



## Présentation de la plateforme **NanoTecMat**

### Responsable

Antoine Ronda, Ingénieur de recherche CNRS

### Personnels impliqués

Equipe NCSE (Resp. Isabelle Berbezier), Equipe OPTO-PV (Resp. Ludovic Escoubas)

### Localisation

Im2np - Campus de Saint-Jérôme - 13397 Marseille



Vues Salles Blanches NanoTecMat

*La plateforme NanoTecMat vise à créer un environnement technologique entièrement dédié à l'étude et à la fabrication de composants modèles (principalement à base d'éléments semiconducteurs de la colonne IV) par la mutualisation des connaissances et des équipements de haute technologie présents dans l'IM2NP. Le but est d'offrir aux utilisateurs, une chaîne complète de techniques allant de l'élaboration à la caractérisation des nanomatériaux jusqu'à la fabrication de composants modèles en micro, nano et opto-électronique*

*La plateforme, labellisée comme centrale de proximité dans CT PACA (dont les deux autres composantes sont PLANETE à Marseille-Luminy et CHREATEC à Sophia Antipolis), nous donne une place privilégiée au niveau national et international dans le domaine des nanomatériaux de la nouvelle et future nanoélectronique à base de silicium (approches top-down et bottom-up). Cette opération participe au regroupement sur le pôle de l'Etoile de fortes compétences en matériaux, procédés et caractérisation des nanomatériaux. Ce domaine en forte évolution nécessite d'associer dans un même pôle des spécialistes des matériaux et des dispositifs. Il est ainsi possible de mener de front une recherche amont tout à fait indispensable dans ce domaine (voir road-map ITRS) et les possibilités de développement industriel. Cette plateforme de recherche et les équipements qui lui sont associés participent à ce regroupement.*

### Partenaires, collaborations, animations

De nombreux partenaires externes, en plus des membres de différentes équipes de l'IM2NP, utilisent les moyens mis à disposition par NanoTecMat dans le cadre de collaborations, projets, contrats ou prestations (environ 20% de l'utilisation totale). Une liste non exhaustive en est donnée ci-dessous :

- **Nationaux** : Industriels : ST Microelectronics, OrsayPhysics, Nexcis, Thalès Optronique, Sunpartner, DGA; Académiques : LMEN (Reims), INL (Lyon), SIMAP (Grenoble), CINAM (Marseille), LCMCP (Paris)
- **Internationaux** : Univ. Rome, Univ. Stuttgart, UMIST (Manchester, UK), NRC (Ottawa, Canada), Uni. Monastir (Tunisie), Univ. Virginia (US), Univ. Elec. Comm. Tokyo, ICMAB Barcelone, Univ. Padova (I), INFN Rome, Inst. Polytech. Milan, Univ. Batna (Algérie), Univ. Oslo (Norvège), Unvi. Catania (Italie)

NanoTecMat contribue également à des actions de formations. Celles-ci concernent notamment des cycles d'enseignement et également des séjours d'apprentissage aux techniques pour les étudiants des laboratoires extérieurs.

### Financements (Equipements)

		2006	2007	2008	2009	TOTAL (k€ TTC)
ANR	MEMOIRE		56	138		194
DGE	Nanoalliance2008		30	62		92
CNRS				14		14
UPC	BQR					40
Ville de Marseille						15
Contrats divers						20
<b>TOTAL</b>						<b>375</b>

### Description détaillée

NanoTecMat est engagée dans le soutien technologique à différentes études menées dans les domaines des nanomatériaux pour des applications en micro, nano et opto-électronique. Elle met à disposition de la communauté une chaîne d'outils technologiques allant de l'élaboration à la caractérisation de nanomatériaux et composants modèles, principalement à base de silicium et composés.

Les équipements sont localisés au sein de deux salles blanches hébergées par l'IM2NP. Une première salle blanche (Classe 10000 150m<sup>2</sup>, mise en service en 2007) intègre les équipements de **nanofabrication**. La deuxième salle blanche (classe 1000/10000, 70m<sup>2</sup>, totalement reconstruite et mise en service fin 2009) intègre les outils de **photolithographie** et de caractérisation opto-électroniques.

