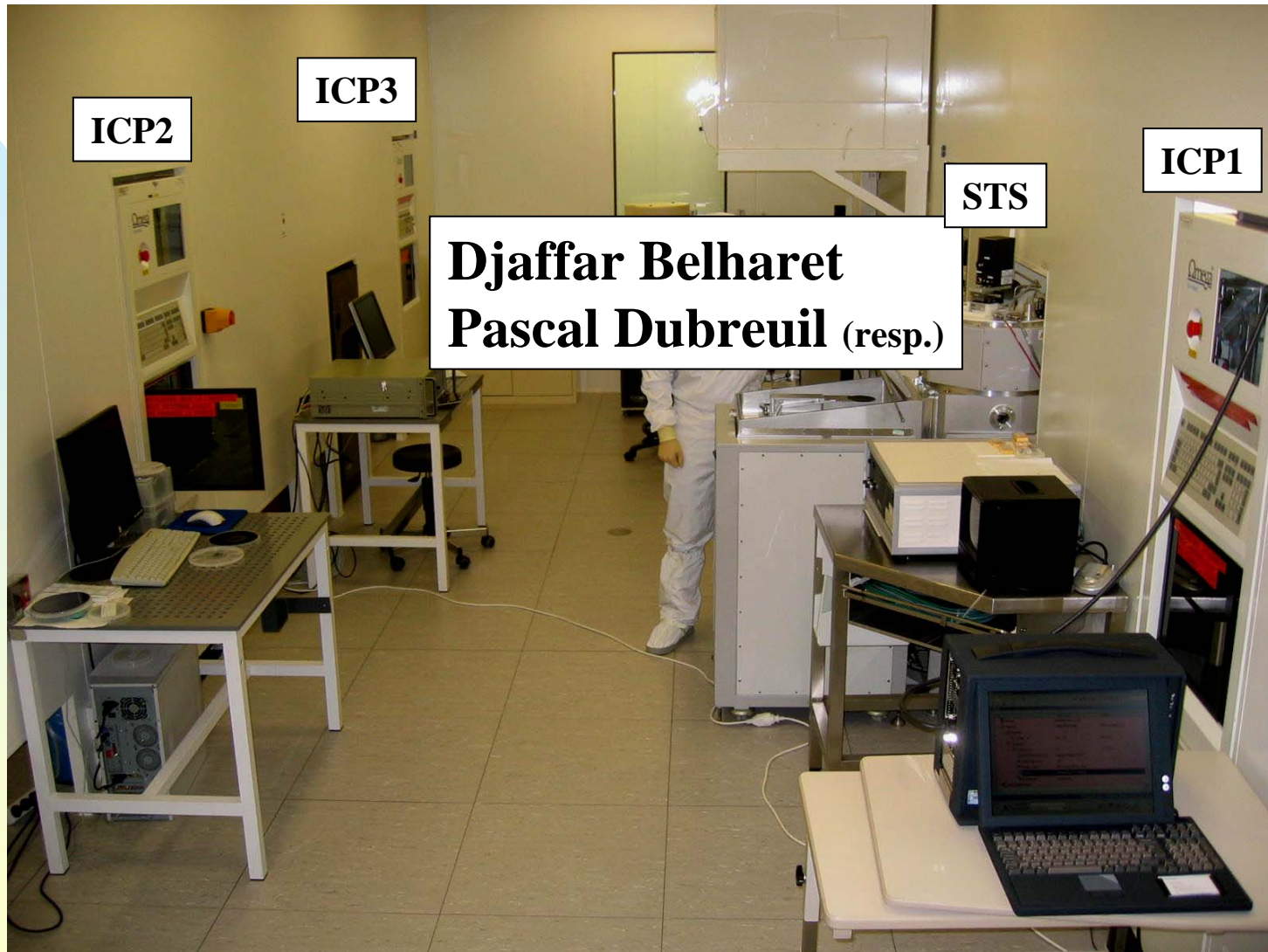


La gravure sèche par plasma

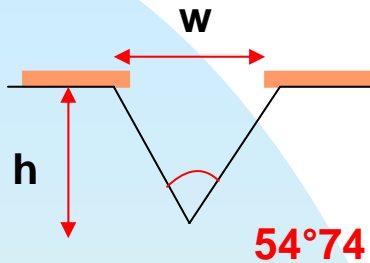


Plan

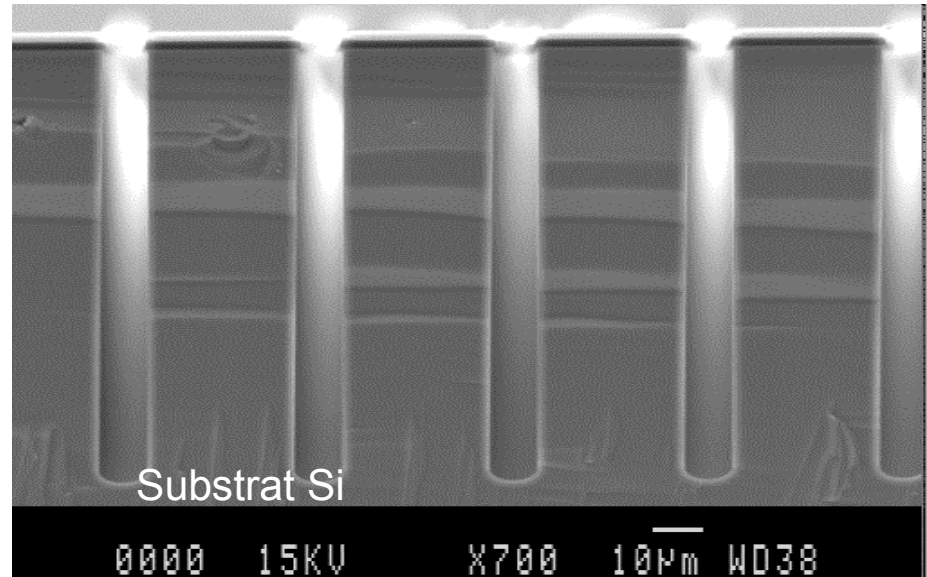
- **Pourquoi la gravure sèche par plasma ?**
- **La gravure par plasma : définitions et propriétés**
- **Sources et équipements plasma pour la gravure**

- **La gravure par plasma et technologie μ -optoélectronique**
- **La gravure par plasma et μ ,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, Si_3N_4 , 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, 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

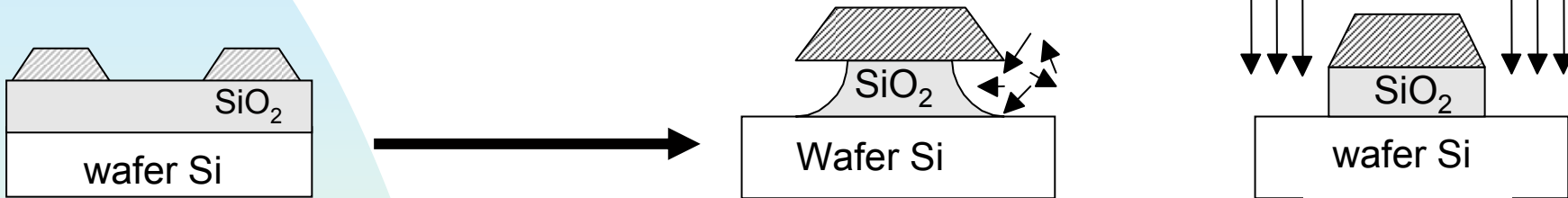
$e_{\text{gravée matériau arrêt}} \ll e_{\text{matériau gravé}} \rightarrow$ gravure sélective

$e_{\text{gravée matériau arrêt}} > e_{\text{matériau gravé}} \rightarrow$ 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

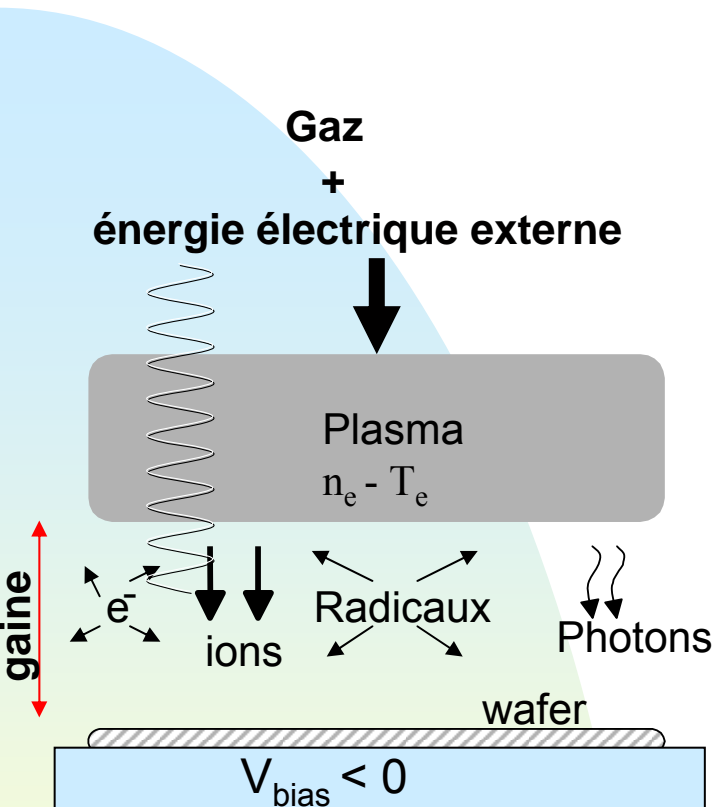
Plan

- 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 μ 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, μ 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 α
- **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

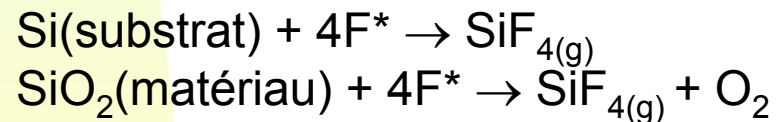
- La gravure par plasma est une attaque physico-chimique du matériau avec des **radicaux** assistés par les **ions** issus du plasma. Les produits de réaction sont généralement volatils et pompés en dehors de la chambre de gravure.

