

Gravure en plasma dense fluorocarboné de matériaux organosiliciés à faible constante diélectrique (SiOCH, SiOCH poreux). Etude d'un procédé de polarisation pulsée

Vanessa RABALLAND

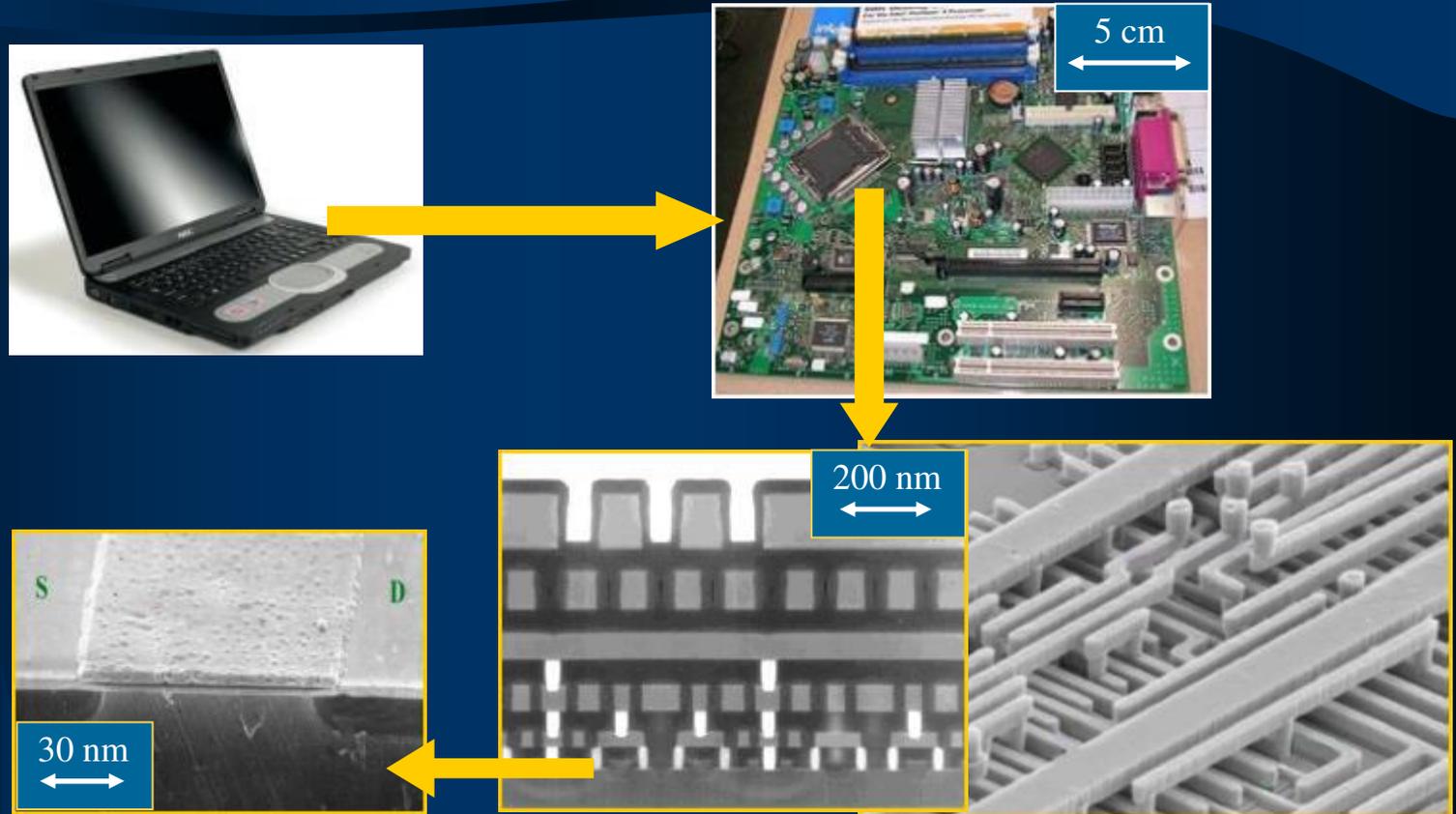
5 juillet 2006

Institut des Matériaux Jean Rouxel de Nantes, Plasmas et Couches Minces

Encadrée par Christophe CARDINAUD et Gilles CARTRY

Application en microélectronique

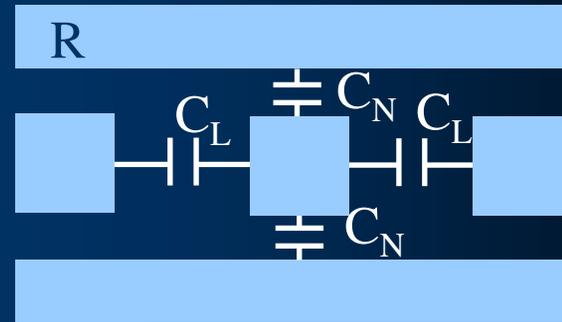
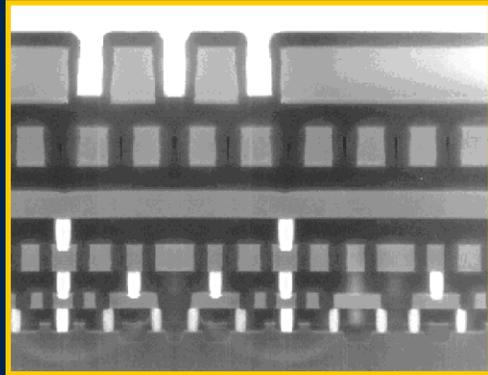
Introduction



- Augmenter l'intégration : diminuer la taille des transistors et des interconnexions
- Augmenter la fréquence des microprocesseurs : diminuer le temps de transfert des données

Réduction d'échelle

Introduction



Délai d'interconnexions $\tau = RC$

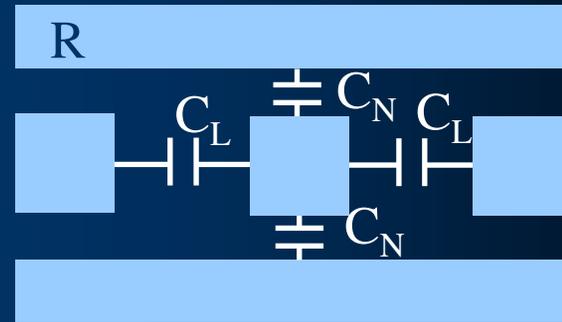
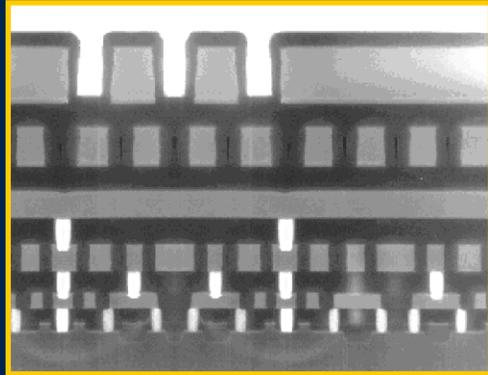
- Diminuer la résistivité du métal \rightsquigarrow Al \rightarrow Cu
- Diminuer la capacité entre les lignes métalliques en

diminuant la constante diélectrique ϵ_r du matériau isolant $C = \frac{\epsilon_o \epsilon_r S}{d}$

\rightsquigarrow SiO₂ ($\epsilon_r \sim 4,1$) \rightarrow SiOCH ($\epsilon_r \sim 2,9$) \rightarrow SiOCH poreux ($\epsilon_r \sim 2,2$)

Réduction d'échelle

Introduction



Délai d'interconnexions $\tau = RC$

- Diminuer la résistivité du métal \rightsquigarrow Al \rightarrow Cu
- Diminuer la capacité entre les lignes métalliques en

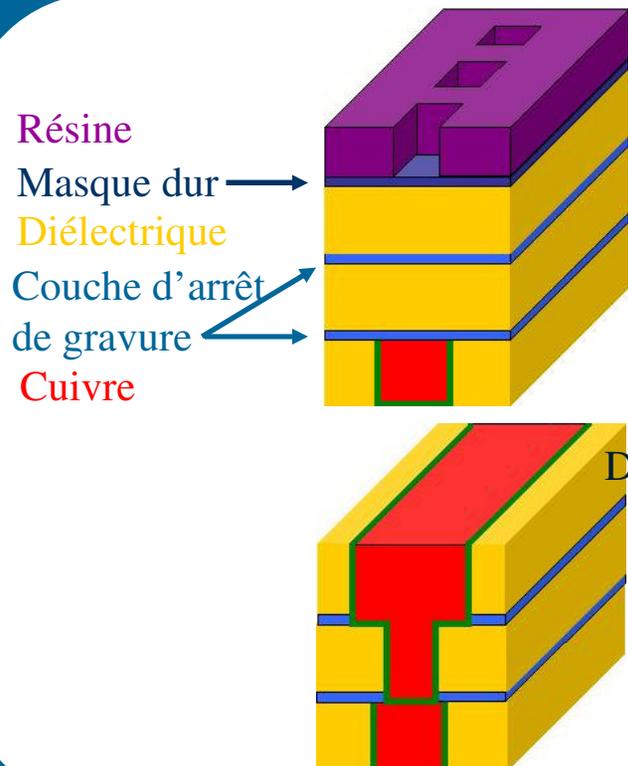
diminuant la constante diélectrique ϵ_r du matériau isolant $C = \frac{\epsilon_o \epsilon_r S}{d}$

\rightsquigarrow SiO₂ ($\epsilon_r \sim 4,1$) \rightarrow SiOCH ($\epsilon_r \sim 2,9$) \rightarrow **SiOCH poreux ($\epsilon_r \sim 2,2$)**

Intégration des interconnexions : Procédé damascène

Introduction

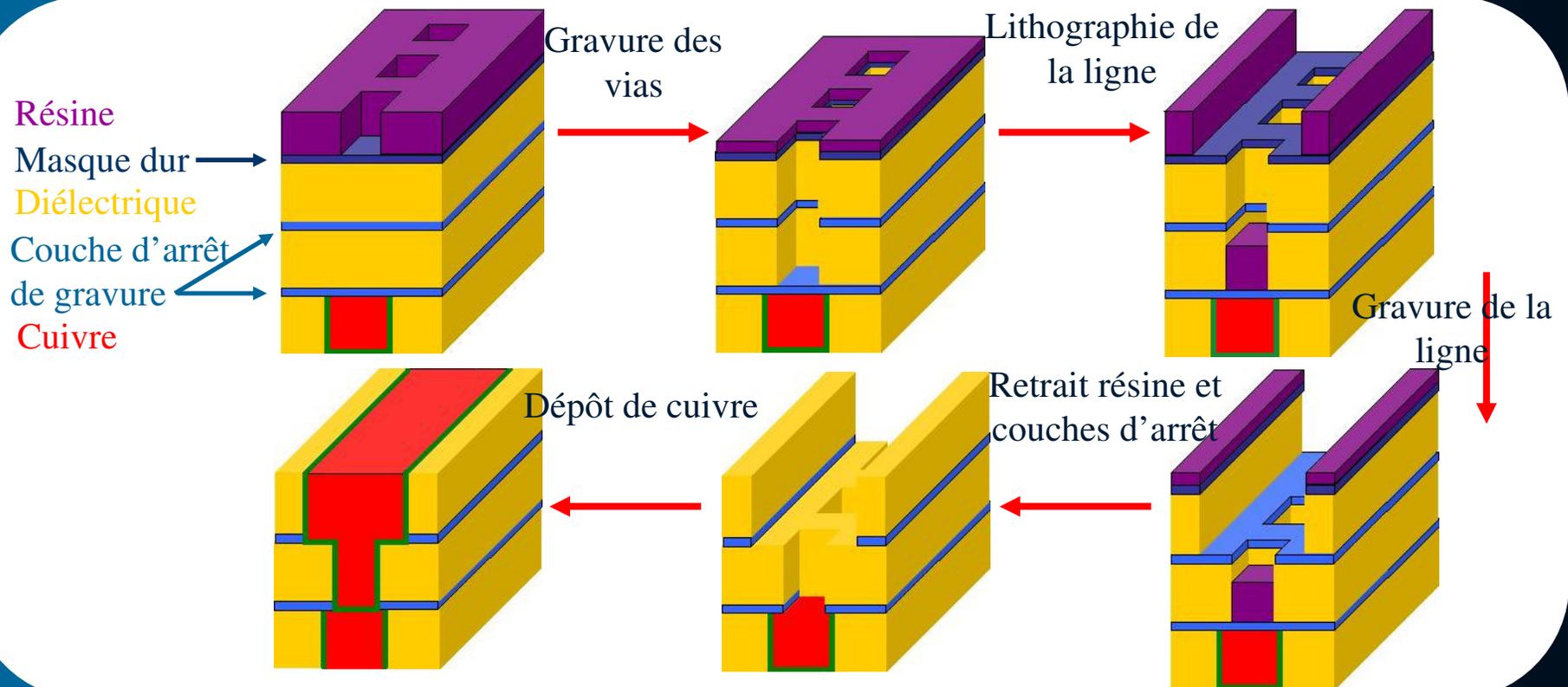
- Dépôt et Gravure du diélectrique
- Remplissage de cuivre



Intégration des interconnexions : Procédé damascène

Introduction

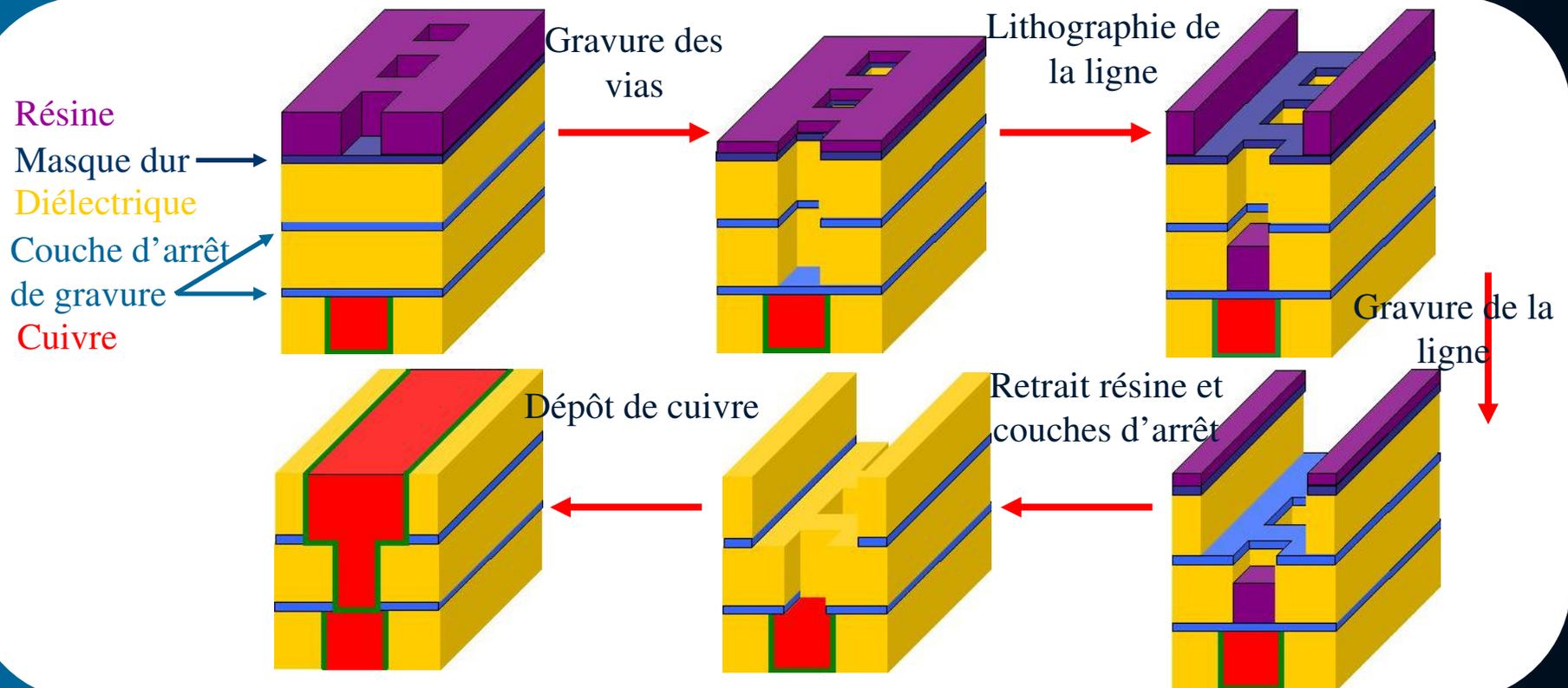
- Dépôt et Gravure du diélectrique
- Remplissage de cuivre



Intégration des interconnexions : Procédé damascène

Introduction

- Dépôt et Gravure du diélectrique
- Remplissage de cuivre



⇒ Graver de façon anisotrope et sélective vis à vis du masque ou de la couche d'arrêt de gravure

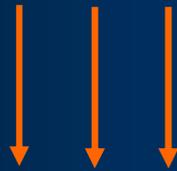
Gravure par plasma du matériau diélectrique

Introduction



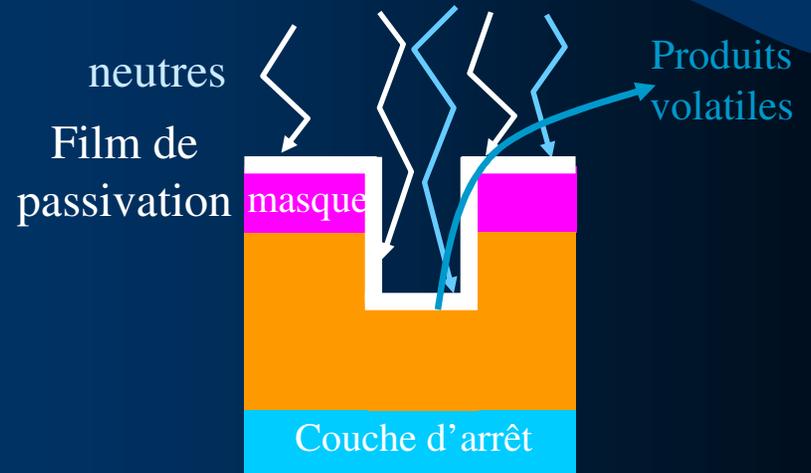
...

