

Cristaux Photoniques, PO-014

Ecole doctorale photonique

Romuald Houdré

Semestre été 2007

IV Fabrication

Plan

*1 Introduction, survol du domaine.

- Introduction
- Histoire des cristaux photoniques
- Les principaux concepts

*2 Théorie

- Cristal infini
 - Equations de base
 - Structure de bandes
 - Ondes planes
- Cristal fini
 - Matrice de transfert
 - FDTD

*3 Propriétés physiques

- Contrôle des ondes électromagnétiques
 - Miroir
 - Guide d'onde
 - Résonateurs optiques
- Propriétés réfractives
- Diagramme de dispersion et nappes equi-fréquence
- Réfraction
- Analyse de Fourier des ondes de Bloch
- Superprisme, ultraréflexivité, réfraction négative
- Auto-collimation

*4 Techniques de fabrication

- écriture, gravure
- 2D, III-V, Si, SOI
- 3D, Opales

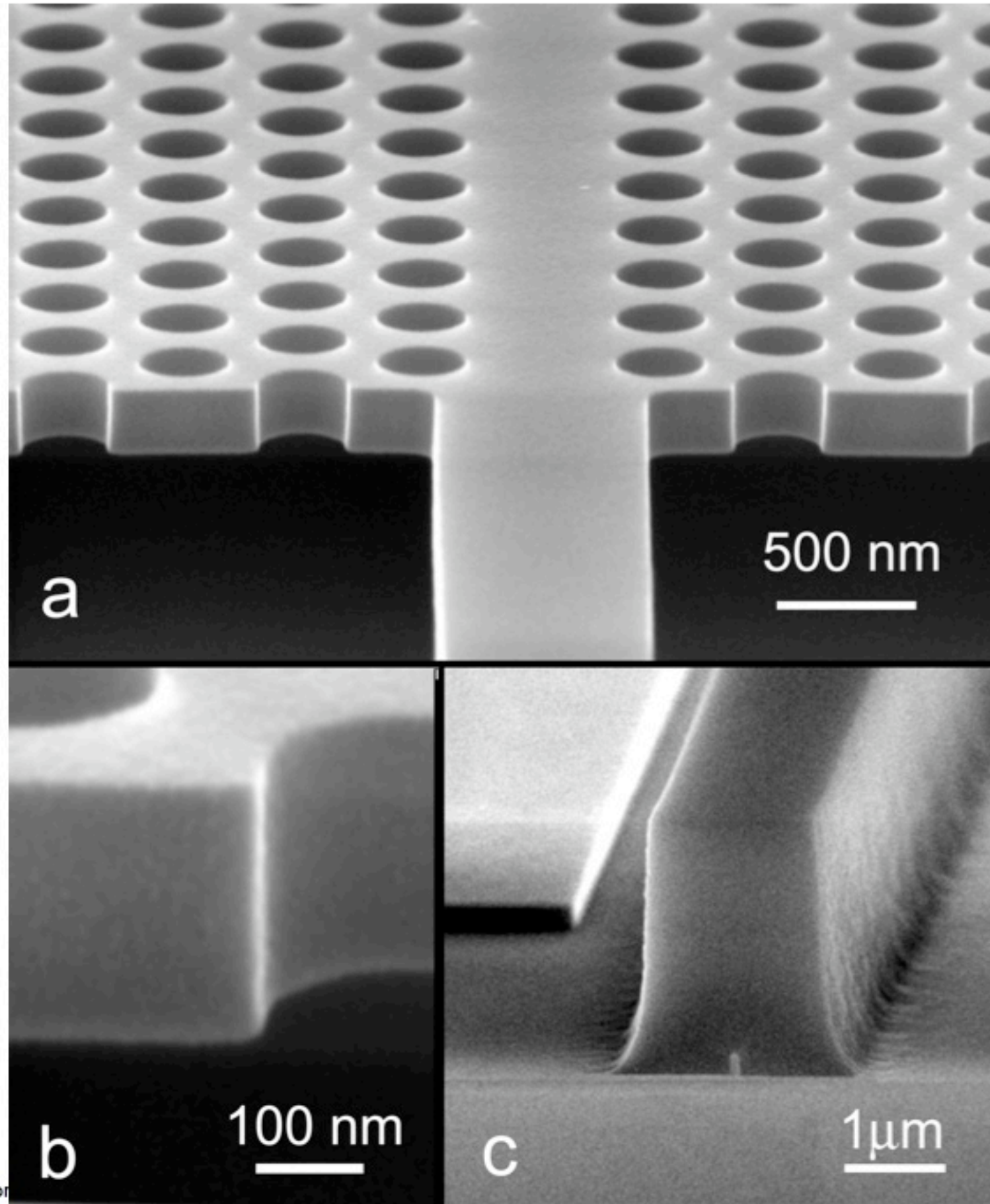
*5 Techniques de mesure

- Source interne
- Injection face clivée

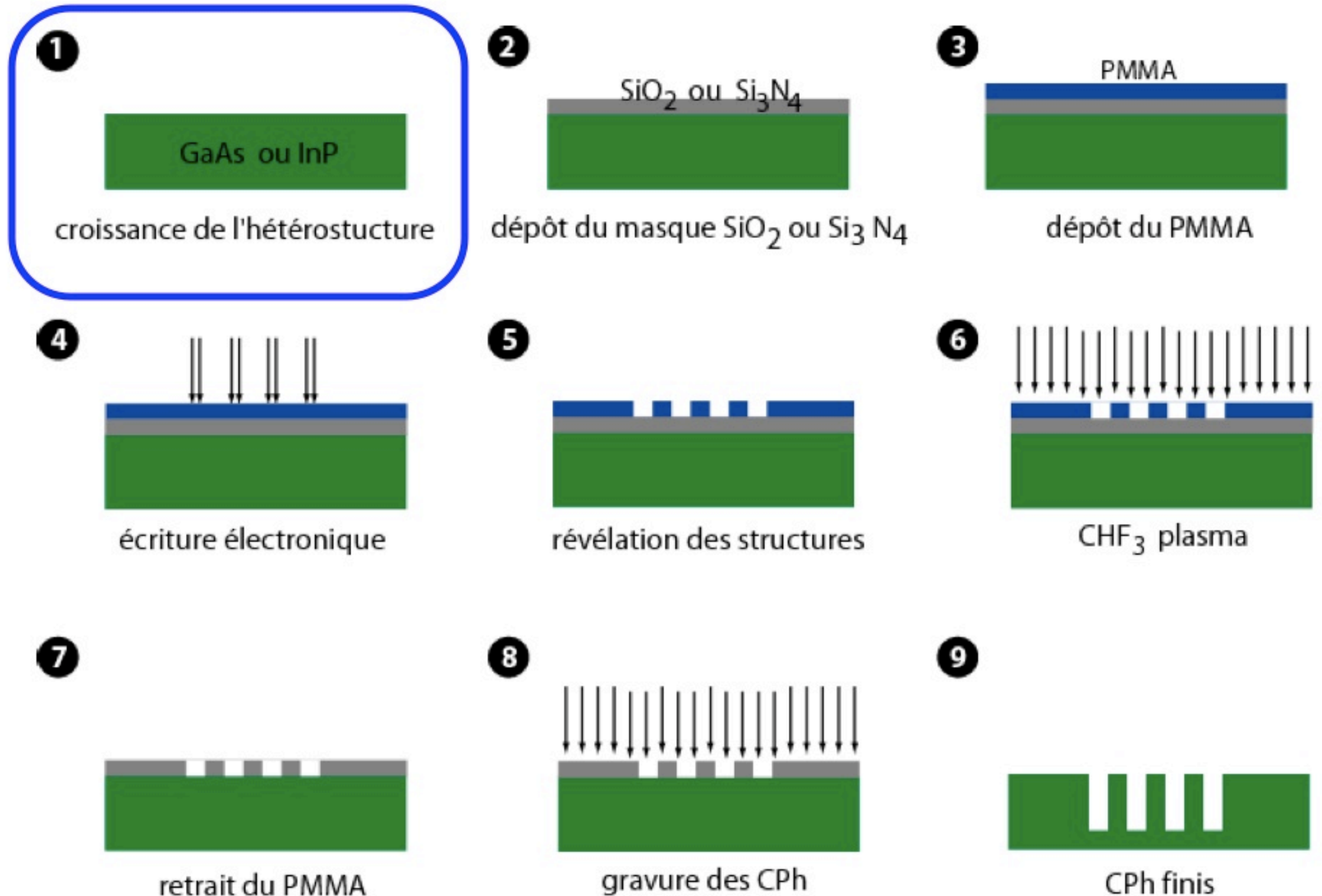
*6 Composants

- Virages, diviseurs, coupleurs
- Filtres multiplexeurs / démultiplexeurs
- Spectromètres et interféromètres
- Coupleurs
- Polariseur et rotateur
- Lasers à cristaux photoniques
- Lasers 1D
- Amplificateurs
- Lasers cavités 0D
- Cavités à grand facteur de qualité
- Modes lents

Fabrication cristaux 2D

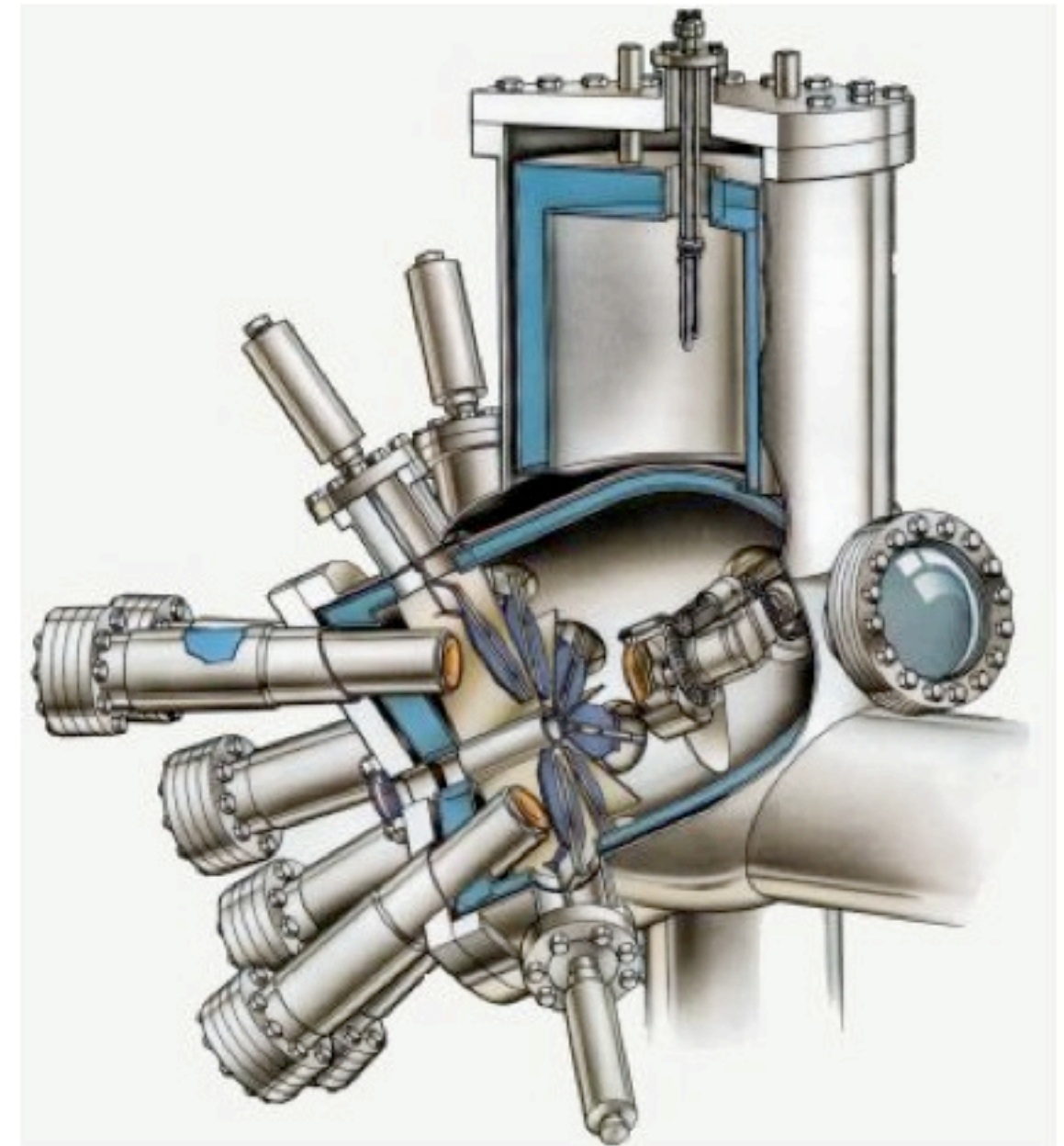
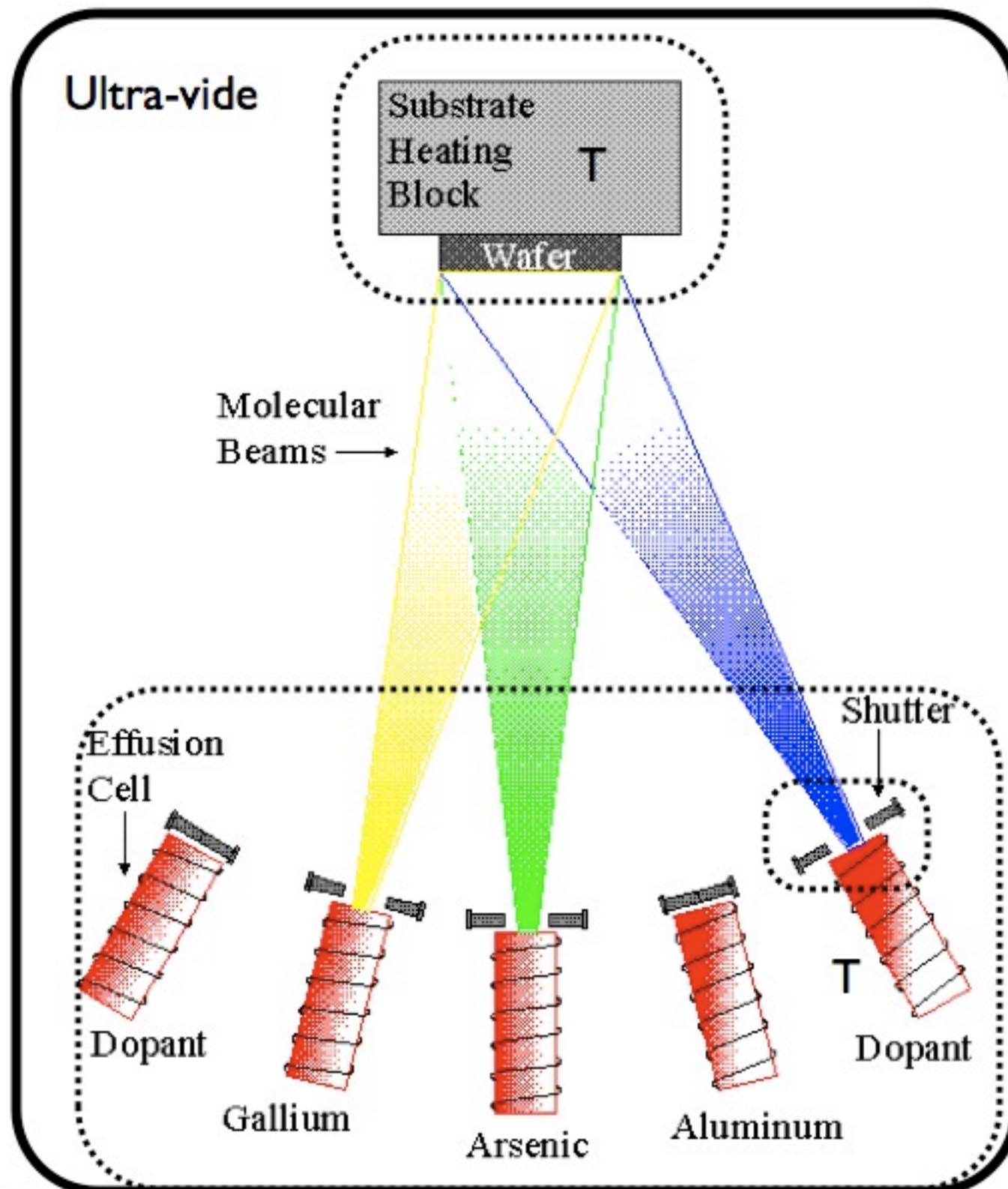


Fabrication cristaux 2D



Croissance du guide d'onde planaire

Epitaxie par jets moléculaires (EJM / MBE)

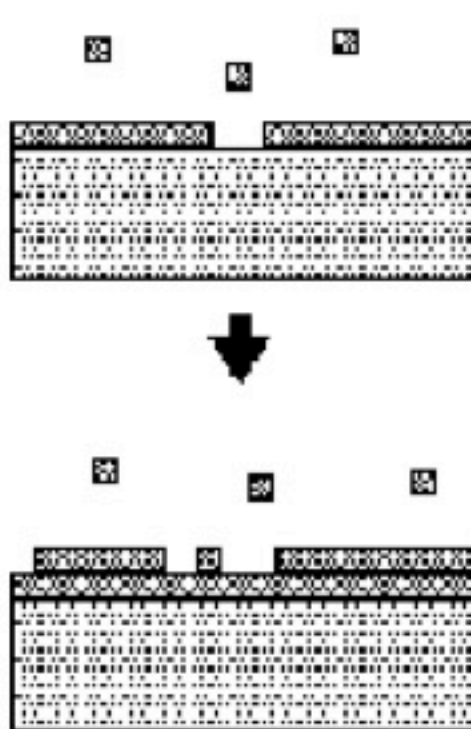


MBE VG

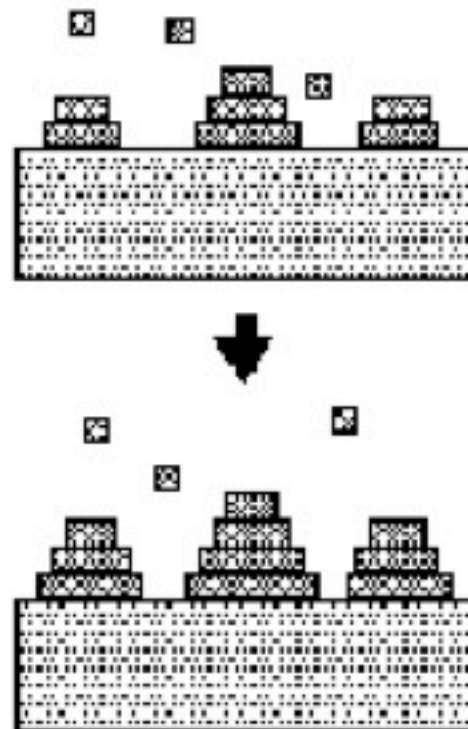
Croissance du guide d'onde planaire

Epitaxie par jets moléculaires (EJM / MBE)

