

Lithographie électronique et FIB

Thierry FOURNIER
Institut Néel-Grenoble
NANOFAB

Panorama des centrales

- **Les centrales du 1^{er} cercle**
 - LPN (Marcoussis)
 - Minerve- IEF (Paris sud)
 - IEMN (Lille)
 - LAAS (Toulouse)
 - FEMTO (Besançon)
 - LETI-Minatec-PTA (Grenoble)
- **Les centrales de proximité**
 - Lyon
 - Nancy-Strasbourg
 - Paris-Centre
 - Saclay
 - Rennes
 - Montpellier
 - Nanofab Grenoble

Nanofab: centrale de nanofabrication « de proximité »

1000 m² de salle blanche :

- litho UV/DUV
- litho e-beam (Leo 1530/Raith) + FIB (Orsay Physic)
- RIE

Contacts ultrasons, profilomètre, ...

Dépôts métalliques :

- thermiques
- par canon électrons

Gravure Ar IBE

Formation : 30 stagiaires et doctorants depuis 2002, 11 thèses soutenues, 15 thèses en cours

ESONN, CESIRE

Personnel technique (CNRS et UJF) :

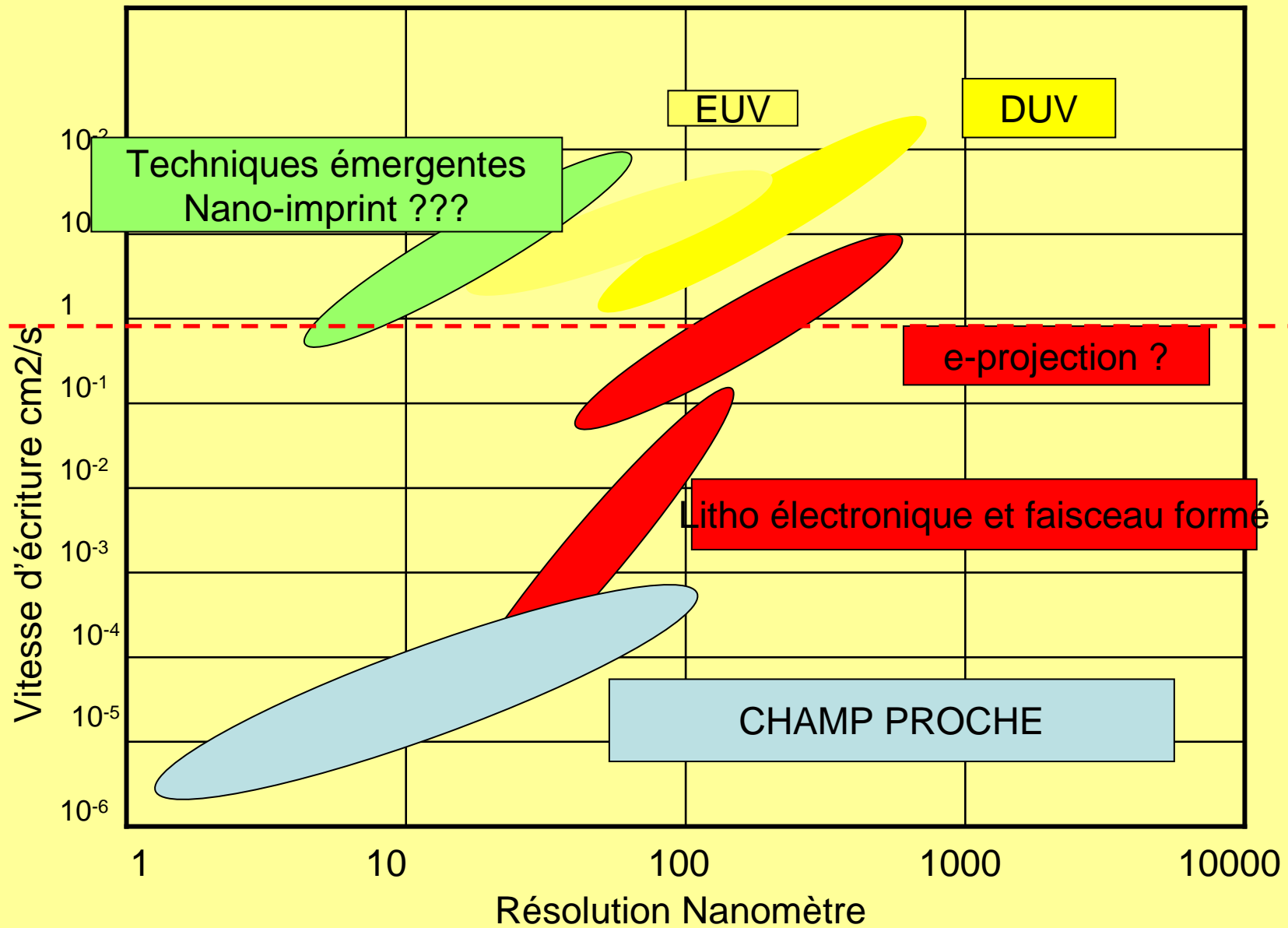
2 IR, 1 AI, 3 T



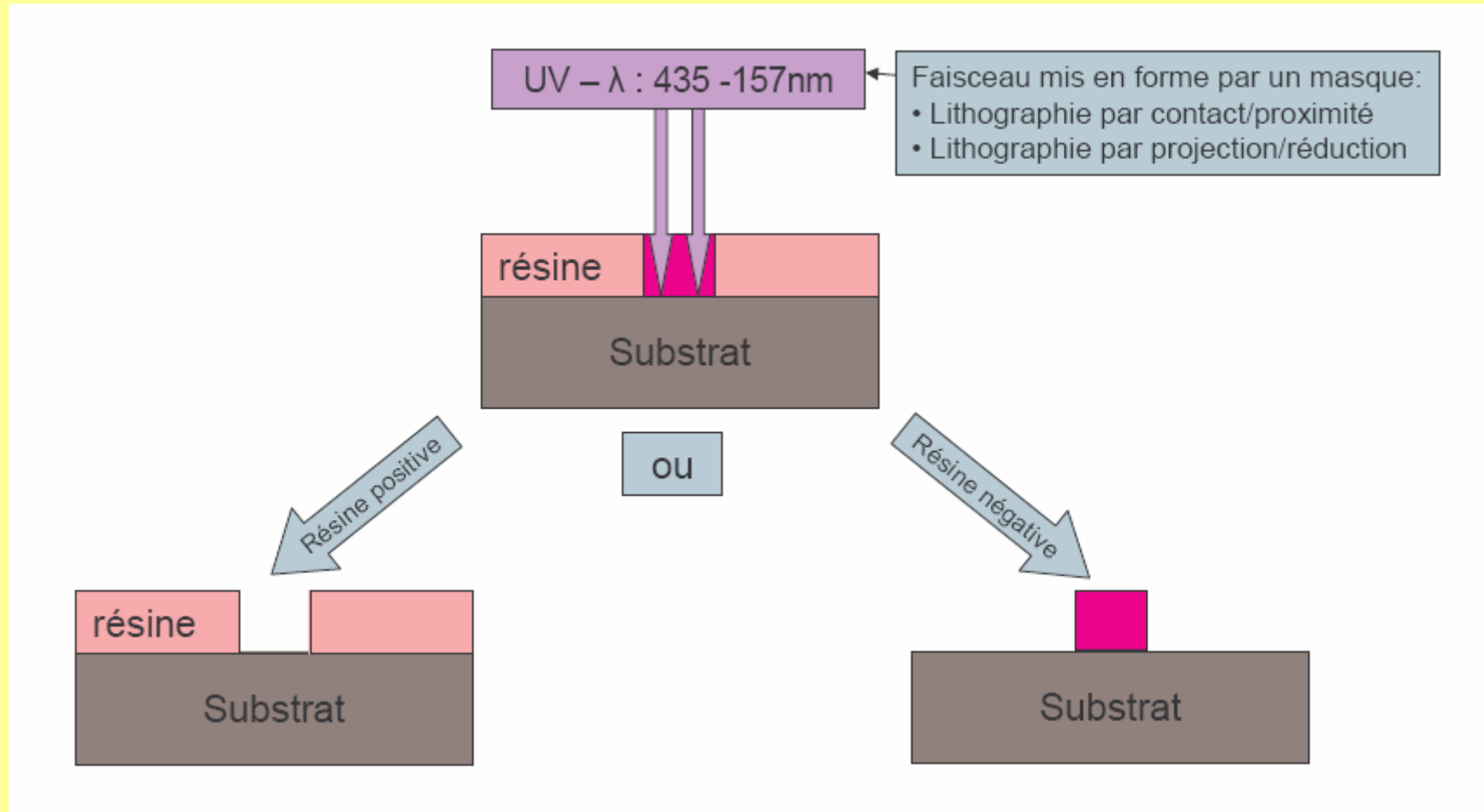
Lithographie

« Ecrire sur la pierre »

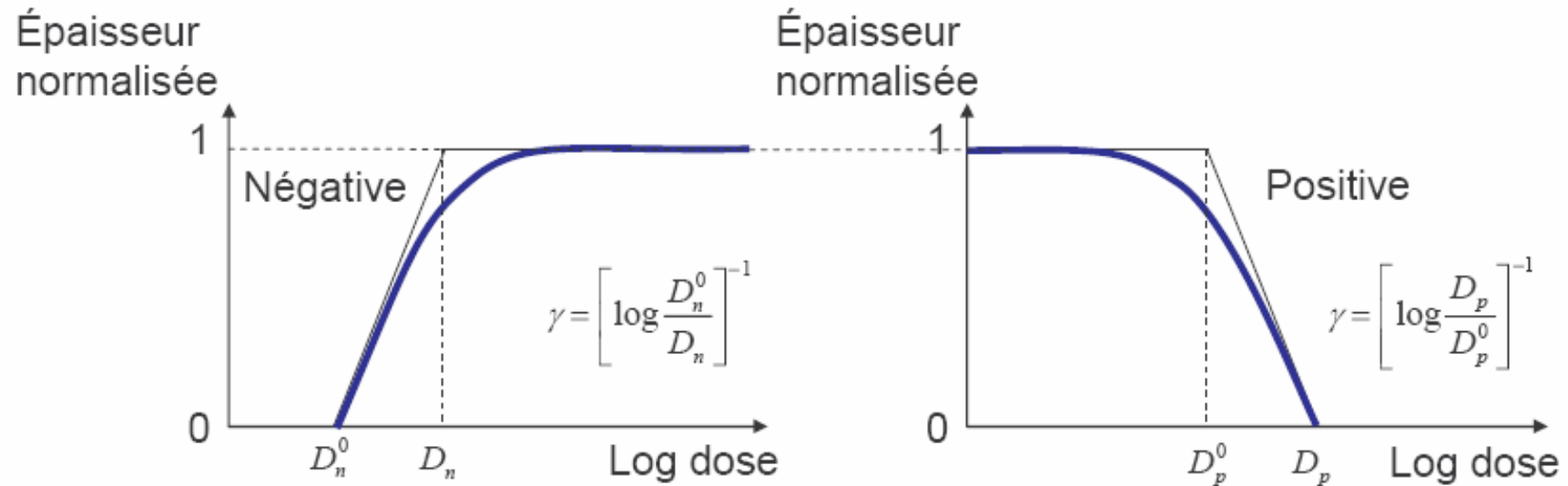
- Reproduire un motif sur un substrat
 - Utilisation d'une résine
 - Lithographie optique
 - Lithographie électronique
 - Lithographie ionique
 - Écriture sans résine
 - Faisceau d'ions Focalisés (FIB)
 - Lithographie de proximité



La Lithographie Optique

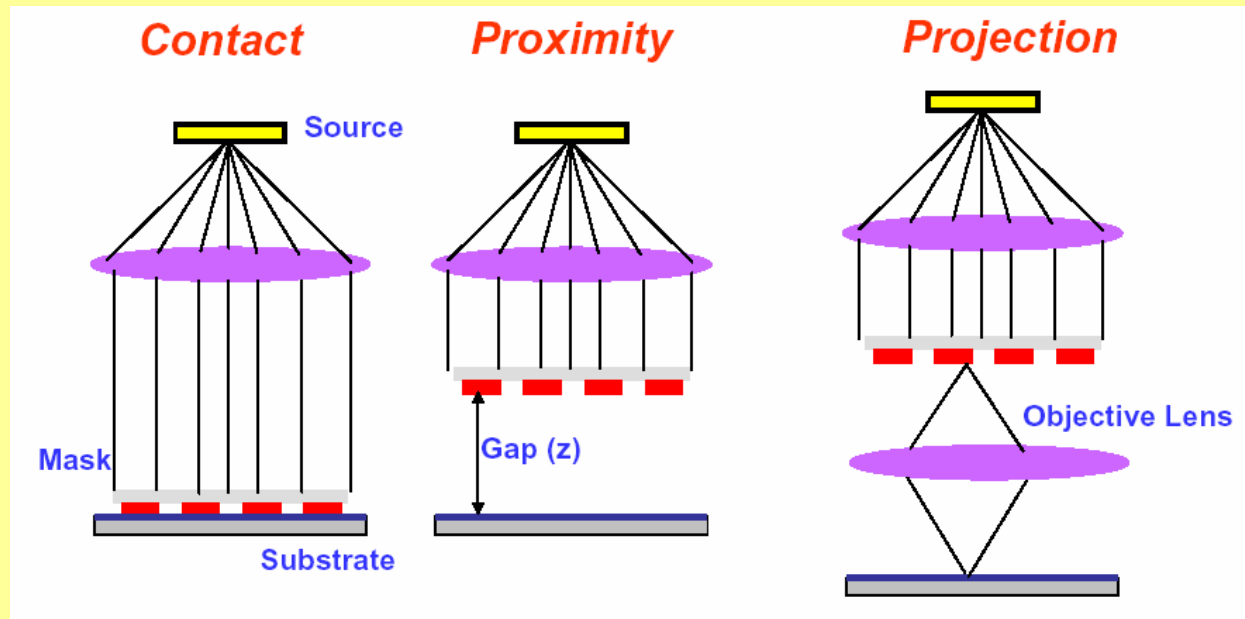


Le contraste



- Vitesse de révélation = f(poids moléculaire)
- Contraste γ # pente de la courbe
- Contraste élevé # sélectivité en poids moléculaire :
 - Flancs verticaux
 - Plus grande latitude de procédé
 - Meilleure résolution
 - moins sensible aux effets de proximité
- Contraste faible
 - Lithographie "3D"

Les Lithographies optiques

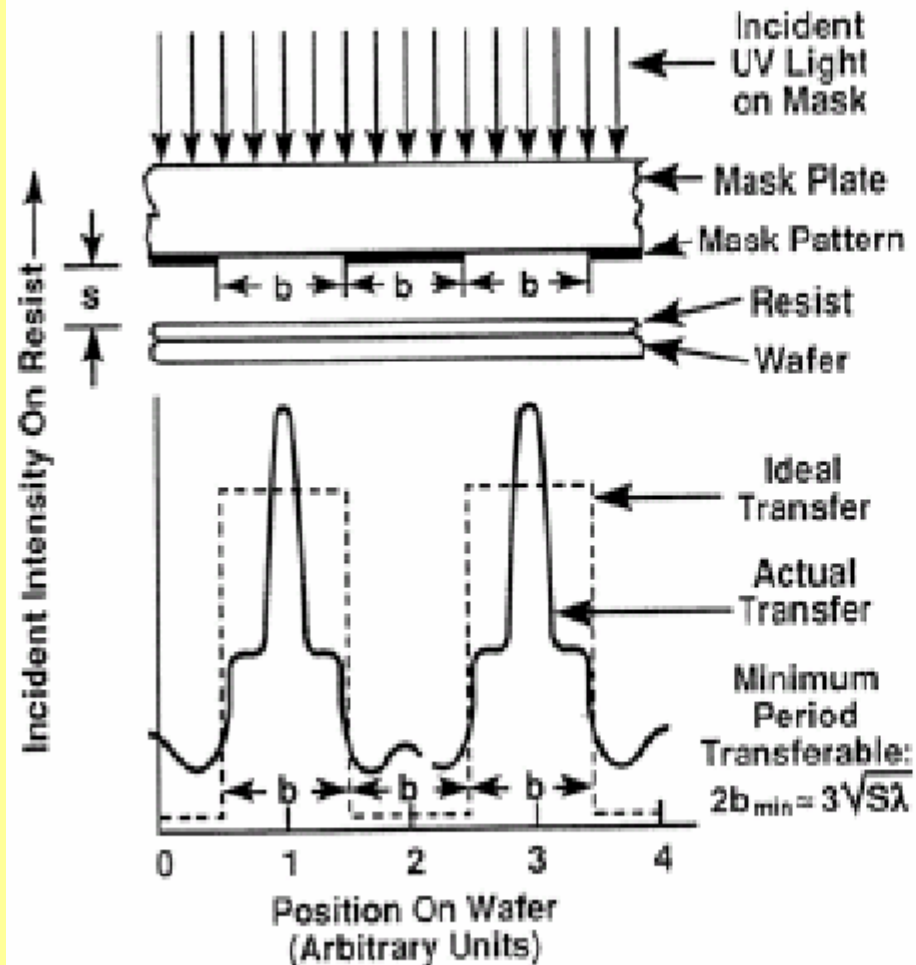


- Resolution controlled by λ and z
- Issues: 1x, damage

- Resolution affected by λ and NA
- Mask 4x, protected



Lithographie contact



- ✓ Light pass the mast should be square wave.
- ✓ It is never a square wave because diffraction.
- ✓ Photo-resist help to compensate for diffraction and give us a uniform pattern
- ✓ the Resolution limits

$$2b_{\min} = 3(\lambda S)^{1/2}$$

	$\lambda = 405nm$	$\lambda = 220nm$
$s = 1\mu m$	$0.68\mu m$	$0.50\mu m$
$s = 0.5\mu m$	$0.48\mu m$	$0.25\mu m$

Lithographie par projection

$$R = k \lambda / N.A$$

k: process parameter (résine, process dépendant)

Améliorer la résolution

- Diminuer la longueur d'onde

 - 360 nm, 248 nm, 193 nm, ~~157 nm~~

 - Extreme UV (13.5 nm), ~~RX~~

- Augmenter N.A (n sini)

 - Augmenter l'angle (aberrations...)

 - Augmenter n (H₂O)

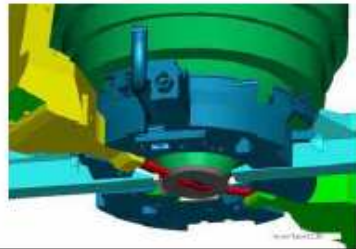
- Réduire k

 - Masques

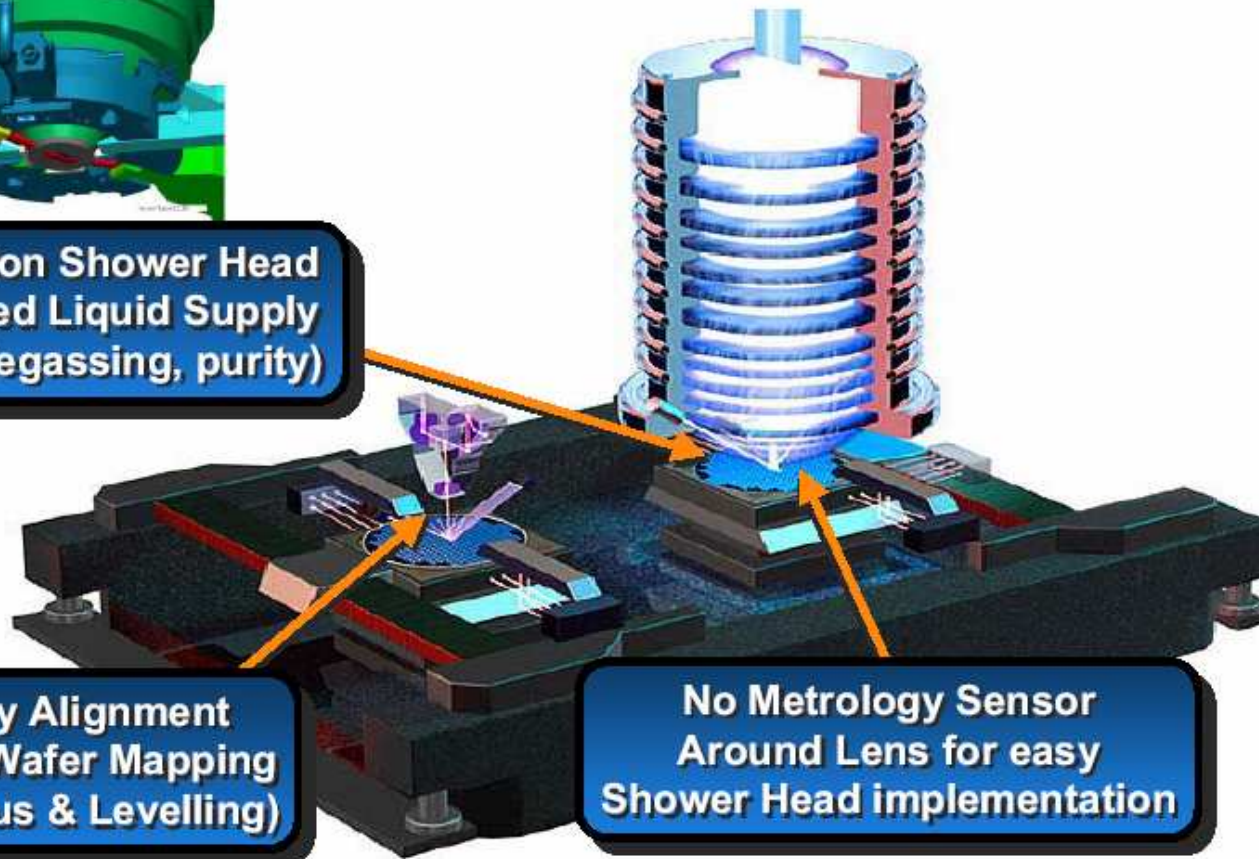
 - OPC (Optical Proximity correction)

 - PSM (Phase Shifting Masks)