Ions +



Substrat polarisé
négativement

Produits
volatiles



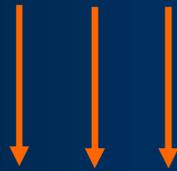
Gravure par plasma du matériau diélectrique

Introduction



...

Ions +

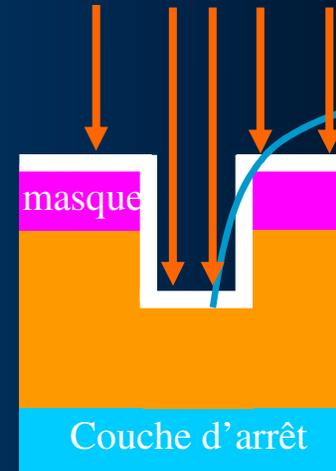


Substrat polarisé
négativement

Produits
volatiles



ions



Produits
volatiles

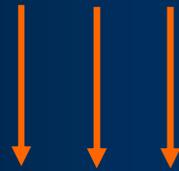
Gravure par plasma du matériau diélectrique

Introduction



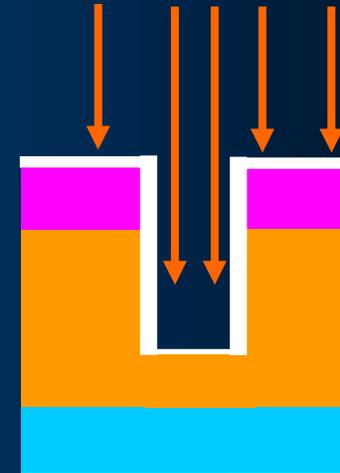
...

Ions +



Substrat polarisé
négativement

Produits
volatiles



Caractéristiques demandées	Paramètres ajustables
<ul style="list-style-type: none">- Vitesse de gravure (200 nm/min)- Sélectivité/ masque dur et couche d'arrêt (>10)- Anisotropie	<ul style="list-style-type: none">- Mélange de gaz- Flux d'ions- Energie des ions

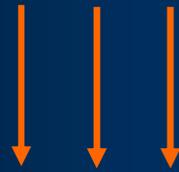
Gravure par plasma du matériau diélectrique

Introduction



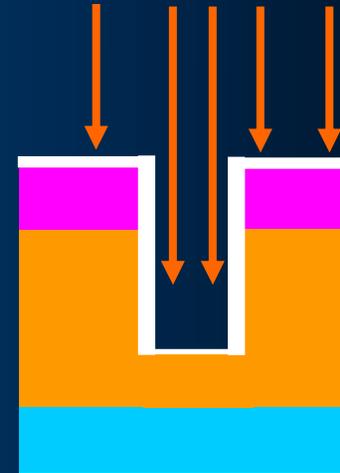
...

Ions +



Produits volatiles

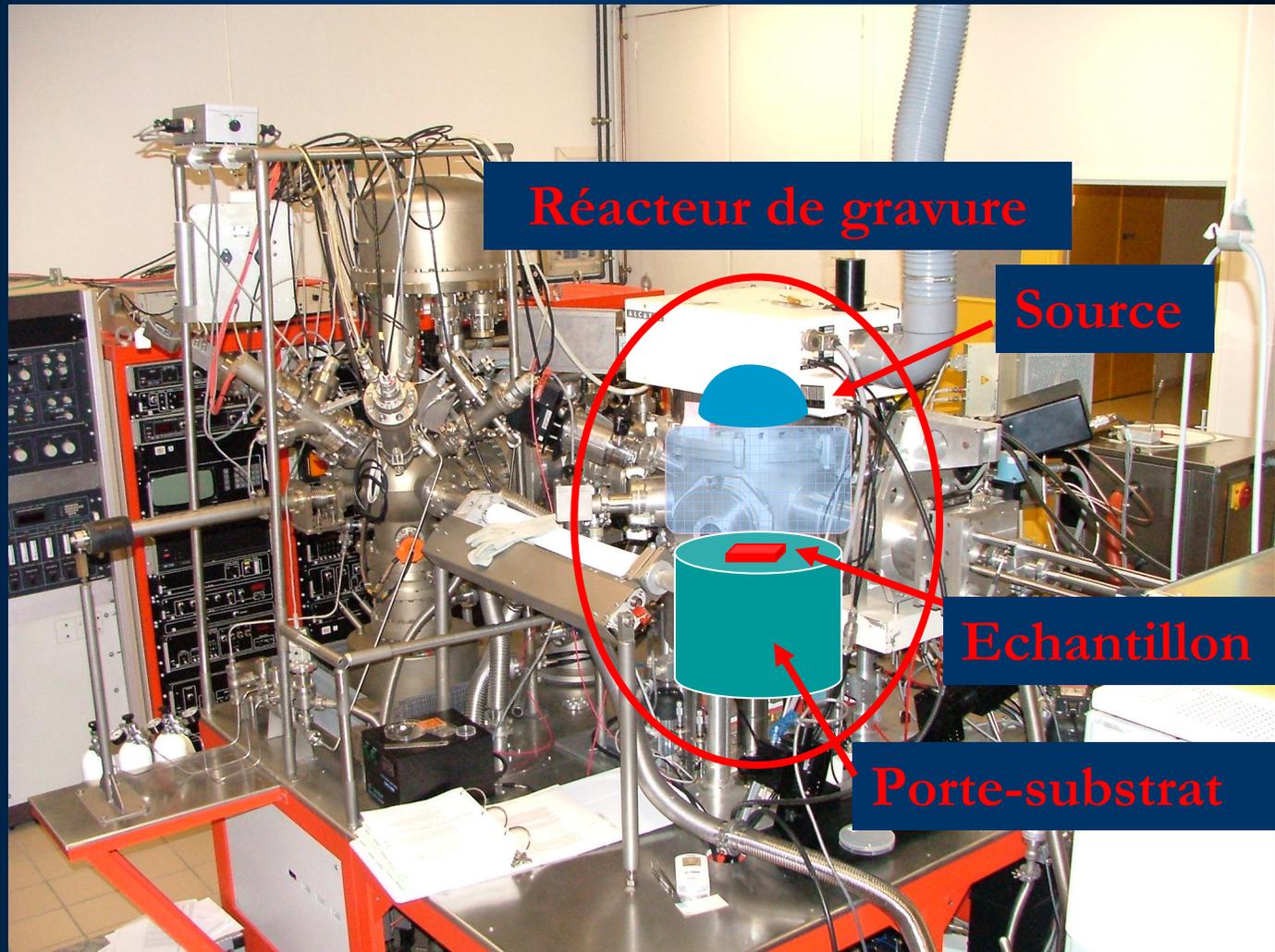
Substrat polarisé négativement



Caractéristiques demandées	Paramètres ajustables
<ul style="list-style-type: none">- Vitesse de gravure (200 nm/min)- Sélectivité/ masque dur et couche d'arrêt (>10)- Anisotropie	<ul style="list-style-type: none">- Mélange de gaz- Flux d'ions- Energie des ions- Pulse de la tension de polarisation

Réacteur de gravure

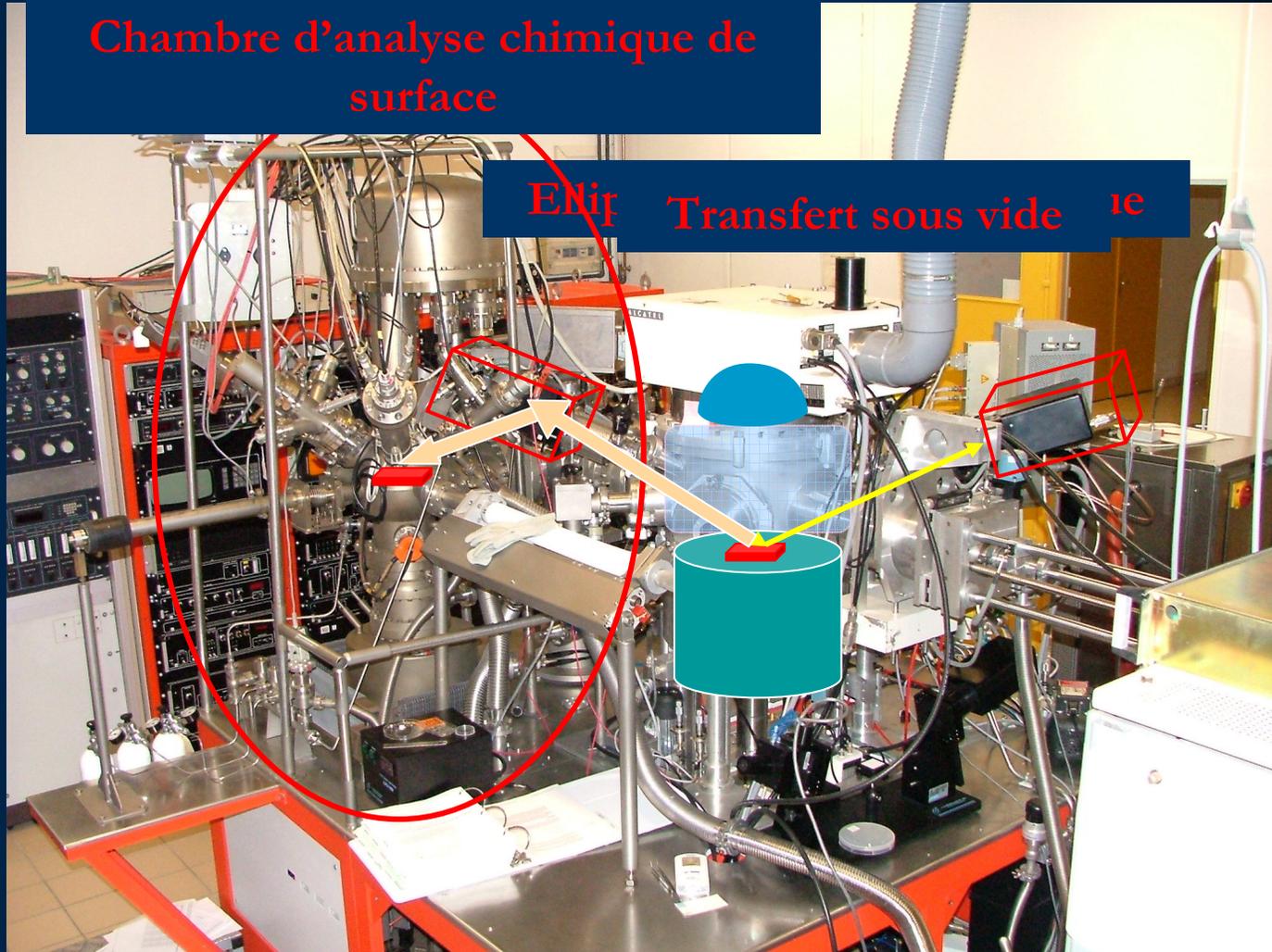
Introduction



Réacteur de gravure

Introduction

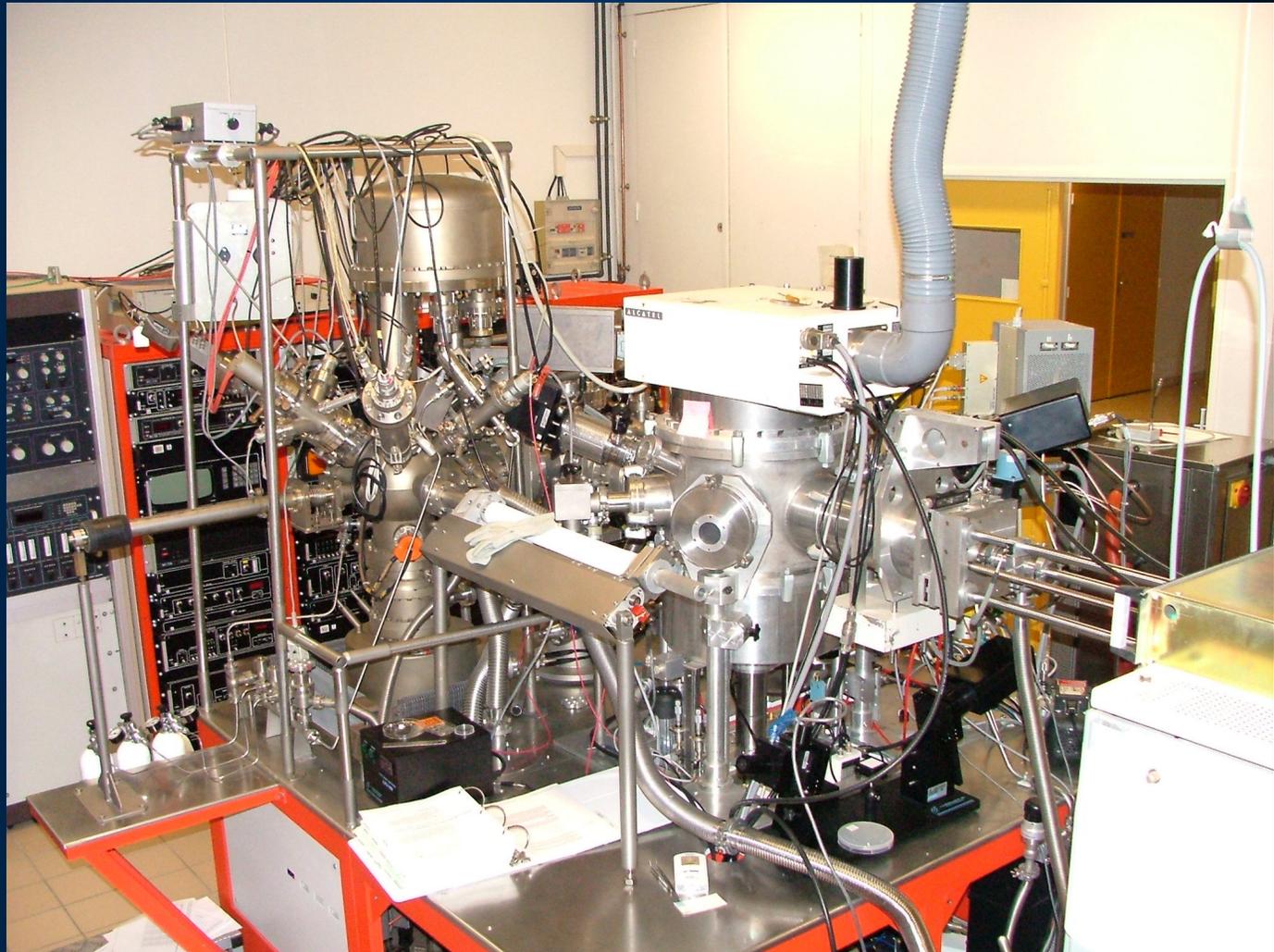
Chambre d'analyse chimique de surface



ENi₂ Transfert sous vide 1e

Réacteur de gravure

Introduction



But de l'étude et plan de l'exposé

Introduction

- Etudier un nouveau procédé de gravure sélective de SiOCH poreux vis à vis de SiO₂ et SiCH
- Etude d'un nouveau procédé : polarisation pulsée
- Mécanismes de gravure en polarisation pulsée
- Compréhension du procédé de gravure pulsée
- Conclusion et perspectives

But de l'étude et plan de l'exposé

Introduction

**Polarisation
pulsée**

- Pourquoi pulser ?
- Paramètres de pulse
- Gravure en polarisation pulsée
- Transfert de motifs

