



HAL
open science

Solution générique pour l'adressage matriciel de micro-actionneurs thermiques et optimisation de micro-sources thermiques

Maxime Dumonteuil

► **To cite this version:**

Maxime Dumonteuil. Solution générique pour l'adressage matriciel de micro-actionneurs thermiques et optimisation de micro-sources thermiques. Micro et nanotechnologies/Microélectronique. Université Paul Sabatier - Toulouse III, 2006. Français. NNT: . tel-00135620

HAL Id: tel-00135620

<https://theses.hal.science/tel-00135620>

Submitted on 8 Mar 2007

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

Préparée au

Laboratoire d'Analyse et d'Architecture des Systèmes du CNRS

En vue de l'obtention du

Doctorat de l'Université Paul Sabatier - Toulouse III

Spécialité : **Electronique**

Par

M DUMONTEUIL

Solution générique pour l'adressage matriciel de
micro-actionneurs thermiques et optimisation de
micro-sources thermiques

Soutenue le 24 février 2006 devant le jury :

Président

T. PARRA

Rapporteurs :

JC.BATSALE

J.SAMITIER

Directeurs de thèse :

T.CAMPS

Examineur :

R.CARIN

M.PUIG VIDAL

*A Pierre- Jacques, Brigitte, Camille et Stéphanie
Et à Marc mon grand- père*

J'exprime mes profonds remerciements à mon directeur de thèse, Thierry CAMPS pour l'aide compétente qu'il m'a apportée, pour sa patience et son encouragement tout au long de ce travail commencé il y a maintenant plus de trois ans. Son oeil critique m'a été très précieux pour structurer ce travail et pour en améliorer la qualité.

Je remercie Messieurs LAPRIE et GHALLAB, directeurs successifs du Laboratoire d'Analyse et d'Architecture des Systèmes du CNRS de Toulouse pour m'avoir permis de réaliser cette thèse en ces lieux. Je remercie aussi les responsables successifs de l'école doctorale GEET, Messieurs MARTINEZ et GRAFFEUIL, pour leur engagement dans notre formation doctorale.

Je remercie également Anne Marie GUE qui m'a accueilli dans le groupe Microsystème et Intégration de Système dont elle est responsable, et avec qui j'ai eu la chance de travailler durant une partie de ces travaux.

Je souhaiterais aussi remercier les rapporteurs Messieurs BATSALE et SAMITIER qui ont accepté de se plonger dans ce sujet, ainsi que les autres membres du jury, Messieurs PARRA et CARIN, pour avoir parfaitement rempli leur rôle d'analyse scientifique, et fait de cette soutenance un moment particulièrement intéressant.

Je tiens tout particulièrement à remercier Alain CAZARRE pour l'ensemble des démarches qu'il a effectué pour me permettre de rentrer dans un cursus universitaire. Je tiens aussi tout particulièrement à remercier ma très chère voisine Chantal FONTAINE qui a fortement influencé mes choix d'orientation, et sans qui je n'aurai jamais découvert le monde (merveilleux) de la recherche.

Il me reste à remercier les personnes avec qui j'ai travaillé durant ces années, notamment Carole ROSSI qui avait en charge le projet Micropyros. Ensuite viennent les personnes côtoyées en salle blanche, dont les portes m'ont été ouvertes par Norbert FABRE. Je pense tout particulièrement à Véronique CONEDERA avec qui ce fut un plaisir de travailler, ainsi que David BOURIER pour m'avoir si souvent « sauvé en salle », Ludovic SALVAGNAC, Bernard ROUSSET, Laurent BOUSQUEROL, Laurent MAZENQ, Monique DILHAN, Laurent JALABERT, David COLIN et Pierre François CALMON. Je pense aussi à Jean Christophe MARROT et Hugues GRANIER qui ont supporté sans perdre leur bonne humeur tout ce que je leur ai demandé lors de mes différents process. Enfin d'une manière générale je remercie l'ensemble du service TEAM qui m'a permis de travailler dans de si bonnes conditions et toujours dans la bonne humeur !

Enfin je tiens à remercier tous ceux qui ont fait de ces quelques années une si bonne expérience, David JUGIEU avec qui ce fut un réel plaisir de travailler, Alexandre MARCHESE qui a gentiment mis sa thèse en stand-by pour me laisser l'honneur d'être le premier du bureau à soutenir ! Qu'il se rassure, c'est chose faite, il peut désormais s'y remettre ! Je n'oublie pas tous ceux que j'ai eu la chance de rencontrer grâce à mon séjour au LAAS : Ghislain et Emilie, Christian et le destin qui l'a pris sous (dans) son aile, Sabine et son chat, Olive et Gaëlle, JB et Virginie, David et le PSG, Rodolphe et Marlène, Nico et Aurélie. Reste celui qui a partagé tant de pauses clope et café avec moi, et qui a su garder sa légendaire nonchalance malgré tout ce que j'ai pu lui faire subir. Un grand merci à Nicolas et à travers lui à Anne et au petit Paul, qui espérons le héritera de toutes les qualités de son père mais pas de son implantation capillaire....

Et enfin merci à ma famille, et surtout à celle qui m'a supporté et me supporte encore.

Sommaire

Introduction générale.....	3
Chapitre I: Micro-sources thermiques et solutions pour l'adressage matriciel.....	3
I.1 Champ d'application des micro-sources thermiques:	4
I.1.1 Capteurs de gaz.....	4
I.1.2 Micro-actionneurs thermiques	7
I.1.3 Micro-fluidique : les micro-éjecteurs de gouttes	10
I.1.4 Micro-initiateur pyrotechnique.....	12
I.2 Adressage matriciel :.....	14
I.2.1 Approche multipolaire (transistors à couches minces)	15
I.2.2 Approche dipolaire.....	18
I.2.2.1 Eléments à seuils asymétriques.....	18
I.2.2.2 Eléments à seuils symétriques	19
I.3 Notre positionnement et applications visées.....	20
Chapitre II: Réalisation de matrices adressables à l'aide d'éléments à seuils asymétriques	24
II.1 Présentation du projet Micropyros et de l'actionneur pyrotechnique	25
II.2 Evaluation de la sensibilité des performances globales de la matrice.....	26
II.3 Réalisation de matrices adressées à l'aide de diodes silicium.....	30
II.3.1 Présentation du procédé de fabrication compatible avec le procédé de réalisation des initiateurs à résistances polysilicium diffusé.....	30
II.3.2 Process I	31
II.3.2.1 Description du Process I.....	31
II.3.2.2 Présentation des structures réalisées avec le process I.....	32
II.3.3 Process II	33
II.3.3.1 Description du Process II	33
II.3.3.2 Présentation des structures réalisées avec le process II.....	33
II.3.4 Process III	35
II.3.4.1 Augmentation de la tenue en tension :.....	36
II.3.4.2 Diminution du bilan thermique et description du Process III:	37
II.3.4.3 Présentation des structures réalisées avec le process III.....	38
II.4 Bilan des réalisations à base de diodes PN Silicium.....	38
Chapitre III: Nouvelle approche pour l'adressage matriciel à l'aide d'éléments à seuils symétriques	41
III.1 Etude théorique de l'adressage à base de dipôles à seuils symétriques	42
III.2 L'élément à seuils symétriques.....	47
III.2.1 Le Polysilicium.....	48
III.2.2 Méthode de dépôt du polysilicium.....	48
III.2.3 Dopage du polysilicium.....	49

III.2.3.1 Dopage in situ :.....	49
III.2.3.2 Dopage par diffusion :.....	50
III.2.3.3 L'implantation ionique :.....	50
III.2.4 Caractérisation des couches et des contacts polysilicium.....	51
III.2.4.1 Méthode de caractérisation.....	51
III.2.4.2 Etude sur la résistivité du polysilicium dopé par implantation.....	52
III.2.4.3 Contacts Métal / polysilicium.....	54
III.2.5 Jonctions PN polysilicium	55
III.2.5.1 Etude théorique d'une jonction PN dans du polysilicium	55
III.2.5.2 Simulation technologique sous Athéna du process.....	56
III.3 Réalisation de matrices adressables à base d'éléments à seuils symétriques.....	59
III.3.1 Process générique de fabrication de l'élément à seuils symétriques.....	59
III.3.2 Matrices adressables de 10x10 micro-propulseurs pyrotechniques.....	60
III.3.3 Adressage d'une matrice de 8x8 micro-éjecteurs sur membrane suspendue	64
III.3.3.1 Présentation du procédé de fabrication.....	64
III.3.3.2 Résultats de la caractérisation électrique des Micro-éjecteurs.....	69
III.4 Bilan des réalisations à base d'éléments à seuils symétriques.....	73
Chapitre IV: Optimisation des éléments à seuils symétriques pour l'adressage et applications pour la réalisation de micro-sources thermiques configurables.	75
IV.1 Dimensionnement des éléments à seuils symétriques.....	76
IV.1.1 Contrôle de la résistance série des éléments à seuils symétriques.	77
IV.1.2 Ajustement de la tension de seuil.....	79
IV.1.2.1 Tension de claquage de la diode PN en polysilicium	79
IV.1.2.2 Ajustement de la tension de seuil globale d'un ESS	80
IV.2 Limites de l'adressage matriciel à base d'éléments à seuils symétriques.....	81
IV.3 Optimisation d'une micro-source de chaleur	84
IV.4 Simulations thermiques pour évaluer trois types d'éléments chauffants.....	85
IV.4.1 Définition du motif et des structures simulées	85
IV.4.2 Résultats de simulation	88
IV.4.2.1 Élément chauffant sur substrat Si Massif.....	88
IV.4.2.2 Élément chauffant localement suspendu (pont à air).....	90
IV.4.2.3 Structure sur membrane totalement suspendue	92
IV.4.2.4 Synthèse des résultats obtenus sur les trois structures	95
IV.5 Caractérisation en température.....	96
IV.5.1 Résistance globale :.....	96
IV.5.2 Variation de la tension de seuil :.....	97
IV.6 Electroluminescence du polysilicium implanté Bore	99
IV.7 Utilisation des jonctions pour la création de nouvelles fonctions électriques et thermiques.....	100
IV.8 Bilan des travaux d'optimisation électriques et thermiques des ESS.....	103
Conclusion générale.....	109

Table des Figures

Figure I-1 : a) Monocapteur MSGS (doc. Microsens), b) coupe de l'élément sensible.	5
Figure I-2 : Schéma électrique équivalent.	6
Figure I-3 : Capteur de gaz à élément chauffant en polysilicium.	7
Figure I-4: Micro actionneur à membrane.	8
Figure I-5 : Micro actionneur de type bilame en coupe (a) et classique vue de dessus (b).	9
Figure I-6 : Nouvelle génération de micro actionneur thermique.	9
Figure I-7 : Vue schématique d'un micro-éjecteur de gouttes.	11
Figure I-8 : Vue schématique d'un micro-propulseur à initiation par la face arrière.	13
Figure I-9 : Vue schématique en coupe d'un micro-propulseur Micropyros.	13
Figure I-10 : Comparaison entre adressage direct (vectoriel) et adressage matriciel.	14
Figure I-11 : Vue en coupe d'un transistor à couche mince.	15
Figure I-12 : Cellule élémentaire et schéma équivalent.	16
Figure I-13 a) structure de la matrice de photodiodes, b) électronique associée.	17
Figure I-14 : Cellule élémentaire d'une matrice d'obturateurs.	17
Figure I-15 : Fonctionnement d'une matrice à diodes.	18
Figure I-16 : Schéma électrique et caractéristique I(V) d'un élément à seuils symétriques (ESS).	19
Figure I-17 : Eléments à seuils symétriques.	20
Figure II-1 : Vue en coupe schématique d'un micro-propulseur.	25
Figure II-2 : Dimensions du micro-propulseur élémentaire.	26
Figure II-3 : Fonctionnement d'une matrice à diodes.	27
Figure II-4 : Schéma électrique équivalent à une matrice à base de diodes	28
Figure II-5 : Evolution du rendement en fonction du courant de fuite.	29
Figure II-6 Evaluation des performances d'une matrice 10x10 à éléments redresseurs ($I_{Sat}=10\mu A$)	29
Figure II-7: Structure d'un élément chauffant, et photographie d'une réalisation	30
Figure II-8 : Matrice de 16x16 initiateurs thermiques a) et détail des cellules b).	32
Figure II-9 : Nouveau profil des dopages dans la diode visés lors de la réalisation du process II.	33
Figure II-10 : Caractéristique courant/tension de la cellule élémentaire (R+D).	34
Figure II-11 : Caractéristique de la diode en inverse.	34
Figure II-12 : Via de croisement ligne/colonne.	34
Figure II-13 : Plots de métal sur le polysilicium passivé par le Si ₃ N ₄ .	35
Figure II-14 : Détail de la diode du process II.	35
Figure II-15 : Design de la cathode.	36
Figure II-16 : a) Masquage résine avant implantation d'anode, b) Matrice d'éléments chauffants à adressage par diodes PN silicium.	38
Figure III-1 : Symbole, schéma électrique équivalent et caractéristique I(V) d'un élément à seuils symétriques	42
Figure III-2 : Adressage matriciel dipolaire à seuils symétriques, cellule (1,1) sélectionnée.	43
Figure III-3 : Schéma électrique équivalent d'une matrice à base d'ESS et caractéristiques de la cellule sélectionnée et du circuit parasite	44
Figure III-4 : Evaluation des performances d'une matrice de 10x10 à éléments à seuils symétriques	45
Figure III-5 : Evolutions des tensions aux bornes des éléments de chaque groupe de la matrice, en fonction de la tension appliquée à la cellule sélectionnée.	46
Figure III-6 : Evolutions des performances électriques avec ($I_{Sat}= 50nA$)	47
Figure III-7 : Structure d'un ESS réalisé en polysilicium et schéma électrique équivalent	47
Figure III-8 : Evolution de la résistance par carré du polysilicium en fonction du dopage	54
Figure III-9 : Contacts Métal / Polysilicium a) contacts Schottky $N_A=N_B= 5.10^{18}at/cm^3$, b) contacts ohmiques $N_A=N_B =10^{20} at/cm^3$	55
Figure III-10 : Influence de l'encapsulation sur le niveau de dopage de la couche de polysilicium: avant a) et après b) le recuit d'activation.	57
Figure III-11 : a) Implantation de Bore dans le polySilicium dopé Arsenic, b) Implantation d'Arsecenic dans le polySilicium dopé Bore, c) diffusion latérale résultante.	58
Figure III-12 : Processus générique de fabrication d'ESS	59
Figure III-13 : Structure des micro-actionneurs pyrotechniques du projet Micropyros.	61
Figure III-14 : Exemples de réalisation d'éléments chauffants	61
Figure III-15 : Caractéristiques courant tension de 15 éléments au sein d'une matrice de 8x8 éléments pour les quatre types de motifs.	62
Figure III-16 : Matrice d'initiateurs pour micro-actionneurs pyrotechniques, a) vue du dessus de la matrice, b) vue de la face arrière.	63

Figure III-17 : Test IR d'adressage	63
Figure III-18 : Processus standard d'initiateur diffusé.	65
Figure III-19 : Description des étapes supplémentaires par rapport au process initial	66
Figure III-20 : Différents motifs sur le masque d'implantation localisée permettant de faire varier le nombre de diode au sein de chaque cellule, a) 1 diode, b) 2 diodes, c) 3 diodes.	66
Figure III-21 : Structure à 3 jonctions en série, a) Résine de masquage d'implantation, b) Structure correspondante avant métallisation finale.	67
Figure III-22 : Matrices Implanté/implanté avec un niveau de métallisation	67
Figure III-23 : Vue au microscope de la diffusion latérale dans les zones implantées	67
Figure III-24 : Eléments en polysilicium avant diffusion/activation avec le masque d'oxyde, n'ayant subi qu'une implantation pleine plaque de type P.	68
Figure III-25 : Vue de la matrice utilisant deux niveaux de métallisation et vue d'un croisement ligne/colonne.	68
Figure III-26 : Vue du wafer après gravure plasma DRIE.	69
Figure III-27 : Vue d'une matrice complète avec ses buses d'éjection en SU-8	69
Figure III-28 : Caractéristique I (V) des vecteurs comportant une barrette P.	70
Figure III-29 : Caractéristique I (V) des vecteurs comportant deux barrettes P.	70
Figure III-30 : Caractéristique I (V) des vecteurs comportant trois barrettes P	71
Figure III-31 : Motifs de polysilicium avec les nouveaux masques de SiO ₂	71
Figure IV-1 : Gabarit Courant / Tension pour une puissance donnée.	76
Figure IV-2 : Evolution de la résistance par carré d'une couche de 0,5µm de polysilicium	77
Figure IV-3 : Motif de test de la limite de conduction en courant.	78
Figure IV-4 : a) élément chauffant classique de micro-éjecteur, b) nouvel élément chauffant	79
Figure IV-5 : a) Evolution de la tension de seuil, b) Influence sur la résistance série.	80
Figure IV-6 : a) Motif de test, b) Evolution de la tension de seuil en fonction du nombre de barrettes	81
Figure IV-7 : Matrice adressable de 32x32 ESS	82
Figure IV-8 : Test électrique et validation de l'adressage de puissance par visualisation de l'élément sélectionné.	82
Figure IV-9 : Caractéristique d'une cellule sélectionnée, courbe grise dans une matrice 8x8, courbe noire dans une matrice 32x32.	83
Figure IV-10 : a) motif de test pour la caractérisation du courant parasite d'une matrice 8x8, b) caractéristique associée.	84
Figure IV-11 : Répartition de la puissance dissipée dans un ESS par effet résistif et au niveau des jonctions.	84
Figure IV-12 : Géométrie de la structure simulée.	86
Figure IV-13 : Description des structures retenues, A : structure sur substrat massif,; B structure dite à pont à air, C structure sur membrane.	87
Figure IV-14 : Vue 3D du quart de la structure C.	87
Figure IV-15 : Localisation des températures relevées sur l'élément chauffant.	87
Figure IV-16 : Simulation thermique de la structure A, sur silicium massif.	89
Figure IV-17 : Simulation thermique de la structure B, localement suspendue.	91
Figure IV-18 : Simulation thermique de la structure C, sur membrane totalement suspendue.	95
Figure IV-19 : Caractéristique d'un ESS à différentes températures entre 38°C et 150°C.	96
Figure IV-20 : Influence de la température sur la résistance série d'un ESS.	97
Figure IV-21 : influence de la température sur la caractéristique courant/tension sous le seuil.	98
Figure IV-22 : Observation de l'émission de lumière le long du profil d'une jonction interdigitée, a) dessin du motif réalisé, b) image en couleurs inversée.	99
Figure IV-23 : Observations de l'émission de lumière au niveau d'une jonction PN en inverse, image obtenues à l'aide du caméra standard, couleurs inversées.	100
Figure IV-24 : Motifs de test, a) Structure A :Zone chauffante extensible de droite à gauche, b)Structure B : Zone chauffante extensible du centre vers l'extérieur.	101
Figure IV-25 : Caractéristique I(V) simulée(a) et mesurée (b) pour la structure A.	102
Figure IV-266 : a) Elément de test de type structure B , b) visualisation du fonctionnement par camera standard.	102

Introduction Générale

Les micro-sources de chaleur ont trouvé place dans des domaines d'applications aussi variés que les capteurs de gaz, le monde grandissant des micro-actionneurs et celui en pleine expansion de la micro-fluidique. Parallèlement, les techniques de fabrication de MEMS (Micro Electro Mechanical Systems) ont atteint un niveau de maturité rendant possible l'intégration de grandes quantités d'éléments sur une même puce. Des solutions d'adressage ont dès lors dû être mises en place afin de palier les problèmes liés aux interconnexions (complexité grandissante et limites associées). Diverses méthodes d'adressage sont apparues, permettant d'actionner de manière individuelle un élément sélectionné au sein d'une matrice d'éléments.

De nombreux domaines requérant l'utilisation de micro-sources de chaleur se voient confrontés à la multiplication des éléments à réaliser au sein d'un même système. Ainsi, au LAAS, deux projets ont nécessité le développement d'une méthode simple d'adressage matriciel, spécifique au domaine des micro-sources de chaleur et étant compatible avec une réalisation sur membrane suspendue. Tout d'abord le projet européen Micropyros a mené à la réalisation de matrices de micro-actionneurs pyrotechniques. Ces structures intègrent un étage d'initiation composé d'une multitude d'éléments chauffants, partiellement réalisés sur membrane. En plus d'une solution propre à ce projet, nous avons développé une méthode originale et générique qui a ensuite été employée dans le cadre du projet de matrices de micro-éjecteurs thermiques adressables individuellement pour la fonctionnalisation de bio-puces. Ce second projet, plus sensible du fait de ses dimensions réduites, nous a permis de pleinement valider notre méthode innovante d'adressage, basée sur des éléments à seuils symétriques.

La mise au point de cette méthode a nécessité pas moins de sept jeux de masques et des dizaines de plaques processées dans la centrale de technologie du LAAS. La réalisation d'éléments à seuils symétriques en polysilicium nous a conduit à mettre en place une campagne d'étude de ce matériau et de ses principales caractéristiques. Les résultats obtenus ont permis de mettre en avant des possibilités nouvelles, notamment pour l'amélioration d'éléments chauffants existants. En parallèle, cela nous a mené à envisager une stratégie de conception générique pour la réalisation de matrices de micro-sources de chaleur.

Lors des caractérisations des structures réalisées, nous avons pu mettre en avant des comportements pouvant présenter des intérêts dans des domaines autres que la thermique. Ainsi, de l'électroluminescence a été observée, et de nouvelles fonctions électriques, exploitant nos éléments à seuils symétriques, ont été réalisées.

Le premier chapitre présente tout d'abord les principaux domaines d'utilisations des micro-sources de chaleur, fait un inventaire, non exhaustif, des utilisations possibles ainsi que de leurs caractéristiques associées. Les méthodes d'adressage existantes sont, elles aussi, abordées. Ce rapide tour d'horizon nous permet de préciser notre positionnement, ainsi que les applications visées.

Dans le deuxième chapitre, une première solution propre au projet Micropyros, concernant la réalisation de matrice adressable de micro-propulseurs pyrothermiques, est largement exposée. Après avoir mené une étude théorique de la méthode d'adressage par diodes PN réalisées dans le silicium, les processus technologiques de fabrication successivement mis en œuvre sont amplement décrits. Enfin, les résultats de la caractérisation des composants fabriqués seront présentés.

Le troisième chapitre aborde notre méthode originale d'adressage à l'aide de dipôle à seuils symétriques et souligne l'intérêt de cette solution pour la réalisation de matrices de micro-sources thermiques. Nous présentons alors les réalisations technologiques relatives à deux projets : matrice de micro-propulseur et matrice d'éjecteur de gouttes. Les caractérisations électriques et thermo-graphiques des dispositifs réalisés, permettent de valider la fonctionnalité notre approche novatrice et souligne son caractère générique permettant de répondre à des contraintes distinctes propre aux deux applications visées.

Le quatrième chapitre porte sur le développement et l'optimisation du procédé de fabrication générique présenté au chapitre précédent. Nous montrons comment contrôler les différents paramètres électriques mais aussi thermiques, afin de pouvoir répondre à tout type d'applications. D'autres aspects intéressants, tels que la détection en température et l'électroluminescence seront également abordés.

Nous concluons sur les résultats obtenus en utilisant cette méthode d'adressage matriciel et les limites de son utilisation seront discutées.

Chapitre I: Micro-sources thermiques et solutions pour l'adressage matriciel

Afin d'aborder la problématique générale à laquelle cherchent à répondre nos réalisations et d'approcher le vaste champ des applications en lien avec notre sujet d'étude, nous allons dans un premier temps effectuer une revue non exhaustive des applications intégrant des micro-sources thermiques. La variété des domaines d'applications tels que les capteurs de gaz, le monde grandissant des micro-actionneurs et celui en pleine expansion de la micro-fluidique tendent à montrer la multitude d'applications envisageables pour de telles réalisations. Sans prendre en compte les méthodes d'obtention de ces micro-sources de chaleur, nous détaillerons successivement les principales caractéristiques nécessaires à chaque champ d'applications.

La deuxième partie de ce chapitre sera consacrée aux solutions apportées pour adresser individuellement des capteurs ou actionneurs arrangés matriciellement. Les deux principales familles de méthode d'adressage matriciel seront détaillées et nous présenterons succinctement les principes de fonctionnement ainsi que les principaux avantages et inconvénients de chaque solution. Les modes d'adressage les plus en adéquation avec les champs d'application visés seront en effet détaillés au long des chapitres suivants.

Nous finirons enfin ce premier chapitre par la présentation des applications supports de nos études. Le projet Micropyros visant à la réalisation de micro-actionneurs pyrotechniques sera introduit, de même que le projet de matrices de micro éjecteurs pour des puces à ADN. Cette brève introduction, ainsi que les contraintes relatives à chaque projet nous mèneront à expliciter nos axes de recherche et ce, pour chacune des deux solutions explorées à savoir :

- La réalisation de l'adressage matriciel d'éléments chauffants polysilicium par des diodes silicium
- l'adressage matriciel par des éléments chauffants polysilicium intégrant l'élément à seuil nécessaire à l'adressage.

1.1 Champ d'application des micro-sources thermiques:

Les micro-sources thermiques sont présentes dans de nombreuses applications et tout particulièrement dans les micro-capteurs où le contrôle de la température permet d'ajuster et de maintenir la sensibilité de détection constante. Elles présentent aussi un grand intérêt pour les micro-systèmes électromécaniques appelés MEMS (Micro Electro Mechanical Systems), où elles sont à la base de plusieurs principes d'actionnement thermomécanique. Nous allons donc dans un premier temps présenter les différents champs d'applications de ces micro-sources thermiques.

1.1.1 Capteurs de gaz

Trois grandes familles de micro-capteurs permettent d'identifier et de quantifier certaines espèces chimiques gazeuses:

- Une première famille est basée sur la réaction chimique du composé gazeux avec la surface du capteur dont il résulte une nouvelle espèce chimique. Si cette espèce chimique s'intègre dans une chaîne ionique, il en résulte une variation de potentiel proportionnelle à la quantité de gaz ayant réagi. En revanche, si la réaction chimique est exothermique ou endothermique, c'est alors la mesure de la quantité de chaleur mise en jeu qui est significative de la quantité de gaz ayant réagi.

- Une seconde famille fait appel à l'absorption physico-chimique à la surface du capteur et la modification d'une grandeur physique de cette couche sensible est alors aisément mesurée. Le plus souvent, on mesure l'évolution de la résistivité du matériau mais parfois c'est plus simplement la variation de masse de l'élément sensible.

- Enfin une troisième famille est basée sur les propriétés thermiques du gaz à identifier. Pour cela, un élément résistif semi-conducteur est chauffé : soit à température constante et la quantité d'énergie utilisée est significative de l'environnement du capteur, donc de la conductibilité thermique du gaz en contact avec le capteur, soit à énergie constante et c'est alors la variation de température qui est significative.

C'est souvent une combinaison des grands principes énoncés ci-dessus qui est mise en œuvre dans les micro-capteurs chimiques. Il en résulte une très grande variété des éléments sensibles et des transducteurs utilisés. La technologie la plus répandue est basée sur des films résistifs à base d'oxydes métalliques sur support céramique. Cette technologie, proposée par Taguchi ^[1], fut commercialisée dès 1968 par la compagnie japonaise Figaro Inc. L'idée fondamentale de Taguchi est qu'une couche poreuse d'un oxyde métallique

(semi-conducteur), déposée sur un substrat diélectrique chimiquement neutre (céramique), voit ses propriétés conductrices affectées sensiblement en présence d'une faible concentration de gaz oxydant ou réducteur. En effet, les gaz oxydants génèrent des états de surface accepteurs dans le semi-conducteur (oxyde métallique) et les gaz réducteurs provoquent au contraire des états donneurs. Il s'agit en fait d'exacerber ces phénomènes de surface qui, dans les composants électroniques classiques, sont considérés comme des mécanismes parasites souvent indésirables.

Aujourd'hui, le principe proposé par Taguchi a été adopté par nombre des constructeurs qui l'ont mis en oeuvre en y ajoutant des concepts de nanotechnologie.

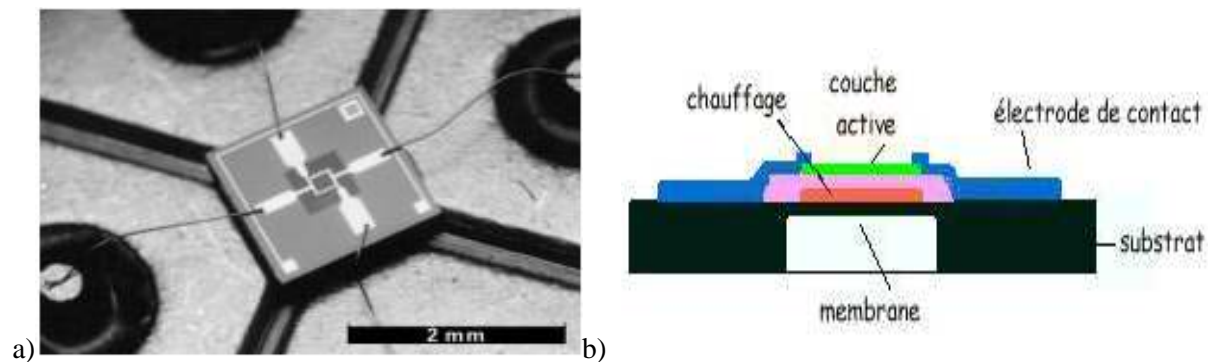


Figure I-1 : a) Monocapteur MSGS (doc. Microsens), b) coupe de l'élément sensible.

Ainsi, les capteurs de la famille MSGS, présentés sur la Figure I-1, sont typiquement des capteurs sur substrat de Silicium micro-usiné. Comme montre la vue en coupe de ce type de dispositif (Figure I-1.b), on retrouve l'élément sensible, constitué d'une couche mince d'oxyde métallique semi-conducteur ($\text{SnO}_2\text{-Nb}_2\text{O}_5$) déposée sur une membrane de diélectrique en SiO_2 de $0.8\mu\text{m}$ d'épaisseur dans la zone sensible, sur laquelle est intégré un système de chauffage en platine. Grâce à la finesse de cette membrane, la couche sensible est quasiment isolée thermiquement du reste du substrat de silicium, ce qui limite considérablement la puissance électrique nécessaire à l'obtention d'une température de fonctionnement convenable ($>400^\circ\text{C}$).

Parfois, pour des considérations de robustesse mécanique, on préfère une membrane en silicium à la membrane diélectrique jugée trop fragile. Afin de minimiser la quantité d'énergie nécessaire pour chauffer une couche active, le substrat de silicium est localement aminci (3 à $5\ \mu\text{m}$ d'épaisseur) en exploitant les techniques de micro-usinage de volume développées pour la réalisation de capteurs mécaniques (substrat SOI). Dans ce cas, la couche isolante intermédiaire entre le film chauffant et la couche active sera le plus souvent à base de nitrure de silicium (Si_3N_4) pour des raisons de tenue mécanique, thermique et d'adhérence.

Le schéma électrique du montage de mesure potentiométrique employant ce type de capteur est représenté sur la Figure I.2. Il nécessite deux sources d'alimentation distinctes, V_H pour le chauffage et V_{IN} pour la mesure. L'information sera la tension V_{OUT} mesurée aux bornes d'une résistance montée en série avec l'élément sensible.

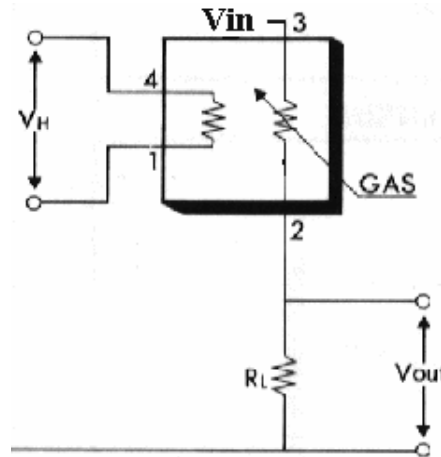


Figure I-2 : Schéma électrique équivalent.

La température jouant un rôle prépondérant sur le processus d'absorption ou de désorption, il est clair que le temps de réponse sera sensiblement modifié si la température de fonctionnement du capteur est elle-même modifiée. La température de fonctionnement doit être spécifiée pour chaque capteur. Elle dépend à la fois de la couche sensible du capteur (oxydes métalliques) et du gaz à détecter. En pratique, on distingue deux températures:

- la première, correspondant à la température de désorption, à laquelle doit être soumis le capteur pendant un temps défini pour lui permettre de retrouver un état de surface "vierge" (pas de gaz piégé dans le film sensible).
- la seconde est celle à laquelle on procèdera à la mesure après un temps précis de stabilisation.

Ainsi, dans le cas du capteur Figaro, il est préconisé une phase de désorption à environ 350°C pendant 14 ms, suivie d'une période de retour à température ambiante en 236 ms et d'une plage temporelle de mesure de 150 ms, soit pour un cycle de mesure une durée totale de 400 ms. De tels transitoires thermiques ne sont rendus possibles que par la réalisation sur membrane qui limite les volumes chauffés mis en jeu.

Afin de limiter le nombre de capteurs utilisés, le principe largement retenu est de faire fonctionner ceux-ci séquentiellement selon plusieurs cycles de mesure différents. En effet la sélectivité et la sensibilité varient selon la température de fonctionnement du capteur, et un cycle de mesure est généralement suffisamment court pour que l'on puisse garantir que la composition de l'atmosphère gazeuse au voisinage du capteur n'ait pu varier significativement entre deux cycles de mesures successifs. Il est donc possible avec le

même capteur d'obtenir successivement plusieurs mesures exploitables en faisant varier la température de mesure.

Plusieurs solutions sont utilisées pour réaliser les éléments chauffants. Elles sont toutes basées sur la création de chaleur par effet Joule.

Ces résistances chauffantes peuvent être réalisées à l'aide de fines couches métalliques [2-3-4]. La principale caractéristique pour ce type d'applications est une faible consommation de puissance (>200mW) pour une gamme de températures d'utilisation allant de 350°C à 450°C avec des temps de montée en température bien inférieurs à la seconde [5].

Une autre méthode est d'utiliser une couche mince de polysilicium (Figure I.3) déposée sur membrane [6-7] diélectrique et thermiquement isolante. De telles réalisations permettent d'obtenir des rendements électro-thermiques de 20°C/mW [8] pour des zones de chauffe de 240x240µm².

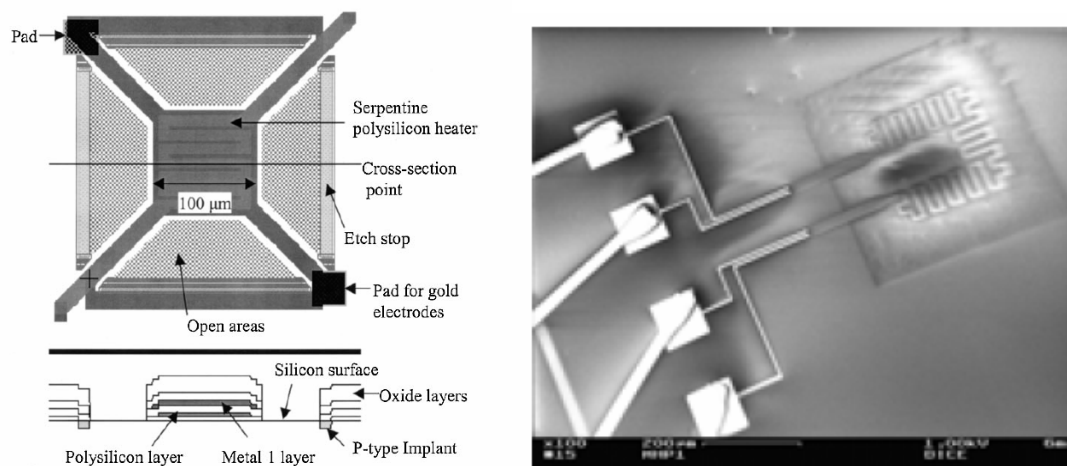


Figure I-3 : Capteur de gaz à élément chauffant en polysilicium.

Ce type de micro-sources thermiques peut être exploité pour la réalisation d'imageur thermique. En effet, après une phase de chauffage correspondant à une excitation thermique, on analyse la réponse thermique transitoire et permanente. Cette analyse peut renseigner sur la présence de microfissures, de micro-cavités d'air ou même de l'altération (oxydation, délamination,...) de matériaux tels que le béton, le métal, ou des matériaux hétérogènes (céramiques frittées). Une application prometteuse et très porteuse de ce type d'analyse semble être le contrôle des édifices (béton armé et structures métalliques). Le fait d'être une méthode de détection non intrusive renforce son intérêt.

I.1.2 Micro-actionneurs thermiques

Un autre domaine d'applications des micro-sources thermiques est la création de forces ou de déplacement dans les MEMS (Mechanical Electrical Micro-Systems). Dans un

MEMS, le micro-actionneur permet d'avoir des actions mécaniques sur le monde extérieur. Il peut être utilisé pour manipuler un micro miroir, pour réaliser un balayage parallèle ou normal au plan du substrat ou encore pour actionner une micro-pompe dans un dispositif micro-fluidique. Compte tenu de la réduction d'échelle et des masses des parties mobiles à déplacer, l'actionnement par force électromagnétique n'est plus incontournable pour des micro-actionneurs. La recherche a permis de mettre en avant d'autres principes d'actionnements qui utilisent les forces électrostatiques, la dilatation thermique, les forces piézo-électriques, ou encore les alliages à mémoire de forme.

Les actionneurs thermiques exploitent des principes de fonctionnement variés tels que la dilatation de gaz, les alliages à mémoire de forme, l'effet bilame, la dilatation thermique, etc. Ces principes sont résumés ci-dessous :

- Certains micro-actionneurs thermiques utilisent l'expansion de gaz, de liquide ou encore le changement de phase liquide / gazeux pour créer une force ou un déplacement. Ces actionneurs sont constitués d'une cavité contenant le gaz ou le liquide. L'une des faces de la cavité est une membrane déformable comme présentée sur la Figure I.4. Lorsque le courant passe dans la résistance chauffante intégrée au sein dans la cavité, son contenu se dilate et l'on obtient une déformation de la membrane.

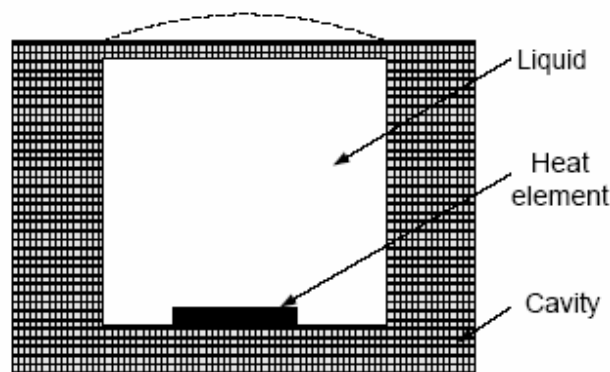


Figure I-4: *Micro actionneur à membrane.*

- L'effet mémoire peut apparaître lorsqu'une transformation thermo-mécanique à l'échelle atomique d'un métal intervient à une certaine température. A basse température, l'alliage à mémoire de forme reste dans la position déformée que l'on lui a imposée. Lorsque la température dépasse un certain seuil, l'alliage retrouve sa forme initiale.

-Les actionneurs à effet bilame utilisent deux matériaux accolés, possédant des coefficients de dilatation différents comme indiqué sur la Figure I.5.a. Lorsque la structure est chauffée, la différence de dilatation entraîne une déflexion.

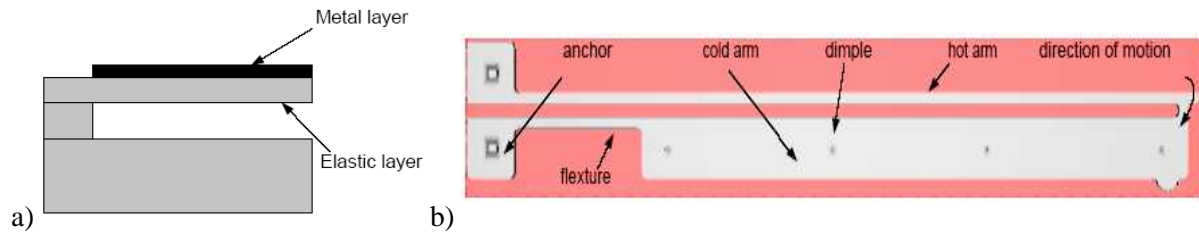


Figure I-5 : *Micro actionneur de type bilame en coupe (a) et classique vue de dessus (b).*

-L'actionneur thermique classique utilise le même principe que celui du bilame mais diffère dans le fait qu'un seul matériau est utilisé. On distingue sur la Figure I.5.b un bras "chaud" (plus fin) du bras "froid". La résistance du bras "chaud" est la plus élevée et induit une chaleur générée dans ce bras largement supérieure à celle générée dans le bras "froid". Cette différence de température implique une différence de dilatation, entraînant une déflexion de la partie libérée de l'actionneur dans le plan parallèle à la surface du substrat. Les déflexions réalisables sont supérieures à celles obtenues par effet électrostatique, sans avoir recours à de hautes tensions d'actuation. Pour ce type de micro-actionneurs ^[9], on peut relever des performances de l'ordre d'une dizaine de micromètres de déflexion avec une puissance de commande réduite ($P < 50 \text{ mW}$).

Cependant, certaines limitations, dues à la géométrie, ont poussé à modifier la structure de base pour arriver à une configuration présentée sur la Figure I.6, où l'intégralité de la puissance dissipée est utilisée pour l'actionnement.

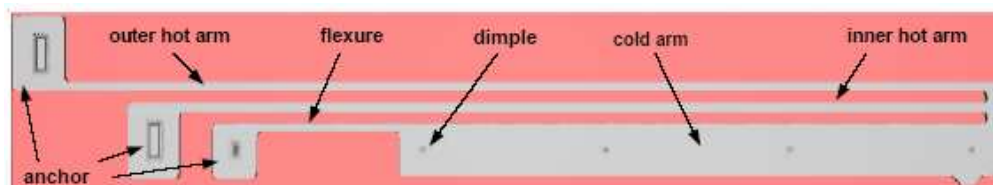


Figure I-6 : *Nouvelle génération de micro actionneur thermique.*

Le courant ne circule plus à travers le bras froid. Ainsi, la géométrie a été optimisée pour atteindre des déflexions supérieures à celles obtenues avec la structure précédente. Une puissance de commande de 31mW (6,8V et 4,6mA), permet alors d'obtenir une déflexion de 12,3 μm et une force de 8 μN ^[10]. Lors de ces actionnements, les températures atteintes dépassent 800°C dans le cas des plus grandes déflexions.

Une solution technologique permettant de modifier localement la résistivité, rendrait possible la localisation de la source de chaleur au milieu des bras, indépendamment du design, et permettrait d'améliorer le rendement thermomécanique de ce type d'actionneurs. Enfin, la possibilité d'adresser matriciellement un arrangement de ce type d'actionneurs offrirait la possibilité d'envisager la réalisation de micro-positionneurs (table X,Y) très compacts et de grandes dimensions (quelques cm^2), capables de manipuler des objets de très petite taille.

