

Cristaux Photoniques, PO-014

Ecole doctorale photonique

Romuald Houdré

Semestre été 2007

V 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 Composants, fabrication et applications

- Techniques de fabrication
 - écriture, gravure
 - 2D, III-V, Si, SOI
 - 3D, Opales
- Techniques de mesures
 - Source interne
 - Injection face clivée
- Guides d'onde à cristaux photoniques
- Composants
 - Virages, diviseurs, coupleurs
 - Filtres multiplexeurs / démultiplexeurs
 - Spectromètres et interféromètres
 - Coupleurs
 - Polariseur et rotateur
 - Lasers à cristaux photoniques
 - Lasers 1D
 - Amplificateurs
 - Lasers cavités 0D

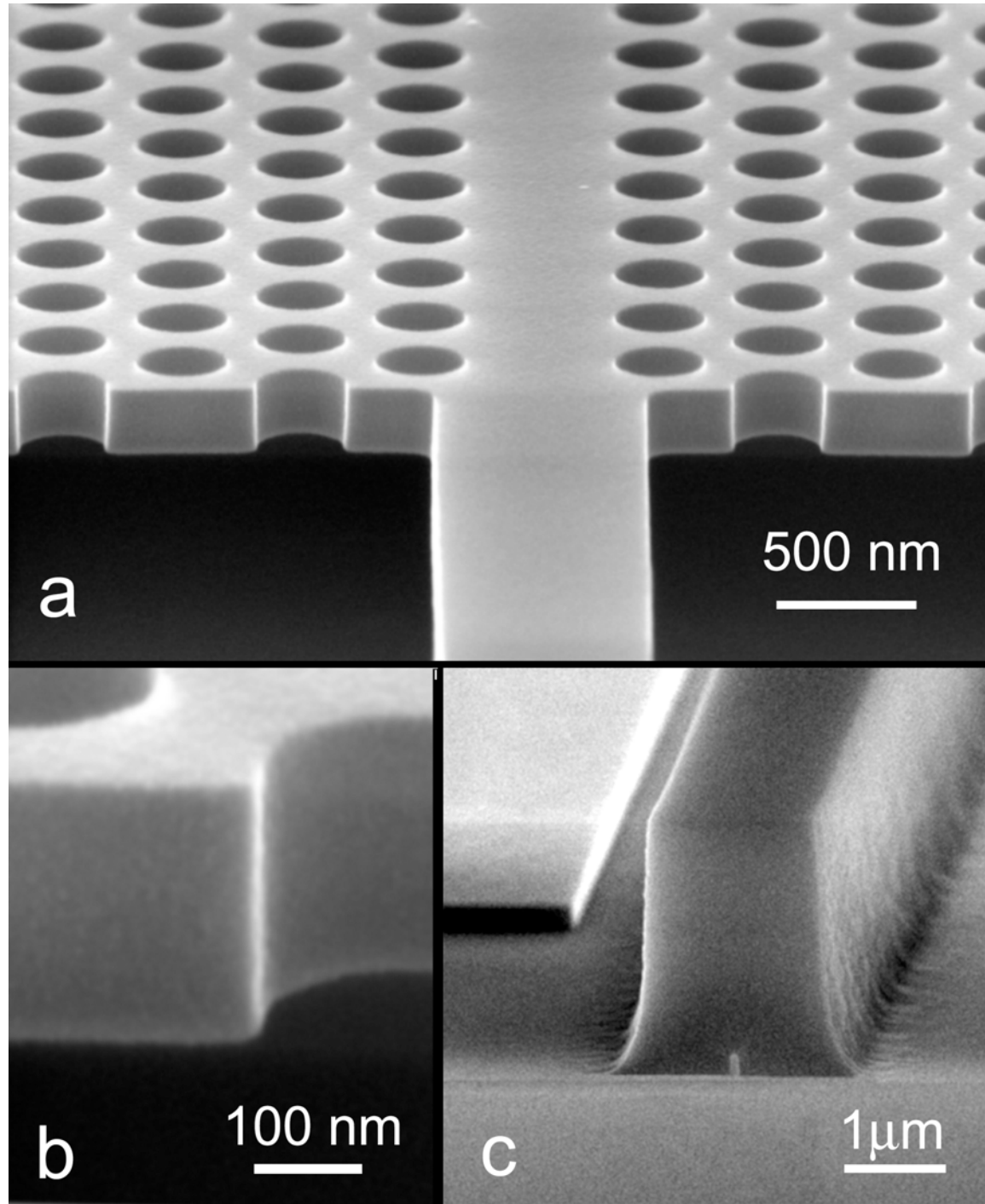
*5 L'actualité

- Imagerie, Fourier, champ proche, résolu en temps
- Cavités à très grand facteur de qualité
- Modes lents

*6 Sujets connexes

- Les matériaux 3D
- Les fibres à cristaux photoniques
- Les métamatériaux

Fabrication cristaux 2D



Fabrication cristaux 2D

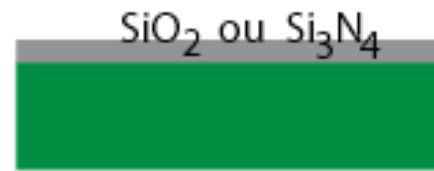
1



GaAs ou InP

croissance de l'hétérostructure

2



SiO_2 ou Si_3N_4

dépôt du masque SiO_2 ou Si_3N_4

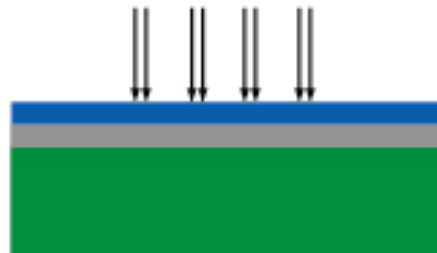
3



PMMA

dépôt du PMMA

4



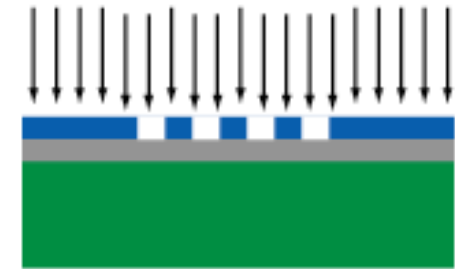
écriture électronique

5



révélation des structures

6



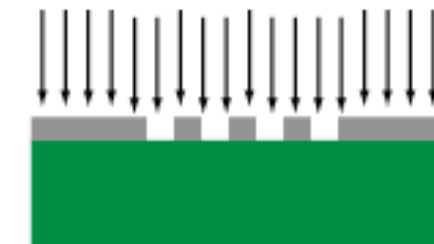
CHF_3 plasma

7



retrait du PMMA

8



gravure des CPh

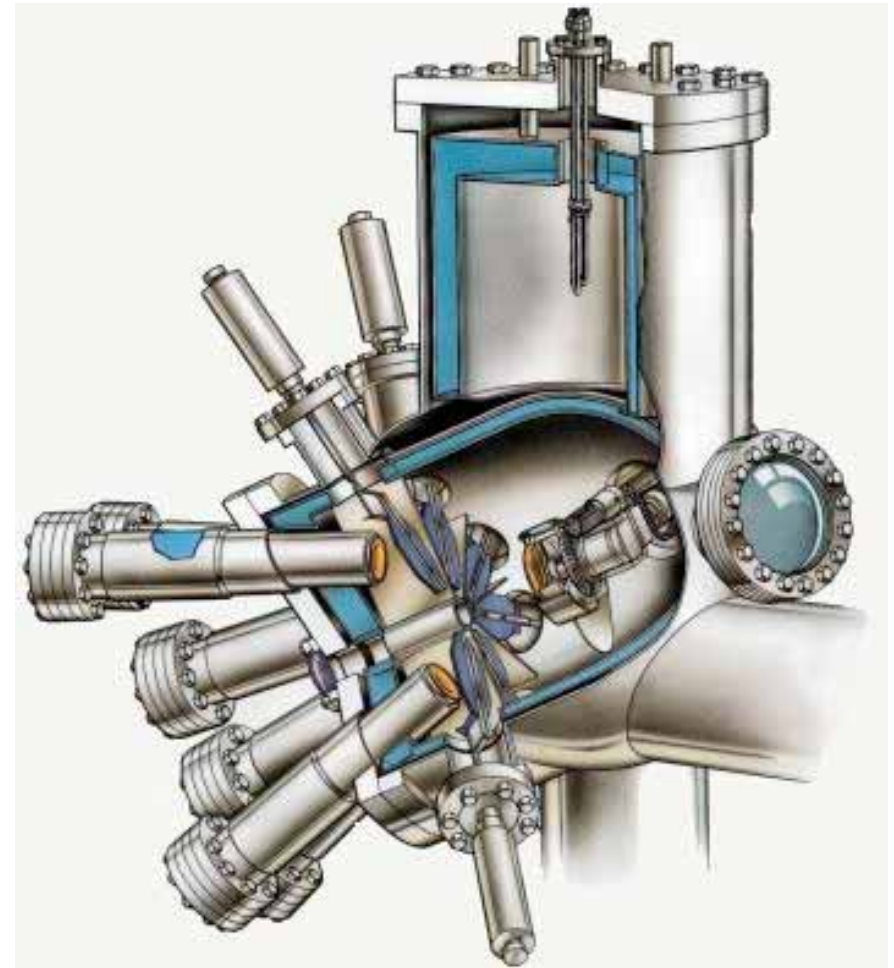
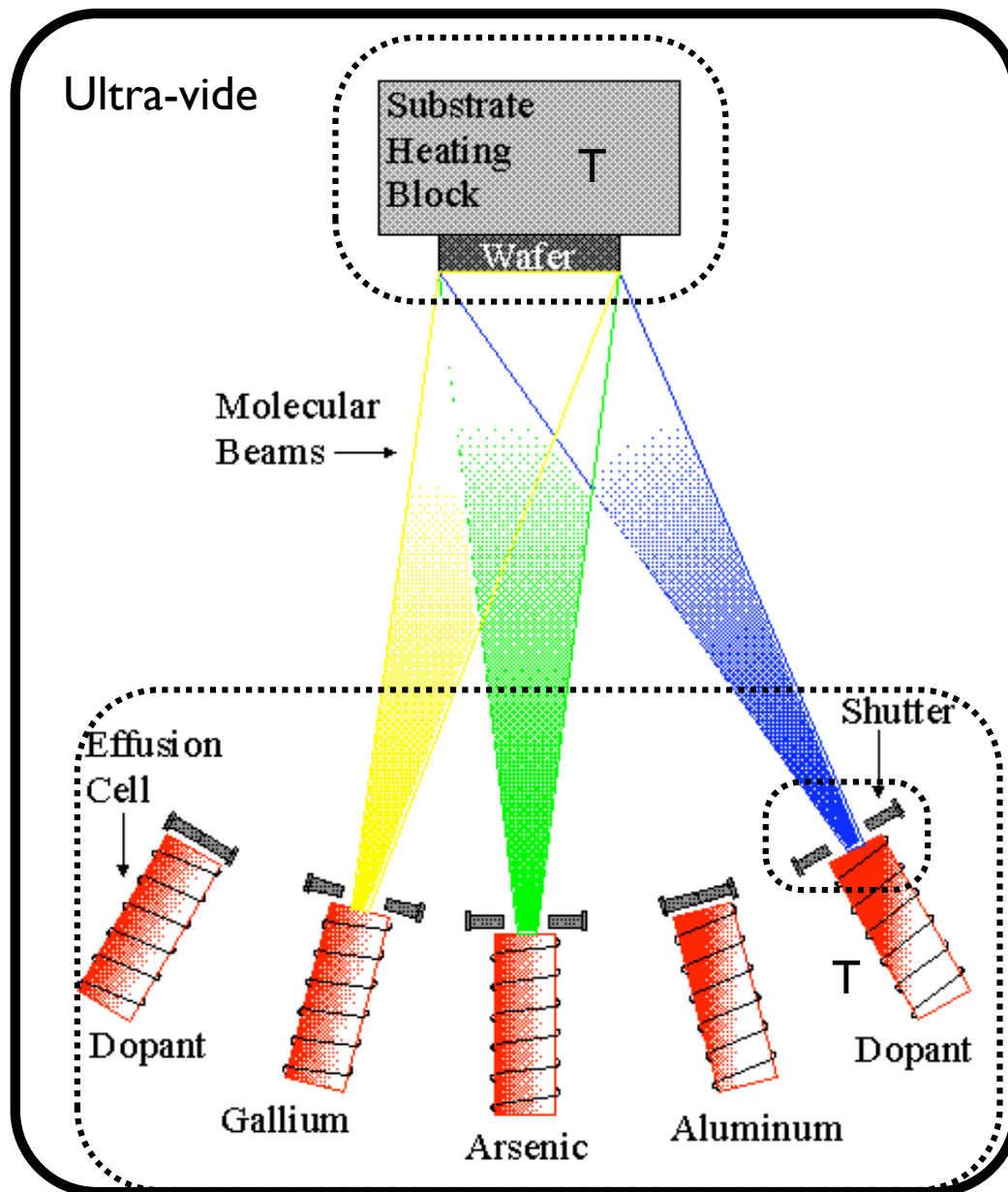
9



CPh finis

Croissance du guide d'onde planaire

Epitaxie par jets moléculaires (EJM / MBE)

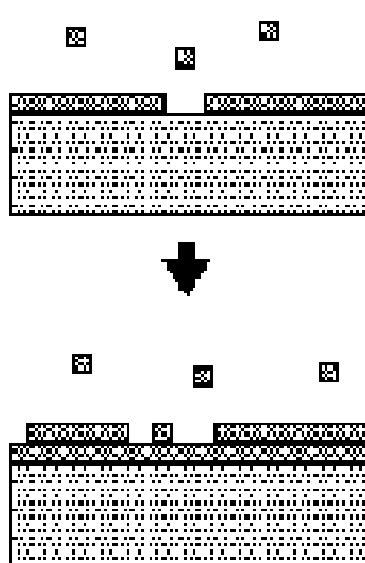


MBEVG

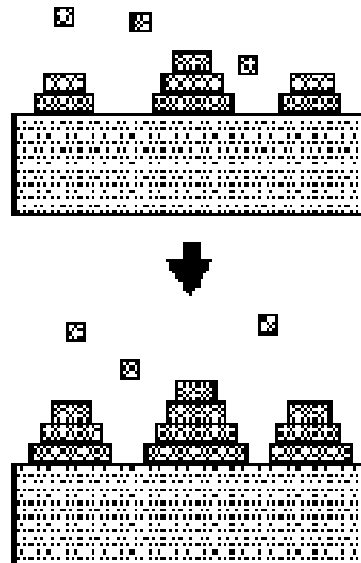
Croissance du guide d'onde planaire

Epitaxie par jets moléculaires (EJM / MBE)

