Les **nanotubes, canons à électrons** à usages multiples

Les nanotubes de carbone sont particulièrement bien adaptés à l'extraction d'électrons à température ambiante. Cette propriété, directement liée à leur forme, peut être mise en œuvre dans deux types d'applications : la réalisation d'écrans plats et l'utilisation de microcanons à électrons pour élaborer les circuits électroniques du futur. Deux exemples qui illustrent l'apport des nanotechnologies à des objets tant de la vie courante que de très haute technologie.

L'émission d'**électrons** à partir d'un matériau conducteur est possible, à température ambiante, lorsque ce matériau est soumis à un champ électrique d'une intensité supérieure au milliard de volts par mètre (ou au millier de volts par micron). Compte tenu de la valeur colossale du champ à appliquer, l'obtention de cet effet (dit *effet de champ* ou *émission froide*) pose des problèmes techniques majeurs s'il s'agit d'extraire des électrons d'une surface plane. L'utilisation de pointes aux rayons de courbure très faibles placées en regard d'une **anode polarisée** permet de contourner cette difficulté (figure 1a). En effet, le champ local au sommet d'une pointe est le produit du champ appliqué par un coefficient d'amplification qui dépend essentiellement de la géométrie de la pointe. Ce coefficient, typiquement compris entre 10 et 100, permet de ramener à des valeurs raisonnables l'intensité du champ électrique nécessaire à l'émission. Cette intensité est d'autant plus forte que le *rapport d'aspect* entre la hauteur de la pointe et son rayon de courbure est grand. C'est là qu'entrent en scène les nanotubes de carbone (voir *Les nanotubes de carbone, stars de la recherche*). Leurs dimensions, en effet, sont exceptionnelles : leur diamètre est compris entre un et quelques dizaines de nanomètres (nm) et leur longueur atteint très facilement plusieurs microns (µm), sans parler de records qui font état de millimètres, voire de centimètres. Ces objets sont donc très intéressants pour l'émission de champ, car leur rapport d'aspect (dans le cas d'un nanotube, rapport entre la hauteur et le rayon) atteint facilement

CEA

Image du premier écran vidéo de 15 cm de diagonale à base de nanotubes de carbone réalisé au Leti. Cet écran monochrome de démonstration comporte 320 × 240 pixels au pas de 350 µm.