I.1.3 Micro-fluidique : les micro-éjecteurs de gouttes

La micro-fluidique, nouveau domaine d'applications, s'est fortement développée depuis quelques années. Au sens strict, la micro-fluidique est un champ disciplinaire qui étudie les écoulements de liquides ou gaz dans des canaux de dimensions sub-millimétrique, dont l'épaisseur peut, en conséquence, être dans certains cas de taille comparable aux objets qui y circulent (bulles, cellules, gouttes, polymères). Au sens large, il s'agit d'un domaine technologique transdisciplinaire qui intègre la mécanique des fluides, la chimie analytique, la chimie des surfaces, l'ingénierie moléculaire... En pratique, le terme "micro-fluidique" caractérise des outils technologiques utilisés dans les systèmes miniaturisés (MEMS) pour la maîtrise des écoulements et le contrôle des quantités transportées par les fluides. A cette échelle, le très bon contrôle des volumes, allant de quelques picolitres à quelques microlitres, permet de traiter et d'analyser des quantités très limitées de produits, en parallèle et à grande vitesse (haut débit). Ce peut être une approche très prometteuse pour la synthèse ou le travail sur des produits chimiques très coûteux ou fortement toxiques (nano-réacteur chimique) qui se prête à un traitement collectif parallèle.

La micro-fluidique contribue ainsi à améliorer la spécificité des processus physico-chimiques mis en jeu, voire d'explorer puis exploiter des phénomènes originaux.

L'accès exhaustif aux génomes de multiples organismes, dont l'homme, a récemment induit de nouveaux besoins et de nouvelles perspectives dans le secteur biomédical, en particulier en recherche pharmaceutique et en diagnostic moléculaire. Ces attentes apportent un moteur supplémentaire à ce domaine de recherche. En effet, la composante micro-fluidique intervient dans la plupart des applications envisagées, depuis le simple capteur jusqu'aux systèmes les plus complexes intégrant de multiples fonctionnalités. De nombreux problèmes technologiques restent à résoudre pour effectuer, dans des microsystèmes, de multiples opérations : réactions chimiques, synthèses, analyses de molécules qui doivent intervenir successivement dans différents compartiments.

L'objectif, à terme, est de réaliser des "lab-on-chip" (laboratoires sur puce) offrant de plus en plus de fonctionnalités. De nombreux travaux de recherche ont déjà été entrepris sur la compréhension théorique et la mise au point des dispositifs de micro-fluidique développés de façon modulaire : pompes, canaux, valves, mélangeurs, réacteurs... pouvant être intégrés dans des dispositifs complexes.

De nombreuses briques de la micro-fluidique reposent sur des principes où le paramètre température joue un rôle prépondérant. Le contrôle en température dans les réacteurs chimiques, la création de bulles, l'éjection de gouttes nécessitent un élément chauffant réalisé de façon compatible avec les autres dispositifs présents dans un système micro-fluidique.

La micro-éjection est un domaine dont le développement a été très rapide grâce à une application à très grande échelle : les têtes d'impression des imprimantes jet d'encre.

Cependant, d'autres champs d'applications ont connu un fort développement, notamment en biologie grâce à la recherche effectuée sur l'ADN ^[11-12-13].

De manière générale, un éjecteur thermique est constitué d'un réservoir contenant le liquide à éjecter, d'une résistance chauffante placée dans le réservoir et d'un orifice constituant la buse d'éjection. Ainsi, l'éjecteur thermique de goutte développé par Mme A.M.Gué au LAAS CNRS, reprend cette configuration comme le montre la Figure I.7.

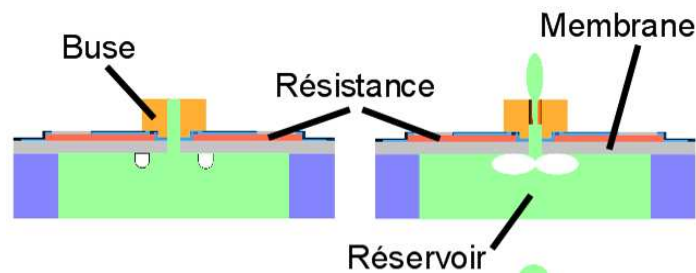


Figure I-7 : *Vue schématique d'un micro-éjecteur de gouttes.*

La résistance chauffante est alimentée par une impulsion de courant de forte amplitude et de courte durée (quelques dizaines de microsecondes) de manière à générer localement un échauffement suffisant pour amener le liquide à une température supérieure à sa température d'ébullition. Cette rapide surchauffe, communément appelée "mise à feu" ou «nucléation », permet de générer des bulles de gaz dont le volume augmente plus rapidement que le front d'onde de la pression. De cette manière, c'est le volume dans le réservoir de liquide qui croît et ne laisse qu'une possibilité au fluide pour retrouver un état d'équilibre : éjecter une goutte par la buse d'éjection. Lorsque le chauffage est arrêté, la capillarité au niveau de l'entrée des canalisations d'alimentation suffit à réalimenter le petit réservoir en liquide et le cycle peut reprendre. De tels systèmes équipent les imprimantes à jet d'encre, dont certaines sont capables de distiller des microgouttes de deux picolitres et de diamètre n'excédant pas une quinzaine de microns.

De multiples paramètres sont à considérer dans la réalisation d'éjecteurs thermiques :

- ils doivent être simples d'utilisation avec un faible coût de fabrication
- ils ne doivent pas produire de gouttes satellites
- il ne faut aucune interaction avec les éjecteurs non actionnés, que ce soit au remplissage de la chambre d'éjection ou lors de l'éjection
- il faut que la période entre l'éjection et le remplissage soit la plus courte possible pour avoir une forte fréquence d'utilisation.

- Lors de la « mise à feu », il faut pouvoir prévenir la surchauffe de la résistance et l'éjection prématurée de fluide de la chambre fluidique.

Pour cela, la structure doit être conçue en tenant compte des deux périodes : durant la « mise à feu », la structure doit pouvoir transférer la chaleur efficacement au fluide dans la chambre ; après la « mise à feu », cette même structure doit transférer le résidu de chaleur à l'intérieur de la tête d'impression et non pas dans le fluide de manière à favoriser le refroidissement de la résistance avant la mise à feu suivante. Lorsque la fréquence de mise à feu augmente, le design fluidique caractérisant le transfert de chaleur devient critique pour fournir une nucléation uniforme en évitant d'accumuler de la chaleur. La performance d'un éjecteur est donc étroitement liée à la structure de la chambre d'éjection, aux canaux d'alimentation et à la résistance chauffante.

La commande électrique correspond à une impulsion dont la durée varie de 1 à 5 μ s, et qui permet d'éjecter des bulles de 2 pL à 40 pL. Le diamètre des buses d'éjection est généralement compris entre 10 μ m et 30 μ m. Les contraintes les plus sévères concernent l'élément chauffant. La densité de puissance dissipée dans l'élément chauffant est proche de 1kW/cm². Il doit être capable d'effectuer une augmentation de température de 110 °C/s et d'atteindre une température de surchauffe de 250°C en environ 2 μ s.

I.1.4 Micro-initiateur pyrotechnique

Une autre approche pour créer un déplacement consiste à exploiter la poussée liée à la génération de gaz. L'utilisation de matériau explosif permet, après initiation, de générer un gaz dont le volume est de quatre ordres de grandeur supérieur à celui du combustible dont il est issu. Ce type d'actionneur a déjà été mis à profit pour la réalisation de patch intradermique ^[14] ainsi que pour la réalisation de micro-propulseurs pouvant assurer la correction d'attitude de futurs nano-satellites (~10kg). D'autres applications telles que la propulsion de micro-drônes sont également envisageables. Enfin, dans des applications micro-fluidiques, cette génération de gaz peut être mise à profit pour la circulation de fluides dans des canaux.

Avec l'avènement de la technologie des MEMS, le développement des micro-propulseurs pour des applications spatiales a suscité un intérêt considérable dans la communauté scientifique. Cependant, la technologie actuelle sur les microsatsellites souffre d'un manque de connaissances sur les micro-écoulements et sur les combustions à dimensions réduites. La situation actuelle dans la conception et le développement des systèmes de micro-propulsion a été passée en revue dans la littérature ^[15-16].

Des micro-propulseurs développés par l'US Navy ^[17-18] sont présentés sur la Figure I.8. Dans ces structures, l'initiation se fait par le fond du réservoir. Les éléments chauffants sont donc placés sur le capot inférieur du réservoir, à l'opposé de la tuyère. L'élément chauffant est en contact avec le combustible, mais aussi avec le substrat inférieur, ce qui a pour effet d'augmenter de façon significative la puissance d'initiation nécessaire.

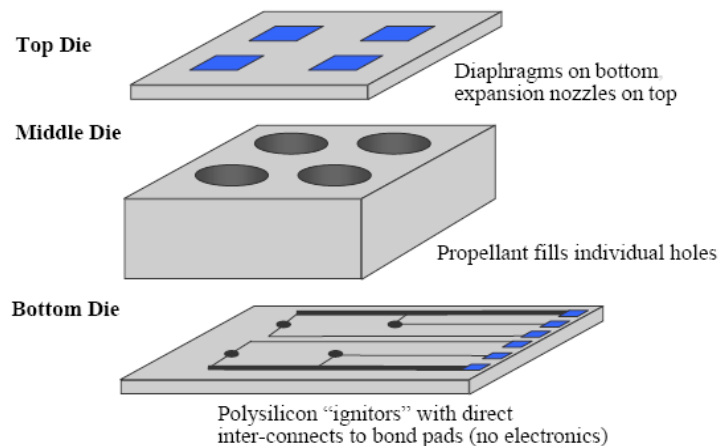


Figure I-8 : *Vue schématique d'un micro-propulseur à initiation par la face arrière.*

Dans cette application, les résistances utilisées sont réalisées en polysilicium et sont alimentées par une brève impulsion de courant de 0.5A sous 100V durant 50 μ s. Comme on peut le noter, la puissance d'actuation (mise à feu) est loin d'être optimisée et nécessite une électronique robuste permettant l'adressage d'une puissance d'environ 50W sous 100V.

La Figure I.9 montre la vue schématique du micro-propulseur pyrotechnique unitaire développé au LAAS par Mme C.Rossi. Ce micro-propulseur est constitué de 3 étages distincts :

- Un étage contenant l'initiateur, avec une résistance en polysilicium réalisée sur une membrane libérée.
- Un réservoir à propergol qui définit la chambre de combustion
- Un wafer usiné pour réaliser la tuyère qui est rajouté en haut de la structure

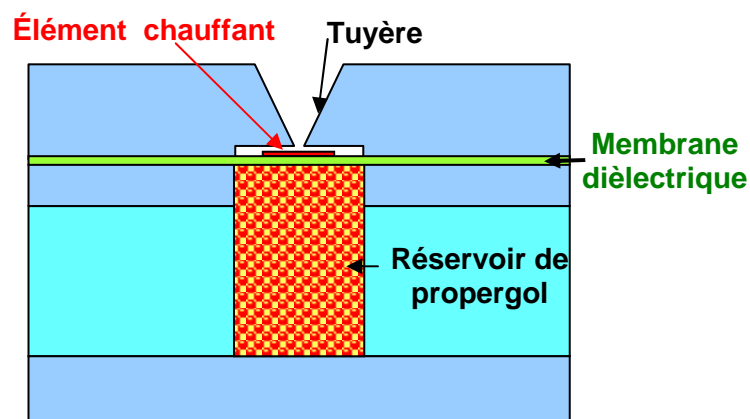


Figure I-9 : *Vue schématique en coupe d'un micro-propulseur Micropyros.*

Son principe de fonctionnement consiste à initier la combustion du contenu des réservoirs à l'aide d'une résistance chauffante portée à une température d'initiation de 300°C. Il y a alors combustion locale dans le réservoir et propagation du front de combustion dans la matière explosive qui est, dans ce cas précis, du propergol. La pression du gaz ainsi généré, brise la membrane et le gaz est alors violemment expulsé à travers la tuyère à une vitesse supersonique permettant d'obtenir une force de poussée de quelques milli-Newton.

1.2 Adressage matriciel :

Devant la miniaturisation des capteurs et des actionneurs, la multiplicité des fonctions à réaliser et leur intégration de plus en plus poussée, l'adressage direct (plot individuel par cellule et plot commun) devient obsolète. En effet, le nombre et surtout la surface réservée aux interconnexions nuisent fortement à la densité d'intégration et dans certains cas à la fiabilité. L'adressage matriciel s'impose naturellement lorsque l'on désire intégrer, dans un système, un grand nombre de cellules identiques. La Figure I.10 montre clairement la simplification apportée au niveau des interconnexions (pistes d'amenée de courant) et surtout la réduction du nombre de plots d'interconnexions externes à micro-souder lors de la mise en boîtier (packaging). Ce nombre de plots d'interconnexions pour une matrice de N lignes et M colonnes ($N \times M$ éléments) est de $(N \times M) + 1$ pour un adressage vectoriel (A), contre $(N + M)$ plots dans le cas d'un adressage matriciel (B). Dans la conception de systèmes comprenant plus d'une centaine d'éléments, l'adressage matriciel apparaît incontournable.

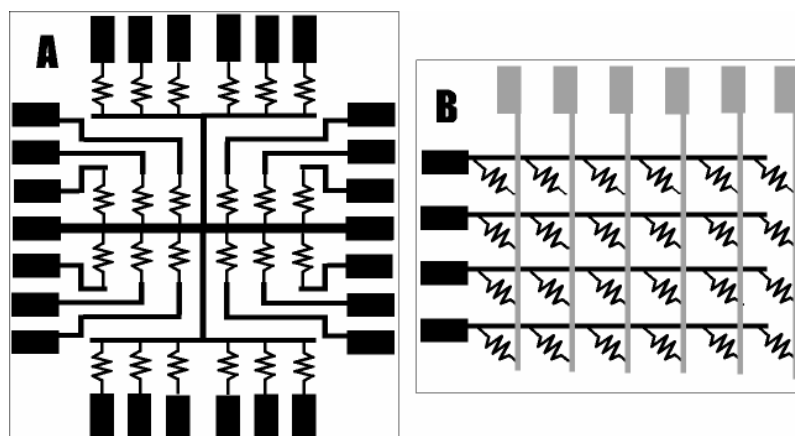


Figure I-10 : *Comparaison entre adressage direct (vectoriel) et adressage matriciel.*

Pour sélectionner une cellule élémentaire parmi $N \times M$ micro-capteurs ou actionneurs arrangés matriciellement, plusieurs approches sont envisageables ^[19] et nous en ferons une présentation non exhaustive au long des paragraphes suivants.

I.2.1 Approche multipolaire (transistors à couches minces)

L'approche multipolaire consiste à intégrer en série avec l'élément "actif" (capteurs ou actionneurs) un interrupteur à semi-conducteur (Transistor bipolaire, MOST,...). Cette solution présente un grand intérêt dans le cas de matrices mettant en jeu des signaux de très faibles niveaux (tension et/ou courant) que l'on souhaite mesurer ou imposer avec grande précision. En contre partie, cette approche implique la compatibilité entre le process mis en œuvre pour la fabrication des interrupteurs (CMOS par exemple) et les étapes spécifiques à la réalisation de l'élément actif (micro-usinage, dépôt de films sensibles,...). De plus, si l'on ne dispose pas de l'ensemble des deux processus de fabrication (processus CMOS pour l'interrupteur et du micro-usinage de surface et volume pour l'élément sensible) une réalisation en « post processing » de l'élément actif peut être envisagée. A la difficulté de compatibilité de fabrication, s'ajoute le problème lié à l'encombrement de l'interrupteur. En effet, si le courant nécessaire au fonctionnement des éléments de la matrice atteint la centaine de milliampère, la surface de l'interrupteur devient prépondérante vis-à-vis de celle allouée à l'élément actif et donc pénalise l'intégration. De plus, ces solutions demandent également des amenées de courant, une ligne de commande supplémentaire ou l'utilisation du substrat en tant que masse commune. Enfin, il semble difficile de réaliser une matrice d'éléments actifs avec interrupteurs associés sur des structures sur membrane suspendue.

Ce type de méthode d'adressage reste largement répandu et est assez performant pour la fabrication d'écrans plats à base de cristaux liquides et de matrices actives à l'aide de transistor à couche mince (TCM, aussi connu sous l'acronyme TFT, Thin Film Transistor).

Les transistors MOS utilisés dans ces matrices actives sont analogues à ceux réalisés sur substrat silicium mais la couche mince semi-conductrice est en Silicium polycristallin ou en Silicium amorphe. Le composant présenté sur la Figure I.11 est obtenu par dépôts sur un support en verre de couches métalliques, isolantes et semi-conductrices délimitées par gravure. Ces dernières sont le plus souvent réalisées en silicium amorphe hydrogéné. Les composants réalisés avec ce matériau présentant des caractéristiques qui comme nous le verrons, sont suffisantes pour l'adressage d'une matrice à cristaux liquides.

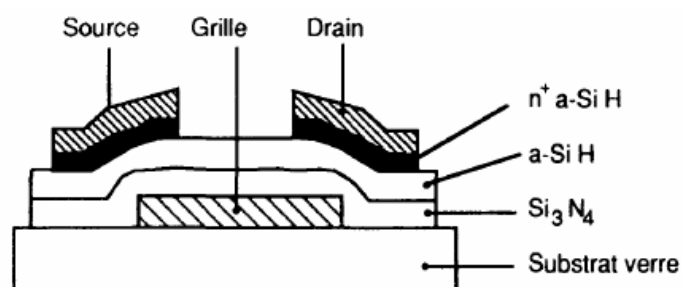


Figure I-11 : Vue en coupe d'un transistor à couche mince.

Dans la matrice dont une cellule est présentée sur la Figure I.12, le drain du transistor est relié au pixel, la "source" à une colonne de l'écran et enfin la grille à une ligne. Dans cette structure, il est à noter que lignes, colonnes, pixels et transistors sont sur le même substrat ; le second substrat, quant à lui, supporte une électrode de référence (commune à tous les pixels et constituant la seconde armature du condensateur) portée au potentiel V_{ref} .

On rencontre également une structure dite à "Bus non croisés", où l'on place lignes et colonnes sur des substrats différents, évitant ainsi tout risque de court-circuit lignes/colonnes.

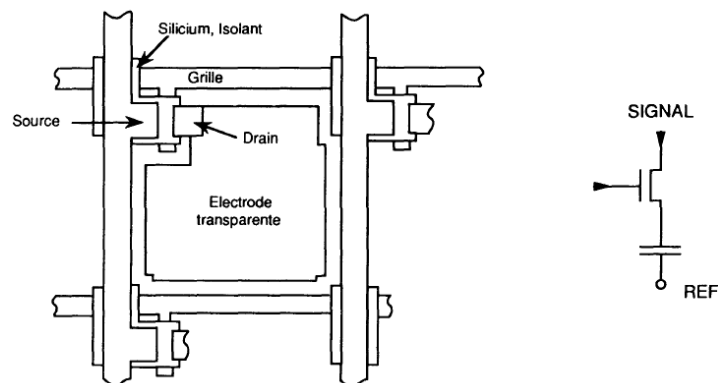


Figure I-12 : Cellule élémentaire et schéma équivalent.

Les transistors couches minces utilisés dans ces matrices sont bloquants ($R = R_{off}$) quand une tension négative ou faible est appliquée entre grille et source ou drain. Ces électrodes sont indistinctes du fait de l'absence de substrat que l'on rencontre dans la technologie MOS classique. Ils deviennent conducteurs ($R = R_{on}$) lorsque la tension appliquée entre grille et source dépasse une valeur de seuil V_T à partir de laquelle un canal se crée par inversion de population des porteurs, permettant la conduction des électrons. Ils se comportent donc comme des interrupteurs commandés par la grille, permettant ainsi la charge des pixels à la tension colonne lorsque les lignes sont sélectionnées et le maintien de cette charge le reste du temps. Ce dispositif présente, malgré sa faible sortance ($I_{ON} < 1\text{mA}$), les performances requises pour des matrices de détecteurs (conduction de faible courant $> 1\mu\text{A}$). De plus, la réalisation de TCM à partir de silicium amorphe déposé à basse température ($\sim 700^\circ\text{C}$) reste compatible avec un support en verre (écran LCD). Enfin, on notera que la tension appliquée aux pixels ne dépend que de la tension appliquée à la colonne lors de la sélection et reste très peu sensible aux dispersions de caractéristiques des TCMs de la matrice.

Ainsi, les matrices de capteurs utilisent souvent cette méthode d'adressage à un seul transistor. Dans le cas d'une matrice de photodiodes^[20] (Figure I.13) utilisée pour réaliser un capteur d'image, il est nécessaire de pouvoir accéder individuellement à l'information

contenue dans chaque photodiode. Une matrice de 128x128 éléments représenterait un total d'environ 8200 connections dans le cas d'un adressage individuel (vectoriel). En utilisant des transistors dont le signal de commande est relié à la ligne correspondante à l'élément associé, le nombre d'interconnexions est réduit à 256.

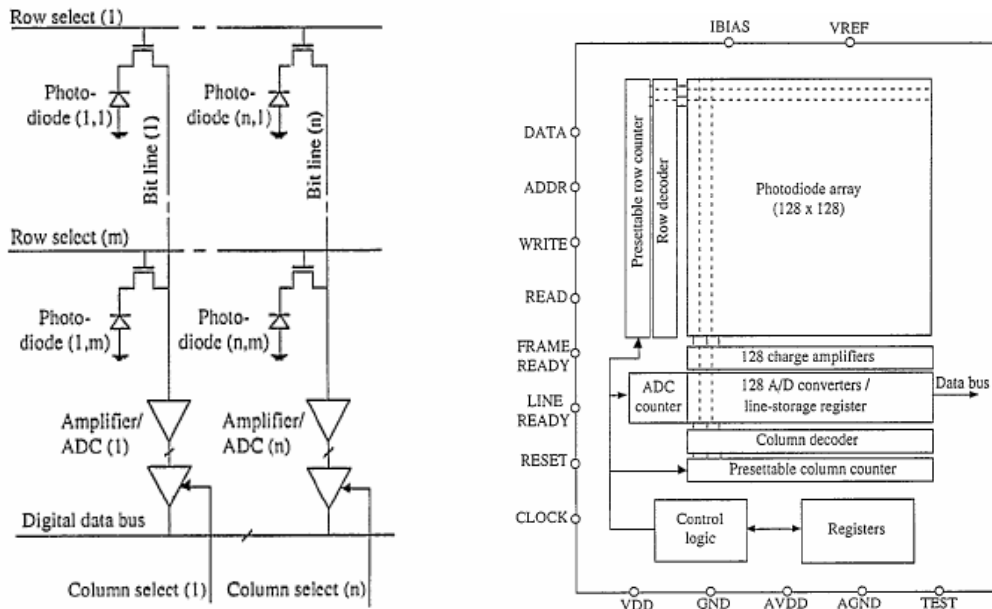


Figure I-13 a) structure de la matrice de photodiodes, b) électronique associée.

De plus, la possibilité d'intégrer l'électronique de mesure au plus proche du capteur (Figure I.15.b), en technologie compatible CMOS, permet d'améliorer les performances globales du système. Cette électronique permet d'obtenir des images à une fréquence de 25 Hz, le tout en utilisant un temps d'intégration pour chaque photodiode de 40ms.

Les circuits d'adressage en technologie CMOS sont utilisés dans de multiples applications touchant à des domaines très variés. En vue d'applications spatiales, une matrice d'obturateurs optiques d'environ 600 éléments ^[21], présentée sur la Figure I.14, a été réalisée avec process CMOS.

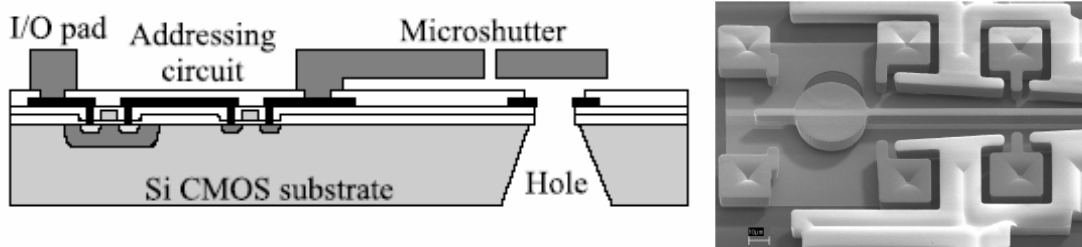


Figure I-14 : Cellule élémentaire d'une matrice d'obturateurs.

Ce mode d'adressage est adapté à une utilisation pour de faibles niveaux de courant. Sa mise en œuvre sur un même substrat que les éléments actifs demande une compatibilité des processus qui peut s'avérer difficile à réaliser et lourde à mettre en œuvre. Enfin, dans le

cas précis d'actionneurs thermiques nécessitant de forts niveaux de courant pour la commande (plusieurs dizaines de milliampères), la dimension du transistor devient excessive et l'emploi de TCM devient quasi impossible (faible sortance).

I.2.2 Approche dipolaire

L'autre approche possible est dite dipolaire et consiste à associer en série un élément à seuil avec l'élément actif. Dans le cadre de cette approche dipolaire, deux voies sont envisageables :

- La première consiste en la mise en série d'un élément redresseur avec l'élément actif (élément à seuil asymétrique). L'utilisation de diodes PN permet de rendre chaque élément de la matrice adressable individuellement.
- La seconde voie repose sur l'utilisation d'éléments à seuils symétriques que nous décrirons et détaillerons ultérieurement.

I.2.2.1 Éléments à seuils asymétriques

Dans l'approche dipolaire à éléments à seuils asymétriques, les courants de fuite de ces derniers jouent un rôle prépondérant dans le fonctionnement global des matrices. Il convient donc de limiter le courant inverse de la diode pour garantir de bonnes performances globales de la matrice. Pour expliquer le rôle de l'élément à seuil, observons la Figure I.15 montrant les conductions dans une matrice comprenant M lignes et N colonnes d'éléments chauffants représentés par des résistances.

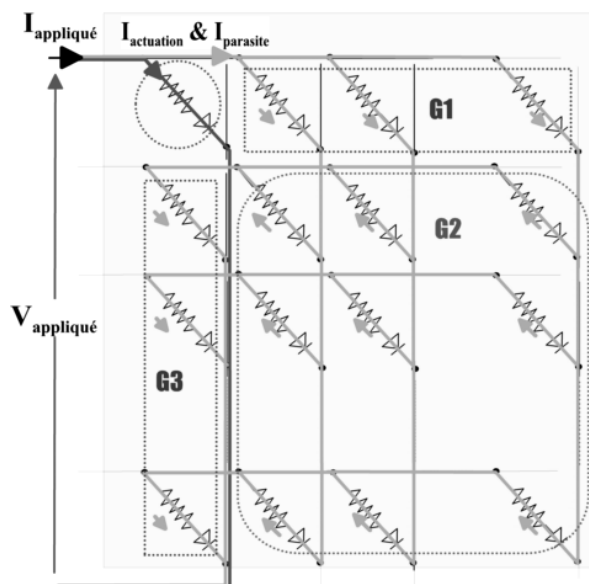


Figure I-15 : Fonctionnement d'une matrice à diodes.

Dans ce cas de commande, la cellule [ligne 1, colonne 1] est sélectionnée. La tension appliquée se retrouve intégralement aux bornes du dipôle [1,1]. Si l'on observe bien la

conduction parasite (I_{Parasite}) dans le reste de la matrice, on constate que même si les éléments des groupes G1 et G3 sont polarisés en direct, en revanche ceux du groupe G2 sont polarisés en inverses. Le courant parasite est donc limité par les fuites des $(M-1) \times (N-1)$ diodes des éléments du groupe G2.

Dès lors, ce type d'adressage sera sensible à la température puisque une augmentation de celle-ci se traduit généralement par un fort accroissement du courant inverse des diodes.

En fonctionnement normal, on limitera la tension de commande à une valeur inférieure à la tension de claquage des diodes (V_B). Cette remarque souligne qu'une excellente maîtrise de la valeur de la tension de claquage (uniformité, reproductibilité, ...) est nécessaire au bon fonctionnement de la matrice.

Il apparaît également clairement que, dans le cas d'une matrice de détecteurs dans laquelle le courant à mesurer est réduit ($< 1\mu\text{A}$), il sera quasiment impossible de satisfaire aux conditions strictes sur le courant de saturation afin d'obtenir un signal mesuré significatif du seul élément détecteur lu. Cette remarque sera d'autant plus pertinente que la dimension de la matrice ($N \times M$) considérée sera importante. Ces dipôles redresseurs peuvent être réalisés à l'aide de simples diodes PN silicium ou même Schottky.

I.2.2.2 Éléments à seuils symétriques

Le deuxième type de dipôle utilisable pour l'adressage de matrices est un dipôle à seuils symétriques. Dans cette autre approche, les dipôles constitués par une résistance et une diode en série sont remplacés par des Éléments à Seuils Symétriques (ESS). La Figure I.16 présente la vue en coupe, le schéma électrique équivalent et enfin, la caractéristique Courant / Tension de ce type d'élément.

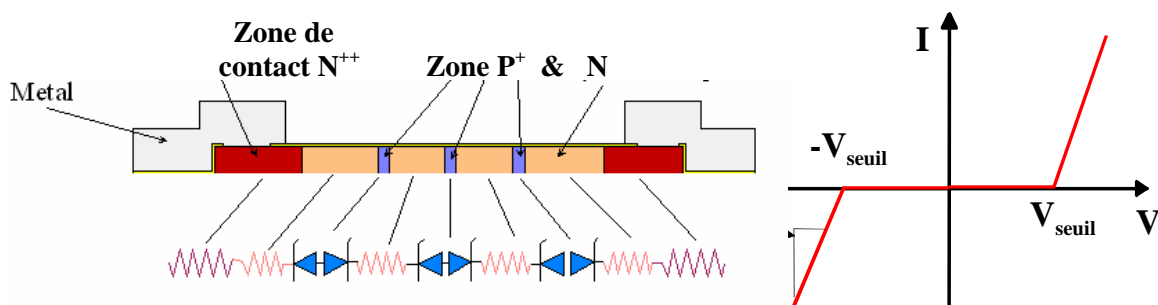


Figure I-16 : Schéma électrique et caractéristique $I(V)$ d'un élément à seuils symétriques (ESS).

Comme on le remarque sur la caractéristique $I(V)$, la symétrie des seuils permet de distinguer un fonctionnement bloqué, si la tension appliquée est comprise entre $-V_{\text{Seuil}}$ et

V_{Seuil} , correspondant à la conduction d'un courant de saturation des diodes ($I = I_{sat}$), et un fonctionnement passant, au-delà de V_{Seuil} . Pour une tension appliquée supérieure à la tension de seuil, on a une variation linéaire du courant avec la tension, modélisée par une résistance série " R_S ". Ces dipôles peuvent être mis à profit dans des actionneurs thermiques, où l'on peut exploiter la dissipation thermique générée au niveau des jonctions en inverse et l'associer à celle dissipée dans la partie résistive (R_S). Un placement astucieux des jonctions permettra de maîtriser la répartition en température pour assurer une bonne homogénéité ou, selon l'application visée, d'ajuster le profil en températures (gradient thermique).

Comme dans le cas des matrices à base de dipôles à seuils asymétriques, l'étude de la conduction parasite dans une matrice à base d'éléments à seuils symétriques (ESS) permet de tirer des conclusions similaires. On retrouve les mêmes groupes d'éléments (G1, G2 & G3), mais cette fois-ci, ils ne sont plus en direct ou en inverse. En effet, tant que la tension appliquée reste inférieure à $3 \cdot V_{Seuil}$, chaque groupe supporte une partie de cette tension appliquée. C'est donc le groupe présentant le moins d'éléments (G1 ou G3) qui limite la conduction parasite globale.

A présent, le fonctionnement global de la matrice ne repose plus sur la maîtrise de la valeur 'absolue' de la tension de seuil, mais seulement sur l'homogénéité de cette dernière sur un wafer. La plage de tension de commande sera comprise entre V_{Seuil} et $3 \cdot V_{Seuil}$.

Différentes technologies ont été étudiées pour réaliser les éléments non linéaires et parmi les plus courantes, on trouve celles présentées sur la Figure I.17 :

- Les diodes MIM (Métal Isolant Métal) qui utilisent les propriétés de conduction non-linéaires dans les oxydes (généralement Ta_2O_5).
- Les associations de diodes Silicium amorphe (couches minces de silicium déposé par décomposition chimique de silanes) en série, en anneau ou mixtes.

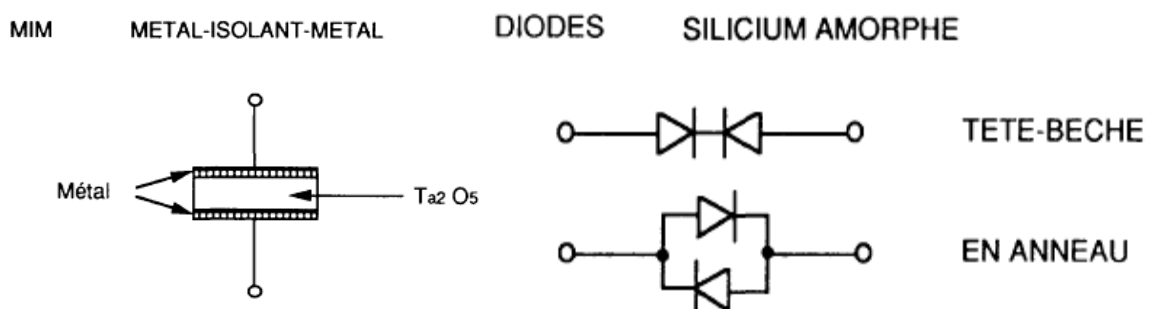


Figure I-17 : Eléments à seuils symétriques.

1.3 Notre positionnement et applications visées.

Ce rapide tour d'horizon a permis de montrer que les applications des micro-sources thermiques sont aussi nombreuses que variées. Les applications visées dans le cadre de

nos travaux de recherche, rejoignent des thématiques déjà existantes au sein de notre groupe de recherche (M.I.S. du LAAS-CNRS). En effet, sont déjà développée l'utilisation de micro-sources thermiques en micro-fluidique, pour l'éjection de gouttes, mais aussi sur une application de micro-propulsion.

En ce qui concerne la micro-propulsion, chaque actionneur pyrotechnique étant à usage unique, il est nécessaire d'avoir à disposition un grand nombre d'éléments. Le processus de fabrication et surtout d'assemblage étant relativement complexe, les nouvelles étapes à mettre en place pour l'adressage matriciel doivent permettre de réduire de façon significative le nombre d'interconnexions (réduction de la surface totale occupée) et de simplifier le circuit de commande associé en limitant le nombre d'interconnexions.

Dans le cas des micro-éjecteurs, application qui sera détaillée ultérieurement, les contraintes thermiques liées à ce type de structures font que l'ensemble de la matrice est réalisée sur membrane suspendue. De plus, la densité d'éjecteurs souhaitée est telle qu'il est difficile de placer un circuit d'adressage dédié (à base de transistors MOS), venant prendre place autour de chaque cellule. De plus, cette électronique d'adressage devrait être réalisée sur la membrane diélectrique suspendue dans le film en Polysilicium, à l'aide de TFT, dont la faible sortance limiterait la valeur de la puissance dissipée. En effet, pour les deux types d'applications précédemment décrite, la puissance électrique d'actionnement est comprise entre 100 et 300 mW, correspondant à un courant allant de 10 à 30 mA.

Nos choix technologiques mis en œuvre pour la réalisation des éléments chauffants adressables ont pris en compte les process existants en essayant de limiter le nombre d'étapes supplémentaires. L'élément chauffant est réalisé dans une couche de polysilicium et la méthode d'adressage des micro-actionneurs pyrotechniques, s'est porté sur une approche dipolaire. La mise en œuvre d'une approche quadripolaire serait nettement plus complexe et nous a paru difficilement réalisable. Les deux types d'éléments à seuils asymétriques et symétriques (diode et diode zéner tête-bêche) ont pu être testés. Nous soulignerons la très nette amélioration induite par l'utilisation de dipôles à seuils symétriques, tant de point de vue simplification technologique que le plan des performances électriques globale de la matrice.

Dans le cas des micro-éjecteurs, faute de silicium car la matrice est exclusivement réalisée sur une membrane diélectrique suspendue, la solution retenue a été l'intégration d'éléments à seuils symétriques, au sein même de l'élément chauffant, dans la couche de polysilicium. Cette dernière solution, nous a amené à mettre en place une nouvelle filière technologique générique, qui s'est avérée simple à mettre en œuvre et surtout bien moins sensible aux problèmes de reproductibilité. En effet, comme nous l'illustrerons, seule

l'homogénéité des dopages au sein du wafer est requise pour obtenir des éléments chauffants d'une plus grande efficacité que les générations précédentes.

Enfin, pour valoriser et renforcer l'intérêt de nos structures à base d'éléments à seuils symétriques, nous montrerons l'opportunité d'exploiter leurs caractéristiques pour réaliser divers capteurs. En effet, on peut mettre à profit les dérives thermiques de la résistance série ou celle du seuil pour détecter les variations de température lié à l'auto-échauffement de l'élément chauffant. Ceci peut être exploité pour asservir la température générée. De même, c'est la forte sensibilité du courant sous le seuil que nous exploiterons pour réaliser un capteur en température proprement dit. Nous montrerons que cette approche permet d'atteindre des sensibilités supérieure à 100 mV/°C .

Références bibliographiques du chapitre I :

- [1] N. TAGUCHI
Gas detection device
British Patent 1 280 809 (1972)
- [2] G.C. CARDINALI, L. DORI, M. FIORINI, I. SAYAGO, G. FAGLIA, C. PEREGO, G. SBERVEGLIERI, V. LIBERALI, F. MALOBERTI, D. TONETTO,
A smart sensor system for carbon monoxide detection,
Anal. Integ. Circ. Sign. Process. 14 (1997) 275–296.
- [3] G. FAGLIA, E. COMINI, M. PARDO, A. TARONI, G.C. CARDINALI, S. NICOLETTI, G. SBERVEGLIERI,
Micromachined gas sensors for environmental pollutants, Microsyst. Technol. 6 (1999) 54–59.
- [4] V. GUIDI, G.C. CARDINALI, L. DORI, G. FAGLIA, M. FERRONI, G. MARTINELLI, P. NELLI, G. SBERVEGLIERI,
Thin-film gas sensor implemented on a low-power-consumption micromachined silicon structure,
Sens. Actuators B 49 (1998) 82–89.
- [5] J. HILDENBRAND, J. WÖLLENSTEIN, E. SPILLER, G. KÜHNER, H. BÖTTNER, G. URBAN, J. G. KORVINK
Design and fabrication of a novel low cost hotplate micro gas sensor,
Proc. SPIE Vol. 4755, p. 191-199, Design, Test, Integration, and Packaging of MEMS/MOEMS 2002
- [6] C. ROSSI, E. SCHEID, D. ESTÈVE,
Theoretical and experimental study of silicon micromachined microheater with dielectric stacked membranes,
Sens. Actuators A 63 (1997) 183–189.
- [7] C. ROSSI, P. TEMPLE-BOYER, D. ESTEVE,
Realization and performance of thin SiO₂/SiN_x membrane for microheater applications,
Sens. Actuators A 64 (1998) 241–245.
- [8] LACONTE ET AL.,
Fully CMOS Compatible Low- Power Microheater,
Proceedings of the SPIE "Design, Test, Integration, and Packaging of MEMS/MOEMS 2002", Cannes, France, 6-8 May 2002, 2002.

- [9] EDWARD S. KOLESAR
Thermally-actuated cantilever beam for achieving large in-plane mechanical detections
Thin Solids Films 355-356 (1999) 295-302
- [10] EDWARD S. KOLESAR, SIMON Y. KO, JEFFERY T. HOWARD, PETER B. ALLEN, JOSH M. WILKEN,
NOAH C. BOYDSTON, MATTHEW D. RUFF, RICHARD J. WILKS
*In-plane tip deflection and force achieved with asymmetrical polysilicon electrothermal
microactuators*
Thin Solid Films 377]378_2000.719]726
- [11] KUONI, M. BOILLAT, N.F. DE ROOIJ,
A Modular High Density Multi-Channel Dispenser for Micro-Array Printing
Transducers'03, Boston, USA , June 8-12, 2003
- [12] T. GOLDMANN, J. S.GONZALEZ,
Inkjet Printing of Polymers: State of the Art and Future Developments
J.Biochem. Biophys. Methods 42 (2000) 105-110
- [13] O. GUTMAN, R. NIEKRAWIETZ, C.P. STEINERT , H. SANDMAIER, S. MESSNER, B. DE HEIJ, M. DAUB,
R. ZENGERLE.
Droplet Release in a Highly Parallel, Pressure Driven Nanoliter Dispenser
Transducers'03, Boston, USA , June 8-12, 2003
Collin S, Pour la science. N°306 Av
- [14] C. ROSSI
*« Conception et réalisation d'un système de réhydratation pour patch transdermique à partir
de micro actionneurs pyrotechniques »*,
thèse Université P.Sabatier, Décembre 1997
- [15] H. HELVAJIAN
Microengineering Aerospace Systems,
The Aerospace Press, El Segundo, CA, and AIAA, Reston, VA, 1999.
- [16] M.M MICCI,. AND A.D. KETSDEVER
Micropropulsion for Small Spacecraft,
Progress in Astronautics and Aeronautics, Vol.187, AIAA, Reston, VA, 2000.
- [17] D. H. LEWIS, JR., S.W. JANSON, R. B. COHEN, AND E. K. ANTONSSON.
Digital MicroPropulsion.
In The Twelfth IEEE International Micro ElectroMechanical Systems Conference,
Orlando, Florida, Jan. 1999. IEEE.
- [18] LEWIS, ET AL.
Digital MicroPropulsion,
Sensors & Actuators A, 2000, 80(2), p143-154
- [19] *An Examination of Active Matrix Technologies and Components*
LCD Application Note SHARP Liquid Crystal Displays
- [20] ANDREA SIMONI
A digital vision sensor
Sensors and Actuators A 46-47 (1995) 439-443
- [21] JAN TUE RAVNKILDE
Fabrication of nickel microshutter arrays for spatial light modulation
New Challenges in Mesomechanics Aalborg University, Denmark August 26-30, 2002

Chapitre II: Réalisation de matrices adressables à l'aide d'éléments à seuils asymétriques

Comme nous venons de le détailler lors du premier chapitre, dans le but d'augmenter la densité d'intégration de matrices d'actionneurs ou de capteurs, l'adressage matriciel de ces derniers devient incontournable. Pour ce faire, on dispose d'approches multipolaires qui sont souvent lourdes à mettre en œuvre, difficilement réalisables et enfin pas toujours pertinentes (interrupteur à semi conducteur encombrant). L'approche dipolaire, parfois insuffisante dans le cas des matrices de capteurs, s'avère une solution compacte et à priori plus simple à mettre en œuvre.

Le projet européen "Micropyros", de 2001 à 2003 a visé à la réalisation d'un nouveau type de MEMS pour une application spatiale : la micro-propulsion. Le projet incluait la fabrication de ces MEMS, mais aussi l'électronique de commande associée ^[1]. La micro-propulsion par actionneurs pyrotechniques est basée sur la combustion de propergol solide stocké dans un réservoir micro-usiné dans un substrat (wafer) de silicium. Dans la course à la réalisation de micro et nano-satellites (<10kg), les microsystèmes apportent des solutions pour la miniaturisation des propulseurs utilisés pour la correction d'attitude et d'altitude. Les principaux avantages de cette technologie sont, outre son faible coût de production, sa maturité et la forte intégration obtenue (25 propulseurs/cm²) grâce aux technologies de la microélectronique sur silicium. Afin de réaliser la fonction désirée, et attendu que chaque élément est à usage unique, il est nécessaire d'embarquer un grand nombre de micro-propulseurs sur chaque satellite. Cette contrainte d'encombrement nous a donc conduit à proposer des solutions d'adressage matriciel de cet arrangement matriciel de micro-propulseurs.

Dans ce projet, la partie micro-propulseur ^[2] proprement dite a fait l'objet de la thèse de Mr. B.LARANGOT. De notre côté, nous avons suivi plusieurs voies pour réaliser l'adressage matriciel avec la préoccupation de rester compatible avec le processus déjà existant. La première réalisation, amplement décrite dans ce second chapitre, a consisté à placer en série avec l'élément chauffant disposé sur une membrane diélectrique, une diode PN réalisée dans le silicium avoisinant.

