
Lithographie électronique : principe et application aux nanosttructures magnétiques

F. Montaigne

Institut Jean Lamour

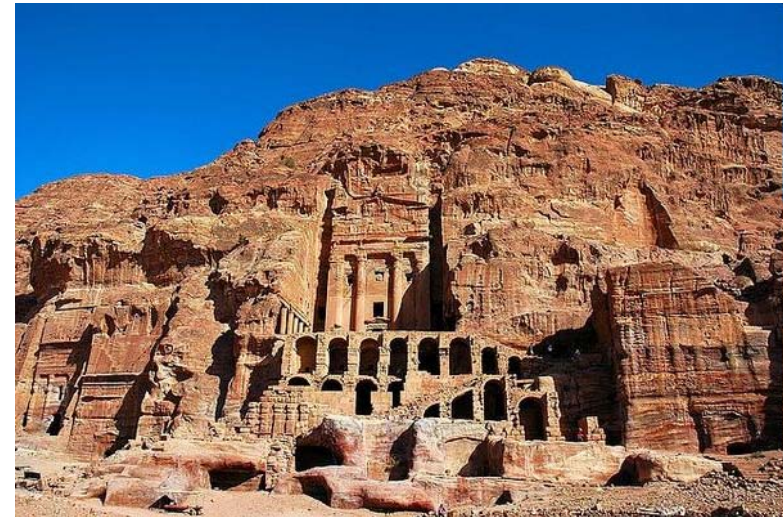
Nancy-Université, CNRS

Fabrication des nano-objets

Bottom-up



Top-down



Structuration directe vs lithographie



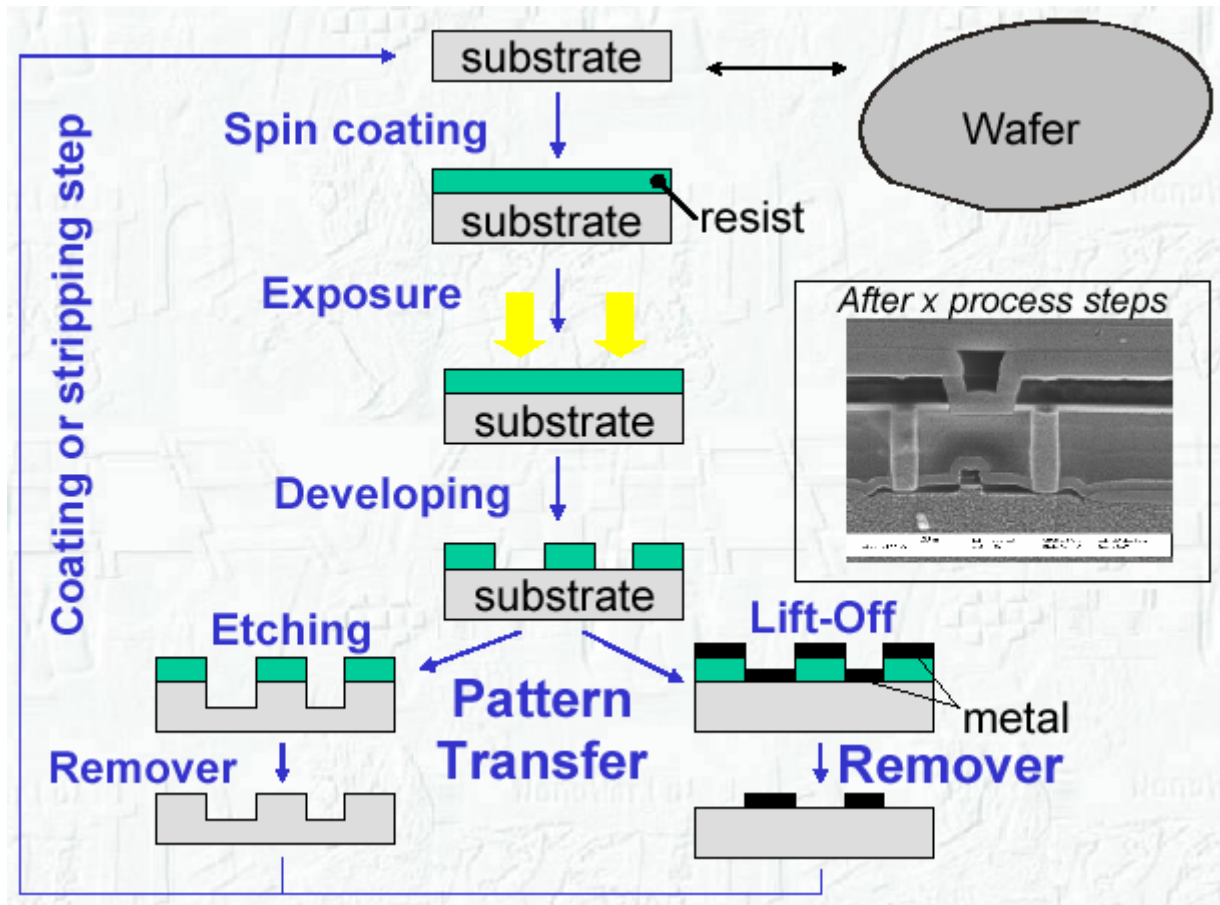
- Structuration directe : capacité à mettre ou enlever de la matière à l'échelle nanométrique
 - Focused ion beams (FIB)
Gravure ionique et dépôt
 - Electron beam induced deposition (EBID)
 - AFM/STM
Nanoindentation, électrochimie locale

Structuration directe vs lithographie



- Lithographie
 - Process (gravure, dépôt) effectué à l'échelle du wafer
 - Sélectivité latérale est obtenue par un "pochoir" (résine)
 - La lithographie détermine la résolution

Procédés



Panorama des techniques de lithographie

Beam writing

- *Similar to direct writing (on resist)*
- *No mask*
- *Slow*
- Focussed light
- **Electron beam lithography**
- Focussed Ion Beam (FIB)
- AFM / STM

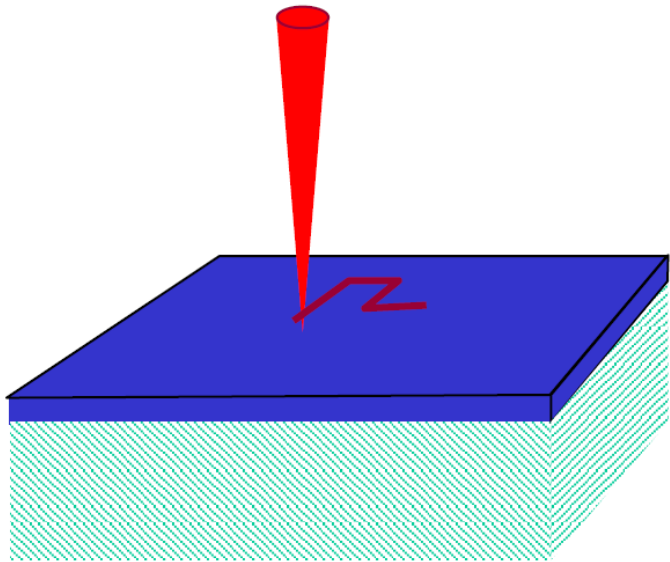
Parallel writing

- *Broad beam through a mask*
- *Fast*
- **Optical lithography**
 - Contact / Proximity
 - Projection
 - Interference lithography
 - Extreme UV
 - X-rays
- "Mechanic" lithography
Nano-imprint
- Electron and ion beams projection

Plan

- Généralités
- Choix d'une résine
- Interactions électrons-résine
- Effets de proximité
- Peut on faire de la lithographie avec un MEB ?
- Applications aux nanostructures magnétiques

Principe



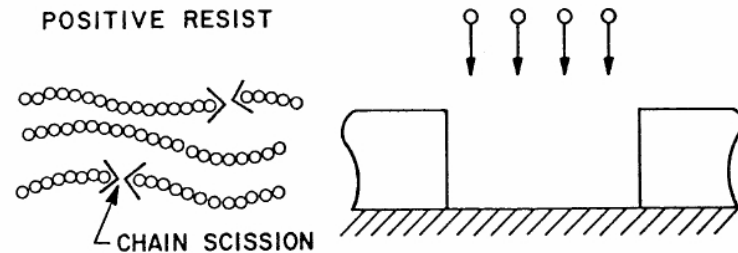
- Finesse du faisceau (< 20 nm)
- Pas de diffraction ($\lambda < 0,1$ nm)
- Résolution ultime : 1 – 20 nm
- Ecriture directe
(pas de masque, flexibilité)
- Exposition séquentielle
(longue)

Utilisations

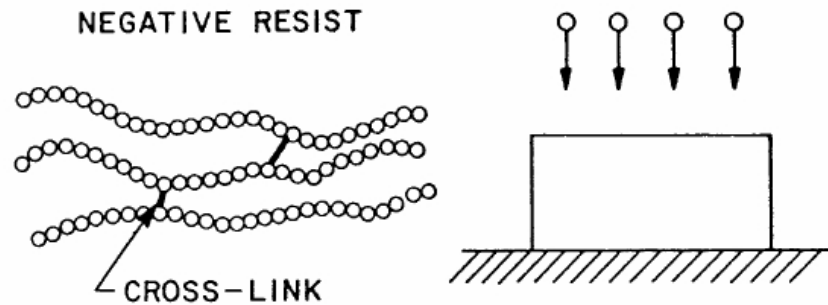
- Production de masques pour la lithographie optique ($\times 4-5$).
- Prototypage pour les circuits intégrés avancés (écriture directe)
- Prototypage ou productions de petites série pour des composants spécifiques (III-V, optronique, ...)
- Recherche et développement !
 - Souplesse, flexibilité, résolution...

