

LITHOGRAPHIE ELECTRONIQUE



Franck CARCENAC
LAAS - CNRS 7, avenue du Colonel Roche
31077 TOULOUSE Cedex 04 - FRANCE
e-mail : fcarcena@laas.fr



Buts du cours

- **Comprendre :**
 - **comment ça fonctionne ?**
 - Origine de la lithographie électronique
 - Principes physiques qui s'y rattachent
 - Différents types de machines
 - Principes de fonctionnement
 - **où sont les limites ?**
- ☞ **Comment optimiser une demande de litho. Élec. ?**
- ☞ **Comment être utile et efficace ?**

Lithographie ... pourquoi électronique ?

- Diminuer la longueur d'onde
- $\lambda_{200\text{keV}} = 0.0027\text{nm}$ - $\lambda_{20\text{keV}} = 0.0086\text{nm}$
- Simple à produire et à mettre en forme:

Mais ...

- Résolution max. $\sim 5\text{nm}$ à 200kV et $\sim 20\text{nm}$ à 20kV
(sur échantillon massif)
- Lent

Différentes techniques de lithographie électronique



- **Faisceau formé** (variable shaped beam)
 - Machines industrielles (masques DUV)
 - Excellente résolution (45nm), rapide ... mais chères



- **STM**
 - Très haute résolution
 - Très lent



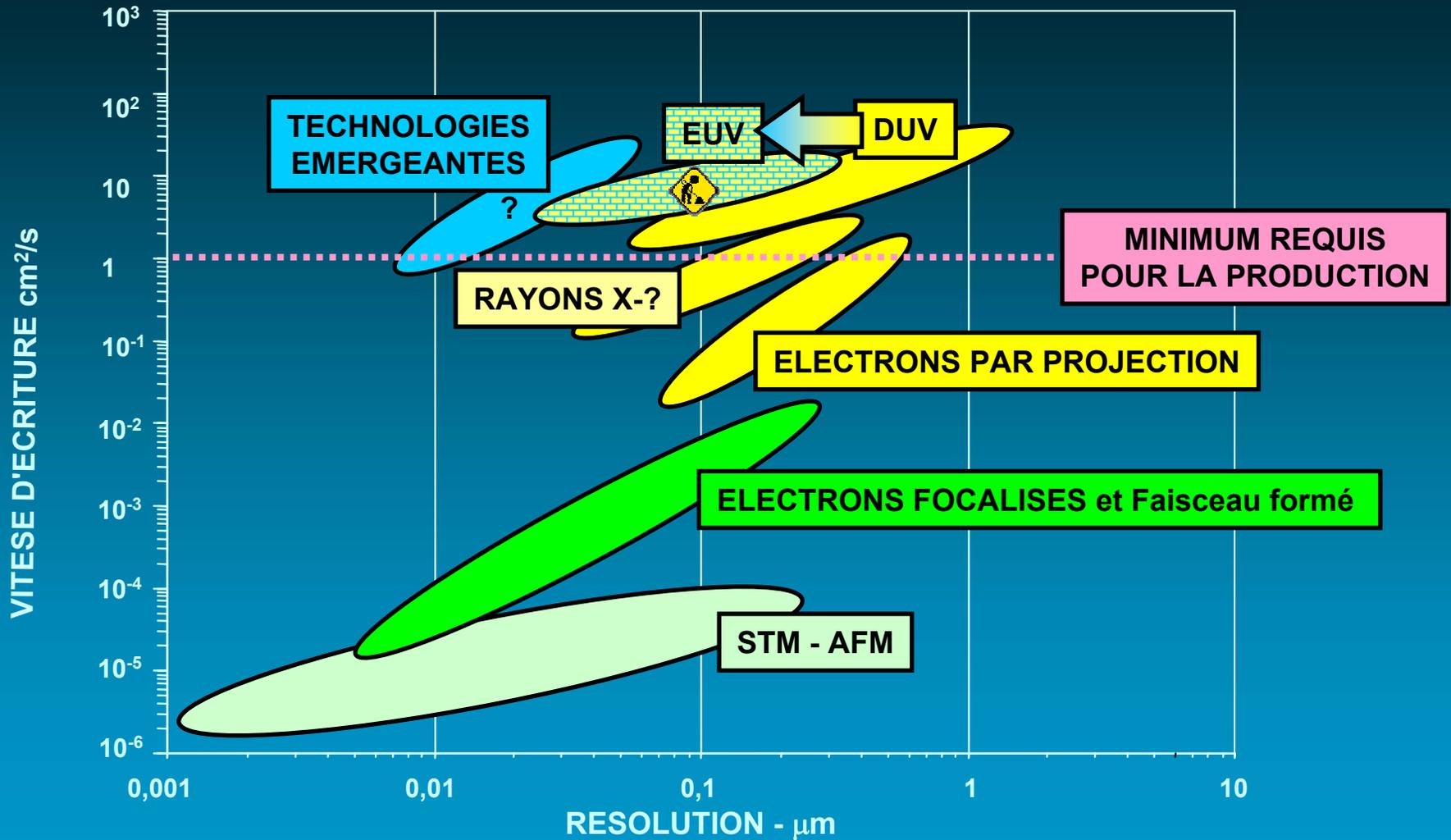
Écriture directe de motifs atomiques, réalisés et observés par un microscope à effet tunnel. Ces deux idéogrammes (Yuán Zi) signifient "atome" en chinois et sont constitués par des atomes de fer sur une surface de cuivre (figure obtenue par D.M. Eigler et ses collaborateurs au centre de recherche IBM d'Almaden).