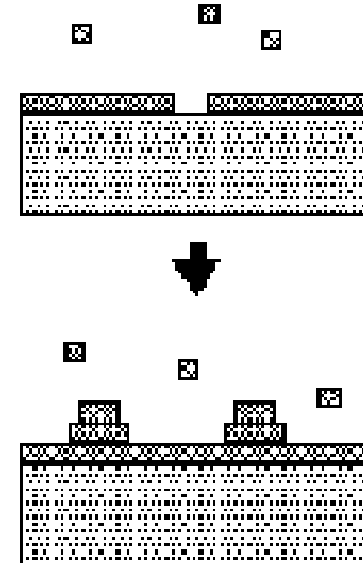
Frank-van der Merwe



Volmer-Weber



Stranski-Krastanow



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

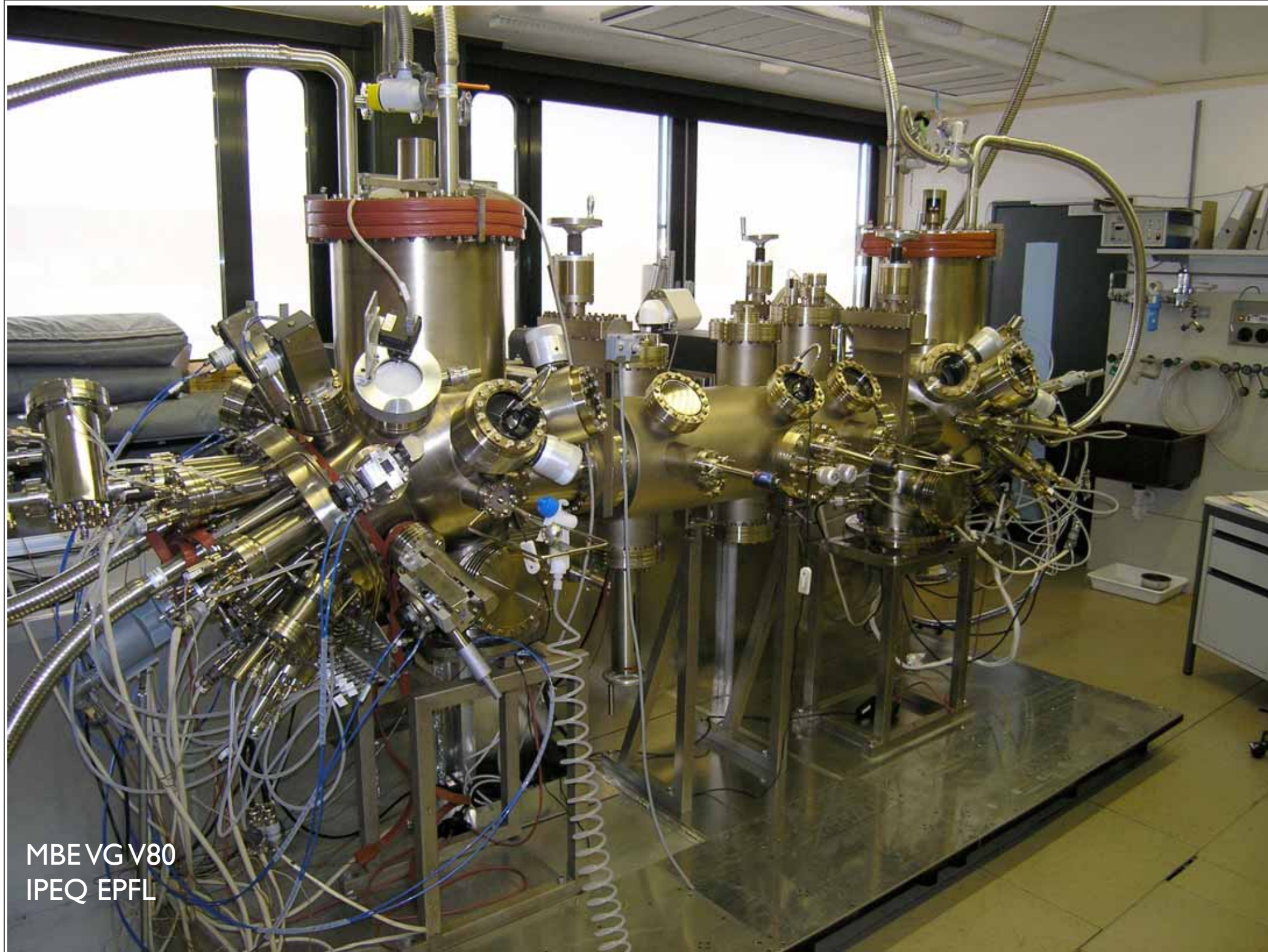
AlAs

3 x InGaAs

AlAs

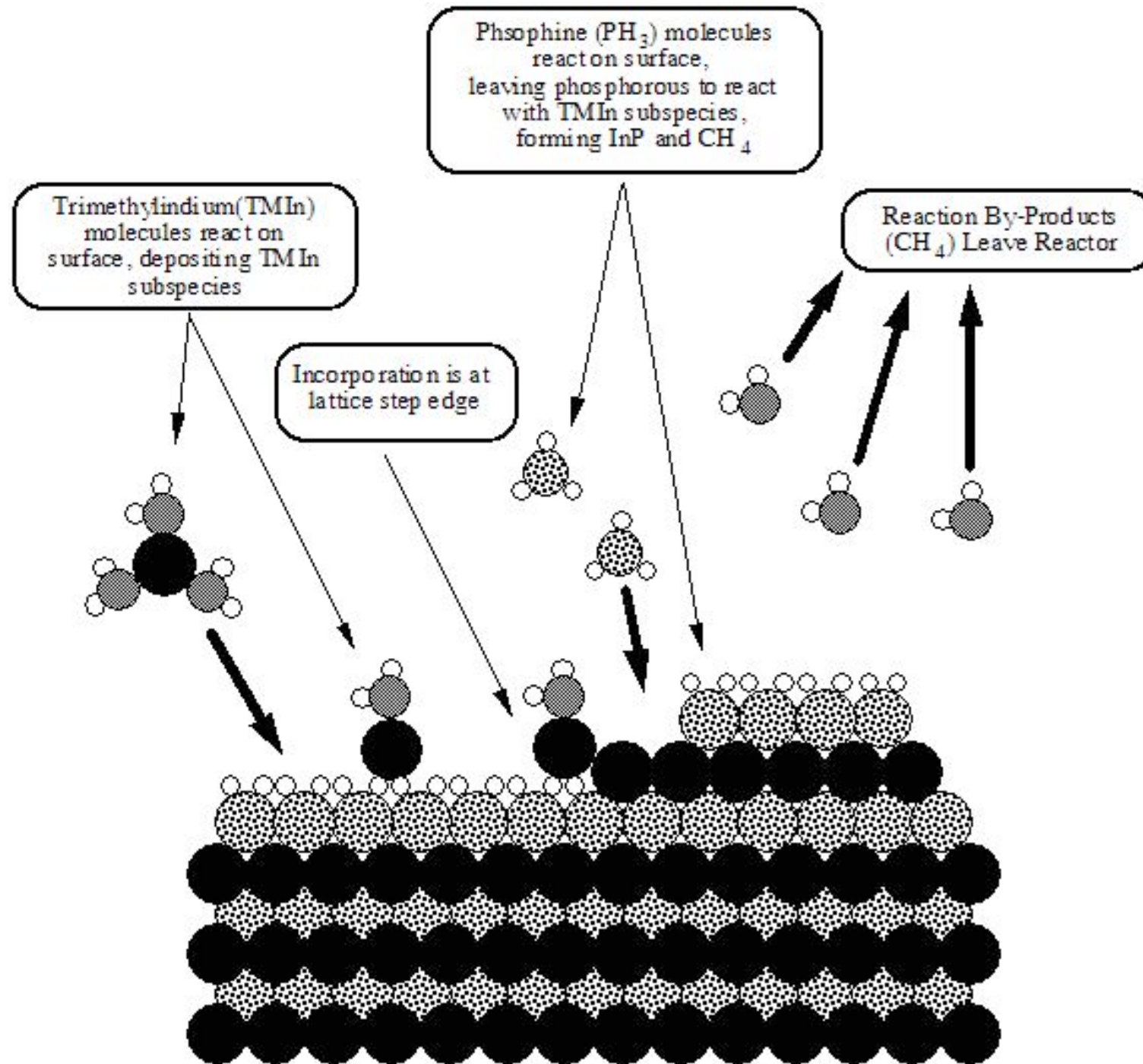


Puits quantique 80 Å

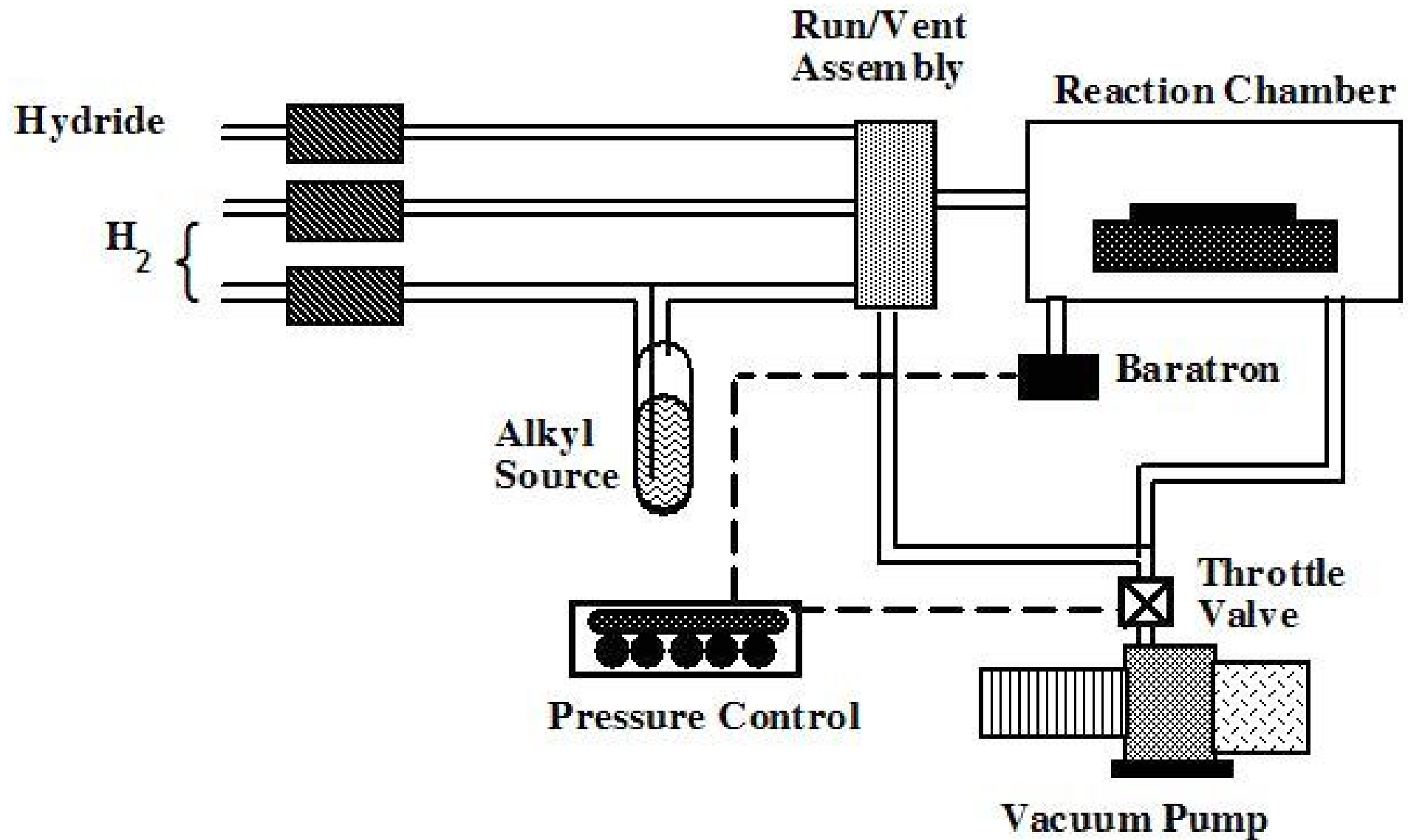


MBE VG V80
IPEQ EPFL

Epitaxie organométalliques



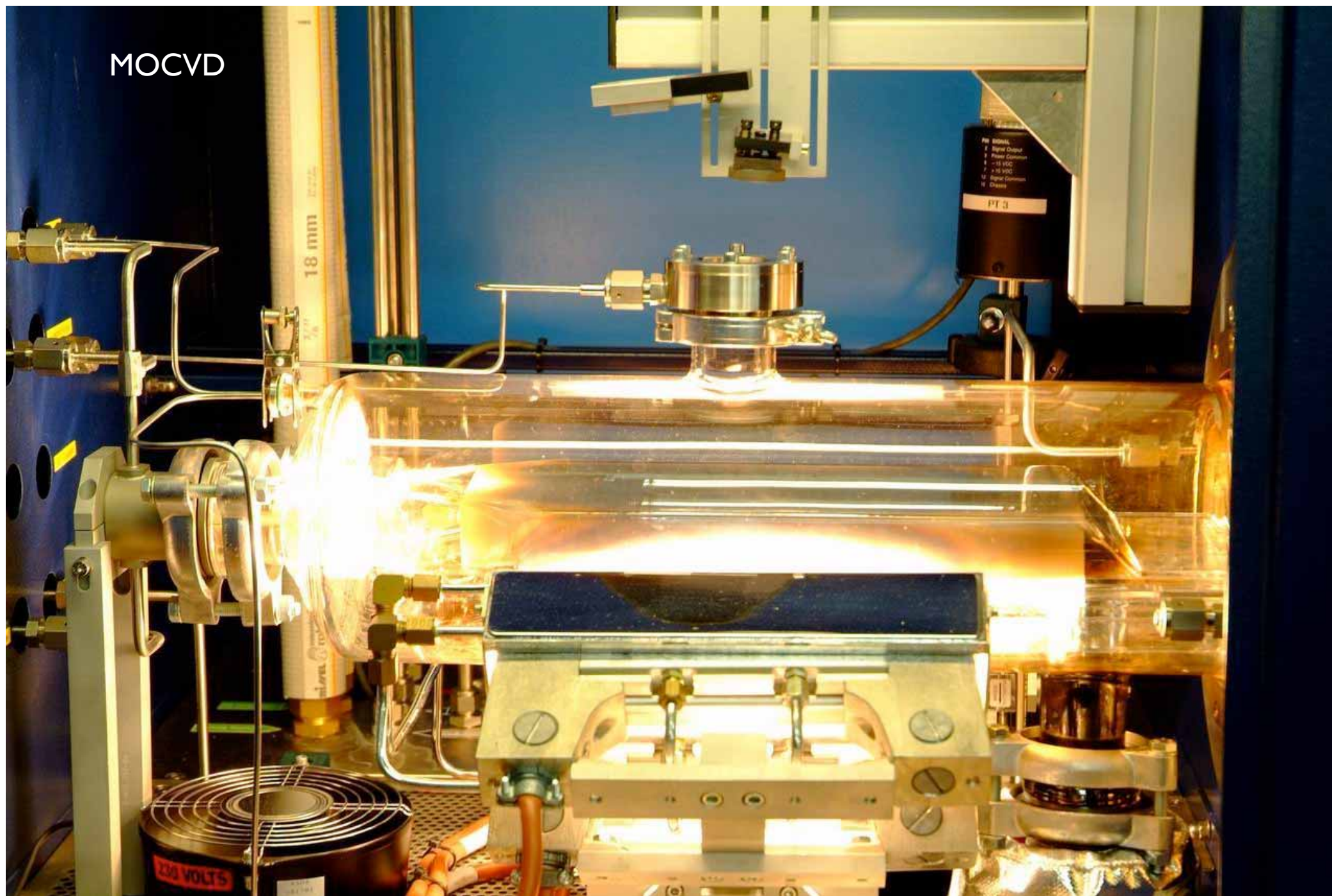
Epitaxie organométalliques





MOCVD

MOCVD



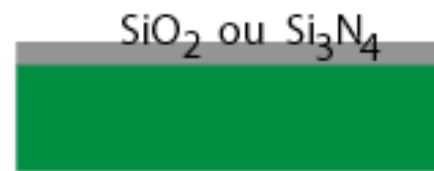
Fabrication cristaux 2D

1



croissance de l'hétérostructure

2



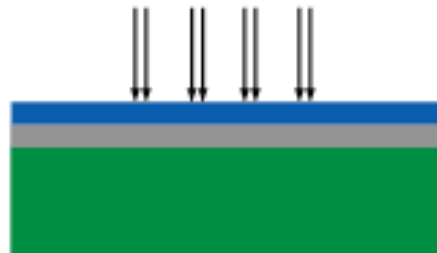
dépôt du masque SiO_2 ou Si_3N_4

3



dépôt du PMMA

4



écriture électronique

5



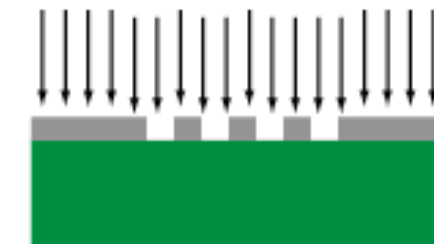
révélation des structures

7



retrait du PMMA

8



gravure des CPh

9



CPh finis



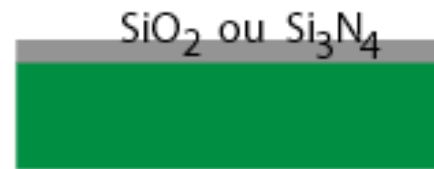
Fabrication cristaux 2D