- Les **radicaux** 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

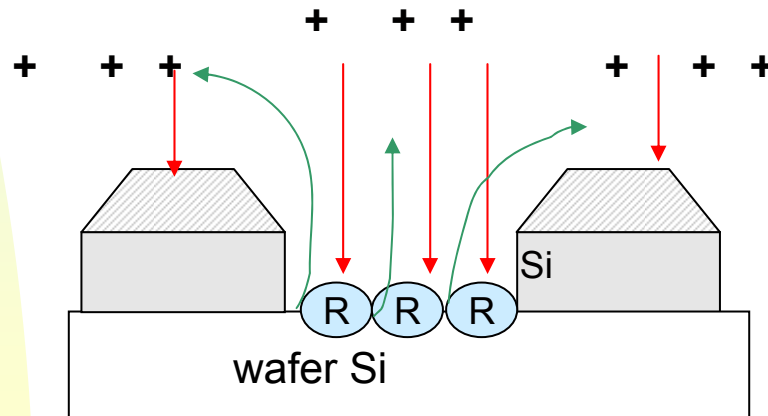
Ex : gravure du silicium et de l'oxyde de silicium dans un plasma fluoré



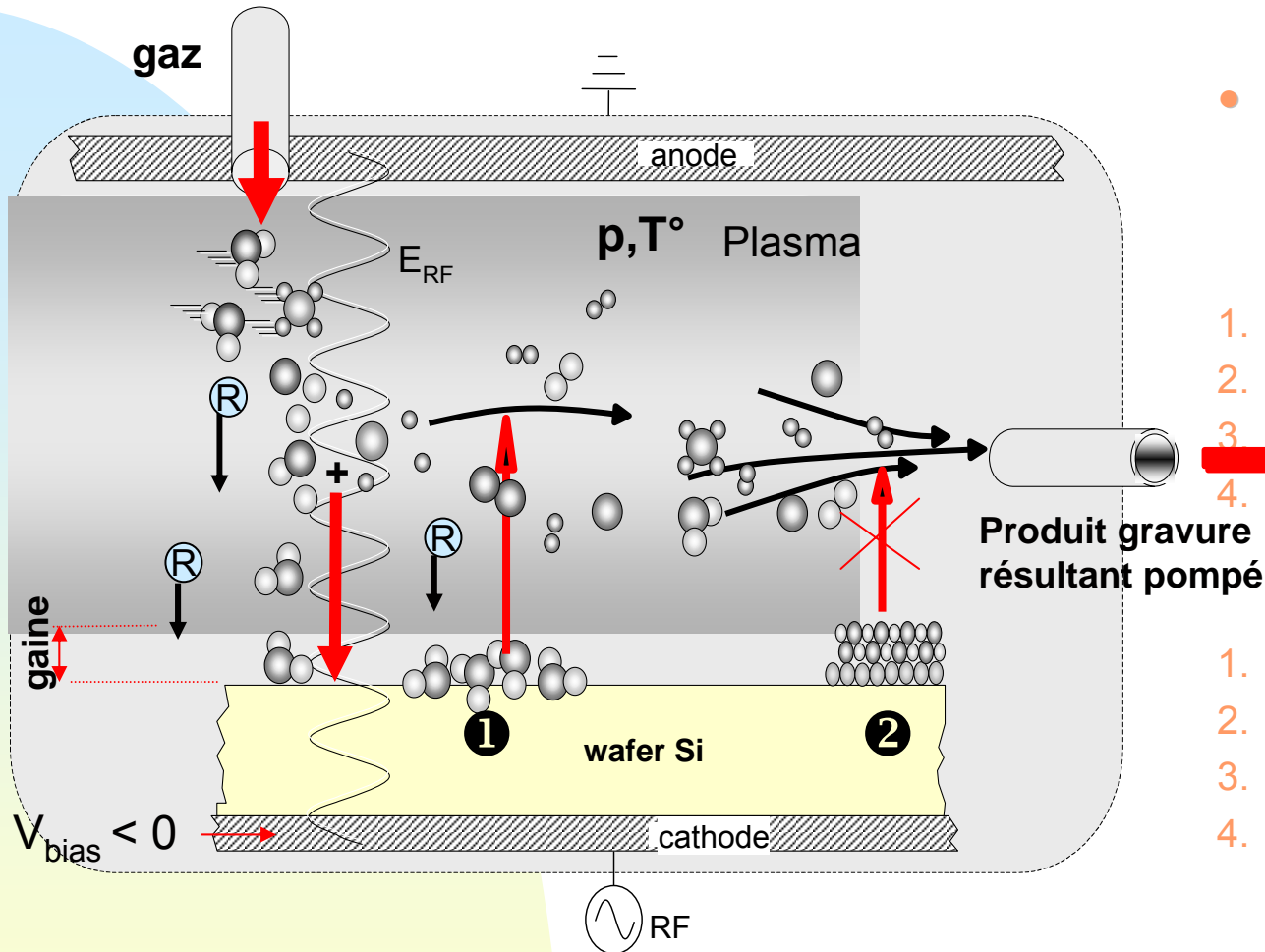
La gravure sèche par plasma : définitions et propriétés (4)

■ 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

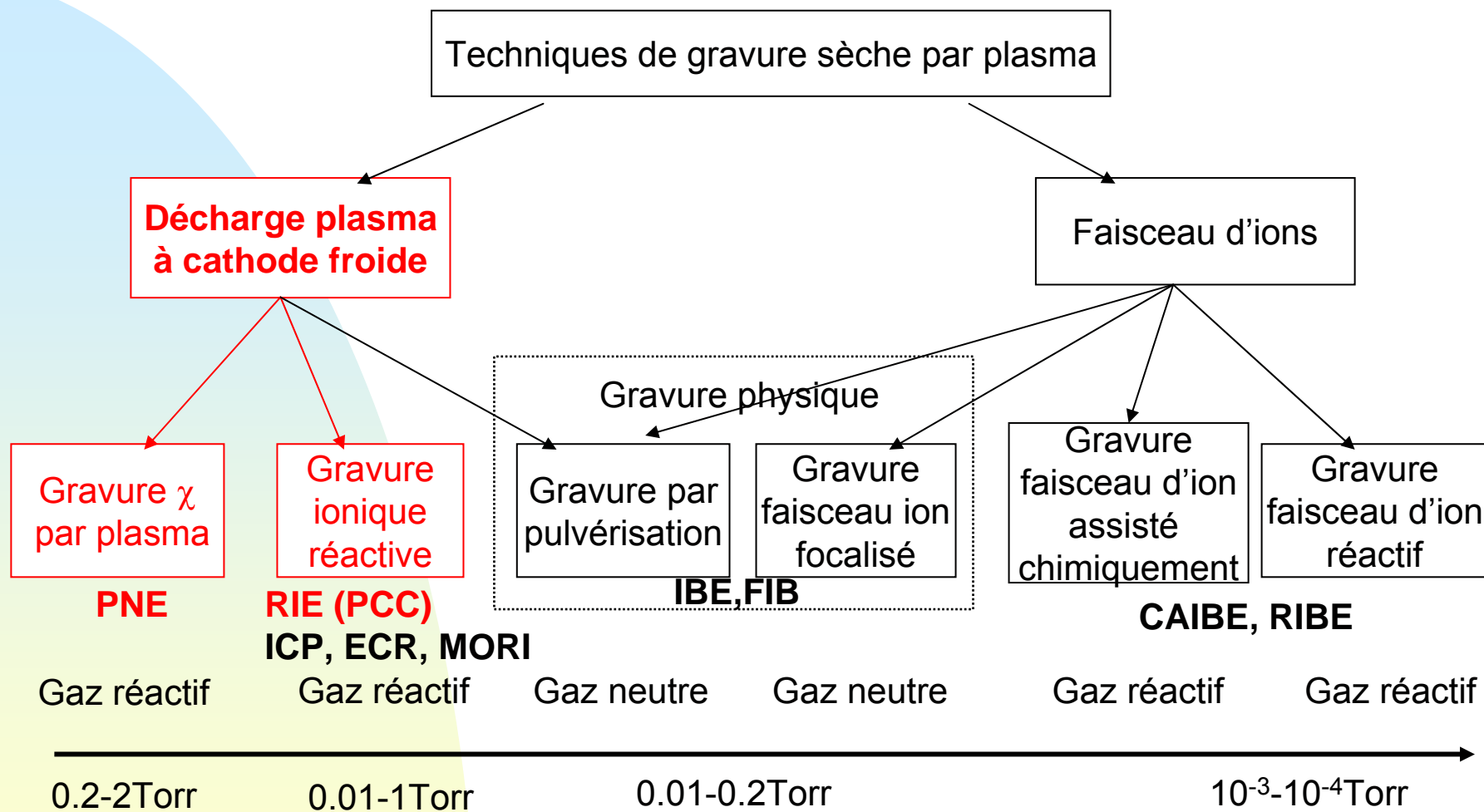
L'étape la plus lente domine le procédé de gravure plasma

