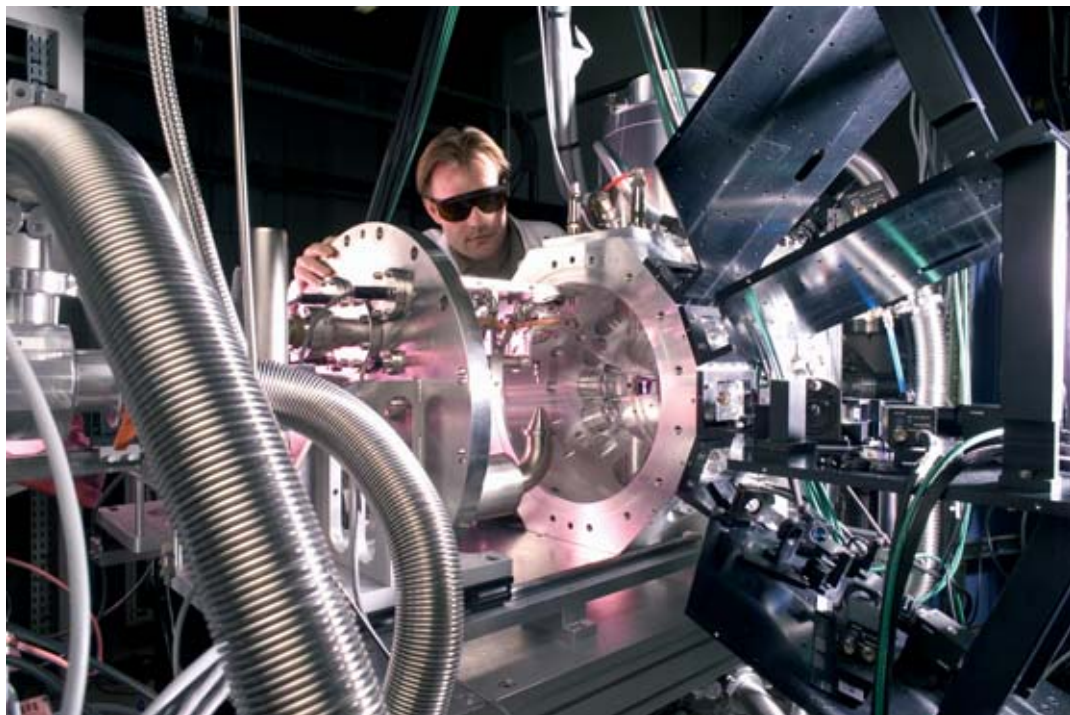




La lithographie dans l'extrême ultraviolet pour des circuits encore plus fins

Obtenir des motifs toujours plus fins pour traiter toujours plus d'informations est un défi permanent pour l'industrie microélectronique. Un axe de recherche très prometteur, suivi notamment par le CEA, utilise la lumière dans l'extrême ultraviolet (EUV). L'objectif est de disposer, vers 2010, de techniques de lithographie permettant de graver des motifs inférieurs à 32 nanomètres.



Réglage, au CEA/Saclay, de la source EUV plasma à excitation laser réalisée dans le cadre du consortium Exulite. Six faisceaux laser sont focalisés sur une microbille de verre simulant un microjet de xénon, au cœur d'une chambre d'expérience sous vide.

L'évolution spectaculaire de la technique de **lithographie** optique (encadré E, **La lithographie, clé de la miniaturisation**) a permis, depuis plusieurs décennies, de diminuer considérablement la taille des motifs gravés sur **silicium** et d'augmenter fortement les performances des **circuits intégrés** (CI). Le nombre de **transistors** d'un Pentium 4 actuel a ainsi déjà augmenté d'un facteur 1 000 par rapport au processeur 80286 d'un PC AT, un des premiers ordinateurs de bureau commercialisés au début des années 1980! À cette époque, bien peu étaient conscients de l'évolution sous-tendue par les prédictions de Gordon Moore, le cofondateur d'Intel Corporation (voir p. 32 l'encadré sur la loi de Moore dans *De la microélectronique à la nanoélectronique*) qui énonçait que le nombre de transistors des CI devait doubler tous les dix-huit mois. Si les prévisions actuelles de l'industrie de la microélectronique se réalisent, cette "loi de Moore" devrait encore rester valable pendant plusieurs années. Dans le même temps, la microélectronique est devenue un facteur économique considérable. La demande pousse à la fois vers une miniaturisation des structures des CI et vers des performances accrues. En parallèle, leurs prix ont chuté de façon spectaculaire. En 1973, le prix d'un million de transistors était celui d'une maison

(76 000 €) ; en 2005, c'est celui d'un *Post-it*[®] (0,004 €). Cet immense progrès est lié à des pas de gravure de CI de plus en plus petits. L'un des principaux facteurs à l'avoir permis est l'utilisation de longueurs d'onde de plus en plus courtes par les sources de lumière des appareils, nommés photorépétiteurs, employés dans le procédé de lithographie optique. Grâce à des techniques d'amélioration de **résolution**, on a même fini par graver des motifs qui sont bien en dessous de la longueur d'onde utilisée : aujourd'hui les lasers fournissent dans l'ultraviolet une longueur d'onde de 193 nm qui permet de graver des motifs d'environ 110 nm en production de volume.

L'introduction de nouvelles techniques de lithographie, représentant un investissement économique très lourd, nécessite une exploitation suffisamment longue pour assurer un retour sur investissement suffisant. C'est pour cette raison qu'a été récemment purement et simplement abandonnée l'étape technologique basée sur une longueur d'onde de 157 nm. Le secteur a préféré maintenir la technologie à 193 nm en introduisant une nouvelle astuce optique (voir *De la microélectronique à la nanoélectronique*).

Cette évolution est cependant limitée par la complexité des moyens techniques utilisés. Tous les acteurs du

secteur préféreraient se retrouver dans la situation des années 1980 où la dimension des motifs était bien supérieure aux longueurs d'onde utilisées, au moment où l'industrie cherche à développer les techniques de lithographie qui permettront d'atteindre, vers 2010, des tailles de motif inférieures ou égales à 32 nm.

La LEUV, d'abord une affaire d'optique

C'est en suivant cette logique qu'a été proposée par les différents protagonistes tels que ASML en Europe, Nikon et Canon au Japon et Intel aux États-Unis, la lithographie dans l'extrême **ultraviolet** (LEUV) fonctionnant avec une longueur d'onde de 13,5 nm⁽¹⁾. La LEUV (en anglais EUVL) est actuellement considérée comme la technologie de choix pour atteindre cet objectif ambitieux. Son introduction représenterait à la fois une réelle continuité et une vraie révolution. D'un côté, il s'agit d'une lithographie optique ce qui permettrait d'appliquer, comme dans le passé, une panoplie d'astuces déjà connues afin de réduire progressivement la taille des motifs. De l'autre, il s'agit d'une technologie totalement nouvelle: le procédé doit se réaliser intégralement sous ultraviolet, car pratiquement tous les matériaux, même sous forme gazeuse, absorbent la lumière à 13,5 nm. Cela impose l'abandon des optiques réfractives des anciens photorépéteurs et l'utilisation, notamment, d'un masque et d'optiques réfléchives, des miroirs extrêmement précis. Pire encore, la source de lumière ne sera plus un laser mais un **plasma** chaud créé à partir d'un minuscule volume de matière (xénon, lithium ou étain). Cette source sera l'un des éléments critiques qui détermineront le succès de la lithographie EUV. La figure 1 montre le schéma d'un photorépéteur EUV.

Le CEA et la source laser

L'introduction de la lithographie EUV représente un défi technologique énorme qui a été relevé par de nombreux acteurs dans les pays les plus avancés comme le Japon, les USA et l'Europe. Depuis plusieurs années, le CEA s'est fortement investi dans des projets de R&D concernant l'EUVL, à commencer par le projet national Preuve, dans le cadre du Réseau de micro et nanotechnologies (RMNT), qui a été initié par le Laboratoire d'électronique et de technologie de l'information (Leti) du CEA fin 1999 et s'est terminé en août 2002. Trois pôles du CEA ont participé à ce projet, notamment sa Direction de la recherche technologique comme maître d'œuvre d'une première machine de lithographie EUV en Europe ainsi que ses Directions des applications militaires et des sciences de la matière qui ont chacune développé une source plasma à 13,5 nm. Par la suite, plusieurs projets européens⁽²⁾ ont été lancés dans le cadre de Medea+ sur les masques, les sources et les procédés résines pour la LEUV (voir *Les résines et les masques, les autres composants critiques de la LEUV*). Enfin, un projet intégré du 6^e PCRDT, appelé More