II.1 Présentation du projet Micropyros et de l'actionneur pyrotechnique

La Figure II-1 montre une vue schématique d'un micro-propulseur unitaire. Chaque micro-propulseur est constitué de 4 blocs assemblés par collage :

- Un wafer permettant de fermer le réservoir (opercule)
- Le réservoir de propergol qui définit la chambre de combustion
- L'initiateur, qui intègre une résistance en polysilicium réalisée sur une membrane libérée
- Un wafer de silicium usiné pour réaliser la tuyère en haut de la structure

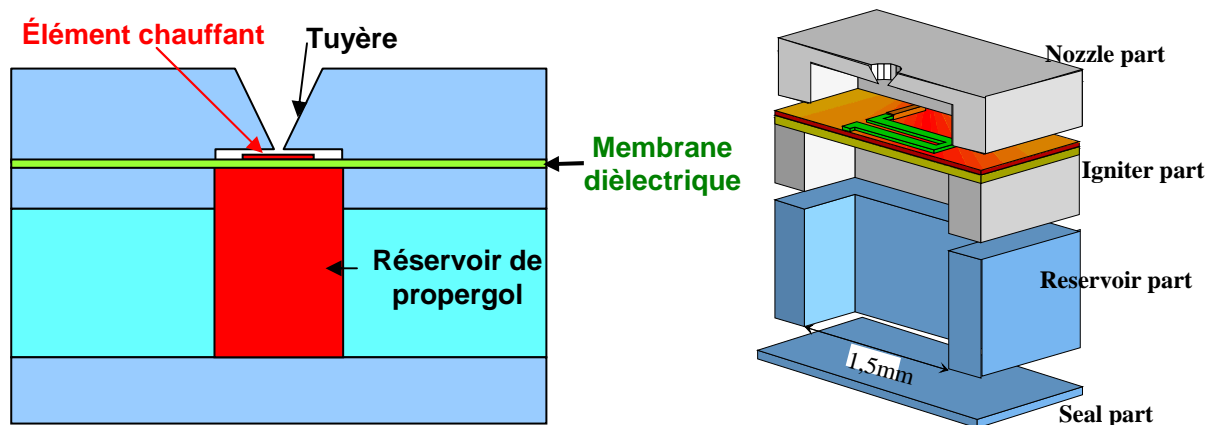


Figure II-1 : Vue en coupe schématique d'un micro-propulseur.

Dans ce type de micro-propulseur, on initie la combustion du propergol à l'aide d'une résistance chauffante située sur la membrane du second niveau (igniter part).

Une fois la température d'initiation atteinte (dans notre cas 300°C pendant quelques dizaines de millisecondes), il y a initiation de la combustion du propergol tout d'abord de façon locale puis s'étendant à toute la surface. La propagation du front de combustion s'étend enfin à l'ensemble de la matière explosive contenue dans le réservoir. La pression du gaz ainsi généré brise la membrane diélectrique. Le gaz est alors évacué à travers la tuyère à une vitesse supersonique. Le rapport entre le volume des gaz générés et celui du combustible solide est proche de 10000 et compte tenu des dimensions de nos dispositifs, la poussée obtenue est comprise entre 0,1 mN à quelques dizaines de mN.

Les chambres de combustion sont réalisées en Foturan (verre photosensible) choisi pour sa faible conductivité thermique, les autres parties (tuyères, étage d'initiation et plaque de scellement) sont réalisées en silicium grâce aux techniques standards de la microélectronique et du micro-usinage de surface et de volume.

Pour chaque micro-propulseur, les dimensions de la chambre de combustion sont millimétriques et micrométriques en ce qui concerne celles de la tuyère. De nouvelles

limitations sont apparues lors de la miniaturisation. En effet, lors de la combustion du propergol, les pertes thermiques par conduction, via les parois du réservoir, et la quantité de chaleur nécessaire pour auto-entretenir la combustion sont en compétition. Ainsi, si les pertes sont supérieures à la production de chaleur, le front de combustion stoppe.

Ces considérations associées à l'objectif de maintenir l'attitude d'un nano-satellite, nécessitant quelques dizaines de milli-Newton pendant plusieurs centaines de millisecondes, nous ont conduit à dimensionner les chambres de combustion des micro-propulseurs à un volume d'environ 3mm^3 .

Comme indiqué sur la Figure II-2, la section de la chambre de combustion retenue est de $1.5 \times 1.5 \text{ mm}^2$. Le diamètre d'ouverture de la tuyère varie de $105\mu\text{m}$ à $150\mu\text{m}$ selon la poussée désirée. La hauteur totale de la chambre de combustion est de 1.5mm ($H1+H2$). Pour ces dimensions, la puissance électrique nécessaire à l'initiation est de l'ordre de 200mW . En fixant la résistance des éléments chauffants à $1\text{k}\Omega$, le point de fonctionnement nominal correspondra à une tension de 14 V et un courant de 14 mA .

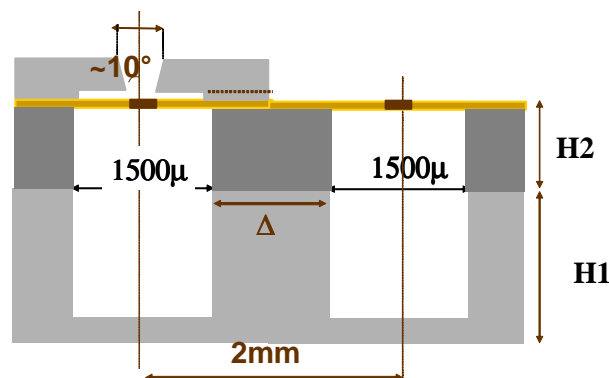


Figure II-2 : Dimensions du micro-propulseur élémentaire.

Afin de réaliser la fonction d'adressage matriciel, nous allons adjoindre à l'élément chauffant, un élément redresseur sur le wafer. Les modifications qui en découlent, doivent rester compatibles avec le procédé de fabrication d'initiateur individuel déjà existant.

II.2 Evaluation de la sensibilité des performances globales de la matrice

Dans le cadre d'une approche multipolaire, l'interrupteur individuel permet d'éliminer les courants de fuite, ou du moins de les rendre négligeables devant le courant adressé. Dans l'approche dipolaire, ces courants de fuite affectent le fonctionnement de la matrice. C'est pourquoi, il convient de bien appréhender les mécanismes de conduction parasite dans les cellules non sélectionnées et d'évaluer l'influence de la non idéalité de l'élément bloquant (courant inverse de la diode, dispersion de la tenue en tension (V_B),...) sur les performances globales de la matrice. Afin de quantifier ces performances, nous avons défini le rendement

d'adressage « η » comme étant le rapport entre la puissance dissipée dans l'élément adressé et celle appliquée à la matrice. Certes, nous aurions pu nous attacher à des paramètres tels que le temps de réponse mais dans la perspective d'applications dans des systèmes embarqués, ce rendement d'actuation souligne une considération énergétique dont l'importance est souvent primordiale. Pour expliquer le rôle de l'élément à seuils, observons la Figure II-3, déjà présentée au premier chapitre, qui montre les conductions dans une matrice, comprenant M lignes et N colonnes, où l'élément chauffant est modélisé par une résistance.

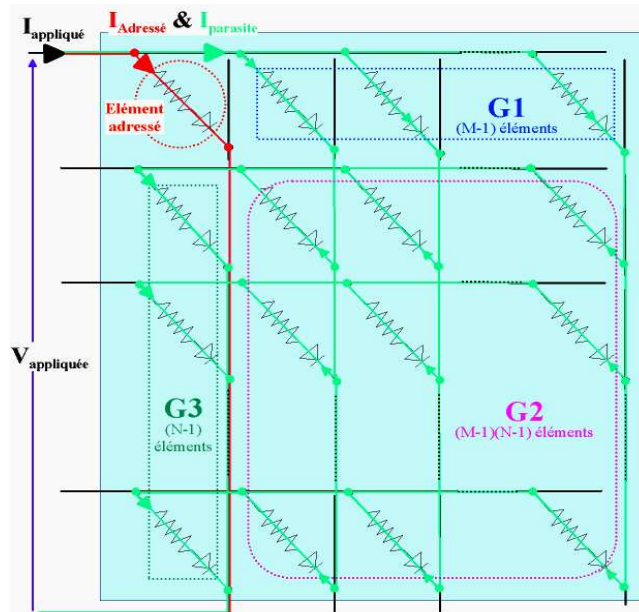


Figure II-3 : Fonctionnement d'une matrice à diodes.

Dans le cas de commande représenté, la cellule [1,1] est sélectionnée (correspondant à l'intersection de la ligne 1 et de la colonne 1). La tension appliquée se retrouve intégralement à ses bornes. Dans ces conditions et en faisant l'hypothèse que les pertes liées aux amenées du courant restent négligeables, le rendement d'adressage peut s'exprimer de la façon suivante :

$$\eta = P_{\text{Adressé}} / P_{\text{Appliquée}} = I_{\text{Adressé}} / I_{\text{Appliqué}} = \frac{1}{1 + \frac{I_{\text{Parasite}}}{I_{\text{Adressé}}}} \quad (1)$$

A présent, intéressons nous à la conduction parasite (I_{Parasite}) dans le reste de la matrice. L'ensemble du courant de fuite passe tout d'abord dans les (M-1) éléments en direct qui composent le groupe « G1 ». Puis les (M-1)(N-1) éléments en inverse du groupe « G2 » sont parcourus, avant que ne soient traversés les (N-1) éléments du groupe « G3 » eux aussi en direct. Si l'on fait l'hypothèse que les diodes sont identiques, il n'y a alors pas de dispersion des courants inverses et des tensions de claquage. On peut alors résumer la conduction adressée et la conduction parasite par le schéma électrique équivalent présenté sur la Figure II-4.

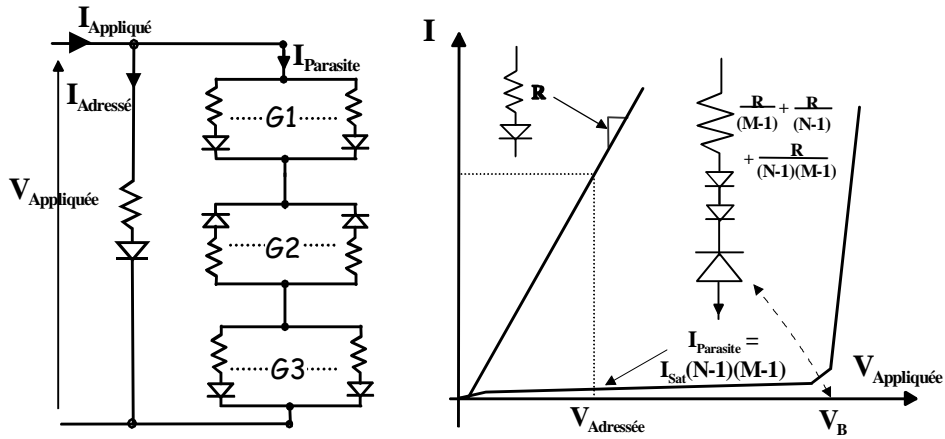


Figure II-4 : Schéma électrique équivalent à une matrice à base de diodes

Cette modélisation de la matrice nous amène à tirer les conclusions suivantes :

- Ce sont les diodes du groupe G2, polarisées en inverse qui supportent la quasi-totalité de la tension appliquée. C'est donc ce groupe, comprenant le plus grand nombre d'éléments, qui limitera le courant parasite. Le courant parasite total peut être exprimé sous la forme de l'expression suivante :

$$I_{\text{Parasite}} (V_{\text{Appliquée}} < V_B) = (M-1)(N-1) I_{\text{Sat}} (-V_{\text{Appliquée}}) \quad (2)$$

$$\& I_{\text{Parasite}} (V_{\text{Appliquée}} > V_B) \cong \frac{V_{\text{Appliquée}} - V_B}{\frac{R}{M-1} + \frac{R}{N-1}} \quad (3)$$

- Compte tenu de cette relation, ce type d'adressage présentera une grande sensibilité à la température, par le biais du courant de saturation, auquel s'ajoute l'influence de la taille de la matrice. Il en résulte une baisse significative des performances globales de la matrice.

En fonctionnement normal, on limitera la tension d'actuation à une valeur inférieure à celle du claquage des diodes (V_B). La valeur maximale acceptable du courant de saturation des diodes, pour un rendement η souhaité, doit satisfaire l'inéquation suivante :

$$I_{\text{Sat}} < \frac{I_{\text{Adressé}}}{(M-1)(N-1)} \cdot \left(\frac{1-\eta}{\eta} \right) \quad (4)$$

Il apparaît clairement que dans le cas d'une matrice de détecteurs dans laquelle le courant mesuré est réduit ($< 1 \mu\text{A}$), il devient quasiment impossible de satisfaire une telle condition sur le courant de saturation et ce, d'autant plus que la dimension ($M \times N$) de la matrice sera importante.

Pour illustrer nos propos, considérons la matrice conçue dans le cadre du projet MicroPyros, comprenant 10×10 éléments chauffants ($R_{\text{Heater}} = 1 \text{ k}\Omega$). A l'aide du simulateur électrique "Pspice", nous avons étudié la conduction parasite en faisant varier la puissance adressée, et le courant de saturation des diodes (I_{Sat}). La Figure II-5 présente l'évolution du rendement en fonction du courant de fuite, en considérant plusieurs puissances appliquées.

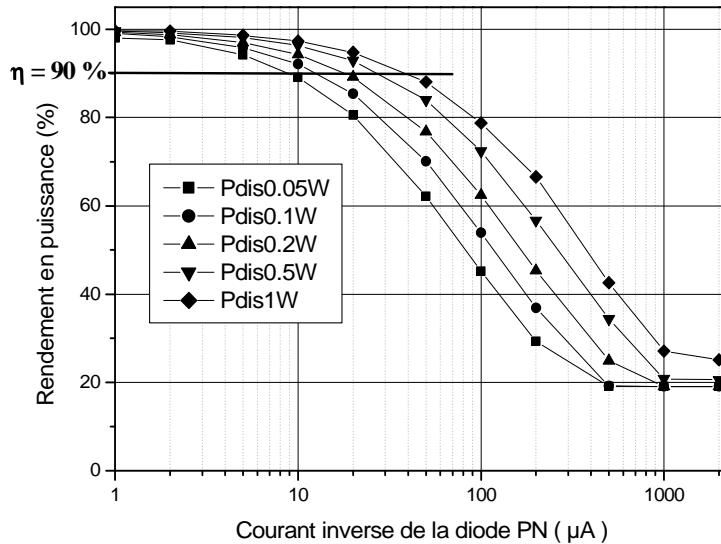


Figure II-5 : Evolution du rendement en fonction du courant de fuite.

On constate que pour obtenir un rendement η supérieur à 90%, le courant de saturation I_{Sat} admissible dans la diode dépend aussi de la puissance adressée. En effet, pour une puissance réduite de $P_{adressée}$ de 50 mW, ce courant doit rester inférieur à $8\mu A$, contre $20\mu A$ pour la puissance de 200mW visée pour notre application. Il peut même atteindre $100\mu A$ pour une puissance de commande élevée de 1 W.

La Figure II-6 montre les évolutions conjointes du rendement (gris), des courants appliqués (vert) et d’actuation (rouge) et de la puissance dissipée (noir) dans l’élément sélectionné.

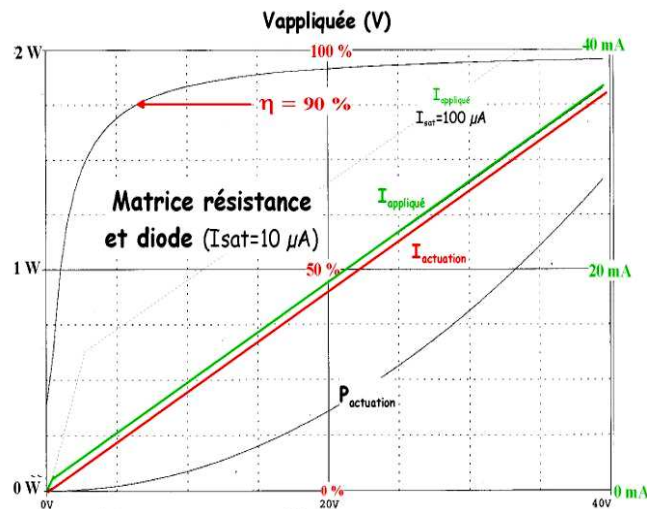


Figure II-6 Evaluation des performances d'une matrice 10x10 à éléments redresseurs ($I_{Sat}=10\mu A$)

Un courant de saturation de $10\mu A$ entraîne un écart entre le courant d’actuation et celui appliqué d’environ $0.8mA$, conforme à la valeur déduite de la relation (2) et cela quelque soit la tension appliquée. Au-delà d’une tension appliquée de 7V, soit une puissance dissipée de 60 mW, le rendement devient supérieur à 90 %.

Cette étude nous confirme que la conduction parasite dans les éléments non sélectionnés est bien conforme à notre modélisation (cf. Figure II-4). Pour notre application (matrice de 10*10 éléments), avec une puissance adressée de 200mW et un rendement supérieur à 90 %, on doit limiter le courant de conduction en inverse I_{Sat} à moins de 20 μ A. Malgré tout, les éléments des groupes G1 & G3 ne dissiperont que 32 μ W, contre 0.5 μ W pour ceux du groupe G2 et on peut conclure qu'aucune cellule, autre que celle adressée, ne sera actionnée accidentellement.

II.3 Réalisation de matrices adressées à l'aide de diodes silicium

II.3.1 Présentation du procédé de fabrication compatible avec le procédé de réalisation des initiateurs à résistances polysilicium diffusé.

Avant de présenter les aménagements du procédé de fabrication que nous avons dû apporter, présentons le procédé initial. Pour réaliser les initiateurs, on utilise un wafer de silicium (100) de 350 μ m d'épaisseur recouvert de 1,4 μ m d'oxyde de silicium obtenu par oxydation thermique humide. Ensuite, un dépôt LPCVD (Low Pressure Chemical Vapor Deposition) est réalisé pour obtenir une couche de SiN_x de 0.6 μ m d'épaisseur. Ces premières couches forment ce qui sera plus tard la membrane diélectrique suspendue, d'une épaisseur totale de 2 μ m. Un dépôt de polysilicium de 0.5 μ m d'épaisseur, lui aussi déposé par LPCVD à 605°C, est ensuite effectué et dopé N+ par diffusion de phosphore. Le ruban chauffant de polysilicium est délimité par gravure sèche ou RIE (reactive ionic etching). Après l'étape d'ouverture des contacts, vient enfin une étape de métallisation finale en Or précédé d'une couche d'accrochage en chrome ou titane, afin de réaliser les amenés de courants et les différents plots de microsoudure. La membrane est libérée par une attaque face arrière du silicium par gravure profonde ou DRIE (Deep Reactive Ionic Etching). La structure visée est présentée sur la Figure II-7, ainsi qu'une photographie d'un élément chauffant sur membrane.

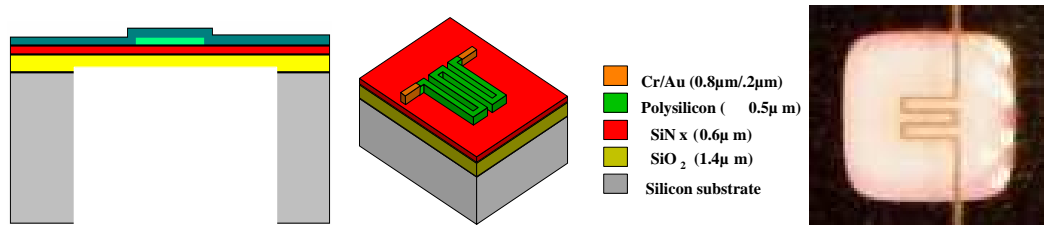


Figure II-7: Structure d'un élément chauffant, et photographie d'une réalisation

Afin de réaliser l'adressage de la matrice par adjonction d'une diode, la voie explorée a été la réalisation d'une diode PN dans le substrat silicium de l'étage de l'élément chauffant. Cependant, l'intégration de cette diode nécessite des étapes d'implantation supplémentaires,

de gravure RIE et enfin de recuits, difficilement compatibles avec le procédé existant. Le point le plus critique est le bilan thermique qui joue un rôle prépondérant sur les contraintes thermomécaniques induites dans la membrane. En effet, l'optimisation du bicouche ($\text{SiO}_2/\text{Si}_3\text{N}_4$) a été faite en prenant en compte le bilan thermique du procédé de fabrication standard des éléments chauffants et limite les contraintes au sein du bicouche à quelques dizaines de MPa. Augmenter ce bilan thermique implique une nouvelle optimisation. Il a donc fallu mettre en place un procédé permettant de préserver les caractéristiques des éléments chauffants existants, tout en obtenant une diode satisfaisant à nos attentes.

On désignera par "process" dans la suite du manuscrit, l'ensemble des étapes d'un procédé technologique. Le premier process a visé la réalisation de matrices de 16x16 éléments. Il reprenait les étapes de fabrication des éléments chauffants classiques, en y ajoutant avant la métallisation finale l'ensemble des étapes nécessaires à la réalisation d'une diode PN dans le substrat silicium.

II.3.2 Process I

II.3.2.1 Description du Process I

Voici l'enchaînement des différentes étapes du premier process mis en œuvre :

Réalisation de la membrane : oxydation thermique SiO_2 ($1.4\mu\text{m}$), dépôts LPCVD du Si_3N_4 ($0.6\mu\text{m}$) puis du polysilicium ($0.5\mu\text{m}$)

Dopage par diffusion de phosphore de la couche de polysilicium.

Photolithographie pour la délimitation de l'élément chauffant en polysilicium.

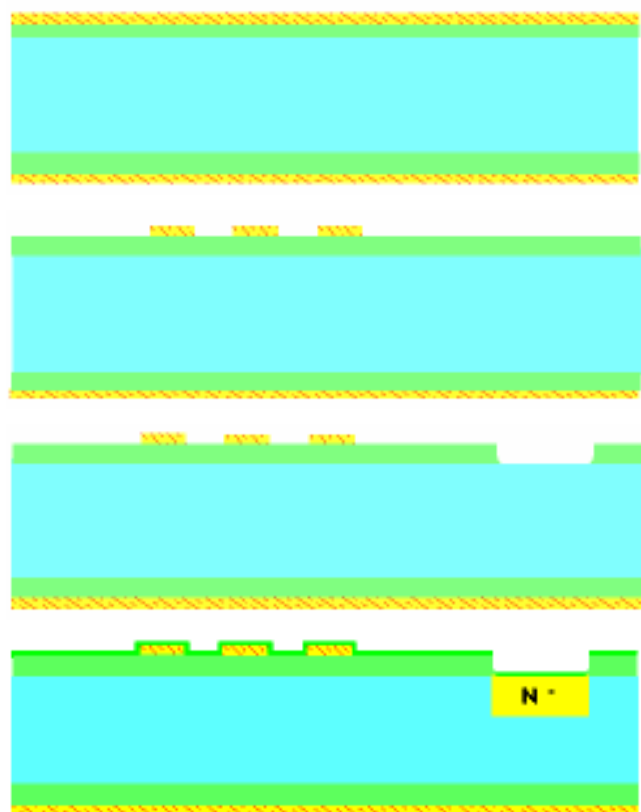
Gravure sèche, RIE du polysilicium

Photolithographie pour l'ouverture de la membrane.

RIE de la couche de Si_3N_4 ($0.6\mu\text{m}$), puis fin de l'attaque aqueuse du SiO_2 au buffer HF

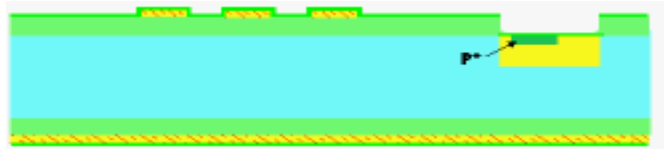
Implantation du caisson N- de la diode

Dépôt LPCVD de Si_3N_4 pour éviter l'exodiffusion durant le recuit de diffusion / activation de l'implantation ($5\text{h} - 1150^\circ\text{C}$)



Photolithographie pour localiser la zone P+ de l'anode

Implantation de Bore (P+)



Photolithographie pour localiser la zone de contact N+

Implantation d'Arsenic (N+)

Recuit d'activation des implantations (30', 950°C)



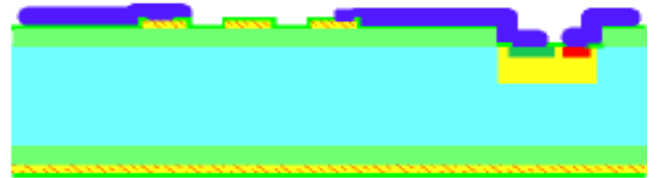
Photolithographie pour l'ouverture des contacts

RIE du Si₃N₄ pour ouverture des contacts

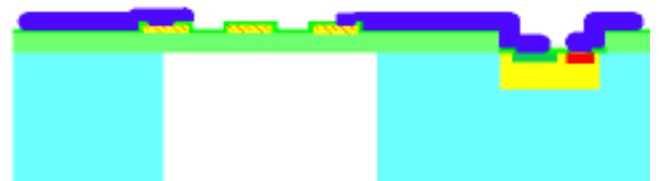


Photolithographie pour le lift-off de la métallisation finale

Métallisation Cr/Au



DRIE (Deep Reactive Ion Etching) face arrière pour libérer les membranes.



II.3.2.2 Présentation des structures réalisées avec le process I

Ce process a permis la réalisation des matrices ^[3] présentées sur la Figure II-8, où l'on peut observer une matrice complète ainsi que le détail de quatre cellules élémentaires.

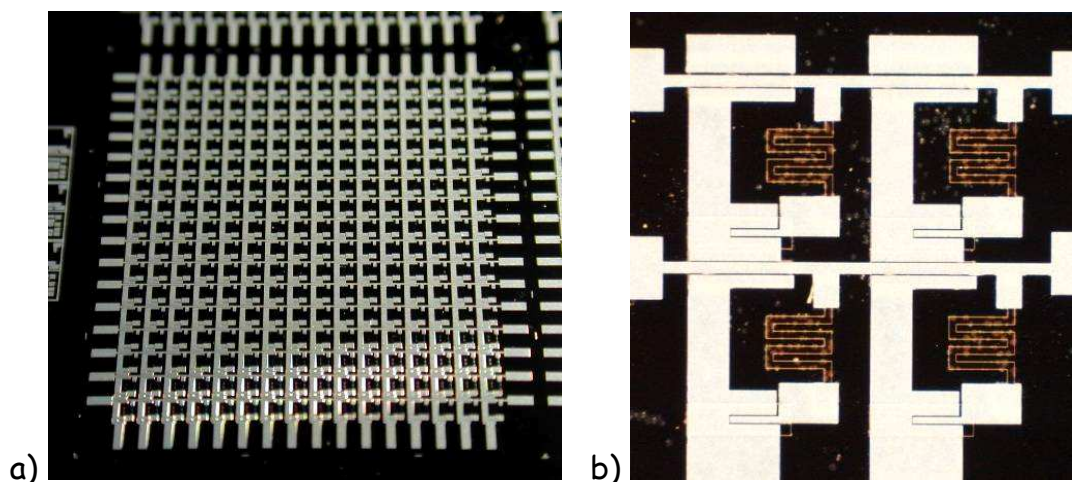


Figure II-8 : Matrice de 16x16 initiateurs thermiques a) et détail des cellules b).

Les tests électriques de ces matrices ont mis en évidence un courant de fuite très important, de l'ordre du milliAmpère. Les tenues en tension des diodes présentait elles

aussi de fortes dispersions rendant difficile l'arrêt de conclusions nettes. Ces matrices n'ayant pas été libérées, nous n'avons pu nous rendre compte de l'impact des étapes thermiques (recuit d'activation des implantations à 1150 °C pendant 5 heures) sur la tenue des membranes lors de la libération. De nombreux problèmes liés à la métallisation ont aussi été mis à jour. Nous avons été confrontés à des problèmes de recouvrement de marche, ainsi qu'à des contacts qui n'étaient pas ohmiques. Dans ce process, les diodes avaient une surface de 50x400 μm^2 . Les dimensions de la matrice à réaliser ayant été revues à la baisse (10x10 éléments), un nouveau jeu de masques a été réalisé pour le deuxième process.

II.3.3 Process II

II.3.3.1 Description du Process II

Le process II reprend l'enchaînement des étapes du process I dans ses grandes lignes. Seules les doses et énergies des implantations ont été modifiées. Un nouveau jeu de masques a été dessiné pour réaliser des matrices de 10x10 éléments. La surface d'anode des diodes a été réduite à 30x300 μm^2 . Le profil en dopage et la géométrie de la structure visée sont présentés sur la Figure II-9. Nous avons augmenté la profondeur de l'anode (la jonction P+ / N- passe respectivement de 0,5 μm à 1 μm) ainsi que celle du caisson N- (la jonction N-/P- passe respectivement de 3 à 4 μm).

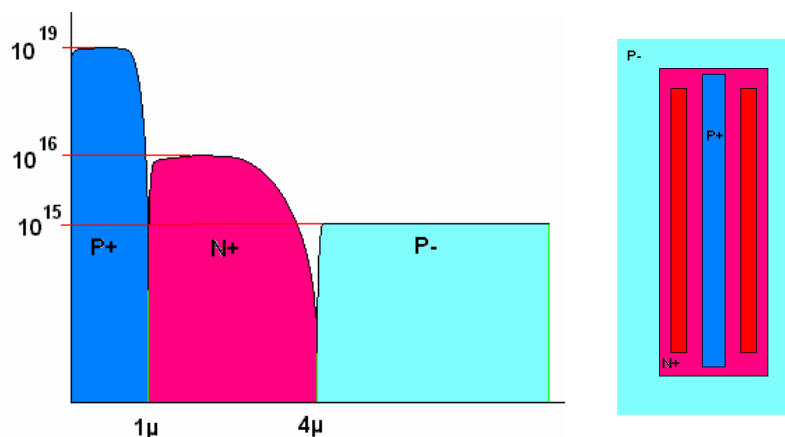


Figure II-9 : Nouveau profil des dopages dans la diode visés lors de la réalisation du process II.

II.3.3.2 Présentation des structures réalisées avec le process II

Ce process, avec les nouveaux paramètres d'implantation et le nouveau design des cellules, a permis de réaliser 4 matrices par wafer (4 pouces). Les tests montrent que l'ensemble diode et élément chauffant possède une caractéristique courant / tension conforme à celle visée (Figure II-10).

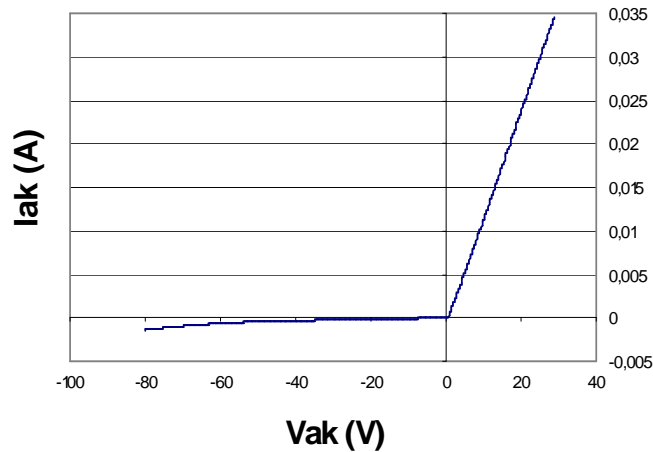


Figure II-10 : Caractéristique courant/tension de la cellule élémentaire (R+D).

On note cependant que le courant de fuite de la diode reste trop important. Ce courant est de $250\mu\text{A}$ à 20V (Figure II-11). Le rendement en puissance de la matrice chute à une valeur proche de 50%. Il conviendra donc pour le prochain process d'augmenter la tenue en tension des diodes réalisées et de réduire le courant de fuite à la tension d'utilisation.

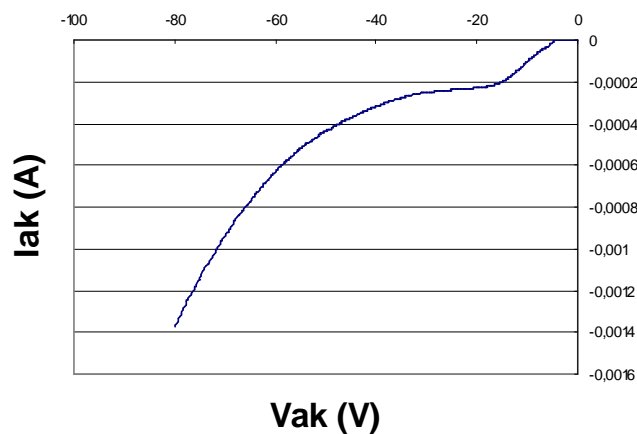


Figure II-11 : Caractéristique de la diode en inverse.

Les cellules élémentaires réalisées ont des caractéristiques qui les rendent exploitables pour l'adressage. Cependant, les matrices sont souvent court-circuitées au niveau des croisements lignes / colonnes les rendant inexploitables. Afin de permettre ce franchissement à chaque croisement présenté sur la Figure II-12, ne disposant que d'un niveau de métallisation, nous avons utilisé des Vias en polysilicium diffusé passivé par un film de Si_3N_4 déposé par PECVD.

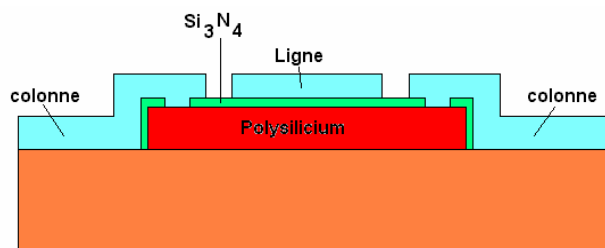


Figure II-12 : Via de croisement ligne/colonne.

Les tests effectués sur des motifs spécifiques, présentés sur la Figure II-13, montrent que la conduction ne se fait pas par les surfaces en regard sur le dessus du via.

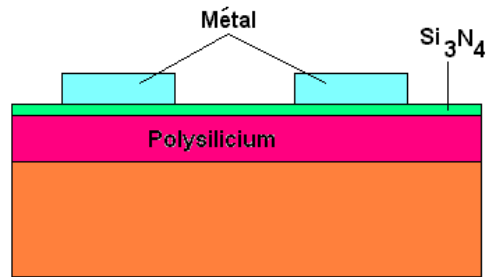


Figure II-13 : Plots de métal sur le polysilicium passivé par le Si_3N_4 .

Sur ces motifs, des tests C(V) effectués sur le Si_3N_4 ont montré que ce type de dépôt est un bon passivant présentant une résistivité très élevée sur des structures planes. En revanche, la présence de flancs verticaux au niveau des vias en polysilicium, induit après relaxation de contrainte thermomécanique, des craquellements de cette passivation SiO_2 responsables des courts-circuits lignes/colonnes. C'est en augmentant l'épaisseur de ce passivant à $0,8\mu\text{m}$ et surtout en limitant les étapes thermiques suivantes que l'on pourrait résoudre ce problème. Cette nouvelle couche, présente aussi dans les diodes (Figure II-14), n'a pas perturbé leur fonctionnement.

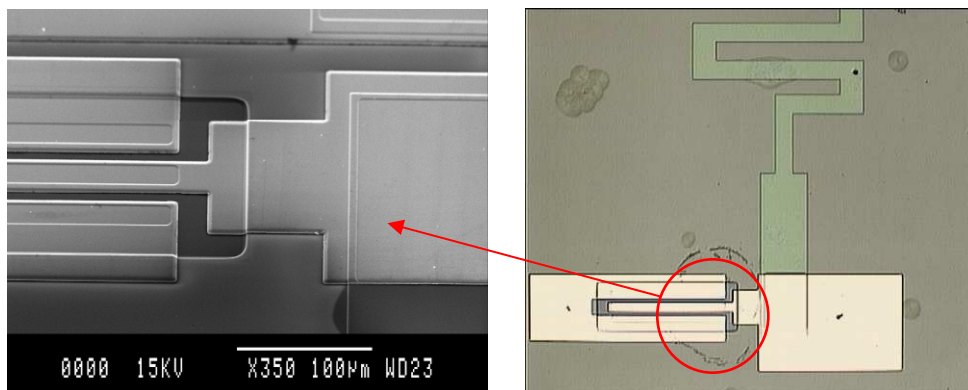


Figure II-14 : Détail de la diode du process II.

Ces matrices, non fonctionnelles en raison des courts-circuits lignes/colonnes, nous ont quand même permis de tester la libération de ses membranes grâce à la DRIE face arrière. Lors de l'étape de libération, l'ensemble des membranes est rompu. En effet, le temps de recuit d'activation / diffusion de 5h à 1150°C , permettant la diffusion à $4\mu\text{m}$ du caisson N-, est trop important. Les contraintes dépassent plusieurs GPa dans le bicouche $\text{SiO}_2/\text{SiN}_4$ et sont telles que la membrane ne peut que se briser à la libération.

II.3.4 Process III

Ce dernier processus vise à résoudre les problèmes précédemment rencontrés lors des processus de fabrication antérieurs. Nous devons faire face à une tenue en tension trop

faible de nos diodes, et veiller à limiter le bilan thermique pour ne pas qu'il soit fatal à la libération des membranes.

II.3.4.1 Augmentation de la tenue en tension :

Afin d'augmenter la tenue en tension des diodes, nous avons revu la forme de ces dernières. Lors des premiers processus, l'anode P+ était de forme rectangulaire. Cette géométrie entraîne la présence de diodes sphériques aux quatre coins. Les tenues en tension de ces jonctions sphériques sont inférieures à celle de la jonction plane, et dans notre cas, la tenue en tension est réduite de plus de moitié. Les calculs ^{[4][5]} considérant un dopage du caisson N⁻ de $N_D=10^{16}$ at/cm³ et une profondeur de jonction de 3 μm (l'extension maximale de la charge d'espace étant de 2.63μm) (cf. Annexe1) permettent de présenter la synthèse suivante :

Jonction plane	
Methode Empirique	$V_{BP}=63.1V$
Methode Integrale d'ionisation I	$V_{BP}=52.7V$
Methode Integrale d'ionisation II	$V_{BP}=56.5V$
Jonction cylindrique	
Méthode Empirique	$V_{BC}=31.5 V$
Jonction sphérique	
Méthode Empirique	$V_{BS} =19.68 V$

Ces calculs montrent que les jonctions sphériques présentes dans nos premières diodes ne permettaient pas d'obtenir les tenues en tension désirées ($B_V>30V$). Pour palier ce désagrément, nous avons opté, comme le montre la Figure II-15, pour une forme de cathode rectangulaire aux extrémités arrondies.

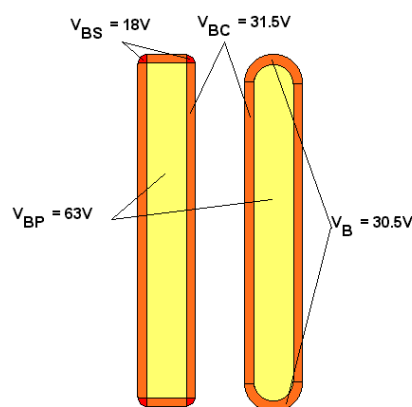






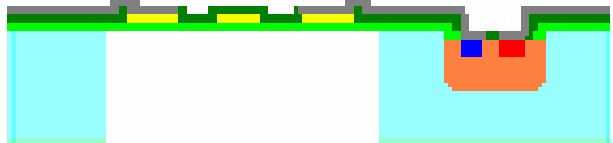


Figure II-15 : Design de la cathode.

Le rayon de courbure étant grand devant celui de la diffusion, on obtient alors une tenue en tension proche de celle de la diode cylindrique, supérieure aux 30 Volts souhaités.

II.3.4.2 Diminution du bilan thermique et description du Process III:

Afin de diminuer le bilan thermique pour résoudre les problèmes rencontrés lors de la libération des membranes, nous avons décidé de mettre à profit l'étape thermique de la croissance de l'oxyde humide de la membrane. Ainsi, l'étape de recuit de diffusion du caisson N sera supprimée. Ce changement implique certains aménagements du process qui est décrit par la suite.

Photolithographie marquage silicium RIE 0,5µm de Silicium Implantation localisée du caisson N-	
Réalisation de la membrane: oxydation thermique (1.4µm), puis dépôt de Si ₃ N ₄ (0.6µm) et du polysilicium (0.5µm) par LPCVD Diffusion de phosphore dans le polysilicium Photolithographie pour la délimitation du heater, puis RIE du polysilicium	
Photolithographie pour l'ouverture de la membrane et RIE de la couche de Si ₃ N ₄ (1.4µm), puis fin de l'attaque du SiO ₂ au buffer HF	
Photolithographie et implantation localisée P+ d'anode Photolithographie et l'implantation localisée N+ de contact de cathode Dépôt PECVD de SiO ₂ pour limiter l'exodiffusion lors du recuit d'activation des implantations	
Recuit d'activation des implantations	
Photolithographie pour l'ouverture des zones de contact et attaque aqueuse (HF) du SiO ₂	
Photolithographie pour le lift-off et Métallisation AlSi de 2µm d'épaisseur DRIE (Deep Reactive Ion Etching) face arrière pour libérer les membranes	

II.3.4.3 Présentation des structures réalisées avec le process III

Ce process III a donc été réalisé en employant le nouveau masque d'implantation d'anode, dont la géométrie rectangulaire avec les extrémités arrondies, et qui est présenté sur la Figure II-16.

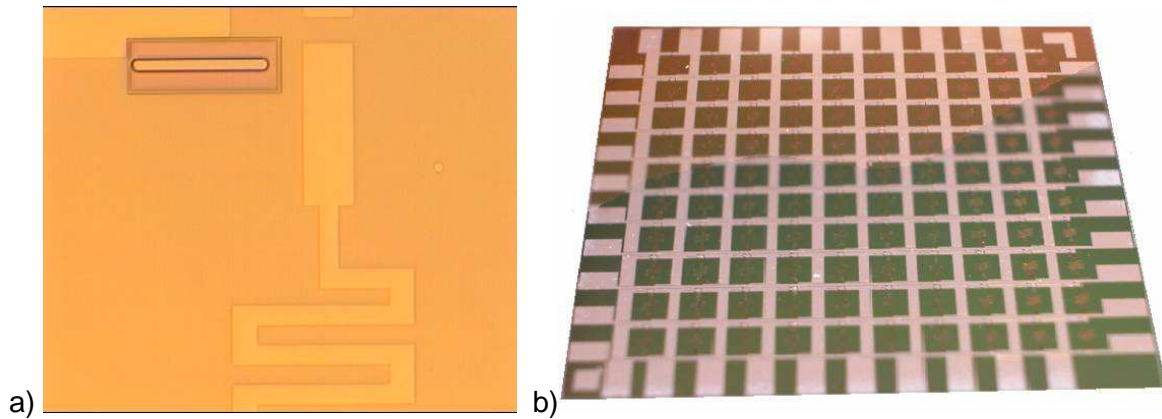


Figure II-16 : a) Masquage résine avant implantation d'anode, b) Matrice d'éléments chauffants à adressage par diodes PN silicium.

Nous avons changé la métallisation Cr/Au, respectivement de 100nm et 500nm, pour de l'AlSi de 2 μm d'épaisseur dans le but de palier le problème de continuité rencontré lors des précédents process. En effet, l'ouverture de la membrane pour réaliser la diode dans le silicium représente une marche de près de 2 μm , à laquelle s'ajoute la sous gravure liée à l'attaque aqueuse du SiO_2 .

Les tests électriques, avant l'étape de libération de la membrane par DRIE, ont montré un nouveau problème lié au choix de la métallisation. Les diodes sont en effet court-circuitées. Cela est dû à la diffusion accélérée de l'aluminium dans les couches implantées.