Mécanismes de gravure

- SiCH
- SiO₂
- SiOCH poreux

Procédé pulsé

- Modélisation
- Amélioration du modèle

Conclusion

- Etudier un nouveau procédé de gravure sélective de SiOCH poreux vis à vis de SiO₂ et SiCH
- Etude d'un nouveau procédé : polarisation pulsée
- Mécanismes de gravure en polarisation pulsée
- Compréhension du procédé de gravure pulsée
- Conclusion et perspectives

Gravure en plasma de CHF₃ : Polarisation continue

Introduction

Polarisation pulsée

- Pourquoi pulser ?
- Paramètres de pulse
- Gravure en polarisation pulsée
- Transfert de motifs

Mécanismes de gravure

- SiCH
- SiO₂
- SiOCH poreux

Procédé pulsé

- Modélisation
- Amélioration du modèle

Conclusion

1500 W
5 mTorr

CHF₃ : 40 sccm

Ellipsomètre Woollam

88 longueurs d'onde

polariseur

analyseur

Générateur RF 13.56 MHz

Champ magnétique

Gaz : CHF₃, C₂F₆,
H₂, O₂, Ar, N₂

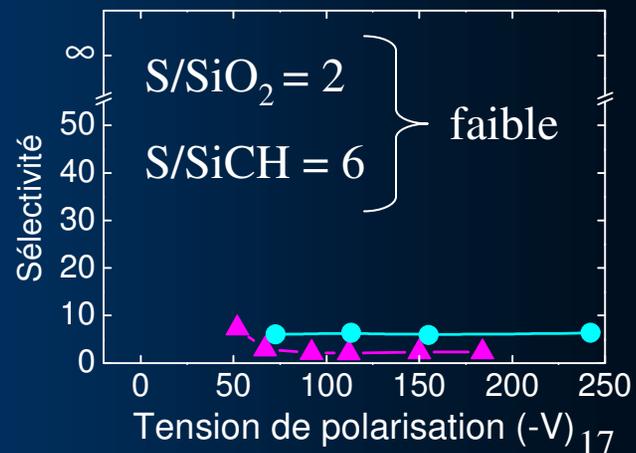
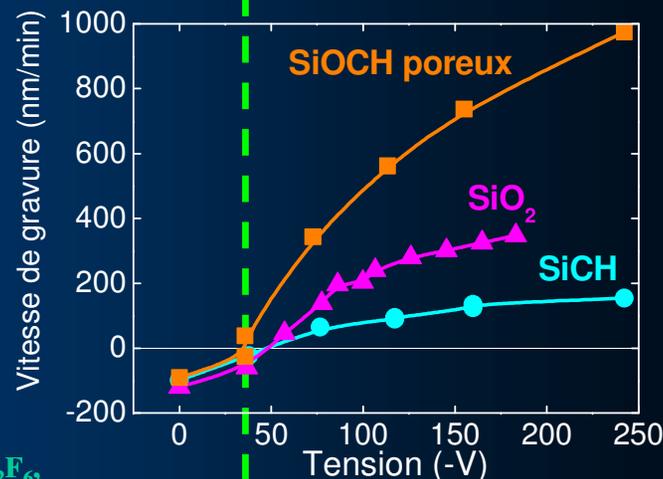
Polarisation porte substrat

Générateur RF 13.56 MHz



$$S = \frac{V_g(\text{SiOCH poreux})}{V_g(\text{SiO}_2 \text{ ou SiCH})}$$

dépôt ← gravure →



Pourquoi pulser la tension de polarisation ?

Introduction

Polarisation pulsée

- Pourquoi pulser ?
- Paramètres de pulse
- Gravure en polarisation pulsée
- Transfert de motifs

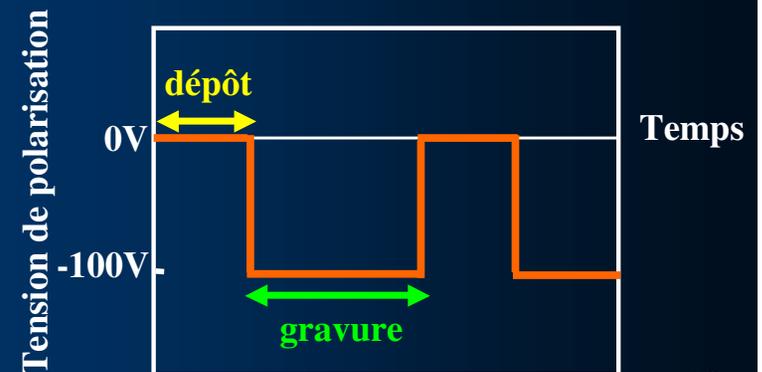
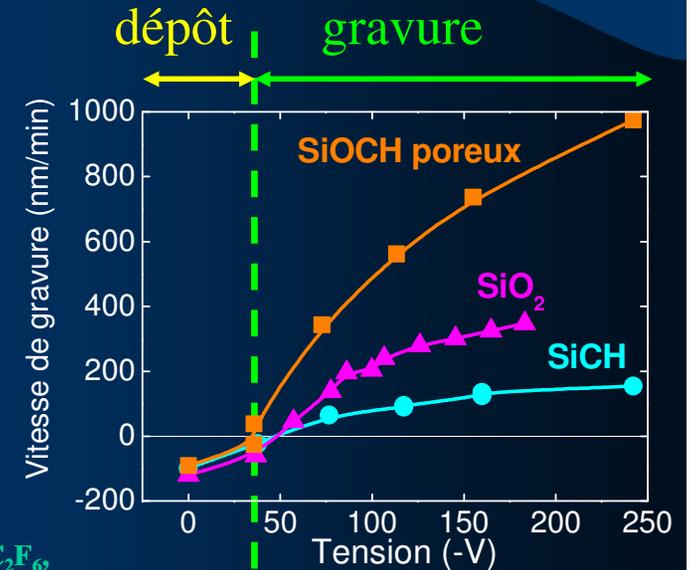
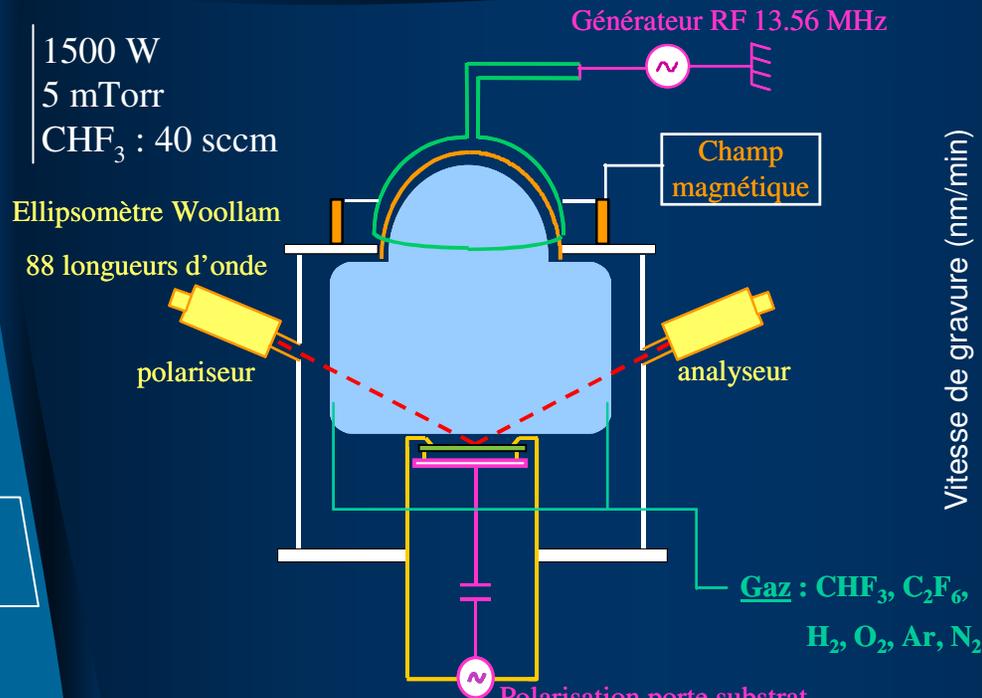
Mécanismes de gravure

- SiCH
- SiO₂
- SiOCH poreux

Procédé pulsé

- Modélisation
- Amélioration du modèle

Conclusion



Influence des paramètres de pulse sur les vitesses de gravure

Introduction

Polarisation pulsée

- Pourquoi pulser ?
- Paramètres de pulse
- Gravure en polarisation pulsée
- Transfert de motifs

Mécanismes de gravure

- SiCH
- SiO₂
- SiOCH poreux

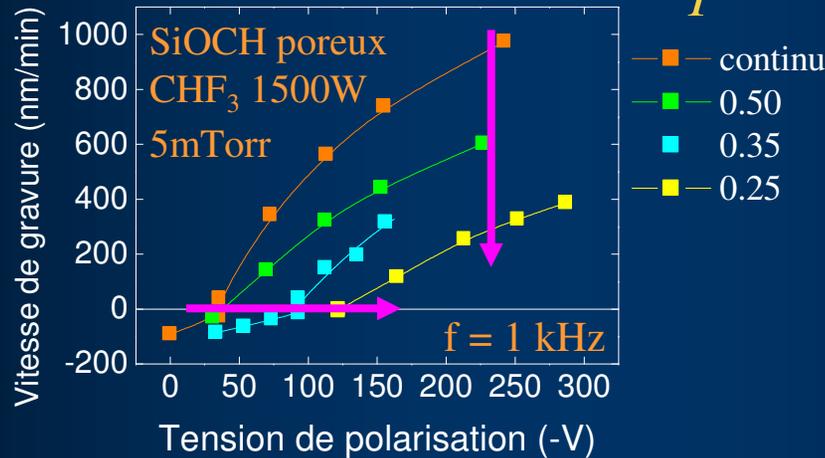
Procédé pulsé

- Modélisation
- Amélioration du modèle

Conclusion

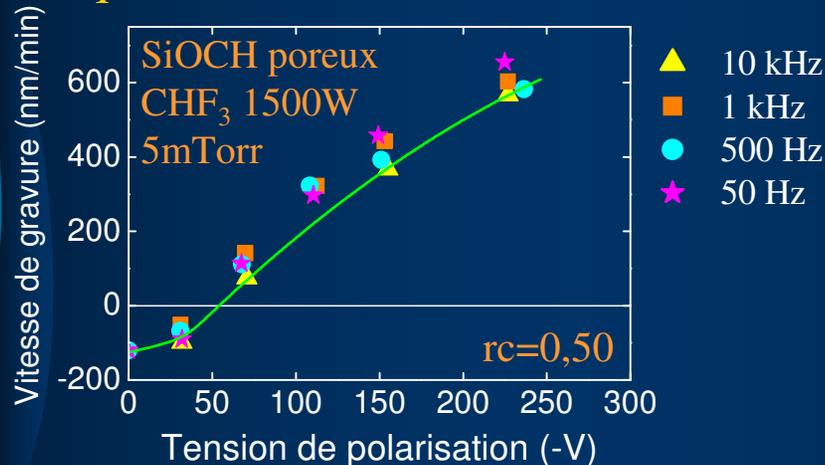
• Rapport cyclique

$$rc = \frac{T_{ON}}{T}$$

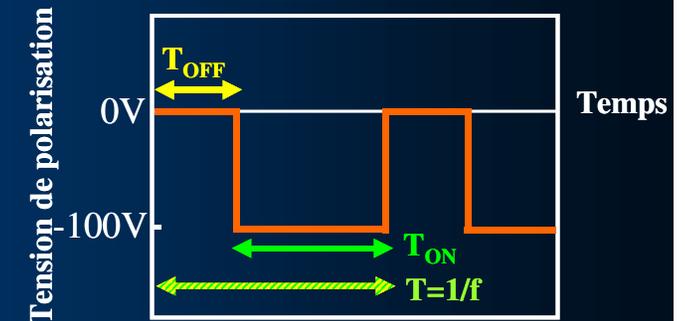


- ➔ Diminution de la vitesse de gravure
- ➔ Décalage du seuil dépôt-gravure

• Fréquence



- ➔ Peu d'influence



Vitesse de gravure et sélectivité en CHF_3 avec polarisation pulsée

Introduction

Polarisation pulsée

- Pourquoi pulser ?
- Paramètres de pulse
- Gravure en polarisation pulsée
- Transfert de motifs

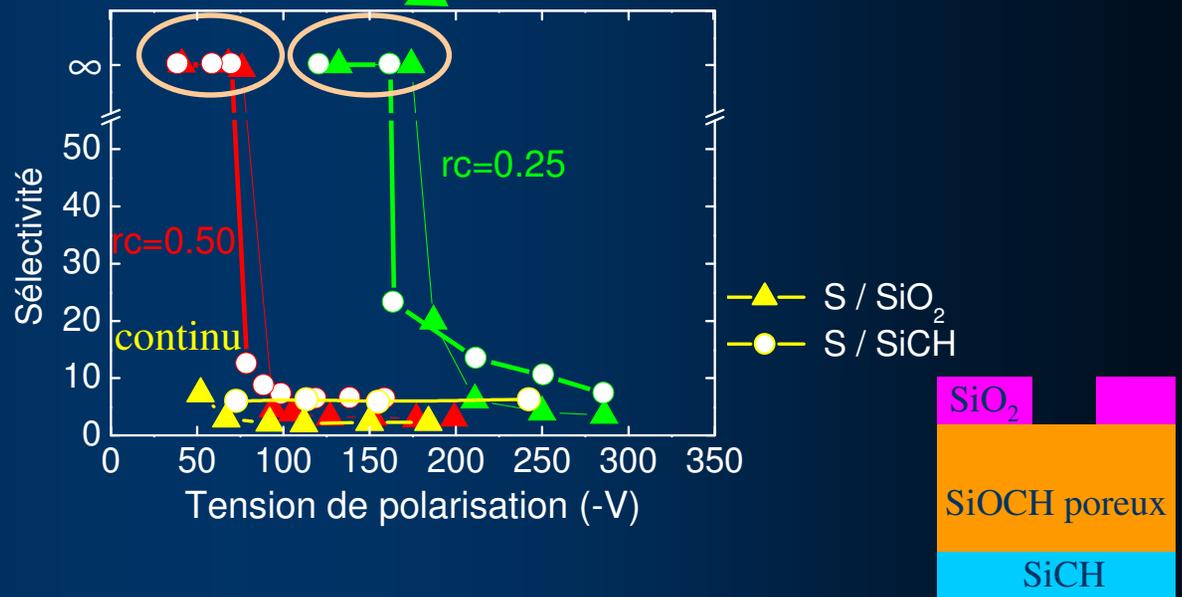
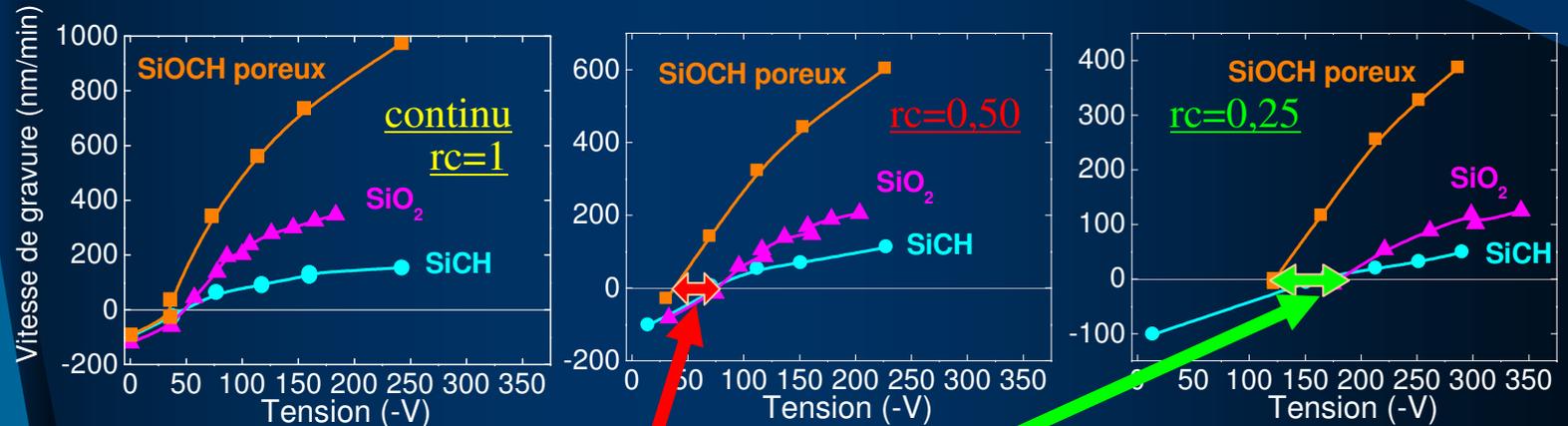
Mécanismes de gravure