Dual Stage Advantage : Measure Dry - Expose Wet



**Immersion Shower Head
Integrated Liquid Supply
(temp, degassing, purity)**



**Dry Alignment
Dry Wafer Mapping
(Focus & Levelling)**

**No Metrology Sensor
Around Lens for easy
Shower Head implementation**

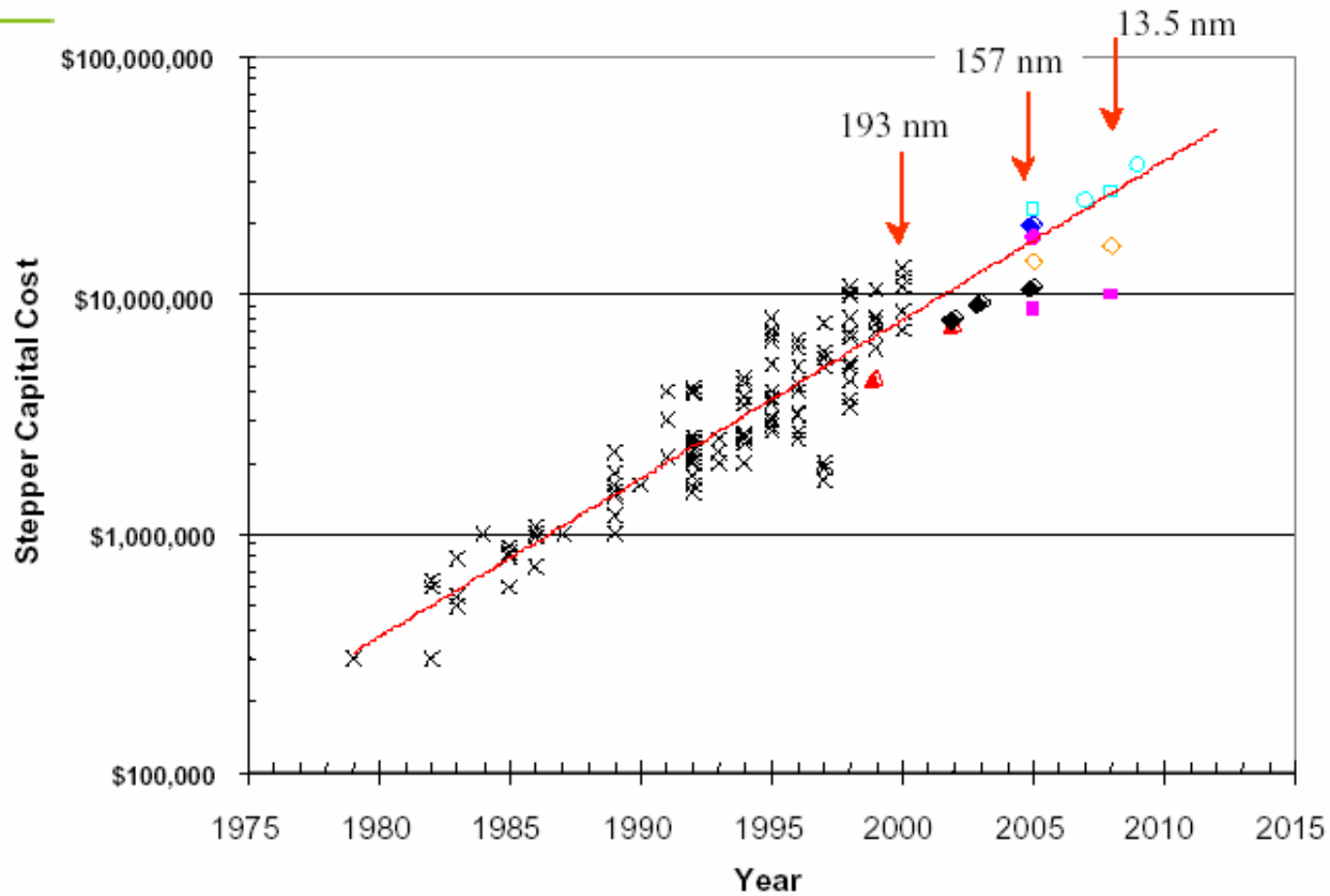
Brewer Science ARC Symposium, Albany, Oct 28, 2004



Situation actuelle: 45 nm



ISMT Exposure Tool Cost Projections

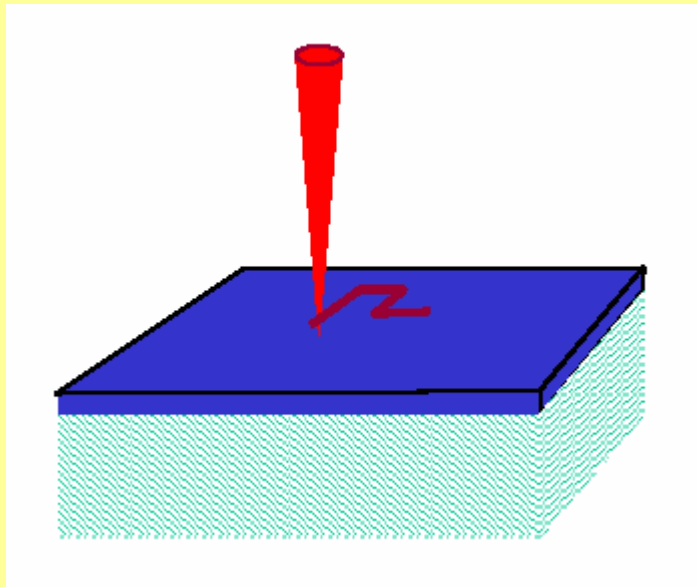


leti

MINATEC 2003 24-09-03 -S. Tedesco

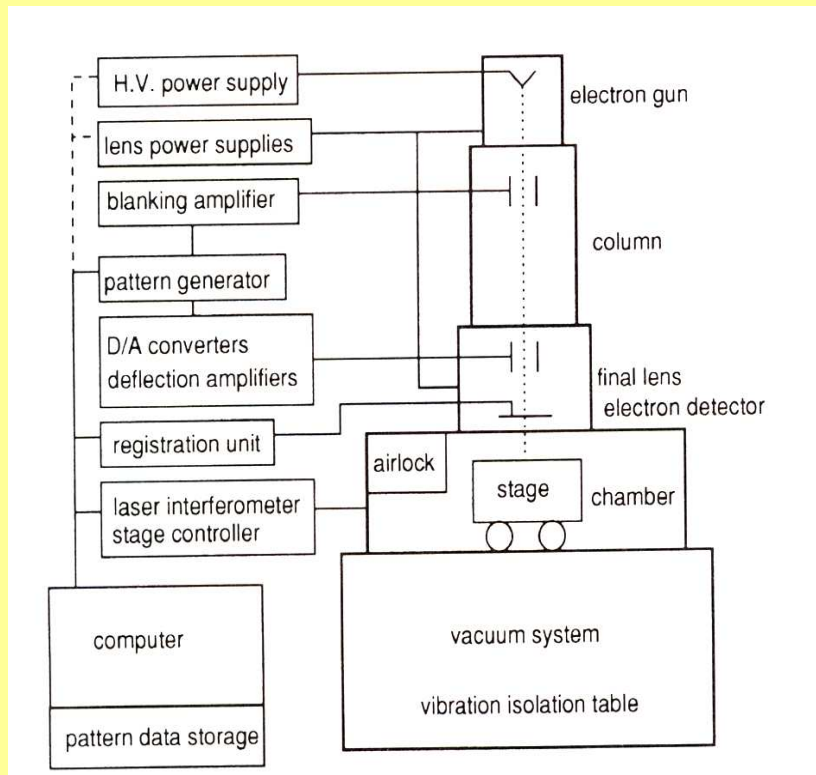
16

Lithographie électronique



- Écriture directe: pas de masque physique
- Small spots (3-10 nm)
 - SEM
- Très petite longueur d'onde (pas de diffraction)
- Résolution dépend plus de la résine que de la taille du spot
- Écriture séquentielle donc très lente.

Optique



- Optique et Imagerie d'un MEB
- Beam-Blanking
- Pilotage externe du faisceau (Balayage vectoriel)
- Couplage CAO
 - Balayage + grandissements
 - Beam Blanking
 - Platine mécanique
- Platine interférométrique
 - Positionnement : qq nm
 - Alignement des champs (stitching)
 - Calibration déplacement e-/XY

E.B.L: Gaussian scan

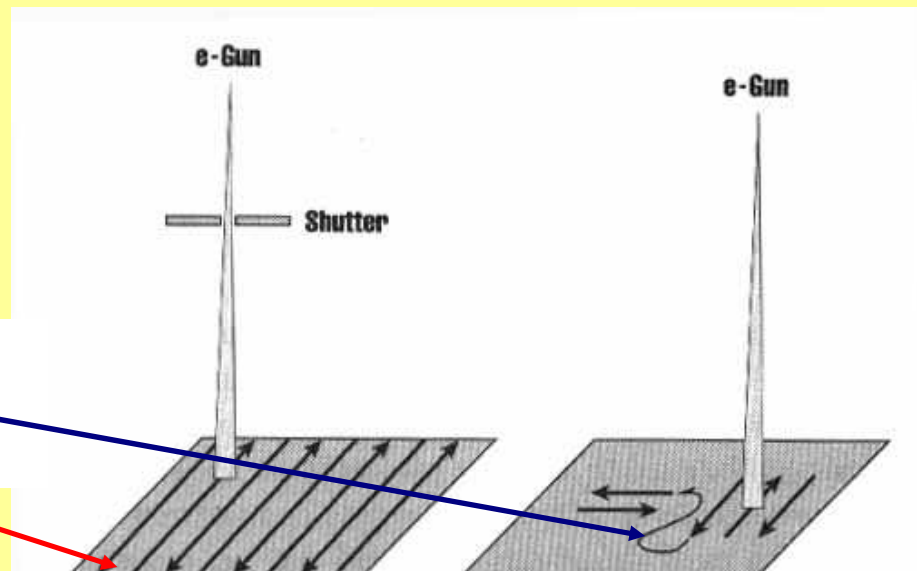
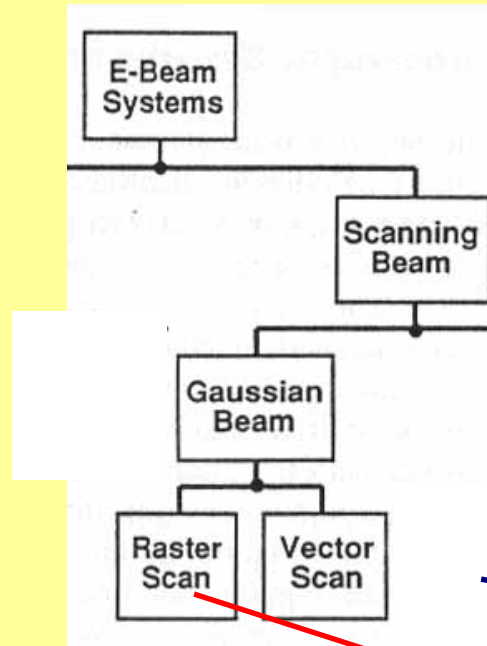
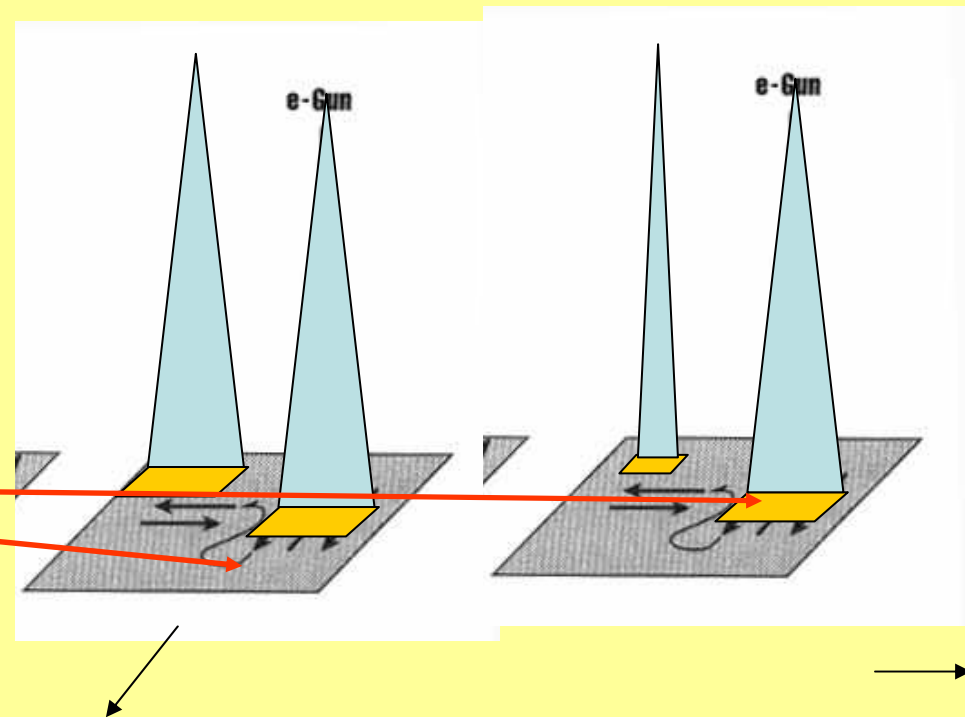
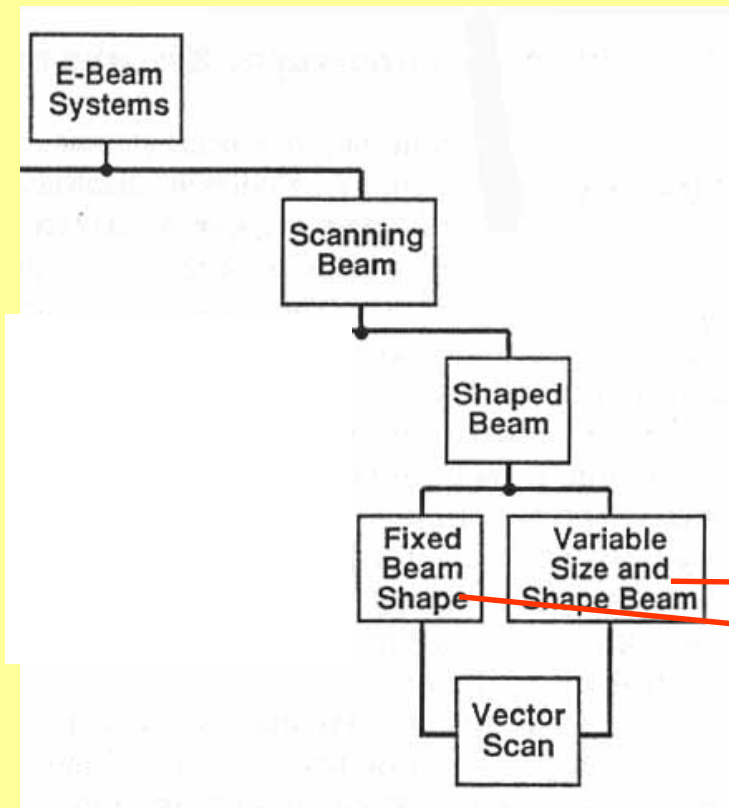


Figure 9-9 A comparison of scanning methodologies; raster scan (left) and vector scan (right).

EBL: Shaped beam scan

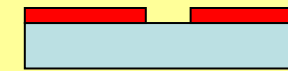


Lithographie électronique

Gravure



gravure



Retrait résine

Lift-Off

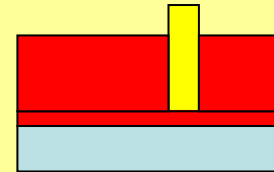
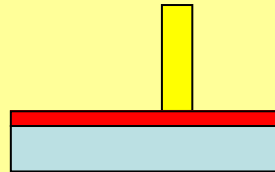


Dépôt

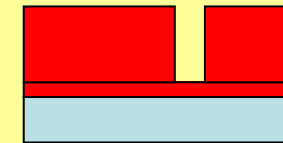


Lift-Off

Electroplating



Croissance
électrochimique



Retrait résine

Les résines électrosensibles

- **Création ou rupture de liaisons**
- **Résine positive**
 - **Rupture de liaisons, Poids moléculaire diminue**
 - Ex PMMA (dose moyenne)
- **Résine négative**
 - **Création de liaisons, Poids moléculaire augmente**
 - Ex PMMA (forte dose), maN-2400
- **Résines à amplification chimique**
 - **Rupture de liaisons, création de radicaux**
 - **Puis activation thermique par un recuit post exposition**
 - Ex Shipley UV3 et UVN, Sumitomo NEB22
 - Résines souvent sensibles aux DUV (mix and match)
- **Résines inorganiques**
 - **Modifications structurales, changement de phases..;**
 - AlF₃, Fox (SiO₂),

Dose

$$\text{Dose } \mu\text{C/cm}^2 = I \times \text{Dwt} / \text{ASS}^2$$

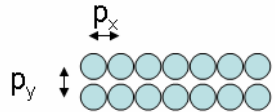
I : Courant électronique mesuré sur une cage de Faraday

ASS: Area Step Size: distance entre deux spots

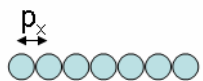
minimum ASS: writing field / 65536

Dwt: Area Dwelltime: Durée d'écriture en chaque spot
minimum Dwt 1/ fréquence (notre système, Raith Elphy plus:
0.375 μs)

Surfacic

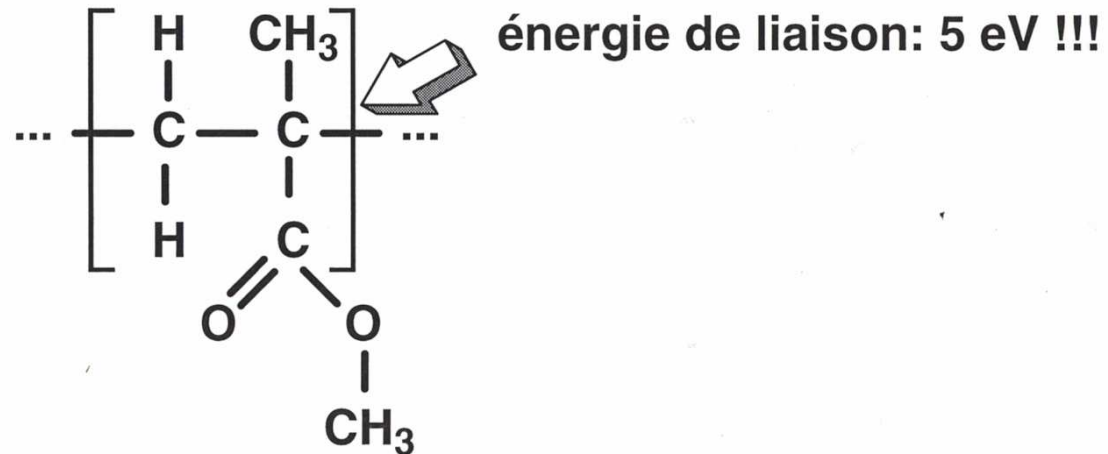

$$D = \frac{I_x t}{P_x P_y} \quad (\text{C} / \text{cm}^2)$$

Linear


$$D = \frac{I_x t}{P_x} \quad (\text{C} / \text{cm})$$

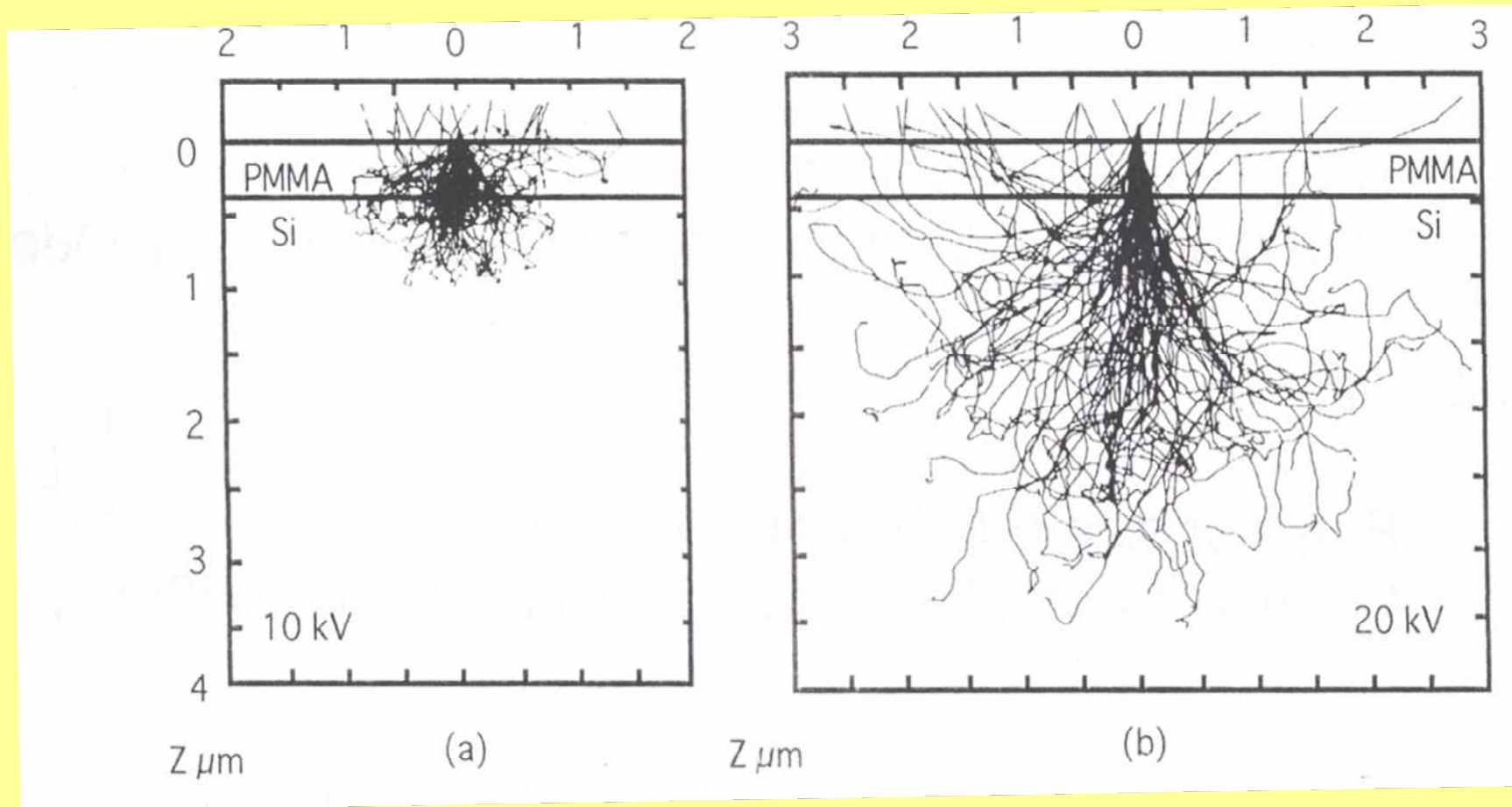
Le PMMA

le PMM(A) : POLY METHYL METH ACRYLATE
(poids moléculaire 950.000 u.m.a.)

