublement de contacts, nous avons utilisé le masque *Bodbi* dont les paramètres lithographie 193i/gravure ont déjà été optimisés lors de l'étude du « shrink de contact ». Ce masque présente de larges champs d'ellipses (comme les

contacts pour le « shrink de contact ») mais avec une seule dimension de guide de telle sorte que les ellipses aient un ratio axes majeur sur axe mineur visé de 2. Ces structures ont été dimensionnées suite à des premiers modèles mais après un rapide test DSA elles s'avèrent être trop larges, laissant ainsi trop de mobilité au polymère (le ratio final sur plaque est plutôt autour de 1.7). L'étude s'est donc faite sur d'autres champs présents sur le masque intégrant des dimensions d'ellipses plus variées mais qui représentent de plus petites surfaces. Ils seront nommés par la suite « champs à CD variables ». Ces champs font environ  $10\ \mu\text{m} \times 10\ \mu\text{m}$  chacun et sont composés d'environ 100 motifs de guide chacun. D'un champ à l'autre, les dimensions des ellipses (largeur et longueur) varient par pas de 2 nm, ce qui nous donne accès à un grand nombre de tailles de guide pour l'étude de commensurabilité. Plusieurs pitches de guide (distance entre deux guides) sont disponibles mais seuls les guides au  $\text{pitch}_{\text{guide}}=120\ \text{nm}$  sont étudiés ici afin d'avoir le plus grand nombre possible de contacts mesurés.

Les dimensions visées dans les champs à CD variables lors de l'élaboration du masque ne correspondent pas aux dimensions réelles sur les plaques après les étapes de lithographie/gravure. Pour lier les performances DSA en dédoublement aux tailles réelles de guide, cette étude de commensurabilité se fait par étape :

Dans un premier temps, pour déterminer rapidement quel guide permet la meilleure organisation DSA, l'ensemble des champs à CD variables d'une même puce est analysé par CD-SEM. Grâce à ces images, une cartographie rapide sur la base du dimensionnement visé des ellipses est faite afin de discriminer les motifs ne donnant pas un HOY de 100% (cf. figure IV-2). Ici le HOY est calculé à partir de 24 contacts DSA par motifs.

Dans un deuxième temps, quelques champs à CD variables ayant un HOY proche ou égal à 100% sont sélectionnés afin de :

1 – mesurer ces mêmes champs sur toutes les puces d'une plaque post-ouverture de guide pour obtenir les dimensions réelles des guides. Pour un champ à CD variables donné, la dimension retenue est la moyenne sur tous les contacts (moyenne des axes majeur et mineur sur environ 900 guides).

2 – mesurer ces champs post-DSA sur toutes les puces de la plaque pour augmenter la statistique et recalculer un HOY plus robuste, mais aussi la CDU et le pitch. Là encore, pour un champ à CD variables, la CDU est obtenue sur la somme des contacts inspectés sur toutes les puces, soit environ 1800 contacts DSA et le pitch est la moyenne des pitches obtenus sur toute la plaque.

Au final, nous obtenons les graphiques révélant la dépendance des critères de qualité (HOY, CDU, pitch) en fonction des dimensions réelles des guides elliptiques (largeur et longueur) (cf. figure IV-3). Nous définissons la fenêtre de procédé pour le dédoublement de contacts d'un copolymère à blocs la zone qui correspond à un HOY proche de 100% (en vert sur la figure). En dehors de cette zone, il existe quelques défauts (environ 50 % pour les zones en orange). Les zones rouges correspondent à des guides non adaptés au copolymère à blocs car presque tous les contacts sont défectueux (HOY proche de 0 %). Ce travail est effectué pour différents procédés comme présenté dans les paragraphes suivants.

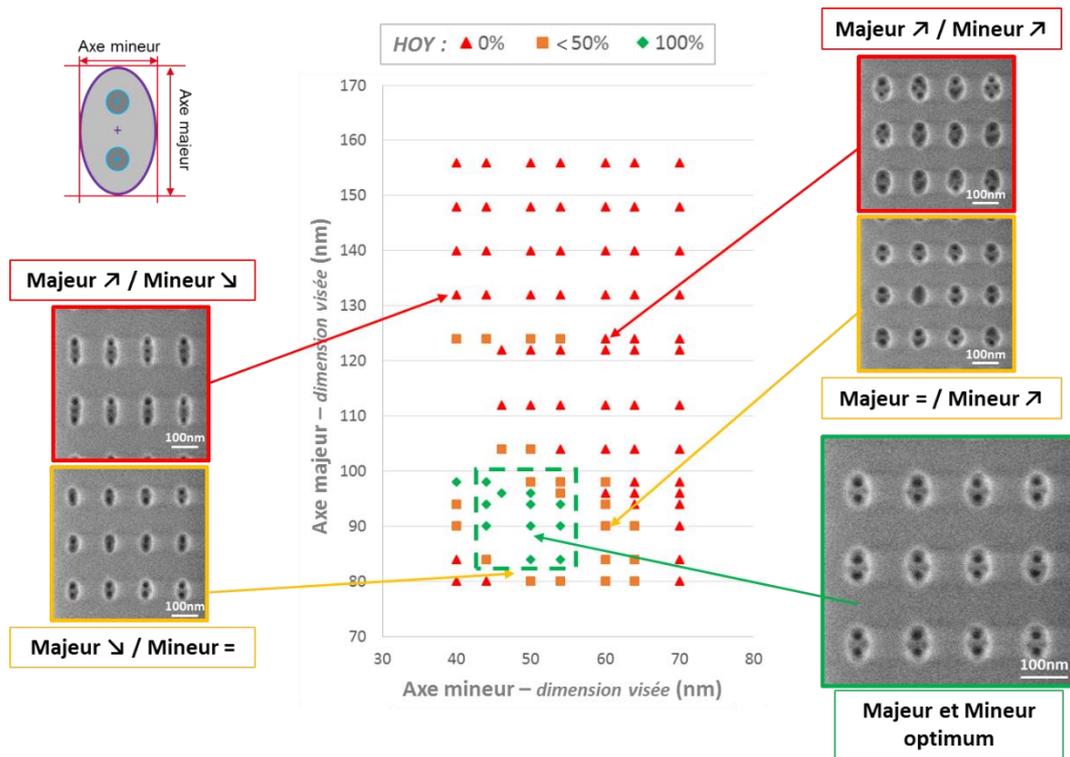


Figure IV-2 : Cartographie représentant le taux d'ouverture de contacts DSA (HOY) en fonction des dimensions (axes majeur et mineur) des ellipses pour un copolymère C35 avec le procédé « PS-affine ». Chaque point correspond à un champ à CD variables. Le HOY est évalué pour chaque champ sur une image CD-SEM comme présenté en exemple. Lorsque le dimensionnement s'écarte de l'optimum (en vert), cela conduit à la création de défauts (images en rouge et orange).

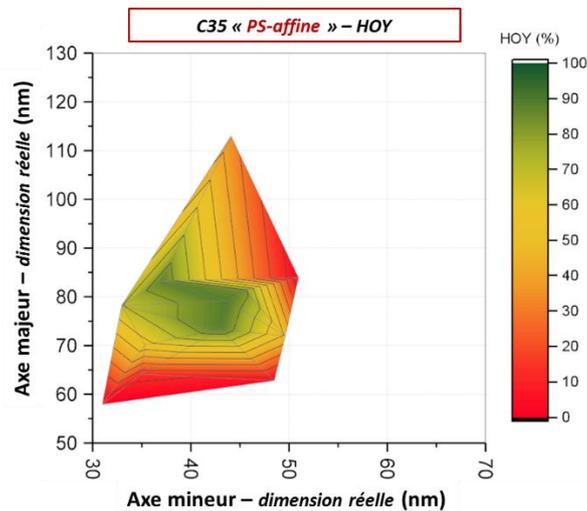


Figure IV-3 : Graphique représentant le taux d'ouverture de contacts DSA (HOY) en couleur en fonction des dimensions réelles des guides : d'un HOY de 0 % (en rouge) à 100 % (en vert). Chaque « sommet » correspond à une valeur expérimentale. Le logiciel Origin permet de faire l'extrapolation entre les points. L'échelle en X (axe mineur) est volontairement choisie deux fois plus grande que l'axe Y (axe majeur) pour une meilleure visibilité.

## **IV.3 Dédoublement de contacts dans des guides elliptiques avec un copolymère C35**

Le copolymère C35 étant notre matériau de référence, nous allons tout d'abord déterminer sa fenêtre de procédé en fonction des dimensions des motifs de guide. L'optimisation du recuit thermique en vue d'améliorer les performances DSA viendra ensuite compléter cette étude.

### **IV3.1 Détermination des fenêtres de procédé**

L'étude des fenêtres de procédés DSA pour le « shrink de contact » a permis de déterminer la gamme de CD de guide adéquate pour obtenir les meilleures performances lithographiques pour un copolymère donné. Pour le dédoublement de contact, nous avons décidé de commencer par analyser les résultats obtenus avec le copolymère à blocs C35 pour les procédés « PS-affine » et « PMMA-affine » puisque c'est le polymère donnant les meilleurs résultats en « shrink de contact ». Le contrôle de l'épaisseur du copolymère statistique en fonction de la densité des motifs de guidage est difficile à maîtriser, c'est pourquoi le procédé « neutre » n'a pas été étudié avec ce véhicule de tests. Il est à noter que, sauf mention contraire, les plaques analysées en dédoublement sont les mêmes que celles étudiées en « shrink de contact » pour les approches « PS-affine » et « PMMA-affine » (cf. [figure II-4](#)).

- « PS-affine » : greffage d'hPS<sub>g</sub> de 10 min à 230°C puis recuit d'auto-assemblage de 10 min à 250°C.
- « PMMA-affine » : recuit d'auto-assemblage de 10 min à 250°C.

La figure suivante représente le taux d'ouverture de contacts DSA (HOY) obtenus avec le polymère C35 pour deux procédés : « PS-affine » et « PMMA-affine » (cf. [figure IV-4](#)). Notons ici que chaque partie du graphique est basé sur l'analyse d'environ 20000 contacts DSA, ce qui correspond à 12 champs à CD variables différents, chacun d'eux étant mesurés sur toutes les puces de la plaque.

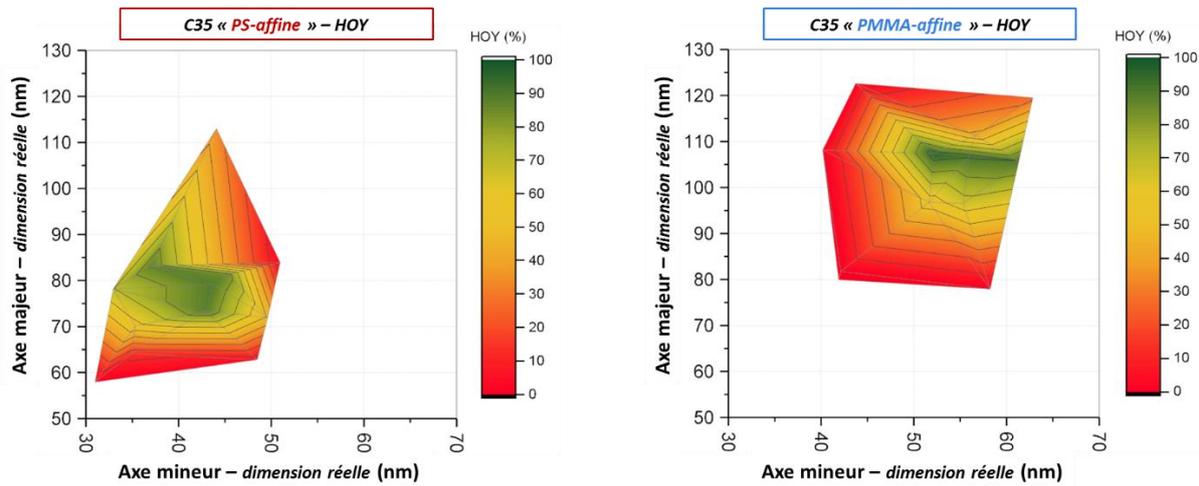


Figure IV-4 : Graphiques représentant le taux d'ouverture de contacts DSA (HOY) en fonction des dimensions réelles du guide pour les procédés « PS-affine » (à gauche) et « PMMA-affine » (à droite) avec un copolymère C35.

Une première analyse de ces graphiques permet de conclure que les centres des deux fenêtres de procédé ne sont pas les mêmes : le meilleur taux d'ouverture de trous est obtenu pour des guides plus petits pour le procédé « PS-affine » que pour le procédé « PMMA-affine » (cf. tableau IV-1).

<i>C35</i>	CD <sub>guide_majeur</sub> (nm)	Δ majeur (nm)	CD <sub>guide_mineur</sub> (nm)	Δ mineur (nm)	HOY (%)
« PS-affine »	79.2	~15	43.7	~10	89.2
« PMMA-affine »	107.3	~7	52.1	~10	95.5

Tableau IV-1 : Performances DSA en termes de HOY en fonction des dimensions des ellipses ainsi que les dimensions de la fenêtre de procédé (Δ majeur et Δ mineur) pour les approches « PS-affine » et « PMMA-affine » avec un copolymère C35.

Cela peut être expliqué par l'agencement des chaînes à l'intérieur de la cavité qui n'est pas le même pour les deux procédés (cf. figure IV-5). Pour le « PS-affine », quatre chaînes sont alignées le long du guide alors qu'il y en a six pour le « PMMA-affine ». Ceci se retrouve sur le graphique : le centre de la fenêtre de procédé « PS-affine » est à environ 80 nm ce qui correspond à deux fois la période intrinsèque du polymère (35 nm) majoré par deux fois l'épaisseur d'hPS greffé (environ 5 nm de chaque côté). De même, le meilleur HOY pour le « PMMA-affine » est obtenu pour des guides autour de 105 nm de long, soit trois fois  $L_0$ . La fenêtre de procédé se situe dans une zone où la largeur de guide est comprise entre  $L_0$  et  $2L_0$  : les chaînes de polymère sont contraintes dans la direction de l'axe mineur de l'ellipse.

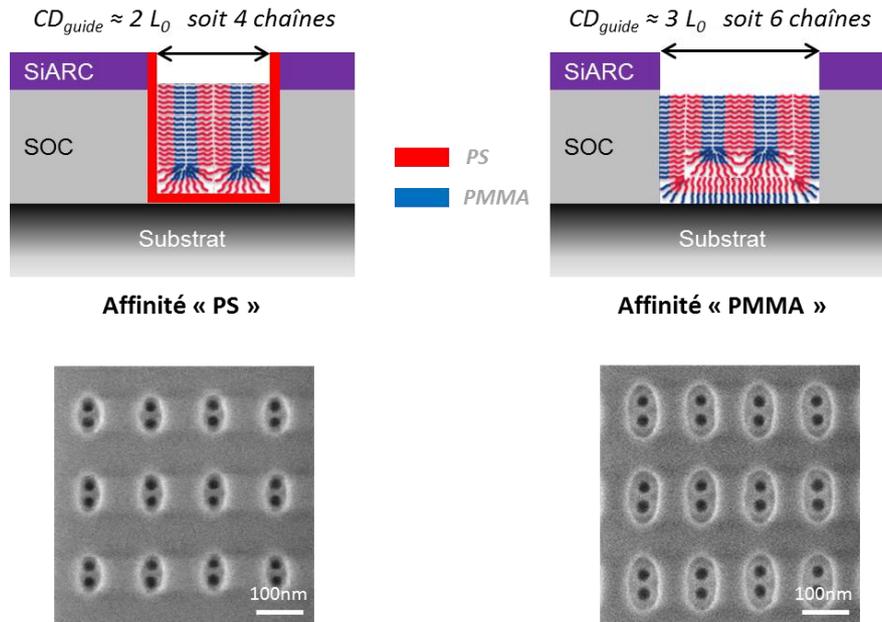


Figure IV-5 : Représentations schématiques de l'organisation des chaînes de copolymères dans les cavités de guidage pour deux procédés dans le cas du dédoublement de contacts ainsi que les images CD-SEM associées par un copolymère C35 (en rouge : les blocs PS, en bleu : les blocs PMMA).

La fenêtre de procédé « PMMA-affine » ( $\Delta$  majeur  $\sim 7$  nm) est plus étroite que celle du « PS-affine » ( $\Delta$  majeur  $\sim 15$  nm). En effet, pour le procédé d'affinité PS, les blocs PS du copolymère sont maintenus proches des parois grâce à l'hPS<sub>g</sub> greffé au préalable. Nous pouvons même supposer qu'il y a interpénétration des chaînes de PS (celles venant du copolymère à blocs et celles de l'hPS<sub>g</sub> greffé), ce qui confère de la rigidité au système. Dans le cas du procédé « PMMA-affine », une couche de blocs PMMA mouille les parois de la cavité. Les chaînes formant le motif « flottent » au centre, ayant ainsi plus de degré de liberté et formant donc potentiellement plus de défauts.

La qualité de l'assemblage est légèrement meilleure avec l'approche « PMMA-affine » qu'avec celle « PS-affine » comme l'atteste le HOY maximal des deux procédés. Ceci ne semble pas être lié à la qualité des motifs de guidage. En effet, une étude de la CDU<sub>guide</sub> nous montre que la variation de la taille des ellipses calculée sur chaque point de mesure n'est pas significativement différente entre les deux procédés : le DSA permet dans les deux cas d'absorber la CDU<sub>guide</sub> qui est autour de 10 %, ce qui est standard pour une lithographie 193i (cf. figure IV-6).

Avec les conditions de préparation de surface et de recuit du polymère ainsi testées, le procédé « PS-affine » ne permet pas d'atteindre un HOY de 100%, c'est pourquoi nous avons réalisé une étude d'optimisation du recuit thermique d'auto-assemblage de manière similaire à celle faite sur le « shrink de contact ». Le choix de l'approche à optimiser s'est fait selon plusieurs critères. L'un concerne les résultats obtenus sur « shrink de contact », bien meilleurs pour le procédé « PS-affine » que pour le procédé « PMMA-affine », ce qui en fait notre procédé de référence. De plus, l'optimisation sur le même procédé que celui de l'étude faite en « shrink de contact » nous permet de comparer de manière plus juste l'influence du temps et de la température de recuit d'auto-

assemblage sur la défektivité pour le « shrink » et le dédoublement de contacts. Enfin, l'étude en temps et température pour le dédoublement de contacts a été faite en parallèle à celle sur le « shrink de contact » sur les mêmes plaques, c'est pourquoi nous avons fait l'optimisation du recuit thermique avec l'approche « PS-affine » bien que le procédé « PMMA-affine » donne un meilleur HOY pour le dédoublement de contacts.

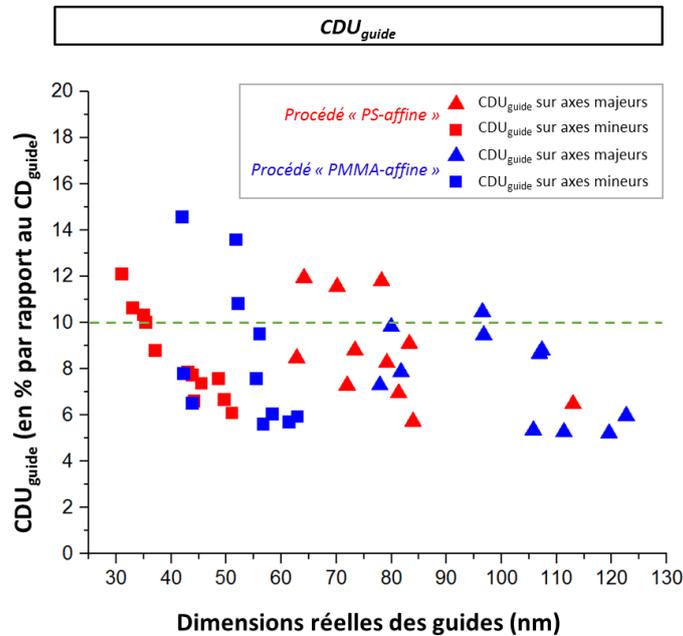


Figure IV-6 : Uniformité de CD des guides utilisés pour le C35 en fonction des dimensions des ellipses (axes majeurs (▲) et mineurs (■)) pour le procédé « PS-affine » (en rouge) et « PMMA-affine » (en bleu).

### IV3.2 Optimisation du recuit d'auto-assemblage

Dans la configuration du dédoublement de contacts, les chaînes de copolymères à blocs dans la cavité sont plus nombreuses que pour le « shrink de contact ». L'énergie nécessaire à l'auto-assemblage est donc potentiellement plus importante. Pour vérifier cela, nous avons mené la même étude que sur le « shrink de contact » avec le procédé « PS-affine » et le copolymère C35, mais cette fois sur le dédoublement de contacts avec les guides elliptiques. Parmi les champs à CD variables explorés pour la détermination de la fenêtre de procédé « PS-affine », celui donnant l'un des meilleurs HOY est observé sur différentes plaques ayant subi chacune un recuit d'auto-assemblage différent. Ainsi, nous avons analysé 5 plaques dont le recuit a été fixé à 250 °C mais dont le temps de recuit varie (2, 5, 10, 30 et 60 min). Nous avons complété ce set de plaques par 8 plaques supplémentaires (+ la plaque de référence : 10 min à 250 °C) pour l'étude à temps fixé (10 min) mais à température variable (150, 170, 190, 210, 230, 250, 270, 280 et 290 °C). Sur chaque plaque, le champ en question est observé sur toutes les puces afin d'obtenir le plus grand nombre possible de contacts mesurés (environ 1800 contacts DSA).