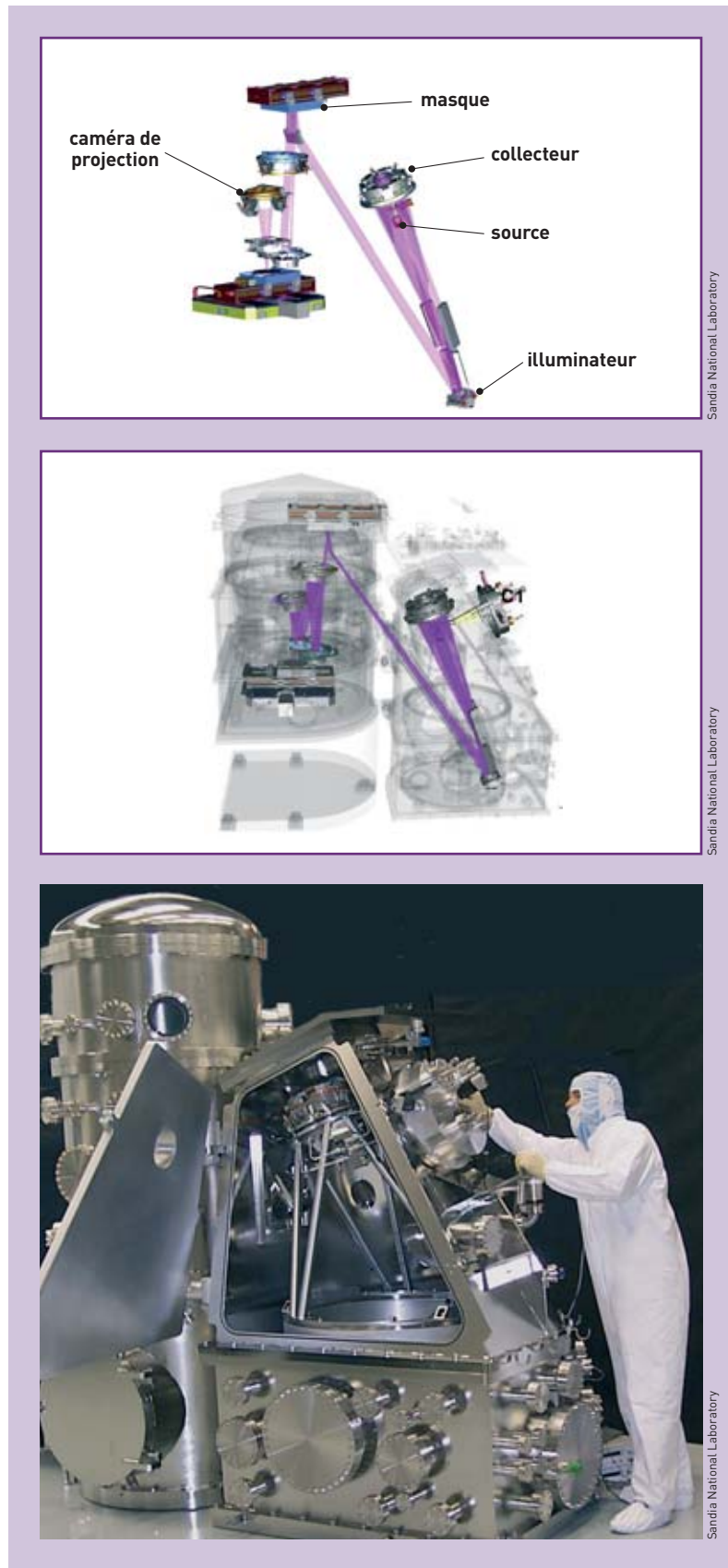


Figure 1. La première machine expérimentale de lithographie EUV construite au monde l'a été en 2001 au Sandia National Laboratory américain dans le cadre du projet EUV-LLC. Le schéma du haut montre le trajet optique du rayonnement EUV en partant de la source et en passant par le collecteur, l'illuminateur (du masque), le masque, la caméra de projection jusqu'à la plaque de silicium (wafer). Celui du milieu présente l'intégration du système optique dans une enceinte à vide divisée en deux parties, "source" à droite et "projection" (P.O. Box) à gauche. En bas, le prototype ETS (Engineering Test Stand) de la première machine expérimentale de lithographie EUV, construite au Sandia National Laboratory américain.

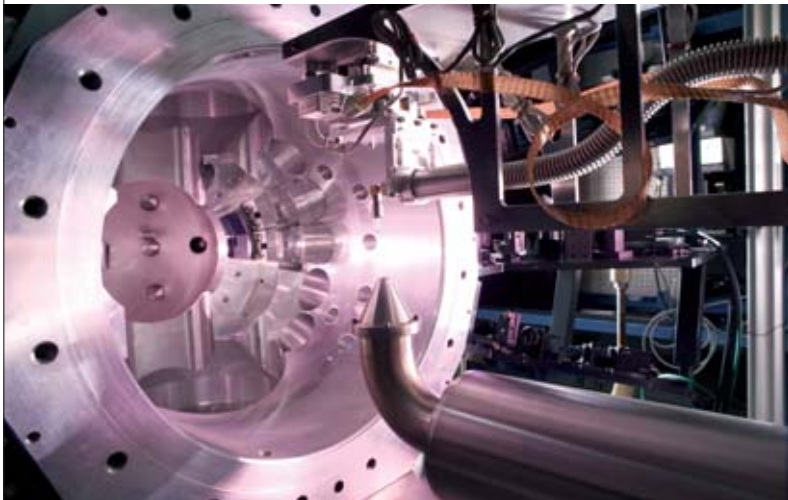
(1) La longueur d'onde a été fixée d'un commun accord à 13,5 nm pour optimiser la réflectivité des traitements optiques multicouches de type Mo-Si.

(2) (Extumask T404 - DRT/Leti), sur les sources (Exulite T405 - DEN/DPC/SCP et DSM/DRECAM/SPAM) et les procédés résines pour la EUVL (Excite T406 - DRT/Leti).

Moore, impliquant le CEA-Leti, a démarré en 2004. Au niveau des sources, le CEA est notamment impliqué dans le projet français Exulite, qui a pour but de construire une source EUV à plasma généré par laser de puissance. L'objectif pour les sources plasma en termes de performances et de coûts est très ambitieux. La puissance utile à 13,5 nm dans une fenêtre spectrale étroite de 0,27 nm doit atteindre 115 W. Afin de pouvoir collecter la lumière EUV, le diamètre du point source ne doit pas dépasser 1 mm. Des valeurs qui conduisent aux limites de la physique, qui sont données par un **corps noir** chauffé à environ 350 000 kelvins. Ce niveau de puissance est nécessaire, car une petite fraction seulement de la lumière créée par la source arrive au niveau de la plaquette de silicium (*wafer*) à graver, comme le montre schématiquement la figure 2. Ceci est dû à l'absorption inexorable de la lumière EUV sur son trajet optique au sein du photorépéteur en passant par le collecteur de la source, l'illuminateur

du masque, le masque et, enfin, la caméra de projection. En outre, la source doit atteindre une fiabilité exceptionnelle sur une durée de 30 000 heures et assurer une cadence de fonctionnement minimale de 7 kHz. Le rendement du procédé de génération de lumière EUV doit être optimisé afin de minimiser la charge thermique sur les différents éléments vitaux de la source. Parmi les deux différents types de source plasma actuellement développés dans le monde, le CEA a décidé de favoriser une source plasma à excitation laser (LPP – *Laser-Produced Plasma*) au détriment d'une source à décharge électrique (DPP – *Discharge-Produced Plasma*)⁽³⁾. L'inconvénient d'une source LPP est sa plus grande complexité et un prix plus élevé, mais de l'autre côté, les problèmes de pollution et de charge thermique semblent compromettre l'utilisation de la source DPP en milieu industriel.

Dans le cadre du projet paneuropéen Medea+ T405, dont le coordinateur est la société allemande Xtreme Technology, le consortium Exulite regroupe les efforts côté français. Le CEA, en étroite collaboration avec Alcatel Vacuum Technology et Thalès Laser, y réalise un prototype de faisabilité nommé ELSA/C (*EUV Lithography Source Apparatus / Cw*) avec le soutien financier du ministère de l'Industrie, de l'Économie et des Finances. Achievé fin 2005, il délivrera plusieurs watts de puissance EUV utile à une cadence de 10 kHz. L'installation a été montée dans un laboratoire commun aux Directions de



A. Gemin/CEA

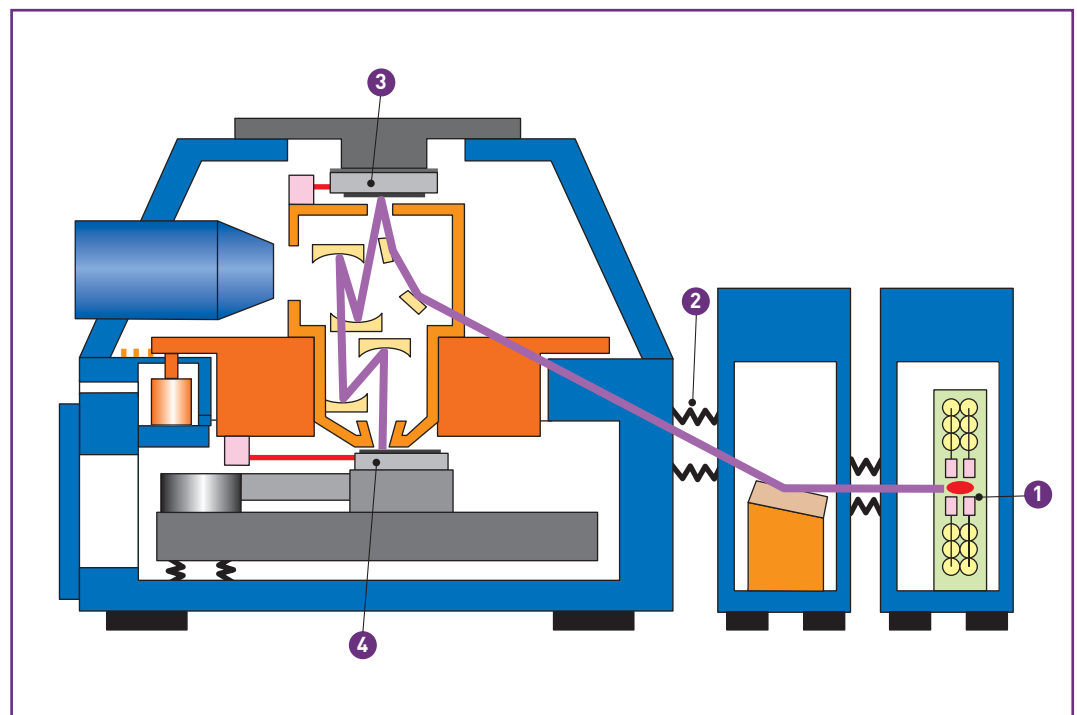
L'intérieur de la chambre d'expérience sous vide de la source EUV plasma à excitation laser du consortium Exulite au CEA/Saclay.