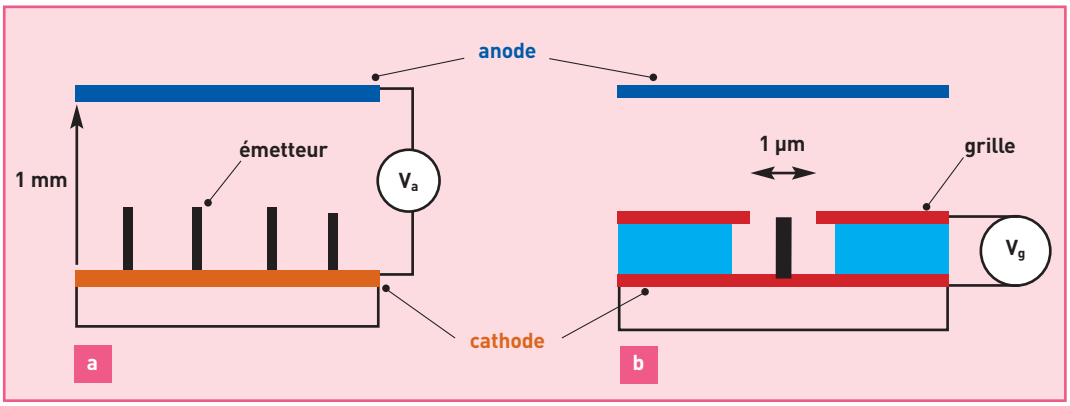


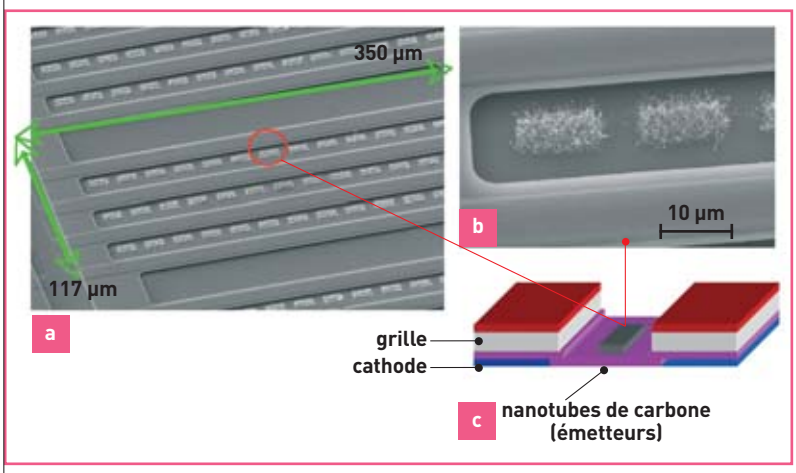
Figure 1.
Principe des structures utilisées pour extraire des électrons par émission froide.
Structure diode (a) : le champ électrique appliqué entre l'anode et la cathode est amplifié par l'effet de pointe des émetteurs, qui sont par exemple des nanotubes. Compte tenu du champ nécessaire, la tension V_a est de plusieurs kilovolts car les distances entre anode et cathode sont de l'ordre du millimètre.
Structure triode (b) : c'est la structure universellement utilisée. Ici, le champ d'extraction est obtenu par la grille située à quelques microns de l'émetteur. Dans ces conditions, la tension grille V_g nécessaire à l'extraction des électrons n'est plus que de quelques dizaines de volts et l'ensemble du dispositif est "intégrable".

quelques milliers. Cette géométrie particulière permet donc d'extraire facilement des électrons de ces matériaux en appliquant des champs faibles, de l'ordre de quelques volts par micron.

Des émetteurs d'électrons particulièrement performants

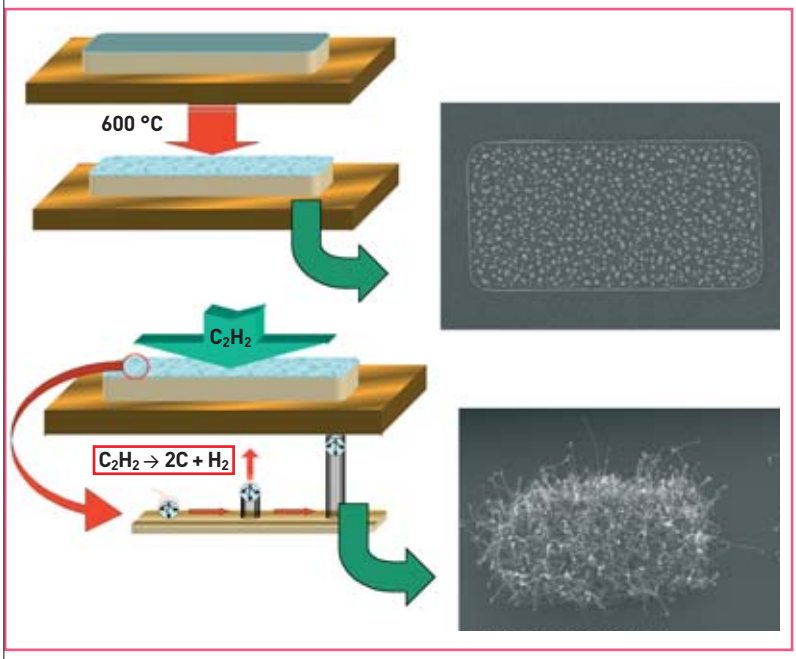
Contrairement aux applications de l'électronique moléculaire qui nécessitent des nanotubes très bien cristallisés avec un caractère **semi-conducteur** ou métallique défini, les applications des nanotubes à l'effet de champ sont beaucoup moins exigeantes. Elles s'accommodent de tubes de bien moins bonne qualité, ce qui permet d'utiliser des nanotubes multiparois réalisés à des températures assez basses, donc compatibles avec des dépôts sur des substrats de verre ou sur des **circuits intégrés** **silicium** fonctionnels.