Telle que présentée dans le chapitre précédent, l'optimisation du budget thermique pour le « shrink de contact » nous a conduit à changer le procédé de référence pour adopter un recuit du copolymère à blocs C35 de 2 min à 250°C au lieu de 10 min à 250 °C. L'étude sur le dédoublément de contacts s'étant faite en parallèle sur les mêmes plaques de silicium, le procédé de référence initial a été également fixé à 10 min à 250 °C pour l'étude. Dans la figure suivante, nous avons choisi de présenter à la fois les résultats pour le « shrink » et le dédoublément de contacts afin de réaliser un comparatif (cf. figure IV-7).

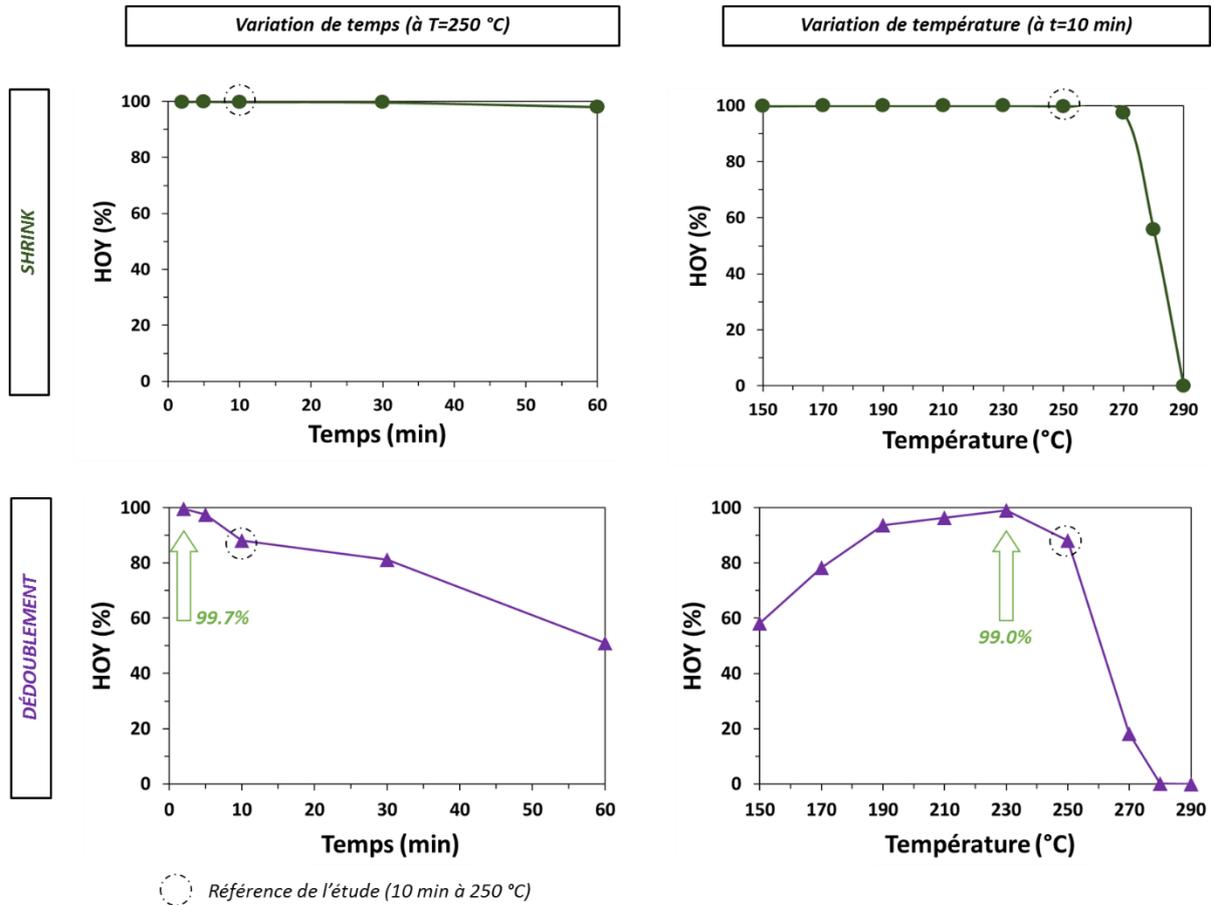


Figure IV-7 : Variation du taux d'ouverture de trous (HOY) pour un copolymère C35 en fonction (à gauche) du temps à une température de 250 °C et (à droite) de la température à un temps de recuit de 10 min avec le procédé « PS-affine » pour le « shrink » (en haut) et le dédoublément de contacts (en bas).

Ainsi, pour le dédoublément de contacts, nous pouvons remarquer que l'évolution du HOY en fonction du temps n'est pas la même qu'en fonction de la température. Dans le cas de l'étude à température fixe (250 °C), un recuit prolongé en temps dégrade rapidement les performances DSA. Toutes les images CD-SEM prises sur la plaque ayant subi un recuit de 30 min présentent au moins un défaut. Après une heure de recuit, le polymère est dégradé dans les cavités (cf. figure IV-8). En

revanche, un **recuit rapide de 2 min** (à 250 °C) permet de passer d'un HOY de 88.1 % (10 min) à 99.7 %, soit une **augmentation du HOY de plus de 11 %** par rapport à notre référence.

La variation du HOY en fonction de la température suit une courbe en cloche. Au-delà de 250 °C, le polymère est fortement dégradé dans les cavités. A 290 °C, il ne reste plus de polymère dans les guides. Cependant, quand le système PS-*b*-PMMA ne reçoit pas assez d'énergies (en dessous de 190 °C), l'auto-assemblage ne se fait pas complètement, ce qui donne naissance à des trous voilés (cf. figure IV-9). Pour un recuit de 10 min, un **optimum se trouve autour de 230 °C** ce qui, par rapport au recuit de référence de 250 °C, permet là encore d'**améliorer le HOY d'environ 11 %**.

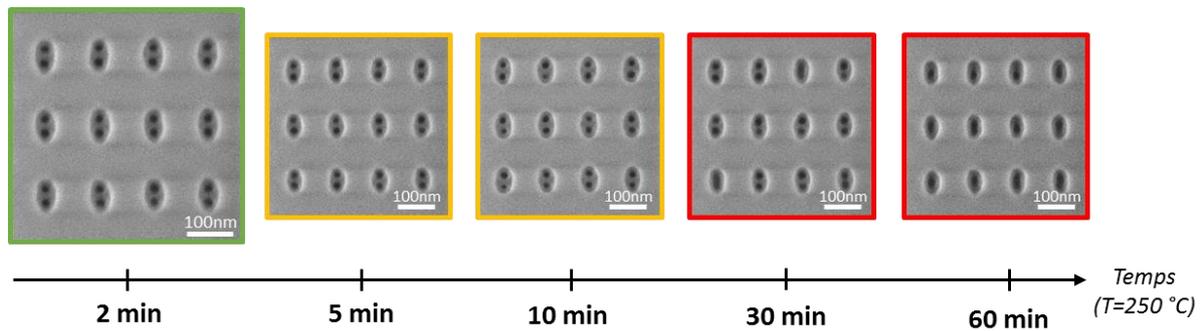


Figure IV-8 : Images CD-SEM d'un même champ à CD variables observé sur des plaques de silicium ayant subi différents temps de recuit à une température de 250 °C.

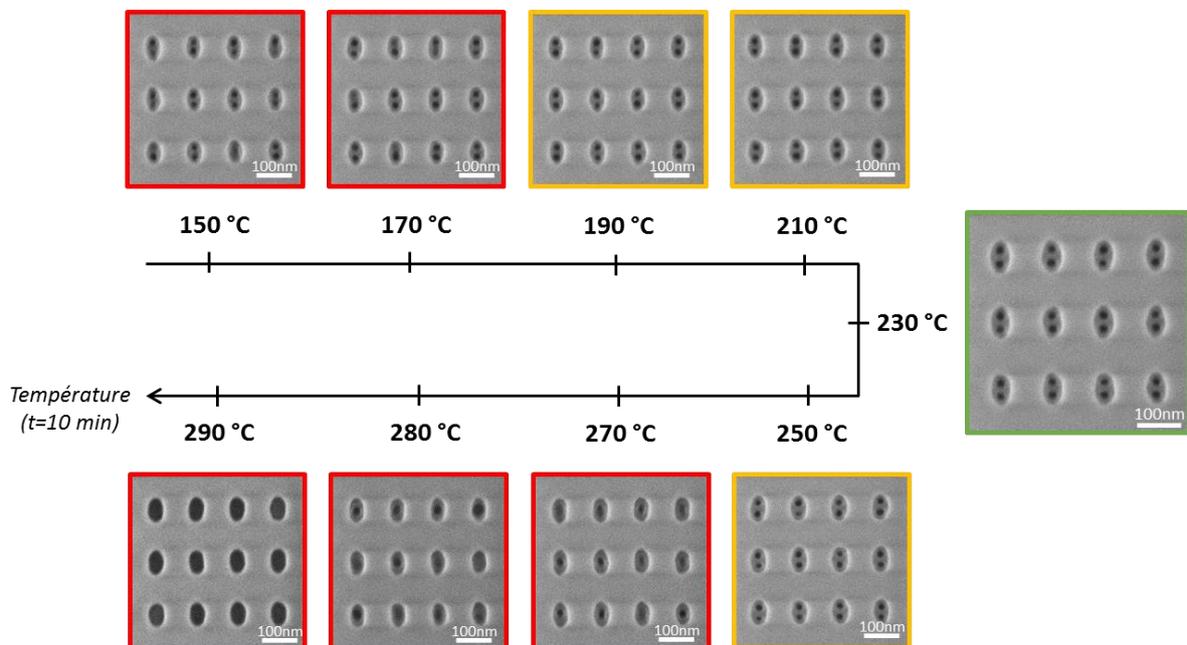


Figure IV-9 : Images CD-SEM d'un même champ à CD variables observé sur des plaques de silicium ayant subi différentes températures de recuit pendant 10 min.

La variation de la défektivité en fonction du temps et de la température n'est pas la même pour le « shrink » et pour le dédoublement de contacts. La dégradation des performances avec le temps est plus rapide et plus significative avec le dédoublement de contacts. Ce phénomène peut être imputé au degré de mobilité plus grand dans les ellipses que dans les trous simples, ce qui rend le polymère plus sensible aux variations de procédés pour le cas du dédoublement de contacts. En effet, si nous considérons le rapport du périmètre sur l'aire pour un guide circulaire et un guide elliptique (pris chacun au centre de la fenêtre de procédé), nous remarquons qu'il est plus grand dans le cas du « shrink de contact » ( $0.1 \text{ nm}^{-1}$  pour un  $\text{CD}_{\text{guide}}=40 \text{ nm}$ ) que dans le cas du dédoublement de contacts ( $0.073 \text{ nm}^{-1}$  pour un  $\text{CD}_{\text{guide}}=[79.2 \text{ nm} ; 43.7 \text{ nm}]$ ). Cela veut dire que l'impact des parois est plus important pour le « shrink » que pour le dédoublement de contacts : les chaînes sont plus confinées dans les contacts circulaires que dans les ellipses.

De plus, la variation de HOY en fonction de la température pour le « shrink de contact » est en forme de plateau, ce qui assure une grande fenêtre de procédé en termes de recuit d'auto-assemblage, contrairement au dédoublement qui suit une forme de cloche montrant une sensibilité plus importante à la variation de température du recuit. La cinétique d'assemblage n'est donc pas la même entre ces deux configurations.

En perspective de cette étude, il serait intéressant de mettre en place un plan d'expérience croisant à la fois différents temps et différentes températures de recuit d'auto-assemblage afin de trouver les paramètres procédés permettant d'obtenir le meilleur HOY possible.

## **IV.4 Dédoublement de contacts dans des guides elliptiques avec un copolymère C43**

Le copolymère C35, bien qu'étant le plus mature, permet d'adresser des pitches autour de sa période intrinsèque (c'est-à-dire 35 nm) et ne permet donc pas d'atteindre les pitches requis pour le nœud technologique 10 nm (46, 64 et 80 nm). Le copolymère C43, plus approprié à cette application, est donc étudié plus en détails dans la partie suivante.

### **IV.4.1 Détermination des fenêtres de procédés**

De la même manière que l'étude menée sur le polymère C35, nous avons déterminé les fenêtres de procédés pour le polymère C43 avec les approches « PS-affine » et « PMMA-affine ». Le HOY en fonction de l'axe majeur et de l'axe mineur sont reportés, pour les deux affinités, dans la figure suivante (cf. figure IV-10).

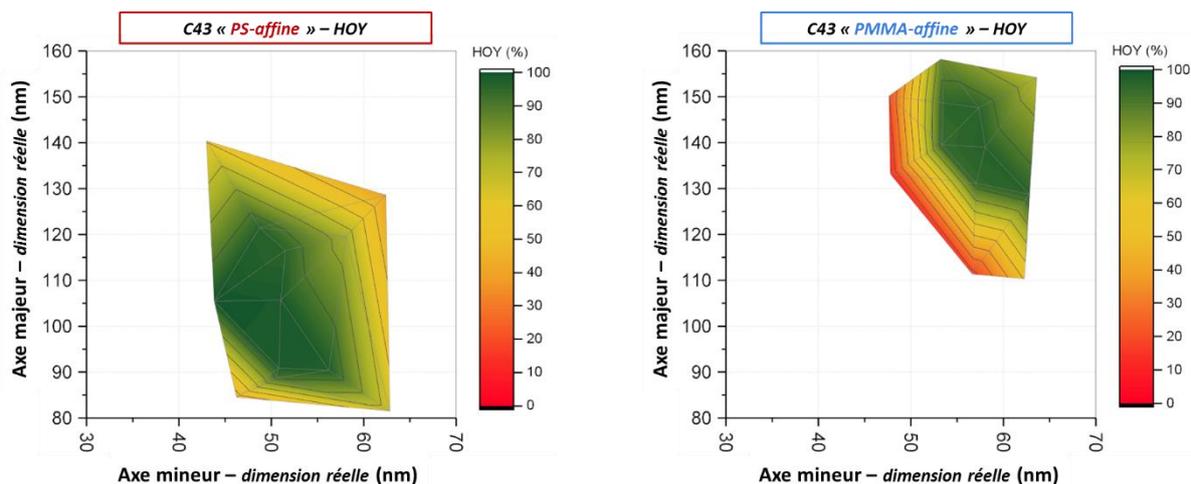


Figure IV-10 : Graphique représentant le taux d'ouverture de trous (HOY) en fonction des dimensions réelles du guide pour les procédés « PS-affine » (à gauche) et « PMMA-affine » (à droite) avec un copolymère C43.

La fenêtre de procédés pour l'approche « PS-affine » est décalée par rapport à celle de l'approche « PMMA-affine ». Expérimentalement, les meilleurs HOY sont obtenus pour les guides suivants (cf. tableau IV-2).

<i>C43</i>	CD <sub>guide_majeur</sub> (nm)	Δ majeur (nm)	CD <sub>guide_mineur</sub> (nm)	Δ mineur (nm)	HOY (%)
« PS-affine »	105.5	~35	43.8	~15 <sup>‡</sup>	99.8
« PMMA-affine »	139.0	~30	58.0	~10 <sup>‡</sup>	96.6

<sup>‡</sup> Les dimensions de guide permettant de mieux définir la fenêtre de procédé (guides plus larges et plus longs) ne sont pas disponibles sur les plaques.

Tableau IV-2 : Performances DSA en termes de HOY en fonction des dimensions des ellipses ainsi que les dimensions de la fenêtre de procédé (Δ majeur et Δ mineur) pour les approches « PS-affine » et « PMMA-affine » avec un copolymère C43.

Ce comportement est similaire à celui obtenu avec le copolymère C35. Le décalage des fenêtres de procédés entre « PS-affine » et « PMMA-affine » est dû à l'agencement des chaînes dans les cavités selon l'affinité des parois et du fond du guide. Cependant, le placement des centres de ces points de procédés s'éloigne de la tendance pressentie pour le C35, à savoir que le guide doit avoir une longueur de  $2 L_0$  ( $L_0=43$  nm) majorée de l'épaisseur de l'hPS<sub>g</sub> greffé (environ 5 nm de chaque côté) pour l'affinité PS et de  $3 L_0$  pour l'affinité PMMA. En théorie, nous nous attendons à ce que les milieux de fenêtres de procédés soient à peu près pour  $CD_{guide\_majeur}=96$  nm pour le procédé « PS-affine » et  $CD_{guide\_majeur}=129$  nm pour l'approche « PMMA-affine ». Expérimentalement, les meilleurs HOY sont obtenus pour une longueur de guide environ 10 nm plus grand. De plus, les

fenêtres de procédés du C35 sont nettement plus réduites que celles du C43 (les échelles des figure IV-4 et figure IV-10 sont les mêmes).

La fenêtre de procédé pour l'affinité PS est plus grande que celle pour l'affinité PMMA, mais là encore, ce n'est pas dû à une  $CDU_{\text{guide}}$  puisqu'elle est, en moyenne, autour de 6 % dans les deux cas (en dessous de la spécification de 10 %). Pour les meilleures performances HOY, la  $CDU_{\text{guide}}$  est même autour de 12 %, ce qui montre bien que le DSA permet d'absorber une partie de la non uniformité des motifs initiaux (cf. figure IV-11).

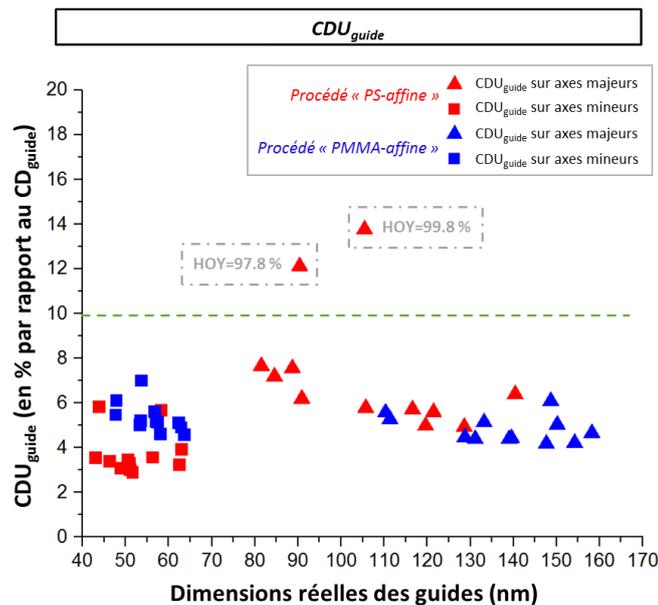


Figure IV-11 : Uniformité de CD de guides utilisés pour le C43 en fonction des dimensions des ellipses (axes majeurs (▲) et mineurs (■)) pour le procédé « PS-affine » (en rouge) et « PMMA-affine » (en bleu).

Enfin, nous reportons dans le tableau suivant une étude comparative des performances HOY au milieu des fenêtres de procédés pour les deux copolymères et les deux affinités (cf. tableau IV-3). Rappelons ici qu'en dehors de la préparation de surface qui est différente pour l'approche « PS-affine » (greffage d'un  $hPS_g$ ) et « PMMA-affine » (pas de modification), le procédé d'assemblage du copolymère à blocs est le même pour le C35 et pour le C43, pour cette étude (10 min à 250 °C). Le copolymère C43 permet d'obtenir des résultats d'HOY meilleurs que le C35 pour ce même recuit. Nous avons vu avec l'optimisation du recuit pour le C35 que nous obtenons un meilleur HOY avec un temps de recuit plus court. Contrairement au C35, le C43 ne présente que très peu de défauts avec un recuit de 10 min à 250 °C, ce qui laisse présager que le C43 a besoin de plus d'énergie pour s'assembler. Notons ici que la  $CDU$  des guides pour le C43 est au même niveau que celle des guides pour le C35 (environ 10 % pour les meilleurs HOY) (cf. figure IV-11). La relaxation de la contrainte lithographique sur les guides ne contribue pas de manière systématique à l'amélioration des performances DSA puisque les performances en termes de HOY

sont dégradées pour le C43 entre les procédés « PS-affine » et « PMMA-affine » alors que le  $CD_{guide}$  est relâché de près de 35 nm.

	C35			C43		
	$CD_{guide\_majeur}$ (nm)	$CD_{guide\_mineur}$ (nm)	HOY (%)	$CD_{guide\_majeur}$ (nm)	$CD_{guide\_mineur}$ (nm)	HOY (%)
« PS-affine »	79.2	43.7	89.2	105.5	43.8	99.8
« PMMA-affine »	107.3	52.1	95.5	139.0	58.0	96.6

Tableau IV-3 : Récapitulatif des meilleures performances en termes de HOY obtenues avec un copolymère C35 et C43 pour les approches « PS-affine » et « PMMA-affine », pour les mêmes conditions de recuit (10 min à 250 °C).