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

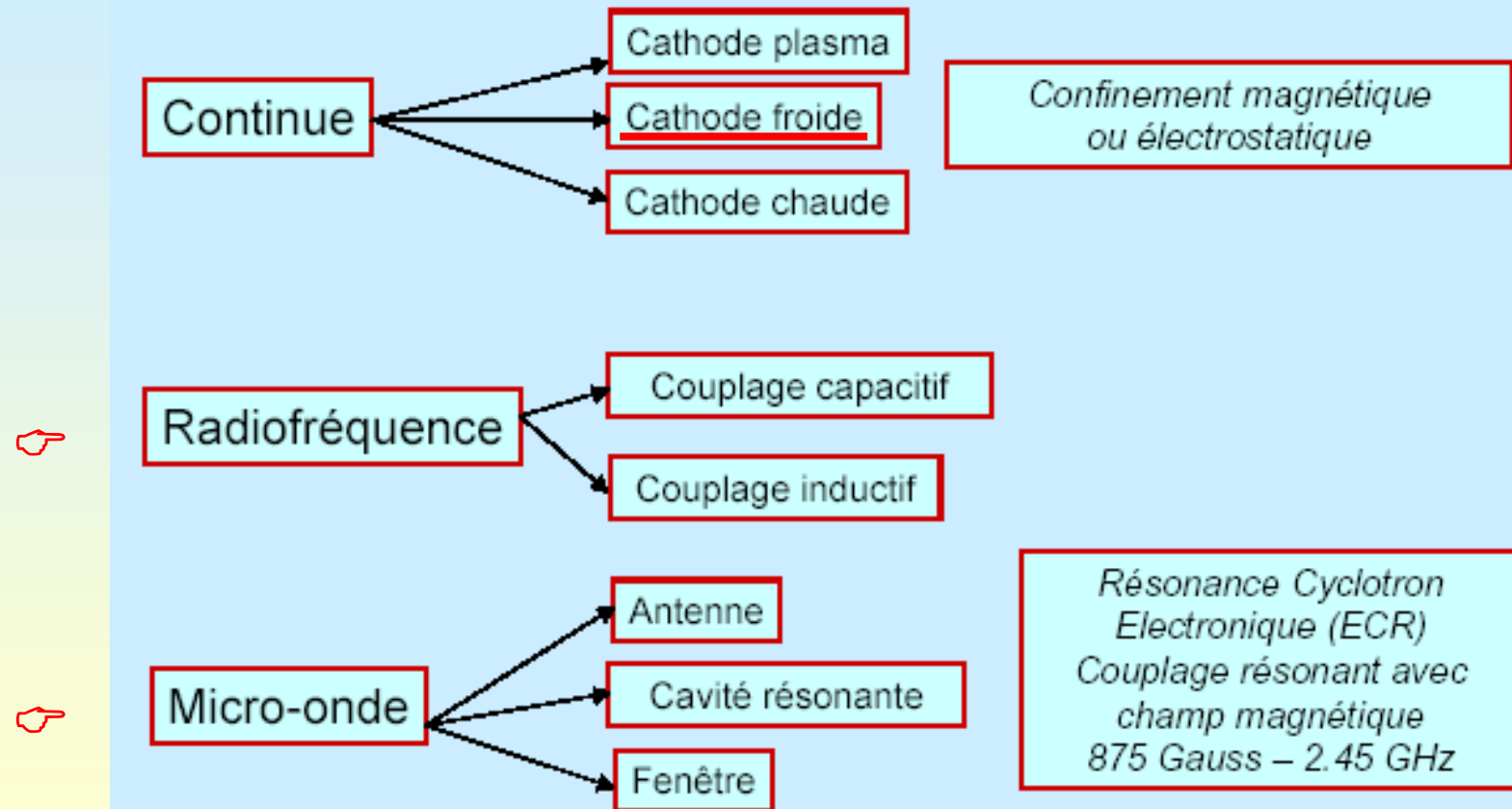
Sources et équipements plasma pour la gravure (1)



Salle blanche du LAAS : 4 ICP, 1 PNE

Sources et équipements plasma pour la gravure (2)

Mode d'excitation du plasma

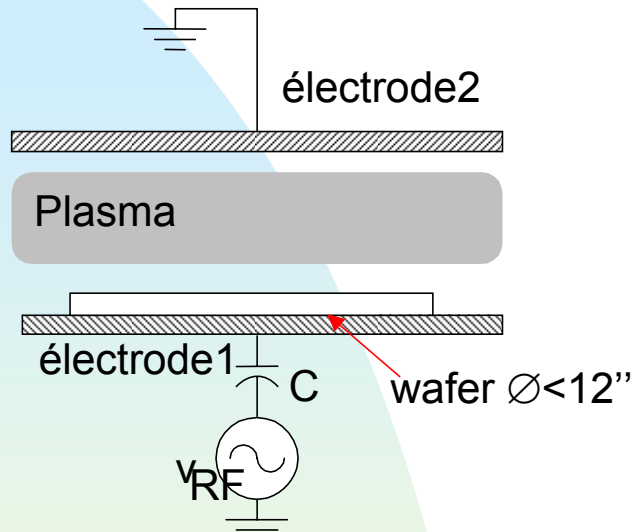


Sources et équipements plasma pour la gravure (4)

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 _{ion} (eV) V _{bias}	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 _e (cm ⁻³)	10 ⁹	≤ 10 ¹⁰	5.10 ¹¹	5.10 ¹¹	5.10 ¹²
α	10 ⁻⁵	10 ⁻⁵	10 ⁻³	5.10 ⁻³	5.10 ⁻³
B	non	non	option	1-2kG	1-2kG
V _g Si -V _g SiO ₂	μm - ?	[0.2μm]	[0.1μm- 0.3μm]	[μm-0.1μm]	[μm-0.1μm]
Sélect / SiO ₂	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

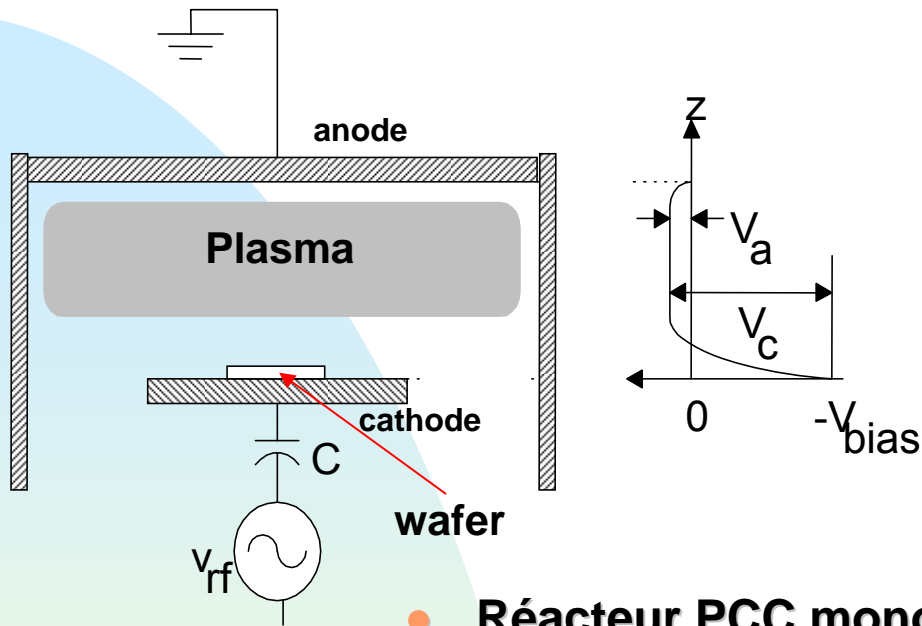
■ **Mode RIE (gravure physicochimique quasi-anisotrope)**

- 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)



