

Le VIDE en MICRO et NANO-TECHNOLOGIE

Ou le point de vue de l'utilisateur !

Jean-Claude PESANT

Responsable de la Centrale de Technologie de l'I.E.M.N.

École Polytechnique

Palaiseau 9 décembre 2008

M.R.C.T.

Réseau des Technologies du Vide



- « *La technique du vide était il n'y a pas encore très longtemps, presque exclusivement du domaine du laboratoire; elle prend maintenant une importance industrielle et scientifique sans cesse accrue. Sur elle reposent des industries entières, comme la Radio et ses dérivés : télécommandes, radiodétection, télévision, etc...comme l'éclairage, les applications des rayons X, la télémécanique, le cinéma parlant. Dans toutes ces industries, en effet, les progrès sont liés à ceux des **tubes à vide**. On peut encore citer: les réactions chimiques sous vide, le traitement et le dégazage des métaux dont les applications sont en plein développement.... »*

EDITORIAL

Par P. TARBES

Le VIDE Technique-Applications

1ere Année – N° 1

Janvier 1946

De la Société Française des Ingénieurs Techniciens du Vide :SFITV



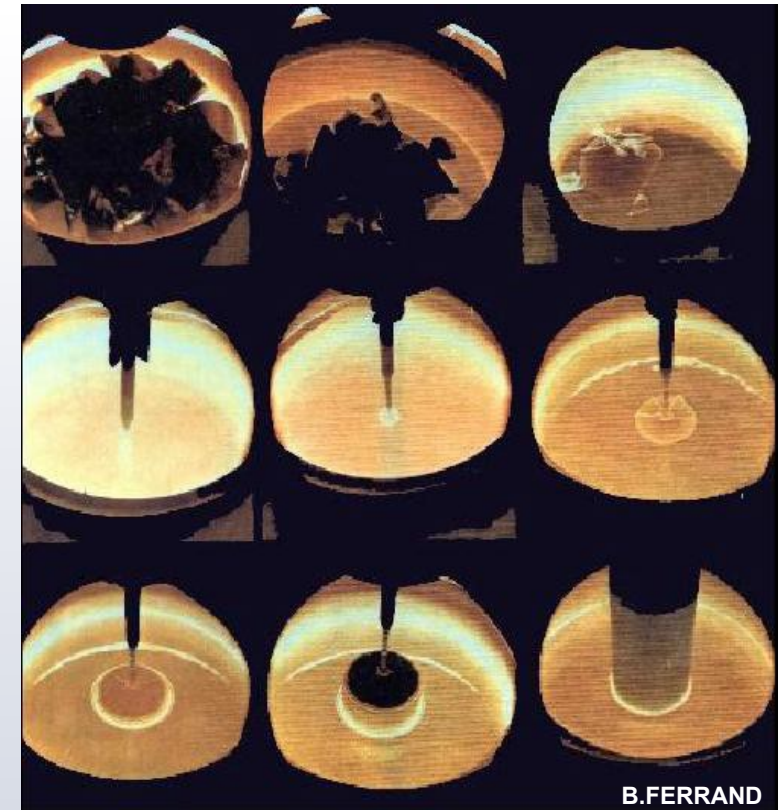
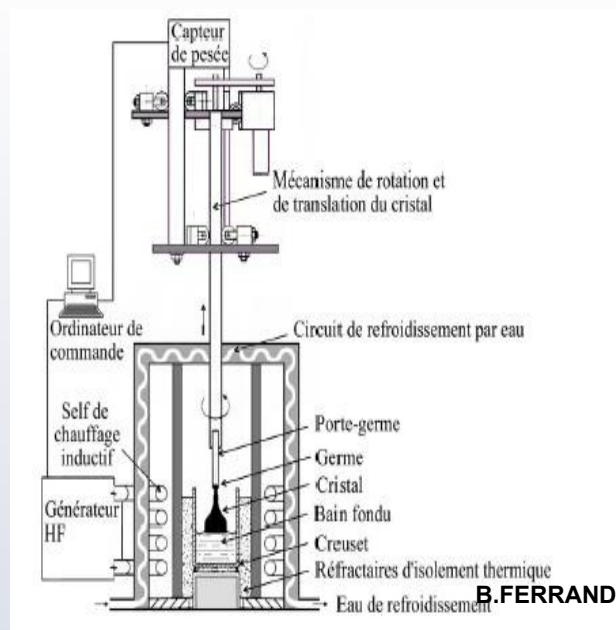
- Même si les TUBES ELECTRONIQUES sont détrônés par les transistors puis par les circuits intégrés et maintenant par des structures nanométriques, on ne peut éluder le fait que, de 1930 à 1970 cette industrie a été des plus florissantes (plus d'une centaine de millions par an ont été fabriqués).
- Une boutade célèbre disait : « *Le vide a créé les tubes électroniques, mais ceux-ci le lui ont bien rendu !* ».
- Quelle somme incroyable de **connaissances théoriques et pratiques** ne leur a-t-on pas consacrée ! Ils ont mis en œuvre presque **tous les domaines** de la **Physique** et de la **Chimie**.
- Et c'est bien à eux que l'on doit les immenses conquêtes de l'électronique...
- Il n'est guère de discipline scientifique qui n'ait bénéficié de leurs possibilités.
- « R. CHAMPEIX; Le vide les couches minces; supplément au n°228; 1985. »



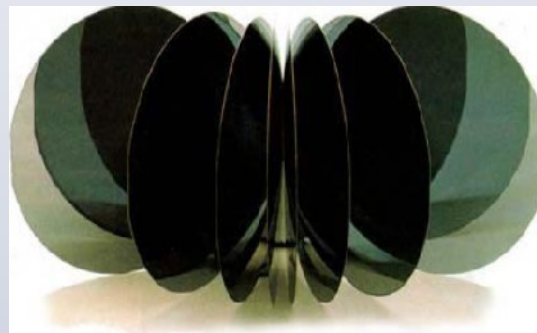
- La Technologie des Semi-conducteurs et des couches minces
- Ce domaine est au confluent de la Physique et de la Chimie à l'état solide, de la science des surfaces, de *la technique du vide*, de la physique des dispositifs et de l'électronique.
- Afin de tenter d'être le plus complet possible...nous allons vous convier à suivre l'ensemble des étapes de fabrication d'un *composant électronique*...d'un **MEMS** ou **NEMS** (Micro ou Nano Electro-Mechanical Systems)

- Tout commence au « tirage du cristal » !
Le vide permet de **dégazer** le creuset et l'enceinte

(méthode Czochralski)



- * Plaquettes de Silicium (Wafers)
- * Substrat...



- Le substrat étant réalisé (ou acheté) on trouve **4** grands types d'opérations pour la fabrication de composants, de circuits, de micro ou nano systèmes:
 - La **Croissance** des couches actives : atomiques, minces
 - La **Lithographie** : optique ou électronique
 - La **Gravure** sèche ou humide
 - Les **Dépôts** CVD (PE,LP,OM...); PVD
- Et **2** autres étapes technologiques :
 - Le **Dopage** par diffusion ou localisé
 - Le **Recuit** thermique : traditionnel, flash
- Ces opérations sont réalisées en salle blanche : ISO 6, ISO 5 et ISO 4; sur 1600m2.
- Personnels techniques permanents : 27 I.T.
- Personnels scientifiques permanents : 45 chercheurs et enseignants chercheurs
- Personnels non permanents : 80 thésards, post docs, stagiaires fréquentent la centrale.

- **Elaboration des couches actives par une technique de croissance : E.J.M. ou M.B.E. (III-V)**

Condition de Knudsen ($\lambda > 1\text{m}$)

Vide « stand-by »: 10^{-10} mbar

Vide « croissance »: $10^{-7} - 10^{-8}$ mbar

Sources solides: **V**:P,As,Sb. **III**: Al,Ga,In...Si,C,Te (P.I. 400l/s et cryogénique)

Sources gazeuses :**V**:AsH₃,PH₃. **III**:Al,Ga,In...Si,Be (P.I. 400l/s; P.cryo; P.turbo)



I.E.M.N.

Ga _{0.47} In _{0.53} As 5.10 ¹⁸ cm ⁻³ 100Å	
Al _{0.48} In _{0.52} As nid 200Å	
Al _{0.48} In _{0.52} As nid 50Å	
Ga _{0.47} In _{0.53} As nid 120Å	
InP nid 120Å	
Tampon Al _{0.48} In _{0.52} As 3000Å	
substrat InP semi-isolant (Fe)	



Plan de dopage
5.10¹²cm²

I.E.M.N.

Exemple de couches

Méthodes caractérisations « in situ » :

- * RHEED de 15 keV et 35 keV
- * Spectromètre de masses: quad
- * Analyseur de gaz
- * ESCA (UPS,XPS) et LEED



I.E.M.N.



- **La lithographie optique**
 - **Opération d'enduction** : La plaquette (substrat + C.act) est enduite de résines photosensibles par centrifugation (**vide**)
 - **Opération d'alignement** : La plaquette « laquée » est insolée à travers un masque, afin d'obtenir après révélation le motif du masque ou son inverse dans le cas de résine négative.
- On peut également aligner le dessin du masque avec des motifs préexistants sur le substrat pour un travail à plusieurs niveaux.*
- Cette technique permet de structurer des couches minces de matériaux afin de créer des transistors, pistes... et autres composants...*
- **Opération de développement** : par gravure chimique, on élimine la résine non photo-sensibilisée.