1



croissance de l'hétérostructure

2



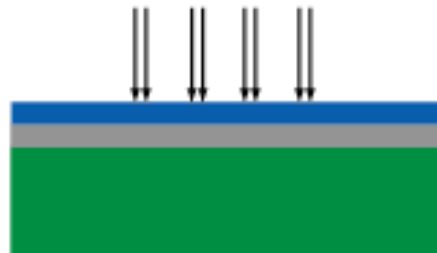
dépôt du masque SiO_2 ou Si_3N_4

3



dépôt du PMMA

4



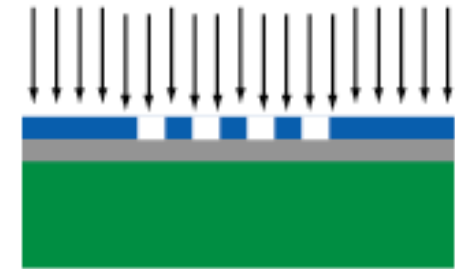
écriture électronique

5



révélation des structures

6



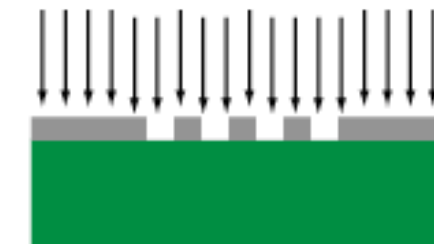
CHF_3 plasma

7



retrait du PMMA

8



gravure des CPh

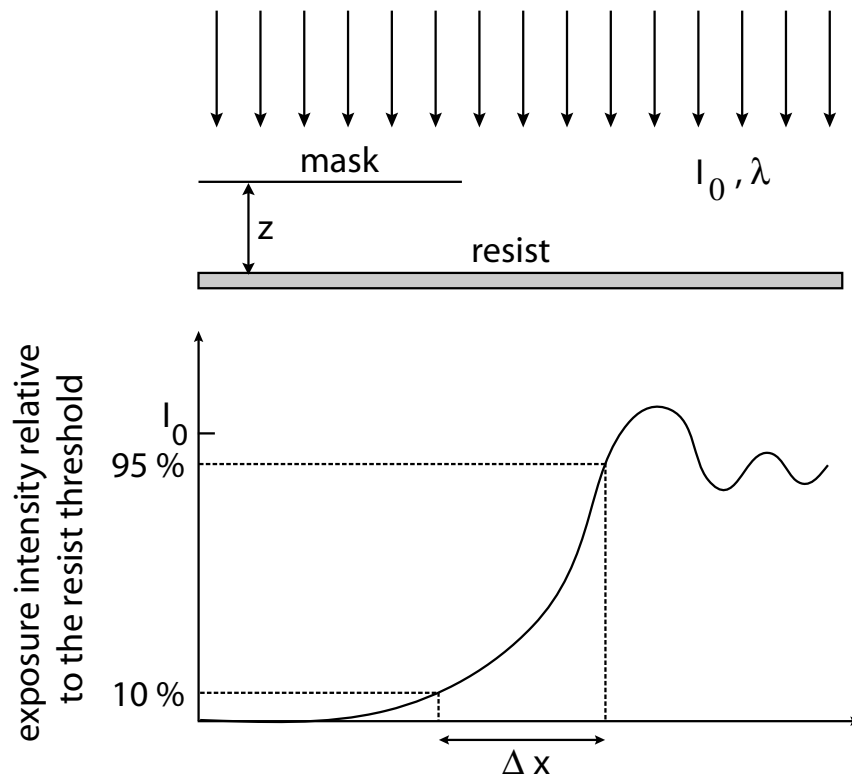
9



CPh finis

Ecriture

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



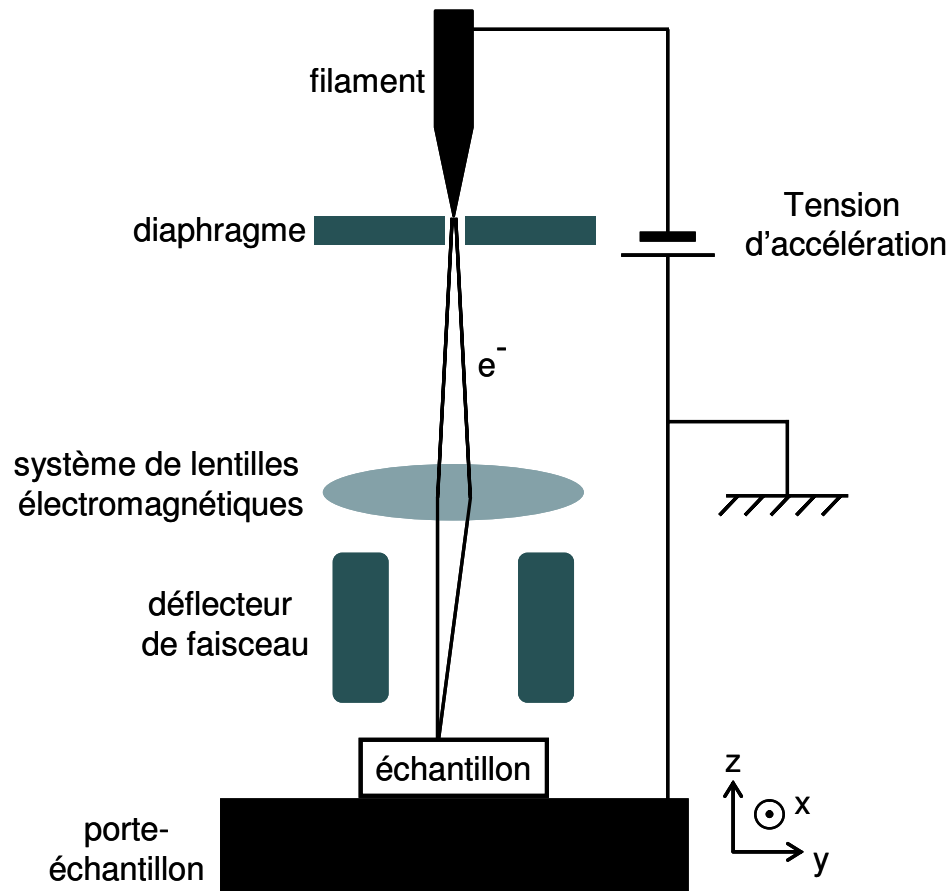
$$\Delta x = \frac{3}{2} \sqrt{\lambda \left(z + \frac{d}{2} \right)}$$

Diminuer la longueur d'onde:

- UV lointain
- électrons
- ions

Ecriture

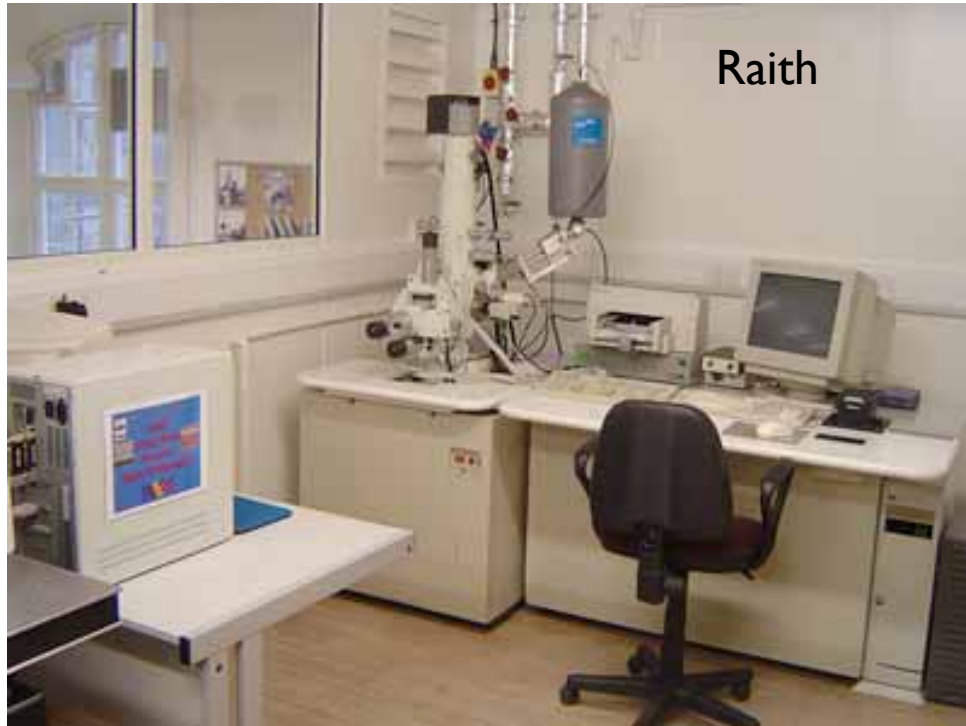
Lithographie électronique



- 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

Écriture électronique

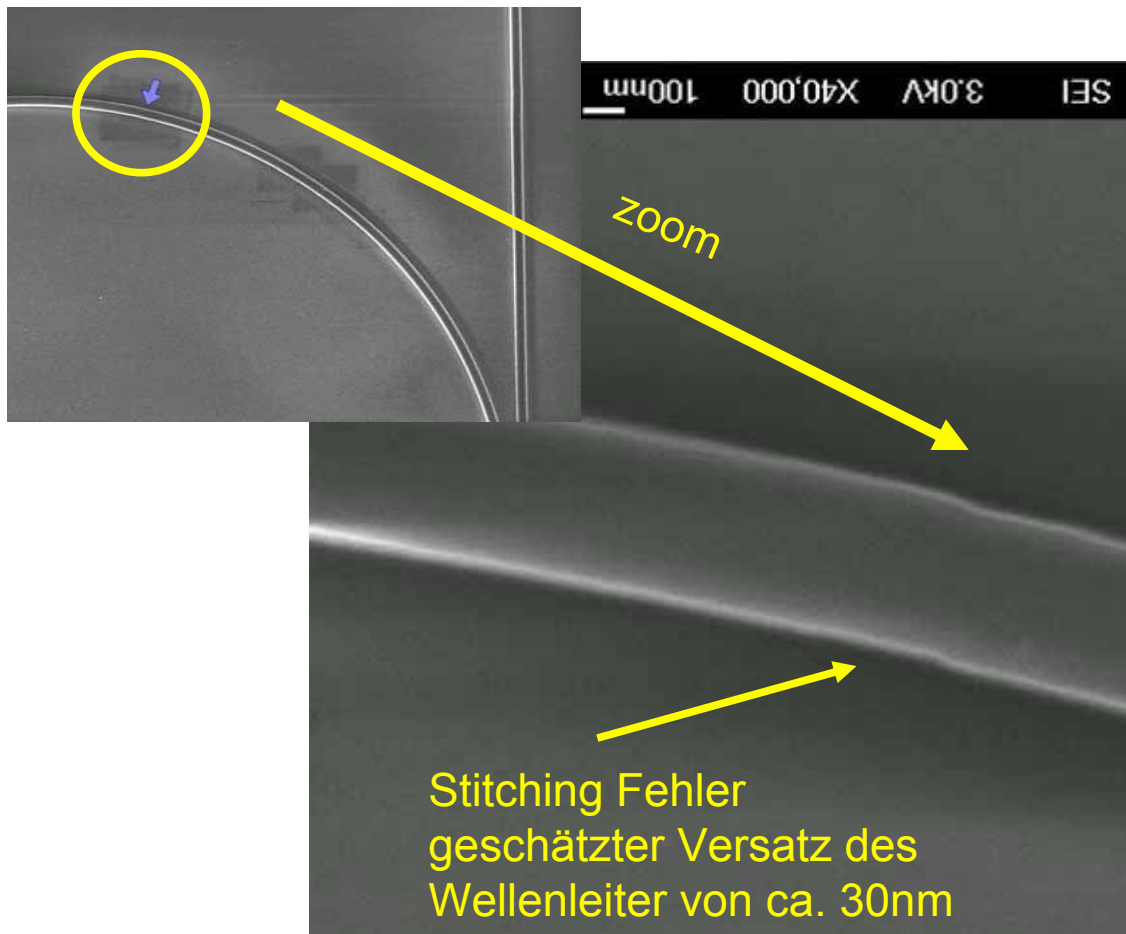


Écriture

Lithographie électronique

Limites :