- SiCH
- SiO_2
- SiOCH poreux

Procédé pulsé

- Modélisation
- Amélioration du modèle

Conclusion



Influence du plasma Addition d'Argon à CHF₃

Introduction

**Polarisation
pulsée**

- Pourquoi pulser ?
- Paramètres de pulse
- Gravure en polarisation pulsée
- Transfert de motifs

Mécanismes de gravure

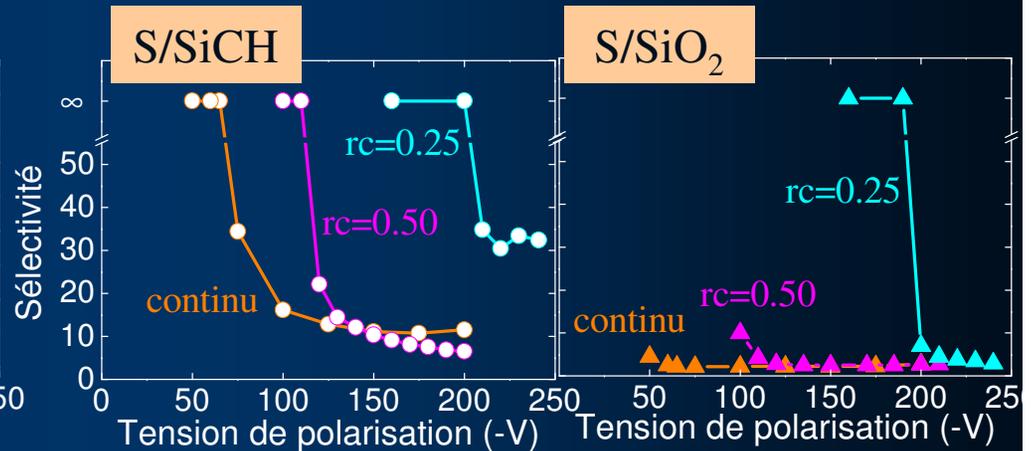
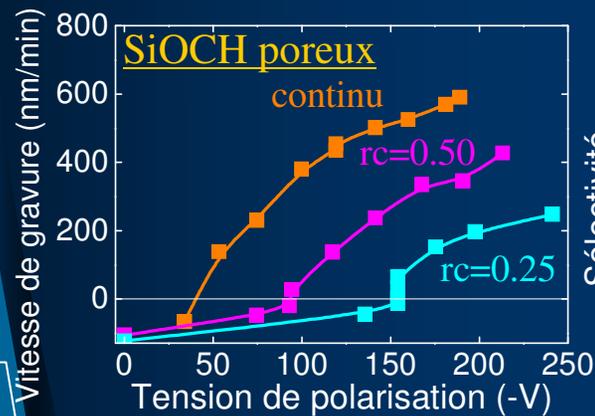
- SiCH
- SiO₂
- SiOCH poreux

Procédé pulsé

- Modélisation
- Amélioration du modèle

Conclusion

CHF₃/Ar (50%-50%)



Sélectivité SiOCH poreux / SiCH :

rc=0.50 : peu d'amélioration / mode continu

rc=0.25 : sélectivités plus élevées

Sélectivité SiOCH poreux / SiO₂ :

rc=0.50 : pas d'amélioration / mode continu

rc=0.25 : sélectivités améliorées

Influence du plasma

Addition d'hydrogène à CHF_3

Introduction

Polarisation pulsée

- Pourquoi pulser ?
- Paramètres de pulse
- Gravure en polarisation pulsée
- Transfert de motifs

Mécanismes de gravure

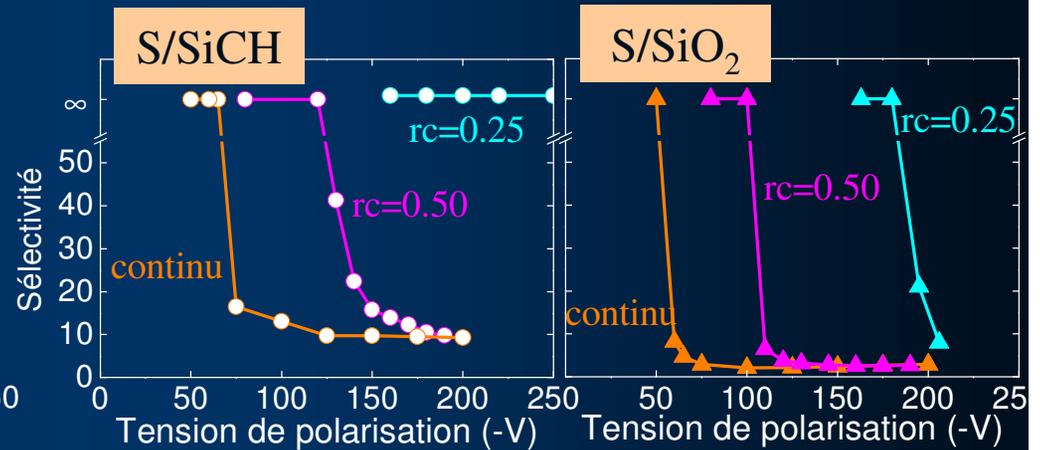
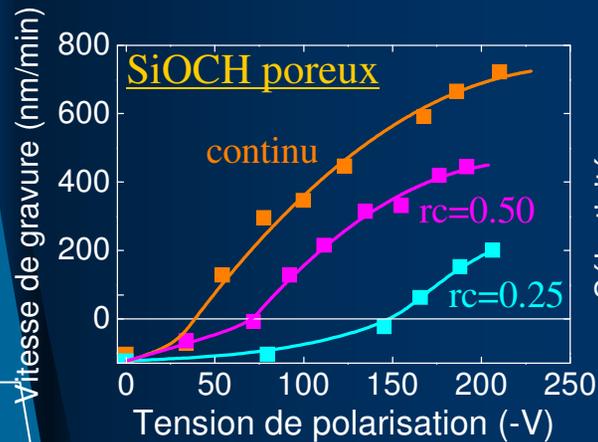
- SiCH
- SiO_2
- SiOCH poreux

Procédé pulsé

- Modélisation
- Amélioration du modèle

Conclusion

CHF_3/H_2 (75%-25%)



Sélectivité SiOCH poreux / SiCH:

Peu d'amélioration entre les modes continu et pulsé à $rc=0,50$

Augmentation de la sélectivité à $rc=0.25$

Sélectivité SiOCH poreux / SiO_2 :

Augmentation de la sélectivité en diminuant le rapport cyclique

Transfert de motifs

Introduction

Polarisation pulsée

- Pourquoi pulser ?
- Paramètres de pulse
- Gravure en polarisation pulsée
- **Transfert de motifs**

Mécanismes de gravure

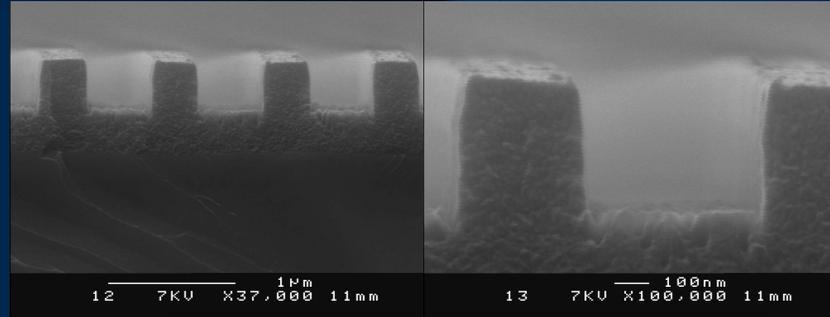
- SiCH
- SiO₂
- SiOCH poreux

Procédé pulsé

- Modélisation
- Amélioration du modèle

Conclusion

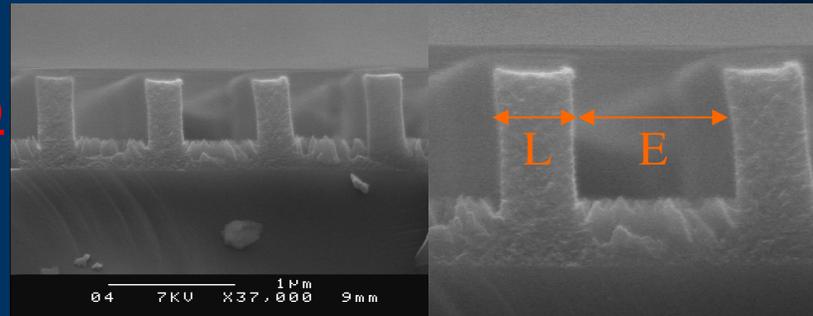
CHF₃



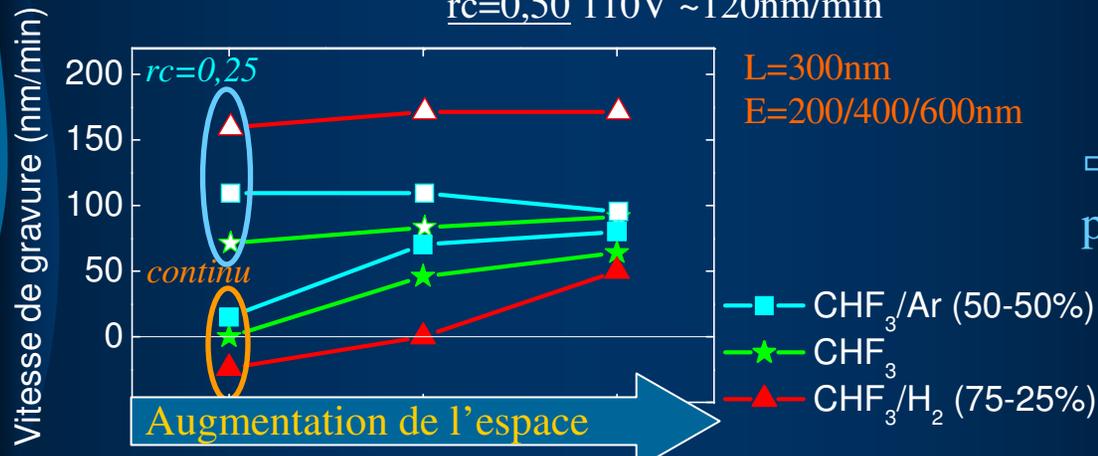
rc=0,25 170V ~ 90nm/min

⇒ Anisotropie, transfert de motifs correct lorsque la tension de polarisation est pulsée

CHF₃/H₂ (75%-25%)



rc=0,50 110V ~ 120nm/min



⇒ diminution du phénomène d'ARDE

Bilan sur le procédé « polarisation pulsée »

Introduction

**Polarisation
pulsée**

- Pourquoi pulser ?
- Paramètres de pulse
- Gravure en polarisation pulsée
- Transfert de motifs

Mécanismes de gravure

- SiCH
- SiO₂
- SiOCH poreux

Procédé pulsé

- Modélisation
- Amélioration du modèle

Conclusion

En diminuant le rapport cyclique :

- ↳ Décalage du seuil dépôt-gravure vers les plus fortes énergies des ions + différenciation du seuil entre SiOCH poreux et SiO₂ ou SiCH
- ↳ Amélioration de la sélectivité de gravure SiOCH poreux/SiCH et SiOCH poreux/SiO₂

En polarisation pulsée :

- ↳ Transfert de motifs réalisable
- ↳ Diminution du phénomène d'ARDE

But de l'étude et plan de l'exposé

Introduction

Polarisation pulsée

- Pourquoi pulser ?
- Paramètres de pulse
- Gravure en polarisation pulsée
- Transfert de motifs

Mécanismes de gravure

- SiCH
- SiO₂
- SiOCH poreux

Procédé pulsé

- Modélisation
- Amélioration du modèle

Conclusion

- Etudier un nouveau procédé de gravure sélective de SiOCH poreux vis à vis de SiO₂ et SiCH
- Etude d'un nouveau procédé : polarisation pulsée
- Mécanismes de gravure en polarisation pulsée
- Compréhension du procédé de gravure pulsée
- Conclusion et perspectives

But de l'étude et plan de l'exposé

Introduction

Polarisation pulsée

- Pourquoi pulser ?
- Paramètres de pulse
- Gravure en polarisation pulsée
- Transfert de motifs

Mécanismes de gravure

- SiCH
- SiO₂
- SiOCH poreux

Procédé pulsé

- Modélisation
- Amélioration du modèle

Conclusion

- Etudier un nouveau procédé de gravure sélective de SiOCH poreux vis à vis de SiO₂ et SiCH
- Etude d'un nouveau procédé : polarisation pulsée
- Mécanismes de gravure en polarisation pulsée
- Compréhension du procédé de gravure pulsée
- Conclusion et perspectives

Comparer les mécanismes de gravure en polarisation pulsée et continue

Introduction

Polarisation pulsée

- Pourquoi pulser ?
- Paramètres de pulse
- Gravure en polarisation pulsée
- Transfert de motifs

Mécanismes de gravure

- SiCH
- SiO₂
- SiOCH poreux

Procédé pulsé

- Modélisation
- Amélioration du modèle

Conclusion

Mécanismes de gravure :

- Plasma
- Surface des matériaux

} Interaction plasma-surface

↪ En polarisation pulsée : le plasma est inchangé / mode continu
Seule l'énergie des ions varie

↪ En polarisation pulsée : modèle de surface ?

- SiCH
- SiO₂
- SiOCH poreux



SiCH : Modèle de surface et mécanisme de gravure

Introduction

Polarisation pulsée

- Pourquoi pulser ?
- Paramètres de pulse
- Gravure en polarisation pulsée
- Transfert de motifs

Mécanismes de gravure

- SiCH
- SiO₂
- SiOCH poreux

Procédé pulsé

- Modélisation
- Amélioration du modèle

Conclusion

[Eon04]

→ Modèle bi-couche : - couche CF_x
- couche d'interaction SiF_x

→ Epaisseur CF_x limite la diffusion du fluor du plasma vers SiCH

$$V_g \propto [F].\exp\left(-\frac{e_{FC}}{L}\right)$$



SiCH : Modèle de surface et mécanisme de gravure

Introduction

Polarisation pulsée

- Pourquoi pulser ?
- Paramètres de pulse
- Gravure en polarisation pulsée
- Transfert de motifs

Mécanismes de gravure

- SiCH
- SiO₂
- SiOCH poreux

Procédé pulsé

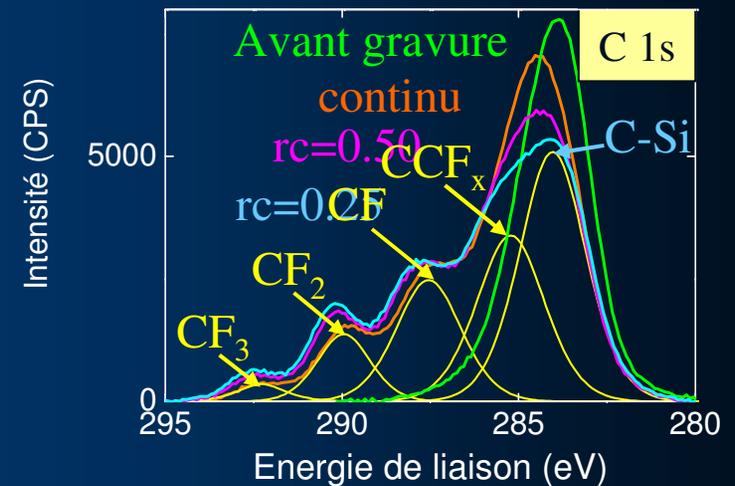
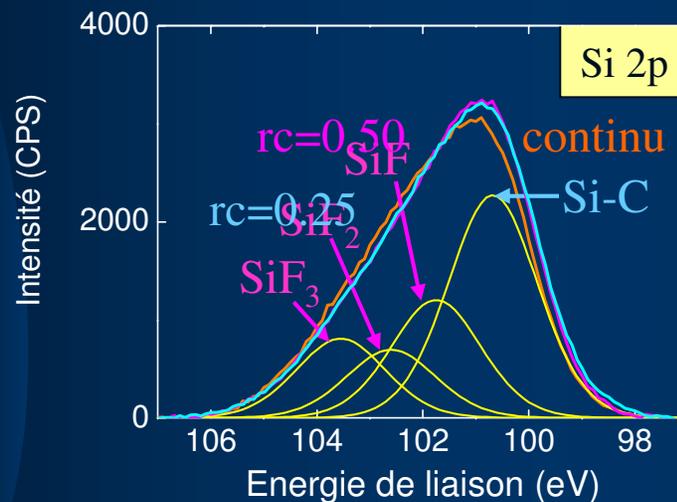
- Modélisation
- Amélioration du modèle

