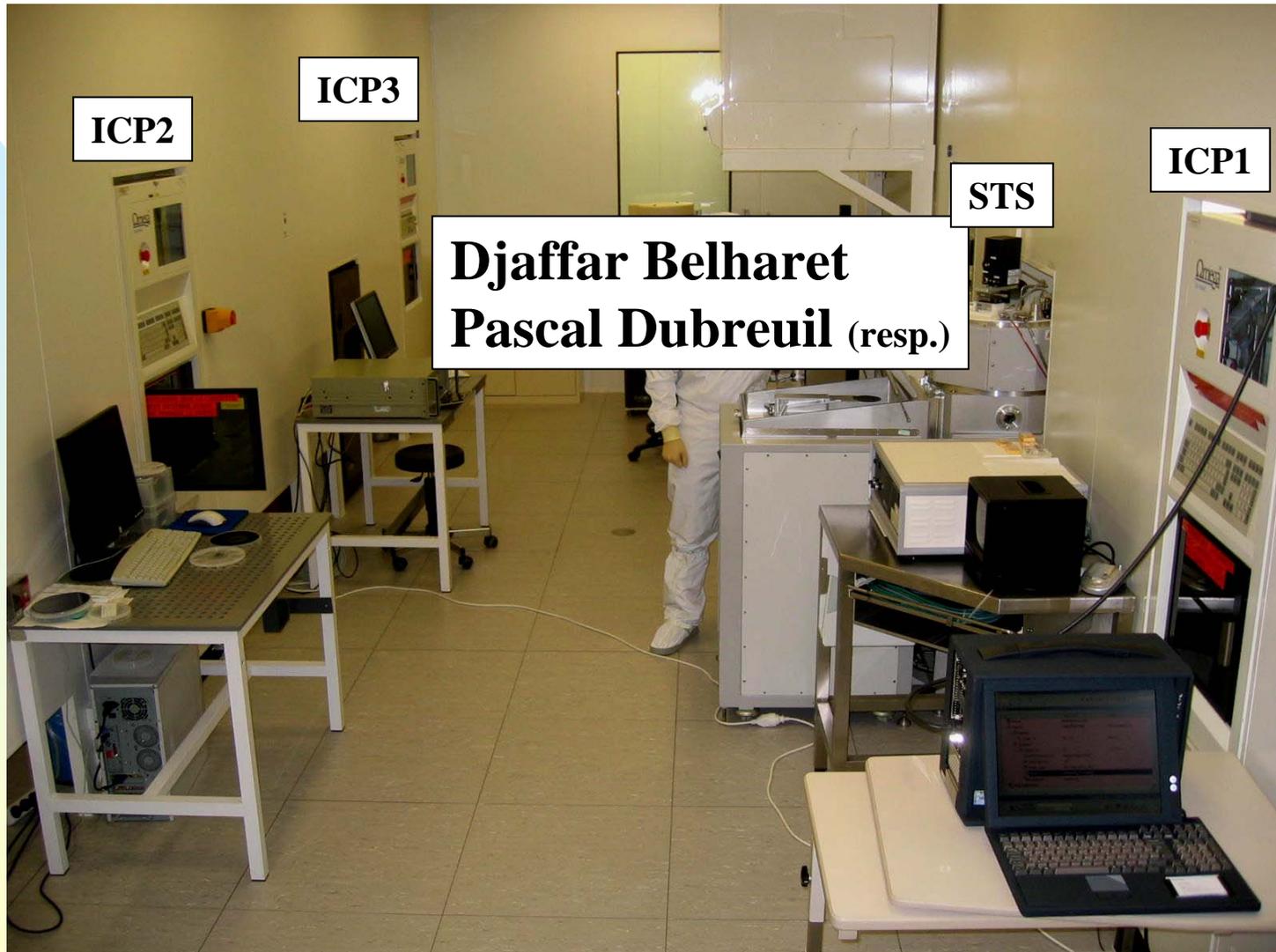


# La gravure sèche par plasma

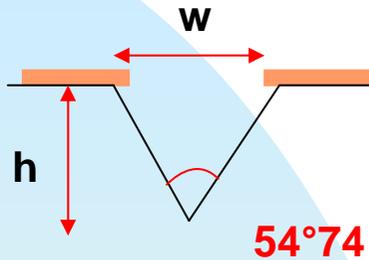


# Plan

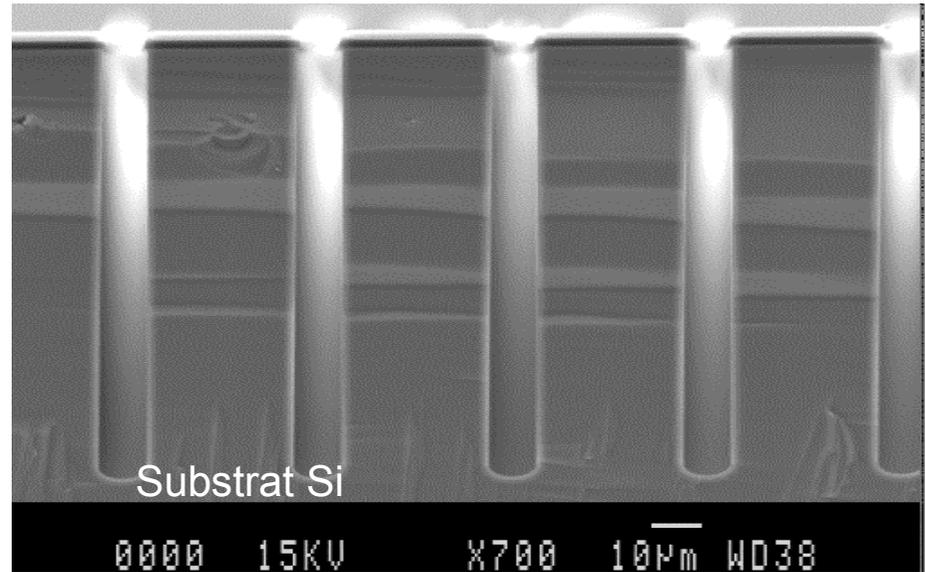
- **Pourquoi la gravure sèche par plasma ?**
- **La gravure par plasma : définitions et propriétés**
- **Sources et équipements plasma pour la gravure**

---
- **La gravure par plasma et technologie  $\mu$ -optoélectronique**
- **La gravure par plasma et  $\mu$ ,nanotechnologies**
- **Détection fin d 'attaque de la gravure par plasma**

# Pourquoi la gravure sèche par plasma ? (1)



Gravure chimique humide



Gravure physico-chimique « sèche »

- meilleur transfert d'un motif au travers d'un masque (cas  $w < \mu\text{m}$ )
- anisotrope
- rapide ( $\text{XXX nm. min}^{-1} < v_g < \text{x } \mu\text{m. min}^{-1}$ )
- sélective (matériau d'arrêt, matériau/masque)
- reproductible
- matériaux à graver :  $\text{nm} < e_p < \text{mm}$   
Si, polySi,  $\text{Si}_3\text{N}_4$ ,  $\text{SiN}_x$ ,  $\text{SiO}_{2\text{th}}$ ,  $\text{SiO}_{2\text{pecvd}}$ , Ga(Al)As, InP, GaSb, diamant, verre résine, BCB, métaux...
- masque de gravure :  $\text{nm} < e_p < \text{XX}\mu\text{m}$   
AZ1529, AZ4562, solgel,  $\text{SiO}_2$ , métaux

# Pourquoi la gravure sèche par plasma ? (2)

- critères de gravure

- Sélectivité :

matériau à graver / matériau arrêt (ex :silicium/oxyde)

matériau à graver / résine



$e_{\text{gravée masque}} \ll e_{\text{matériau gravé}} \rightarrow$  gravure sélective

$e_{\text{gravée masque}} \sim e_{\text{matériau gravé}} \rightarrow$  gravure non sélective

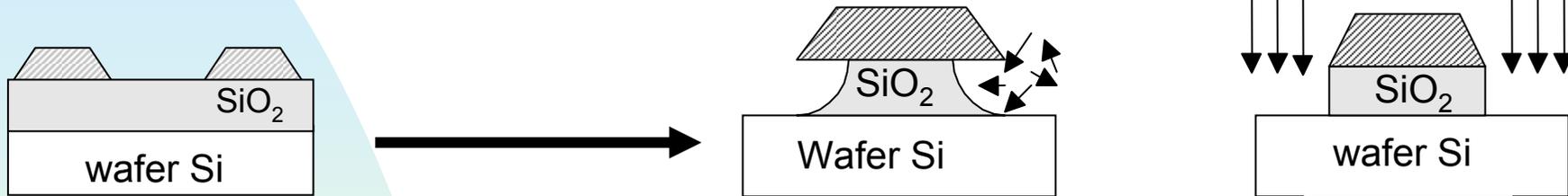
$e_{\text{gravée matériau arrêt}} \ll e_{\text{matériau gravé}} \rightarrow$  gravure sélective

$e_{\text{gravée matériau arrêt}} > e_{\text{matériau gravé}} \rightarrow$  gravure non sélective ou faible sélectivité

# Pourquoi la gravure sèche par plasma ? (3)

## ■ critères de gravure

- Anisotropie : profil de tranchée à flancs droits



$e_{\text{gravure latérale}} \sim e_{\text{couche gravée}} \rightarrow$  isotrope (flanc arrondi)

$e_{\text{gravure latérale}} \ll e_{\text{couche gravée}} \rightarrow$  anisotrope (flanc droit)

- Uniformité : f(dimension motif et répartition bord et centre wafer)

- Procédé « reproductible » : conditions de gravure identiques + préparation wafer

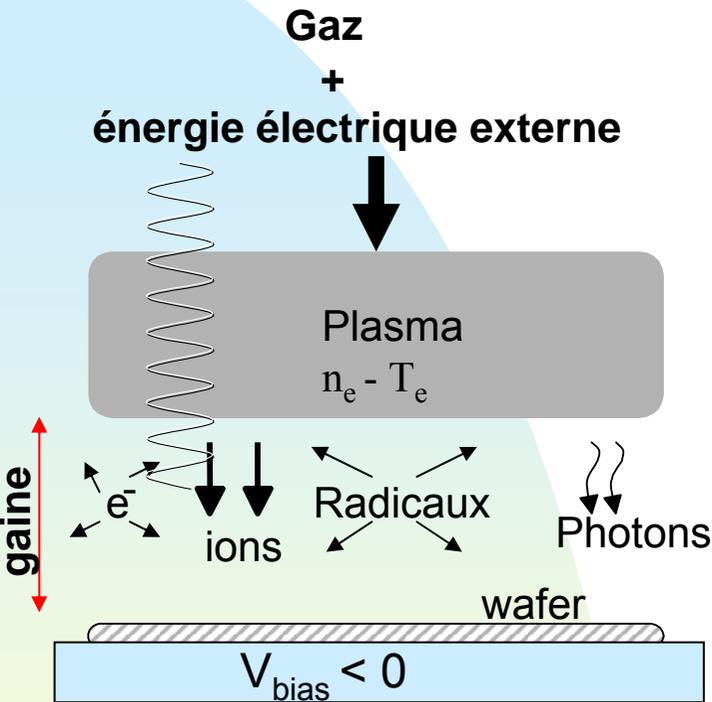
# Plan

- Pourquoi la gravure sèche par plasma ?
- **La gravure par plasma : définitions et propriétés**
- Sources et équipements plasma pour la gravure
- La gravure par plasma en technologie  $\mu$ électronique
- La gravure par plasma en technologie MEMS
- Détection fin d 'attaque de la gravure par plasma

# La gravure sèche par plasma : définitions et propriétés (1)

- **Gravure** : réaction en surface du matériau à graver avec des espèces chimiques ou/et physiques pour enlever une partie du matériau quelque soit son orientation cristalline, délimité par un masquage.
- **Sèche** : contrairement à une gravure humide chimique, le milieu de réaction est gazeux.
- **Plasma** : procédé de transformation d'un gaz en « milieu réactif » et moteur de la gravure pour fournir des produits de réaction + ou - volatils.