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

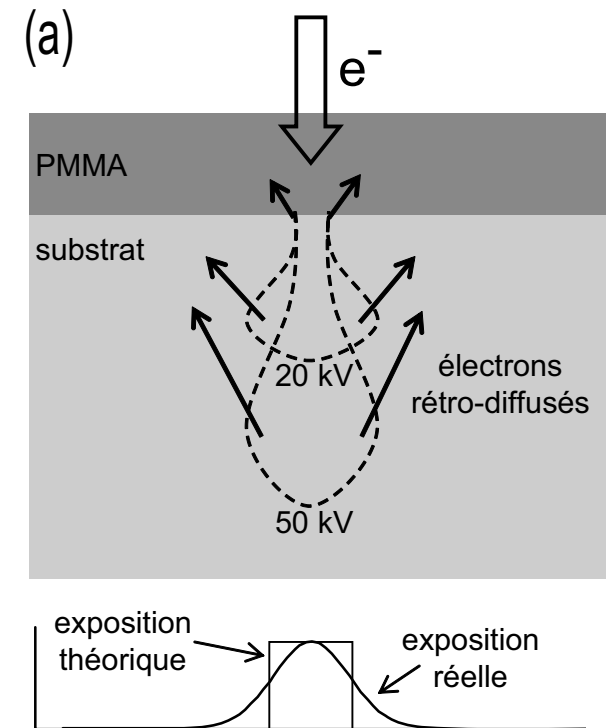
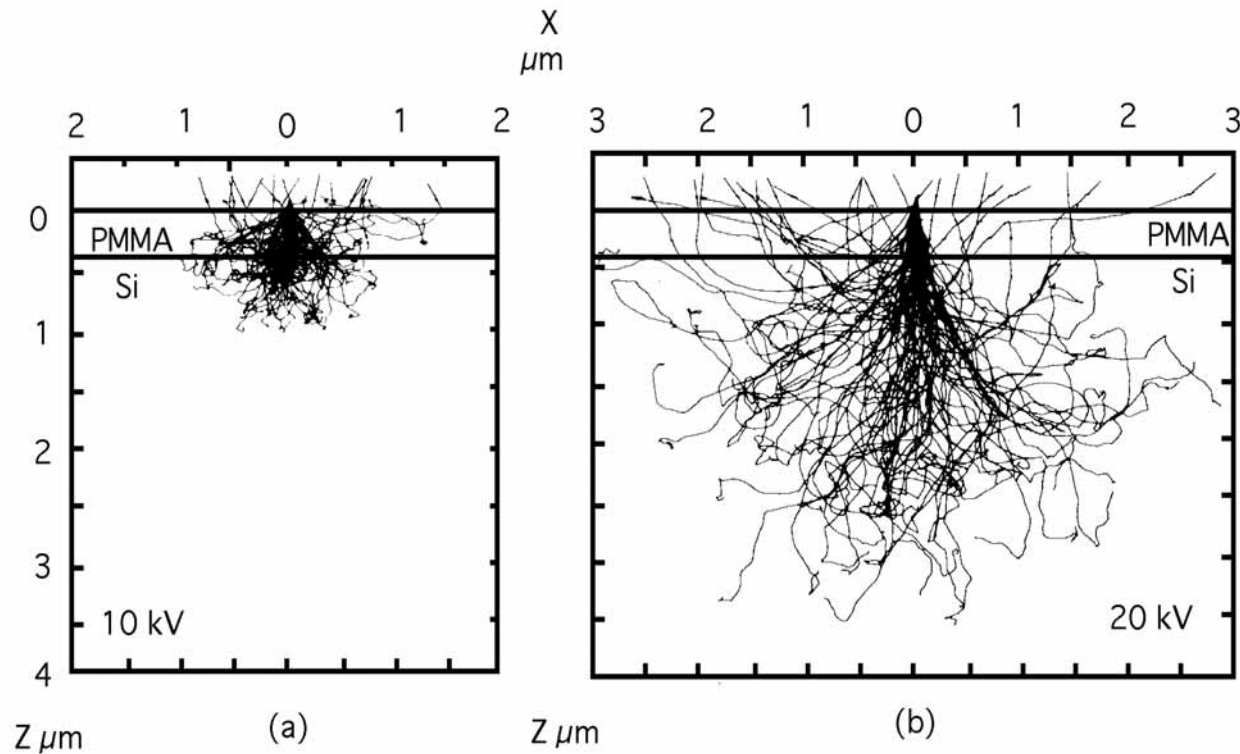


Ecriture

Lithographie électronique

Limites :

- Effets de proximité



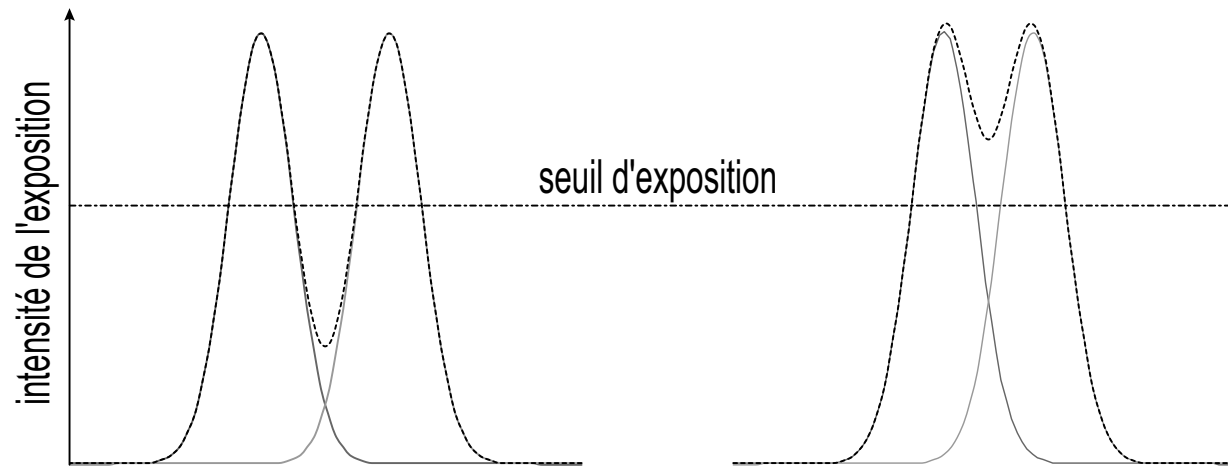
Écriture

Lithographie électronique

Limites :

- Effets de proximité

(b)



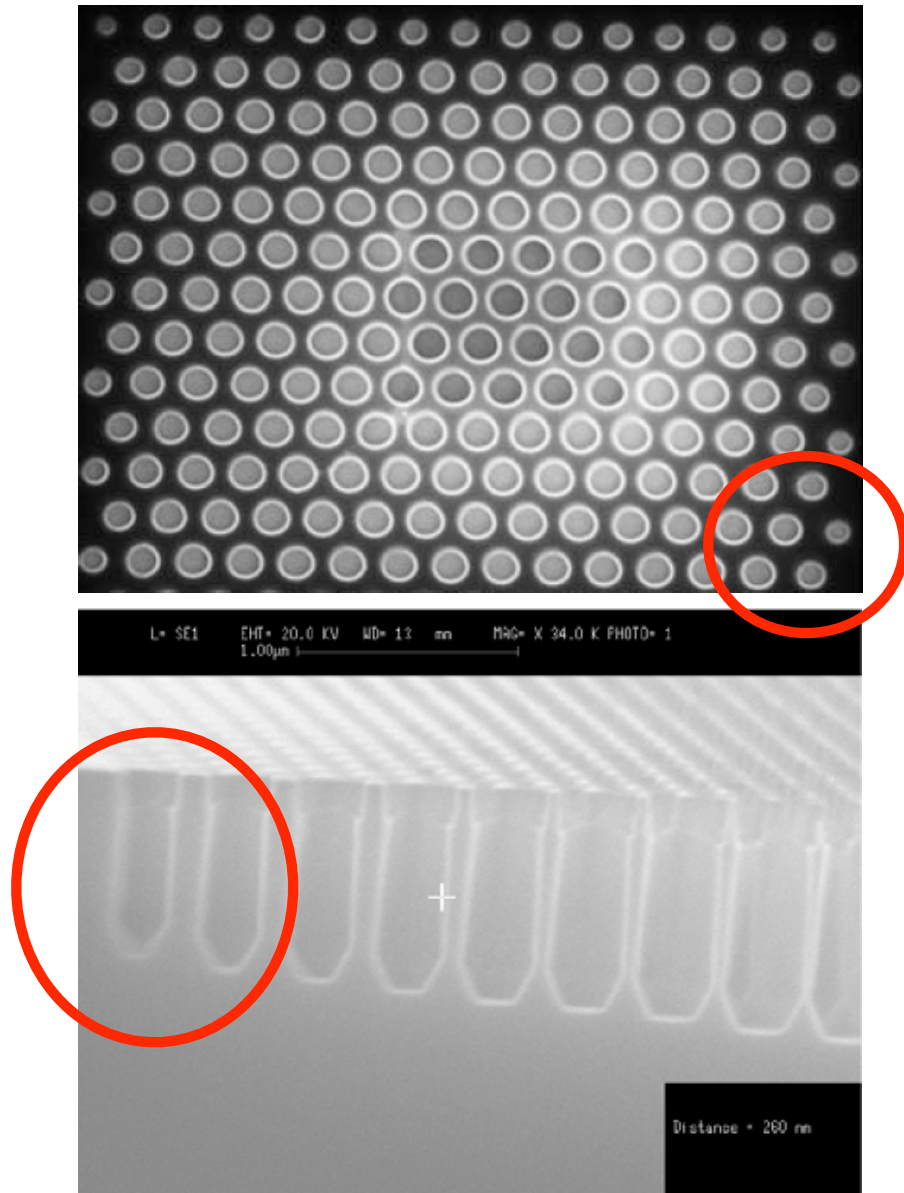
Correction par modulation de la dose (procédé gourmand en temps de calcul)

Les effets de proximité sont maximum autour de 50 keV

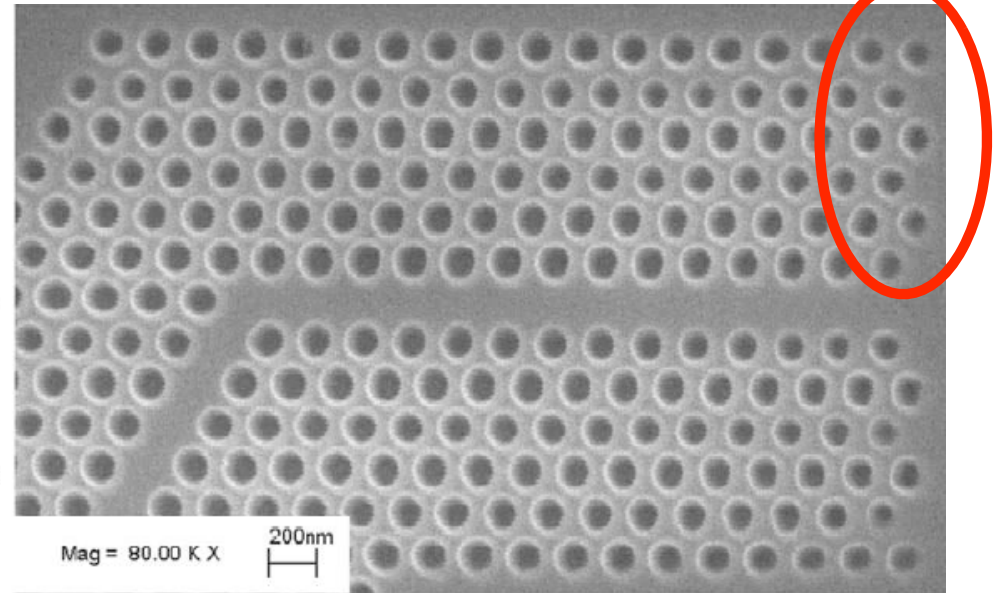
Lithographie électronique

Limites :