Aligneur



- **Lithographie électronique** : 2 utilisations possibles :
- Comme précédemment, mais avec des résines électro-sensibles
- En mode « **écriture directe** » : on utilise un « masqueur électronique »
- Composés à effet de champ.

Tensions d'accélération : 20 kV, 50 kV ou 100 kV.

Diamètre de spot minimum : < 10nm

Taille minimum du pixel: 1.25 nm

Courant de faisceau : 100pA à 100 nA.

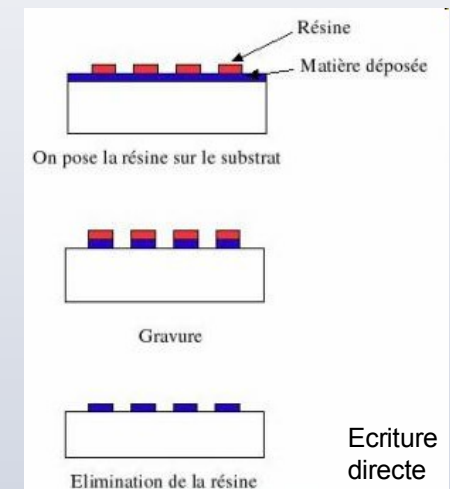
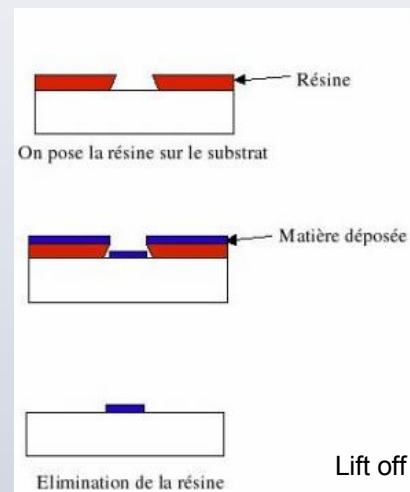
Platine interférométrique: 0,6nm de précision de positionnement

Vide : 10^{-9} à 10^{-7} mbar

- Pompes : ioniques et turbo



**Nanomasqueur « VISTEC
EBPG-5000Plus »**



- **La gravure sèche : par plasma**

consiste à transférer dans une couche ou multicouches, un motif défini par un masque réalisé à la surface de l'échantillon par lithographie UV, X, électronique...

Ce transfert nécessite la mise au point de nb. paramètres :

Au niveau de l'échantillon : nature, anisotropie, rapport d'aspect, sélectivité, cristallinité, rugosité...

Au niveau du plasma : Pression, Débits des gaz réactifs : SF₆, BCl₃, SiCl₄, CHF₃, CF₄, H₂, O₂, He, N₂
Tension de polarisation, Température

Vide: 10⁻⁷ à 10⁻³ mbar.

Pompes sèches et turbo moléculaires.

Pompes sèches dans couloir technique



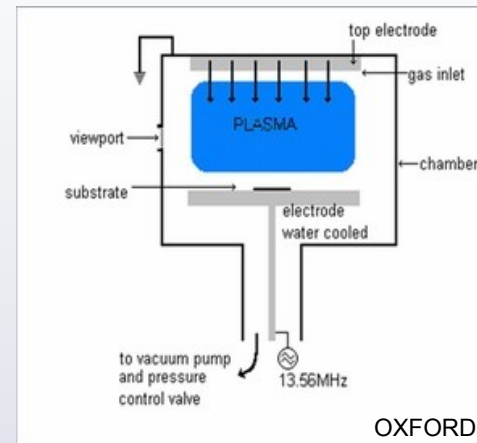
I.E.M.N.



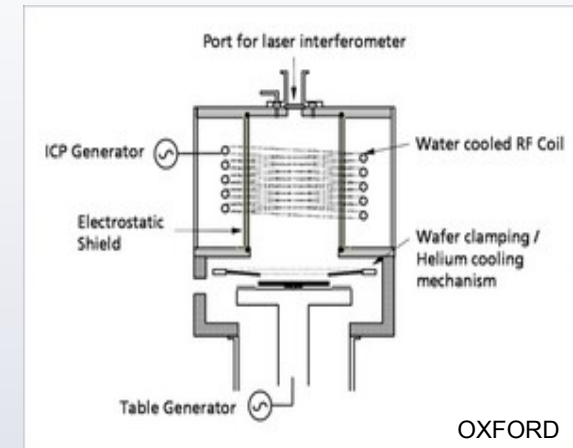
I.E.M.N.



I.E.M.N.



Plasma de type RIE (Reactive Ionic Etching)



Plasma de type DRIE (par Inductif Coupled Plasma)

Le VIDE en MICRO et NANO-TECHNOLOGIE

2 types de procédés de dépôts CVD:

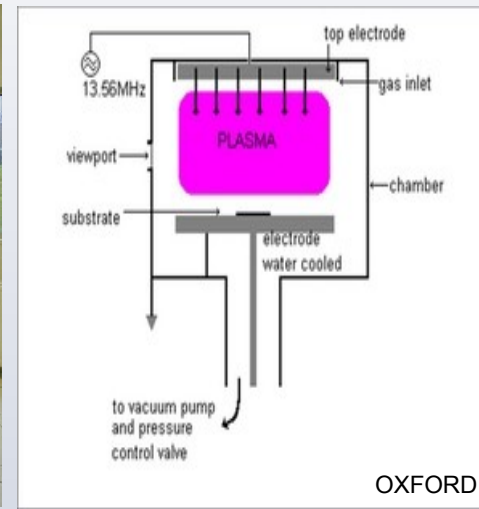
• **Procédés « froids »: PE-CVD:** dépôts de *diélectriques* par voie plasma RF, tels que : SiO₂, Si₃N₄, Si_xO_yN_z... à partir de gaz réactifs : SiH₄, NH₃, N₂O...

Elaboration de 150 à 350°C

• Le Vide s'effectue par pompes sèches et pompes turbo moléculaires : 10⁻⁷ à 10⁻² mbar

• **Procédés « chauds »: LP-CVD:** dépôts de *diélectriques*, de couches sacrificielles de poly-silicium ou couches d'oxydes dopées ou non, par voie thermique, de 600 à 1000°C, à l'aide de gaz tels que : SiH₄, NH₃, N₂O, BCl₃, PH₃...H₂,O₂...

Le vide s'effectue uniquement par pompes sèches: 10⁻³ à 50 mbar.



Pompes sèches

Dépôts par PE-CVD

Installation de dépôts par LP-CVD



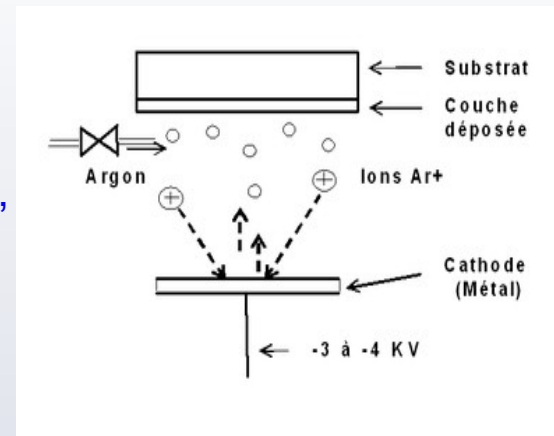
- **Dépôts métalliques par PVD:**

Utilisés dans tous les composants électroniques, opto électroniques, capteurs, micro mécanismes...

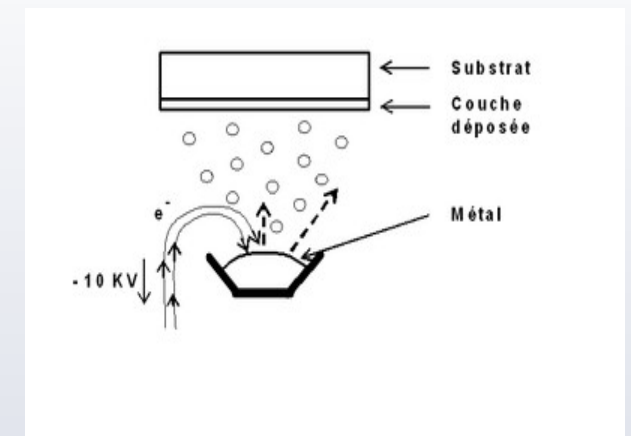
Ils servent à : *contacter des couches actives*,
de mode d'actionnement des μ systèmes, de
plots de contacts...

L'opération s'effectue sous **vide** (10^{-8} à 10^{-5} mbar),
à l'aide : soit d'énergie thermique (évaporation),
soit d'énergie cinétique (pulvérisation)

Pompes : sèches, cryogéniques et ioniques.



Pulvérisation cathodique



Evap. par canon à électrons

- **Implantation Ionique**

Energie : de 12 à 200 keV

Dose : de 10^{11} à 10^{21} at.cm⁻² d'une trentaine d'espèces chimiques

Vide : de 10^{-7} à 10^{-4} mbar

6 pompes: 1 Diffusion + 3 sèches + 2 cryogéniques

Dopage et isolation localisées

Procédés d'aide à la technologie : *dépôts localisés*, faciliter la gravure de composés chimiques stables, réduire la diffusion...