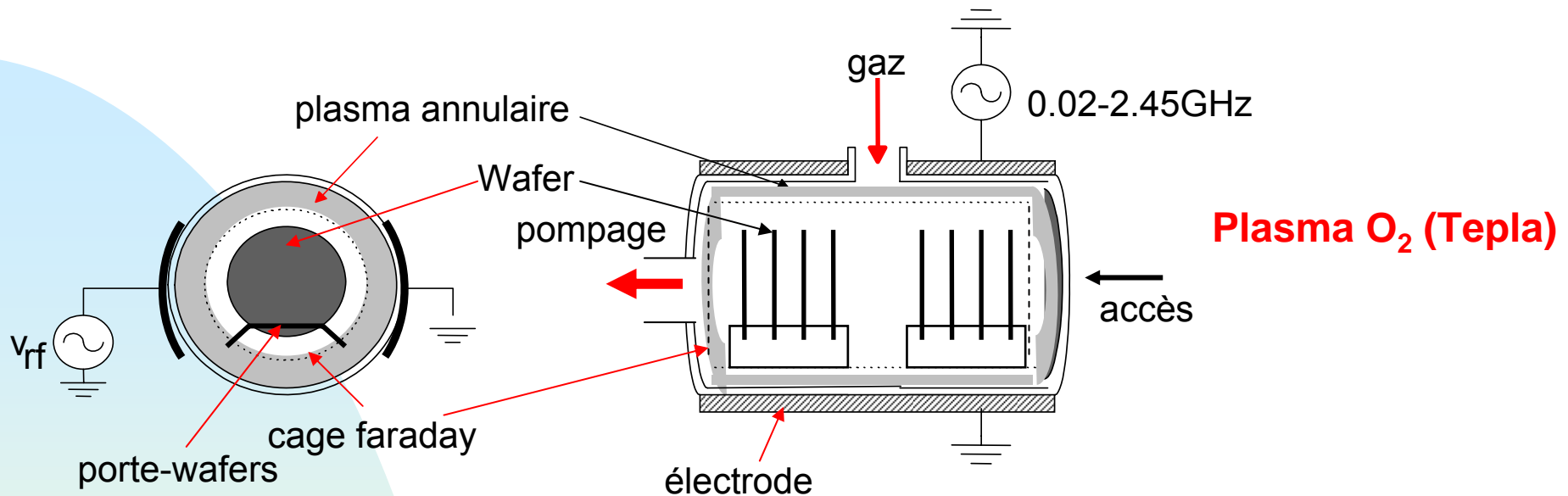
- **Réacteur PCC monoplate à électrodes dissymétriques : RIE**

- 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, Si₃N₄, SiO₂**

Sources et équipements plasma pour la gravure (7)



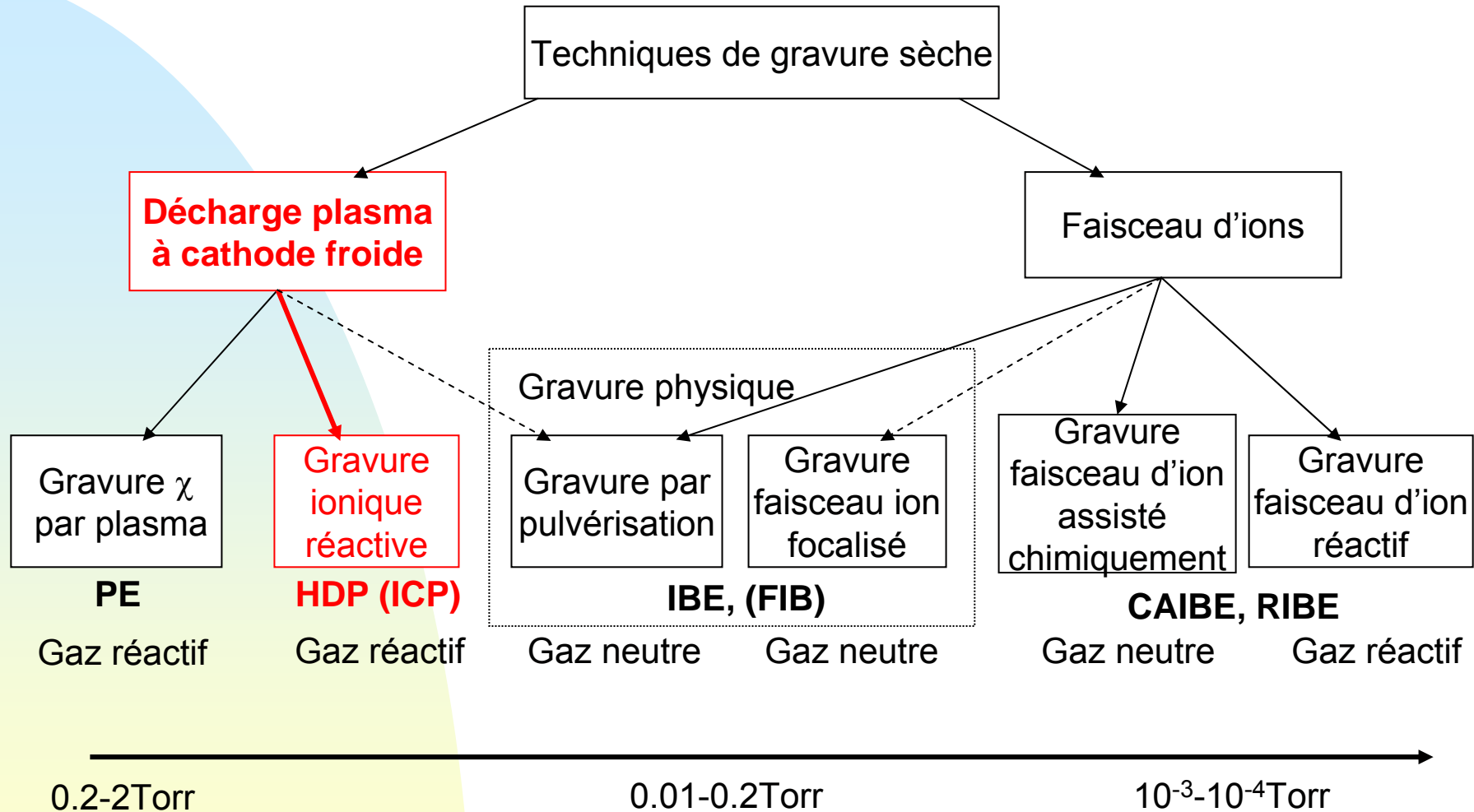
- **Les réacteurs tubulaires :**

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

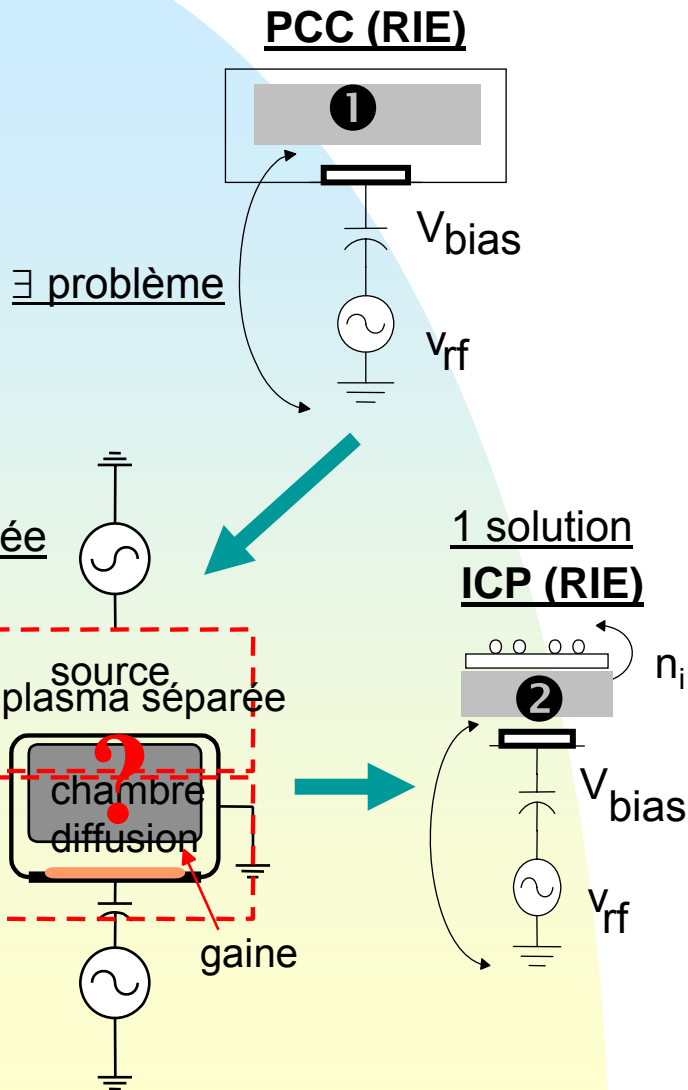
- **Applications :**

- délaquage de résine
- préparation/nettoyage de surface (χ + 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 ①)
 - si $p > 100 mTorr$, difficulté de graver des motifs $< 0.25 \mu m$
 - pb transfert P_{RF} dans le plasma (α 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 monoplaque
 - sélectivité \nearrow , défauts \searrow , $p \searrow$
- Solution (s) :**
 - découpler V_{bias} et production des ions (P_{RF}) (schéma ②)
 - couplage capacitif RF indépendant plaquette (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

