

# Faisceaux d'ions focalisés

## Façonner la matière à l'échelle nanométrique

**ÉDITER DES CIRCUITS ÉLECTRONIQUES, PRÉPARER DES ÉCHANTILLONS POUR LA MICROSCOPIE ÉLECTRONIQUE EN TRANSMISSION OU ENCORE CRÉER DES NANOPORES... LES CAPACITÉS DES FAISCEAUX D'IONS FOCALISÉS SONT MULTIPLES. AVEC UN POINT COMMUN : UNE PRÉCISION NANOMÉTRIQUE.**

### CE QU'IL FAUT RETENIR

La technologie des faisceaux d'ions focalisés est particulièrement utilisée en microélectronique pour l'édition des circuits intégrés, que ce soit pour éliminer de la matière de manière ultra-précise ou pour créer de nouvelles connexions. Mais elle connaît actuellement de nouveaux développements, à travers une approche « bottom-up » : partir d'atomes ou de molécules et les associer grâce au faisceau pour créer des édifices moléculaires « intelligents ».

**L**es faisceaux d'ions focalisés ou FIB (focused ion beam) sont une technologie populaire, polyvalente, puissante et largement utilisée pour l'inspection des composants et circuits intégrés fabriqués par l'industrie des semi-conducteurs. Dans la recherche, son rôle, au départ limité à celui de scalpel, pour couper des connexions, ou de fer à souder, pour établir de nouvelles connexions à l'échelle submicrométrique, s'est étendu à des applications de prototypage, principalement dans les domaines relatifs à la science des matériaux. En R&D, il a été démontré que les faisceaux d'ions finement focalisés sont compatibles avec les approches « ascendantes » consistant à faire croître ou agglomérer des atomes ou des particules autour d'un germe induit localement. Ces avancées ouvrent de nouvelles perspectives pour les nanotechnologies.

### 1 L'avènement de la technologie FIB grâce à une source intense d'ions rapides

En microélectronique, les sources d'ions d'énergie comprise entre un et quelques milliers d'électronvolts ont été beaucoup employées pour la gravure et l'implantation. Mais il s'agissait



**JACQUES GIÉRAH**

Ingénieur de recherche CNRS, responsable de la plateforme Instrumentation et sources d'ions (C2N)



**RALF JEDE**

Membre du conseil consultatif de Raith Group

pratiquement toujours de procédés classiques, utilisant soit un plasma, soit un faisceau d'ions de forte intensité dit large, c'est-à-dire non focalisé. Ce n'est que dans les années 1960, avec la mise au point de sources d'ions à métal liquide ou LMIS (liquid metal ion sources) intenses et ponctuelles, que de nouvelles perspectives ont vu le jour, donnant naissance à des systèmes utilisant des faisceaux d'ions focalisés. Ceux-ci comportent en leur cœur une source d'ions à métal liquide couplée à un dispositif de focalisation générant un faisceau d'ions dont l'énergie varie entre un et quelques kiloélectronvolts.

Le premier type de source d'ions à métal liquide a d'abord été étudié afin de réaliser des propulseurs pour les véhicules spatiaux. La découverte d'une source intense d'ions rapides utilisant un métal liquide allait susciter un intérêt considérable. En 1978, des chercheurs de HRL Laboratories, en Californie, ont réalisé une première: ils ont mis au point un microscope ionique à balayage en adaptant une source d'ions à métal liquide avec une optique de microscope électronique. L'ère des applications des faisceaux d'ions focalisés de hautes performances était lancée.

## 2 Des propriétés particulières et un dispositif original

Les LMIS constituent une classe particulière de sources à effet de champ. Elles possèdent des propriétés générales qui sont les suivantes: un courant émis modéré (de l'ordre de 1 à 100 microampères), issu d'une zone émissive très petite (inférieure à 10 nanomètres) et distribué dans un **angle solide** relativement large (plus de 0,1 stéradian). Il s'agit donc de sources quasi ponctuelles et leur luminance ou **brillance** (qui est le rapport du courant émis par la source au produit de la surface de la source par l'angle solide) intrinsèque est l'une des plus élevées connues à ce jour. Avec les sources d'ions à métal liquide, le faisceau est fin dès sa formation, de sorte qu'il peut être focalisé par des systèmes optiques relativement simples. C'est là leur principal intérêt.

Les LMIS utilisent toutes des structures voisines et ont été longuement optimisées en faisant appel à la science des matériaux et des traitements de surfaces. L'émetteur est constitué d'une tige de tungstène taillée en pointe par électrolyse (fig. 1). La pointe obtenue est une très fine aiguille conique de demi-angle  $\sim 10^\circ$ , ayant un rayon de courbure terminal de l'ordre de la centaine de nanomètres. Une rugosité de surface régulière et reproductible est créée, définissant une série de canaux longitudinaux dans lesquels va pouvoir se lier par capillarité, puis circuler, le métal liquide, sans qu'aucune tension électrique ne soit appliquée. En effet, le mécanisme de diffusion de surface du métal liquide aspiré à l'extrémité (l'apex) prend place pour l'essentiel à l'intérieur de ces canaux pour permettre l'émission LMIS.

Un filament de tungstène formant une boucle autour de la pointe est porté à très haute température dans une chambre à vide en y faisant circuler un courant de chauffage par les deux pattes latérales. La boucle est ensuite immergée dans un bain de métal fondu (le matériau qui sera ionisé, aussi appelé métal d'apport). Ce métal s'attache à la boucle par capillarité et la remplit.