- **Fours de Recuits rapides (RTA)**

- Gamme de températures : 25 à 1200°C (300°C/s)

- Suscepteurs : Si ou graphite recouvert de SiC

- Gaz process: N₂ ou N₂-H₂ ou vide

- Vide : 10^{-7} mbar (pompes sèches et turbo.)



Focused Ion Beam

Outil des nanosciences par excellence !

Possibilité de faire des: gravures, dépôts et implantations à l'échelle nano métrique.

- *Colonne électronique SEM:* 200V à 30 kV
Canon à émission de champ (type Schottky)

Résolution en balayage : 3nm

Vide : 10^{-9} mbar

Une pompe ionique

- *Colonne ionique FIB:* 5 à 30 kV

Source d'ions : métal-liquide (Ga)

Intensité faisceau : 1 pA à 20 nA

Résolution : 5nm

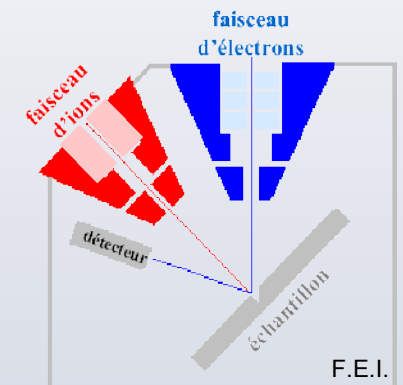
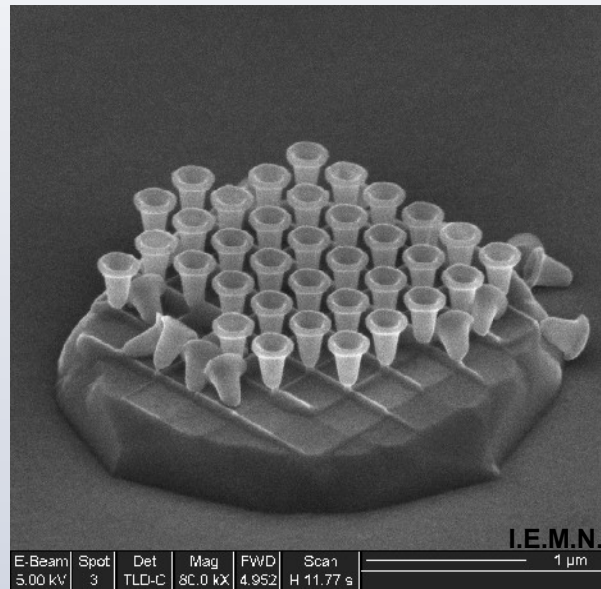
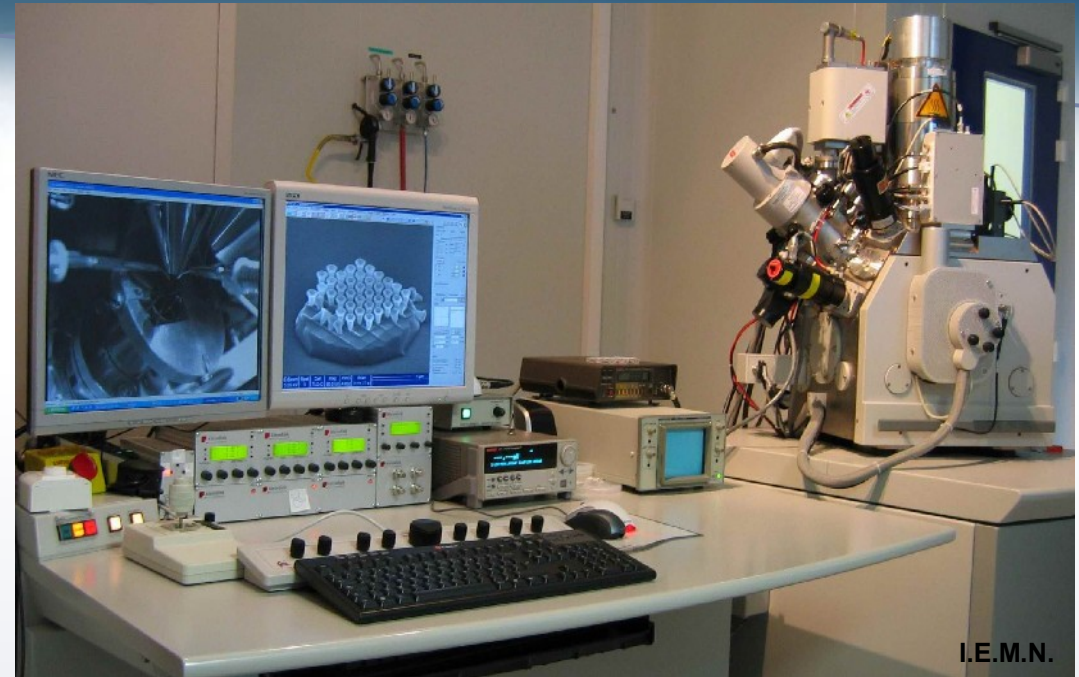
Vide : 10^{-9} à 10^{-6} mbar

Deux pompes ioniques

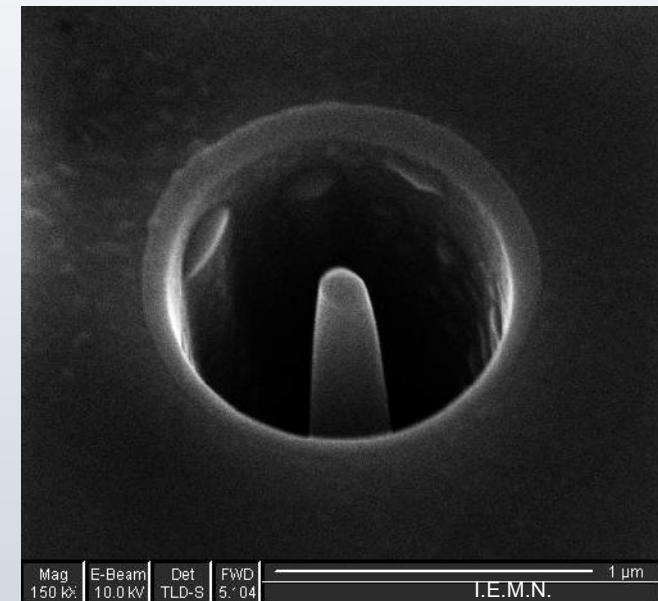
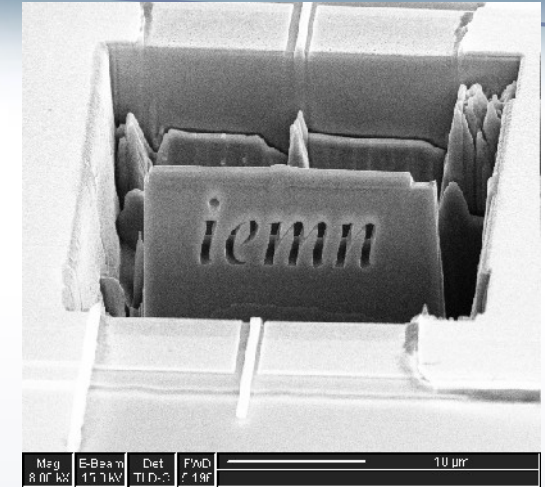
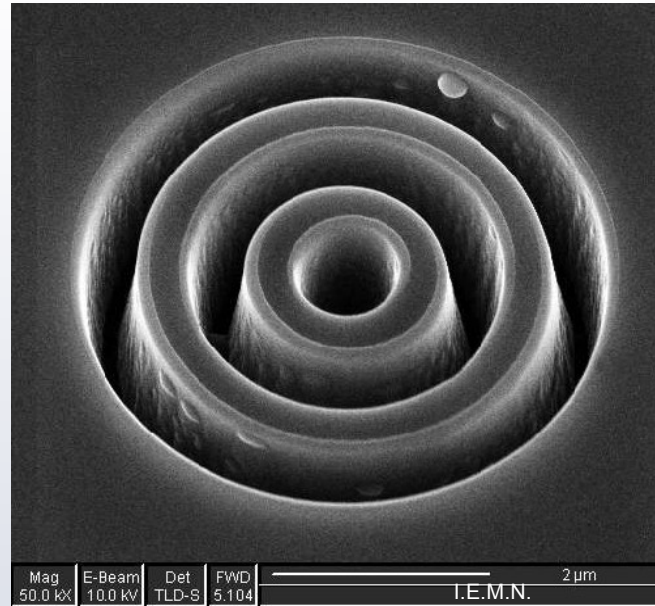
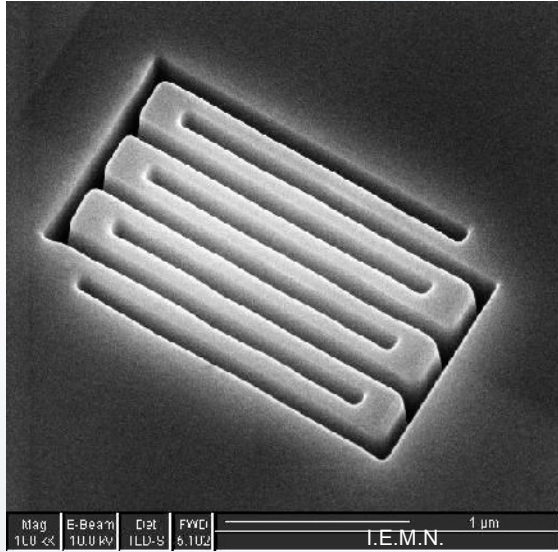
- *Chambre :*