Pour les motifs qui se trouvent au centre de la fenêtre de procédé, nous avons calculé l'uniformité de CD des contacts DSA ( $CDU_{DSA}$ ) pour les deux procédés étudiés. Les résultats sont reportés dans la figure suivante sous la forme de cartographie 3D avec la  $CDU_{DSA}$  en code couleur de 0 nm (en vert) à 16 nm (en rouge) en fonction des axes mineur et majeur des guides (cf. figure IV-12).

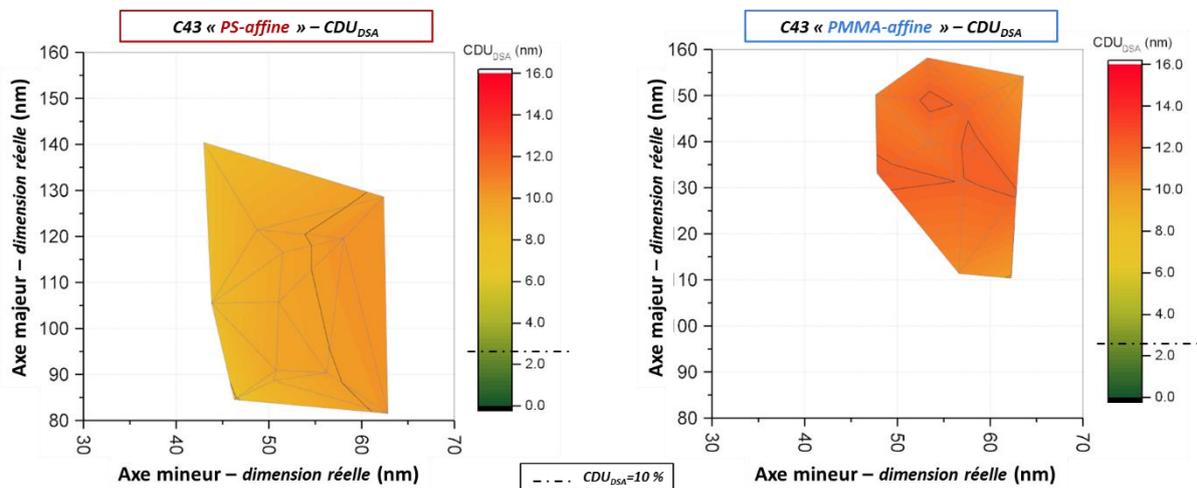


Figure IV-12 : Graphiques représentant l'uniformité de CD des contacts DSA ( $CDU_{DSA}$ ) en fonction des dimensions réelles du guide pour les procédés « PS-affine » (à gauche) et « PMMA-affine » (à droite) avec un copolymère C43. En pointillé sur l'échelle de couleur : les spécifications idéales ( $CDU_{DSA}=10\%$ ).

Pour les deux procédés, la  $CDU_{DSA}$  est hors spécification sur tous les champs à CD variables inspectés, elle ne dépend donc pas du taux de défauts mesuré (cf. figures IV-10 et IV-12). Le tableau

suivant résume les performances en termes de  $CDU_{DSA}$  pour le « shrink » et le dédoublément de contacts pour le copolymère C43 avec les deux approches « PS-affine » et « PMMA-affine » au centre des fenêtres de procédés (cf. tableau IV-4).

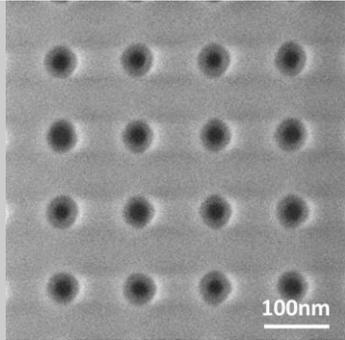
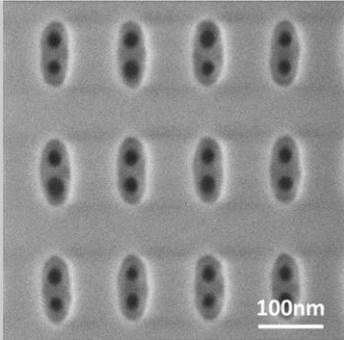
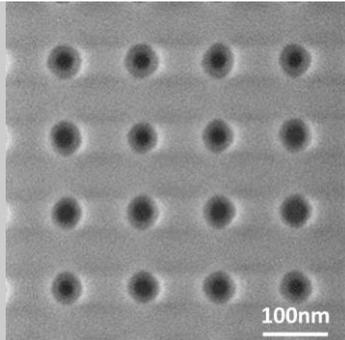
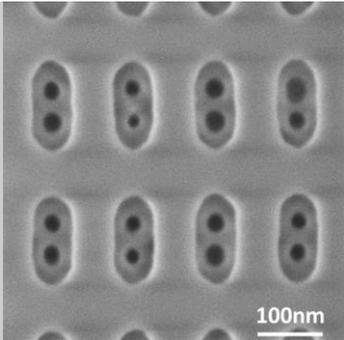
C43	« Shrink de contact »		Dédoublément de contacts	
	$CDU_{DSA}$ (nm)	$CDU_{DSA}$ (% du $CD_{DSA}$ )	$CDU_{DSA}$ (nm)	$CDU_{DSA}$ (% du $CD_{DSA}$ )
« PS-affine »	2.4	11.8	9.4	43.8
Images CD-SEM				
« PMMA-affine »	3.0	12.7	11.4	49.9
Images CD-SEM				

Tableau IV-4 : Récapitulatif des performances  $CDU_{DSA}$  obtenues au milieu des fenêtres de procédés avec un copolymère C43 pour les approches « PS-affine » et « PMMA-affine » pour des applications « shrink » et dédoublément de contacts ainsi que les images CD-SEM associées.

Pour le dédoublément de contacts avec le C43, la  $CDU_{DSA}$  est légèrement meilleure pour le procédé « PS-affine » que pour le « PMMA-affine » mais reste élevée dans les deux cas par rapport aux spécifications requises (10 % du  $CD_{DSA}$ ). De plus, les performances en termes de CDU pour le dédoublément de contacts sont moins bonnes que pour le « shrink de contact » avec le même procédé et le même polymère. Ainsi, pour le dédoublément de contacts, les performances CDU sont loin des spécifications requises par l'ITRS ( $CDU_{DSA}=10\%$ ) mais peuvent être améliorée en modifiant par exemple le polymère. *Chevalier et al.* ont développé une nouvelle génération de copolymères à blocs issus du mélange de copolymères purs ayant la période intrinsèque désirée. En comparant les performances (CDU, défektivité) de ces copolymères dits « blends » avec un copolymère pur de même période, il a été démontré que les « blends » ont de meilleures performances aux copolymères purs [Chevalier 2016]. Le procédé de planarisation, optimisé pour

le « shrink de contact » seulement, pourrait aussi jouer un rôle dans les mauvaises performances  $CDU_{DSA}$  observées. Les zones explorées pour l'étude du dédoublement de contact étant relativement petites, l'optimisation du temps de rétro-gravure n'a pas été conduite. Il serait cependant intéressant de le faire sur une nouvelle itération du masque Bodhi qui serait dimensionné à partir de l'étude des fenêtres de procédés présentée ici.

L'utilisation du C43 pour le dédoublement de contacts est motivée par la période intrinsèque du copolymère qui est proche des règles de dessins requis par le nœud technologique 10 nm. Rappelons ici que le désalignement entre les deux contacts DSA dans la direction de l'axe mineur est noté «  $pitch_{mineur}$  ». Puisque les ellipses sont verticales sur les images, et que le  $pitch_{mineur}$  est relativement faible, nous pouvons considérer que la projection de l'écart entre les deux contacts DSA dans la direction de l'axe mineur équivaut au pitch final des contacts DSA (cf. figure IV-13).

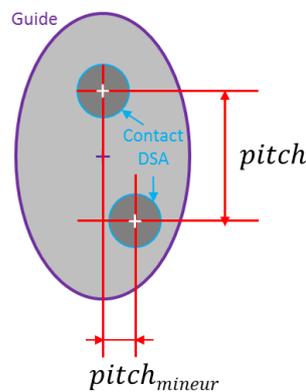


Figure IV-13 : Représentation schématique des  $pitch$  et  $pitch_{mineur}$ .

Nous avons donc mesuré le  $pitch$  final obtenus dans les guides elliptiques pour les champs à CD variables inspectés. La figure suivante représente le  $pitch$  en code couleur (échelle allant de  $pitch=35$  nm à 80 nm) en fonction des axes majeurs et mineurs des guides pour les procédés « PS-affine » et « PMMA-affine » (cf. figure IV-14). Pour le procédé « PMMA-affine », certains champs à CD variables présentent trop de défauts pour avoir une estimation du  $pitch$  (souvent un seul trou DSA par guide). C'est pourquoi la gamme d'ellipses étudiées pour le  $pitch$  est réduite par rapport à ce qui a été présenté à la figure IV-10.

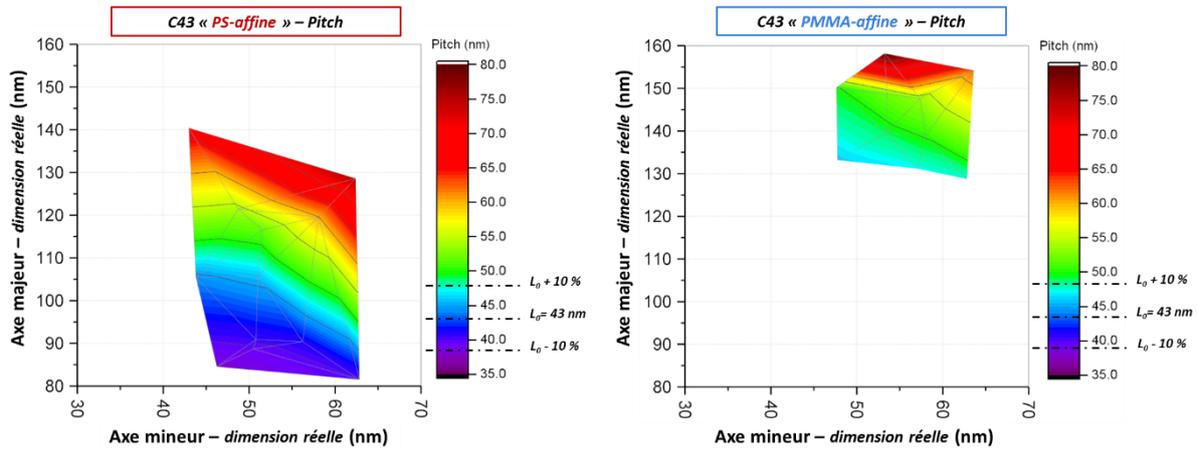


Figure IV-14 : Graphique représentant le pitch DSA en fonction des dimensions réelles du guide pour les procédés « PS-affine » (à gauche) et « PMMA-affine » (à droite) avec un copolymère C43. En pointillé sur l'échelle de couleur :  $L_0$  et  $L_0 \pm 10\%$ .

Pour le procédé « PS-affine », la gamme de pitches atteints est relativement grande (entre 40 et 55 nm) mais concentrée autour de la période intrinsèque du polymère (en bleu sur la figure). La variation importante de pitch au centre de fenêtre de procédé ( $3\sigma=5.1$  nm soit 11 % du pitch) peut être expliquée par une  $CD_{\text{guide}}$  élevée pour ce motif (14 % du  $CD_{\text{guide}}$ ) (cf. figure IV-11). Quand le guide s'agrandit, le HOY diminue et les deux contacts DSA sont très écartés, voire un troisième contact DSA se forme entre les deux déjà existants. Il en est de même pour le procédé « PMMA-affine » : les contacts ont tendance à fusionner lorsque le guide est trop long (cf. figure IV-15). La valeur du pitch associée au meilleur HOY pour le procédé « PMMA-affine » est de 50.3 nm, ce qui est supérieur à la période intrinsèque du copolymère.

Les performances en termes de pitch et de  $pitch_{\text{mineur}}$  au centre des fenêtres de procédés pour le « PS-affine » et le « PMMA-affine » sont résumées dans le tableau suivant (cf. tableau IV-5).

C43	Pitch (nm)	Pitch - $3\sigma$ (nm)	$pitch_{\text{mineur}}$ (nm)	$pitch_{\text{mineur}} - 3\sigma$ (nm)
« PS-affine »	44.5	5.1	1.0	2.2
« PMMA-affine »	50.3	6.1	1.3	2.6

Tableau IV-5 : Récapitulatif des performances en termes de pitch et  $pitch_{\text{mineur}}$  obtenues au milieu des fenêtres de procédés avec un copolymère C43 pour les approches « PS-affine » et « PMMA-affine ».

Il est à noter que, pour les champs à CD variables au centre de la fenêtre de procédé, les contacts DSA sont bien alignés entre eux ( $pitch_{\text{mineur}}$  faible), la contrainte sur les chaînes dans la direction de l'axe mineur du guide semble suffisante pour éviter des défauts de positionnement.

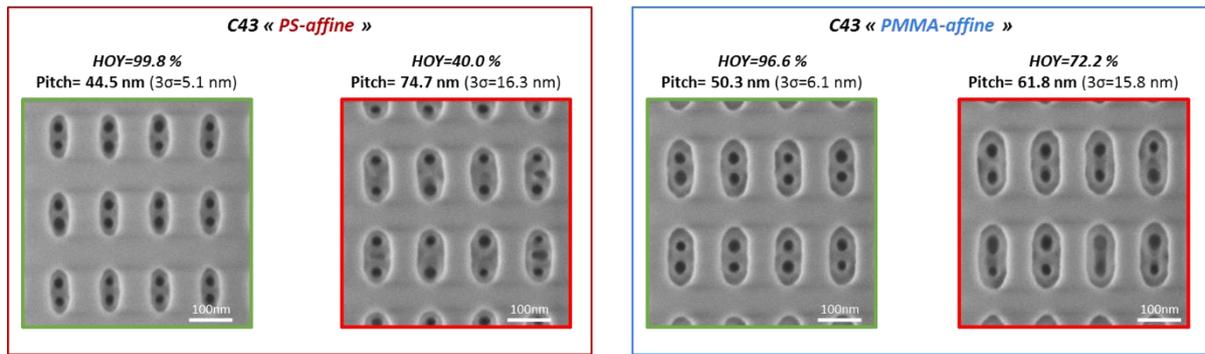


Figure IV-15 : Images CD-SEM prises pour différents champs à CD variables (meilleure performance HOY en vert, défectueux en rouge) pour les procédés « PS-affine » (à gauche) et « PMMA-affine » (à droite).

La valeur du pitch moyen pour le procédé « PMMA-affine » est intrigante puisqu'elle est supérieure à la période intrinsèque du copolymère à blocs (pitch=50.3 nm >  $L_0=43$  nm environ). Pour mieux comprendre ce phénomène, nous avons tracé les valeurs de pitches DSA moyens mesurés en fonction de l'axe majeur moyen des guides pour les procédés « PS-affine » et « PMMA-affine » et nous avons comparé ces résultats avec les simulations faites par Wuister *et al.* [Wuister 2014] (cf. figure IV-16). Ces dernières prennent en compte l'affinité PMMA des bords, ce qui correspond à notre approche « PMMA-affine ».

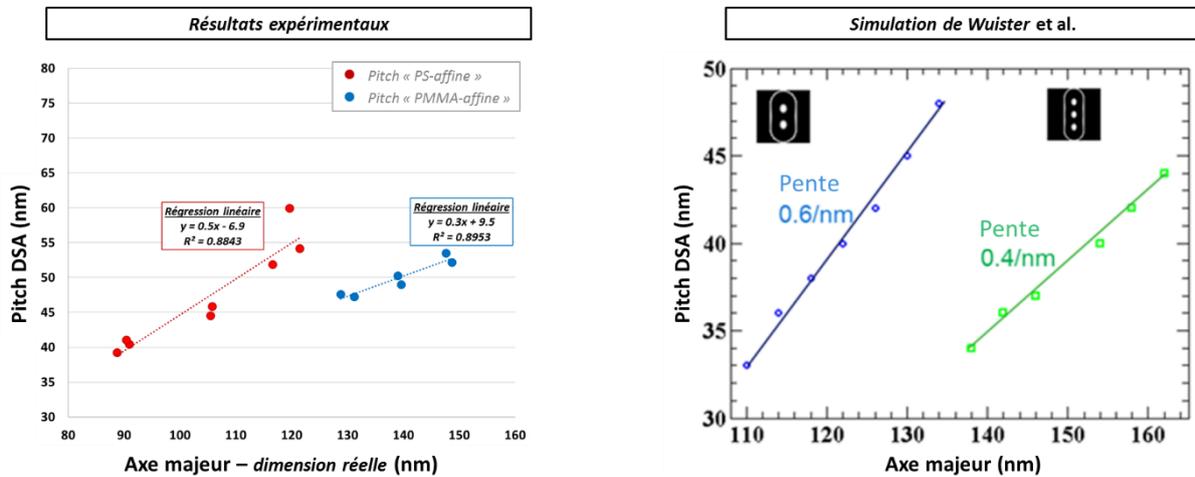


Figure IV-16 : Pitch DSA en fonction de l'axe majeur de l'ellipse : (à gauche) résultats expérimentaux pour le procédé « PS-affine » (en rouge) et « PMMA-affine » (en bleu), (à droite) résultats de la simulation pour un procédé « PMMA-affine » (d'après [Wuister 2014]).

Bien que les simulations prennent en compte seulement l'approche « PMMA-affine », nous remarquons des similitudes entre ces dernières et les résultats expérimentaux pour les approches « PS-affine » et « PMMA-affine » pour le dédoublement de contacts. La pente extraite des points

de mesures pour le procédé « PS-affine » est de 0.5, ce qui est proche de ce qui est obtenu en simulation pour le cas du dédoublement de contacts en « PMMA-affine » (0.6). N'ayant pas la pente issue de la simulation dans le cas du procédé « PS-affine », il est difficile de conclure sur une corrélation éventuelle entre la simulation et les points expérimentaux. De plus, bien que les pentes coïncident, la plage de valeurs d'axe majeur des guides est différente pour la simulation ( $CD_{\text{majeur}}^{\text{simu}}=110 - 135 \text{ nm}$ ) et pour les résultats expérimentaux ( $CD_{\text{majeur}}^{\text{exp}}=90 - 120 \text{ nm}$ ).

Pour le procédé « PMMA-affine », la plage de  $CD_{\text{majeur}}$  est décalée de 10 nm environ entre la simulation ( $CD_{\text{majeur}}^{\text{simu}}=140 - 160 \text{ nm}$ ) et les valeurs expérimentales ( $CD_{\text{majeur}}^{\text{exp}}=130 - 150 \text{ nm}$ ) ce qui peut s'expliquer par la topologie du guide. En effet, comme présenté dans le cas du « shrink de contact » (cf. figure III-14), le SiARC forme une sorte de « chapeau » qui rétrécit de manière artificielle la taille des guides mesurés par CD-SEM et ce d'environ 5 nm de chaque côté, ce qui correspond au décalage de 10 nm entre les valeurs expérimentales et la simulation. La pente de la régression linéaire faite sur les points expérimentaux du procédé « PMMA-affine » pour le dédoublement de contacts (0.3) coïncide davantage avec celle issue de la simulation pour un triplement de contacts DSA en « PMMA-affine » (0.4). Ainsi, pour cette approche, **l'écart entre le pitch mesuré et la période intrinsèque du C43 peut en théorie s'expliquer par la possible formation d'un troisième contact DSA en profondeur, non visible par images CD-SEM.**

Ces simulations ont par ailleurs été corrélées par l'auteur avec les résultats expérimentaux de Yi *et al.* qui, de ce fait, sont corrélés aux nôtres [Yi 2012] (cf. figure IV-17). Yi *et al.* ont, pour cette expérience, développé un procédé plutôt « PMMA-affine » (pas de modification de surface après ouverture des guides). Leurs points de mesures associés à 2 contacts visibles par images CD-SEM correspondent à ce que nous obtenons pour le « PS-affine ».

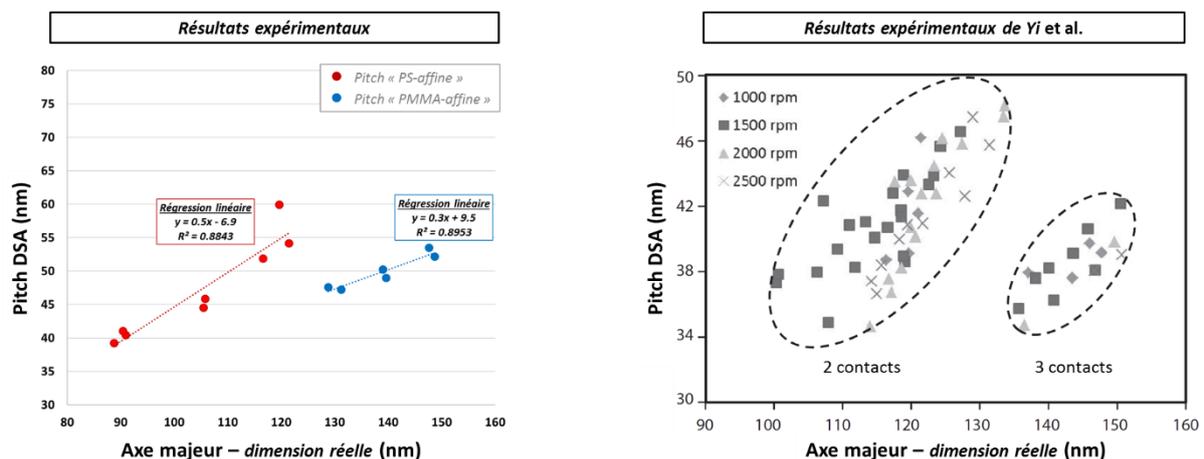


Figure IV-17 : Pitch DSA en fonction de l'axe majeur de l'ellipse : (à gauche) résultats expérimentaux pour le procédé « PS-affine » (en rouge) et « PMMA-affine » (en bleu), (à droite) résultats expérimentaux avec une approche « PMMA-affine » (d'après [Yi 2012]).