- **Projection (SCALPEL)**
 - Standby ?
- **Micro-colonnes**
 - standby

- **Faisceau focalisé**
 - haute résolution ...
 - Pas de masque



NANOLITHOGRAPHIE : SITUATION "ACTUELLE"



PRODUCTION DE MASSE
 MASQUES NECESSAIRES

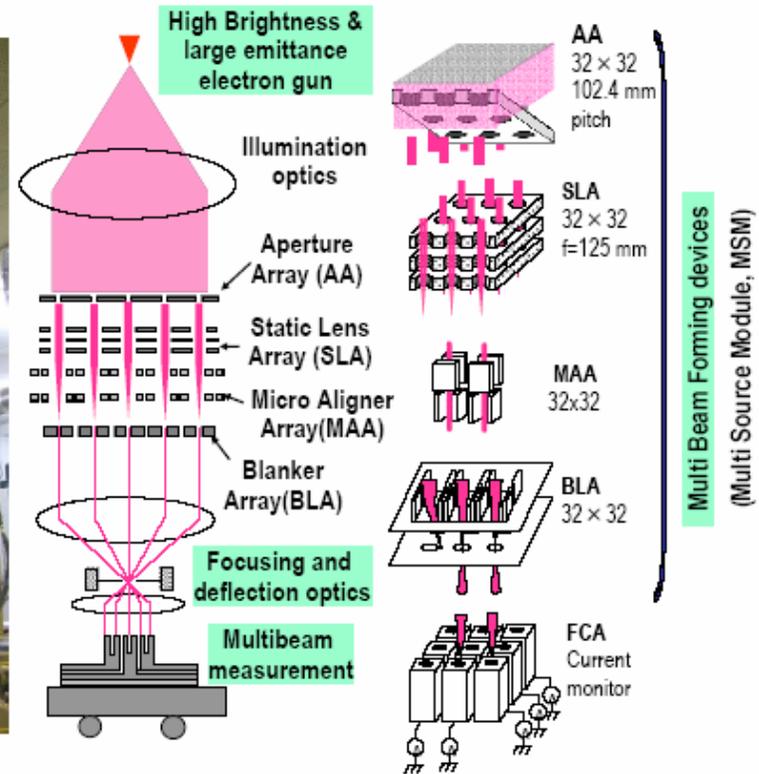
MASQUAGE DIRECT

Projet internationaux

BLA (Blanker Array) ML2 system



POL (Proof of Lithography system)