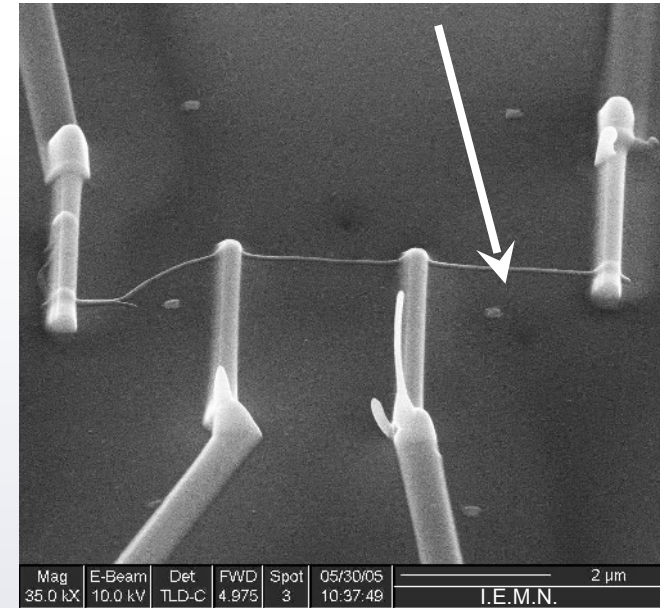
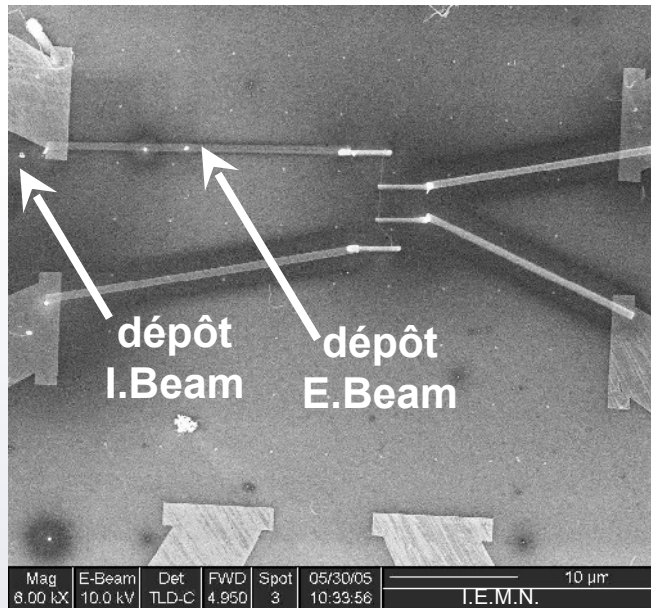
Vide : 10^{-7} à 10^{-6} mbar

Pompes: sèche + turbo moléculaire



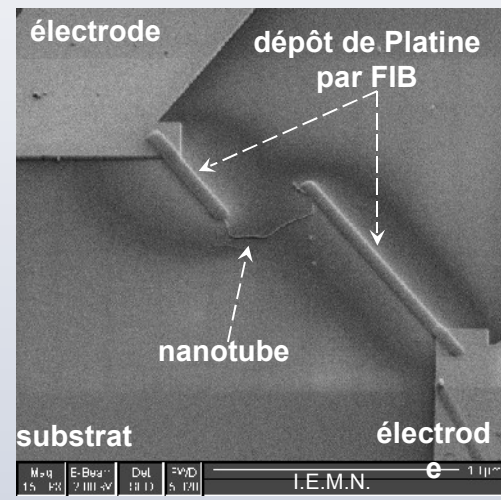
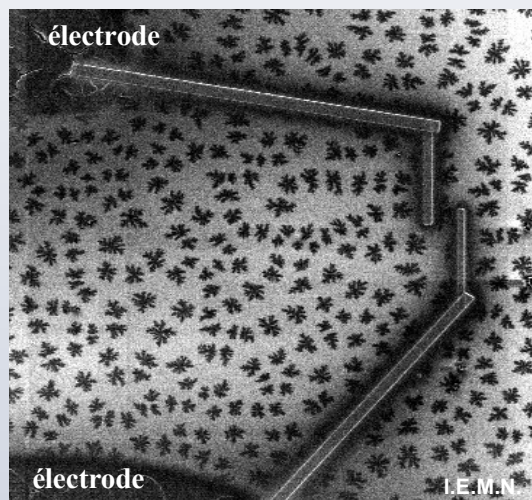
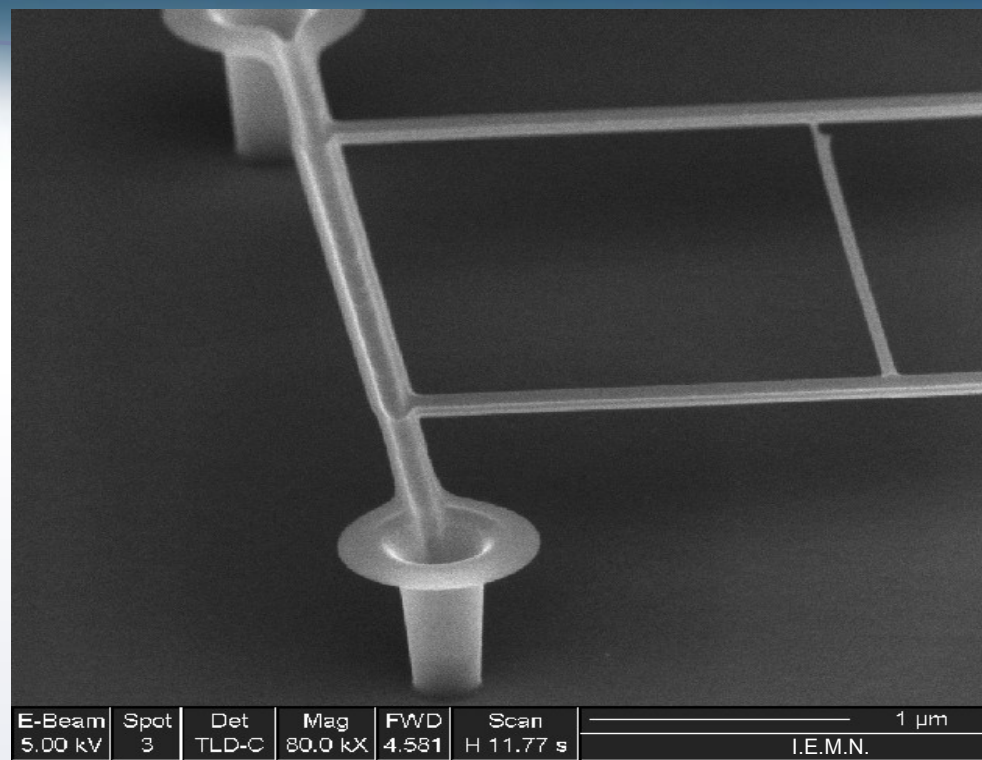
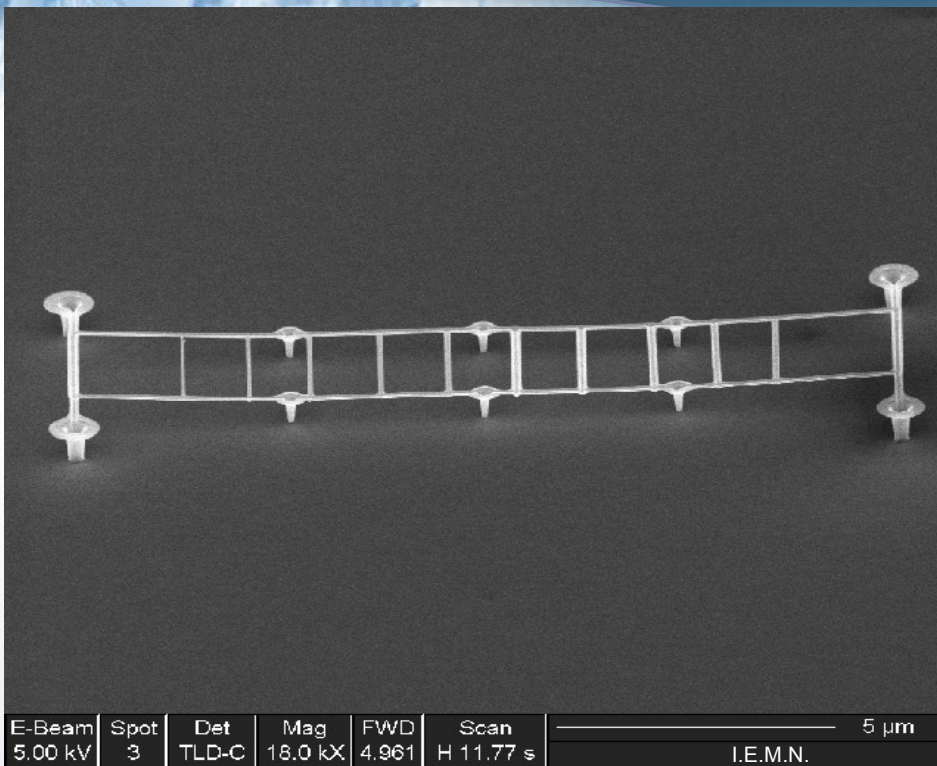
Le VIDE en MICRO et NANO-TECHNOLOGIE