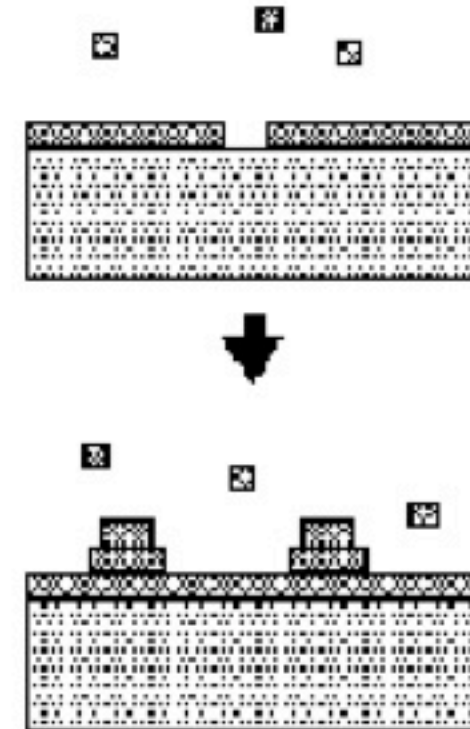
Frank-van der Merwe



Volmer-Weber



Stranski-Krastanow

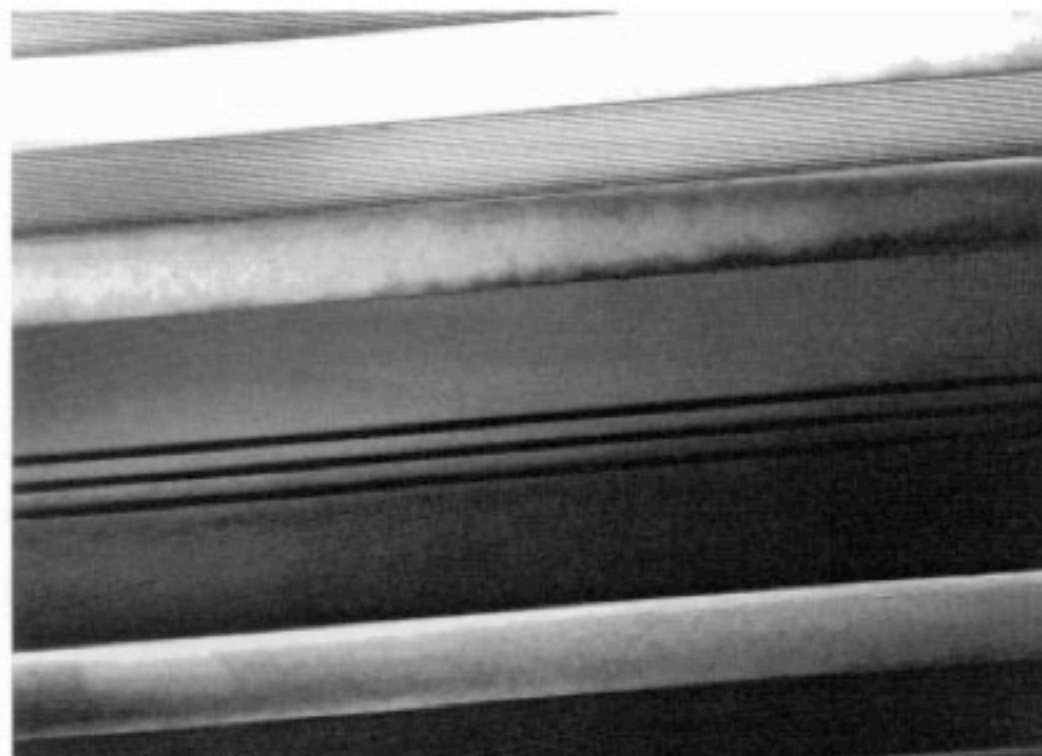


$\text{Al}_{0.1}\text{Ga}_{0.9}\text{As}$

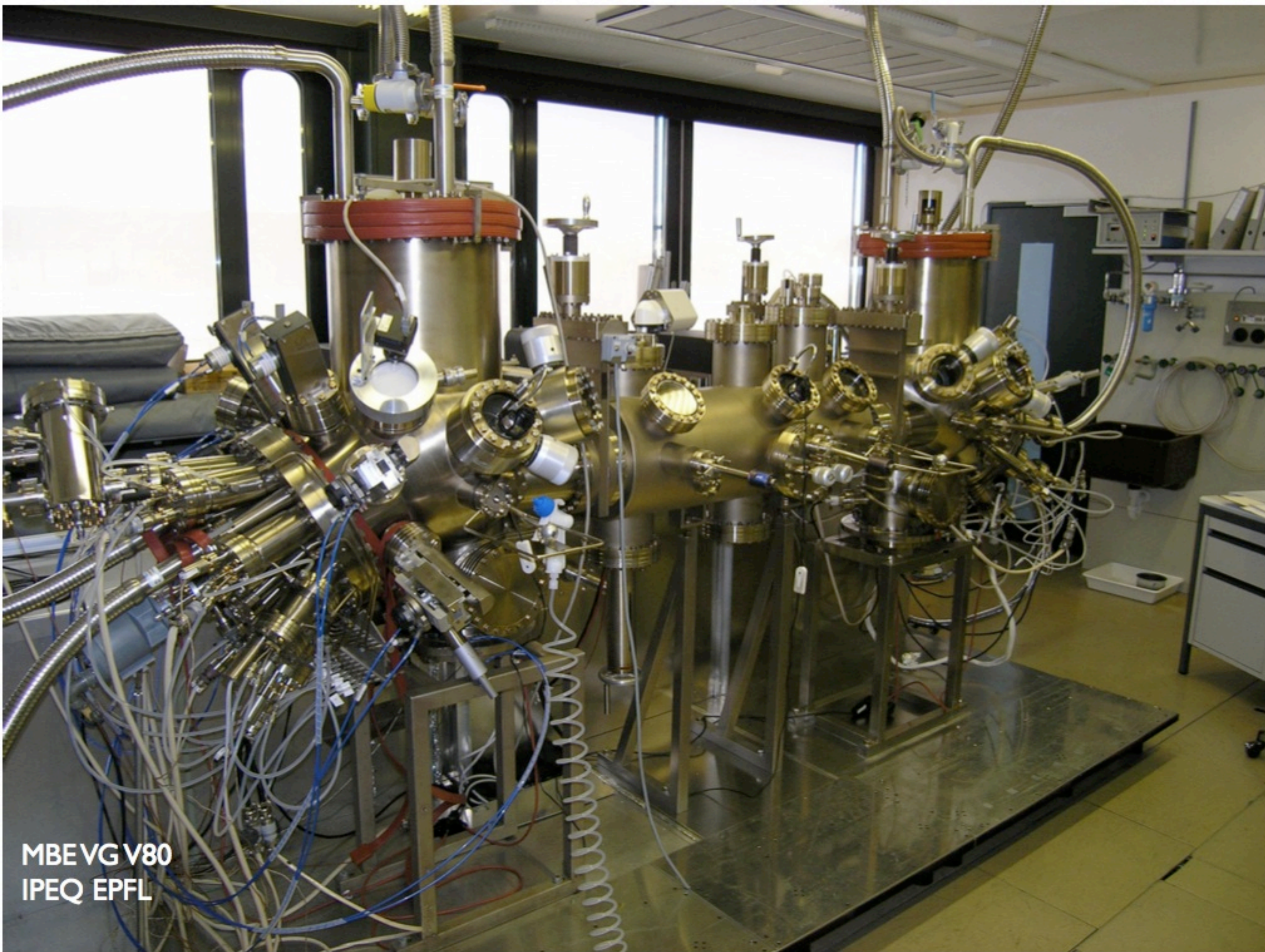
AlAs

3 x InGaAs

AlAs

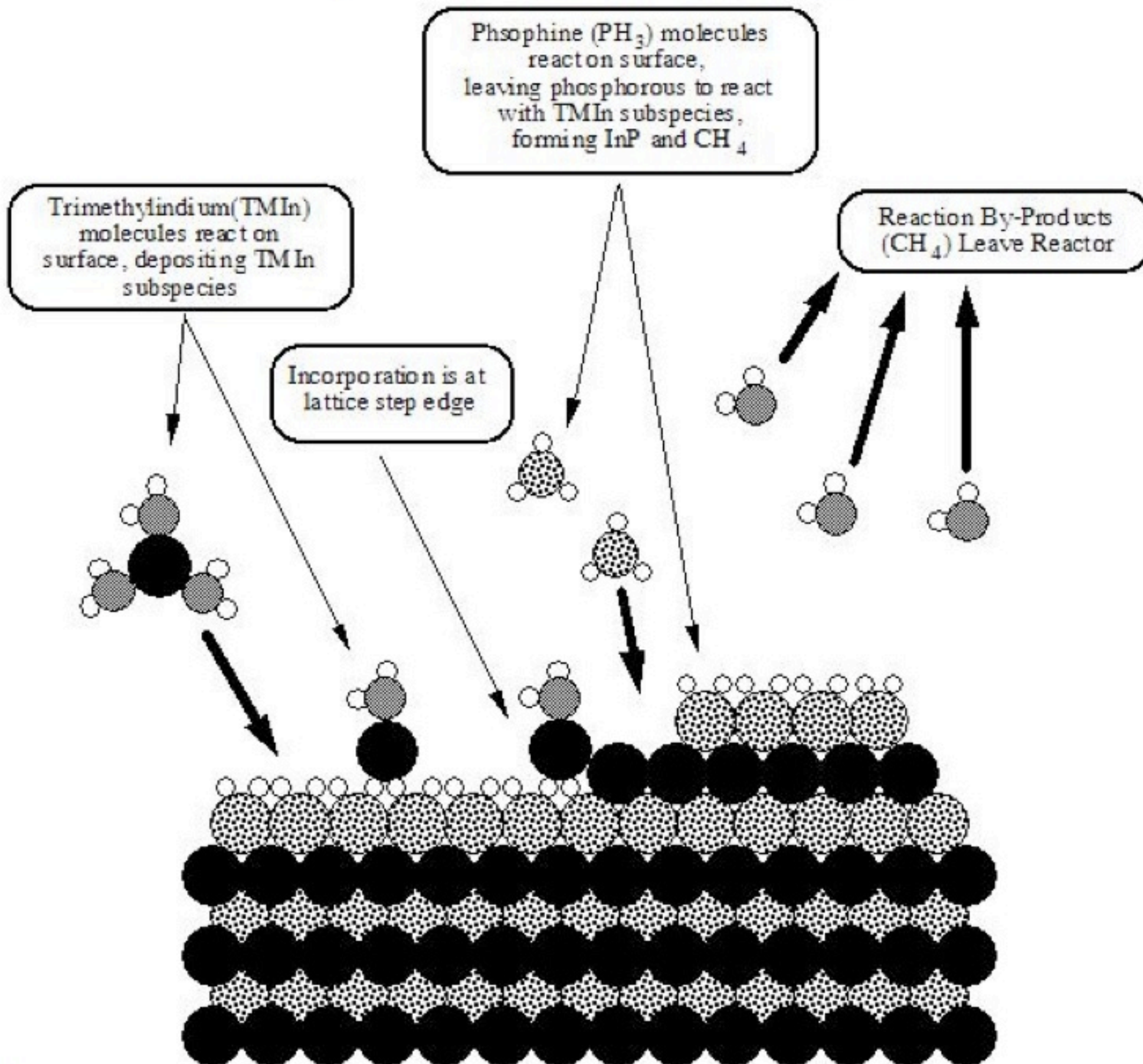


Puits quantique 80 Å

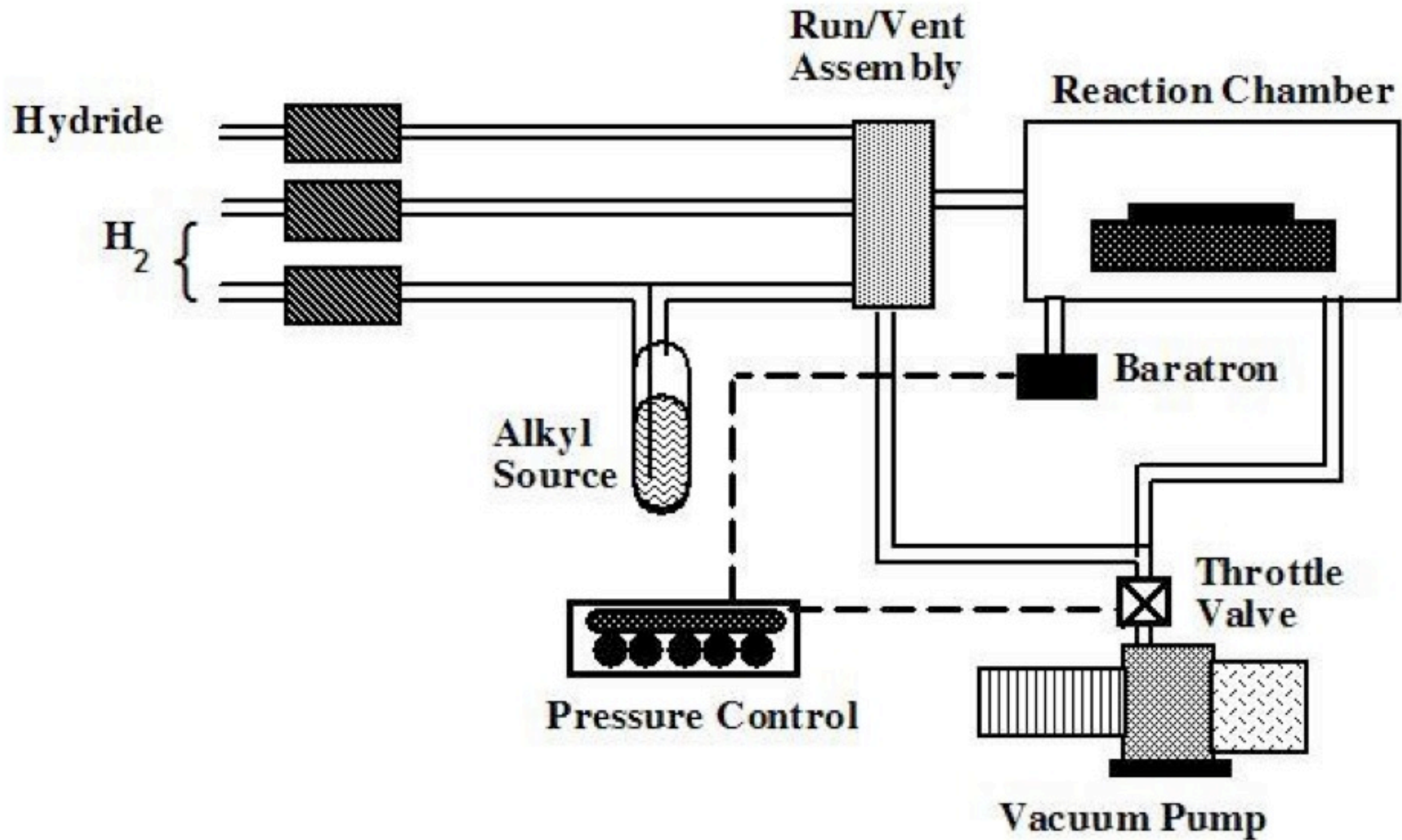


MBE VG V80
IPEQ EPFL

Epitaxie organométalliques



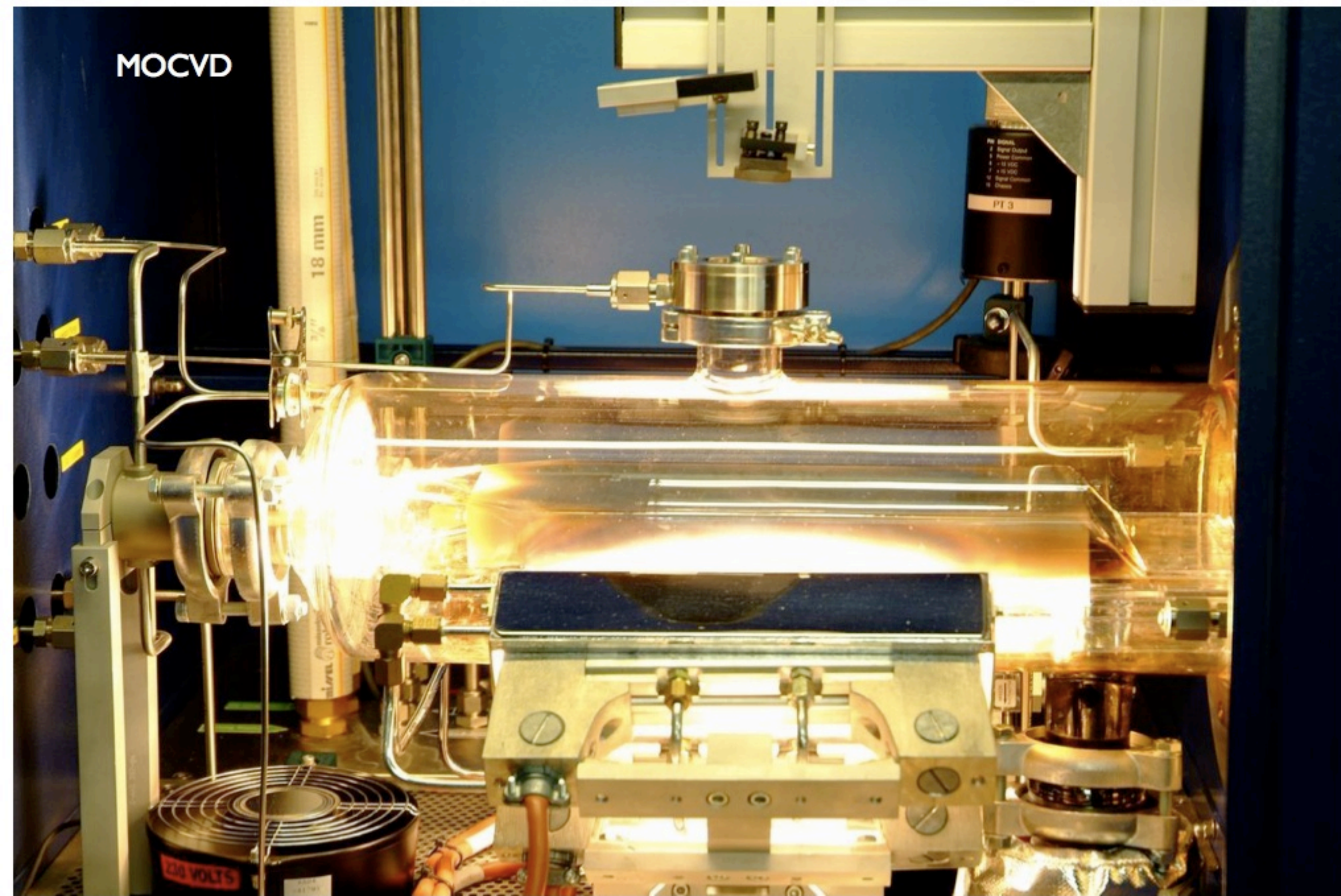
Epitaxie organométalliques



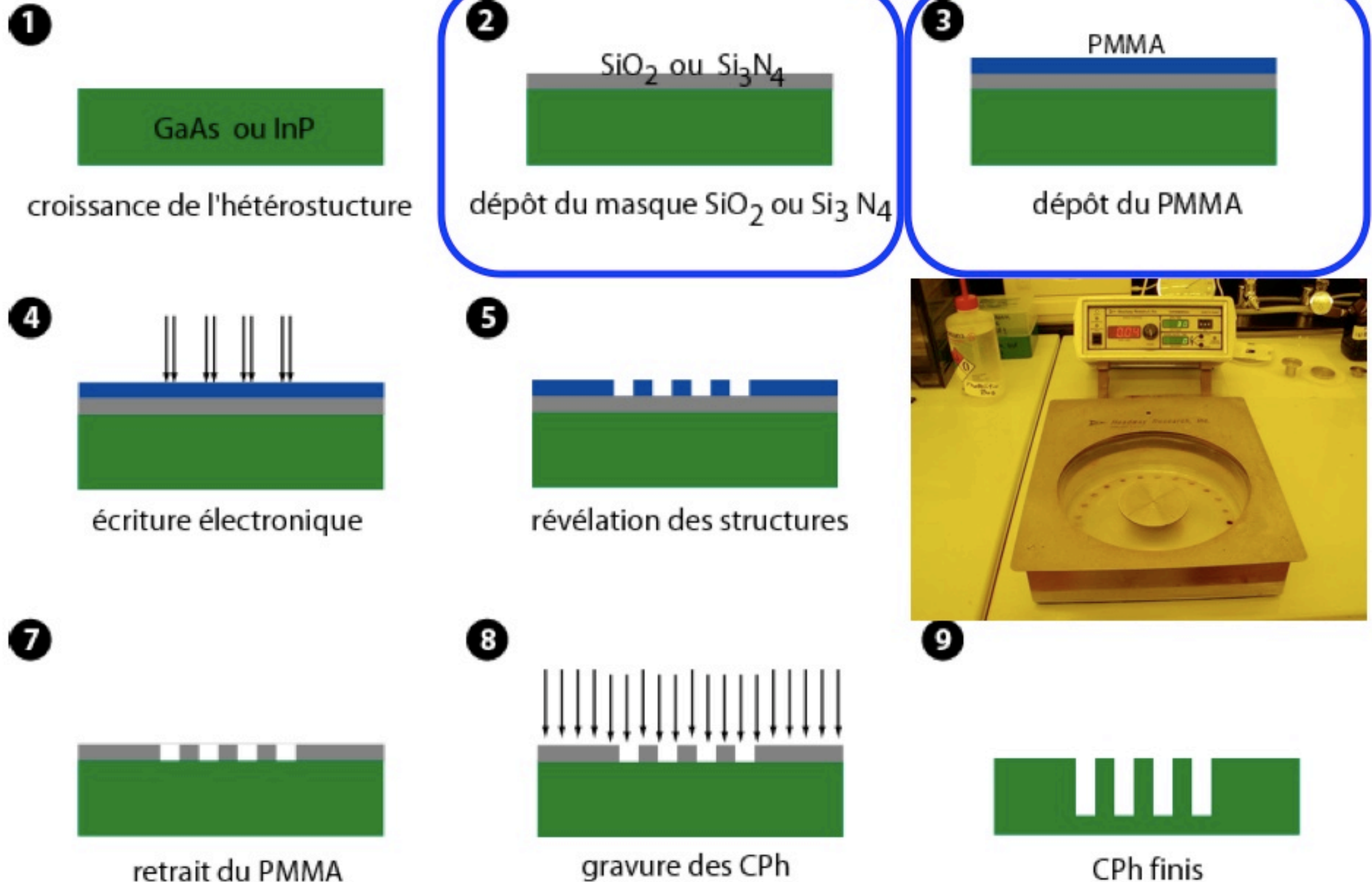


MOCVD

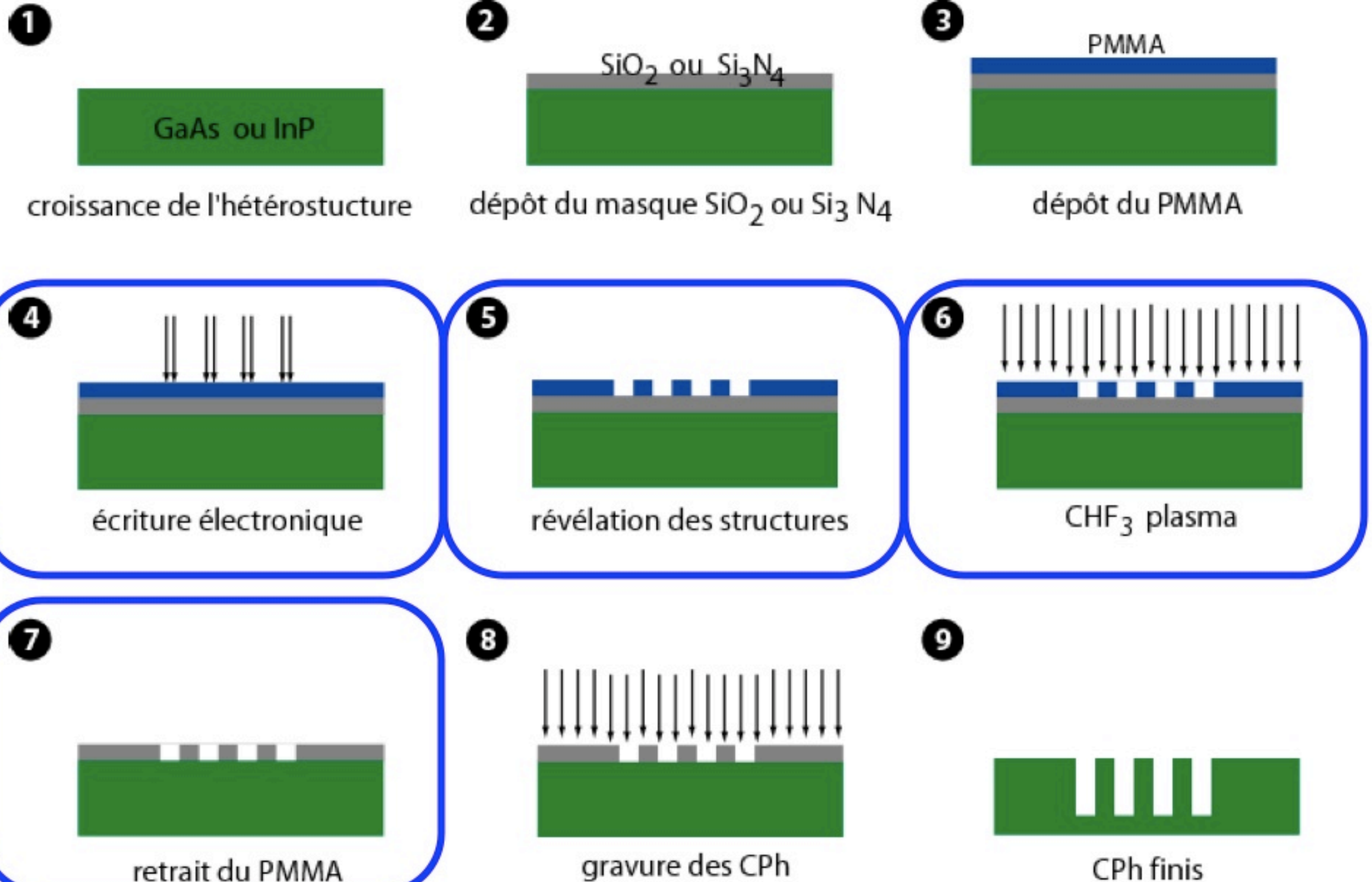
MOCVD



Fabrication cristaux 2D

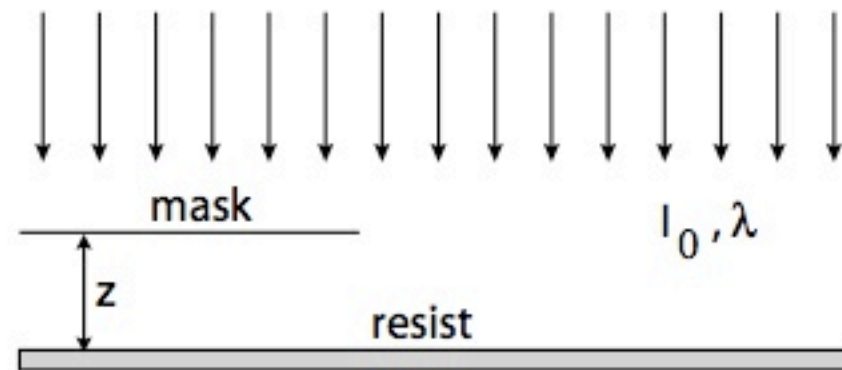


Fabrication cristaux 2D



Écriture

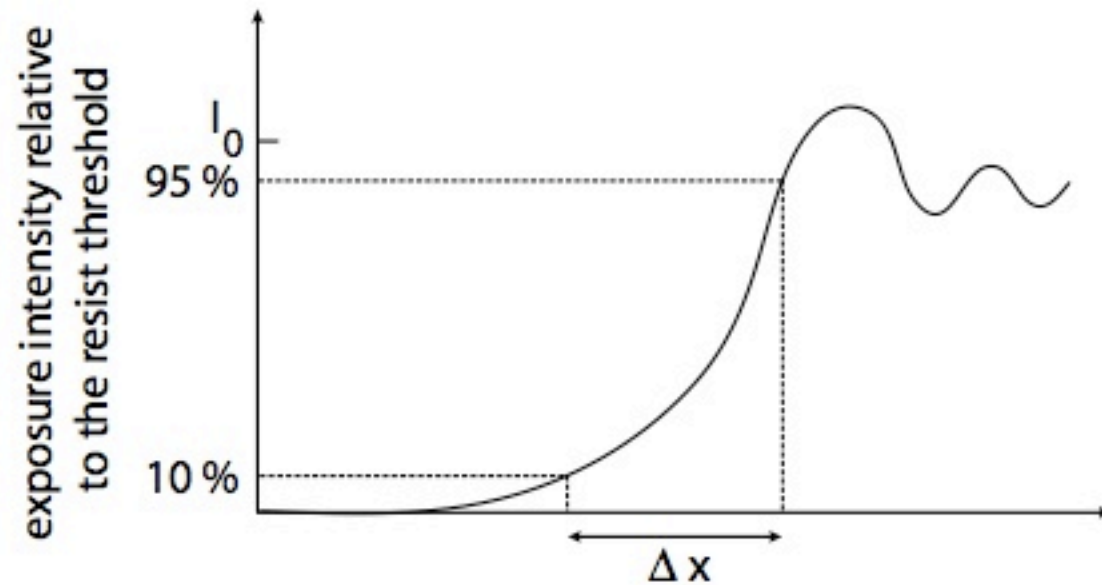
Les techniques usuelles de la microélectronique par lithographie optique n'ont pas la résolution nécessaire