Les structures classiques pour extraire des électrons sont des structures **triodes** (figure 1b) où le champ est appliqué par l'intermédiaire d'une **grille** proche de l'émetteur. Du fait de cette proximité, les tensions requises pour obtenir un courant d'émission sont relativement faibles (typiquement quelques dizaines de volts). Après extraction du matériau, les électrons sont accélérés sous vide par un deuxième champ électrique appliqué entre la **cathode** et une **anode** située à une distance de l'ordre du millimètre. Les électrons interagissent au niveau de l'anode soit avec un phosphore (ou luminophore) pour émettre de la lumière (application écrans plats), soit avec une résine pour l'insoler (application **lithographie**). Deux applications brièvement détaillées ici.



CEA

Figure 2.
Structure d'une cathode pour écran plat utilisant des nanotubes de carbone en guise d'émetteurs.
En (a), vue au microscope électronique à balayage de la structure d'un pixel (350 µm par 117 µm) constitué par quatre bandes métalliques (grilles) entre lesquelles les nanotubes ont poussé sur des plots de catalyseur situés dans les tranchées.
En (b), détail des tapis de nanotubes obtenus entre les grilles. Chaque tapis a une taille de 10 × 6 µm et les nanotubes visibles un diamètre de 30 nm.
En (c), coupe de principe de la structure de la cathode.



CEA

Figure 3.
Procédé de croissance des nanotubes utilisés dans les écrans. Dans l'étape n° 1 (en haut à gauche), le plot de catalyseur se fragmente sous l'effet de la température. Les gouttelettes de catalyseur sont nettement visibles sur l'image (en haut à droite), obtenue au microscope électronique à balayage, d'un plot de catalyseur après fragmentation.
L'étape n° 2 (en bas à gauche) est la croissance des nanotubes sur les gouttelettes de catalyseur. Le gaz réactif (ici, de l'acétylène) se décompose sur chaque gouttelette, le carbone diffuse à travers elle et le nanotube se construit sous la gouttelette, qui se trouve au sommet du tube. L'image du plot de catalyseur après croissance (en bas à droite) montre le tapis de nanotubes.

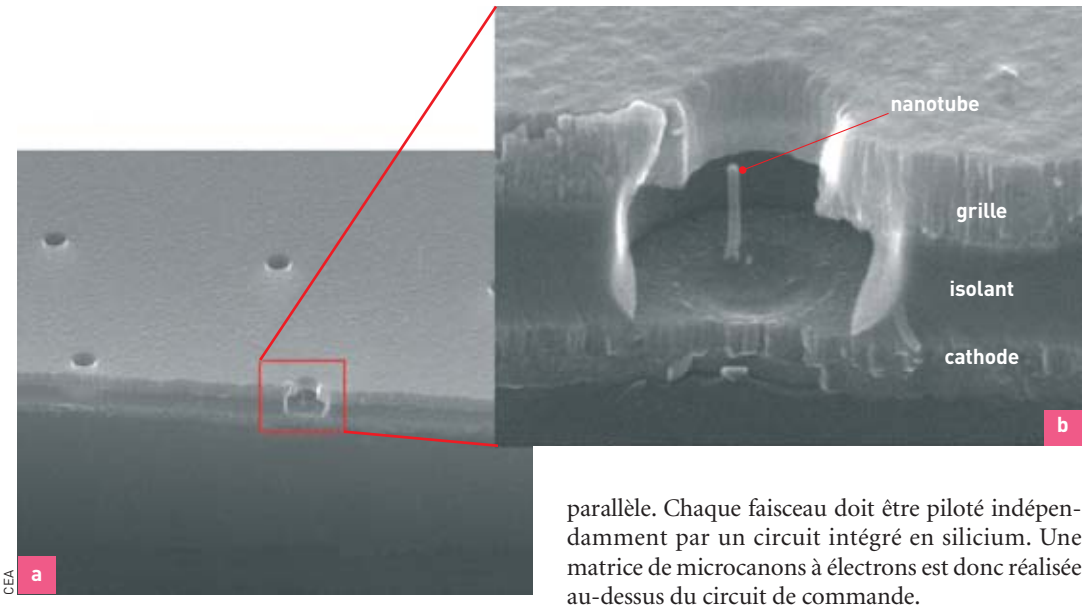
Une nouvelle génération d'écrans de télévision