# La gravure sèche par plasma : définitions et propriétés (2)



- **Plasma froid basse pression :** milieu ionisé confiné sous vide
  - atomes, molécules, **radicaux** :  $N_g$
  - **ions** positifs et négatifs :  $n_i$
  - électrons :  $n_e$
  - photons (luminescence du plasma).
- **Plasma de gravure :**  
plasma obtenu avec sources électriques (DC, BF, RF,  $\mu$ Onde) + électrodes à  $1-10^{-4}$  Torr  
→ agents de gravure (ions + radicaux)
- **Propriétés :**
  - pas de contact avec les parois, wafer →  $\exists$  gaine ( $-V_{\text{bias}}$ )
  - électriquement conducteur  $v_e \gg v_i$  ( $E \neq 0$  V/cm)
  - macroscopiquement neutre  $n_i \approx n_e$
  - coef. ionisation  $\alpha$
- **Rôle des électrons :**
  - Il faut beaucoup  $e^-$  → source d'ions et de radicaux
  - création ion/  $e^- \geq$  perte ion/  $e^-$  → plasma auto-entretenu

# La gravure sèche par plasma : définitions et propriétés (3)

## ■ gravure par plasma : rôle des radicaux du plasma

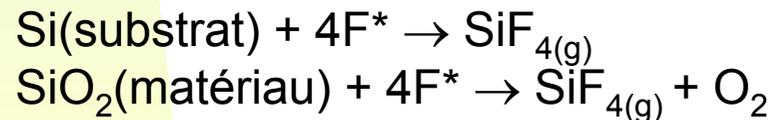
- La gravure par plasma est une attaque physico-chimique du matériau avec des **radicaux** assistés par les **ions** issus du plasma. Les produits de réaction sont généralement volatils et pompés en dehors de la chambre de gravure.

- Les **radicaux**  $\text{R}^\bullet$  sont des fragments de molécules de gaz dans un niveau d'énergie plus élevé. Ils sont chimiquement réactifs avec le matériau à graver. Ils donnent la composante chimique spontanée à la gravure (on dit gravure isotrope).

- Les mécanismes de réaction avec le matériau à graver sont :

- adsorption en surface
- formation des produits de réaction
- désorption des produits de réaction

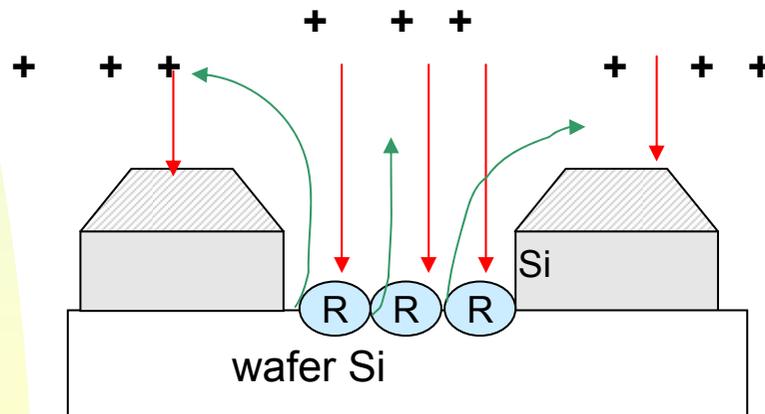
Ex : gravure du silicium et de l'oxyde de silicium dans un plasma fluoré



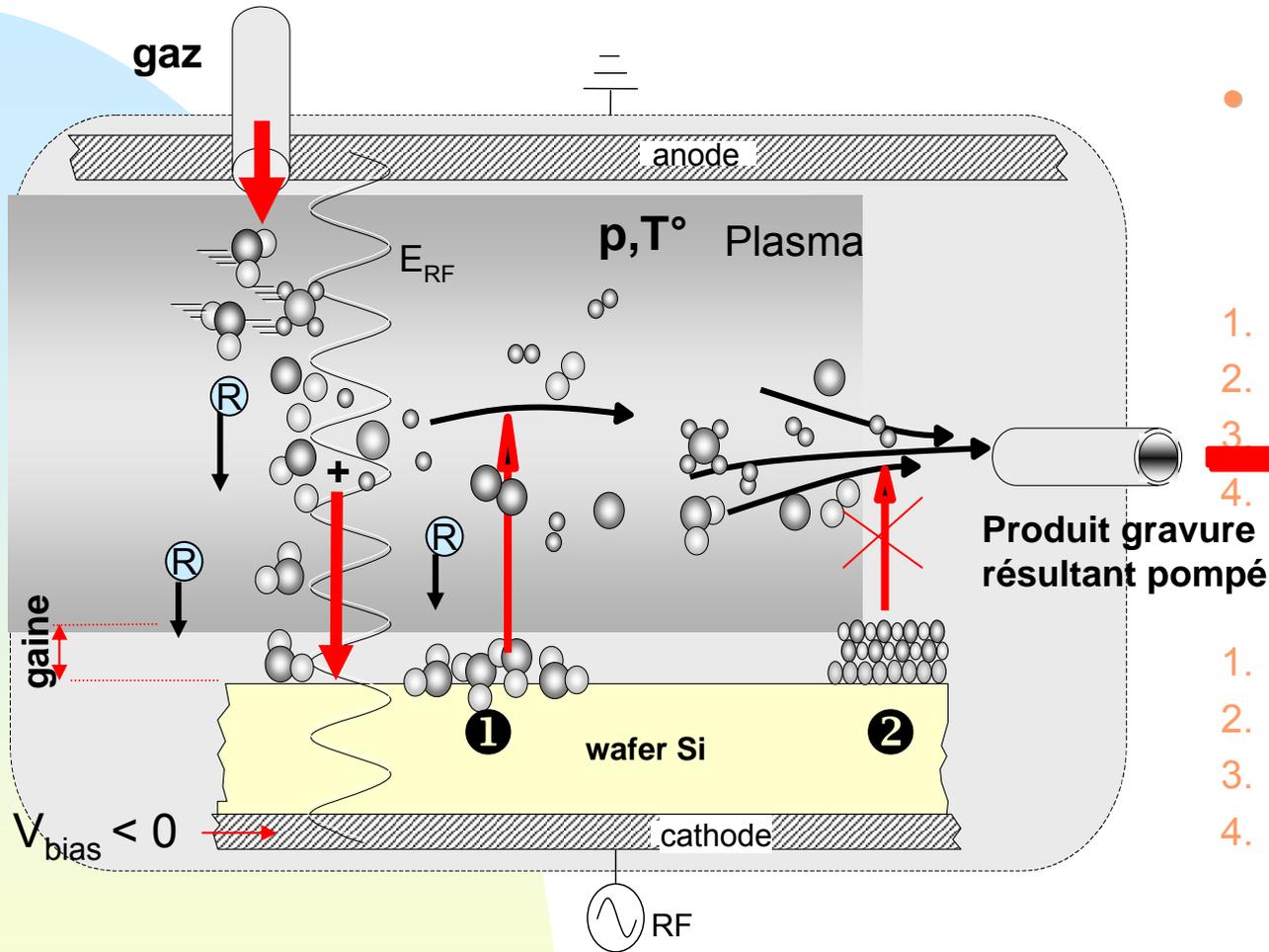
# La gravure sèche par plasma : définitions et propriétés (4)

## ■ gravure par plasma : rôle des ions du plasma

- Les **ions +** sont issus de l'ionisation des molécules de gaz par les électrons. Ils sont accélérés dans la gaine par la tension d'autopolarisation ( $-V_{\text{bias}}$ ) vers le matériau à graver et le bombardent. Ils donnent la composante physique de la gravure (on dit gravure anisotrope).
- Les mécanismes de réaction des ions avec le matériau à graver sont :
  - activation chimique de la surface du matériau (source de radicaux, formation des produits de réaction)
  - pulvérisation de la surface du matériau (désorption des produits de réaction)
  - pulvérisation du masque de gravure !!!!!