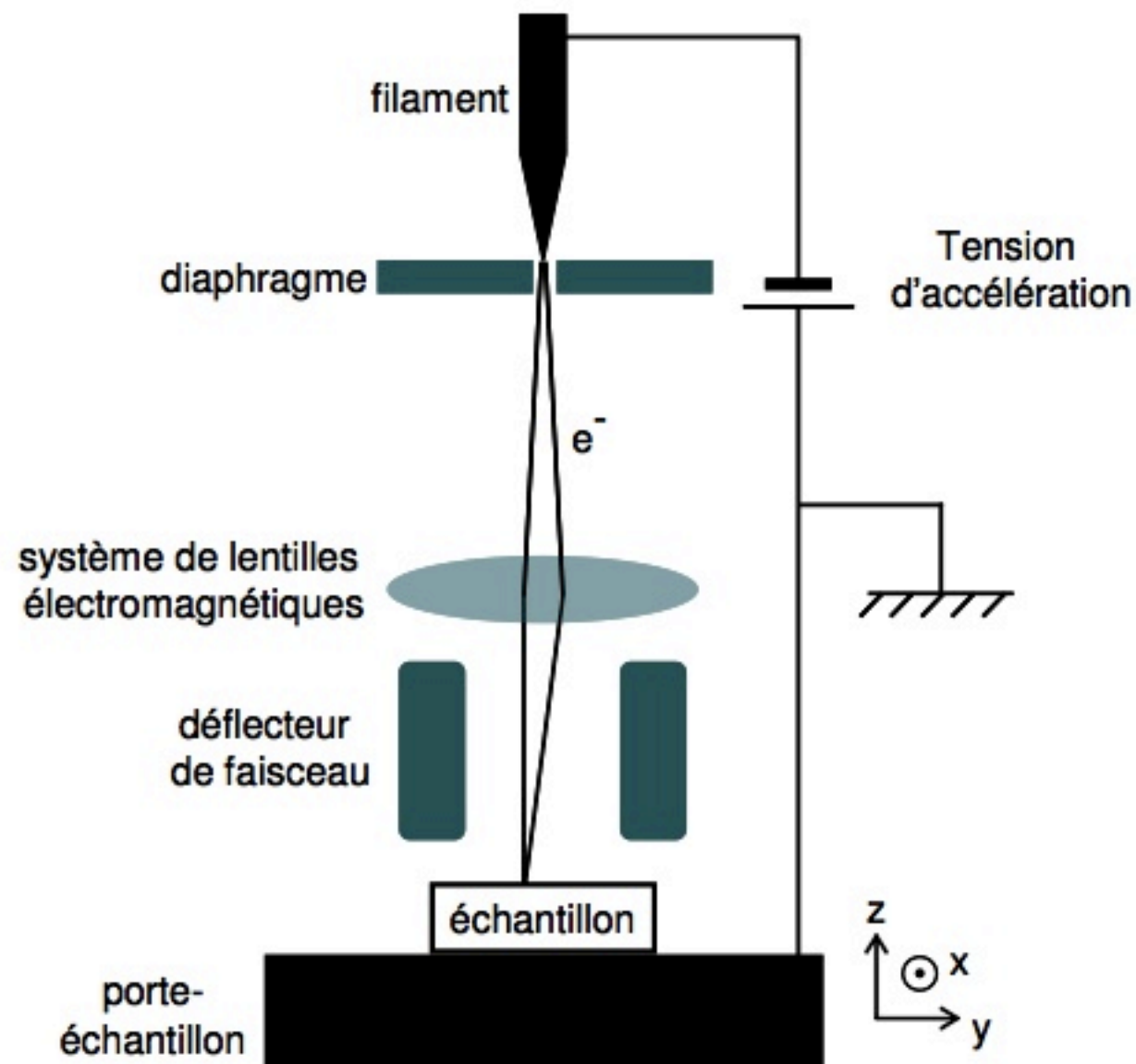
$$\Delta x = \frac{3}{2} \sqrt{\lambda \left(z + \frac{d}{2} \right)}$$

Diminuer la longueur d'onde:

- UV lointain
- électrons
- ions



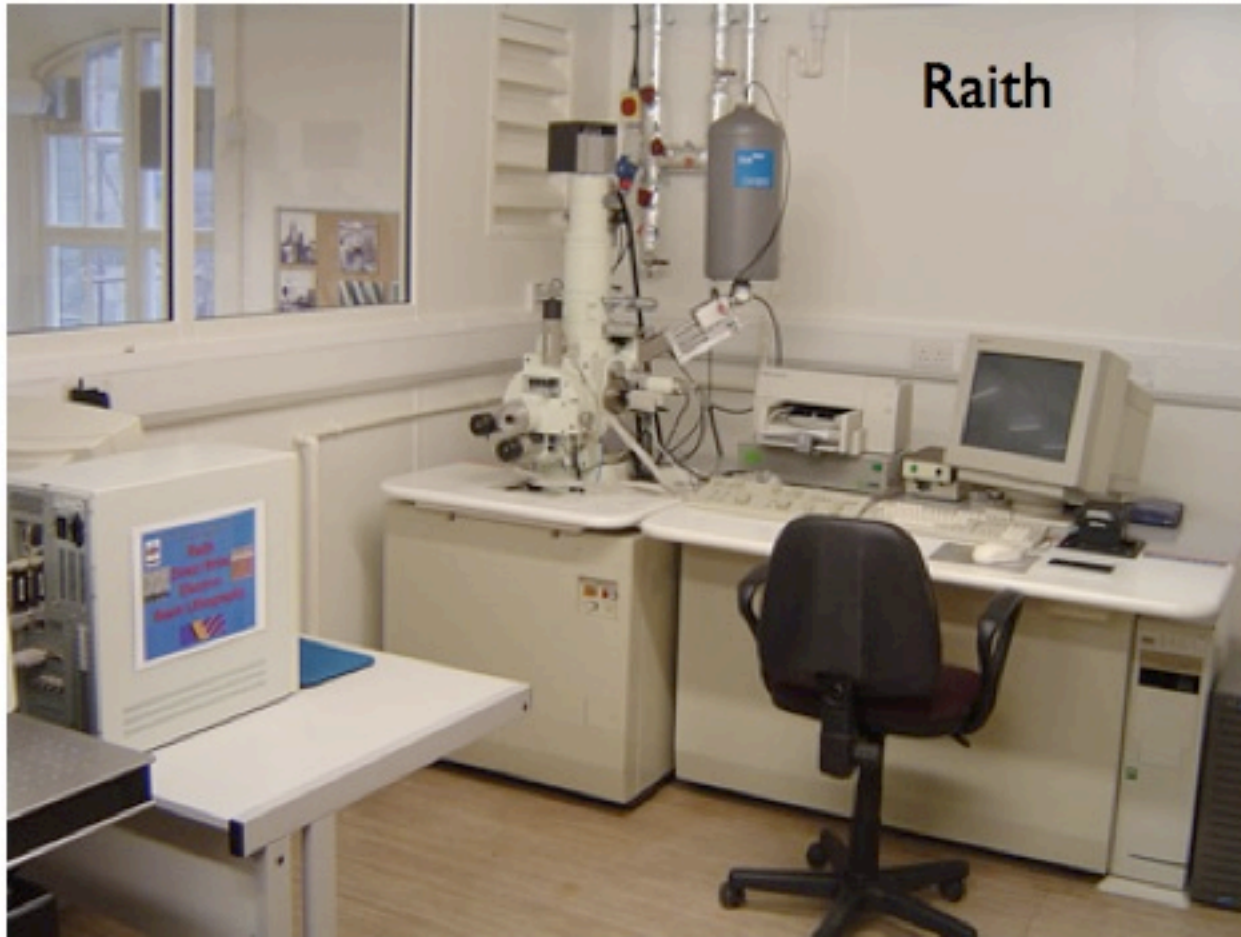
Lithographie électronique



- Ecriture dans des résines sensibles à l'irradiation électronique
- Résine de polymère (PMMA, ZEP etc...)
- Les électrons (20-100 keV) brisent les chaînes en chaînes plus courtes
- Dissolution sélective entre polymère original et polymère modifié

Microscope électronique à balayage

Ecriture électronique

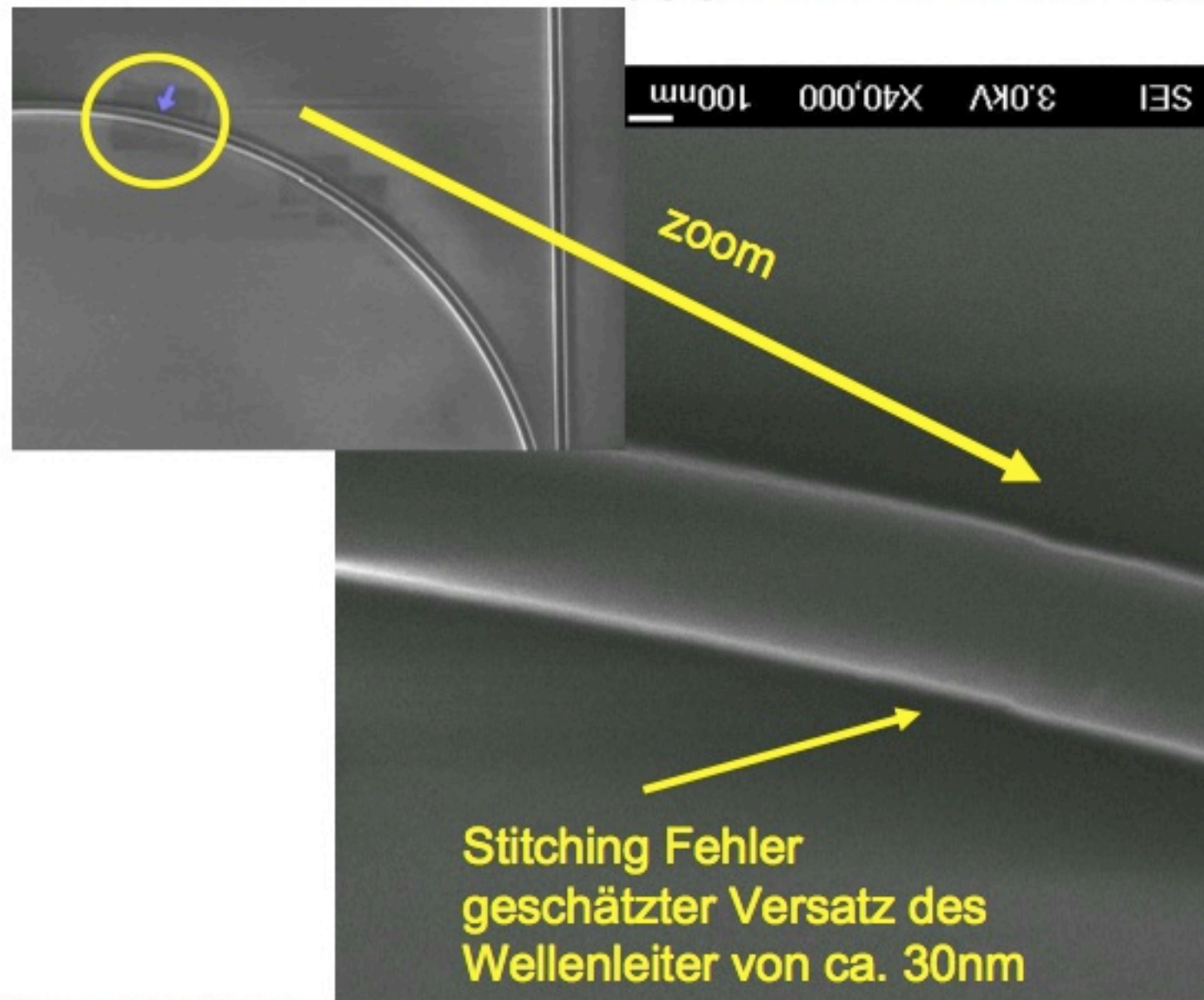


Ecriture

Lithographie électronique

Limites :

- Procédé non parallèle, donc lent
- Champs d'écriture limités (qq $100 \times 100 \mu\text{m}^2$), raccord de champs



