



# Sources plasma microonde haute densité distribuées dans une configuration matricielle

L. Latrasse, A. Lacoste, A. Bès, J. Pelletier

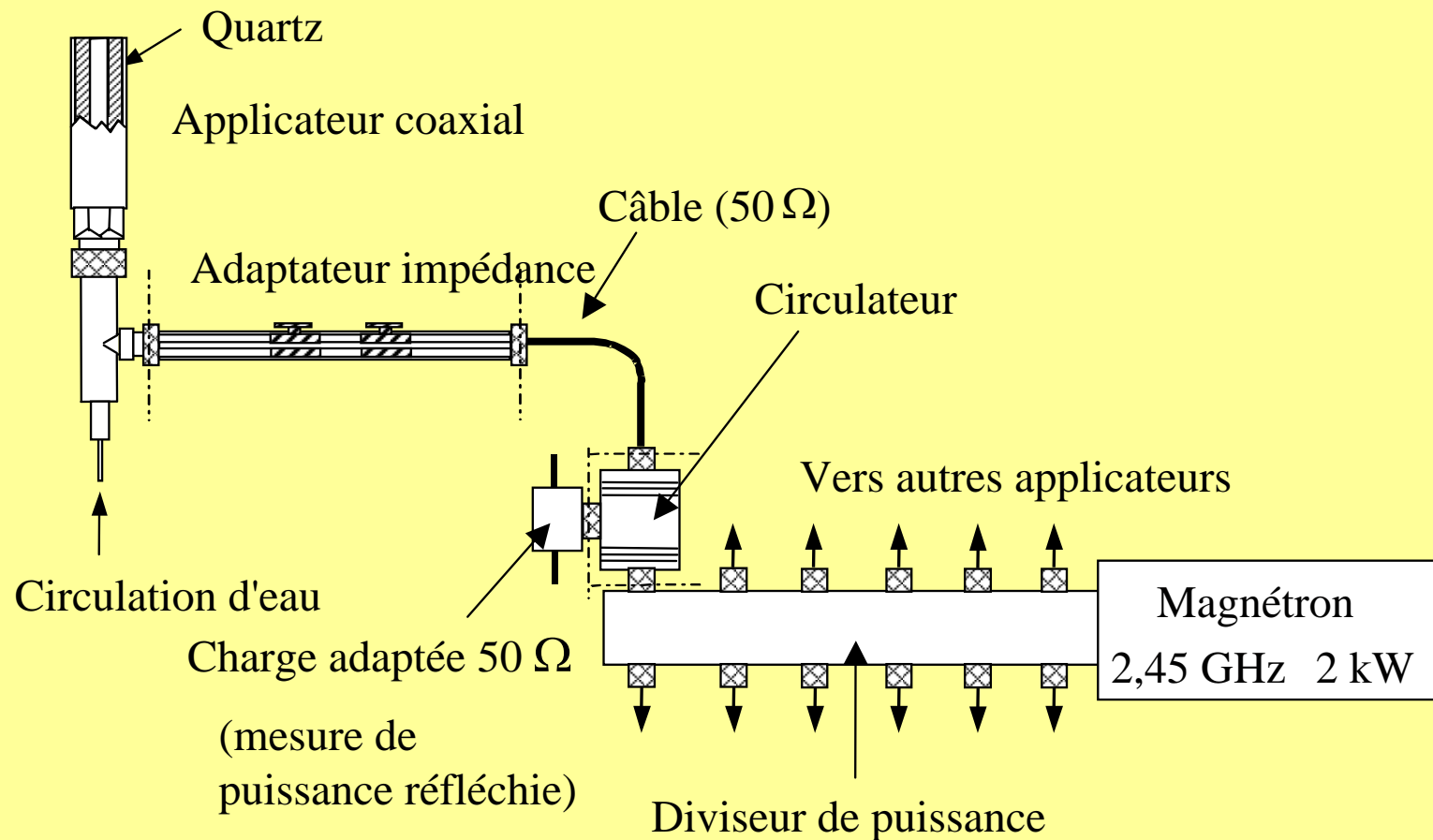
Centre de Recherche Plasmas-Matériaux-Nanostructures

Laboratoire de Physique Subatomique et Cosmologie  
53 rue des Martyrs, Grenoble

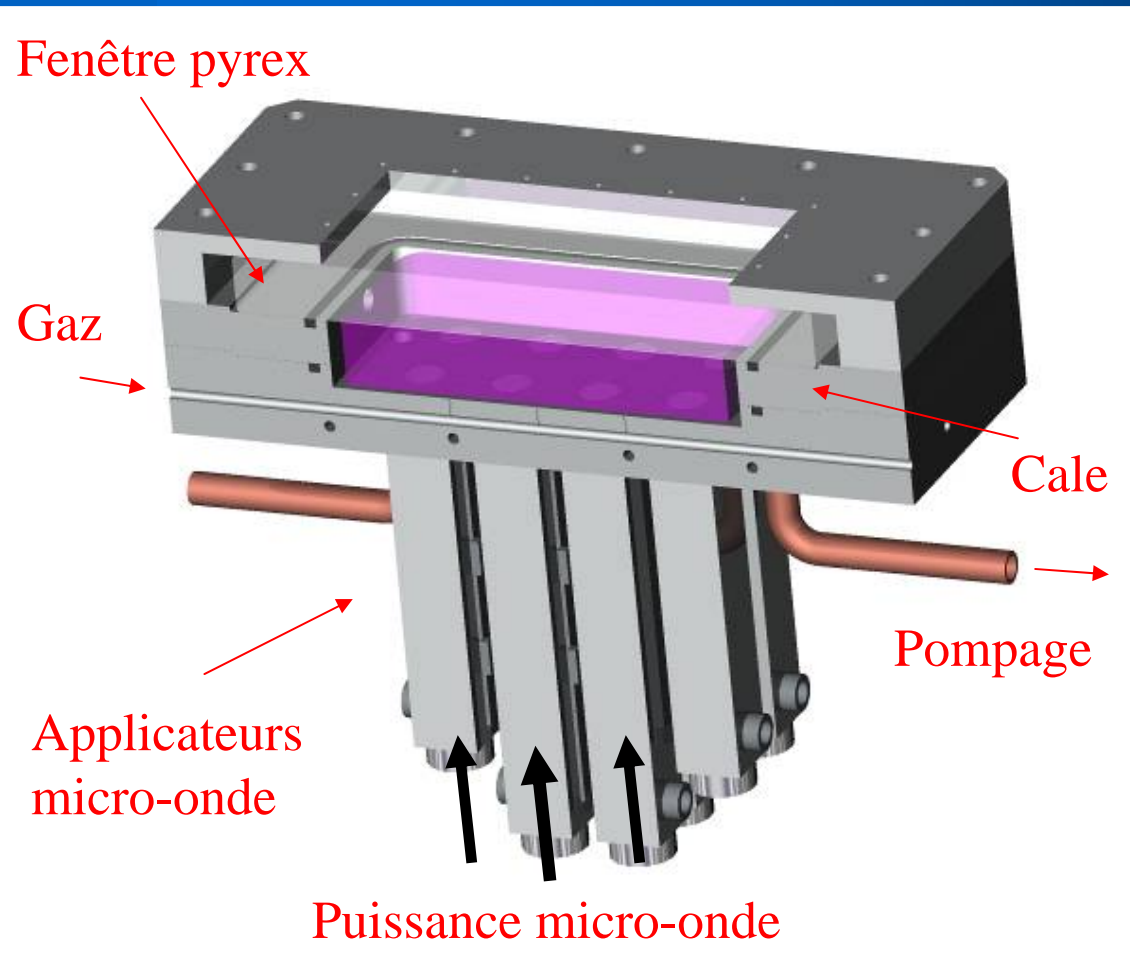
# Sources plasma microonde haute densité distribuées dans une configuration matricielle