Différentes résines...

Positive



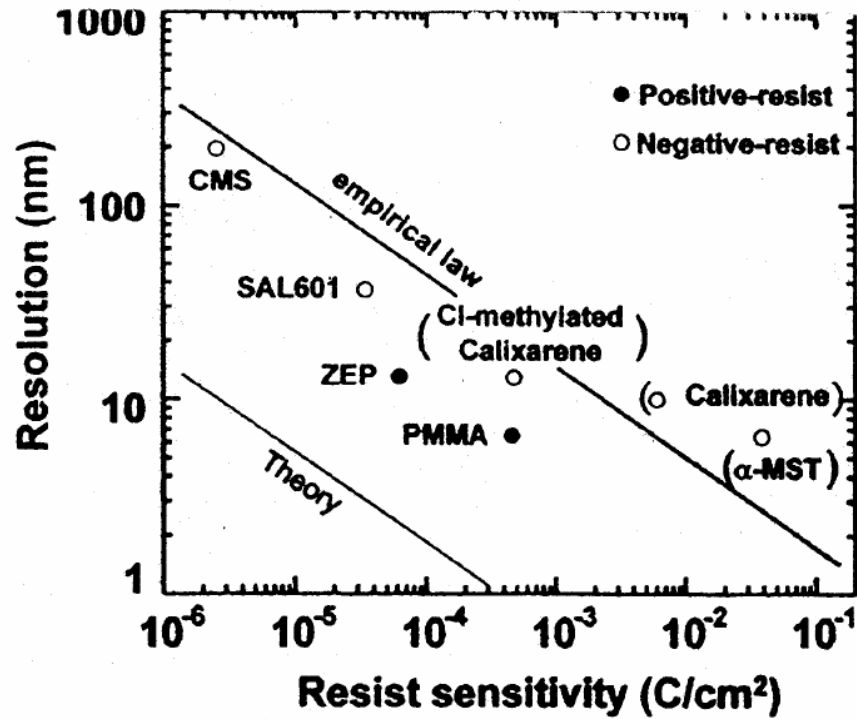
Négative



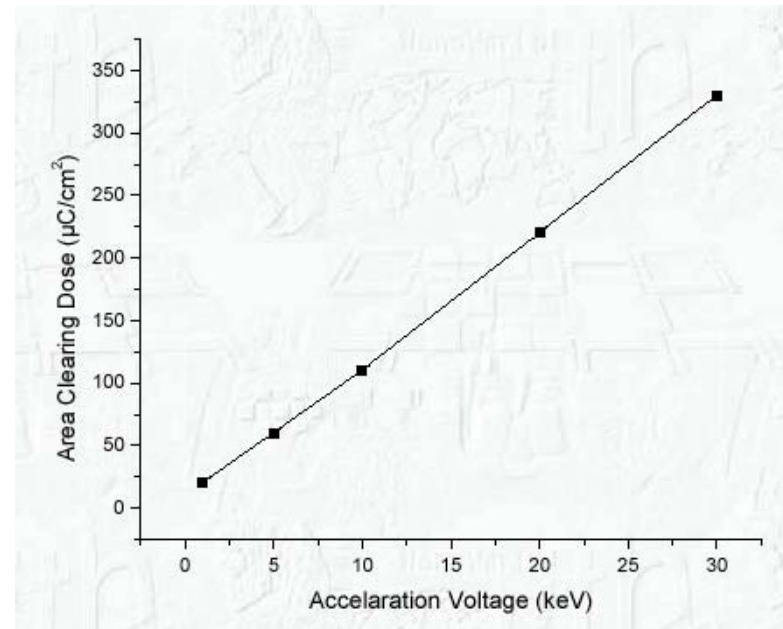
- Polarité : positive ou négative, en fonction du taux de couverture
- Sensitivité : fixe le temps d'exposition
- Résistance à la gravure
- Bi ou tricouches : lift-off, T-gates...
- Retrait de la résine
- ...

Compromis vitesse-résolution

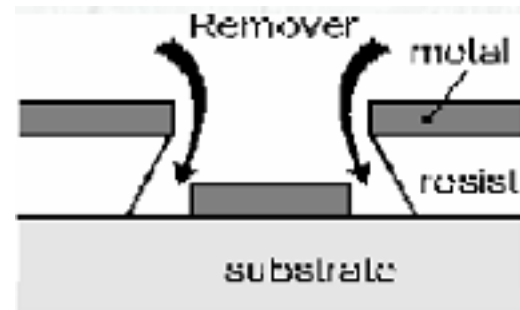
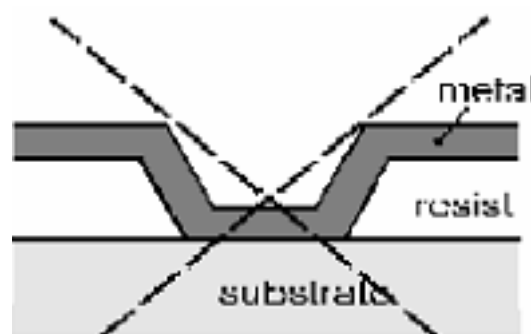
PMMA



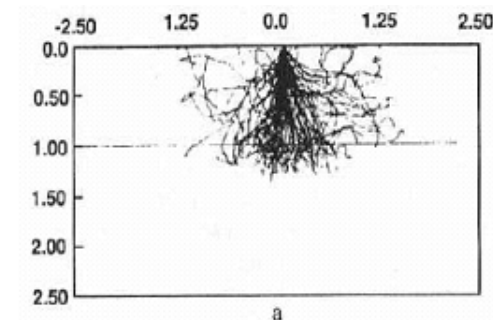
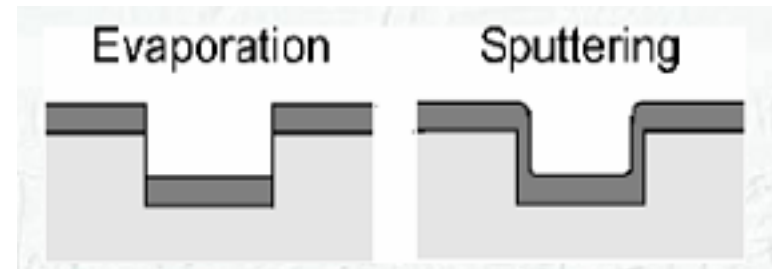
Produit	Résolution	Sensibilité
MIBK	Faible	Haute
MIBK/IPA 1:1	Bonne	Bonne
MIBK/IPA 1:2	Très bonne	Moyenne
MIBK/IPA 1:3	Excellente	Faible



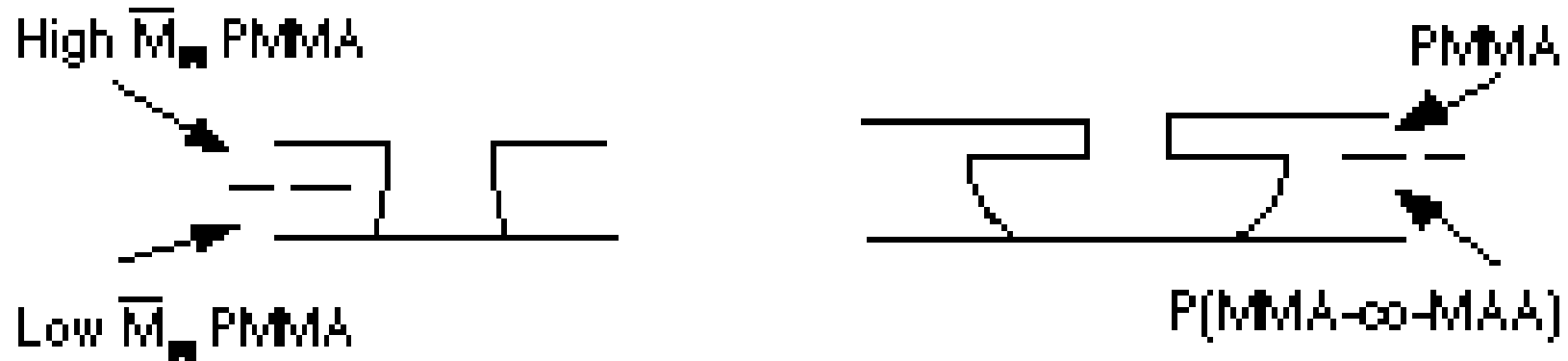
Lift-off



- Augmentation du rapport épaisseur de résine/épaisseur de métal
- Directivité du dépôt (évaporation plutôt que pulvérisation)
- Création d'un "undercut" dans la résine
 - Faisceau à basse énergie
 - Résine spécifique (ZEP)
 - Bicouches



Résines bi-couches



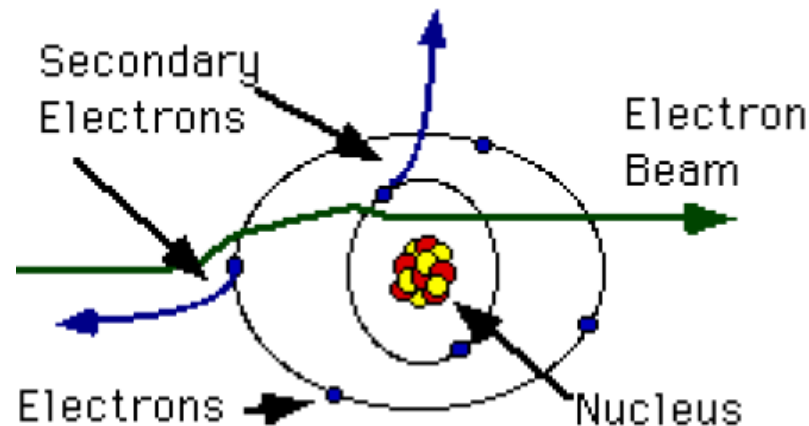
- Deux résines de sensibilité différente
- Possibilité de réaliser des ponts (shadow evaporation)

Electron-resist interactions : inelastic scattering

The resolution is not limited by the size of the beam...