Conclusion

- En polarisation continue
 - Présence de CF_x, SiF_x
 - Epaisseur CF_x importante (~3nm) limite la gravure
- En polarisation pulsée
 - Peu de variations
 - Epaisseur CF_x importante limite la gravure de SiCH



→ Modèle de surface SiCH identique en polarisation continue et pulsée



Plasma CHF₃/Ar (50%-50%) 1500W 5mTorr 200V

SiO₂ : Modèle de surface et mécanisme de gravure

Introduction

Polarisation pulsée

- Pourquoi pulser ?
- Paramètres de pulse
- Gravure en polarisation pulsée
- Transfert de motifs

Mécanismes de gravure

- SiCH
- SiO₂
- SiOCH poreux

Procédé pulsé

- Modélisation
- Amélioration du modèle

Conclusion

Deux régimes de gravure [Oehrlein94][Gaboriau05]:

- Faible énergie des ions : Epaisseur CF_x importante limite la diffusion du fluor du plasma vers SiO₂
- Forte énergie des ions : Epaisseur CF_x faible non limitante → Composition du plasma



Oehrlein et al., J. Vac. Sci. Technol. A 12, p.333, 1994
Gaboriau et al., J. Vac. Sci. Technol. A 23, p.226, 2005

SiO₂ : Modèle de surface et mécanisme de gravure

Introduction

Polarisation pulsée

- Pourquoi pulser ?
- Paramètres de pulse
- Gravure en polarisation pulsée
- Transfert de motifs

Mécanismes de gravure

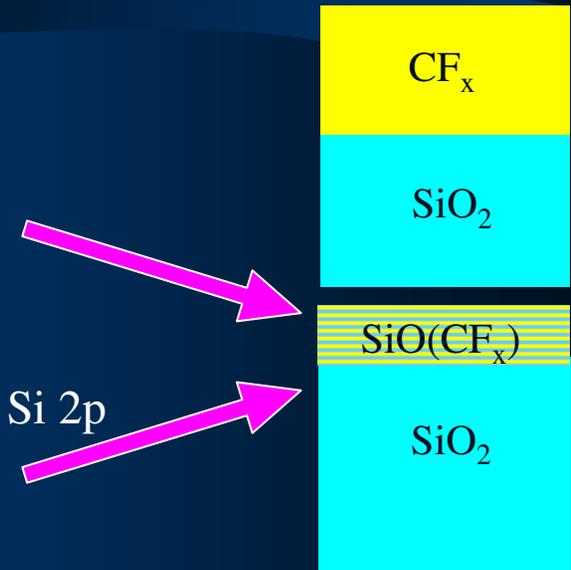
- SiCH
- SiO₂
- SiOCH poreux

Procédé pulsé

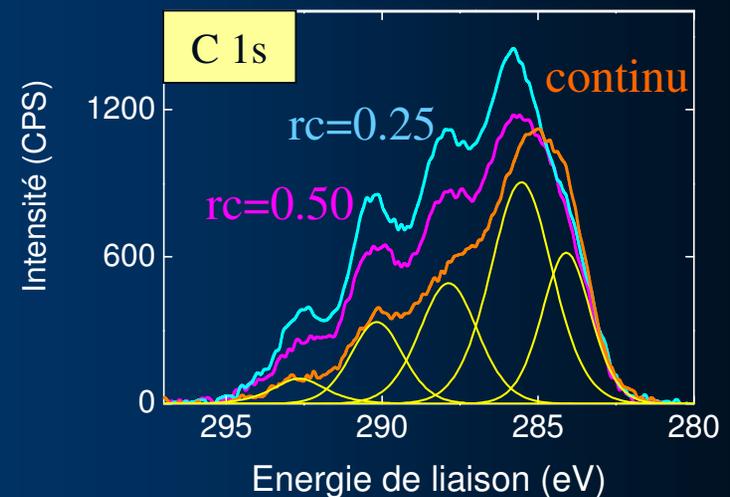
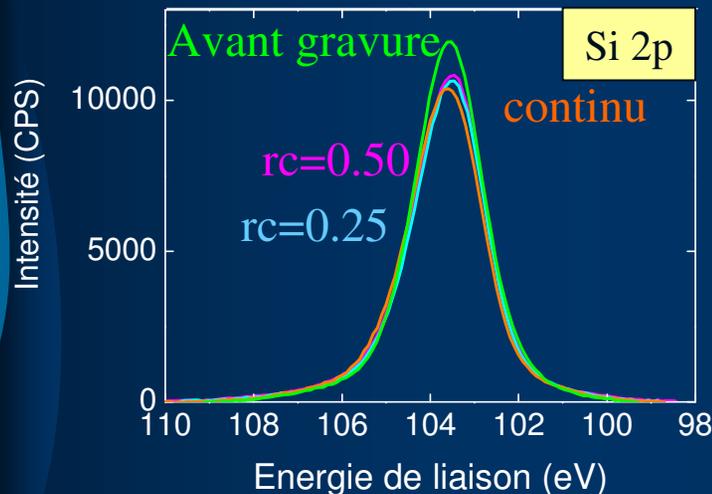
- Modélisation
- Amélioration du modèle

Conclusion

- En polarisation continue
 - Présence de CF_x + faible diminution Si 2p
 - Epaisseur CF_x faible (~1nm) non limitante
- En polarisation pulsée
 - Augmentation des CF_x + faible diminution Si 2p
 - Epaisseur CF_x faible non limitante



→ Modèle de surface SiO₂ identique en polarisation continue et pulsée



Plasma CHF₃/Ar (50%-50%) 1500W 5mTorr 200V

SiOCH poreux : Modèle de surface analyse XPS

Introduction

Polarisation
pulsée

- Pourquoi pulser ?
- Paramètres de pulse
- Gravure en polarisation pulsée
- Transfert de motifs

Mécanismes de
gravure

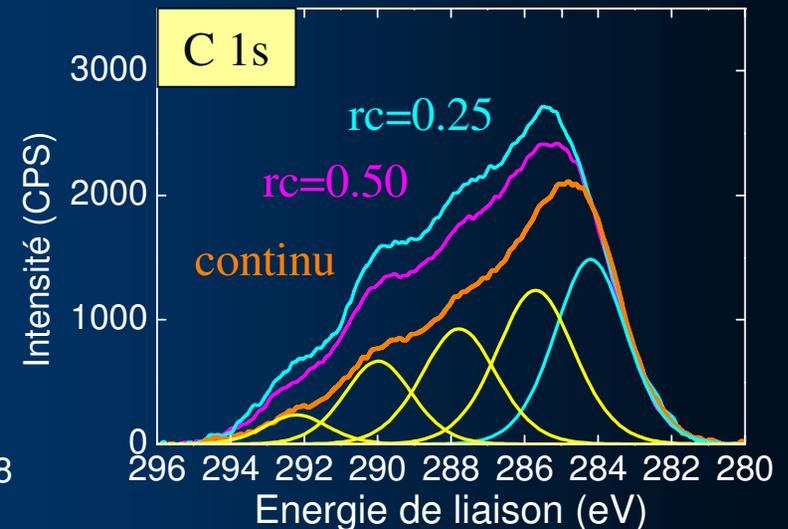
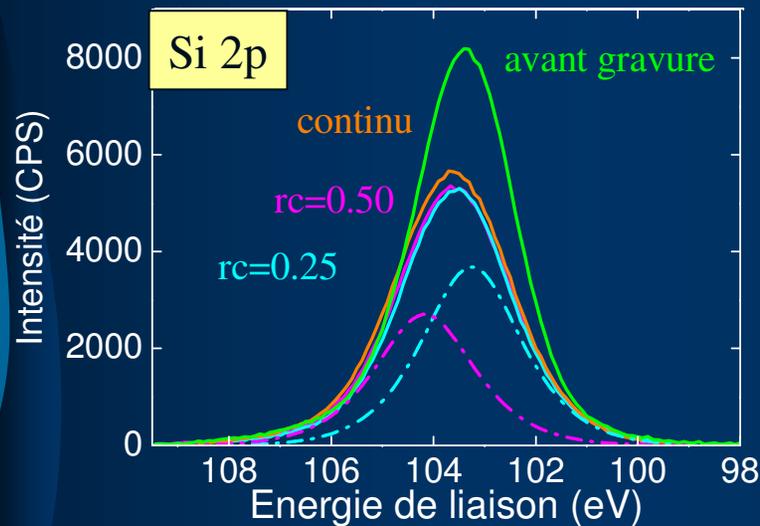
- SiCH
- SiO₂
- SiOCH poreux

Procédé pulsé

- Modélisation
- Amélioration du modèle

Conclusion

- En polarisation continue
 - Présence de CF_x
 - Pic Si 2p : sensible élargissement
 - En polarisation pulsée
 - Forte augmentation des composantes CF_x
 - Pic Si 2p inchangé
- Pas de couche d'interaction, présence de CF_x



Plasma CHF₃/Ar (50%-50%) 1500W 5mTorr 200V

SiOCH poreux : Modèle de surface analyse XPS angulaire

Introduction

Polarisation
pulsée

- Pourquoi pulser ?
- Paramètres de pulse
- Gravure en polarisation pulsée
- Transfert de motifs

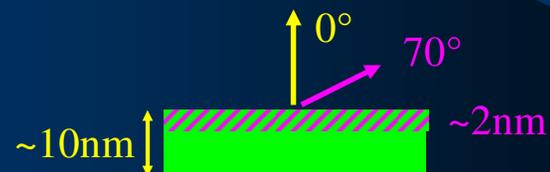
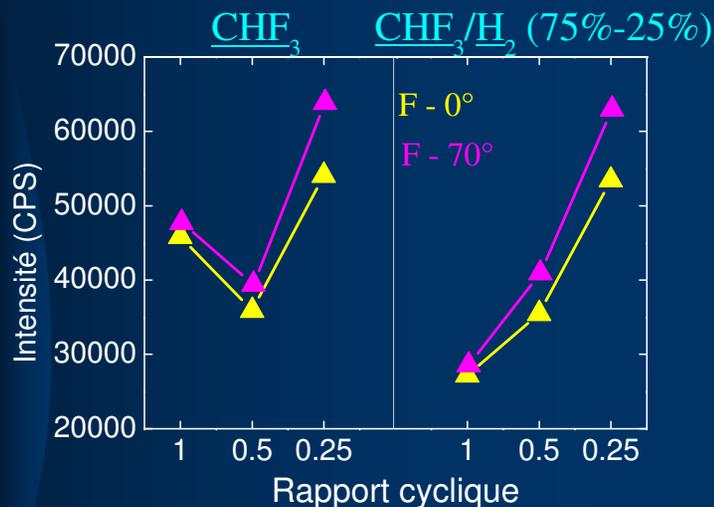
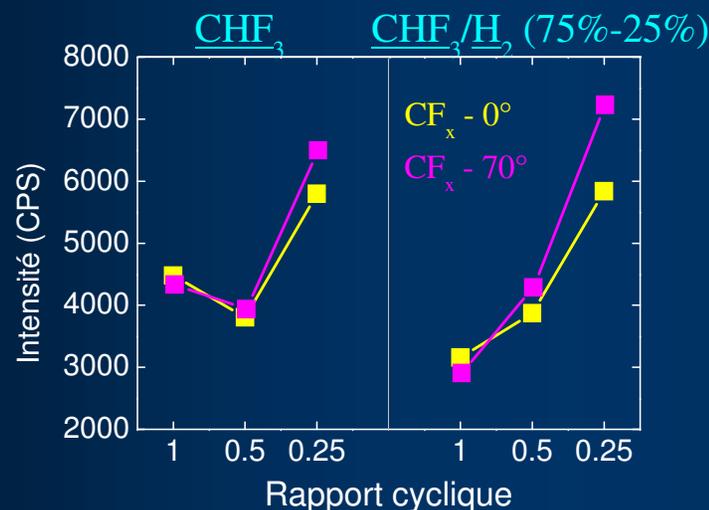
Mécanismes de
gravure

- SiCH
- SiO₂
- SiOCH poreux

Procédé pulsé

- Modélisation
- Amélioration du modèle

Conclusion



En polarisation continue ET pulsée :

- ⇒ F et CF_x présents sur toute l'épaisseur sondée
- ⇒ Pas de gradient de concentration dans l'épaisseur sondée

[Possémé04] : Diffusion d'espèces CF_x dans le matériau poreux

- ⇒ Gravure : Compétition entre la formation de la couche modifiée ($\text{SiOCH} + \text{CF}_x$) et la gravure du matériau poreux

SiOCH poreux : Modèle de surface

Introduction

Polarisation pulsée

- Pourquoi pulser ?
- Paramètres de pulse
- Gravure en polarisation pulsée
- Transfert de motifs

Mécanismes de gravure

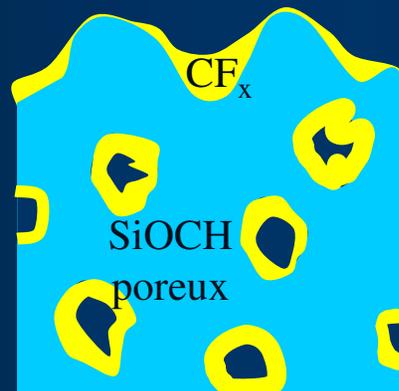
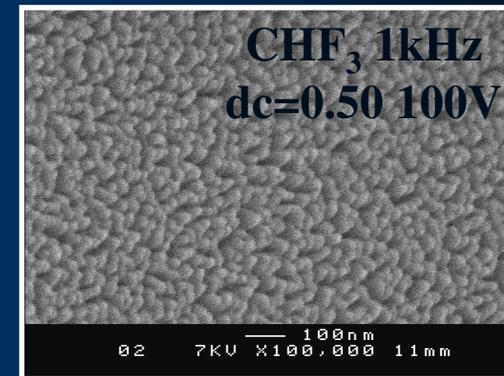
- SiCH
- SiO₂
- SiOCH poreux

Procédé pulsé

- Modélisation
- Amélioration du modèle

Conclusion

- MEB \Rightarrow surface rugueuse après gravure en polarisation continue ou pulsée



\rightarrow Plasma polymérisant et faible énergie des ions favorisent le dépôt CF_x

SiOCH poreux / SiOCH dense

Introduction

Polarisation pulsée

- Pourquoi pulser ?
- Paramètres de pulse
- Gravure en polarisation pulsée
- Transfert de motifs

Mécanismes de gravure

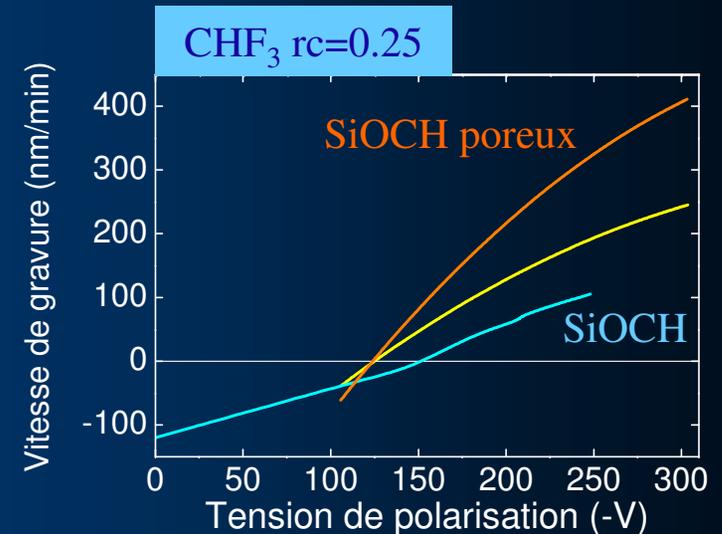
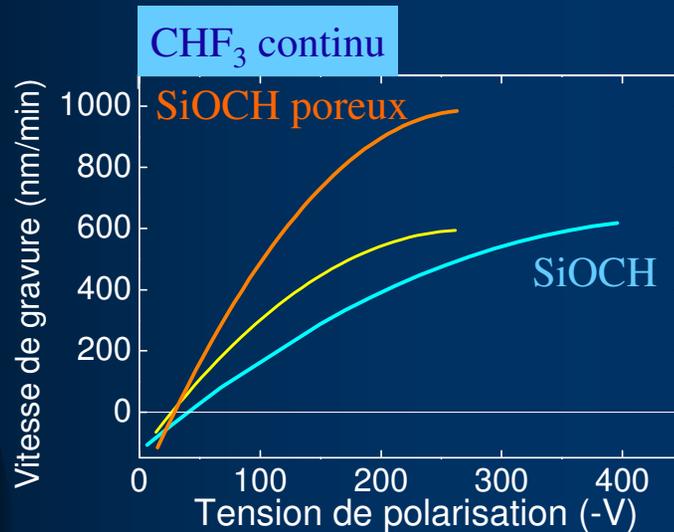
- SiCH
- SiO₂
- SiOCH poreux