- **Conception du réacteur**
- Domaines de fonctionnement et d'homogénéité du plasma
- Caractéristiques électriques d'un plasma d'argon
  - $n_i = f(P_w, p_{Ar})$
  - $T_e, V_p, V_f$  en volume et près du plan source
- Applications aux procédés
  - Gravure de résine par plasma d'oxygène
  - Caractéristiques de dépôts obtenus à partir des plasmas de mélange TMS + O<sub>2</sub> et TMS + N<sub>2</sub>
- Conclusion et perspectives

# Conception du réacteur : Ligne électrique d'une source plasma micro-onde élémentaire



# Conception du réacteur : Configuration planaire, matricielle

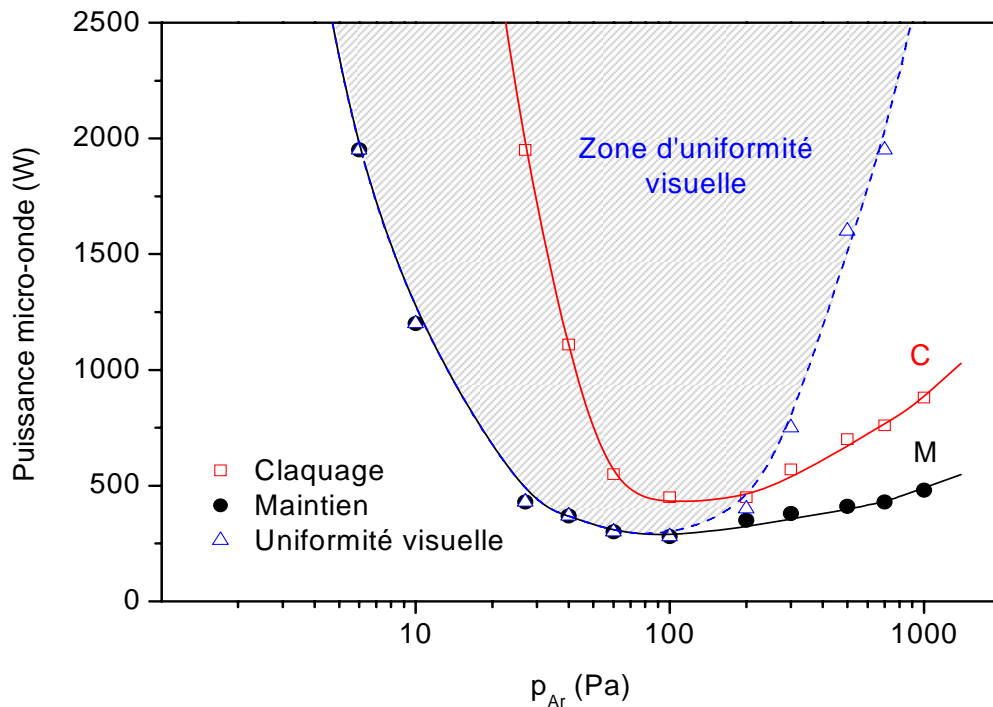


- 4×3 sources élémentaires ( $S = 200 \text{ cm}^2$ )
- Distance entre sources  $a = 4 \text{ cm}$
- Injection du gaz et refroidissement repartis
- Pas de couplage EM entre sources (atténuation du champ électrique sur épaisseur de peau  $\delta \ll a$ )
  - Adaptation d'impédance indépendante
  - à 60 Pa et 500 W  $\Rightarrow P_r/P_i=0$  ( $P_r/P_i < 10 \%$  à 300 Pa)
  - Augmentation de la surface par augmentation du nombre de sources

# Sources plasma microonde haute densité distribuées dans une configuration matricielle

- Conception du réacteur
- Domaines de fonctionnement et d'homogénéité du plasma
- Caractéristiques électriques d'un plasma d'argon
  - $n_i = f(P_w, p_{Ar})$
  - $T_e, V_p, V_f$  en volume et près du plan source
- Applications aux procédés
  - Gravure de résine par plasma d'oxygène
  - Caractéristiques de dépôts obtenus à partir des plasmas de mélange TMS + O<sub>2</sub> et TMS + N<sub>2</sub>
- Conclusion et perspectives

# Domaine de fonctionnement : claquage, maintien et homogénéité du plasma



➤ Domaine d'uniformité du plasma :

○ Puissance de 300 à 2000 W

○ Pression de 10 à 700 Pa (Ar)