# La gravure sèche par plasma : définitions et propriétés (5)



## Étapes de la gravure :

### Formation plasma

1. Arrivée des gaz
2. Collisions électrons/ gaz
3. Formation radicaux et ions (gaine)
4. Adsorption en surface du wafer

### Gravure

1. Réactions de surface ① ou ②
2. Bombardement ionique  $\perp$
3. Désorption produits de réactions
4. Pompage des produits volatils

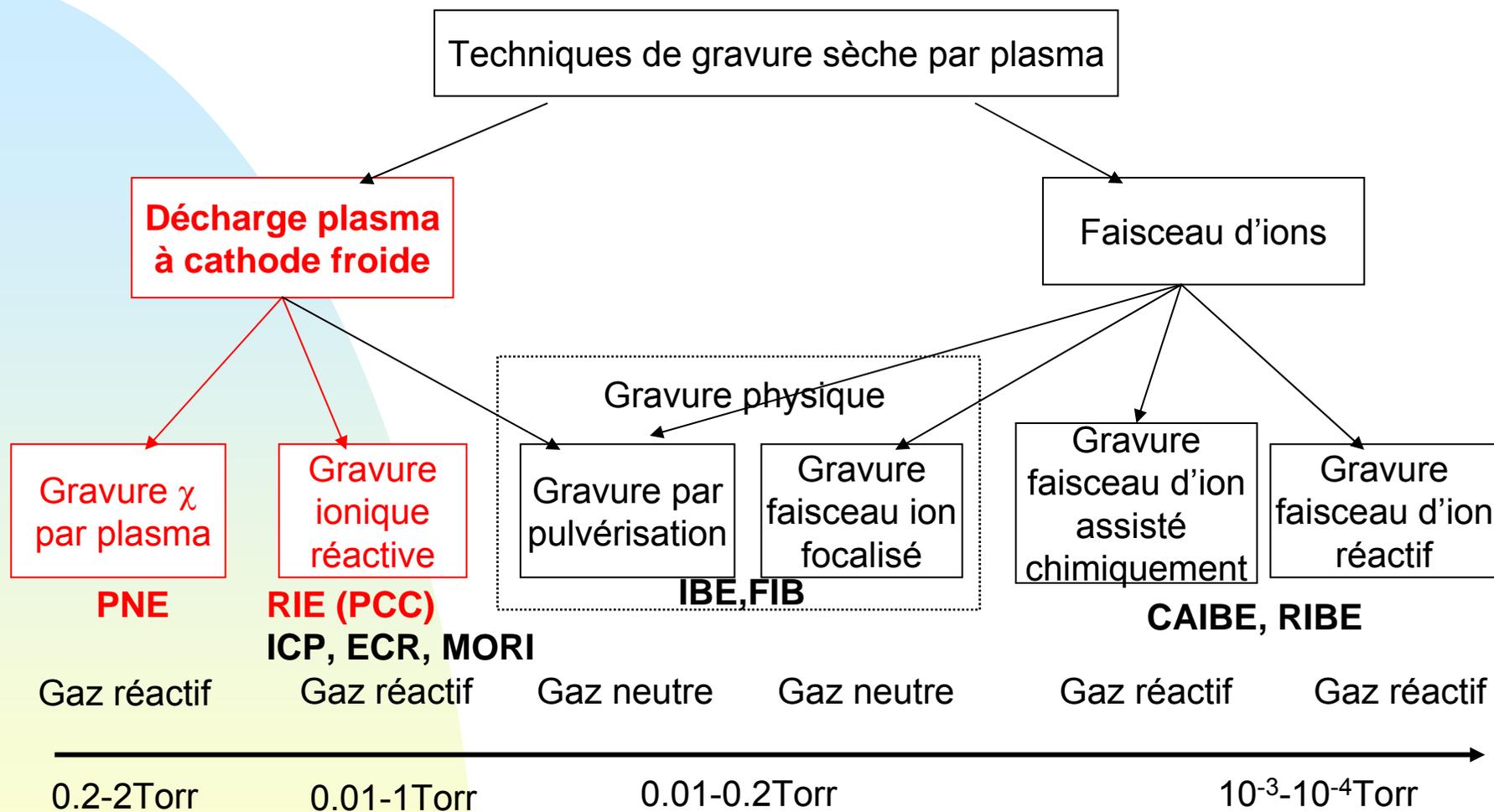
L'étape la plus lente domine le procédé de gravure plasma

# Plan

- Pourquoi la gravure sèche par plasma ?
- La gravure par plasma : définitions et propriétés
- **Sources et équipements plasma pour la gravure**

---
- La gravure par plasma en technologie  $\mu$ électronique
- La gravure par plasma en technologie MEMS
- Détection fin d 'attaque de la gravure par plasma

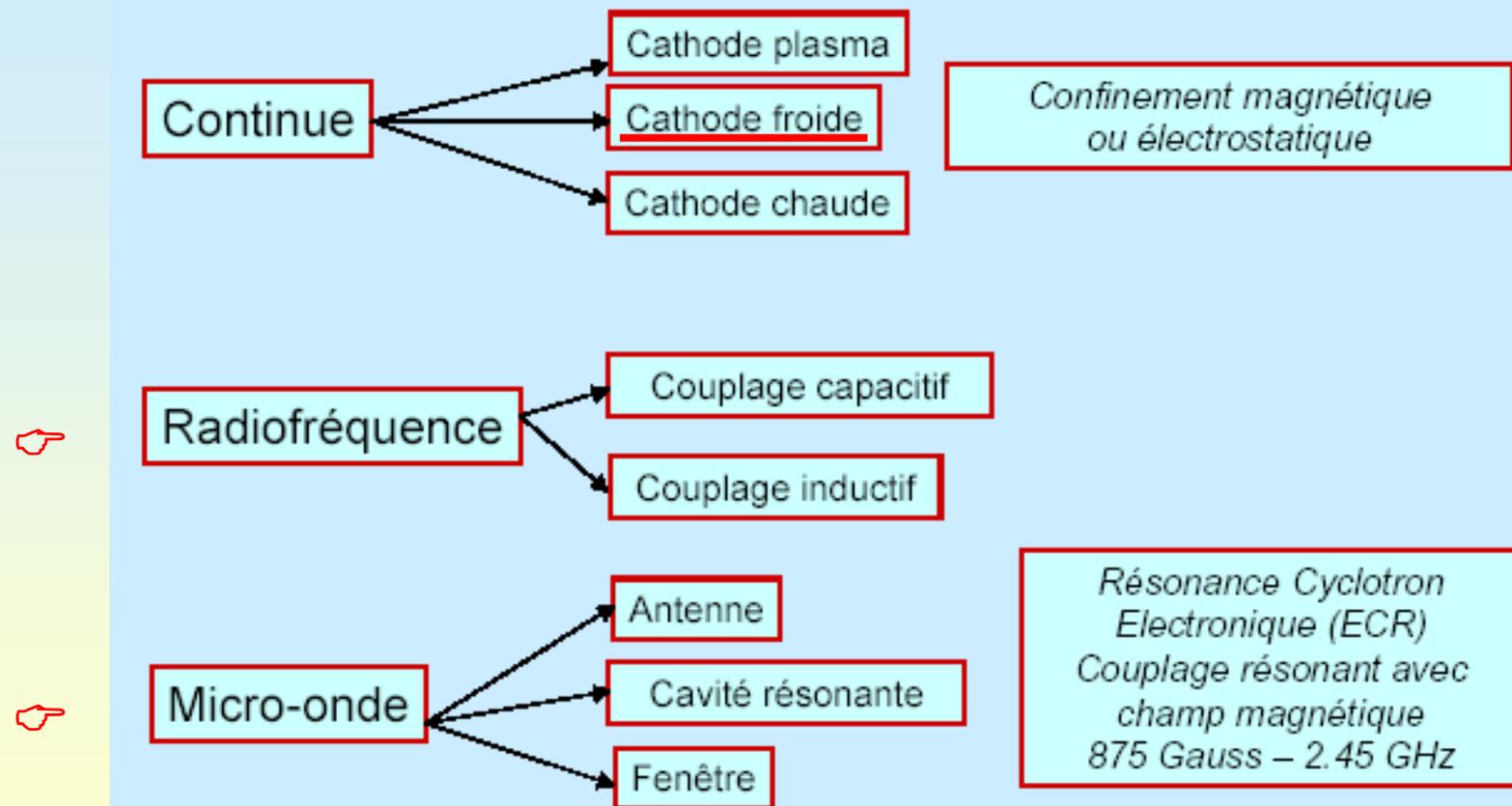
# Sources et équipements plasma pour la gravure (1)



**Salle blanche du LAAS : 4 ICP, 1 PNE**

## Sources et équipements plasma pour la gravure (2)

### Mode d'excitation du plasma

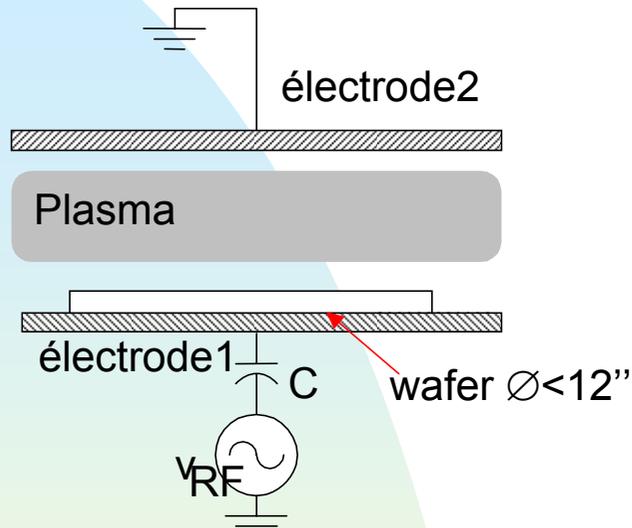


# Sources et équipements plasma pour la gravure (4)

## Deux familles d'équipements : PCC et HDP

	PCC			HDP	
	PNE	RIE (LAAS)	ICP (LAAS)	ECR	MORI (helicon)
P (mtorr)	100-1000	10-100	5-30	1-10	1-100
Lpm e- (mm)	0.2	2	50	50	2
E <sub>ion</sub> (eV) V <sub>bias</sub>	20	<500	<100	<50	Contrôlable
Fréq exc. MHz	RF 13.56	RF 0.4 -13.56	RF 0.4 -13.56	μondes 2.45GHz	RF13.56 27.12GHz
n <sub>e</sub> (cm <sup>-3</sup> )	10 <sup>9</sup>	≤ 10 <sup>10</sup>	5.10 <sup>11</sup>	5.10 <sup>11</sup>	5.10 <sup>12</sup>
α	10 <sup>-5</sup>	10 <sup>-5</sup>	10 <sup>-3</sup>	5.10 <sup>-3</sup>	5.10 <sup>-3</sup>
B	non	non	option	1-2kG	1-2kG
V <sub>g</sub> Si -V <sub>g</sub> SiO <sub>2</sub>	μm - ?	[0.2μm]	[0.1μm- 0.3μm]	[μm-0.1μm]	[μm-0.1μm]
Sélect / SiO <sub>2</sub>	élevée	[1-10]	[40]	élevée	-----

# Sources et équipements plasma pour la gravure (5)



## ■ Les réacteurs PCC planaires :

- multiplaques, monoplaque
- 2 électrodes internes // , (dis)symétriques
- $n_e < 10^{10} \text{cm}^{-3}$
- couplage capacitif à travers les gaines