### Equipements disponibles :

**Traitement** : Zone de nettoyage chimique des plaquettes sous classe 100 ; Four de recuit rapide (8'') sous vide (10<sup>-6</sup> mbar) ou sous atmosphère contrôlée (O<sub>2</sub>, N<sub>2</sub>, N<sub>2</sub>/H<sub>2</sub>)

### Photolithographie /Gravure :

Aligneur 4'', mode contact ou proximité, résolution 3µm ; Insolation holographique (UV 363.8nm), résolution sub-micronique ; Gravure Si, SiO<sub>2</sub> : Gravure chimique ; Gravure chimique anisotrope ; Gravure sèche plasma

### Nanostructuration :

Nanolithographie Très Haute Résolution FIB filtrée en masse (sources AuSi, Ga, ...), diamètre du faisceau ~ 3nm

### Caractérisations :

Ellipsomètre spectroscopique (250-1000nm); AFM ; Profilométrie ; Microscopie optique ; MEB ; Spectroscopie de Photoluminescence (acquisition 2010). Mesures électriques (I(V), C(V),...)

### Dépôts technologiques :

Métaux : évaporateurs sous vide. Diélectriques : PECVD (acquisition 2010)

### Elaboration :

Bâits d'épitaxie en phase solide et en phase vapeur (acquisition 2010)

### Principaux résultats 2006-2009

De nombreux projets scientifiques s'appuient sur les moyens en nanostructuration, nanofabrication, caractérisations de la Plateforme et ses outils technologiques de base. Les activités couvrent différentes applications en micro-nano-opto-électronique : mémoires à nanocristaux, transistors MODFET, imageurs à illumination face arrière, cellules photovoltaïques, ... Les résultats marquants sont repris dans les bilans d'Equipes, quelques exemples de procédés technologiques associés sont donnés ci-dessous.

### Fabrication et caractérisation d'oxydes

Une des étapes importantes dans la réalisation de nombreux dispositifs modèles correspond aux dépôts ou la formation d'isolants, notamment SiO<sub>2</sub> dans les domaines étudiés à l'institut. C'est notamment le cas pour la fabrication des oxydes tunnel et oxydes de contrôle dans les mémoires à nanocristaux ou encore pour les cellules photovoltaïques de 3<sup>ième</sup> génération dans une configuration de nanocristaux intégrés dans une matrice isolante. Les propriétés des oxydes fabriqués à NanoTecMat en fonction des conditions

expérimentales utilisées sont étudiées à l'aide de différentes techniques (ellipsométrie,  $I(V)$ ,  $C(V)$ ,...). La figure 1 montre des mesures  $C(V)$  sur une capacité MOS réalisée à partir des oxydes fabriqués : la qualité de l'oxyde et l'effet positif d'un recuit RTP sur la diminution des défauts peuvent notamment être observés. Un exemple de structure modèle réalisée à NanoTecMat est donné dans la figure 1 qui montre une vue MET en coupe d'une nano-boîte de Ge déposée sur un oxyde tunnel et enrobée dans un oxyde de contrôle.

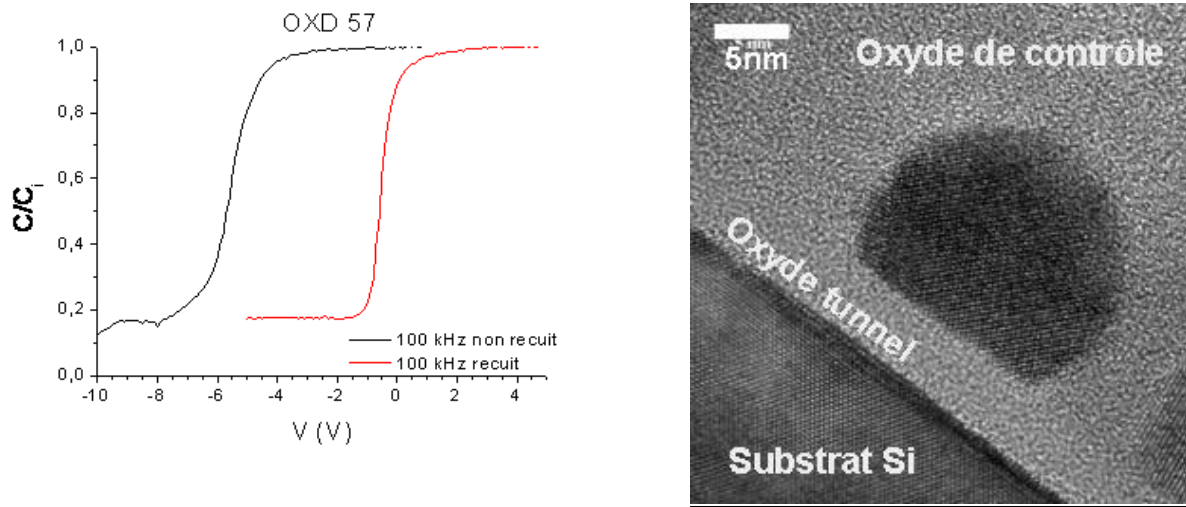


Fig. 1 : A gauche caractéristiques  $C(V)$  de capacité MOS.  
A droite, vue transverse MET d'une boîte de Ge déposée sur un oxyde tunnel et enrobée dans un oxyde de contrôle