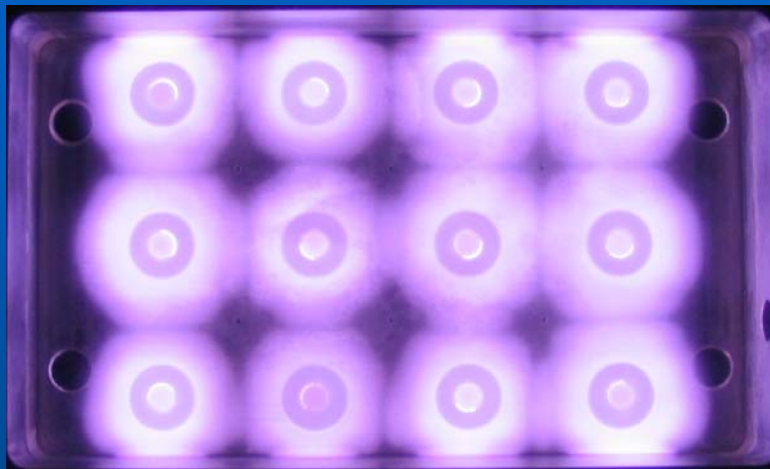


➤ Plasma homogène dans un domaine de pression étendu

➤ Efficacité maximum de

60 Pa à 200 Pa

# Uniformité visuelle du plasma en fonction de paramètres opératoires

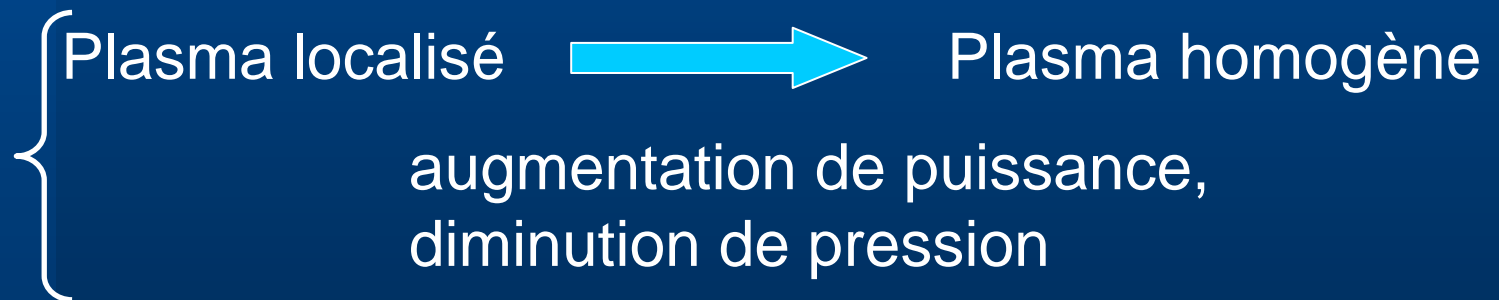


300 Pa, 650 W

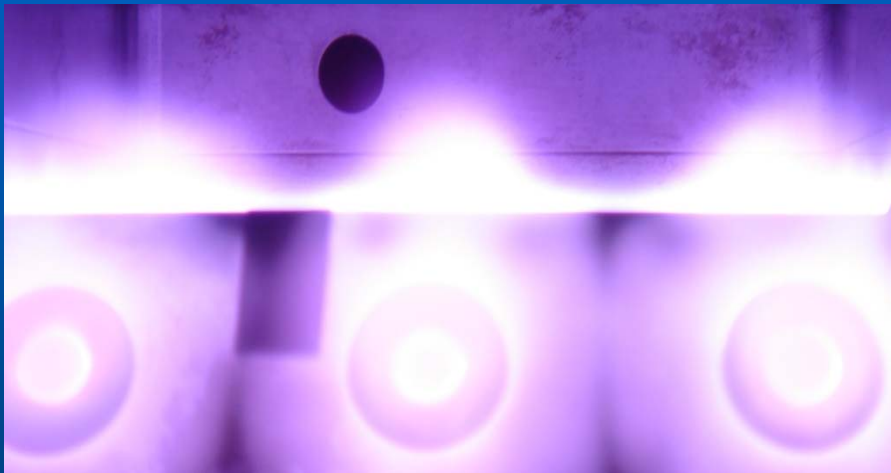


30 Pa, 1500 W

basse P  
haute  $p_{Ar}$



# Uniformité visuelle du plasma en fonction de paramètres opératoires



1050 Pa, 1950 W



100 Pa, 1000 W

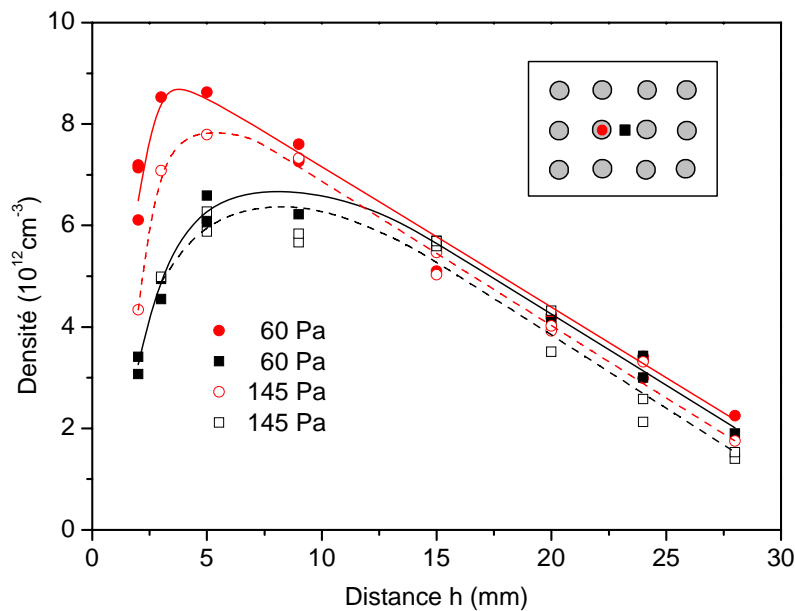


# Uniformité du plasma : caractérisation électrique (mesures par sonde de Langmuir)

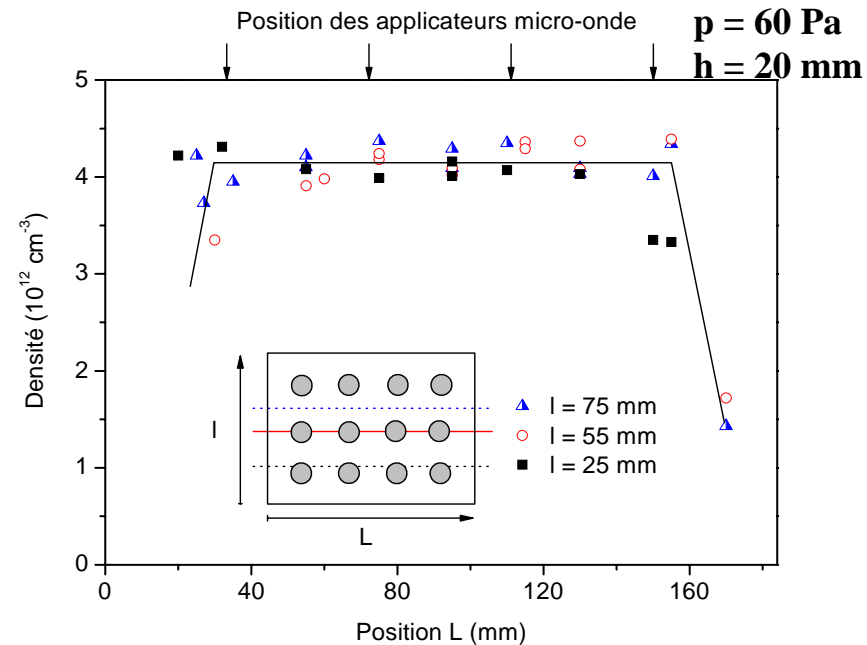
Densité plasma en fonction de la distance  $h$  du plan source

Densité plasma le long du réacteur

**P = 1200 W**



**P = 1200 W**  
**p = 60 Pa**  
**h = 20 mm**



➤ Plasma uniforme pour  $h > 15 \text{ mm}$

➤ Plasma homogène ( $\Delta n_i / n_i \pm 3,5 \%$ )  
excepté les effets de bords

# Distance (h) par rapport au plan source

## Uniformité du plasma

| Pression<br>Puissance | 30 Pa | 100 Pa | 260 Pa | 500 Pa | 700 Pa |
|-----------------------|-------|--------|--------|--------|--------|
| 500 W                 | 19 mm | 25 mm  | /      | /      | /      |
| 1000 W                | 17 mm | 15 mm  | 17 mm  | /      | /      |
| 1500 W                | 15 mm | 15 mm  | 15 mm  | /      | /      |
| 1800 W                |       | 15 mm  | 15 mm  | 27 mm  | /      |