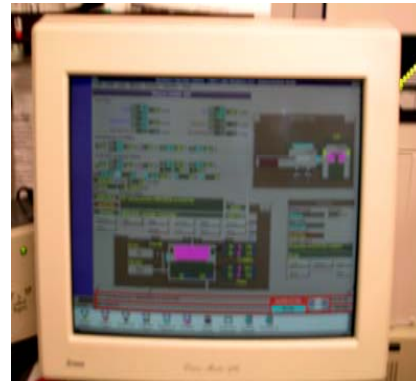


STS : ICP multiplex

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 $\text{SF}_6/\text{C}_4\text{F}_8$)

salle grise



écran contrôle process



écran contrôle D.F.A

Sources et équipements plasma pour la gravure (11)

STS : ICP multiplex

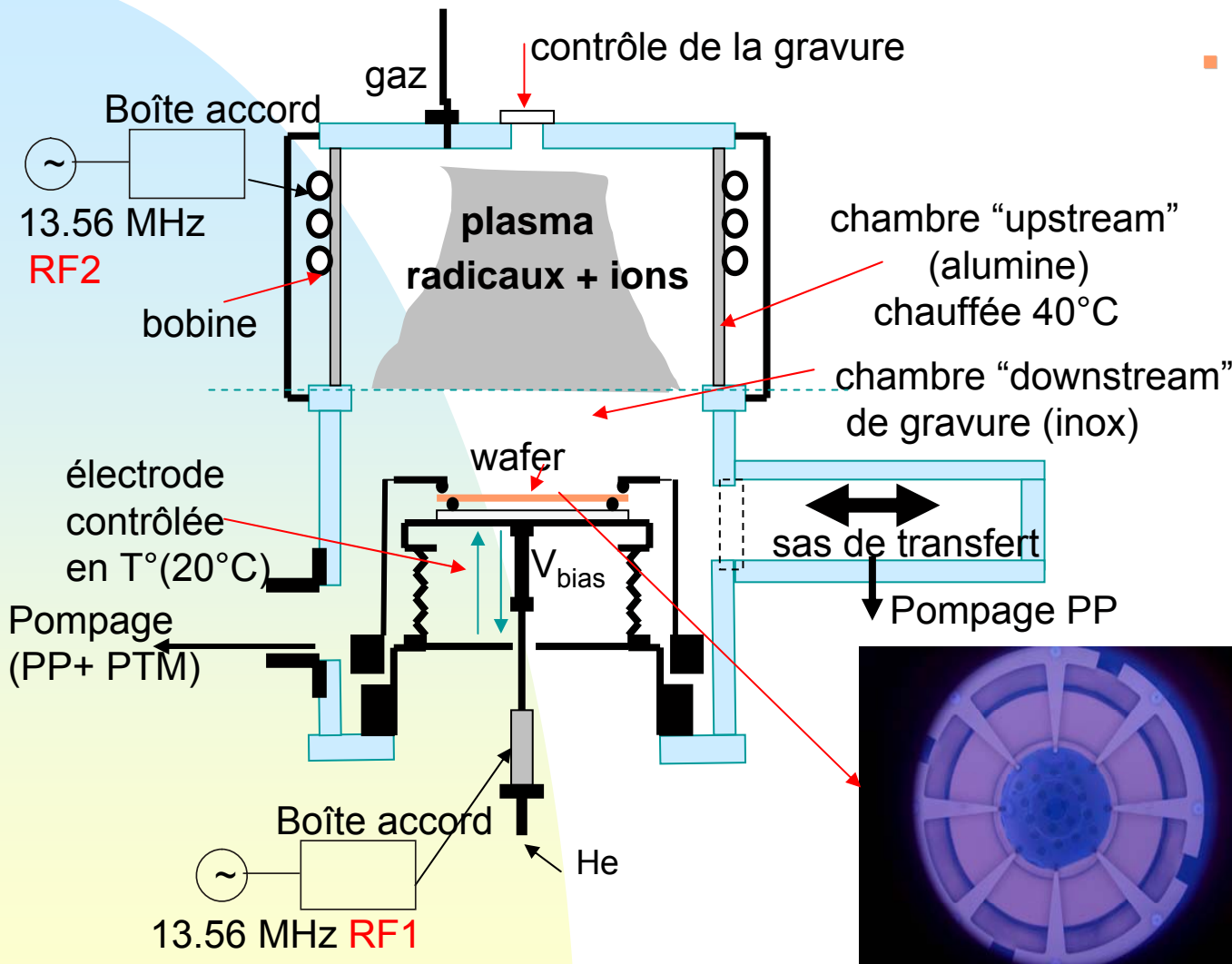
■ Plasma HDP : ICP

- 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°_{wafer} ($20^\circ C + He$)



wafer + clampage (vue dessus)

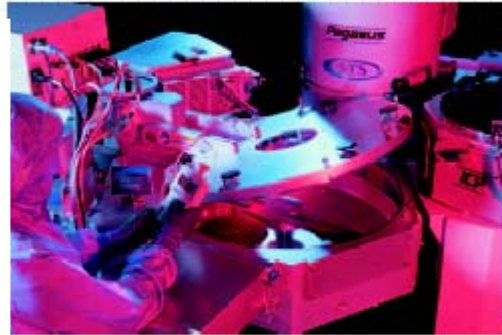
Sources et équipements plasma pour la gravure (12)

Surface Technology System



ICP pegasus

Ion Attenuation



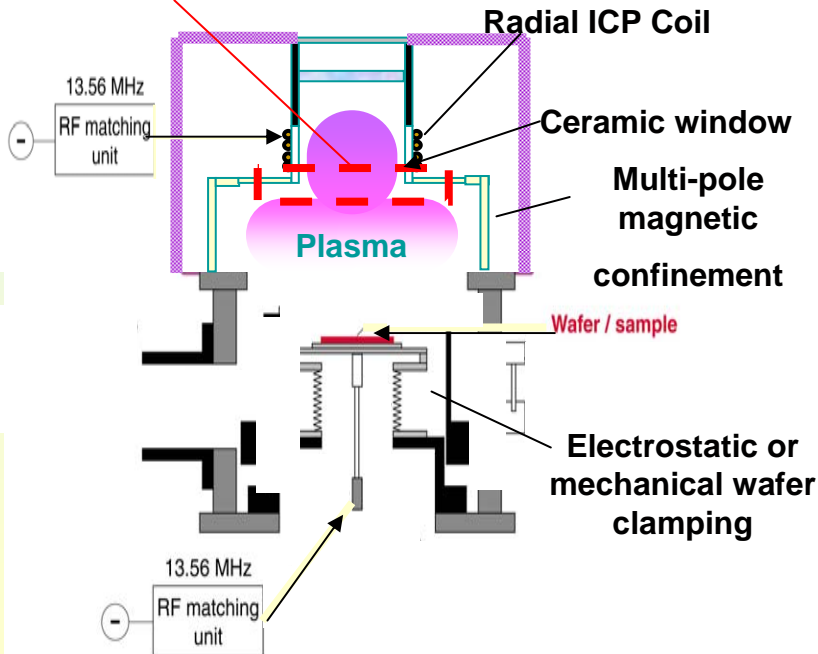
VPX : 3 chambres

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 SF₆/C₄F₈)



	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_{si} = 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 SiO₂, 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 SiO₂, 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) $W_{\text{Si}} = 0,8\mu\text{m}$

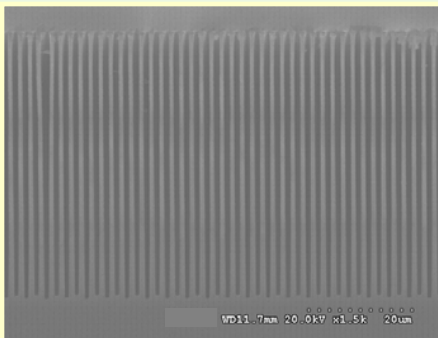
Max Aspect ratio : 100



AMS 200 SE ou DE



AMS 3200



Gravure tranchées Si

Sources et équipements plasma pour la gravure (13)

ALCATEL Micro Machining System (ADIXEN)

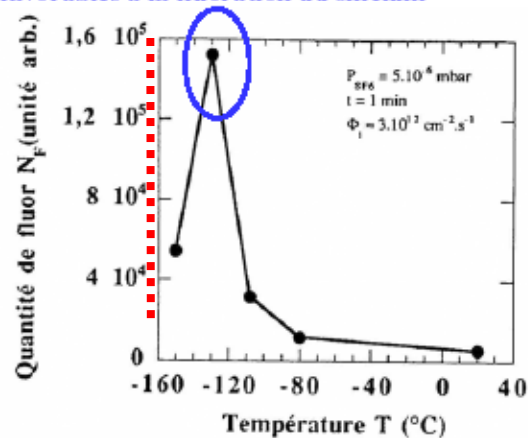


ICP 601E

■ 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_{wafer}° ($-110^\circ\text{C} + \text{He}$)