La boucle constitue ainsi le réservoir de matériau ionisable. Chauffée au besoin, elle permet de le conserver sous forme liquide.

Le nombre d'espèces ioniques disponibles avec les LMIS ne couvre pas l'ensemble des éléments. Bien qu'il soit possible, dans certains cas, d'utiliser une partie de ces éléments sous forme d'alliage et de «trier» ensuite les espèces ioniques désirées, la réalisation d'une LMIS à partir d'un métal simple comporte des contraintes:

- la **pression de vapeur** du métal à ioniser doit être suffisamment basse, pour que le métal ait une phase liquide sous vide. Par exemple, on ne peut pas utiliser le magnésium ou le zinc, qui se subliment lorsqu'on veut les fondre sous vide;
- la mouillabilité du tungstène par le métal à ioniser doit être bonne. Il doit diffuser par capillarité à la surface de la pointe en matériau réfractaire. Ce n'est pas le cas pour les couples argent/tungstène et cuivre/tungstène;
- la formation d'alliage entre le matériau de la pointe et le métal d'apport est à proscrire, car elle entraîne une corrosion rapide de la pointe et donc une destruction de la source. C'est notamment le cas avec le couple aluminium/tungstène.

**La pression de vapeur** est la pression exercée pour une température donnée par les vapeurs d'un liquide sur le récipient qui les contient.

## 3 Production, transport et manipulation de faisceaux d'ions focalisés

Une fois la pointe de tungstène recouverte de métal fondu, ce dernier est ensuite polarisé par une tension positive qui tire le liquide pour créer le phénomène émissif. En soumettant la pointe à une différence de potentiel  $V$  de plusieurs milliers de volts, le film de métal liquide recouvrant son extrémité prend la forme d'une structure conique stable. Cette configuration d'équilibre que les forces électriques et mécaniques maintiennent indéfiniment a été étudiée au début des années 1960 par le physicien britannique Geoffrey Taylor - d'où son nom de cône de Taylor.

Trois forces déterminent la forme du métal liquide: les forces électriques, la tension superficielle et la pression interne dans le film de métal fondu. Les forces électriques tendent à tirer les atomes du liquide selon les lignes de champ, tandis que la tension de surface assure la cohésion du liquide. Sans les forces électriques, le liquide formerait une gouttelette sphéroïdale à l'extrémité de la pointe. Les deux forces sont inversement proportionnelles au carré du rayon de courbure de la surface du liquide: plus la surface du métal est courbée, à l'extrémité de la pointe, plus forte sera la poussée centrifuge du champ électrique, mais plus grande sera la force cohésive centripète, due à la tension superficielle.

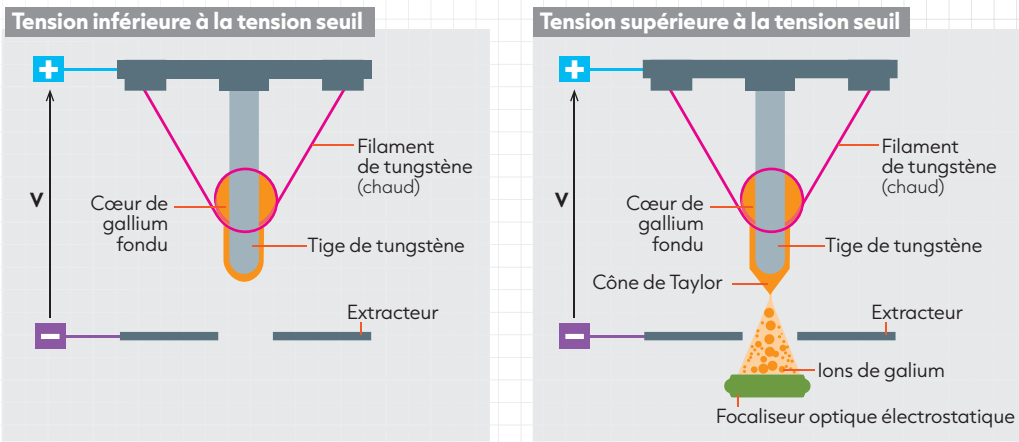
Au-dessus d'une certaine tension critique  $V_c$ , dite tension de seuil, il y a un départ de matière sous forme d'ions et d'amas chargés. La zone émissive située à l'apex, d'où partent les ions, est alors étirée en un fin jet de liquide. Ce processus d'émission est complexe, son mécanisme principal est l'évaporation de champ, causée par un champ électrique local intense de l'ordre de  $10^{10}$  V/m. Cela consiste à fournir à un atome situé à l'intérieur du métal une énergie supérieure à son énergie de liaison, pour franchir la barrière de potentiel qui le retenait et être émis sous forme d'un ion positif libre.