Nous avons également comparé nos résultats expérimentaux avec les simulations faites dans le cadre d'une thèse en cours au CEA Leti [Fouquet 2017]. Ses simulations sont basées sur le modèle d'Ohta-Kawasaki [Ohta 1986] et sont similaires à ce qu'ont fait Fukawatase *et al.* ou encore Muramatsu *et al.* [Fukawatase 2014][Muramatsu 2014]. Le graphique suivant compare les résultats expérimentaux et de simulation du pitch en fonction de l'axe majeur du guide (à axe mineur constant) (cf. figure IV-18).

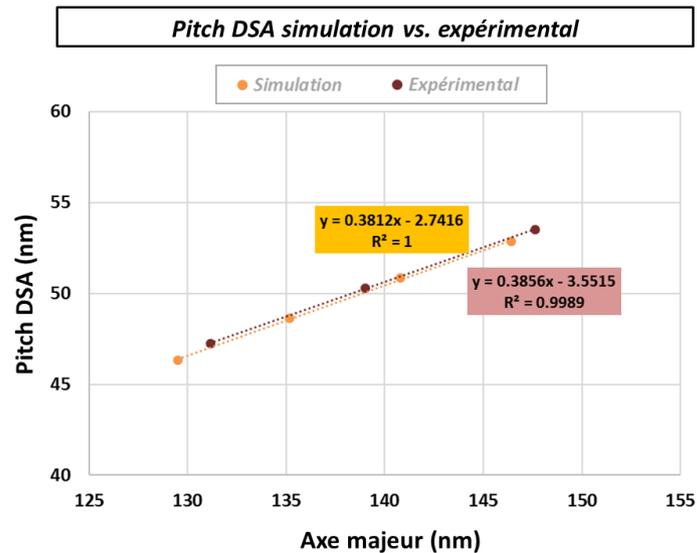


Figure IV-18 : Pitch DSA en fonction de l'axe majeur de l'ellipse (axe mineur constant) : valeurs expérimentales et simulations.

Les simulations concordent avec nos mesures : les pentes issues des données expérimentales (0.38) et de simulation (0.39) sont quasi-identiques. Le modèle d'Ohta-Kawasaki comme implémenté ici semble être fiable. Nous décidons donc de complexifier la simulation pour mieux comprendre l'assemblage du copolymère à blocs à l'intérieur de la cavité de guidage. Un modèle 3D est implémenté sur ce même principe et donne les résultats ci-dessous (cf. figure IV-19).

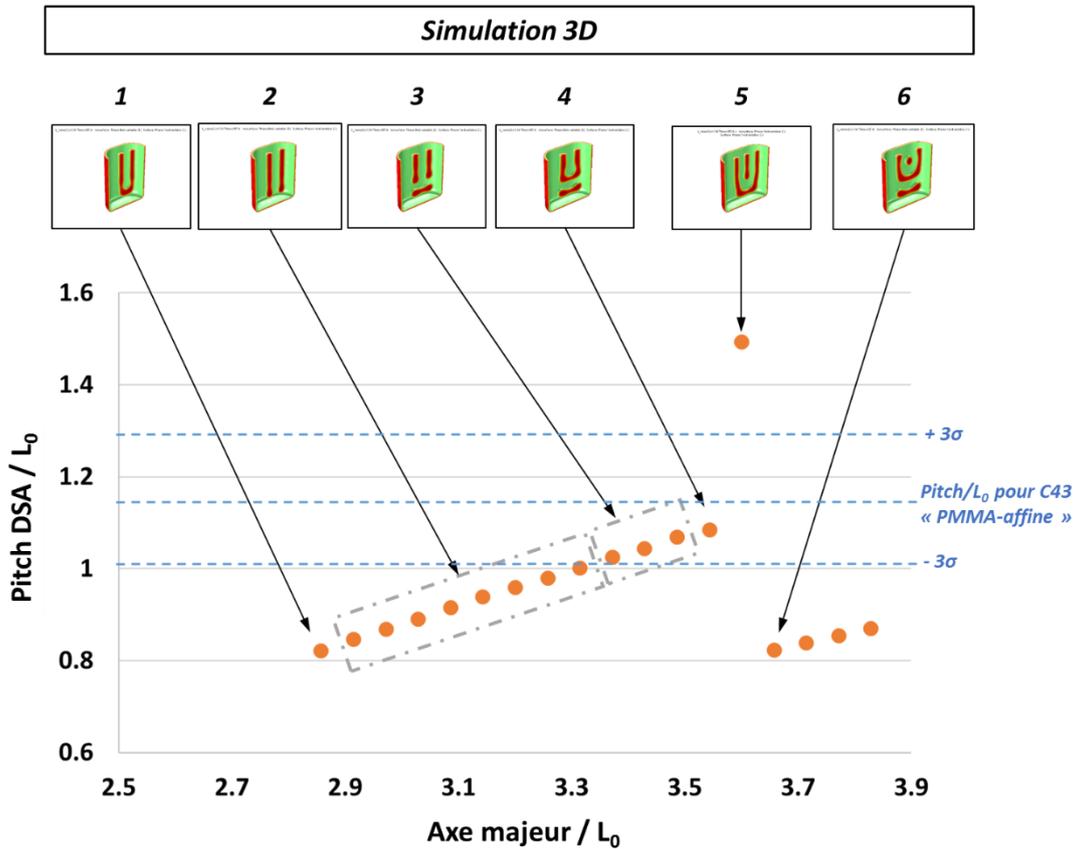


Figure IV-19 : Pitch DSA normé par  $L_0$  du copolymère C43 (43 nm) en fonction de l'axe majeur des guides normé par  $L_0=43$  nm pour le procédé « PMMA-affine ». En image : les morphologies obtenues à l'équilibre, (en rouge : le domaine de PMMA, en vert : le domaine de PS).

La morphologie finale de l'assemblage est dépendante de la longueur du guide. Toutes ces morphologies d'assemblage ne permettent pas le transfert des motifs DSA dans les couches sous-jacentes : seule la deuxième structure 3D est viable car les domaines de PMMA sont bien perpendiculaires au substrat. La morphologie n°2 est atteinte pour des ratios axe majeur/ $L_0$  entre environ 2.9 et 3.3, soit une variation de +/- 6 % autour du ratio moyen de 3.1. Sachant que la  $CDU_{\text{guide}}$  est autour de 10 % (>6 %), il est fort probable que dans tous les cas, plusieurs configurations d'assemblage coexistent sur le même champ mesuré sur plusieurs puces de la plaque et donc qu'il existe des contacts défectueux car des guides seront trop grands ou trop petits.

Nous avons reporté les valeurs expérimentales obtenues avec le copolymère C43 avec l'approche « PMMA-affine » sur le graphique précédent (en bleu sur la figure IV-19). Nous remarquons que les configurations 3D correspondantes sont les n°3 et n°4, cette dernière étant celle concordant avec le pitch moyen obtenu sur toute la plaque. Pour confirmer les résultats de la simulation, nous avons réalisé des images SEM vue de dessus et en section transverse (cf. figure IV-20).

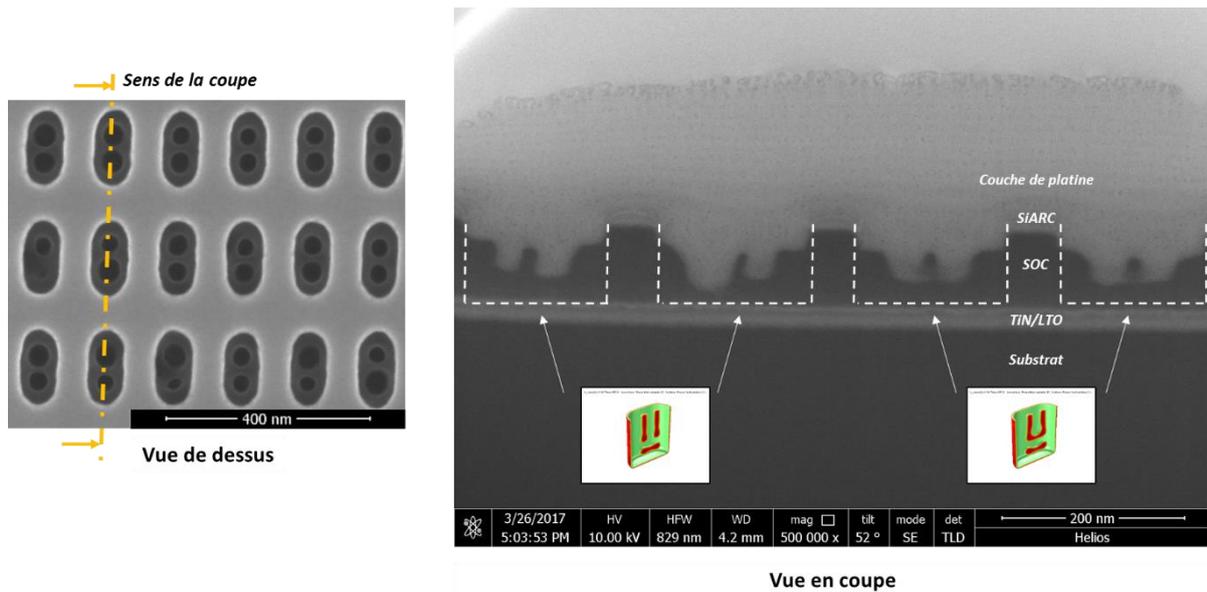


Figure IV-20 : Images CD-SEM vue de dessus (à gauche) et transverse (FIB) (à droite) de guides elliptiques (C43 avec le procédé « PMMA-affine »).

L'image CD-SEM vue de dessus atteste de la bonne organisation des contacts avec quelques défauts ponctuels. Après une sélection soignée des motifs ayant les plus belles organisations au centre de la fenêtre de procédés, une coupe FIB a été réalisée afin d'avoir accès à l'organisation du copolymère en profondeur. Elle est faite après planarisation donc après retrait du PMMA. Un dépôt de platine sur les motifs est réalisé afin d'augmenter le contraste entre le copolymère restant dans la cavité et les contacts DSA vidés de polymères.

Les deux doublets de gauche semblent déboucher sur une couche de polymère. Le contraste chimique entre les blocs PS et PMMA est faible, c'est pourquoi il est difficile d'affirmer qu'un domaine de PMMA est formé en profondeur. La configuration de ces deux contacts peut s'apparenter à la troisième morphologie présentée sur la [figure IV-18](#). Les deux contacts de droite présentent une particularité intéressante. Grâce au dépôt de platine (en gris clair sur l'image), nous pouvons deviner qu'un pont s'est formé en profondeur entre les deux contacts DSA (anciennement bloc PMMA). Cette configuration, a priori viable en vue de dessus, n'est pas transférable et donc doit être considérée comme défectueuse.

Notons ici que l'épaisseur de polymère résiduel en fond de cavité est d'environ 33 nm, soit de l'ordre de la période intrinsèque du copolymère. Il est donc possible que le domaine de PMMA qui apparaît parallèle au substrat sur la simulation ne soit pas présent réellement dans les cavités de guide. Le contraste chimique entre les domaines de PS et de PMMA étant très faible, il n'est pas possible de confirmer cette hypothèse. Néanmoins, cela ne permet pas de contourner le problème de formation de ponts entre les deux contacts DSA.

## IV4.2 Stratégie de relaxation de la contrainte de lithographie sur le guide

Le procédé « PMMA-affine » présente l'avantage de relâcher la contrainte sur la lithographie 193i puisqu'il nécessite des guides plus grands pour l'auto-assemblage des copolymères à blocs. Cependant, nous avons vu qu'il implique un état d'équilibre pour le copolymère à blocs dont la configuration n'est pas exploitable pour la gravure. Ce n'est pas le cas du procédé « PS-affine » qui, en revanche, nécessite des guides plus petits et permet d'avoir accès à des configurations plus intéressantes pour la gravure. Nous avons donc décidé de mener une étude complémentaire sur le procédé « PS-affine » en changeant d'hPS<sub>g</sub> greffé lors de la préparation de surface afin de relâcher les dimensions des guides nécessaires à l'auto-assemblage du copolymère à blocs.

Dans notre procédé « PS-affine » de référence, l'hPS<sub>g</sub> greffable utilisé pour la préparation de surface a une masse molaire  $M_{w1}=12 \text{ kg.mol}^{-1}$ , ce qui permet de greffer une épaisseur de 5 nm environ. Afin d'utiliser des guides plus grands, nous avons développé une variante du procédé de référence (appelé « PS-affine modifié » par la suite) qui utilise un hPS<sub>g</sub> greffable de masse molaire plus grande ( $M_{w2}=50 \text{ kg.mol}^{-1}$ ), ce qui conduit à une épaisseur greffée d'environ 10 nm. Sur le même modèle que les études précédentes, nous avons déterminé la nouvelle fenêtre de procédé pour cette approche « PS-affine modifié » et l'avons comparée au procédé de référence.

La figure suivante représente le taux d'ouvertures des contacts DSA en fonction des dimensions des guides pour les procédés « PS-affine » et « PS-affine modifié » (cf. figure IV-21).

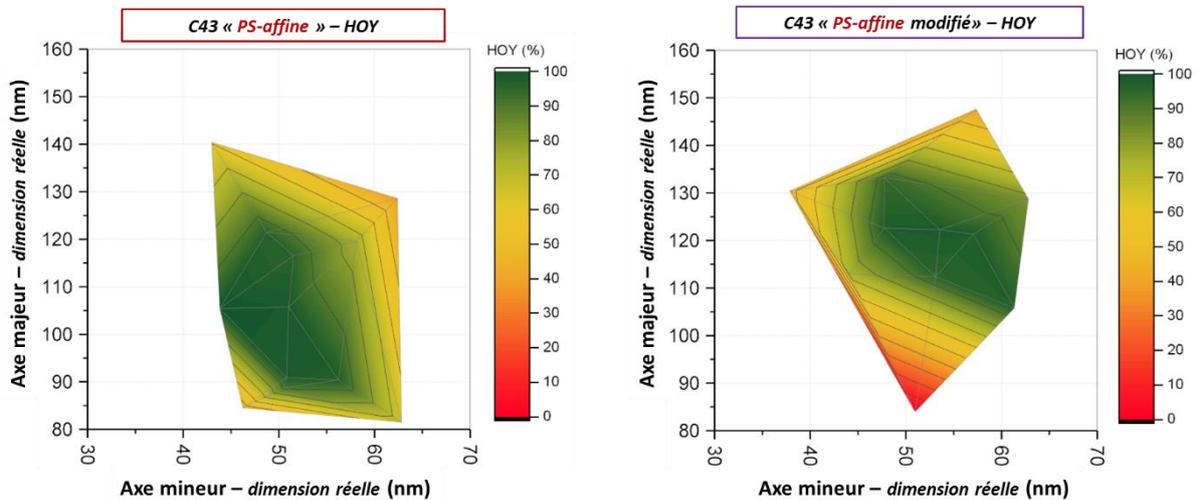


Figure IV-21 : Graphiques représentant le taux d'ouverture de trous (HOY) en fonction des dimensions réelles du guide pour les procédés « PS-affine » (à gauche) et « PS-affine modifié » (à droite) avec un copolymère C43.

Nous observons un décalage de la fenêtre de procédé d'environ 10 nm dans la direction de la largeur entre le « PS-affine » et le « PS-affine modifié ». Cependant, le décalage est d'environ 17 nm dans le sens de l'axe majeur du guide. La contrainte dans le sens de la longueur et de la largeur du guide est donc relâchée et se rapproche de celle du procédé « PMMA-affine ».

Nous avons également étudié la variation du pitch en fonction des dimensions des guides. Les graphiques suivants représentent le pitch (en échelle de couleur) en fonction des axes majeurs et mineurs des guides pour les trois procédés étudiés (cf. figure IV-22). Pour les procédés « PMMA-affine » et « PS-affine modifié », certains champs à CD variables présentent trop de défauts pour avoir une estimation du pitch (souvent un seul trou DSA par guide), c'est pourquoi la gamme d'ellipses étudiées pour le pitch est réduite.

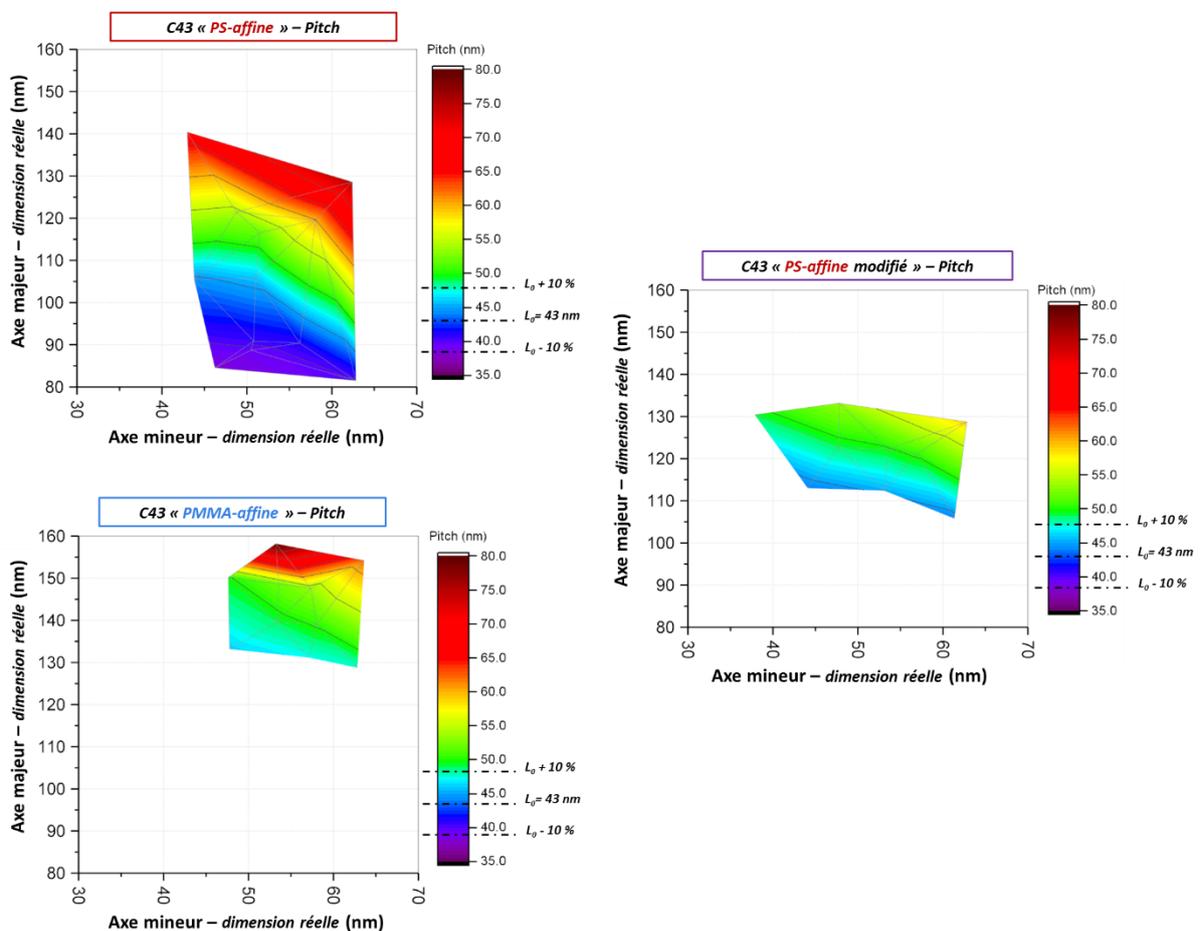
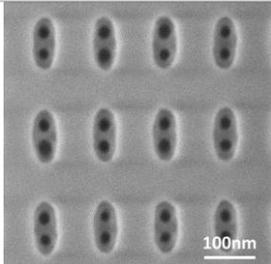
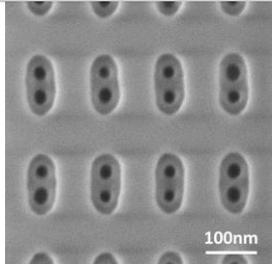
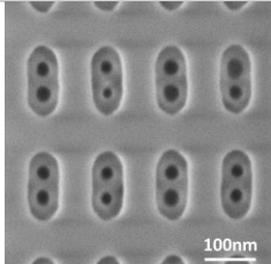


Figure IV-22 : Graphiques représentant le pitch DSA en fonction des dimensions réelles du guide pour les procédés « PS-affine » (en haut à gauche), « PMMA-affine » (en bas à gauche) et « PS-affine modifié » (à droite) avec un copolymère C43. En pointillé sur l'échelle de couleur :  $L_0$  et  $L_0 \pm 10\%$ .