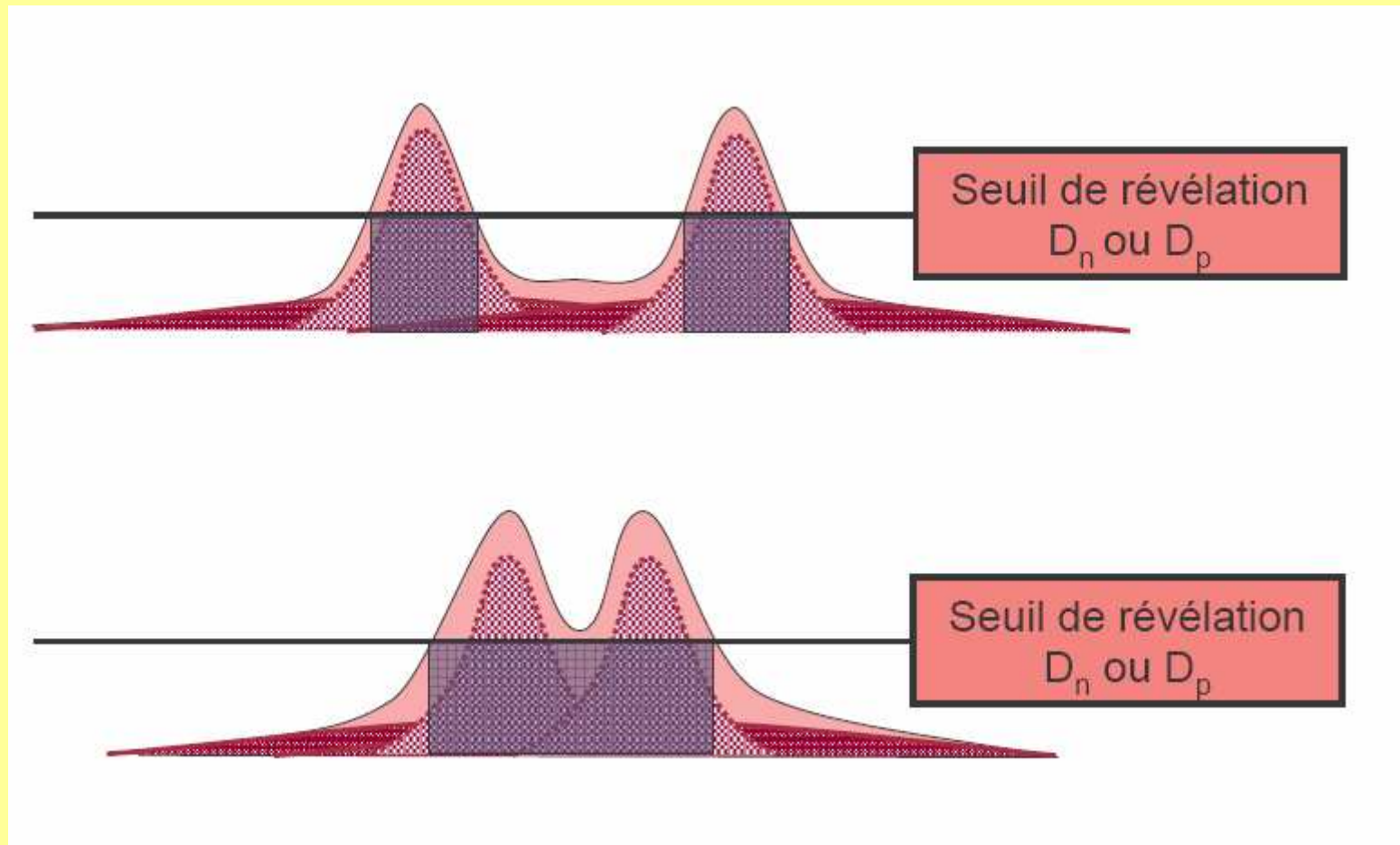


monomère

Interaction electrons-matière



Effets de proximité

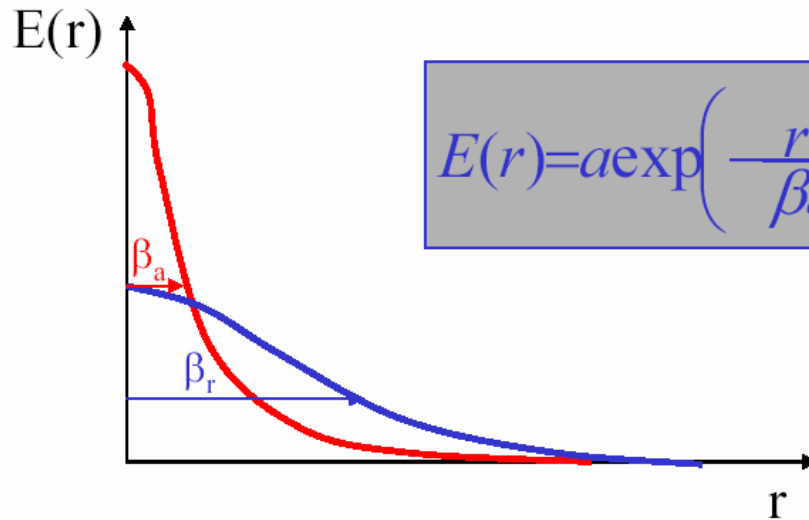


Comment corriger les effets de proximité

- Haute tension
 - Effets dilués sur une grande distance
- Tension faible
 - Effets spatialement limités
- Utilisation de membranes
- Varier la dose sur chaque motif

Tension kV	$\beta_a(\mu\text{m})$	$\beta_r(\mu\text{m})$
20	0.08	2
50	0.04	9
60	-	13
120	-	43

Double Gaussian model



$$E(r) = a \exp\left(-\frac{r}{\beta_a}\right)^2 + b \exp\left(-\frac{r}{\beta_b}\right)^2$$

Tension kV	β_a (μm)	β_r (μm)
20	0.08	2
50	0.04	9
60	-	13
120	-	43

Substrate: Si

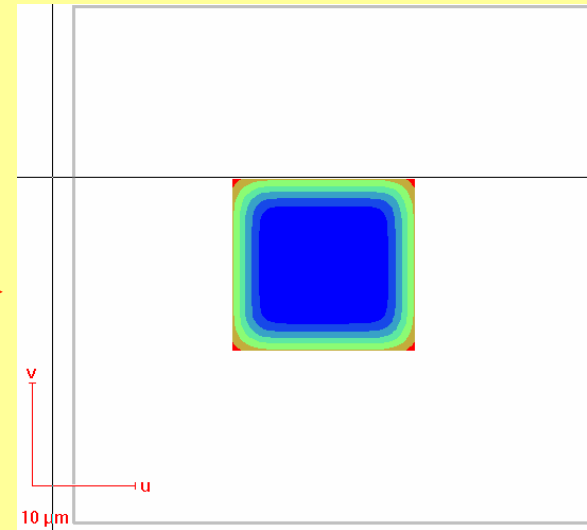
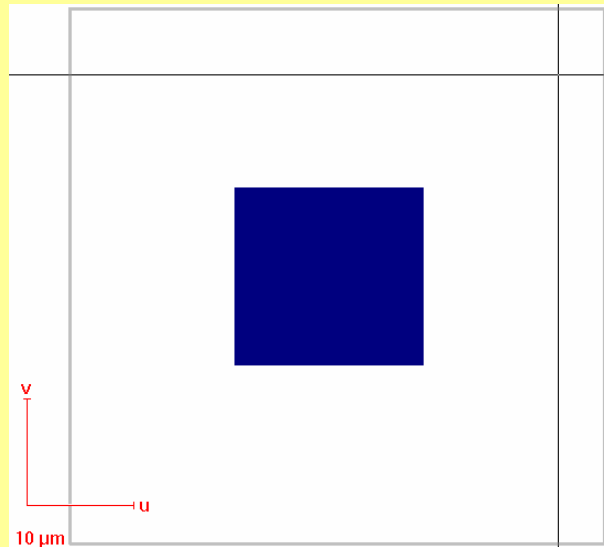
β_a forward scattering:

Essentially depends on the resist and the voltage

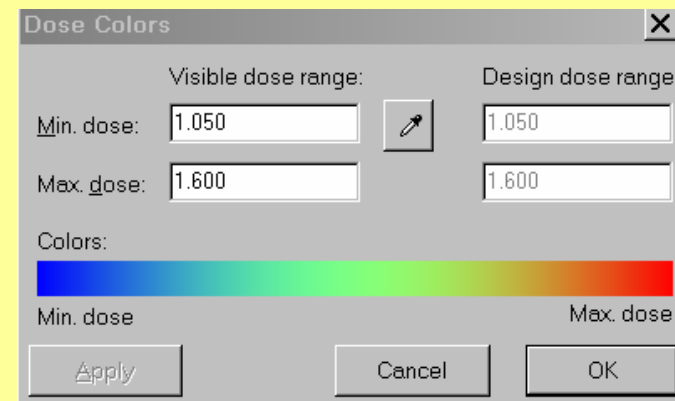
β_r backscattering:

Depends on the voltage and the substrate

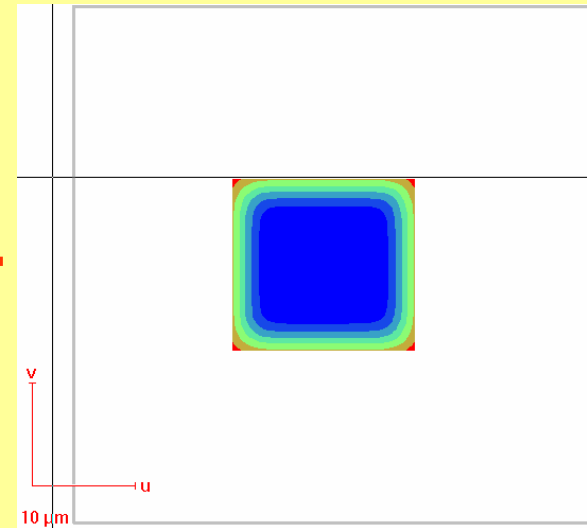
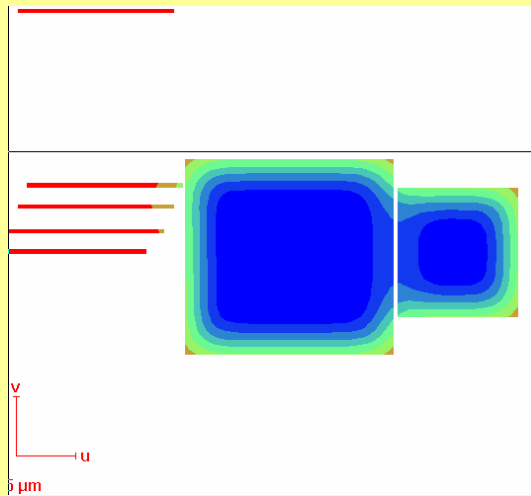
Effets de proximité



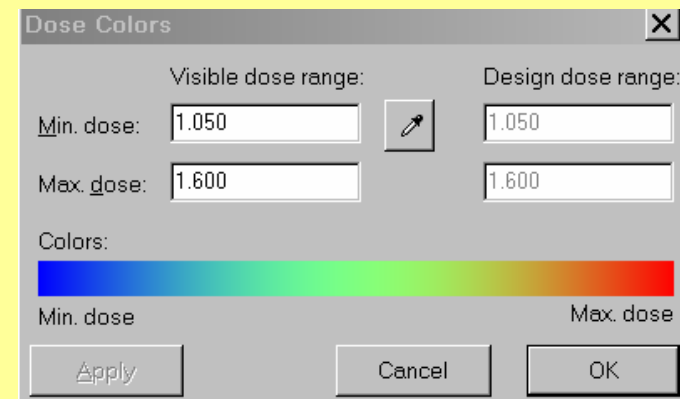
Correction de proximité intra
pattern



Effets de proximité

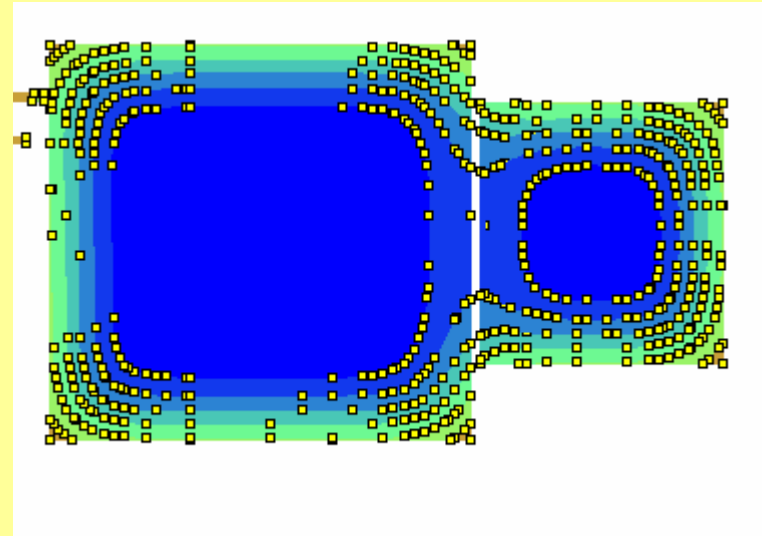


Proximity correction inter- pattern



Logiciels de corection

- couteux
- Peu efficace à l'échelle nano
- Couteux en temps d'exposition



Lithographie mode d'emploi

- **Dessiner sur CAO**
 - **Multi niveaux (croix d'alignements)**
 - **Estimer le temps d'écriture**
- **Aligner le microscope**
 - **Points spécifiques**
 - **Mesure et Stabilité de courant**
 - **Calibration et alignement des champs (relais de changement de gamme !!!) pour différents courants/courants/diaphragme**
 - **Alignement des déplacements électroniques et mécaniques**
 - **Correction de focalisation en fonction de X,Y**
- **Choisir ses paramètres de lithographie**
 - **-pour une résine et une dose données**
 - **Dwell-time et stepsize petits**
 - » **-Bonne résolution, temps d'écriture important, vitesse d'écriture élevée, risque de distortion**
 - **Dwell-time et stepsize plus élevés**
 - » **-Lignes rugueuses, temps d'écriture plus faibles, vitesse d'écriture et distorsion plus faibles**

Fréquence et Vitesse

Fréquence Elphy: 2.6 Ghz-
 $t=0.385 \mu\text{sec}$

$D=240 \mu\text{C}/\text{cm}^2$ $I=16 \text{ pA}$

PMMA/MAA

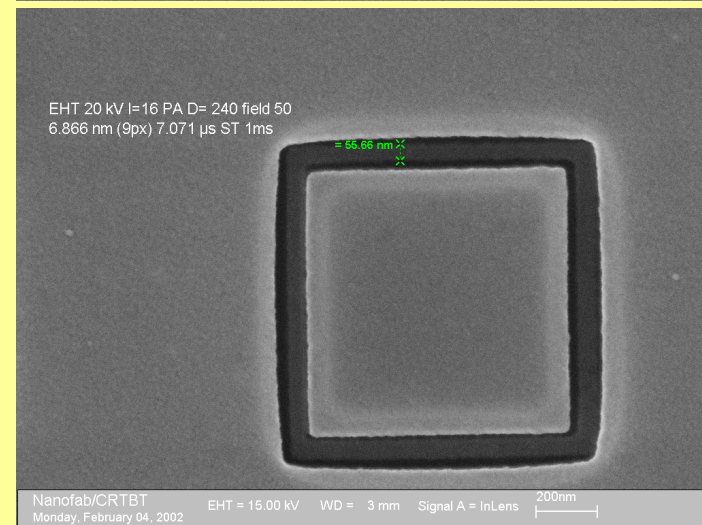
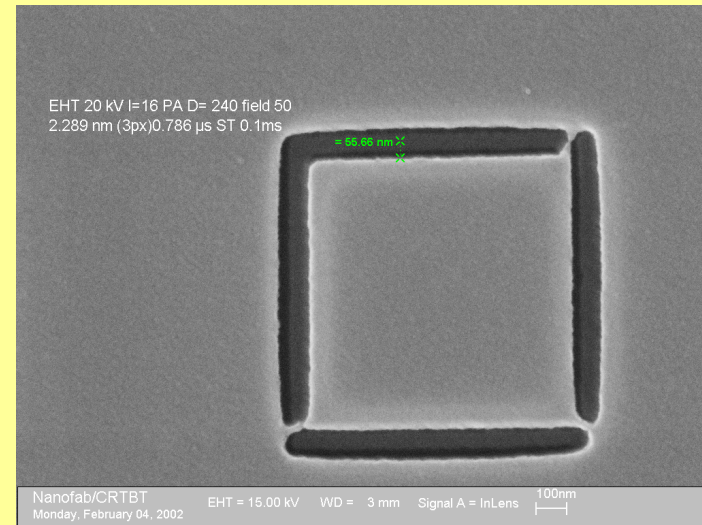
Pas: $2.3\text{nm}/0.786 \mu\text{sec}$

$V=2.9\text{nm} / \mu\text{sec}$

Pas: $6.8\text{nm}/ 7.071 \mu\text{sec}$

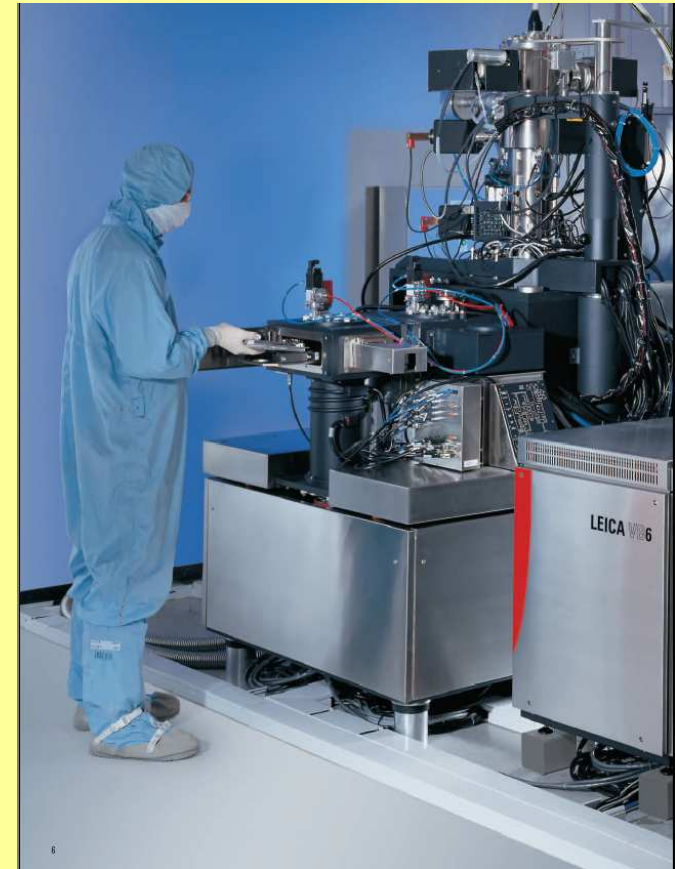
$V= 1 \text{ nm}/ \mu\text{sec}$

- perte de résolution
- courants faibles
- Pb résines sensibles



Les solutions

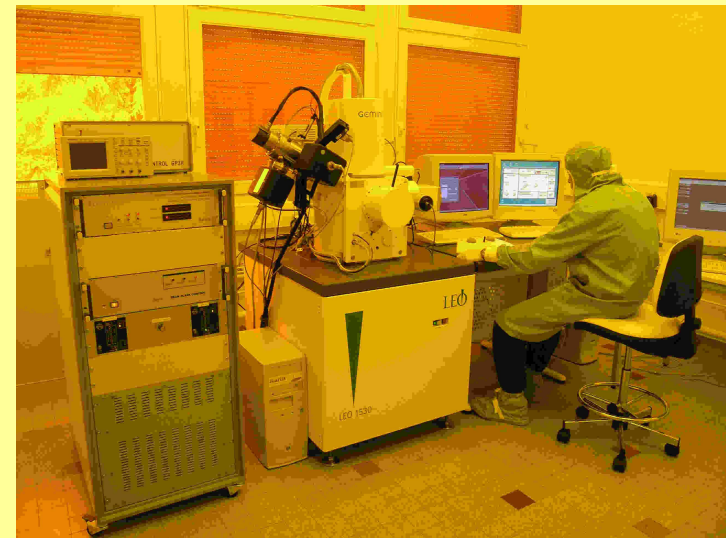
- Masqueur Industriel (Leica, Jeol, Crestec, Hitachi, Raith,...)
- Cout élevé(de1 M€ à 10 M€...)
 - Haute tension (50 à 100 kV)
 - Vitesse d'écriture élevée
 - Très haute résolution
 - Echantillons jusqu'à 300 mm
 - Platine interférométrique
 - Possibilité faisceau formé