(3) Les deux types de sources qui sont actuellement développés se distinguent avant tout par leur mécanisme d'excitation et de chauffage du plasma émetteur. Tandis que les sources LPP (*Laser-Produced Plasma*) utilisent des lasers pulsés intenses qui sont focalisés sur une cible dense, les sources DPP (*Discharge-Produced Plasma*) sont basées sur une décharge électrique intense dans un gaz de densité modérée.

(4) Cryogénique : littéralement "produisant du froid" ; par extension, "en rapport avec les basses températures".

(5) Rms (*Root-Mean-Square*) : racine de la moyenne des carrés des écarts : méthode statistique pour rendre plus représentative la moyenne calculée de plusieurs valeurs.

Figure 2. Schéma illustrant la diminution progressive de la puissance lumineuse à 13,5 nm au sein d'un photorépéteur de lithographie EUV. Tandis que le niveau de puissance à la source ① est de 1 600 W, il n'est plus de 115 W au foyer intermédiaire ② situé entre collecteur et illuminateur, 6,1 W sur le masque ③ et seulement 0,321 W au niveau du *wafer* ④. L'exemple est donné pour une source plasma à décharge électrique (DPP). En utilisant une source plasma à excitation laser, on se retrouve dans une situation plus favorable du fait d'une meilleure collection du rayonnement EUV, ce qui permet de réduire la puissance au niveau de la source à 500 W.



Xtreme Technology (Allemagne)

l'énergie nucléaire et des sciences de la matière du CEA, la première étant en charge de la partie optique (lasers issus de la technologie SILVA d'enrichissement de l'uranium par laser) et de l'interfaçage avec l'enceinte source, la seconde responsable de l'intégration de l'enceinte source comprenant la cible de xénon liquide.

Le concept intègre dans une structure modulaire six modules identiques de lasers de puissance (500 W) focalisés en un même point sur une cible de xénon liquide (figure 3). Cette approche modulaire présente plusieurs avantages : elle est évolutive en termes de puissance et permet de réduire les coûts de développement et de maintenance. La puissance d'un module pourra à terme atteindre 2 kW. Avec de 10 à 20 modules lasers couplés, il sera donc possible d'injecter plusieurs dizaines de kW de puissance laser sur la cible afin d'obtenir la puissance EUV nécessaire. L'architecture de la source est le fruit d'une analyse fonctionnelle exhaustive définissant tous les sous-ensembles de la source : enceinte à vide refroidie comportant la cible cryogénique⁽⁴⁾ de xénon, le système d'injection de cible, le système de pompage et de recyclage du xénon, le transport et la focalisation des lasers, le collecteur EUV et le contrôle commande du système entier.

L'approche modulaire présente aussi un avantage déterminant lié au contrôle précis de la dose EUV sur la plaquette de silicium. Une méthode originale développée par le CEA permet une stabilité de la dose de 0,1 % rms⁽⁵⁾. Plusieurs brevets protègent d'ailleurs l'ensemble des solutions développées par le CEA.

➤ **Martin Schmidt**

Direction des sciences de la matière
CEA centre de Saclay

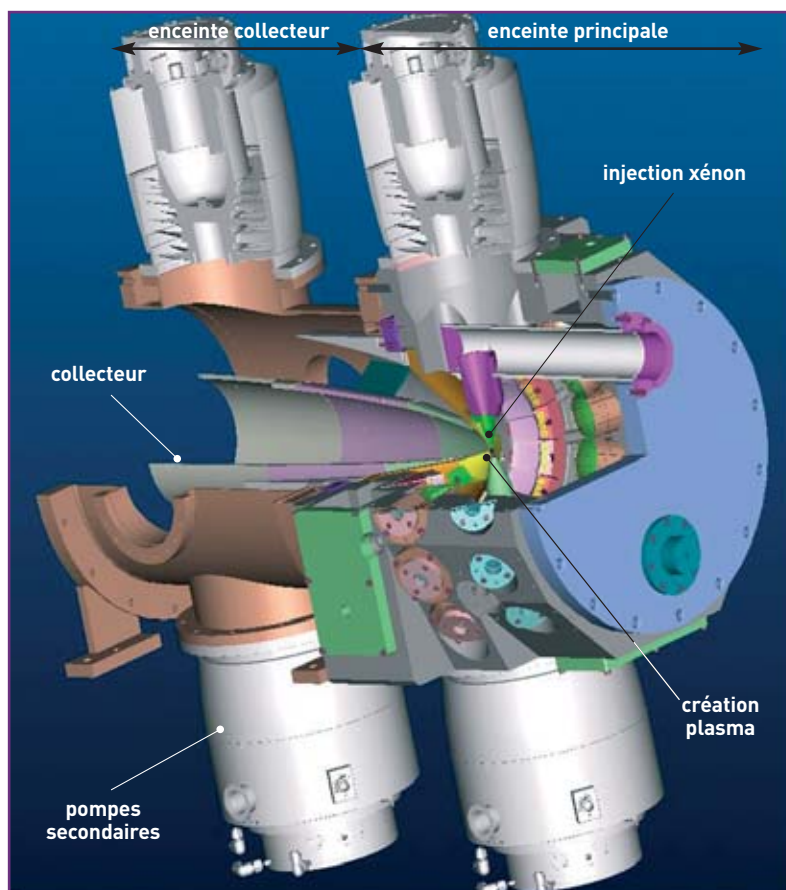


Figure 3. La source ELSA/C (EUV Lithographie Source Apparatus / Cw) en cours de réalisation par le consortium Exulite au CEA/Saclay. À droite se trouve l'enceinte source avec l'injecteur cryogénique de xénon et à gauche l'enceinte du collecteur avec une optique réfléchissante à incidence rasante. Les cylindres en haut et en bas sont des pompes à vide turbo à palier magnétique.

Les résines et les masques, les autres composants critiques de la LEUV

Dans la mise en œuvre de la lithographie en extrême UV, deux éléments, en dehors de la source, exigent des études et des essais poussés : les résines qui recouvrent la surface photosensible et les masques qui comportent le dessin des circuits à réaliser.

Les résines utilisées avant l'introduction de la photolithographie en UV profond (en anglais DUV, pour Deep-UV), fonctionnaient sur un mécanisme de photosensibilisation directe : un photon induit une seule et unique réaction photochimique qui modifie le comportement de dissolution de la résine dans le développeur. Le passage à la lithographie DUV et aujourd'hui à la lithographie dans l'extrême UV (LEUV) s'accompagne de l'augmentation de l'énergie des photons, et par conséquent d'une diminution de leur nombre pour une même dose d'exposition. Afin de conserver la même efficacité en termes de nombre de plaques traitées par heure, un nouveau concept a été proposé : l'amplification chimique pour laquelle la résine doit être composée d'un polymère, d'un composé photogénérateur d'acide (PAG en terminologie anglo-saxonne) va libérer un acide. Il y a alors création d'une image