Procédé pulsé

- Modélisation
- Amélioration du modèle

Conclusion

$$V_g^{norm} = V_g^{poreux} (1 - p)$$



➔ Gravure du matériau poreux plus efficace que celle du matériau dense en polarisation continue ET pulsée

[Sankaran03]

➔ Morphologie (porosité, diamètre des pores) favorise la pulvérisation du matériau

Bilan sur les mécanismes de gravure en polarisation pulsée

Introduction

Polarisation pulsée

- Pourquoi pulser ?
- Paramètres de pulse
- Gravure en polarisation pulsée
- Transfert de motifs

Mécanismes de gravure

- SiCH
- SiO₂
- SiOCH poreux

Procédé pulsé

- Modélisation
- Amélioration du modèle

Conclusion

En polarisation pulsée :

- Le plasma est inchangé
- Les modèles de surface des différents matériaux sont identiques en polarisation continue et pulsée

⇒ Mécanismes de gravure en polarisation pulsée similaires à ceux en polarisation continue

⇒ MAIS le procédé de gravure diffère

- diminution des vitesses de gravure en diminuant le rapport cyclique
- décalage du seuil dépôt-gravure vers les plus fortes énergies des ions

⇒ **Comment fonctionne le procédé de gravure en polarisation pulsée ?**

But de l'étude et plan de l'exposé

Introduction

Polarisation pulsée

- Pourquoi pulser ?
- Paramètres de pulse
- Gravure en polarisation pulsée
- Transfert de motifs

Mécanismes de gravure

- SiCH
- SiO₂
- SiOCH poreux

Procédé pulsé

- Modélisation
- Amélioration du modèle

Conclusion

- Etudier un nouveau procédé de gravure sélective de SiOCH poreux vis à vis de SiO₂ et SiCH
- Etude d'un nouveau procédé : polarisation pulsée
- Mécanismes de gravure en polarisation pulsée
- Compréhension du procédé de gravure pulsée
- Conclusion et perspectives

But de l'étude et plan de l'exposé

Introduction

Polarisation pulsée

- Pourquoi pulser ?
- Paramètres de pulse
- Gravure en polarisation pulsée
- Transfert de motifs

Mécanismes de gravure

- SiCH
- SiO₂
- SiOCH poreux

Procédé pulsé

- Modélisation
- Amélioration du modèle

Conclusion

- Etudier un nouveau procédé de gravure sélective de SiOCH poreux vis à vis de SiO₂ et SiCH
- Etude d'un nouveau procédé : polarisation pulsée
- Mécanismes de gravure en polarisation pulsée
- Compréhension du procédé de gravure pulsée
- Conclusion et perspectives

Etape de gravure en polarisation pulsée

Introduction

Polarisation pulsée

- Pourquoi pulser ?
- Paramètres de pulse
- Gravure en polarisation pulsée
- Transfert de motifs

Mécanismes de gravure

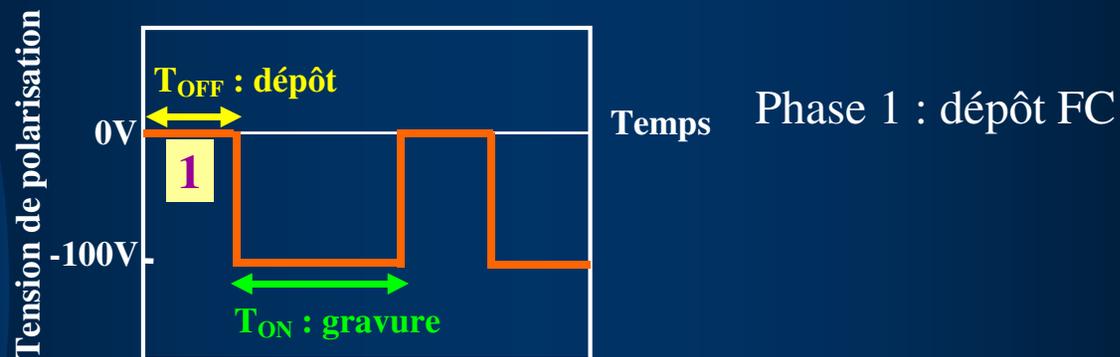
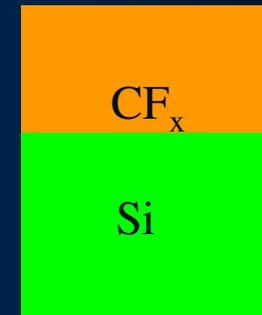
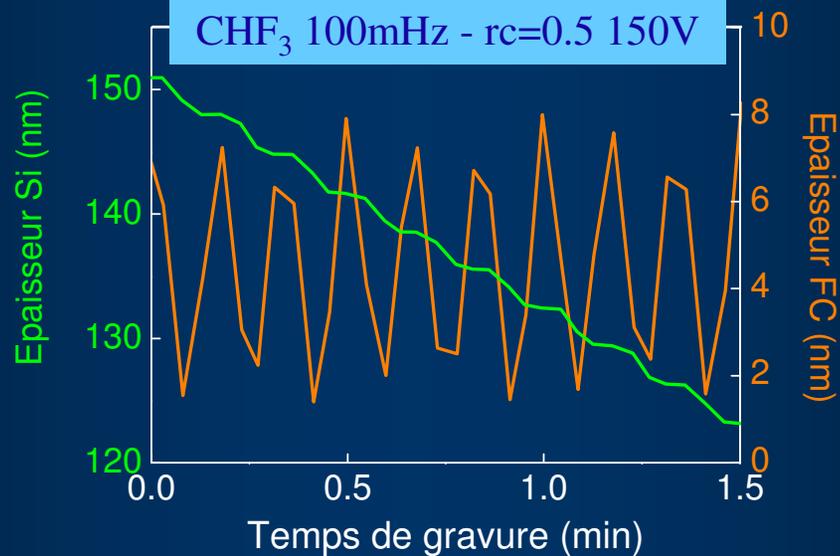
- SiCH
- SiO₂
- SiOCH poreux

Procédé pulsé

- Modélisation
- Amélioration du modèle

Conclusion

A basse fréquence



Etape de gravure en polarisation pulsée

Introduction

Polarisation pulsée

- Pourquoi pulser ?
- Paramètres de pulse
- Gravure en polarisation pulsée
- Transfert de motifs

Mécanismes de gravure

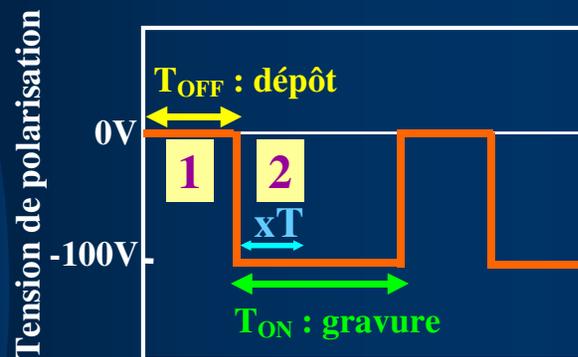
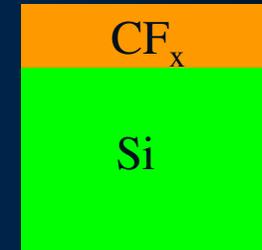
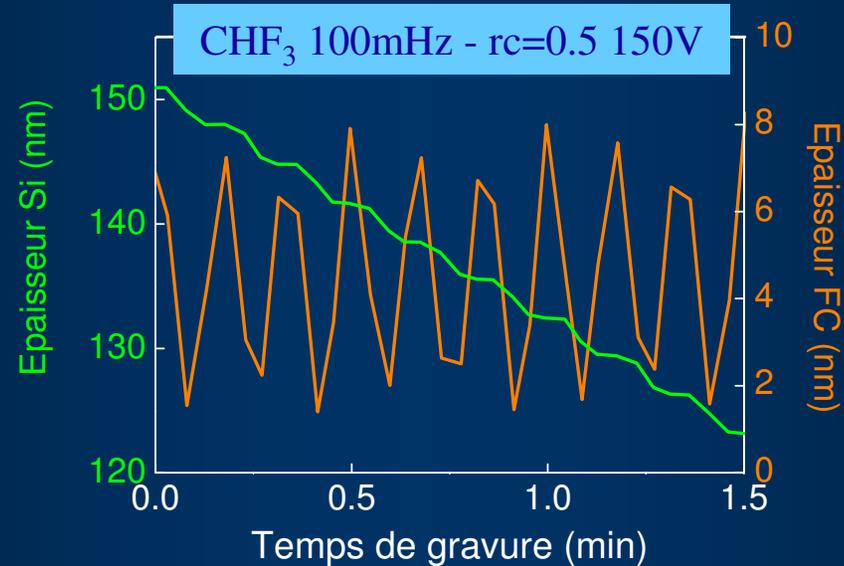
- SiCH
- SiO₂
- SiOCH poreux

Procédé pulsé

- Modélisation
- Amélioration du modèle

Conclusion

A basse fréquence



Temps Phase 1 : dépôt FC
Phase 2 : gravure FC

Etape de gravure en polarisation pulsée

Introduction

Polarisation pulsée

- Pourquoi pulser ?
- Paramètres de pulse
- Gravure en polarisation pulsée
- Transfert de motifs

Mécanismes de gravure

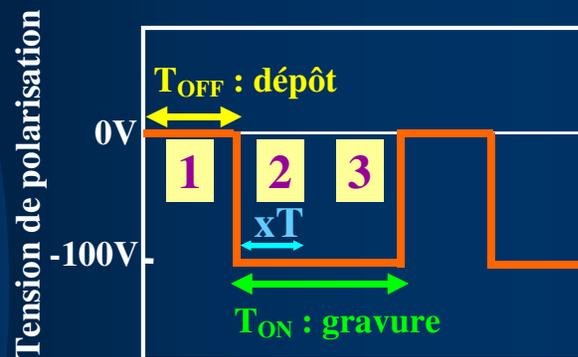
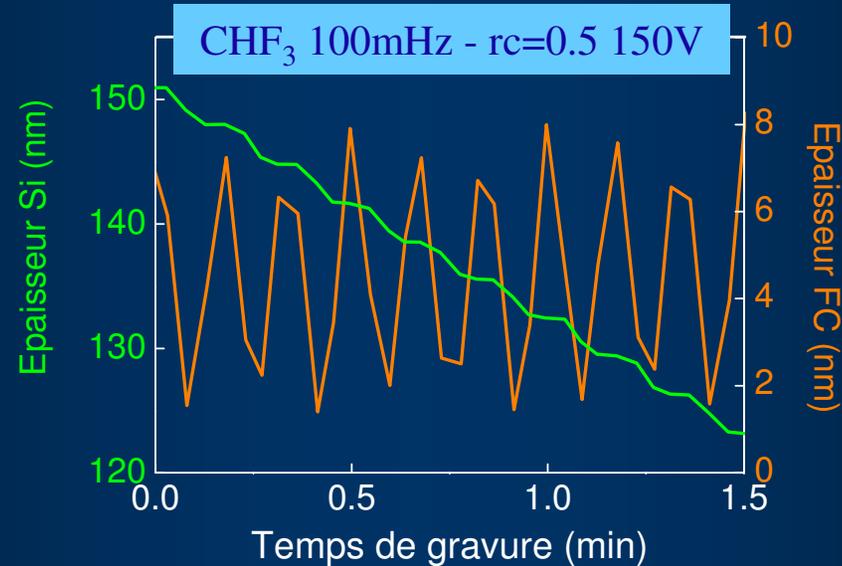
- SiCH
- SiO₂
- SiOCH poreux

Procédé pulsé

- Modélisation
- Amélioration du modèle

Conclusion

A basse fréquence



- Temps
- Phase 1 : dépôt FC
 - Phase 2 : gravure FC
 - Phase 3 : gravure du matériau

$$V_{mat}^{pulsé} = V_{cont}^{mat} \times \left(\frac{T_{ON} - xT}{T} \right) = V_{cont}^{mat} \times (rc - x)$$

Modélisation de la vitesse de gravure en polarisation pulsée

Introduction

Polarisation pulsée

- Pourquoi pulser ?
- Paramètres de pulse
- Gravure en polarisation pulsée
- Transfert de motifs

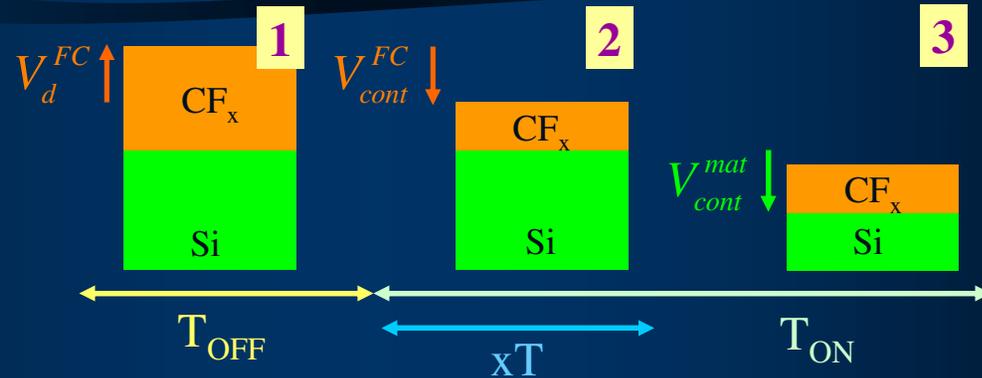
Mécanismes de gravure

- SiCH
- SiO₂
- SiOCH poreux

Procédé pulsé

- Modélisation
- Amélioration du modèle

Conclusion



Modélisation de la vitesse de gravure en polarisation pulsée

Introduction

Polarisation pulsée

- Pourquoi pulser ?
- Paramètres de pulse
- Gravure en polarisation pulsée
- Transfert de motifs

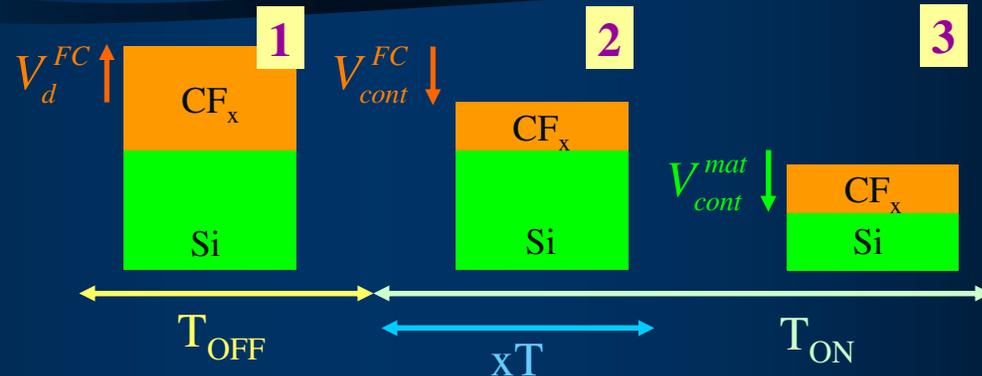
Mécanismes de gravure

- SiCH
- SiO₂
- SiOCH poreux

Procédé pulsé

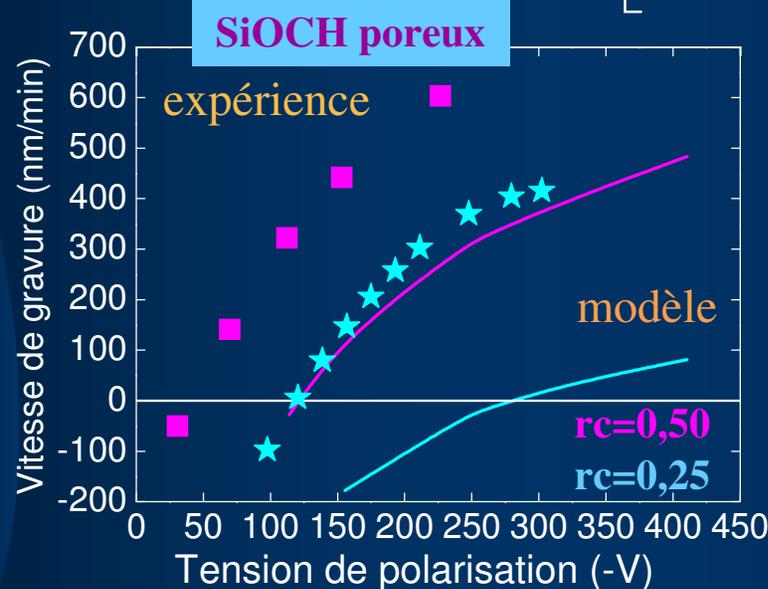
- Modélisation
- Amélioration du modèle

Conclusion



$$V_{mat}^{pulsé} = V_{cont}^{mat} \times \left[rc - (1 - rc) \frac{V_d^{FC}}{V_{cont}^{FC}} \right]$$