En revanche l'étape de libération de la membrane s'est bien passée et témoigne de la réduction significative des contraintes induites dans la membrane et liées à la réalisation des dopages des diodes.

II.4 Bilan des réalisations à base de diodes PN Silicium

Les solutions proposées au cours de ce deuxième chapitre mettent en œuvre un nombre très important d'étapes supplémentaires par rapport au processus initial. Ainsi, pas moins de cinq niveaux de masquages viennent s'ajouter aux quatre déjà existants. Cet accroissement du nombre d'étapes et les problèmes liés à la difficile compatibilité avec le process existant n'ont pas permis d'aboutir à des résultats satisfaisants.

Les problèmes liés au fort bilan thermique des nouvelles étapes sont résolus par la solution proposée dans le process III. La tenue en tension a été nettement améliorée. Cependant, le relief dû à la réalisation de la diode en bas de la membrane et la diffusion de la métallisation dans les zones implantées n'ont pas à ce jour trouvé de solution fiable et reproductible.

De plus, la solution diode silicium présente une très forte sensibilité aux paramètres (I_{Sat} et V_B) de chaque diode de la matrice. La mise en place d'une telle matrice exige une parfaite maîtrise des composants réalisés, ce qui demanderait encore un temps très important de mise au point et de fiabilisation du processus de fabrication.

Les process successivement mis en place nous ont permis de cerner les étapes critiques et souvent de trouver une solution technologique. Cependant, l'analyse de la complexité et des difficultés de mise au point de ces solutions nous ont fait stopper dans le développement de cette voie. Une autre solution, plus innovante, présentée dans le prochain chapitre, vient idéalement répondre à nos besoins d'adressage, en limitant les contraintes sur les éléments constitutifs.

Références bibliographiques du chapitre II :

- [1] M.PUIG VIDAL , J.LOPEZ , P.MIRIBEL , E.MONTANE , J.LOPEZ-VILLEGAS , J.SAMITIER , C.ROSSI , T.CAMPS , M.DUMONTEUIL
Electronic circuitry development in a micropyrotechnic system for micropropulsion applications
Microtechnologies for the New Millennium 2003, Maspalomas (Espagne), 19-21 Mai 2003
Proceedings of SPIE "Smart sensors, actuators, and MEMS", Vol.5116, ISBN 0-8194-4976-8, 2003, pp.260-269
- [2] B.LARANGOT
Conception, fabrication et caractérisation de matrices de micropropulseurs pyrotechniques sur silicium
Doctorat, Université Paul Sabatier, Toulouse, 23 Janvier 2004, 157p., Président: M.DJAFARI ROUHANI, Rapporteurs: P.JOULAIN, A.BOURJAULT, Examineurs: L.MARCHAND, Directeurs de thèse: D.ESTEVE, C.ROSSI
- [3] B. LARANGOT, C. ROSSI, T. CAMPS, A. BERTHOLD, P.Q. PHAM, D. BRIAND, N.F. DE ROOIJ, M. PUIG-VIDAL, P. MIRIBEL, E. MONTANE, E. LOPEZ , J. SAMITIER
SOLID PROPELLANT MICRO-ROCKETS – TOWARDS A NEW TYPE OF POWER MEMS
NanoTech'2002, Houston (USA), 9-12 Septembre 2002, 7p.
- [4] G. CHARITAT
Modélisation et réalisation de composants planar haute-tension
Doctorat d'Etat, Université Paul Sabatier, Toulouse, 28 Septembre 1990, N°1416
- [5] F. MORANCHO
De nouvelles limites pour le compromis "résistance passante spécifique/tenue en tension" des composants unipolaires de puissance
Habilitation, Université Paul Sabatier, Toulouse, 1er Décembre 2004, 89p.,

Chapitre III: Nouvelle approche pour l'adressage matriciel à l'aide d'éléments à seuils symétriques

Dans le premier chapitre, nous avons vu l'intérêt de la mise en place d'un adressage matriciel pour des systèmes comprenant un grand nombre d'éléments. Nous avons ensuite présenté l'application visée, ainsi que la première méthode d'adressage, reposant sur l'adjonction en série de diode PN réalisée dans le silicium avoisinant. Nous avons mis en œuvre cette méthode pour la réalisation de matrices de micro-propulseurs.

Dans le cadre du projet Micropyros, en parallèle avec la première voie explorée qui s'est avérée infructueuse, nous avons développé une nouvelle méthode d'adressage : cette approche intègre au sein de l'élément chauffant, la fonction seuil nécessaire à l'adressage.

Au cours de ce chapitre, nous détaillerons le fonctionnement de ces matrices à base d'éléments à seuils symétriques (ESS). Nous mettrons en évidence l'intérêt de leur utilisation, en soulignant l'impact sur les performances globales des matrices ainsi réalisées.

Nous expliquerons comment leur utilisation permet de réduire les contraintes sur les performances de l'élément à seuils (I_{Sat} , V_{Seuil}) rendant aisé la réalisation de telles matrices.

Nous terminerons par la présentation des applications pour lesquelles cette approche générique d'adressage à base d'éléments à seuils symétriques a été mise en œuvre avec succès. Ainsi seront successivement abordées la réalisation et la caractérisation de matrices de micro-propulseurs nécessitant une puissance d'actionnement proche de 400 mW dissipée sur une surface de $500 \times 500 \mu\text{m}^2$ et dont la taille de la cellule élémentaire est de $2000 \times 2000 \mu\text{m}^2$, Puis celles correspondant micro-éjecteurs nécessitant pour leur part une puissance d'actionnement d'environ 200 mW dissipée sur une surface de $80 \times 80 \mu\text{m}^2$ et dont la taille de la cellule élémentaire est de $250 \times 250 \mu\text{m}^2$.

III.1 Etude théorique de l'adressage à base de dipôles à seuils symétriques

Considérons une nouvelle approche où l'on remplace les dipôles précédemment utilisés (résistance et diode en série), par des éléments à seuils symétriques (ESS). La Figure III-1 présente respectivement le symbole que nous utiliserons pour ce dipôle, son schéma électrique équivalent et enfin, l'allure de sa caractéristique Courant / Tension.

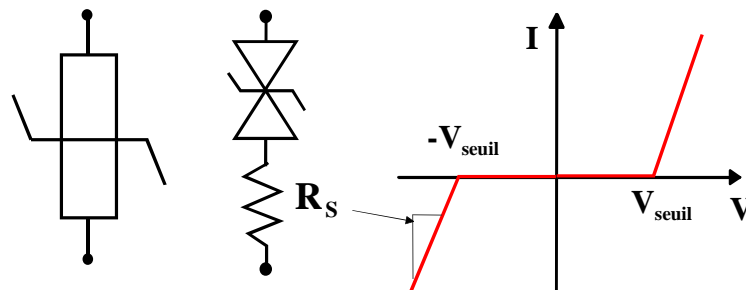


Figure III-1 : Symbole, schéma électrique équivalent et caractéristique $I(V)$ d'un élément à seuils symétriques

Comme on le remarque sur la caractéristique $I(V)$, la symétrie des seuils ne permet plus de distinguer un sens "passant" d'un sens "bloqué", qui correspondaient dans l'approche précédente aux polarisations directe et inverse d'une diode. On parlera plutôt d'un fonctionnement bloqué ($I_{\text{ESS}} = I_{\text{sat}}$) si l'on considère une tension comprise entre V_{seuil} et $-V_{\text{seuil}}$ et d'un fonctionnement passant pour une tension supérieure à V_{seuil} (ou inférieure à $-V_{\text{seuil}}$). Lorsque une tension appliquée est supérieure à la tension de seuil, il se produit alors une variation quasi-linéaire du courant avec la tension que l'on modélisera par une résistance série " R_s ". Ce dipôle présente la caractéristique de dissiper de l'énergie par effet Joule d'une manière répartie sur l'ensemble de la structure (R_s), mais aussi de façon localisée à l'endroit où l'on place les fonctions seuils (jonctions). De plus, l'utilisation de ce type de dipôle en qualité de capteur peut aussi être envisagée si un ou plusieurs de ses paramètres électriques (R_s , V_{seuil} ou I_{sat}) sont sensibles à des grandeurs physiques telles que la température, la pression, le rayonnement infra-rouge, etc. Ainsi l'utilisation de ces ESS peut permettre d'optimiser notre réalisation matricielle en combinant la fonction "seuil" avec une fonction actuatrice ou détectrice et en réduisant la place nécessaire à la fonction d'adressage.

Dans la perspective de réaliser des actionneurs thermiques, on peut exploiter la dissipation thermique générée au niveau du ou des éléments à seuils et l'associer à la puissance dissipée dans la partie résistive (R_s). Un placement astucieux de ces éléments à seuils permettrait de maîtriser la répartition en température et ainsi d'assurer une bonne homogénéité ou un gradient de température selon les besoins. Nous détaillerons ultérieurement les étapes technologiques mises en œuvre pour la réalisation de ce type

d'élément mais nous pouvons d'ores et déjà préciser que l'on peut aisément, en modifiant seulement la géométrie et quelques paramètres technologiques, ajuster la tension de seuil et la résistance série. De plus, nous avons veillé lors des choix technologiques, à la compatibilité avec des réalisations sur membrane suspendue.

Comme précédemment pour les matrices à base de dipôles à seuils asymétriques, nous allons étudier la conduction parasite dans une matrice à base d'éléments à seuils symétriques. La Figure III-2, ci-dessous, montre les conductions souhaitée et parasites dans une matrice de $N \times M$ éléments actifs.

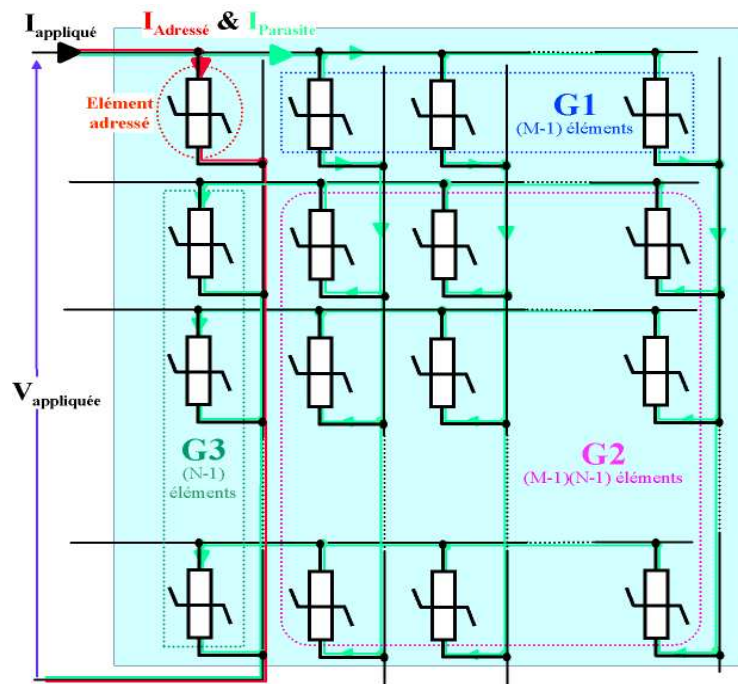


Figure III-2 : Adressage matriciel dipolaire à seuils symétriques, cellule (1,1) sélectionnée.

On retrouve comme précédemment les mêmes groupes d'éléments (G1, G2 & G3) mais cette fois, ils ne sont plus polarisés en direct ou en inverse : tant que la tension appliquée reste inférieure à $3 \cdot V_{Seuil}$, chaque groupe supporte une partie de cette tension et ce sera le groupe contenant le moins d'éléments (G1 ou G3) qui limitera la conduction parasite. Si on fait pour hypothèse que les éléments à seuils sont tous identiques (pas de dispersion de I_{Sat} et V_{Seuil}), on peut représenter ces conductions, adressée et parasites, sur le schéma électrique équivalent présenté sur la Figure III-3. Dans le cadre des matrices à éléments à seuils asymétriques, la tension de claquage (V_B) limitait la plage de la tension de commande. A présent, cette limite est fixée par le seuil de conduction des 3 groupes d'éléments en série et sera donc de $3 \cdot V_{Seuil}$. Cette limite est ajustable en jouant sur les paramètres technologiques et/ou le nombre d'éléments à seuils mis en série.

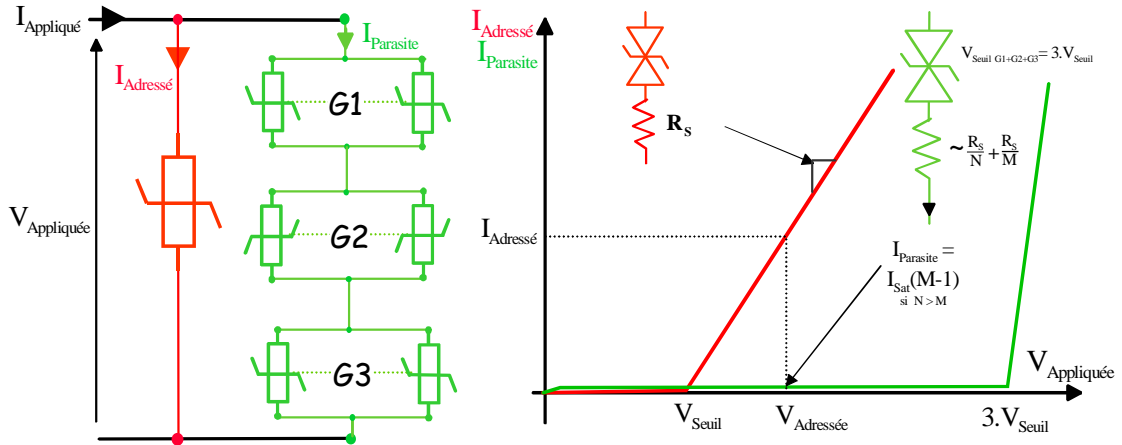


Figure III-3 : Schéma électrique équivalent d'une matrice à base d'ESS et caractéristiques de la cellule sélectionnée et du circuit parasite

Si on considère qu'il y a plus de lignes que de colonnes ($N > M$), ce sera donc le groupe comprenant le moins d'éléments, G1 dans notre cas, qui limitera le courant parasite dont l'expression devient :

$$I_{\text{Parasite}} (V_{\text{Appliquée}} > 3.V_{\text{Seuil}}) \cong (M - 1).I_{\text{Sat}} (V_{\text{Appliquée}}/3) \quad (5)$$

$$\text{et } I_{\text{Parasite}} (V_{\text{Appliquée}} > 3.V_{\text{Seuil}}) \cong \frac{V_{\text{Appliquée}} - 3.V_{\text{Seuil}}}{\frac{R}{M-1} + \frac{R}{N-1}} \quad (6)$$

Comparons ces résultats à ceux résultant de l'utilisation de diodes PN. Le courant parasite obtenu à présent est $(N-1)$ fois plus petit. On peut noter que l'impact d'une augmentation de la température ambiante sera moindre car, même si elle se traduit toujours par l'accroissement du courant de saturation de chaque ESS, le courant parasite sera $(N-1)$ fois plus faible que précédemment.

A présent, le fonctionnement global de la matrice à base d'E.S.S. ne repose plus sur la valeur 'absolue' de V_{Seuil} , (anciennement V_B de la diode PN) mais plutôt sur la plage de tension comprise entre V_{Seuil} et $3.V_{\text{Seuil}}$. On peut relâcher la contrainte sur la valeur absolue de V_{Seuil} , en revanche, on doit garantir une bonne homogénéité des tensions de seuil sur le wafer. La condition sur la valeur de I_{Sat} est, elle aussi, moins contraignante par rapport au cas précédent.

Dans des conditions normales de fonctionnement, on limitera la tension appliquée à une valeur inférieure à $3.V_{\text{Seuil}}$. La valeur maximale du courant de saturation acceptable pour assurer un rendement ' η ' est donnée par la relation suivante :

$$I_{\text{Sat}} (V_{\text{Appliquée}}/3) < \frac{I_{\text{Adressé}}}{M-1} \cdot \left(\frac{1-\eta}{\eta}\right) \quad (7)$$

Afin d'apprécier le fonctionnement et les améliorations amenées par l'utilisation d'ESS sur les performances globales des matrices, considérons à présent le cas d'une matrice comprenant 10x10 éléments chauffants. Cette matrice sera constituée d'ESS ayant comme caractéristiques une tension de seuil de $V_{Seuil} \cong 40V$ et une résistance série de $R_S=1\text{ k}\Omega$. Tout d'abord, étudions la conduction parasite en faisant varier la tension appliquée. La Figure III-4 présente les courants adressé (courbe verte) et appliqué (courbe rouge) à la cellule sélectionnée, les puissances adressée (courbe bleue) et appliquée (courbe jaune), et enfin l'évolution du rendement 'η' (courbe orange), dans le cas d'une matrice d'ESS où l'on considérera que le courant sous le seuil est fixé à $I_{Sat} = 10\mu A$.

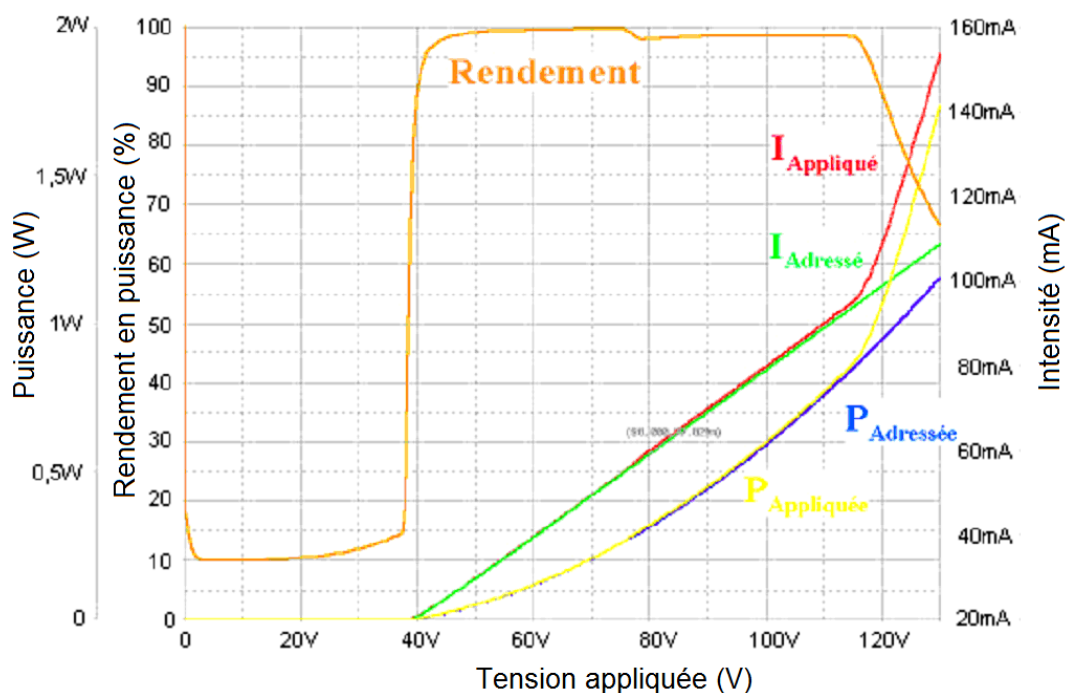


Figure III-4 : Evaluation des performances d'une matrice de 10x10 à éléments à seuils symétriques

La première constatation qui s'impose est, que pour des tensions appliquées supérieures à la tension de seuil ($V_{Seuil} \cong 40V$), le rendement croît rapidement pour se stabiliser à une valeur supérieure à $\eta > 98\%$. Au delà de $3 \cdot V_{Seuil}$ ($\sim 120V$), le rendement s'effondre quand la conduction parasite dans la matrice devient prépondérante. Une observation plus poussée montre qu'au delà d'une tension correspondant à $2 \cdot V_{Seuil}$, il y a un accroissement du courant parasite, se traduisant par une réduction sensible du rendement. Afin de déterminer l'origine de ce seuil intermédiaire, nous avons tracé les évolutions conjointes des différences de potentiel appliquées et celles présentes aux bornes des ESS des groupes G1, G2 et G3. Le caractère non linéaire de la conduction dans les ESS fait, qu'au lieu de répartir la tension appliquée de façon égale aux bornes de chaque groupe d'éléments, elle se répartit comme le présente la Figure III-5.

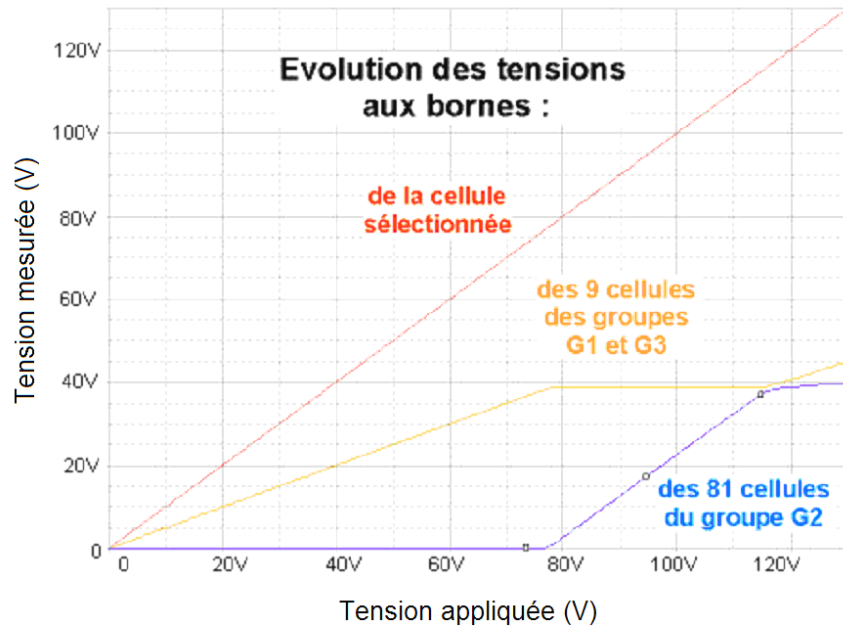


Figure III-5 : Evolutions des tensions aux bornes des éléments de chaque groupe de la matrice, en fonction de la tension appliquée à la cellule sélectionnée.

On remarque que ce sont les groupes G_1 et G_3 qui supportent la totalité de la tension appliquée jusqu'à une valeur de $2.V_{Seuil}$, et donc le groupe G_2 supporte une tension quasiment nulle. Ainsi, dans la plage de tension comprise entre V_{Seuil} et $\sim 2.V_{Seuil}$, le courant inverse est limité par les 9 éléments de G_1 et G_3 , et atteindra une valeur proche de $90\mu A$. Au delà de ce second seuil ($2.V_{Seuil}$), les groupes G_1 et G_3 conduisent un courant réduit ($>0,1mA$) et donc la tension à leurs bornes reste très proche de V_{Seuil} . Pendant ce temps, ce sont les éléments du groupe G_2 qui supportent la différence de tension ($V_{Appliquée} - 2.V_{Seuil}$) et le courant global est limité par ces 81 éléments (d'où l'augmentation de l'écart entre les courants appliqué et adressé car le courant parasite atteint une valeur proche de $810\mu A$). Ce second seuil pourra, comme nous allons le présenter plus tard être repoussé à une valeur supérieure mais difficile à prévoir. En tout état de cause, si l'application visée est une matrice de détecteurs où l'on privilégie la précision de la mesure du courant adressé (η maximum), on limitera la plage des tensions de mesure de $1.3*V_{Seuil}$ à $1.9*V_{Seuil}$. Dans le cas présent, où $I_{Sat} = 10 \mu A$, le rendement dans cette gamme de tensions est supérieur à 99.5%, ce qui permet donc une très bonne précision de mesure. Cette valeur est à comparer avec la précision de 5 % obtenue dans des conditions semblables lors de l'étude de la matrice à base de diodes et résistances. Ceci démontre, une fois de plus, l'intérêt des ESS dans la réalisation de structures matricielles.

A présent, considérons le courant de saturation de 50 nA et observons sur la Figure III-6, l'amélioration des performances (précision et plage d'utilisation).

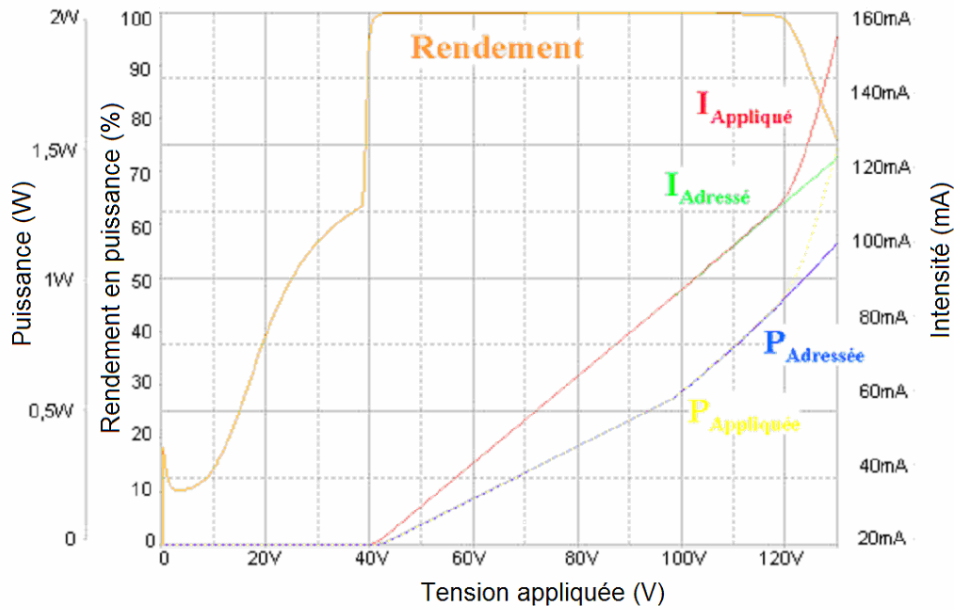


Figure III-6 : Evolutions des performances électriques avec ($I_{Sat}= 50nA$)

Le rendement reste supérieur à 99.8% dans la gamme de tension $1.1 \cdot V_{Seuil}$ à $2.9 V_{Seuil}$. Pour les mêmes paramètres, un rendement de l'ordre de 99,5% serait observé pour une matrice de 128x128 (16384) éléments. Ce qui confirme l'intérêt de ces structures ESS pour la réalisation d'adressage matriciel sur des structures de grandes dimensions (plusieurs milliers de cellules).

III.2 L'élément à seuils symétriques

Cette nouvelle méthode d'adressage repose sur la réalisation reproductible de dipôles à seuils symétriques en utilisant un des matériaux les plus usités en microélectronique : le polysilicium ou silicium polycristallin. Il peut être dopé par implantation et permettre un contrôle local de sa résistivité ainsi que la réalisation de jonctions PN comme le montre la Figure III-7.

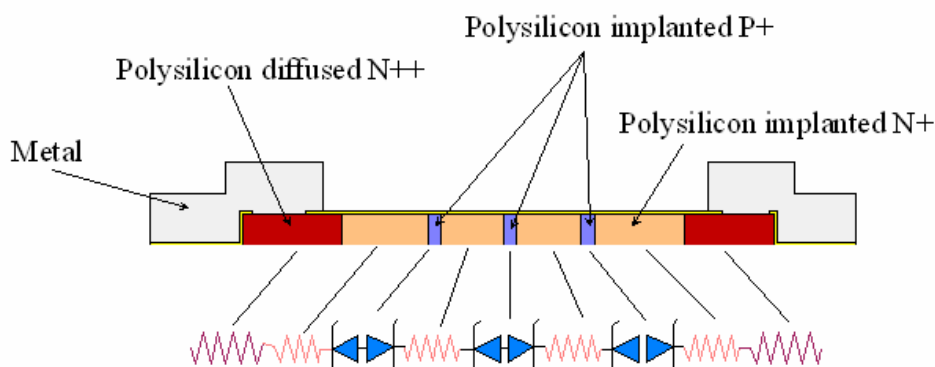


Figure III-7 : Structure d'un ESS réalisé en polysilicium et schéma électrique équivalent

Cette proposition technologique nous a conduit à initier une étude sur le dopage par implantation dans le polysilicium pour identifier les paramètres à ajuster afin de pouvoir contrôler les principales caractéristiques des ESS, à savoir principalement la résistance série et la tension de seuil.

III.2.1 Le Polysilicium

Les couches minces de silicium polycristallin, couramment appelé polysilicium sont très largement utilisées pour la réalisation d'électrodes de grille dans les technologies MOS. Elles sont aussi employées pour la réalisation de résistances ainsi que pour assurer des contacts ohmiques avec des jonctions peu profondes. Dans le cadre de l'utilisation comme électrode de grille, un métal (tel que le tungstène) peut être déposé à sa surface pour augmenter sa conductivité. Le polysilicium est compatible avec des traitements à haute température tels que l'oxydation thermique du silicium ou les recuits d'activation après implantations. Comme électrode de grille, il s'est avéré plus fiable que l'aluminium, car il limite les charges parasites dans l'oxyde. Il a l'avantage de pouvoir être déposé de manière conforme même sur des reliefs abrupts. Les couches minces de polysilicium fortement dopées peuvent également être employées en tant qu'émetteur dans des circuits bipolaires alors que les films de polysilicium faiblement dopés peuvent être employés comme résistances. Enfin, la possibilité de le déposer par LPCVD à basse température (>750°C) permet d'envisager des réalisations sur un grand nombre de supports autres que le silicium, par exemple le verre.

III.2.2 Méthode de dépôt du polysilicium

Le dépôt de polysilicium, sur un wafer de semi-conducteur, est réalisé par pyrolyse (décomposition thermique) du silane, SiH_4 , à l'intérieur d'un réacteur à basse pression à une température comprise entre 580°C et 650°C. Ce procédé de pyrolyse, qualifié de Low Pressure Chemical Vapor Deposition (LPCVD), implique la réaction de base suivante : le silane se décompose en silicium et deux molécules d'hydrogène ($\text{SiH}_4 \rightarrow \text{Si} + 2\text{H}_2$).

Il y a deux procédés basse pression communément utilisés pour déposer des couches de polysilicium. Le premier emploie une concentration de silane de 100% à une pression de 25 Pa à 130Pa (0.2 à 1.0 torr). Le second utilise une concentration de silane moindre (20-30% dilué dans de l'azote) et conserve la même pression. Ces deux types de dépôt permettent de déposer le polysilicium sur 10-200 wafers par run, à une vitesse de l'ordre de 10-20 nm/min et avec des uniformités d'épaisseur de plus ou moins 5%. L'espacement entre les wafers et leur taille, n'ont que des effets mineurs sur le procédé de dépôt. Les paramètres les plus critiques sont la température, la pression, la concentration en silane, et la concentration de dopant. La vitesse de dépôt du polysilicium augmente

rapidement avec la température, puisqu'elle suit l'équation d'Arrhenius :

$$R=A e^{-qE_a/kT} \quad (8)$$

Où R est la vitesse de dépôt, E_a est l'énergie d'activation en électron volts, T est la température absolue en degrés Kelvin, k est la constante de Boltzmann, q est la charge élémentaire d'un électron et A une constante. L'énergie d'activation pour le dépôt de polysilicium est d'environ 1.7 eV.

Il y a cependant une température limite, où la vitesse de dépôt deviendrait plus rapide que la vitesse d'apport de silane à la surface des wafers. Au delà de cette température, la vitesse de dépôt sature et on dit alors que cette réaction est "mass-transport-limited". Dans ce cas, la vitesse de réaction dépend principalement de la concentration en réactif, de la géométrie du réacteur et de l'écoulement des gaz.

Quand la vitesse de dépôt de polysilicium est plus lente que la vitesse d'apport de silane, alors, le dépôt sera limité par la réaction en surface et sera sensible à la concentration en réactif et à la température de réaction. Les procédés de dépôt classiques sont limités par les réactions en surface car ils garantissent une bonne uniformité de l'épaisseur et une taille de grain reproductible.

III.2.3 Dopage du polysilicium

Afin de réaliser des ESS en polysilicium, nous avons besoin de pouvoir contrôler la résistance série de nos éléments. Pour ce faire, nous devons pouvoir choisir le type de dopant et sa concentration dans chaque zone de nos ESS.

Nous avons trois techniques de dopage à notre disposition : le dopage in situ, le dopage par diffusion et enfin le dopage par implantation ionique.

III.2.3.1 Dopage in situ :

La méthode de dopage in situ du polysilicium consiste à apporter les dopants au cours du dépôt de la couche de polysilicium. Cela implique l'adjonction de gaz de dopants tels que la phosphine ou diborane aux gaz normalement utilisés pour le dépôt de polysilicium. Cette méthode n'est pas un processus simple, puisque l'introduction des gaz de dopants complique le contrôle de l'épaisseur des couches, de l'uniformité des dopants et de la vitesse de dépôt. Néanmoins, cette technique quand elle est bien maîtrisée, s'avère très performante. En effet, malgré le danger lié à l'emploi de gaz hautement toxique, on peut arriver à un très bon contrôle de la concentration et donc de la résistivité de la couche déposée.

III.2.3.2 Dopage par diffusion :

L'étape de diffusion est généralement réalisée à des températures relativement élevées (900°C-1100°C). Cette méthode correspond à une oxydation thermique humide du polysilicium, mais la vapeur d'eau est remplacée par un flux d'azote ayant barboté dans une solution à base de POCl_3 . Il en résulte la croissance d'un verre fortement dopé phosphore qui sert ensuite de source dopante qui diffusera dans le polysilicium lors d'un recuit de redistribution. L'avantage de la diffusion est la possibilité d'atteindre des niveaux de dopage très élevés au sein du polysilicium, permettant d'atteindre des résistivités très faibles. Cependant, les hautes températures nécessaires ont tendance à augmenter la rugosité et le dopage effectif n'est pas contrôlable.

III.2.3.3 L'implantation ionique :

Le principe de l'implantation ionique est de bombarder des dopants dans la couche polysilicium. Dans ce but, on accélère des ions d'espèces dopantes à haute énergie (des dizaines de kilo-Volt). L'implantation ionique a des effets destructifs et elle doit être suivie d'une étape de recuit qui répare les défauts ainsi créés au sein du réseau cristallin et qui active les dopants implantés (les atomes passent de sites interstitiels à des sites substitutionnels). Le principal avantage est la possibilité de contrôler le niveau et la localisation du dopage avec une grande précision. Cependant, on ne peut pas atteindre de niveaux de résistivité aussi bas que ceux obtenus par diffusion. Cette méthode permet une localisation précise des zones dopées et les deux types de dopants peuvent cohabiter dans la même structure.

Les deux paramètres les plus importants lors de l'étape d'implantation sont la dose et l'énergie utilisées. La dose correspond à la quantité d'atomes dopants qui sera implantée par unité de surface et est exprimée en atomes/cm². La relation entre dose et dopage dépend du profil d'implantation. Dans le cas d'une couche mince de polysilicium, abordé ultérieurement dans le dernier chapitre, cette répartition devient uniforme après le recuit d'activation et dès lors, le dopage est lié à la dose par la relation suivante :

$$N_{\text{Dopage}} = D_{\text{Implantée}} / L_{\text{Epaisseur}} \quad (9)$$

Les résultats de la littérature ^[1] présentés sur la figure III.8 montrent les possibilités qu'offre le dopage du polysilicium par implantation. Les trois courbes présentent les résistivités de couche dopée par les trois dopants les plus usités à savoir pour le type N, l'arsenic (As) et le phosphore (PHOS), et bore (B) pour le type P. Pour chacun, on retrouve pour les plus forts niveaux de dopages ($>2.10^{20} \text{at/cm}^3$), correspondent à une dose élevée, un mécanisme de solubilité limite, caractérisé par un « planchet » de la résistivité.

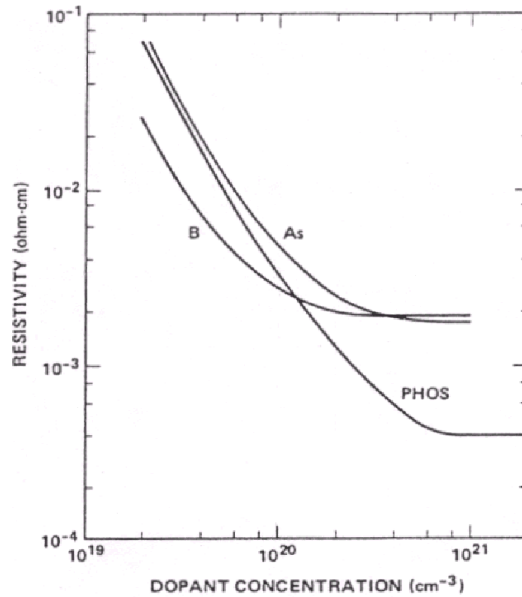


Figure III.8 : Evolution de la résistivité en fonction du niveau de dopage

Cependant, dans le cas du polysilicium, les valeurs de résistivité sont extrêmement sensibles au procédé de dépôt. Il sera donc nécessaire de caractériser la conduction dans les films minces de polysilicium réalisés au LAAS.

L'énergie d'implantation permet d'ajuster la profondeur de la zone implantée dans nos films minces (0.5 μ m) de polysilicium et la dose permet d'ajuster le niveau de dopage. L'autre paramètre important concerne le recuit post implantation visant la redistribution et l'activation des atomes implantés. Dans le cas de couches minces où le recuit permet un dopage uniforme du film, l'énergie ne joue aucun rôle et sera donc fixée pour toutes nos réalisations (50 keV).

III.2.4 Caractérisation des couches et des contacts polysilicium

III.2.4.1 Méthode de caractérisation

Afin de caractériser les différents processus réalisés, nous avons étudié dans un premier temps la résistivité des couches minces de polysilicium en fonction du niveau de dopage.

La méthode expérimentale la plus couramment employée expérimentalement pour déterminer la résistance par carré et la résistance spécifique de contact est la méthode des lignes de transmission dite T.L.M. (Transfer Length Method), proposée par Schockley ^[2], et dont le motif de test est présentée Figure III-.

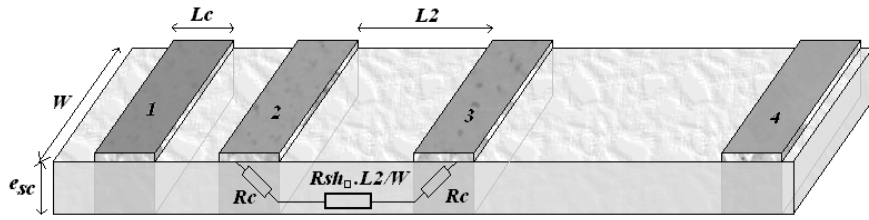


Figure III-9 : Structure de test "TLM"

Où : W est la largeur du contact, R_{SH} la résistance par carré du semi-conducteur, R_C la résistance d'un contact et enfin, L_C la longueur du contact.

La résistance entre deux contacts successifs distants de L est donnée par :

$$R(L) = 2R_C + R_{SH} \cdot n \quad (10)$$

$$\text{Avec } R_{SH} = \rho / e_{SC} \text{ et } n = L / W \quad (11,12)$$

Où R_{SH} est la résistance par carrée de la couche, ρ la résistivité du semi-conducteur et e_{SC} son épaisseur, n le nombre de carrés correspondant au rapport longueur sur largeur du semi-conducteur.

L'ordonnée à l'origine du tracé $R(L)$ correspond pour la valeurs $R(0) = 2 \cdot R_C$ et la pente de cette droite permet de déduire la valeur de R_{SH} . Sans entrer plus loin dans le modèle du contact ohmique, la résistance de fin de contact R_E est un paramètre important qu'il convient de déterminer à l'aide de la relation suivante :

$$R_E = (R_{12} + R_{23} - R_{13}) / 2 \quad (13)$$

Où R_{12} , R_{23} et R_{13} sont les résistances mesurées entre les plots 1 et 2, 2 et 3, 1 et 3.

La détermination de R_C et R_E permet de calculer les paramètres propres au contact ohmique à savoir, la résistance spécifique de contact " ρ_c " et la longueur effective du contact L_T à l'aide des relations suivantes:

$$\rho_c = R_C^2 \cdot w / 2(R_C - R_E) \quad (14)$$

$$L_T = L_C / \cosh (R_C / R_E) \quad (15)$$

En pratique, on choisira une longueur de prise de contact L_C supérieure à $5 \cdot L_T$ pour minimiser la résistance de contact.

III.2.4.2 Etude sur la résistivité du polysilicium dopé par implantation

Dans un premier temps, nous avons réalisé une étude visant à calibrer les résistivités suivant les niveaux de dopage de la couche de polysilicium. Ces tests préliminaires ont ensuite été complétés par des mesures faites systématiquement sur les réalisations suivantes. Les résultats obtenus sont regroupés dans le tableau ci-dessous :

Dopage Bore (at/cm ³)	Résistance par carré (Ω/□)	Dopage Arsenic (at/cm ³)	Résistance par carré (Ω/□)
1,00E+18	26000	1,5 E+18	168000
3E+18	13505	2 E+19	2400
6,00E+18	1280	3 E+19	1450
1,5E+19	399	4 E+19	388
8E+19	113	7 E+19	270
1E+20	92	1 E+20	223
1,7E+20	56	2 E+20	120

Nos résultats sont cohérents avec la littérature^[1] et présentent les mêmes tendances. Ces mêmes travaux, montrent qu'au-dessous d'un dopage de quelques 10¹⁷ at/cm³, le dopage électrique reste très faible devant la concentration en atomes dopants, comme le montre la Figure III-.

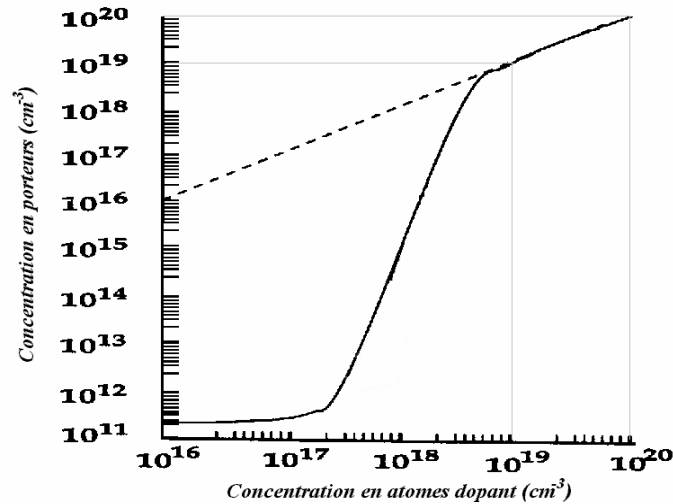


Figure III-10 : Concentration en porteurs libres en fonction de la concentration en atomes dopants pour le silicium poly-cristallin. Courbe en pointillés : concentration dans le silicium mono-cristallin

Par souci de bien maîtriser la résistivité, nous nous interdirons des dopages inférieurs à 10¹⁸ at/cm³. De plus, le polysilicium réalisé au LAAS a été initialement optimisé pour ses caractéristiques mécaniques, morphologiques et non électriques. Ceci entraîne des différences entre des valeurs de résistivité que nous obtenons et celles présentes dans la littérature. L'ensemble des mesures quatre pointes effectuées sur le polysilicium de 0.5µm d'épaisseur réalisé au LAAS, est synthétisé dans la Figure III-8.

On peut noter que lors de nos tests, nous n'avons pas atteint la zone correspondant à la solubilité limite des atomes dopants dans le polysilicium. Il apparaît en effet qu'au-delà d'un niveau de dopage de 3.10²⁰ at/cm³, la résistivité du polysilicium ne décroît plus avec le dopage.