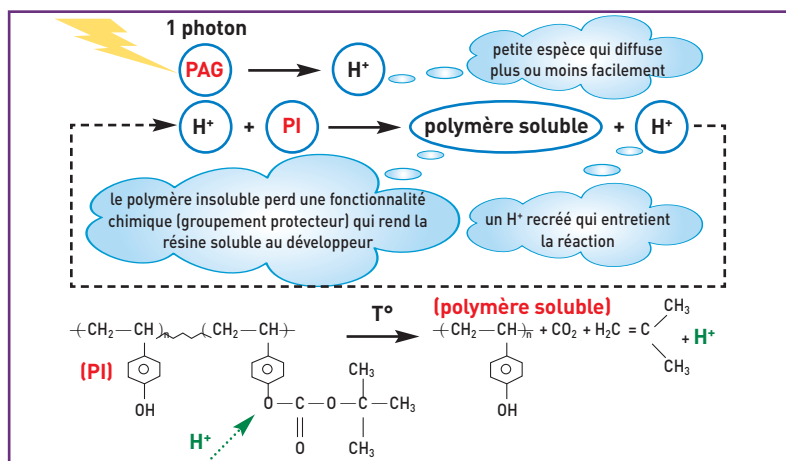
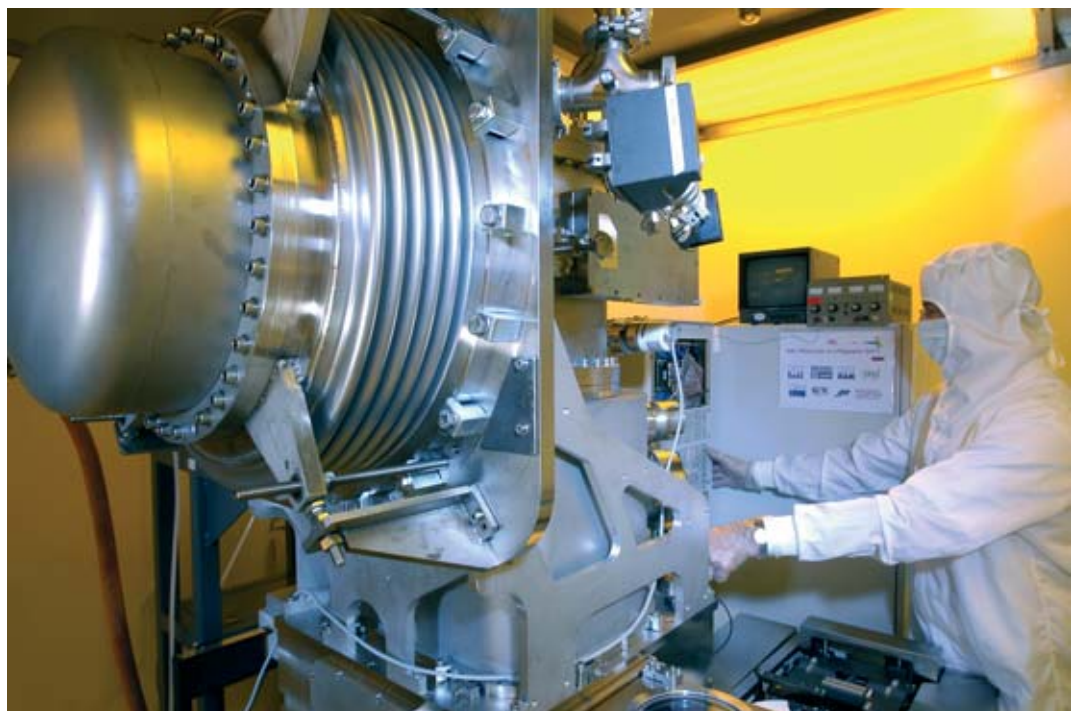


Figure 1. Principe de déprotection d'une résine à amplification chimique polymère insoluble (PI) + solvant + photogénérateur d'acide (PAG) + autres composants.



Banc expérimental de lithographie (BEL) dans l'extrême-UV en phase de tests au CEA/Grenoble. La source EUV n'est pas montée.

Artechnique/CEA

latente du masque dans la résine, mais les propriétés de dissolution ne sont pas encore modifiées.

Un second procédé, le recuit après exposition (PEB en anglais), engendre une déprotection par **catalyse** d'acide : une molécule d'acide est régénérée à chaque réaction de déprotection et est susceptible d'aller déprotéger un autre site après diffusion dans le film de résine. Cette réaction, appelée abusivement amplification chimique, augmente par activation thermique le comportement de dissolution de la résine (CAR en terminologie anglo-saxonne).

Au-delà des capacités des équipements de lithographie, la limite en termes de **résolution** des résines à amplification chimique est donc étroitement liée aux propriétés de diffusion des acides dans la matrice de

résine. Ces propriétés conditionnent la dimension critique (CD), la rugosité de flanc (LER) et la rugosité de ligne (LWR) des motifs insolés sur un film de résine dont l'épaisseur ne cesse de diminuer.

Les enjeux des prochaines générations de lithographie

Les critères définis par l'ITRS (*International Technology Roadmap for Semiconductors*), véritables verrous technologiques qu'il est impératif de faire sauter (voir tableau et l'article *De la microélectronique à la nanoélectronique*) sont autant d'axes de recherche au sein du CEA-Leti. C'est pour répondre à cette problématique que le CEA a mis en place une plateforme de recherche en EUV autour d'un outil unique en Europe, le BEL (Banc d'essai de lithographie) qui a été réalisé dans le cadre du programme Preuve, projet fédérateur d'acteurs français (groupes industriels, PME, laboratoires de recherche publics et universitaires). Il se situe dans le cadre du développement de la prochaine génération de lithographie pour la microélectronique avancée, et en particulier la réalisation de circuits aux dimensions largement submicroniques (inférieures à 32 nm).

Le BEL (figure 2) est installé en salle blanche au CEA-Leti à Grenoble. Il est constitué de quatre parties principales : la source EUV, le système d'illumination (constitué d'une optique de collection du flux EUV émis par la source et d'un filtre pour en limiter la bande spectrale à 13,5 nm), le système de projection (constitué du masque, de l'optique de projection et d'un système de focalisation sur le substrat) et le substrat, recouvert de résine photosensible dans laquelle l'image du masque est transférée.

La mise en œuvre du BEL au sein d'une plate-forme de lithographie dans l'EUV, permet au CEA et à ses partenaires de développer des projets de recherche en collaboration, et d'être *leader* de tâches conséquentes dans plusieurs programmes européens : Médéa+ Excite, Médéa+ Extumask, IST More Moore.

nœud (≈ CD)	45 nm	32 nm	22 nm
épaisseur de résine	90-160 nm	65-110 nm	45-80 nm
rugosité de ligne (LWR)	2 nm	1,4 nm	1 nm
sensibilité du PEB	1,5 nm/°C	1 nm/°C	1 nm/°C

Tableau. Critères des résines photosensibles selon l'*International Technology Roadmap for Semiconductors* (ITRS.)

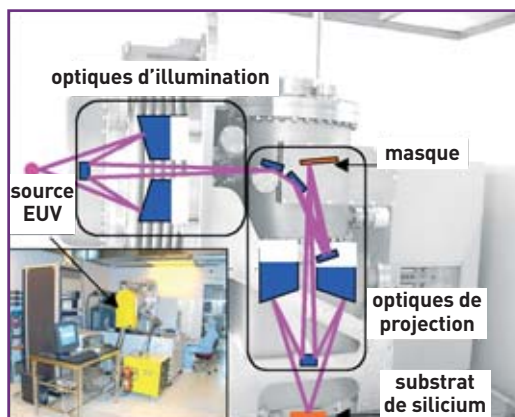


Figure 2. Banc d'essai de lithographie dans l'EUV (BEL) au CEA-Leti, à Grenoble.

L'utilisation d'une longueur d'onde dans l'extrême ultraviolet introduit une véritable rupture technologique en imposant un système entièrement sous ultravide, avec l'ensemble des optiques et du masque en mode réfléchif. La maîtrise de la réalisation des masques est l'un des aspects les plus critiques, ce qui a été encore confirmé lors du dernier symposium international sur la lithographie EUV en novembre 2004, tout particulièrement pour la réalisation de masque "zéro défaut".

La structure des masques EUV (ou réticules) est schématisée dans la figure 3. Leur réalisation implique des changements importants par rapport à celle des masques standard actuels pour plusieurs raisons. Les substrats pour les masques EUV nécessitent d'abord une amélioration d'un facteur 10 à 100 de leur qualité

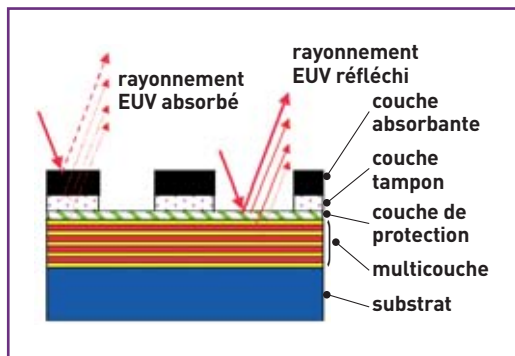


Figure 3. Schéma d'un masque EUV.

de polissage: les principales caractéristiques recherchées sont la planéité, le parallélisme entre faces, mais aussi l'absence de défauts après l'opération. Par ailleurs les masques EUV, qui opèrent en réflexion, requièrent la réalisation d'un miroir à la longueur d'onde de 13,5 nm. Ce miroir (figure 4) est un système interférentiel multicouche, dont la principale difficulté de réalisation est l'obtention de dépôt de multicouche à très faible taux de défauts (10^{-3} défauts par cm^2). Enfin, une résolution d'au moins 120 nm est nécessaire pour la réalisation des motifs du masque ("patterning" des couches absorbantes), ceci pour permettre d'atteindre des résolutions de 32 nm au niveau de la plaquette, compte tenu d'un facteur 4 de réduction du système optique. Les moyens métrologiques pour l'inspection des masques (réflectivité des miroirs multicouches à 13,5 nm, contrôle de défauts de taille aussi petite que 50 nm) sont spécifiques à l'utilisation des masques EUV.

Le rôle du CEA

Les activités du CEA-Leti concernent l'étude des procédés de dépôt pour masques, associée à un développement poussé dans le domaine de la métrologie des défauts dans les multicouches. Il est en effet connu que les défauts rencontrés dans les empilements multicouches des masques EUV résultent soit de la croissance de nodules (défauts intrinsèques), soit de défauts extrinsèques générés par le procédé de dépôt. Pour le procédé utilisé au CEA-Leti, chaque famille contribue environ pour moitié au nombre total de défauts, les défauts extrinsèques ayant des tailles

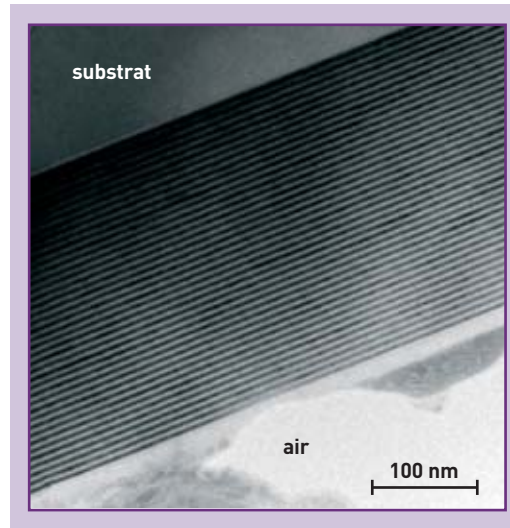


Figure 4. Masque EUV : observation au microscope électronique en transmission d'un multicouche constitué de 40 paires Mo(3 nm)/Si(4 nm).