Leica VB6

Les solutions

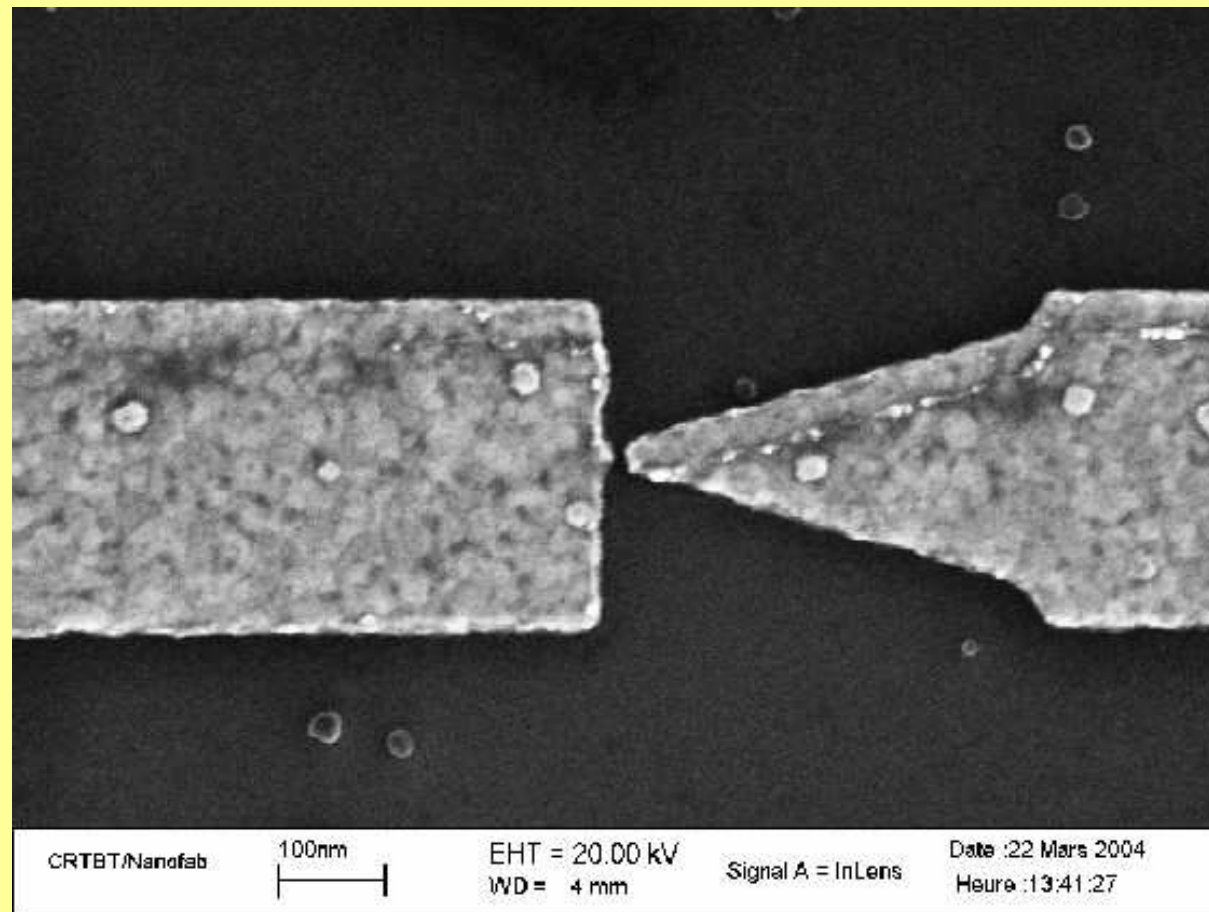
- Equiper un MEB conventionnel (FEI, Zeiss, Jeol, Hitachi, etc..)
 - Pilotage faisceau (Raith, Nabity...)
 - Cout modéré (0.2 à 0.5 M€)
 - Haute résolution
 - Basse Tension (20-40 kV)
 - Faible vitesse d'écriture
 - Echantillon petite taille
 - Versatile
 - Imagerie
 - Adapté aux Labo de recherches



SEM Leo 1530 + Raith Elphy
+ FIB Orsay Physics

Nanofab- CNRS Grenoble

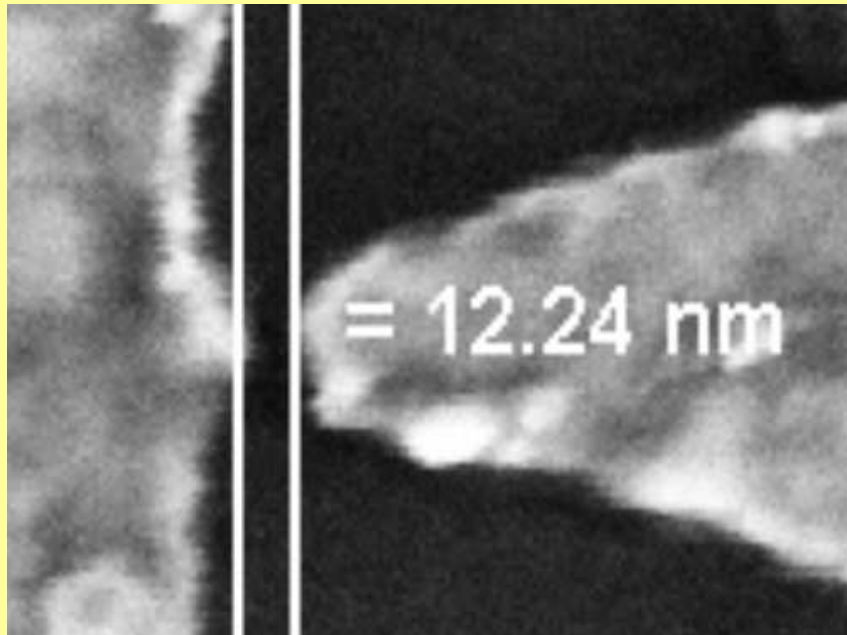
Top-Down et Bottom-Up



Nano-electrode Ti-Au LTM-LPN-CRTBT

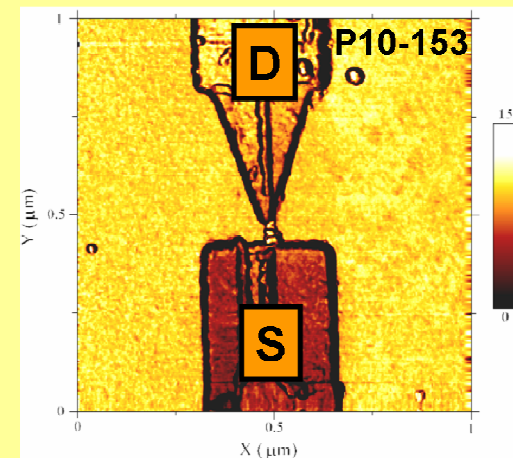
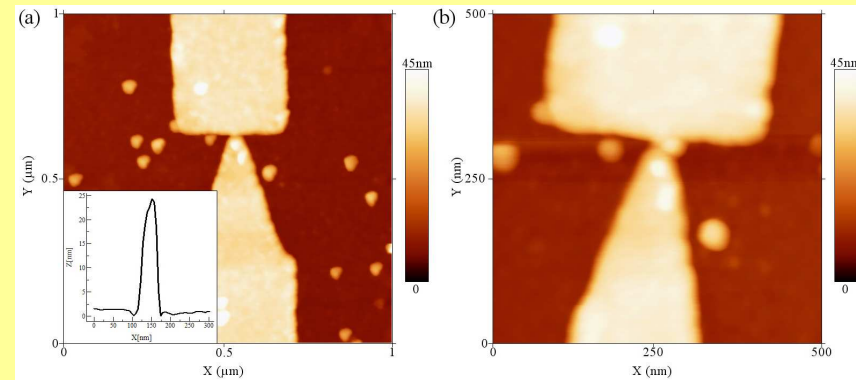
Thierry FOURNIER- GN-MEBA- 01/12/2006

Top-Down et Bottom-Up



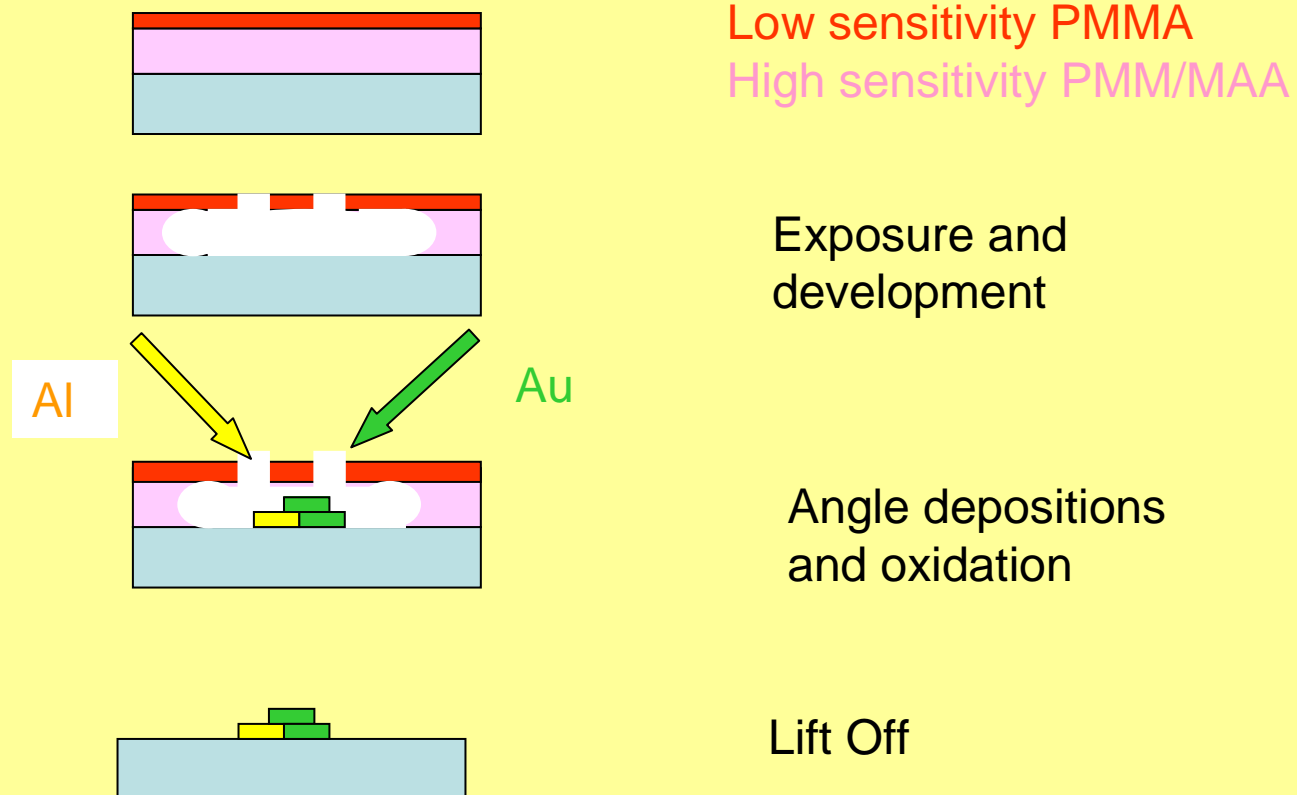
Fabrication électrode Ti/Au par lithographie électronique (CRTBT)

Manipulation de nano-grains de Si (LTM,LPM)



E-Beam and Ion Lithography

Bi-Layers process

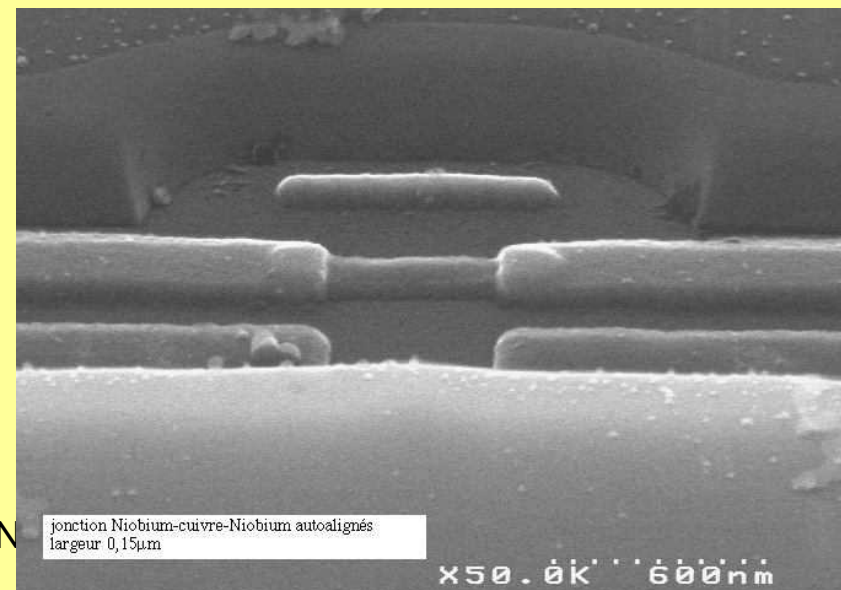
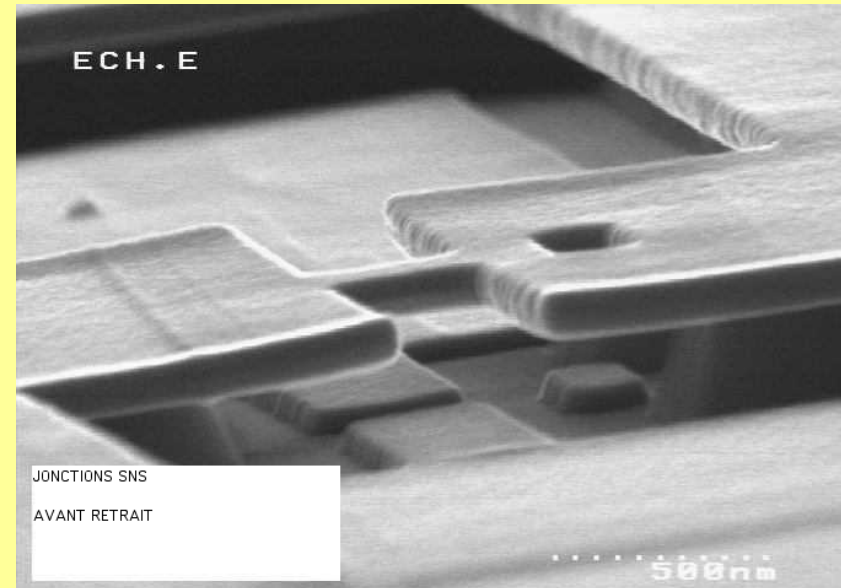


Jonctions supraconductrices (CRTBT)

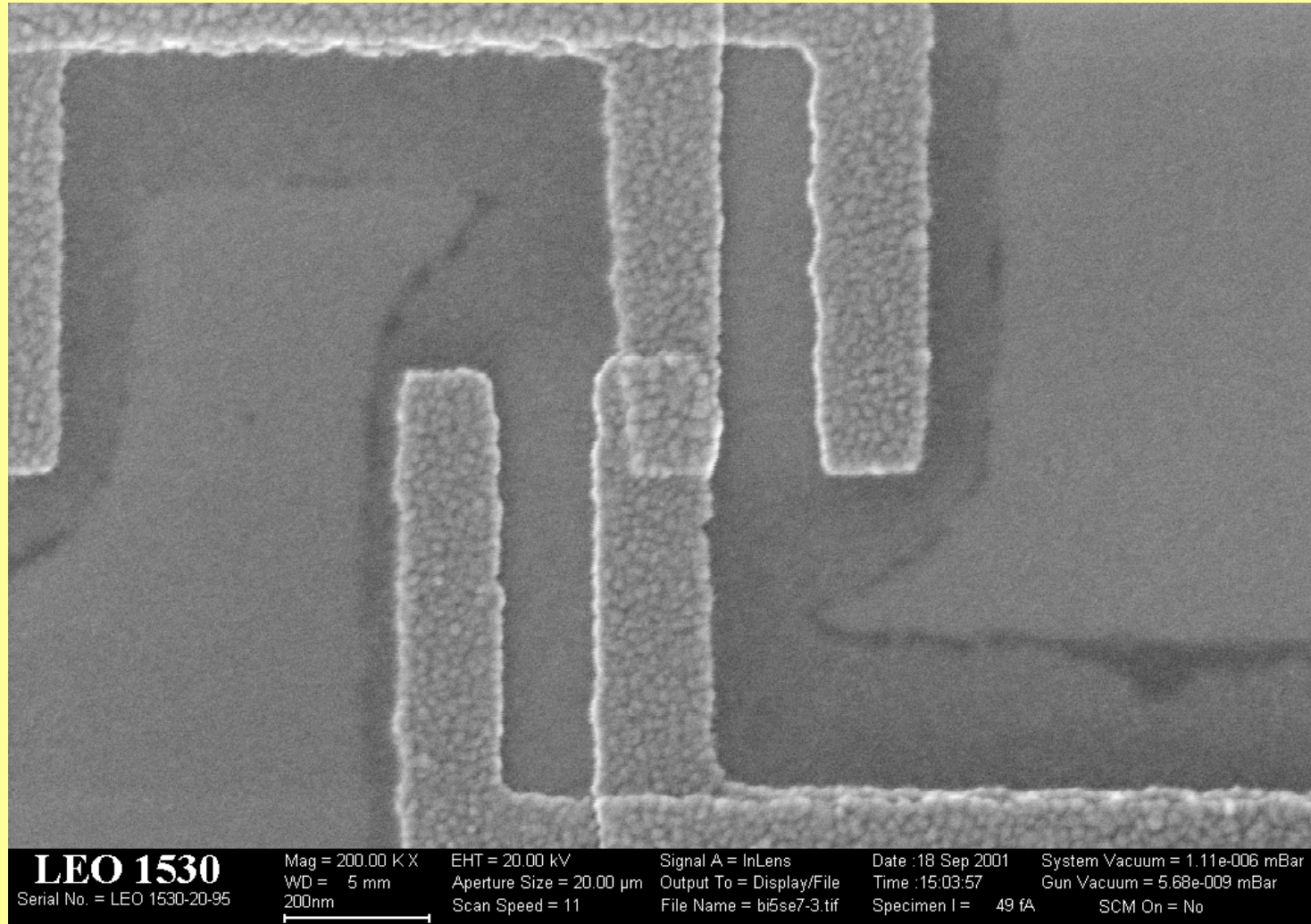
Etude du transport en cohérence de phase dans des systèmes hybrides métal normal / métal supraconducteur.

- Litho e-beam
- Si/SiO₂/Si ou Si/Co-PMMA/MAA
- Surgravure SiO₂ ou co-MAA
- Dépôts angulaires
- Polissage ou Lift off

P. Dubos, H. Courtois, O. Buisson et B. Pannetier,
Phys. Rev. Lett. 87, 206801 (2001).



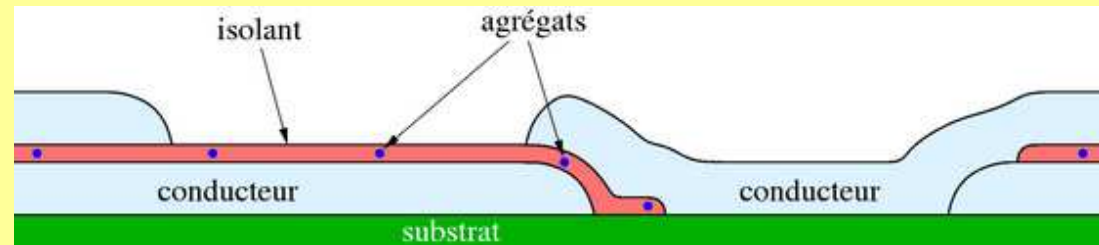
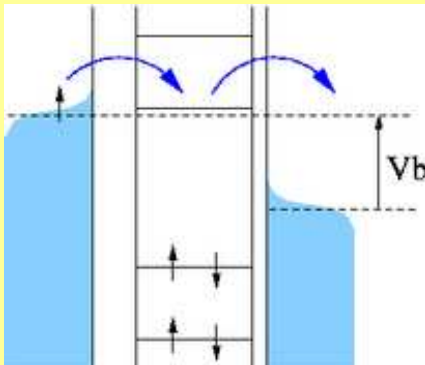
Contrôle de la taille des jonctions par l'angle des dépôts



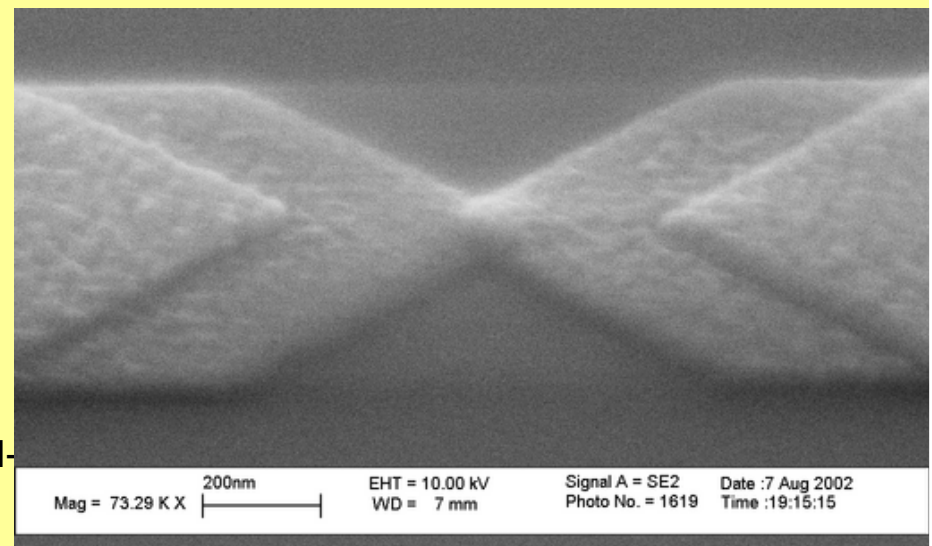
Transport électronique à travers une nanoparticule magnétique

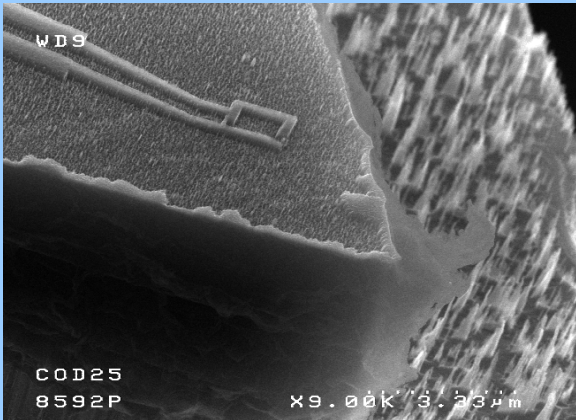
Labo L. Néel et LPMCN-Lyon

- Particule métallique de 3 nm \approx 1000 atomes, reliée à deux électrodes de mesure par des jonctions tunnel
- Conduction tunnel à travers les états quantiques discrets de la particule