Courtoisie, M. Först, Aachen

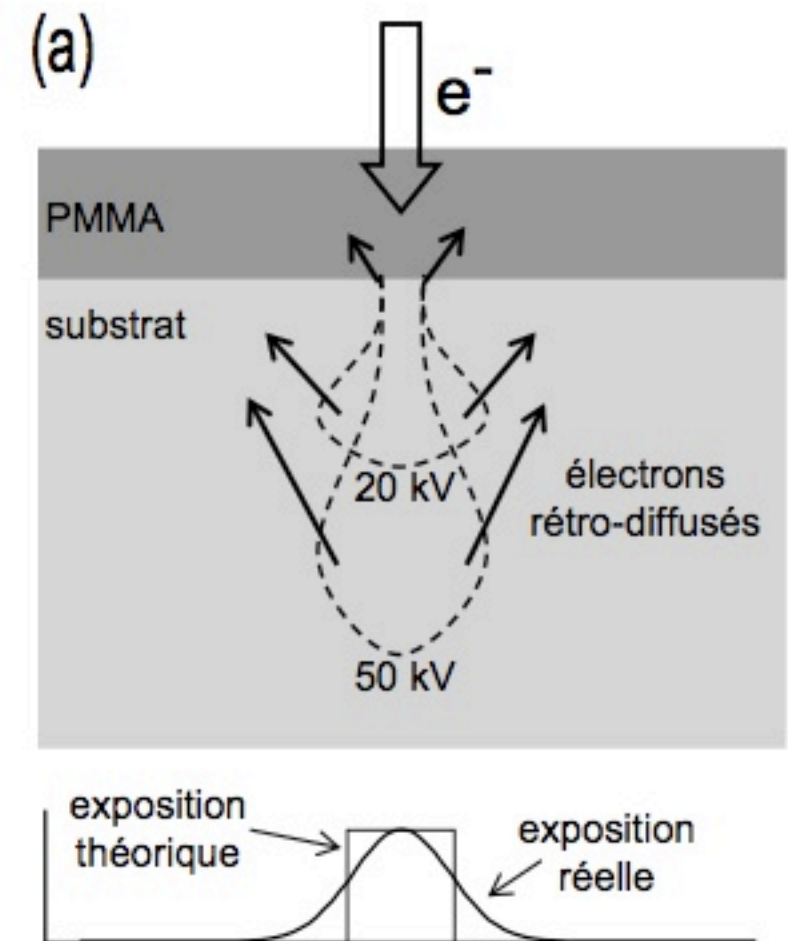
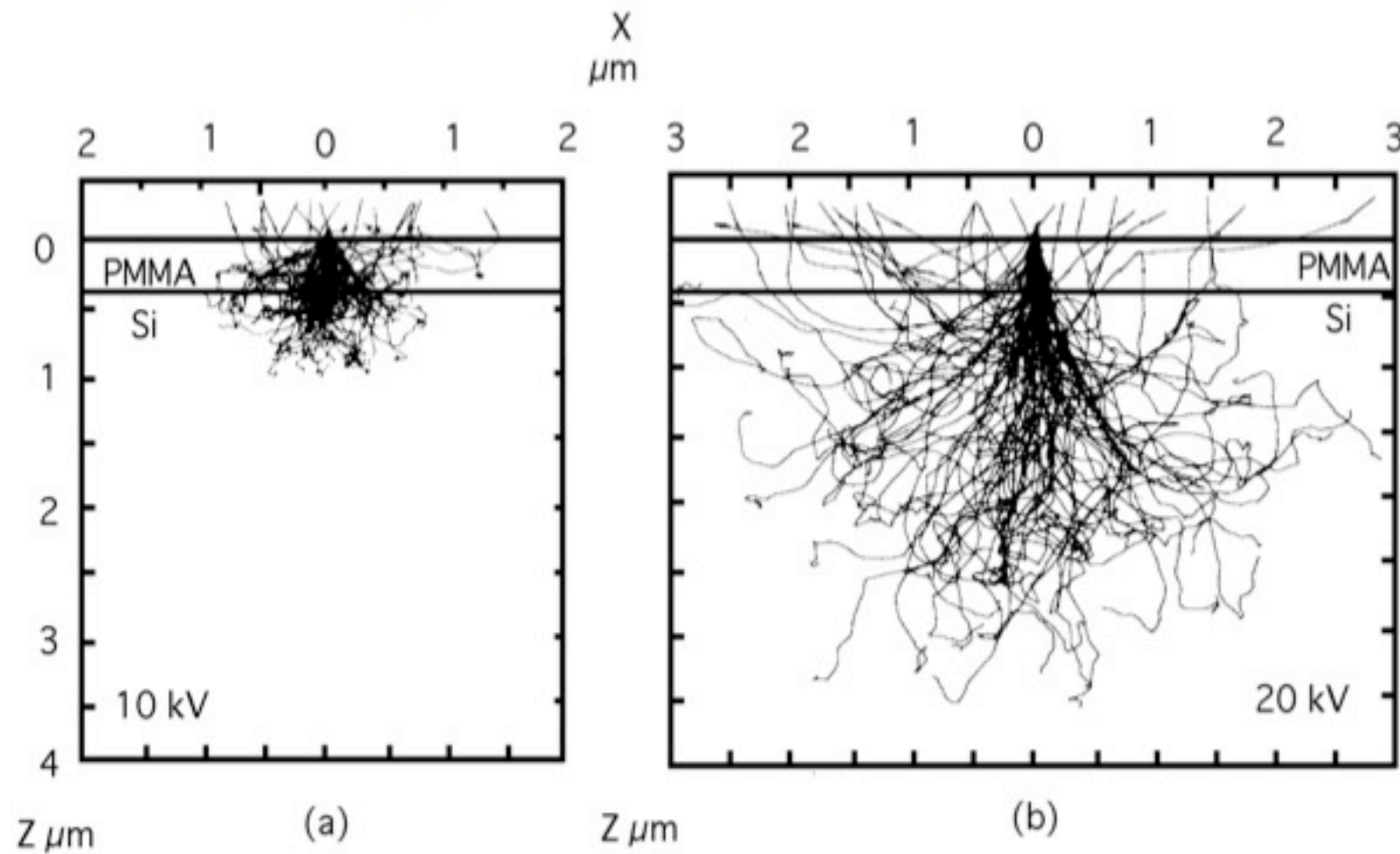
Ecole doctorale photonique, Cristaux Photoniques, PO-014, Romuald Houdré, Semestre été 2009

Ecriture

Lithographie électronique

Limites :

- Effets de proximité



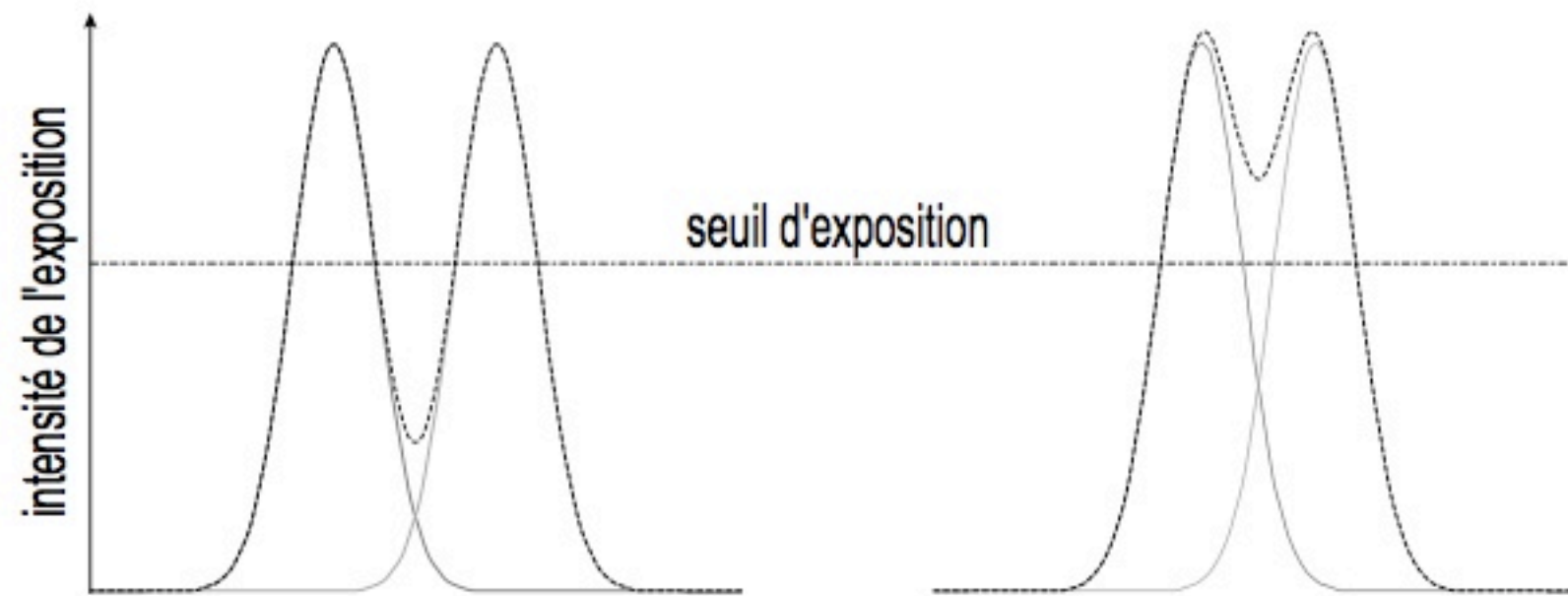
Écriture

Lithographie électronique

Limites :

- Effets de proximité

(b)



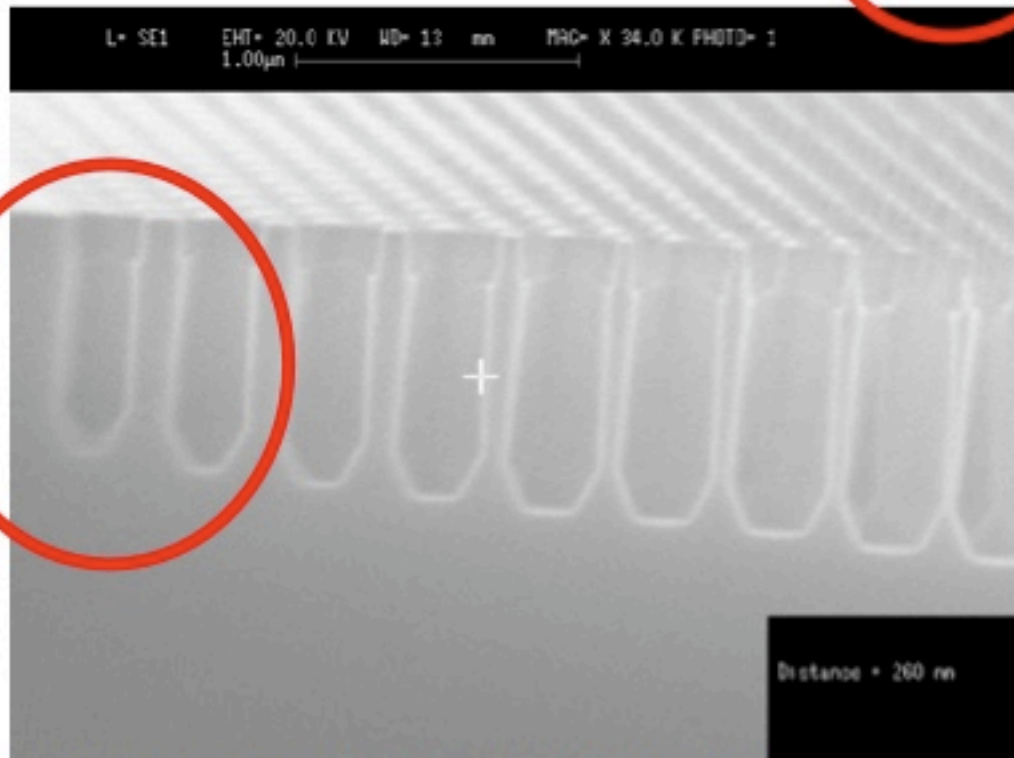
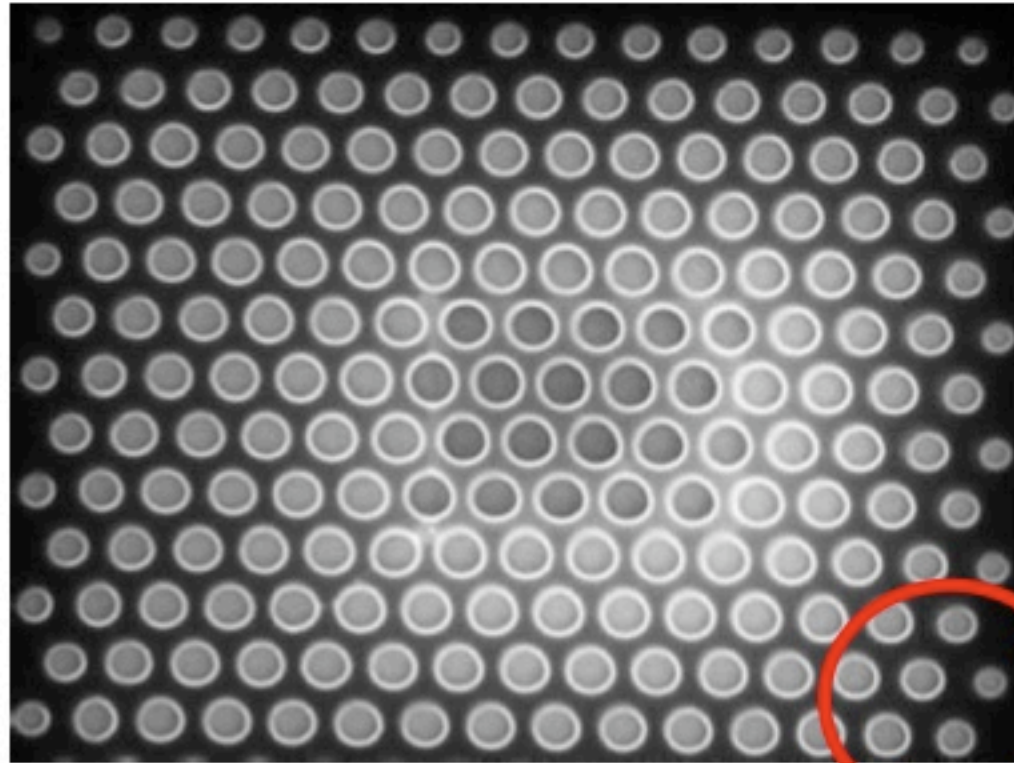
Correction par modulation de la dose (procédé gourmand en temps de calcul)

Les effets de proximité sont maximum autour de 50 keV

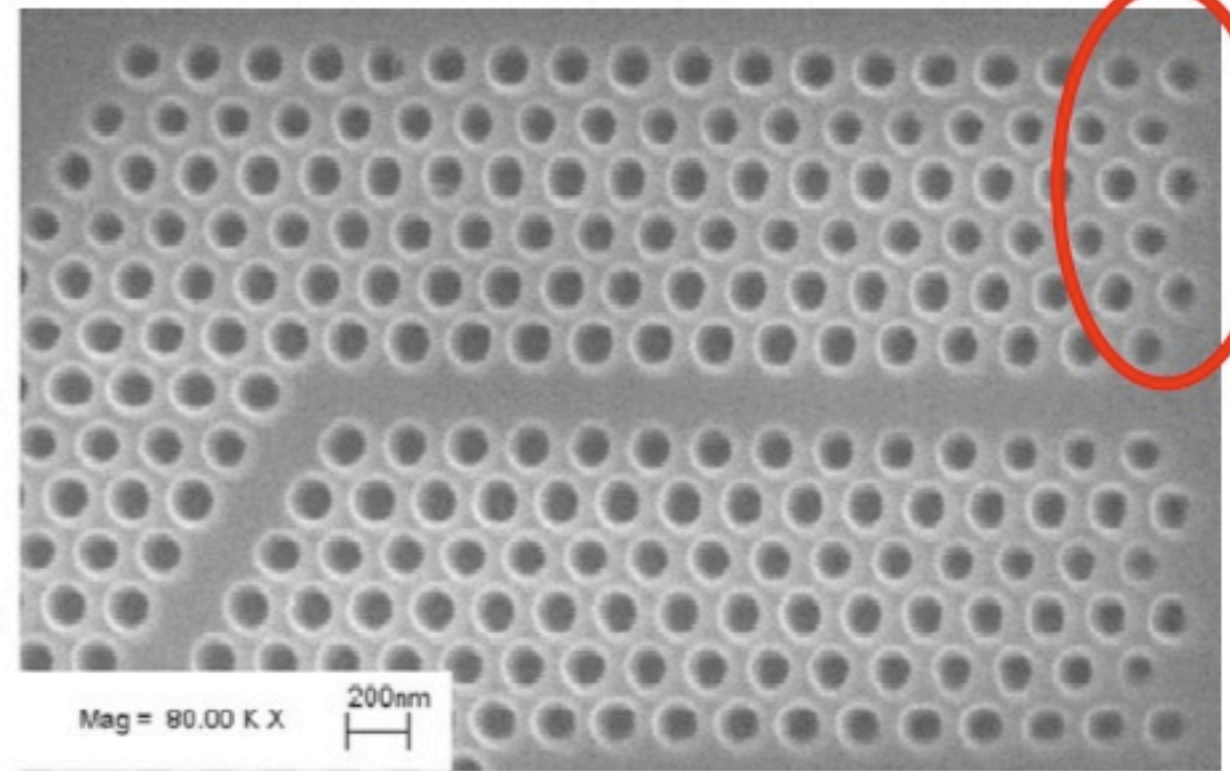
Lithographie électronique

Limites :