**L'angle solide** est l'analogie en trois dimensions d'un angle plan. Il se mesure en stéradians.

**La brillance** est le rapport du courant émis par la source au produit de la surface de la source par l'angle solide.

P. 55  
**La technologie des faisceaux d'ions focalisés**

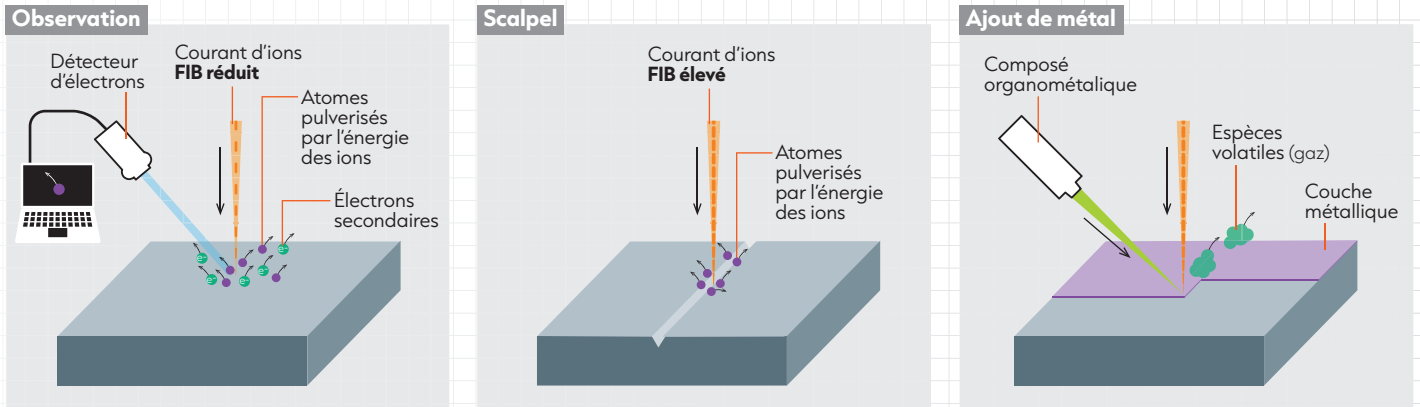
**FIG. 1 La technologie des faisceaux d'ions focalisés**



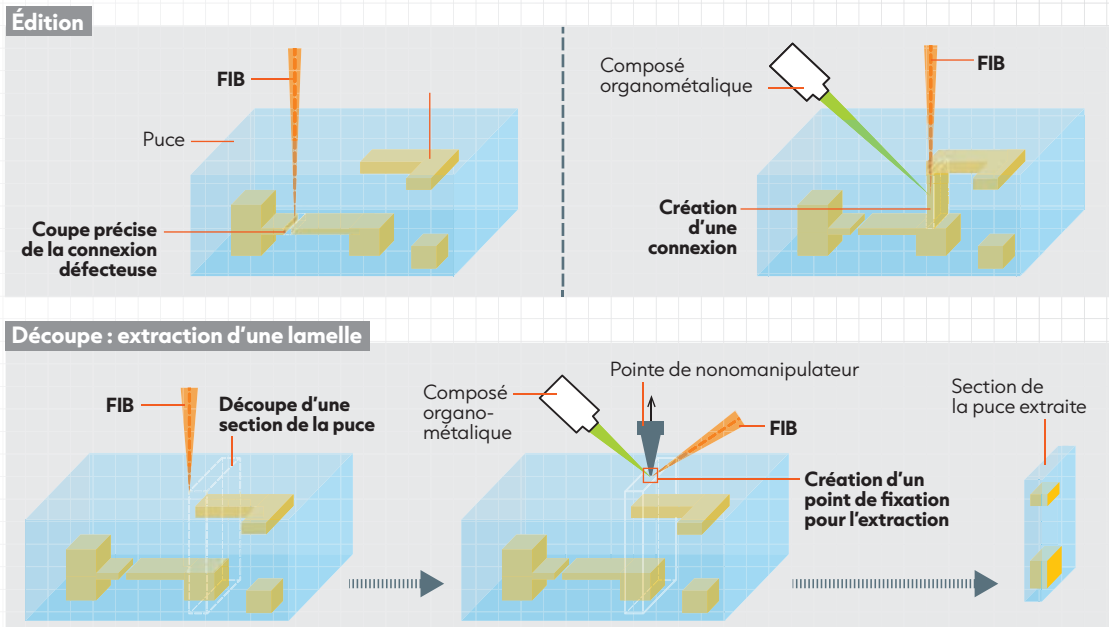
Le dispositif permettant l'émission d'un faisceau d'ions est composé d'une tige de tungstène traversant une boucle remplie de gallium fondu. Lorsqu'il est soumis à un champ électrique et que la tension est supérieure à la tension seuil, le gallium est ionisé et le faisceau est émis. Le métal qui se diffuse le long de la pointe se déforme alors sous forme de cône, appelé cône de Taylor.

**FIG. 2 Trois modes d'action du FIB**

Le faisceau d'ions focalisés a trois modes d'action différents. Avec un courant d'ions réduit, il sert à la microscopie ionique. Avec un courant plus élevé, le FIB permet de graver la surface d'un matériau. Enfin, avec l'ajout d'un composé organométallique qui se décompose sous l'action du faisceau, il est possible de créer une couche métallique.



**FIG. 3 Principale application dans l'industrie: l'édition et la découpe de circuits imprimés**



La technologie FIB est particulièrement utilisée dans l'industrie microélectronique: elle est capable de modifier de manière ultra-précise certaines couches de la puce, en coupant une connexion défectueuse ou en en créant une nouvelle, sans abimer le reste de la puce. Il est aussi possible d'extraire une lame mince pour pouvoir l'observer au microscope.