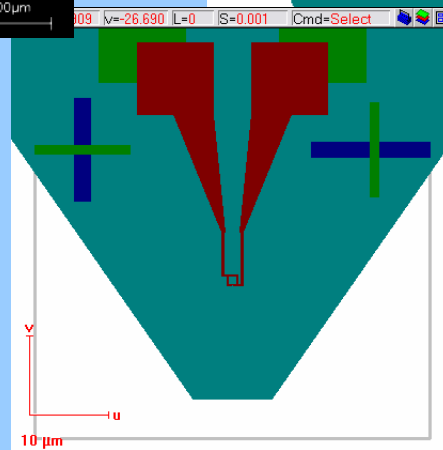
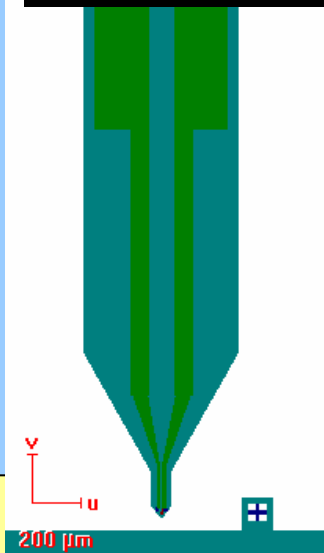
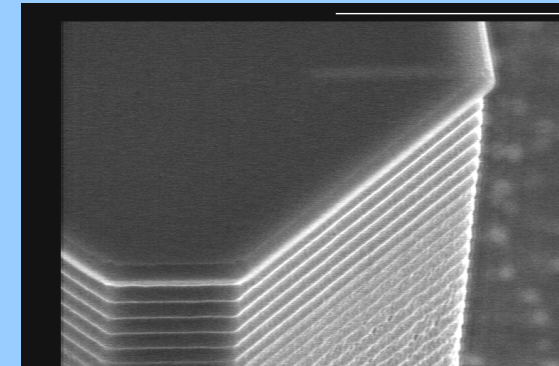
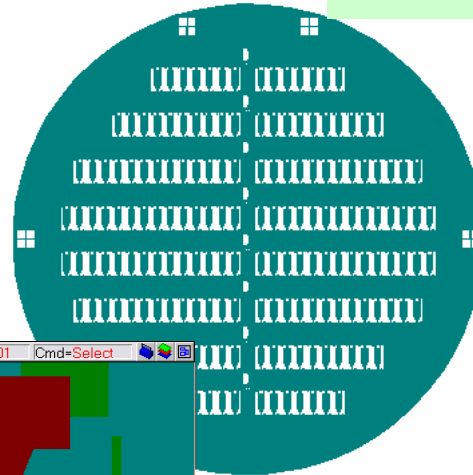
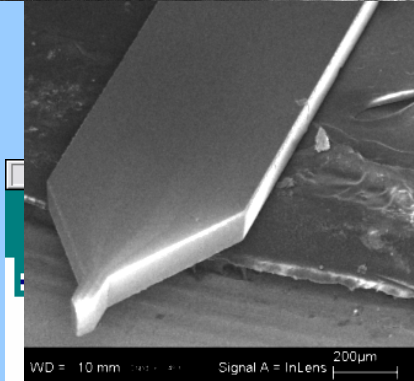
- Masqueur -> possibilité d'avoir des électrodes magnétiques et des amenées de courant non magnétiques





PROCESS SQUID AFM

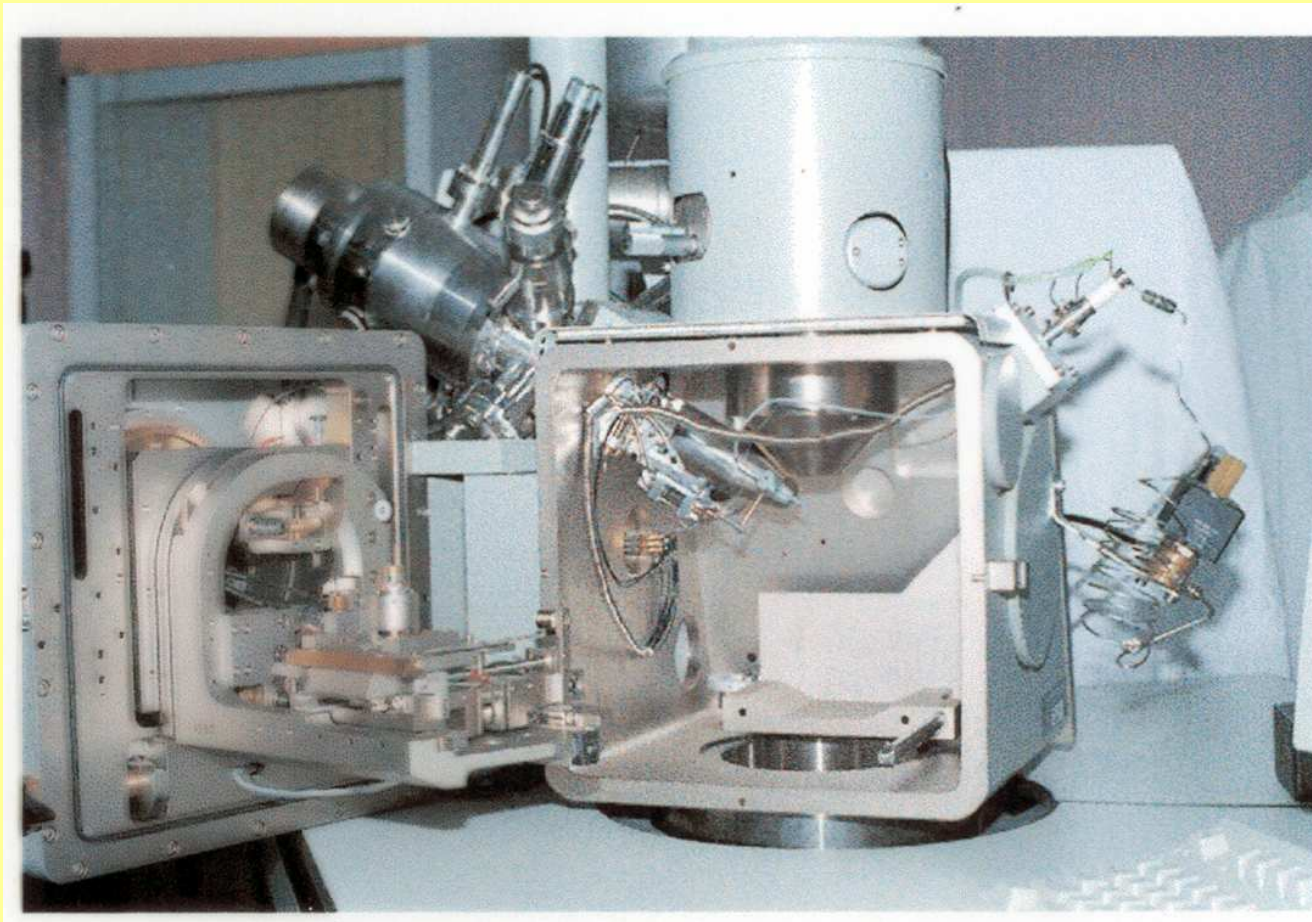
- 1^{er} Niv. : Croix d'alignement en or- Litho optique
- 2^{ème} Niv. : Litho optique DUV PMMA
- 3^{ème} Niv. : Litho e-Beam squid 30 nm sur le même PMMA avec réalignement auto
MIX and MATCH
- 4^{ème} Niv. : Gravure profonde –Litho optique



Coil IRAM

K.Schuster et al

FIB/ DUAL BEAM



Focused ion beam (FIB)

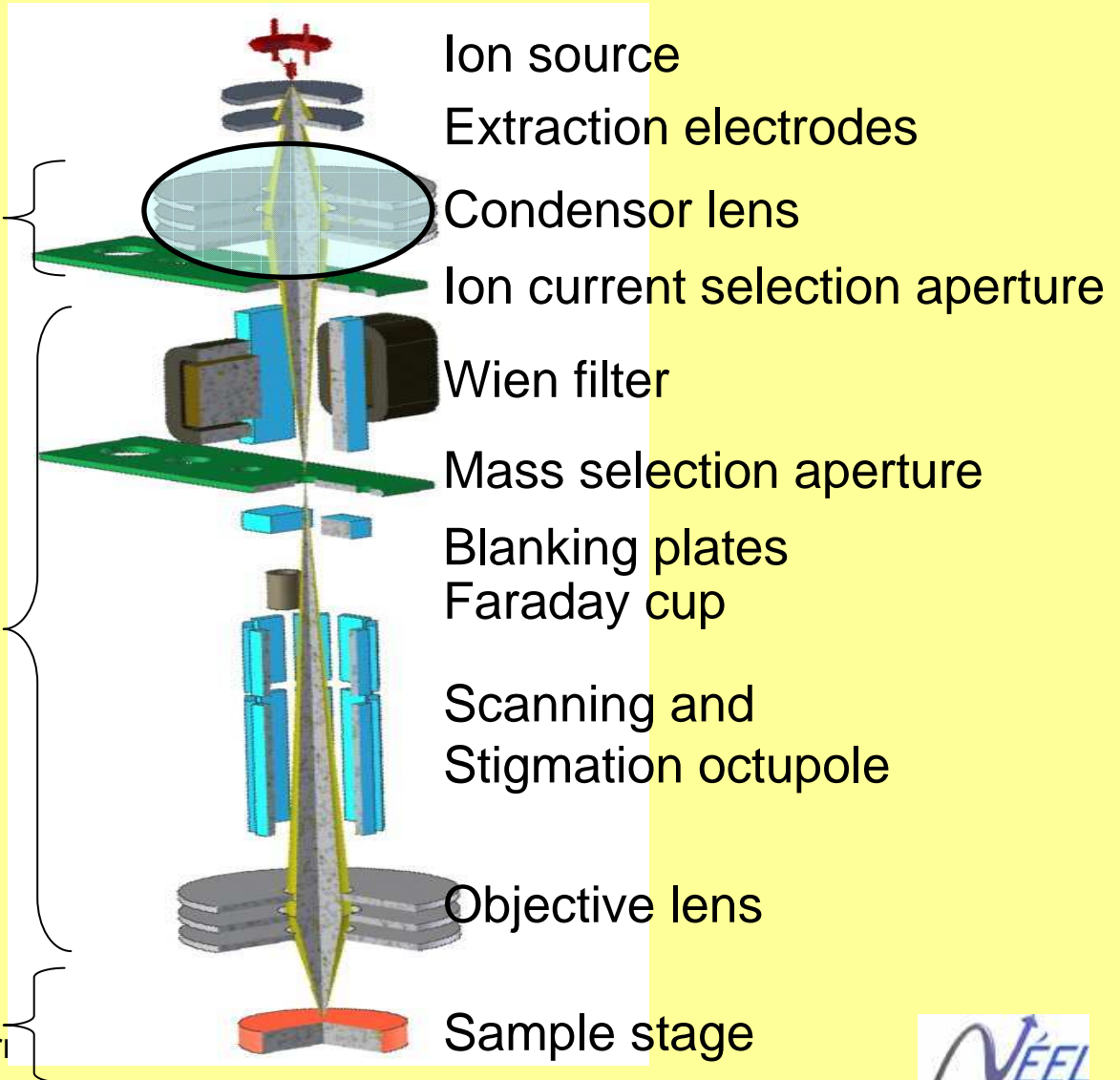
- **Ecriture directe à partir d'ions focalisés**
- Ecriture séquentielle
- Technique très adaptée à la fabrication de prototypes(laboratoire)
- Très haute résolution en écriture directe < 15nm
- Faible rendement
- **Industrie**
 - Analyse de défaillance (cross section, préparation TEM)
 - Réparation de masques/ circuits
- Laboratoire**
 - Caractérisation
 - NANOFABRICATION**

La Colonne ionique

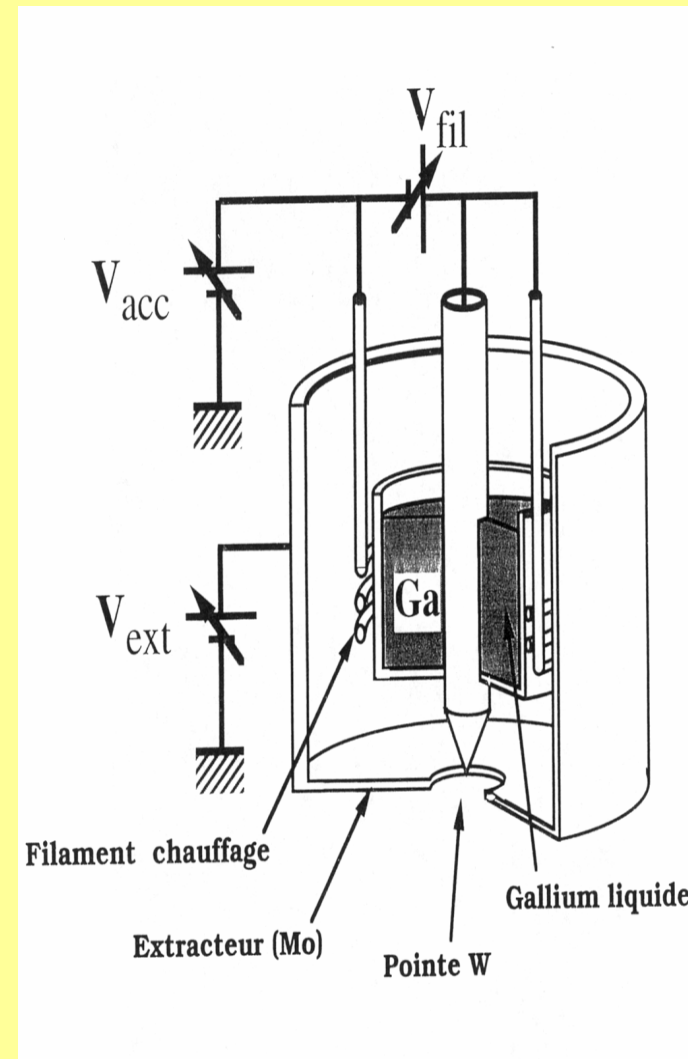
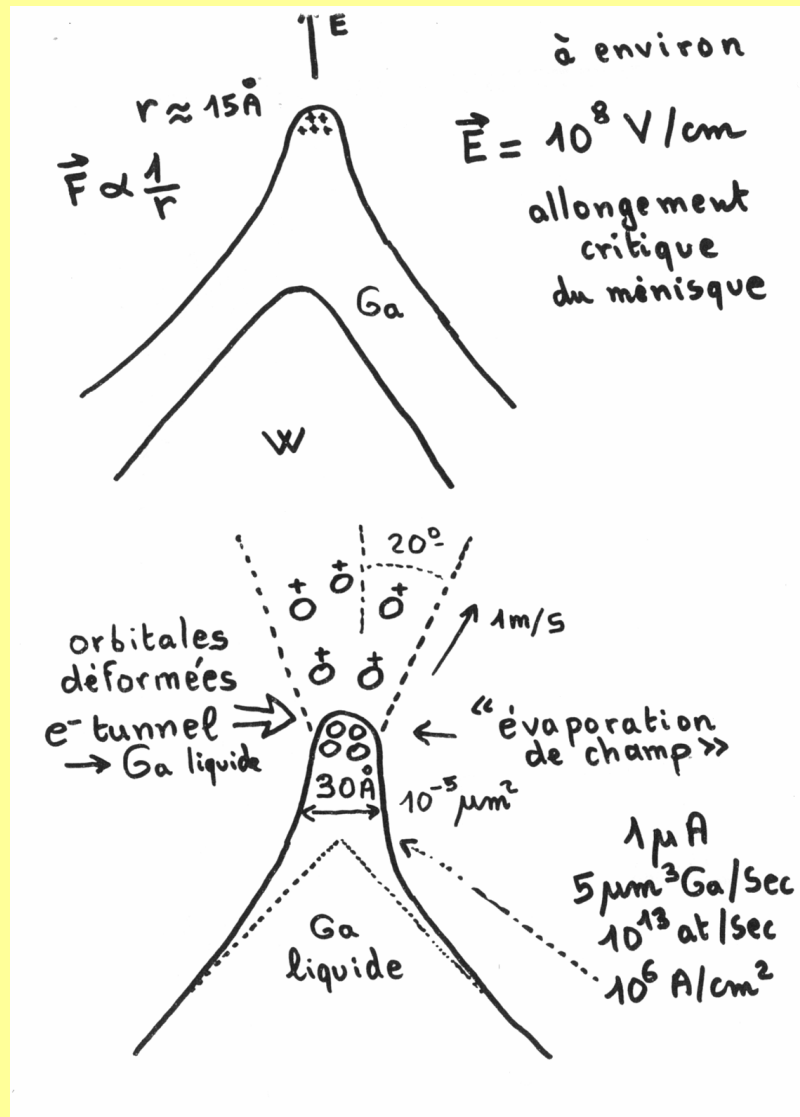
*Le canon
avec sa source
LMIS*

L'optique ionique

La chambre



LMIS: Source Ionique Liquide Ga



Alloy Liquid Metal Ion Source Materials

Material	Melting Temperature (°C)	Applications
Au₇₃Ge₂₇	365	Au: Sputtering, nano-cluster; Ge: Doping, Si _x Ge _{1-x} alloy
Au₇₇Ge₁₄Si₉	365	Si: contamination free processing, imaging
Au₈₂Si₁₈	365	
Co₃₆Nd₆₄	566	Co: CoSi ₂ – IBS, Nd: optical + magnetic application
Co₂₇Ge₇₃	817	Co: magnetic application
Er₆₉Ni₃₁	765	Er: optical application
Er₇₀Fe₂₂Ni₅Cr₃	862	Fe,Ni,Cr: magnetic application
Sn₇₄Pb₂₆	183	Sn: doping, academic
In₁₄Ga₈₆	14.2	Academic, source emission investigation
Mn₄₅Ge₅₄Si₁	720	Mn implantation in compound semiconductors
Ga₃₈Bi₆₂	222	Ga: acceptor; Bi: shallow donor
Ga	29.7	All classical FIB applications

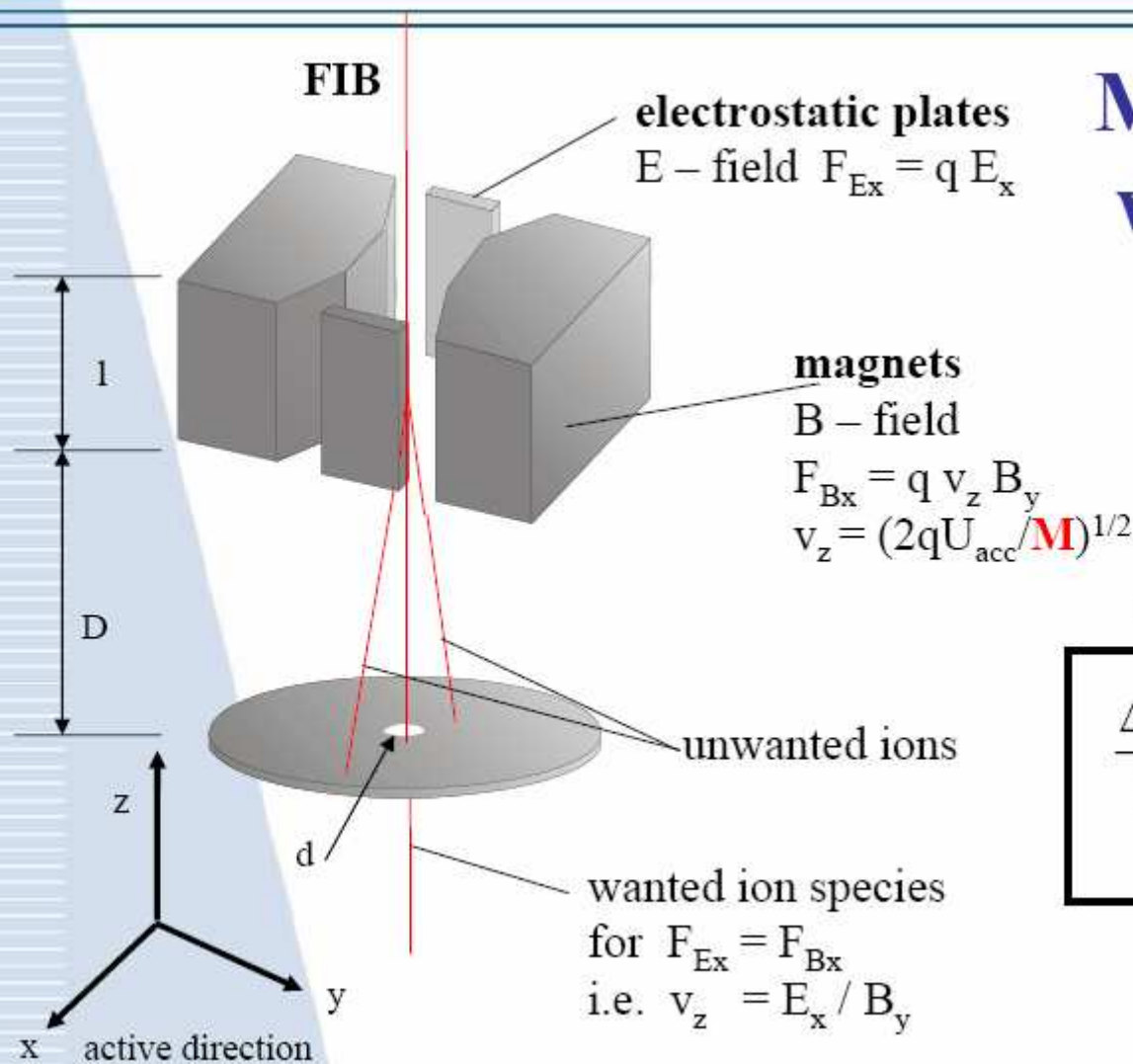
All materials have a vapour pressure lower than 10⁻⁸ Torr at the used temperature, but not Mn.