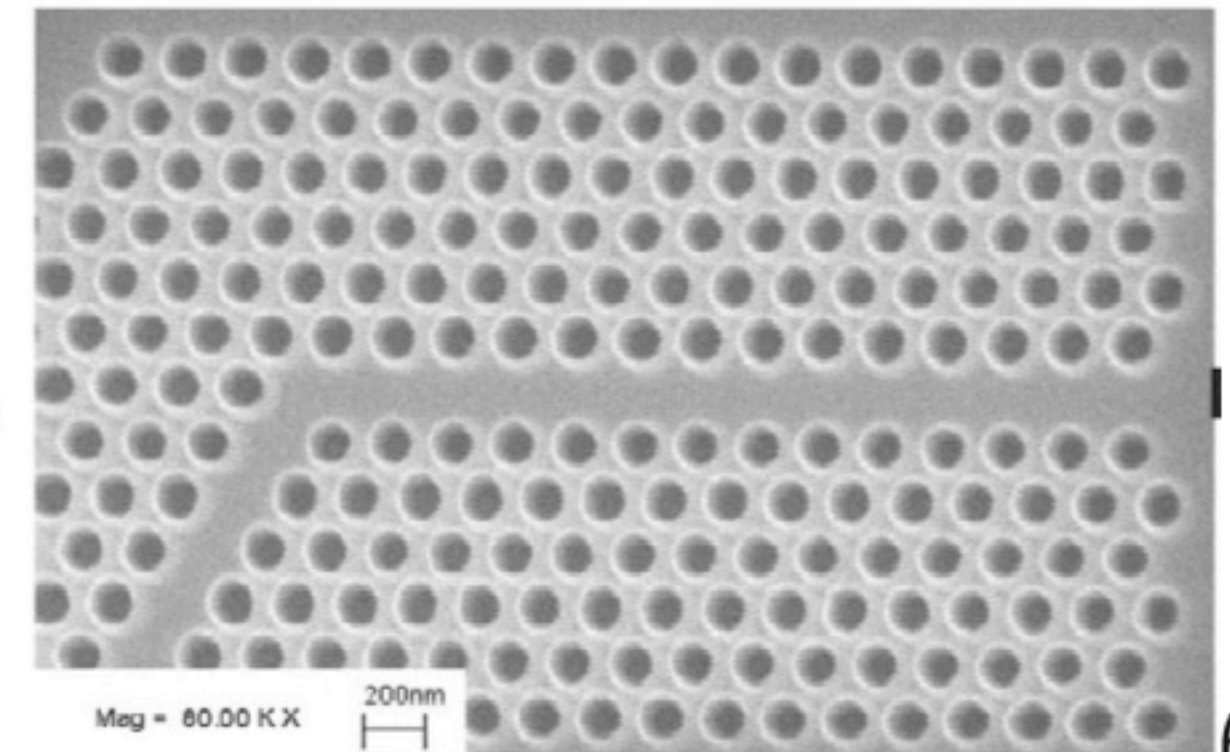
- Effets de proximité



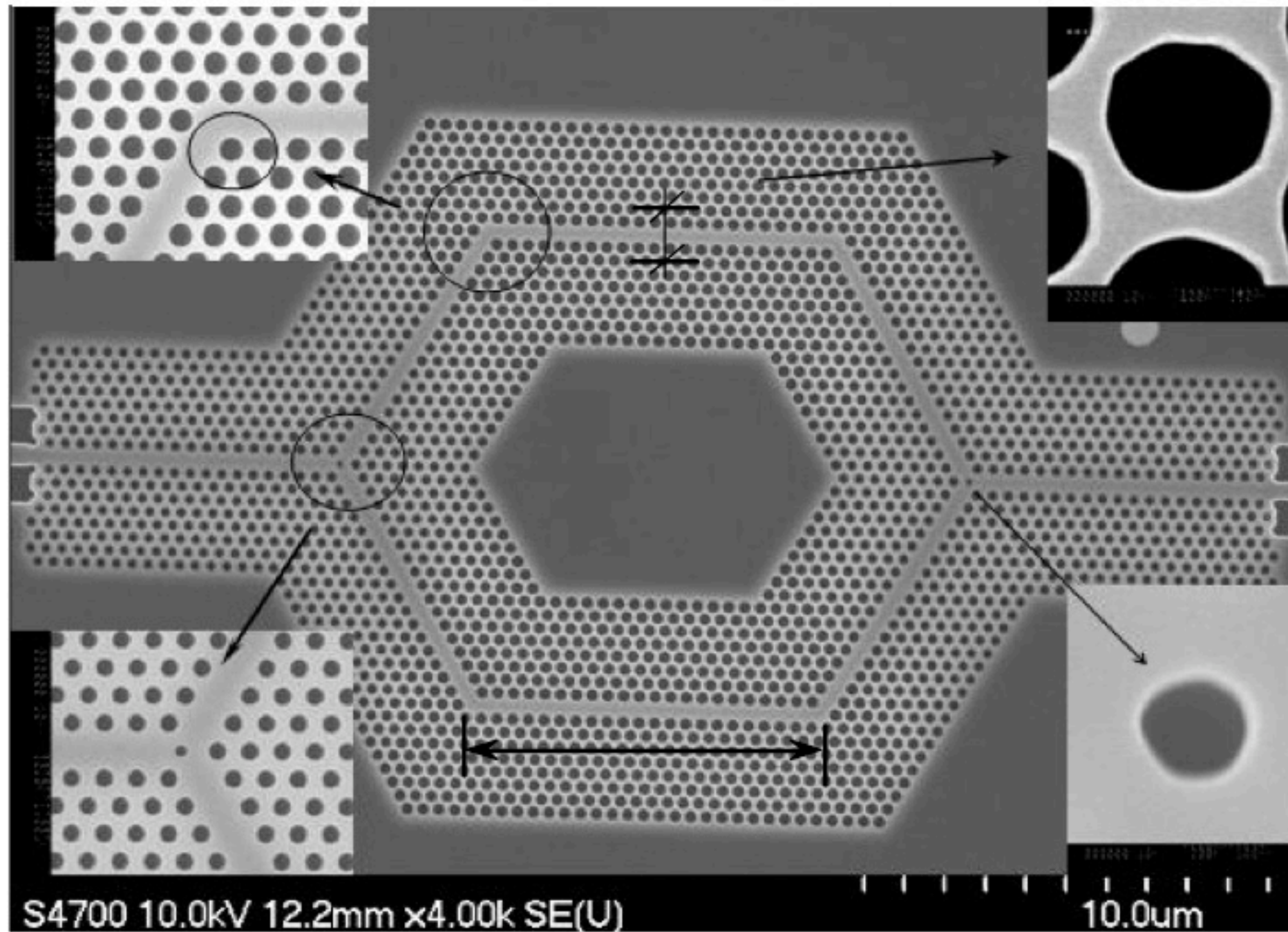
a) Not proximity corrected



b) Proximity corrected

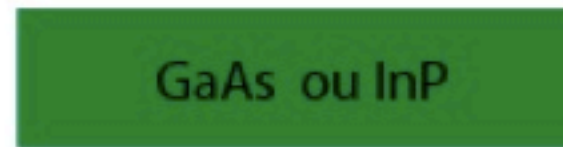


Ecriture



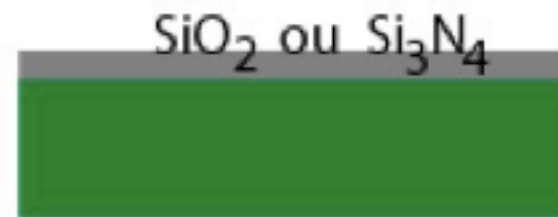
Fabrication cristaux 2D

1



croissance de l'hétérostructure

2



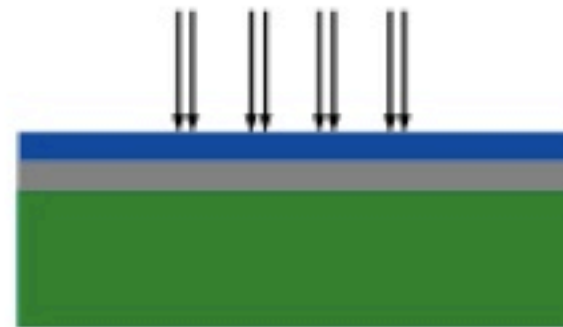
dépôt du masque SiO_2 ou Si_3N_4

3



dépôt du PMMA

4



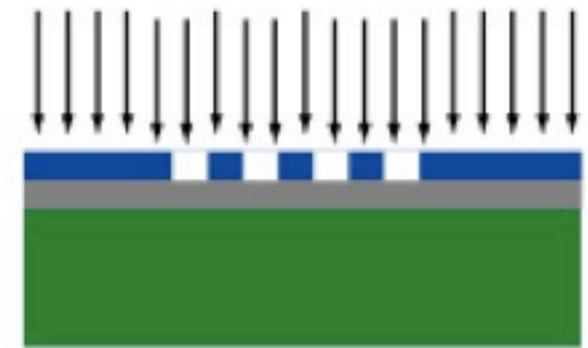
écriture électronique

5



révélation des structures

6



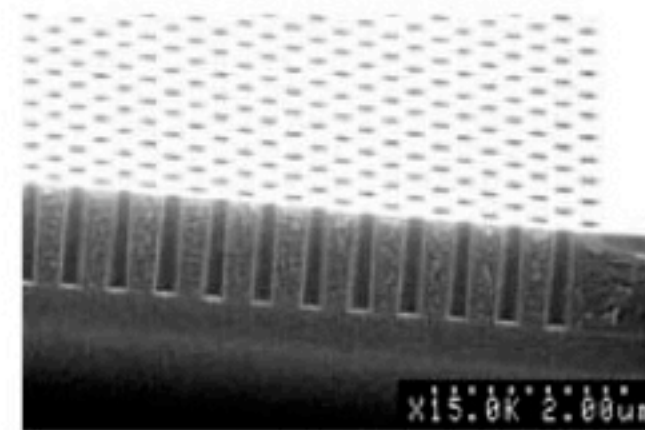
CHF_3 plasma

7

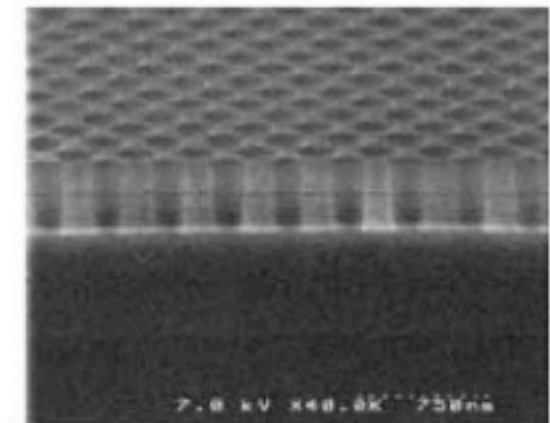


retrait du PMMA

a)

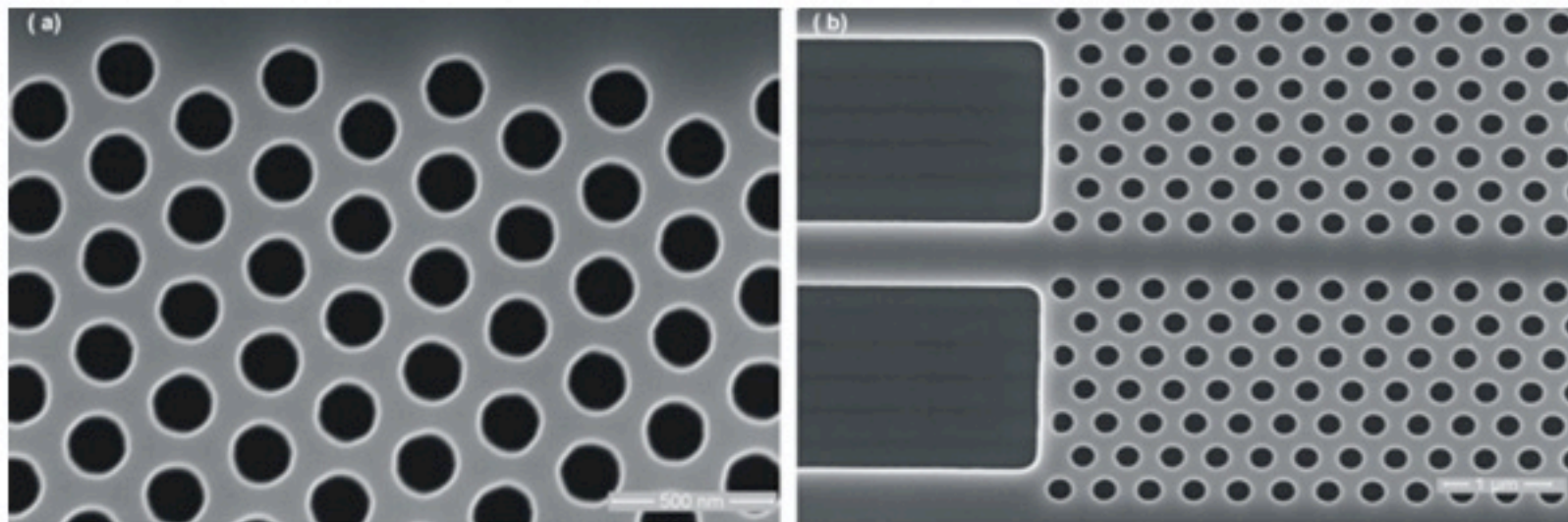
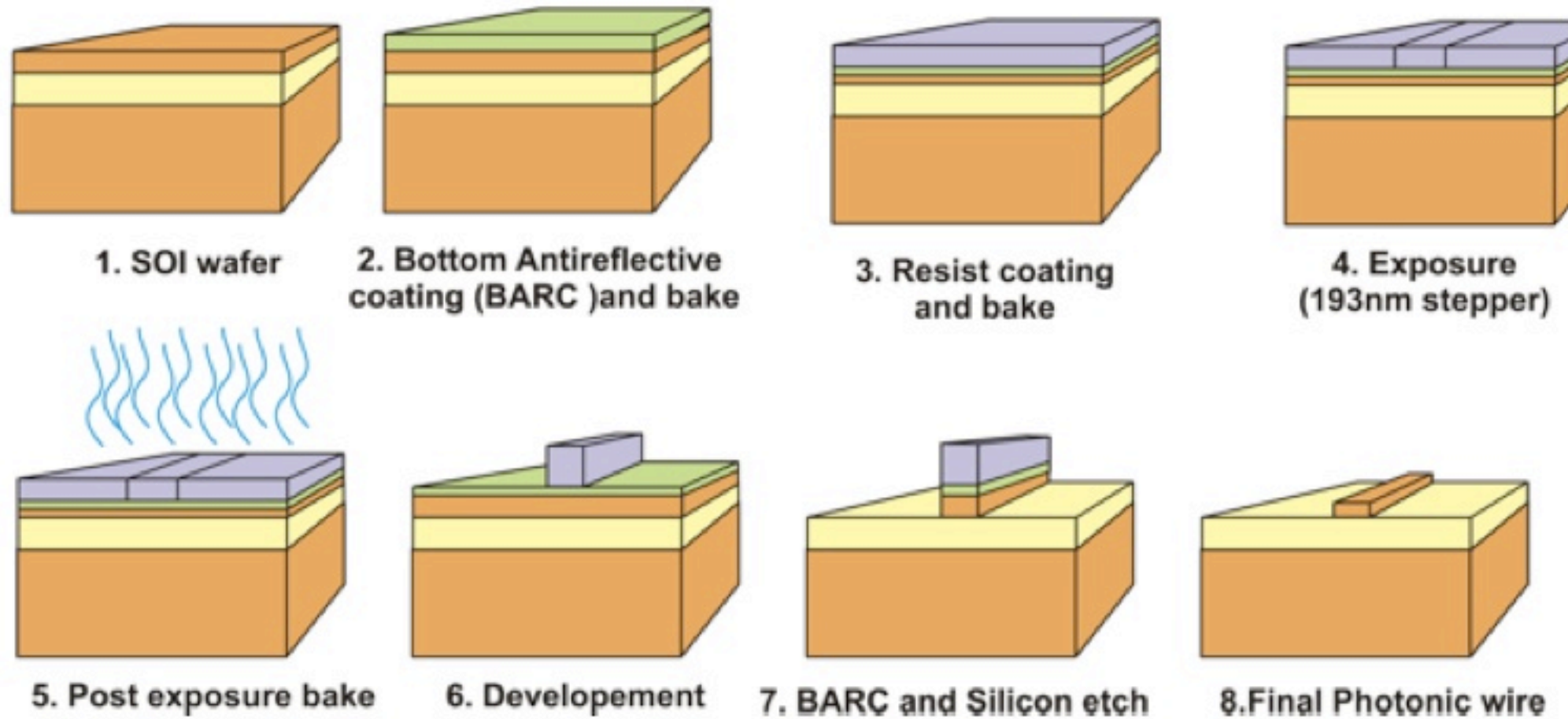


b)



Ecriture

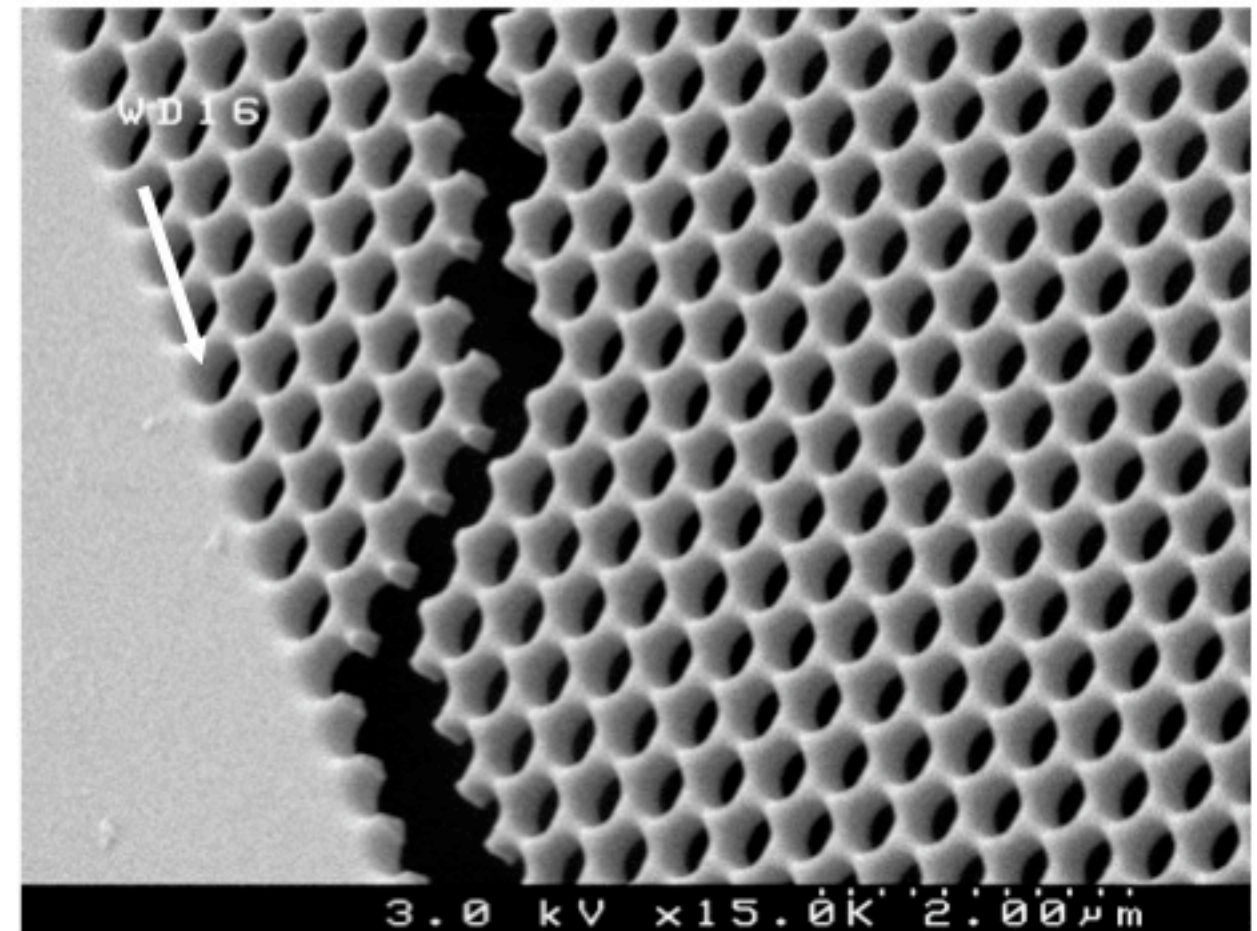
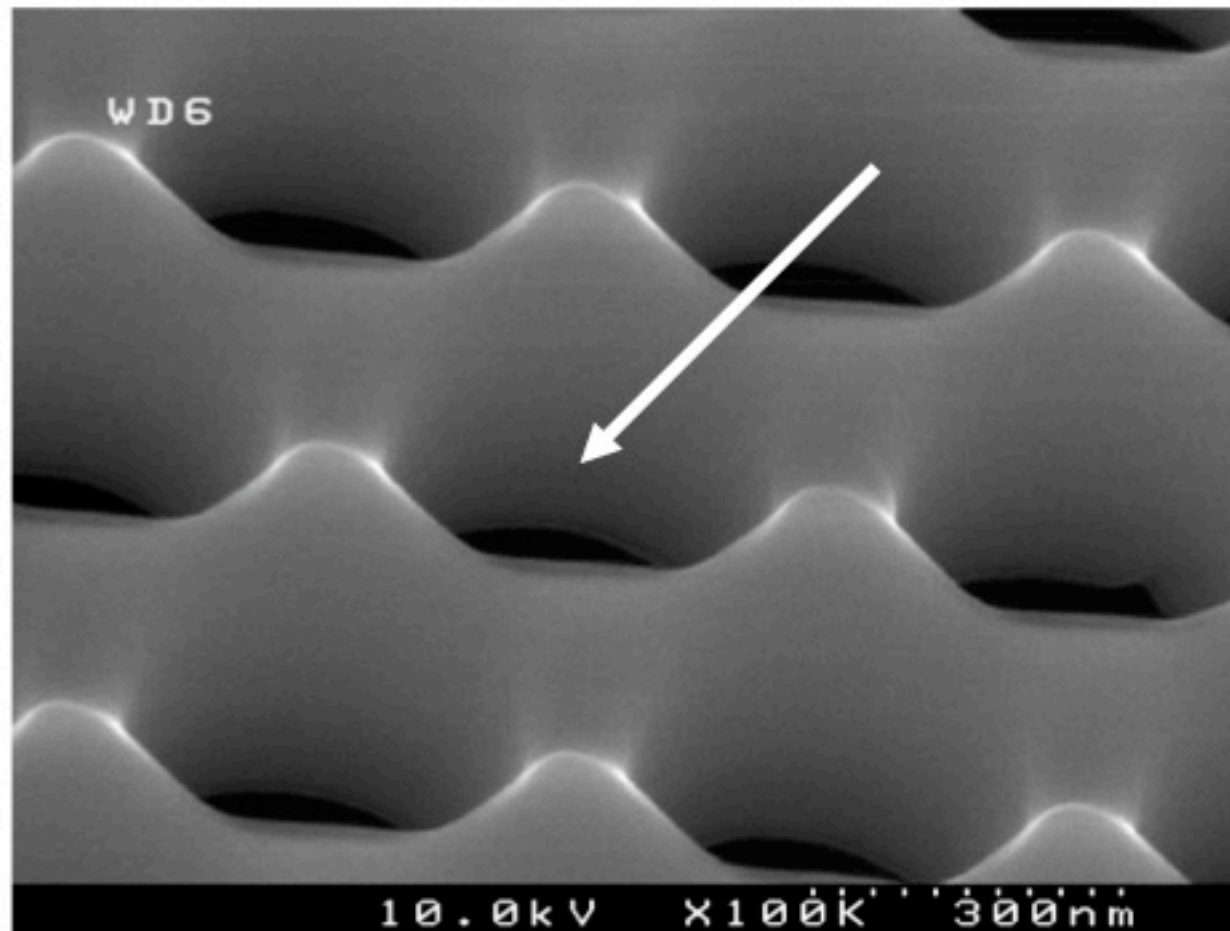
Lithographie UV lointain et X



Écriture et gravure simultanée

Faisceau ionique (FIB)