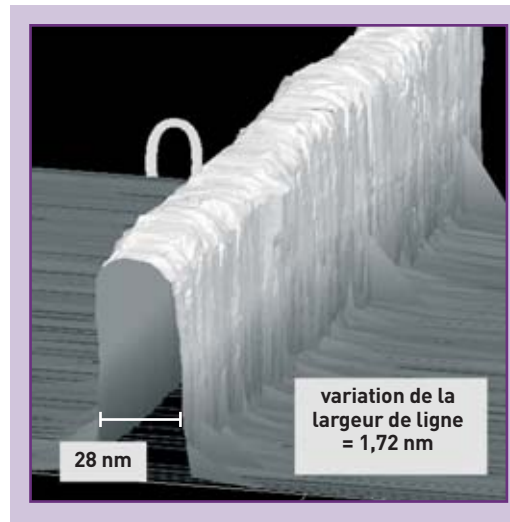


Figure 5. Profil 3D obtenu par AFM d'une ligne de résine insolée.

plutôt supérieures à 175 nm tandis que les intrinsèques se situaient entre 90 et 120 nm, pour une densité totale de 0,9 déf./ cm^2 $\varnothing > 90$ nm. Ce dernier chiffre traduit les limitations du procédé actuel et la nécessité d'effectuer un saut technologique pour lequel le Leti est aujourd'hui en mesure de proposer une solution originale de contrôle *in situ* des défauts générés par le procédé (défauts extrinsèques). Toutes ces activités (résines, masques) sont soutenues par un développement important des moyens de métrologie, qui sont eux-mêmes des sujets de recherche. Le Leti a mis en place, début 2004, un Centre expertise résines qui étudie les propriétés physico-chimiques des résines photosensibles. S'agissant de la métrologie dimensionnelle, le recours à des moyens d'analyse 3D comme l'AFM Veeco 3D permet de déterminer qualitativement mais aussi quantitativement les paramètres géométriques tels que le CD, le profil ou encore la rugosité de ligne (figure 5). Enfin, un banc de caractérisation de blanc de masque EUV, Comnet, permet de détecter, sur substrat de silicium de 200 mm, des défauts d'une taille de 80 nm.

> Jean-Philippe Gouy

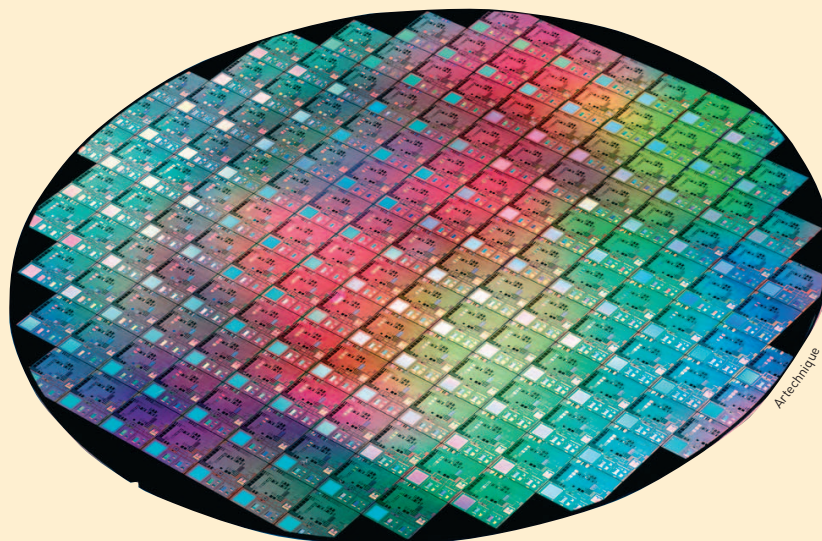
Direction de la recherche technologique
CEA-Leti centre de Grenoble

A Du monde macroscopique au nanomonde, ou l'inverse...

Afin de se représenter plus aisément les dimensions des objets micro et nanoscopiques*, il est pratique de procéder à des comparaisons et courant de faire correspondre différentes échelles, par exemple celle du monde du vivant, de la molécule à l'homme, et celle des objets manipulés ou fabriqués par lui (figure). Cette correspondance entre "artificiel" et "naturel" permet, par exemple, de voir que des **nanoparticules** fabriquées artificiellement sont plus petites que des globules rouges.

Un autre mérite de cette juxtaposition est d'illustrer les deux grandes façons

*Du grec *nano* qui signifie "tout petit" et est utilisé comme préfixe pour désigner le milliardième (10^{-9}) d'une unité. En l'occurrence, le **nanomètre** ($1 \text{ nm} = 10^{-9} \text{ m}$, soit un milliardième de mètre) est l'unité reine du monde des nanosciences et des nanotechnologies.



Tranche de silicium de 300 mm réalisée par l'Alliance Crolles2, illustration de la démarche *top-down* actuelle de la microélectronique.

d'élaborer des objets ou des systèmes nanométriques : la voie descendante (*top-down*) et la voie ascendante (*bottom-up*). Deux chemins mènent en effet au nanomonde : la fabrication moléculaire, qui passe par la manipulation d'**atomes** individuels et la construction à partir de la base, et l'ultraminaturisation, qui produit des systèmes de plus en plus petits.

La voie descendante est celle du monde artificiel, qui part de matériaux macroscopiques, ciselés par la main de l'homme puis par ses instruments : c'est elle qu'a empruntée l'électronique depuis plusieurs dizaines d'années, principalement avec le **silicium** comme substrat, et ses "tranches" (*wafers*) comme entités manipulables. C'est d'ailleurs la microélectronique qui a largement contribué à donner à cette voie le nom anglais sous laquelle elle

est connue. Mais il ne s'agit plus seulement d'adapter la miniaturisation de la filière silicium actuelle, mais aussi de prendre en compte, pour s'en prémunir ou les utiliser, les phénomènes physiques, **quantiques** en particulier, qui apparaissent aux faibles dimensions.

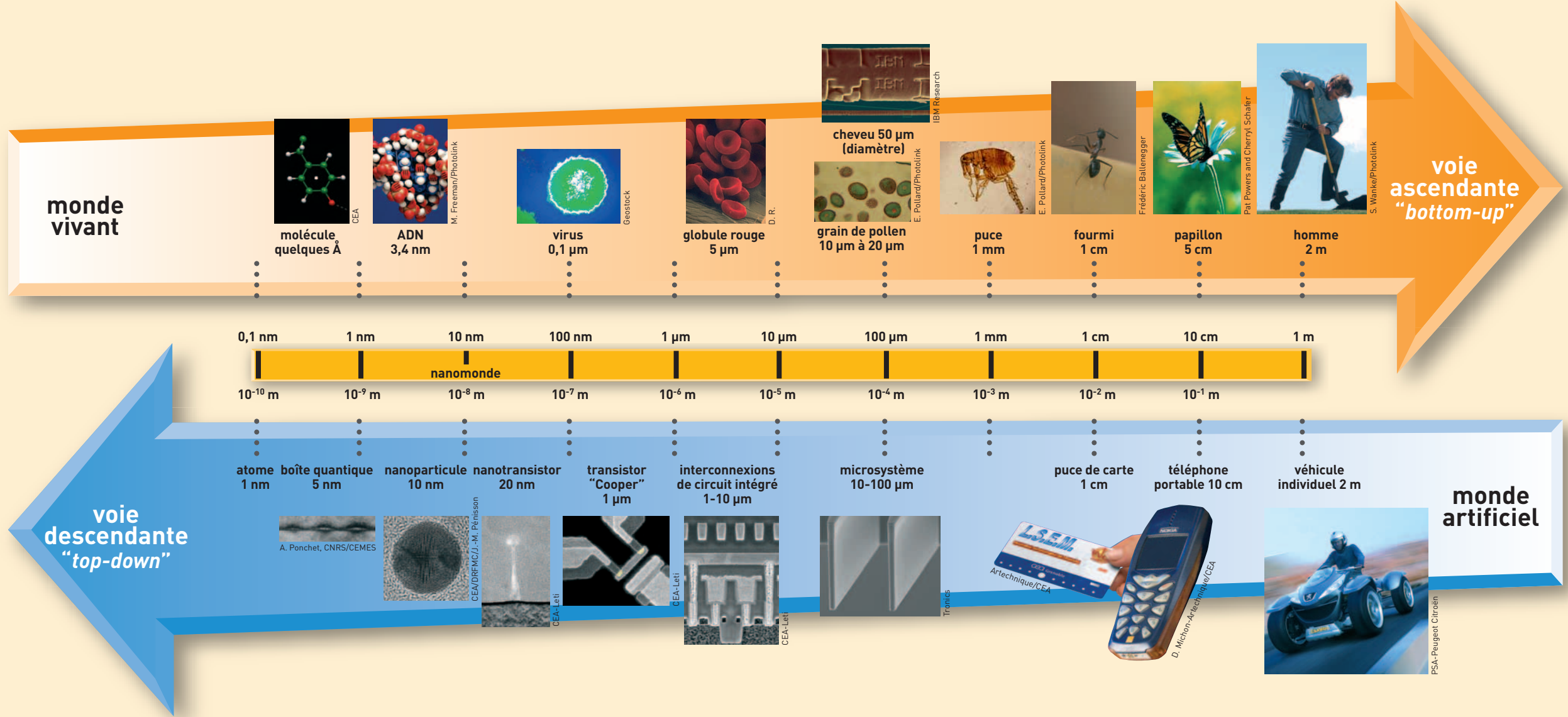
La voie ascendante peut permettre de passer outre ces limites physiques et aussi de réduire les coûts de fabrication, en utilisant notamment l'**auto-assemblage** des composants. C'est elle que suit la vie en pratiquant l'assemblage de molécules pour créer des **protéines**, enchaînement d'acides aminés que des super-molécules, les **acides nucléiques** (ADN, ARN), savent faire produire au sein de cellules pour former des organismes, les faire fonctionner et se reproduire tout en se complexifiant. Cette voie, dite "*bottom-up*", vise à orga-

niser la matière à partir de "briques de base", dont les atomes eux-mêmes sont les plus petits constituants, à l'instar du monde vivant. La nanoélectronique du futur cherche à emprunter cette voie d'assemblage pour aboutir à moindre coût à la fabrication d'éléments fonctionnels.