Conditions favorables à la fluoration du silicium

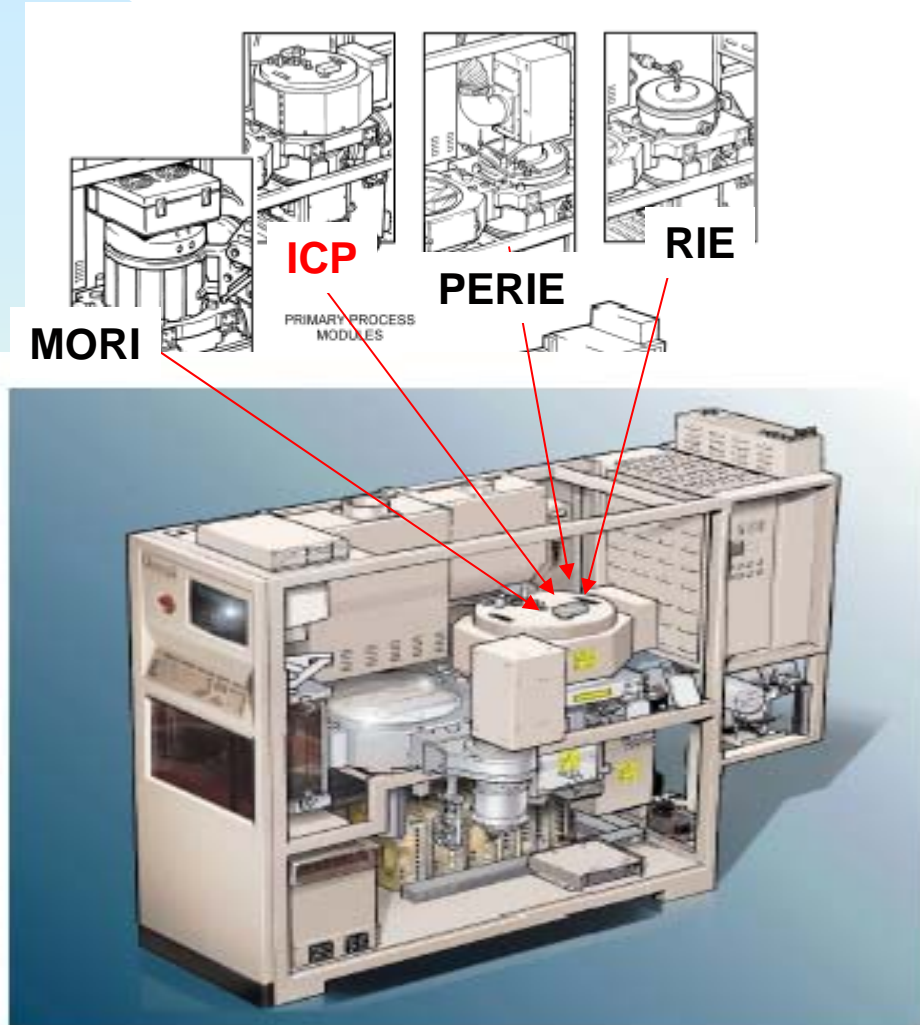


■ Applications :

- DRIE à T° ambiante, à -110°C
(procédé cryogénique SF_6/O_2)

Sources et équipements plasma pour la gravure (15)

Aviza Technology



- ① chargement wafer
- ② sas transfert + robot
- ③ 1 chambre gravure
- ④ lignes gaz + MFC
- ⑤ pompage

- coil 600W- 5kW – platen 600W

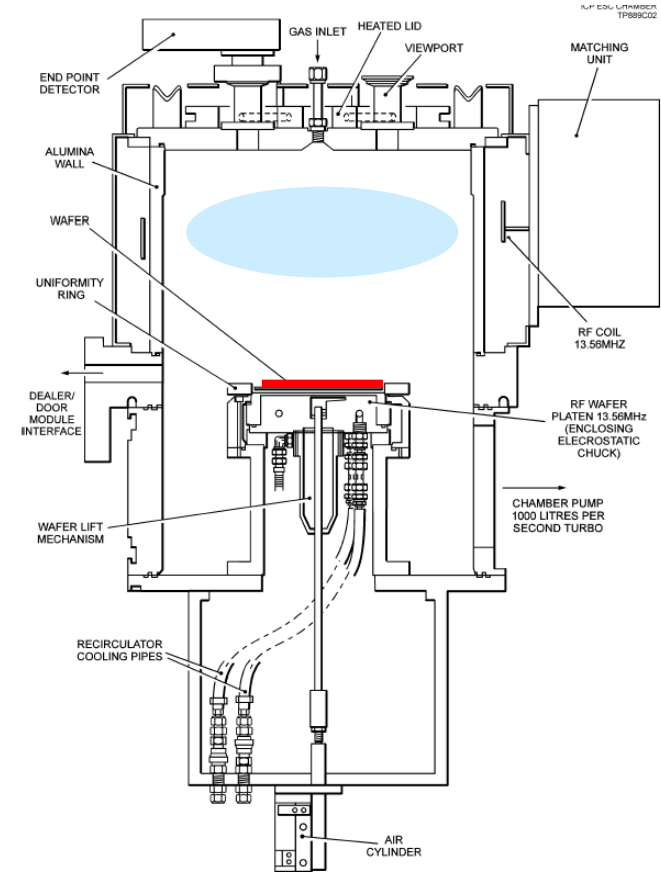
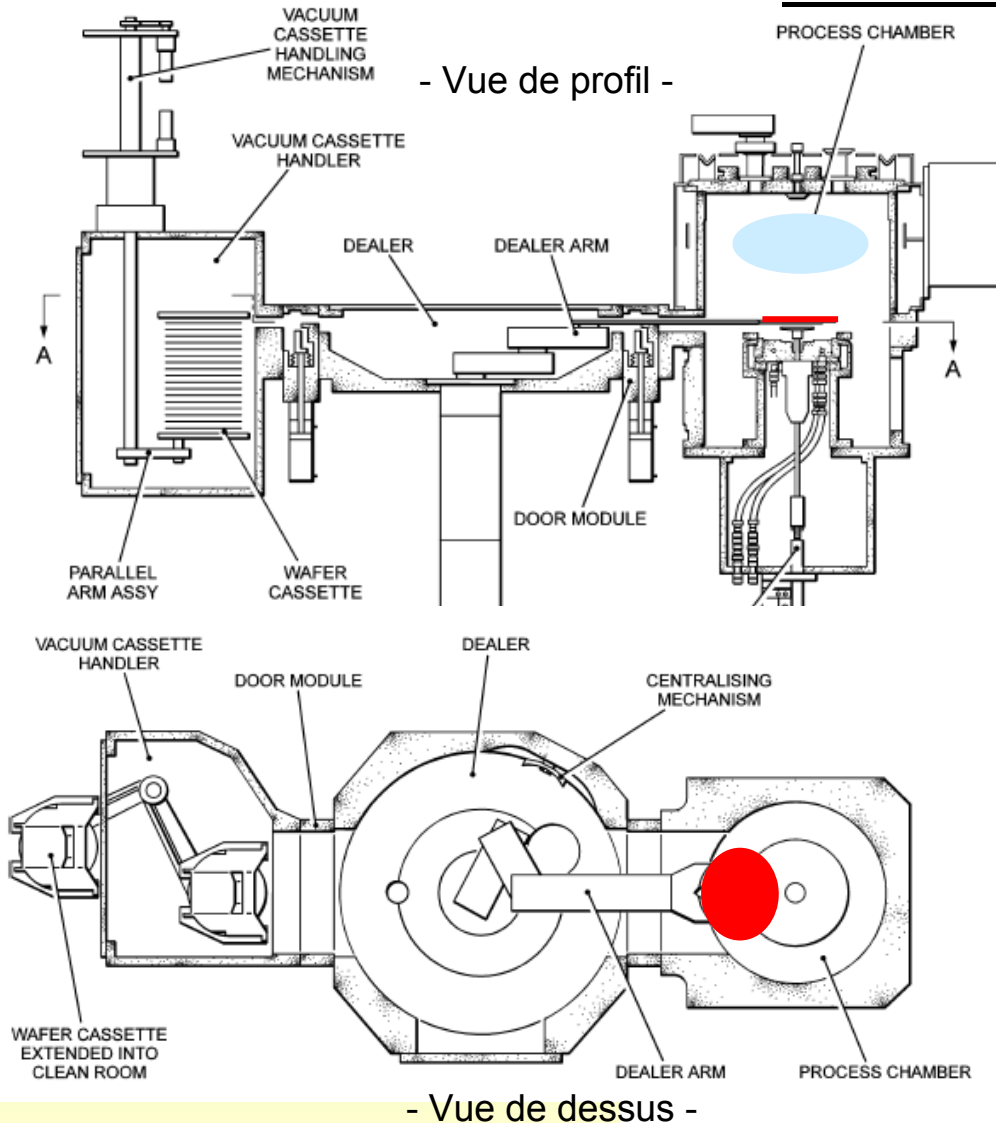
RIE du SiO_2 , Si_3N_4 pour MEMS et μ électronique