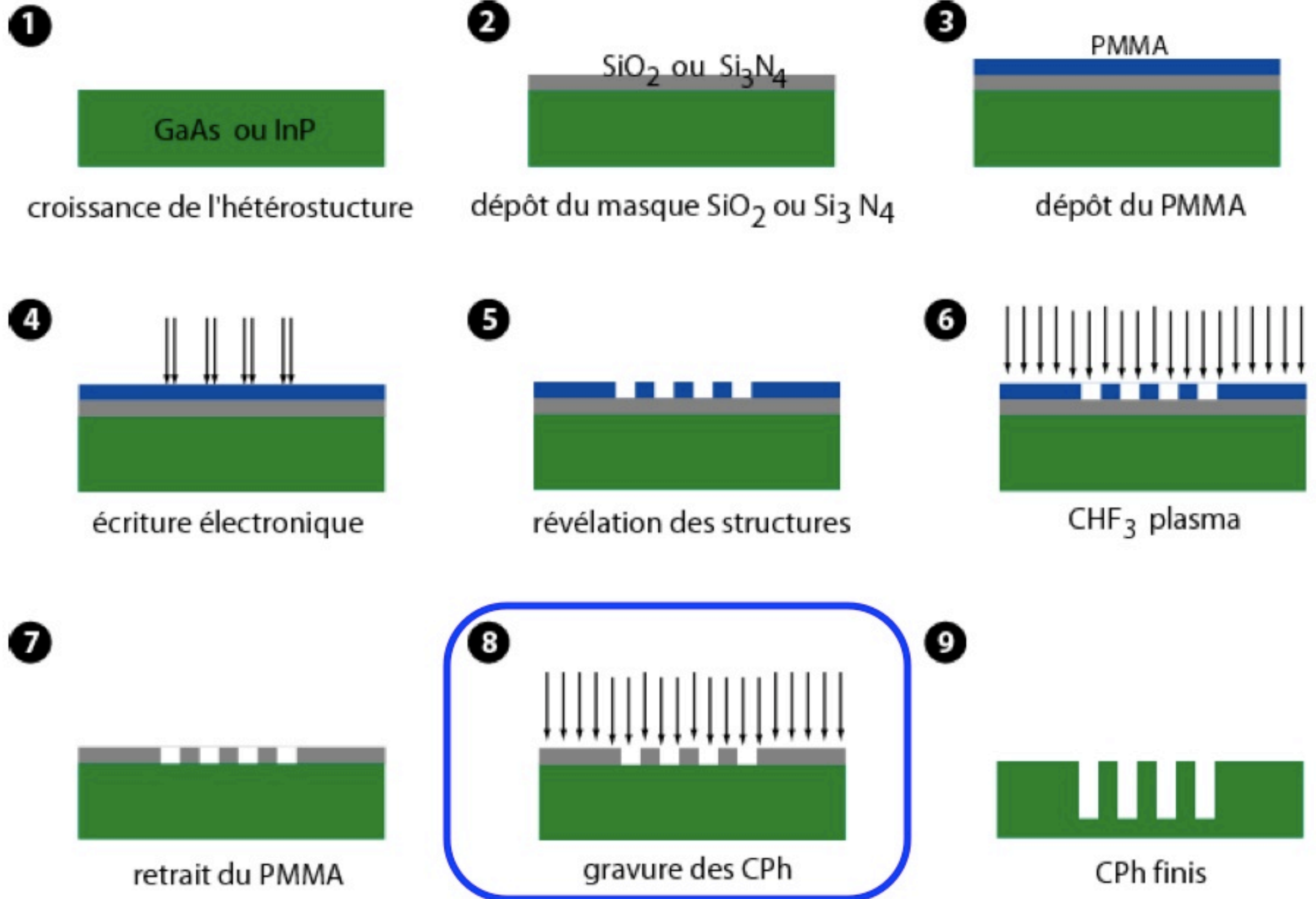
Erosion mécanique par un faisceau d'ions focalisés



D. Freeman et al., Opt. Exp., 13, 3079 (2005)

Ecole doctorale photonique, Cristaux Photoniques, PO-014, Romuald Houdré, Semestre été 2009

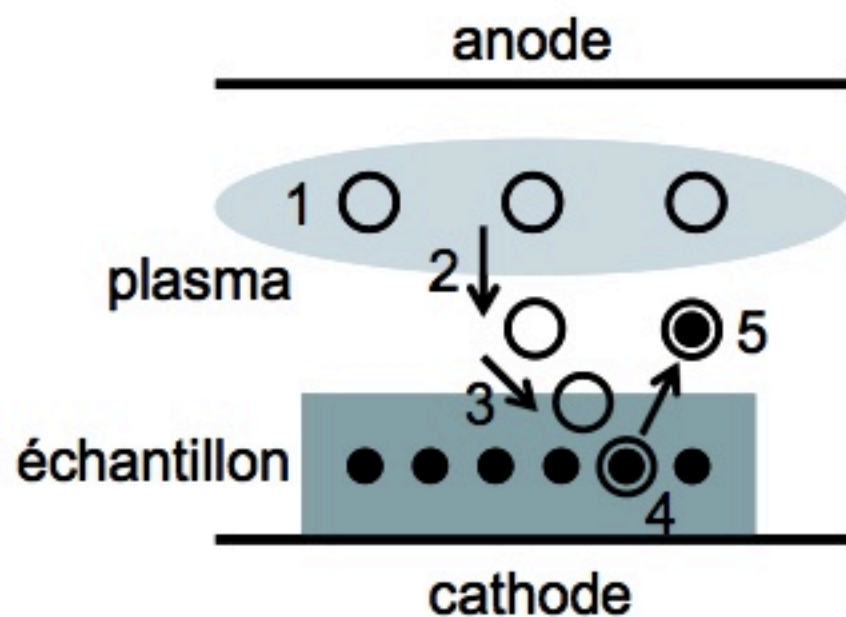
Fabrication cristaux 2D



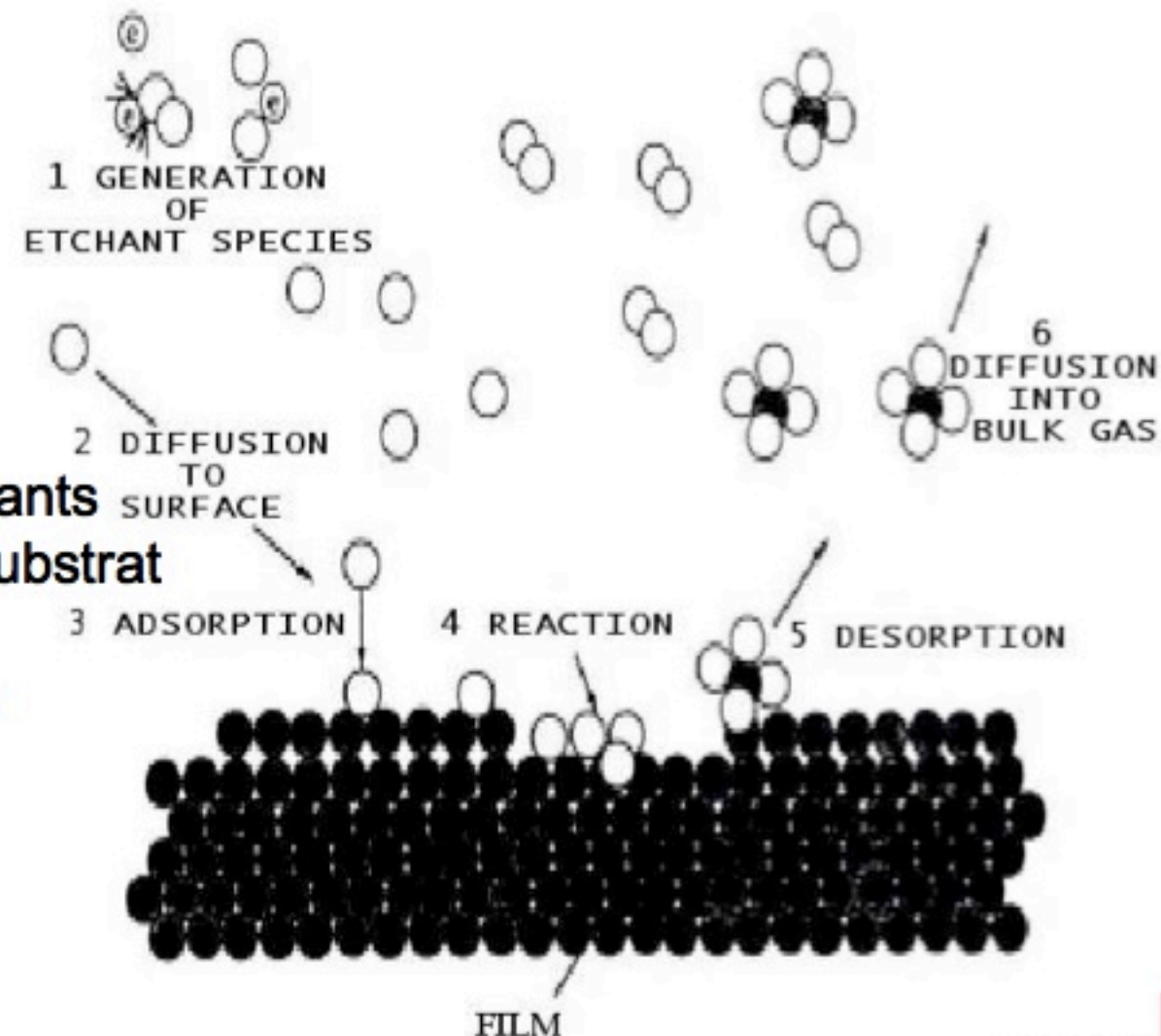
Gravure

Gravure sèche, par plasma

- Gravure physique par érosion mécanique
 - isotrope
 - engendre des défauts
 - faible sélectivité
- Gravure chimique par réaction chimique avec les ions du plasma
 - anisotrope
 - sélectivité
 - rapide



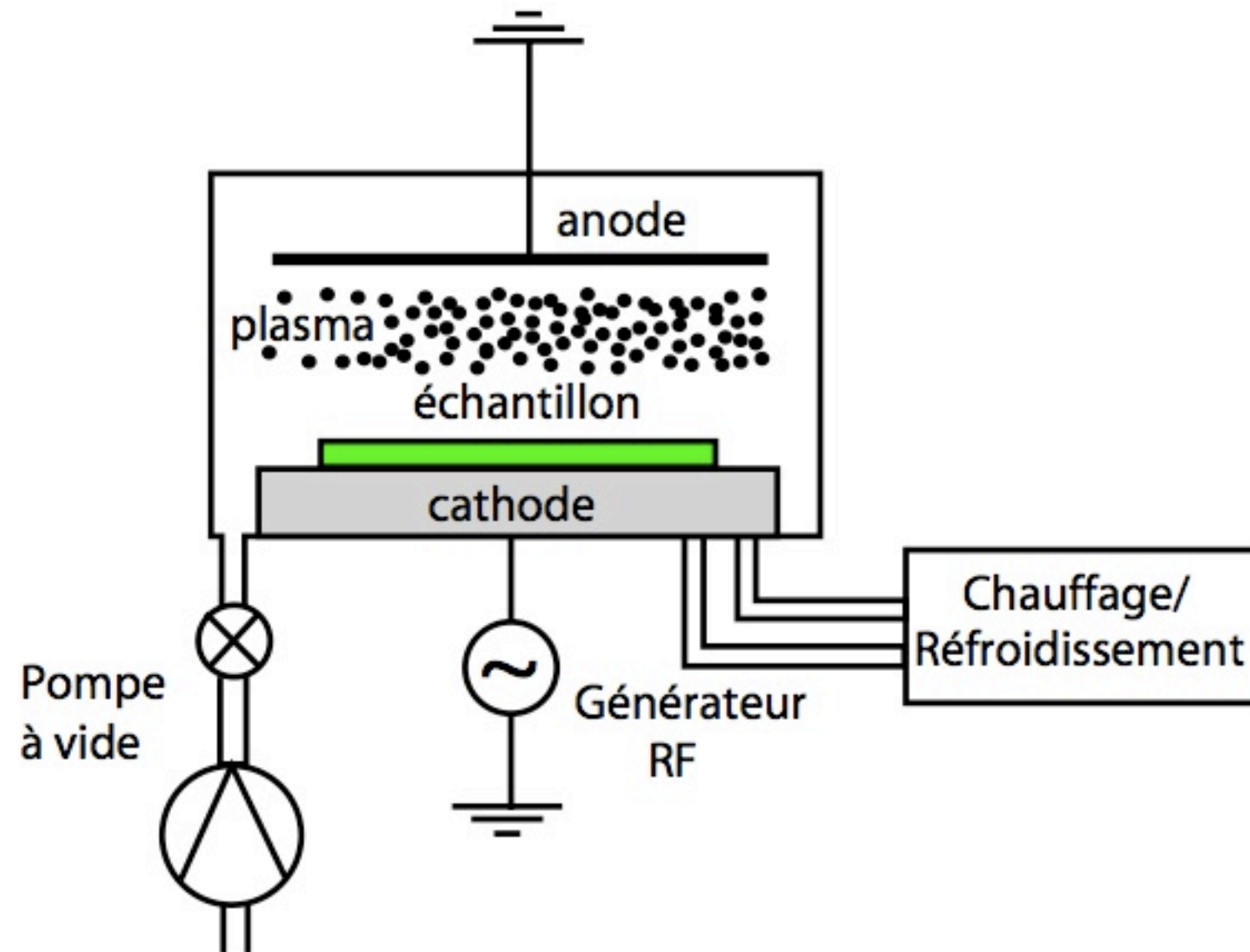
- 1) Création des réactants
- 2) Migration vers le substrat
- 3) Adsorption
- 4) Réaction chimique
- 5) Désorption



Gravure plasma

Différents types de systèmes plasma

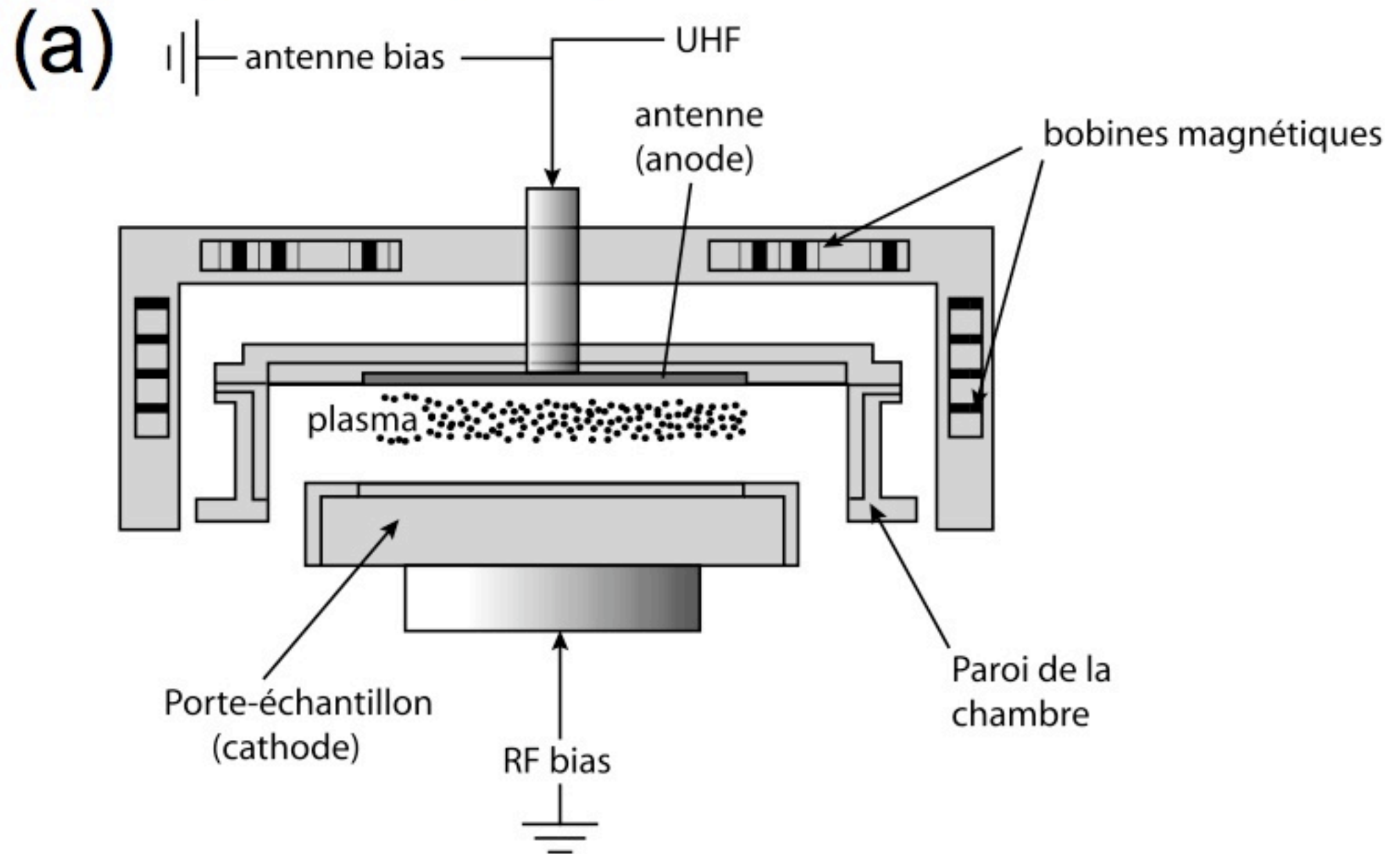
- Générateur RF
- Directivité augmente avec le libre parcours moyen quand la pression diminue
- Faible pression nécessite une plus grande puissance d'allumage du plasma
- Difficile de contrôler l'équilibre gravure chimique / gravure physique



Générique, plasma par couplage capacitif (CCP)

Gravure plasma

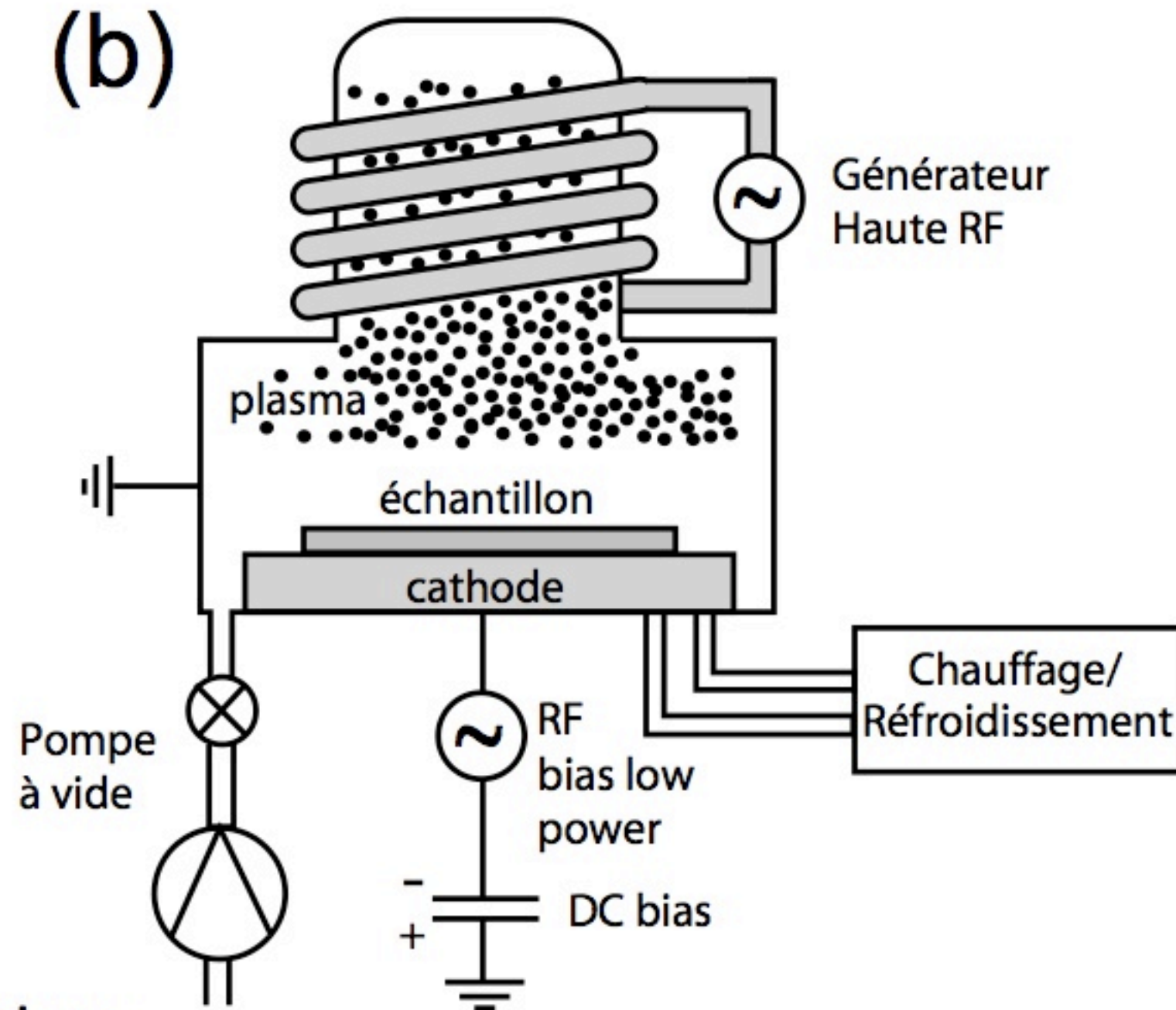
Résonance électron-cyclotron (ECR)