Les **nanosciences** peuvent ainsi être définies comme l'ensemble des recherches visant à la compréhension des propriétés (physiques, chimiques et biologiques) des nano-objets ainsi qu'à leur fabrication et à leur assemblage par auto-organisation.

Les **nanotechnologies** regroupent l'ensemble des savoir-faire qui permettent de travailler à l'échelle moléculaire pour organiser la matière afin de réaliser ces objets et matériaux, éventuellement jusqu'à l'échelle macroscopique.

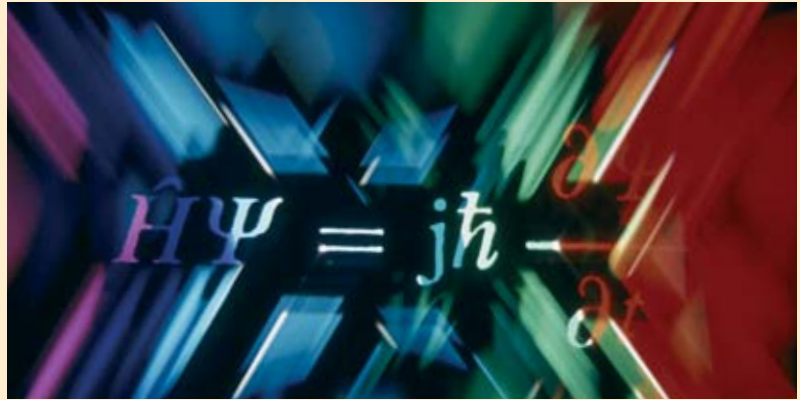
A (Suite)



B Quelques repères de physique quantique

La **physique quantique** (historiquement dénommée mécanique quantique) est l'ensemble des lois physiques qui s'appliquent à l'échelle microscopique. Fondamentalement différentes de la plupart de celles qui semblent s'appliquer à notre propre échelle, elles n'en constituent pas moins le socle global de la physique à toutes ses échelles. Mais à l'échelle macroscopique, ses manifestations ne nous apparaissent pas étranges, à l'exception d'un certain nombre de phénomènes *a priori* curieux, comme la **supraconductivité** ou la superfluidité, qui justement ne s'expliquent que par les lois de la physique quantique. Au demeurant, le passage du domaine de validité des lois paradoxales de cette physique à celui des lois, plus simples à imaginer, de la physique classique peut s'expliquer d'une façon très générale, comme cela sera évoqué plus loin.

La physique quantique tire son nom d'une caractéristique essentielle des objets quantiques : des caractéristiques comme le moment angulaire (**spin**) des particules sont des quantités **discrètes** ou discontinues appelées **quanta**, qui ne peuvent prendre que des valeurs multiples d'un *quantum* élémentaire. Il existe de même un **quantum d'action** (produit d'une énergie par une durée)



D. Sarrault/CEA

“Vue d'artiste” de l'équation de Schrödinger.

appelé **constante de Planck** (h), dont la valeur est de $6,626 \cdot 10^{-34}$ joule-seconde. Alors que la physique classique distingue *ondes* et *corpuscules*, la physique quantique englobe en quelque sorte ces deux concepts dans un troisième, qui dépasse la simple dualité onde-corpuscule entrevue par Louis de Broglie, et qui, quand nous tentons de l'appréhender, semble tantôt proche du premier et tantôt du deuxième. L'objet quantique constitue une entité inséparable de ses conditions d'observation, sans attribut propre. Et cela, qu'il s'agisse d'une particule – en aucun cas assimilable à une bille minuscule qui suivrait une quelconque trajectoire – de lumière

(**photon**) ou de matière (**électron, proton, neutron, atome...**).

Cette caractéristique donne toute sa force au **principe d'incertitude d'Heisenberg**, autre base de la physique quantique. Selon ce principe [d'*indétermination* plutôt que d'*incertitude*], il est impossible de définir avec précision à un instant donné à *la fois* la position d'une particule et sa vitesse. La mesure, qui reste possible, n'aura jamais une précision meilleure que h , la constante de Planck. Ces grandeurs n'ayant pas de réalité intrinsèque en dehors du processus d'observation, cette détermination simultanée de la position et de la vitesse est simplement impossible.

B (Suite)

C'est qu'à tout instant l'objet quantique présente la caractéristique de *superposer* plusieurs états, comme une onde peut être le résultat de l'*addition* de plusieurs autres. Dans le domaine quantique, la hauteur d'une onde (assimilable à celle d'une vague par exemple) a pour équivalent une **amplitude de probabilité** (ou onde de probabilité), nombre complexe associé à chacun des états possibles d'un système qualifié ainsi de quantique. Mathématiquement, un état physique d'un tel système est représenté par un **vecteur d'état**, fonction qui, en vertu du principe de superposition, peut s'ajouter à d'autres. Autrement dit, la somme de deux vecteurs d'état possibles d'un système est *aussi* un vecteur d'état possible du système. De plus, le produit de deux espaces vectoriels est aussi la somme de produits de vecteurs, ce qui traduit l'**intrication** : un vecteur d'état étant généralement étalé dans l'espace, l'idée de localité des objets ne va plus de soi. Dans une paire de particules intriquées, c'est-à-dire créées ensemble ou ayant déjà interagi l'une sur l'autre, décrite par le *produit* et non par la *somme* de deux vecteurs d'état individuels, le destin de chacune est lié à celui de l'autre, quelle que soit la distance qui pourra les séparer. Cette caractéristique, également appelée *l'enchevêtrement quantique d'états*, a

des implications vertigineuses, sans parler des applications imaginables, de la cryptographie quantique à – pourquoi ne pas rêver ? – la téléportation.

Dès lors, la possibilité de prévoir le comportement d'un système quantique n'est qu'une prédictibilité probabiliste et statistique. L'objet quantique est en quelque sorte une "juxtaposition de possibles". Tant que la mesure sur lui n'est pas faite, la grandeur censée quantifier la propriété physique recherchée n'est pas strictement définie. Mais dès que cette mesure est engagée, elle détruit la **superposition quantique**, par *réduction du paquet d'ondes*, comme Werner Heisenberg l'énonçait en 1927.

Toutes les propriétés d'un système quantique peuvent être déduites à partir de l'équation proposée l'année précédente par Erwin Schrödinger. La résolution de cette **équation de Schrödinger** permet de déterminer l'énergie du système ainsi que la **fonction d'onde**, notion qui a donc tendance à être remplacée par celle d'amplitude de probabilité.

Selon un autre grand principe de la physique quantique, le **principe (d'exclusion) de Pauli**, deux particules identiques de spin $\frac{1}{2}$ (c'est-à-dire des **fermions**, en particulier les électrons) ne peuvent avoir à la fois la même position, le même spin et la même vitesse (dans les limites

posées par le principe d'incertitude), c'est-à-dire se trouver dans le même *état quantique*. Les **bosons** (en particulier les photons), ne suivent pas ce principe et peuvent se trouver dans le même état quantique.

La coexistence des **états superposés** donne sa **cohérence** au système quantique. Dès lors, la théorie de la **décohérence quantique** peut expliquer pourquoi les objets macroscopiques ont un comportement "classique" tandis que les objets microscopiques, atomes et autres particules, ont un comportement quantique. Plus sûrement encore qu'un dispositif de mesure pointu, "l'environnement" (l'air, le rayonnement ambiant, etc.) exerce son influence, éliminant radicalement toutes les *superpositions d'état* à cette échelle. Plus le système considéré est gros, plus il est en effet couplé à un grand nombre de degrés de liberté de cet environnement. Et donc moins il a de "chances" – pour rester dans la logique probabiliste – de sauvegarder une quelconque cohérence quantique.

POUR EN SAVOIR PLUS

Étienne KLEIN, *Petit voyage dans le monde des quanta*, Champs, Flammarion, 2004.