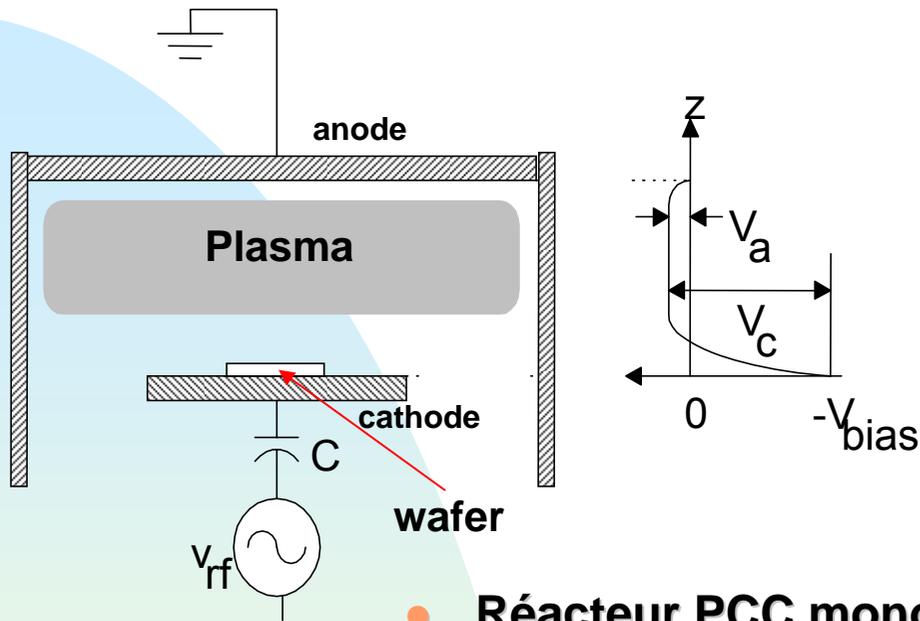
## ■ **Mode RIE (gravure physicochimique quasi-anisotrope)**

- électrode1 à  $V_{RF}$
- électrode2 à la masse

## ■ **Mode PNE (gravure chimique isotrope)**

- électrode1 à la masse
- électrode2 à  $V_{RF}$

# Sources et équipements plasma pour la gravure (6)



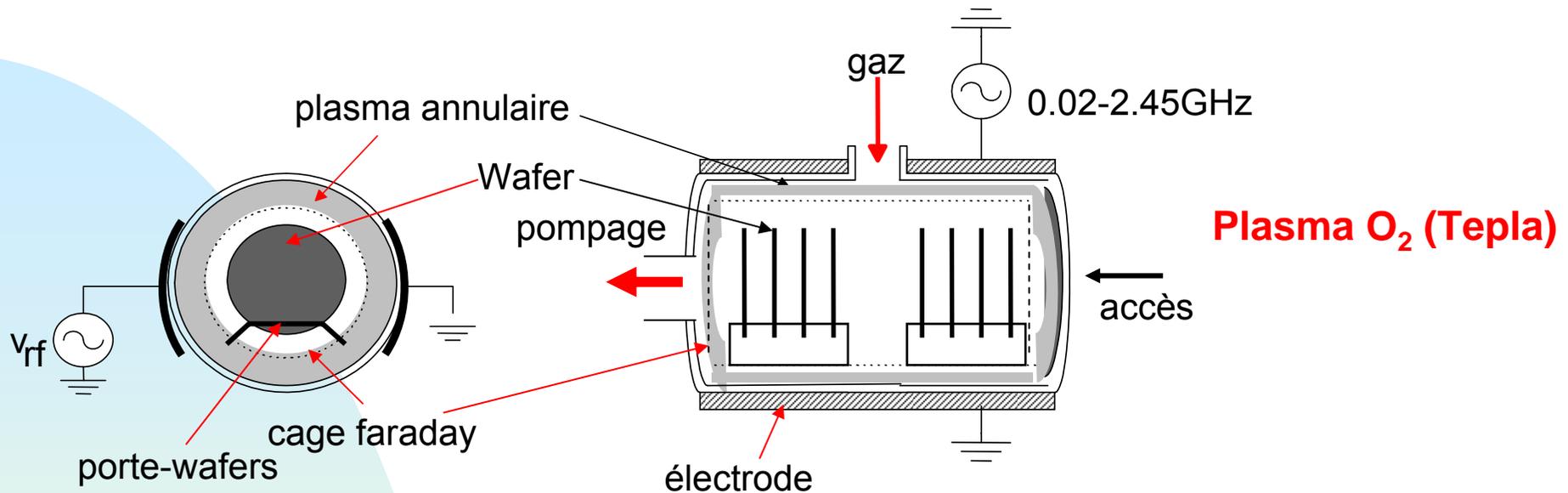
- **Réacteur PCC monoplate à électrodes dissymétriques : RIE**

- wafer sur petite électrode RF (cathode)
- la grande électrode à la masse (anode + paroi)
- $(-V_{bias}) = -(V_c - V_p) < 0 \rightarrow$  bombardement ionique  $\perp$  sur wafer
- $|V_{bias}| = f(\text{RF}, \rho, \text{surface électrode})$

- **Applications :**

- gravure **Sipoly**, **SiNx**, **Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>**, **SiO<sub>2</sub>**

# Sources et équipements plasma pour la gravure (7)



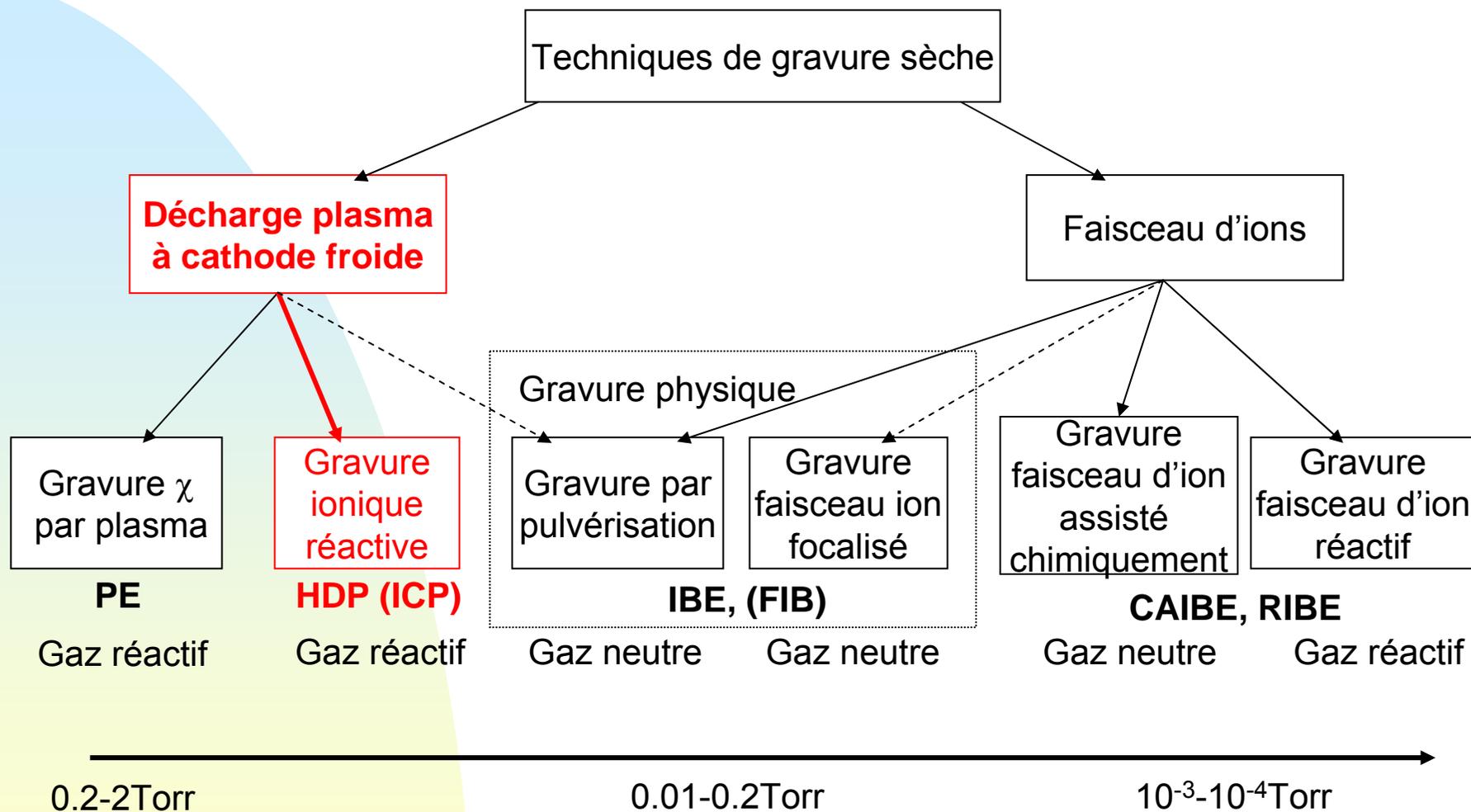
- **Les réacteurs tubulaires :**

- traitement multiplaques en mode PNE
- électrodes externes
- excités en RF : couplage capacitif, monde

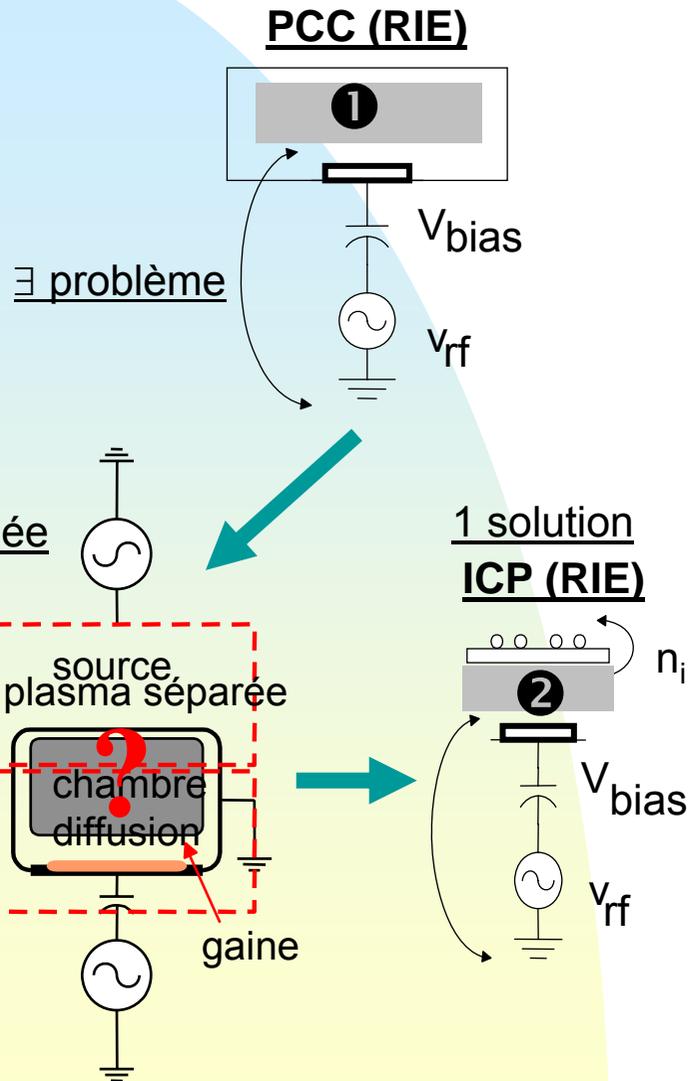
- **Applications :**

- délaquage de résine
- préparation/nettoyage de surface ( $\chi$  + cage faraday )
- structuration de surface (avec test de la goutte d'eau)