E. Hesse, L. Bischoff and J. Teichert, J. Phys. D: Appl. Phys. **27** (1994) 427

L. Bischoff and J. Teichert, J. Phys. D: Appl. Phys. **33** (2000) L69

L. Bischoff et al. Appl. Phys. A **79** (2004) 89

Mass separation with ExB filter



Resolution:

$$\frac{\Delta M}{M} = \frac{U_{acc}}{E_x} \frac{d}{l(\frac{1}{2}l + D)}$$

J. Melngailis, J. Vac. Sci. Technol. B5 (1987) 469.

Interaction ions/matière

- Emission ionique et électronique
 - Imagerie
- Erosion ionique
 - Gravure et Lithogravure
- Implantation ionique
 - Dopage et Amorphisation
- Activation Chimique
 - Dépôt et Gravure Réactive Localisée

Imagerie MEB e/e

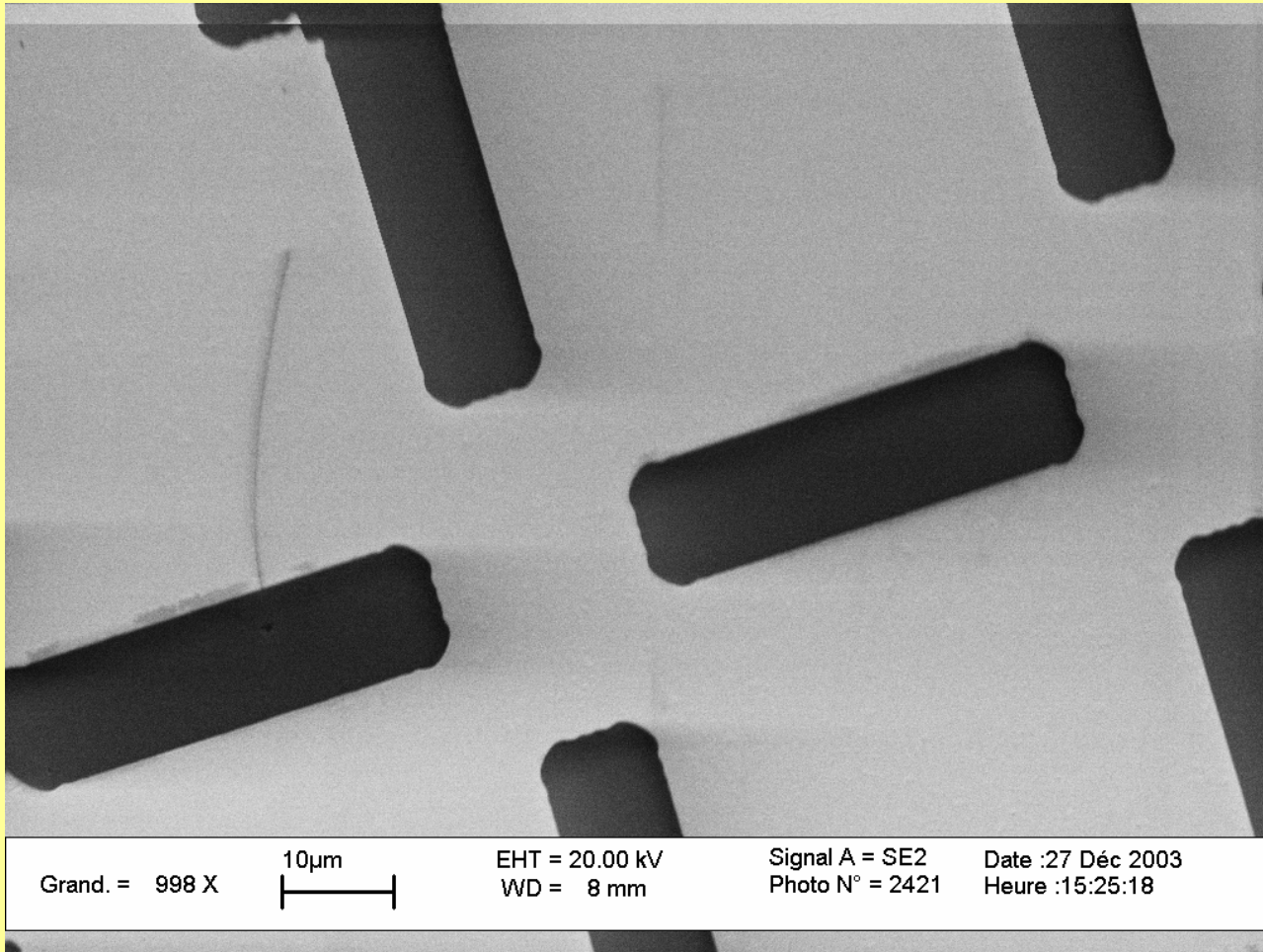
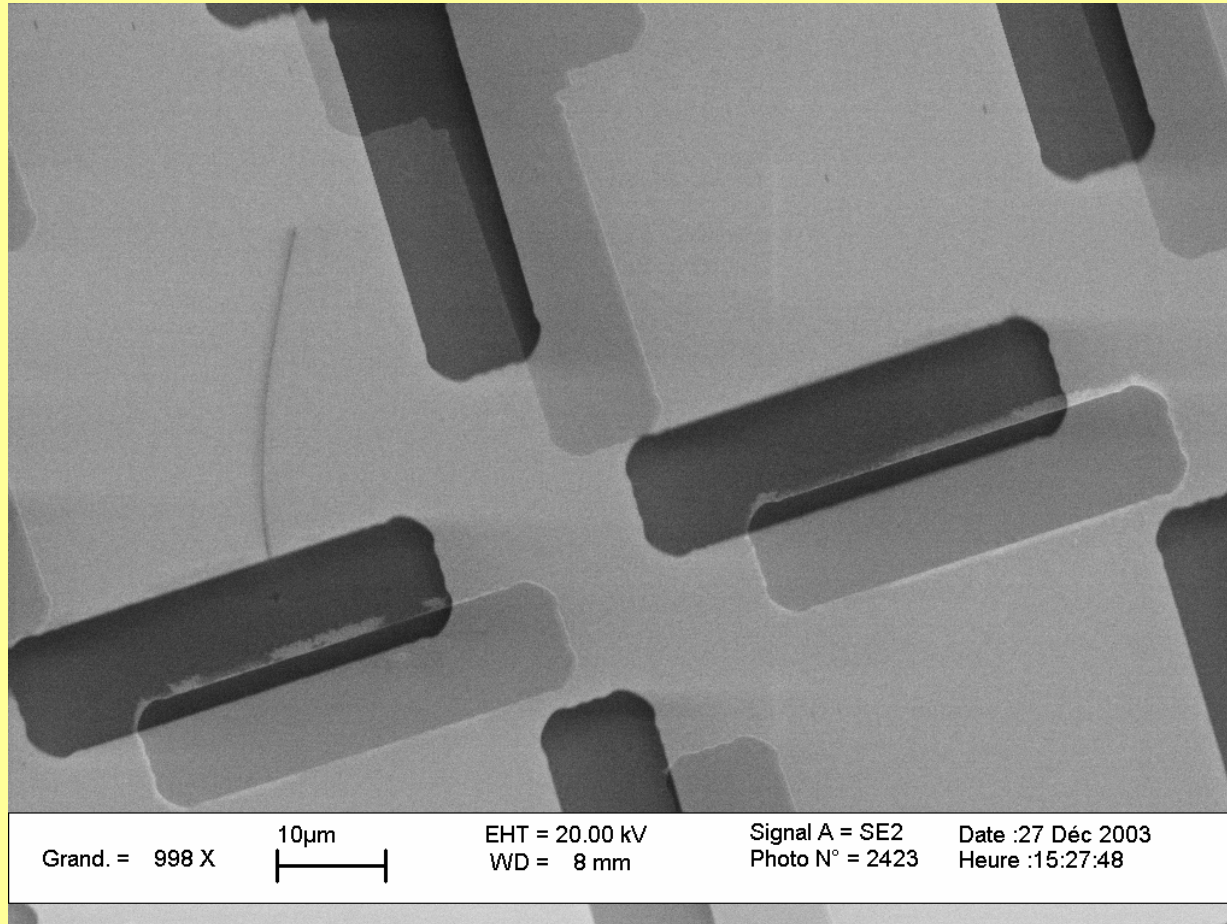
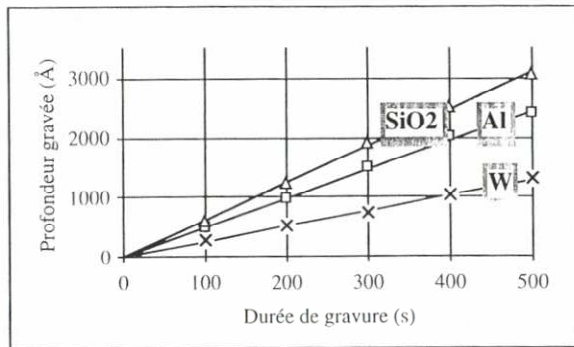


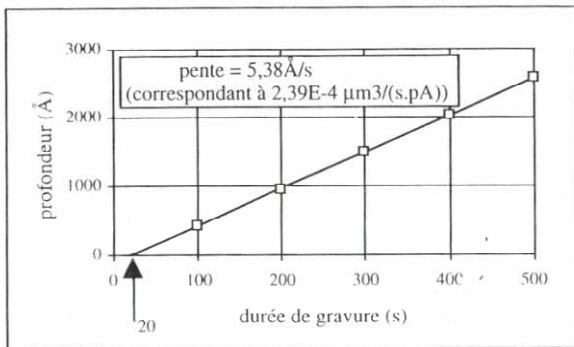
Image Meb e/e et FIB ions/e



Mesure des rendements de pulvérisation à 30 KeV et incidence perpendiculaire



Profondeur gravée en fonction du temps de gravure (Al, W, SiO₂; I=1800pA; S=800µm²)



Profondeur gravée en fonction du temps de gravure (Si; Ifaisceau : 1800pA; S=800µm²)

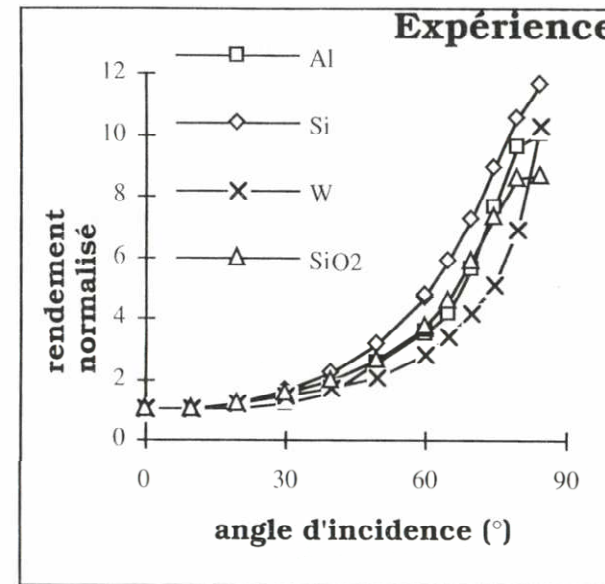
Quelques chiffres: Si: $0.24 \text{ (micron)}^3/\text{s.nA}$

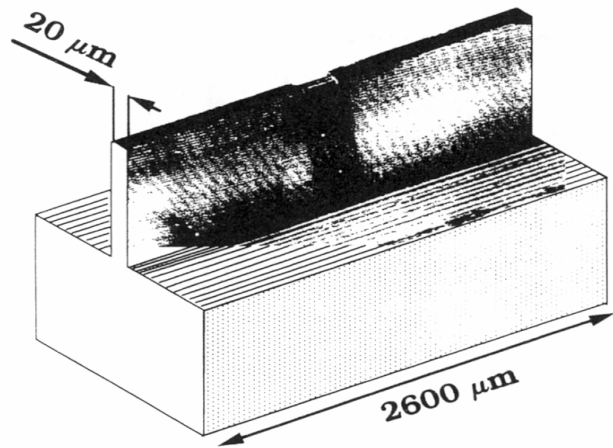
soit: gravure grossière (1 nA): ligne $100 \times 100 \times 1 \text{ microns} = 40000\text{s}$

gravure fine (10 pA): ligne $0.1^* \quad 0.1^*1 = 4\text{s}$

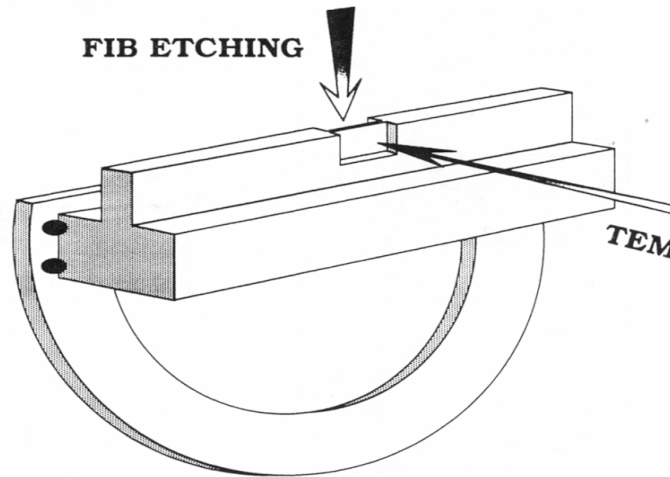
LA GRAVURE

Mesure du rendement de pulvérisation en fonction de l'angle d'incidence à 30 KeV

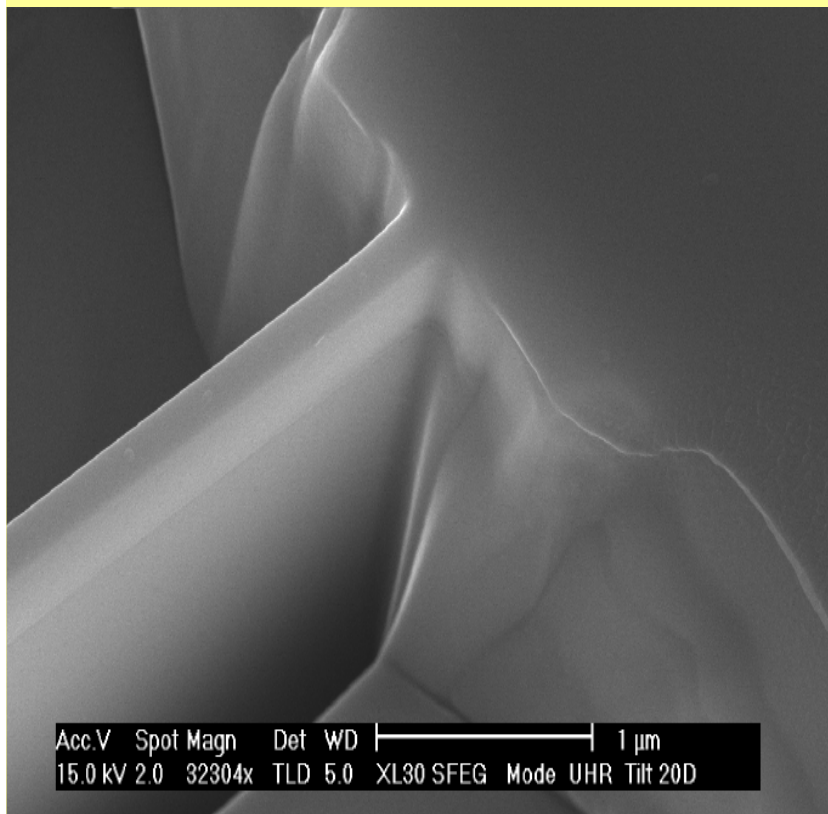




Mechanical sawing

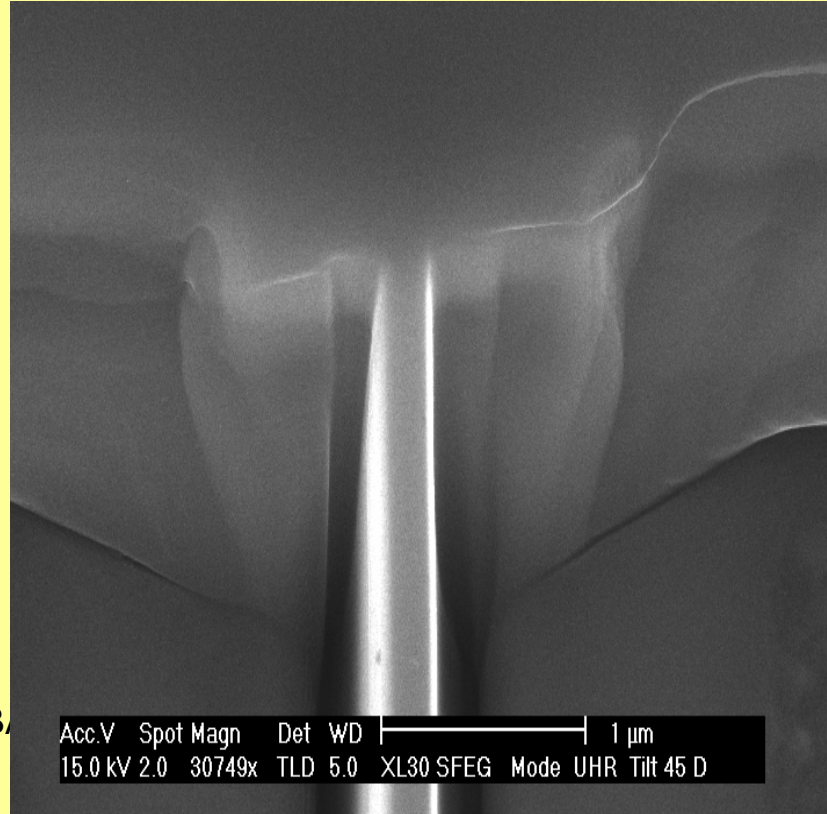


Sample fixation on TEM ring

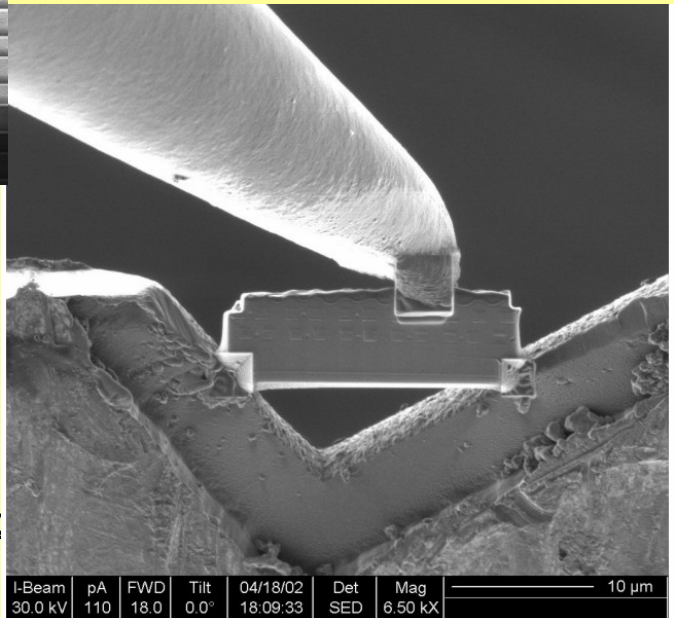
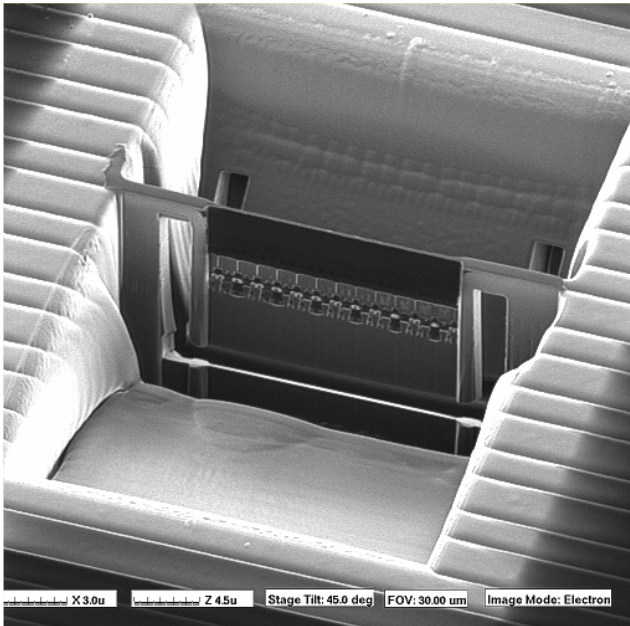


Acc.V Spot Magn Det WD |-----| 1 μm
 15.0 kV 2.0 32304x TLD 5.0 XL30 SFEG Mode UHR Tilt 20D

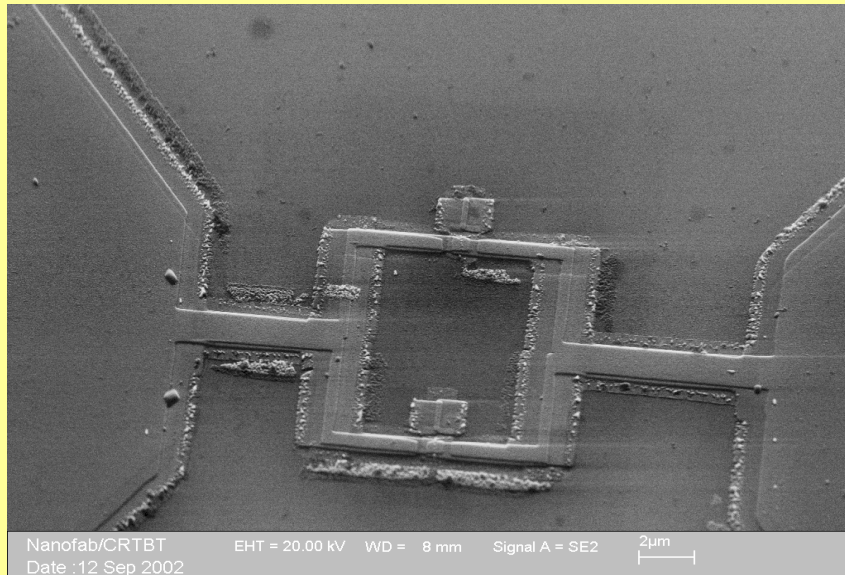
NIER- GN-MEB,



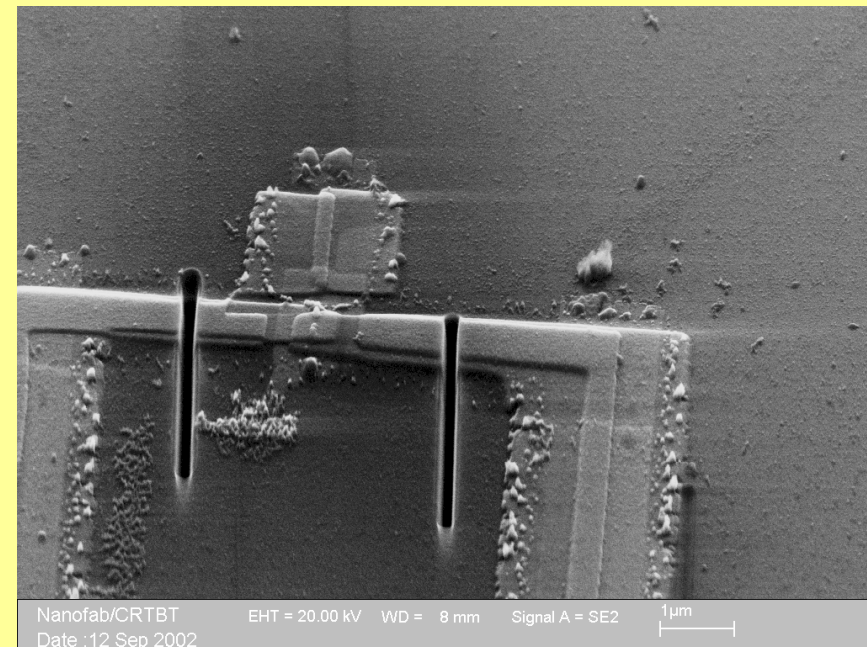
Acc.V Spot Magn Det WD |-----| 1 μm
 15.0 kV 2.0 30749x TLD 5.0 XL30 SFEG Mode UHR Tilt 45 D