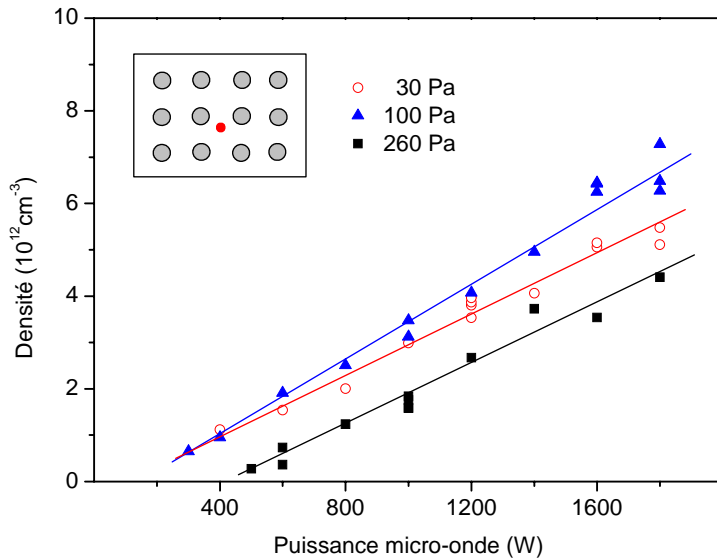
➤ Pour  $h > 20$  mm le plasma est homogène sur une large gamme de pression

# Sources plasma microonde haute densité distribuées dans une configuration matricielle

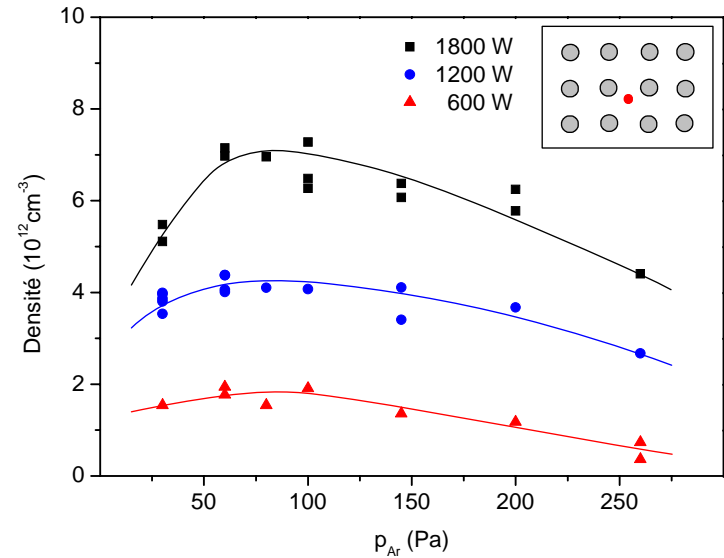
- Conception du réacteur
- Domaines de fonctionnement et d'homogénéité du plasma
- **Caractéristiques électriques d'un plasma d'argon**
  - $n_i = f(P_w, p_{Ar})$
  - $T_e, V_p, V_f$  en volume et près du plan source
- Applications aux procédés
  - Gravure de résine par plasma d'oxygène
  - Caractéristiques de dépôts obtenus à partir des plasmas de mélange TMS + O<sub>2</sub> et TMS + N<sub>2</sub>
- Conclusion et perspectives

# Caractérisation électrique du plasma à distance du plan source fixée ( $h = 20$ mm)

Densité plasma en fonction de la puissance incidente



Densité plasma en fonction de la pression

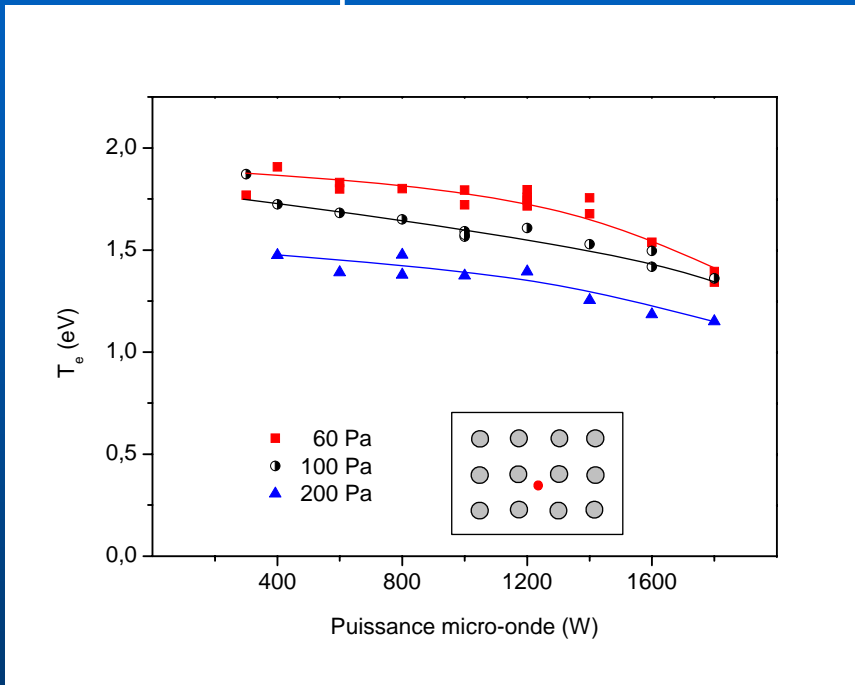


- Densité plasma  $\propto$  Puissance
- Densité  $> 10^{12} \text{ cm}^{-3}$

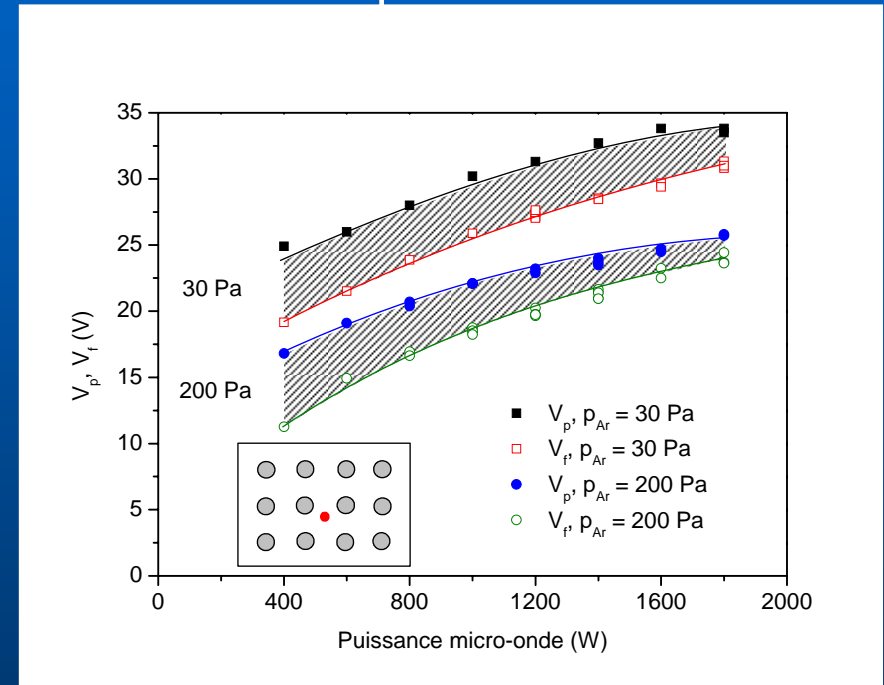
- $p_{Ar} < 75$  Pa : transfert d'énergie e-N plus efficace  $\Rightarrow n_i$  augmente
- $p_{Ar} > 75$  Pa :  $\Lambda_D$  diminue  $\Rightarrow n_i$  diminue