Le pitch moyen au centre des fenêtres de procédé n'est pas le même pour les trois procédés. En effet, le pitch obtenu avec le procédé « PS-affine » est proche de la période intrinsèque du polymère

( $\text{pitch}_{\text{PS-affine}}=44.5 \text{ nm} / L_0=43 \text{ nm}$ ). En revanche, le procédé « PS-affine modifié » induit un pitch proche de celui observé sur « PMMA-affine » ( $\text{pitch}_{\text{PS-affine\_modifié}}=49.8 \text{ nm}$  contre  $\text{pitch}_{\text{PMMA-affine}}=50.3 \text{ nm}$ ).

Les performances en termes de HOY, de pitch et de  $\text{pitch}_{\text{mineur}}$  au centre des fenêtres de procédés pour le « PS-affine », « PS-affine modifié » et le « PMMA-affine », ainsi que les largeurs des fenêtres de procédé ( $\Delta$  majeur et  $\Delta$  mineur) sont résumées dans le tableau suivant (cf. tableau IV-6).

<i>C43</i>	« PS-affine »	« PS-affine modifié »	« PMMA-affine »
<b><math>\Delta</math> majeur (nm)</b>	~35	~25	~30
<b><math>\Delta</math> mineur (nm)</b>	~15 <sup>‡</sup>	~15 <sup>‡</sup>	~10 <sup>‡</sup>
<b>CD<sub>guide_majeur</sub> (nm)</b>	105.5	122.3	139.0
<b>CD<sub>guide_mineur</sub> (nm)</b>	43.8	53.5	58.0
<b>HOY (%)</b>	99.8	98.5	96.6
<b>Pitch (nm)</b>	44.5	49.8	50.3
<b>Pitch – 3<math>\sigma</math> (nm)</b>	5.1	6.4	6.1
<b>Pitch<sub>mineur</sub> (nm)</b>	1.0	1.3	1.3
<b>Pitch<sub>mineur</sub> – 3<math>\sigma</math> (nm)</b>	2.2	2.7	2.6
<b>Images CD-SEM</b>			

<sup>‡</sup> Les dimensions de guide permettant de mieux définir la fenêtre de procédé (guides plus larges et plus longs) ne sont pas disponibles sur les plaques.

**Tableau IV-6 : Récapitulatif des performances en termes de HOY, de pitch et  $\text{pitch}_{\text{mineur}}$  obtenues au milieu des fenêtres de procédés avec un copolymère C43 pour les approches « PS-affine » et « PMMA-affine », ainsi que les images CD-SEM associées.**

Il est à noter que, pour les champs à CD variables au centre de la fenêtre de procédé, les contacts DSA sont bien alignés entre eux ( $\text{pitch}_{\text{mineur}}$  faible), la contrainte sur les chaînes dans la direction de l'axe mineur du guide semble suffisante pour éviter des défauts de positionnement. La gamme de pitch dans la fenêtre de procédé du « PS-affine modifié » se rapproche davantage de ce qui est obtenu avec le « PMMA-affine ».

Le graphique suivant représente le pitch en fonction de la dimension de l'axe majeur des motifs de guidages (cf. figure IV-23).

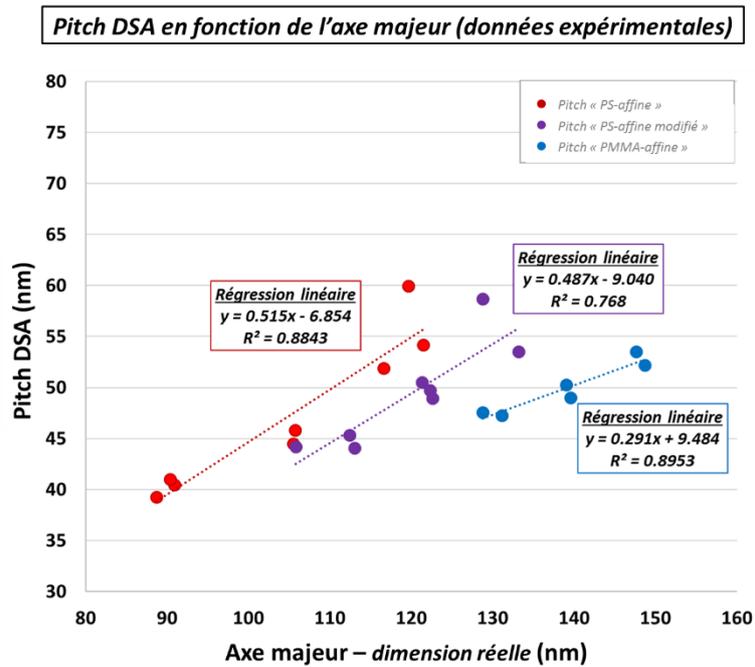


Figure IV-23 : Pitch DSA en fonction de l'axe majeur de l'ellipse : résultats expérimentaux pour le procédé « PS-affine » (en rouge), « PS-affine modifié » (en violet) et « PMMA-affine » (en bleu).

Nous remarquons que la pente issue de la régression linéaire sur les points expérimentaux du procédé « PS-affine modifié » se situe entre celle du « PS-affine » et celle du « PMMA-affine ». Le comportement des chaînes de copolymères dans les cavités de type « PS-affine modifié » est donc à mi-chemin entre celui observé dans les guides type « PS-affine » et « PMMA-affine ». Dans le cas de l'approche « PS-affine », les chaînes de copolymères sont rigidifiées par la présence de l'homopolymère greffé car les blocs PS s'entremêlent avec les chaînes d'hPS<sub>g</sub> sur les bords des guides. Pour le procédé « PMMA-affine », les blocs PMMA du copolymère forment une couche de démouillage sur les parois du guide, ce qui laisse un certain degré de mobilité aux chaînes formant les contacts DSA. Le fait de greffer un hPS<sub>g</sub> de masse molaire plus grand dans le procédé « PS-affine modifié » reproduit possiblement cette couche de démouillage. Composée de chaînes d'hPS plus longue, la couche greffée sur les parois du guide ne permet pas un entremêlement des blocs PS du copolymère dans la couche aussi fort qu'avec un hPS<sub>g</sub> plus petit, ce qui diminue la rigidité des chaînes par rapport au procédé « PS-affine » classique.

Nous avons voulu vérifier cette hypothèse en étudiant la distance guide – DSA : il s'agit de la distance entre le bord du guide et le centre du contact DSA dans la direction longitudinale de l'ellipse (cf. figure IV-24).

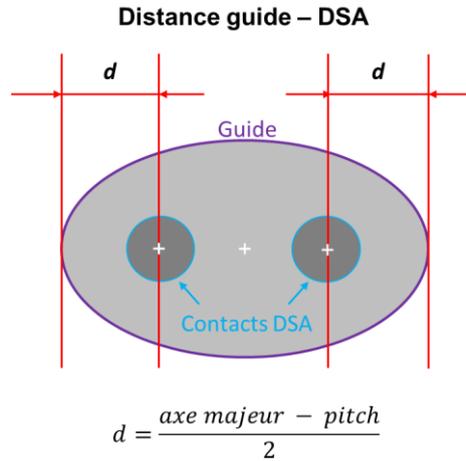


Figure IV-24 : Représentation schématique de la distance guide – DSA.

Cette valeur est calculée en prenant, pour chaque champ à CD variables, la moyenne de l'axe majeur du guide minoré du pitch et divisée par deux car cette distance se retrouve deux fois le long de l'axe majeur. Nous supposons pour cela que les contacts DSA sont idéalement répartis le long de l'axe majeur du guide lorsqu'il n'y a pas de défauts DSA. La figure suivante représente la distance guide – DSA mesurée en fonction de l'axe majeur du guide pour les trois procédés étudiés (cf. figure IV-25).

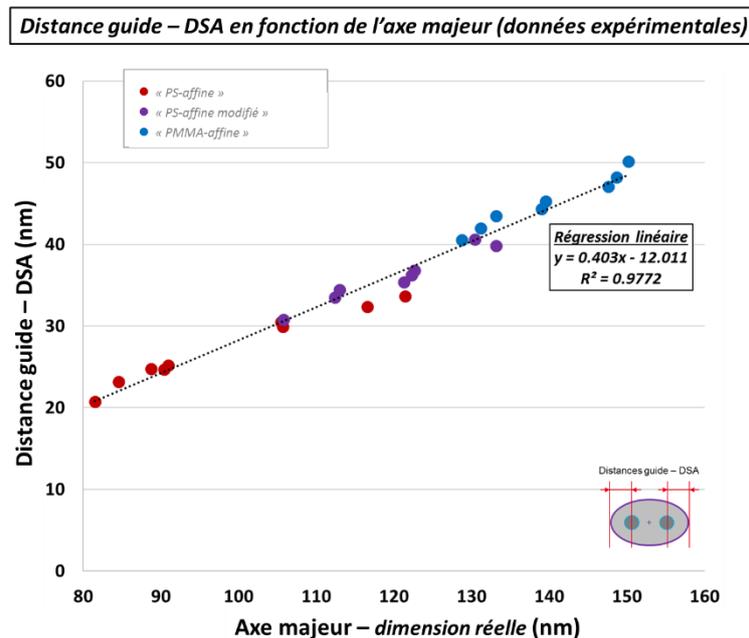


Figure IV-25 : Distance guide – DSA en fonction de la longueur du guide pour les procédés « PS-affine » (en rouge), « PS-affine modifié » (en violet) et « PMMA-affine » (en bleu).

Puisque l'agencement des chaînes dans les cavités n'est pas le même selon le procédé mis en place (cf. figure IV-5), il est logique que la distance guide – DSA ne soit pas la même pour les trois approches.

Dans le cas du procédé « PS-affine », le bloc PS des chaînes de copolymères forme, avec l'hPS<sub>g</sub> greffé à environ 5 nm d'épaisseur, une couche entre le guide et le contact DSA. La période intrinsèque du copolymère équivaut à deux fois la longueur de la chaîne et la chaîne est composée de PS:PMMA=70:30. La distance guide – DSA vaut donc :

$$d_{PS-affine} \sim 0.7 \times \frac{L_0}{2} + 5 \sim \mathbf{20 \text{ nm}}$$

Équation IV-1 : Calcul de la distance guide – DSA dans le cas du procédé « PS-affine » avec un copolymère C43.

Dans le cas du procédé « PS-affine modifié », le calcul est le même si ce n'est que la couche d'hPS<sub>g</sub> greffé est plus épaisse (10 nm environ), ce qui donne :

$$d_{PS-affine\_modifié} \sim 0.7 \times \frac{L_0}{2} + 10 \sim \mathbf{25 \text{ nm}}$$

Équation IV-2 : Calcul de la distance guide – DSA dans le cas du procédé « PS-affine modifié » avec un copolymère C43.

Dans le cas du procédé « PMMA-affine », il n'y a pas de couche greffée pour fonctionnaliser la surface du guide et la couche formée à l'interface des contacts DSA et du guide équivaut à une chaîne de copolymère entière plus un bloc PS, ce qui se traduit par :

$$d_{PMMA-affine} \sim (1 + 0.7) \times \frac{L_0}{2} \sim \mathbf{36 \text{ nm}}$$

Équation IV-3 : Calcul de la distance guide – DSA dans le cas du procédé « PS-affine modifié » avec un copolymère C43.

Nous observons un décalage entre les valeurs théoriques calculés ci-dessus et les valeurs expérimentales présentées sur la figure IV-25 : les distances guide – DSA mesurées sont plus grandes que celle prédites par le calcul. Cependant, ces valeurs sont cohérentes entre elles : la distance guide – DSA est minimisée avec le procédé « PS-affine » et est la plus grande avec le procédé « PMMA-affine », l'approche « PS-affine modifié » nous donnant une valeur intermédiaire.

Nous remarquons également que, contrairement au pitch, cette distance varie de la même façon avec la longueur du guide quel que soit le procédé, comme les résultats de la [figure IV-25](#). Pour mieux comprendre ce comportement, nous pouvons considérer le ressort comme modèle physique pour modéliser la chaîne de copolymère, comme le suggère Wuister *et al.* dans leur publication [Wuister 2014]. Dans cet article, ils décrivent les blocs de copolymères comme étant des ressorts et leur attribuent une constante de raideur  $K$  différente comme explicité dans la figure ci-après (cf. [figure IV-26](#)). Dans ce modèle, ils considèrent que  $K_{\text{PMMA}}$  est considéré comme infini : les chaînes de PMMA se déforment peu (plus  $K$  est grand, plus le ressort est rigide).

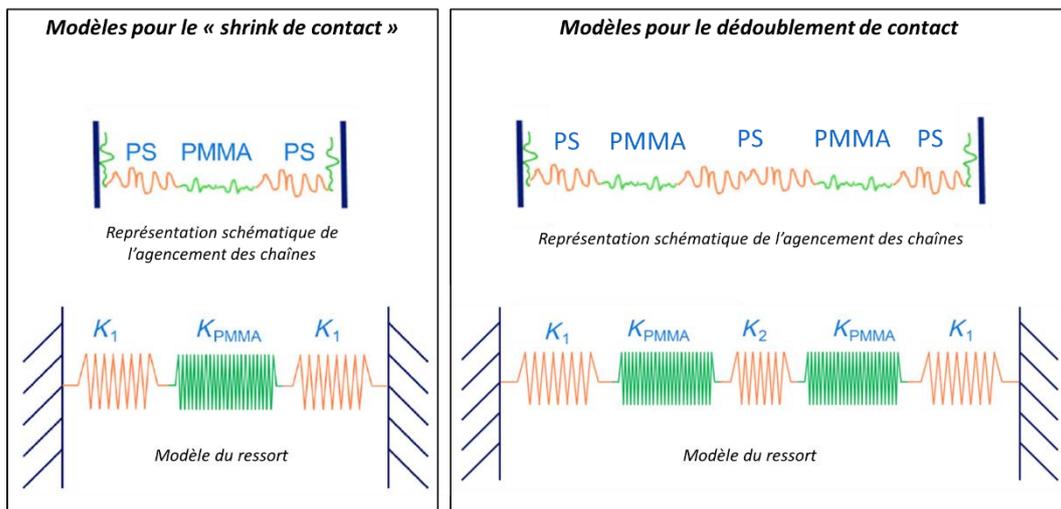


Figure IV-26 : Modèles utilisés par Wuister *et al.* pour illustrer la déformation du pitch en fonction de la forme des guides (adapté de [Wuister 2014])

Nos résultats expérimentaux valident ce modèle : la contrainte que les bords imposent aux polymères et en particulier l'attraction qui crée la couche de démouillage est la même quel que soit le procédé. La pente de la régression linéaire sur la distance guide – DSA est à comparer à celles obtenues précédemment pour la variation du pitch en fonction de l'axe majeur des guides (cf. [tableau IV-7](#)).

C43	PS-affine	PS-affine modifié	PMMA-affine
Pente « pitch »	0.515	0.487	0.291
Pente « distance guide – DSA »		0.403	

Tableau IV-7 : Pentés obtenues par régression linéaire des données expérimentales sur la variation du pitch et la distance guide – DSA en fonction de l'axe majeur des guides pour les procédés « PS-affine », « PS-affine modifié » et « PMMA-affine ».

Pour les procédés « PS-affine » et « PS-affine modifié », le pitch varie plus vite que la distance guide – DSA avec la taille du guide puisque les pentes « pitch » sont plus grandes que la pente « distance guide – DSA ». Dans ce cas, les blocs PS situés entre les deux contacts DSA absorbent en premier la variation de  $CD_{\text{guide}}$  (donc  $K_2 < K_1$ ). Cela peut s'expliquer par l'interpénétration des blocs PS du copolymère dans les chaînes d'hPS<sub>g</sub> greffées sur les parois du guide, ce qui rigidifie le système. Dans ce cas-là, l'attraction est physique : les blocs PS proches du bord sont plus soumis à la variation de  $CD_{\text{guide}}$  que dans le cas du « PMMA-affine », où l'attraction n'est que chimique.

En effet, pour le procédé « PMMA-affine », c'est l'inverse : la distance guide – DSA varie plus vite que le pitch (la pente « distance guide – DSA » est plus grande que la pente « pitch »). La variation de  $CD_{\text{guide}}$  est absorbée en premier par les blocs PS situés entre le guide et les contacts DSA (donc  $K_2 > K_1$ ), ce qui pourrait conduire à une variation plus importante de pitch dans le cas du procédé « PMMA-affine ». Cependant, ce phénomène ne transparait pas en regardant la dispersion du pitch ( $3\sigma$ ) qui est, en relatif, la même pour les trois procédés (cf. tableau IV-6). Cela est sans doute dû à une  $CDU_{\text{guide}}$  trop importante. Il serait intéressant de mener cette expérience sur des guides dont la CDU est plus finement maîtrisée, comme c'est le cas des guides réalisés en lithographie e-beam.

Pour compléter cette étude, nous avons également inspecté la  $CDU_{\text{DSA}}$  du procédé « PS-affine modifié ». Les figures suivantes présentent la  $CDU_{\text{DSA}}$  en échelle de couleur (de 0 nm en vert à 16 nm en rouge) en fonction des axes majeur et mineur du guide (cf. figure IV-27).

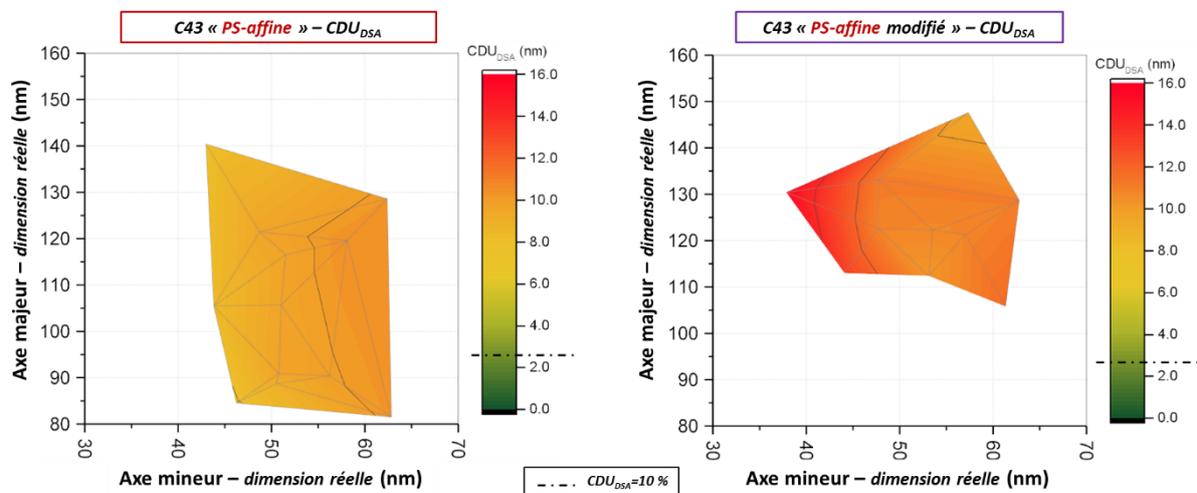


Figure IV-27 : Graphiques représentant l'uniformité de CD des contacts DSA ( $CDU_{\text{DSA}}$ ) en fonction des dimensions réelles du guide pour les procédés « PS-affine » (à gauche) et « PS-affine modifié » (à droite) avec un copolymère C43.

Nous remarquons que la  $CDU_{\text{DSA}}$  pour le procédé « PS-affine modifié » est légèrement dégradé par rapport au procédé de référence qui est déjà mauvais en termes d'uniformité de CD sur toute la fenêtre de procédé (cf. tableau IV-8).

<i>C43</i>	« PS-affine »	« PS-affine modifié »	« PMMA-affine »
<b>HOY (%)</b>	99.8	98.5	96.6
<b>CD<sub>DSA</sub> (nm)</b>	20.5	21.1	22.8
<b>CDU<sub>DSA</sub> (nm)</b>	9.4	11.4	11.4
<b>CDU<sub>DSA</sub> (%)</b>	43.8	54.0	49.9

Tableau IV-8 : Récapitulatif des performances en termes de taux d'ouverture de contacts DSA et de CDU<sub>DSA</sub> pour les procédés « PS-affine », « PS-affine modifié » et « PMMA-affine » avec un copolymère C43.

### IV.4.3 Bilan des performances « shrink » et dédoublément de contact pour le copolymère C43

Le tableau ci-dessous résume les meilleures performances DSA en termes de taux d'ouvertures de contacts DSA, de CDU, de pitch et d'erreur de placement, obtenues avec les approches « PS-affine », « PS-affine modifié » et « PMMA-affine » pour les applications « shrink » et dédoublément de contacts avec le copolymère C43 (cf. tableau IV-9).