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

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

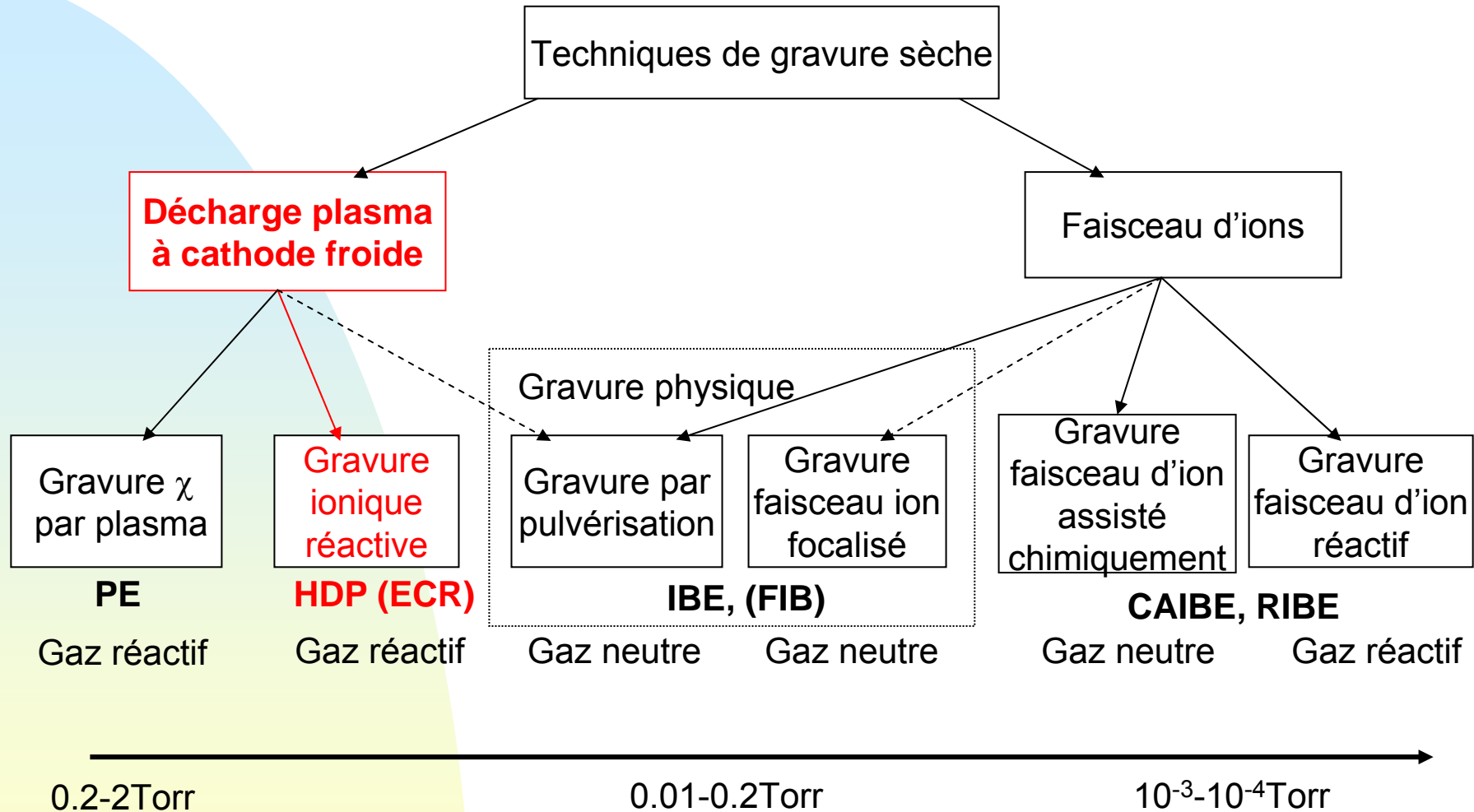
Sources et équipements plasma pour la gravure (16)

Aviza Technology

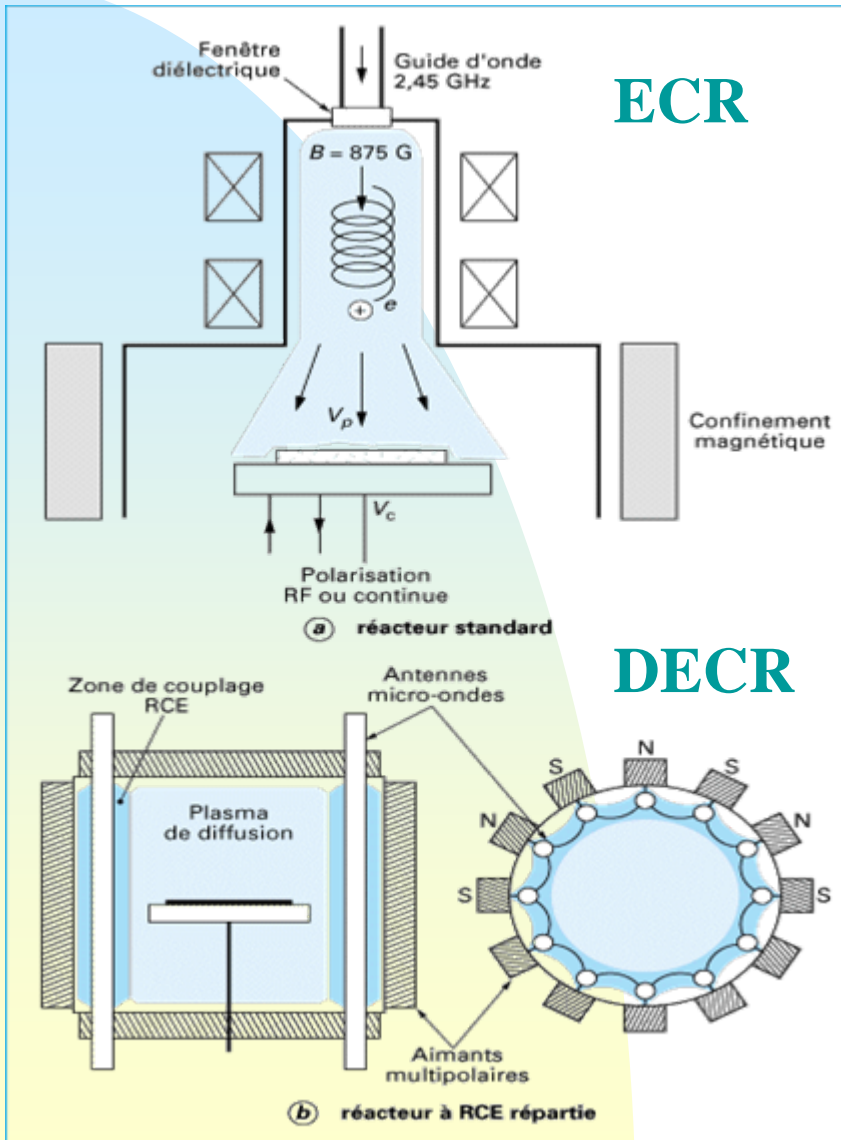


- wafer maintenu par clamping électrostatique (face arrière ok avec SiO_2 , Si_3N_4 si $e < 2\mu\text{m}$)

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 $T_{e^-} \nearrow$ ($< 3 \text{ eV}$ en DECR)
- confinement magnétique : uniformité \nearrow