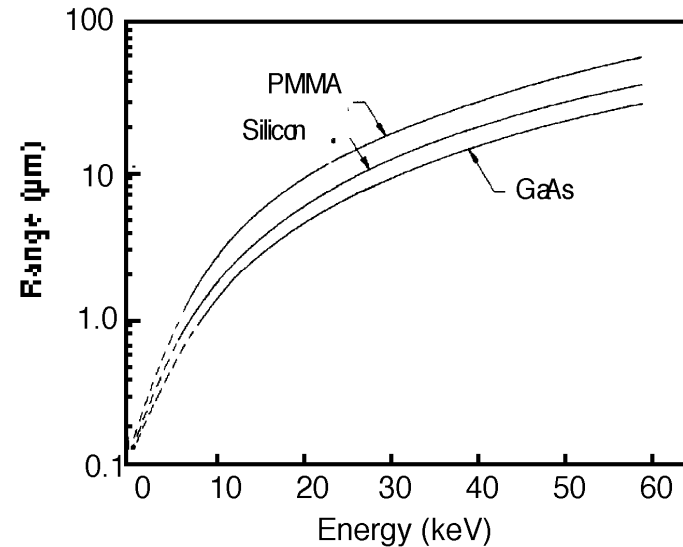
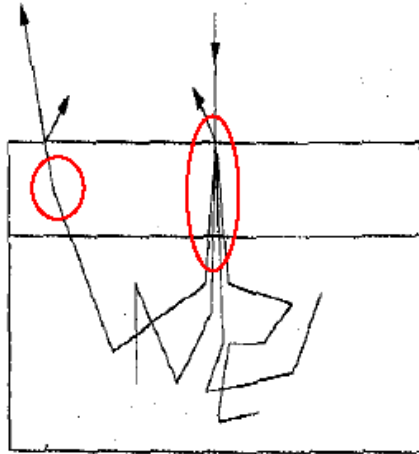
The breaking bond energy is typically 10 eV

Resist is exposed by secondary electrons (2-50 eV)



Emission of secondary electrons leads to an effective spreading of the beam (<10 nm)

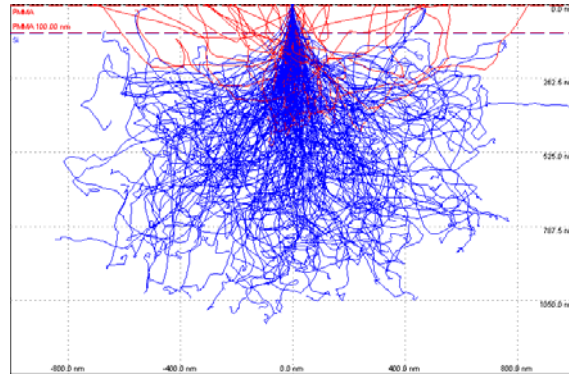
Electron-resist interactions : elastic scattering



- Forward Scattering
 - Small angular deviation
 - Spreading of the beam : $d \approx (t/V_b)^{1,5}$
- Backscattering
 - Large angle scattering : electron comes back !
 - Travel back in the resist : new exposition
 - Longs range in the resist => proximity effect

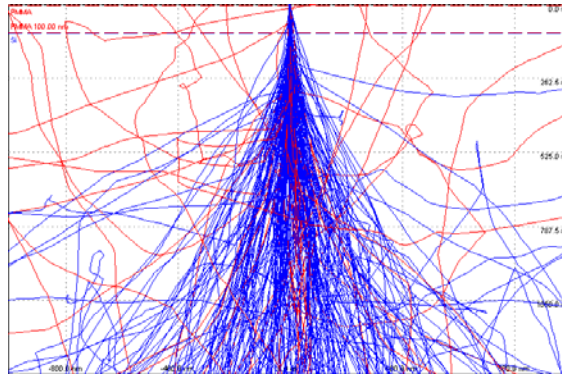
Monte-Carlo simulations

10 keV

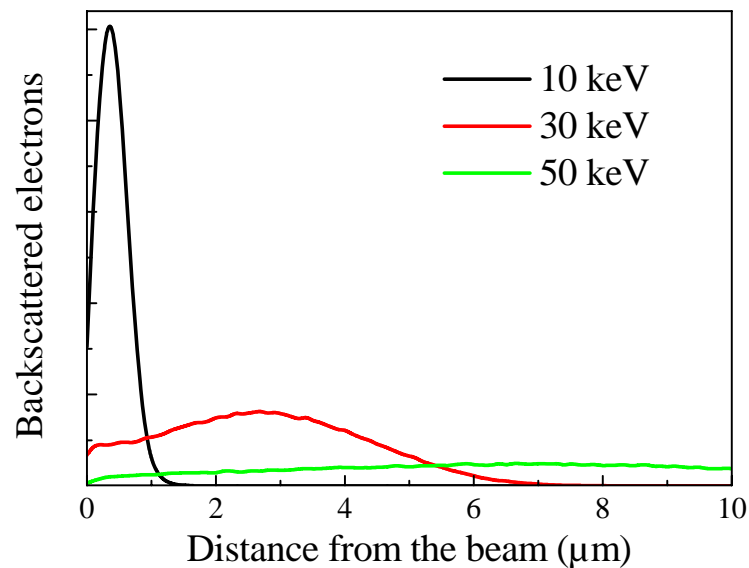
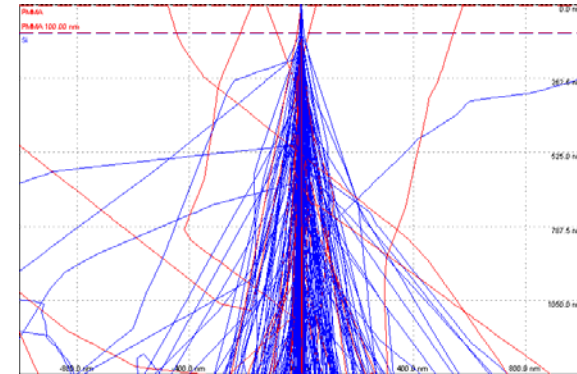


2 μm

30 keV



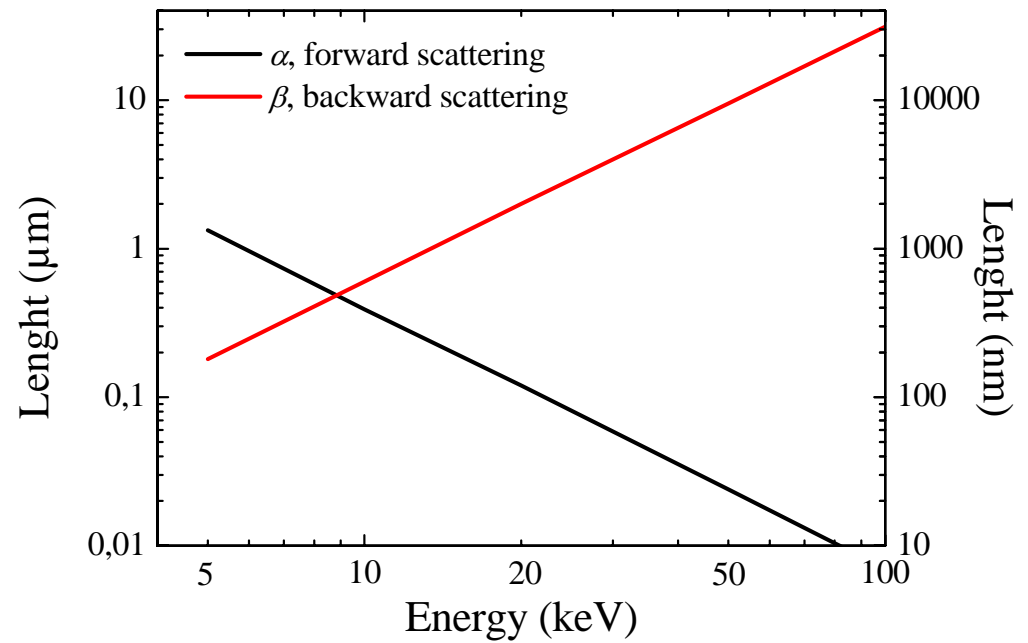
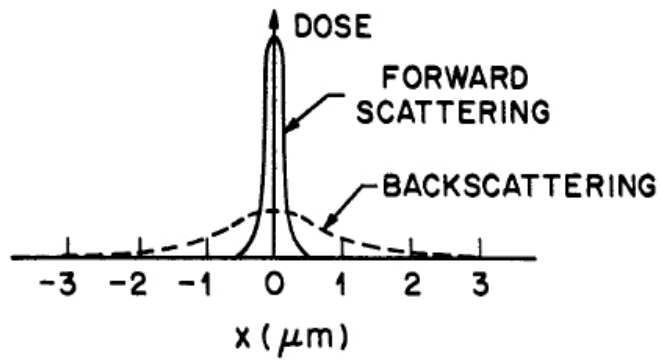
50 keV



- Number of backscattered not dependent on energy
- Spatial distribution is
- Proximity effects are "diluted" at high energies