NEDO Project

(NEDO: New Energy and Industrial Technology Development Organization)

September 23, 2005, M. Yamake, ASET

CPL Workshop, 2005

Source: NEDO web site: www.nedo.go.jp

Report No. 100003007

12

NANOFABRICATION AU LAAS : HR-EBL



- **FEI - Philips CM20 TEM/STEM (200kV)**
- **canon à émission de champ Schottky :**
 - stabilité d'émission
 - forte densité de courant
 - **taille min. du faisceau : 1nm**
- **Adapté à l' EBL**
 - DAO
 - contrôle externe du faisceau
 - **escamoteur de faisceau (lent)**
 - détecteur d'électron secondaire
 - **Taille des échantillons 4x4mm**
 - **Surface de travail Ø2mm**
 - **Résolution 5nm**
 - **Pas min. 30nm**
 - Exposition sur 1 champ : 40µm – 800µm
- **Imagerie en transmission opérationnelle**

NANOFABRICATION AU LAAS : EBL



- **RAITH 150**
- **Filament** : émission de champ Schottky
- **Tension d'accélération** 200 eV - 30 KeV
- Courant de faisceau : 4 pA - 20 nA
- **Résolution** : 20 nm @ 20 KeV (démonstré sur 4")
- **Pas min.** : 80nm @ 20keV (110nm sur 4")
- Fréquence de balayage : 10 MHz
- Taille des champs : 0,5 μm - 2 mm
- **Raccordements** : <60nm
- **Alignement** : <60nm
- **taille des échantillons** : 6"
- Sas d'introduction automatique pour 1 plaque
- Contrôle de la planéité
- Compacte