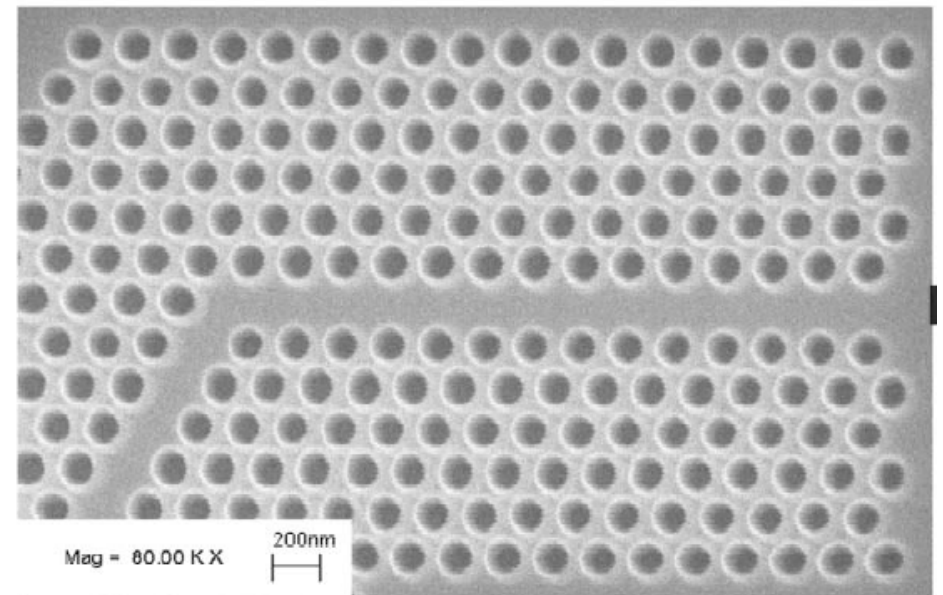
- Effets de proximité



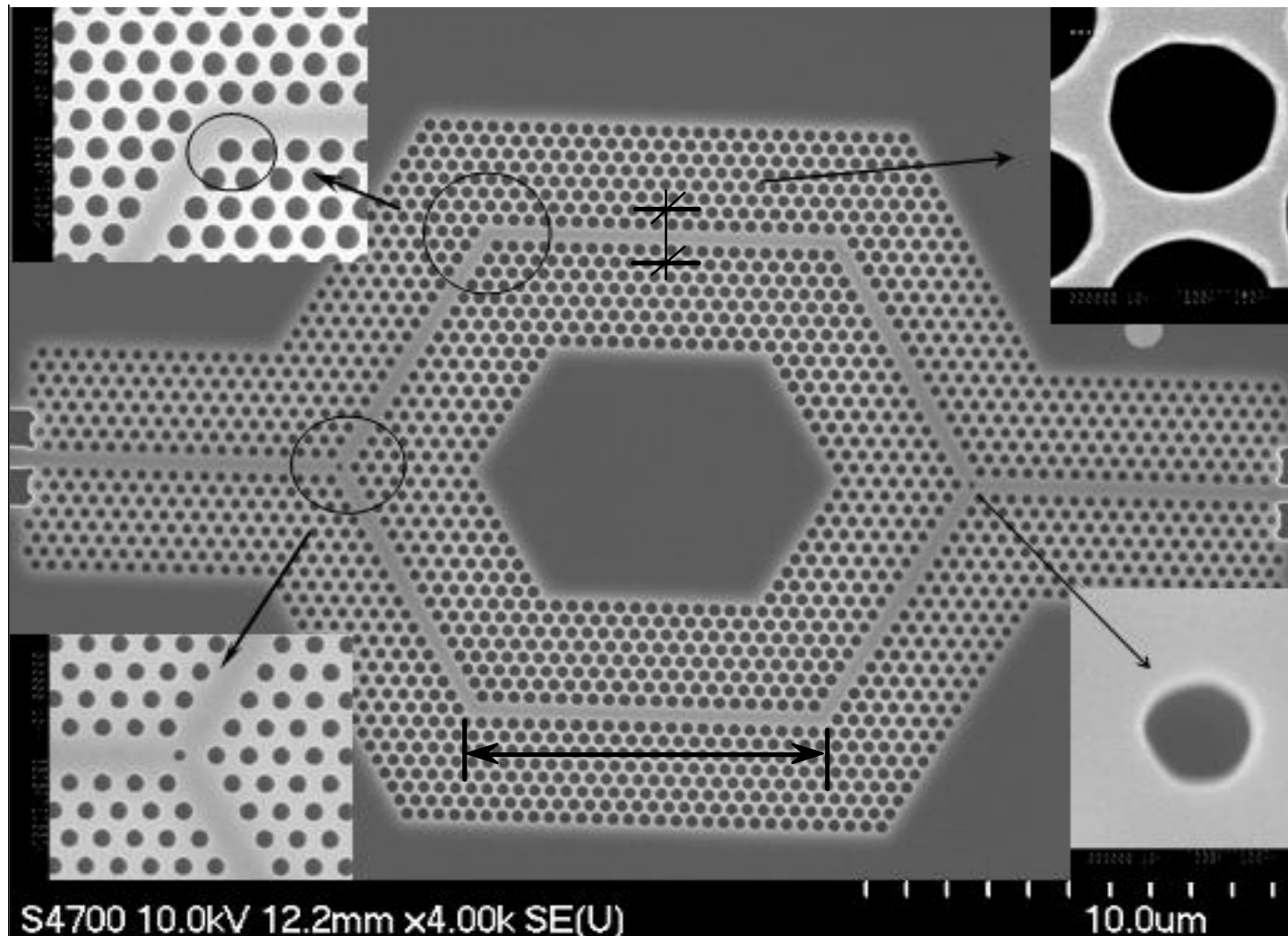
a) Not proximity corrected



b) Proximity corrected



Ecriture



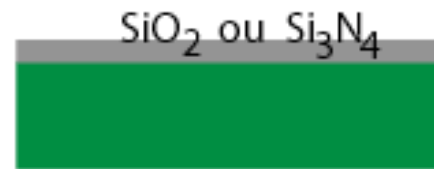
Fabrication cristaux 2D

1



croissance de l'hétérostructure

2



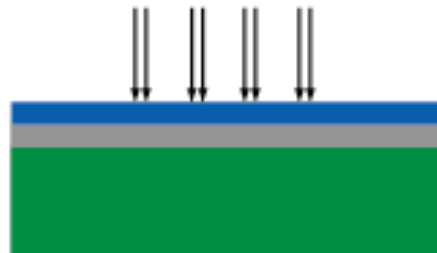
dépôt du masque SiO_2 ou Si_3N_4

3



dépôt du PMMA

4



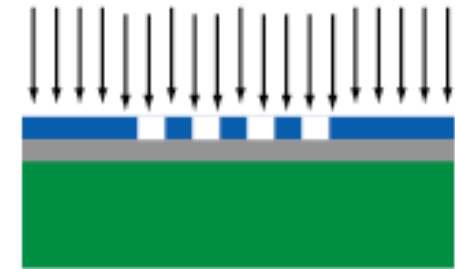
écriture électronique

5



révélation des structures

6



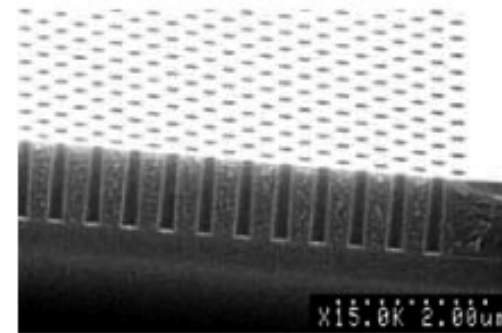
CHF_3 plasma

7

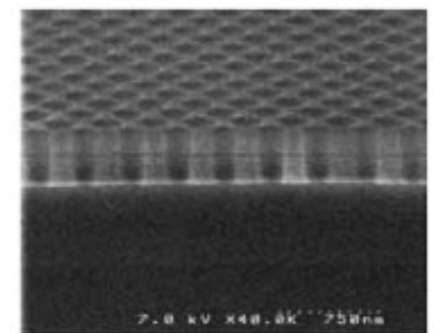


retrait du PMMA

a)

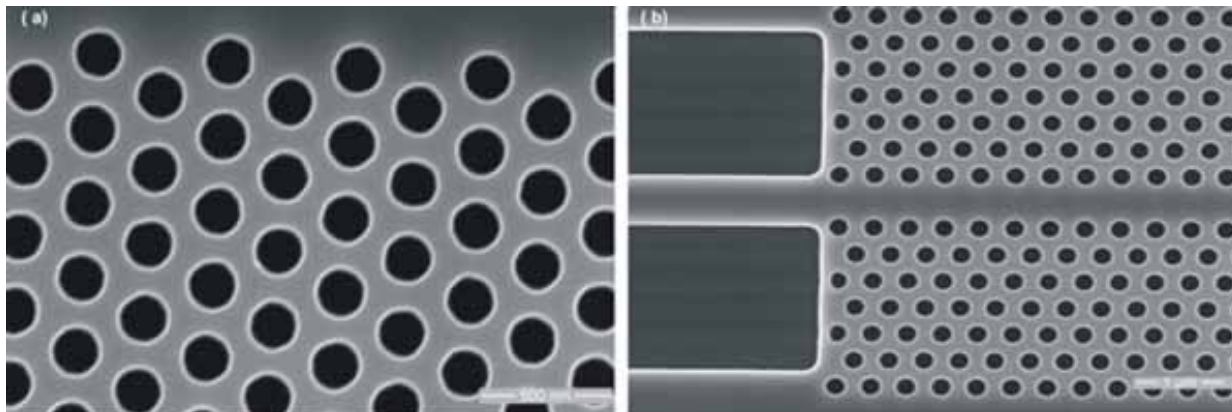
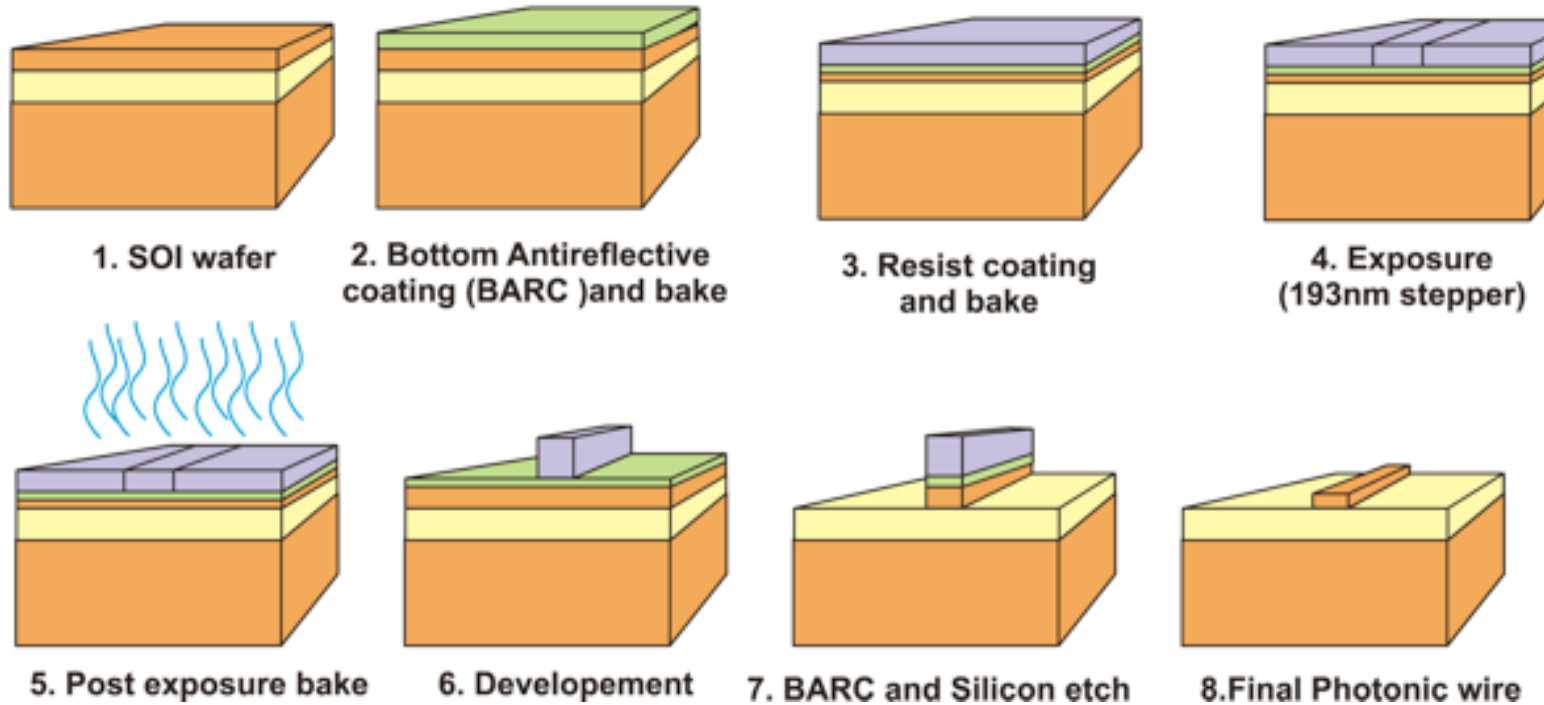


b)