# Caractérisation électrique du plasma à distance du plan source fixée ( $h = 20$ mm)

Température électronique en fonction de la puissance incidente



Potentiels plasma et flottant en fonction de la puissance incidente



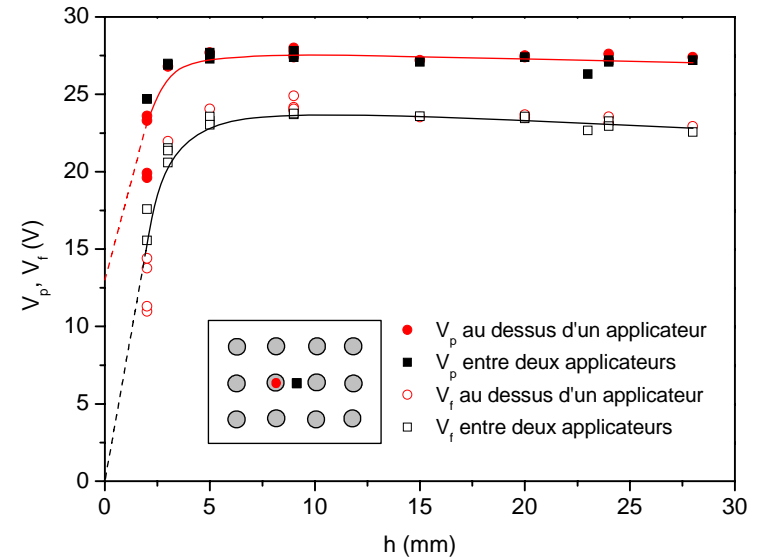
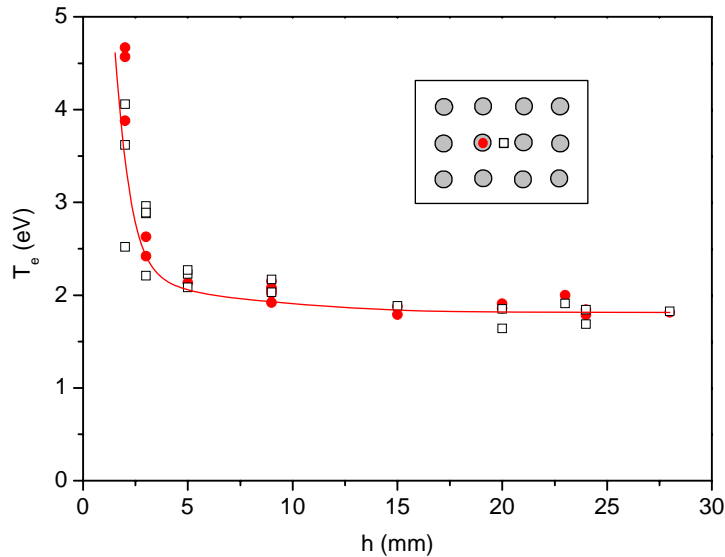
➤ A pertes constantes,  $T_e$  diminue quand  $P$  augmente  $\Rightarrow \theta_a$  diminue  $\Rightarrow$  ionisation par étapes ?

➤  $(V_p - V_f)$  imposé par  $T_e$  :  
 ○ diminution quand  $p_{Ar}$  augmente  
 ○ diminution quand  $P$  augmente

➤ Pourquoi  $V_p$  et  $V_f$  si grands ?

# Température électronique et potentiels en fonction de la distance du plan source

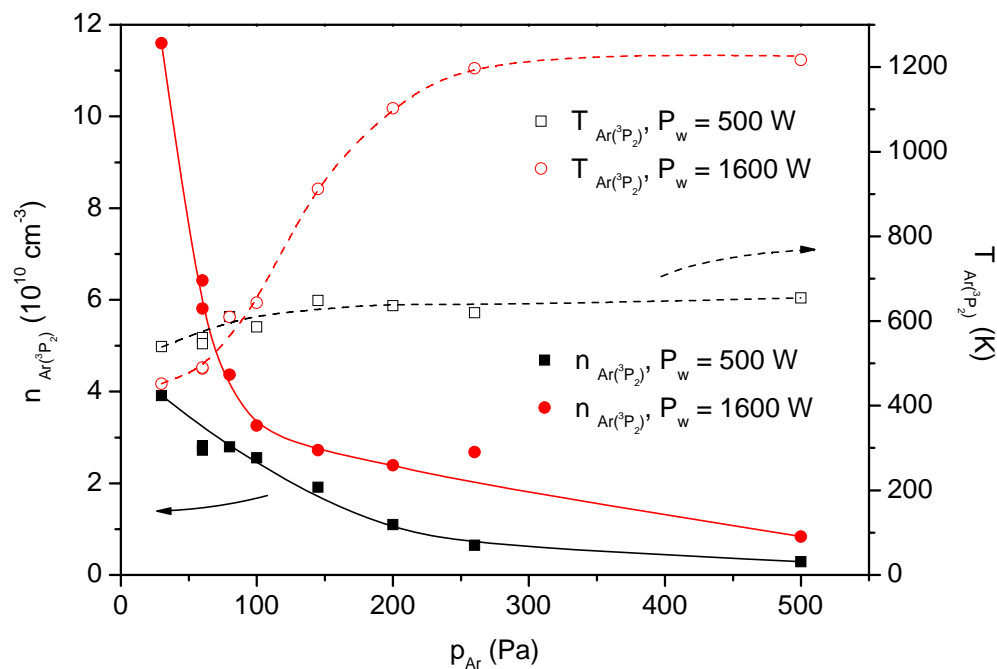
**P = 1200 W**  
**p = 60 Pa**



- $T_e$  grand dans la zone du plan source (fort champ HF)
- $T_e =$  valeur dans le corps du plasma à partir de  $h \geq \delta$  (épaisseur de peau)