# Sources et équipements plasma pour la gravure (8)



# Sources et équipements plasma pour la gravure (9)



- Plasma à couplage capacitif (RIE) :  $e_{Si}$ ,  $e_{SiO_2} < \mu m$** 
  - $P_{RF}$  et  $V_{bias}$  sont « liés »
    - si  $P_{RF} \nearrow$  alors  $v_{gravure} \nearrow$  mais  $V_{bias} \nearrow$  (schéma ❶)
  - si  $p > 100 mTorr$ , difficulté de graver des motifs  $< 0.25 \mu m$ 
    - pb transfert  $P_{RF}$  dans le plasma ( $\alpha$  trop faible)
    - pb gravure anisotrope (gaine collisionnelle)
  - $V_{bias} \nearrow$  et  $p \nearrow$  : érosion et contamination des parois
- Exigences d'aujourd'hui : gravure  $e_{Si}$ ,  $e_{SiO_2} > \mu m$** 
  - on veut  $v_{gravure} \nearrow$  et  $V_{bias} \searrow$  et uniformité  $\nearrow$  ... comment ?
  - $n_e \nearrow$  (radicaux  $\nearrow$  + ions  $\nearrow$ )
  - traitement mono-plaque
  - sélectivité  $\nearrow$ , défauts  $\searrow$ ,  $p \searrow$
- Solution (s) :**
  - découpler  $V_{bias}$  et production des ions ( $P_{RF}$ ) (schéma ❷)
  - couplage capacitif RF indépendant plaque ( $V_{bias}$ )
  - plasma HDP  $n_e > 10^{10} cm^{-3}$  et  $p < 50 mtorr$
  - source ICP, ECR, MORI

# Sources et équipements plasma pour la gravure (10)

salle blanche

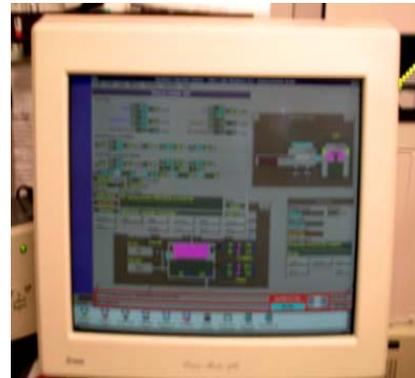


## STS : ICP multiplex

x1

- Plasma HDP : ICP
  - pression : <50 mTorr
  - source RF 13.56MHz (coil) 1.2kW
  - chuck+wafer RF 13.56MHz (platen) 300W
  - clampage mécanique du wafer
- Application : gravure profonde Si 100mm (Procédé Bosch  $SF_6/C_4F_8$ )

salle grise



écran contrôle process



écran contrôle D.F.A

# Sources et équipements plasma pour la gravure (11)

## STS : ICP multiplex

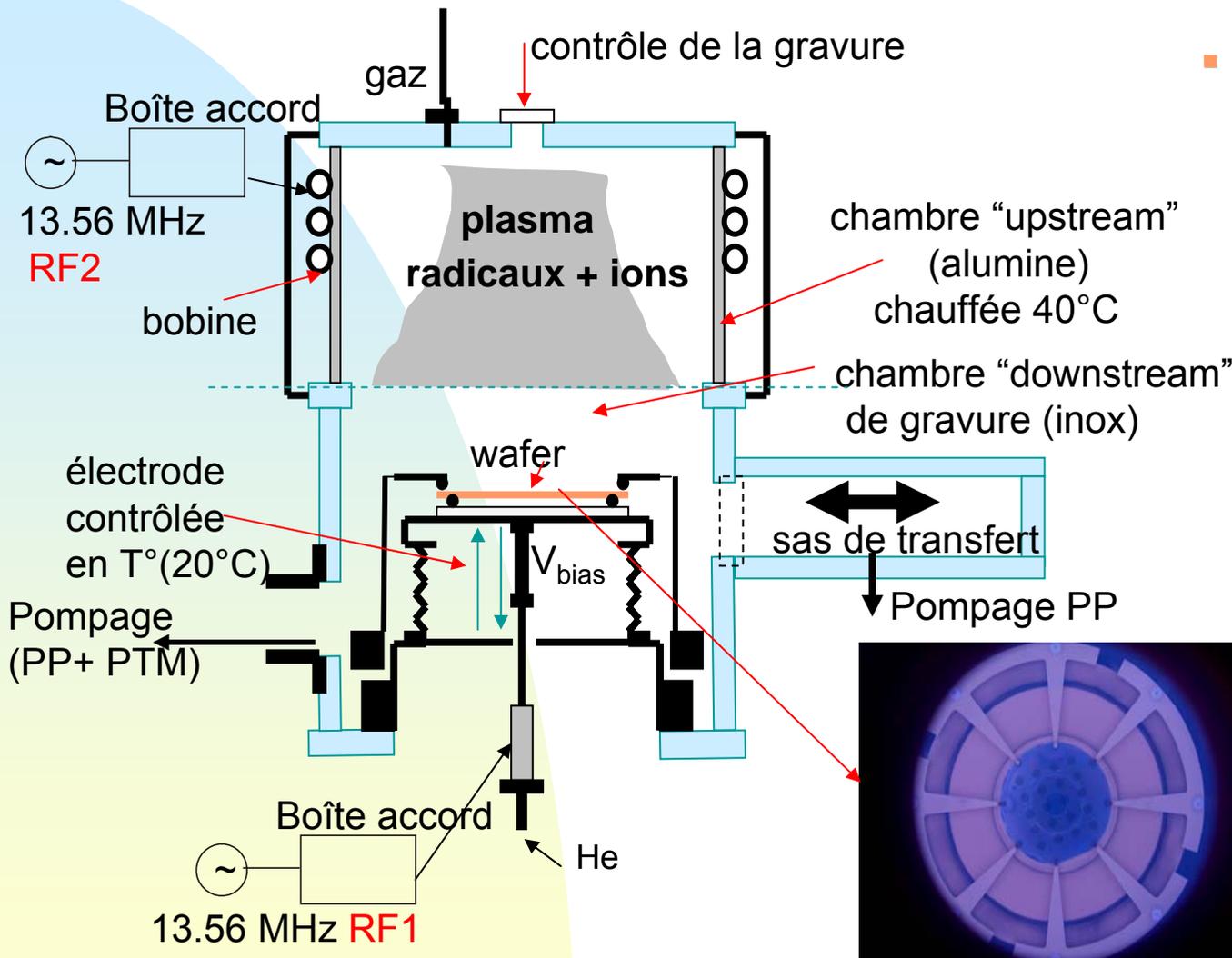
### ■ Plasma HDP : ICP

- 1 chambre plasma :

- bobine +  $RF_2$  induit  $ExB$
- $ExB$  accélèrent  $e^-$
- création radicaux/ions/ $e^-$

- 1 chambre gravure :

- diffusion radicaux
- accélération ions par  $RF_1$
- contrôle  $T^\circ_{wafer}$  ( $20^\circ C + He$ )



wafer + clampage (vue dessus)

La gravure sèche par plasma

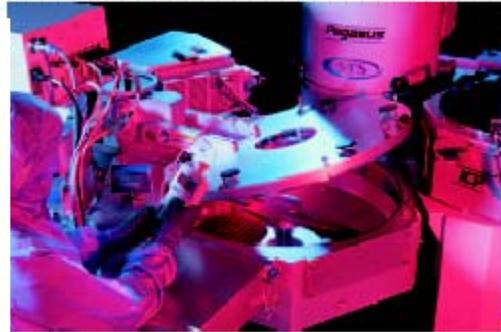
# Sources et équipements plasma pour la gravure (12)

## Surface Technology System



**ICP pegasus**

Ion Attenuation



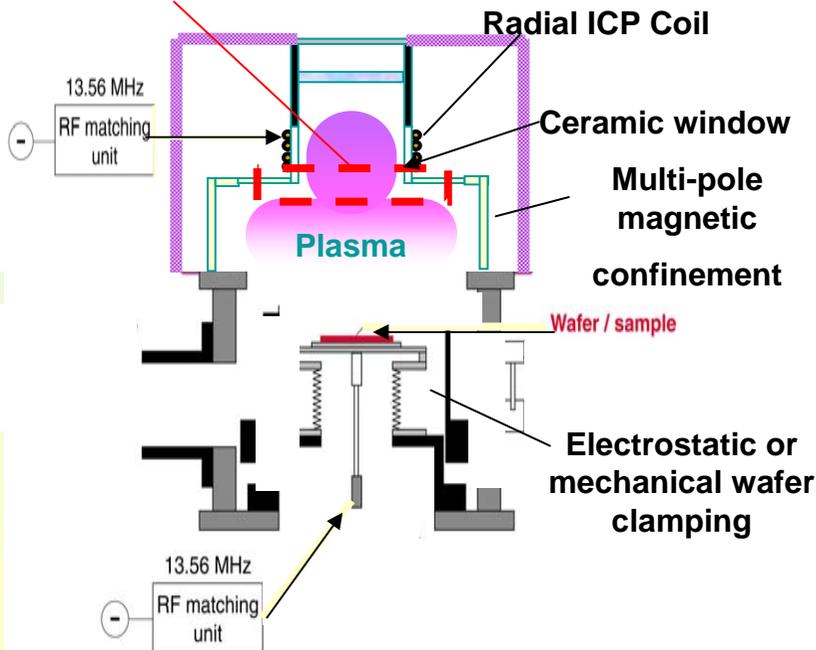
**VPX : 3 chambres**

## Évolution Plasma HDP : ICP

- 1 chambre plasma :  
coil 3kW ou 6,5kW en RF
- 1 chambre gravure :  
300W en RF (+ 300W en LF)  
contrôle T°wafer (20°C + He)

## Application :

gravure profonde Si wf<300mm  
(Procédé Bosch SF<sub>6</sub>/C<sub>4</sub>F<sub>8</sub>)



	Garanti	Aujourd'hui	2008
Etch Rate (µm/min)	>22.0	28.0	40.0
Uniformity X- W	2.5%	1.2%	2.5%
Uniformity W - W	3.5%	3.0%	2.5%
Selectivity Si:résine	>150:1	>250:1	>150:1
Profile Angle (°)	92 ± 1°	92 ± 0.5°	92 ± 1°