<i>C43</i>	Shrink			Dédoublément		
	<i>PS-affine</i>	<i>PS-affine modifié</i>	<i>PMMA-affine</i>	<i>PS-affine</i>	<i>PS-affine modifié</i>	<i>PMMA-affine</i>
<b>HOY (%)</b>	100*	100*	100*	99.8 <sup>▲</sup>	98.5 <sup>▲</sup>	96.6 <sup>▲</sup>
<b>CD<sub>DSA</sub> (nm)</b>	20.3	24.3	23.7	20.4	22.0	23.5
<b>CDU<sub>DSA</sub> (nm)</b>	6.9 <sup>¥</sup> (2.4 <sup>•</sup> )	7.0 <sup>¥</sup> (3.4 <sup>•</sup> )	7.1 <sup>¥</sup> (3.0 <sup>•</sup> )	8.4 <sup>¥</sup>	10.7 <sup>¥</sup>	12.2 <sup>¥</sup>
<b>Pitch (nm)</b>	-	-	-	44.5	49.8	50.3
<b>Pitch - 3σ (nm)</b>	-	-	-	5.1	6.4	6.1
<b>PE (nm)</b>	0.8	0.6	0.8	-	-	-
<b>PE - 3σ (nm)</b>	1.3	2.2	2.3	-	-	-

\* statistique sur environ 700 contacts

<sup>▲</sup> statistique sur environ 1800 contacts DSA

• CDU wafer (3σ des moyennes par puce)

<sup>¥</sup> CDU all (3σ sur tous les contacts) dont la valeur est proche de la CDU wafer dans le cas du dédoublément de contacts

Tableau IV-9 : Récapitulatif des performances DSA avec un copolymère C43 pour le « shrink » et le dédoublément de contacts.

Les procédés en « shrink de contact » sont plus matures que ceux en dédoublément. En effet, le taux d'ouvertures de contacts DSA est de 100 % pour les applications « shrink » avec les trois approches alors que le 100 % n'est pas atteint pour le dédoublément de contacts. Nous pouvons cependant noter que le HOY obtenu pour le dédoublément de contacts pour le procédé de

référence « PS-affine » présente un HOY de 99.8 %, soit 5 contacts défectueux sur 1800 contacts DSA inspectés, ce qui en fait un procédé prometteur, à explorer davantage pour y apporter des améliorations.

Si nous considérons la  $CDU_{DSA}$  sur tous les contacts (appelées *CDU all*), nous remarquons qu'elle est élevée pour le « shrink » de contact (environ 30 % du  $CD_{DSA}$ ) mais qu'elle l'est d'autant plus pour le dédoublement (entre 40 et 50 % du  $CD_{DSA}$  selon l'approche considérée). La  $CDU_{DSA}$  médiocre dans les deux cas peut être expliquée en partie par le procédé de planarisation. En effet, la rétro-gravure qui permet de retirer la surépaisseur de copolymère est uniforme sur toute la plaque jusqu'à ce que le SiARC soit révélé. Afin de retirer le bloc PMMA et ainsi révéler le contact DSA, la rétro-gravure est prolongée de quelques secondes. Le plasma ne gravera pas exactement de la même manière les zones denses et les zones à motifs isolés, ce qui peut induire une CDU sur le contact final. La combinaison du procédé de rétro-gravure avec d'autres méthodes de retrait de la phase PMMA du copolymère peut être envisagée, comme par exemple l'exposition aux UV ou le développement à l'acide acétique. La mauvaise  $CDU_{DSA}$  pour le dédoublement de contacts peut quant à elle s'expliquer en plus par une plus grande mobilité des chaînes dans les guides elliptiques par rapport aux guides circulaires.

De plus, pour tous les procédés et en particulier pour le procédé « PMMA-affine », une couche de copolymère est présente en fond de cavité, ce qui peut gêner le transfert des motifs DSA dans les couches sous-jacentes. Quelques pistes d'amélioration des procédés sont donc envisageables comme une optimisation du recuit d'auto-assemblage, une fonctionnalisation différente de la surface des guides (donc une nouvelle intégration), une nouvelle formulation de copolymères à blocs ou encore la modification de la forme des guides afin de confiner davantage les chaînes de copolymères, comme nous allons le voir dans le prochain paragraphe.

- **Modification supplémentaire de l'affinité de surface** : que ce soit avec l'affinité PS ou l'affinité PMMA, la couche de polymère en fond de cavité doit être réduite au maximum. Dans l'idéal, afin d'éviter l'assemblage en « U » (cf. figure IV-5), le fond et les bords des guides doivent avoir une affinité différenciée. Cependant, le procédé « neutre » n'est pas adapté aux variations de densités de motifs, entraînant une variation d'épaisseur de greffage du copolymère statistique et donc une inhomogénéité d'affinité guide à guide. C'est pourquoi Sun *et al.* ont étudié le changement de « phase » du PS-*r*-PMMA. Lorsqu'il est insolé par UV, le polymère statistique greffé change de tonalité et rend la surface plutôt d'affinité PS ou plutôt d'affinité PMMA selon la dose d'UV [Sun 2016]. Réalisable en surface libre (comme c'est le cas de l'étude), la méthode peut être périlleuse à mettre en place dans le cas d'une approche par grapho-épitaxie pour des contacts. En effet, les guides nécessaires à l'auto-assemblage des copolymères sont petits et la lumière risque d'avoir du mal à passer dans de petites cavités comme les formes elliptiques. Cependant, cette méthode semble marcher sur de grandes tranchées, comme le démontre Claveau *et al.* dans un article en cours de publication [Claveau 2017]. Il serait intéressant de l'implémenter sur nos guides. Dans une toute récente publication, Doise *et al.* ont développé un nouveau procédé basé sur le double greffage sélectif de deux  $hPS_g$  modifié. L'un va préférentiellement se greffer sur les bords du guide en oxyde (*Spin On Glass* ou SOG), l'autre va se greffer en fond de cavité sur la couche sous-jacente en SiN. De cette manière, ils

différencient l'affinité des bords de celle du fond des guides [Doise 2017]. Les résultats qu'ils obtiennent avec cette méthode pour le dédoublement de contacts sont meilleurs en termes de  $CDU_{DSA}$  mais reste équivalent aux nôtres pour ce qui est de la défektivité et de la variation du pitch ( $3\sigma=5.1$  nm).

- **Changement de la composition du polymère** : des modifications peuvent également être apportées aux copolymères à blocs afin d'améliorer l'auto-assemblage. Chevalier *et al.* ont utilisé des copolymères « blends » (mélange de copolymères ou de copolymères + homopolymères) afin d'améliorer la  $CDU_{DSA}$  et le taux de défauts en surface libre par rapport à un copolymère pur de même période. De plus, ils ont également synthétisé une nouvelle génération de copolymères à blocs (appelés « special ») basés sur l'architecture du PS-*b*-PMMA et présentant l'avantage de s'auto-assembler avec moins de défauts à une épaisseur grande [Chevalier 2016]. Laachi et al. ont démontré par simulation que l'ajout d'hPMMA dans une solution de copolymères purs tend à améliorer l'auto-assemblage de l'ensemble dans des cavités cylindriques dans le cas « PMMA-affine » mais également lorsque les guides sont neutres sur les bords et le fond de cavité [Laachi 2015]. Ces pistes sont également à explorer en perspective des études que nous avons menées.
- **Amélioration de la forme des guides** : le taux de défauts est supérieur pour le dédoublement de contacts par rapport au « shrink de contact » en partie à cause d'une trop grande mobilité des chaînes dans le guide. Une solution pour contraindre davantage l'organisation des chaînes est de créer des guides elliptiques dont le centre est resserré. En plus de limiter la mobilité des chaînes, elle permet d'augmenter le pitch final des contacts qui n'est pas atteignable ni par la lithographie conventionnelle (densité trop agressive), ni par les copolymères à blocs (chaînes de polymère trop longue à synthétiser) (cf. figure IV-1). Cette forme de guide, appelée « peanut » en référence à sa forme de « cacahouète », est étudiée plus en détail dans la partie suivante.

## IV.5 Dédoublément de contacts dans des guides type « peanut »

Le taux de défauts est supérieur pour le dédoublement de contacts par rapport au « shrink de contact » possiblement en partie à cause d'un confinement physique du guide insuffisant sur les chaînes de copolymères. Une solution pour contraindre davantage l'organisation des chaînes est de créer des guides elliptiques dont le centre est resserré. Cette forme de guide est connue sous le nom de « peanut-shape » (ou plus simplement « Peanut ») de par sa ressemblance avec une arachide. En plus de limiter la mobilité des chaînes, cette forme de motif permet d'augmenter le pitch final des contacts qui n'est pas atteignable par la lithographie conventionnelle (cf. figure IV-1). Typiquement,

les pitches visés pour le nœud C014 sont à 80 nm et 68 nm alors que le critère de Rayleigh impose une limite de résolution du pitch autour de 80 nm avec la lithographie 193 nm à immersion. L'auto-organisation de copolymères à blocs de grand masse molaire (et donc de grande période intrinsèque) n'est pas aisée car plus les chaînes de copolymères sont longues, plus leur mobilité est diminuée.

La forme « peanut » est la combinaison de deux contacts simples (appelés lobes) fusionnés partiellement de manière contrôlée en formant un resserrement (appelé « neck ») (cf. figure IV-28).

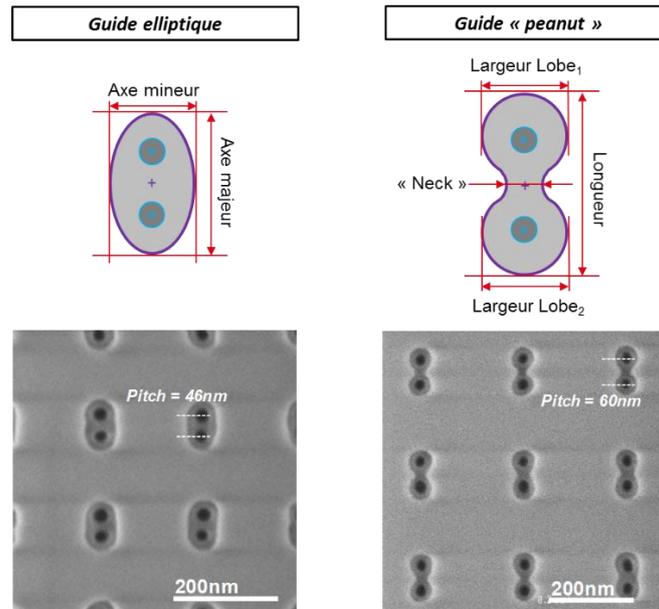


Figure IV-28 : Représentations schématiques des guides elliptiques (à gauche) et « peanut » (à droite) accompagnées d'images CD-SEM (avec un copolymère C43, approche « PS-affine »).

La forme « peanut » des guides est plus complexe à réaliser par lithographie conventionnelle que les ellipses. En effet, le resserrement entre les deux lobes qui forment le guide, appelé « neck », est d'une dimension plus petite et donc plus difficile à contrôler. Néanmoins, Fouquet *et al.* ont démontré par simulation la faisabilité de ces guides par lithographie 193i et en particulier les guides permettant d'atteindre les pitches DSA de 68 nm et 80 nm en choisissant la source lumineuse adéquate et un OPC adaptée (*Optical Proximity Correction* pour correction d'effet optique de proximité) [Fouquet 2015]. A la suite de cette étude, un nouveau masque de lithographie 193i dédié à la défektivité pour les « peanuts » appelé *Boar* a été fabriqué au Leti. Il présente de grands champs de contacts d'environ 8 mm<sup>2</sup> permettant d'étudier sur une même puce le « shrink de contact » et le dédoublement de contacts par « peanuts » (cf. figure IV-29).

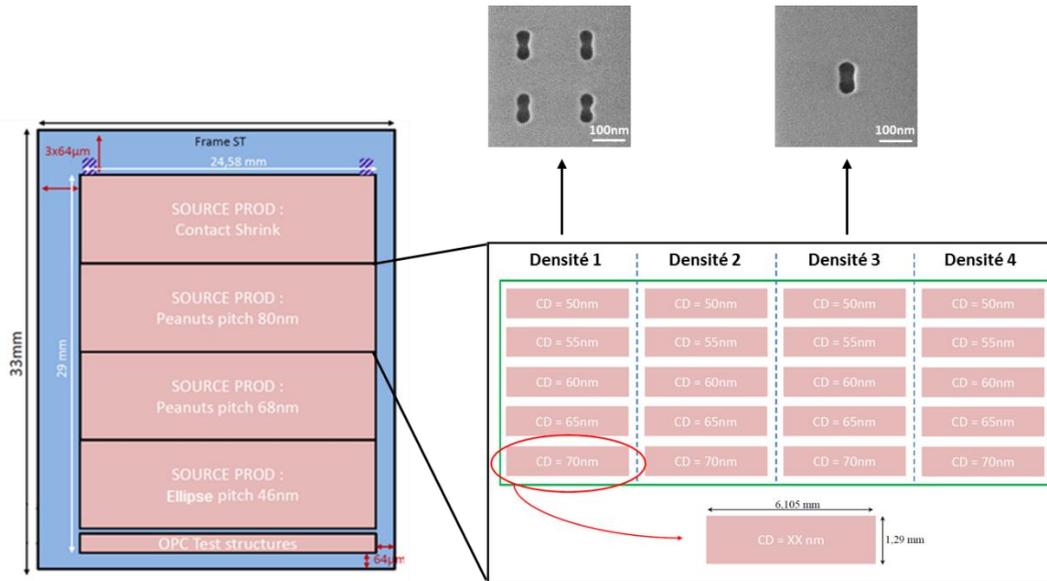


Figure IV-29 : Description du masque « Boar » utilisé pour l'étude de dédoublement de contacts DSA dans des guides « peanut »

Une étude similaire à celle faite sur le masque *Bodhi* a été menée sur ce nouveau masque au Leti. Les courbes de Bossung issues de la mesure CD sur les guides circulaires sont dans un premier temps analysées pour déterminer les paramètres lithographiques (dose et focus nécessaires) permettant d'atteindre les dimensions désirées. La figure suivante représente les courbes de  $CD_{guide}$  en fonction du focus à différentes doses (Bossung) (à gauche) ainsi que le  $CD_{guide}$  en fonction de la dose pour le focus nominal (à droite) (cf. figure IV-30).

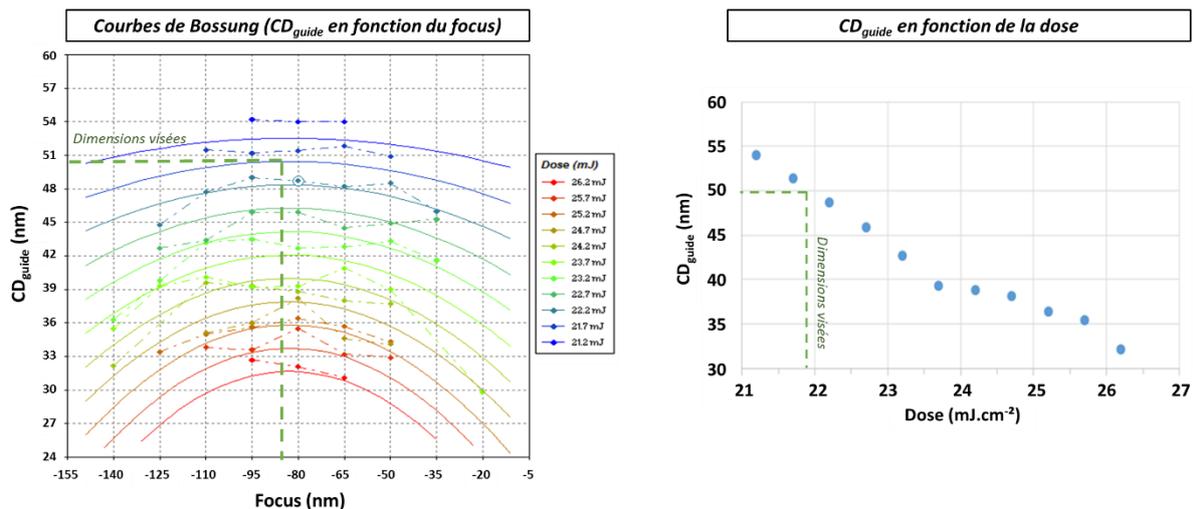


Figure IV-30 : Courbes de Bossung ( $CD_{guide}$  en fonction du focus pour plusieurs doses) (à gauche) et  $CD_{guide}$  en fonction de la dose d'insolation à focus fixe (à droite).

D’après l’étude de commensurabilité menée sur le « shrink de contact » avec le copolymère C43 dans une approche « PS-affine », le  $CD_{\text{guide}}$  visé est d’environ 50 nm. Ainsi, ce CD est atteint pour un focus de  $f=-85$  nm, avec une dose entre  $21.7 \text{ mJ.cm}^{-2}$  et  $22.2 \text{ mJ.cm}^{-2}$ . Une plaque FEM avec un pas de variation de dose plus fine est mesurée et la dose nominale est fixée à  $d=21.8 \text{ mJ.cm}^{-2}$ .

A ce stade, nous avons déterminé le couple (*dose, focus*) qui permet d’avoir les guides circulaires de tailles optimales pour le « shrink de contact ». Il reste à vérifier que ces conditions d’insolation permettent d’obtenir les mêmes dimensions pour les deux lobes des guides « peanuts » qui doivent être au plus proches de celles des guides circulaires. Nous ajoutons à cela une condition sur le « neck » qui doit être plus petit que la période intrinsèque du copolymère afin d’éviter la formation d’un troisième contact. Nous prendrons comme valeur visée  $CD_{\text{neck}}=25$  nm. La figure suivante représente le CD du lobe droit du guide « peanut » en fonction du CD du lobe gauche (à gauche) et le CD des deux lobes en fonction de la dose (à focus fixe) (cf. figure IV-31).

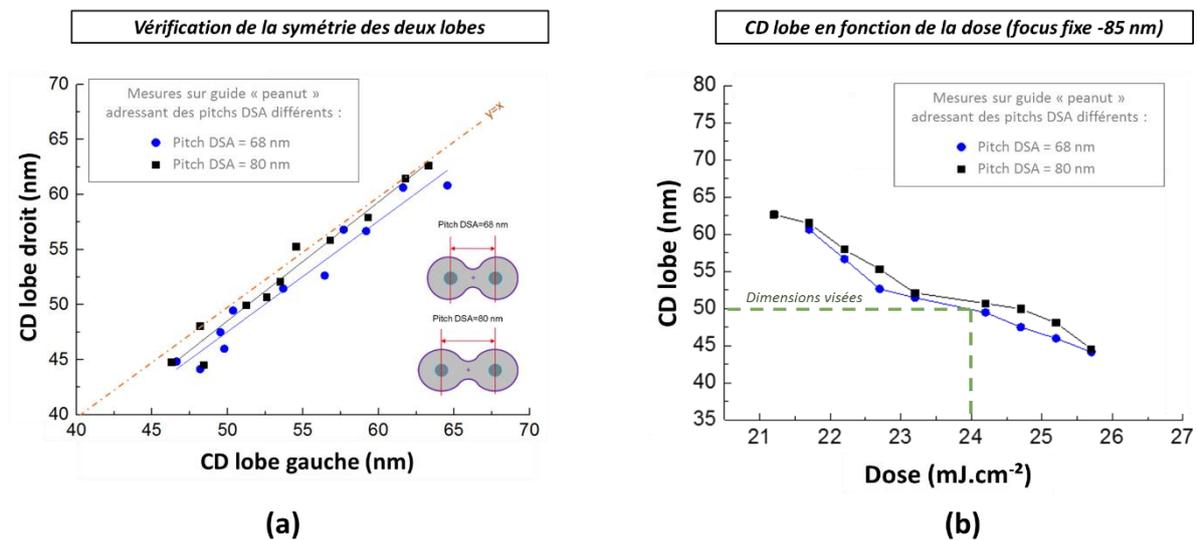


Figure IV-31 :  $CD_{\text{lobe\_gauche}}$  en fonction du  $CD_{\text{lobe\_droite}}$  (à gauche) et  $CD_{\text{lobe}}$  en fonction de la dose (à droite) adressant les pitches DSA 68 nm et 80 nm.

D’après les courbes ci-dessus (cf. figure IV-31 a), les guides « peanuts » présentent une légère asymétrie, un lobe étant légèrement plus grand que l’autre. Cette non uniformité est faible et ne devrait pas gêner l’auto-assemblage du copolymère. En revanche, la dose permettant de créer des « peanuts » de  $CD_{\text{lobe}}=50$  nm n’est pas la même que pour les guides circulaires ( $24 \text{ mJ.cm}^{-2}$  contre  $21.8 \text{ mJ.cm}^{-2}$  pour la dose nominale) (cf. figure IV-31 b). Cela signifie qu’en l’état actuel, il n’est pas possible de résoudre à la fois les « peanuts » et les guides simples sur une même puce.

Intéressons-nous à présent aux paramètres lithographiques permettant de résoudre le « neck ». La figure suivante représente le CD du « neck » en fonction de la dose pour un focus fixe à -90 nm (cf. figure IV-32).