## Nanogravures FIB

La fabrication de nano-objets contrôlés à la fois en taille et en localisation présente de nombreuses potentialités pour différentes applications

NanoTecMat dispose d'une station FIB haute résolution avec filtrage en masse des ions source permettant de réaliser la nanostructuration de couches ou de substrats. Le filtrage en masse autorise une grande souplesse quant au choix des ions source en fonction des matériaux et procédés étudiés. En particulier, il permet d'une part d'éviter les contaminations indésirables du matériau par les ions sources (Ga, dopant du Si, dans Si par exemple) et d'autre part la chimie des ions sources peut être mise à profit dans le développement de procédés (effet catalytiques ou de contrainte pour la fabrication de nanostructures). Les conditions expérimentales pour le développement des procédés de nanolithographie ultime sont étudiées. Des motifs contrôlés en taille et en distribution à l'échelle nanométrique ont pu être fabriqués. Des exemples de réseaux de nanotrous réalisés sur substrat Si ou  $\text{SiO}_2$  à partir d'ions source Ga ou Au sont montrés sur la figure 2. Des réseaux de boîtes de Ge parfaitement organisées ont pu être obtenus par croissance sur les substrats nanostructurés par FIB (figure 2).

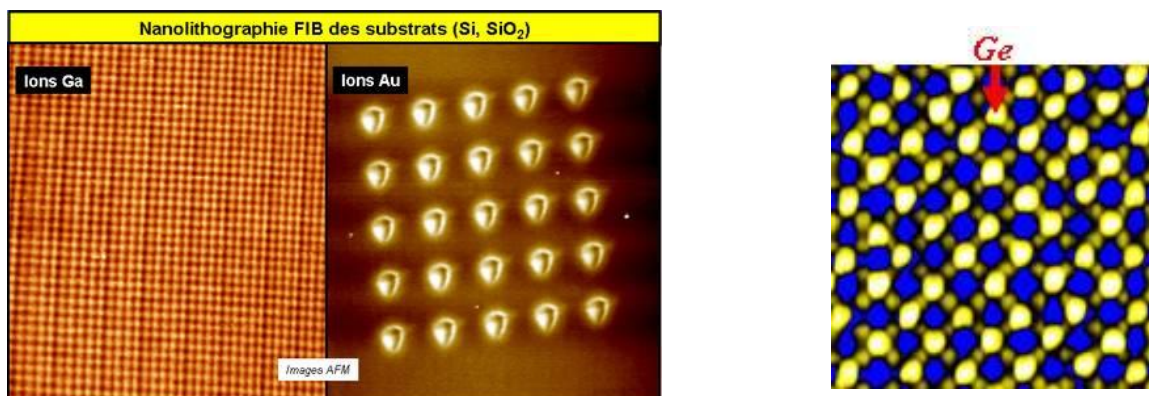


Fig 2 : Images AFM : à gauche réseaux de trous nanométriques fabriqués par FIB, en utilisant des ions sources Ga ou des ions source Au.  
A droite réseaux de boîtes de Ge obtenus par croissance sur les substrats nanostructurés.

## Caractérisations

Les propriétés (morphologiques, optiques, électriques,...) des objets réalisés au sein de NanoTecMat sont étudiées à l'aide d'un ensemble de techniques de caractérisation disponibles dont les principales ont été données plus haut. L'utilisation de ces techniques tout au long de la chaîne technologique de NanoTecmat permet de valider les différents procédés développés ainsi que les propriétés des structures modèles en vue



d'applications potentielles.

A titre d'exemple, la figure 3 illustre les résultats de différentes caractérisations morphologiques (AFM, TEM), électriques (macroscopiques et locales) et optiques (PL) réalisées sur une structure formée par des îlots de Ge enrobés dans SiO<sub>2</sub>. Ces caractérisations permettent de mettre notamment en évidence les effets de taille sur les propriétés électriques ou optiques.