- $(V_p - V_f)$  imposé par  $T_e \Rightarrow V_p$  poussé vers hautes valeurs par rapport à  $V_f \approx 0$  au niveau du plan source
- $V_p = \max$  à  $h \approx \delta$  où  $n_i = \max$

# Température et concentration de métastables Ar ( $^3P_2$ ) à distance $h = 20$ mm du plan source



➤ Concentration significative de  $[Ar (^3P_2)] \Rightarrow$  ionisation par étapes

➤ Augmentation de pression

➤  $[Ar (^3P_2)]$  diminue car l.p.m. des électrons chauds diminue

➤  $T_g$  augmente par augmentation transfert d'énergie collisionnelle e-neutre

# Sources plasma microonde haute densité distribuées dans une configuration matricielle

- Conception du réacteur
- Domaines de fonctionnement et d'homogénéité du plasma
- Caractéristiques électriques d'un plasma d'argon
  - $n_i = f(P_w, p_{Ar})$
  - $T_e, V_p, V_f$  en volume et près du plan source
- Applications aux procédés
  - Gravure de résine par plasma d'oxygène
  - Caractéristiques de dépôts obtenus à partir des plasmas de mélange TMS + O<sub>2</sub> et TMS + N<sub>2</sub>
- Conclusion et perspectives

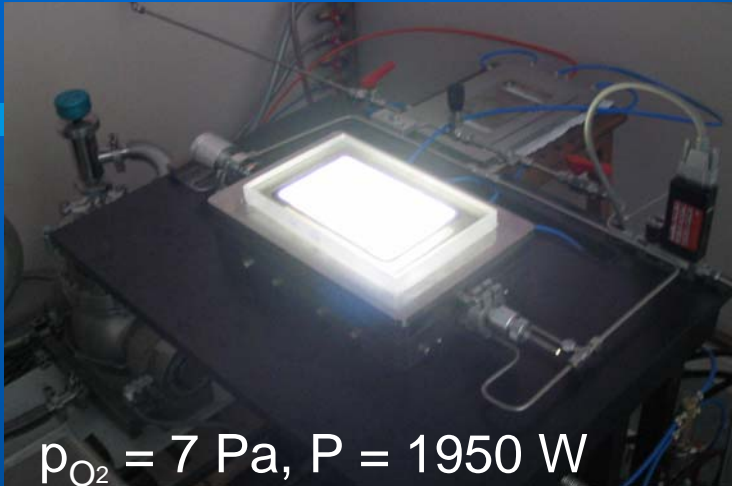


# Réacteur en configuration planaire matricielle

## Procédés

- Gravure de résine
  - Plasma  $O_2$
  
- Dépôt SiCOH et SiCNH/ Si
  - Plasma de mélange TMS +  $O_2$
  - Plasma de mélange TMS +  $N_2$
  
- Dépôt SiCOH et SiCNH/ Inox
  - Plasma de mélange TMS +  $O_2$
  - Plasma de mélange TMS +  $N_2$

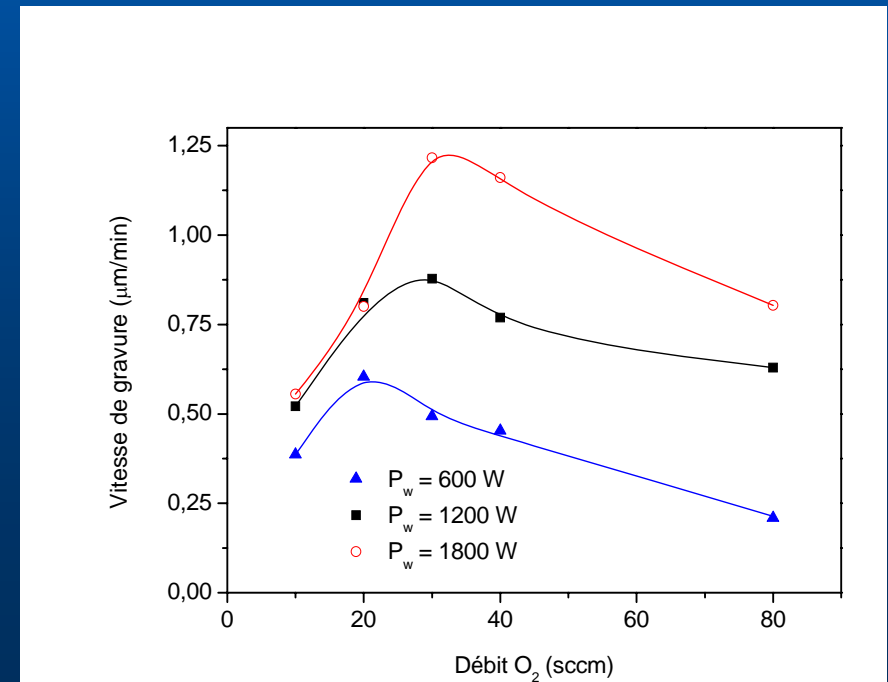
# Gravure de résine S1818, (h = 30 mm)



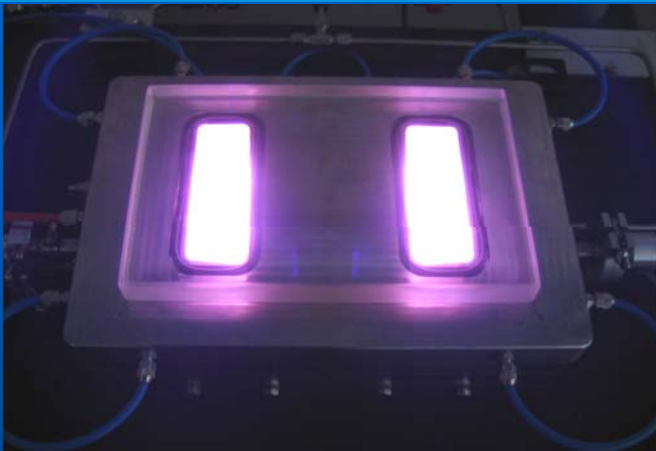
## ➤ Plasma $O_2$

- $p_{O_2} = 7 - 25 \text{ Pa}, P = 400 - 1950 \text{ W}$
- $n_i = 2 \cdot 10^{11} - 10^{12} \text{ cm}^{-3}$
- $T_e = 1,7 - 2,2 \text{ eV} (V_p = 30 - 50 \text{ V})$