Connexions d'un nano fil de silicium : dépôt de Pt par faisceau d'ions et faisceau d'électrons

Le VIDE en MICRO et NANO-TECHNOLOGIE



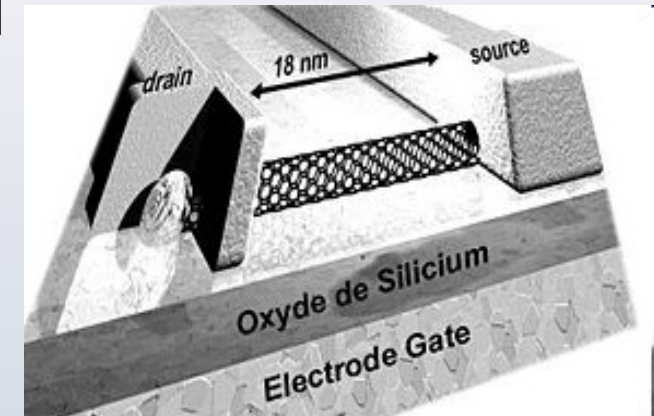
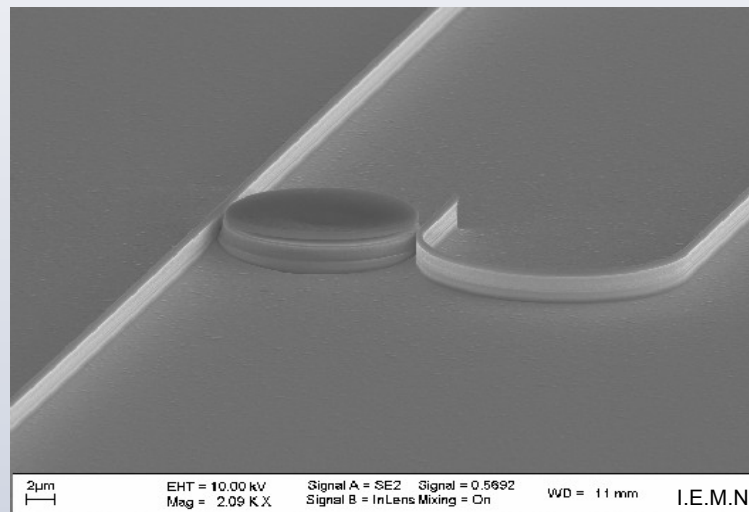
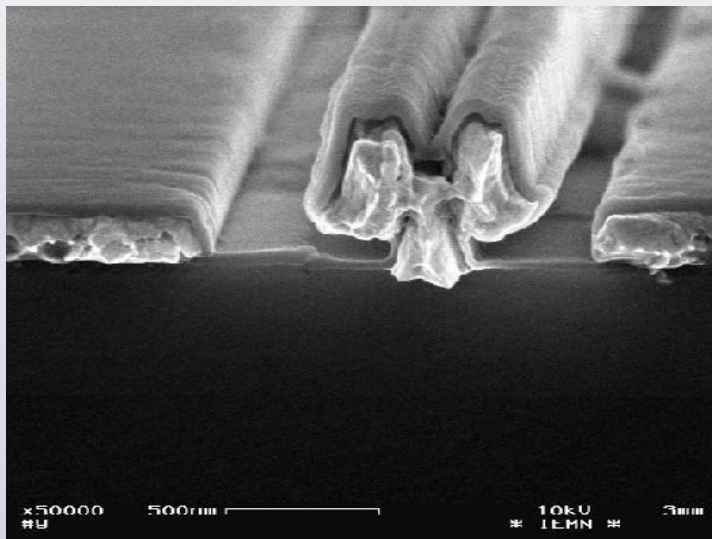
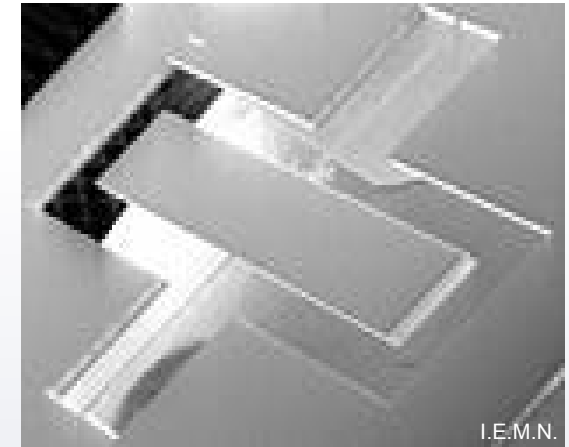
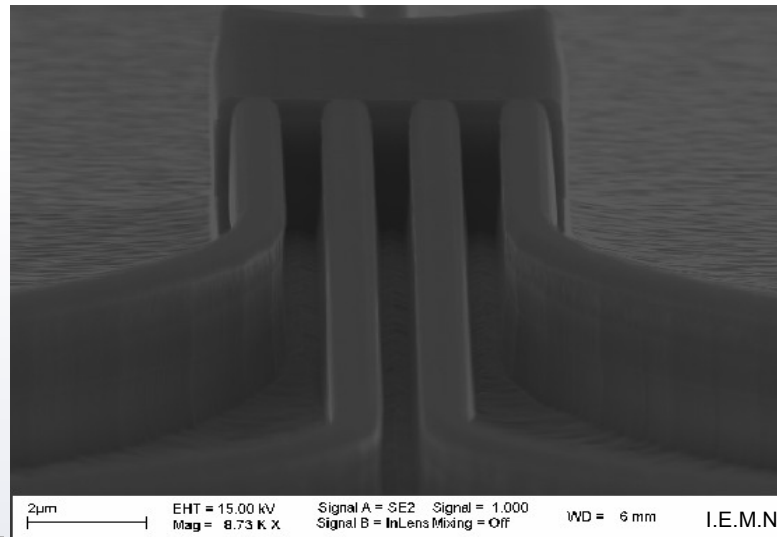
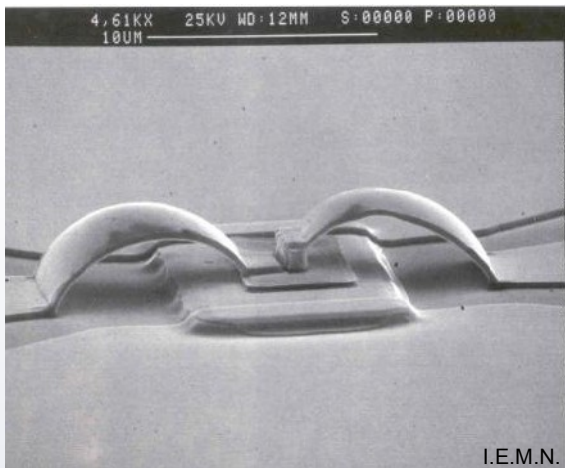
Molécules de pentacène