- Ondes UHF + champ magnétique
- Contrôle indépendant de l'énergie des ions et de la densité du plasma

Gravure plasma

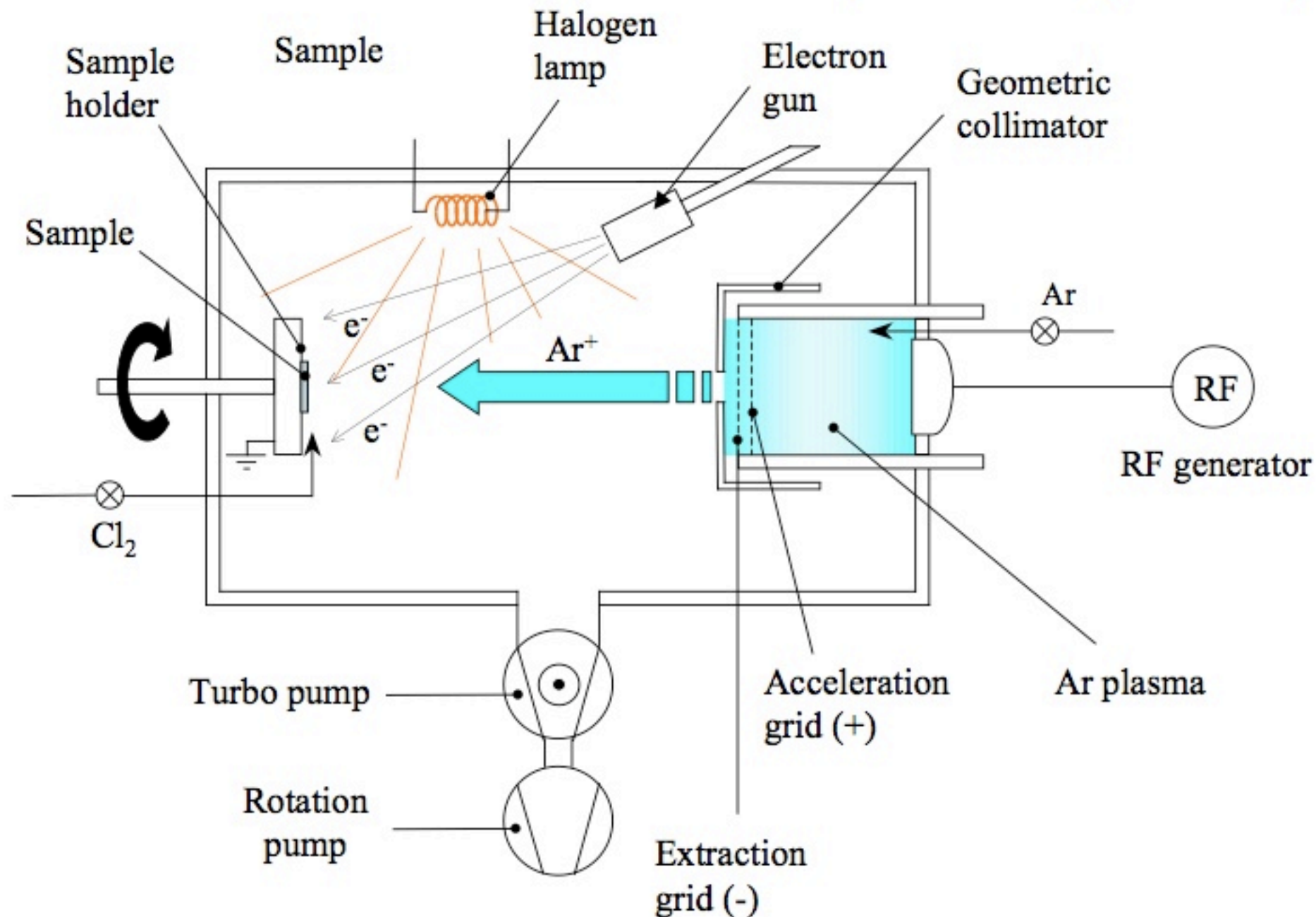
Plasma couplé inductivement (ICP)



- Champ magnétique
- Contrôle de l'énergie des ions et de la densité du plasma indépendamment de la tension des électrodes

Gravure plasma

Gravure par faisceau d'ions assistés chimiquement (CAIBE)



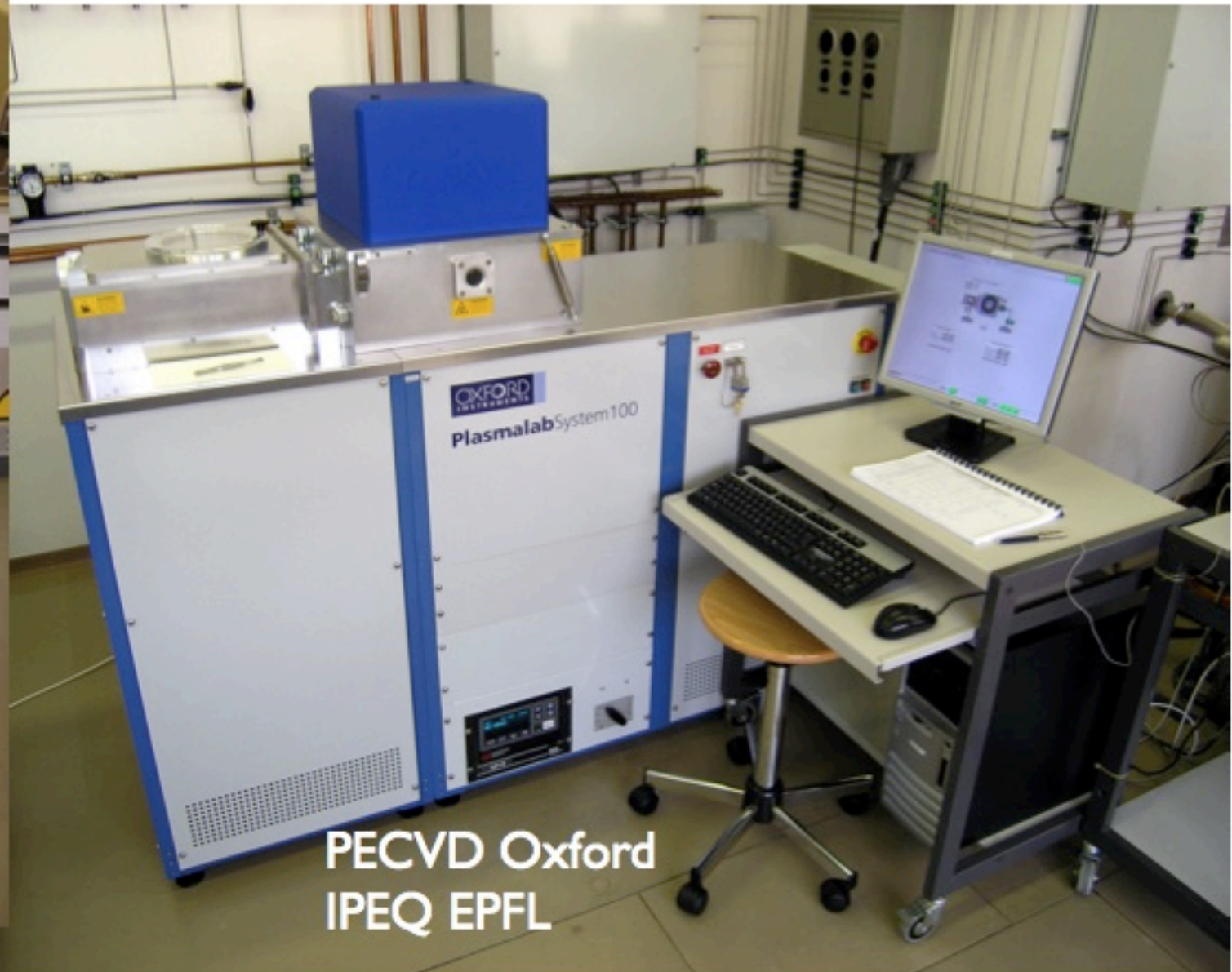
- Deux chambres séparées
- 1 Création d'un plasma (gravure physique)
- 2 Ions pour la gravure chimique introduit séparément

Gravure plasma

Le choix des ions utilisés dépend de nombreux paramètres
 CF_4 , CHF_3 , H_2 , SiCl_4 , Cl_2 , Ar , O_2

- Balance gravure physique gravure chimique
- Matériau à graver (GaAs, InP, Si, etc...)
- Type de plasma (ECR, ICP, CAIBE, ...)
- Type d'échantillons (trous profonds ou non ...)
- Nature du masque (SiO_2 , Si_3N_4 , métal, ...)
- ...

Gravure plasma

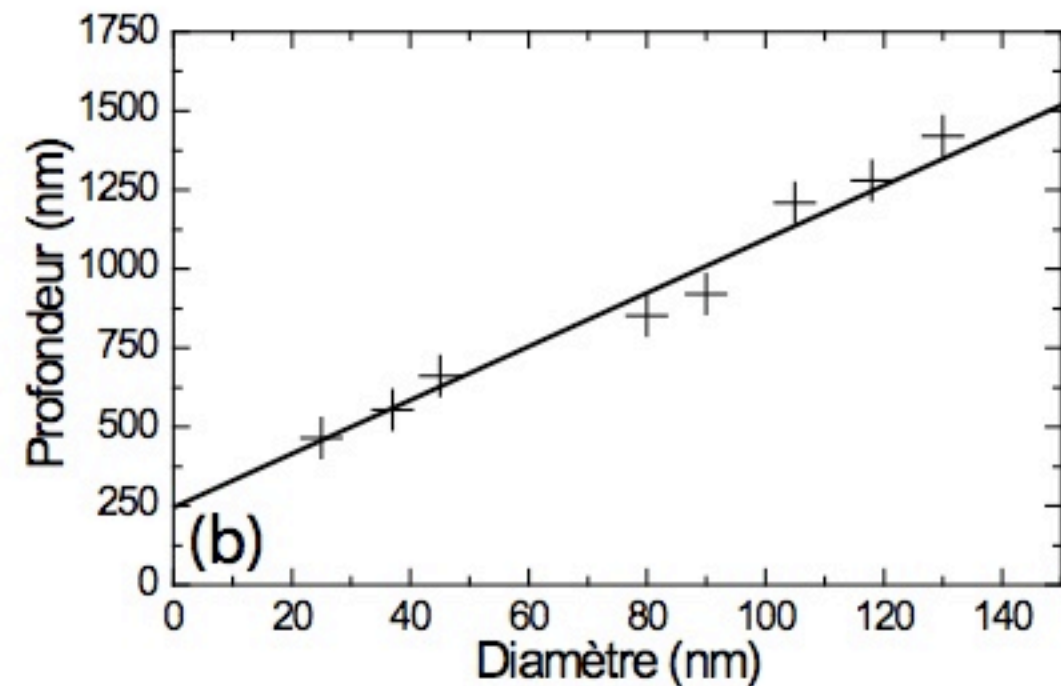
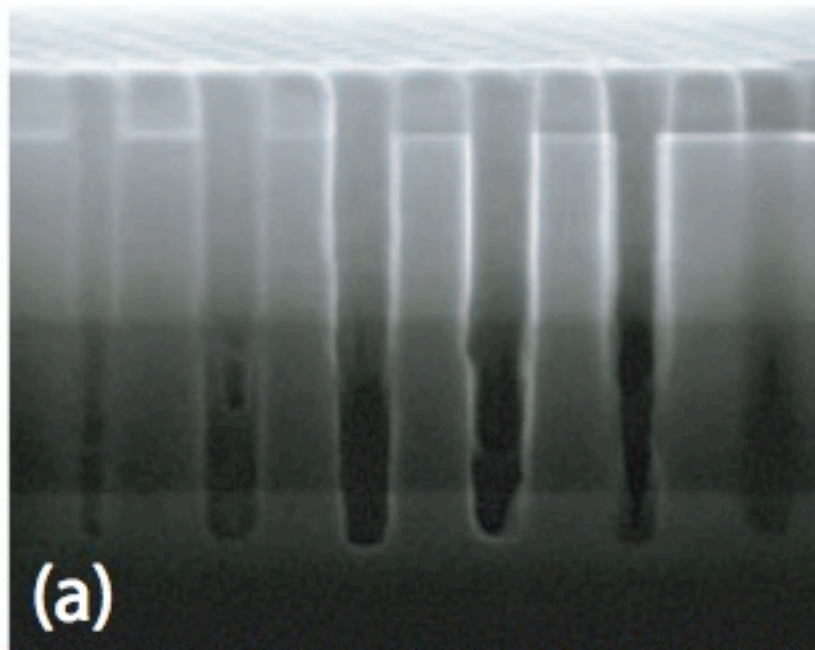
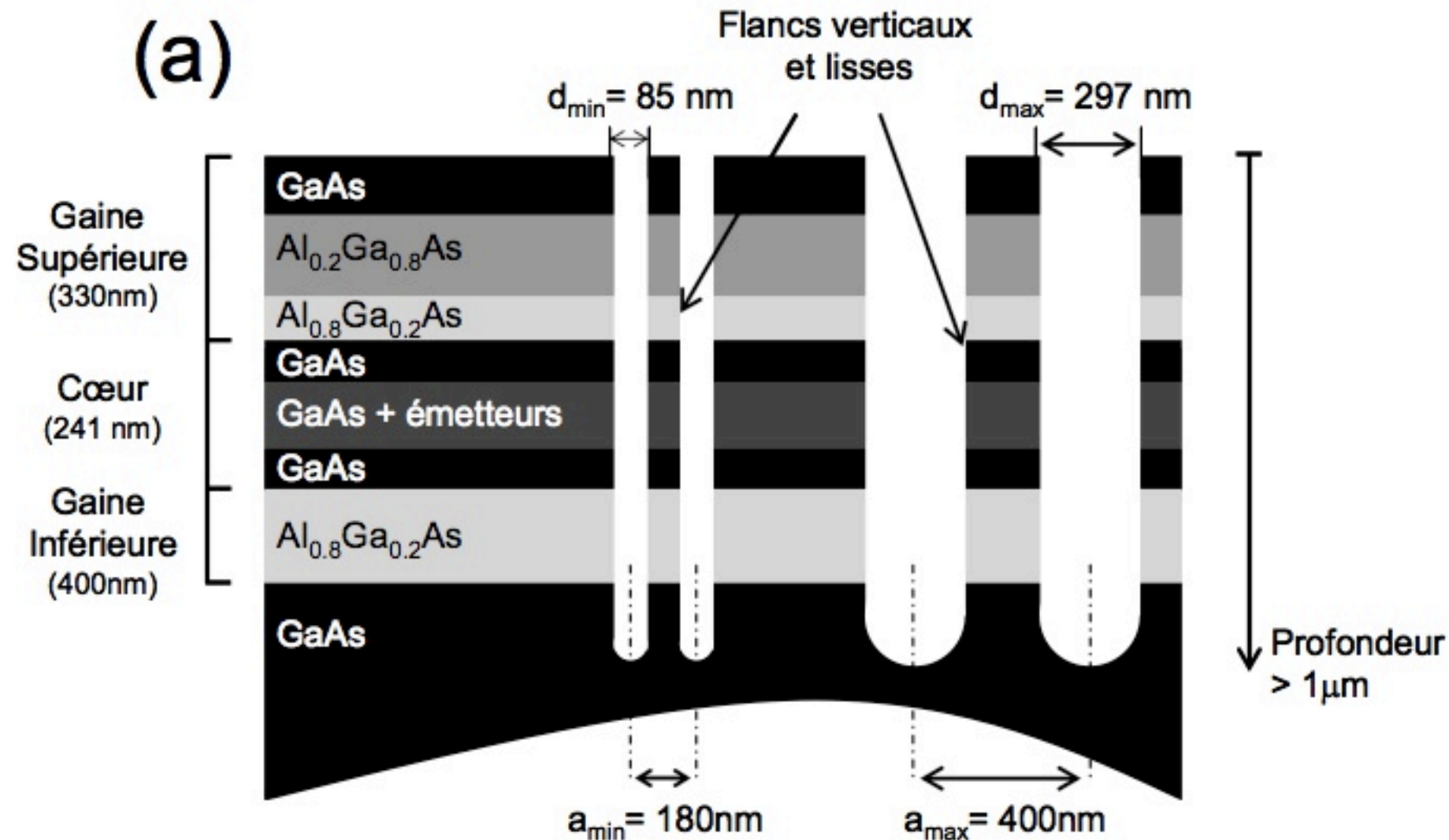


Gravure plasma

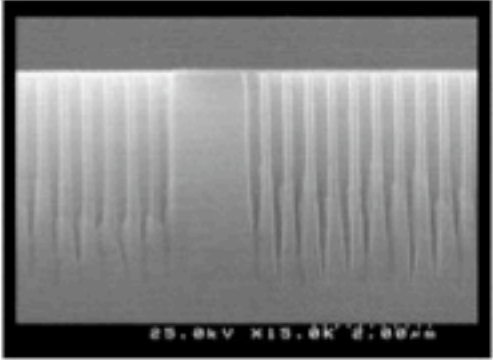
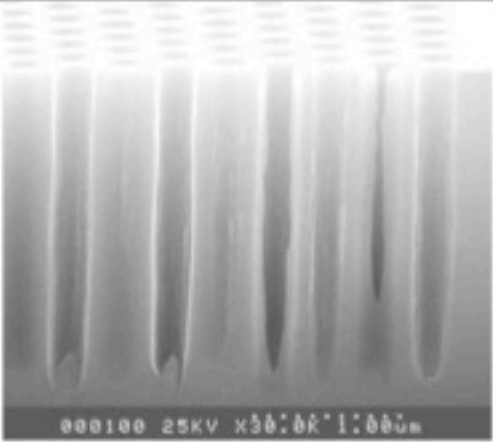
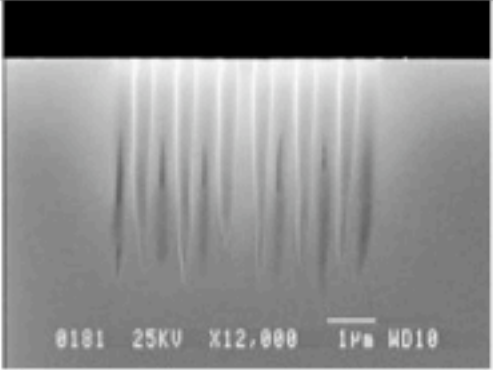
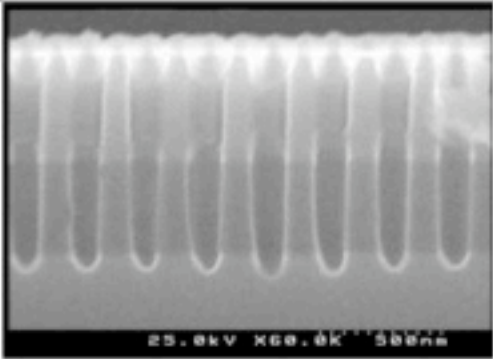


