

DE LA RECHERCHE À L'INDUSTRIE



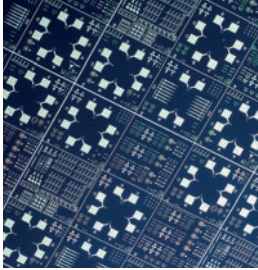
LIVRET PÉDAGOGIQUE

LA MICROÉLECTRONIQUE

- Un peu d'histoire...
- Passer du design à la fabrication
- De plus en plus d'applications
- Electronique... et plus encore



De l'électron à la fabrication des puces !



Sommaire



Introduction 03



Un peu d'histoire 04-09

Naissance des composants 05
De la diode à la triode
L'ère des transistors
Circuits imprimés et intégrés
Le tout sur une puce

Des composants à maturité 07
L'omniprésence des CMOS
et du FDSOI



Passer du design à la fabrication 10-14

Du sable... 11
Le design des circuits
6 étapes clés de fabrication
La photolithographie
...À la puce 14



De plus en plus d'applications 15-19

Informatique 16
Internet et téléphonie 17
Santé 17
Efficacité énergétique 18
Cybersécurité 18
Imagerie astrophysique 18
Au quotidien 19



Électronique... et plus encore 20-27

Top-down 22
Nanoélectronique
Électronique quantique
Bottom-up 23
De nouvelles technos 24
Spintronique, marier l'électronique
et le magnétisme
Photonique, la lumière pour coder
l'information
Des laboratoires aux start-ups 26
STMicroelectronics et Soitec
Movea capture les mouvements
Isorg et l'électronique imprimée

Photo de couverture : Motifs structurés, réalisés en salle blanche de la Plate-forme Technologique Amont du site Minatec.
Observation au microscope de microstructures. © PF. Grosjean/CEA
Illustrations : Yuvanoé - p.8 : F.Mathé / Les Défis du CEA n°217 - Conseiller scientifique : Didier Louis
Rédaction : Florence Klotz, Lucia Le Clech et Margaux Israël - Réalisation : Agence Gimmik - Juillet 2018

Introduction



L'électronique est une discipline née de la physique et dédiée à la manipulation des signaux électriques. Elle permet, au moyen de divers éléments appelés « composants », de construire des appareils capables de gérer ces signaux électriques dans le but de transmettre ou de recevoir des informations.

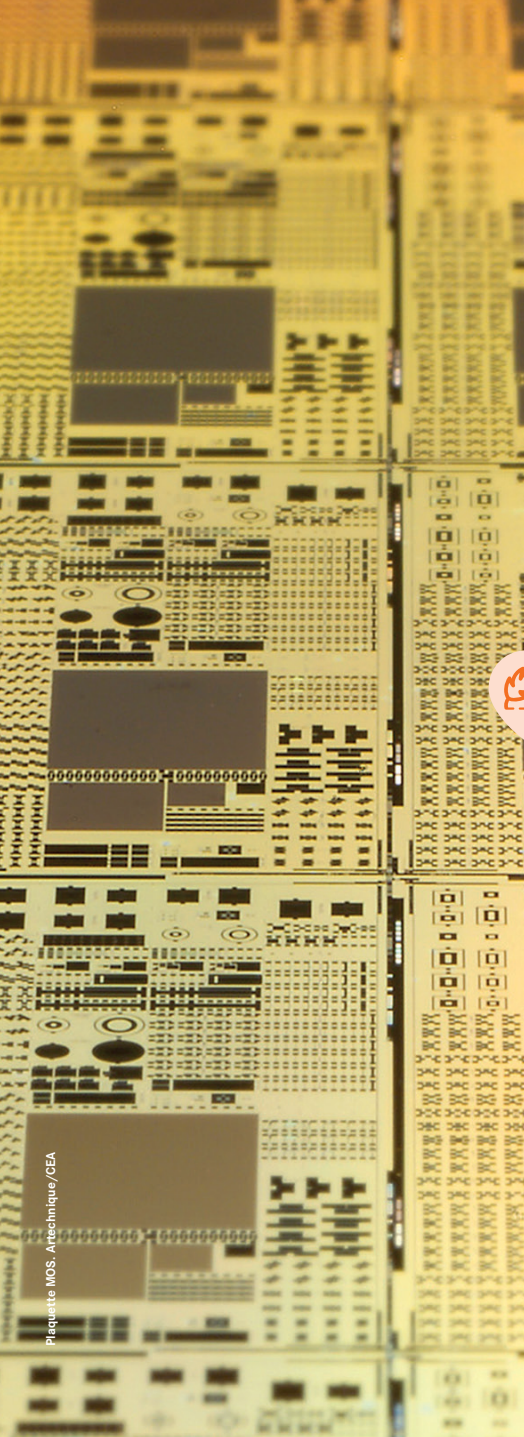
La microélectronique désigne l'ensemble des technologies de fabrication de composants, qui utilisent des courants électriques pour transmettre, traiter ou stocker des informations, à l'échelle micrométrique.

Elle est en grande partie à l'origine des formidables progrès réalisés ces dernières décennies dans les domaines de l'informatique, des télécommunications et de l'imagerie, entre autres.



- Dans les salles blanches.
- Laboratoire sur puce.