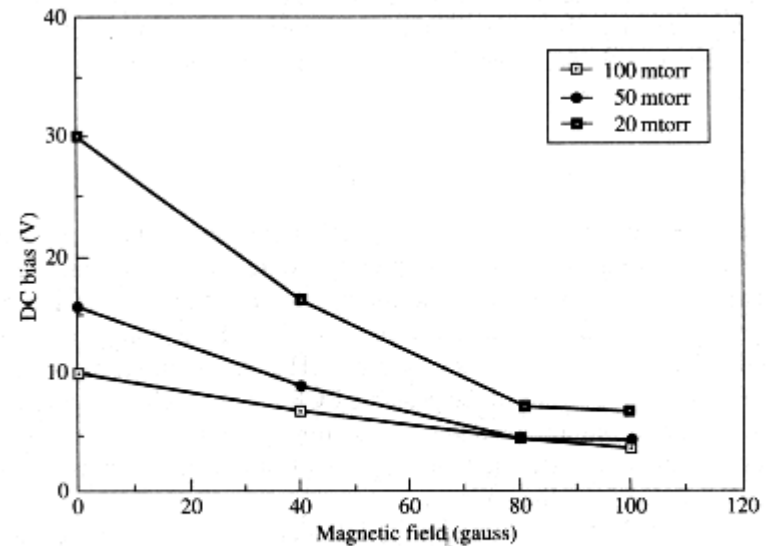
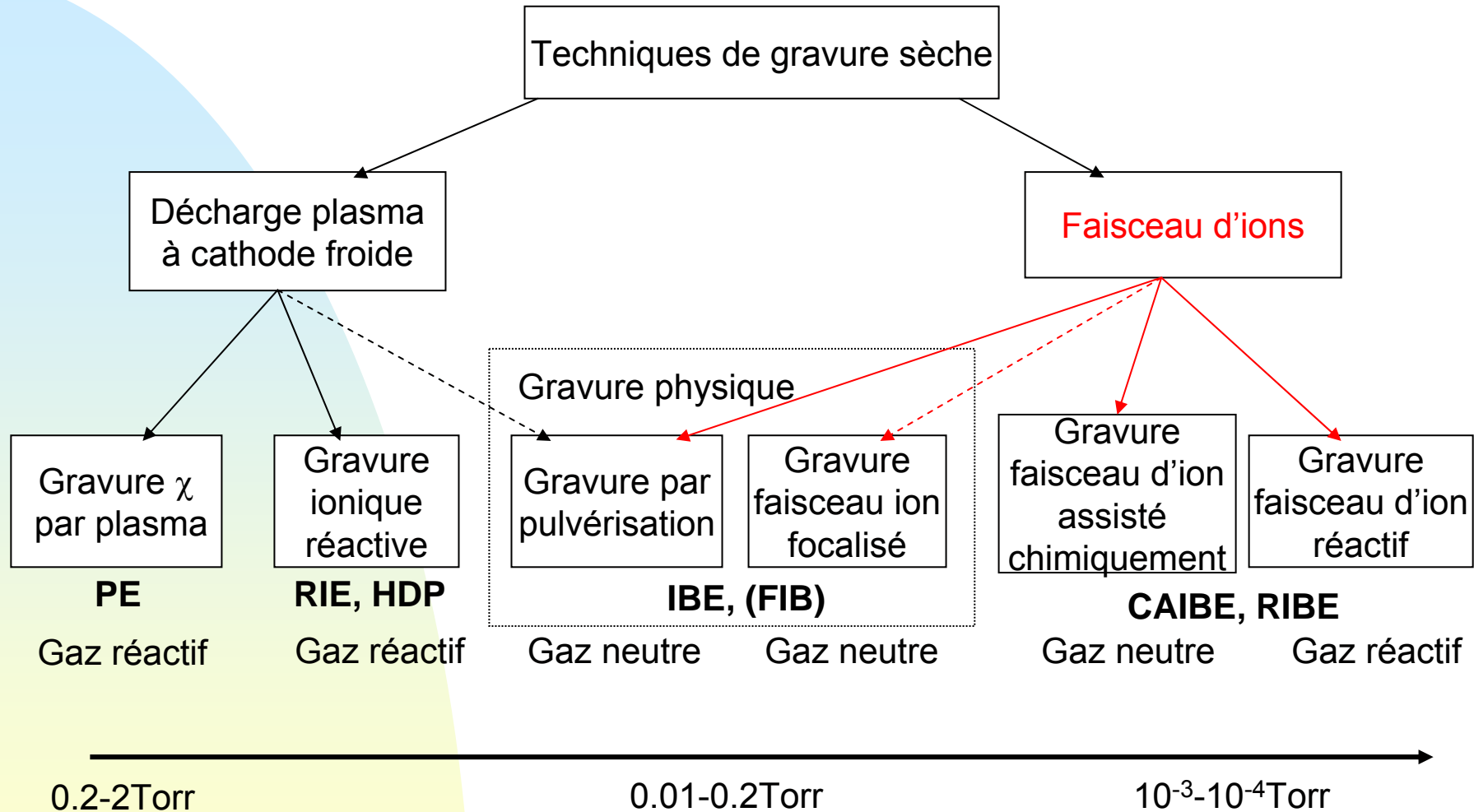
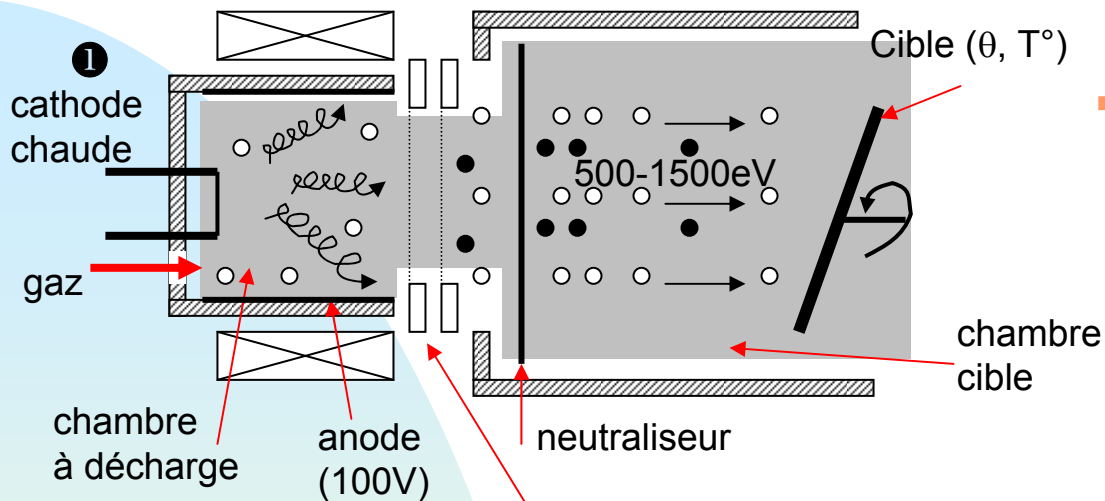


FIGURE 16
Effect of magnetic field on self-bias voltage. (After Lii, Ng, and Danner, Ref. 10.)

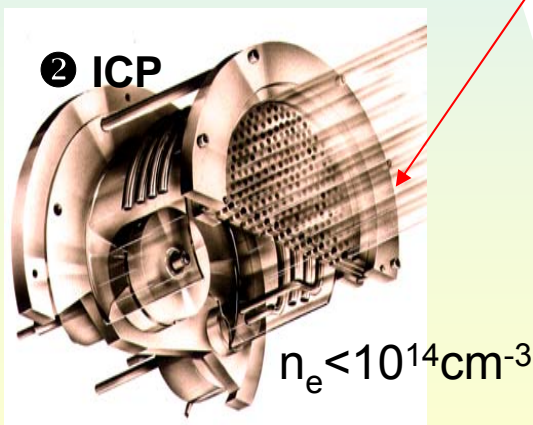
Sources et équipements plasma pour la gravure (19)



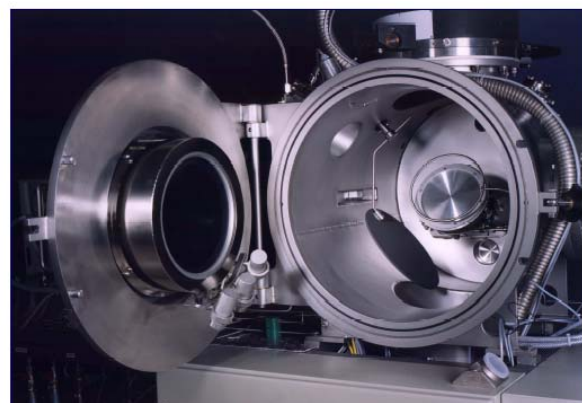
Sources plasma et équipements pour la gravure (21)



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



Grilles
accélération

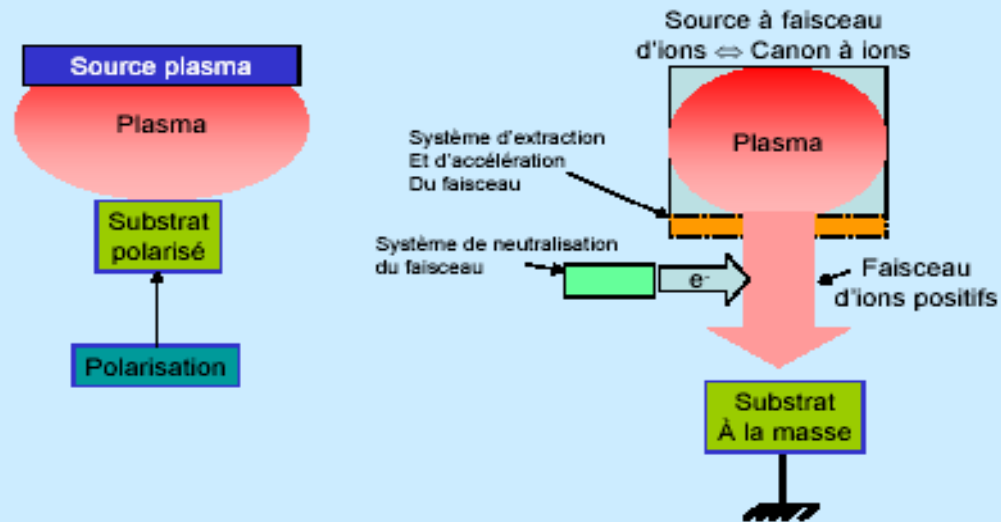


- **Source froide sans filament :**
RF+ ICP (ion $<$ 200eV), ECR
- zone d'ionisation (cathode émissive)
- grilles accélération/décélération
- neutraliseur par e^-

- **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

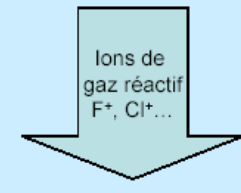
Gravure par faisceau d'ions

IBE
(Ion Beam Etching)



Effet physique : pulvérisation

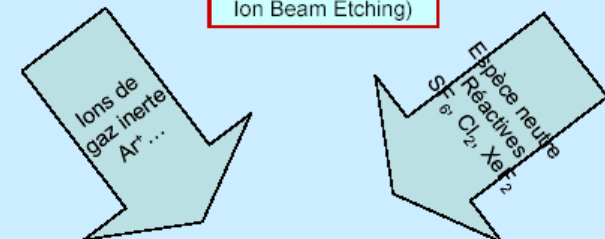
RIBE
(Reactive Ion Beam Etching)



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^{ere} partie