La source émise a plusieurs caractéristiques:  
 – la luminance ou brillance, qui est le flux d'ions émis par unité de surface. Ce paramètre important va fixer la valeur du courant dans chaque plan traversé par le faisceau. On utilise le concept de brillance réduite qui s'écrit :

$$B = \frac{dI}{d\Omega \cdot dS}$$

où  $dI/d\Omega$  est la densité d'ions par unité d'angle solide émise par la surface élémentaire  $dS$  de la source  
 B s'exprime en ampères par unité de surface et par unité d'angle solide ( $A/m^2 \cdot sr$ )

$$B = \frac{4 \cdot dI / d\Omega}{\pi \cdot d_v^2}$$

Dans le cas d'ions gallium, en posant  $dI/d\Omega = 20 \mu A/sr$  et  $d_v = 50 \text{ nm}$  (diamètre de la source virtuelle), on obtient finalement  $B \sim 10^6 A/cm^2 \cdot sr$ . Ce qui représente l'une des plus fortes valeurs connues pour les sources d'ions.  
 – l'intensité angulaire de l'émission ( $dI/d\alpha$ ): les ions sont émis dans un cône de demi-angle d'ouverture  $\alpha = 20^\circ$ . Cette distribution atteint un maximum près de l'axe du faisceau, on a alors  $dI/d\Omega = 20 \mu A/sr$ . Elle décroît ensuite de façon symétrique et s'annule pour  $\alpha = 20^\circ$ .

Dans une optique ionique, on utilise toujours en priorité la partie centrale du faisceau de façon à obtenir le maximum de courant transporté.

– sa taille virtuelle/ sa taille réelle: la charge d'espace résultant de la forte densité d'ions émis (environ  $10^{13}$  ions/s), confinés dans un espace restreint ( $< 10 \text{ nm}$ ) juste à l'extérieur de la surface de métal liquide, perturbe les trajectoires des ions émis et agrandit la dimension apparente de la zone émissive. On aboutit alors à une taille virtuelle de la zone émissive  $\sim 50 \text{ nm}$  à comparer avec la taille réelle  $\sim 1,5 \text{ nm}$ .

– la dispersion en énergie du faisceau émis. Ce paramètre est responsable de l'aberration chromatique des lentilles qui constitue la principale limitation pour l'obtention de sondes ioniques de taille nanométrique. Contrairement aux sources d'électrons fonctionnant par émission de champ pour lesquelles la dispersion est au maximum de l'ordre de 0,2 à 0,3 eV, pour une LMIS, la dispersion en énergie des ions émis est beaucoup plus importante. Toutes ces grandeurs permettent de caractériser la LMIS gallium et de la comparer aux différents types de sources existantes.

Une machine FIB, communément appelée colonne FIB, se compose de deux parties principales:

– le canon contient la source d'ions et une électrode d'extraction qui permet de définir l'axe d'émission du faisceau et de collecter une partie des **électrons secondaires** pour minimiser la pollution de la pointe. Ce canon génère un faisceau de particules ayant une énergie fixée (de quelques kiloelectronvolts (keV) à 50 keV en général)  
 – l'optique pour particules chargées focalise ensuite le faisceau d'ions, en corrige les défauts de stigmatisme et balaie le pinceau sortant à la surface de l'échantillon cible. La focalisation ou convergence du faisceau est obtenue par l'emploi de lentilles électrostatiques qui sont

plus adaptées aux faisceaux d'ions avec des propriétés de convergence indépendantes du rapport charge sur masse. Elles possèdent néanmoins des défauts intrinsèques: une aberration sphérique, c'est-à-dire la tendance à faire converger les particules vers un foyer qui dépend de la distance initiale des particules par rapport à l'axe optique et, surtout, une aberration chromatique importante, c'est-à-dire la variation de la distance focale en fonction de l'énergie des particules à focaliser. Comme la distance focale d'une lentille électrostatique dépend de l'énergie des particules, des ions d'énergies différentes convergent en des points légèrement différents, ce qui dégrade la taille de la sonde ionique.

Le balayage du faisceau d'ions sur la surface de l'échantillon est enfin assuré par un jeu de **défecteurs électrostatiques** commandés par des tensions générées de valeurs et de fréquences variables. Il devient possible grâce à une conception assistée par ordinateur (CAO) de dessiner des motifs complexes digitalisés, puis de les convertir en des matrices de points en assignant à chacun un temps d'irradiation, c'est-à-dire un nombre d'ions atteignant la surface d'un échantillon qui varie de la dizaine à plusieurs millions.

Une dernière électrode importante permet ce contrôle du nombre d'ions par point sur une telle dynamique: il s'agit d'un effaceur de faisceau, ou «blanking». Celui-ci est piloté par un générateur de tension rapide qui occulte, à un moment précis, le faisceau à l'intérieur de la colonne. De cette façon, il l'empêche d'atteindre l'échantillon cible.

#### 4 Intégration à un environnement technologique

La technologie des faisceaux d'ions est surtout utilisée en microfabrication, pour élaborer des structures dont l'ordre de grandeur des dimensions latérales va du micromètre jusqu'à environ 100 nm. La majorité des instruments FIB possède une architecture à faisceaux «croisés» ou «doubles»: le faisceau d'ions de la FIB et le faisceau d'électrons de la plate-forme de microscope électronique à balayage (MEB) sur laquelle la machine FIB est installée. Les deux axes optiques visant un même point de l'échantillon. Cette combinaison très performante fut popularisée au début des années 1980 par le Laboratoire de microstructures et de microélectronique, alors situé à Bagneux (Hauts-de-Seine), intégré au Centre national d'études des télécommunications (Cnet).