(2007) Tranchées W<sub>si</sub> = 0.8µm et Max Aspect ratio : 80

# Sources et équipements plasma pour la gravure (14)

## ALCATEL Micro Machining System (ADIXEN)



**AMS 100/ 110 SE**

- **AMS 100 et 200 SE** : coil 3kW – platen 600W

RIE silicium à T° ambiante

DRIE silicium à T° ambiante (procédé Bosch)

RIE SiO<sub>2</sub>, quartz, pyrex à T° ambiante  $e_{\text{SiO}_2} < 5\mu\text{m}$

**AMS 200 DE ( $e_{\text{SiO}_2} \gg 5\mu\text{m}$ )** : coil 3kW – platen 600W RF

DRIE SiO<sub>2</sub>, quartz, pyrex

**AMS 3200 (= 3 AMS 100 SE et/ou DE)**

DRIE silicium à T° ambiante (procédé Bosch)

Coil 5,5kW – 300W LF pour wf < 300mm

(2007)  $W_{\text{Si}} = 0,8\mu\text{m}$

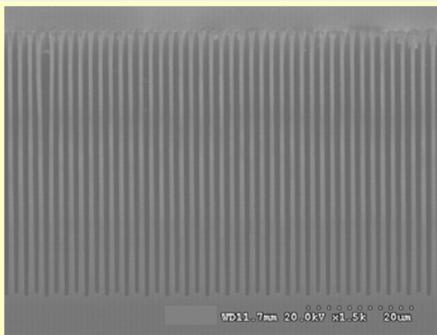
**Max Aspect ratio : 100**



**AMS 200 SE ou DE**



**AMS 3200**



Gravure tranchées Si

# Sources et équipements plasma pour la gravure (13)

## ALCATEL Micro Machining System (ADIXEN)

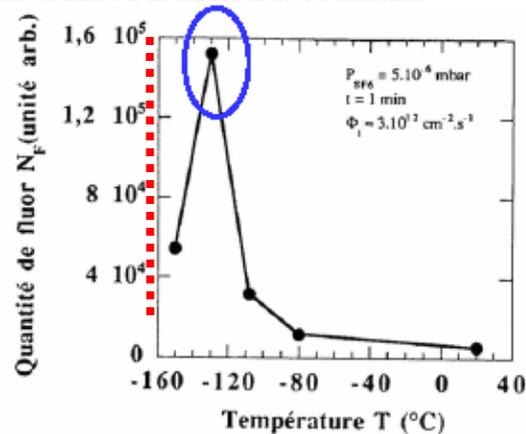


**ICP 601E**

### ■ Plasma HDP : ICP

- 1 chambre plasma : coil 2kW  
antenne +  $RF_2$  induit  $E \times B$  accélèrent  $e^-$   
bobine DC 12V (confiner, limiter pertes  $e^-$ )
- 1 chambre gravure : platen 500W  
ions contrôlés par  $RF_1$   
aimants permanents distribués (limiter pertes  $e^-$ )  
contrôle  $T_{\text{wafer}}^\circ$  ( $-110^\circ\text{C} + \text{He}$ )

### Conditions favorables à la fluoration du silicium

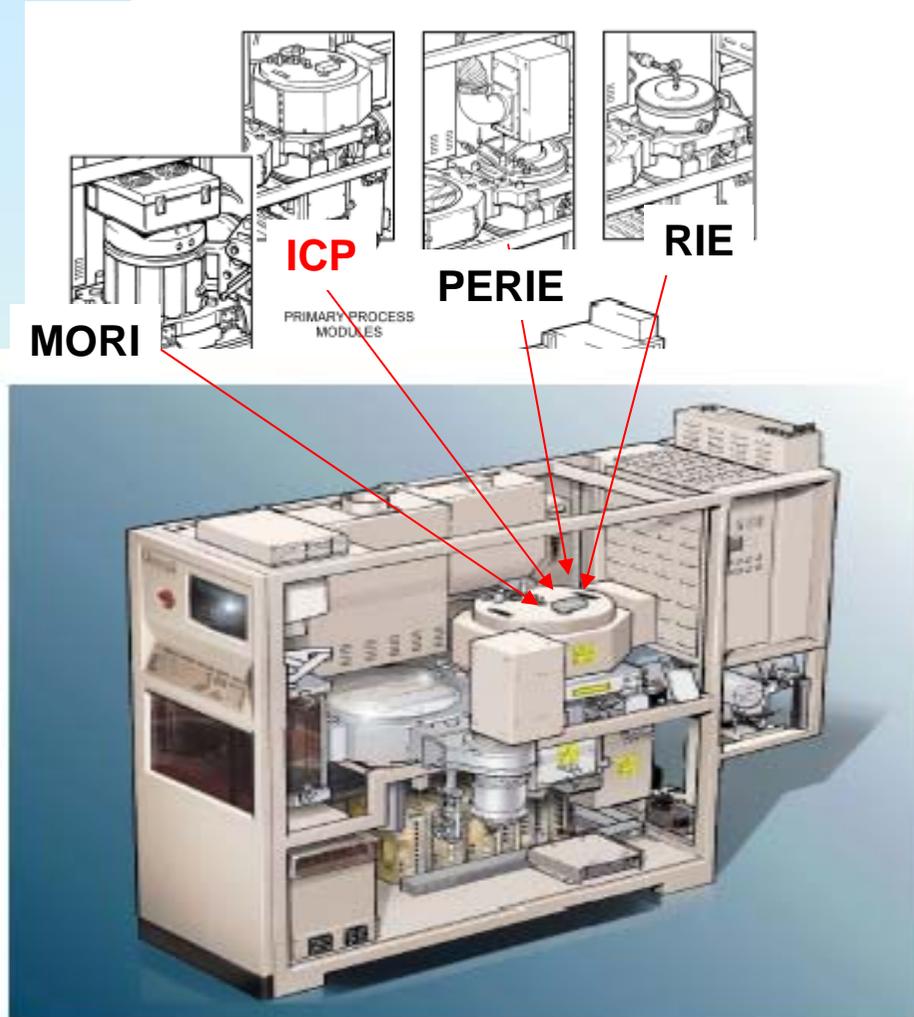


### ■ Applications :

- DRIE à  $T^\circ$  ambiante, à  $-110^\circ\text{C}$   
(procédé cryogénique  $\text{SF}_6/\text{O}_2$ )

# Sources et équipements plasma pour la gravure (15)

## Aviza Technology



- ❶ chargement wafer
- ❷ sas transfert + robot
- ❸ 1 chambre gravure
- ❹ lignes gaz + MFC
- ❺ pompage

- coil 600W- 5kW – platen 600W

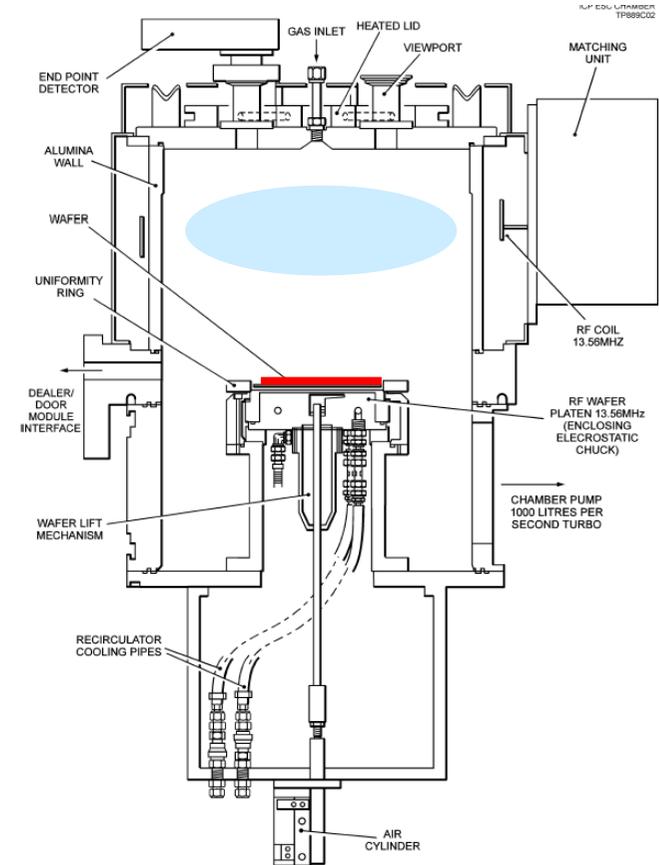
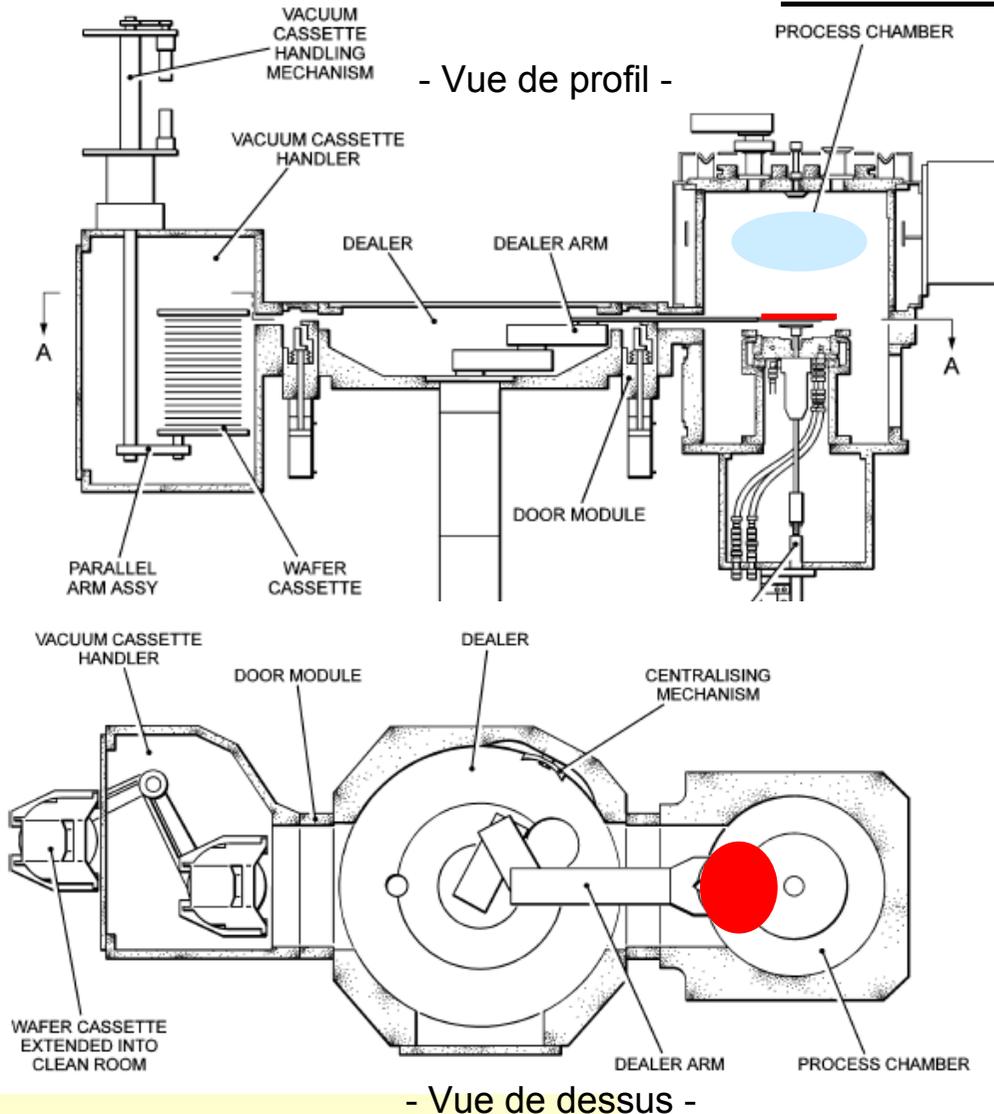
RIE du  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Si}_3\text{N}_4$  pour MEMS et  $\mu$ électronique

RIE du MEMS RF, verre, polymères, diamant, ...