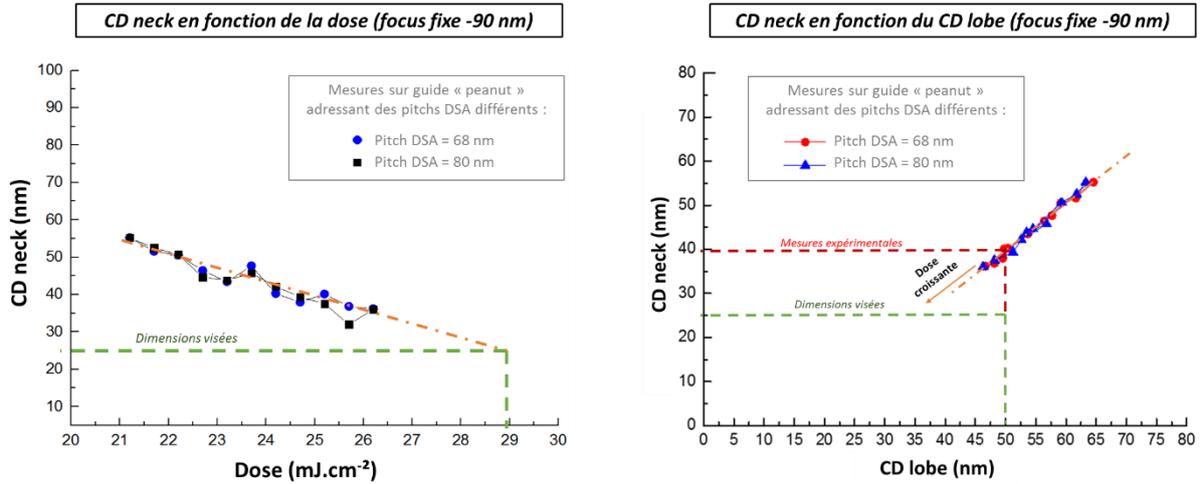


Figure IV-32 :  $CD_{neck}$  en fonction de la dose d'insolation (à gauche) et  $CD_{neck}$  en fonction du  $CD_{lobe}$  (à droite) pour différentes doses et différents guides « peanut » adressant les pitches DSA 68 nm et 80 nm.

La dose nécessaire pour avoir un resserrement de 25 nm est supérieure à la dose permettant d'imprimer la taille de lobe optimale (29  $mJ.cm^{-2}$  contre 21.8  $mJ.cm^{-2}$  pour la dose nominale). Il est plus parlant de tracer le  $CD_{neck}$  en fonction du  $CD_{lobe}$  moyen. Nous remarquons qu'il n'existe pas de dose permettant d'avoir à la fois un  $CD_{neck}$  de 25 nm et un  $CD_{lobe}$  de 50 nm et ce, quel que soit le pitch DSA visé.

La figure suivante montre des images CD-SEM de motifs DSA dans des guides « peanut » avec dans un cas la taille des lobes optimisées et dans l'autre la taille du neck optimisé (cf. figure IV-33).

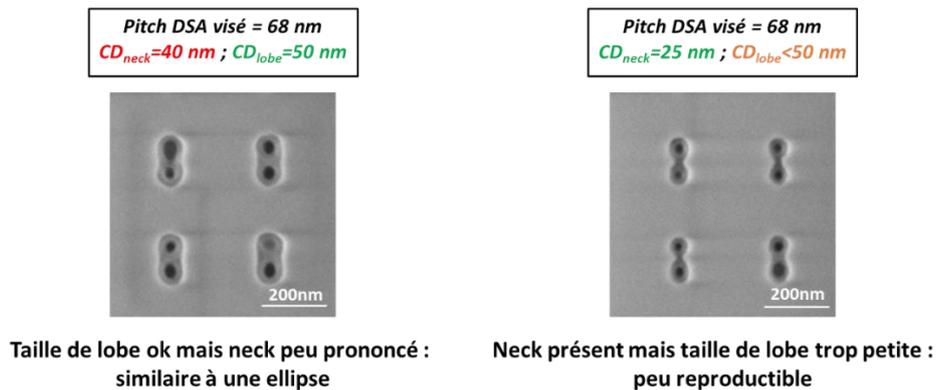


Figure IV-33 : Images CD-SEM de motifs DSA dans des structures « peanut » pour différentes conditions de lithographie (copolymère C43 procédé « PS-affine »).

Lorsque la taille des lobes est autour de 50 nm, le neck est peu présent, ce qui revient à avoir des guides proches de la forme elliptique. Lorsque que le neck est présent, les lobes sont plus petits que la dimension visée. Dans ce cas, les petites dimensions à la fois des lobes et du « neck » implique une grande variabilité sur le guide qu’il est nécessaire de contrôler pour monter en maturité.

Comme présenté dans la figure suivante, le procédé de planarisation permet d’adresser toutes les densités même si les dimensions (lobes et « neck ») ne sont pas encore très reproductibles (cf. figure IV-34).

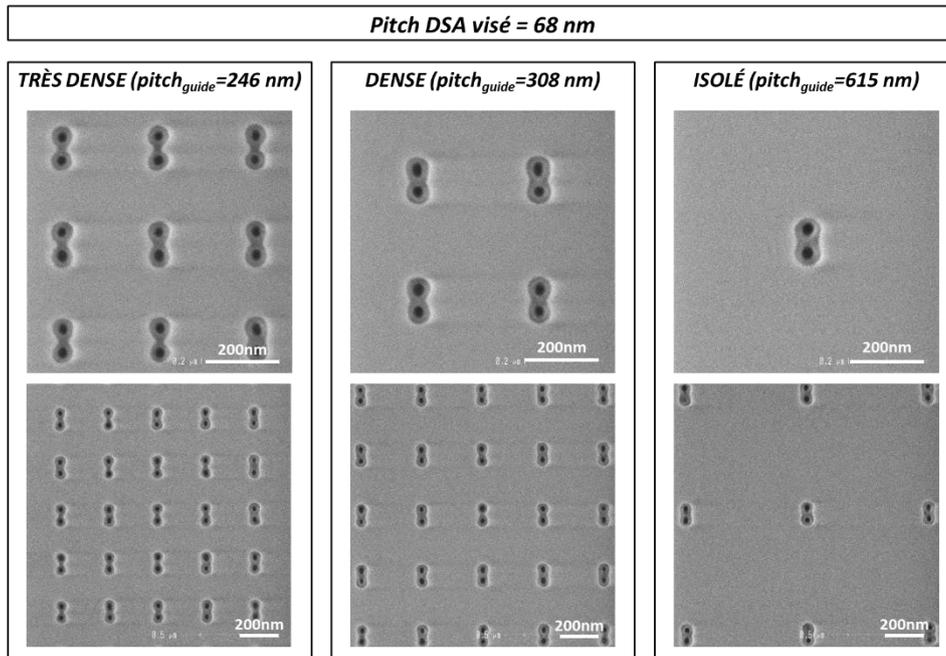


Figure IV-34 : Images CD-SEM de motifs DSA dans des structures de guides type « peanut » à différentes densités (copolymère C43 procédé « PS-affine »).

L’étude sur les guides elliptiques a permis de mettre en lumière les éventuels problèmes de l’auto-assemblage des chaînes de copolymères dans la cavité et en particulier le risque de créer un troisième contact DSA au milieu des deux désirés, chose que la forme « peanut » devrait éviter. Nous avons donc comparé les images CD-SEM en vue transverse pour les formes elliptiques et « peanut » afin de nous en assurer (cf. figure IV-35). Il est à noter ici que nous comparons deux procédés différents : le copolymère à blocs C43 a été assemblé avec l’approche « PMMA-affine » dans les guides elliptiques et avec l’approche « PS-affine » dans les guides « peanuts ».

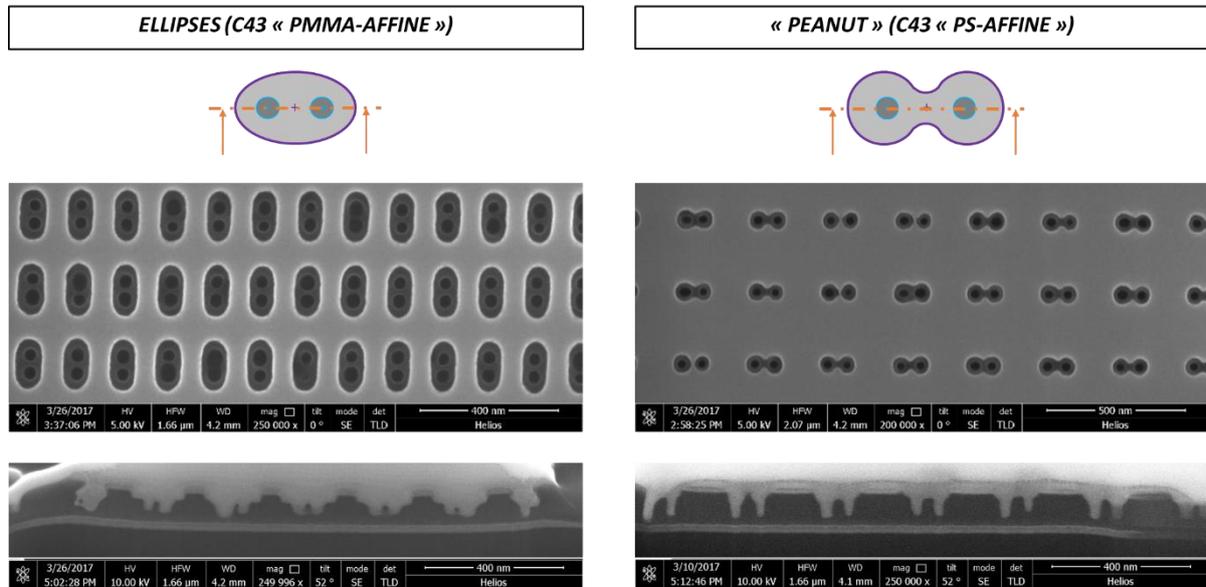


Figure IV-35 : Images CD-SEM vue de dessus (en haut) et vue transverse (en bas). A gauche : assemblage d'un C43 avec le procédé « PMMA-affine » dans des guides elliptiques. A droite : assemblage d'un copolymère C43 avec le procédé « PS-affine » dans des guides « peanut ».

Sur les quelques images analysées, aucune fusion de contacts DSA n'a été observée sur les guides « peanuts », contrairement aux guides elliptiques. Cela est en partie dû au fait que le DSA a été fait avec l'approche « PS-affine » dans les guides « peanuts ». Cependant, nous pouvons comparer les motifs DSA dans les ellipses n'ayant pas fusionnés avec les motifs DSA dans les guides « peanut ». La largeur du contact DSA est révélatrice de la contrainte du guide sur le copolymère. Les contacts DSA sont plus larges dans les guides elliptiques que dans les guides « peanut », ce qui indique que le copolymère est moins contraint dans les ellipses. Ceci peut éventuellement avoir un impact sur la CDU des contacts DSA et donc sur la CDU des contacts après transfert. En effet, pendant cette étape, les motifs DSA peuvent être élargis, ce qui peut conduire à des fusions de contacts et donc à des défauts. Il faut donc que leur taille soit maîtrisée.

Malgré de premiers résultats encourageants, la conception des guides « peanut » sur le masque a besoin d'être davantage optimisée. Classiquement, l'optimisation d'un masque de lithographie 193i se fait en plusieurs itérations afin d'affiner le modèle OPC pour chaque motif. Ce modèle prend en compte les propriétés optiques des sources mais aussi celles de la résine utilisée. Dans le cas du masque « Boar », l'OPC a été calibré essentiellement sur les guides simples en prenant comme source lumineuse la source standard utilisée en production à STMicroelectronics. Des zones supplémentaires présentant des contacts dont l'OPC a été calibré pour d'autres sources lumineuses pourraient être utiles pour une étude complémentaire. Celui-ci permettrait de choisir une source mieux adaptée au contrôle du « neck ». Le modèle concernant la résine doit être également retravaillé pour inclure les structures « peanuts ».

## IV.6 Conclusion

Ce chapitre a été dédié à l'étude du dédoublement de contacts par DSA. A partir de l'analyse des besoins liés à l'utilisation du DSA pour la lithographie (réduction des dimensions et augmentation de la densité des motifs), nous avons pu dégager deux stratégies d'intégration : l'une mettant en jeu des motifs de guidage elliptiques et l'une basée sur des motifs plus complexes de type « peanut ».

Nous avons tout d'abord étudié les fenêtres de procédé DSA avec des guides elliptiques. A partir de l'étude faite sur le « shrink de contact », nous avons implémenté les procédés « PS-affine » et « PMMA-affine » avec notre matériau de référence, le copolymère C35. Nous avons déterminé les fenêtres de procédés (HOY=100 %) pour les deux approches :

- L'approche « PS-affine » présente une fenêtre de procédé deux fois plus large que le procédé « PMMA-affine » en termes d'axe majeur de l'ellipse ( $\Delta_{\text{majeur}}^{\text{PMMA-affine}}=7$  nm contre  $\Delta_{\text{majeur}}^{\text{PS-affine}}=15$  nm).
- Le centre des fenêtres de procédé ne sont pas identiques pour les deux approches. Dans le procédé « PS-affine », le copolymère s'assemble dans des guides plus petits que ceux nécessaires au procédé « PMMA-affine ». Cette dernière approche permet donc de relâcher la contrainte sur les guides d'environ 25 nm pour l'axe majeur et 10 nm pour l'axe mineur.
- La  $CDU_{\text{DSA}}$  est mauvaise pour les deux approches (environ 40 % du  $CD_{\text{DSA}}$ ).
- Aucun des deux procédés ne permet d'atteindre un HOY de 100 % à ce stade de l'étude. Cependant, le procédé « PMMA-affine » a un meilleur taux d'ouvertures de contacts ( $HOY_{\text{PMMA-affine}}=95.5$  % contre  $HOY_{\text{PS-affine}}=89.2$  %).

Les performances en termes de taux de défauts n'étant pas satisfaisantes avec le recuit standard de 10 min à 250 °C ( $HOY < 100$  %), nous avons conduit une étude d'optimisation du recuit d'auto-assemblage, similaire à celle menée sur le « shrink de contact ». Nous avons remarqué une absence de plateau pour lequel  $HOY=100$  %, que ce soit en température ou en temps : le dédoublement de contacts est plus sensible aux variations des paramètres du recuit d'auto-assemblage que le « shrink ». Cependant, pour le copolymère C35, une optimisation est possible : une augmentation du HOY de 11 % a été démontrée en diminuant le temps de recuit (2 min à 250 °C) ou en diminuant la température de recuit pour un temps plus long (10 min à 230 °C).

Le pitch atteignable par le copolymère C35 est de l'ordre de la période intrinsèque (environ 35 nm), ce qui ne permet pas d'adresser les pitches du nœud C014. Nous avons donc étudié le copolymère C43 qui, puisqu'il est de masse molaire plus grande, crée des contacts espacés d'environ 45 nm. De la même manière, nous avons déterminé les fenêtres de procédé pour les approches « PS-affine » et « PMMA-affine » :

- L'utilisation du copolymère C43 nécessite des guides environ 10 nm plus large et 32 nm plus long que ceux du C35.

- Pour le C43, la fenêtre de procédé « PS-affine » est 5 nm plus grande (en axe majeur et mineur) que celle de l'approche « PMMA-affine » ( $\Delta_{\text{majeur}}^{\text{PMMA-affine}}=10$  nm contre  $\Delta_{\text{mineur}}^{\text{PMMA-affine}}=15$  nm).
- La  $\text{CDU}_{\text{DSA}}$  est mauvaise pour les deux approches (environ 40 % du  $\text{CD}_{\text{DSA}}$ ).
- Les pitches obtenus au milieu des fenêtres de procédés « PMMA-affine » (50.3 nm) et « PS-affine » (44.5 nm) sont sensiblement différents.

La valeur du pitch moyen obtenu au centre de la fenêtre de procédé « PMMA-affine » (50.3 nm) est plus grande que la période intrinsèque du copolymère (43 nm). Pour mieux comprendre ce phénomène, nous nous sommes appuyés sur des simulations basées sur le modèle d'Ohta-Kawasaki et sur les images MEB en vue transverse. Nous avons démontré que le procédé « PMMA-affine » pourrait impliquer une mauvaise organisation du copolymère à blocs en profondeur dans les cavités de guidage à cause du manque de contrainte des parois des guides sur le copolymère avec cette approche. Une analyse complémentaire sur la variation du pitch et de la distance entre le guide et les contacts DSA en fonction de la longueur des guides nous a permis de mieux comprendre le mécanisme de confinement des chaînes de copolymères dans les guides. En particulier, nous avons montré que le fait de greffer un  $\text{hPS}_g$  de grande masse sur les parois réduit la rigidité du système en comparaison à l'utilisation d'un  $\text{hPS}_g$  de masse plus petite, ce qui conduit à une augmentation du degré de liberté des chaînes de copolymères et potentiellement à des défauts.

La seconde stratégie d'intégration du dédoublement de contacts par DSA est l'utilisation des guides de forme « peanut ». Cette forme assimilable à un guide elliptique pincé en son milieu permet d'adresser les pitches nécessaires au nœud C014 en contraignant davantage les chaînes dans les cavités de guidage. Ces guides particuliers sont générés à l'aide d'un nouveau masque *Boar* qu'il a fallu qualifier. Lors de ces premiers tests, nous avons démontré que l'OPC (corrections de motifs) utilisé sur ce masque n'est pas optimisé pour ce type de motifs, ce qui conduit à des problèmes de reproductibilité des formes sur la plaque. Cependant, une première implémentation du procédé DSA « PS-affine » avec le copolymère C43 a démontré le potentiel de cette intégration. Les images SEM en coupe ont montré des contacts DSA plus réguliers, plus petits et mieux définis dans la profondeur des guides en comparaison aux contacts DSA dans des guides elliptiques. Cela est dû en partie au « neck » (pincement au milieu du guide) empêchant la création d'un troisième contact au centre et contraignant davantage les chaînes que dans les guides elliptiques. Afin de confirmer ces premiers résultats, il serait nécessaire d'implémenter un nouvel OPC sur une seconde itération du masque *Boar* pour stabiliser au mieux la lithographie, de tester d'autres sources lumineuses d'insolation et de mener une campagne de mesures à grande échelle afin d'avoir des résultats plus robustes statistiquement parlant.

## Bibliographie

- Boots, H., de Ruiter, J. M., Nguyen, T. T., Brizard, A., Peeters, E., Wuister, S. F., ... Fraaije, J. G. E. M. (Hans). (2014). Pitch variations of self-assembled cylindrical block copolymers in lithographically defined trenches. *Journal of Micro/Nanolithography, MEMS, and MOEMS*, 13(3), 033015–033015. <http://doi.org/10.1117/1.JMM.13.3.033015>
- Chevalier, X., Coupillaud, P., Lombard, G., Nicolet, C., Beausoleil, J., Fleury, G., ... Cayrefourcq, I. (2016). Design of new block copolymer systems to achieve thick films with defect-free structures for applications of DSA into lithographic large nodes (Vol. 9779, pp. 977913-977913–11). <http://doi.org/10.1117/12.2219214>
- Claveau, G., Argoud, M., Quéméré, P., Tiron, R., Fernández-Regúlez, M., Pimenta-Barros, P., & Evangelio, L. (2017). Improved versatility of DSA topographic patterns through the use of UV-exposed grafted layers (Vol. 30, pp. P06-01). Presented at the 61st EIPBN conference.
- Doise, J., Chan, B. T., Hori, M., & Gronheid, R. (2017). Dual brush process for selective surface modification in graphoepitaxy directed self-assembly. In C. K. Hohle & R. Gronheid (Eds.), (p. 101460R). <http://doi.org/10.1117/12.2259791>
- Fouquet, A., Perraud, L., Bérard-Bergery, S., Gharbi, A., Pimenta-Barros, P., Tiron, R., ... Farys, V. (2015). 193i lithography for contact doubling with grapho-epitaxy DSA: a simulation study (Vol. 9423, pp. 942324-942324–9). <http://doi.org/10.1117/12.2085822>
- Fouquet, Antoine. (2017). *Mise au point d'un modèle pour la simulation de l'auto-assemblage de copolymères à blocs*. INSA de Lyon.
- Fukawatase, K., Yoshimoto, K., Ohshima, M., Naka, Y., Maeda, S., Tanaka, S., ... Mimotogi, S. (2014). DFM for defect-free DSA hole shrink process (Vol. 9049, p. 90491K–90491K–8). <http://doi.org/10.1117/12.2046108>
- Laachi, N., Delaney, K. T., Kim, B., Hur, S.-M., Bristol, R., Shykind, D., ... Fredrickson, G. H. (2015). Self-consistent field theory investigation of directed self-assembly in cylindrical confinement. *Journal of Polymer Science Part B: Polymer Physics*, 53(2), 142–153. <http://doi.org/10.1002/polb.23452>
- Muramatsu, M., Nakano, T., Tomita, T., Yamamoto, K., Matsuzaki, K., & Kitano, T. (2014). Simulation analysis of directed self-assembly for hole multiplication in guide pattern (Vol. 9049, pp. 904921-904921–14). <http://doi.org/10.1117/12.2045865>
- Ohta, T., & Kawasaki, K. (1986). Equilibrium morphology of block copolymer melts. *Macromolecules*, 19(10), 2621–2632. <http://doi.org/10.1021/ma00164a028>
- Sun, Y.-S., Wang, C.-T., & Liou, J.-Y. (2016). Tuning polymer-surface chemistries and interfacial interactions with UV irradiated polystyrene chains to control domain orientations in thin films of PS-b-PMMA. *Soft Matter*, 12(11), 2923–2931. <http://doi.org/10.1039/C5SM02605A>

- Wuister, S., Druzhinina, T., Ambesi, D., Laenens, B., Yi, L. H., & Finders, J. (2014). Influence of litho patterning on DSA placement errors (Vol. 9049, p. 90491O–90491O–13). <http://doi.org/10.1117/12.2048065>
- Wuister, S. F., Finders, J., Peeters, E., & van Heesch, C. (2012). Lithography assisted self-assembly of contact holes on 300-mm wafer scale. *Journal of Micro/Nanolithography, MEMS, and MOEMS*, 11(3), 031304-1. <http://doi.org/10.1117/1.JMM.11.3.031304>
- Yi, H., Bao, X.-Y., Tiberio, R., & Wong, H.-S. P. (2015). A General Design Strategy for Block Copolymer Directed Self-Assembly Patterning of Integrated Circuits Contact Holes using an Alphabet Approach. *Nano Letters*, 15(2), 805–812. <http://doi.org/10.1021/nl502172m>
- Yi, H., Bao, X.-Y., Zhang, J., Bencher, C., Chang, L.-W., Chen, X., ... Wong, H.-S. P. (2012). Flexible Control of Block Copolymer Directed Self-Assembly using Small, Topographical Templates: Potential Lithography Solution for Integrated Circuit Contact Hole Patterning. *Advanced Materials*, 24(23), 3107–3114. <http://doi.org/10.1002/adma.201200265>



# Conclusion générale

Ce manuscrit de thèse expose les travaux de recherche visant à estimer le potentiel d'industrialisation des procédés par auto-assemblage des copolymères à blocs, utilisés dans le but de créer des contacts (VIA) pour les nœuds technologiques très avancés (C014 de STMicroelectronics). A travers deux applications, le « shrink de contact » et le dédoublement de contacts, nous avons pu mettre en évidence les atouts et les points faibles de cette technique innovante, le tout à la lumière des recommandations de l'ITRS.