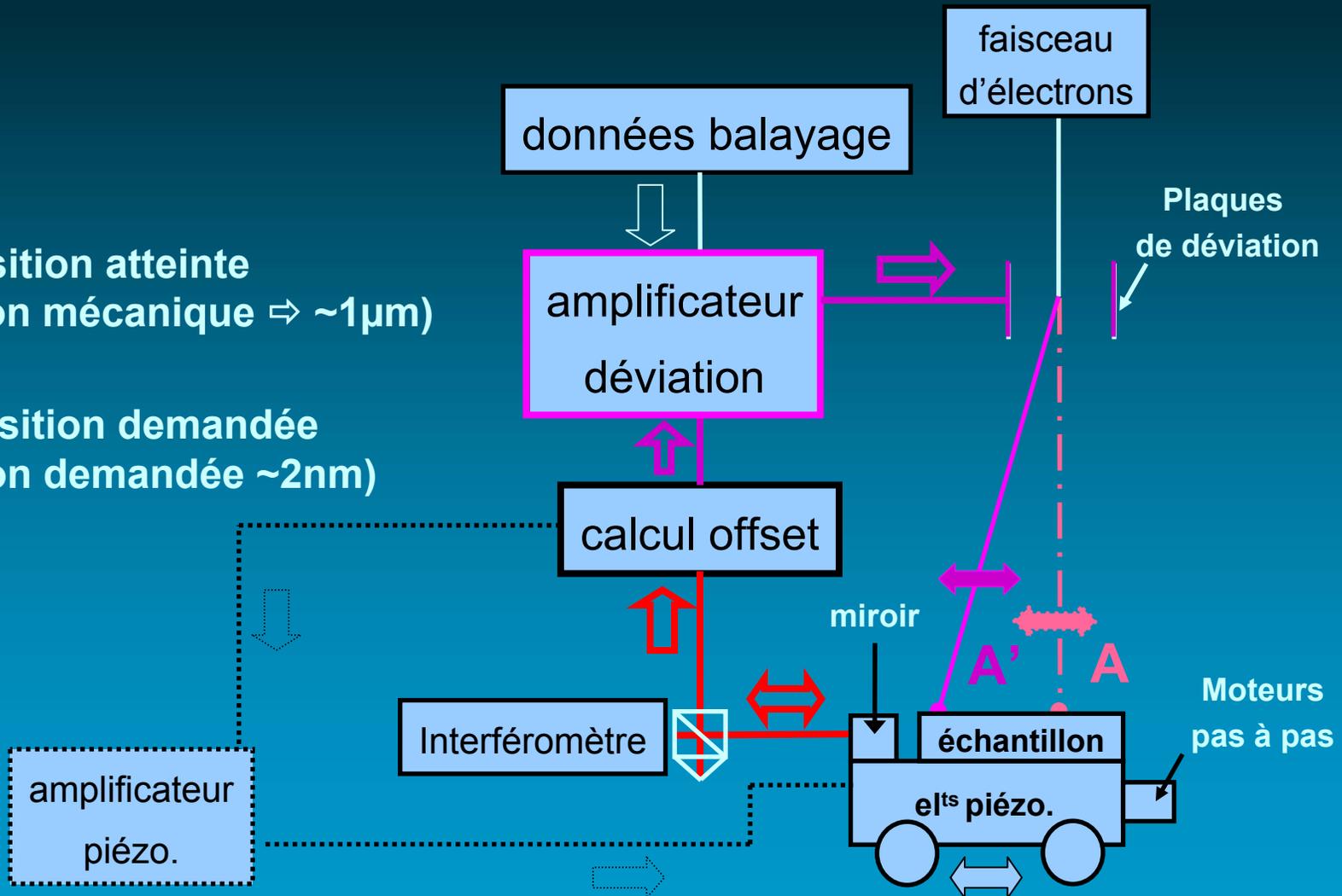
LITHOGRAPHIE ELECTRONIQUE

COMPOSITION DU SYSTEME

- optique électronique et imagerie d'un MEB
- + escamotage du faisceau # « beam blanking »
- + pilotage externe du faisceau (balayage vectoriel)
- + couplage C-D.A.O./ balayage faisceau /BBLK
- + interférométrie LASER (HeNe)
 - positionnement précis : 2nm
 - calibration : taille des champs, distorsion et raccordement
 - alignement : lecture de position (détection de marques)

LITHOGRAPHIE ELECTRONIQUE : SYNOPTIQUE

- **A** : position atteinte
(précision mécanique $\Rightarrow \sim 1\mu\text{m}$)
- **A'** : position demandée
(précision demandée $\sim 2\text{nm}$)