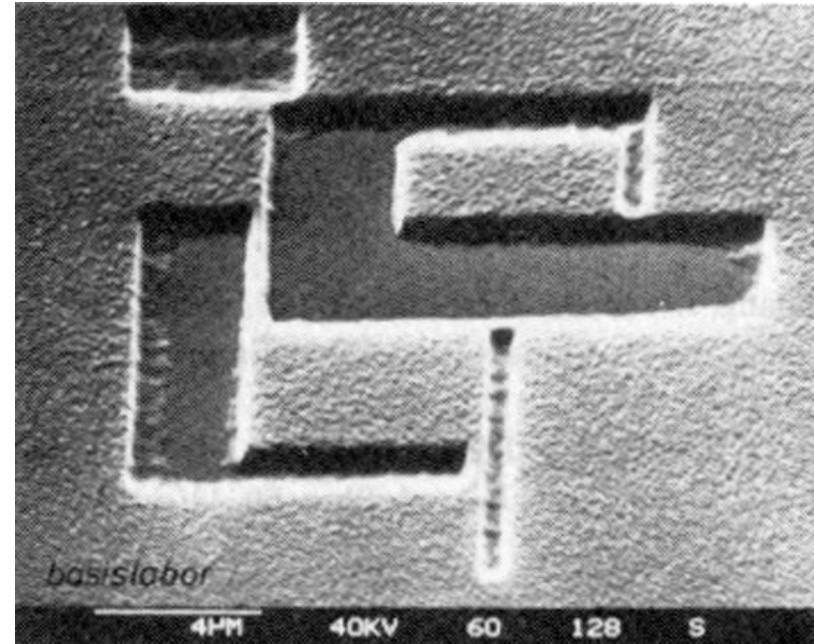
Double-Gaussian model

$$E(r) = \frac{1}{\pi(1-\eta)} \left(\frac{1}{\alpha^2} \exp\left(-\frac{r^2}{\alpha}\right) + \frac{\eta}{\beta^2} \exp\left(-\frac{r^2}{\beta}\right) \right)$$

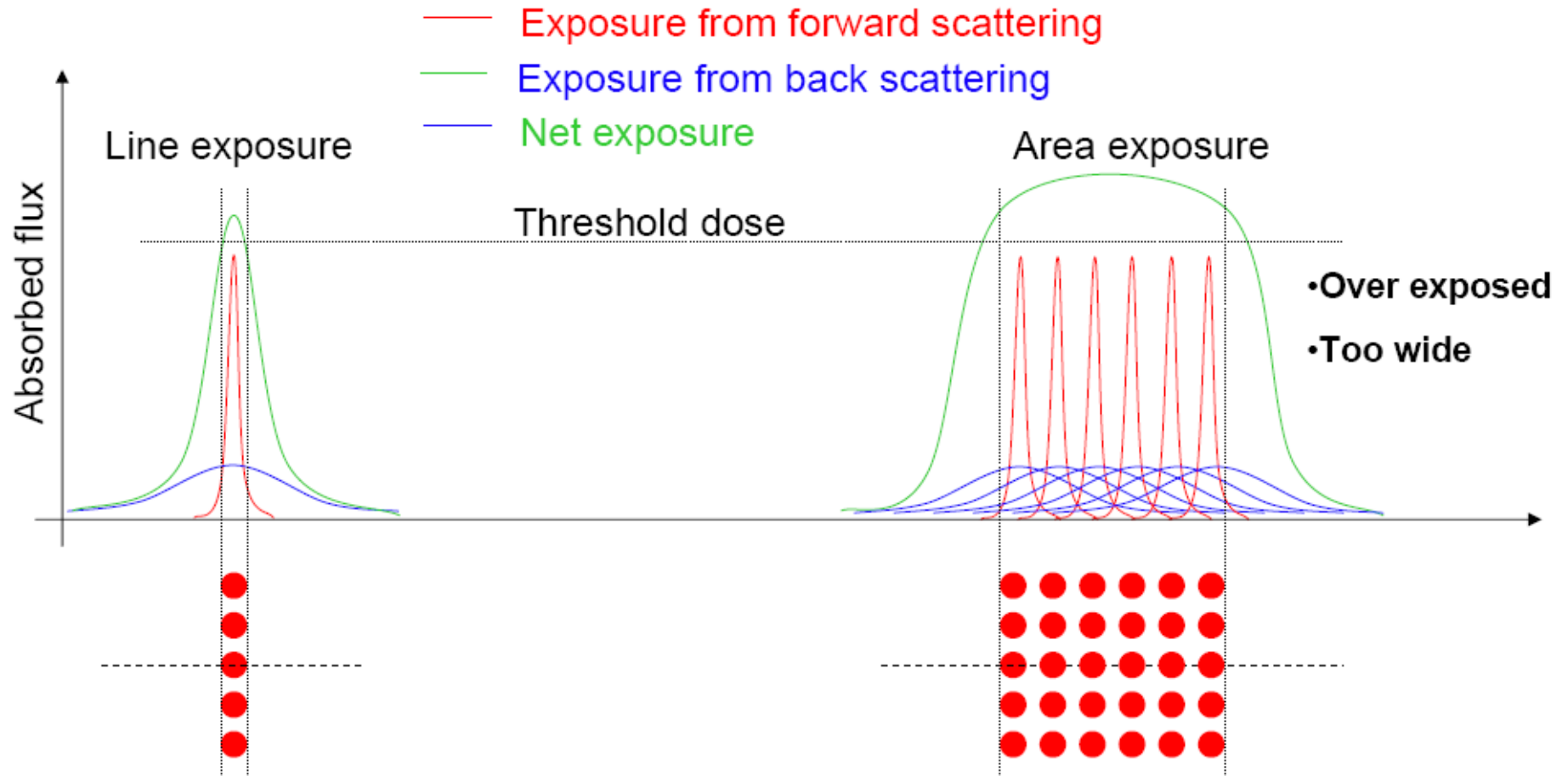


Effets de proximité

- Dose effective plus grande pour les motifs de grande surface
- Doses plus faibles sur les bords des motifs
- Difficulté de réalisation de réseaux denses



Proximity effect

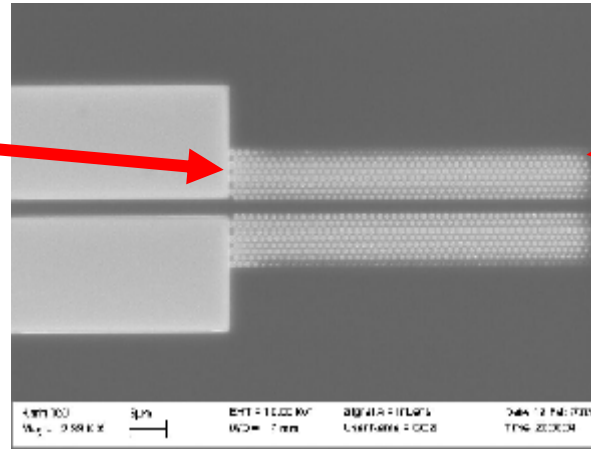


How to beat proximity effects ?

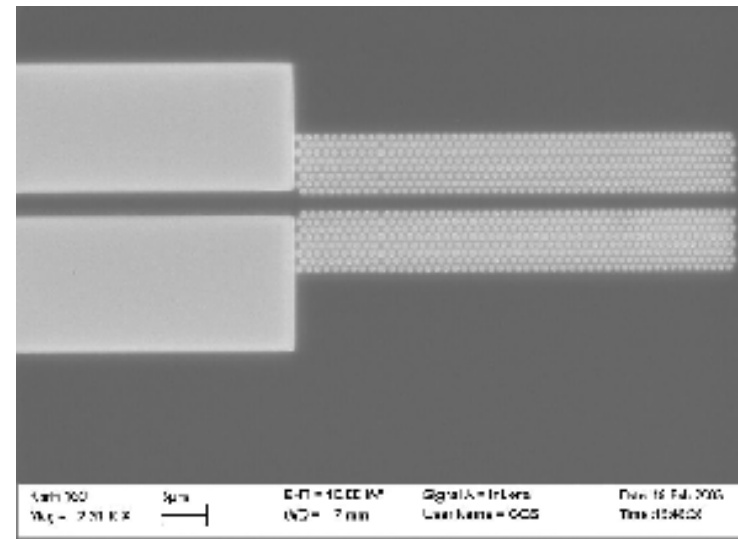
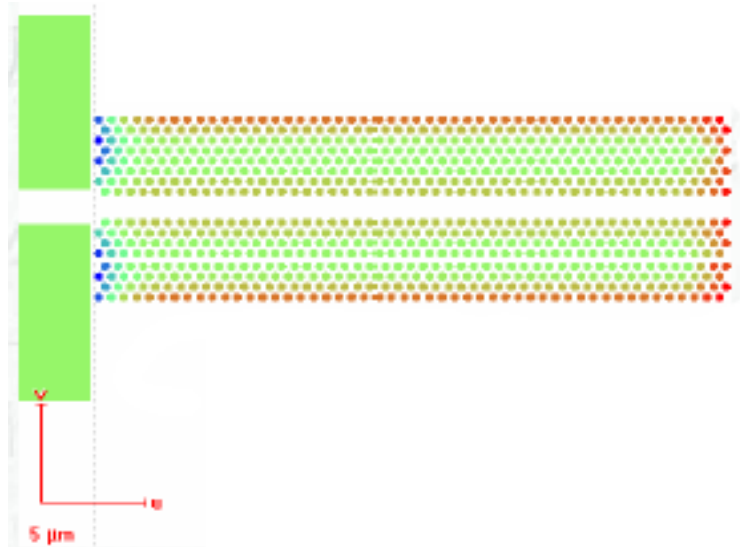
- Specific systems
 - Multi-layer resist with absorbing layer
 - Lithography on membrane
 - Inorganic resists (sensitive to direct beam, not easy transfer of the pattern)
- Use small energy beam
 - Backscattered distance below 100 nm
 - Resolution limited by forward scattering : only for thin resist layer
- Use high energy beam
 - Dilution of proximity effect on large area
- Dose correction
 - Optimization of the dose for regular array of small objects
 - Empirical correction (higher doses for smaller structures)
 - Simulation of proximity effect and software dose optimization

Proximity effect : software correction

Over-exposure



Under-exposure



Which system for ebeam lithography ?