C L'épitaxie par jets moléculaires

La fabrication des **puits quantiques** utilise la technique d'**épitaxie** (du grec *taxi* (ordre) et *epi* (dessus) par jets moléculaires (en anglais MBE, pour *Molecular Beam Epitaxy*). Le principe de cette technique de dépôt physique, développée initialement pour la croissance **crystalline** des **semi-conducteurs** de la famille III-V, est fondé sur l'évaporation des différents constituants purs du matériau à élaborer dans une enceinte où est maintenu un vide poussé (pression pouvant être de l'ordre de $5 \cdot 10^{-11}$ mbar) afin d'éviter toute pollution de la surface. Un ou des jets thermiques d'**atomes** ou de **molécules** réagissent sur la surface propre d'un substrat monocristallin, placé sur un support maintenu à haute température (quelques centaines de °C), qui sert de trame pour former un film dit épitaxique. Il est ainsi possible de fabriquer des empilements de couches aussi fines que le milliardième de millimètre, c'est-à-dire composées de seulement quelques plans d'atomes.

Les éléments sont évaporés ou sublimés à partir d'une source de haute pureté, placée dans une **cellule à effusion** (chambre dans laquelle un flux moléculaire passe d'une région où règne une pression donnée à une région de plus basse pression) chauffée par **effet Joule**.

La croissance du film peut être suivie *in situ* et en temps réel en utilisant diverses sondes structurales et analytiques, en particulier des techniques d'étude de la qualité des surfaces et de leurs transitions de phase par diffraction électronique en incidence rasante, LEED (pour *Low energy electron diffraction*) ou RHEED (pour *Reflection high-energy electron diffraction*) et diverses méthodes **spectroscopiques** (spectroscopie d'**électrons** Auger, SIMS (spectrométrie de masse d'**ions** secondaires), spectrométrie de photoélectrons XPS par **rayons X** et UPS (*Ultraviolet photoelectron spectroscopy*).

La technique d'épitaxie par jets moléculaires s'est étendue à d'autres semi-

conducteurs que les III-V, à des métaux et à des isolants, se développant avec les progrès des techniques d'*ultravide*. Le vide régnant dans la chambre de croissance, dont la conception varie en fonction de la nature du matériau à déposer, doit en effet être meilleure que 10^{-11} mbar pour permettre la croissance d'un film de haute pureté et d'excellente qualité cristalline à des températures de substrat relativement basses. Il s'agit de qualité de vide lorsque le bâti est au repos. Pour la croissance d'arséniures, par exemple, le vide résiduel est de l'ordre de 10^{-8} mbar dès que la cellule d'arsenic est portée à sa température de consigne pour la croissance. Le pompage pour atteindre ces performances fait appel à plusieurs techniques (pompage ionique, cryopompage, sublimation de titane, pompes à diffusion ou turbomoléculaires). Les principales impuretés (H_2 , H_2O , CO et CO_2) peuvent présenter des pressions partielles inférieures à 10^{-13} mbar.

D Le transistor, composant de base des circuits intégrés

En décembre 1947, John Bardeen et Walter H. Brattain réalisaient le premier **transistor** en germanium. Avec William B. Shockley, aux Bell Laboratories, ils développaient l'année suivante le transistor à jonction et la théorie associée. Au milieu des années 1950, les transistors seront réalisés en **silicium** (Si), qui reste aujourd'hui le **semi-conducteur** généralement utilisé, vu la qualité inégalée de l'interface créée par le silicium et l'oxyde de silicium (SiO_2), qui sert d'isolant.

En 1958, Jack Kilby invente le **circuit intégré** en fabriquant cinq composants sur le même substrat. Les années 1970 verront le premier microprocesseur d'Intel (2250 transistors) et les premières mémoires. La complexité des circuits intégrés ne cessera de croître exponentiellement depuis (doublement tous les deux-trois ans, selon la "loi de Moore") grâce à la miniaturisation des transistors. Le transistor (de l'anglais *transfer resistor*, résistance de transfert), composant de base des **circuits intégrés** micro-

électroniques, le restera *mutatis mutandis* à l'échelle de la nanoélectronique : adapté également à l'amplification, entre autres fonctions, il assume en effet une fonction basique essentielle : laisser passer un courant ou l'interrompre à la demande, à la manière d'un commutateur (figure). Son principe de base s'applique donc directement au traitement du langage binaire (0, le courant ne passe pas ; 1, il passe) dans des circuits logiques (inverseurs, portes, additionneurs, cellules mémoire).

Le transistor, fondé sur le transport des électrons dans un solide et non plus dans le vide comme dans les tubes électroniques des anciennes **triodes**, est composé de trois **électrodes** (*anode, cathode et grille*) dont deux servent de réservoirs à **électrons** : la **source**, équivalent du filament *émetteur* du tube électronique, le **drain**, équivalent de la plaque *collectrice*, et la **grille**, le "contrôleur". Ces éléments ne fonctionnent pas de la même manière dans les deux principaux types de transistors utilisés aujourd'hui, les *transistors bipolaires à jonction*, qui ont été les premiers à être utilisés, et les *transistors à effet de champ* (en anglais FET, *Field Effect Transistor*). Les transistors bipolaires mettent en œuvre les deux types de porteurs de charge, les électrons (charges négatives) et les **trous** (charges positives), et se composent de deux parties de substrat semi-conducteur identiquement

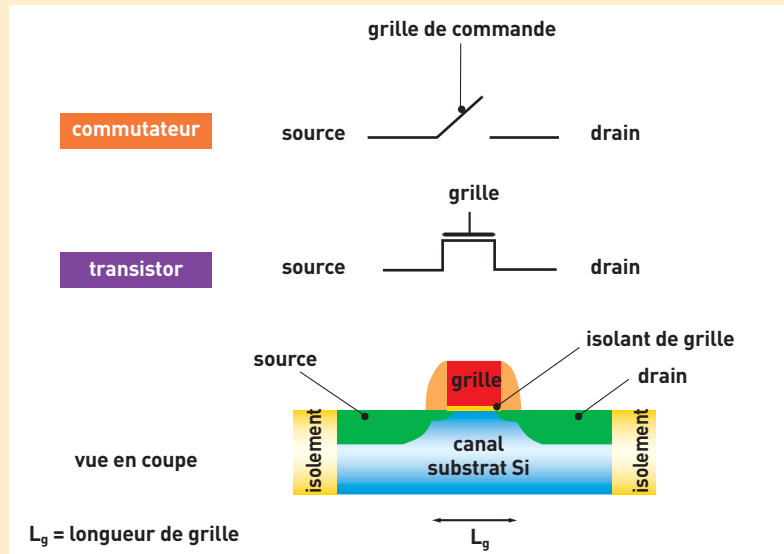


Figure. Un transistor MOS est un commutateur qui permet de commander le passage d'un courant électrique de la source (S) vers le drain (D) à l'aide d'une grille (G) isolée électriquement du canal de conduction. Le substrat en silicium est noté B (pour *Bulk*).

D (Suite)

dopées (p ou n), séparées par une mince couche de semi-conducteur inversement dopée. L'assemblage de deux semi-conducteurs de types opposés (jonction p-n) permet de ne faire passer le courant que dans un sens. Qu'ils soient de type n-p-n ou p-n-p, les transistors bipolaires sont fondamentalement des amplificateurs de courant, commandés par un courant de grille⁽¹⁾ : ainsi dans un transistor n-p-n, la tension appliquée à la partie p contrôle le passage du courant entre les deux régions n. Les circuits logiques utilisant des transistors bipolaires, appelés TTL (*Transistor Transistor Logic*), sont plus consommateurs de courant que les transistors à effet de champ, qui présentent un courant de grille nul en régime statique et sont commandés par l'application d'une tension.

Ce sont ces derniers, sous la forme **MOS** (Métal oxyde semi-conducteur), qui composent aujourd'hui la plupart des circuits logiques du type CMOS (C pour complémentaire)⁽²⁾. Sur un cristal de silicium de type p, deux régions de type n sont créées par dopage de la surface. Appelées là aussi **source** et **drain**, ces deux régions ne sont donc séparées que par un petit espace de type p, le **canal**. Sous l'effet d'une tension positive sur une électrode de commande placée

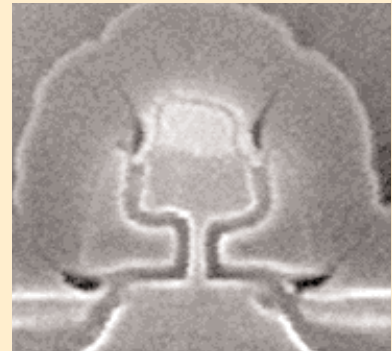
au-dessus du semi-conducteur et qui porte tout naturellement le nom de **grille**, les trous sont repoussés de sa surface où viennent s'accumuler les quelques électrons du semi-conducteur. Un petit canal de conduction peut ainsi se former entre la source et le drain (figure). Lorsqu'une tension négative est appliquée sur la grille, isolée électriquement par une couche d'oxyde, les électrons sont repoussés hors du canal. Plus la tension positive est élevée, plus la résistance du canal diminue et plus ce dernier laisse passer de courant. Dans un circuit intégré, les transistors et les autres composants (diodes, condensateurs, résistances) sont d'origine incorporés au sein d'une "puce" aux fonctions plus ou moins complexes. Le circuit est constitué d'un empilement de couches de matériaux conducteurs ou isolants délimitées par **lithographie** (encadré E, *La lithographie clé de la miniaturisation*, p. 37). L'exemple le plus emblématique est le microprocesseur placé au cœur des ordinateurs et qui regroupe plusieurs centaines de millions de transistors (dont la taille a été réduite par 10 000 depuis les années 1960) et bientôt un milliard, ce qui amène les industriels à fractionner le cœur des processeurs en plusieurs sous-unités travaillant en parallèle !