En général, ces machines à double faisceau donnent respectivement une fonction d'imagerie non destructive via le faisceau d'électrons et la micro ou nanoécriture in situ avec un contrôle en trois dimensions (X et Y et Z en profondeur) en utilisant le faisceau d'ions (et possiblement le faisceau d'électrons). L'imagerie de la cible repose sur l'interaction du faisceau d'électrons avec la surface de l'échantillon à observer. L'image est reconstruite point par point, en balayant de manière synchrone la surface de l'échantillon et l'écran de visualisation. L'intensité de l'interaction du faisceau avec l'échantillon est traduite en brillance pour chaque point de l'écran. Le faisceau d'ions peut aussi être utilisé pour l'imagerie, mais il dégrade la surface observée.

Une autre option, que nous avons choisie au Centre de nanosciences et de nanotechnologies (C2N), consiste à

Un **défecteur électrostatique** modifie la direction d'un flux de particules chargées.

Un **électron secondaire** est un électron arraché à la surface d'un matériau soumis à un processus d'ionisation comme le FIB.

utiliser une architecture avec une colonne FIB positionnée perpendiculairement sur une plateforme incorporant une platine porte-échantillon ayant des déplacements très précis et reproductibles, dont le positionnement est assuré par interférométrie laser. L'intérêt principal est de permettre une navigation en aveugle, sans avoir besoin d'imager la surface, et donc sans prendre le risque de dégrader ou polluer l'échantillon à structurer. Cela est possible grâce à un positionnement relatif de l'ordre de la dizaine de nanomètres dans le plan XY. En outre, la possibilité d'utiliser le mode «microscope ionique à balayage par détection des électrons secondaires» étant évidemment préservée, il devient alors possible de détecter des repères de cet échantillon puis, par traitement d'images, de déterminer avec une excellente précision la position, par exemple, de marques d'alignement définies au cours d'un processus antérieur. Il est aussi possible de réaliser directement ces marques par gravure FIB localisée pour des positions parfaitement déterminées et donc faciles à retrouver.

### 5 Une gradualité de dosages et d'effets localisés

Un faisceau d'ions lourds (gallium) de 30 keV focalisé dans une tache de quelques dizaines de nanomètres de diamètre a l'avantage de transférer l'énergie des ions incidents aux atomes de la cible de manière très localisée (fig. 2). Les chocs entre les ions incidents et les atomes de la cible vont localement être très intenses. Ils entraînent le déplacement de nombreux atomes de la cible, à condition que l'énergie cédée à un atome soit supérieure à son énergie-seuil de déplacement atomique. La pulvérisation se produit dans le cas particulier où un atome de la cible est éjecté de la surface. Deux conditions doivent être remplies : les couches de surface ont besoin de recevoir suffisamment d'énergie et les atomes composant les couches de surface doivent être déplacés en dehors de la région soumise au bombardement. Ce mécanisme de pulvérisation peut être contrôlé, car plus le nombre d'ions incident augmente, plus le nombre de collisions sur la surface de l'échantillon croît et plus la probabilité d'éjecter des atomes de la cible devient élevée. Les atomes situés au niveau des couches les plus profondes de l'échantillon sont moins susceptibles d'être pulvérisés car le faisceau d'ions perd de l'énergie à mesure qu'il pénètre dans l'échantillon. On pose comme règle qu'un ion gallium pénètre dans une cible de 1 nm par kilovolt de tension d'accélération. Il atteint donc 30 nm pour un faisceau de 30 keV. Le principal intérêt du FIB est qu'il est possible d'ajuster localement la dose (le nombre d'ions par point visé) par un contrôle du temps. On peut alors faire varier les profils de structures gravées dans les trois dimensions.

Enfin, les systèmes à faisceaux d'ions focalisés sont utilisés pour ajouter sur des circuits défaillants des pistes en matériaux conducteurs. On parle alors de «dépôt induit par faisceau d'ions» ou *Ibid* (ion beam induced deposition). Cette technique consiste à injecter un gaz précurseur organométallique, comme l'hexacarbonyle de tungstène  $W(CO)_6$ , directement sur la cible dans la chambre à vide. Le gaz va se condenser sur l'échantillon. En bombardant cette zone de l'échantillon avec le faisceau d'ions, le gaz précurseur va être décomposé en com-

posants volatils et non volatils comme le tungstène, qui restera déposé à la surface de l'échantillon en répliquant la géométrie dessinée par le faisceau (lignes, points...). Divers métaux ainsi que des matériaux isolants peuvent être déposés par ce même procédé. Le dépôt se produit par le transfert d'énergie induit par le faisceau primaire aux molécules du gaz précurseur qui sont alors cassées. Les composants non volatils (souvent métalliques) vont alors se déposer sous l'impact du faisceau. Il s'agit donc toujours de techniques «d'écriture directe» se produisant uniquement localement.