SEM conversion

- Conventional SEM
- Almost no SEM modification
- Hardware controller
- Low cost : $< 0,3 \text{ M€}$



Dedicated system

- Based on SEM system
- Perfect integration
- Interferometer stage
- Focus correction
- Intermediate cost $< 1 \text{ M€}$



Ebeam writer

- High energy column
- Dedicated electron optic
- High reproducibility
- Automation
- High cost ($> 3 \text{ M€}$)

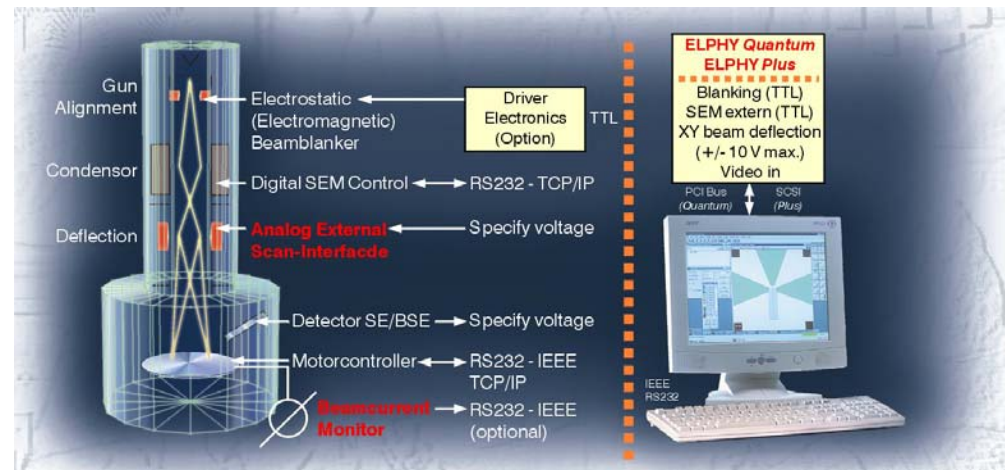


Comparaison des sources d'électrons

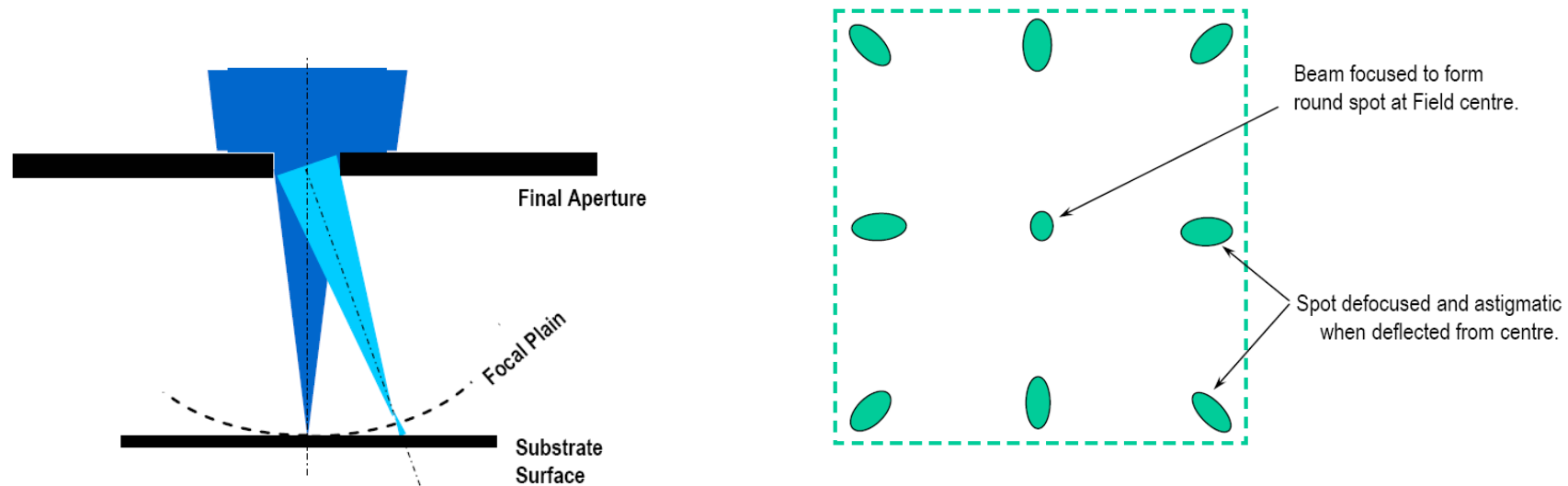
Source	Tungstène	LaB ₆	Cathode chaude	Cathode froide
Emission	Thermique		Emission de champ	
Brillance (A/cm ² /str)	10 ⁵	10 ⁶	10 ⁸	10 ⁹
Taille de source	25 μm	10 μm	20-25 nm	5 nm
Taille de faisceau (20 kV)	~5 nm	~4 nm	~2 nm	~2 nm
Dispersion en énergie	2-3 eV	2-3 eV	0,9 eV	0,22 eV
Vide requis (mbar)	10 ⁻⁶	10 ⁻⁸	10 ⁻⁹	10 ⁻¹⁰
Courant max (nA)	1000	1000	100	1
Stabilité du courant	~1%/h	~1%/h	~1%/h	~20-30%/h

Adaptation de MEB

- Sur le MEB : beam-blanker, cage de Faraday
- Hardware :
 - Contrôle du faisceau (DAC)
 - Contrôle blanking (TTL)
 - Contrôle motorisations
 - Commandes microscope
- Software :
 - Dessin des motifs
 - Préparation des données
 - Imagerie et alignements
- Fournisseurs :
"Fait-Maison", Raith, NPGS, Nanonic, Xenos, ...
5-50 k€

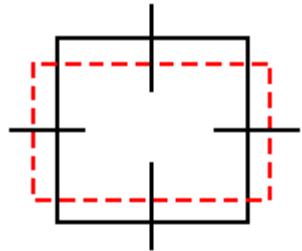


Distorsion de champ

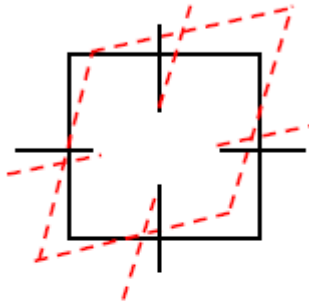


- Limitation du champ d'écriture (50-500 μm)
- Nécessité de déplacer mécaniquement l'échantillon sous le faisceau
- Alignement des systèmes de coordonnées mécaniques et électronique
- Pas de possibilité de continuité entre champs sans platine interférométrique