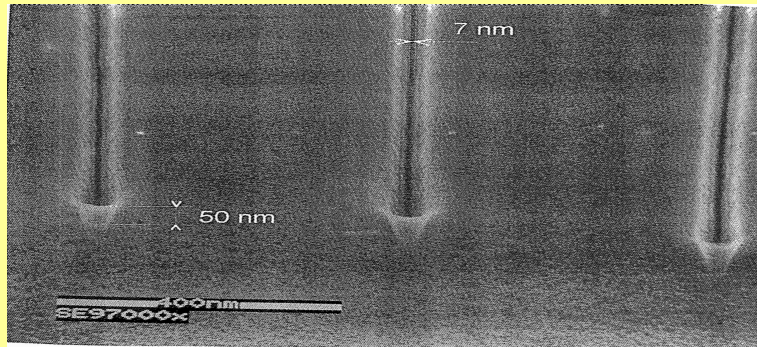
Modification de circuits/masques



Imagerie électronique/ Gravure
ionique

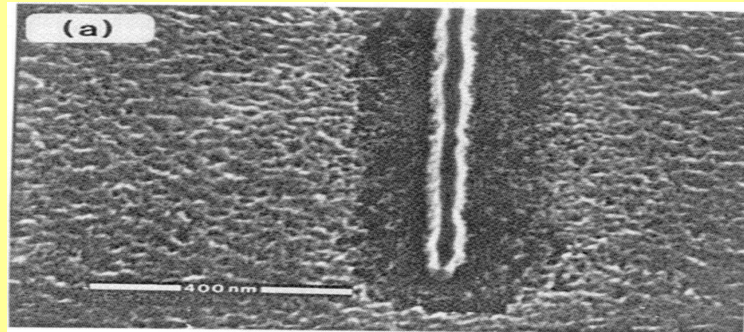


Focused ion beam (FIB)

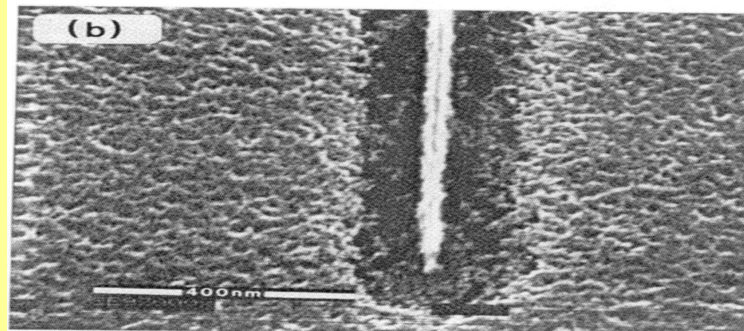


Gravure ultime

AlF_3 , J. Gierak et al, APL
70(15) 1997.



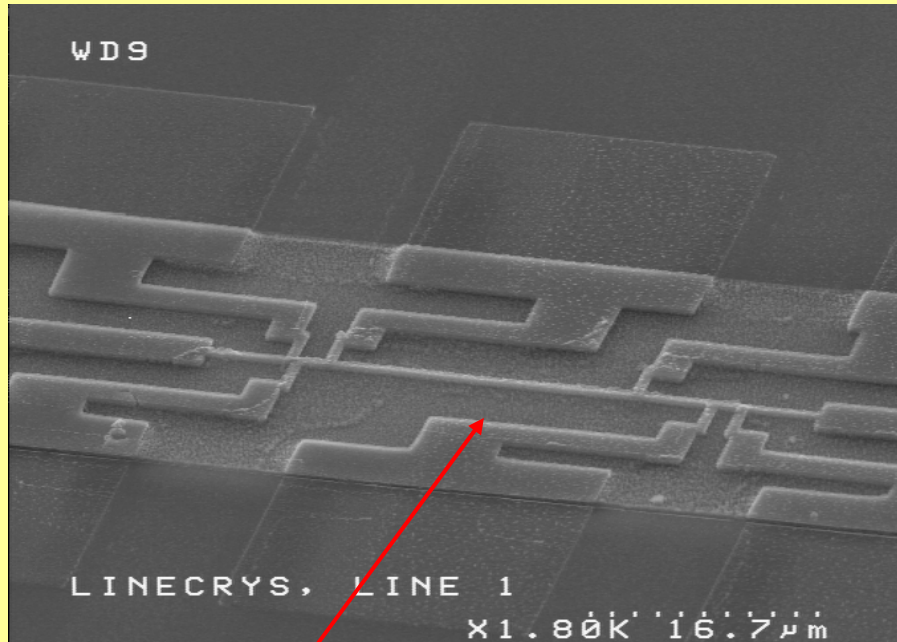
Lithographie ultime



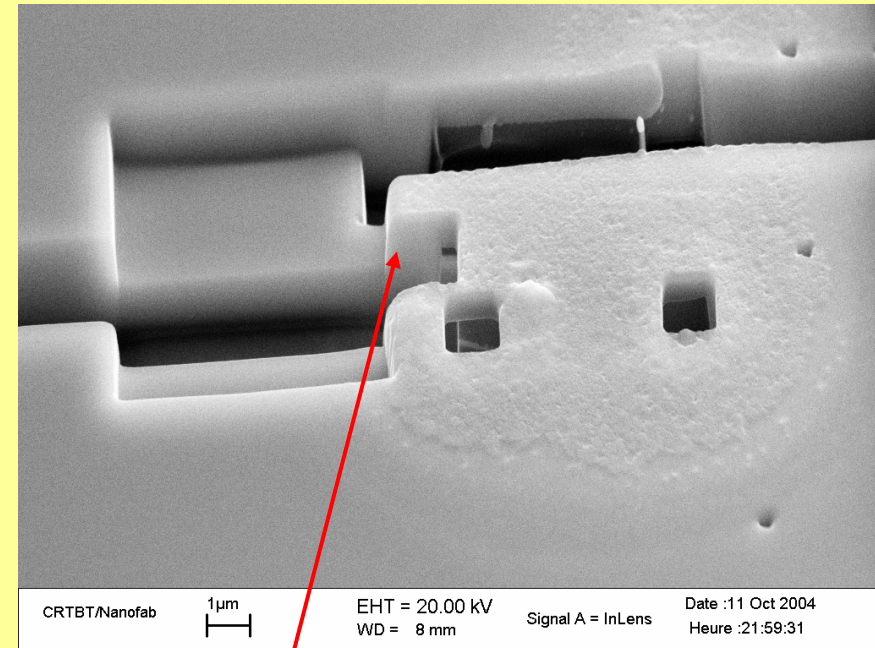
AlF_3

Structuration de cristaux spécifiques (CRTBT)

Matériaux à ondes de densité de charge : NbSe_3 , NbSe_2 , TaSe_2



Structuration d'un monocrystal e-beam et RIE : transport suivant les chaines

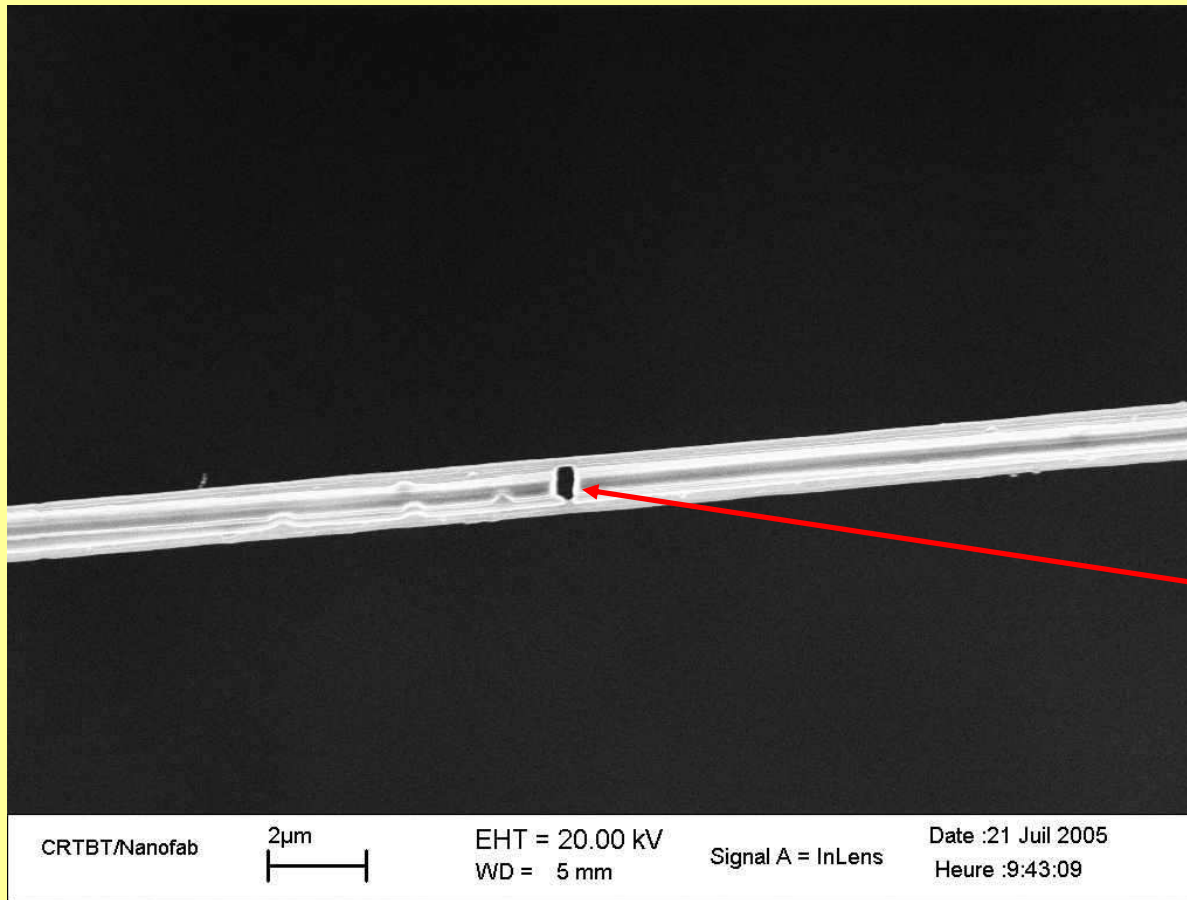


Structuration d'un monocrystal par usinage FIB : transport perpendicuaire

Latyshev Yu.I., Monceau P., Brazovskii S., Orlov A.P., Fournier T 95 (2005) 266402 - Physical Review Letters

Gravure 3D

Lithographie/gravure
échantillon non planaire



Anémomètre à fil
chaud

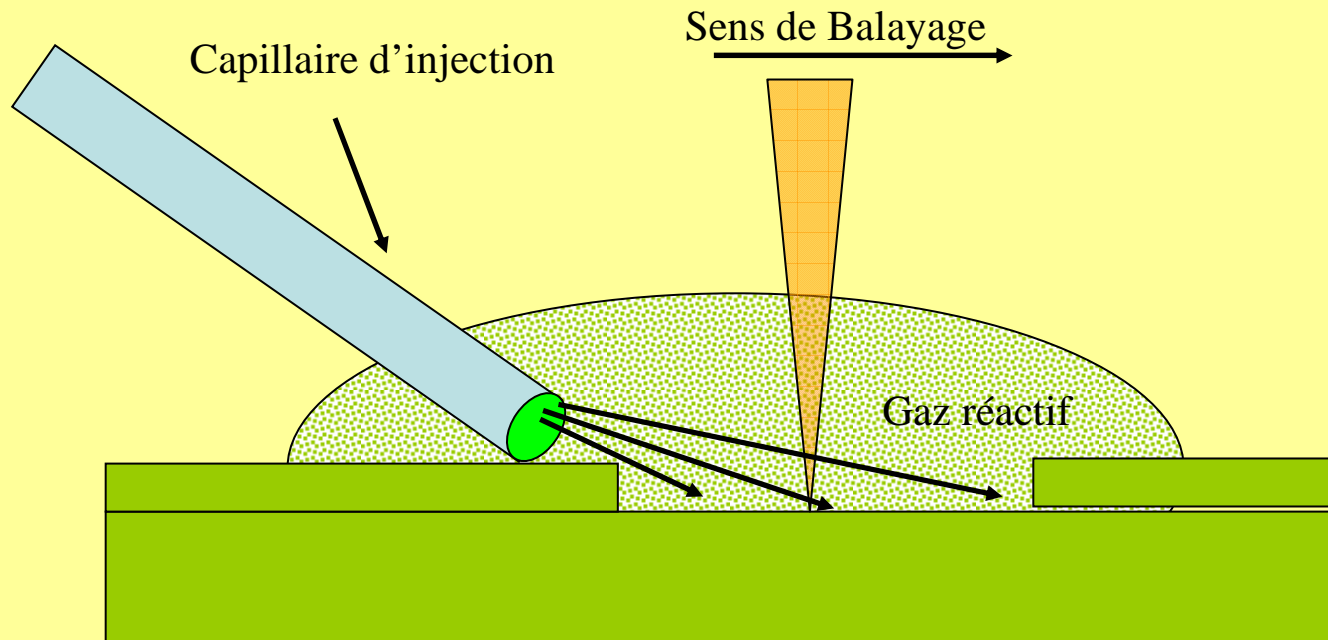
CNRS/CRTBT

P.Diribarne

Affaiblissement de la
supraconductivité par
réalisation d'un trou
200nm sur un fil NbTi
400 nm

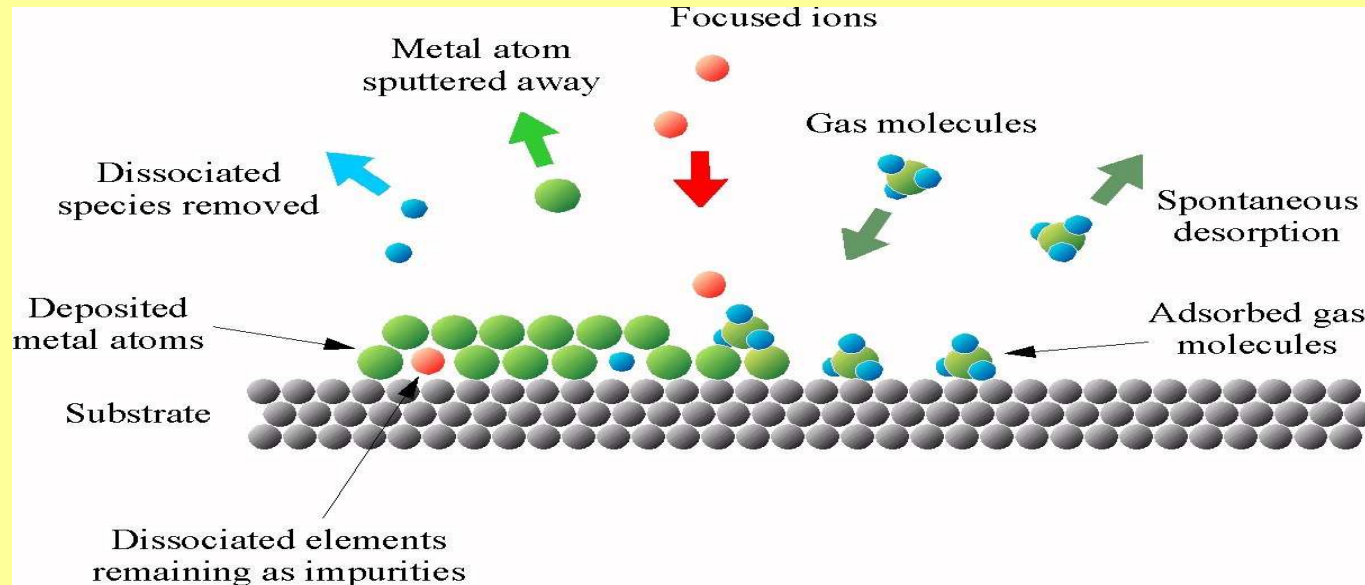
Focused ion beam (FIB)

Gravure selective et dépôt de métal ou d'isolant



Focused ion beam (FIB)

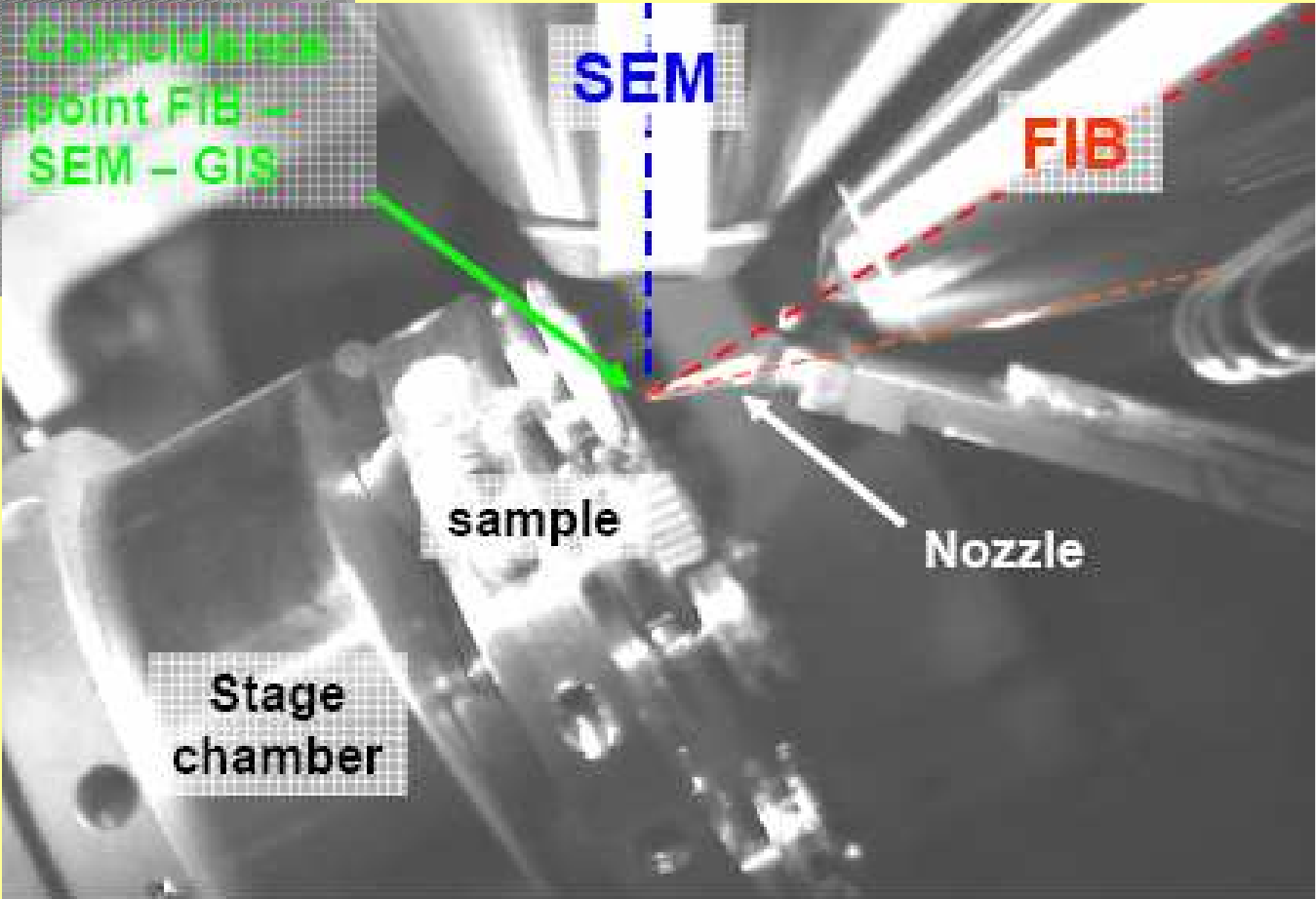
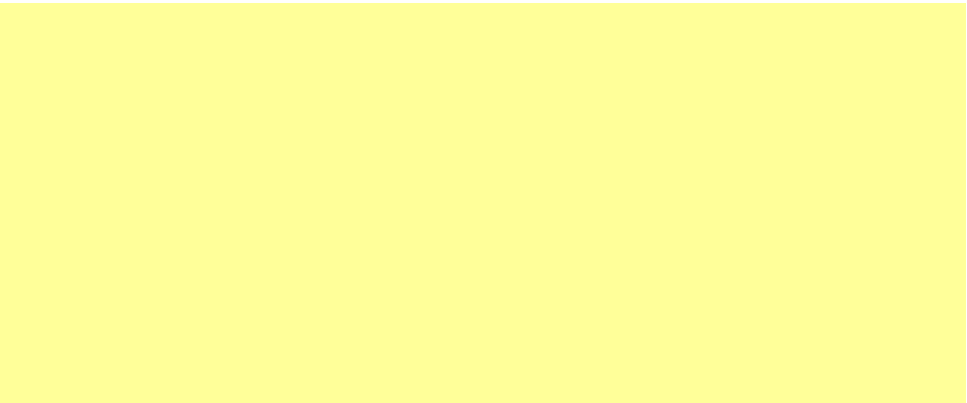
Dépôt de métal ou d'isolant