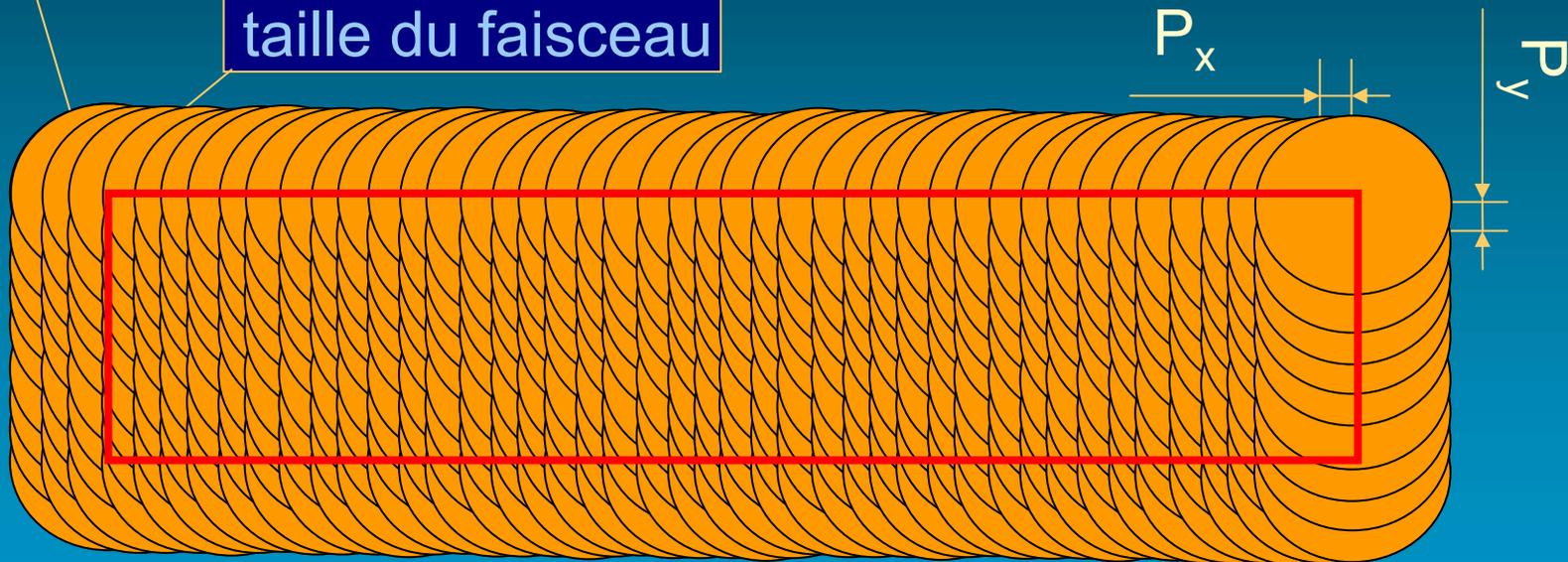


LITHOGRAPHIE ELECTRONIQUE : PRINCIPES

INSOLATION

taille révélée \approx taille du faisceau $\times 3$

taille du faisceau



Contrôle dimensionnel

Taille dessin = taille désirée - taille révélée

LITHOGRAPHIE ELECTRONIQUE :

Paramètres d'insolation

- Doses :

- Dose pour une surface : $\sigma_{(\mu C/cm^2)} = \frac{I_{(\mu A)} \cdot t(s)}{S_{(cm^2)}} = \frac{I \cdot t_{point}}{p_x \cdot p_y}$

- Dose pour une ligne : $\sigma_{(nC/cm)} = \frac{I_{(nA)} \cdot t(s)}{L_{(cm)}} = \frac{I \cdot t_{point}}{p_x} \text{ ou } \frac{I \cdot t_{point}}{p_y}$

- Dose pour un point : $\sigma_{(pC)} = I \cdot t(s) \text{ ou } I \cdot t_{point}$

LITHOGRAPHIE ELECTRONIQUE

Phénomènes mis en jeu

- **Création ou rupture de liaison :**
 - résine organique : 6 – 10eV → électrons secondaires
 - résine inorganique : > 50eV → électrons rétrodiffusés
- **Résine positive :**
 - rupture de liaisons → ↗ poids moléculaire (ex.: **PMMA**, *PMMA/CoMAA*, *PMGI*, *ZEP520*)
- **Résine négative :**
 - créations de liaisons → ↗ poids moléculaire(ex. : **ma-N 2400**, *PMMA*, *HSQ*, *calixarene*)
- **Résine négative à amplification chimique :**
 - rupture de liaisons → création de radicaux
 - réticulation activée thermiquement (PEB – Post Exposure Bake) → ↗ poids moléculaire (ex. : **SU8**, *KRS-XE*, *UVNxx*, *SAL601*, *SNR200*, *AZ-PN114*)
- **Matériaux inorganiques :**
 - *changement de phase, de cristallinité, rupture de liaisons ou autorévélant (ex.: **WO3**, **AlF3**, **SiO2**)*

LITHOGRAPHIE ELECTRONIQUE

Facteurs limitants

- **Effets de proximité :**
 - Additifs sur matériaux organiques
 - Localisation :
 - ☞ modèle analytique à 2 Gaussiennes
 - correction locale de la dose

- **Dépendent du couple insolation / révélation :**
 - Densité et forme des motifs
 - Substrat
 - Energie initiale des électrons
 - Résine (positive, négative, réversible, ...)
 - Révélateur

LITHOGRAPHIE ELECTRONIQUE :