Nanotube de carbone



Le VIDE en MICRO et NANO-TECHNOLOGIE

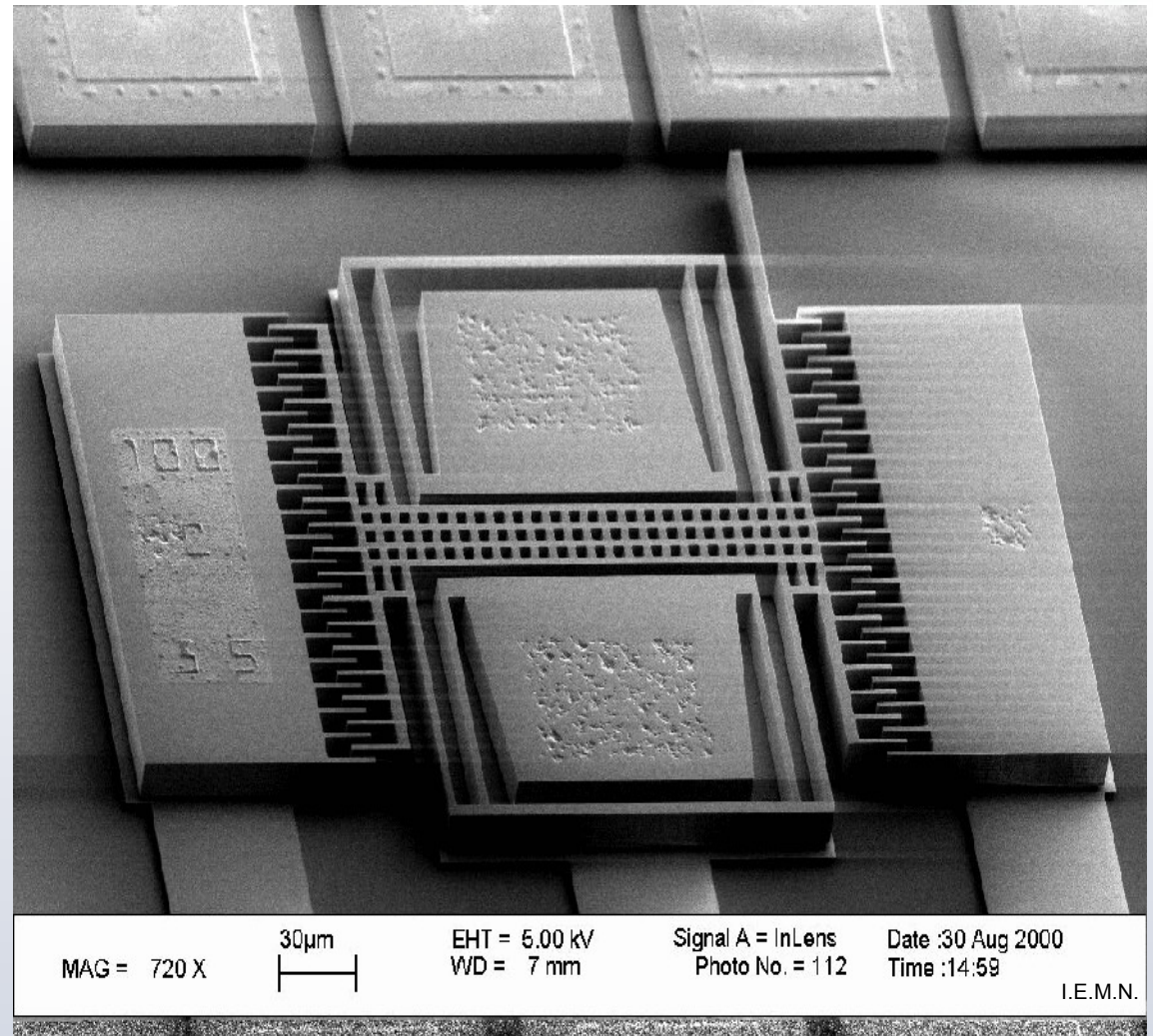
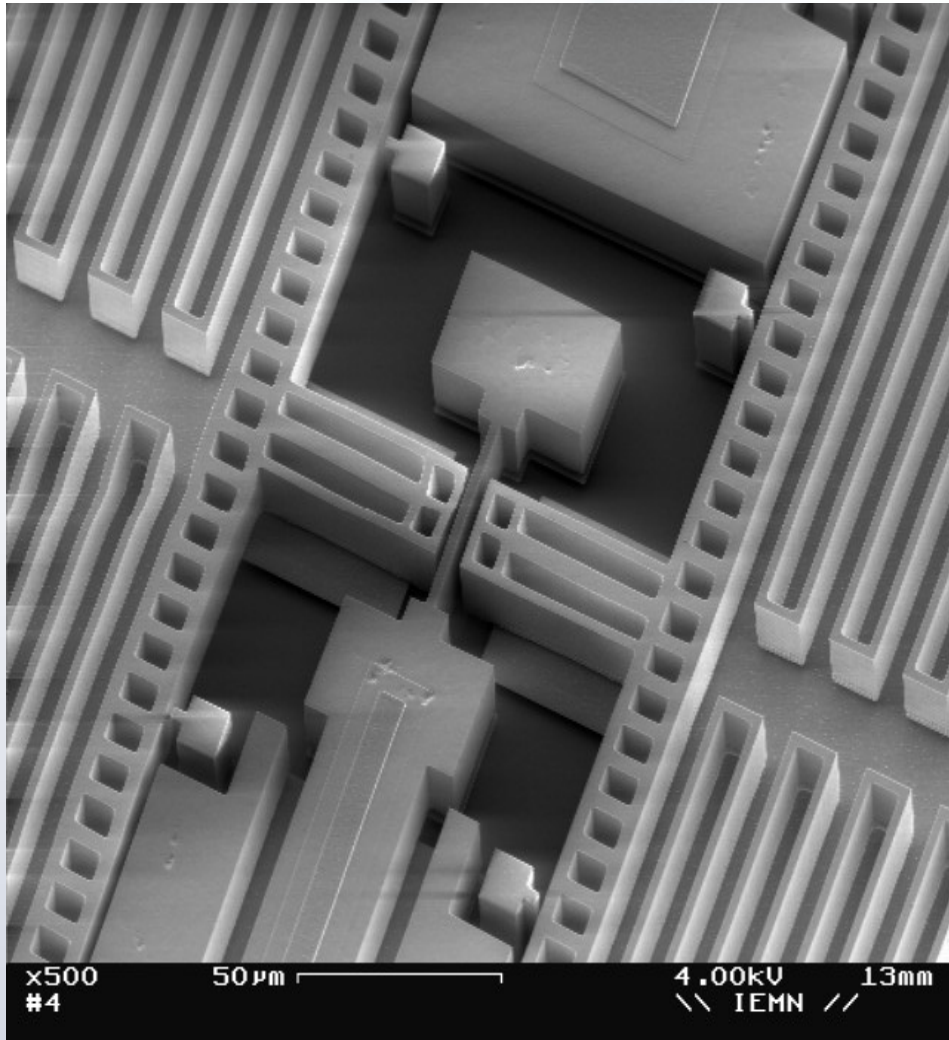
- Pas une seule des techniques évoquées ici, n'utilisent pas le VIDE !



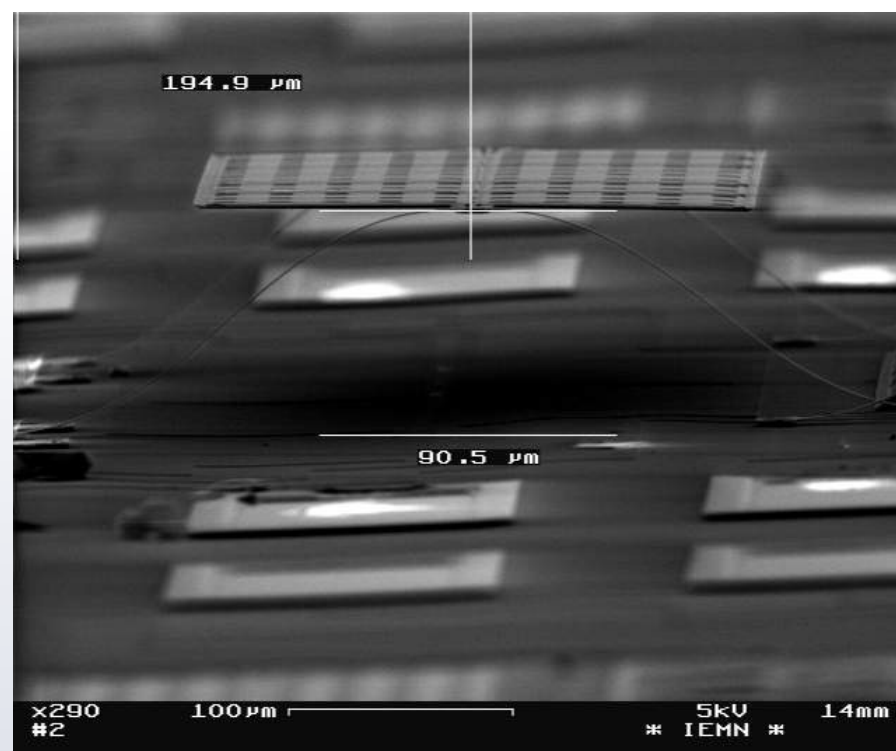
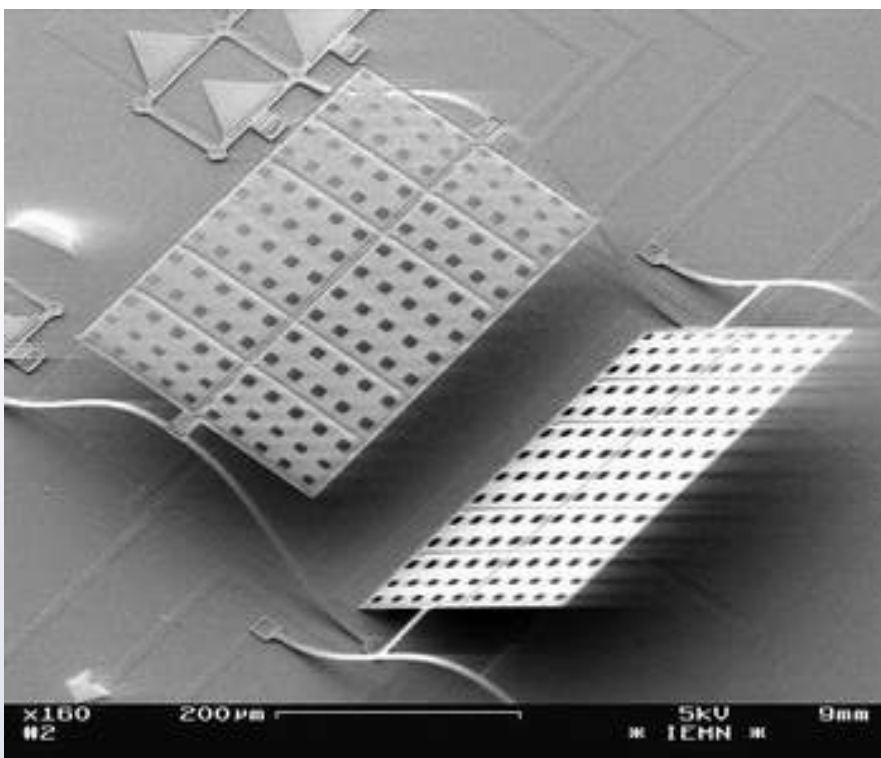
Le transistor à effet de champ à nanotube (CNFET), utilise un nanotube de carbone mono-paroi dans une structure s'apparentant à un transistor à effet de champ (FET) conventionnel (d'après IBM & "Nanocomputers & Swarm Intelligence", Jean-Baptiste Waldner, ISTE, London, 2007. Reproduit avec l'autorisation de l'auteur)

I.B.M.