RIE du Ga(Al)As, GaSb et DRIE du Ga(Al)As, ...

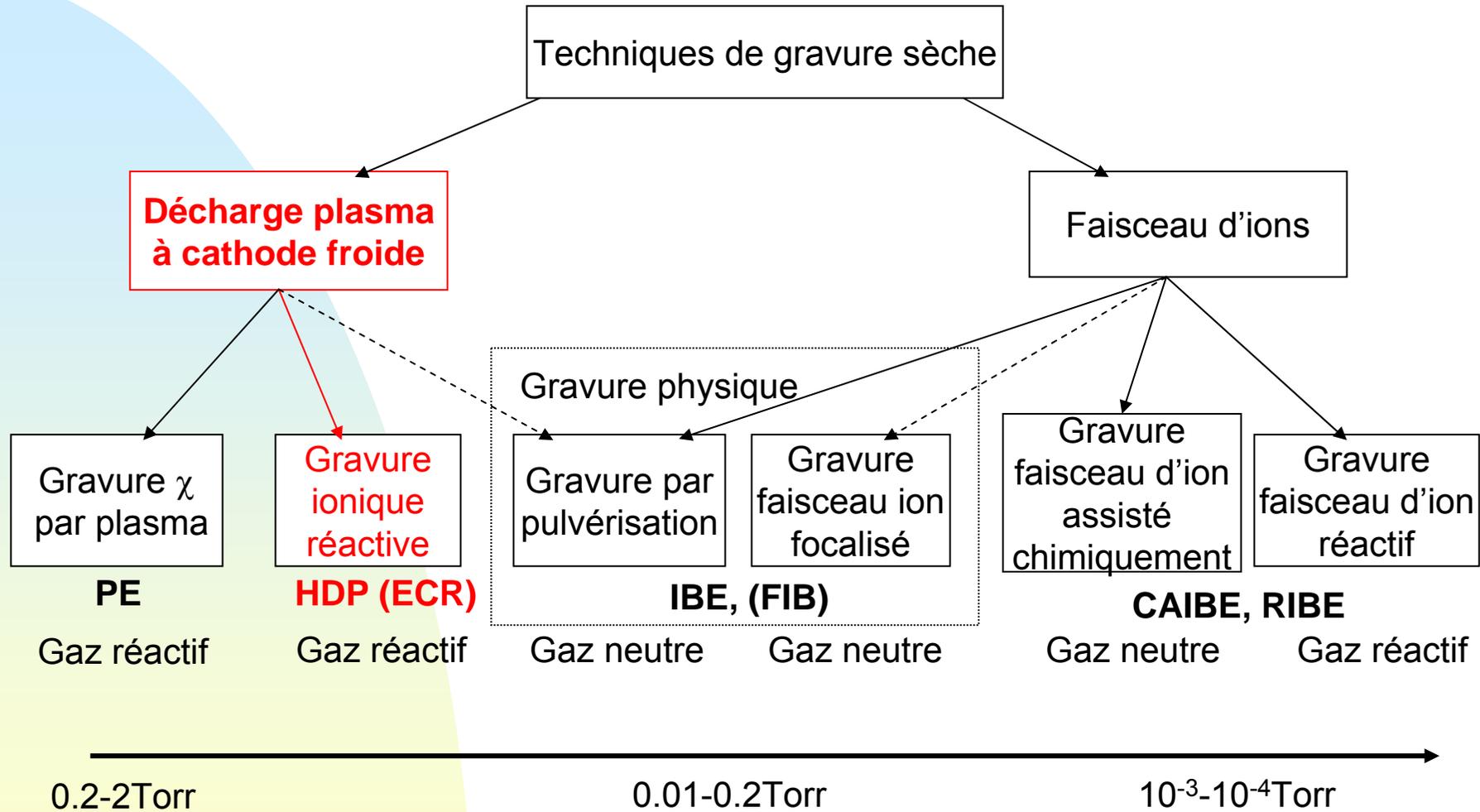
# Sources et équipements plasma pour la gravure (16)

## Aviza Technology

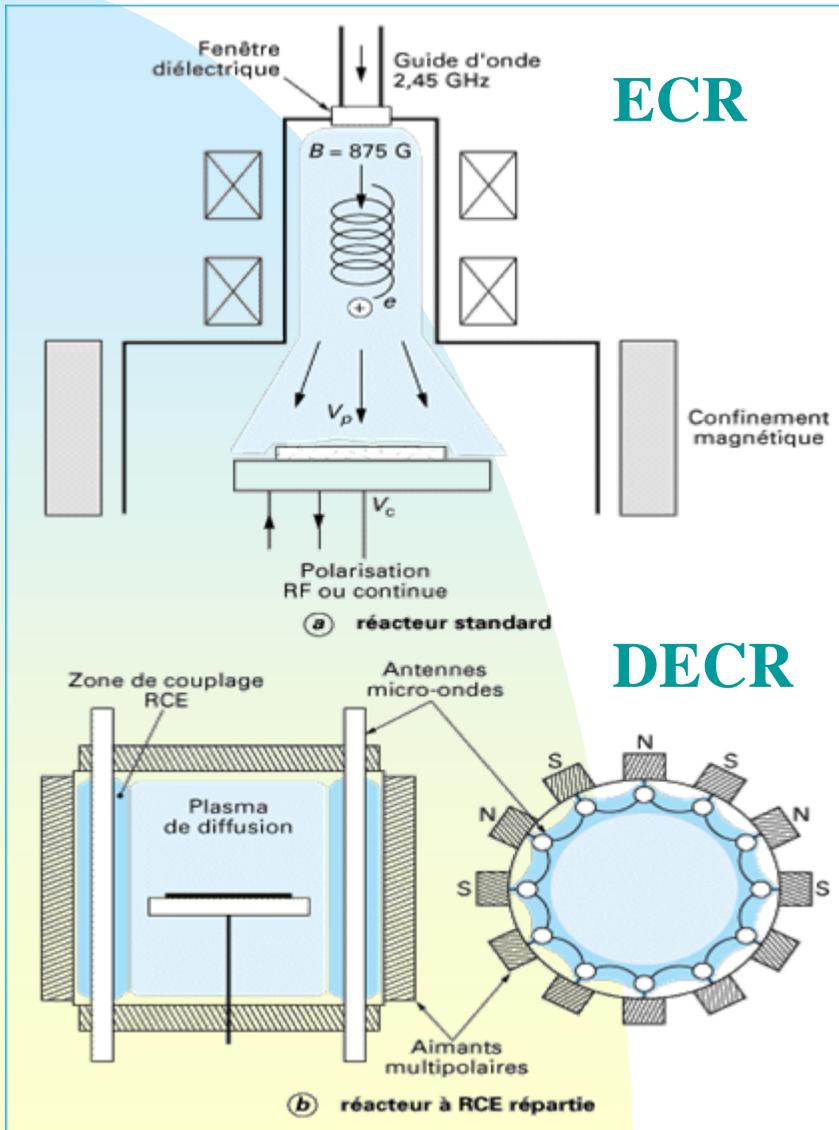


- wafer maintenu par clamping électrostatique (face arrière ok avec  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Si}_3\text{N}_4$  si  $e < 2\mu\text{m}$ )