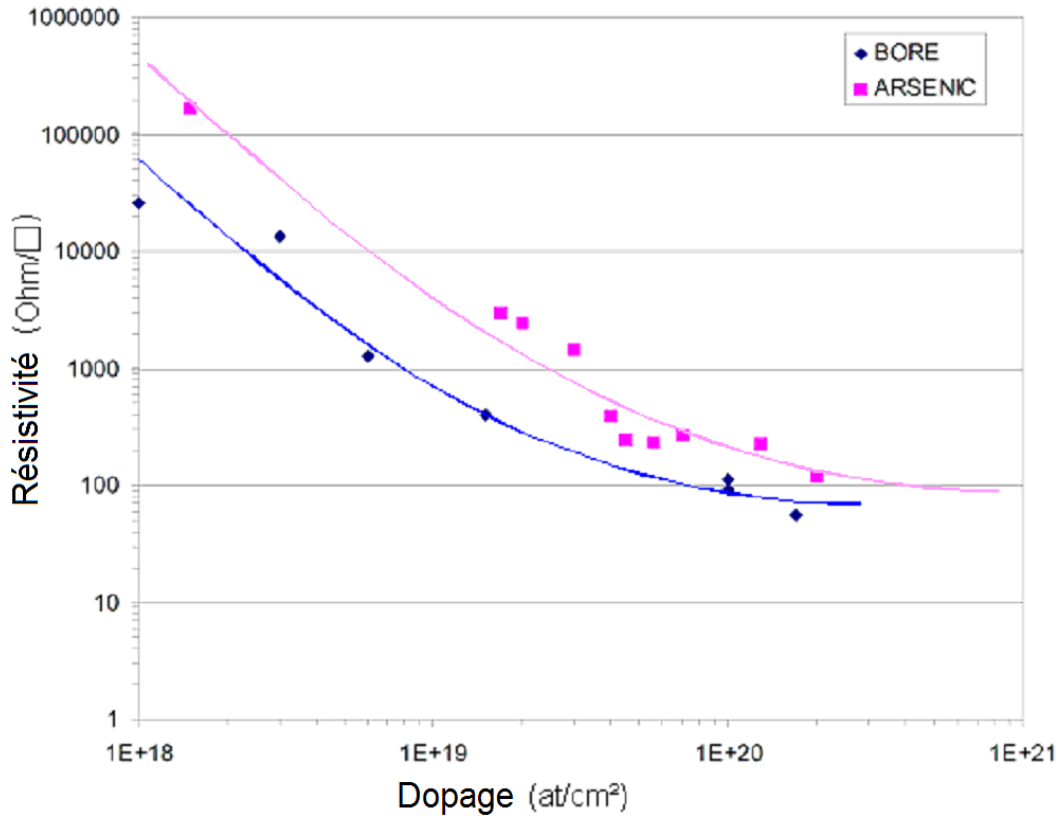


Figure III-8 : Evolution de la résistance par carré du polysilicium en fonction du dopage

On note aussi que, à l'inverse du silicium, à dopage identique, la résistivité des couches de type P est plus faible que celle de type N. Ainsi, si on le désire, on pourra réaliser des jonctions PN⁺ qui présenteront la même résistance par carré des deux côtés de la jonction. Par exemple, pour obtenir une résistivité uniforme de 1 kΩ/□, on optera pour un dopage de 7.10¹⁸ at/cm³ pour la zone P et un dopage de 3.10¹⁹ at/cm³ pour le type N. On voit que l'on peut aisément ajuster la valeur de la résistance par carré de la couche de polysilicium et la faire passer d'environ 15 Ω/□ par diffusion de phosphore, à près de 100 kΩ/□ par implantation d'arsenic. Cette possibilité de modification locale de la résistivité sera particulièrement appréciable pour localiser la zone de chauffe et minimiser les pertes d'amenées pour accéder à la zone active (zone de chauffe).

III.2.4.3 Contacts Métal / polysilicium

Pour optimiser nos dispositifs, il convient de minimiser les éléments parasites liés aux amenées du courant. C'est pourquoi, nous avons étudié le contact Métal/Polysilicium et nous avons tenté de minimiser la résistance spécifique de contact. Pour ce faire, nous nous appuyons sur les motifs TLM. Nous avons étudié et optimisé les conditions du recuit (contact allié) puis nous avons déterminé les dopages critiques permettant l'obtention reproductible de contacts ohmiques. Si nous avons observé que les métallisations classiques (Al, AlSi, Cr/Au) donnent des résultats très semblables, en revanche il convient de dépasser un

dopage minimum, en dessous duquel le contact n'est pas ohmique (contact Schottky). Comme on peut clairement l'observer sur les photos de la Figure III-92, ce dopage minimal est respectivement de $N_A > 10^{19} \text{at/cm}^3$ pour le Polysilicium de type P, contre $N_D > 10^{20} \text{at/cm}^3$ pour le Polysilicium de type N.

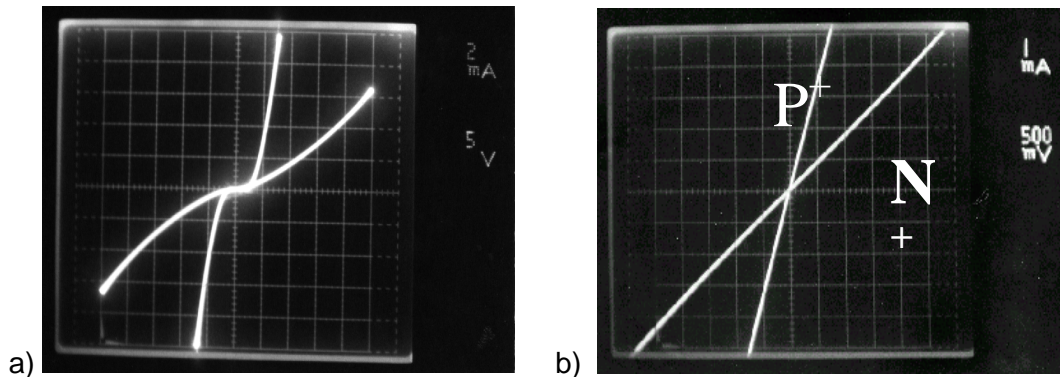


Figure III-9 : *Contacts Métal / Polysilicium a) contacts Schottky $N_A=N_B= 5.10^{18} \text{at/cm}^3$, b) contacts ohmiques $N_A=N_B=10^{20} \text{at/cm}^3$*

Ainsi, après optimisation, nous obtenons de façon reproductible une résistance spécifique de contact inférieure à $\rho_c = 10^{-5} \Omega \cdot \text{cm}^2$ et une longueur effective de contact de $L_T = 1,5 \mu\text{m}$ sur type N et P. En pratique, on pourra limiter la longueur de contact L_C à $10 \mu\text{m}$. Prenons le cas d'un contact de $10 \mu\text{m}$ de long et $100 \mu\text{m}$ de large, la résistance de contact sera d'environ 5Ω .

III.2.5 Jonctions PN polysilicium

Comme nous l'avons déjà dit, outre le contrôle de la résistance série liée au dopage, nous devons maîtriser la tension de seuil des ESS. Pour cela, il est nécessaire de mettre en œuvre des jonctions PN au sein du polysilicium.

III.2.5.1 Etude théorique d'une jonction PN dans du polysilicium

La modélisation d'une jonction PN dans du polysilicium s'avère délicate. En effet, contrairement au cas du silicium où ce type de jonction a été amplement étudié et l'ensemble des mécanismes identifiés et modélisés, il en est tout autrement dans le polysilicium. A cela, s'ajoute le fait que les mécanismes mis en œuvre lors de la conduction électronique dans ce matériau sont extrêmement sensibles à sa morphologie, son épaisseur et son dopage. Ces paramètres sont étroitement liés aux conditions et aux méthodes de dépôt, mais qui peuvent également évoluer (taille et joint de grain) lors des étapes de dopage et de recuit.

Nous n'avons pas trouvé dans la littérature, une loi générique donnant la variation de la mobilité avec le niveau de dopage (dopage électrique que nous ne contrôlons que partiellement) tellement cette dernière est sensible à l'élaboration de ce matériau.

En utilisant le simulateur électrique ATLAS de Silvaco, après les simulations du procédé de fabrication réalisées avec ATHENA, on note rapidement les lacunes de ce simulateur, liées aux modélisations du polysilicium. L'ensemble de ces remarques explique pourquoi nous n'avons pas entrepris d'étude théorique sur la conduction en direct et inverse dans les jonctions PN en polysilicium.

Cependant, dans le cadre de nos réalisations, les niveaux de dopage des différentes zones de l'élément à seuils symétriques sont élevés (dopages $>10^{18}$ at/cm³). Cet état de fait induit de faibles extensions des charges d'espace au niveau des jonctions et ces barrières étroites permettent une conduction de type tunnel et thermo-ionique assistée par le champ en polarisation inverse. De ce fait, nos diodes P⁺N⁺ polysilicium seront des diodes Zéner capables de conduire un courant inverse et présenteront une faible tension de claquage (quelques Volts). Ce claquage n'induirait pas de mécanisme d'avalanche et/ou d'emballement électrothermique et sera réversible, donc non destructeur pour la jonction. Enfin, nos jonctions seront particulières car leur réalisation dans la section d'un film mince, nous permet avec la résolution de la photolithographie à UV classique (~1µm) de réaliser des jonctions de quelques micromètres carré. Avec de telles dimensions, on s'expose à avoir des diodes où les mécanismes parasites de conduction périphériques peuvent être prépondérants devant ceux de la jonction plane dans la section. Nos interrogations trouveront certaines réponses après la caractérisation électrique de ces diodes.

III.2.5.2 Simulation technologique sous Athéna du process

Afin de mieux évaluer l'intérêt d'une couche d'encapsulation, l'effet du recuit d'activation et enfin les profils de dopage obtenus lors de nos implantations, nous avons procédé à des simulations à l'aide du simulateur technologique ATHENA. Ces simulations, plus qualitatives que quantitatives, nous ont permis de dégager plusieurs tendances, des options technologiques et enfin, les limites auxquelles se heurteront nos réalisations.

Cette première étude, présentée sur la figure III.13, montre clairement la nécessité d'encapsuler à l'aide une couche de SiO₂ déposée à basse température (LPCVD ou PECVD) la surface du polysilicium afin de limiter, lors du recuit d'activation (950 °C pendant 1h), l'exodiffusion. Cette étude porte sur une implantation d'Arsenic pour une dose de 10¹⁶ atomes/cm² et une énergie de 30Kev. Cette exodiffusion aurait pour effet de réduire le dopage en surface du polysilicium pouvant compromettre l'ohmicité du contact. En effet, outre la valeur minimale de dopage en surface (7.10¹⁹) le dopage moyen du film est

augmenté de 50% grâce à l'encapsulation. Cette encapsulation servira aussi, comme on pourra le constater plus tard, lors de la présentation du process générique, pour protéger les zones implantées lors de la diffusion de phosphore.

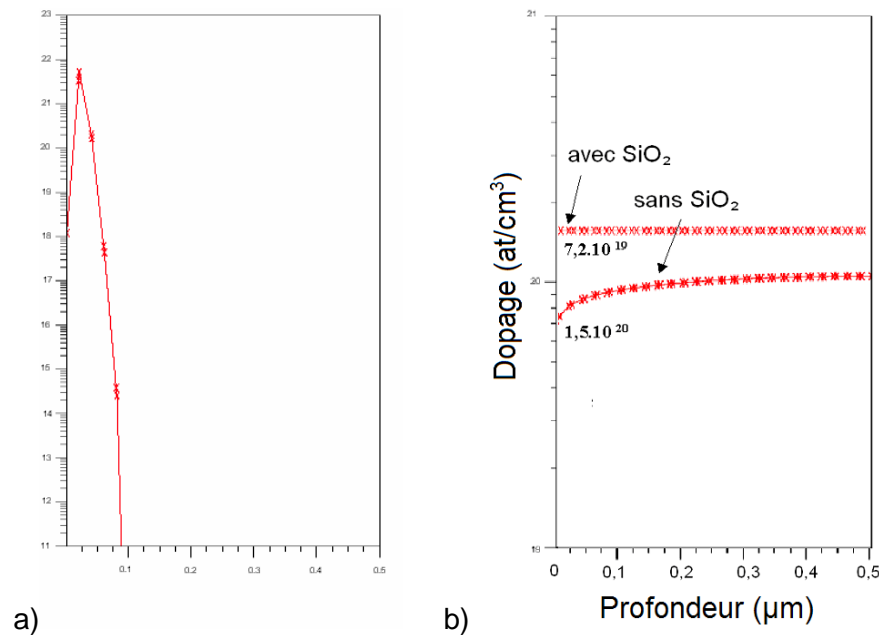


Figure III-10 : Influence de l'encapsulation sur le niveau de dopage de la couche de polysilicium: avant a) et après b) le recuit d'activation.

On note aussi que le recuit d'activation a pour effet de faire diffuser les atomes implantés. Des mécanismes de diffusion accélérée dans le polysilicium ont pour effet de parfaitement uniformiser le dopage suivant la profondeur. Cette remarque est d'autant plus pertinente qu'elle se traduira, au niveau des jonctions réalisées, par l'absence de gradient de dopage et donc par la réalisation reproductible de jonctions planes. Ceci permettra donc l'obtention de tensions de seuil (tension de claquage Zéner) très homogènes indispensables pour l'adressage matriciel à base d'ESS.

Le premier type de jonction que nous avons envisagé est une jonction entre une partie de polysilicium implantée P⁺ et une zone N⁺⁺ diffusée. Les simulations montrent que les profils de ce type de jonction ne sont pas constants selon l'épaisseur. Les diodes ainsi obtenues présenteront sûrement un claquage instable et non uniforme. Par conséquent ce type de jonction, obtenue par diffusion de Phosphore (N⁺⁺) dans une couche implantée P⁺ sera à priori à proscrire pour l'adressage matriciel.

Le second type concerne la jonction obtenue par implantation dans une couche déjà implantée. Cette étude nous a permis d'appréhender la diffusion latérale d'un type de dopant dans l'autre lors de deux implantations successives utilisant la même étape de recuit après encapsulation par du SiO₂. De là, nous en avons déduit les règles de dessin permettant d'éviter la coalescence entre deux implantations adjacentes (distance minimale entre les

jonctions). Les deux cas présentés sur la Figure III-11 montrent le cas d'une implantation P⁺⁺ (bore) dans du N⁺ et celui d'une implantation N⁺⁺ (Arsenic) dans du P⁺. Les implantations localisées ont une largeur initiale de 5µm et un dopage visé de 1,5.10²⁰ at/cm³ dans une couche implantée pleine plaque pour obtenir un dopage de 2.10¹⁹ at/cm³.

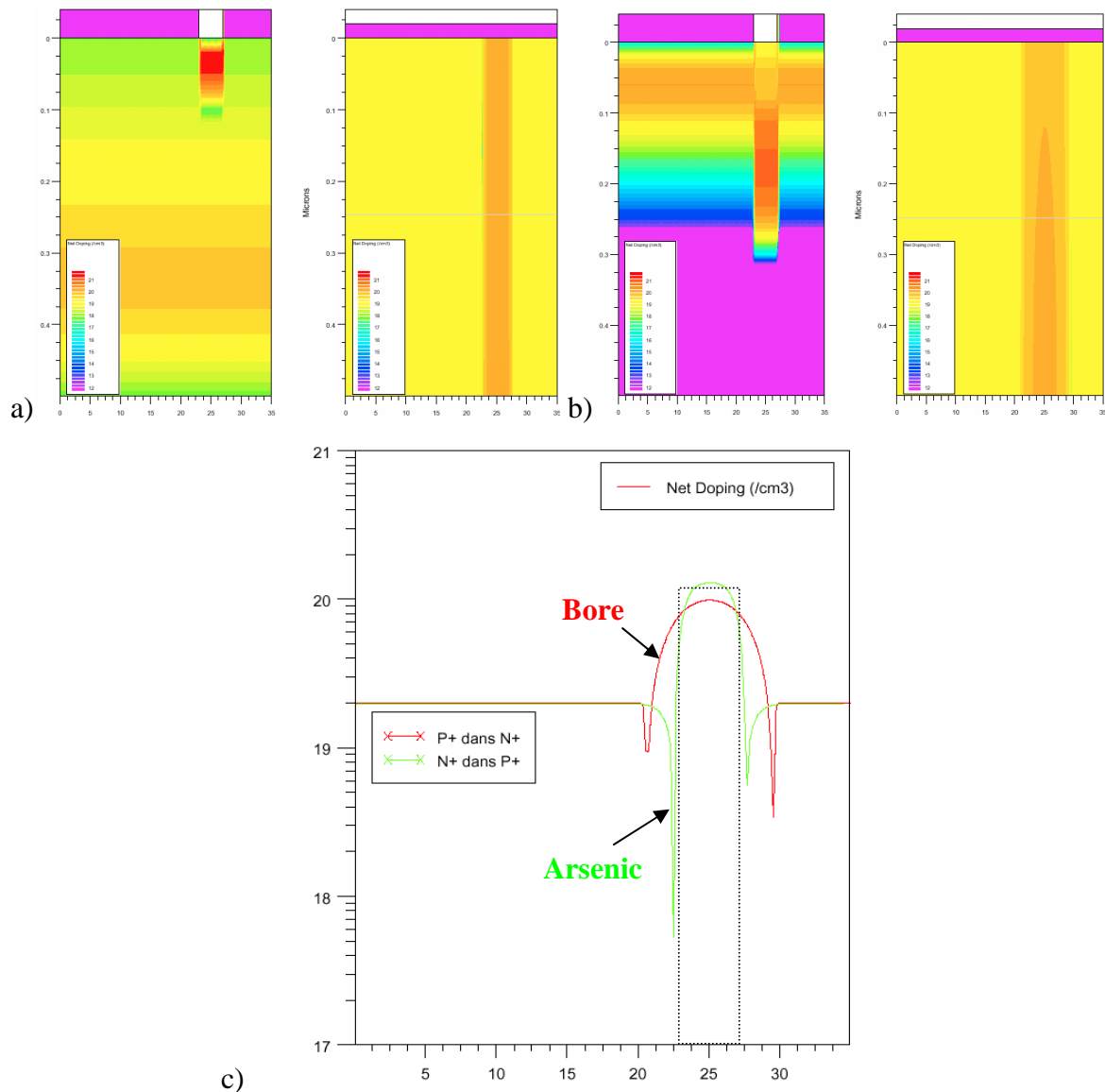


Figure III-11 : a) Implantation de Bore dans le polySilicium dopé Arsenic, b) Implantation d'Arsecenic dans le polySilicium dopé Bore, c) diffusion latérale résultante.

Les résultats de ces simulations soulignent la forte diffusion latérale du Bore dans le polySilicium déjà dopé Arsenic (2.75µm). En revanche la diffusion latérale de l'Arsecenic dans le polySilicium déjà dopé Bore est moins marquée (0.5µm) et sera donc plus favorable pour bien maîtriser des dispositifs de faible dimensions. Cette différence de diffusion latérale peut être imputée à la différence de taille des deux atomes dopants. En effet, l'atome d'arsenic étant nettement plus petit que celui de Bore, sa diffusivité est plus élevée. On pourrait, en modifiant les paramètres du recuit d'activation, réduire la diffusion latérale, mais

dans notre cas précis, ils sont fixés par l'étape de diffusion thermique du phosphore (30 minutes à 950°C). Néanmoins, il conviendra de tenir compte de cette diffusion latérale dans les règles de dessin des distances inter-jonctions sous peine de coalescence de ces dernières. On notera, que dans les deux cas on conserve un profil uniforme suivant la profondeur, ce qui est primordial pour la réalisation de diodes planes à claquage uniforme.

III.3 Réalisation de matrices adressables à base d'éléments à seuils symétriques

III.3.1 Process générique de fabrication de l'élément à seuils symétriques.

Les éléments à seuils symétriques peuvent être obtenus grâce à l'ajout de quelques étapes technologiques au process utilisant des éléments chauffants en polysilicium. La réalisation de jonctions dans l'élément chauffant implique l'utilisation de l'implantation comme moyen de dopage. L'enchaînement des étapes technologiques est décrit ci-dessous dans la Figure III-12.

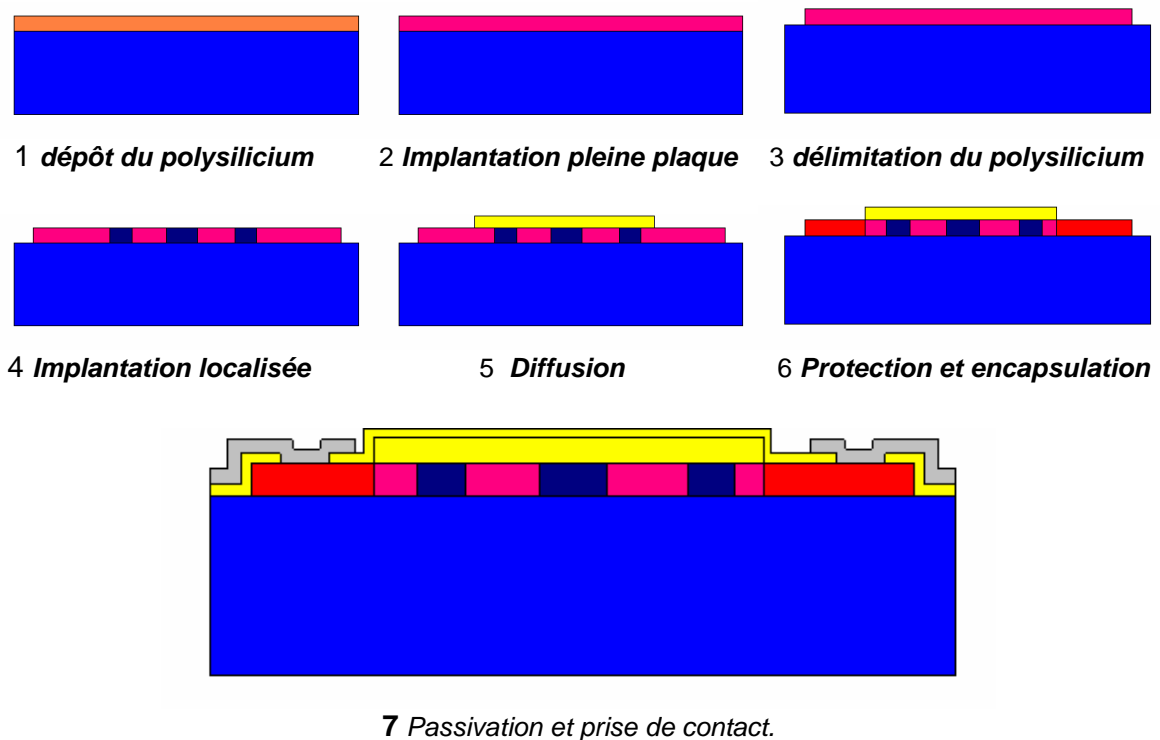


Figure III-12 : Processus générique de fabrication d'ESS

L'adjonction d'éléments à seuils symétriques, pour assurer la fonctionnalité d'adressage, n'induit pas une complexification du procédé technologique existant. Afin de les réaliser, deux étapes d'implantations sont nécessaires (type N et P). De plus, l'utilisation de la diffusion pour réaliser les zones de contacts et d'accès semble incontournable.

Après le dépôt d'une couche mince de polysilicium, une première implantation pleine plaque de type N^+ est réalisée. Une étape de RIE permet de délimiter les motifs dans le film de polysilicium. Ensuite, une deuxième étape d'implantation de type P^+ est effectuée, de manière localisée grâce à un masquage avec de la résine photosensible. Une couche d'oxyde est ensuite déposée et délimitée par attaque humide afin de protéger les zones dites « actives » de nos composants, où l'on souhaite conserver les niveaux de dopages obtenus par les implantations. L'étape suivante est la diffusion N^{++} afin de doper jusqu'à saturation toutes les zones non protégées par l'oxyde. Cette étape thermique sert aussi de recuit d'activation des zones implantées N^+ et P^+ et permet ainsi de ne pas alourdir le bilan thermique. Le reste du processus est identique à celui pour la réalisation d'éléments chauffants en polysilicium diffusé, à savoir : dépôt d'une couche de passivation, ouverture de contacts, et métallisation.

Dans ce processus type, les jonctions sont réalisées entre des zones implantées N^+ et des zones implantées P^+ . La taille des zones P^+ ainsi que l'intervalle entre elles sont limités par la diffusion latérale lors du recuit d'activation. Ce dernier s'effectue lors de l'étape de diffusion des zones non protégées.

Cependant, il est possible de réaliser des jonctions de types P^+ implantées et N^+ diffusées. Ce type d'élément nécessite moins d'étapes mais ne permet pas de garantir l'homogénéité des claquages.

Etant donné que chaque application se distingue par son temps d'actionnement, sa puissance et la dimension de la matrice, il convient donc, à partir de notre approche générique d'adapter le dimensionnement des éléments chauffants aux exigences de l'application visée ^[3].

C'est pourquoi, dans les deux applications que nous allons présenter, l'approche générique a été adaptée pour la réalisation de matrices de micro-propulseurs (application décrite au Chapitre II) et pour la réalisation de micro-éjecteurs.

III.3.2 Matrices adressables de 10x10 micro-propulseurs pyrotechniques

Dans le cadre du projet MicroPyros, présenté lors du deuxième chapitre, nous avons aussi réalisé des matrices de micro-actionneurs pyrotechniques à partir des éléments à seuils symétriques. La structure générale du microsystème reste la même, comme on peut le voir sur la Figure III-13.

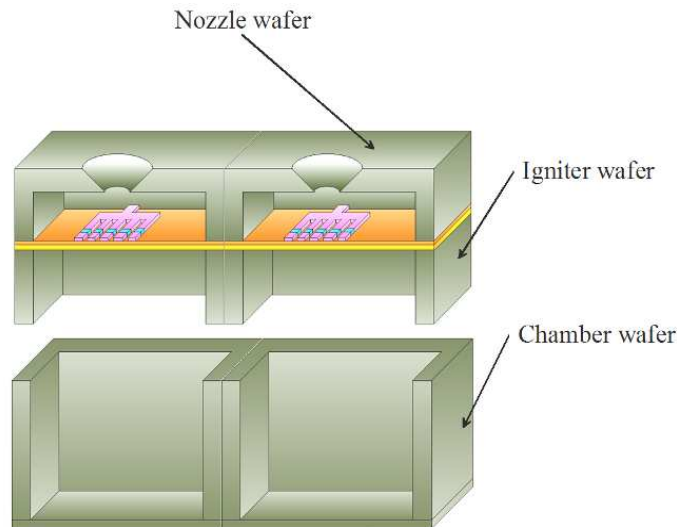


Figure III-13 : Structure des micro-actionneurs pyrotechniques du projet Micropyros.

Seul l'étage correspondant aux initiateurs est modifié conformément à notre nouvelle approche. Le process initial est modifié au niveau du dopage et du design de la couche mince de polysilicium.

Au cours de la mise au point de ce processus technologique, plusieurs designs ont été testés, ainsi qu'un nombre différent de jonctions NPN dans les éléments chauffants. Ces différents motifs sont visibles sur la Figure III-14.

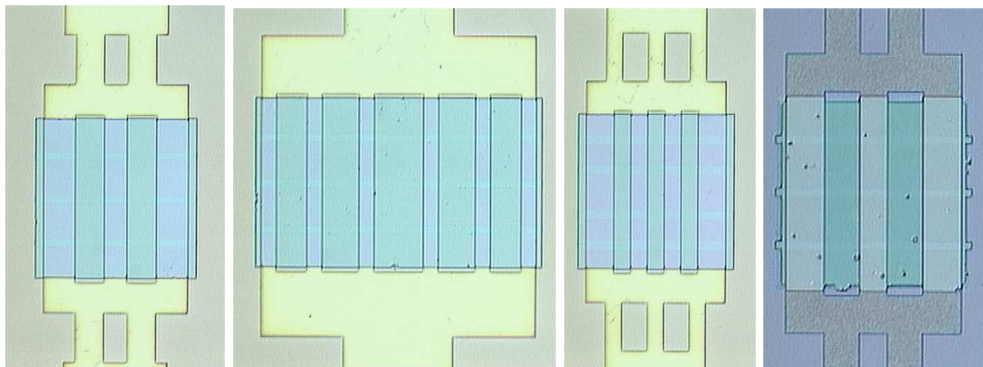


Figure III-14 : Exemples de réalisation d'éléments chauffants.

Au cours des différents processus technologiques, des motifs de test nous ont permis de suivre l'évolution des tensions de claquage des diodes présentes, et de nous assurer de la symétrie des caractéristiques de nos éléments. Nous avons donc ainsi pu réunir les principaux indicateurs de bon fonctionnement de nos matrices. Comme le montre la Figure III-15, où sont représentées les caractéristiques électriques de 15 éléments répartis au sein de matrices 8x8 des types de motifs correspondant à ceux présentés Figure III-14, la tension de seuil obtenue est bien uniforme dans un même wafer, et au sein de chaque matrice, on observe une légère dispersion de la résistance série, imputable aux différences de résistance d'accès.

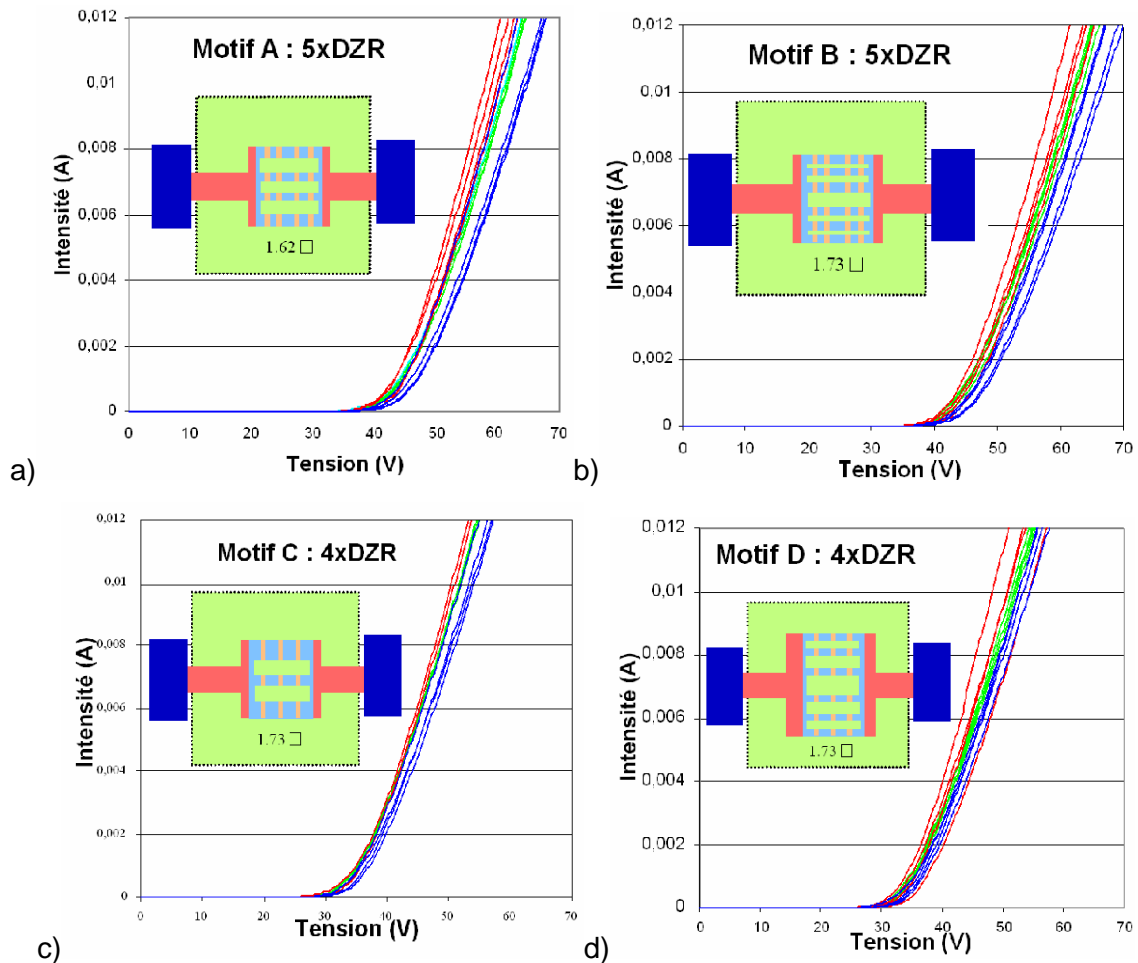


Figure III-15 : Caractéristiques courant tension de 15 éléments au sein d'une matrice de 8x8 éléments pour les quatre types de motifs.

Dans le cadre de la réalisation de matrices et en vue de simplifier au maximum le processus de fabrication, nous avons opté pour une réalisation ne faisant appel qu'à un seul niveau de métal. Les connections entre éléments de même ligne sont réalisées par un ruban de métal continu, alors que les connections entre éléments de la même colonne sont réalisées par des bandeaux de métal, reliés entre eux au niveau des croisements lignes/colonnes par des vias en polysilicium dopé par diffusion à faible résistivité.

Au cours des différents essais effectués, des éléments chauffants réalisés par implantation P^+ et diffusion N^+ ont permis d'atteindre les valeurs de R_S et de V_{Seuil} souhaitées. Un processus compatible avec les spécifications du projet a donc été réalisé et la matrice obtenue est présentée sur la figure III.18. On distingue parfaitement sur la vue de la face arrière, les motifs polysilicium disposés de l'autre côté de la membrane. Cette matrice ayant été utilisée pour des tests d'initiation de combustion, certaines des membranes individuelles sont rompues.

Cette réalisation est possible en ajoutant au minimum quatre étapes (implantation pleine plaque, dépôt de SiO_2 , photolithographie, délimitation du SiO_2) pour une structure à

diodes diffusées/ implantées, et une étape supplémentaire pour l'utilisation de diodes implantées/implantées, par rapport au processus pour la réalisation d'actionneurs individuels en polysilicium diffusé.

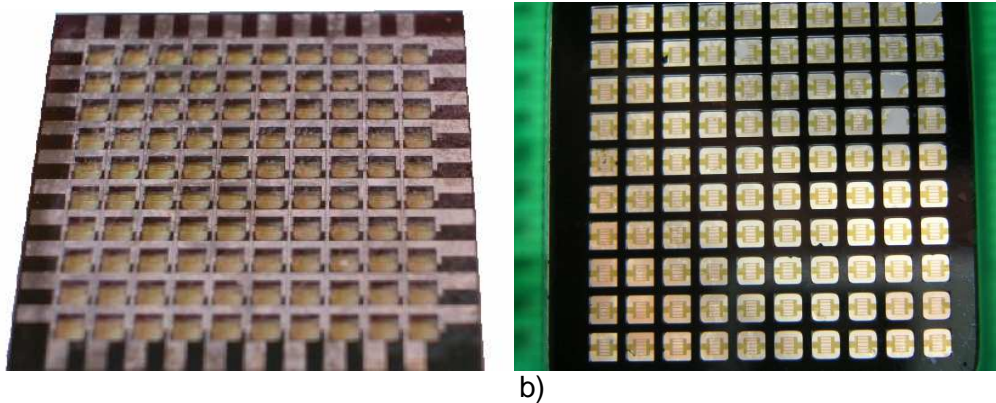


Figure III-16 : *Matrice d'initiateurs pour micro-actionneurs pyrotechniques, a) vue du dessus de la matrice, b) vue de la face arrière.*

Outre les caractérisations systématiques permettant de valider la reproductibilité des différents paramètres sur l'ensemble des matrices d'un même wafer, nous avons pu valider à l'aide d'une camera infra-rouge le bon fonctionnement de nos matrices. On peut voir sur la Figure III-17 que seul l'élément chauffant sur membrane suspendue sélectionné chauffe et qu'il est bien isolé de son environnement.

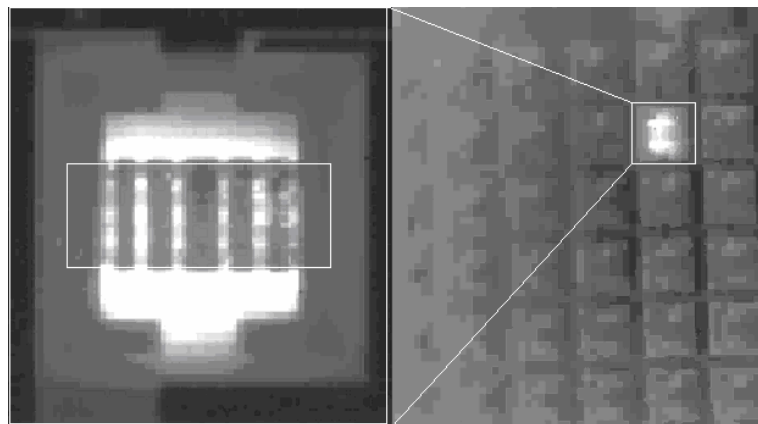


Figure III-17 : *Test IR d'adressage*

Sans calibration précise, les images IR obtenues permettent seulement d'avoir des informations qualitatives sur le fonctionnement de nos microsystèmes. Cependant, on distingue, au niveau de la zone active (représentée par un rectangle blanc), que chaque jonction crée une augmentation localisée de la chaleur. Ceci confirme qu'un placement judicieux de ces dernières permettrait de contrôler les profils en température des éléments chauffants réalisés.

Enfin, ces matrices n'ayant pu être assemblées pour être testées avec des réservoirs remplis d'explosif, des tests ont eu lieu de façon à valider tout de même la capacité de nos réalisations à initier des combustions. Pour cela, des explosifs solides ont été collés à la

surface des matrices. Connaissant le point d'explosion du matériau, proche de 300°C, nous avons pu caractériser un point température / puissance de nos éléments chauffants et ainsi, valider l'intérêt de nos éléments pour ce type d'application.

Les résultats de ce test ^[4] ont montré que les explosifs s'amorçaient à une puissance de 150mW, ce qui correspond à une température de 300°C. Cette valeur est sensiblement plus faible que celle mesurée sur les éléments en polysilicium diffusé classique. Cet écart est certainement dû à la réduction des pertes dans les amenées et donc à un meilleur rendement (entre la puissance appliquée et celle réellement utilisée lors de la phase de chauffe).

III.3.3 Adressage d'une matrice de 8x8 micro-éjecteurs sur membrane suspendue

Un autre projet nous a permis de développer l'adressage matriciel par éléments à seuils symétriques. Une matrice de micro-éjecteurs thermiques ^[5] est en effet développée au LAAS dans le groupe MIS par Mme A.M. GUE et nous avons donc collaboré avec D.JUGIEU pour rendre ces matrices fonctionnelles ^[6].

Le micro éjecteur est un système complexe du point de vue de son fonctionnement car il met en jeu des phénomènes électrothermiques et fluidiques. Les travaux antérieurs effectués par Mr. T. Phou^[7] ont permis d'en comprendre le principe de fonctionnement. Ils ont aussi permis de mieux appréhender le comportement thermique d'un éjecteur par la connaissance de l'élévation de la température en fonction de la puissance électrique appliquée. Enfin, ils nous ont aussi permis de valider la tenue de la structure face aux fortes élévations de température auxquelles l'éjecteur est soumis. Pour ce qui est du domaine fluide, ils ont pu montrer la réalité de l'éjection par une observation directe des gouttes formées sur une lame de verre ainsi qu'une évaluation des quantités éjectées et des vitesses d'éjection. Notre collaboration a porté sur l'intégration de la fonction d'adressage pour des micro-éjecteurs thermiques réalisés en polysilicium diffusé.

III.3.3.1 Présentation du procédé de fabrication

Le procédé technologique de réalisation de vecteur de micro-éjecteurs sur membrane avec une résistance chauffante en polysilicium diffusé, comportant une buse en Su8 a été mis au point dans le cadre de la thèse de Mr T. Phou. Les étapes successives de cette technologie sont représentées par la Figure III.20.

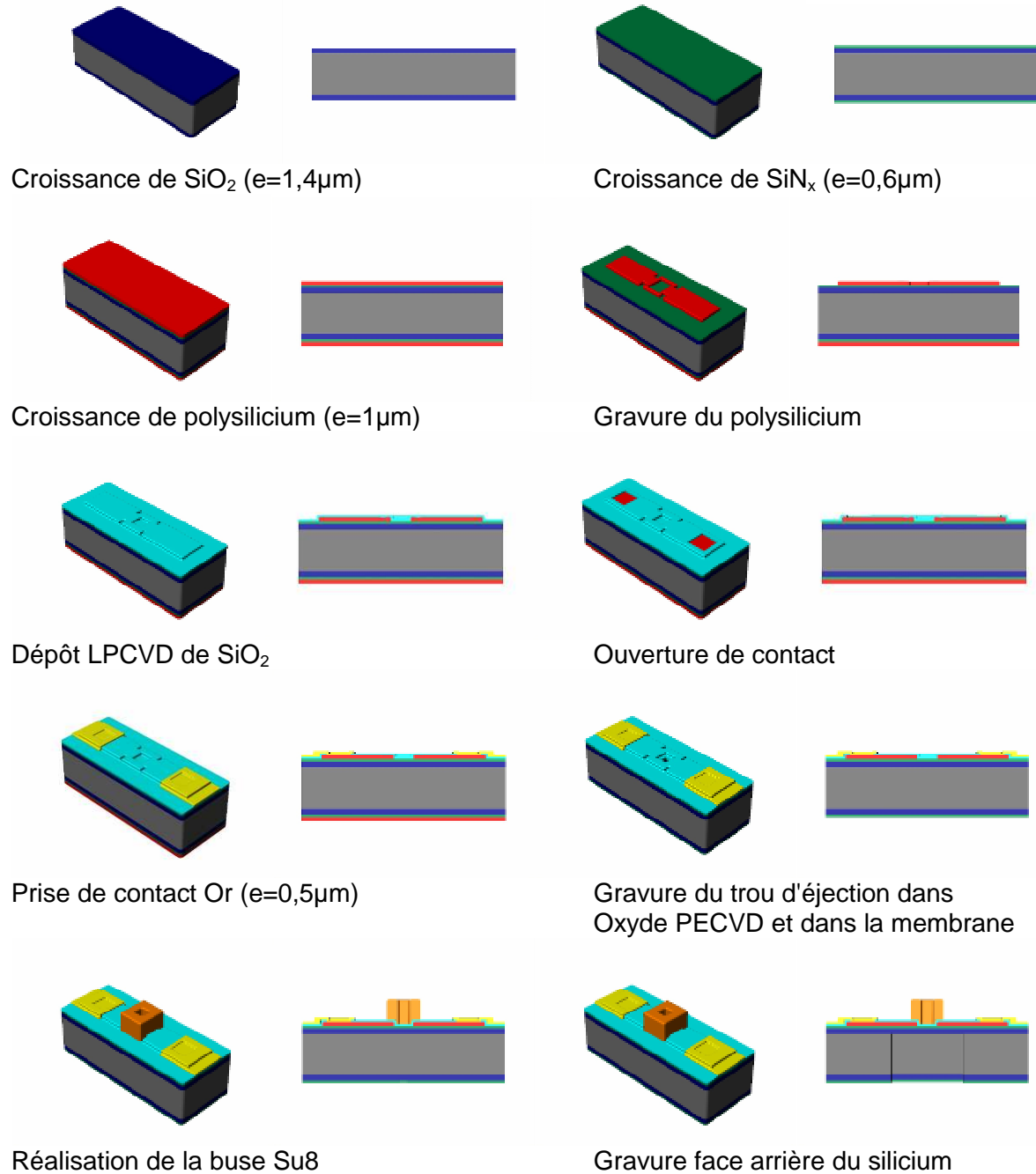
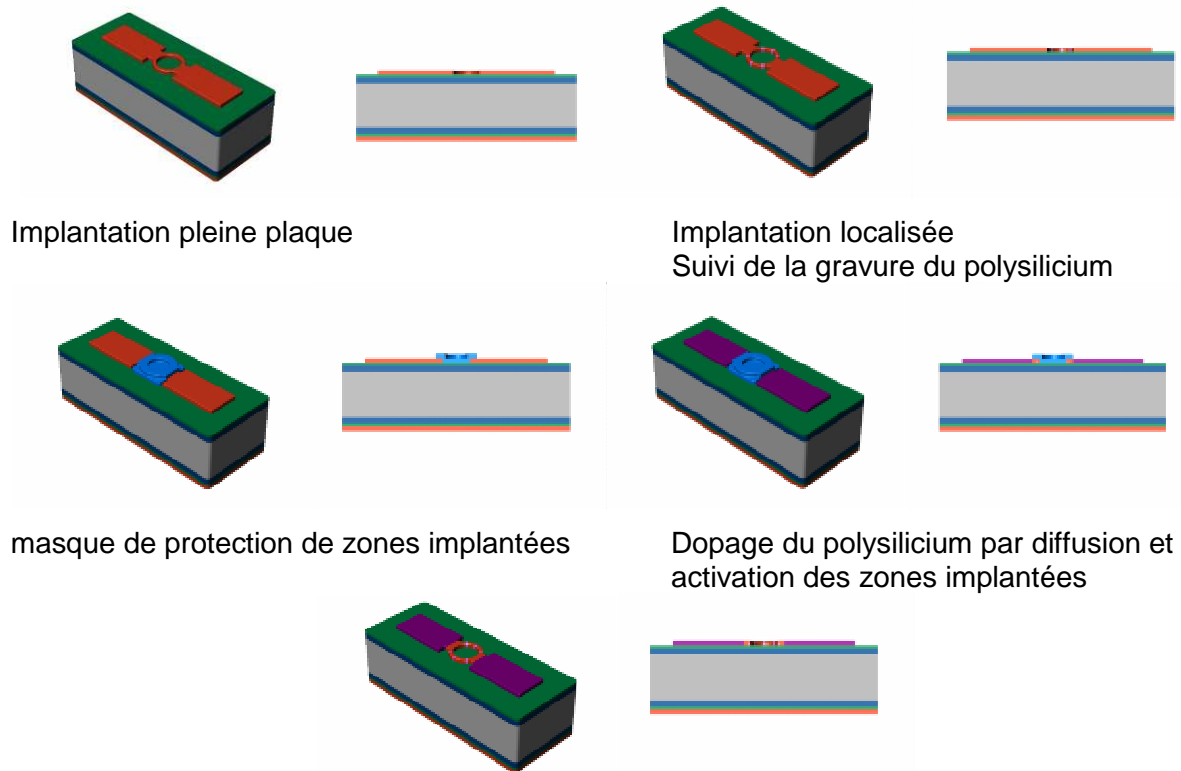


Figure III-18 : Processus standard d'initiateur diffusé.