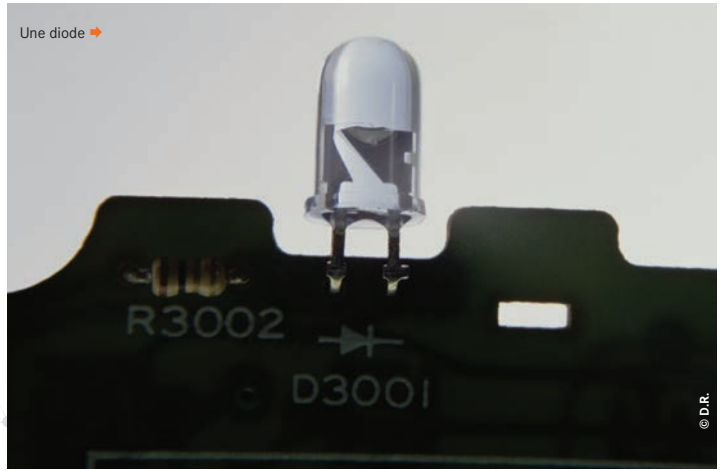




UN PEU D'HISTOIRE...

En un siècle, la miniaturisation a permis le passage du tube à vide au transistor sur matériau solide d'un micromètre carré. Parallèlement, le passage du signal analogique (à variation continue) au signal numérique (codé en une succession de 0 et de 1) a facilité le développement de circuits électroniques aux fonctions de plus en plus performantes.

Une diode ➔



NAISSANCE DES COMPOSANTS

De la résistance au transistor, du circuit intégré simple au microprocesseur complexe en passant par les convertisseurs ou les diodes électroluminescentes... les composants de la microélectronique sont nombreux et remplissent des fonctions variées.

De la diode à la triode

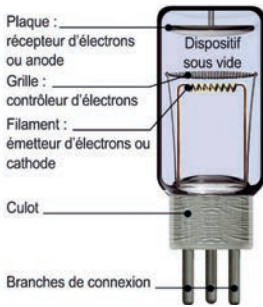
En 1904, John Alexandre Fleming, ingénieur anglais, invente la diode, un dispositif sous vide comprenant un filament émetteur d'électrons et une plaque, collectrice d'électrons lorsqu'elle est polarisée positivement. Ce dispositif laisse passer le courant électrique dans un seul sens et le bloque dans l'autre. Il suffit de faire varier la tension (positive ou négative) de la plaque pour permettre ou interrompre le passage du courant.

Ce premier dispositif est utilisé dans les postes de radio. Il existe de nombreuses variétés de diodes, selon les propriétés des matériaux utilisés. Les diodes électroluminescentes (Leds) sont désormais largement utilisées pour produire de la lumière en consommant très peu d'énergie.

En 1907, Lee de Forest, chercheur américain, améliore le principe en inventant la triode dans laquelle une grille est ajoutée entre le filament et la plaque. C'est le premier système amplificateur d'un signal électronique. Elle se compose d'une cathode¹ semi-conductrice à chaud, émettrice d'électrons, d'une anode¹ réceptrice, et d'une grille positionnée entre les deux. Celle-ci joue le rôle de « modulateur d'électrons » : selon sa polarisation, elle les bloque ou accélère leur passage (amplification du courant).

1- L'anode est l'électrode où a lieu une réaction électrochimique d'oxydation (menant à la production d'électrons) par opposition à la cathode, l'électrode de sortie du courant, où se produit une réaction électrochimique de réduction (menant à la consommation d'électrons).

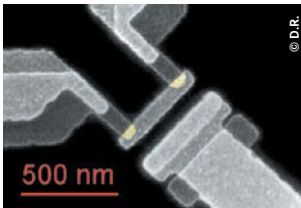
La triode



Dans les années 40, les triodes et autres tubes à vide sont utilisés dans les tout premiers ordinateurs. Plus les calculs à effectuer sont complexes, plus le besoin de tubes à vide est grand. Or, ceux-ci sont volumineux, chauffent beaucoup et « claquent » facilement. Ce manque de fiabilité freine le développement de l'informatique.

L'ère du transistor

En 1948, John Bardeen, Walter Brattain et William Shockley, trois physiciens américains, inventent le transistor bipolaire et ouvrent ainsi l'ère de la microélectronique. Il comprend un émetteur d'électrons, un collecteur et un dispositif de modulation appelé base. Le déplacement des électrons ne s'effectue plus dans le vide mais dans un matériau solide, semi-conducteur, qui permet de contrôler le courant électrique (l'interrompre, l'amplifier ou le moduler). Ce transistor a supplanté rapidement le tube électronique : démarrant quasi instantanément, sans temps de chauffe, beaucoup plus petit et léger. Les transistors sont réalisés directement à la surface du silicium², leurs connexions sont fabriquées par dépôt de couches métalliques. Ils ont pu être fabriqués industriellement dès les années 50. Rapidement, leur taille va passer de celle d'un dé à celle d'un grain de sel !



↑
Transistor Cooper

Circuit imprimé et circuit intégré

Un circuit est un assemblage de composants. Il est appelé « circuit imprimé » lorsqu'il est fabriqué par dépôts de matériaux conducteurs sur des matériaux isolants (exemple : du cuivre³ sur l'époxy⁴) comme dans le cas de la carte mère des ordinateurs. Il est appelé « circuit intégré » lorsqu'il rassemble, plusieurs composants permettant de réaliser différentes fonctions.