# Sources et équipements plasma pour la gravure (17)

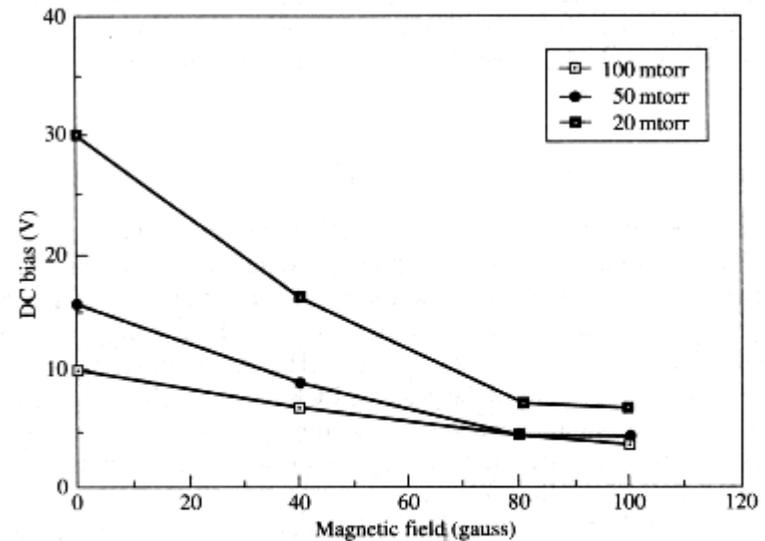


# Sources et équipements plasma pour la gravure (18)



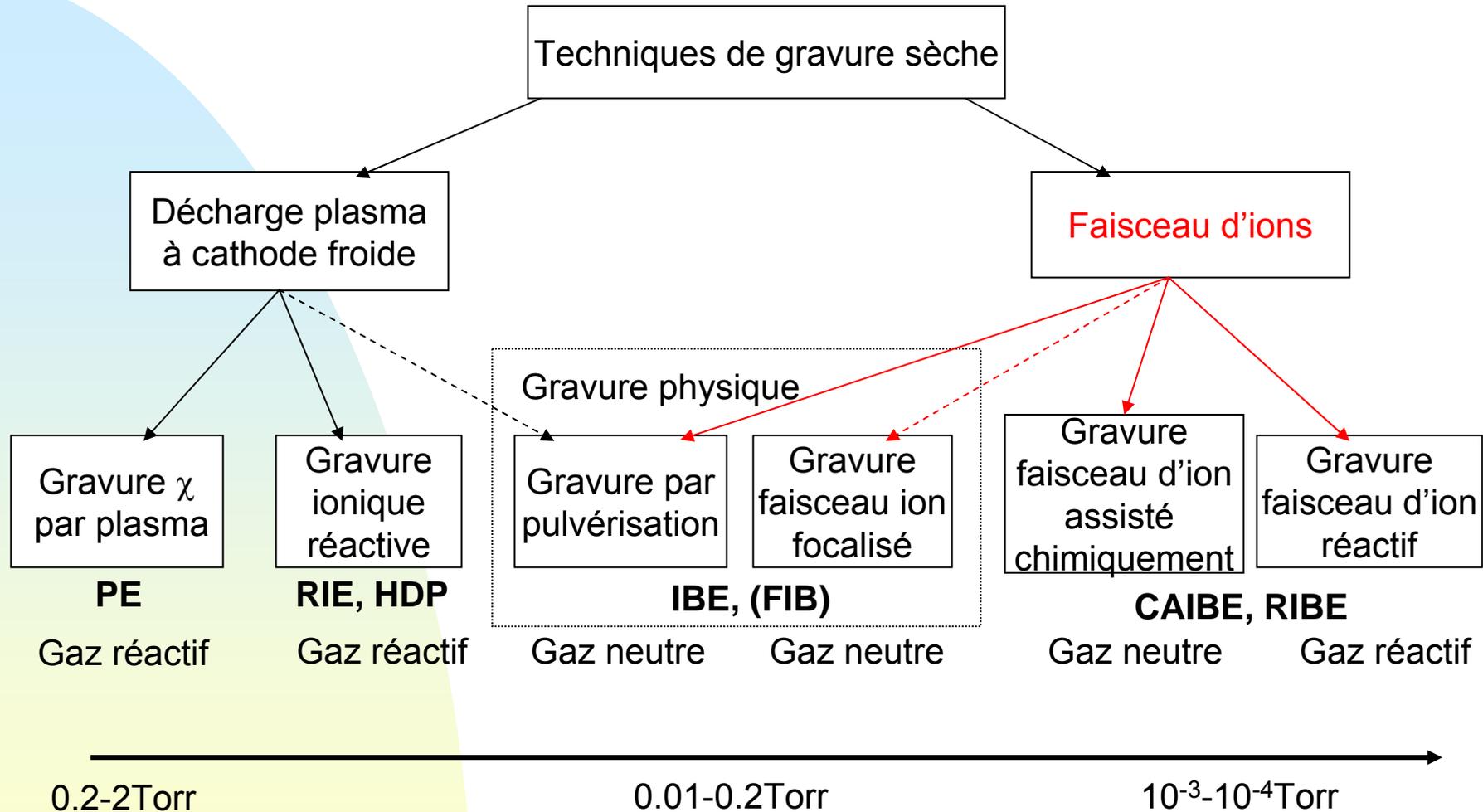
## ■ Source onde RCE

- $f_c = e.B/2\pi.m_e$
- $f_c = 2.45 \text{ GHz}$  et  $B = 875 \text{ Gauss}$
- pas d'électrode interne ( $E_{c_{ion}} \searrow$ ,  $V_{bias} \searrow$ )
- $p \searrow$ ,  $l_{pm} e^- \nearrow$ ,  $n_{e^-} \nearrow$  et  $T_{e^-} \nearrow$  (<3eV en DECR)
- confinement magnétique : uniformité  $\nearrow$

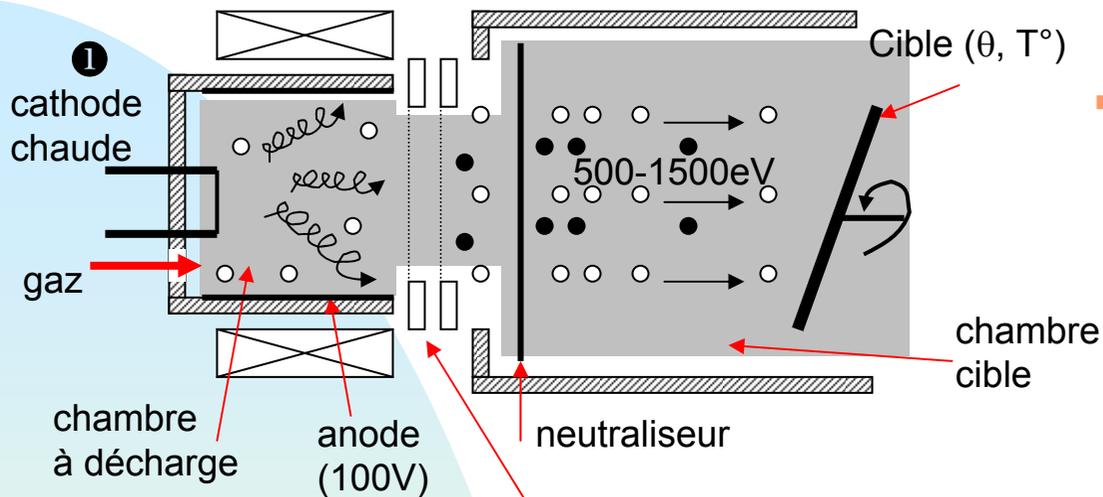


**FIGURE 16**  
Effect of magnetic field on self-bias voltage. (After Lii, Ng, and Danner, Ref. 10.)

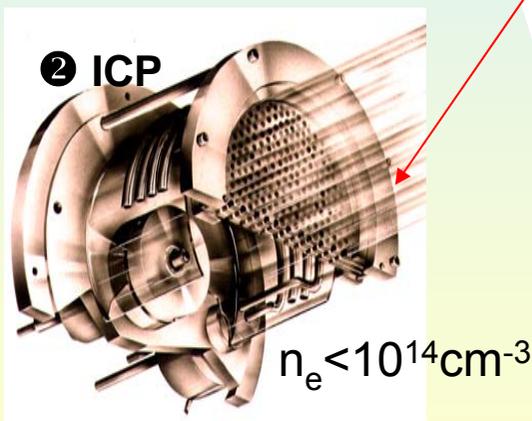
# Sources et équipements plasma pour la gravure (19)



# Sources plasma et équipements pour la gravure (21)

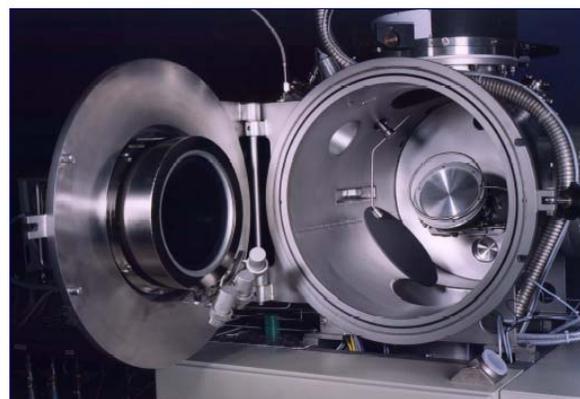


- **Source chaude avec filament d'ions :**  
Kaufmann, Penning (ion  $\gg 200\text{eV}$ )



Grilles accélération

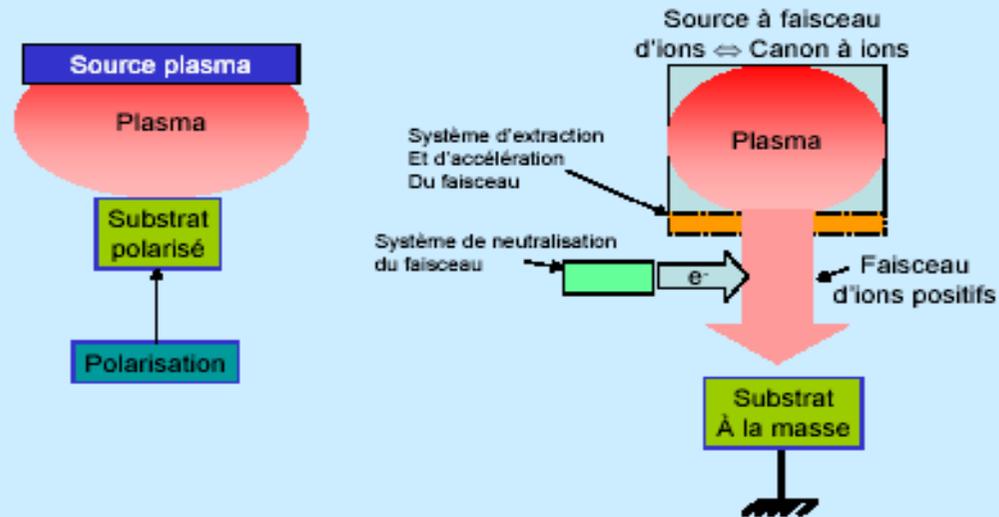
- **Source froide sans filament :**  
RF+ ICP (ion  $< 200\text{eV}$ ), ECR  
- zone d'ionisation (cathode émissive)  
- grilles accélération/décélération  
- neutraliseur par  $e^-$



- **Applications :** gravure métaux, GaAs, matériaux « exotiques » (PZT,...)

# Sources et équipements plasma pour la gravure (20)

## Sources plasma et source à faisceau d'ions



### Avantages :

- traiter tous matériaux réfractaires à la RIE
- contrôle énergie et flux espèces ionisées
- faisceau monoénergétique
- pression de travail très faible

### Inconvénients :

- faible flux d'ions sur échantillon
- mauvaise uniformité
- interaction faisceau / grilles extraction (pollution, usure)
- neutraliseur nécessaire

La gravure sèche par plasma

## Gravure par faisceau d'ions

**IBE**  
(Ion Beam Etching)



Effet physique : pulvérisation

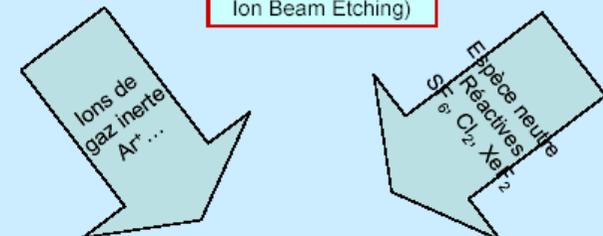
**RIBE**  
(Reactive Ion Beam Etching)



Combinaison d'un effet physique et chimique

## Gravure par faisceau d'ions

**CAIBE**  
(Chemically Assisted Ion Beam Etching)



Substrat

Combinaison d'un effet physique et chimique :  
Le contrôle se fait plus finement et de manière indépendante

# **FIN de la 1<sup>ere</sup> partie**