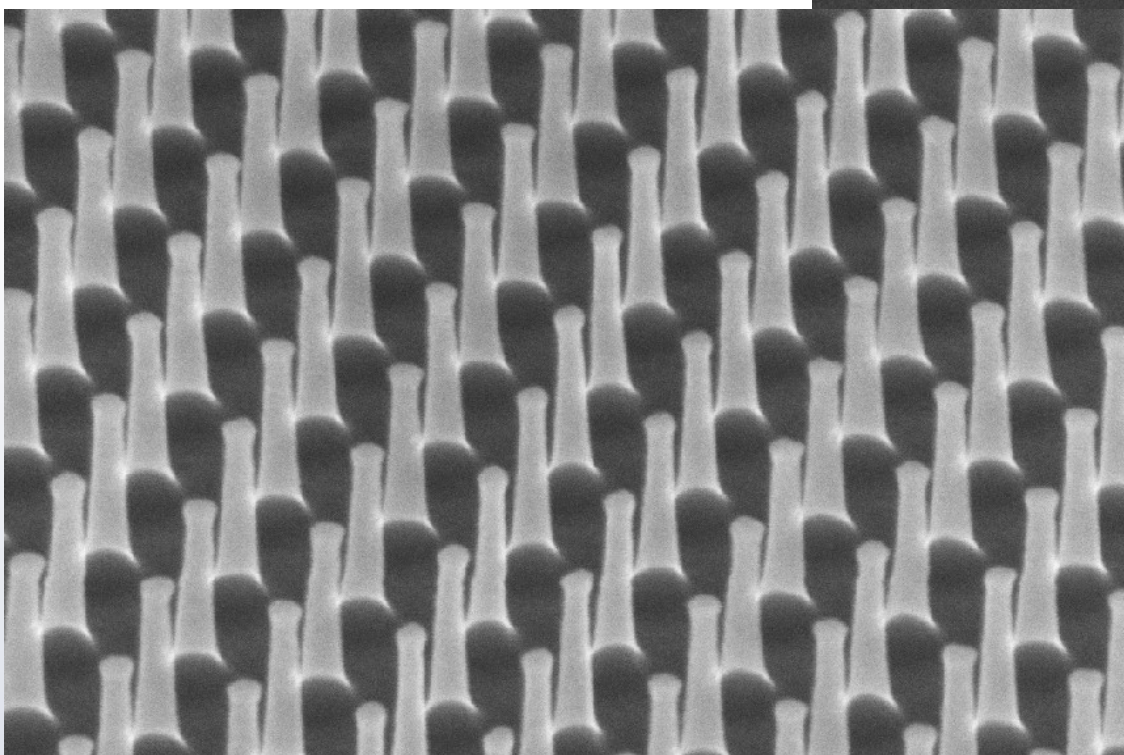
Le VIDE en MICRO et NANO-TECHNOLOGIE



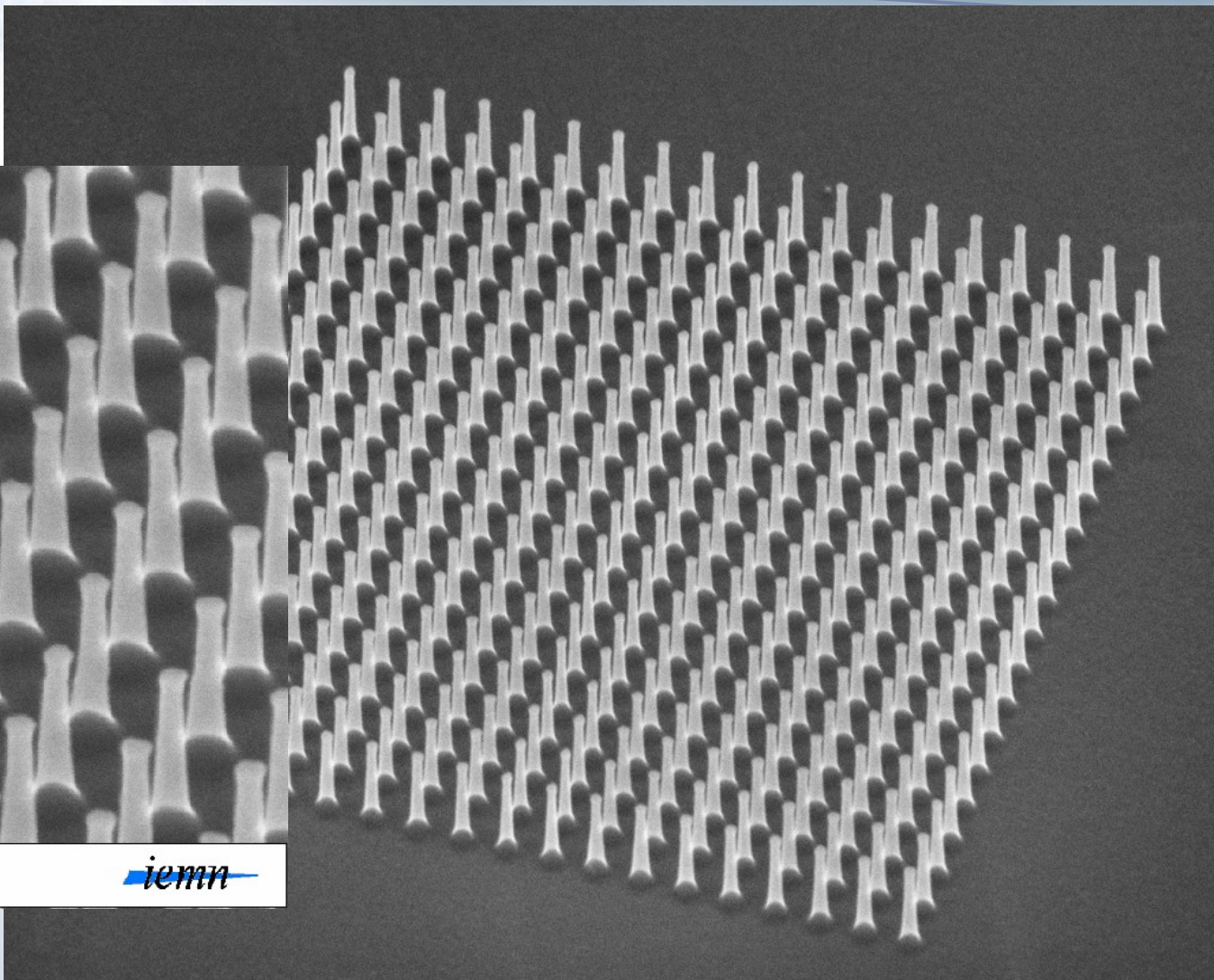
Le VIDE en MICRO et NANO-TECHNOLOGIE




Le VIDE en MICRO et NANO-TECHNOLOGIE

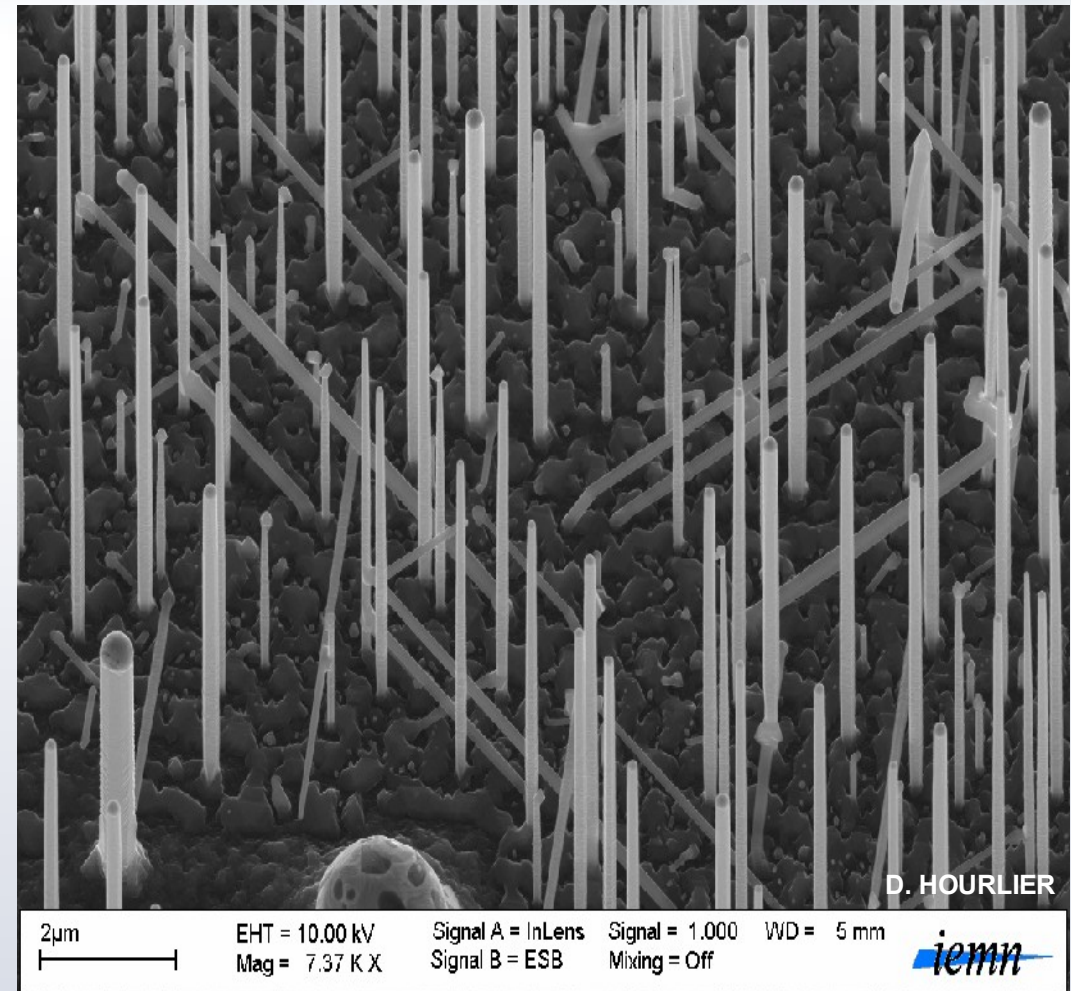
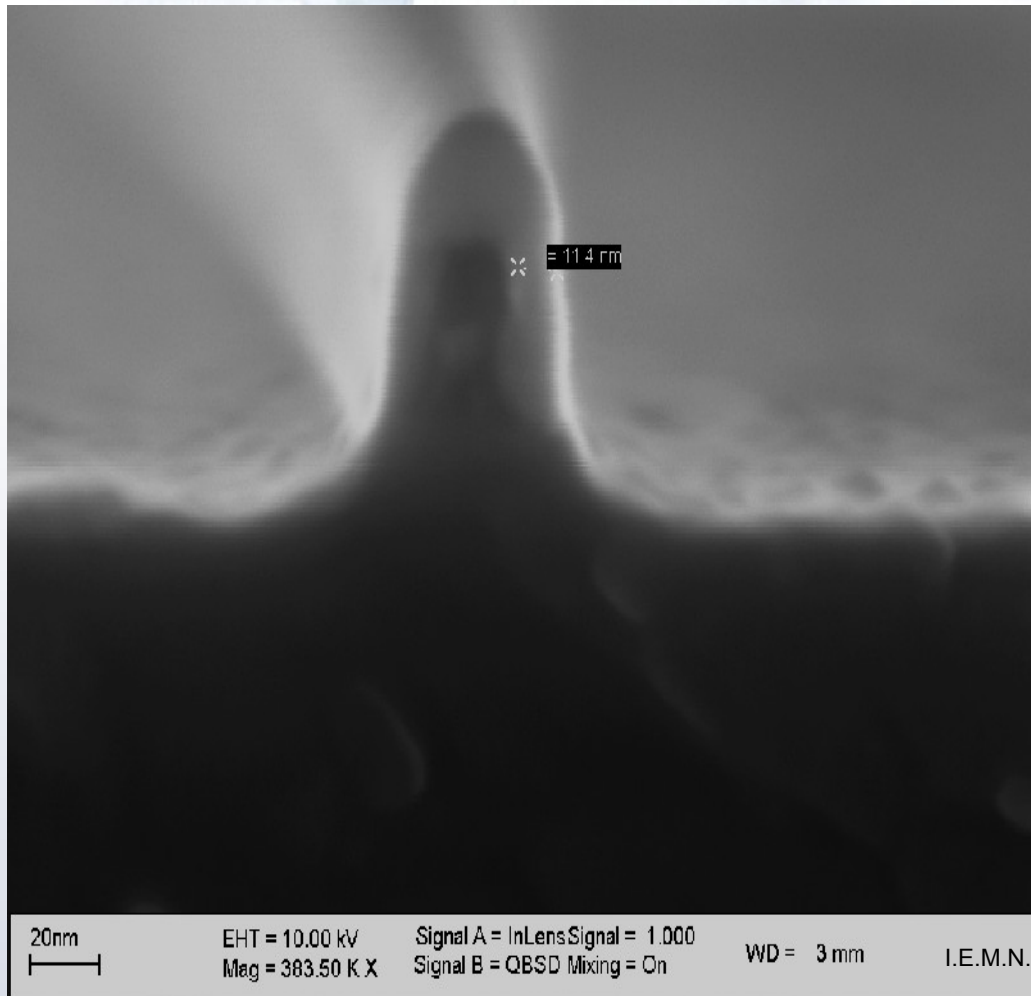


100 nm EHT = 15.00 kV Signal A = InLens
Mag = 124.64 K X WD = 6.7 mm

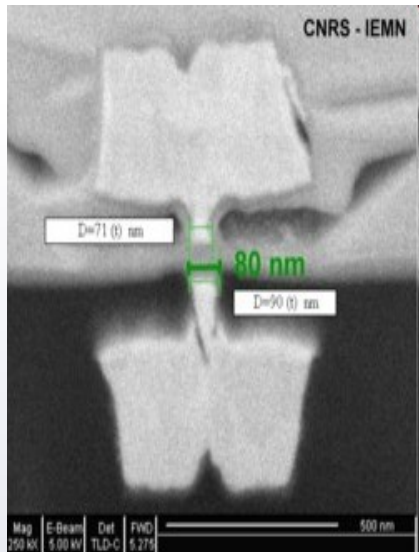


200 nm EHT = 15.00 kV Signal A = InLens
Mag = 40.55 K X WD = 6.7 mm



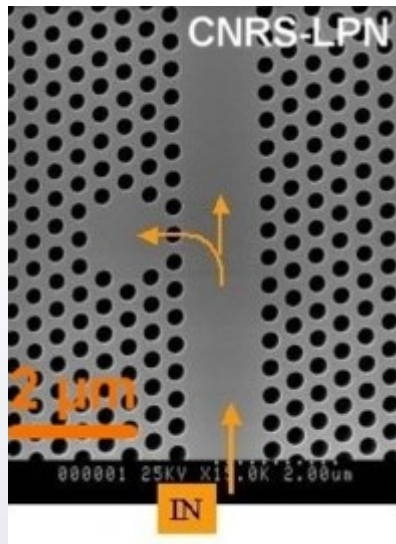


Nanofils de silicium



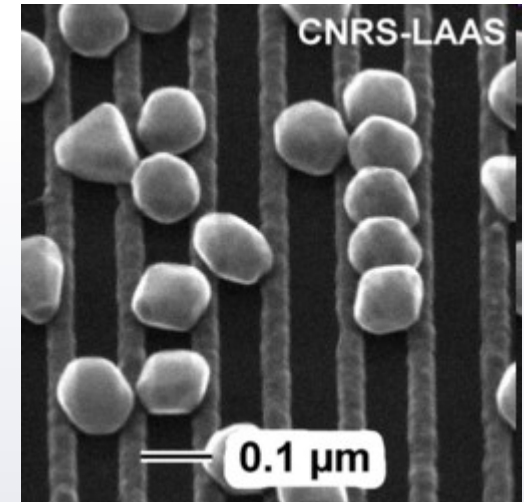
Electronique ultime

Nouvelle génération de transistor à double grille en T sur substrat d'InP.



Photonique ultra compacte à base de cristaux photoniques

Dispositif de couplage d'un guide et d'une microcavité résonnante permettant d'obtenir une fonction de filtrage

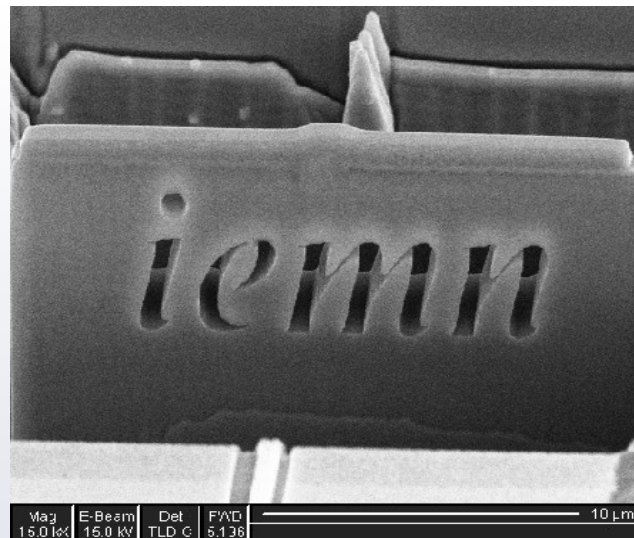


Nano biosciences

Dispositif de nano adressage à base d'électrodes interdigitées, permettant d'identifier des particules en fonction de la réponse électrique des nano électrodes(30nm) au passage de celles-ci.

- Toutes les technologies et les différentes techniques présentées dans le cadre des micro et nano technologies utilisent nécessairement « **du vide** » !
- La **notion de vide** est absolument liée aux micro et nanotechnologies, comme l'a été à la création de l'électronique, les tubes à vide.
- Cette nécessité est liée soit :
 - au **degré de propreté** exigé (absence d'impuretés non contrôlées)
 - au fait, qu'il est impossible d'**élaborer** de **nouveaux matériaux** ou de **nouvelles** micro ou nano **structures** dans un environnement autre que le **VIDE** !

En vous remerciant de votre ATTENTION !



<http://www.iemn.univ-lille1.fr>

<http://www.iemn.univ-lille1.fr/fr/les-moyens/centrale-de-technologie.html>