Les aménagements du process pour y intégrer les éléments à seuils symétriques permettant l'adressage matriciel, sont cette fois encore relativement restreints et sont présentés sur la Figure III-19.

Une autre modification réside dans la possibilité d'utiliser un second niveau de métallisation pour les interconnexions électriques et s'affranchir des via en polysilicium aux croisements lignes/colonnes. Ainsi, de nouvelles étapes viennent se rajouter en fin de processus.



Retrait du masque de protection en oxyde (étape non obligatoire)

Figure III-19 : Description des étapes supplémentaires par rapport au process initial

Au cours du projet, de nombreuses configurations ont été testées comme le nombre de diodes (1 à 3). Ceci a nécessité la création de motifs différents dans les masques d'implantation localisée. Ces différents motifs sont présentés sur la Figure III-22.

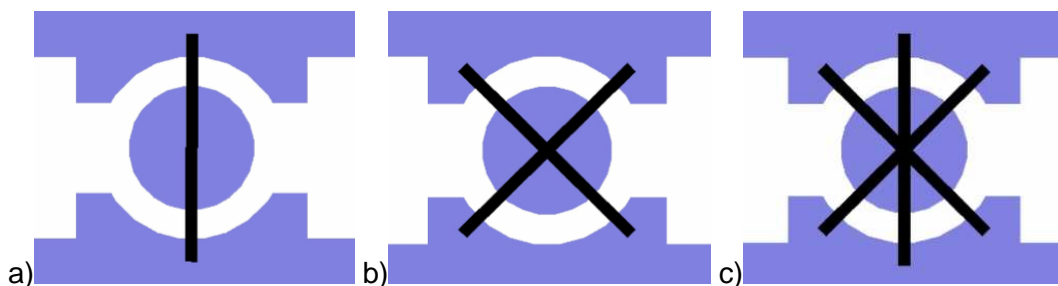


Figure III-20 : Différents motifs sur le masque d'implantation localisée permettant de faire varier le nombre de diode au sein de chaque cellule, a) 1 diode, b) 2 diodes, c) 3 diodes.

Dans ce cas, les dimensions tiennent compte de la diffusion latérale des zones implantées. En effet, cette fois-ci nous utilisons une zone, implantée pleine plaque, qui reçoit une plus forte dose localisée (barrettes correspondant aux diodes). La différence des concentrations de dopant induira un élargissement de la barrette implantée. En moyenne, la diffusion latérale sera de $1\mu\text{m}$ et cas extrême, la largeur de barrette effective sera augmentée de $3\mu\text{m}$ mais il n'y aura pas coalescence des diodes. On retrouve sur la Figure III-23, la localisation de l'implantation des diodes et le motif final après passivation SiO_2

permettant la diffusion de phosphore dans les amenées et préservant les zones actives implantées. Ces diodes sont P++ implanté dans N+ implanté pleine plaque.

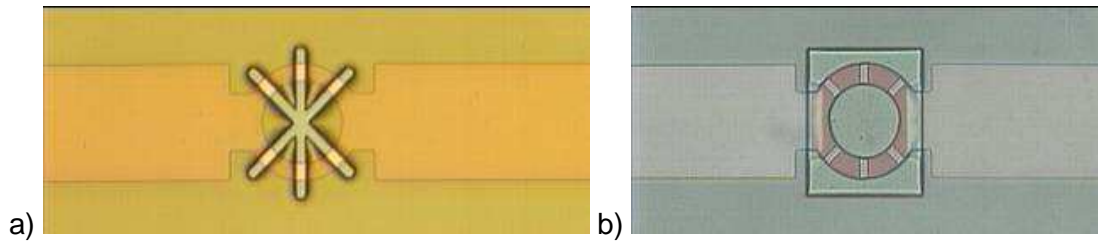


Figure III-21 : Structure à 3 jonctions en série, a) Résine de masquage d'implantation, b) Structure correspondante avant métallisation finale.

Ces variations de design intègrent aussi un motif permettant de réaliser des matrices n'utilisant qu'un seul niveau de métal. La Figure III.24 illustre les différents types de matrices de micro-éjecteurs que nous avons réalisés.

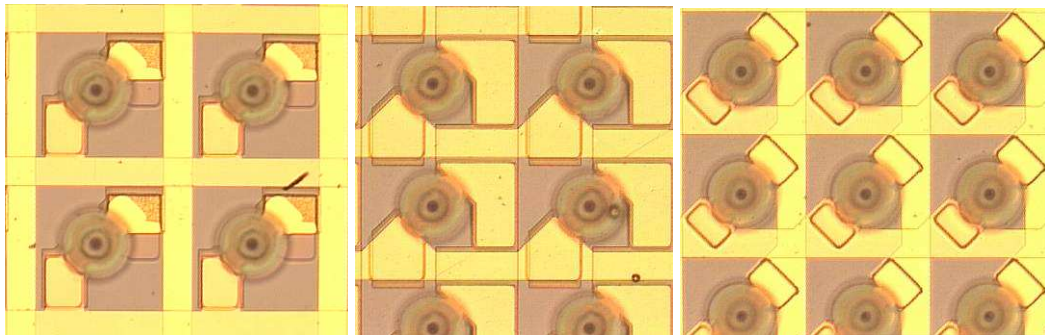


Figure III-22 : Matrices Implanté/implanté avec un niveau de métallisation

On peut voir, grâce aux nuances de couleur sur la figure III.25, la diffusion latérale du phosphore ($>10\mu\text{m}$) dans les zones implantées, sous la protection SiO_2 . On peut aussi noter que cette protection remplit bien son rôle de masque de diffusion mais ne peut s'opposer à la diffusion latérale.

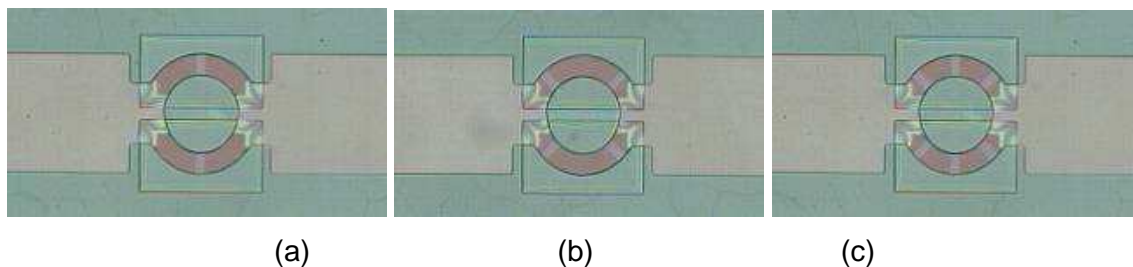


Figure III-23 : Vue au microscope de la diffusion latérale dans les zones implantées

Comme nous le disions précédemment, on pourrait réduire le nombre d'étapes en réalisant la diode par diffusion N^{++} dans la couche P^+ implantée pleine plaque comme présenté sur la figure III.26. Cette approche, qui simplifie le processus de fabrication, peut être intéressante sur des motifs de grandes dimensions (plusieurs dizaines de micromètres)

pour lesquels on ne recherche pas l'uniformité des claquages. En revanche, dans notre cas où les motifs sont réduits et où l'homogénéité de la tension de seuil des ESS est requise, elle s'avère peu pertinente.

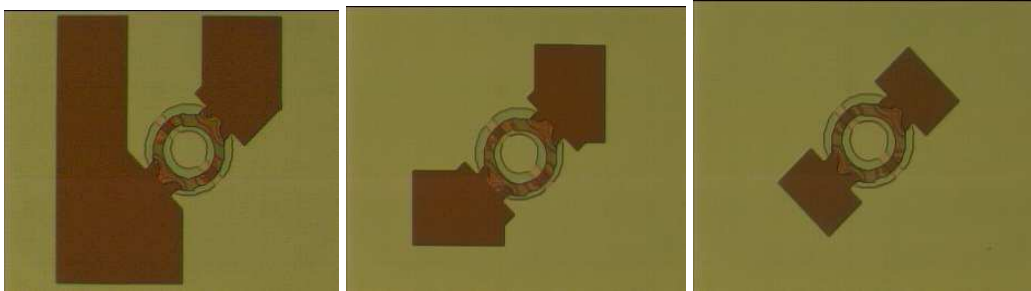


Figure III-24 : *Eléments en polysilicium avant diffusion/activation avec le masque d'oxyde, n'ayant subi qu'une implantation pleine plaque de type P.*

Afin de renforcer l'intégration, dans la matrice présentée sur la Figure III-27, nous avons réduit la taille de la cellule élémentaire à $150 \times 150 \mu\text{m}^2$ soit une densité supérieure à 4400 micro-éjecteurs/cm². De plus, en optant pour l'utilisation d'un second niveau de métallisation, nous compliquons le processus mais nous évitons les problèmes rencontrés précédemment aux croisements lignes/colonnes (parfois en court-circuit). Une question persistait sur la tenue de la membrane au moment de la libération. En effet, même si nous avons choisi une métallisation Cr/Au par évaporation pour minimiser les contraintes thermomécaniques liées aux couches métalliques, rien ne garantissait la tenue de la réalisation finale.

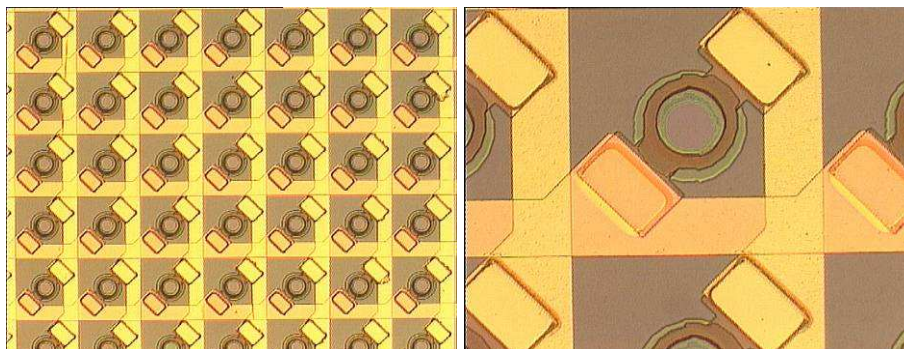


Figure III-25 : *Vue de la matrice utilisant deux niveaux de métallisation et vue d'un croisement ligne/colonne.*

Les premières matrices réalisées n'ont pas cédé à l'étape de libération et valident notre choix de la métallisation et son mode de dépôt.

Après adjonction de la buse réalisée en résine épaisse SU-8, les membranes sont libérées par une DRIE. La figure III.28 donne un aperçu du résultat de cette gravure.

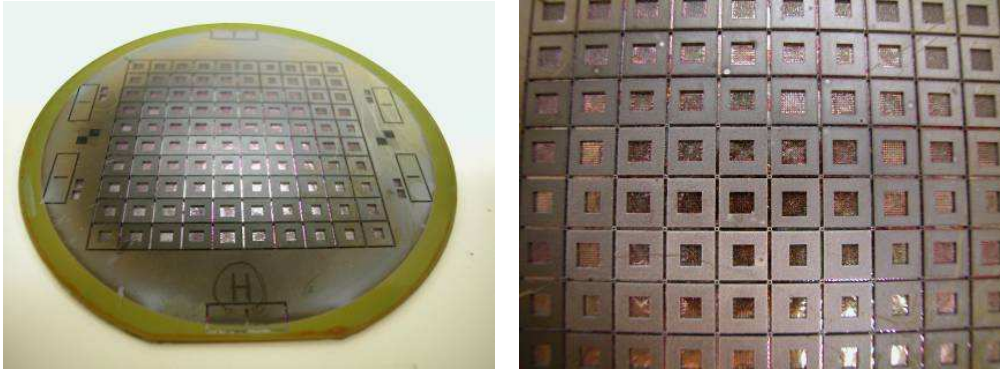


Figure III-26 : *Vue du wafer après gravure plasma DRIE.*

Ces matrices, dont on peut voir une vue au MEB sur la Figure III-27, ont pu être caractérisées électriquement et thermiquement.

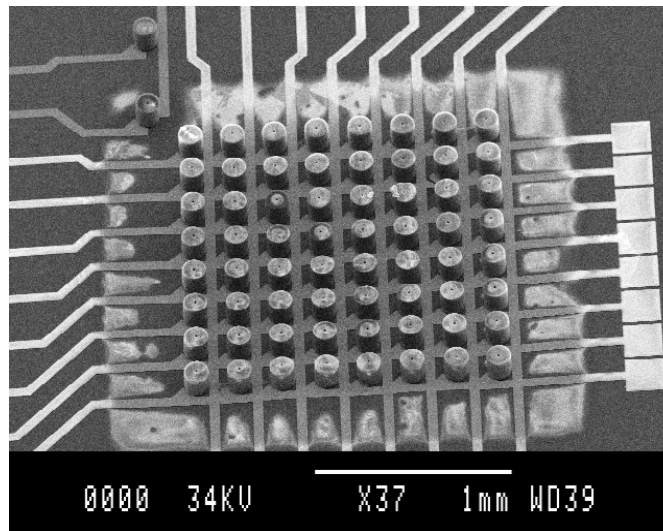


Figure III-27 : *Vue d'une matrice complète avec ses buses d'éjection en SU-8*

Dans le cadre de ce projet, les dimensions mises en œuvre sont nettement inférieures à celles du projet MicroPyros (presque un facteur 10). Cependant, les résultats obtenus à partir de notre processus sont tout aussi satisfaisants.

III.3.3.2 Résultats de la caractérisation électrique des Micro-éjecteurs

Afin de pouvoir caractériser électriquement nos matrices sans s'exposer à une élévation en température trop importante ($>800^{\circ}\text{C}$) risquant la destruction de la membrane, nous avons choisi de tester nos ESS avant l'étape de libération de membrane. Pour tout de même se placer dans les conditions réelles d'utilisation, nos balayages en tension lors des mesures sont ajustés pour atteindre une puissance dissipée d'environ 200 mW. Nous allons présenter en premier lieu les résultats obtenus sur des ESS réalisés par implantation pleine plaque d'arsenic suivie d'une implantation localisée de bore. Une étude systématique des éléments chauffants en fonction du nombre de diodes a été réalisée.

- **ESS avec diode zéner unique** : les caractéristiques $I(V)$ sont toujours symétriques et bien conformes à nos attentes. Sur la Figure III-30 ne sont représentées que les parties correspondant à des tensions positives des caractéristiques. Nous observons sur les caractéristiques de plusieurs ESS pris aux extrémités et au centre du Wafer, que la tension de seuil de ces éléments est homogène ($V_{Seuil} \sim 7\text{Volts}$) et la conduction résistive est elle aussi relativement uniforme ($R_S \sim 6.5\text{ k}\Omega$ à $\pm 6\%$).

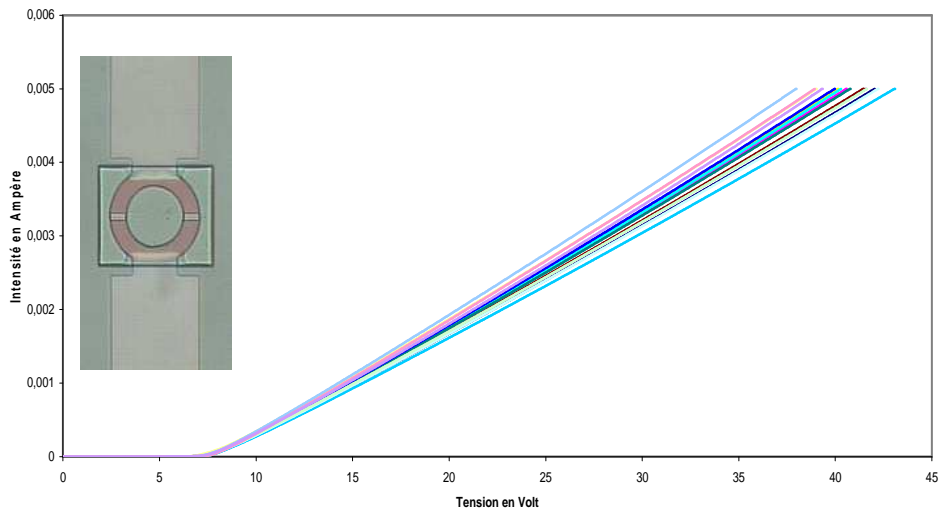


Figure III-28 : Caractéristique $I(V)$ des vecteurs comportant une barrette P.

- **ESS avec deux diodes zéner** : On peut tirer les mêmes conclusions que précédemment, mais cette fois ci, l'insertion de deux diodes entraîne la multiplication par deux de la tension de seuil ($V_{Seuil} \sim 14\text{Volts}$; Figure III-29) alors que la résistance série n'a quasiment pas évoluée.

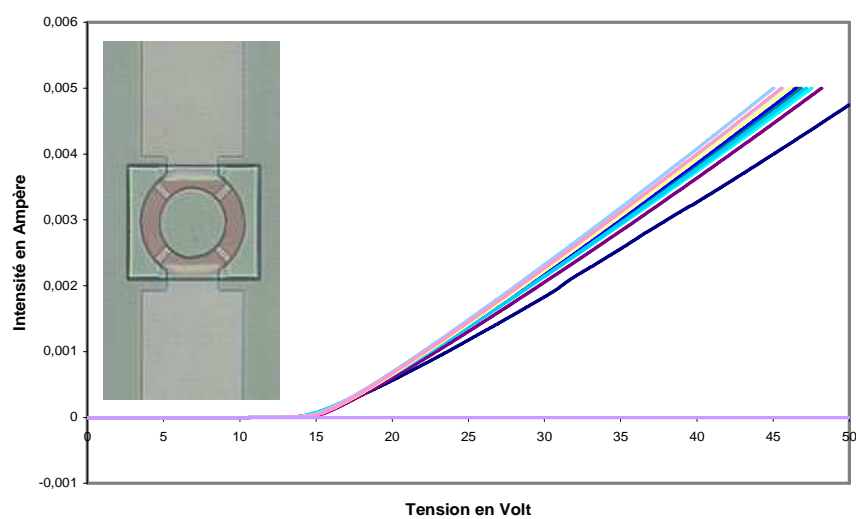


Figure III-29 : Caractéristique $I(V)$ des vecteurs comportant deux barrettes P.

- **ESS avec trois diodes zéner** : Cette fois ci, la présence de trois jonctions entraîne une tension de seuil de proche de 21V. Ceci confirme l'excellente uniformité des tensions de claquage Zéner de nos diodes (Figure III-30).

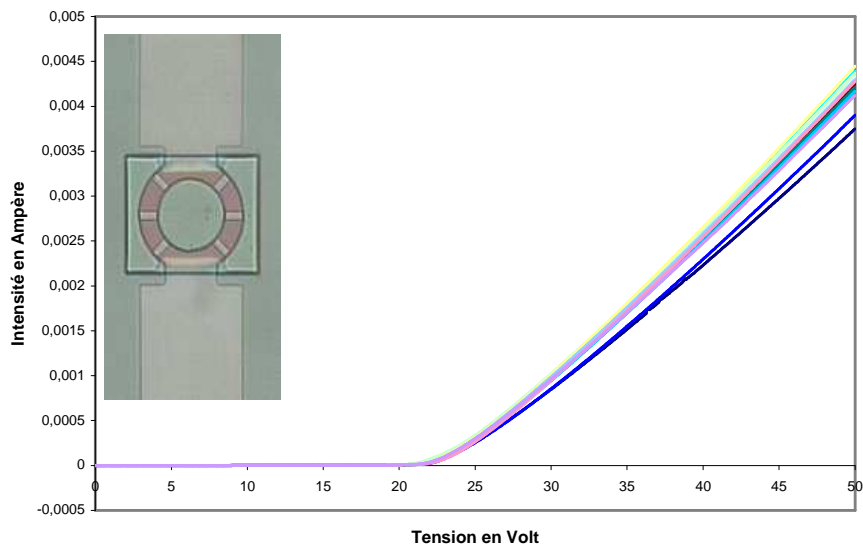


Figure III-30 : Caractéristique $I(V)$ des vecteurs comportant trois barrettes P

Parfois, nous avons observé que la conduction s'effectuait dans un bras, puis dans les deux. Pour tenter d'y remédier, nous avons légèrement modifié le motif de SiO_2 de protection de diffusion. Ceci est présenté Figure III-31, au niveau de l'amenée sur les deux bras. Nous retrouvons les mêmes tendances, la diffusion mais la dissymétrie de seuil de conduction des bras semble avoir été supprimée.

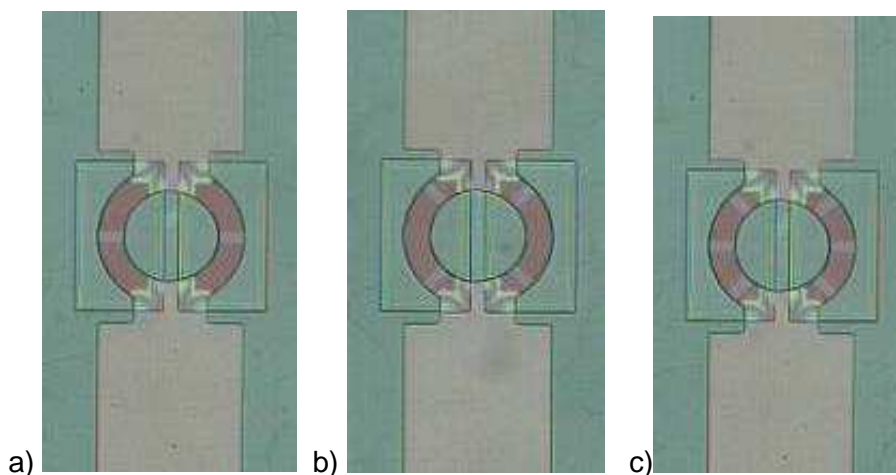


Figure III-31 : Motifs de polysilicium avec les nouveaux masques de SiO_2

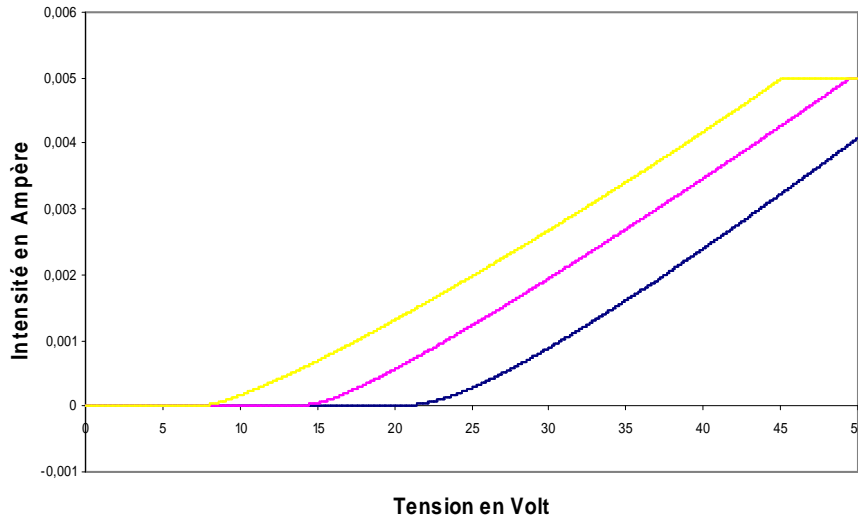


Figure III.32 : Caractéristique $I(V)$ des vecteurs comportant une, deux et trois barrettes P

La structure où la diode est diffusée / implantée fonctionne bien, contrairement à nos craintes de dispersion du claquage Zéner. On observe la proportionnalité de la tension de seuil en fonction du nombre de barrettes et une partie résistive de la caractéristique parfaitement linéaire. Les matrices réalisées ont permis d'obtenir, pour une tension de 10 Volts, une puissance de 150mW et les images présentées Figure III-33 témoignent du bon fonctionnement de l'adressage [8].

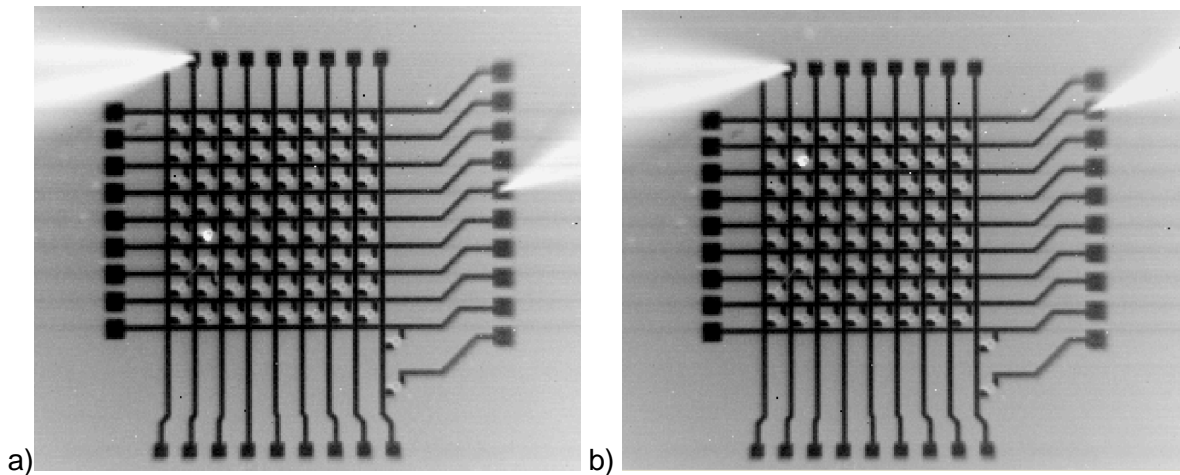


Figure III-35 : Actionnement de l'élément (7; 4) a), puis de l'élément (7; 7) b)

Sur ces photos, nous visualisons les pointes de test (blanches) qui permettent d'alimenter la ligne et la colonne sélectionnées. Même si la résolution de notre caméra n'est pas suffisante pour faire une étude plus précise, on voit néanmoins que seul l'élément adressé chauffe et que la zone de chauffe est parfaitement confinée (pas de couplage avec les éjecteurs adjacents).

III.4 Bilan des réalisations à base d'éléments à seuils symétriques

Comme nous l'avons présenté lors de la première partie de ce chapitre, ce mode d'adressage, basé sur des éléments à seuils symétriques permet d'améliorer, par rapport à la solution présentée au chapitre précédent, les conditions de fonctionnement des matrices pour nos types de réalisations.

Les études technologiques préalables à la réalisation des composants à seuils symétriques en polysilicium ont été réalisées. Cela a permis de donner certaines règles pour la conception de ces éléments, mais cela a surtout mené à la mise en place d'une filière technologique générique, simple, reposant sur l'utilisation du polysilicium dopé par implantation.

Ce procédé de fabrication générique a été ensuite appliqué pour répondre à la problématique du projet Micropyros. Ceci a mené à la réalisation de matrices micro-sources de chaleurs fonctionnelles. Les tests infrarouges, électriques et d'initiation de combustion, ont permis de valider cette solution technologique.

Ce procédé de fabrication a aussi permis de réaliser des matrices de micro-éjecteurs thermiques pour fonctionnalisation de bio-puces. Comme dans le cas précédent, les structures réalisées ont été parfaitement à même de répondre aux contraintes du projet y compris celle d'une structure intégralement sur membrane suspendue.

Au cours de ce chapitre, nous avons donc proposé un process technologique permettant, de façon simple et sûre, la réalisation de matrices de micro-sources de chaleur adressables individuellement. Ce procédé, compatible avec des réalisations sur membranes a été validé par des réalisations dans le cadre de deux applications différentes : matrice de micro-éjecteurs, et projet Micropyros.

Références bibliographiques du chapitre III :

- [1] T.I. Kamins,
Polycrystalline Silicon for Integrated-Circuit Applications,
Kluwer Academic Publishers, Norwell MA, 1988.
- [2] w. Shockley
Reshearch and investigation of inverse epitaxial UHF power transistors
Report n°A1 – TOR -64 – 207 Air force atomic labor atory
Wright Patterson Air force base, Ohio September 1964
- [3] M. Dumonteuil, T. Camps
Polysilicon microheaters 2D addressed array using symmetrical thresholds elements.
Conf. Proc. of ECMS 2005, Toulouse, France, 17-18 May 2005
- [4] C. Rossi, D. Briand, M.Dumonteuil, T. Camps, P.Q. Pham, N.F. de Rooij
Matrix of 10x10 addressed solid propellant microthrusters : Review of the technologies
Sensors and Actuators (2005) Article in press
- [5] D.JUGIEU, T.PHOU, A.M.GUE
Technological development of a micro-array of individually addressable ejectors
Rapport LAAS No05234
- [6] D.JUGIEU
Conception et réalisation d'une matrice de microéjecteur thermique adressable individuellement pour la fonctionnalisation de biopuce
Rapport LAAS No05139
Doctorat, Institut National Polytechnique, Toulouse, 15 Mars 2005, 173p.
- [7] T. Phou,
"Conception et réalisation d'un micro injecteur matriciel pour la fonctionnalisation des biopuces",
Thèse de l'université Paul Sabatier de Toulouse, Mai 2003.
- [8] M. Dumonteuil, D. Jugieu, V. Bouvier, T. Camps, A.M. Gué*
Development of a picolitre droplet ejector with integrated SU-8 nozzle and on-chip addressing system.
Conf. Proc. of Eurosensor barcelone 2005

Chapitre IV: Optimisation des éléments à seuils symétriques pour l'adressage et applications pour la réalisation de micro-sources thermiques configurables.

A travers ce quatrième et dernier chapitre, nous allons présenter les paramètres technologiques permettant d'ajuster les caractéristiques de nos dipôles à seuils symétriques pour répondre aux exigences des différentes applications. Nous montrerons successivement comment régler la résistance des éléments et leur tension de seuil.

Nos dernières réalisations confirmeront que notre approche originale reste pertinente pour la réalisation de matrices de grandes dimensions. Nous montrerons son intérêt pour la réalisation simple et fiable de micro-sources thermiques configurables. En effet, l'arrangement matriciel d'éléments chauffants permet, par un adressage approprié, d'obtenir un profil en température uniforme ou graduel. Nous montrerons aussi que ces ESS sont sensibles à la température et peuvent être exploités comme dispositif dual : Micro source thermique et capteur de grande sensibilité associés.

Enfin, nous présenterons différentes singularités de nos éléments à seuils symétriques susceptibles d'être mis à profit dans des capteurs (température, pression, photodétection,...), des éléments non linéaires (circuits de régulation ou de protection) et enfin dans des actionneurs thermiques.

IV.1 Dimensionnement des éléments à seuils symétriques.

Chaque type d'application nécessitant des micro-sources de chaleur réclame des caractéristiques spécifiques. Le point de fonctionnement nominal de l'application est prépondérant dans le dimensionnement "électrique" de nos ESS (résistance et tension de seuil). En effet, à une température désirée sur une surface de chauffe donnée, correspond une puissance à dissiper, qui est aussi liée au design des éléments chauffants. Chaque type d'application amène des contraintes liées aux sources d'énergies disponibles. Ainsi, pour les applications portables, grand public, on limitera la tension de commande à quelques volts (3V à 9V).

Pour chaque cas de figure, on doit définir un gabarit dans lequel la caractéristique de l'élément chauffant devra se conformer.

Ainsi, dans le cas de nos micro-éjecteurs, nous avons déterminé une puissance nominale d'éjection de 300mW. D'autres considérations reposant sur l'aspect thermique peuvent aussi influencer sur les caractéristiques des éléments à seuils symétriques. A partir de cette spécification initiale, nous pouvons donc définir le gabarit présenté sur la Figure IV-1 où la courbe iso-puissance (300mW) est représentée par une hyperbole :

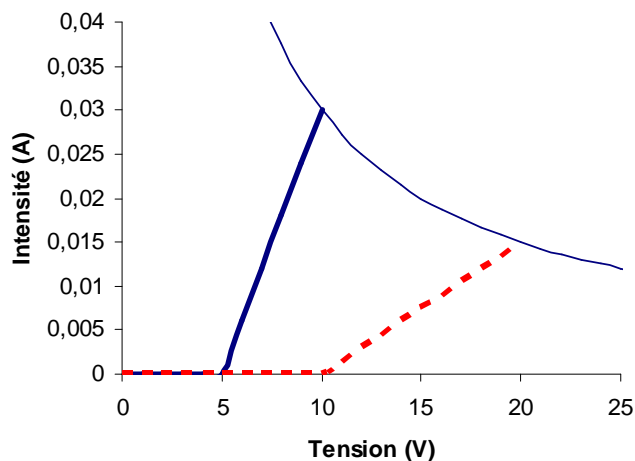


Figure IV-1 : Gabarit Courant / Tension pour une puissance donnée.

Pour les micro-éjecteurs, nous choisissons une répartition de la puissance dissipée presque égale entre les zones résistives et les jonctions. En effet, comme nous l'avons montré au troisième chapitre, cet adressage est plus performant (rendement élevé) si l'on n'excède pas une tension de commande supérieure à 2.VSeuil, car au-delà, la conduction parasite dans le groupe G2 s'accroît de façon significative. Notons que plusieurs solutions répondent au critère de puissance et notre choix sur le type de commande (courant ou tension), dépendra des plages d'utilisations souhaitées et réalisables.

Quand le système n'est pas destiné à être embarqué, la gamme de tension de commande n'est pas limitée. Afin d'atteindre pour une puissance requise, on choisira d'augmenter la tension de commande afin de réduire le courant. En procédant de la sorte, on limite les pertes par effet Joule dans les amenées et doubler la tension de commande revient à réduire d'un facteur quatre ces échauffements parasites pouvant nuire au bon fonctionnement global de la matrice (éjections involontaires).

A condition de pouvoir contrôler avec un minimum de dispersion les valeurs de la tension de seuil et de la résistance de nos éléments, nous disposons d'un moyen simple et générique pour réaliser les micro-sources de chaleur désirées et nous opterons pour une commande en courant. Commander en courant rend moins sensible aux dispersions des tensions de seuils.

IV.1.1 Contrôle de la résistance série des éléments à seuils symétriques.

Etant donné que nous travaillons avec des couches minces d'épaisseur constante, et que l'on admet que le dopage est uniforme (suivant la profondeur) dans chaque zone, la valeur globale de la résistance de l'élément dépend de deux paramètres : sa géométrie et la résistivité du film polysilicium.

Le dessin est défini lors de la création des masques et pour une résistance par carré du polysilicium, il suffit d'ajuster le nombre de carré autrement dit le rapport longueur sur largeur. Concernant la résistance par carré de chaque zone, elle est définie par son dopage et comme le montre la Figure IV-2, on peut l'approximer en linéarisant dans une gamme de dopage allant d'environ 10^{18} at/cm³ jusqu'au dopage où commence la saturation.

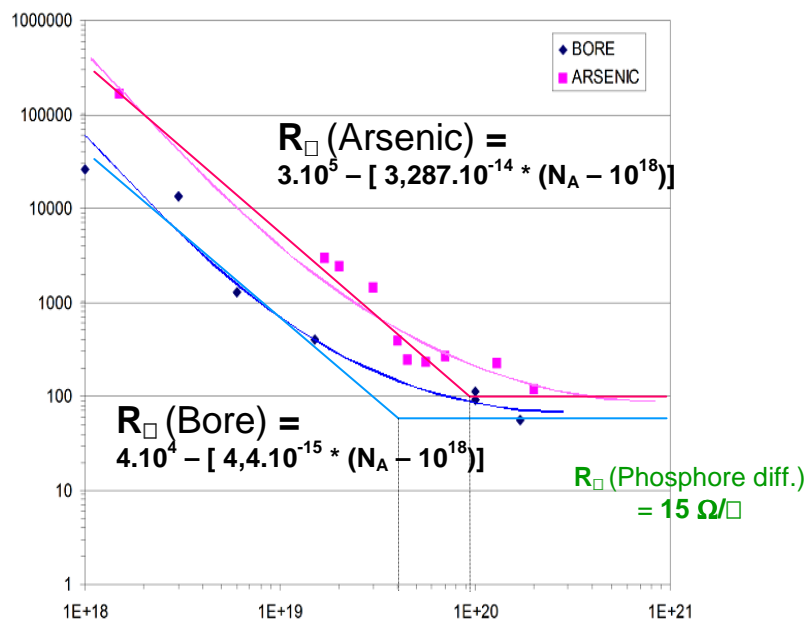


Figure IV-2 : Evolution de la résistance par carré d'une couche de 0,5μm de polysilicium en fonction du niveau de dopage.

Notons tout d'abord que lors de nos tests, nous n'avons pas dépassé la zone correspondant à la solubilité limite dans le polysilicium (saturation). A partir de l'approximation asymptotique, il est possible d'évaluer ce dopage seuil à 4.10^{19} at/cm³ pour le Bore contre 10^{20} at/cm³ pour l'Arsenic.

Nous avons tout de même pu disposer de films de polysilicium dopés N (Arsenic et phosphore) dont la résistance par carré pouvait par implantation, varier d'une centaine d'ohm par carré, à plusieurs centaines de kilo-Ohm par carré. Il est enfin possible d'atteindre la dizaine d'ohm par carré en dopant par diffusion. Ce type de dopage sera réservé aux amenées de courant car sa délimitation souffre de la diffusion latérale sous l'oxyde de masquage.

Après s'être assuré de la possibilité de maîtriser la résistivité, nous avons souhaité explorer d'autres propriétés électriques de la conduction du polysilicium, et notamment ses limites. Avant d'étudier le polysilicium implanté, nous avons testé le polysilicium diffusé. La Figure IV-3 montre le motif que nous avons employé pour tester la limite de conduction, avant destruction par rupture du ruban. Ce motif est sur silicium massif, pour limiter l'auto échauffement mais nous n'avons pas pu identifier si la rupture était d'origine thermomécanique ou s'il s'agissait d'une dégradation du polysilicium (modifications au niveau des joints de grains).

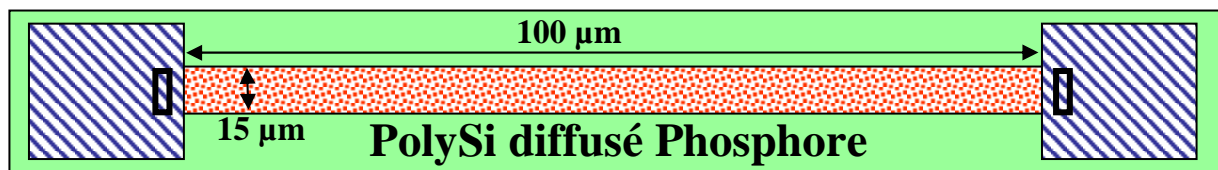


Figure IV-3 : Motif de test de la limite de conduction en courant.

Ce motif a permis de conduire un courant maximum de 30 mA, avec une montée en courant par paliers, laissant le temps à la structure de se stabiliser thermiquement. Cela revient à une densité de courant très élevée de 400 kA/cm². Pour le concepteur, on peut traduire cette limite par une densité linéique de 2 mA/µm pour un film d'épaisseur de 0.5µm. D'autre part, un courant continu de 20 mA, appliqué pendant 200h (8 jours), s'est traduit par une augmentation de 3% de la valeur de la résistance globale.

Une telle mesure est plus délicate sur du polysilicium implanté, car l'auto échauffement est nettement plus marqué et entraîne des dégradations thermomécaniques. Nous avons également observé ce que nous pourrions qualifier d'électro-thermomigration des plots en aluminium. Sans avoir, à ce jour, pu réellement mesurer la température atteinte sur des motifs ruban Implanté/diffusé réalisés sur substrat de silicium massif, nous avons observé sous binoculaire, en appliquant une puissance très élevée (5W dissipés sur 100*100µm²), la diffusion sur près de 500 µm de l'aluminium des plots vers la zone chauffante centrale où est

localisée la zone implantée chaude. On peut tout de même conclure que la température atteinte dépasse 500°C.

Dans le cas d'un élément chauffant issu du projet Micropyros, lors de tests réalisés avant l'étape de libération de la membrane, nous avons pu atteindre un courant de 50mA sous 100V soit, pas moins de 5W dissipés sur une surface de 0,25mm².

Lors de la caractérisation des micro-éjecteurs (Figure IV-a), en procédant à un balayage en tension nous avons constaté à de nombreuses reprises des sauts en courant. L'observation à travers une caméra infrarouge a permis d'associer ce phénomène à une conduction non simultanée dans les deux bras de l'élément chauffant. Pour palier ce phénomène, nous avons dessiné le motif présenté Figure IV- .b.