Le marché visé par cette nouvelle technologie d'écrans est principalement celui de la télévision, où la taille des écrans peut atteindre un mètre de diagonale. Grâce à l'introduction des nanotubes, de nouvelles structures d'écrans ne comportant pas de motifs inférieurs à 10 µm, donc facilement réalisables sur une grande surface, ont été développées au Laboratoire d'électronique et de technologie de l'information (Leti) du CEA (figure 2).

Une première génération d'écrans plats utilisant l'émission froide avait été développée dans les années 1990. Malgré son succès technique, cette technologie n'avait pas été commercialisée à cause d'un coût de fabrication trop élevé. En effet, les émetteurs d'électrons étaient des micropointes en molybdène situées dans des trous de grille d'un diamètre de l'ordre du micron. Cette géométrie, imposée par le faible coefficient d'amplification de la pointe, est difficile à réaliser de façon économique sur une grande surface. De grandes sociétés comme Samsung développent également cette nouvelle technologie à base de nanotubes, qui pourrait apparaître sur le marché grand public avant la fin de la décennie. Plus lumineux et moins chers que les écrans plasma actuels, ces écrans devraient les remplacer à terme.

Une fois réalisée la structure triode de l'écran par des moyens conventionnels tels que dépôts de couches minces et gravures, le dépôt de nanotubes est effectué lors d'une étape de croissance à 600 °C. Cette croissance est localisée uniquement sur des plots de **catalyseur** (figure 3) très grands (10 × 6 µm) par rapport aux nanotubes à réaliser. Leur épaisseur, en revanche, n'est que de 10 nm. Pendant le chauffage de toute la structure à 600 °C, la couche obtenue se fragmente en une multitude de gouttelettes dont le diamètre moyen est justement le diamètre des nanotubes. Ces gouttes constituent les **germes de croissance** de ces derniers qui vont s'organiser ensuite en tapis sur la zone initialement couverte par le plot de catalyseur.

La technologie est intéressante, car elle permet de contrôler le diamètre et la densité des nanotubes sans avoir recours à des étapes coûteuses de lithographie.



CEA

Figure 4.
Images au microscope à balayage d'un réseau de microcanons à électrons réalisés sur une tranche de silicium de 200 mm. En (a), vue d'un réseau de cavités triodes où les trous de grille ont un diamètre de 300 nm.
En (b), vue de détail en coupe montrant le nanotube de carbone vertical dans sa cavité ainsi que l'empilement des matériaux constitutifs du nanodispositif. La grille et la cathode sont des métaux isolés par une couche isolante en silice.

Les tapis de tubes sont utilisés tels quels pour l'émission, les tubes les plus longs constituant statistiquement les émetteurs d'électrons. Les performances actuellement obtenues sont proches de celles nécessaires à la réalisation d'un produit fini. La brillance, la durée de vie et les coûts de production obtenus sont très favorables. Seule l'uniformité de l'émission d'un pixel à l'autre doit encore être améliorée.

Au secours de la lithographie avancée

Les besoins de la **lithographie** (étape technologique qui permet de reproduire à échelle réduite dans un matériau un motif initialement présent sur un masque) sont immenses et tirés vers des **résolutions** de plus en plus élevées par les besoins d'intégration des composants de la micro et de la nanoélectronique. La très grande résolution nécessaire à la fabrication des futurs circuits intégrés ne sera plus accessible dans quelques années (aux alentours de 2010) aux moyens optiques car la longueur d'onde de la lumière utilisable (**ultraviolette**) sera devenue trop grande par rapport aux motifs que l'on cherchera à réaliser (dimensions inférieures à 50 nm).