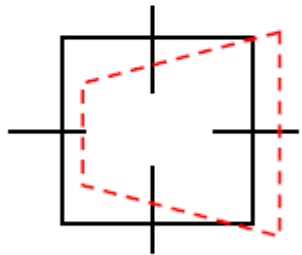
Corrections du champ



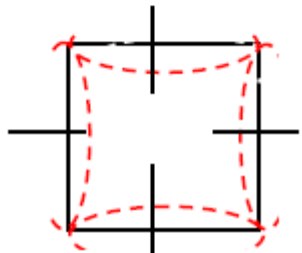
Echelle des deux axes



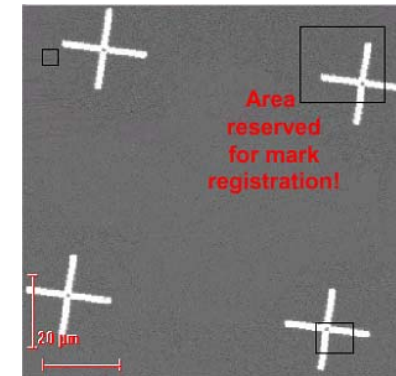
Rotation des deux axes



Pivot



Distortion



Alignement

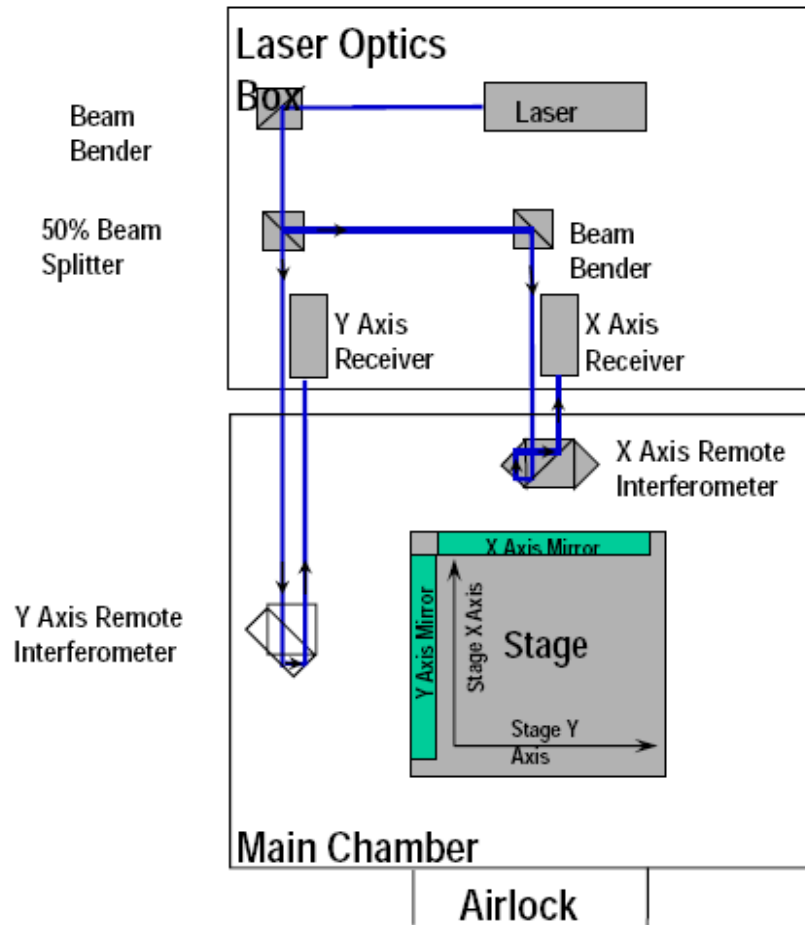
- Pourquoi ?
 - Procédés technologiques à plusieurs étapes
 - Utilisation de plusieurs jeux de paramètres
 - Localisation d'objets dispersés
- Alignement à l'échelle du wafer
 - Correspondance des coordonnées platine
 - Alignement des directions du champ électronique et des directions de la platine
 - Précision limité à 10 μm pour une platine mécanique
- Alignement individuel du champ
 - Observation de croix d'alignements
 - Eventuellement automatique
 - Précision < 100 nm

Systemes dédiés

- Intégration "parfaite" software/hardware
- Platine interferométrique
- Mesure de la hauteur échantillon
- Fournisseurs : Raith, Xenos, ...



Laser interferometer stage



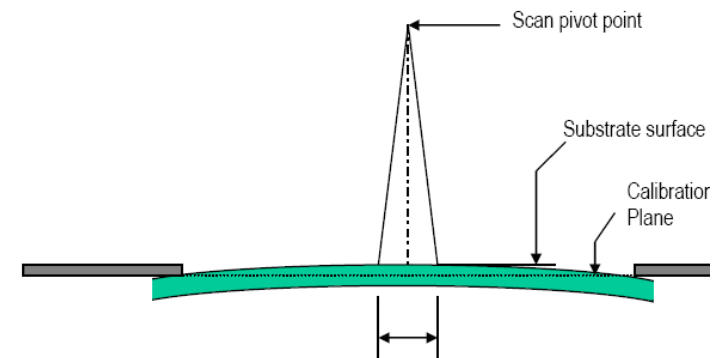
- Interferometry between two laser beams
- Better than 5 nm accuracy
- Different writing fields are perfectly aligned. Stitching is possible
- For conventional SEM, the accuracy is about 5 μm . Stitching is not possible. Precise alignment of different fields requires local alignment marks

Variation de hauteur du substrat

Mauvaise planéité, courbure du substrat

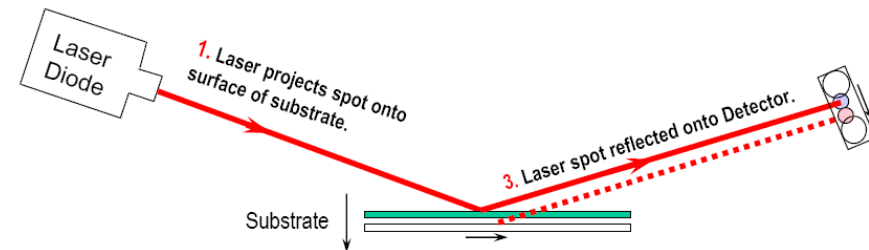
⇒ La hauteur du substrat varie
avec la position

⇒ Variation du focus,
décalibration des champs



Détermination de la hauteur

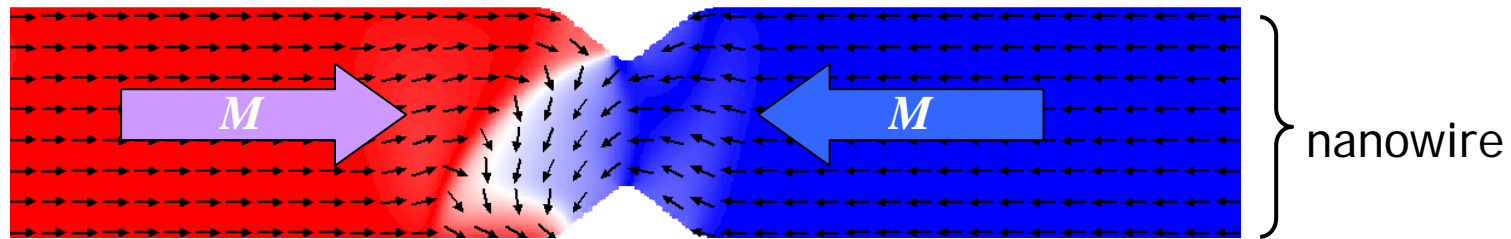
- Interpolation 3 points
- Mesure par réflexion d'un laser



Correction

- Modification du focus
- Modification hauteur échantillon

Domain walls in nanowires



Domains walls in nanowires = single nano-object

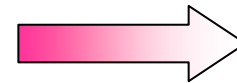
Control :

- External magnetic field
- Shape (notch, angle, V shape...)
- Current

- Propagation dynamic
- Influence of "defects"
- Spin-torque
- Transport
(magnetoresistance, mesoscopic physics)
- ...

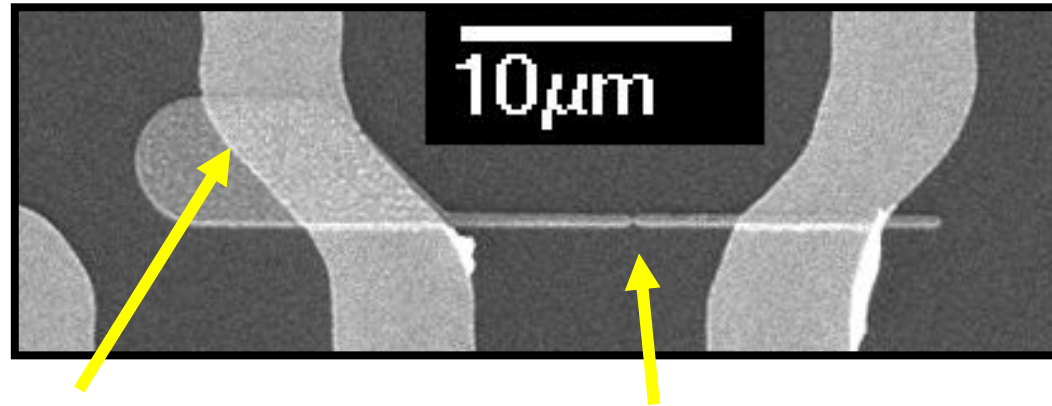
Localization :

- Magnetic imagery
- Transport measurement



- Magnetic memories
- Magnetic logic

Depinning from a notch : the device



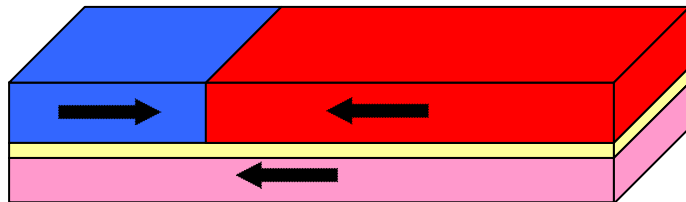
Nucleation Pad

Notch

GMR multilayer

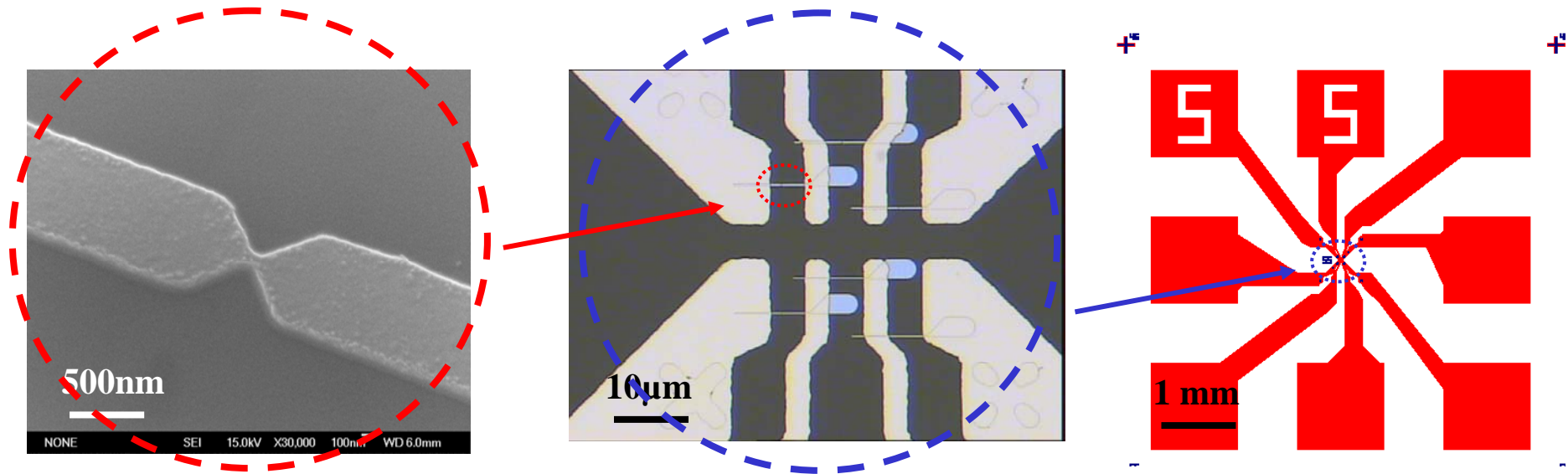
Ta(3) / Cu (2) / IrMn (6) / **CoFe (2.5)** / Cu (3) / **CoFe (4)** / **NiFe (15)** / Ru (6)