## ➤ Vitesse de Gravure



# Dépôt SiCOH par plasma de mélange TMS + O<sub>2</sub>



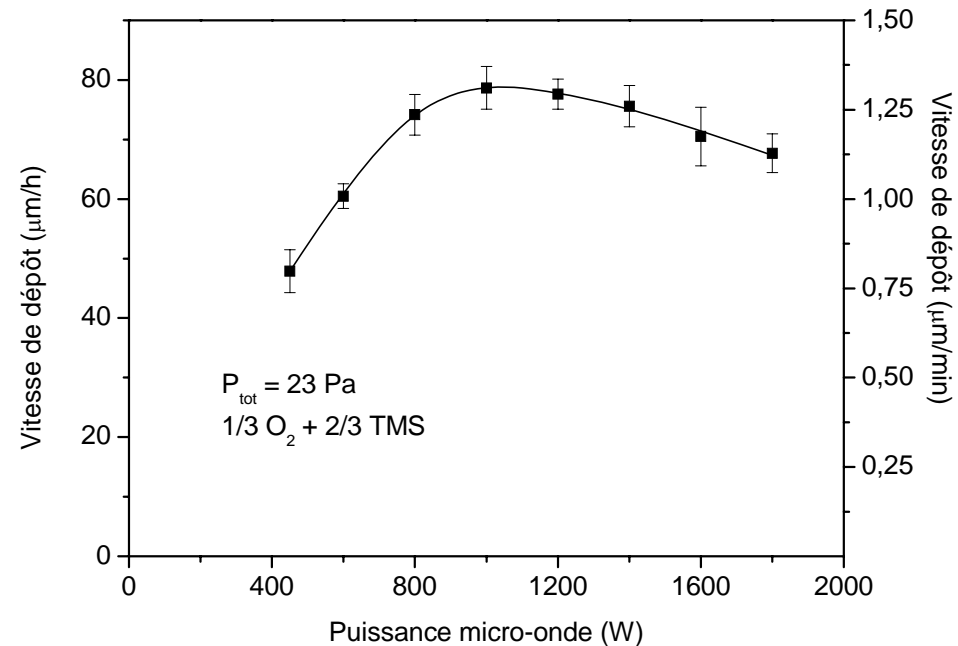
$P = 1950 \text{ W}$ ,

$p = 23 \text{ Pa}$  (1/3 O<sub>2</sub>, 2/3 TMS)

Substrat au potentiel flottant

Vitesse de dépôt en fonction de la puissance

SiCOH/Si

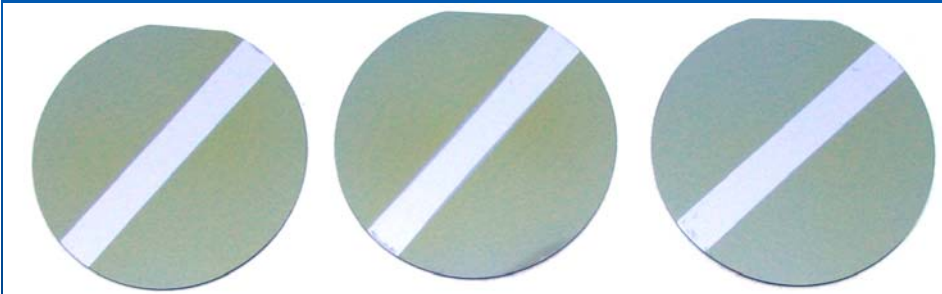
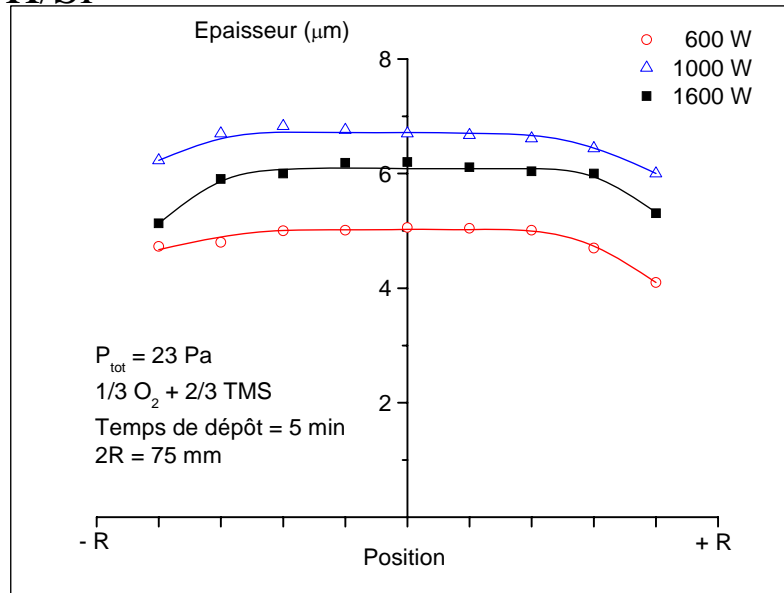


- Grande vitesse de dépôt : jusqu'à 1,3  $\mu\text{m} / \text{min}$  sur Si ( $h = 40 \text{ mm}$ )  
et 2  $\mu\text{m} / \text{min}$  sur inox ( $h = 30 \text{ mm}$ )

# Dépôt SiCOH par plasma de mélange TMS + O<sub>2</sub>

## Uniformité du dépôt

SiCOH/Si



$p_{\text{O}_2} = 7,7 \text{ Pa}$   
 $p_{\text{TMS}} = 15,3 \text{ Pa}$   
 $P = 800 \text{ W}$

$p_{\text{O}_2} = 7,7 \text{ Pa}$   
 $p_{\text{TMS}} = 15,3 \text{ Pa}$   
 $P = 1200 \text{ W}$

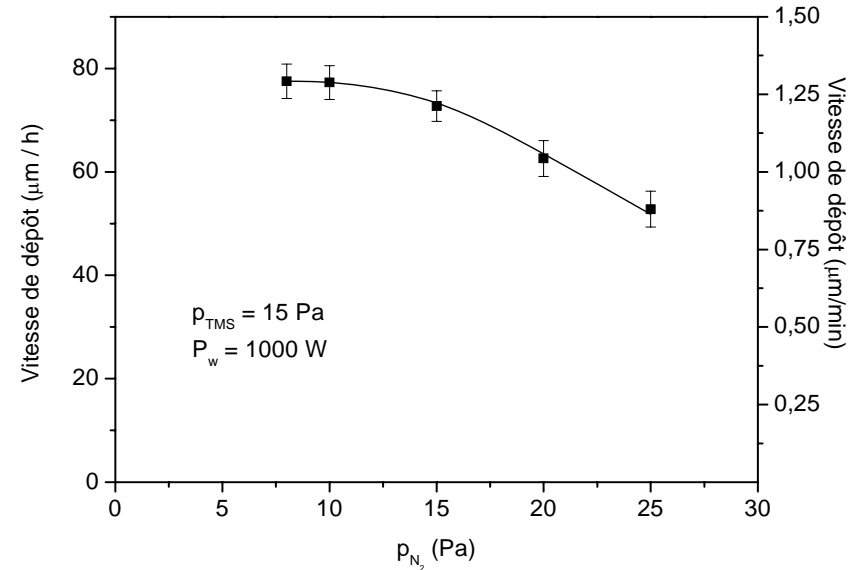
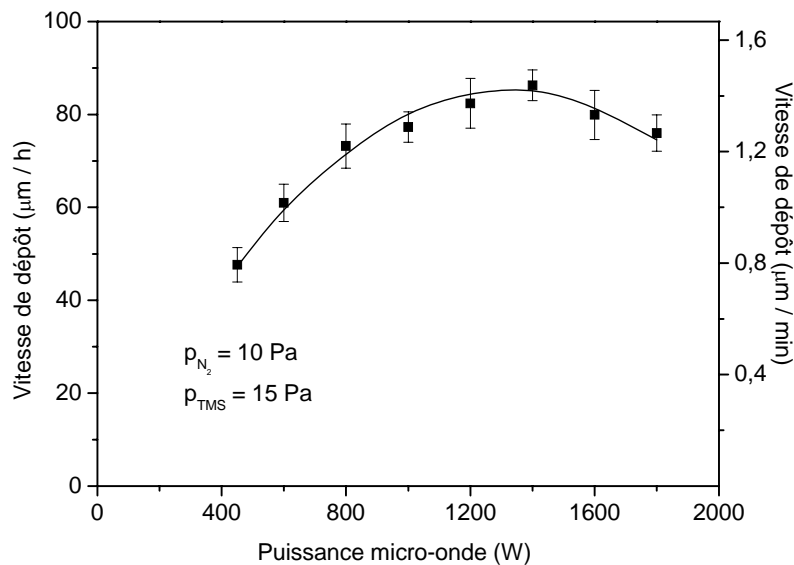
$p_{\text{O}_2} = 10 \text{ Pa}$   
 $p_{\text{TMS}} = 20 \text{ Pa}$   
 $P = 1000 \text{ W}$