ICP CMI

Structures faible contraste d'indice

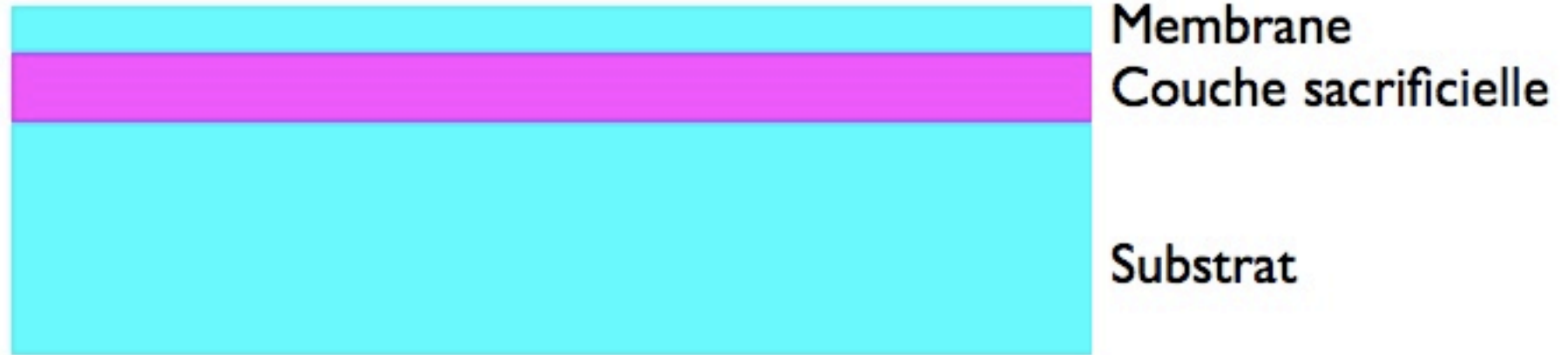


Structures faible contraste d'indice

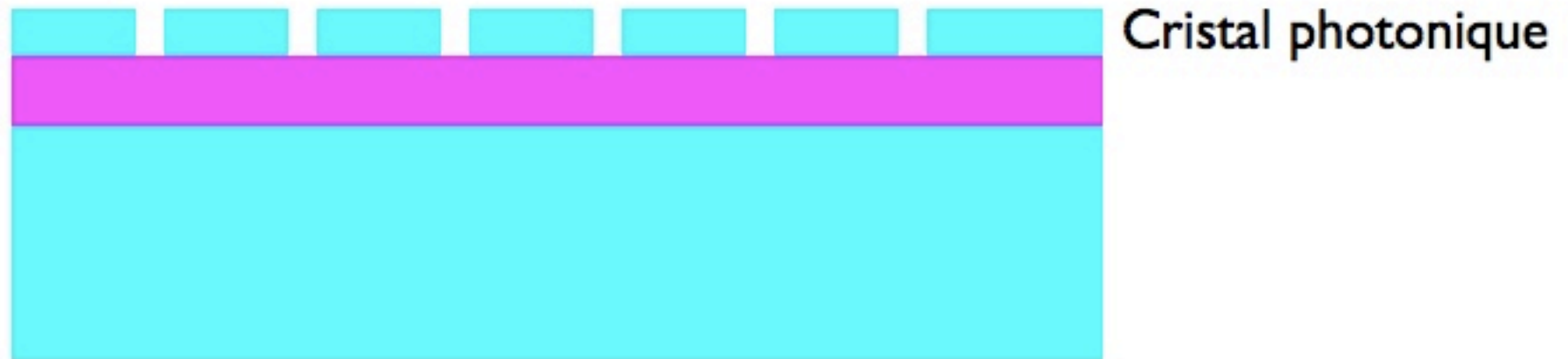
		Hole shape	Etch depth (μm)	Aspect ratio	Limiting factors
ECR (InP)		tapered	3-4	16	mask selectivity
ICP (InP)		cylindro-conical	4.5	14	mask selectivity
CAIBE (InP)		tapered	2.5-4.5	10-20	mask thickness/ removal of etch products
ECR (GaAs)		cylindrical	1.1	6	mask thickness

Structures membrane

1 Guide d'onde



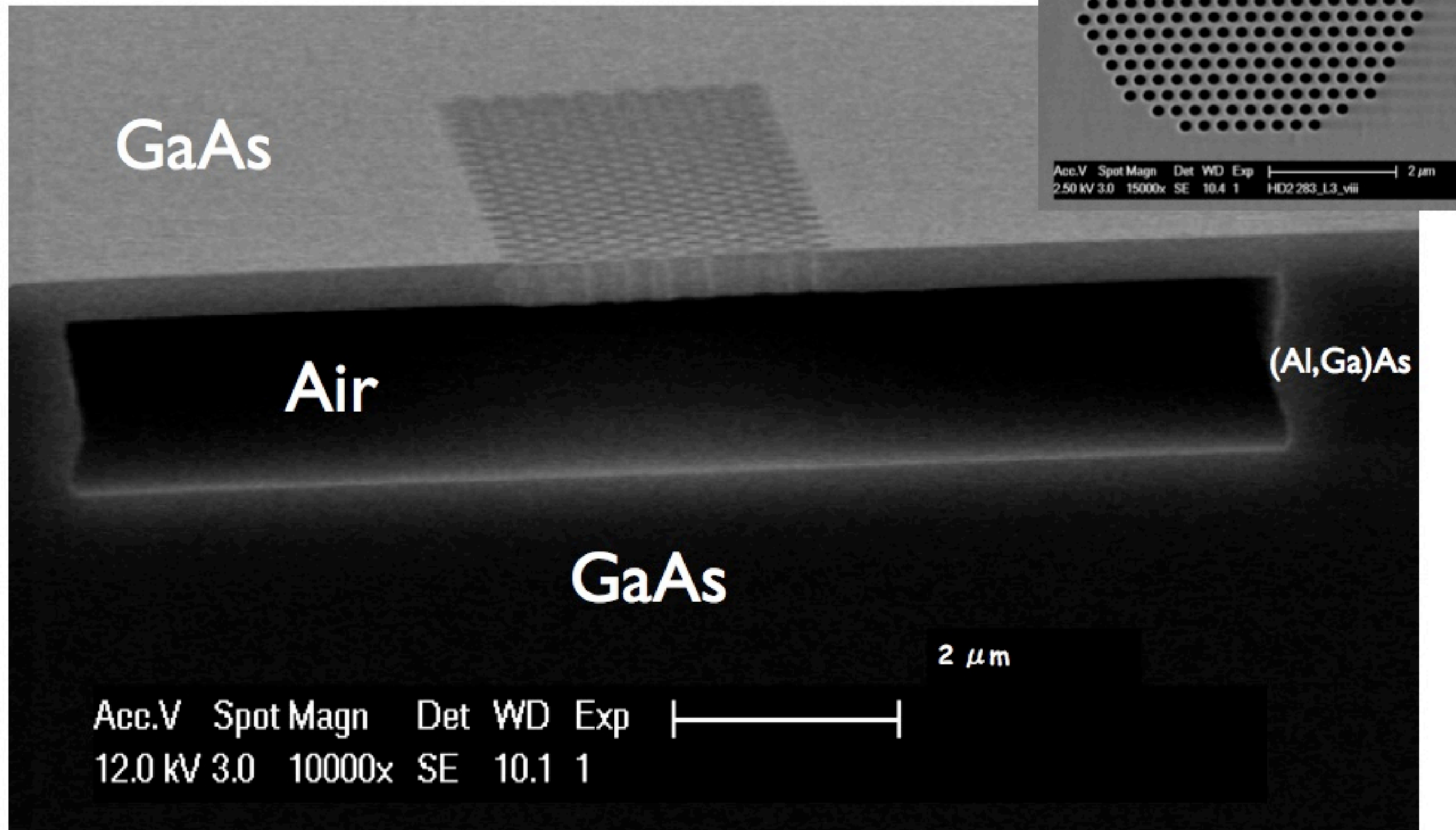
2 Gravure du cristal photonique



3 Gravure sélective de la couche sacrificielle (pas si simple)

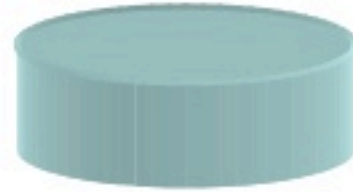


Structures membrane

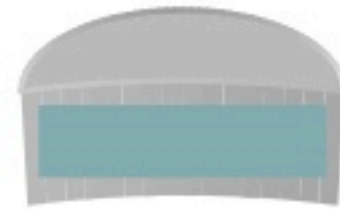


Structures Silicium sur isolant (SOI)

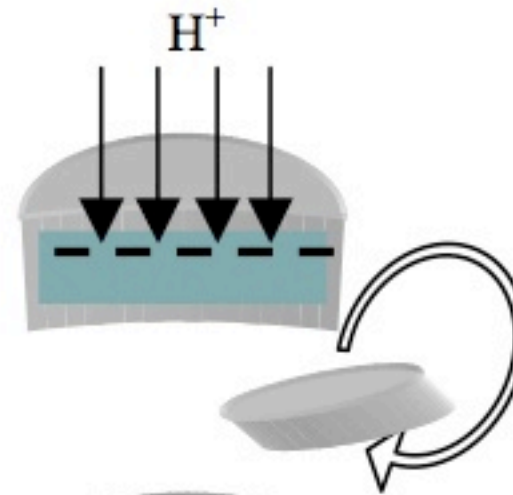
1. Donor bulk silicon



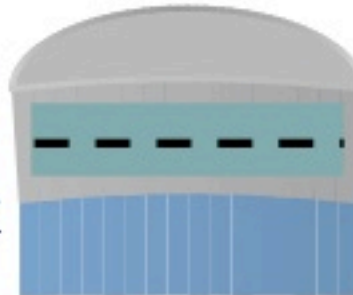
2. Thermal oxidation



3. H^+ ion implantation



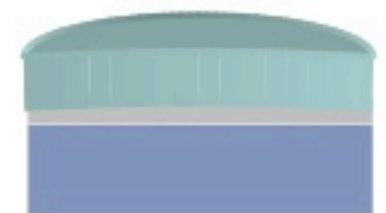
4. Implanted wafer flipped and bonded to receiver bulk wafer



6. CMP polishing

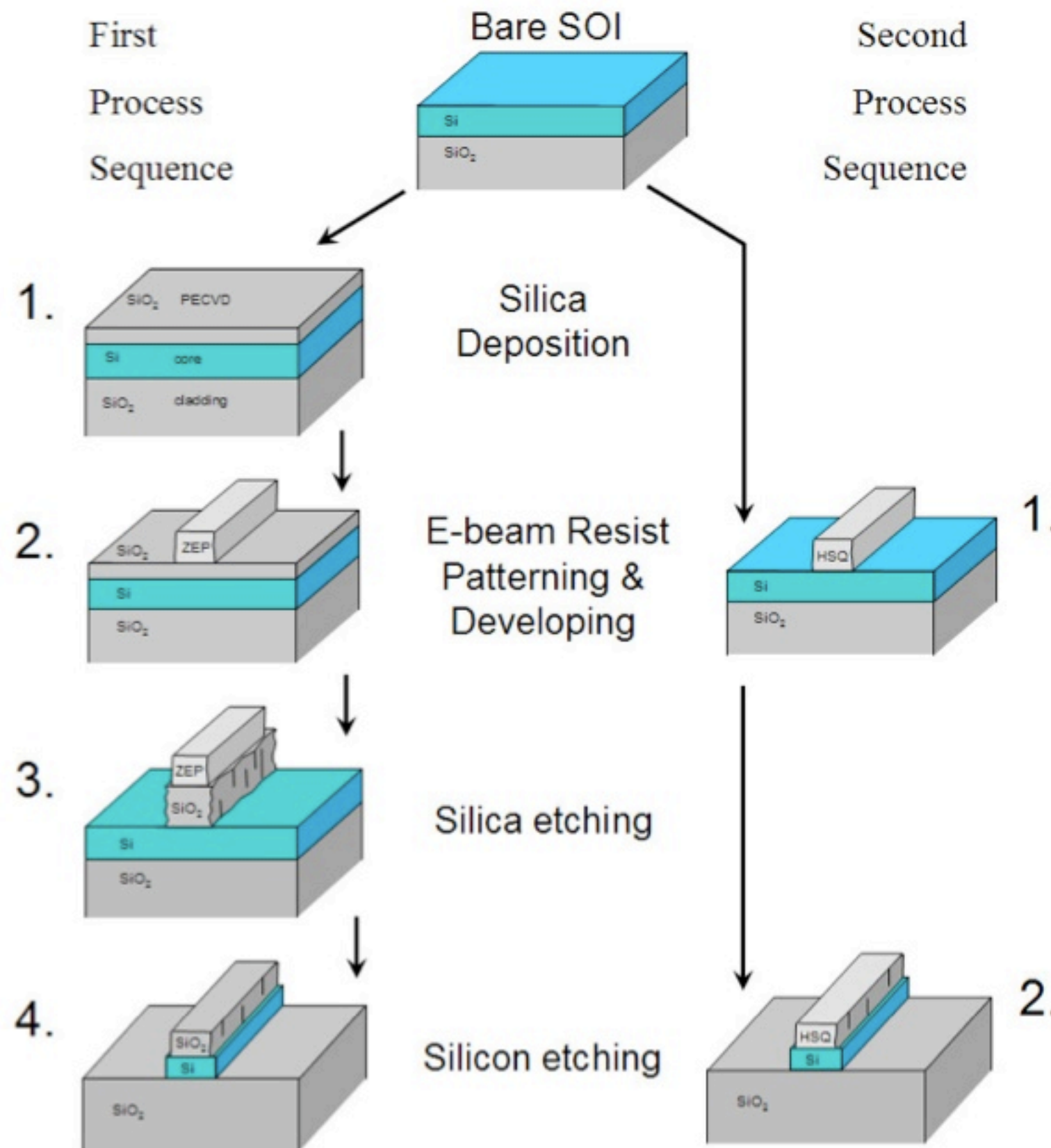


5. Separation of donor and receiver wafer



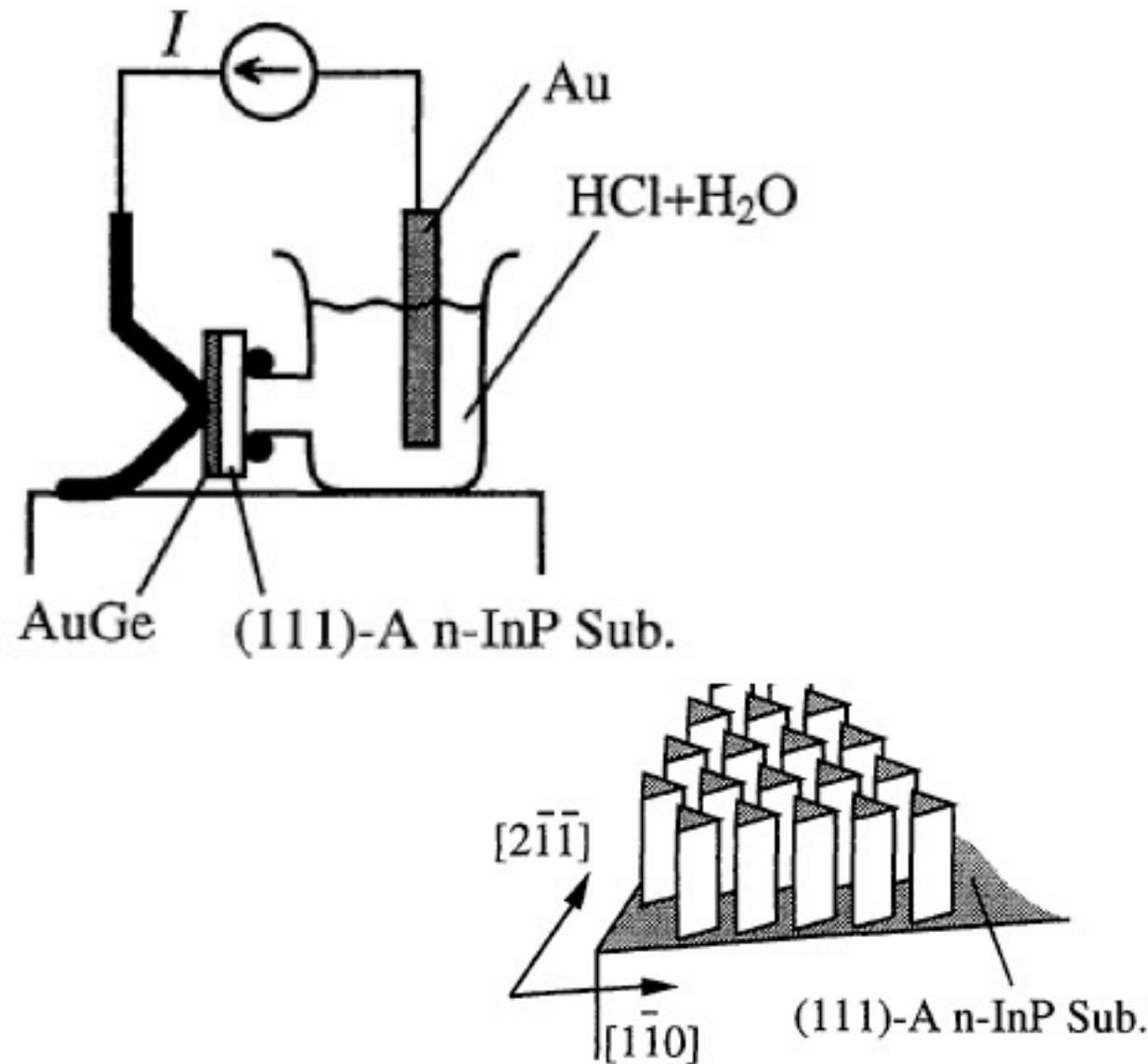
UNIBOND, voir aussi SOITEC etc...

Structures Silicium sur isolant (SOI)



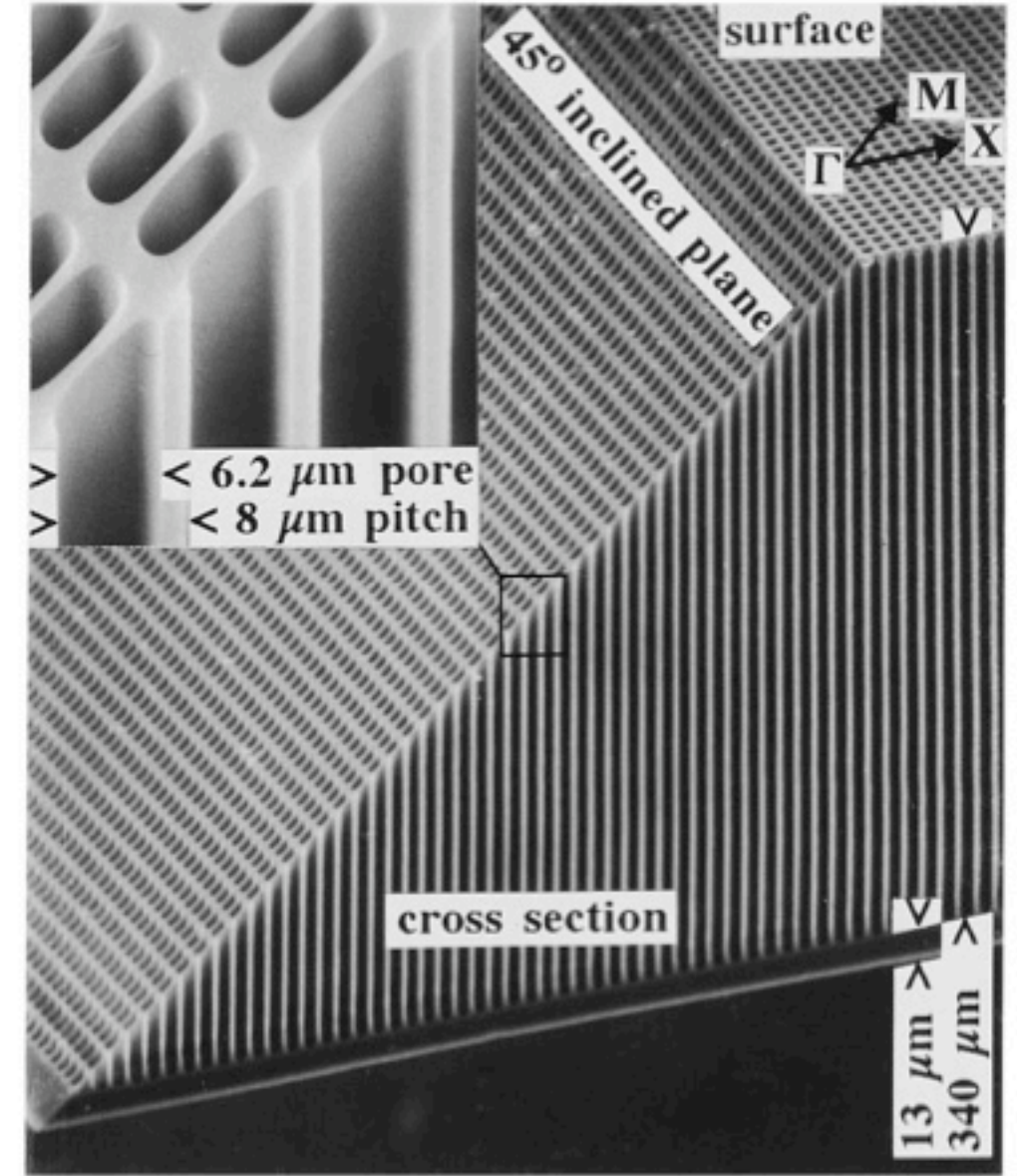
Structures profondes par anodisation

Gravure électrochimique



T. Baba et al., JJAP 34, 1405 (1995)

Exemple InP



U. Grüning et al. App. Phys. Lett. 66 3254, (1995)

Exemple Si

Technique limitée à l'infra-rouge moyen ($\lambda > \approx 10 \mu\text{m}$)