Dans les cours précédents, nous avons abordé les propriétés mécaniques et chimiques des nanomatériaux. Dans cette série de cours dispensés à distance, nous allons aborder, comme deuxième cours, les nano systèmes.

**NB** 1/ Vous trouvez à la fin de chaque cours l'explication des mots (écrits en rouge ) expliquant certains phénomènes , et qui me semblent difficiles pour vous.

**2/** Les numéros des figures ainsi que les références bibliographiques sont ceux que vous trouvez dans le document que je vous ai envoyé dans la boite mail commune pour tout le groupe.

**3. Nanosystèmes**

 Les développements qui précèdent montrent qu’il est possible d’obtenir, pour des matériaux dont l’une des phases au moins présente une ou plusieurs dimensions qui soit de l’ordre du nanomètre, des propriétés très différentes de celles du matériau massif. Par ailleurs, la course à la miniaturisation des systèmes électroniques, optoélectroniques et des systèmes de stockage magnétique qui accompagne entre autres les avancées de la technique informatique conduit actuellement à tendre également vers la dimension nanométrique. Recherche de propriétés particulières et miniaturisation convergent vers des technologies de fabrication de dispositifs constitués d’un très grand nombre d’éléments (107 à 108) dont la taille individuelle est de l’ordre de 10 à 100 nm, avec des interfaces de l’ordre de 1 à 10 nm, parfaitement ordonnés. Il est bien clair que cela ne peut être atteint simplement en faisant appel aux techniques de production de nanomatériaux (voir cours précédents). Il existe bien quelques cas où l’on obtient des matériaux auto-organisés (self-assembly) (couches monomoléculaires de surfactants ou de molécules organiques par exemple) et il est possible que dans le futur l’électronique moléculaire voie le jour (§ 3.2), mais pour le temps présent il faut faire appel à des techniques de nano-usinage pour parvenir à l’objectif recherché. Il ne s’agit plus à proprement parler de nanomatériaux mais d’un domaine connexe dont on sait qu’il est devenu d’une importance considérable. Nous nous contenterons ici de le présenter brièvement, afin que le lecteur puisse avoir une vue d’ensemble, et donnerons quelques références bibliographiques d’articles qui fournissent une synthèse sur le sujet ; ils se rapportent, comme la suite de ce paragraphe, à la fabrication de dispositifs électroniques.

**3.1 Nanofabrication de dispositifs électroniques**

Il s’agit de produire un élément intégré, en disposition dite verticale, c’est-à-dire constitué de couches superposées, comportant à la fois des transistors servant d’interrupteurs, des capacités assurant le stockage de l’information, et la connectique nécessaire, à partir d’un petit cristal de semi-conducteur dont la composition varie selon la profondeur. On dispose à cet effet de deux méthodes :

— les techniques de dépôt d’épaisseurs nanométriques de matériaux (MBE, Molecular Beam Epitaxy) qui permettent de disposer à l’endroit désiré parallèlement à la surface, et en profondeur afin d’atteindre la zone voulue du semi-conducteur, les couches métalliques ou diélectriques isolantes nécessaires à la constitution des éléments de la connectique pour les premières, des capacités ou des transistors à effet de champ (§ 4.1) pour les secondes ;

- les techniques de lithographie, utilisant des électrons, des ions, du rayonnement X ou du rayonnement ultraviolet pour irradier le matériau.

Pour la **lithographie**, on procède au dépôt, sur le matériau que l’on veut graver, d’une couche très mince, de l’ordre de 10 nanomètres d’un matériau (resist), en général polymérique, quelquefois solide ionique, qui est localement transformé par l’irradiation, puis dissout. Le procédé est dit:

- positif si ce sont les régions irradiées qui sont dissoutes (en raison d’une rupture de chaînes polymères),

- négatif dans le cas contraire (en raison d’un pontage entre chaînes par irradiation). Chaque méthode d’irradiation a ses avantages et ses défauts.

l/ C’est le **bombardement électronique** qui est le plus souvent utilisé : l’optoélectronique est la plus performante, et elle permet une résolution lithographique de l’ordre de 5 nm en utilisant des microscopes électroniques à balayage (SEM ou STEM). La limitation principale du procédé réside dans le fait que le libre parcours moyen des électrons dans la matière est de l’ordre du micron, d’où l’étalement de la zône affectée par les électrons, provoqué par les chocs inélastiques avec les atomes du resist ou la rétrodiffusion par le matériau du support. Cet effet est d’autant plus réduit que les électrons sont énergétiques et que le dépôt de resist est mince. Le **bombardement ionique** évite cet inconvénient, mais par contre provoque des dommages par irradiation plus importants dans le substrat et relève d’une optique moins évoluée.

Le **rayonnement X** présente, par rapport aux méthodes précédentes, un avantage de rapidité car on ne procède plus par balayage du faisceau mais par projection sur la cible de l’image d’un cache. Mais à l’inverse, les limitations inhérentes à l’optique du procédé conduisent à une moins bonne résolution (30 nm pour des rayons X de 1 nm de longueur d’onde et une distance entre le cache et la cible de l’ordre de 3 mm). Les étapes ultérieures du procédé sont décrites sur la figure **24**: on dépose d’abord une couche métallique sur toute la surface de l’objet, dont l’épaisseur ne doit pas dépasser la moitié de l’épaisseur du resist afin d’éviter qu’il n’y ait continuité entre les zones où le resist subsiste et celles où il a été supprimé, puis l’on dissout le resist résiduel, ce qui a pour effet de détacher les particules métalliques situées au-dessus (lift off ). Le métal ne subsiste que là où il a été déposé directement sur le support, et sert soit de porte ou d’interconnexion dans le dispositif à réaliser, soit de masque pour un gravage du substrat (figure **24a** ). Dans d’autres cas c’est le resist résiduel qui sert directement de masque, soit pour un gravage (figure **24b** ), soit pour un processus de nucléation et de croissance. Ces mécanismes doivent être soigneusement maîtrisés pour éviter les développements latéraux du gravage ou de la croissance contre provoque des dommages par irradiation plus importants dans le substrat et relève d’une optique moins évoluée.

Le **rayonnement X** présente, par rapport aux méthodes précédentes un avantage de rapidité car on ne procède plus par balayage du faisceau mais par projection sur la cible de l’image d’un cache. Mais à l’inverse, les limitations inhérentes à l’optique du procédé conduisent à une moins bonne résolution (30 nm pour des rayons X de 1 nm de longueur d’onde et une distance entre le cache et la cible de l’ordre de 3 mm).

Nano systèmes: Ce sont des dispositifs analogues aux MEMS, mais à l'échelle du nanomètre (NEMS).Electro-Mechanical Systems nanoométriques.

MEMS: Electro-Mechanical Systems micrométriques.

lithographie: C'est un procédé par lequel on obtient sur du papier, au moyen de la presse, l'empreinte de ce qui a été dessiné ou écrit sur une pierre d'une espèce particulière, avec un crayon ou une encre d'une certaine composition.