- Bonne uniformité de dépôt excepté les effets de bord,  $\Delta e / e = 5\%$ , (limite du plasma uniforme)

# Dépôt SiCNH par plasma de mélange TMS + N<sub>2</sub>

## Vitesse de dépôt

### SiCNH/Si

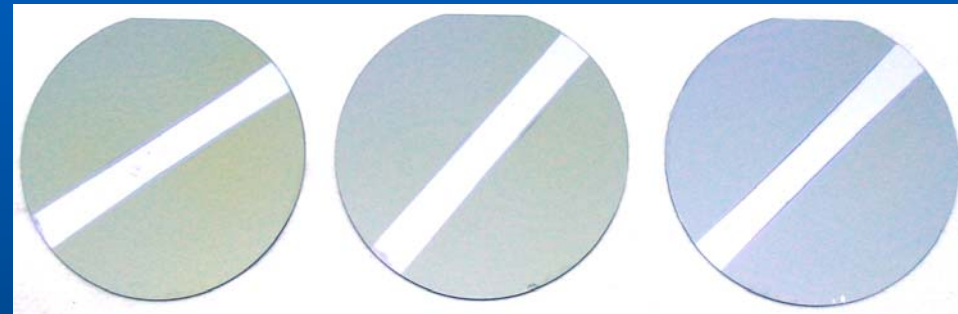
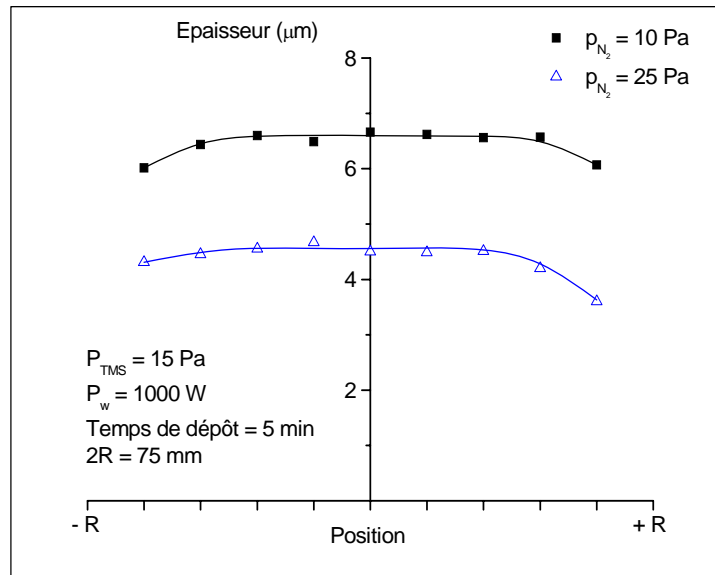


- Grande vitesse de dépôt : jusqu'à 1,4 µm / min sur Si (h = 40 mm)  
et 1,8 µm / min sur inox (h = 30 mm)

# Dépôt SiCNH par plasma de mélange TMS + N<sub>2</sub>

## Uniformité du dépôt

SiCOH/Si



$p_{\text{N}_2} = 15 \text{ Pa}$   
 $P_{\text{TMS}} = 15 \text{ Pa}$   
 $P = 1000 \text{ W}$

$p_{\text{N}_2} = 20 \text{ Pa}$   
 $P_{\text{TMS}} = 15 \text{ Pa}$   
 $P = 1000 \text{ W}$

$p_{\text{N}_2} = 10 \text{ Pa}$   
 $P_{\text{TMS}} = 15 \text{ Pa}$   
 $P = 450 \text{ W}$

➤ Bonne uniformité de dépôt excepté les effets de bord ( $\Delta e / e = 5\%$ )

# Sources plasma microonde haute densité distribuées dans une configuration matricielle

- Conception du réacteur
- Domaines de fonctionnement et d'homogénéité du plasma
- Caractéristiques électriques d'un plasma d'argon
  - $n_i = f(P_w, p_{Ar})$
  - $T_e, V_p, V_f$  en volume et près du plan source
- Applications aux procédés
  - Caractéristiques électriques d'un plasma d'oxygène
  - Caractéristiques de dépôts obtenus à partir des plasmas de mélange TMS + O<sub>2</sub> et TMS + N<sub>2</sub>
- Conclusion et perspectives

# Conclusion

## ● Plasma

- Haute densité ( $n_i \geq 10^{12} \text{ cm}^{-3}$ )
- Uniformité du plasma (3,5%) à partir d'une distance du plan source > 20 mm
- Domaine de pression qq 10 Pa à qq 100 Pa
- Pas de couplage électromagnétique entre sources (atténuation du champ électrique sur épaisseur de peau)
  - pas de problème d'adaptation d'impédance
  - pas de problème d'augmentation de la surface utile de la nappe du plasma par augmentation du nombre de sources

## ● Procédés

- Grande vitesse de dépôt (de  $1,4 \mu\text{m} / \text{min}$  sur Si à  $2 \mu\text{m} / \text{min}$  sur inox)
- Uniformité (5 %)
- Grandes surfaces par extension d'échelle



# Perspectives (court terme)

- Plasma
  - compréhension et interprétation des résultats expérimentaux (métastables)
  - modélisation
  
- Procédés
  - analyse de la structure et de la composition des couches
  - analyse des propriétés mécaniques / anticorrosion

# Perspectives

- Plasma multidipolaire

$$10^{-4} < p < 10^{-2} \text{ Torr}$$



- Plasma matriciel

$$10^{-1} < p < 10 \text{ Torr}$$

- Nouvelles configurations

$$10^{-4} < p < 10 \text{ Torr}$$

(ANR PLASMODIE)