(1) Figurent dans cette catégorie les **transistors de type Schottky** ou à **barrière Schottky** qui sont des transistors à effet de champ comportant une grille de commande de type métal/semi-conducteur qui améliore la mobilité des porteurs de charge et le temps de réponse au prix d'une plus grande complexité.

(2) On parle alors de transistor **MOSFET** (*Metal-Oxide Semiconductor Field Effect Transistor*).



Le tout premier transistor.



Transistor 8 nanomètres développé par l'Alliance Crolles2 réunissant STMicroelectronics, Philips et Freescale Semiconductor.

E La lithographie, clé de la miniaturisation

La **lithographie** optique (ou photolithographie), application majeure de l'interaction particules/matière, est le procédé traditionnel de fabrication des **circuits intégrés**. Étape clé de la définition des motifs de ces circuits, elle reste le verrou de leur développement. La résolution étant en première approximation directement proportionnelle à la longueur d'onde, la finesse des motifs a d'abord progressé avec la diminution, qui s'est effectuée par sauts, de la longueur d'onde λ du rayonnement utilisé.

L'opération consiste en l'*exposition* via une optique réductrice d'une résine photosensible à des particules énergétiques, depuis les **photons ultraviolet (UV)** actuellement utilisés jusqu'aux **électrons** en passant par les photons **X** et les **ions**, au travers d'un masque représentant le dessin d'un circuit. Le but ? Transférer cette image sur l'empilement de couches isolantes ou conductrices qui le constitueront, déposées précédemment (phase de *couchage*) sur une plaquette (*wafer*) de matériau **semi-conducteur**, en général de **silicium**. Ce processus est suivi de la dissolution de la résine exposée à la lumière (*développement*). Les parties exposées de la couche initiale peuvent être alors gravées sélectivement, puis la résine est retirée chimiquement avant le dépôt de la couche suivante. Cette étape de lithographie peut intervenir plus d'une vingtaine de fois au cours de la fabrication d'un circuit intégré (figure).

Dans les années 1980, l'industrie de la microélectronique utilisait des lampes à mercure délivrant dans l'**UV proche** (raies g, h, i), à travers des optiques en quartz, un rayonnement d'une longueur d'onde de 436 nanomètres (nm). Elle gravait ainsi des structures d'une largeur de trait de 3 microns (μm). Employées jusqu'au milieu des années 1990, ces lampes ont été remplacées par des **lasers à excimères** émettant dans l'**UV lointain** (krypton-fluor KrF à 248 nm, puis argon-fluor ArF à 193 nm, les photons créés ayant une énergie de quelques **électronvolts**), permettant d'atteindre des résolutions de 110 nm, et même inférieures à 90 nm avec de nouveaux procédés.

Le Laboratoire d'électronique et de technologie de l'information (Leti) du CEA a été un des pionniers, dans les années 1980, dans l'utilisation des lasers en



Zone de photolithographie en salle blanche dans l'usine STMicroelectronics de Crolles (Isère).

lithographie et dans la réalisation des circuits intégrés par les lasers à excimères, qui constituent aujourd'hui les sources employées pour la production des circuits intégrés les plus avancés. Pour l'industrie, l'étape suivante devait être le laser F₂ ($\lambda = 157 \text{ nm}$), mais cette lithographie a été quasiment abandonnée face à la difficulté de réaliser des optiques en CaF₂, matériau transparent à cette longueur d'onde.

Si la diminution de la longueur d'onde des outils d'exposition a été le premier facteur à permettre le gain en résolution considérable déjà obtenu, deux autres ont été déterminants. Le premier a été la mise au point de résines photosensibles basées sur des matrices de **polymères** peu absorbantes aux longueurs d'onde utilisées et mettant en œuvre des mécanismes de

propagation de l'énergie reçue toujours plus innovants. Le second a consisté en l'amélioration des optiques avec une diminution des phénomènes parasites liés à la diffraction (meilleure qualité de surface, augmentation de l'**ouverture numérique**).

Au fil des années, la complexité accrue des systèmes optiques a ainsi permis d'obtenir des résolutions *inférieures* à la longueur d'onde de la source. Cette évolution ne pourra se poursuivre sans une rupture technologique majeure, un saut important en longueur d'onde. Pour les gé-

érations des circuits intégrés dont la résolution minimale est comprise entre 80 et 50 nm (le prochain "nœud" se situant à 65 nm), différentes voies basées sur la projection de particules à la longueur d'onde de plus en plus courte ont été mises en concurrence. Elles mettent respectivement en œuvre des rayons X "mous", en extrême ultraviolet (dans la gamme des 10 nm), des rayons X "durs" (à la longueur d'onde inférieure à 1 nm), des ions ou des électrons.

L'étape consistant à atteindre des résolutions inférieures à 50 nm conduira à s'orienter plutôt vers la nanolithographie à l'aide d'électrons de basse énergie (10 eV) et d'outils plus adaptés comme le microscope à **effet tunnel** ou l'**épitaxie par jets moléculaires** (encadré C) pour la réalisation de "super-réseaux".

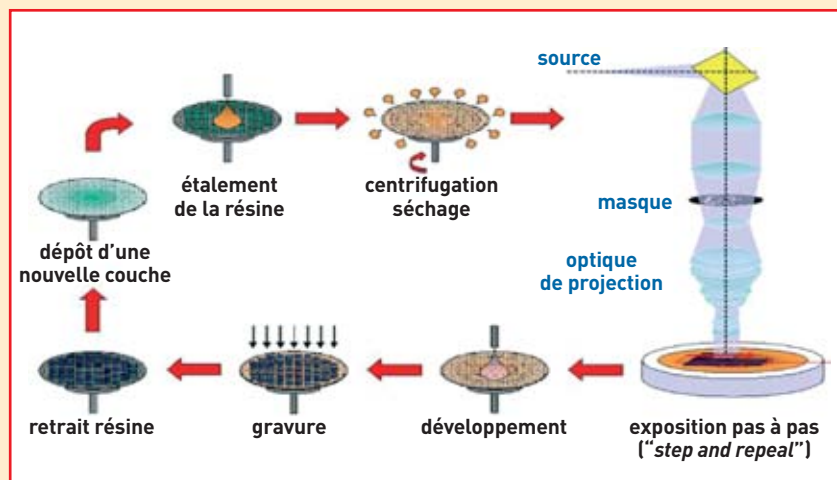


Figure. Les différentes phases du processus de lithographie dont le but est de délimiter les couches de matériaux conducteurs ou isolants qui constituent un circuit intégré. Cette opération est l'enchaînement d'un étalement de résine photosensible, de la projection du dessin d'un masque par une optique réductrice, suivis de la dissolution de la résine exposée à la lumière (développement). Les parties exposées de la couche initiale peuvent être alors gravées sélectivement, puis la résine est retirée avant le dépôt de la couche suivante.

G

L'effet tunnel, un phénomène quantique

La **physique quantique** prédit des comportements inhabituels et difficiles à accepter par notre intuition immédiate, comme l'**effet tunnel**. Prenons le cas d'une bille devant franchir une bosse. En physique classique, si l'énergie communiquée à la bille est insuffisante, elle ne peut pas franchir la bosse et retombe vers son point de départ. En physique quantique, une particule (**proton, électron**) peut franchir la bosse, même si son énergie initiale est insuffisante : elle peut passer de l'autre côté comme par un petit tunnel. L'effet tunnel peut ainsi permettre à deux protons de surmonter leur répulsion électrique à des vitesses relatives plus basses que celles qu'indique le calcul classique. La microscopie à effet tunnel est basée sur le fait qu'il y a une probabilité non nulle qu'une particule d'énergie inférieure à la hauteur d'une barrière de potentiel (la

bosse) puisse la franchir. Les particules sont des électrons traversant l'espace séparant deux **électrodes**, une fine pointe métallique terminée par un **atome** unique et la surface métallique ou **semi-conductrice** de l'échantillon. La physique classique donne d'une surface l'image d'une frontière étanche, les électrons étant strictement confinés à l'intérieur du solide. Par contre, la physique quantique enseigne que chaque électron a un comportement ondulatoire : sa position est "floue". En particulier, au voisinage de la surface existe un nuage d'électrons dont la densité décroît très rapidement, de façon exponentielle, lorsque l'on s'éloigne du solide. L'électron a une certaine probabilité de se trouver "en dehors" du solide. Quand la fine pointe métallique est approchée de la surface, à une distance inférieure au **nanomètre**, la **fonction d'onde** associée à l'électron n'est

pas nulle de l'autre côté de la barrière de potentiel, et les électrons passent de la surface à la pointe, et réciproquement, par effet tunnel. La barrière de potentiel franchie par les électrons est appelée **barrière tunnel**. Lorsqu'une faible tension est appliquée entre la pointe et la surface, un **courant tunnel** peut être détecté. La pointe et la surface étudiée forment localement une **jonction tunnel**. L'effet tunnel se manifeste également dans les **jonctions Josephson** où un courant continu peut passer à travers une étroite discontinuité entre deux éléments **supraconducteurs**. Dans un **transistor**, l'effet tunnel peut se révéler de manière parasite quand l'isolant de **grille** devient très mince (de l'ordre du nanomètre). Il est par contre mis à profit dans de nouvelles architectures, tels les **transistors à barrière tunnel Schottky** ou à base de **nanotubes de carbone**.