Pour ce faire, nous avons tout d'abord mis en place une ligne pilote qui nécessite le contrôle de l'ensemble des étapes du procédé DSA. Ainsi, le choix des matériaux entrant dans la composition des motifs de guidage et en particulier ceux utilisés pour la fonctionnalisation des surfaces, va induire différents types d'intégration impliquant l'utilisation de différentes tailles de guide pour l'auto-assemblage. Les procédés « PS-affine » (hPS<sub>g</sub> greffé sur les parois et le fond des cavités) et « PMMA-affine » (pas de préparation de surface) se sont distingués comme étant les plus intégrables car ils sont faciles à mettre en œuvre et sont compatibles avec toutes les densités de motifs, contrairement au procédé « neutre » (copolymère statistique greffé en fond de cavité). Nous avons également vu l'importance d'utiliser le procédé de planarisation, développé au CEA Leti, afin de pallier au problème de dépendance du remplissage des cavités à la densité des motifs. L'intégration fixée, nous avons déterminé la méthodologie regroupant la métrologie de pointes et l'analyse statistique des résultats à toutes les étapes de l'intégration technologique qui nous permettent de différencier les différents procédés DSA. Pour cela, nous avons mis en place une routine de mesures à plusieurs échelles permettant de déterminer le procédé DSA qui sera notre référence. Ce travail a permis de réduire de près de 95 % le taux de défauts global sur les plaques analysées. L'étude d'une nouvelle métrologie autour de la mesure d'erreur de placement, non disponible au moment de ce travail de thèse, constitue un résultat à l'état de l'art qui est utilisé comme référence pour l'étude comparative des matériaux et des procédés au CEA Leti.

L'étude des différents procédés conduites sur le copolymère de référence (C35) a montré que le procédé « PS-affine » pour le « shrink de contact » donne les meilleures performances en termes d'uniformité de CD (1.2 nm soit 6.6 % du CD<sub>DSA</sub>) et d'erreur de placement (PE=0.8 nm, PE-3σ=1.2 nm), obtenues après une optimisation des paramètres du recuit d'auto-assemblage (2 min à 250 °C). Cependant, ce procédé nécessite des guides dont le CD est proche du bord de la fenêtre de procédé lithographie du 193. Nous avons donc modifié le matériau utilisé pour la fonctionnalisation de surface. En optant pour le greffage d'un hPS<sub>g</sub> de grande masse molaire, nous conservons le principe du procédé « PS-affine » tout en utilisant des CD de guide environ 12 nm plus grand que pour le procédé de référence. Les performances obtenues sont intermédiaires entre le procédé « PS-affine » et le procédé « PMMA-affine ».

Notre avons également étudié l'influence de la composition du copolymère à blocs sur les performances DSA. Ainsi, nous avons démontré, avec les outils de métrologie à notre disposition, que la présence d'hPS résiduel dans le mélange de copolymère dans une proportion autour de 3 %

ne modifie pas les performances lithographiques par rapport à un mélange plus pur (1 %). De même, la sensibilité de nos outils de mesures ne nous permet pas de détecter une variation significative des performances DSA avec l'utilisation de copolymères « blend » (mélange de copolymère de masses molaires différentes) par rapport au copolymère pur de même période intrinsèque. Cependant, ce type de mélanges permettrait de réaliser des recuits à plus basse température, ce qui diminuerait le temps global du procédé. Une étude autour de ces copolymères « blend » (variation des proportions du mélange, optimisation du recuit d'auto-assemblage) constituerait un complément permettant une amélioration potentielle des performances DSA.

Présentant les meilleurs résultats DSA et de défektivité à « grande échelle » (0 défaut détecté post-DSA sur 0.01 mm<sup>2</sup> inspecté), l'étude du procédé « PS-affine » avec le copolymère C35 a été conduite jusqu'au transfert des motifs DSA dans les couches sous-jacentes. Nous avons vu que le copolymère résiduel en fond de cavité bloquait en partie le transfert des motifs par gravure plasma, ce qui entraîne une inhomogénéité du transfert et une forte valeur de CDU des contacts. Une optimisation des paramètres de gravure a conduit à une nette amélioration du nombre de contacts transférés. Pour autant, un travail autour de la défektivité à grande échelle reste à mener afin de s'assurer que tous les contacts sont correctement transférés et une optimisation supplémentaire à faire pour obtenir une CDU dans les spécifications de l'TTRS. En perspective de ce travail, la mise en place d'un procédé DSA réduisant l'épaisseur de polymère résiduel en fond de cavité, comme par exemple l'utilisation d'une couche sous-jacente sans affinité préférentielle avec l'un des deux blocs, pourrait constituer une solution pour pallier au problème de transfert des motifs DSA.

L'application du procédé DSA aux VIA du C014 implique le respect de règles de dessins des motifs, en particulier en termes de pitch des motifs finaux (pitch=46 nm, 68 nm et 80 nm). Puisque les copolymères à blocs ne permettent d'adresser que les pitches autour de la période intrinsèque, nous avons étudié en parallèle du C35 le copolymère C43 dont la période intrinsèque s'approche du pitch visé 46 nm. De plus, notons ici que, in fine, les masque de lithographie 193i servant à la détermination des motifs de guides vont comporter à la fois des motifs pour le « shrink de contact » et pour le dédoublement. Il est donc nécessaire de trouver une intégration commune à ces deux applications pour que le procédé DSA soit considéré comme viable. Ce parallèle entre « shrink » et dédoublement doit donc être fait sur plusieurs critères. Nous devons prendre en compte la taille des fenêtres de procédés, le taux de contacts ouverts (HOY) et les performances en termes de CDU<sub>DSA</sub> (cf. [tableau 1](#)).

En résumé, la taille de fenêtre de procédé en « shrink » (environ 12 nm) et en dédoublement de contact (environ 15 nm pour l'axe mineur) est sensiblement la même dans le cas du procédé de référence (« PS-affine »). En perspective, la détermination plus précise de la largeur des fenêtres des procédés « PS-affine modifié » et « PMMA-affine » permettrait de compléter l'étude. De plus, les guides nécessaires aux deux applications avec l'approche « PS-affine » sont proches de la limite de résolution du 193i mais l'utilisation d'autres procédés détériore les performances DSA en termes de CDU et d'uniformité de PE. Il est à noter que, avec les méthodes de mesures utilisées, nous avons déterminé des valeurs d'erreur de placement dans les spécificités de l'TTRS (PE<2 nm). Enfin, le « shrink de contact » permet d'atteindre un taux d'ouverture des contacts de 100 %, ce qui n'a pas été observé sur le dédoublement de contact même si les valeurs obtenues s'en

approchent. Afin de mieux évaluer cette défektivité, il est donc nécessaire de poursuivre l'étude en incorporant des étapes d'inspection à plus grande échelle.

C43	Shrink				Dédoublément		
	PS-affine	PS-affine modifié	PMMA-affine		PS-affine	PS-affine modifié	PMMA-affine
Largeur fenêtre de procédé $\Delta$ (nm)	~12	-	-	$\Delta$ majeur (nm)	~35	~25	~30
				$\Delta$ mineur (nm)	~15 <sup>s</sup>	~15 <sup>s</sup>	~10 <sup>s</sup>
CD <sub>guide</sub> (nm)	45 – 50	57 – 62	65 – 70	CD <sub>guide_majeur</sub> (nm)	105.5	122.3	139.0
				CD <sub>guide_mineur</sub> (nm)	43.8	53.5	58.0
HOY (%)	100*	100*	100*	HOY (%)	99.8 <sup>▲</sup>	98.5 <sup>▲</sup>	96.6 <sup>▲</sup>
CD <sub>DSA</sub> (nm)	20.3	24.3	23.7	CD <sub>DSA</sub> (nm)	20.4	22.0	23.5
CDU <sub>DSA</sub> (nm)	6.9 <sup>¥</sup> (2.4 <sup>•</sup> )	7.0 <sup>¥</sup> (3.4 <sup>•</sup> )	7.1 <sup>¥</sup> (3.0 <sup>•</sup> )	CDU <sub>DSA</sub> (nm)	8.4 <sup>¥</sup>	10.7 <sup>¥</sup>	12.2 <sup>¥</sup>
Pitch (nm)	-	-	-	Pitch (nm)	44.5	49.8	50.3
Pitch - 3 $\sigma$ (nm)	-	-	-	Pitch - 3 $\sigma$ (nm)	5.1	6.4	6.1
PE (nm)	0.8	0.6	0.8	PE (nm)	-	-	-
PE - 3 $\sigma$ (nm)	1.3	2.2	2.3	PE - 3 $\sigma$ (nm)	-	-	-

<sup>s</sup> Les dimensions de guide permettant de mieux définir la fenêtre de procédé (guides plus larges et plus longs) ne sont pas disponibles sur les plaques.

\* statistique sur environ 700 contacts

<sup>▲</sup> statistique sur environ 1800 contacts DSA

• CDU wafer (3 $\sigma$  des moyennes par puce)

<sup>¥</sup> CDU all (3 $\sigma$  sur tous les contacts) dont la valeur est proche de la CDU wafer dans le cas du dédoublement de contacts

**Tableau 1 : Récapitulatif des performances DSA avec un copolymère C43 pour le « shrink » et le dédoublement de contacts.**

Quel que soit le copolymère utilisé, le pitch des contacts DSA est difficilement contrôlable (3 $\sigma$ =5 nm environ dans le meilleur des cas). Ce qui veut dire que bien que le procédé DSA permette la densification des motifs, le contrôle du placement des contacts dans le cas du dédoublement est un point bloquant, ce qui est moins le cas pour le « shrink » (PE autour de 0.8 nm). Ceci peut être résolu en partie par l'utilisation de guides de forme plus complexe comme démontré dans cette thèse. Les guides dits « peanut » contraignent davantage les chaînes de copolymères dans les cavités de guidage, ce qui diminue la mobilité des chaînes lors du recuit d'auto-assemblage. Le contrôle de l'organisation du copolymère en profondeur basé sur une observation en coupe des contacts et appuyé par des simulations 3D a confirmé les limitations liées à l'intégration du dédoublement de contacts avec des guides de forme elliptique.

En aparté, nous avons également comparé la variation du taux d'HOY en fonction du temps et de la température du recuit d'auto-assemblage pour le « shrink » et le dédoublement de contacts avec le copolymère C35. Nous avons démontré la différence de cinétique d'assemblage entre ces deux applications. Ainsi, nous avons mis en évidence la différence de cinétique d'assemblage entre ces deux applications : le HOY mesuré sur le dédoublement de contact est plus sensible aux variations de recuit que le « shrink ». En particulier, l'analyse des courbes en temps et en température montre qu'un recuit court à haute température permet une amélioration d'environ 11 % du HOY (2 min à 250 °C). Dans l'étude complète d'un masque comportant à la fois des motifs simples et complexes, l'assemblage dans les motifs complexes va être limitant.

Finalement, le DSA permet de réduire les dimensions de manière significative (de 45 nm post-gravure des guides définis par lithographie 193i à environ 15 nm post-transfert des motifs DSA dans la couche de TiN). La période intrinsèque du copolymère étant inférieure à la limite de lithographie 193i, le DSA est un outil remarquable pour la densification des motifs (pitch autour de 35 nm pour le C35).

En résumé, les résultats obtenus pendant ces travaux de thèse sont à l'état de l'art mais l'état de l'art actuel n'est pas suffisant pour considérer que le DSA est mature pour une industrialisation. Cependant, le DSA est une piste sérieuse à explorer pour les nœuds technologiques très avancés (sub-10 nm), en particulier en ce qui concerne l'utilisation des copolymères « high- $\chi$  », alliée à une lithographie de pointe (comme l'extrême UV par exemple).

# Contributions

## Publication en tant que premier auteur dans un journal avec revue :

**S. Bouanani**, R. Tiron, S. Bos, A. Gharbi, P. Pimenta Barros, J. Hazart, F. Robert, C. Lapeyre, A. Ostrovsky, C. Monget.

"Placement error in directed self-assembly of block copolymers for contact hole application", *J. Micro/Nanolith. MEMS MOEMS*. 15(2), 021407 (Apr 27, 2016) ; doi:10.1117/1.JMM.15.2.021407

## Publications en tant que co-auteur dans un journal avec revue :

A. Gharbi, R. Tiron, M. Argoud, G. Chamiot-Maitral, A. Fouquet, C. Lapeyre, P. Pimenta Barros, F. Delachat, S. Bos, **S. Bouanani**, X. Chevalier, C. Nicolet, C. Navarro, I. Cayrefourcq, L. Pain.

"Process highlights to enhance directed self-assembly contact patterning performances", *J. Micro/Nanolith. MEMS MOEMS*. 15(4), 043503 (2016) ; doi: 10.1117/1.JMM.15.4.043503

## Publications en tant que co-auteur dans un journal de conférence (« proceedings ») :

R. Tiron, A. Gharbi, P. Pimenta Barros, **S. Bouanani**, C. Lapeyre, S. Bos, A. Fouquet, J. Hazart, X. Chevalier, M. Argoud, G. Chamiot-Maitral, S. Barnola, C. Monget, V. Farys, S. Bérard-Bergery, L. Perraud, C. Navarro, C. Nicolet, G. Hadziioannou, G. Fleury.

"Template affinity role in CH shrink by DSA planarization", *Proc. SPIE 9423, Alternative Lithographic Technologies VII*, 942317 (March 19, 2015) ; doi:10.1117/12.2085819

## Conférences internationales :

*Contact hole shrink by directed self-assembly of block copolymers: a pattern placement control study*, **S. Bouanani**, R. Tiron, S. Bos, A. Gharbi, P. Pimenta Barros, J. Hazart, F. Robert, C. Lapeyre, A. Ostrovsky, X. Chevalier, C. Monget, *European Materials Research Society (E-MRS)*, May, 2015, Lille, France.

*Directed self-assembly of block copolymers: a commensurability study using elliptical guiding patterns for contact multiplication*, **S. Bouanani**, R. Tiron, A. Gharbi, S. Bos, P. Pimenta Barros, F. Robert, C. Lapeyre, X. Chevalier, A. Ostrovsky, C. Monget, *42<sup>nd</sup> Micro and Nano Engineering (MNE)*, September, 2016, Vienna, Austria.

*Lithographic performances evaluation of directed self-assembly of block copolymers for shrink and doubling contacts*, **S. Bouanani**, R. Tiron, A. Gharbi, S. Bos, P. Pimenta Barros, F. Robert, C. Lapeyre, L. Pain, I. Cayrefourcq, A. Ostrovsky, C. Monget, *2<sup>nd</sup> DSA Symposium*, October, 2016, Grenoble, France.

*Template affinity role in contact shrink by DSA planarization*, A. Gharbi, R. Tiron, M. Argoud, P. Pimenta Barros, S. Bos, G. Chamiot-Maitral, I. Servin, A. Fouquet, J. Hazart, X. Chevalier, C. Navarro, C. Nicolet, **S. Bouanani**, C. Lapeyre, *1<sup>st</sup> DSA Symposium*, October 2015, Leuven, Belgium.

*Process highlights to enhance DSA contact patterning performances*, A. Gharbi, R. Tiron, M. Argoud, G. Chamiot-Maitral, A. Fouquet, C. Lapeyre, P. Pimenta Barros, A. Sarrazin, I. Servin, F. Delachat, S. Bos, S. Bérard-Bergery, J. Hazart, X. Chevalier, C. Nicolet, C. Navarro, I. Cayrefourcq, **S. Bouanani**, C. Monget, *Alternative Lithographic Technologies VIII (SPIE)*, February, 2016, San Jose, California, United States.

*Graphoepitaxy DSA Process Versatility: Template Affinity Role*, M. Argoud, A. Gharbi, G. Claveau, F. Delachat, P. Pimenta Barros, G. Chamiot-Maitral, **S. Bouanani**, C. Lapeyre, R. Tiron, C. Nicolet, X. Chevalier, C. Navarro, A. Erdmann, P. Michalak, T. Fühner, *the Society of Photopolymer Science and Technology (SPST)*, June, 2016, Chiba, Japan.

**Titre de la thèse :** Vers l'industrialisation de l'auto-assemblage dirigé des copolymères à blocs : développement de procédés de lithographie compatibles avec les nœuds technologiques sub-10 nm pour des applications de type contacts

**Résumé :**

La course à la compétitivité que se disputent les industriels du semi-conducteur implique d'augmenter le nombre de fonctionnalités par puce ainsi que de réduire leur coût unitaire, ce qui se traduit par une diminution continue de leur taille. Pour ce faire, le DSA (Directed Self-Assembly), ou auto-assemblage dirigé des copolymères à blocs associe les techniques de lithographie conventionnelle avec les propriétés d'organisation à l'échelle moléculaire des copolymères. Dans ce cadre, l'objectif global de cette thèse est d'évaluer le potentiel d'industrialisation du DSA par grapho-épitaxie pour des applications de type « shrink » et « multiplication » de contacts. Il s'agit en particulier de démontrer la capacité de cette technique à répondre au cahier des charges de l'ITRS en termes d'uniformité de CD, de désalignement et de taux de défauts. Une première étude concernant le « shrink de contact », basée sur l'impact des propriétés matériaux, d'affinité de surface et de tailles de guides permet de comprendre les mécanismes qui rentrent en jeu dans l'apparition de défauts d'assemblage. Une seconde partie de l'étude porte sur la multiplication de contact. Pour adresser cette application, deux types de guides ont été étudiés : les guides elliptiques et les guides complexes dits « peanut ». L'étude de la fenêtre de procédé en termes de paramètres procédé comme le temps et la température de recuit, mais aussi de commensurabilité, a été menée. Une attention particulière a été portée sur l'impact de la variation du guide sur le pitch final obtenu en DSA, dont les données expérimentales ont été corrélées avec des résultats de simulation. Les critères de réussite sont basés sur les performances lithographiques qu'il faut juger à travers une métrologie de pointe. Le développement d'une métrologie spécifique pour mesurer l'erreur de placement des contacts ainsi que leur pitch a été conduite.

**Mots clefs :** auto-assemblage, copolymère à bloc, lithographie, métrologie, DSA

---

**Title:** Towards the industrialization of directed self-assembly of block copolymers: development of lithographic processes compatible with sub-10 nm technology nodes for contact applications

**Abstract:**

The competitiveness-chasing in which industrial manufactures are involved, leads to an exponential increase in the number of functionalities per chips, as well as reducing their unit cost, which results in a continuous decrease of their size. To achieve this, DSA (Directed Self-Assembly) of block copolymers, combines conventional lithography techniques with the molecular-scale organizational properties of copolymers. In this framework, the overall objective of this thesis is to evaluate the industrialization potential of the DSA process by graphoepitaxy for contact hole shrink and contact multiplication applications. In particular, it is necessary to demonstrate the ability of this technique to meet the ITRS specifications in terms of CD uniformity, misalignment and hole open yield. A first study on contact shrink, based on the impact of material properties, surface affinity and guiding feature size, allows us to understand the mechanisms involved in the appearance of defects. A second part of the study deals with contact multiplication. To address this application, two types of guides have been studied: elliptical guiding patterns and more complex ones called "peanut". The study of the process window in terms of process parameters such as annealing time and temperature, but also commensurability was conducted. Particular attention was paid to guide size variation and its impact on DSA final pitch. Experimental data from this study were correlated with simulations. The success criteria are based on the lithographic performances that must be judged through advanced metrology. The development of a specific metrology to measure the placement error of contacts as well as their pitch was conducted.

**Keywords:** self-assembly, block copolymer, lithography, metrology, DSA