Lithographie sans masque

La solution connue pour augmenter la résolution est d'utiliser non plus un faisceau lumineux qui vient reproduire grâce à une optique un masque comportant les motifs à réaliser, mais un faisceau d'électrons qui va venir dessiner directement ces mêmes motifs sur une résine. Le gain en résolution est sensiblement équivalent à celui qui existe entre un microscope optique classique et un microscope électronique. Mais un nouveau problème surgit, et de taille : le temps d'écriture des motifs sur la résine, qui se fait localement avec un seul pinceau électronique, point par point, devient prohibitif et de plus en plus long au fur et à mesure que la résolution augmente pour atteindre la valeurs recherchées, inférieures à 5 nm. Pour diminuer le temps d'écriture, comme il n'est pas possible de faire d'image, l'idée est d'utiliser non plus un seul faisceau mais un grand nombre de faisceaux d'électrons (typiquement 10 000) qui vont travailler en parallèle. Chaque faisceau doit être piloté indépendamment par un circuit intégré en silicium. Une matrice de microcanons à électrons est donc réalisée au-dessus du circuit de commande.
Les chercheurs ont pour ce faire bien sûr pensé aux nanotubes de carbone dont la faible valeur de champ seuil d'émission électronique permet de réaliser des circuits de commande de petite dimension facilement intégrables. Contrairement à l'application écrans plats, l'objectif est ici de réaliser des nanotubes verticaux individuels ayant une localisation très précise (meilleure que 50 nm) dans le dispositif. Toujours utilisé pour initier la croissance, le catalyseur est ici constitué par une petite pastille de 50 nm de diamètre située au centre d'une cavité triode de 300 nm de diamètre (figure 4).
Les difficultés techniques sont très nombreuses. Il s'agit en particulier de maîtriser la croissance des nanotubes à une température qui garantisse le bon fonctionnement de l'électronique (typiquement 400 °C) alors que les températures d'élaboration des tubes sont généralement supérieures à 600 °C. Les images déjà obtenues lors du développement du projet par le Leti attestent des progrès réalisés dans ce domaine.

Un premier macrocomposant électronique fonctionnant grâce à des nano-objets

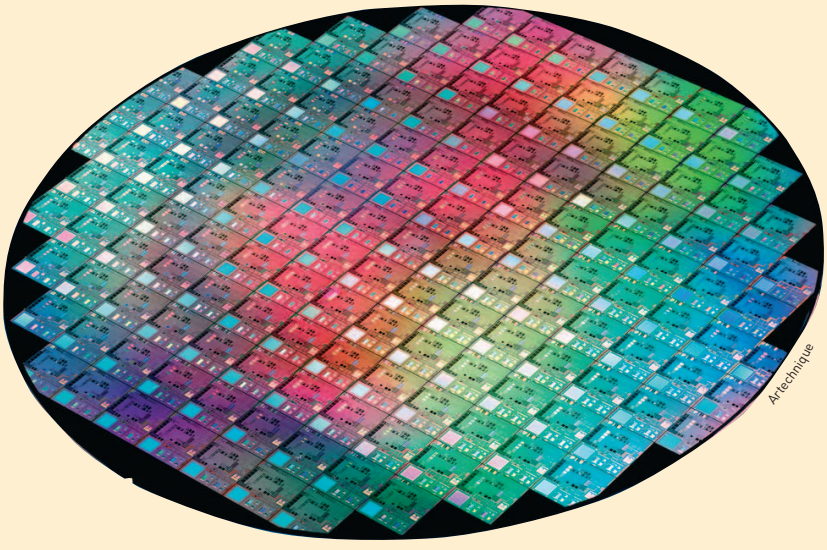
Les écrans plats constituent certainement le premier type de macrocomposant électronique fonctionnant grâce à des nano-objets, disponible aujourd'hui au CEA. Cette application illustre la révolution que va permettre l'introduction de tels objets dans les composants électroniques dont les nanotechnologies ont déjà permis de diminuer le coût, tout en assurant les performances requises. Dans le cas des microcanons pour la lithographie, ces mêmes nano-objets devraient permettre, grâce à leurs performances intrinsèques exceptionnelles, d'accroître les performances globales du système. La technologie des nanotubes commence seulement à être apprivoisée, mais il est déjà clair que, dans quelques années, elle se retrouvera dans de nombreux objets, aussi bien d'usage courant que de haute technologie.