Ecriture

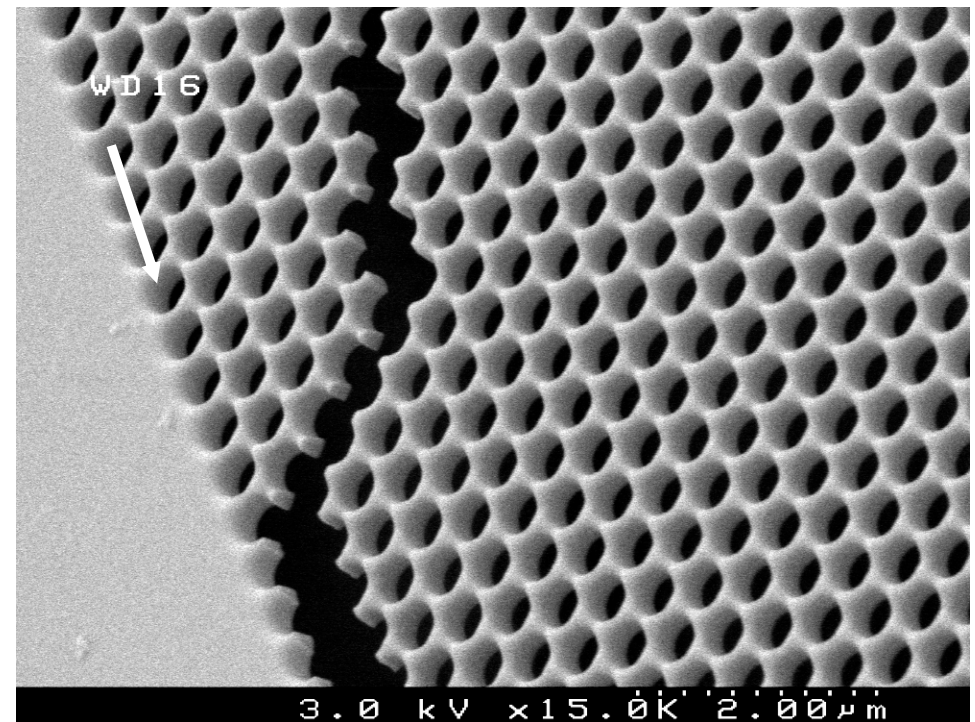
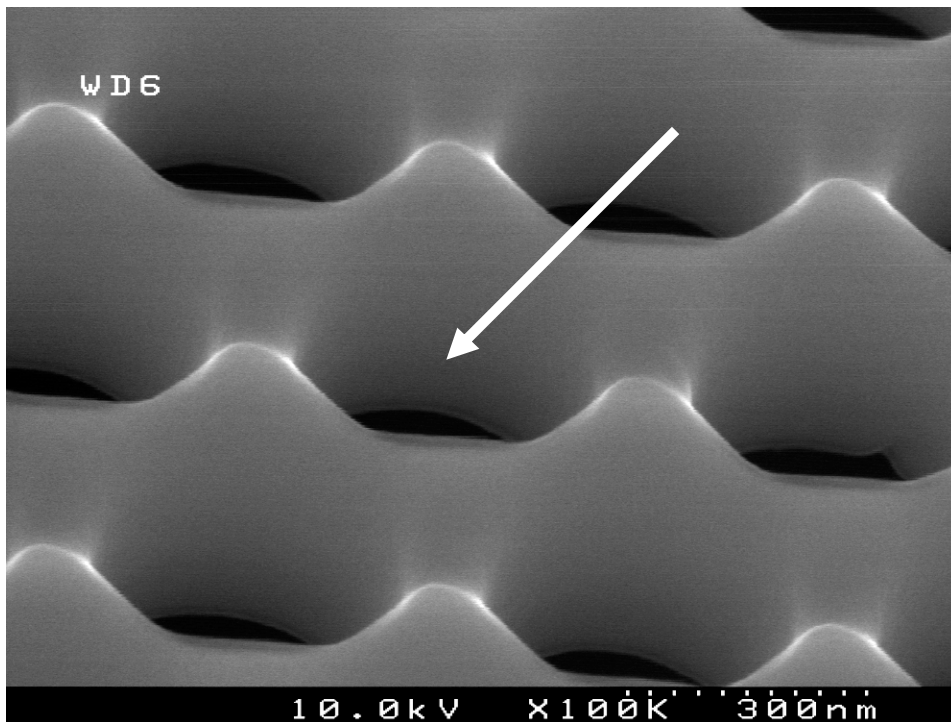
Lithographie UV lointain et X



Écriture et gravure simultanée

Faisceau ionique (FIB)

Erosion mécanique par un faisceau d'ions focalisés



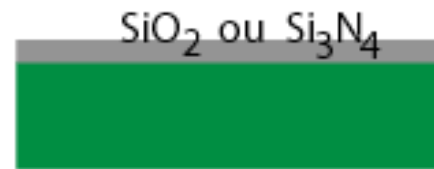
Fabrication cristaux 2D

1



croissance de l'hétérostructure

2



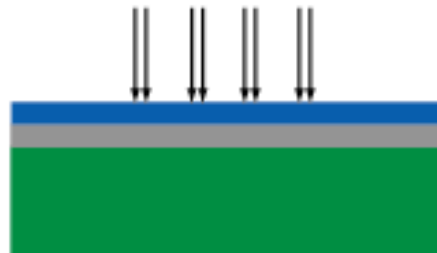
dépôt du masque SiO_2 ou Si_3N_4

3



dépôt du PMMA

4



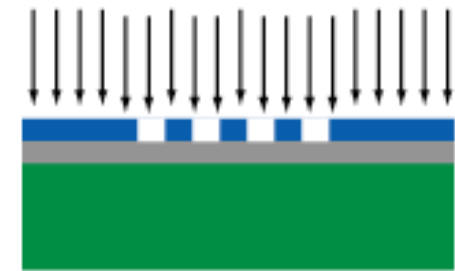
écriture électronique

5



révélation des structures

6



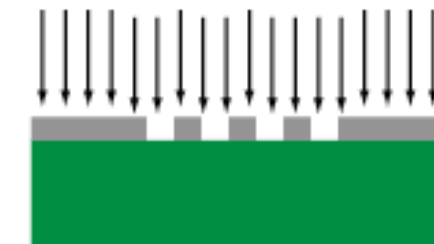
CHF_3 plasma

7



retrait du PMMA

8



gravure des CPh

9

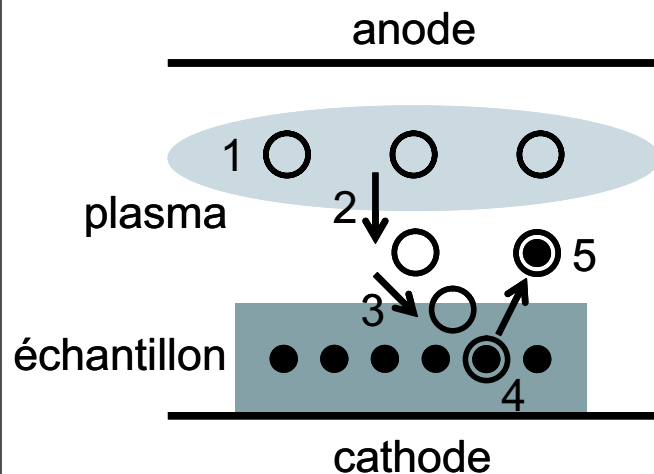


CPh finis

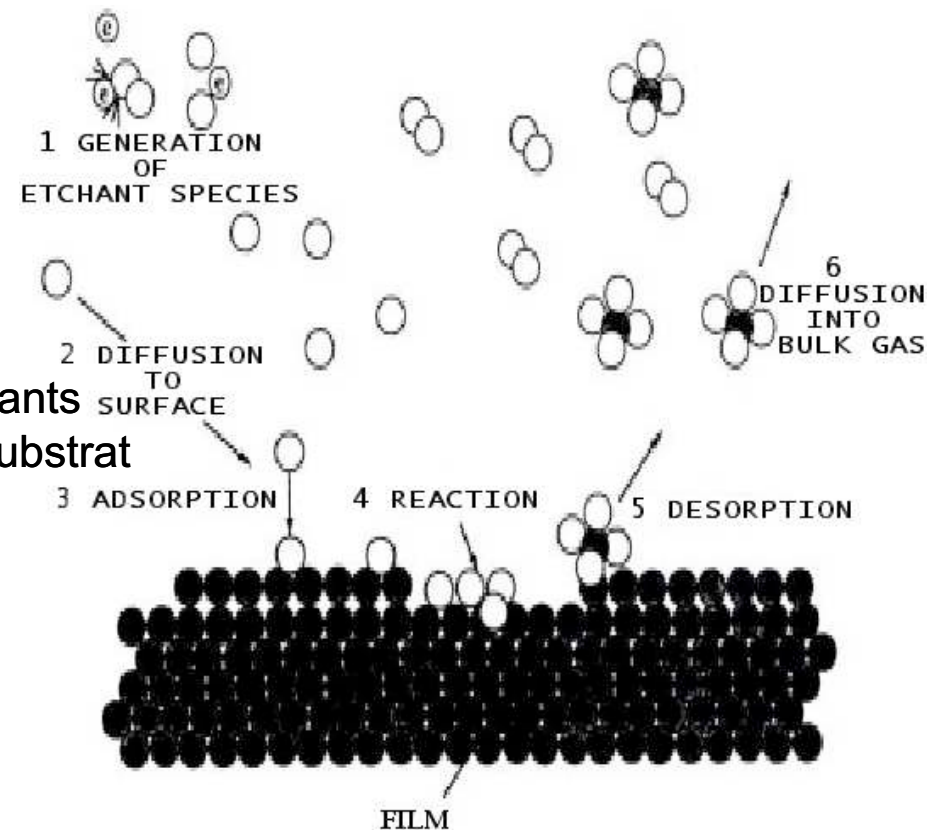
Gravure

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



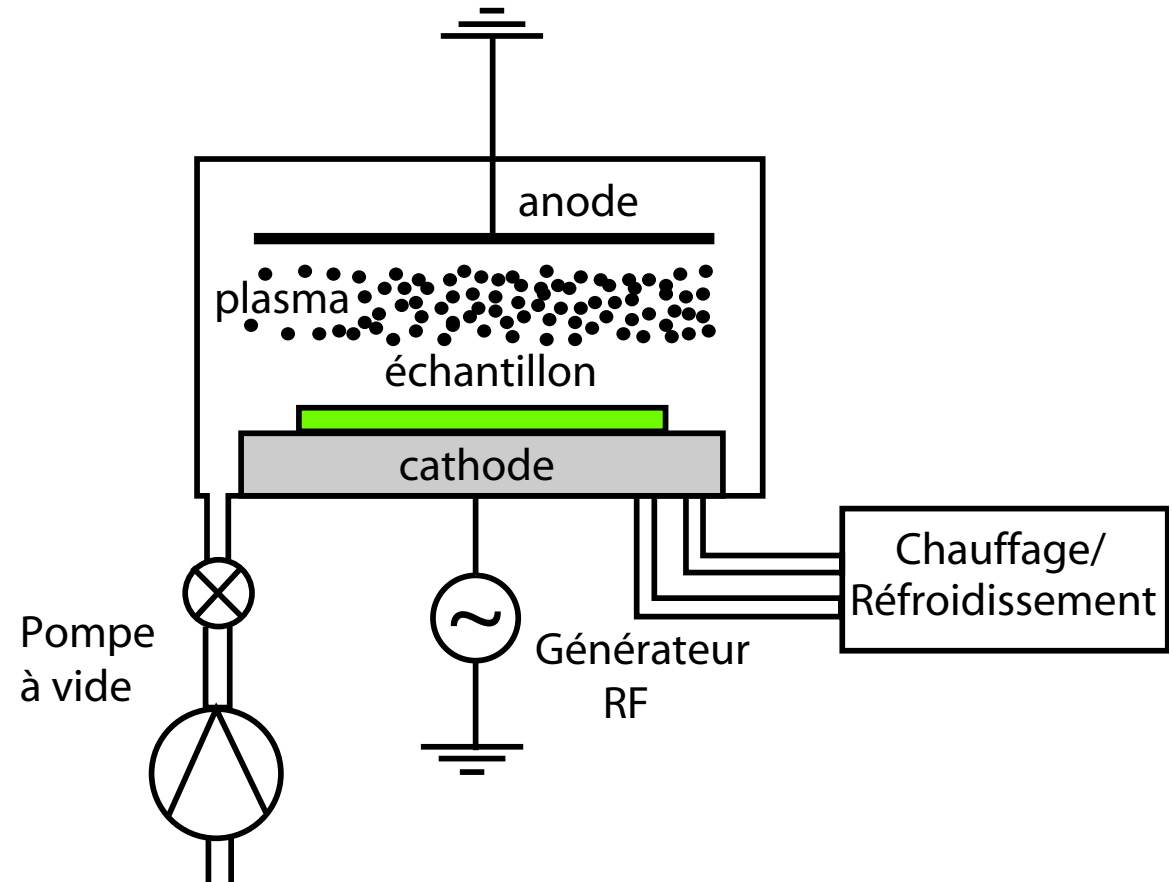
- 1) Création des réactants
- 2) Migration vers le substrat
- 3) Adsorption
- 4) Réaction chimique
- 5) Désorption



Gravure plasma

Différents type de systèmes plasma

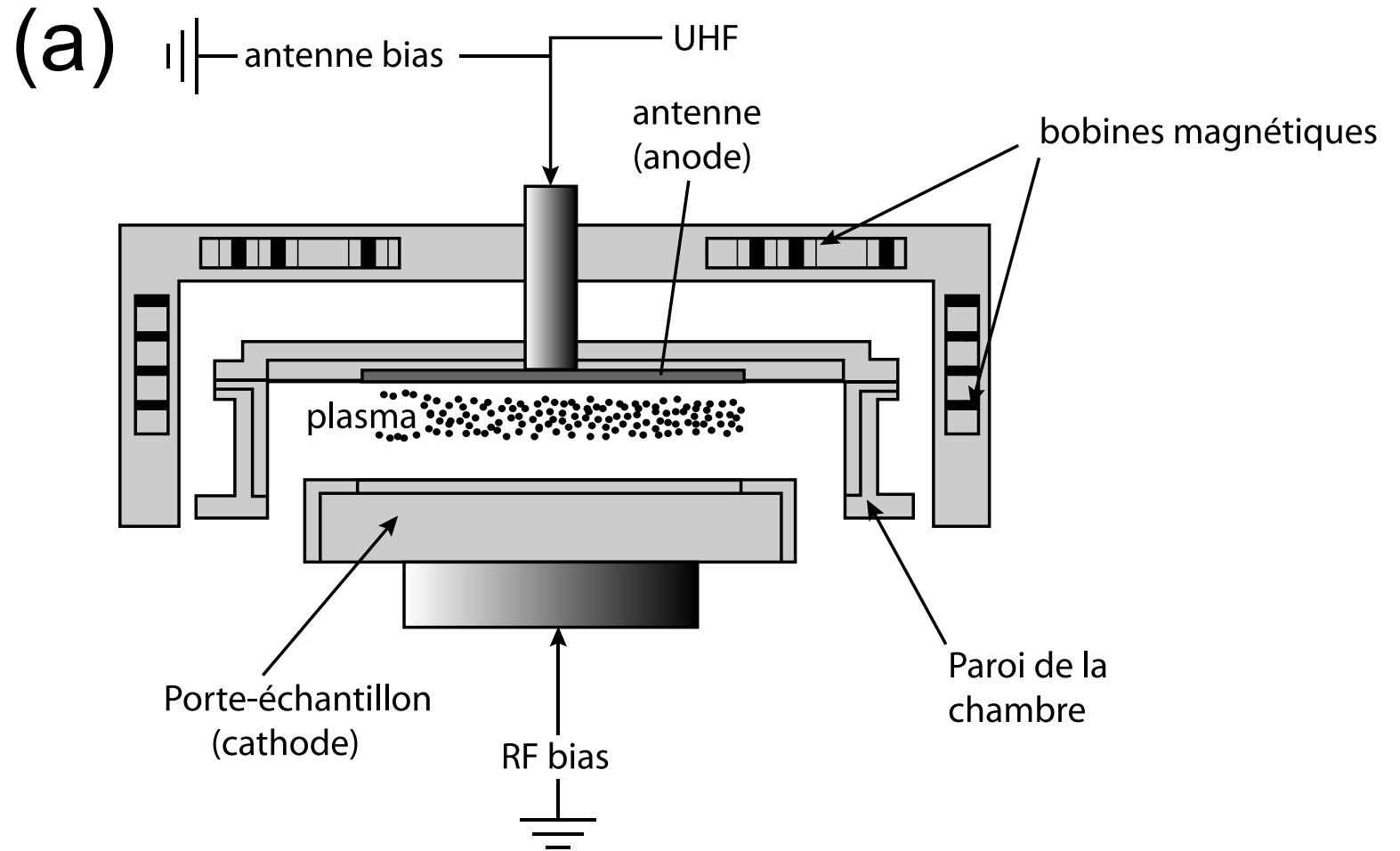
- Générateur RF
- Directivité augmente avec le libre parcours moyen quand la pression diminue
- Faible pression nécessite une plus grande puissance d'allumage du plasma
- Difficile de contrôler l'équilibre gravure chimique / gravure physique