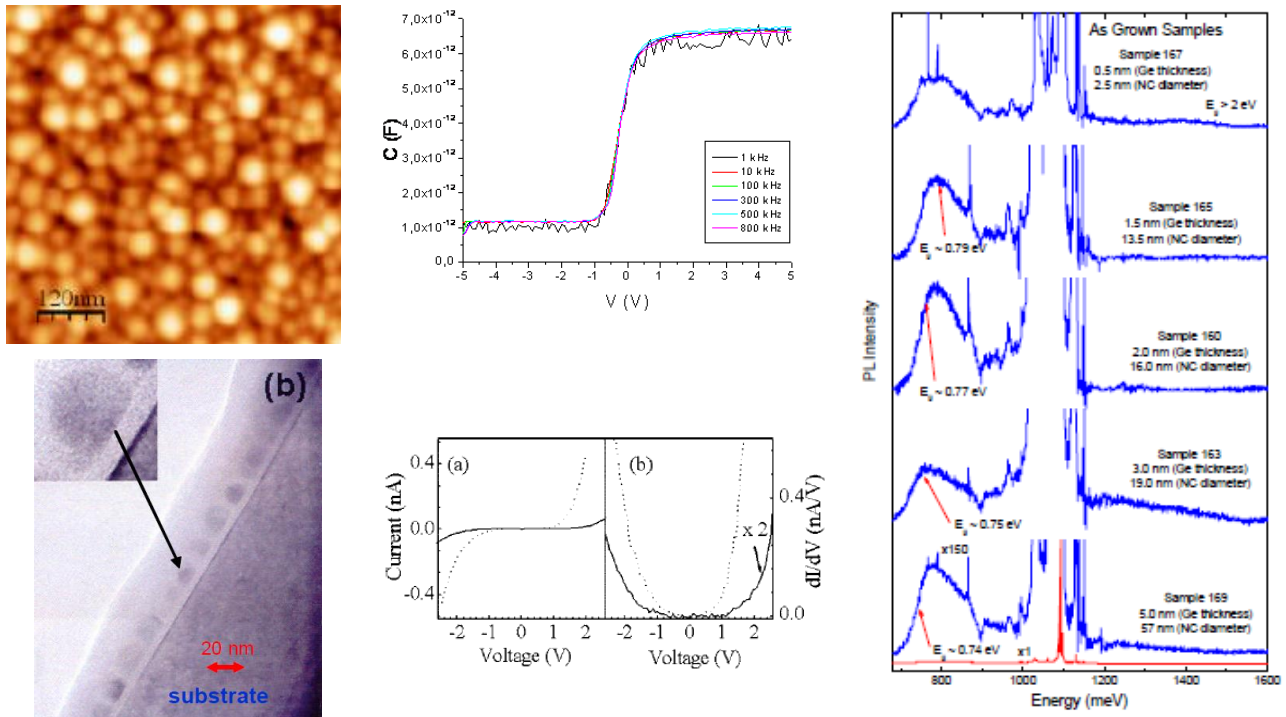


Fig. 3 : Caractérisations d'une structure formée par des îlots de Ge enrobés dans SiO<sub>2</sub>: études morphologiques AFM, TEM (à gauche) ; électriques macroscopiques et locales (au centre) ; optiques (PL).

Un autre exemple concerne la caractérisation des cellules solaires. Celles-ci incluent notamment : (i) mesure de la réponse spectrale qui permet de déterminer le rendement quantique interne et la longueur de diffusion des porteurs minoritaires à partir desquels la qualité du matériau et de la jonction peuvent être estimés ; (ii) mesures courant-tension sous éclaircissement (radiation solaire dans des conditions normalisées d'ensoleillement) qui permettent de remonter aux différentes caractéristiques de la cellule (tension circuit ouvert, intensité de court circuit, puissance maximale de la cellule, facteur de forme, rendement de conversion). Un banc spécifique (Fig. 4) a été réalisé pour permettre de caractériser les cellules sous concentration (environ 20 suns). Des caractérisations fines complémentaires (cartographies LBIC, imagerie IR sous éclaircissement) sont également mises en place.



Fig. 4 : Banc de mesure sous concentration

## Gravure

NanoTecMat dispose de différents moyens de gravure pour la réalisation d'étapes technologiques de base (fabrication de dispositifs tests, capacités, transistors,...). Des procédés de gravure sont également développés pour la réalisation de nanostructures. Par exemple une activité sur la fabrication de nanofils de silicium par gravure chimique a démarré en 2009 (OPTOPV). L'intérêt de ces travaux est double : les nanofils peuvent d'une part être intégrés dans les cellules solaires photovoltaïques dites « de troisième génération » (meilleure absorption, collecte électrique favorisée,...) et d'autre part jouer le rôle d'un très bon anti-reflet

pour les cellules solaires photovoltaïques.