Facteurs limitants

$$\sigma = \frac{I \cdot t_{\text{point}}}{p_x \cdot p_y}$$

- **Pas entre points :**
 - fixe la définition des bords de motif
 - ne change pas la durée d'insolation
 - lié à la taille de sonde et à la révélation : si $\Phi_s \nearrow$ le pas peut \nearrow
 - fixe le courant

- **Sensibilité du polymère :**
 - si très sensible \rightarrow limitation par F_{max}
 - \nearrow Pas (voir ci-dessus) \searrow I

- **Surface insolée :**
 - **Si S trop grande durée d'insolation $\approx \infty$**
 - \rightarrow minimiser la surface – modération du demandeur
 - \rightarrow « Mix & Match » - grandes surfaces réalisées par photolithographie

LITHOGRAPHIE ELECTRONIQUE :

Paramètres d'insolation

- **Compromis** : courant / énergie des électrons / pas entre points / technologie de la résine / temps raisonnable
- **Toujours trop long** ex.: plusieurs heures pour couvrir une surface de 1cm^2 par un réseau de lignes de $0.2\mu\text{m}$ de large au pas de $1\mu\text{m}$ avec le PMMA.
- **Temps de déplacement entre champs et temps d'attente de stabilisation du faisceau non négligeables**

LITHOGRAPHIE ELECTRONIQUE

Limites extrinsèques

- **dérive du faisceau :**
 - **climatisation salle**
 - **climatisation de la machine**
(dilatation mécanique : $\approx 1\mu\text{m}/^\circ\text{C}$)
- **champs magnétiques**
- **vibrations mécaniques**
- **planéité**

Lithographie électronique de A à Z

- **Conception du dessin # motifs à réaliser**

Attention aux effets de proximité

Dépend des paramètres d'exposition

- **Réglages**

Comme un MEB !

Les 2 sont liés

- **Exposition / révélation**

Attention aux effets de proximité

Je sais utiliser un MEB !?!

- **caractérisation / mesures**

Où et comment intervenir en tant que demandeur ?

- **C'est simple ?**

Oui ... avec pas mal d'expérience

Lithographie électronique de A à Z

Où et comment intervenir en tant que demandeur ?

- **Conception du dessin # motifs à réaliser**
 - ✓ logiciel de CAO / DAO compatible avec la machine
- *Réglages /exposition:*
 - ✓ *électromicroscopiste aguerri*
- *Révélation*
 - ✓ *Pourquoi pas ?*
- **Caractérisation :**
 - ✓ **MEB imagerie et mesures ... c'est long !**

Intégration dans une technologie

Eléments à prendre en compte ...

- **l'échantillon :**
 - conducteur / isolant
 - sensible aux électrons
 - taille / forme / fragilité / état de surface / planéité / quantité disponible pour les tests / prix
- **étapes antérieures / compatibilité ?**
- **motifs à réaliser : en creux ou en bosse ? surface / densité / taille ?**
- **propriétés de la résine utilisée :**
 - résolution, sensibilité, révélateur, épaisseur, nature
 - gravure ou lift-off
 - résistance aux produits chimiques
 - résistance à la gravure plasma
 - facile à éliminer
- **marques d'alignement : « mix & match »**