Générique, plasma par couplage capacitif (CCP)

Gravure plasma

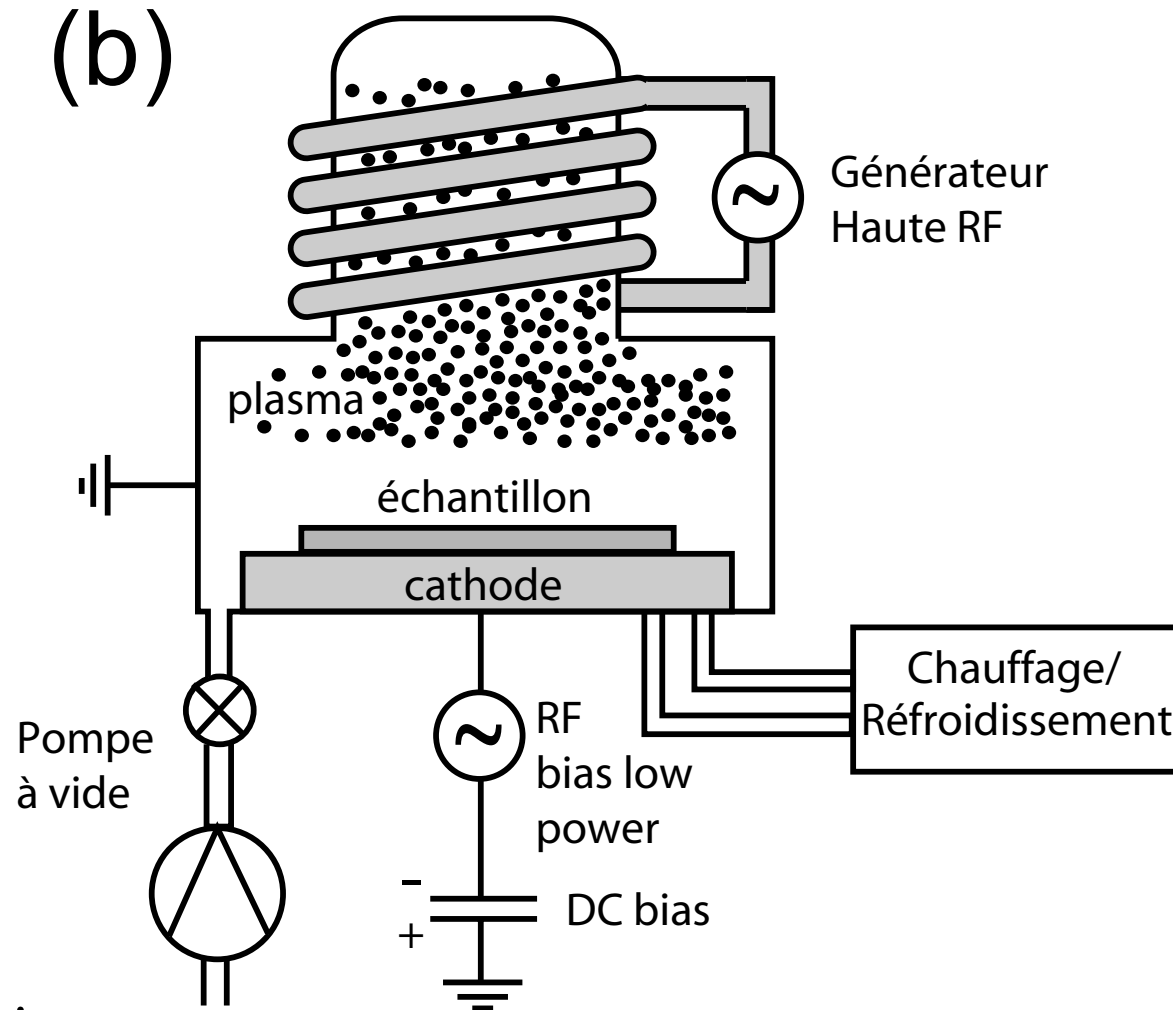
Résonance électron-cyclotron (ECR)



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

Gravure plasma

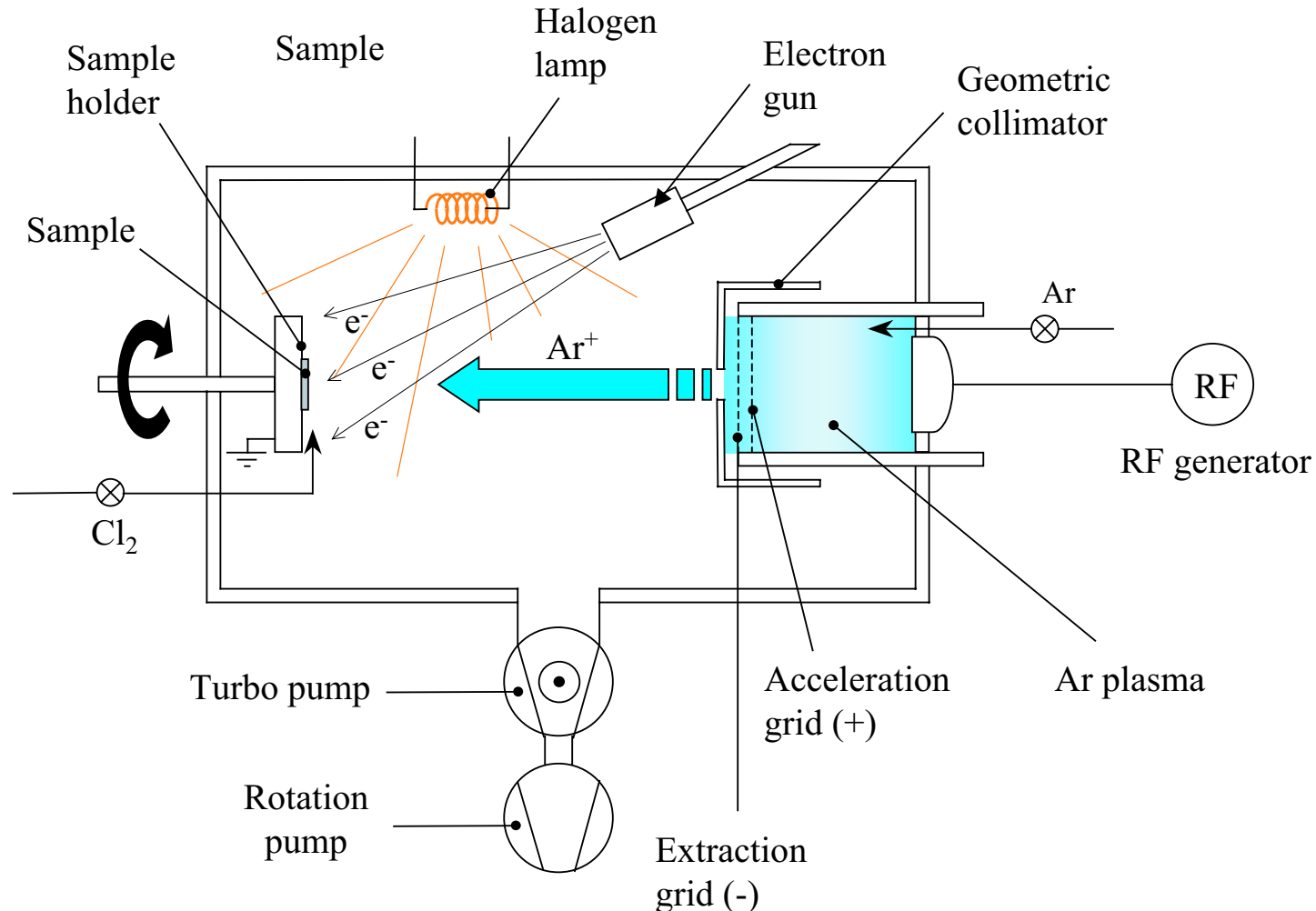
Plasma couplé inductivement (ICP)



- 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
CF₄, CHF₃, H₂, SiCl₄, Cl₂, Ar, O₂

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

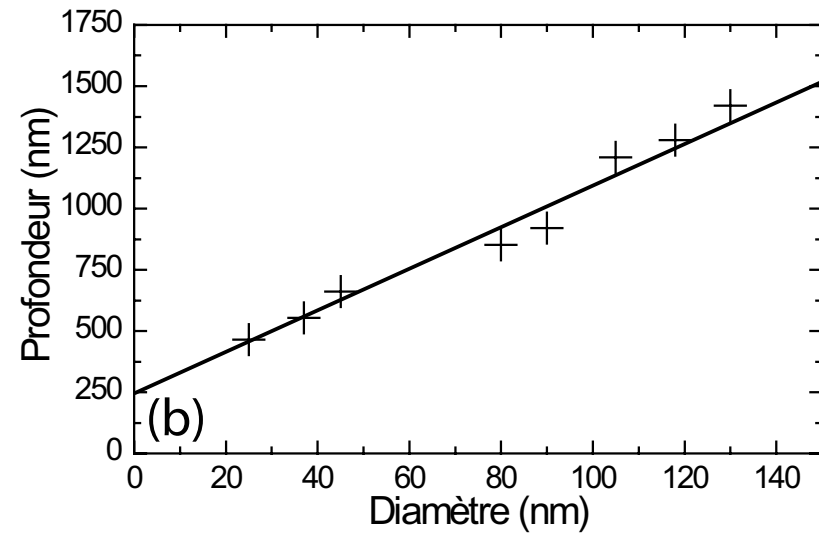
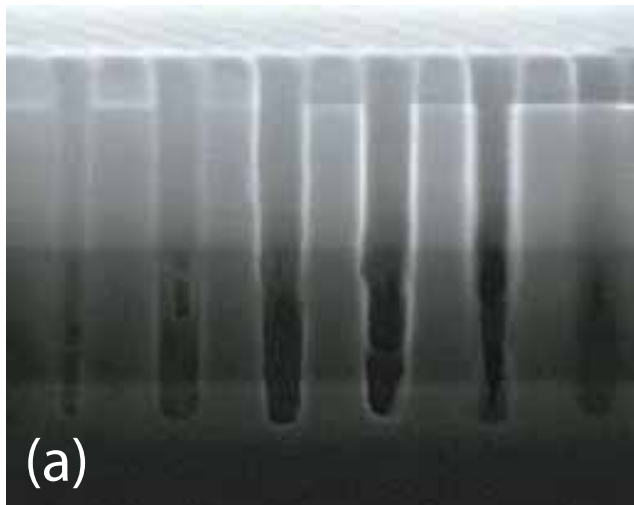
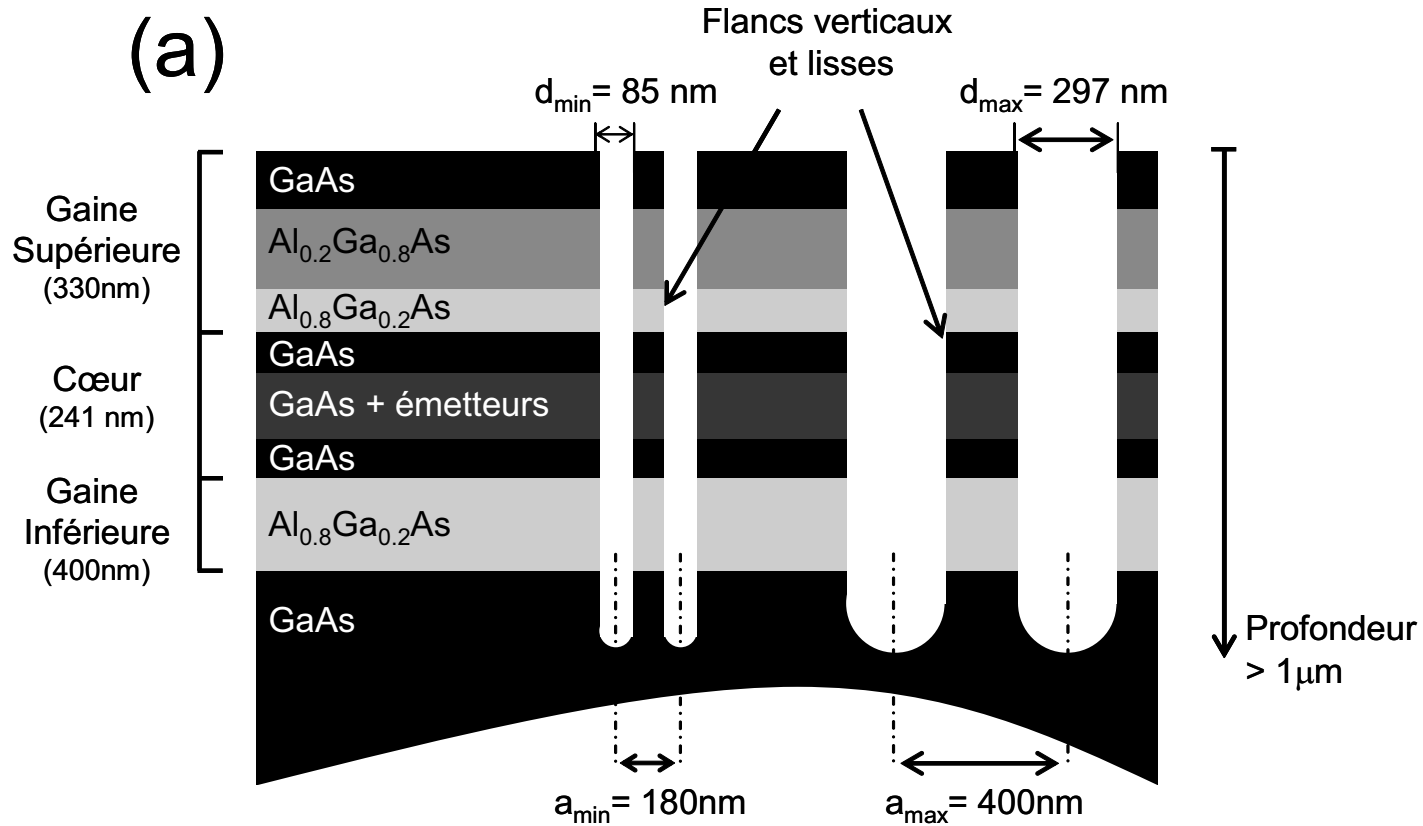
Gravure plasma