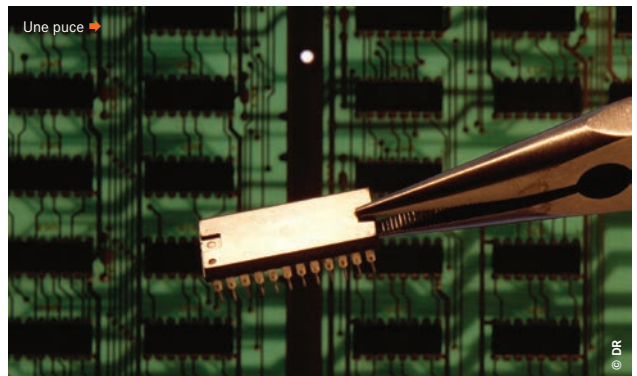
Dans les années 70, une technologie est développée permettant de réaliser des transistors qui consomment moins et de faciliter l'intégration de composants passifs (résistances, capacités) sortants des circuits intégrés. La taille des circuits augmente régulièrement ainsi que celle des plaques de silicium, qui passent de 200 à 300 mm de diamètre. Dans le même temps, la taille des transistors diminue.

2- Le silicium est un corps simple, métalloïde du groupe du carbone ; c'est un des éléments chimiques le plus répandu sur Terre.

3- Le cuivre est un élément chimique ou un métal rouge, très malléable et bon conducteur électrique.

4- L'époxy est un composé formé à partir de molécules contenant des époxydes.

5- Le dopage est l'ajout en très faibles quantités d'ions qui facilitent le passage du courant.



Ils peuvent être gravés dans du silicium massif ou sur une couche mince de quelques centaines de nanomètres déposée sur un isolant ; le SOI (silicium sur isolant) permet de réaliser des circuits plus rapides et moins gourmands en énergie.

Le tout sur une puce

Cette petite pastille de silicium supporte un circuit intégré. L'accroissement exponentiel du nombre de transistors par puce, aussi appelé « loi de Moore » (cf page 11), a entraîné une nouvelle révolution industrielle, en liaison avec le développement des logiciels et des communications.

Début des années 2000, un microprocesseur (le circuit intégré le plus complexe) est une puce en silicium d'environ 2,5 cm de côté. Il peut comporter plusieurs centaines de millions de composants. Il est enfermé dans un boîtier protecteur muni de « pattes » (d'où le nom de « puce ») pour assurer les connexions avec les autres organes de l'appareil dans lequel il s'insère.

DES COMPOSANTS À MATURITÉ

L'omniprésence des CMOS et du FDSOI

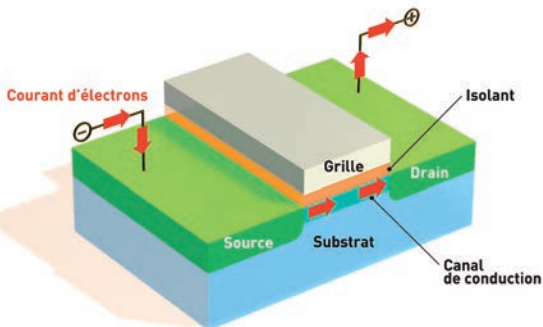
Les premiers **dispositifs MOS** (*Metal Oxide Semiconductor*) apparaissent dans les années 60. Aujourd'hui, le transistor MOS constitue, grâce à sa simplicité de fabrication et à ses dimensions réduites, l'élément fondamental des circuits intégrés numériques.

Le développement des **composants CMOS** (*Complementary Metal Oxide Semiconductor*) industriels a été rendu possible par les progrès enregistrés dans le domaine des transistors bipolaires, en particulier la résolution des problèmes d'interface oxyde-semiconducteur. Sur un substrat de silicium faiblement dopé⁵, un circuit CMOS est constitué de transistors nMOS et pMOS, placés de manière symétrique et interconnectés par des fils métalliques. Chaque transistor MOS ayant la même fonction, l'un est passant tandis que l'autre est bloquant, ils sont complémentaires.

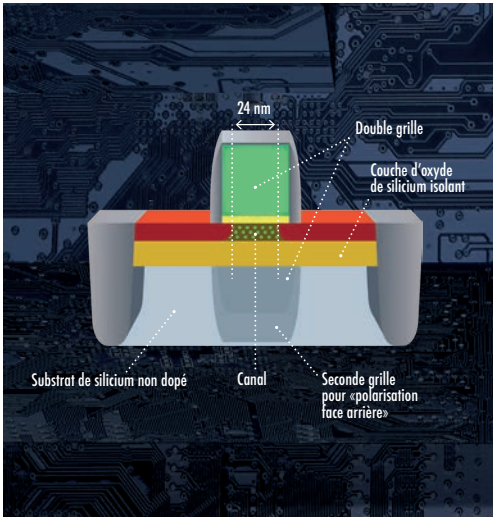
LESAVIEZ-VOUS?

COMMENT FONCTIONNE UN TRANSISTOR MOS ?

Un transistor MOS comprend une source et un drain, entre lesquels les électrons peuvent circuler via un canal de conduction. Ce canal fonctionne comme un interrupteur, en fonction de la charge électrique de la grille. Selon la polarité de cette grille, le canal de conduction est ouvert ou fermé. La performance du transistor dépend principalement de la taille de la grille : plus celle-ci est petite, moins les électrons ont de chemin à parcourir dans le canal, plus le système est rapide.