Les structures réalisées à NanoTecMat, sont obtenues par gravure chimique assistée par un métal. Cette technique basée sur une approche « top-down », permet de graver le silicium, mono ou multicristallin, à l'aide d'un catalyseur métallique (généralement un métal noble tel que l'Argent). Une seule étape est nécessaire pour l'obtention de ces nanofils et consiste à plonger l'échantillon de silicium dans une solution aqueuse d' $\text{HF}/\text{AgNO}_3$ . Le diamètre de ces nanofils est d'une centaine de nanomètres et leur longueur est de quelques microns (cf. figure 1). Les premières mesures optiques montrent un très bon effet anti-reflet (cf. figure 5). C'est une première étape de caractérisation. Des mesures électriques sont en cours et nécessitent la réalisation de jonction pn (dopage de l'échantillon) et de contacts métalliques, qui seront réalisés au sein de NanoTecMat.

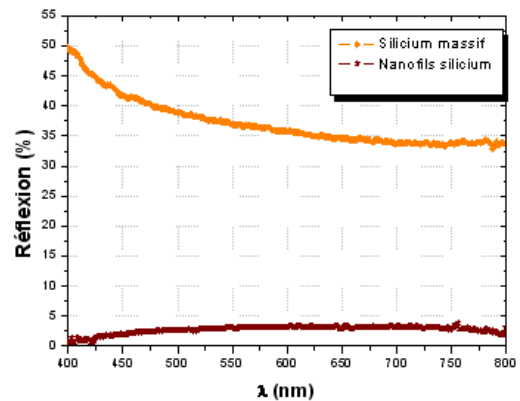
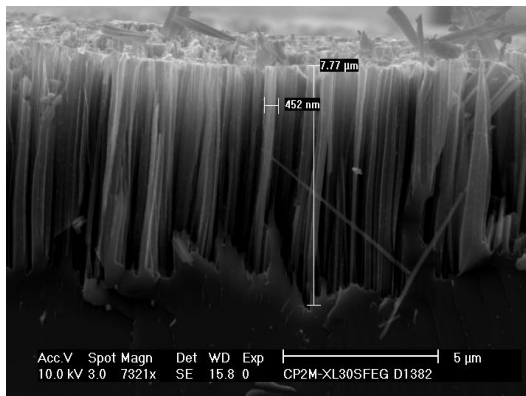


Fig. 5 A gauche image MEB des nanofils fabriqués par gravure. A droite mesure de réflexion réalisée à l'aide d'une sphère intégrante.

### Réalisation des dispositifs modèles

NanoTecMat permet de fabriquer des structures technologiques modèles (diodes, transistors, cellules,...). A titre d'exemple, nous mentionnons ici la fabrication de cellules solaires réalisées dans le cadre projet sur l'étude et l'optimisation de la grille de collecte de cellules PV (collaboration OPTOPV-Sté Sunpartner.)

La fabrication des cellules repose sur les principales étapes suivantes : (i) Nettoyage des plaquettes ; (ii) réalisation jonction pn (four à diffusion de phosphore) et gravure chimique face arrière ; (iii) fabrication des contacts face avant et face arrière par métallisation(Al) ; (iv) photolithographie : dépôt résine (spin coating)-insolation au travers d'un masque -retrait/développement résine- attaque aluminium. La figure 6 montre les cellules fabriquées. Les performances des cellules solaires fabriquées sont ensuite étudiées en utilisant les différentes techniques de caractérisation décrites plus haut.

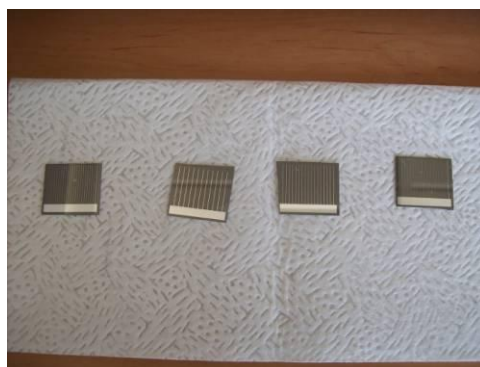


Fig. 6: Cellules solaires réalisées en salle blanche