- Adsorption of the gas molecules on the substrate
- Dissociation of the gas molecules by the ion beam
- Deposition of the material atoms and removal of the organic ligands



Coincidence
point FIB -
SEM - GIS



Source:
ORSAY-PHYSIC

Deposition

- Electronic excitation induces chemical decomposition of gaseous precursor

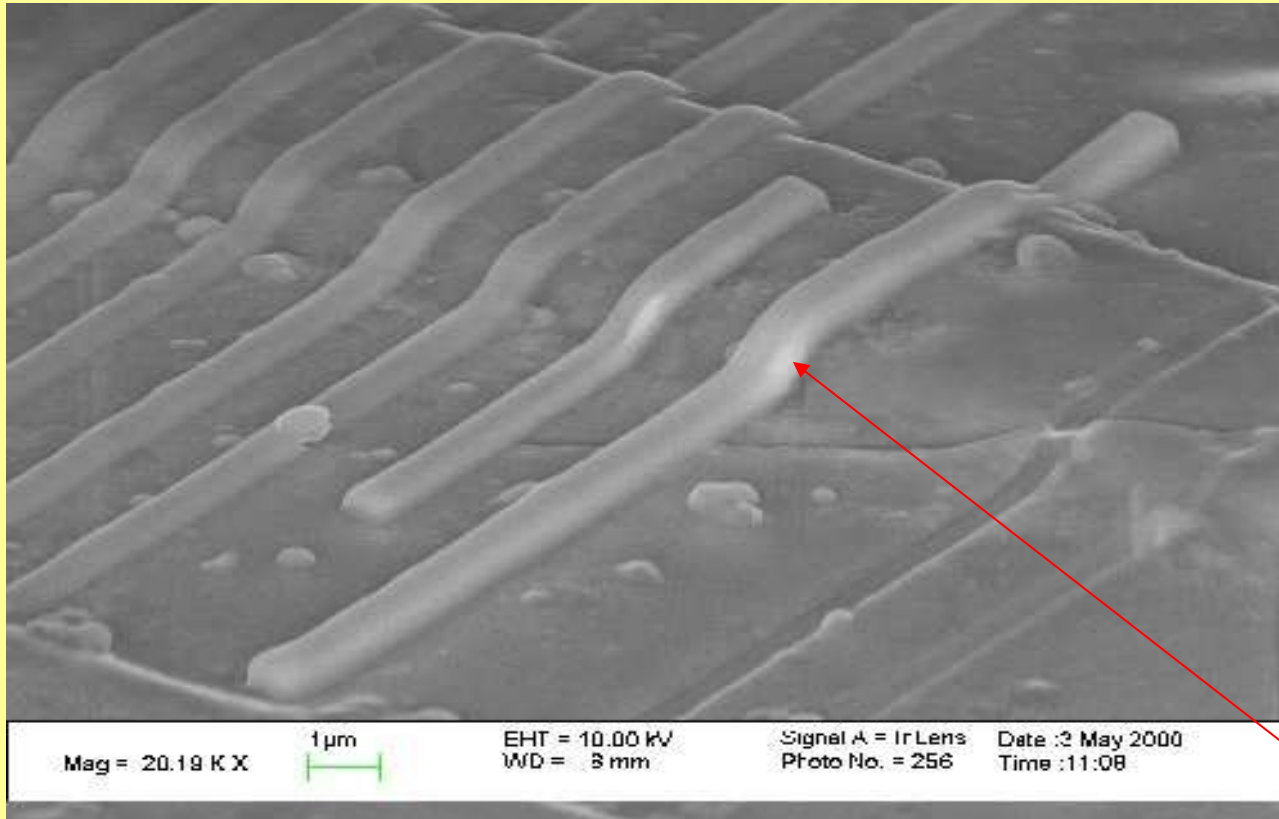
Element	Precursor	Temperature
W	$W(CO)_6$	55 °C
Pt	$(CH_3)_3(CH_3C_5H_4)Pt$	30 °C m.p.
Al	$(CH_3)_3AlH_3$	24 °C at 1 mbar
SiO ₂	O ₂ + tetraethoxysilane	
SiO ₂	O ₂ + $Si(OCH_3)_4$	
C	Phenanthrene	

Ion beam milling

Enhancement in sputter rate over ^{69}Ga

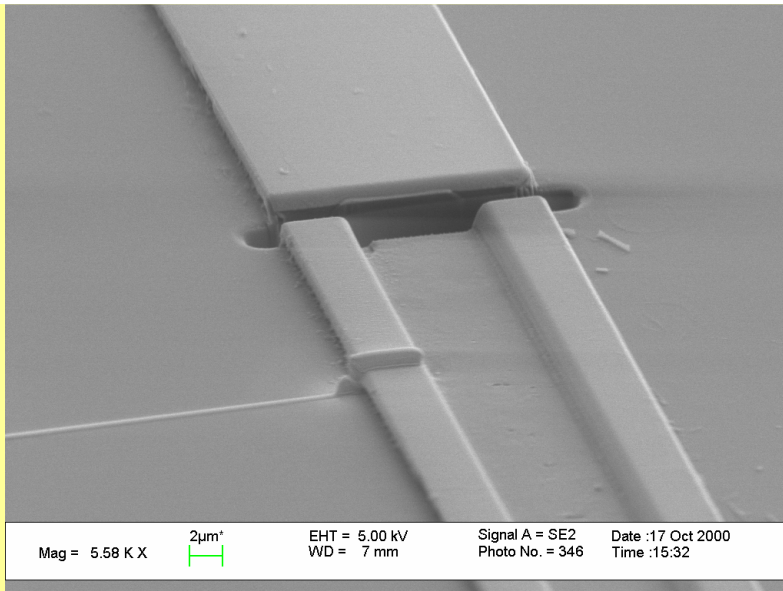
	Si	SiO ₂	Al	W	GaAs	InP	PMMA
Cl ₂	7-10	1	7-10	1	50	4	-
Br ₂	5-6	1	8-16	1	-	-	-
I ₂	5-10	1	5-15	-	-	11-13	2
XeF ₂	7-12	7-10	1	7-10	-	-	4
H ₂ O	0,05- 0.1	0.1- 0.15	0.02- 0.05	-	-	-	18

Modification de circuits



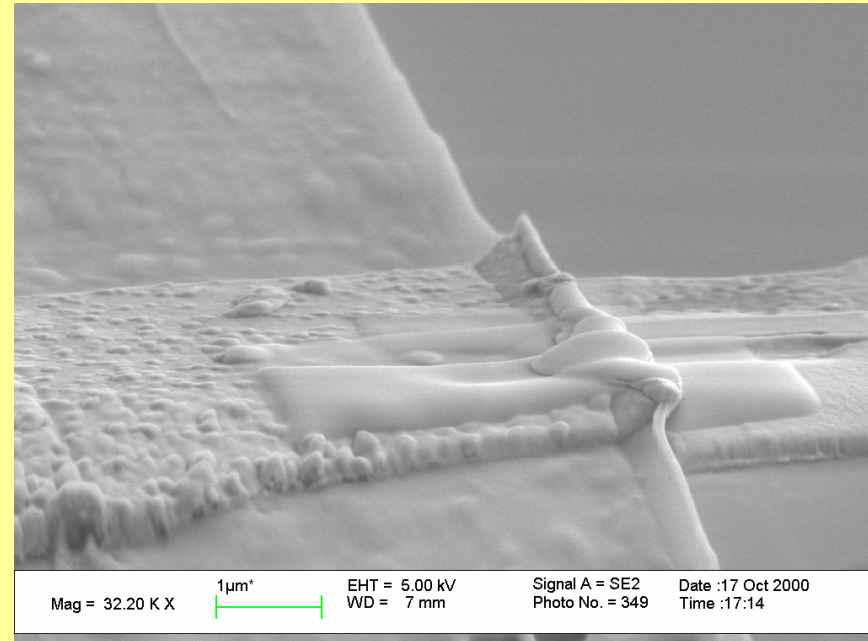
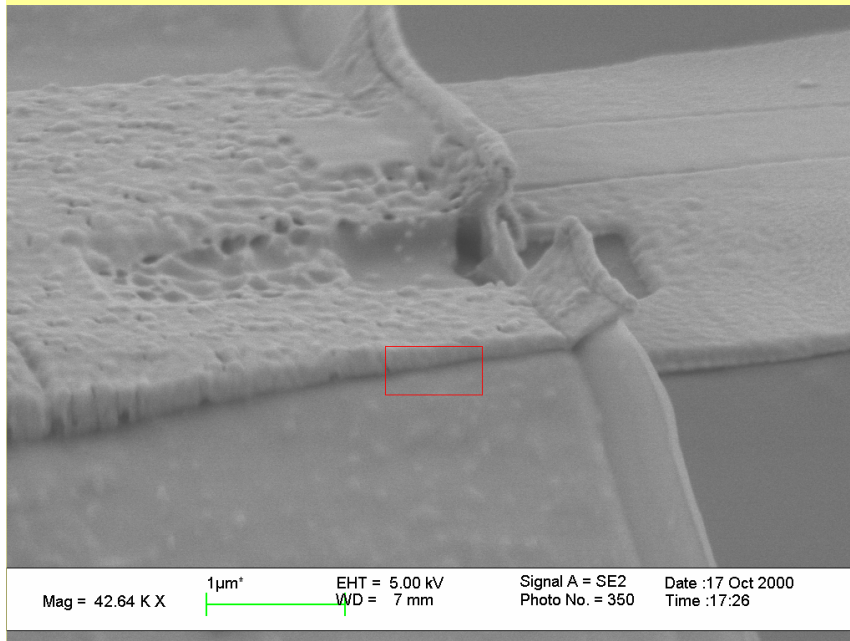
Ligne W

**Précurseur
W(CO)₆**

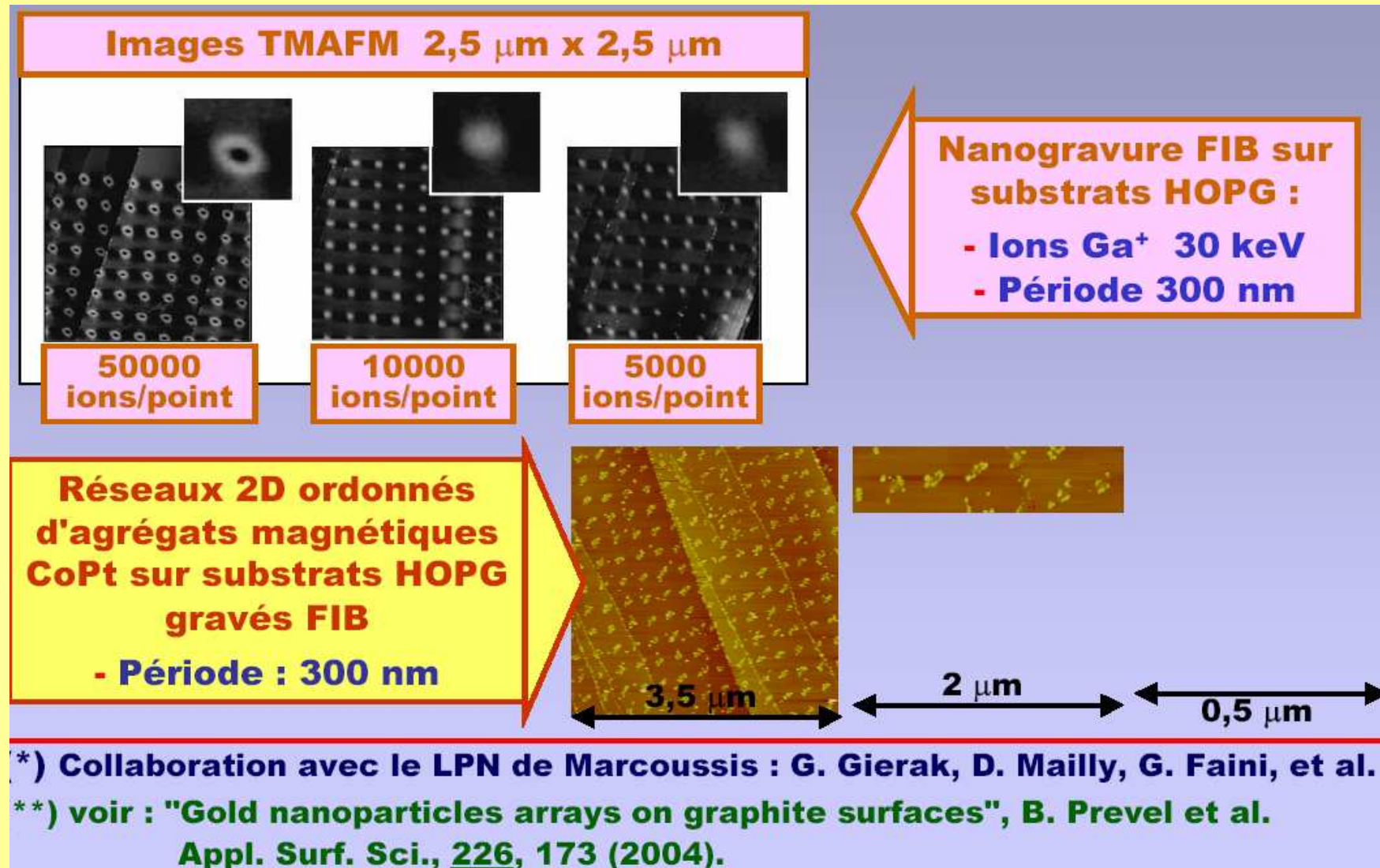


Micro usinage de NbSe3

Dépôt d'électrodes et « chirurgie réparatrice »

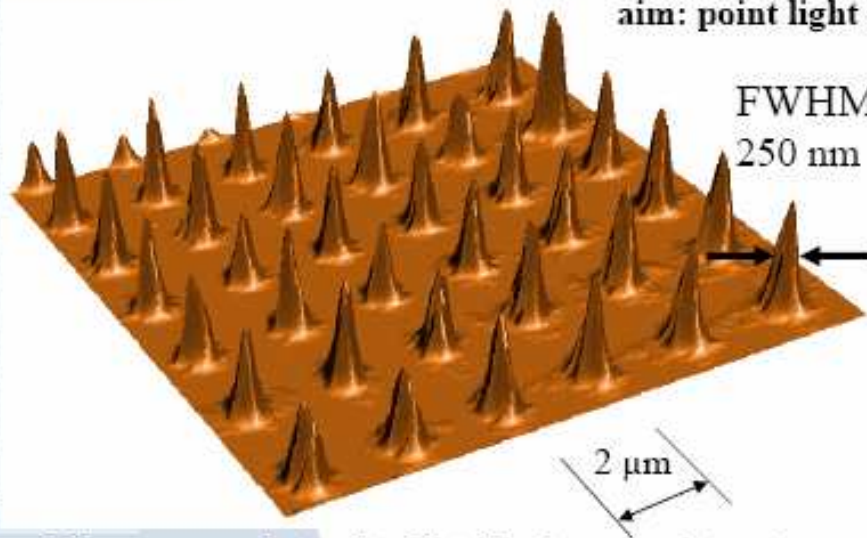


Fonctionalisation de substrats par FIB LPMCN-LPN



Generation and detection of fluorescent color centers with submicron resolution

aim: point light sources for i.e. SNOM applications



- **new materials:**
LiF, CaF₂, LiNbO₃, Al₂O₃, diamond
- **new technology:**
cooling to prevent diffusion (T = 240 K)

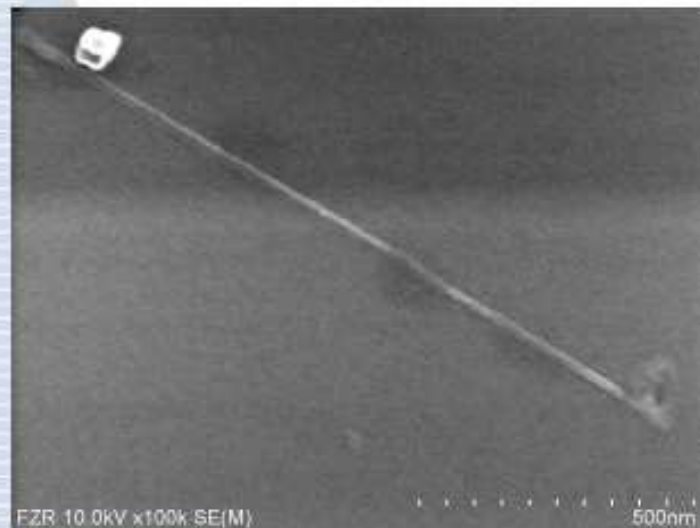
- **new ion sources:**
RE elements Nd, Er
metals Cr, Fe, Co, Ni, Au
(other: Si, Ge, Ga)

**Fluorescence intensity distribution of a dot pattern written by FIB
implantation of Ga into diamond, dose: 37000 ions/dot**

J. Martin, R. Wannemacher, J. Teichert, L. Bischoff and B. Köhler, Appl. Phys. Lett. **75** (1999) 3096

J. Martin, L. Bischoff and R. Wannemacher, Opt. Commun. **188** (2001) 119

Direct FIB written CoSi_2 nano-wire

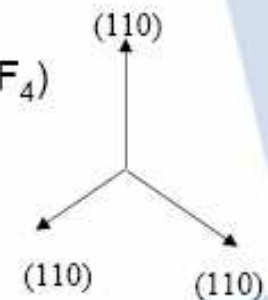


FIB-implantation Co^{++}
60 keV, $2.4 \times 10^{16} \text{ cm}^{-2}$
Si $\langle 111 \rangle$

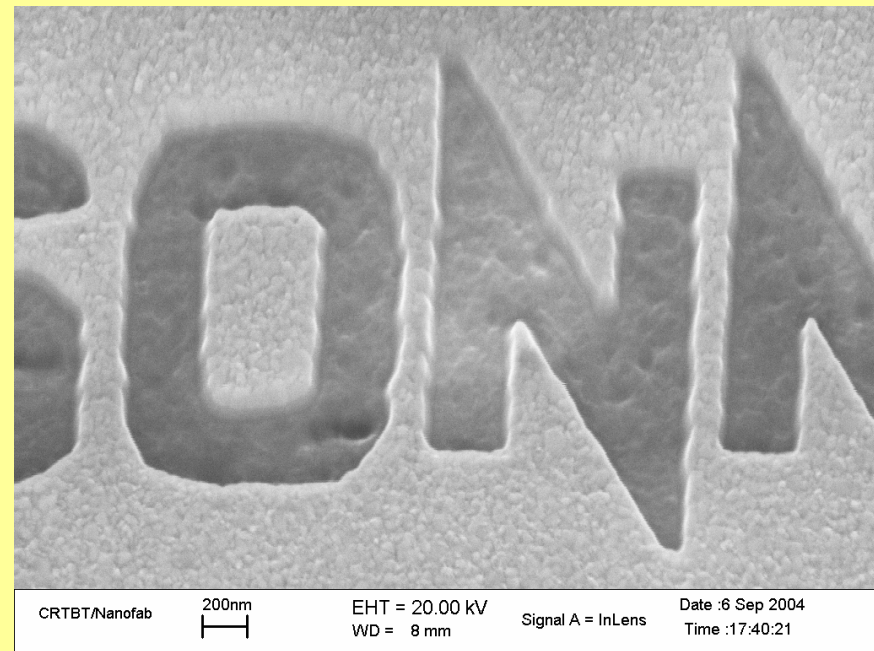
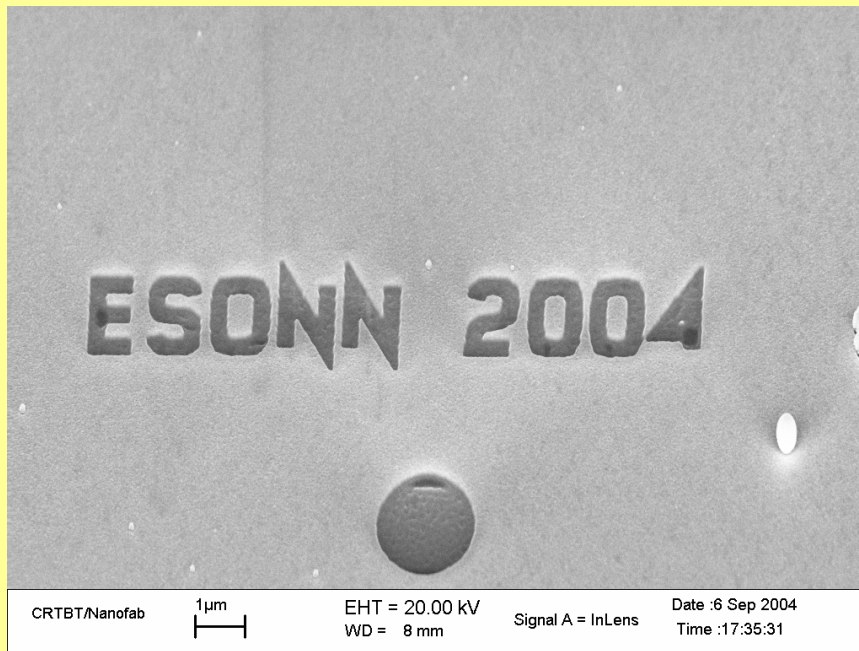
Annealed
600°C 60 min + 1000°C 30 min, N_2

20 s RIE (CF_4)

10 ... 20 nm



Un outil d'enseignement



Conclusions personnelles

E-Beam et FIB

- E-Beam
 - Outil extraordinaire de microfabrication
 - Souple, sans masque physique
 - Haute résolution: 30 nm en routine
 - Ecriture lente
 - Victime de son succès: 24H/24- 3 semaines de réservation
- FIB
 - Gravure directe, substrat exotique, potentiel énorme
 - PB : Gérer la frustration de nombreux clients potentiels:
 - -Gravure trop lente
- MEB + e-Beam + FIB dans une structure de service
 - Une fonction en trop sur la même machine