Transistor conducteur (interrupteur fermé)

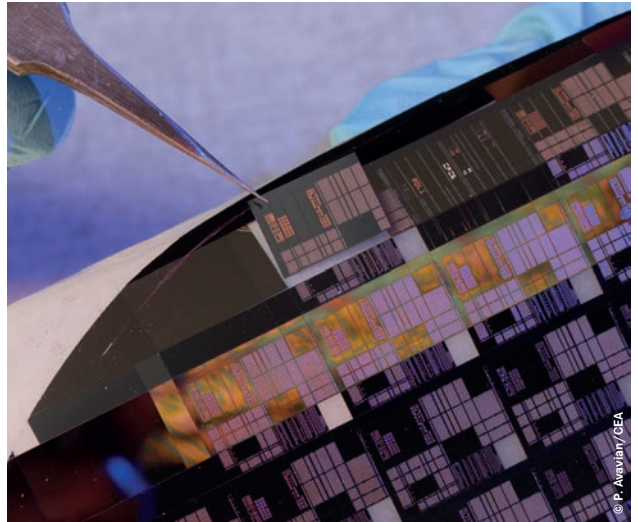


↑
Transistor FDSOI

Dans la **technologie FDSOI** (*Fully Depleted - Silicium On Insulator* ou Transistor entièrement dépleté sur silicium sur isolant), une très fine tranche de silicium est collée sur une fine couche d'oxyde de silicium isolant. Le substrat de silicium ne nécessite plus d'être dopé. Les performances du transistor sont augmentées en appliquant une tension sur sa face arrière. La combinaison de cette tension et de la couche d'isolant agit alors comme une seconde grille. En fonction des tensions relatives appliquées sur les faces avant et arrière du transistor, ses propriétés peuvent être modifiées et améliorées : il est soit très peu gourmand en énergie (30 à 40 % moins énergivore), soit très rapide (25 % plus rapide). Le FDSOI équipe déjà des téléphones et des montres intelligentes et s'annonce incontournable pour l'électronique mobile, la voiture autonome ou encore l'Internet des objets.

Le CEA-Leti développe aujourd'hui encore de nouveaux substrats et composants FDSOI. Il étudie également des structures de transistors originales comme le transistor SET (*Single Electron Transistor*) ou les transistors à nanofils de semi-conducteurs.

→
Prise d'échantillon sur une galette de silicium dont les puces ont été prédécoupées, pour analyse morphologique.



© P. Avary/CEA

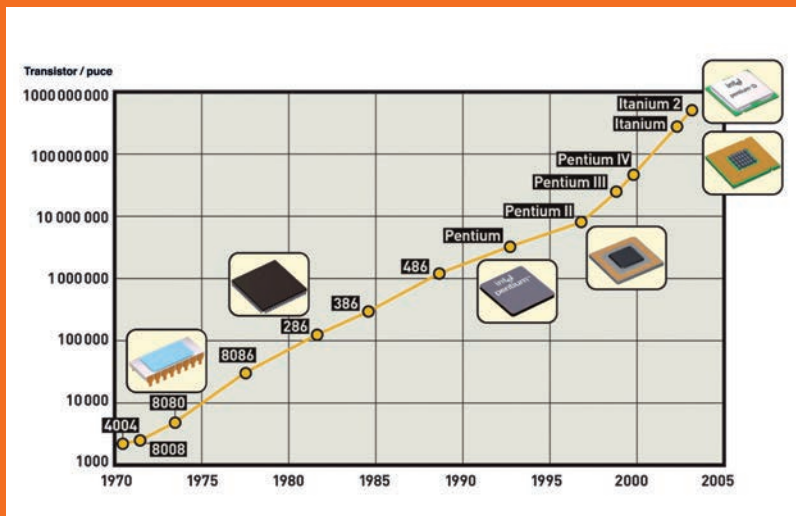
ZOOMSUR

LA LOI DE MOORE :

des composants de plus en plus petits, de moins en moins chers.

Durant les années 70, Gordon Moore, un des cofondateurs de la société Intel et inventeur du premier microprocesseur (Intel 4004, en 1971), prédit le doublement de la densité des puces électroniques tous les deux ans. Depuis cette époque, chercheurs et industriels de la microélectronique suivent donc scrupuleusement une « feuille de route » qui établit avec précision des objectifs de réduction de taille des transistors. Les progrès constants qu'ils ont réalisés, associés à une production massive, ont permis de réduire radicalement les coûts des composants microélectroniques et donc de tous les produits qui y ont recours : ordinateurs, smartphones, téléviseurs, caméras, appareils photos...

Cette loi, qui prévoyait une miniaturisation continue, touche néanmoins à sa fin et laisse place au « More than Moore », une approche axée sur les fonctions (par exemple électro-optiques ou électromécaniques), et au « beyond CMOS » qui explore les propriétés de nouveaux matériaux, de nouvelles structures de transistors, d'architectures de circuits, ou de modes de fabrication (cf. page 20).





PASSER DU DESIGN À LA FABRICATION

Si les puces électroniques se retrouvent aujourd'hui dans de très nombreux objets de la vie quotidienne, c'est qu'elles sont fabriquées en séries et contiennent des milliards de composants. Cette production fait appel à des technologies d'une extrême complexité et nécessite donc des infrastructures et des équipements très coûteux.



© L. Goulet / CEA

DU SABLE...

De par ses propriétés de semi-conducteur, le matériau de base des circuits intégrés est aujourd'hui encore le silicium. Extrait du sable (oxyde de silicium) par réduction chimique, il est cristallisé sous forme de barreaux de 20 ou 30 cm de diamètre, ensuite sciés en tranches de moins d'un millimètre d'épaisseur qui sont polies jusqu'à obtenir des surfaces lisses à 0,5 nanomètre près. C'est sur cette tranche, appelée wafer⁶, que des centaines de puces sont fabriquées simultanément, grâce à la répétition ou la combinaison d'opérations élémentaires : traitement thermique, nettoyage, dépôt, photolithographie, gravure et dopage.

Les dimensions les plus fines obtenues aujourd'hui industriellement permettent de disposer et de connecter des millions de composants de base - les transistors - par circuit, et de multiplier ainsi les fonctionnalités. Cette fabrication collective, qui fait chuter les coûts unitaires, est l'un des atouts majeurs de l'industrie microélectronique. Mais elle durcit aussi les exigences de production : une erreur de manipulation, quelques secondes en plus ou en moins et ce sont plusieurs centaines de circuits qui finissent à la poubelle...