### 6 Les applications traditionnelles

Au cours des dernières décennies, des efforts considérables ont été réalisés pour trouver et mettre au point une série de techniques permettant l'édition de circuits intégrés (CI) (fig. 3), afin de détecter et corriger d'éventuelles erreurs ou anomalies soit dans la conception, soit lors de la production de ces CI. Dans ce contexte, la technologie FIB s'est avérée être très utile et compte parmi les plus emblématiques, en particulier dans l'analyse de défaillance des semi-conducteurs. Un faisceau d'ions focalisé éliminant la matière par gravure uniquement dans une zone précise, sans perturber les parties voisines, permet de réaliser des tomographies sous la surface, de couper ou de rétablir des connexions, ou encore de créer des ouvertures pour des tests en faisant le plus petit trou possible, via une ouverture de forme pyramidale. Le trou est fait en une seule fois avec un détecteur qui analyse les matériaux pulvérisés. Lorsque le signal du matériau de la couche visé est détecté, la gravure est arrêtée automatiquement.

Une autre application importante de la technologie FIB est la préparation d'échantillons pour la microscopie électronique en transmission (MET ou TEM, pour transmission electron microscopy). Préparer une lame mince par gravure FIB pour une analyse ultérieure en MET afin d'en analyser les caractéristiques cristallines peut sembler de prime abord audacieux et provocateur au vu des dégâts collisionnels induits par un bombardement FIB. Néanmoins, grâce à des techniques de préparation sophistiquées, il est devenu possible d'extraire des lames minces à des endroits précis d'un CI pour l'analyse en MET. Ce processus de lame mince repose sur la nanofabrication par gravure FIB d'un mur fin (< 50 nm) qui sera ensuite transparent aux électrons et donc observable en MET. Cette méthode permet de fabriquer des murs à des endroits préalablement choisis ayant une épaisseur de moins de 100 nm et une longueur supérieure à 10 µm sur des matériaux très divers, comme des semi-conducteurs, des métaux et même des matériaux isolants, avec un taux de réussite de près de 100%.

### 7 Les applications émergentes en nanosciences

Dans la plupart des cas, la technologie FIB est surtout employée selon l'approche dite «descendante» («top-down») consistant à réduire progressivement les dimensions d'objets ou de matériaux massifs existant. Il existe cependant une seconde approche dite «ascendante» («bottom-up») consistant à partir d'atomes ou de molécules et à les associer un à un pour élaborer

P. 55  
Trois modes  
d'action  
du FIB

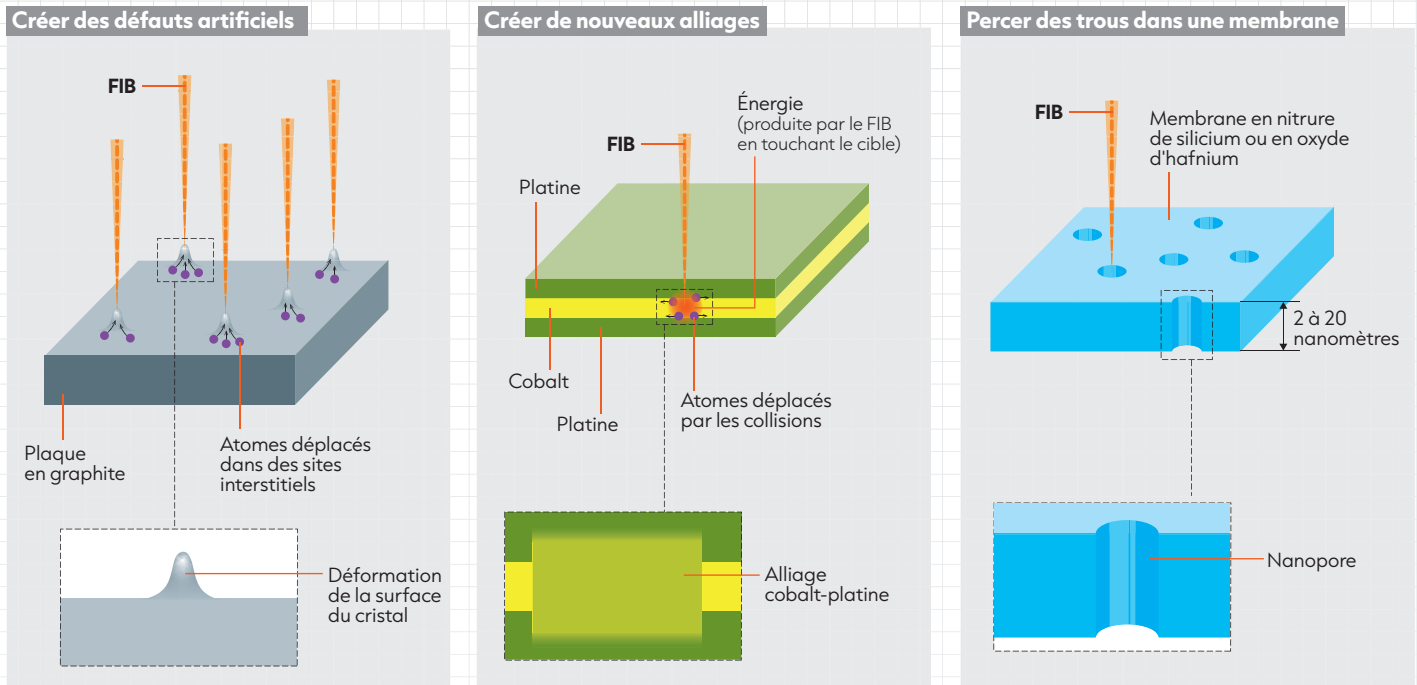
Un composé  
organo-  
métallique  
comprend  
un atome de  
carbone lié  
à un atome  
métallique.