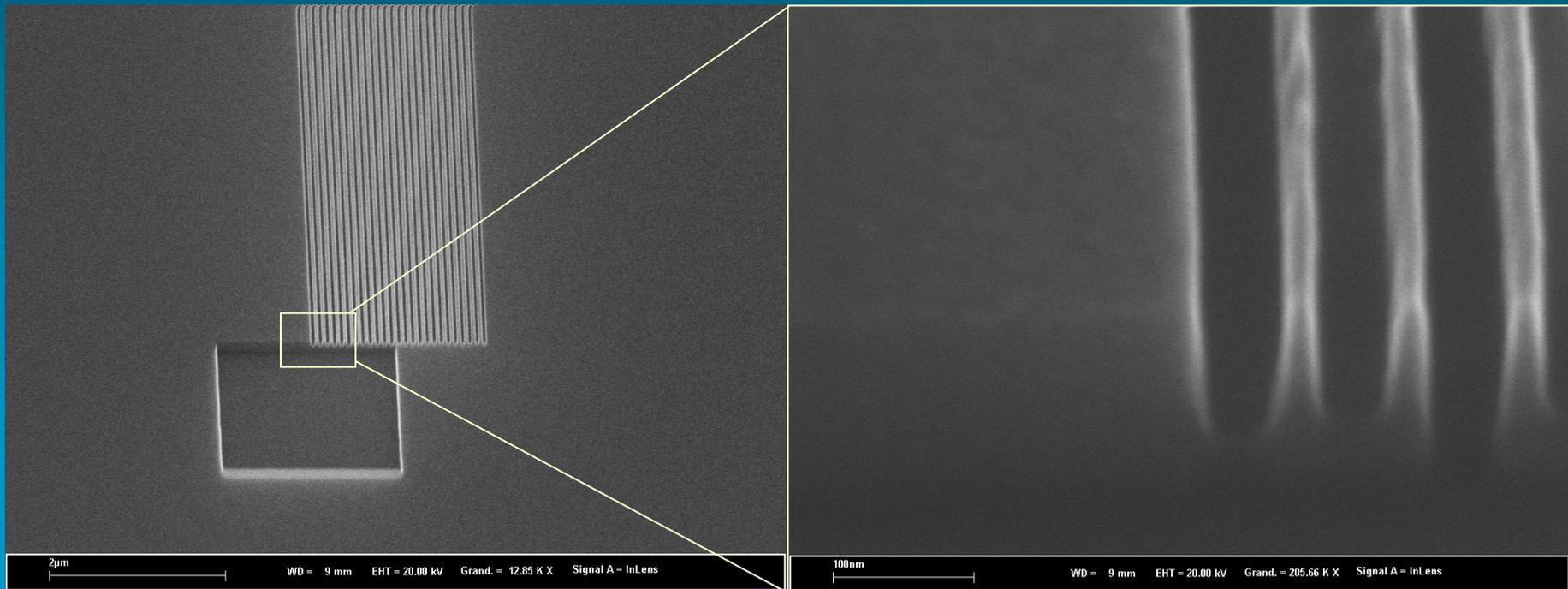
Intégration dans une technologie

Eléments à prendre en compte ...

- **Le dessin :**
 - **Type de logiciel utilisé**
 - CleWin ne gère ni les doses ni les points
 - **Faites attention à la résolution : min.10nm sauf cas particulier**
 - **Dessinez avec symétrie horizontale (attention au dessin fourni en photolithographie... le résultat sur la plaquette est inversé)**
 - **Évitez de mettre des nanostructures en raccord de champ**
 - ☞ **positionnez-les plutôt en milieu de champ**
 - **Formez (informez)-vous ! Dialoguez !**