Lecture du cahier des charges de circuits intégrés, à partir duquel il faudra dessiner les masques nécessaires à la fabrication.

LE DESIGN DES CIRCUITS

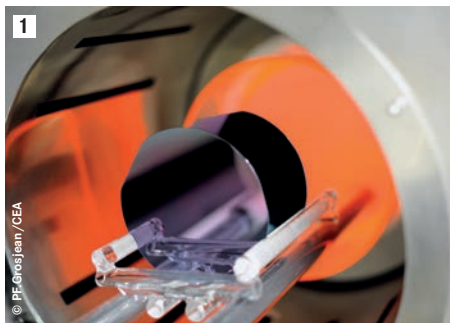
Impossible de concevoir un circuit de plusieurs millions d'éléments sans l'aide de l'ordinateur : tout concepteur de puces recourt à la CAO⁷ pour déterminer les principales fonctions, puiser des modules dans des bibliothèques informatisées, arranger ces modules les uns par rapport aux autres, simuler le fonctionnement global...

L'exercice est long, difficile et incroyablement minutieux : en imaginant qu'un micro-processeur de 100 millions de transistors ait la taille d'un carré de 6 km de côté, chaque isolant de grille de transistor aurait une épaisseur d'un millimètre seulement !

6- Wafer : galette ou plaque de semi-conducteur monocristallin, support des circuits électroniques.

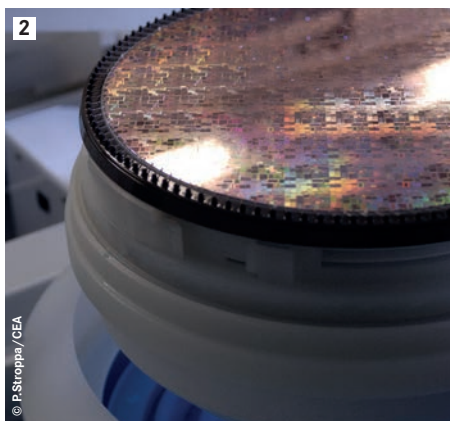
7- CAO : Conception assistée par ordinateur, qui regroupe les logiciels et les techniques de modélisation géométrique qui permettent de concevoir et tester virtuellement des produits manufacturés avant de les réaliser.

6 ÉTAPES CLÉS DE FABRICATION



1- Le traitement thermique

Réalisé dans des fours à des températures de 800 à 1 200° C, il permet de réaliser des couches d'oxyde et de nitrure de silicium par exemple, réarranger des réseaux cristallins ou effectuer certains dopages.



2- Les dépôts

Ils apportent à la surface du silicium des couches conductrices ou isolantes : oxydes, nitrures, siliciures, tungstène, aluminium... Ils sont effectués par diverses techniques physiques ou chimiques : dépôt en phase vapeur (CVD), pulvérisation, épitaxie⁹...



3- La photolithographie

Étape-clé, elle consiste à reproduire dans la résine photosensible le dessin des circuits à réaliser. Ces motifs complexes sont générés en une seule exposition. La lumière d'une source lumineuse de très faible longueur d'onde (UV ou rayons X, pour les gravures les plus fines) y projette l'image d'un masque. Plus la résolution optique est poussée, plus la miniaturisation des circuits est améliorée.



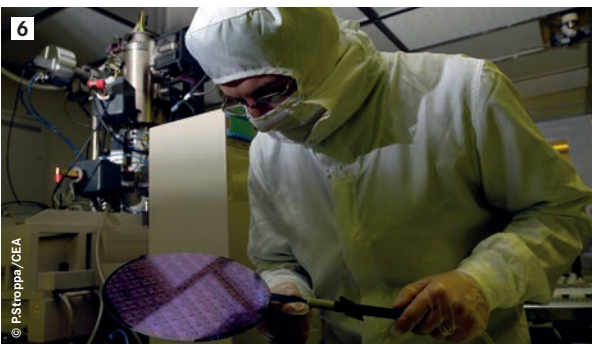
4- Le nettoyage

Les nombreuses opérations de nettoyage des tranches représentent presque un tiers du temps total de processus de fabrication.



5- La gravure

A l'inverse du dépôt, la gravure enlève de la matière, toujours dans le but de réaliser un motif. Deux voies principales : la gravure dite humide, qui utilise des réactifs liquides, et la gravure sèche (ou gravure plasma) qui emploie des réactifs gazeux. En 2004, les gravures les plus fines en production mesuraient 130 nm. Dix ans après, elles n'étaient plus que de 14 nm !



6- Le dopage

Pour introduire au cœur du silicium les atomes qui vont modifier sa conductivité, les plaquettes sont chauffées entre 800 et 1 100° C dans des fours, en présence du gaz dopant, ou bombardées par implantation à travers un masque par un faisceau d'ions accélérés.

Aujourd'hui, réaliser un circuit intégré complexe demande la succession de plusieurs centaines d'opérations.

ZOOMSUR

ENVIRONNEMENT DE LABORATOIRE

A l'échelle d'une puce, un minuscule grain de poussière représente un rocher qui bouche les chemins creusés pour la circulation des électrons. C'est pourquoi la fabrication a lieu en « salle blanche ». L'air est filtré et entièrement renouvelé 10 fois par minute. Il contient 100 000 à 1 million de fois moins de poussières que l'air extérieur. Les opérateurs portent en permanence une combinaison qui les couvre des pieds à la tête et retient les particules organiques et les poussières qu'ils génèrent naturellement.