P. 55  
Principale  
application  
dans l'indus-  
trie : l'édition  
et la découpe  
de circuits  
imprimés

La tomographie  
est un procédé  
d'imagerie  
permettant  
de reconstruire  
le volume d'un  
objet à partir  
de mesures  
réalisées  
en dehors de  
cet objet.

## FIG. 4 Applications émergentes

Parmi les nouvelles applications du FIB, trois se démarquent : la création de défauts artificiels générés par le contact entre le FIB et une plaque en graphite, la fabrication d'alliages localisés grâce au mélange de plusieurs couches de métaux, et le perçage de nanopores dans de fines membranes.



### P. 58 Applications émergentes

**La microscopie à effet tunnel** utilise un phénomène de physique quantique, l'effet tunnel, pour étudier la topographie de la surface d'un échantillon.

des édifices intelligents remplissant des fonctions spécifiques (fig. 4). Cette approche a connu une accélération foudroyante avec le développement de la **microscopie à effet tunnel** (STM), qui permet maintenant d'observer ces édifices moléculaires à une résolution atomique. La création de défauts artificiels pouvant jouer le rôle de germe pour la construction de tels édifices a été démontrée par l'utilisation d'un FIB. La méthode consiste à utiliser un bombardement local et à y induire des défauts contrôlés dans un matériau-cible, créés par le désordre induit par un très petit nombre (de quelques dizaines à quelques centaines) d'ions lourds comme le gallium percutant la cible. Les contraintes ainsi générées, en s'accumulant, déforment la surface du matériau sous la forme d'une bosse.

Dans la perspective de permettre une auto-organisation contrôlée de la surface, les caractéristiques de nucléation, de croissance et les propriétés de ces bosses induites par FIB ont été étudiées. On obtient ainsi des matériaux nanostructurés par «auto-assemblage guidé» ayant des propriétés (magnétiques, électriques, mécaniques...) spécifiques et originales.

Une autre application émergente est la création de nanopores artificiels, soit des ouvertures de taille nanométrique percées dans une membrane – en général, un film synthétique (composé de silicium, feuillet de graphène...). Un nanopore artificiel unique peut être considéré comme l'élément simple constitutif d'une membrane poreuse ayant une perméabilité choisie. Ces nanopores artificiels ont pour modèle les canaux biologiques situés dans les membranes des cellules biologiques. Ces derniers, grâce à leur sélectivité ou leurs propriétés d'ouverture/

fermeture, permettent le transport sélectif d'ions ou de molécules entre les milieux intra et extracellulaires. Le laboratoire C2N a une grande expérience du nanopercage de pores ayant des tailles ultimes de 3 à 4 nm dans des membranes de SiC de 20 nm d'épaisseur.

### 8 Les alternatives aux faisceaux d'ions gallium

Plusieurs types de sources d'ions alternatives aux sources d'ions LMIS gallium ont été proposés (fig. 5).

#### Sources d'ions de résolution atomique

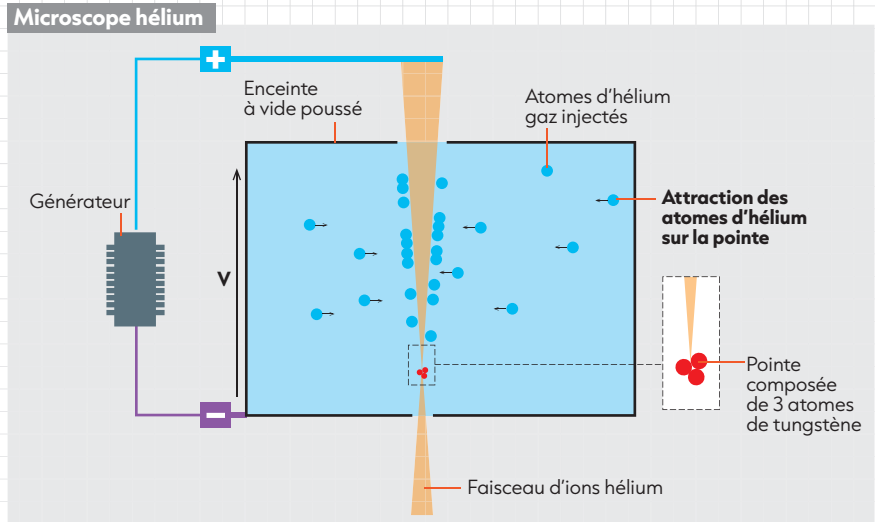
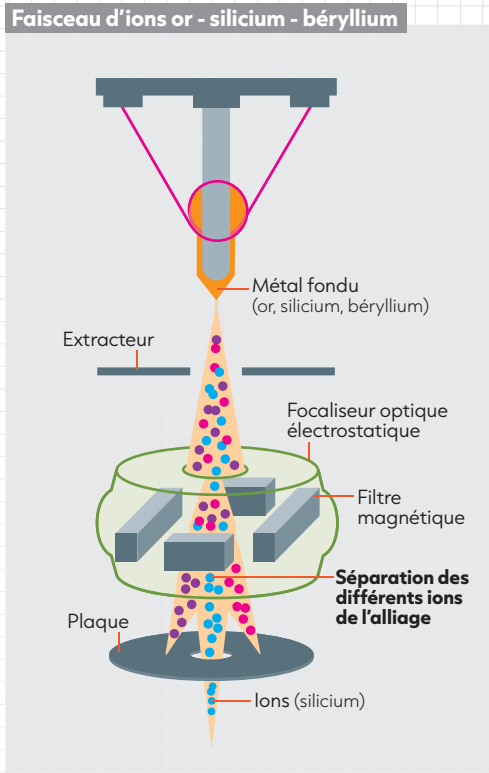
Il s'agit en premier lieu des sources d'ions gazeuses à effet de champ utilisant des gaz comme l'hélium ou le gaz néon. Ce type de source appelée gas field ion source (GFIS) a été développé initialement afin de développer un microscope ionique avec une résolution d'imagerie proche du niveau atomique. Il a ensuite été appliqué à certains défis en matière de nanostructuration avec un grand succès.