> **Jean Dijon**
Direction de la recherche technologique
CEA-Leti centre de Grenoble

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

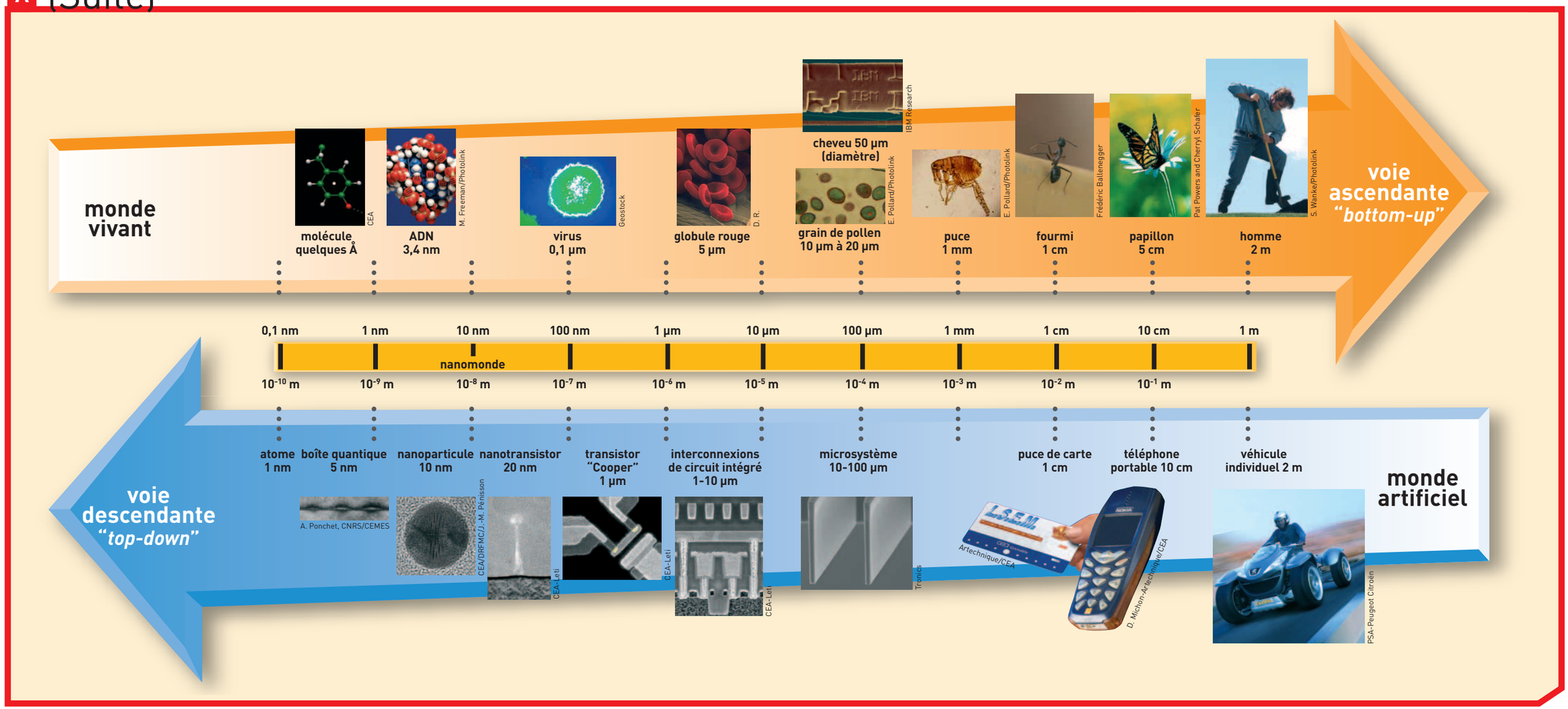
Afin de se représenter plus aisément les dimensions des objets micro et nanoscopiques*, il est pratique de procéder à des comparaisons et courant de faire correspondre différentes échelles, par exemple celle du monde du vivant, de la molécule à l'homme, et celle des objets manipulés ou fabriqués par 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 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'ultraminiaturisation, 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 organiser 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.