Les opérations de photolithographie nécessitent une ambiance appelée inactinique : les lampes utilisées, le plus souvent jaunes (la plage de longueur d'onde ultraviolette est retirée), n'ont pas ou peu d'effets photochimiques sur les résines photosensibles recouvrant les wafers.

8- Epitaxie : Dépôt de cristaux sur un substrat, une surface polie, en couches de quelques nanomètres d'épaisseur.



© T. Foulon/CEA

↑
Masqueur électronique de lithographie par faisceaux d'électrons.

La photolithographie

Elle est limitée par les phénomènes de diffraction et de longueur d'onde du faisceau de lumière utilisé. Aujourd'hui, avec des détails de l'ordre de 10 à 20 nm, la photolithographie atteint ses limites techniques et des effets dus à la physique quantique perturbent le fonctionnement des circuits ; par exemple, des électrons sautent d'un « fil » à l'autre par effet tunnel.

Les motifs peuvent aussi être gravés au moyen de faisceaux d'électrons, mais les dessins doivent alors être tracés les uns après les autres. La lithographie par faisceau d'électrons (*E-beam*) permet d'atteindre une résolution nanométrique, correspondant à leur longueur d'onde.

...À LA PUCE

Pour finaliser la fabrication, une pellicule métallique est déposée aux endroits où le circuit devra être en contact

avec les broches de sortie. Puis les circuits intégrés sont testés, directement sur le wafer.

Enfin, celui-ci est découpé pour obtenir des puces, insérées dans un boîtier individuel de protection et reliées aux broches qui vont leur permettre de communiquer avec l'extérieur. Des tests de validation et de qualification, à différentes fréquences et températures, sont alors entrepris.

ZOOMSUR

MINATEC

Initié par le CEA et l'Institut national polytechnique de Grenoble, soutenu par les collectivités locales et territoriales, Minatec est le premier pôle européen, et l'un des premiers mondiaux, dédié aux micro et nanotechnologies.

Le site est constitué de 45 000 m² de laboratoires, bureaux et salles blanches (8 000 m²) pour la nanoélectronique et les microsystèmes, une plateforme de nanocaractérisation (1 500 m²), un centre de développement, caractérisation et simulation de composants opto-électroniques, des chambres anéchoïdes, une plateforme de cybersécurité...

4 000 personnes environ y travaillent, parmi lesquelles 1 200 chercheurs, 1 000 étudiants, 200 enseignants-chercheurs et 1 000 emplois industriels directs.



© P.F. Grosjean/CEA



DE PLUS EN PLUS D'APPLICATIONS

Téléphones mobiles, appareils photo numériques, micro-ordinateurs, consoles de jeux, cartes bancaires, GPS, automobiles : en quelques décennies, les circuits intégrés ont conquis la plupart de nos objets quotidiens.

Au CEA, les chercheurs développent des composants de base de plus en plus petits. Ils savent ensuite construire des capteurs complets, des circuits intégrés, prévoir des architectures spécifiques, en assurer l'intégration 3D et le packaging, leur associer de l'électronique de puissance, des éléments d'imagerie et des algorithmes de fusion de données... allant jusqu'au stade de pré-industrialisation. Ils continuent aussi d'étudier l'ingénierie des matériaux, à l'origine de nouvelles fonctions.

Cette pluridisciplinarité profite à de nouveaux axes de R&D : l'intelligence artificielle, la réalité virtuelle et la réalité augmentée, les protocoles médicaux, la cybersécurité. Une meilleure connectivité, une bonne autonomie énergétique et la garantie de la sécurité des données et des calculs révolutionnent les domaines de la santé, de l'environnement et de l'énergie.

INFORMATIQUE

Les composants microélectroniques constituent le « socle » physique (hardware) sur lequel fonctionnent toutes les applications informatiques (software).

L'évolution accélérée des capacités de traitement et de stockage des informations numériques, associée aux progrès des langages de programmation et des codes de calcul, a favorisé le développement d'applications logicielles de plus en plus complexes, capables de manipuler d'abord uniquement du texte, puis des images, des vidéos... La révolution actuelle du « Big Data », qui manipule d'énormes quantités de données informatisées, découle directement des progrès de la microélectronique.

➤
Supercalculateur
Airain, hébergé dans
le Très grand centre
de calcul du CEA. Il est
ouvert aux chercheurs
de l'organisme et aux
industriels français.



INTERNET ET TÉLÉPHONIE

Pour répondre à la demande de l'Internet des objets (IoT), de nouveaux systèmes apparaissent : performants, à faible consommation et enrichis de fonctions de communication, stockage et sécurité.

Ils sont accompagnés de systèmes de liaisons numériques sans fil à très haut débit, comme les futurs réseaux 5G qui assurent leur hyperconnectivité.

SANTÉ

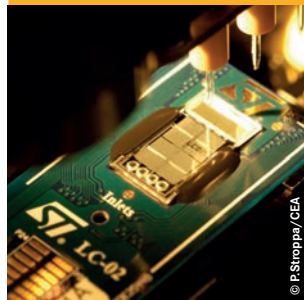
Dès 1976, les systèmes électroniques du CEA ont équipé le premier scanner à rayons X pour analyser le corps entier. En 1980, les chercheurs mettent au point le premier tomographe à émission de positons. En 1997, c'est au tour de la génomique⁹ de profiter de leurs travaux avec les premières biopuces.



© P.Stroppe/CEA

ZOOM SUR

LAB-ON-CHIP



© P.Stroppe/CEA

Aujourd'hui, les laboratoires sur puces permettent de réaliser les analyses biologiques courantes à domicile et de transmettre les données *via* un smartphone à son médecin. Des services dans le domaine de la médecine personnalisée sont envisagés : administration ciblée de médicaments, systèmes de contrôle résorbables et matériaux biocompatibles pour des implants et autres patches médicaux...