Schaepkens et al.
JVST B 18, 2000



- le modèle prédit le décalage du seuil dépôt-gravure

MAIS

- seuils sur-estimés
- vitesses de gravure sous-estimées
- + même observation pour les autres matériaux : SiO₂, SiCH₄

Hypothèses de non-validité du modèle

Introduction

Polarisation pulsée

- Pourquoi pulser ?
- Paramètres de pulse
- Gravure en polarisation pulsée
- Transfert de motifs

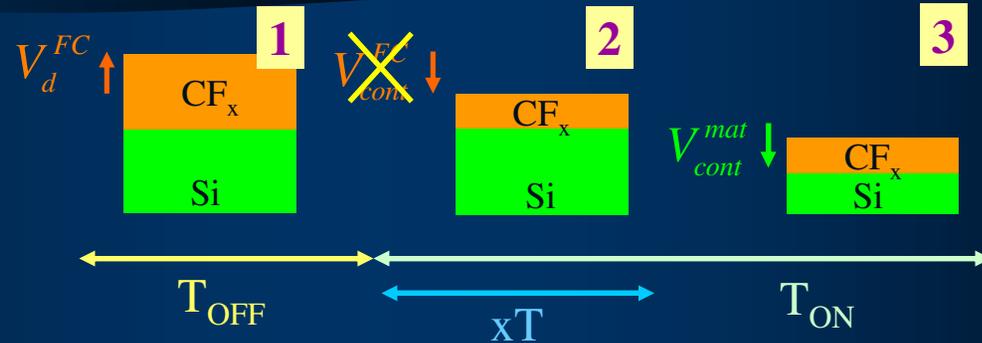
Mécanismes de gravure

- SiCH
- SiO₂
- SiOCH poreux

Procédé pulsé

- Modélisation
- Amélioration du modèle

Conclusion



a/ V_{cont}^{FC} : mesurée sur un film FC épais déposé à 0V en polarisation continue
MAIS vitesse de gravure film FC épais \neq vitesse de gravure d'un film mince

$$\rightarrow V_{cont}^{FC} \rightarrow V_{cont-corr}^{FC}$$

b/ V_{cont}^{mat} : mesurée en polarisation continue
MAIS cette vitesse dépend de l'épaisseur et de la composition du film FC

Caractérisation de la couche CF_x à la surface des matériaux : épaisseur

Introduction

Polarisation pulsée

- Pourquoi pulser ?
- Paramètres de pulse
- Gravure en polarisation pulsée
- Transfert de motifs

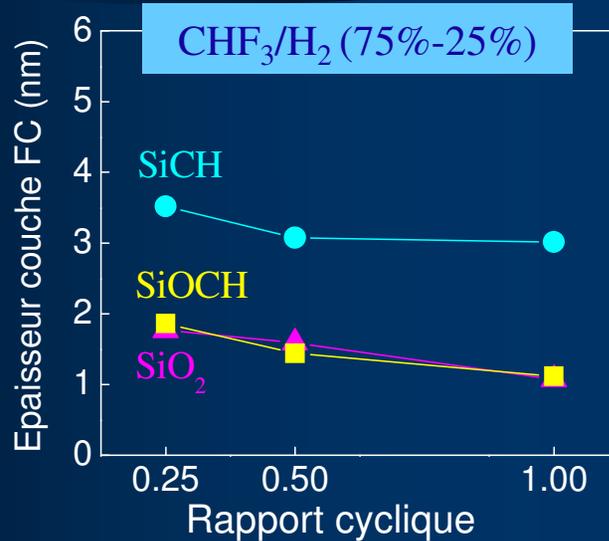
Mécanismes de gravure

- SiCH
- SiO₂
- SiOCH poreux

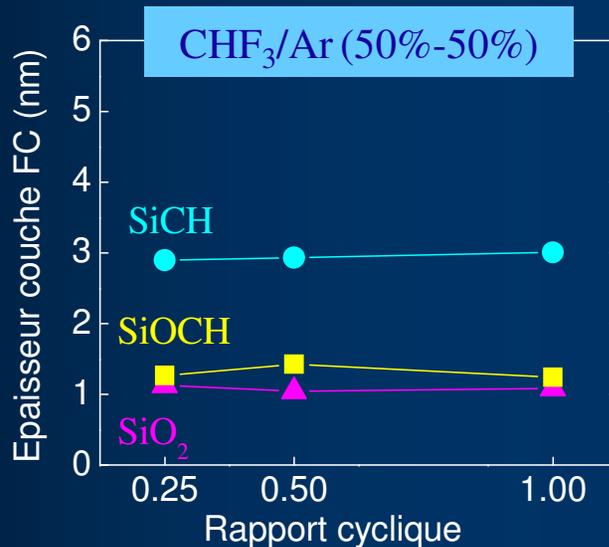
Procédé pulsé

- Modélisation
- Amélioration du modèle

Conclusion



➤ CHF₃/H₂ et CHF₃/Ar, l'épaisseur CF_x est constante sur tous les matériaux



Caractérisation de la couche CF_x à la surface des matériaux : composition

Introduction

Polarisation pulsée

- Pourquoi pulser ?
- Paramètres de pulse
- Gravure en polarisation pulsée
- Transfert de motifs

Mécanismes de gravure

- SiCH
- SiO₂
- SiOCH poreux

Procédé pulsé

- Modélisation
- Amélioration du modèle

Conclusion

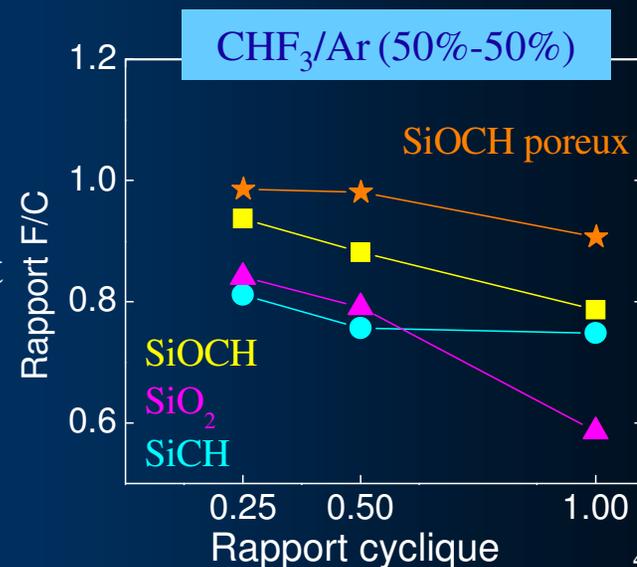
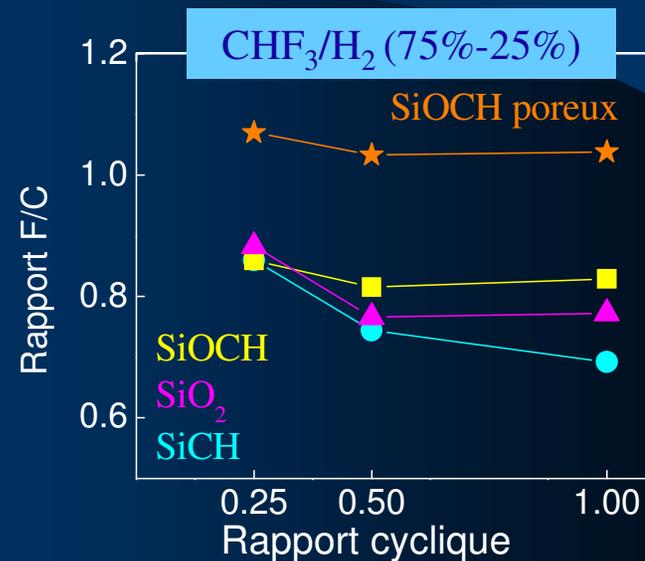
- Diminution du rapport cyclique :

⇒ Augmentation du rapport F/C de la couche CF_x

⇒ Gravure du film CF_x plus facile : épaisseur CF_x varie peu/ continu

⇒ Gravure du matériau plus efficace lorsque la couche CF_x est plus riche en fluor

- SiOCH poreux : comportement différent
Couche CF_x très fluorée



Hypothèses de non-validité du modèle

Introduction

Polarisation pulsée

- Pourquoi pulser ?
- Paramètres de pulse
- Gravure en polarisation pulsée
- Transfert de motifs

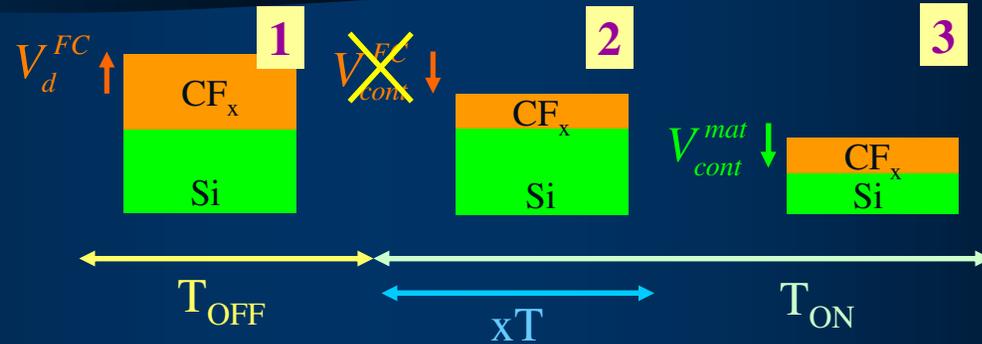
Mécanismes de gravure

- SiCH
- SiO₂
- SiOCH poreux

Procédé pulsé

- Modélisation
- Amélioration du modèle

Conclusion



a/ V_{cont}^{FC} : mesurée sur un film FC épais déposé à 0V en polarisation continue
MAIS vitesse de gravure film FC épais \neq vitesse de gravure d'un film mince

$$\rightarrow V_{cont}^{FC} \rightarrow V_{cont-corr}^{FC}$$

b/ V_{cont}^{mat} : mesurée en polarisation continue
MAIS cette vitesse dépend de l'épaisseur et de la composition du film FC

Hypothèses de non-validité du modèle

Introduction

Polarisation pulsée

- Pourquoi pulser ?
- Paramètres de pulse
- Gravure en polarisation pulsée
- Transfert de motifs

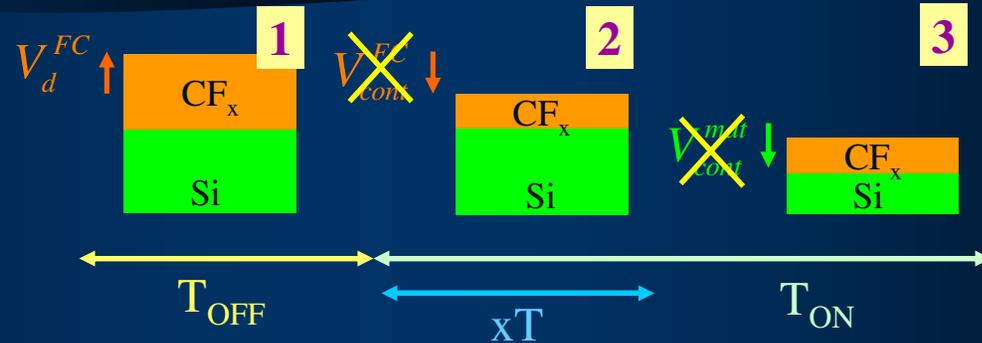
Mécanismes de gravure

- SiCH
- SiO₂
- SiOCH poreux

Procédé pulsé

- Modélisation
- Amélioration du modèle

Conclusion



a/ V_{cont}^{FC} : mesurée sur un film FC épais déposé à 0V en polarisation continue
MAIS vitesse de gravure film FC épais \neq vitesse de gravure d'un film mince

$$\rightarrow V_{cont}^{FC} \rightarrow V_{cont-corr}^{FC}$$

b/ V_{cont}^{mat} : mesurée en polarisation continue
MAIS vitesse de gravure en polarisation pulsée s'opère à travers un film FC plus fluoré qu'en polarisation continue \Rightarrow vitesse de gravure + efficace

Correction sur la vitesse de gravure à travers un film CF_x plus fluoré

Introduction

Polarisation pulsée

- Pourquoi pulser ?
- Paramètres de pulse
- Gravure en polarisation pulsée
- Transfert de motifs

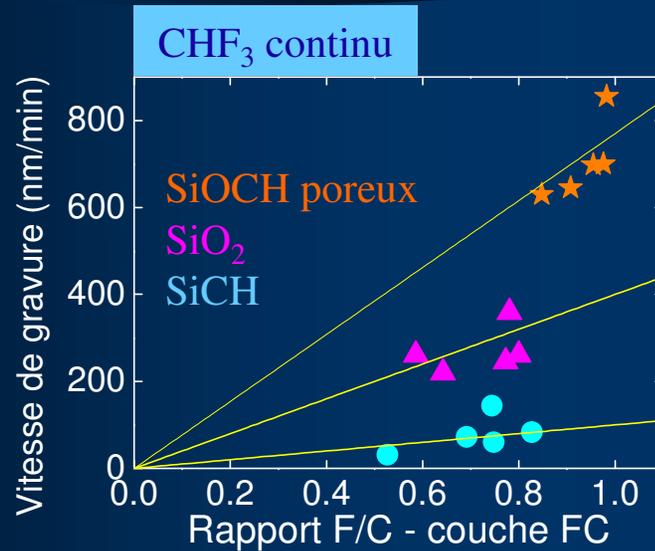
Mécanismes de gravure

- SiCH
- SiO_2
- SiOCH poreux

Procédé pulsé

- Modélisation
- Amélioration du modèle

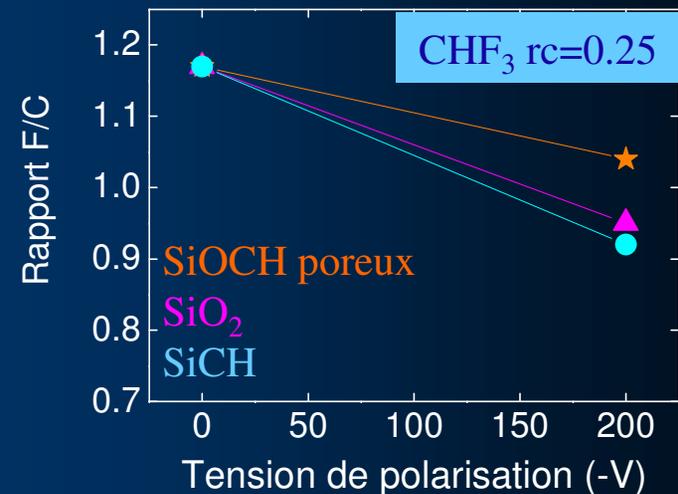
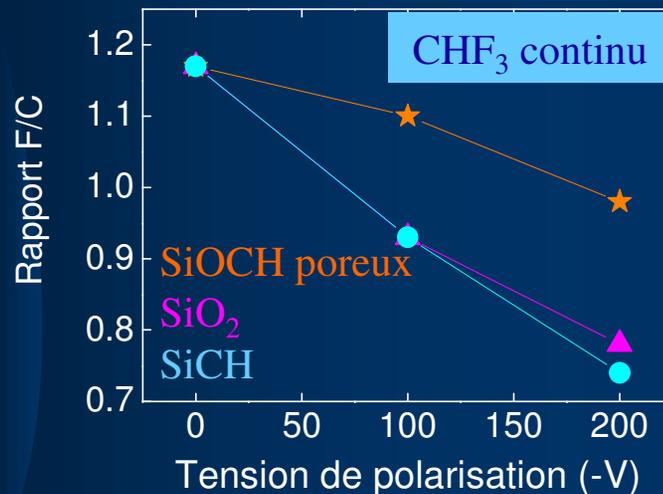
Conclusion



$$\square V_{cont}^{mat} \propto F/C$$

$$\square (F/C)_{cont} \propto V \text{ et } (F/C)_{rc=0.25} \propto V$$

$$\rightarrow V_{cont-corr}^{mat} = V_{cont}^{mat} \times \frac{(F/C)_{rc}}{(F/C)_{cont}}$$



Hypothèses de non-validité du modèle

Introduction

Polarisation pulsée

- Pourquoi pulser ?
- Paramètres de pulse
- Gravure en polarisation pulsée
- Transfert de motifs