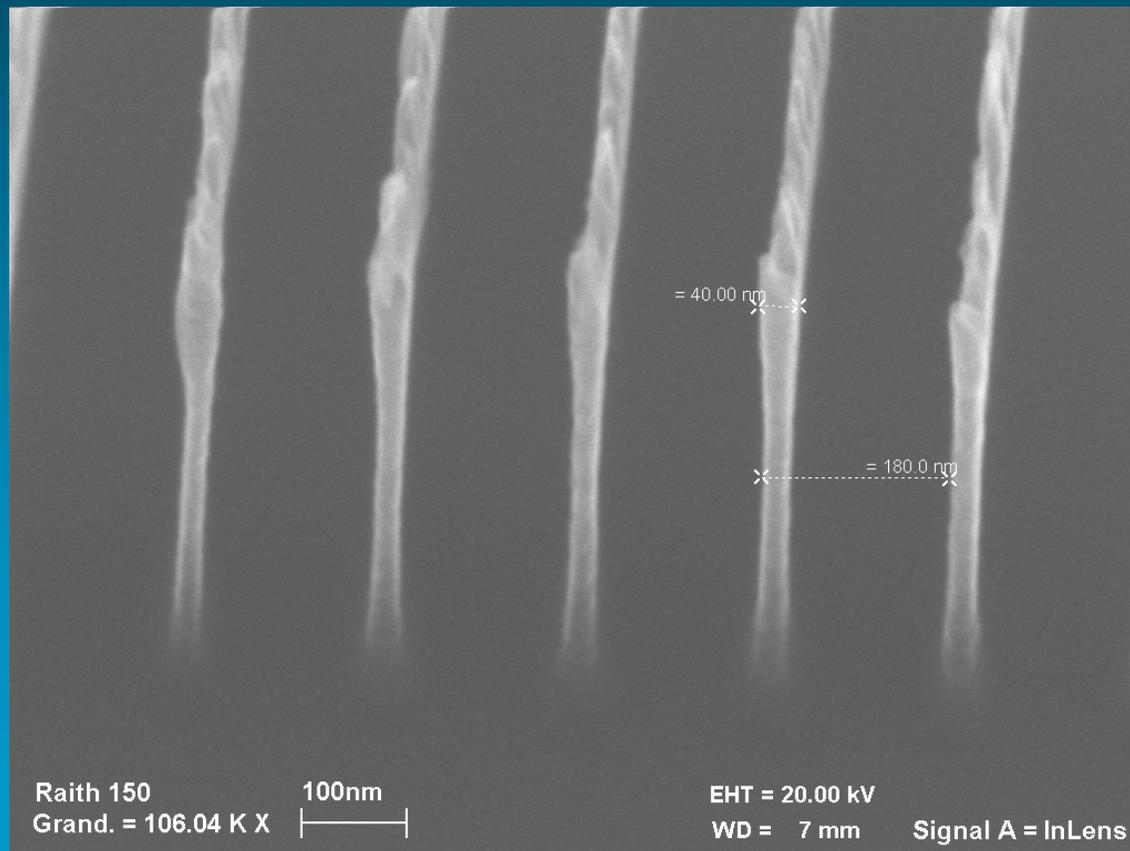
Résultats actuels

- Résine positive : PMMA ép. <math><1\mu\text{m}</math>
 - Résolution 20nm
 - Pas 80nm
 - Utilisation directe en gravure : PMMA:Si / 1:1
 - "Lift-off"



Résultats actuels

- Résine négative : maN2403 ép. 300nm
 - 40nm
 - pas 180nm
 - Utilisation directe en gravure : maN : Si / 1:2



Résultats à venir ...

- **Calibration en cours d'exposition**
- **Alignement sur 4"**
- **Correction des effets de proximité**
- **Nouveaux matériaux / nouvelles propriétés:**
 - **Lift-off avec maN2403 et amélioration du pas min.**
 - **PMGI / Bicouches**
 - **HSQ (négative) : meilleure résistance à la gravure**

Bibliographie

- P. Rai-Choudhury (Ed.) : Handbook of Microlithography, Microfabrication and Microsystems, Vol 1 & 2, SPIE Press - 1997.
- Nanotechnology, numéro spécial de la “Microelectronic Engineering”. Vol. 32, Septembre, 1996.
- Nanometer-Scale Science & Technology, numéro spécial de “Proceedings of the IEEE”. Vol 85, Avril 1996.
- N. Taniguchi (Ed.) Nanotechnology : Integrated Processing Systems for Ultra-precision and Ultra-fine Products, Oxford - University Press, 1997.
- Philip Ball, Made to Measure, Princeton University Press - 1994.
- H.C.Hoch et al (Eds.), Nanofabrication and Biosystems - Cambridge University Press, 1996.
- Semiconductor Industrial Association, The National Technology Roadmap for Semiconductors, 1997.
- <http://www.cst.gouv.qc.ca/ftp/Nanoaccomp.PDF>
- http://www.lps.u-psud.fr/Collectif/gr_27/publications/books/christian/chapitre2.html
- Fundamentals of microfabrication – Marc Madou - CRC Press, (1997)