✦
Caméra hybride de tomographie par émission de positons et de tomodensitométrie corps entier de la plateforme imagerie biomédicale Cycleron.

9- Génomique : Science qui étudie l'ADN et l'ensemble des gènes des êtres vivants.

LES AVIEZ-VOUS?

LEDS

Au-delà des composants, les chercheurs ont développé une nouvelle génération de Leds 3D, plus efficaces et quatre fois moins chères que les Leds classiques.

Pour cela, ils utilisent, sur un substrat plus grand, des matériaux moins onéreux et n'ont plus besoin de phosphore.

EFFICACITÉ ÉNERGÉTIQUE

Pour réduire l'impact sur l'environnement des multiples systèmes numériques, gourmands en énergie, de nouvelles technologies et architectures de composants basse consommation sont développées. Ces composants électroniques cherchent en particulier à récupérer et exploiter l'énergie qui les environne, qu'elle soit issue de rayonnements (solaire, radiofréquence ou infrarouge), de variations de température ou d'origine mécanique (chocs, déformations, vibrations).

CYBERSÉCURITÉ

Grâce à leur expertise approfondie des différents types d'attaques physiques que peuvent subir circuits intégrés et composants électroniques, les chercheurs peuvent assurer la sécurité d'un système numérique dans son ensemble. En couplant technologie, design et logiciel embarqué, ils développent ainsi des protections physiques ou des systèmes assurant la traçabilité de chaque circuit.

IMAGERIE ASTROPHYSIQUE

Les télescopes et satellites, et donc l'astrophysique dans son ensemble, bénéficient pleinement des avancées en microélectronique.

Ainsi, parmi la dizaine d'instruments embarqués sur le satellite Solar Orbiter, un spectromètre équipé de nouveaux détecteurs de rayons X produira des images spectroscopiques du plasma solaire. Une caméra spectrométrique de nouvelle génération, miniaturisée (passant de 330 cm² à 8 cm²) et plus performante, va prendre la relève de celle mise en orbite à bord du satellite Integral.

Montage de matrices de bolomètres sur la caméra ArTÉMIS.

Détecteur Caliste-SO pour le satellite Solar-Orbiter.



Implanté sur le plateau de Chajnantor au Chili, le télescope Apex détecte de nombreux objets célestes. Pour cela, il est équipé entre autres d'une caméra utilisant des bolomètres¹⁰ ultra-sensibles, conçus pour détecter les plus infimes variations de température dues à la faible radiation submillimétrique, mais qui doivent être refroidis à une température de $- 272,85 \text{ }^{\circ}\text{C}$!

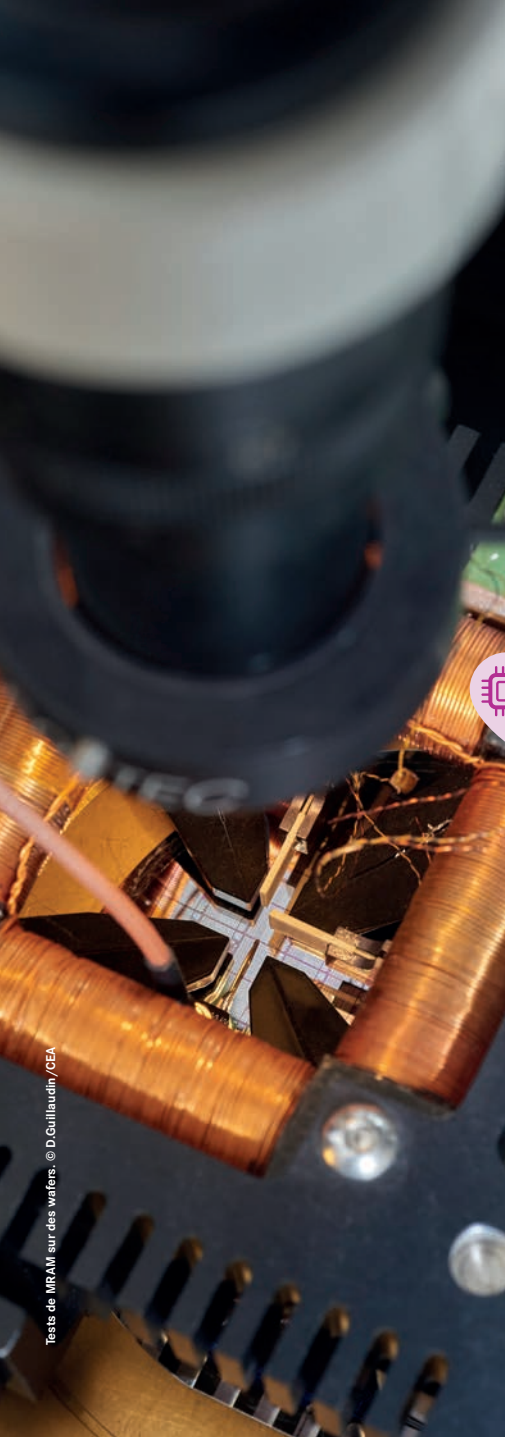
AU QUOTIDIEN

Des détecteurs à base de microbolomètres équipent aujourd'hui de nombreux produits commerciaux, qui vont des systèmes de vision nocturne pour la surveillance et la sécurité, des caméras de thermographie (pour les pompiers par exemple), à des applications grand public : bâtiments connectés, voitures, téléphones portables...