*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 nm = 10^{-9} 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.

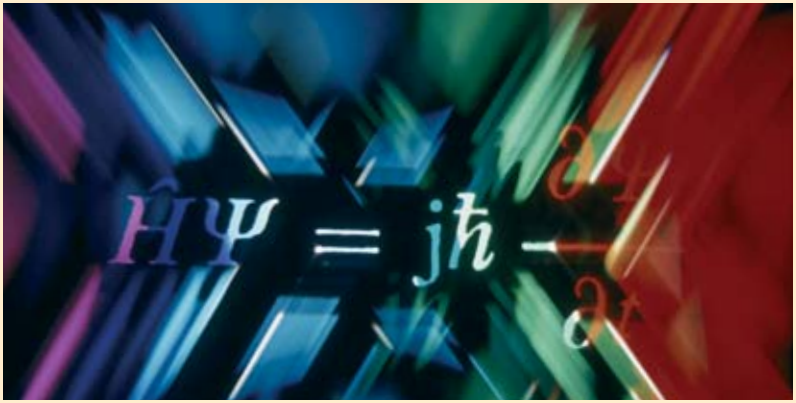
A (Suite)


monde vivant
molécule quelques Å
CEA
ADN 3,4 nm
M. Freeman/Photolink
virus 0,1 µm
Geostock
globule rouge 5 µm
D. R.
cheveu 50 µm (diamètre)
IBM Research
grain de pollen 10 µm à 20 µm
E. Pollard/Photolink
puce 1 mm
E. Pollard/Photolink
fourmi 1 cm
Frédéric Ballenegger
papillon 5 cm
Pat Powers and Cherryl Schafer
homme 2 m
S. Wanke/Photolink
voie ascendante "bottom-up"
0,1 nm
1 nm
10 nm
100 nm
1 µm
10 µm
100 µm
1 mm
1 cm
10 cm
1 m
nanomonde
10^{-10} m
10^{-9} m
10^{-8} m
10^{-7} m
10^{-6} m
10^{-5} m
10^{-4} m
10^{-3} m
10^{-2} m
10^{-1} m
voie descendante "top-down"
atome 1 nm
boîte quantique 5 nm
nanoparticule 10 nm
nanotransistor 20 nm
transistor "Cooper" 1 µm
interconnexions de circuit intégré 1-10 µm
microsystème 10-100 µm
puce de carte 1 cm
téléphone portable 10 cm
véhicule individuel 2 m
monde artificiel
A. Ponchet, CNRS/CEMES
CEA/DRFMC/J.-M. Pénisson
CEA-Leti
CEA-Leti
CEA-Leti
Tronics
Artechnique/CEA
D. Michon-Artechnique/CEA
PSA-Peugeot Citroën

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) 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...).



D. Sarraute/CEA

"Vue d'artiste" de l'équation de Schrödinger.