2.3% GMR, 1200 Oe pinning field



Direct relation between the resistance and the position of the domain wall

Contacts Électriques



Objet Nanométrique

Mesure Macroscopique

- Complémentarité Ebeam - Optique

Structuration En Plusieurs Niveaux

ETAPE:

1) Définition grille
(Des Croix)

METHODE TECHNOLOGIQUE:

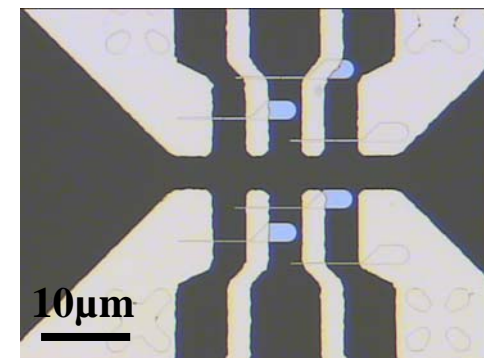
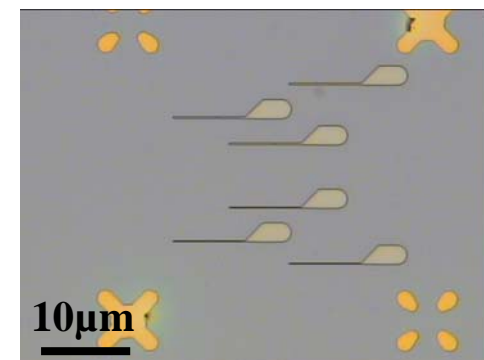
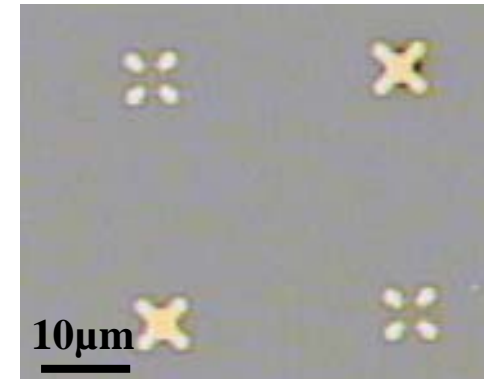
1) Litho UV
+
Lift-off Ti/Au

2) Définition du MOTIF

2) Lithographie Électronique
Lift-Off...
Gravure avec masque...

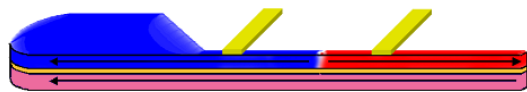
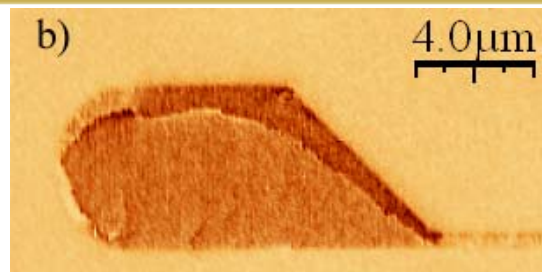
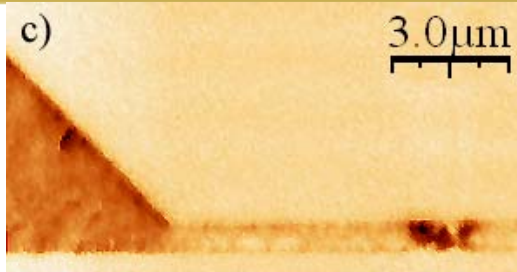
3) Contacts Macroscopiques

3) Lithographie UV
+
Lif-Off Ti/Au

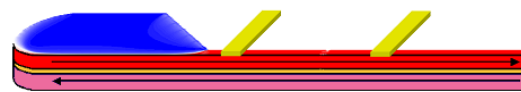


Images en Microscopie Optique

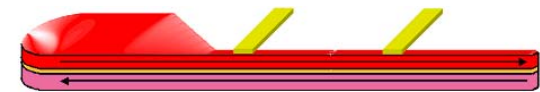
Pinning and depinning of DW



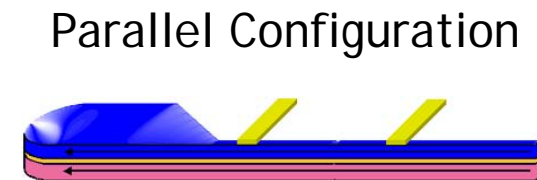
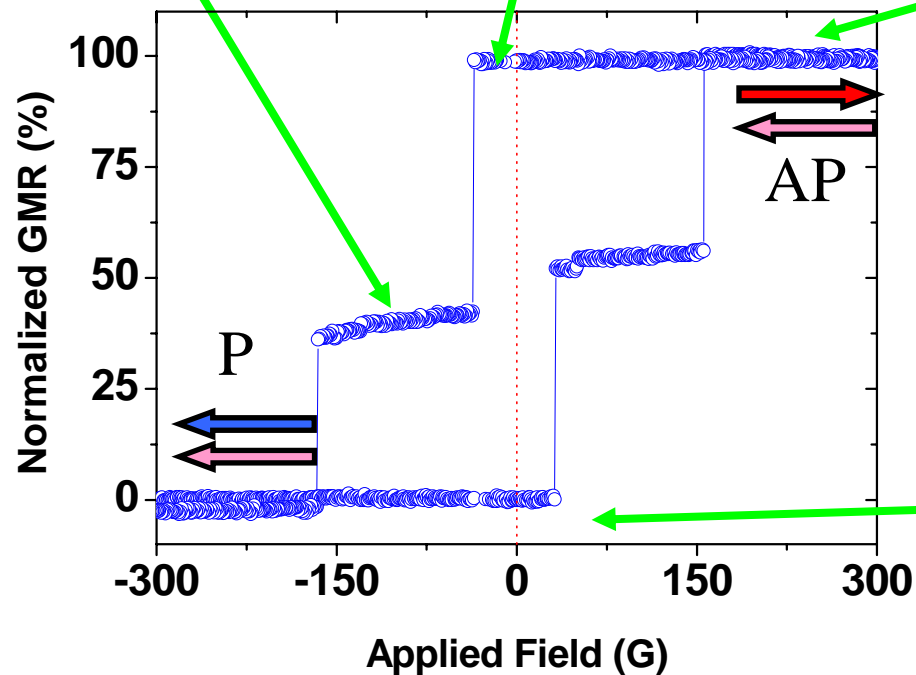
Tail to Tail DW
Pinned