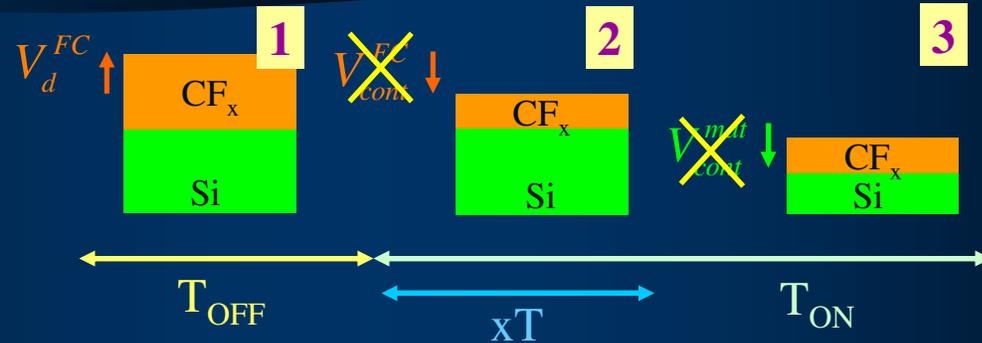
Mécanismes de gravure

- SiCH
- SiO₂
- SiOCH poreux

Procédé pulsé

- Modélisation
- Amélioration du modèle

Conclusion



a/ V_{cont}^{FC} : mesurée sur un film FC épais déposé à 0V en polarisation continue
MAIS vitesse de gravure film FC épais \neq vitesse de gravure d'un film mince

$$\rightarrow V_{cont}^{FC} \rightarrow V_{cont-corr}^{FC}$$

b/ V_{cont}^{mat} : mesurée en polarisation continue
MAIS vitesse de gravure en polarisation pulsée s'opère à travers un film FC plus fluoré qu'en polarisation continue \Leftrightarrow vitesse de gravure + efficace

$$\rightarrow V_{cont}^{mat} \rightarrow V_{cont-corr}^{mat}$$

c/ la gravure du matériau ne s'opère que pendant la phase 3
MAIS le dépôt formé pendant la phase 1 est mince et ne bloque pas la gravure du matériau pendant la phase 2

Vitesse de gravure du matériau pendant T_{ON}

Introduction

Polarisation pulsée

- Pourquoi pulser ?
- Paramètres de pulse
- Gravure en polarisation pulsée
- Transfert de motifs

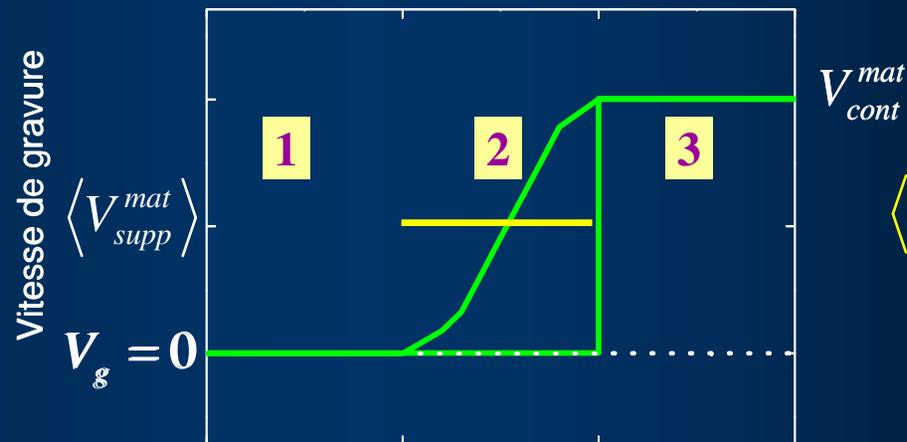
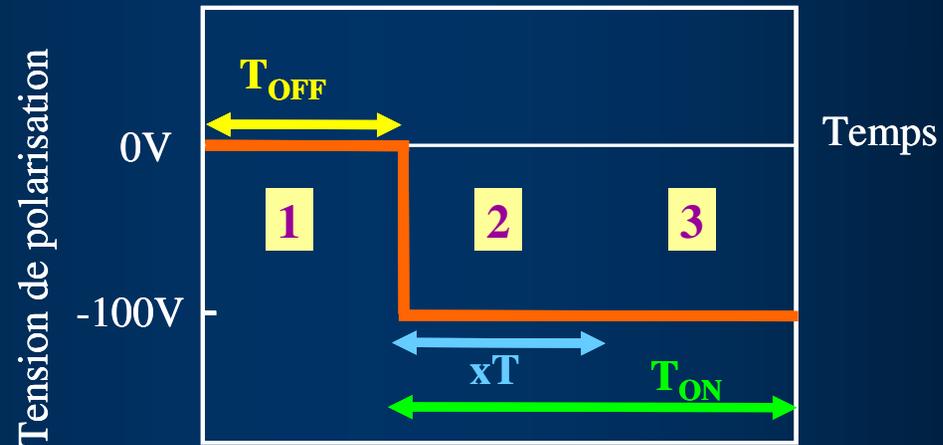
Mécanismes de gravure

- SiCH
- SiO₂
- SiOCH poreux

Procédé pulsé

- Modélisation
- Amélioration du modèle

Conclusion



$$\langle V_{supp}^{mat} \rangle = \frac{x}{2} \cdot V_{cont-corr}^{mat}$$

Hypothèses de non-validité du modèle

Introduction

Polarisation pulsée

- Pourquoi pulser ?
- Paramètres de pulse
- Gravure en polarisation pulsée
- Transfert de motifs

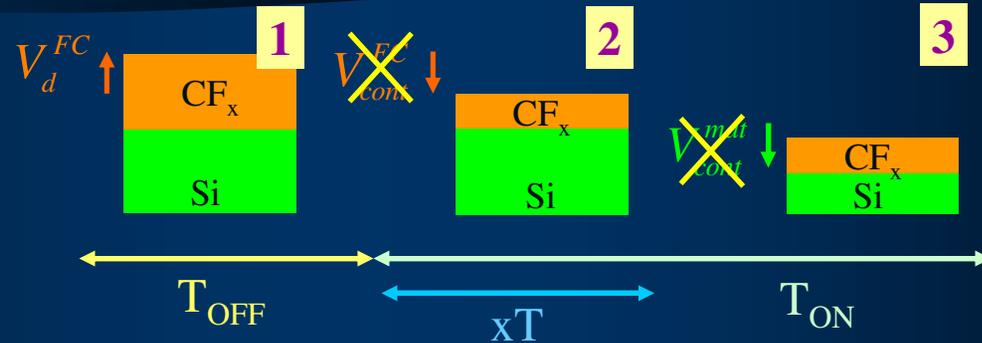
Mécanismes de gravure

- SiCH
- SiO₂
- SiOCH poreux

Procédé pulsé

- Modélisation
- Amélioration du modèle

Conclusion



a/ V_{cont}^{FC} : mesurée sur un film FC épais déposé à 0V en polarisation continue
MAIS vitesse de gravure film FC épais \neq vitesse de gravure d'un film mince

$$\rightarrow V_{cont}^{FC} \rightarrow V_{cont-corr}^{FC}$$

b/ V_{cont}^{mat} : mesurée en polarisation continue
MAIS vitesse de gravure en polarisation pulsée s'opère à travers un film FC plus fluoré qu'en polarisation continue \Rightarrow vitesse de gravure + efficace

$$\rightarrow V_{cont}^{mat} \rightarrow V_{cont-corr}^{mat}$$

c/ la gravure du matériau ne s'opère que pendant la phase 3
MAIS le dépôt formé pendant la phase 1 est mince et ne bloque pas la gravure du matériau pendant la phase 2

$$\rightarrow + \langle V_{supp}^{mat} \rangle = \frac{x}{2} \cdot V_{cont-corr}^{mat}$$

Validation du modèle de gravure en polarisation pulsée

Introduction

Polarisation pulsée

- Pourquoi pulser ?
- Paramètres de pulse
- Gravure en polarisation pulsée
- Transfert de motifs

Mécanismes de gravure

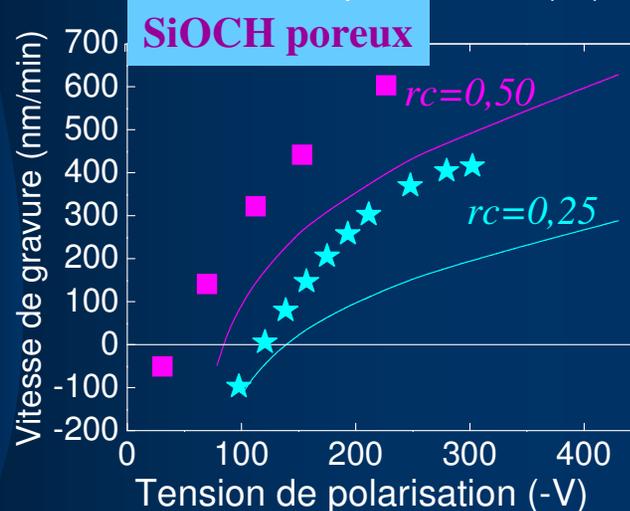
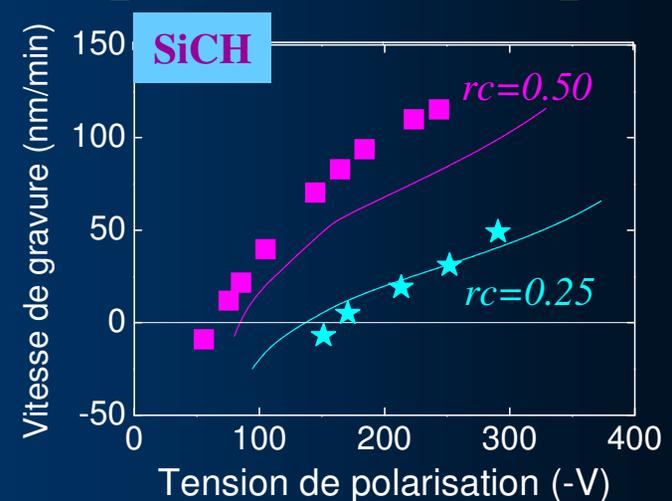
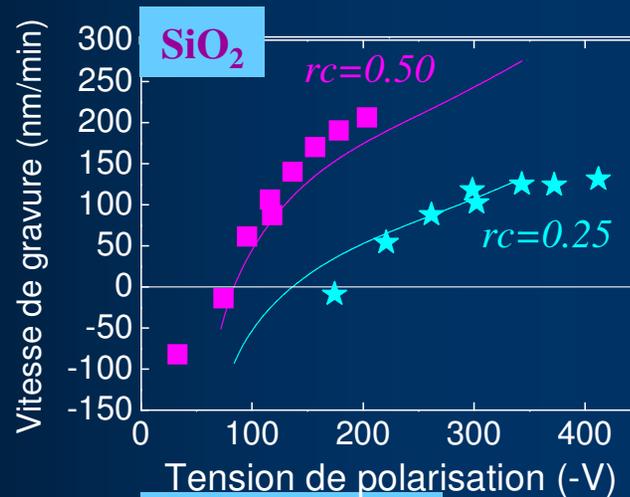
- SiCH
- SiO₂
- SiOCH poreux

Procédé pulsé

- Modélisation
- Amélioration du modèle

Conclusion

$$V_{mat}^{pulsé} = V_{cont-corr}^{mat} \times \left(rc - \frac{x}{2} \right) = V_{cont-corr}^{mat} \times \left[rc - \frac{(1-rc)}{2} \frac{V_d^{FC}}{V_{cont-corr}^{FC}} \right]$$



- pour SiO₂ et SiCH, le modèle prédit correctement seuil et vitesse de gravure
- pour SiOCH poreux, les vitesses de gravure sont sous-évaluées

Modèle de gravure en polarisation pour SiOCH poreux

Introduction

Polarisation pulsée

- Pourquoi pulser ?
- Paramètres de pulse
- Gravure en polarisation pulsée
- Transfert de motifs

Mécanismes de gravure

- SiCH
- SiO₂
- SiOCH poreux

Procédé pulsé

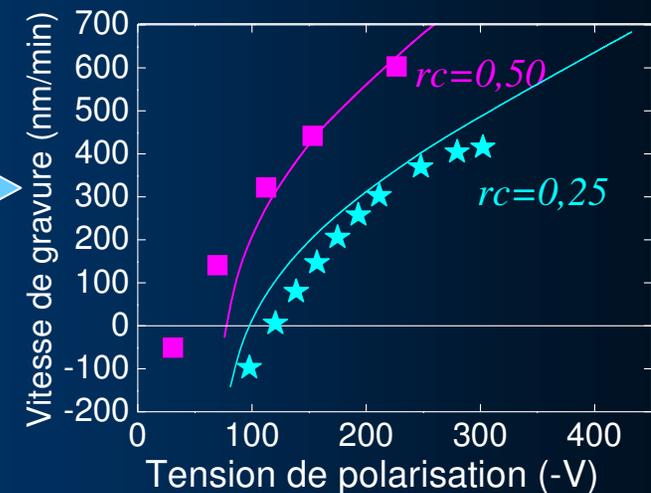
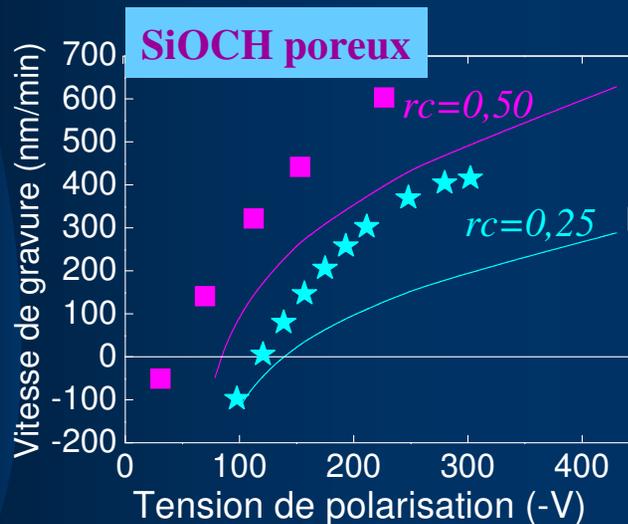
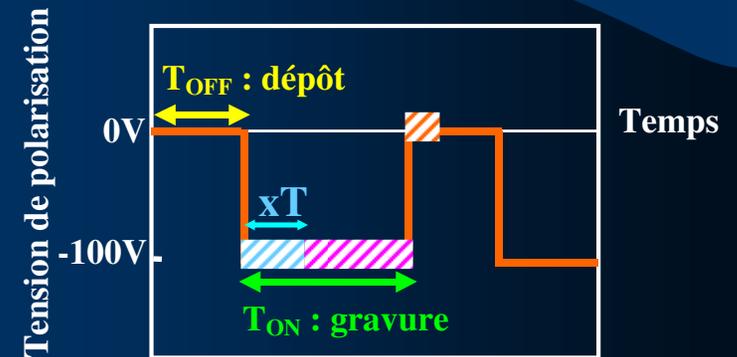
- Modélisation
- Amélioration du modèle

Conclusion

d/ La gravure du matériau peut s'opérer spontanément pendant une fraction de temps à l'extinction du pulse

$$\rightarrow + \left\langle V_{spont}^{mat} \right\rangle$$

→ modèle en meilleur accord avec l'expérience



Bilan sur le modèle de gravure en polarisation pulsée

Introduction

Polarisation pulsée

- Pourquoi pulser ?
- Paramètres de pulse
- Gravure en polarisation pulsée
- Transfert de motifs

Mécanismes de gravure

- SiCH
- SiO₂
- SiOCH poreux

Procédé pulsé

- Modélisation
- Amélioration du modèle

Conclusion

Le procédé de gravure n'est pas une simple succession des étapes de :

- dépôt FC : T_{OFF}
- gravure FC : xT
- gravure du matériau : $T_{ON}-xT$

La gravure en polarisation pulsée s'opère :

- dès le début du temps T_{ON}
- à travers un film FC plus fluoré / polarisation continue
- pendant une fraction de temps supplémentaire à l'extinction du pulse (selon les matériaux)

Conclusion et perspectives

Introduction

Polarisation pulsée

- Pourquoi pulser ?
- Paramètres de pulse
- Gravure en polarisation pulsée
- Transfert de motifs

Mécanismes de gravure

- SiCH
- SiO₂
- SiOCH poreux

Procédé pulsé

- Modélisation
- Amélioration du modèle

Conclusion

Pulser la tension de polarisation

- ☑ Décalage du seuil dépôt-gravure pour les différents matériaux
- ☑ Sélectivité SiOCH poreux/ SiCH et SiO₂ améliorée
- ☑ Transfert de motifs réalisable
- ➔ Potentialité du procédé de « polarisation pulsée »

Mécanisme de gravure

- ☑ Modèle de surface des matériaux SiCH, SiO₂, SiOCH poreux
- ☑ Mécanismes de gravure en polarisation pulsée identiques à ceux en polarisation continue
- ☑ Modélisation des vitesses de gravure en polarisation pulsée

Perspectives

- ☐ Optimisation du procédé « polarisation pulsée »
- ☐ Amélioration des modèles de surface (analyse XPS, ellipsométrie porosimétrique...)
- ☐ Validation du modèle de gravure en polarisation pulsée dans d'autres chimies de plasma
- ☐ Mesures électriques (ϵ_r)