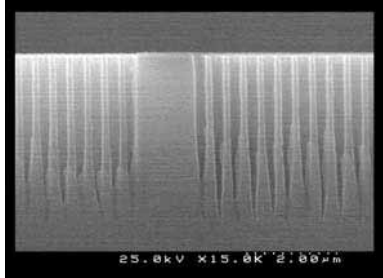
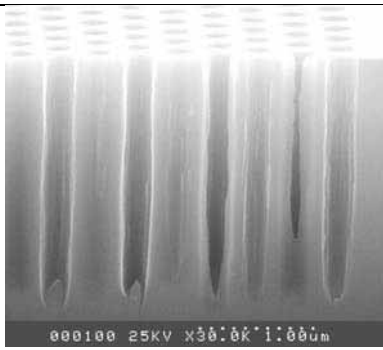
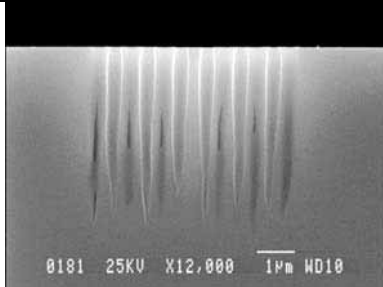
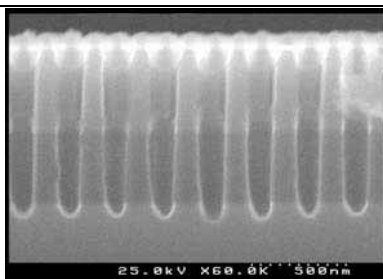
Gravure plasma



Structures faible contraste d'indice



Structures faible contraste d'indice

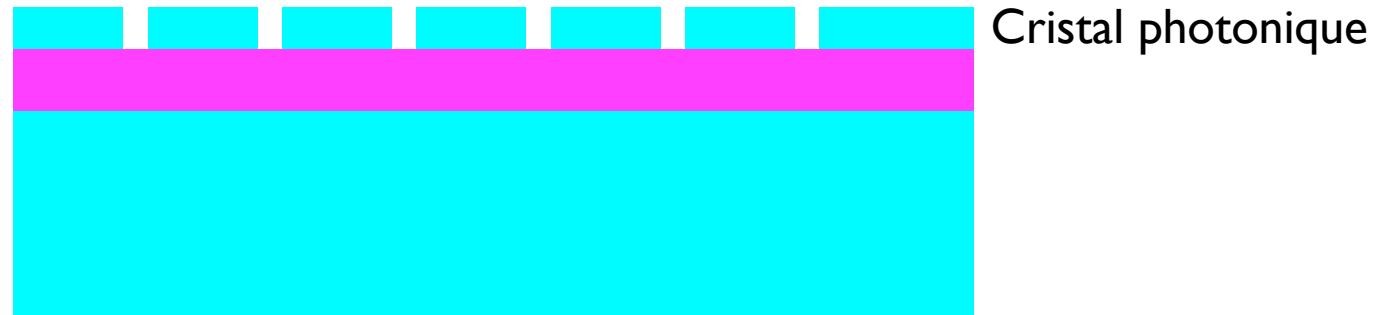
		Hole shape	Etch depth (μm)	Aspect ratio	Limiting factors
ECR (InP)		tapered	3-4	16	mask selectivity
ICP (InP)		cylindro-conical	4.5	14	mask selectivity
CAIBE (InP)		tapered	2.5-4.5	10-20	mask thickness/ removal of etch products
ECR (GaAs)		cylindrical	1.1	6	mask thickness

Structures membrane

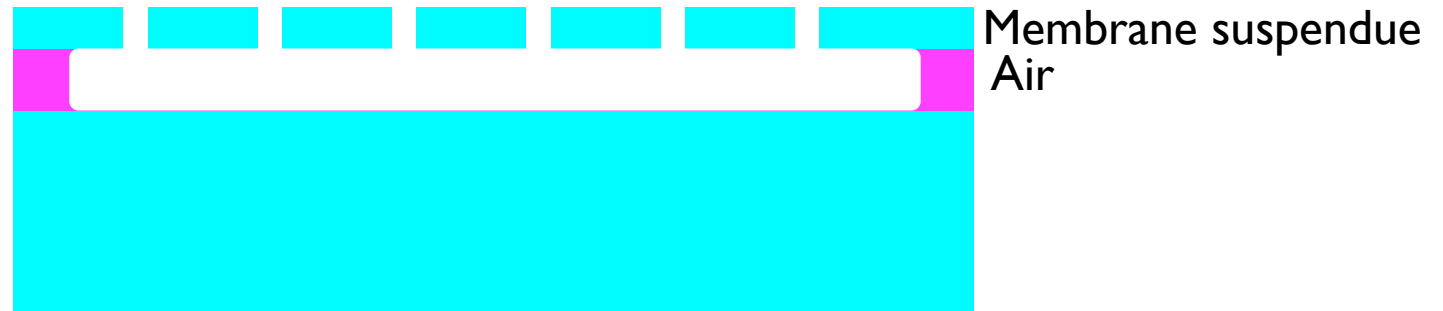
1 Guide d'onde



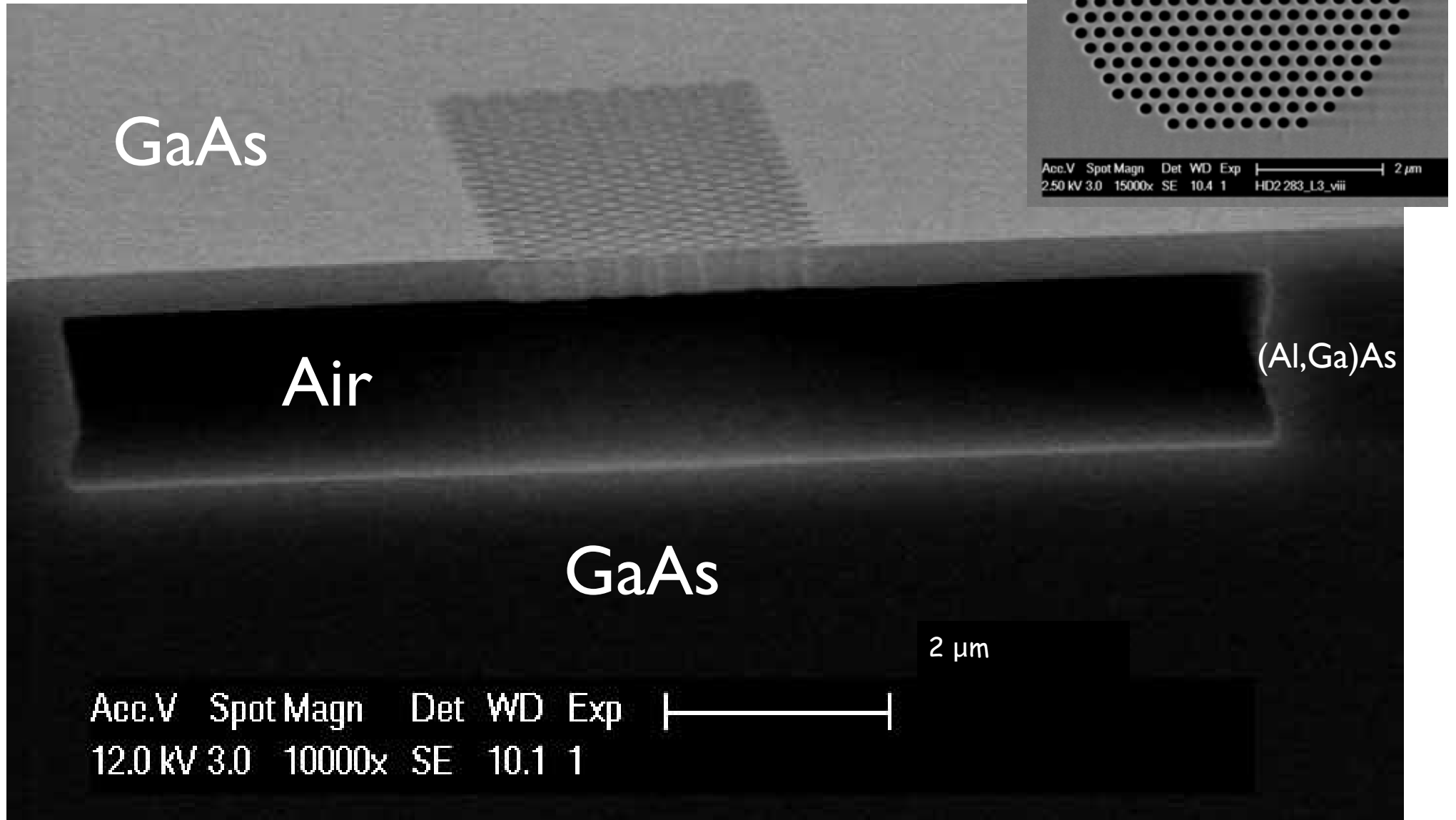
2 Gravure du cristal photonique



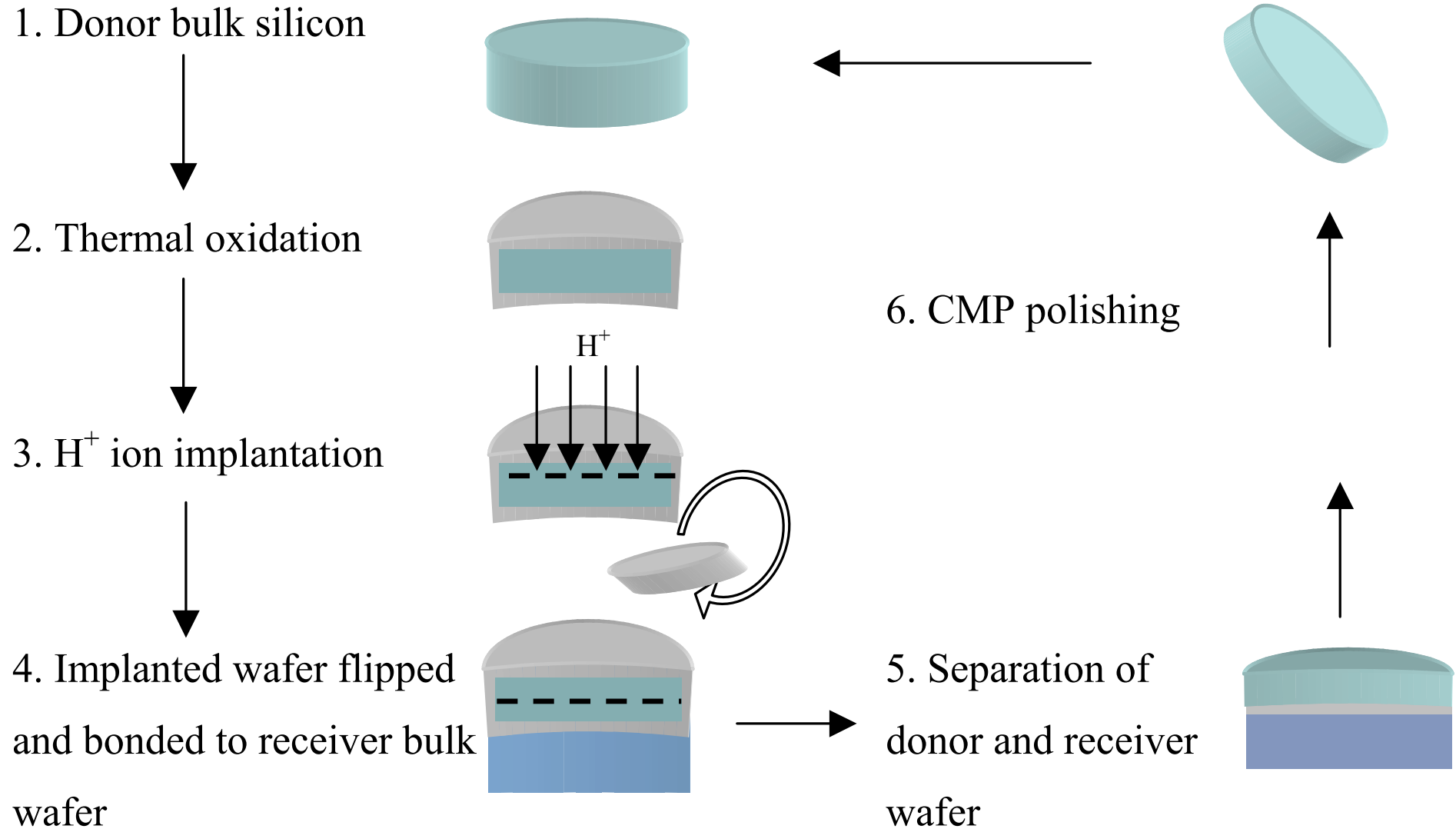
3 Gravure sélective de la couche sacrificielle



Structures membrane



Structures Silicium sur isolant (SOI)



UNIBOND, voir aussi SOITEC etc...

Structures Silicium sur isolant (SOI)