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 ½ (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 cristalline 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 millionième 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** microélectroniques, 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

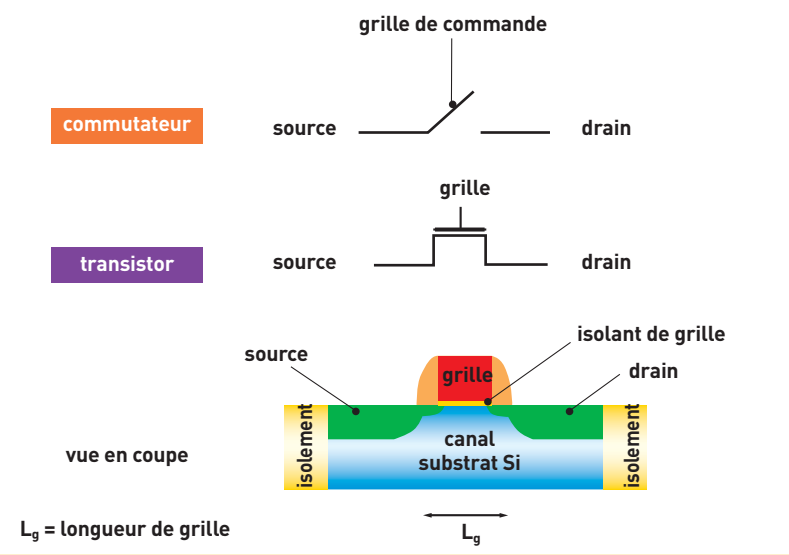


Figure.
Un transistor MOS est un commutateur qui permet de commander le passage d'un courant électrique de la source (S) vers le drain (D) à l'aide d'une grille (G) isolée électriquement du canal de conduction. Le substrat en silicium est noté B (pour *Bulk*).

D (Suite)

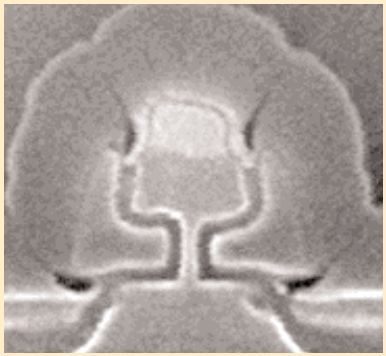
dopées (p ou n), séparées par une mince couche de semi-conducteur inversement dopée. L'assemblage de deux semi-conducteurs de types opposés (jonction p-n) permet de ne faire passer le courant que dans un sens. Qu'ils soient de type n-p-n ou p-n-p, les transistors bipolaires sont fondamentalement des 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 !

Lucent Technologies Inc./Bell Labs

Le tout premier transistor.



STMicroelectronics

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

(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)*.

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.

Artechnique

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

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 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 F_2 (λ = 157 nm), mais cette lithographie a été quasiment abandonnée face à la difficulté de réaliser des optiques en CaF_2, 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 générations 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".

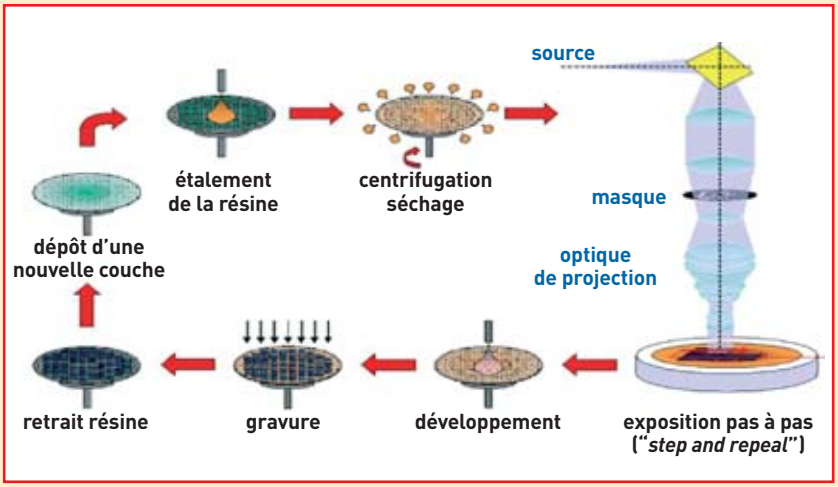


Figure. Les différentes phases du processus de lithographie dont le but est de délimiter les couches de matériaux conducteurs ou isolants qui constituent un circuit intégré. Cette opération est l'enchaînement d'un étalement de résine photosensible, de la projection du dessin d'un masque par une optique 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.