#### Sources d'ions à fort courant pour de très grandes vitesses de gravure

De nombreuses sources d'ions à fort courant sont développées depuis plusieurs années pour répondre aux demandes persistantes du marché principal du FIB, l'édition de circuits intégrés, qui demandent par exemple des vitesses d'érosion supérieures à 500  $\mu\text{m}^3/\text{s}$ . Il s'agit de sources de plasma ne présentant pas des valeurs de luminosité aussi élevées que les GFIS ou même les LMIS, mais qui permettent au FIB d'effectuer des usinages avec des faisceaux transportant des courants d'ions allant jusqu'au micro-ampère. Ces sources donnent des vitesses de gravure particulièrement élevées et permettent

P. 59 Nouvelles technologies du FIB

FIG. 5 Nouvelles technologies du FIB



Outre le gallium, d'autres types de métaux peuvent être utilisés pour la technologie FIB. Dans le faisceau d'ions or-silicium-béryllium, un filtre permet de moduler le type d'ions qu'on souhaite voir arriver sur la cible en fonction de l'action à réaliser. Pour le microscope hélium, les atomes d'hélium sont attirés par une pointe composée de trois atomes de tungstène avant d'être ionisés.

l'enlèvement de grandes quantités de matière. En outre, une faible contamination des échantillons et une forte localisation de l'énergie déposée sont obtenues lorsque des ions lourds tels que le **xénon** sont utilisés.

#### Sources d'ions à alliages

Les sources d'ions de métaux liquides font l'objet actuellement d'un fort regain d'intérêt avec l'emploi de sources d'ions à métal liquide n'utilisant plus un seul métal pur mais des alliages de métaux liquides (liquid metal alloy ion source). Ces alliages produisent des faisceaux d'ions contenant des ions tels que le lithium, le béryllium, le bore et le silicium à partir d'alliages comme l'or-silicium-béryllium. De tels faisceaux sont employés dans une colonne FIB équipée en son centre d'un filtre croisant un champ électrique et un champ magnétique ( $E \times B$ ), lequel permet de séparer les composantes ioniques présentes dans le faisceau, puis de sélectionner précisément le type d'ions issus de l'alliage qui sera envoyé sur la cible, en fonction de l'effet recherché. Il devient possible de produire des faisceaux d'ions très légers (lithium ou béryllium) ou très lourds (bismuth), et de faire du sur-mesure. Ces sources présentent des avantages certains au niveau du prototypage. En effet, leur remarquable brillance ( $B \sim 8 \cdot 10^6 \text{ A/cm}^2 \cdot \text{sr}$ ), et leur excellente stabilité d'émission (faibles fluctuations d'émission de courant et invariance de la zone d'émission) sont des atouts technologiques majeurs. Leurs coûts d'acquisition, d'exploitation et de maintenance sont de loin les plus faibles de toutes les sources considérées ici. Enfin, leur simplicité de fonctionnement et leur durée de vie, de plusieurs centaines voire de milliers d'heures, restent des arguments clés.

Le **xénon** est un gaz noble, inodore et incolore.

#### 9 Perspectives

Dans cet article, nous avons tenté de présenter les divers aspects de la technologie des faisceaux d'ions focalisés en tant qu'outil de micro et de nanostructuration ayant la capacité de modifier directement de manière locale et contrôlée les propriétés d'échantillons très divers. Ceci, en mettant à profit l'interaction existant entre un faisceau d'ion focalisé, souvent du gallium, de très grande finesse et de forte densité, avec une cible. Les exemples qui ont été donnés montrent que l'interaction de ces ions lourds et énergétiques permet d'obtenir des résultats qu'il n'est pas envisageable d'obtenir avec la même souplesse par une autre technique existante.

Les directions de développement ainsi que les hypothèses de travail des différentes équipes de recherche actives dans le domaine des faisceaux d'ions se concentrent désormais sur l'amélioration des sources d'ions et en particulier sur la réduction de la dispersion en énergie du faisceau émis et sur l'augmentation de l'intensité de courant délivré. Les faisceaux d'ions focalisés, s'ils ne sont plus une découverte récente, constituent toujours une technologie indispensable dans de nombreux secteurs, une technologie à fort potentiel avec des limites expérimentales qui continuent d'être repoussées. ■