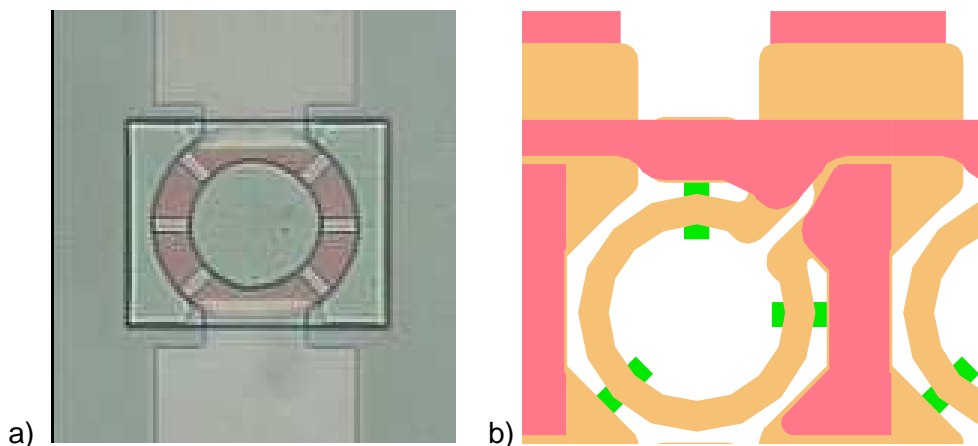


Figure IV-4 : a) élément chauffant classique de micro-éjecteur, b) nouvel élément chauffant

IV.1.2 Ajustement de la tension de seuil

IV.1.2.1 Tension de claquage de la diode PN en polysilicium

Les jonctions polysilicium répondent aux mêmes règles que les jonctions silicium. Ainsi la tension de claquage dépend principalement du niveau de dopage de la zone la plus faiblement dopée. Nos réalisations nous ont permis de mesurer les valeurs contenues dans le Tableau IV-1. Elles permettent de donner les tendances des variations de la valeur de la tension de seuil dans le cas des jonctions Implantées en fonction du dopage le plus faible.

Dopage de la zone la plus faiblement dopée (at/cm ³)	Tension de seuil (V)
10 ¹⁸	6
6.10 ¹⁸	3
2.10 ¹⁹	2

Tableau IV-1 : Variation de la tension de seuil 'V_Z' en fonction du dopage le plus faible de la jonction.

Ces valeurs peuvent servir de repère afin d'ajuster la tension de seuil des éléments à seuils symétriques. Cependant, comme nous pouvons le constater Figure IV-5, pour un

même design, la résistance série subit des modifications. Il convient donc d'adapter le design afin de prendre en compte ces variations lors du développement des éléments.

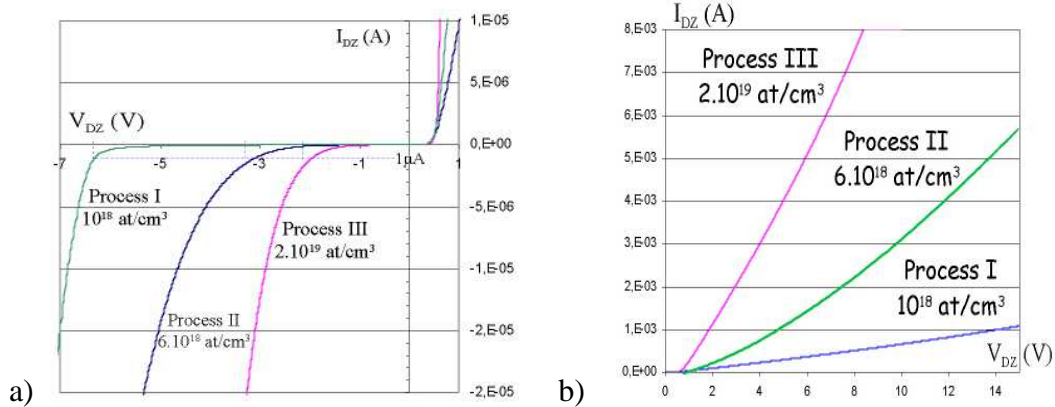


Figure IV-5 : a) Evolution de la tension de seuil, b) Influence sur la résistance série.

En parallèle avec les jonctions Implanté/Implanté, nous avons utilisé des jonctions du type Diffusé/Implanté. Dans le cas de ces jonctions, les résultats sont très difficilement exploitables. En effet, ces jonctions du fait de la diffusion, ne peuvent pas être considérées comme abruptes et ne présentent pas des profils uniformes dans l'épaisseur du matériau. Ces jonctions N++ diffusé / P+ implanté nous ont cependant permis d'obtenir les résultats présentés Tableau IV-2.

dopage N+	dopage P+	dose P+	V_z
diffusion	6,00E+19	3,00 ^E +15	7,13
diffusion	1,00E+20	5,00 ^E +15	6,52
diffusion	1,50E+20	7,50 ^E +15	6,41
diffusion	2,00E+20	1,00 ^E +16	5,83
diffusion	3,00E+20	1,50 ^E +16	5,81

Tableau IV-2 : Modification de la tension de seuil en fonction du dopage de la zone P+.

IV.1.2.2 Ajustement de la tension de seuil globale d'un ESS

Dans tous les cas de dopage, même pour les plus faibles, les tensions de seuil ne peuvent pas excéder 10 Volts. L'utilisation de ces éléments dans des gammes de tensions plus élevées reste toutefois possible grâce à l'implantation localisée qui permet de disposer plusieurs diodes en série. La tension de seuil globale correspondant alors à la somme des tensions de seuils de chaque diode. Pour le vérifier, nous avons conçu le motif de test présenté sur la Figure IV-6.a, où les barrettes rouges correspondent aux zones implantées Bore (P++). La Figure IV-6.b montre les caractéristiques I(V) respectivement obtenues sur des ESS présentant 1, 2 ..., jusqu'à 10 diodes en série. On obtient bien le résultat attendu, à savoir que la tension globale de seuil est bien proportionnelle au nombre de diodes placées en série.

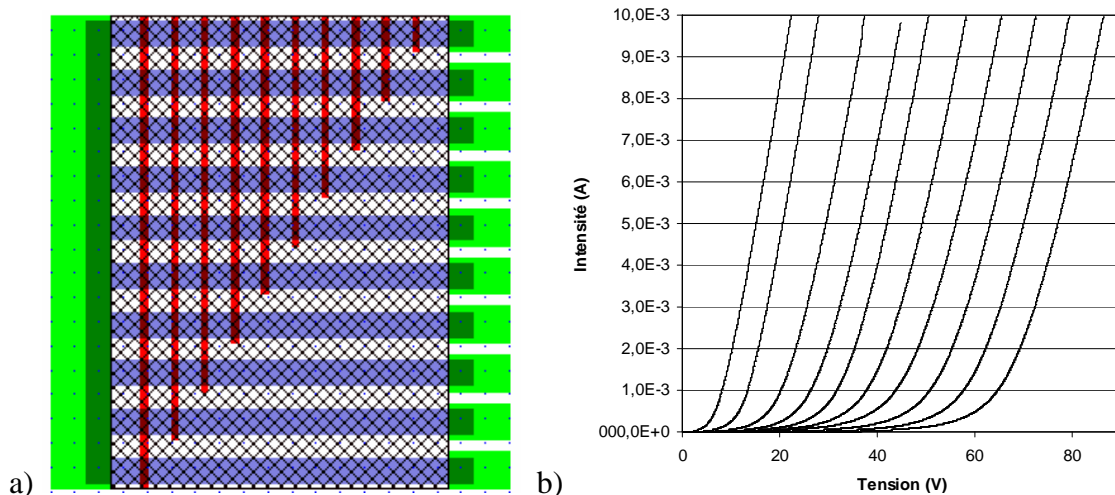


Figure IV-6 : a) Motif de test, b) Evolution de la tension de seuil en fonction du nombre de barrettes

Au cours des différents process réalisés, nous avons pu déterminer les couples de dopages permettant d'être en adéquation avec les spécifications de chaque projet.

IV.2 Limites de l'adressage matriciel à base d'éléments à seuils symétriques

Les réalisations précédentes se sont limitées, du fait des applications visées, à des matrices de 8x8 éléments dans le cas des micro-éjecteurs et 10x10 pour les micro-propulseurs. Cependant, les tests portant sur la validation de cette méthode d'adressage sur des matrices de plus grandes dimensions, ont montré qu'il était possible d'atteindre des matrices contenant plus de 1000 éléments. Lors de notre dernier process, nous avons intégré, dans nos motifs de tests, une matrice de 32x32 éléments (1024 éléments). La réalisation de cette matrice d'éléments chauffants suit strictement le processus de fabrication générique proposée lors du précédent chapitre. Cette matrice occupe une surface totale de 43mm² (6.6 x 6.6 mm²), dans la cellule élémentaire de 200*200μm², l'élément chauffant est de 100*100μm², ce qui conduit à une densité d'intégration de 2500 éléments chauffants par cm². Sur la Figure IV-7 sont présentés le dessin de la matrice totale (a), un zoom correspondant à l'angle (b) où l'on distingue les 3 barrettes implantées Bore (P+) permettant la réalisation des ESS et la photo (c).

Cette matrice ne fait appel, lors de la réalisation, qu'à un seul niveau de métallisation. Les intersections lignes / colonnes sont assurées par des via en polysilicium diffusé (15 Ω/□), ce qui allège le process. Dans le cas de réalisation sur substrat massif, et donc sans attaque face arrière par DRIE, seulement 5 étapes de photogravure sont nécessaires. C'est donc un processus extrêmement simple, potentiellement compatible avec un grand nombre d'autres

process et transposable sur un substrat type verre ou céramique sans obstacle majeur.

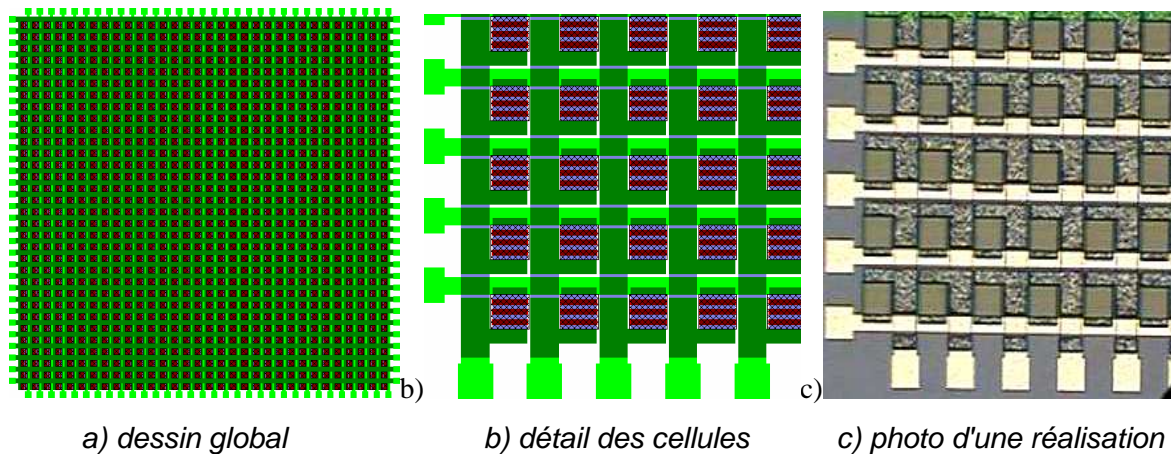


Figure IV-7 : Matrice adressable de 32x32 ESS

Les premiers tests électriques montrent que les matrices sont bien fonctionnelles. En effet, un phénomène d'émission de lumière, sur lequel nous reviendrons plus tard, permet de visualiser la cellule sélectionnée dans la matrice. Outre les caractéristiques électriques qui seront détaillées plus tard, cette visualisation a permis de contrôler le bon fonctionnement de ces matrices. Nous pouvons observer, sur la Figure IV-8.a, l'élément chauffant sélectionné, correspondant à la ligne et la colonne alimentées par les pointes de test, et sur la Figure IV-8.b cet élément adressé émettant une lumière, certes faible, mais perceptible par l'oeil sous binoculaire ou à l'aide d'une caméra standard.

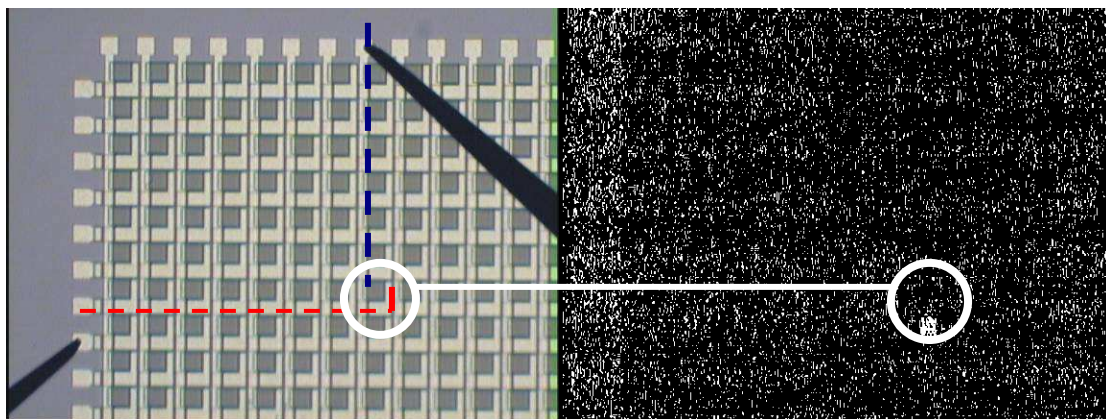


Figure IV-8 : Test électrique et validation de l'adressage de puissance par visualisation de l'élément sélectionné.

On remarque que seul l'élément adressé émet de la lumière. Par observation directe sans caméra, on peut observer trois zones plus intenses correspondant aux jonctions polarisées en inverse. Ceci montre bien l'efficacité de notre adressage. La même image (émission de lumière par la cellule sélectionnée) est obtenue lors d'un test à puissance

identique mais où l'on a porté la température du Wafer à 120°C. Cela montre la faible sensibilité à la température, et la robustesse de notre approche à base d'ESS.

La comparaison des caractéristiques, présentée sur la Figure IV-9, d'un ESS sélectionné dans des matrices comprenant respectivement 64 éléments et 1024 éléments est probante. En effet, le fait que ces courbes soient quasi confondues, à haut niveau de courant, traduit la bonne reproductibilité des caractéristiques des ESS. De plus, le faible écart à bas niveau ($I_A < 10 \mu A$), témoigne de la valeur réduite du courant inverse de ces éléments et permet d'avancer que cette solution resterait valide pour des matrices aussi grandes que 128*128 éléments. En effet, le courant parasite est d'environ 10 μA , ce qui correspond à un courant inverse de 486nA pour chaque élément. En considérant une matrice de 128x128 (16384) éléments, ce courant parasite resterait inférieur à 50 μA .

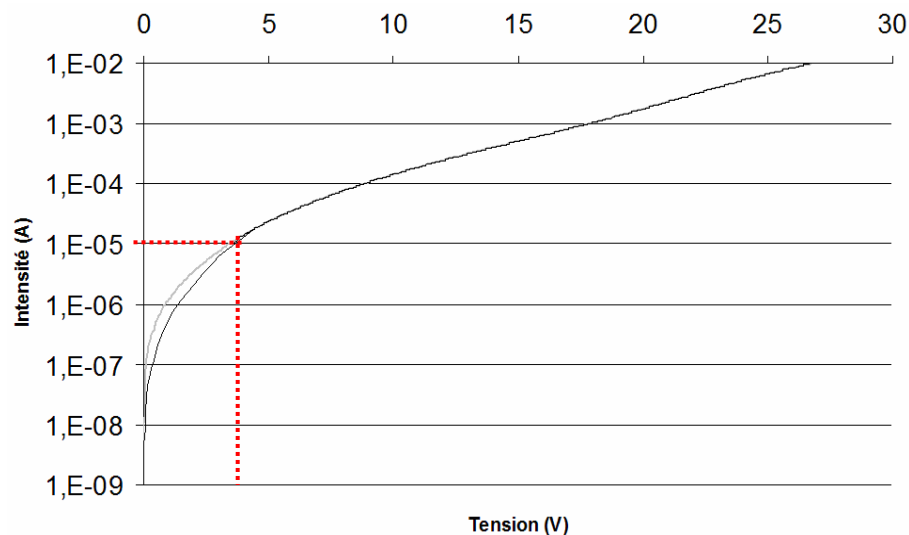


Figure IV-9 : Caractéristique d'une cellule sélectionnée, courbe grise dans une matrice 8x8, courbe noire dans une matrice 32x32.

La Figure IV-10.a présente enfin un motif de test permettant d'obtenir la caractéristique électrique de l'ensemble des chemins parasites d'une matrice car l'élément adressé est volontairement absent de la matrice.

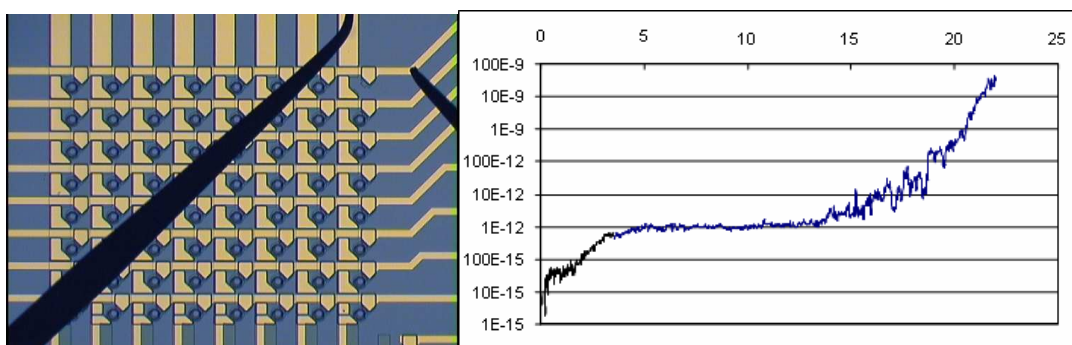


Figure IV-10 : a) motif de test pour la caractérisation du courant parasite d'une matrice 8x8, b) caractéristique associée.

Ce test est à mettre en regard avec la caractéristique d'un élément composant cette matrice. Dans la zone d'actuation, le point de fonctionnement se situe entre 7 et 15 volts, pour un courant de l'ordre de quelques dizaines de milli Ampères, à comparer avec un courant de fuite de 10^{-12} A environ pour cette zone.

IV.3 Optimisation d'une micro-source de chaleur

La géométrie des éléments chauffants était, dans le cas de l'utilisation du polysilicium diffusé, le seul moyen de contrôle du profil en température de nos réalisations. On pouvait ajuster le dessin de l'élément chauffant en forme de serpentín pour tenter d'uniformiser la répartition. De plus, comme la température est toujours plus élevée au centre de la zone chauffante qu'à sa périphérie, il est aussi possible de réduire la section des bras chauffants latéraux (augmenter leur résistance) et /ou augmenter la distance entre les bras placés au centre (réduire le couplage). En associant ces possibilités de design à celles offertes par l'utilisation d'implantations localisées dans le polysilicium, nous obtenons un degré de liberté supplémentaire. En effet, la variation possible de résistivité permet, sans variation de section, de faire varier la puissance localement dissipée par effet Joule et on peut, grâce à la forte localisation de la dissipation thermique au niveau des jonctions PN en direct et surtout en inverse, par placement judicieux, obtenir le profil en température désiré. Ainsi, en se basant sur le modèle électrique des éléments chauffants, on peut distinguer, comme le montre la Figure IV-11, deux sortes de phénomènes dissipatifs de la puissance électrique.

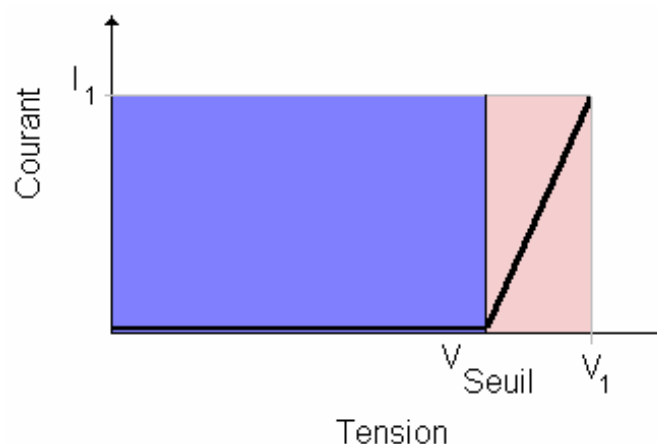


Figure IV-11 : Répartition de la puissance dissipée dans un ESS par effet résistif et au niveau des jonctions.

Par rapport à la puissance globale, qui au point de fonctionnement est définie par la puissance totale dissipée $P_1 = V_1 \cdot I_1$, nous pouvons scinder cette puissance en un effet Joule

dissipé par les différentes parties résistives ($P_{Rs} = R_s \cdot I_1^2$, zone claire) des éléments chauffants et une puissance dissipée au niveau des jonctions (en direct et inverse) qui cette fois est donnée par ($P_J = V_{Seuil} \cdot I_1$ zone foncée). Dans notre illustration Figure IV-11, la dissipation au niveau des jonctions est prépondérante, mais dès lors que l'on dépasse $V_{Appliquée} > 2 \cdot V_{Seuil}$, ce rapport est inversé. Cette puissance supplémentaire ($P_{J,}$) principalement dissipée au niveau des jonctions en inverse, est extrêmement localisée puisqu'elle s'exprime dans un volume correspondant au produit entre la section ($A = W \cdot E_{Poly}$) du film, déjà réduite, et l'extension de la charge d'espace « W_T ». Compte tenu des dopages employés ($> 10^{18} \text{at/cm}^3$), cette extension de la charge d'espace, qui supporte la tension Zéner de la diode, n'excède pas quelques centaines de nanomètres. Par la suite nous qualifierons ces sources de chaleur planaire et leur positionnement, assuré par photolithographie et implantation, permettra une ingénierie thermique fine. Enfin, au vu des volumes mis en œuvre, on peut raisonnablement réaliser des sources spatialement bien résolues (quelques micromètres carré) présentant une très faible inertie thermique.

Enfin, notre process technologique, déjà compatible avec des réalisations sur membranes, sera nous l'espérons, facilement adaptable à des processus dits à pont à air. Nous avons prévu de tester ce process dans notre dernier run technologique, afin de comparer les trois méthodes de réalisation d'éléments chauffants à savoir : sur substrat silicium, sur membrane suspendue et localement suspendus (pont à air). Ces tests n'ont pour l'instant pu aboutir mais nous souhaitons à terme les mener à bien. Cependant, les simulations faites, en parallèle à ces réalisations, permettent de mettre en avant les grandes tendances de ces trois solutions appliquées à nos composants.

IV.4 Simulations thermiques pour évaluer trois types d'éléments chauffants

Ces simulations thermiques ont été réalisées avec le soutien d'Antoine Marty à l'aide du simulateur multidisciplinaire ABAQUS. Elles nous ont permis de mettre en avant les principales caractéristiques de champs d'applications de chaque type de réalisation en terme de gamme de températures et de réponse transitoire. Ces simulations mettent en œuvre une structure sans jonction, présentant une zone plus résistive pour la zone active (polysilicium implanté), et une zone à faible résistivité modélisant les amenées de courant (polysilicium diffusé).

IV.4.1 Définition du motif et des structures simulées

La géométrie du motif de test est présentée sur la Figure IV-12. La structure A sera notre structure de référence ; elle correspondra au motif test disposé sur un substrat massif de silicium (pas de membrane). La structure B est telle que le film de polysilicium est localement suspendu et enfin la structure C correspond au placement de ce motif au centre d'une membrane suspendue. Les vues en coupe de ces trois structures sont successivement représentées sur la Figure IV-13.

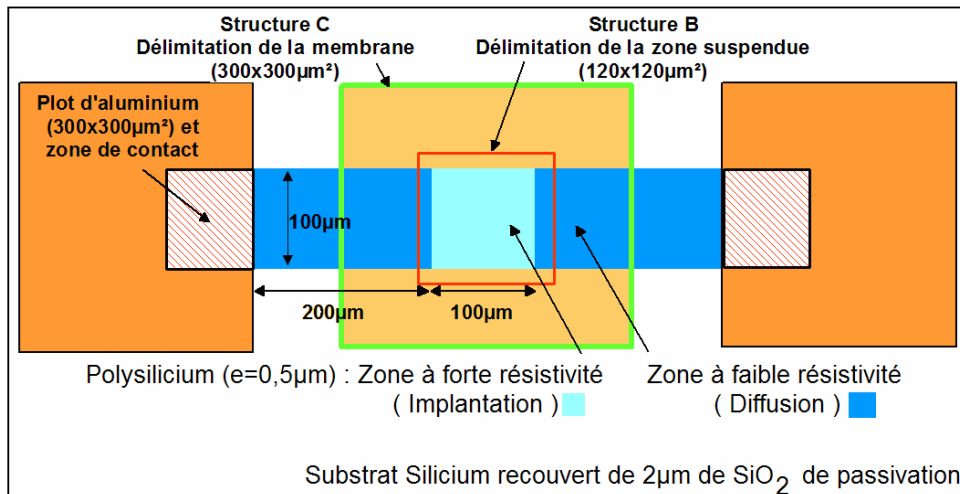


Figure IV-12 : Géométrie de la structure simulée.

Compte tenu des symétries verticale et horizontale dans cette vue de dessus du motif de test, le temps de calcul peut être réduit en limitant la simulation à un quart de la structure en considérant des conditions adiabatiques sur ces plans de symétrie.

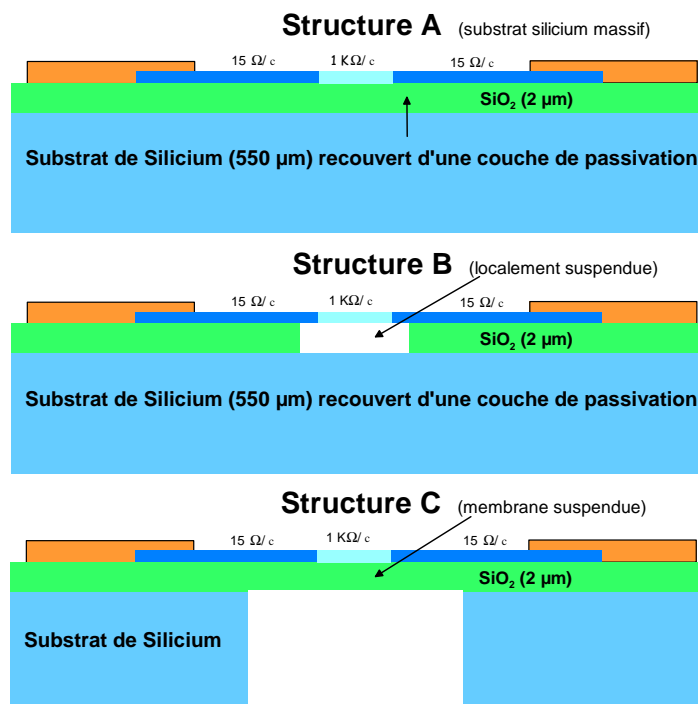


Figure IV-13 : Description des structures retenues, A : structure sur substrat massif,; B structure dite à pont à air, C structure sur membrane.

La Figure IV-14 présente une vue tridimensionnelle du quart de structure servant à simuler la structure sur membrane définie dans ABAQUS. Afin de comparer ces trois structures, nous avons limité la puissance appliquée pour obtenir des résultats cohérents. C'est-à-dire pour obtenir des températures ne dépassant pas 1200°C.

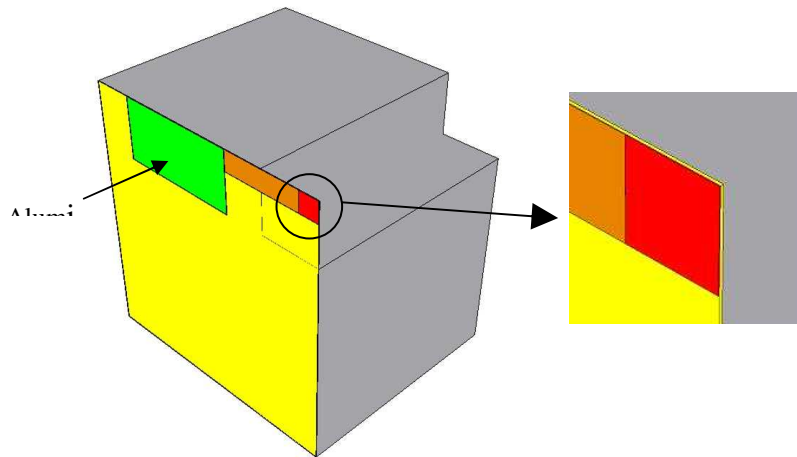


Figure IV-14 : Vue 3D du quart de la structure C.

Les simulations de chauffage des structures sont effectuées en négligeant la convection naturelle ainsi que le rayonnement (ce qui est justifié pour ce type d'étude comparative et compte tenu des dimensions réduites). Dans les trois cas, les mêmes puissances sont dissipées : la zone chauffante dissipe 40 mW (zone rouge dans la Figure IV-14) contre seulement 0.8 mW dans la zone d'accès (orange). Cet écart entre la puissance dissipée dans la zone active chauffante et les zones d'accès est lié au dopage de chaque zone et est de nature à bien localiser la zone chauffante tout en minimisant les pertes d'amenées. Dans les relevés qui suivent, pour chacune des 3 structures simulées, les valeurs de la température au centre de l'élément « T1 », au bord du centre T2, au coin T3, et enfin au centre du bord T4 seront extraites (Cf Figure IV-15).

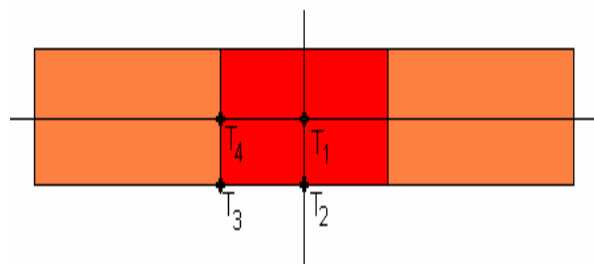


Figure IV-15 : Localisation des températures relevées sur l'élément chauffant.

Du fait de la simulation partielle de chaque structure (un quart), la température T_1 est en fait la température au centre de l'élément chauffant et sera bien évidemment la plus élevée. De plus, nous avons souhaité prendre en compte la loi de variation de la conductivité thermique du silicium et du polysilicium avec la température. Sans réelles données ni mesures sur notre polysilicium, nous considérerons que sa conductivité est égale à 2/3 de celle du silicium. Cette hypothèse sur K_{TH} (PolySi) correspond à des fits réalisés sur des structures employant du polysilicium diffusé phosphore. Dans le cas du polysilicium implanté, cette conductivité doit être nettement plus réduite, ce qui va dans le sens d'une amélioration des performances de l'élément chauffant. Les paramètres retenus pour les différents matériaux présents dans nos structures sont résumés dans le Tableau IV-3.

Matériau	Conductivité thermique (W/m.K)	Chaleur spécifique (J/Kg.K)	Densité (Kg/m³)
Silicium	$102 \times [(T^* + 273)/400]^{-1,25}$	699	2330
Polysilicium	$k_{Si} \times 0,66$	699	2330
SiO₂	1.4	1000	2270
Aluminium	237	900	2700

Tableau IV-3 : *Propriétés thermiques des matériaux mis en œuvre (* température en °C).*

IV.4.2 Résultats de simulation

IV.4.2.1 Élément chauffant sur substrat Si Massif

Dans le cas de la structure A sur silicium massif la chaleur dégagée par la zone active de l'élément chauffant se propage rapidement dans le substrat pour se stabiliser autour de 25°C. L'extraction possible par toute la face inférieure impose une grande uniformité en température de la zone chauffante. Les températures atteintes pour une puissance dissipée de 40mW sont relativement faibles. Si la température atteint 25,4°C au centre, en revanche à l'angle elle chute à 22,2°C. Cette répartition en température présente un profil gaussien (Figure-IV-16), loin de nos attentes en terme d'uniformité. On peut apprécier le temps de montée réduit (~ 20µs) que l'on imputera non seulement à la faible élévation en température ($T_1=5,4°C$) mais aussi lié à la résistance thermique réduite. En effet

pour être évacué vers le substrat maintenu à 20 °C sur sa face arrière, le flux de chaleur traverse la couche d'oxyde du silicium.

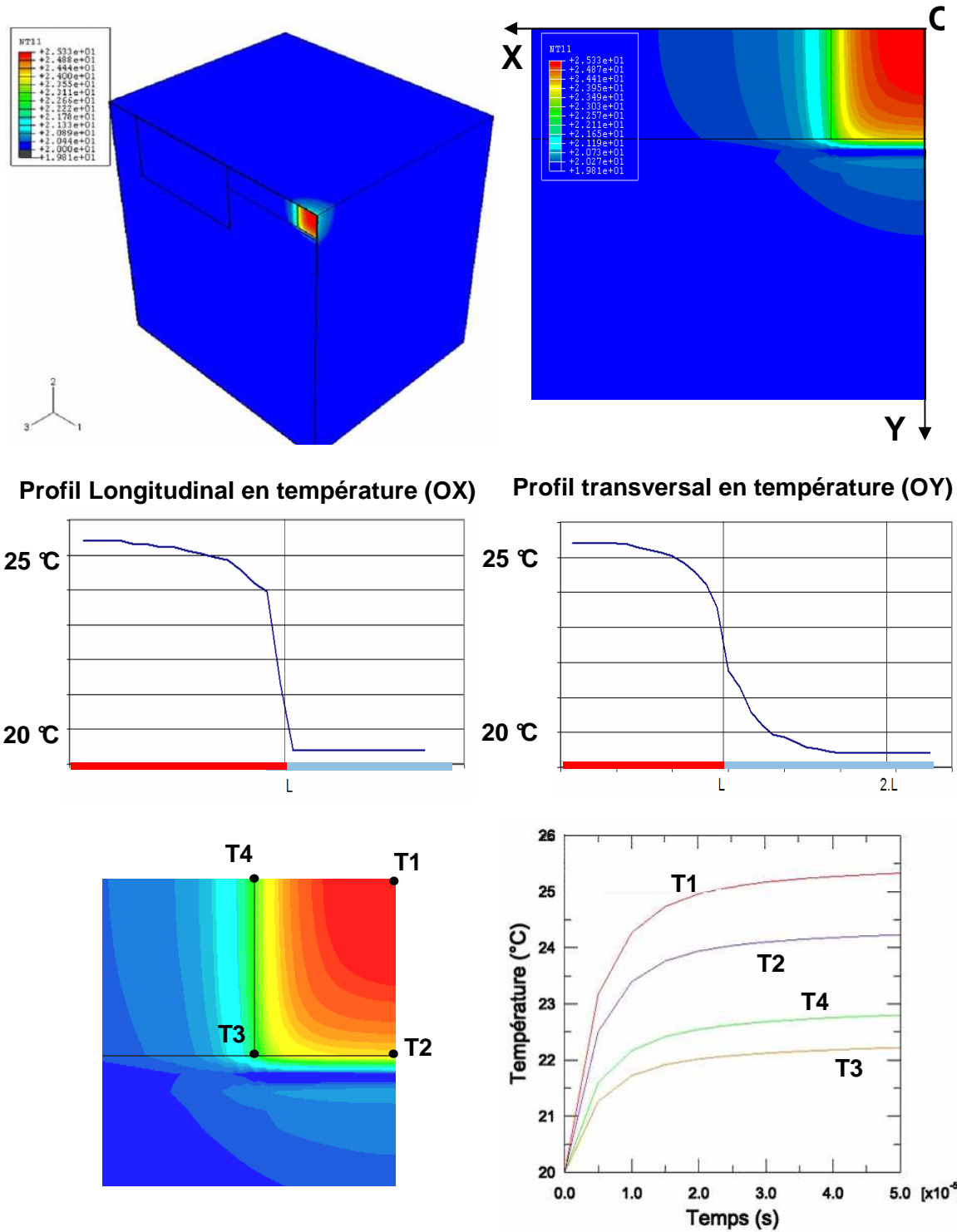
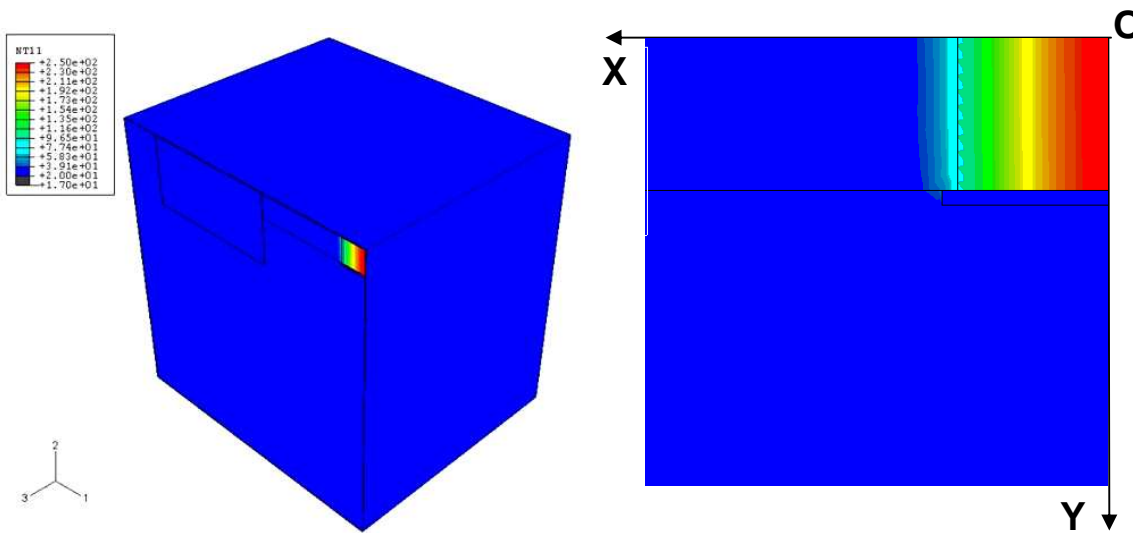


Figure IV-16 : Simulation thermique de la structure A, sur silicium massif.

Si on considère la seule température centrale (T_1) on peut estimer la valeur de la résistance thermique à $R_{THA} = 137^\circ\text{C/W}$. Dans ces conditions, il faudrait appliquer près de 582 mW pour atteindre 100°C au centre de l'élément chauffant. Enfin, la différence entre la température du bord T_2 et celle au centre du bord T_4 , s'explique par l'étalement du flux de chaleur le long du ruban de polysilicium.

IV.4.2.2 Élément chauffant localement suspendu (pont à air)

Ce type de structure où le polysilicium est localement suspendu dans sa partie active (chauffante), présente une forte non uniformité des températures (Cf Figure IV-17). Pour réaliser ce type de structure, il suffit d'éliminer, par attaque sélective, l'oxyde sous la zone active (couche sacrificielle). On retrouve, longitudinalement, une répartition thermique de forme gaussienne ($T_1 > T_4$ et $T_2 > T_3$). En revanche on note que la répartition thermique transversale est quasi uniforme ($T_1 = T_2$ et $T_3 = T_4$). Les zones plus proches des zones d'encrage du polysilicium sont le siège d'une forte extraction latérale de chaleur vers le substrat. Il en résulte un fort gradient longitudinal de la température (250°C au centre contre 75°C aux ancrages) et en revanche un temps de montée en température faible (0.2ms) compte tenu des 230°C d'élévation en température.



Profil Longitudinal en température (OX) Profil transversal en température (OY)

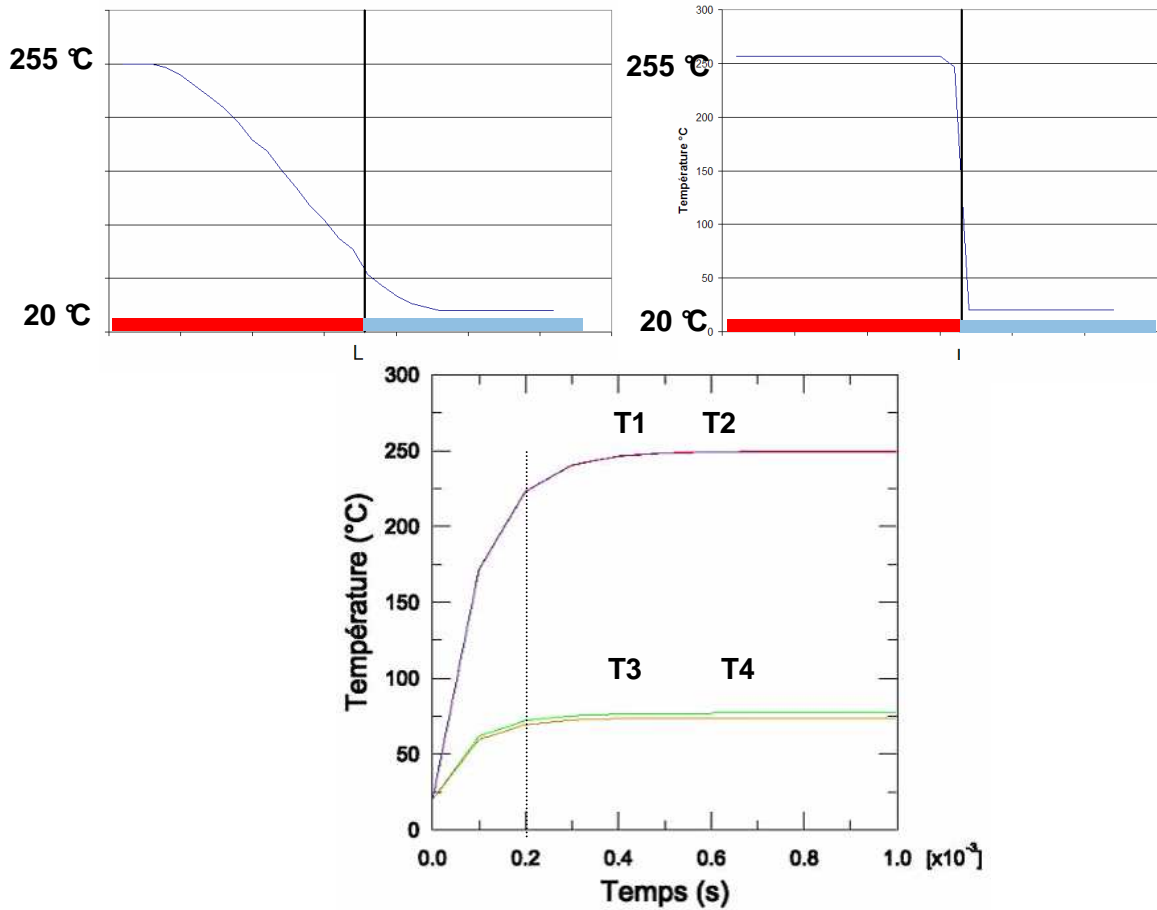


Figure IV-17 : Simulation thermique de la structure B, localement suspendue.

En considérant la température centrale, on obtient une résistance thermique de $R_{THB} = 5750^{\circ}\text{C}/\text{W}$. Dans ces conditions, il suffira d'appliquer 14 mW pour atteindre 100°C au centre de l'élément chauffant. Enfin, la différence, beaucoup plus marquée que précédemment, entre la température du centre T_1 et celle au centre du bord T_4 , s'explique par l'extraction du flux de chaleur à travers le seul ruban de polysilicium.