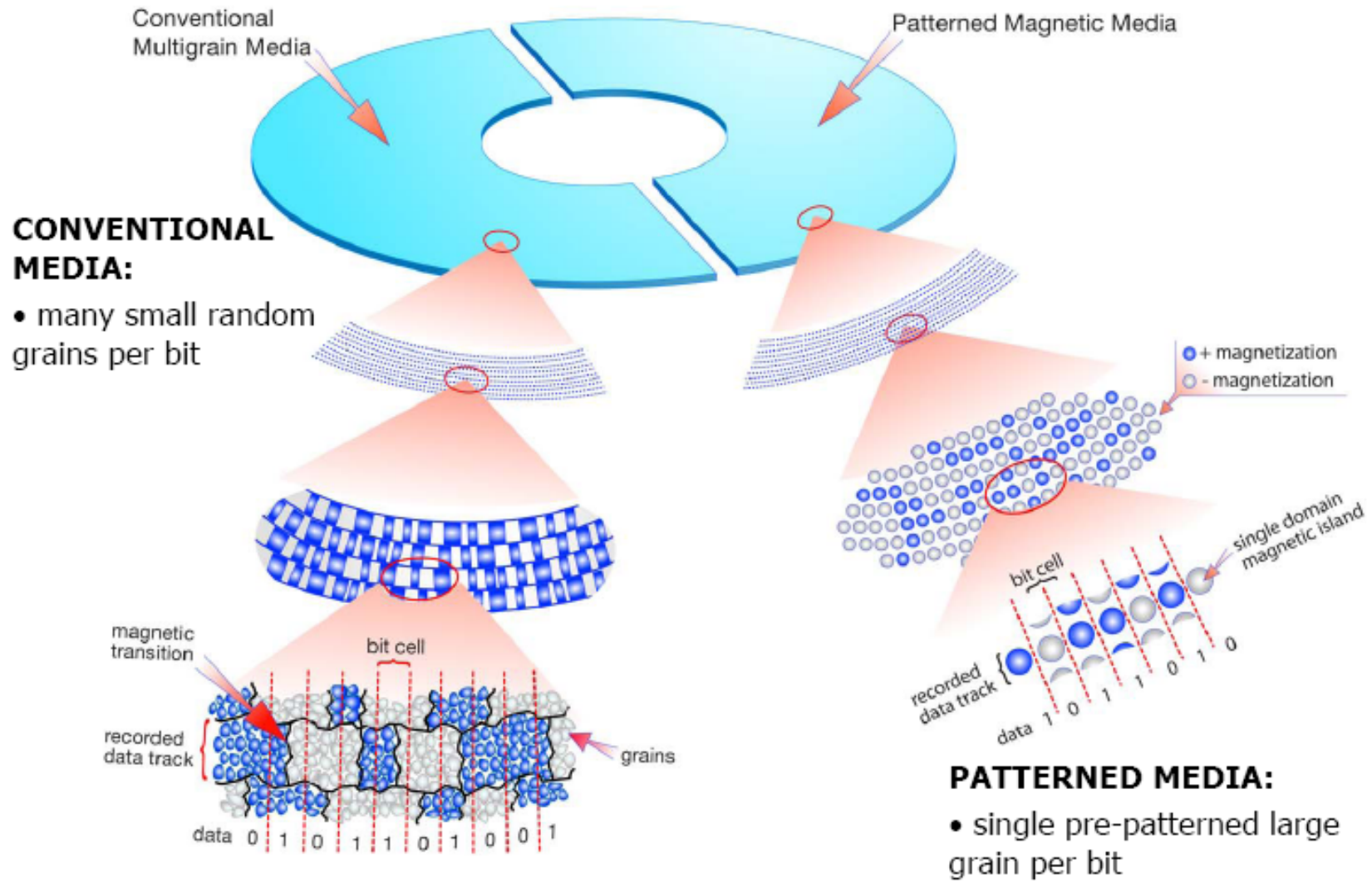
DW nucleated



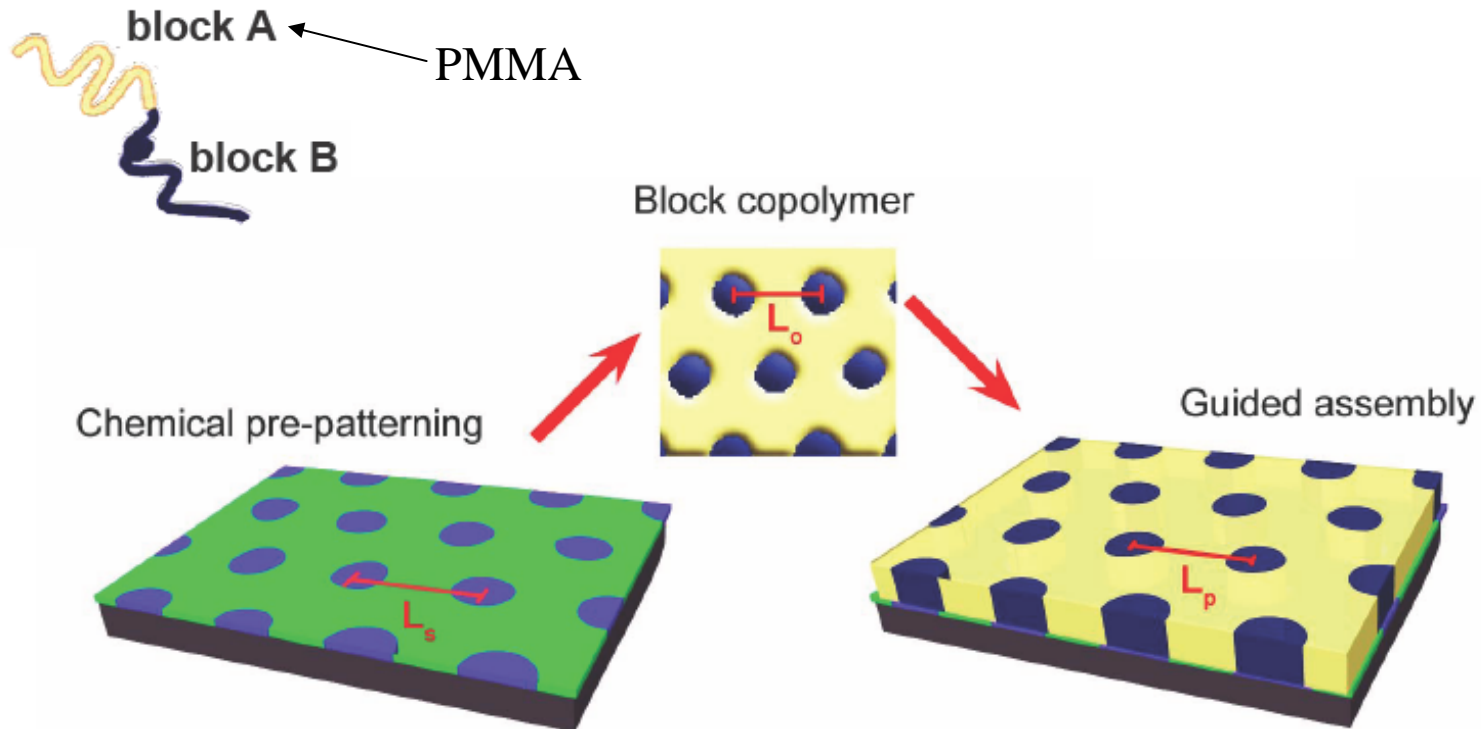
Anti-Parallel
Configuration



Bit Pattern media pour l'augmentation des densités de stockage des disques durs magnétiques



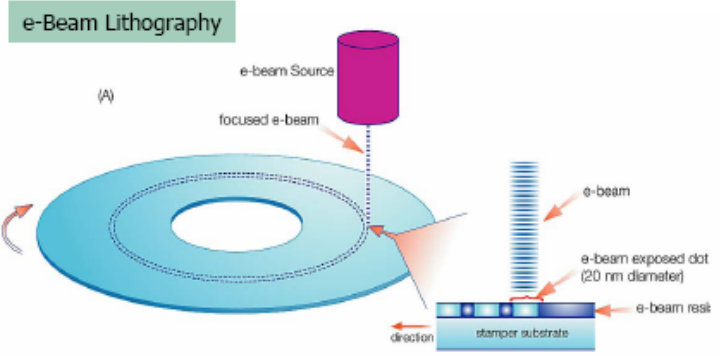
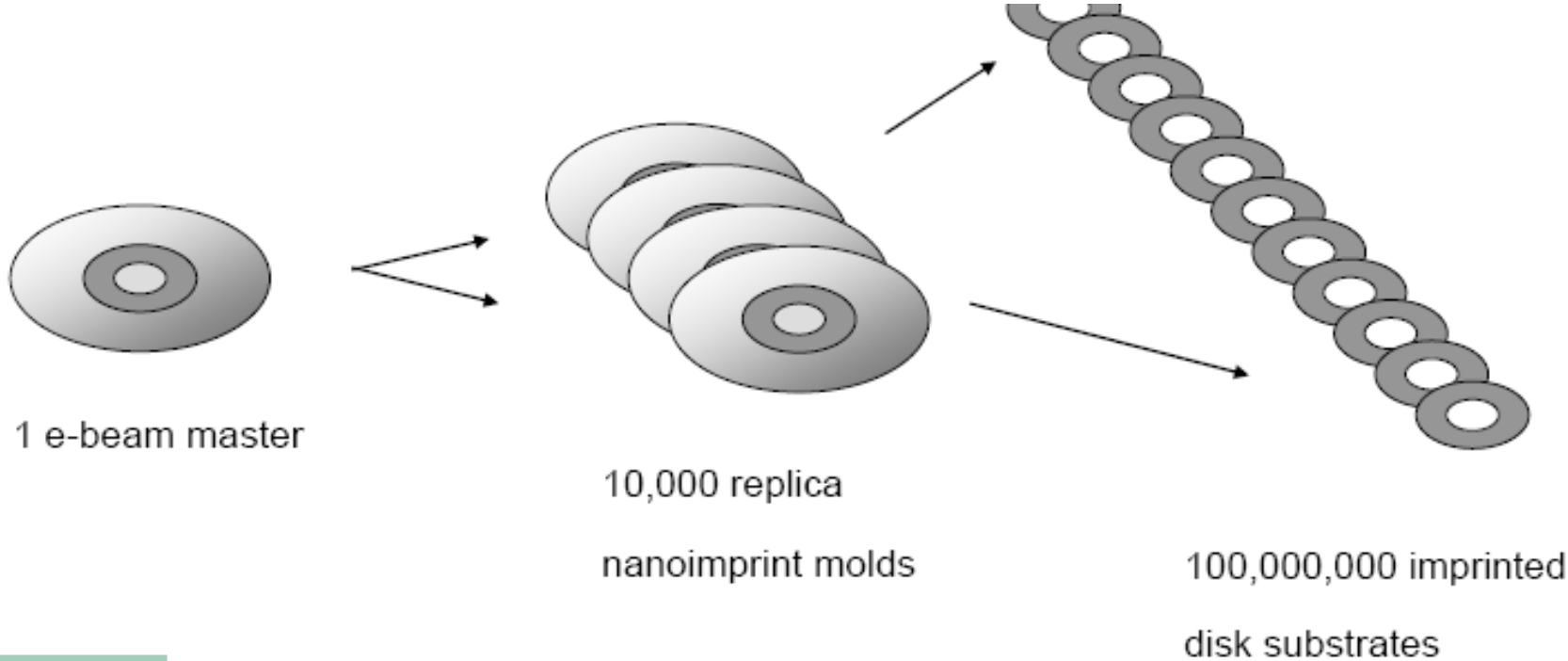
E-beam est cher et amène a d'importantes distributions de taille de plots et de distance entre plots : solution block co-polymers



M. P. Stoykovich, M. Muller, S. O. Kim, H. H. Solak, E. W. Edwards, J. J. de Pablo, P. F. Nealey, *Science* 2005, 308, 1442.

L_s can be 1, 2 or 4 times larger than **L_p** → effet multiplicatif

Fabrication de millions de disques durs par trimestre



"Glaces de spin" artificielles