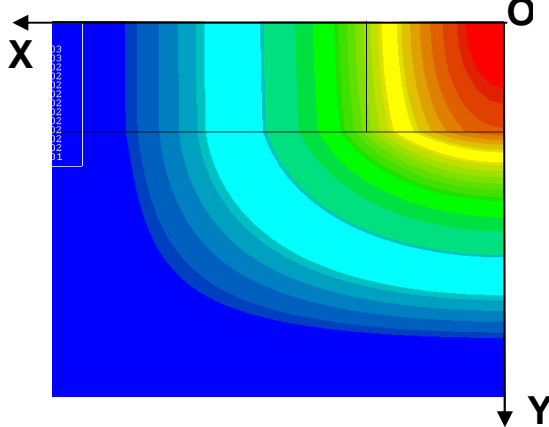
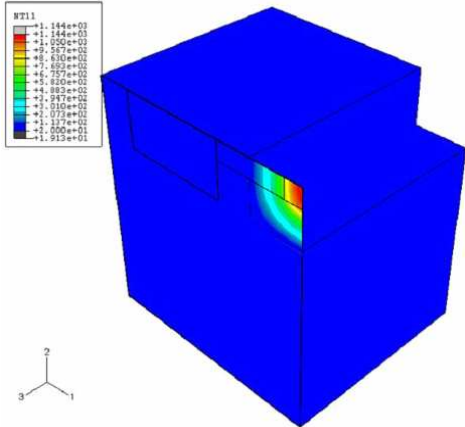
IV.4.2.3 Structure sur membrane totalement suspendue

Ce dernier type de structure est celui permettant d'atteindre les températures les plus élevées pour la même puissance consommée de 40mW

(Cf

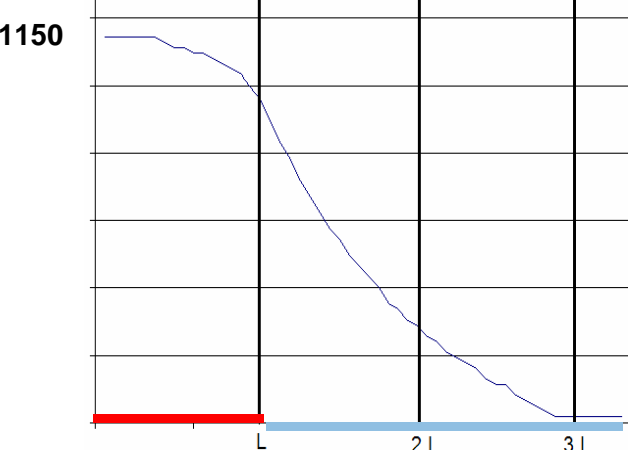
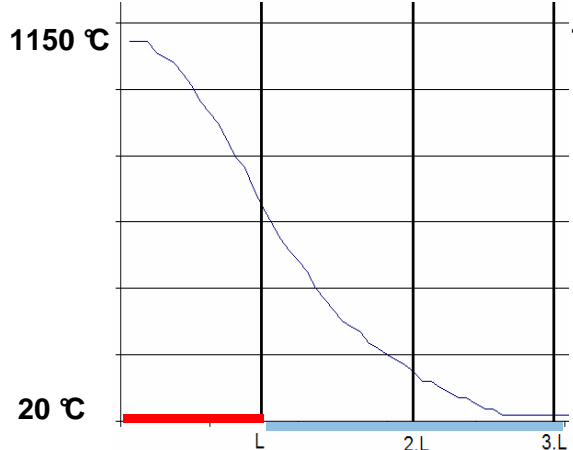
Figure IV-18). Dans le cadre de cette étude, les résultats donnent une température proche de 1200°C, qui en réalité doit être moindre car le rayonnement infra rouge n'est alors plus négligeable. On constate que l'extraction du flux de chaleur est isotrope par conduction de la

chaleur dans la membrane, mais la conduction thermique via le bras en polysilicium induit aussi dans ce cas une dissymétrie. Il en résulte un gradient longitudinal de la température ($T_1 = 1150^\circ\text{C}$ au centre contre $T_4 = 750^\circ\text{C}$ aux bords de l'élément chauffant) et un temps de montée en température important d'environ 7ms.



Profil Longitudinal en température (OX)

Profil transversal en température (OY)



$\Delta T/\Delta t = 160^\circ\text{C/ms}$
($1150^\circ\text{C}/7\text{ms}$)

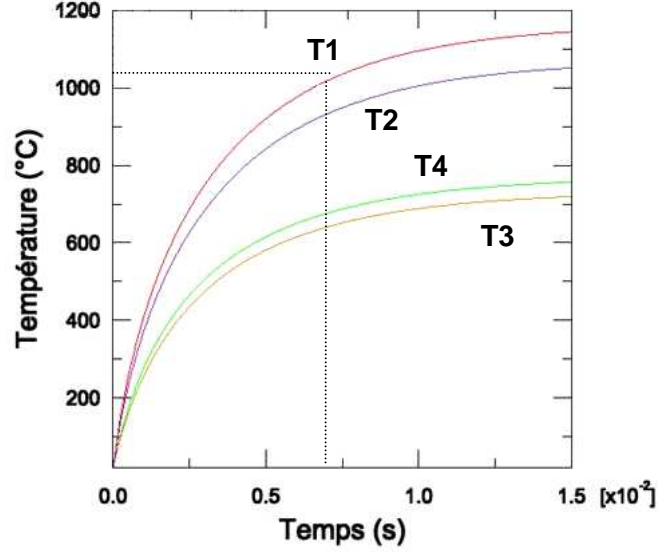


Figure IV-18 : Simulation thermique de la structure C, sur membrane totalement suspendue.

En considérant la température centrale, on obtient à présent une résistance thermique de $R_{TH\ C} = 28250^{\circ}\text{C}/\text{W}$. Dans ces conditions, il suffira d'appliquer 2.8 mW pour atteindre 100°C au centre de l'élément chauffant. Enfin, la différence, beaucoup marquée, entre la température du centre T_1 et celle au centre du bord T_4 , traduit encore la conduction latérale via le ruban de polysilicium.

IV.4.2.4 Synthèse des résultats obtenus sur les trois structures

Afin de comparer les trois types de structures, nous avons regroupé dans le Tableau IV-4, les résultats des simulations thermiques. La température maximale pour une puissance donnée, est atteinte par la structure C sur membrane suspendue. En revanche, la structure B intermédiaire (localement suspendue) permet d'atteindre une élévation en température de plusieurs centaines de $^{\circ}\text{C}$ avec la vitesse de montée en température la plus rapide (supérieure à $1000^{\circ}\text{C}/\text{ms}$).

Enfin, la structure A présente un intérêt dès lors que l'on souhaite une élévation en température réduite (quelques dizaines de degrés) et un bon contrôle de cette dernière.

Type de structure	Température max	Temps de montée (90%)	Vitesse de montée	R_{TH} en T1
<i>A Massif</i>	$25,5^{\circ}\text{C}$	$20\mu\text{s}$	$275^{\circ}\text{C}/\text{ms}$	$137.5^{\circ}\text{C}/\text{W}$
<i>B Pont à air</i>	250°C	$200\mu\text{s}$	$1150^{\circ}\text{C}/\text{ms}$	$5750^{\circ}\text{C}/\text{W}$
<i>C Membrane</i>	1150°C	7 ms	$161^{\circ}\text{C}/\text{ms}$	$28\ 250^{\circ}\text{C}/\text{W}$

Tableau IV-4 : Synthèse des simulations thermiques des trois structures.

Il faut toutefois noter que ces résultats sont donnés à titre qualitatif et permettent de dégager les tendances pour chaque type de structure. Enfin, ces simulations ont été faites dans le cas de chauffage « à vide », ce qui n'est pas le cas dans un grand nombre d'applications, où l'on doit chauffer un liquide ou un solide. Cependant, ces tests nous ont permis de déterminer les gammes de températures que l'on peut espérer atteindre pour chaque type de structure, pour à terme faire les choix technologiques adéquats selon les applications visées.

D'autres simulations intégrant les phénomènes de dissipation aux niveaux des jonctions pourront être réalisées par la suite, en modélisant les jonctions par des zones à forte résistivité très fines, dissipant une puissance équivalente.

IV.5 Caractérisation en température

Ces tests ont été effectués sur la station de test sous pointes cascade permettant des caractérisations bas niveaux, sur laquelle nous avons fait varier la température du substrat de 40°C à 150°C.

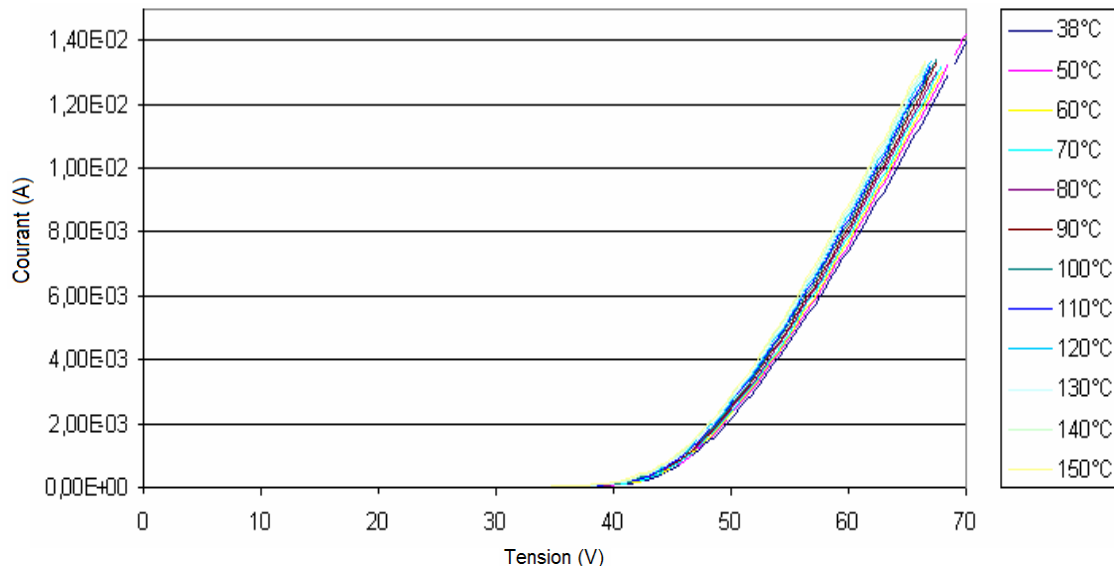


Figure IV-19 : Caractéristique d'un ESS à différentes températures entre 38°C et 150°C.

Cet ensemble de caractéristiques (Figure IV-19) montre que les deux paramètres les plus importants à observer sont l'évolution de la résistance globale, ainsi que celle de la tension de seuil. Deux types de sensibilités peuvent être associées à deux types de mesures :

- Tout d'abord, en se plaçant à des tensions inférieures à la tension de seuil, zone où la puissance dissipée par l'ESS est extrêmement faible. La température ainsi mesurée sera la température ambiante ou celle du substrat. Dans ce cas on observera le courant de saturation des ESS.
- Une seconde mesure, au-delà du seuil, permet de contrôler la température atteinte par auto échauffement au sein de l'élément.

IV.5.1 Résistance globale :

La variation de la résistivité en fonction de la température pour le polysilicium est fortement liée au niveau de dopage de chaque zone. Suivant les cas et les dopants, il est possible d'obtenir des éléments n'ayant pas de variation de résistivité. Dans le cas où on

désire utiliser la variation de pente en tant qu'indicateur de température, il serait possible d'optimiser cette fonction en trouvant le type de dopant et le niveau de dopage adéquat.

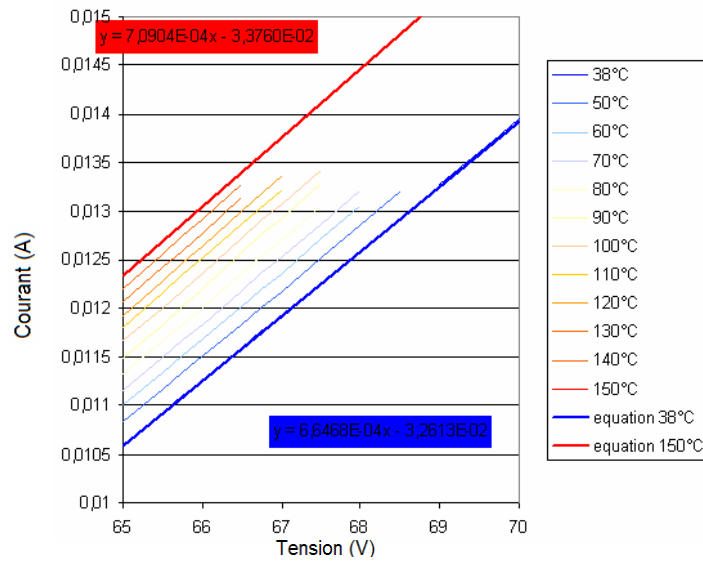


Figure IV-20 : Influence de la température sur la résistance série d'un ESS.

Dans le cas présenté Figure IV-20, la résistance de la cellule élémentaire chute de 1504 Ω pour une température de 40°C, à 1410 Ω pour une température de 150°C. Soit une variation de - 0.85 Ω /°C. Cette sensibilité peut néanmoins être accrue en menant une étude complémentaire sur les dérives en température des couches minces de polysilicium dopées par implantation. De plus en se plaçant à un courant constant de 12.5mA, on observe une diminution d'environ 220mV pour une élévation de 10°C. La variation de la valeur de la résistance est donc responsable de -106 mV et les 114 mV restant, sont dus aux dérives thermiques des 5 diodes présentes dans cet ESS. Cette dérive est donc de -11.4 mV / °C et peut être imputée à la dérive des diodes polarisées en direct correspondant à $5 \times (-2.2\text{mV}/^\circ\text{C}) = -11 \text{ mV}/^\circ\text{C}$.

IV.5.2 Variation de la tension de seuil :

L'autre caractéristique présentant une forte variation lors des changements de température, est la valeur de la tension de seuil. La cellule présentée comporte 4 barrettes dopées P+ dans une zone dopée N+. Afin de mettre en avant cette variation, nous allons étudier les tensions correspondant successivement à un courant de mesure constant de 1, 2, 5 et 10 μ A.

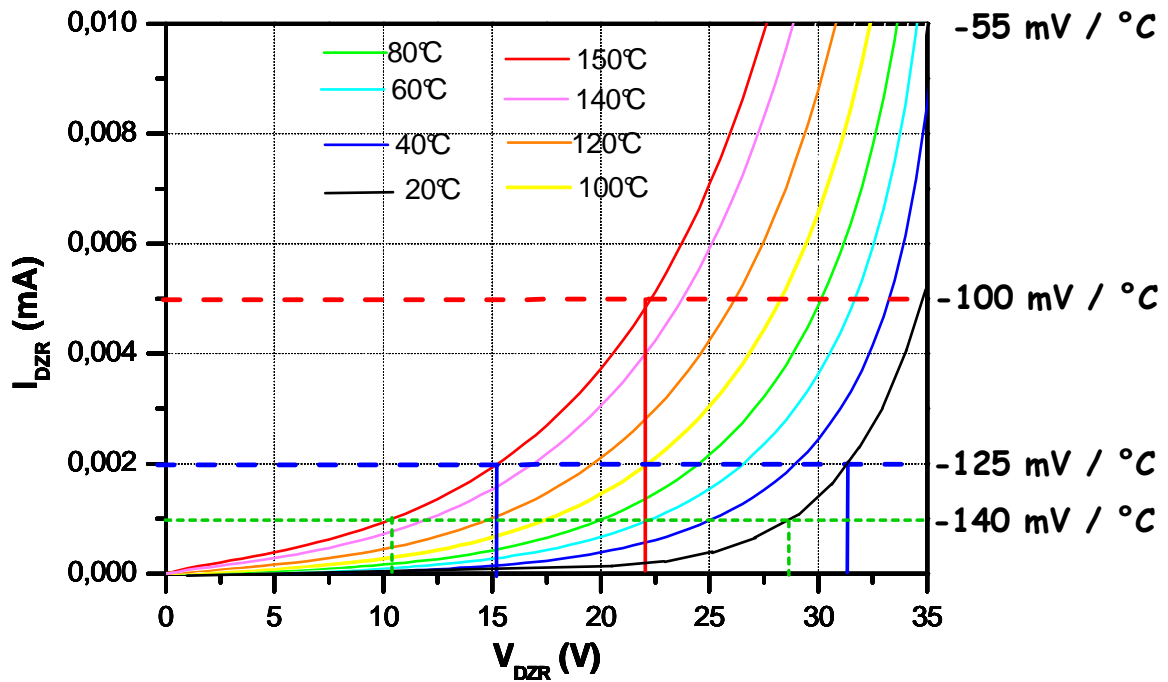


Figure IV-21 : influence de la température sur la caractéristique courant/tension sous le seuil.

Cette évolution représentée Figure IV-21 montre une diminution importante de cette tension « seuil » en fonction de la température.

	V_{ESS} (V) $I_{ESS} = 5\mu\text{A}$	V_{ESS} (V) $I_{ESS} = 10\mu\text{A}$
38°C	33	35,5
50°C	32.4	35
60°C	31.7	34,75
70°C	31	34,25
80°C	30.2	33,75
90°C	29	33,25
100°C	27.8	33
110°C	26.9	32,5
120°C	26	31
130°C	25	30
140°C	24	29
150°C	22,4	28

Tableau IV-5 : Variation de tension pour un courant sous le seuil donné.

A l'aide de cette structure à quatre diodes, nous obtenons une bonne sensibilité en température qui varie avec le niveau de courant constant lors de la lecture en tension. Pour des courants de $5\mu\text{A}$ puis $10\mu\text{A}$, d'après les résultats présentés Tableau IV-5, on obtient respectivement $-95 \text{ mV}/^\circ\text{C}$ et $-67 \text{ mV}/^\circ\text{C}$. Cette sensibilité est la résultante de la dérive thermique des quatre diodes polysilicium en direct ajoutées à celles de 4 diodes identiques en inverse. Dés à présent, nous avons obtenu une sensibilité variant de $140 \text{ mV}/^\circ\text{C}$ avec un courant de $1\mu\text{A}$, contre $55 \text{ mV}/^\circ\text{C}$ pour $10 \mu\text{A}$. Cette valeur de sensibilité est excellente et

permet d'espérer détecter une variation de l'ordre du milli Kelvin. De plus comme on le constate on peut en jouant sur le courant de mesure, ajuster cette sensibilité en température. Moyennant une étude plus poussée visant la réalisation de structures optimisées dédiées à la mesure de température, des sensibilités plus importantes pourraient être atteintes, notamment en réduisant la section du détecteur. Cette sensibilité est liée aux jonctions PN et permet ainsi une localisation de la zone sondée thermiquement. Enfin, on peut conclure que pour renforcer les performances d'un tel capteur, compte tenu de la bonne uniformité des caractéristiques électriques, la réalisation sur le même substrat d'un dipôle de référence, pourrait permettre une mesure différentielle susceptible d'intégrer les variations de température du boîtier.

IV.6 Electroluminescence du polysilicium implanté Bore

Dans le cadre de l'étude de nos dispositifs, nous avons constaté que certaines de nos structures émettaient de la lumière. Dans un premier temps, nous avons supposé que cette émission était liée à une température très élevée (échauffement localisé) au niveau des jonctions en inverse. Nos structures sont capables de conduire des densités de courant extrêmement élevées ($>400 \text{ kA/cm}^2$) notamment au niveau des jonctions en inverse, où la charge d'espace n'excède pas $0.1 \mu\text{m}$, la densité de puissance atteint les $40 \mu\text{W}/\mu\text{m}^3$ (40 MW/cm^3). Mais les observations faites à la caméra, ou sous binoculaire d'une lumière « blanche » nécessiteraient d'atteindre plusieurs milliers de degré. De plus cette émission serait plus diffuse et ne serait pas aussi localisée. Enfin, nous avons noté que cette émission semblait ne s'établir que dans la zone dopée Bore aux frontières des jonctions polarisées en inverse.

Cette émission de lumière blanche est liée à la présence de jonctions polysilicium Implantée/Implantée, car dans le cas des jonctions polysilicium Implantée/diffusée ce phénomène n'est pas visible. Comme le montre la Figure IV-22, nous avons réalisé une jonction PN interdigitée (a). La source lumineuse épouse parfaitement la forme de la jonction P/N.

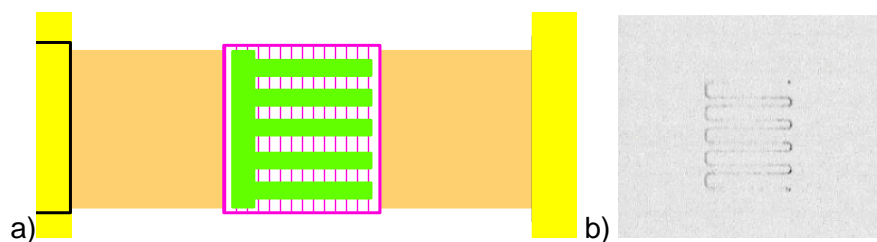


Figure IV-22 : Observation de l'émission de lumière le long du profil d'une jonction interdigitée, a) dessin du motif réalisé, b) image en couleurs inversées.

Conformément à cette image, toutes nos observations tendent à confirmer qu'il n'y a pas d'émission de lumière au niveau de la jonction en direct. Dans le cas d'une jonction perpendiculaire aux lignes de courant dans le ruban, à bas niveau de courant, la source lumineuse est uniforme et épouse parfaitement la frontière entre zones P+ et N+. Lorsque la tension augmente, et donc par conséquent la puissance dissipée dans l'élément, une focalisation progressive de la lumière a lieu en quelques points, et ensuite le nombre de ces points augmente progressivement, jusqu'à la disparition totale des points lumineux. Cette évolution est présentée sur la figure suivante.

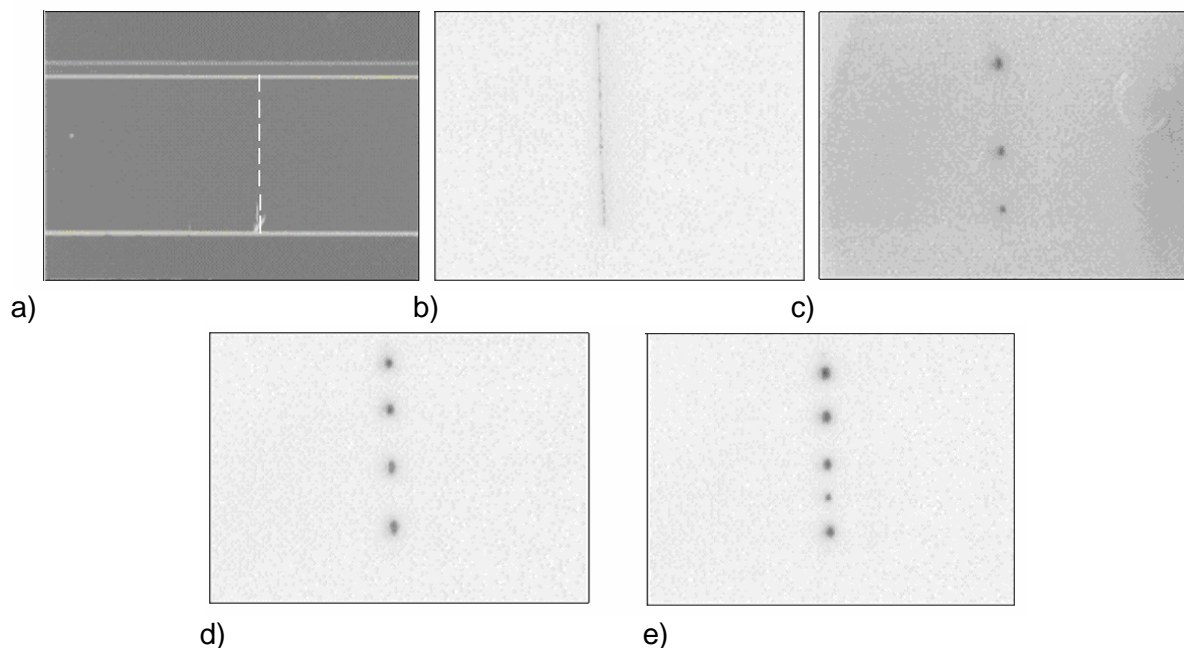


Figure IV-23 : Observations de l'émission de lumière au niveau d'une jonction PN en inverse, image obtenues à l'aide du caméra standard, couleurs inversées.

On peut noter cependant, que si cette évolution est reproductible pour une structure donnée, elle n'est cependant pas réversible. En effet lorsque l'on a focalisé les sources lumineuses par exemple en trois points, si l'on diminue la tension appliquée, la lumière restera focalisée jusqu'à extinction des trois sources.

IV.7 Utilisation des jonctions pour la création de nouvelles fonctions électriques et thermiques.

Lors du dernier run, nous avons réalisé des éléments utilisant pleinement les possibilités offertes par l'utilisation de diodes dans le polysilicium. Pour cela, nous avons dessiné deux motifs de test visant à utiliser les fonctions seuils, autant dans un cadre électrique que dans une perspective thermique.

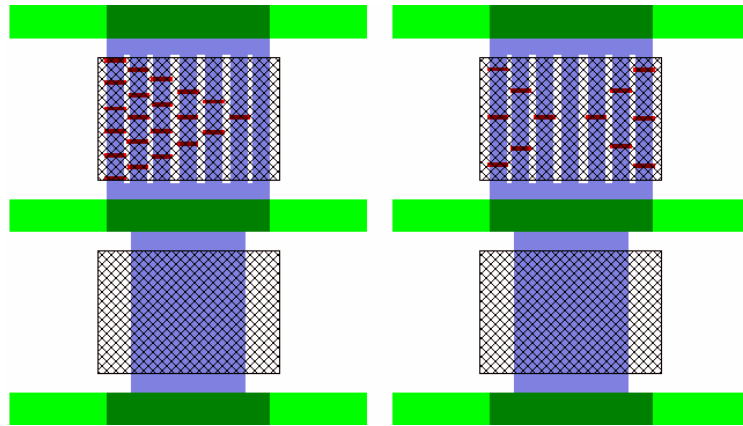


Figure IV-24 : Motifs de test, a) Structure A :Zone chauffante extensible de droite à gauche, b)Structure B : Zone chauffante extensible du centre vers l'extérieur.

Ces éléments sont dessinés afin de réaliser des éléments dont la résistance est variable en fonction de la tension appliquée. En effet, ces dispositifs sont constitués de sept bras comme on peut le voir sur la Figure IV-24 disposant chacun d'un certain nombre de barrettes. Dans le cas du motif de type A, les bras de gauche à droite ont un nombre de barrettes décroissant. Le bras situé à droite est un bras purement résistif. Tant que la tension appliquée aux bornes de ce dispositif reste inférieure à V_{Seuil} , seul ce bras permet la conduction du courant. Dans la gamme de tension allant de V_{Seuil} à $2.V_{Seuil}$, le bras comportant une seule barrette participe à son tour à la conduction du courant. Et ainsi de suite jusqu'à atteindre une conduction à travers l'ensemble des bras de l'élément. La zone de conduction qui était à la base limitée au seul bras résistif, est étendue aux sept bras et la résistance est donc diminuée. La caractéristique globale d'un tel élément est donc linéaire par morceau (Figure IV-25), et il y a un changement de pente à chaque passage d'un multiple de la valeur V_{Seuil} . En association avec cette caractéristique qui fait de nos éléments des résistances variables, il est opportun de s'intéresser au comportement thermique d'une telle structure. En effet, tant que les bras ne sont pas traversés par du courant, ils ne dissipent pas de puissance et ne s'échauffent donc pas. La Figure IV-25 : *Caractéristique $I(V)$ simulée(a) et mesurée (b) pour la structure A.*

5-b montre l'évolution des puissances dissipées au sein de chaque partie de nos structures.

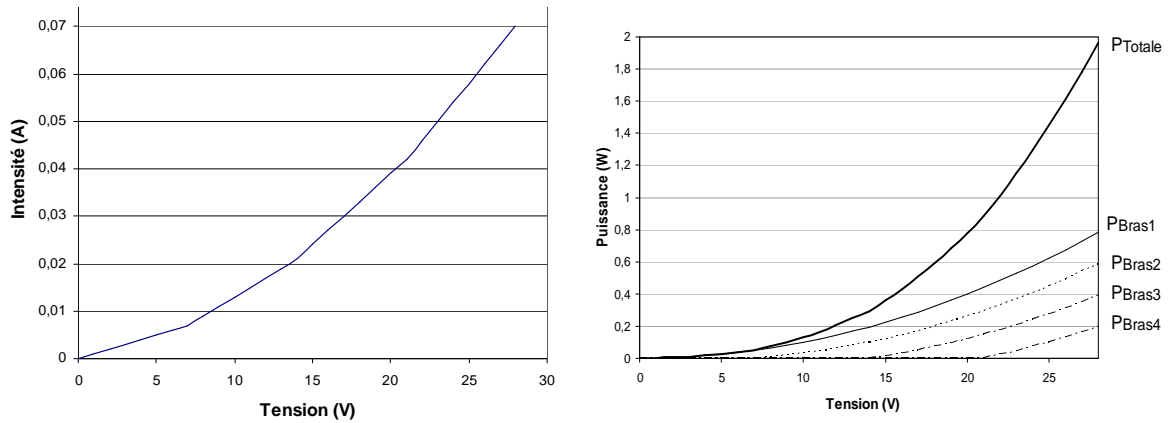


Figure IV-25 : Caractéristique $I(V)$ simulée(a) et mesurée (b) pour la structure A.

On peut facilement déduire de ces courbes que la zone de chauffe de cet élément va progressivement s'étendre de la droite vers la gauche. Cependant la puissance dissipée dans le bras résistif, est toujours supérieure à celle dans les autres bras. En optimisant la géométrie des bras, il est possible de palier cette « dissymétrie » thermique. En effet, en augmentant la largeur des bras contenant des diodes, nous pouvons réduire l'effet cité précédemment et arriver à équilibrer les puissances dissipées dans les différents bras.

Le même type de fonctionnement peut être observé sur la structure B. Dans ce second cas, la surface de chauffe va augmenter de part et d'autre du barreau central. Des photos des tests sous pointes de cette structure sont représentées Figure IV-266. L'image prise par la caméra pour une tension supérieure à $3.V_{Seuil}$ montre clairement que l'ensemble des bras est passant.

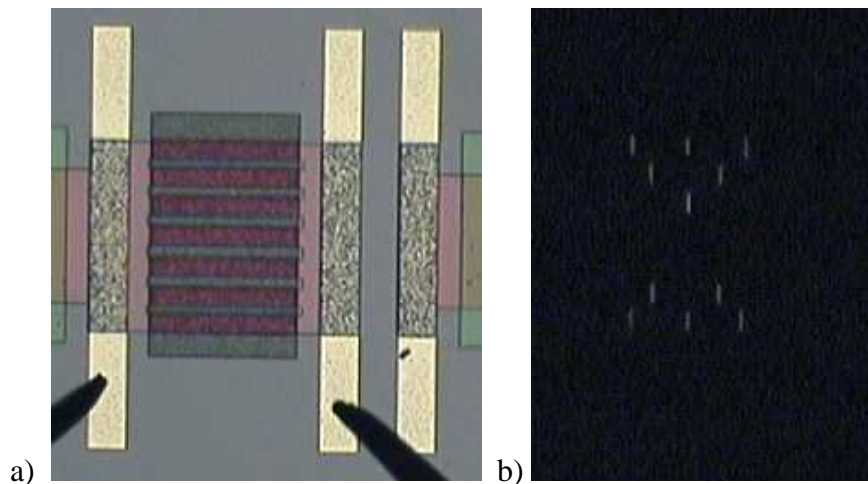


Figure IV-266 : a) Elément de test de type structure B, b) visualisation du fonctionnement par camera standard.

La caractéristique électrique associée à cet élément (Figure IV-7), permet de retrouver les trois états par lesquels la structure passe entre $0V$ et $3xV_{Seuil}$. Les trois droites présentes indiquent les trois asymptotes valables pour chaque partie de la caractéristique.

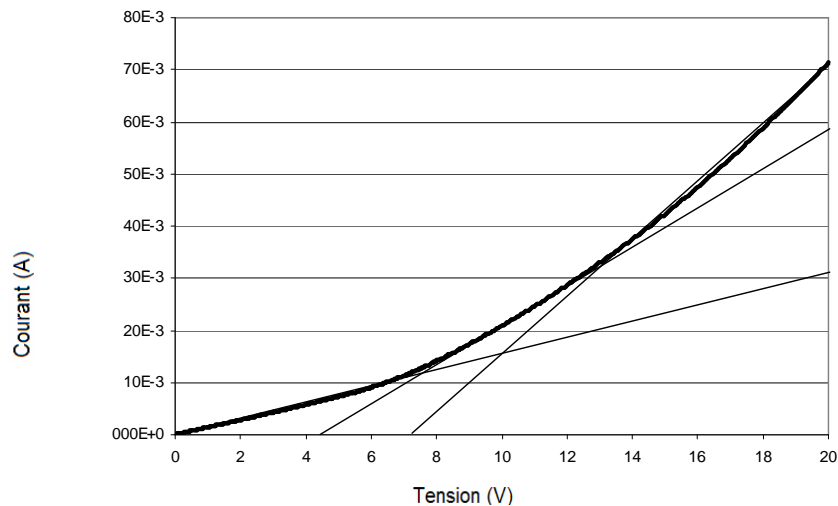


Figure IV-27 : Caractéristique électrique d'une structure de type B, entre 0V et $3 \times V_{Seuil}$.

IV.8 Bilan des travaux d'optimisation électriques et thermiques des ESS

Nous avons vu, au cours de ce chapitre, que nous pouvions régler les caractéristiques des ESS afin de répondre au mieux aux attentes des applications visées. Les différents réglages sont rendus possibles notamment par les choix technologiques à travers les niveaux de dopage. Enfin, l'association de ces premiers degrés de liberté avec les possibilités offertes par le dessin des éléments, à savoir, le positionnement des jonctions, les tailles et positions des zones à résistivité contrôlée, permet un bon contrôle des éléments à seuil symétriques.

Notre étude portant sur la relation entre la résistivité et le niveau de dopage permet dorénavant d'optimiser la phase de mise au point, en ciblant les caractéristiques à atteindre. De même, les valeurs relatives à la relation entre les tensions de seuil et les niveaux de dopages permettent de faire des études préalables ayant de bonnes capacités prédictives sur les caractéristiques réelles des éléments.

L'ensemble de ces études, ajouté au travail de simulation sur différents types de structures peut permettre un travail d'ingénierie complet, tant électrique que thermique, visant à la conception de composants adaptés aux futures applications.

En réalisant une matrice fonctionnelle de plus de 1000 éléments, nous avons démontré que cette méthode d'adressage était compatible avec des matrices de grandes dimensions. Les tests effectués montrent que cette réalisation ne constitue pas une limite à cette méthode d'adressage et que des matrices contenant plusieurs milliers de cellules sont technologiquement envisageables.

Enfin, des caractéristiques propres à nos éléments ont pu être mises en exergue comme la sensibilité des ESS à la température. Ceci rend possible l'utilisation de tels éléments en tant que capteurs. Un phénomène de photo émission a également été observé pour certaines jonctions en inverse.

Une première série de tests ont été réalisés de façon à utiliser la liberté offerte par les ESS afin de créer de nouvelles fonctions tant électriques que thermiques.

Conclusion Générale

Les domaines où l'utilisation de micro-sources de chaleur se fait conjointement à une nécessité d'incorporer un grand nombre d'éléments au sein d'une même structure sont nombreux. Le projet européen Micropyros et le projet de matrices de micro-éjecteurs thermiques pour fonctionnalisation de bio-puces, en font partie. Notre approche a donc été de mettre en place une solution dans le cadre du projet de micro-actionneurs pyrotechniques puis de l'exporter dans le cadre du projet de micro-fluidique.

La première méthode envisagée consistait à placer en série avec l'élément chauffant une diode PN en silicium. De nombreuses réalisations technologiques ont été entreprises afin de mener à bien ce projet. Cependant, devant les difficultés rencontrées et la non généralité de cette solution, liée à la nécessité de présence de silicium, nous avons orienté nos travaux vers une deuxième solution plus innovante.

Cette méthode basée sur l'utilisation d'éléments à seuils symétriques nous a permis de définir dans un premier temps un procédé technologique simple et générique pour la réalisation de matrices de micro-sources de chaleur. La création de cette filière technologique a nécessité de nombreuses étapes de caractérisations du matériau polysilicium. En effet, l'utilisation alliant le dopage par implantation et par diffusion des couches de polysilicium, diffère fortement de l'usage courant qui en est fait. Les paramètres technologiques permettant de contrôler les caractéristiques de nos structures ont donc dû être définies afin de pouvoir se fixer certaines règles de réalisation et d'estimer les résultats attendus.

Pour cela, nous avons procédé à une étude permettant la mise en place d'un process mixte diffusé/implanté du polysilicium. Les étapes de recuit d'activation, de diffusion ainsi que la méthode de protection des zones actives ont été fixées suite à plusieurs séries de tests. Les propriétés spécifiques du matériau implanté ont alors pu être mieux cernées. Nous avons ainsi déterminé la relation existant entre la dose implantée et la résistivité du film obtenu. De même, les jonctions P/N polysilicium ont pu être observées et les informations relatives aux valeurs des tensions de seuils ont pu être extraites.

La bonne maîtrise de l'ensemble des étapes technologiques nous a ensuite permis de mettre en place un process complet pour la réalisation de matrices de micro-sources de chaleur. Ce process, appliqué dans le cadre du projet Micropyros, a conduit à la réalisation de matrices fonctionnelles. Les caractérisations électriques et thermiques valident les

structures réalisées pour l'application visée. Le même procédé a ensuite été réalisé pour le projet de micro-éjecteurs, et comme dans le cas précédant, les matrices se sont avérées permettre l'adressage d'une cellule individuelle.

Grâce au contrôle des paramètres principaux de nos éléments, à savoir la relation entre les niveaux de dopage, la résistivité et la tension de seuil, nous avons pu mettre en place une méthode de conception visant à optimiser les caractéristiques électriques des éléments à seuils symétriques.

Parallèlement à ces travaux concernant l'aspect électrique, un dernier jeu de masques permettant d'étendre la portée de la méthode de conception à l'aspect thermique a été réalisé. Même si cette étude est, pour l'instant, limitée à des simulations, elle permet d'avancer vers une méthode globale de conception et d'optimisation de micro-sources de chaleur.

La finalisation des structures en cours de réalisation, associée à une caractérisation thermique plus précise, permettrait à notre avis, de valider les tendances obtenues lors des simulations. Ceci offrirait une solution complète d'ingénierie électrique et thermique pouvant conduire à la réalisation de matrices de micro-sources de chaleur, ou bien plus simplement à l'optimisation de sources de chaleur existantes.

Annexe 1 :Augmentation de la tenue en tension :

Afin d'augmenter la tenue en tension des diodes, nous avons revu le design de ces dernières. Lors des premiers process, l'anode P+ était de forme rectangulaire. Cette géométrie entraîne la présence de diodes cylindriques aux quatre coins du rectangle. Les tenues en tension de ces jonctions sont inférieures à celle de la jonction plane idéale, et dans notre cas, la tenue en tension est réduite de plus de moitié :

Calcul de la tenue en tension de la jonction plane

-Intégrale d'ionisation à un seul coefficient :

$$V_{BP}=5.27*10^{13}*C_{eff}^{-3/4}$$

$$V_{BP}=52.7V$$

-Intégrale d'ionisation à deux coefficients :

$$V_{BP}=5.65*10^{13}*C_{eff}^{-3/4}$$

$$V_{BP}=56.5V$$

-Calcul empirique:

$$V_{BP}=2.93*10^{12}*C_{eff}^{-2/3}$$

$$V_{BP}=63.1V$$

Les différents calculs montrent que pour les dopages que nous souhaitons réaliser, les tenues en tension de diodes planes devraient se situer autour des 55V.

Calcul de la charge d'espace maximum

-Intégrale d'ionisation à un seul coefficient :

$$W_{BP}=2.63*10^{10}*C_{eff}^{-7/8}$$

$$W_{BP}=2.63\mu$$

-Intégrale d'ionisation à deux coefficients :

$$W_{BP}=2.7*10^{10}*C_{eff}^{-7/8}$$

$$W_{BP}=2.7\mu$$

-Calcul empirique:

$$W_{BP}=6.19*10^9*C_{eff}^{-5/6}$$

$$W_{BP}=2.87\mu$$

Calcul de la tenue en tension de la jonction cylindrique

$$\frac{x_j}{W_P}=\frac{1\mu}{2.7\mu}=0.37$$

Etant donné que ce rapport est inférieur à 0.4, toutes les méthodes de calculs sont applicables.

-Calcul empirique:

$$V_{BC}=\left[0.871+0.125*\ln\left(\frac{x_j}{W_P}\right)\right]^2*V_{BP}$$

$$V_{BC}=31.5 \text{ V}$$

Le calcul montre que la tenue en tension des diodes cylindriques, qui sont obligatoirement présentes sur le pourtour de l'anode, réduisent la tenue en tension de notre dispositif à seulement 30V.

Calcul de la tenue en tension de la jonction sphérique

$$X = \frac{x_j}{W_P}$$

$$V_{BS} = x^2 + 2 \left(\frac{13}{8} \right)^{1/7} * x^{6/7} - \left(x^3 + 3 \left(\frac{13}{8} \right)^{1/7} * x^{13/7} \right)^{2/3} * V_{BP}$$

$$= 19.68 \text{ V}$$

Ce calcul montre que les jonctions cylindriques présentes dans notre premier design de diode ne permettaient pas d'obtenir les tenues en tension désirées. Pour palier ce problème, nous avons changé le design afin de supprimer ce type de diode. Le nouveau design comporte désormais des extrémités arrondies. Le rayon de courbure étant grand devant celui de la diffusion, l'on obtient alors une tenue en tension proche de celle de la diode cylindrique.

Résumé

La technologie a aujourd'hui atteint une maturité suffisante pour garantir la réalisation de MEMS avec un rendement de fabrication proche de 100%. Dès lors, on peut sereinement envisager l'intégration à haute densité de micro actionneurs ou de détecteurs pour de nouvelles fonctionnalités.

Le travail présenté porte sur la mise en place de systèmes d'adressage matriciel pour des actionneurs thermiques, ainsi que sur la réalisation de source de chaleur à profil de température ajustable, voire configurable.

Dans un premier temps, nous effectuerons un tour d'horizon des applications utilisant des micro-sources de chaleur. Ceci afin de spécifier les caractéristiques propres à chaque type d'application. Une solution générique au problème d'adressage de sources de chaleur sera alors proposée, basée sur des éléments à seuils symétriques en polysilicium. La mise au point de cette solution, impliquant un contrôle du dopage du polysilicium par implantation, sera détaillée. Ensuite nous présenterons les deux projets ayant permis de valider l'utilisation de ce système d'adressage : le projet MicroPyros visant à la réalisation d'une matrice de micro actionneurs pyrotechniques, ainsi qu'un projet visant la réalisation d'une matrice de micro éjecteurs. Pour chacun des deux cas, des études ont été menées, conduisant à des réalisations au sein de la centrale technologique du LAAS CNRS. Les différentes matrices réalisées ont ensuite été testées et validées.

Enfin, nous présenterons les résultats du dernier run technologique, visant à permettre la comparaison des réalisations suspendues, sur membranes et sur silicium, ainsi qu'à explorer de nouvelles fonctionnalités basées sur les éléments à seuils symétriques en polysilicium.

Mots clés

Adressage, matrice, polysilicium, diode, micro-source thermique, micro-éjection, implantation

Summary

Nowadays, technology reached a sufficient maturity to guarantee the realization of MEMS with an output of fabrication close to 100%. As a result, high density integration of micro actuators or detectors can be considered to develop new functionalities.

This work concerns the set up of matrix addressing systems for thermal actuators like realization of heating sources with adjustable temperature profile.

First, we will carry out a review of the applications using micro heater sources. This in order to specify the characteristics of each type of application.

A generic solution with the problem of addressing heating source will be proposed, based on polysilicon elements with symmetrical thresholds. The development of this solution, implying a control of the polysilicium doping levels by implantation, will be detailed. Then we will present the two projects which allow to validate the use of this addressing system: MicroPyros project aiming to the realization of a matrix of micro pyrotechnical actuators, as well as the project aiming at the realization of a matrix of micro ejectors. For each of the two cases, studies were undertaken, leading to achievements within the technological station of LAAS CNRS. As a result, the various produced matrices were tested and validated.

Finally, we will present the results of the last technological process, allowing the comparison of the achievements suspended, on membranes and on silicon and even more to explore new functionalities based on the polysilicium elements with symmetrical thresholds.

Key-words

Addressing, polysilicon, diode, thermal micro-source, micro heater, micro ejection, implantation