↑
Habitacle de voiture sans conducteur.

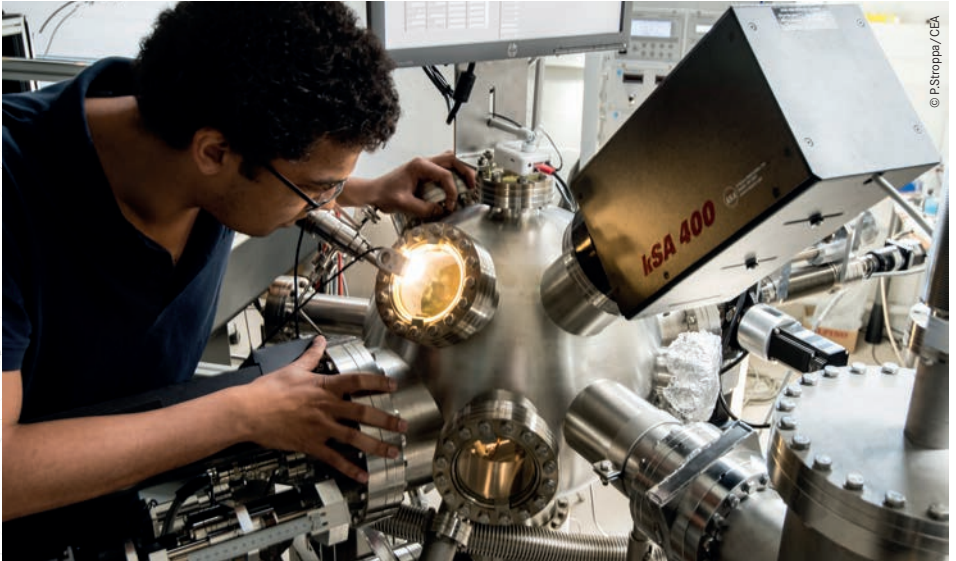
10- Bolomètre : Détecteur du rayonnement électromagnétique solaire, qui convertit l'énergie du rayonnement incident en température, facilement mesurable.



Tests de MRAM sur des wafers. © D.Guillaudin/OEA



ÉLECTRONIQUE, ... ET PLUS ENCORE



© P. Stroppa / CEA

↑
Dépôt de couches minces d'oxydes
ferromagnétiques et antiferromagnétiques
pour la spintronique.

Les domaines des nanosciences et nanotechnologies ont émergé dans les années 80 avec la mise au point de nouveaux outils de fabrication, de mesure et de caractérisation à l'échelle des atomes, comme les microscopes à effet tunnel.

Les nanocomposants sont fabriqués de deux manières :

- La voie descendante, ou top-down. C'est la voie suivie par l'électronique depuis quarante ans, les dimensions du composant que l'on veut fabriquer ont été réduits au maximum, comme pour tous les circuits intégrés sur puce.
- La voie ascendante, ou bottom-up. Des molécules et des assemblages atomiques complexes sont assemblés avant d'être intégrés dans de plus grands systèmes. C'est l'une des voies d'avenir à plus ou moins long terme pour dépasser les limitations de la loi de Moore : fabriquer plus petit, moins cher, avec une qualité accrue, et surmonter ainsi les obstacles de la miniaturisation.



© L.Godard/CEA

↑
Salle blanche de fabrication de puces 3D sur des wafers 300 mm.

TOP-DOWN

Nanoélectronique

Les outils de miniaturisation de découpe, sculpture, gravure... ont permis d'atteindre des dimensions inférieures au micromètre. En 1999, un premier transistor de 20 nm est réalisé. Aujourd'hui, un nouveau transistor à base de nanofils silicium et silicium-germanium permet l'augmentation des performances des circuits intégrés et la réduction de la puissance dissipée. Le système d'hétéro-jonctions¹¹ permet d'envisager une plus grande miniaturisation des composants, et de passer ainsi sous le nœud technologique de 5 nm.

Pour offrir une alternative à la réduction des dimensions de circuits, dont le coût devient prohi-

bitif, et afin d'être encore plus petites et plus fonctionnelles, les puces sont disposées les unes sur les autres, et non plus côte-à-côte, sur des wafers de 300 mm. L'une des technologies développée au CEA superpose et interconnecte des transistors FDSOI avec une précision d'alignement lithographique de l'ordre du nanomètre. Elle permet ainsi de disposer plus de 10 millions de contacts 3D au mm², contre 100 000 pour des solutions classiques.

Électronique quantique

Une boîte quantique (ou *quantum dot* en anglais) est une nanostructure de semi-conducteurs qui confine les électrons (et les trous) dans les trois dimensions de l'espace. Du fait de ces propriétés

¹¹- Hétéro-jonction : Jonction formée de deux semi-conducteurs différents ou d'un métal et un semi-conducteur.

physiques, elles font l'objet d'études poussées depuis une vingtaine d'années, et trouvent leur principale application dans les transistors.

De plus, les points quantiques pourraient avoir une application dans l'informatique où des qubits, unités de stockage d'information quantique, remplaceraient le système actuel. Alors qu'un bit ne peut prendre que les valeurs 0 et 1, et une seule à la fois, un qubit n'a pas cette restriction. Concrètement, avec 4 bits, un ordinateur classique peut traiter un état parmi 24 soit 16 états différents : 0000, 0001, 0010, 0011... Dans un ordinateur quantique, les quatre qubits pourraient être dans une superposition de tous ces états et ces 16 états pourraient être traités simultanément. Il calculerait donc 4 fois plus vite qu'un ordinateur classique ! À noter, aujourd'hui, ces dispositifs ne fonctionnent qu'à très basse température (20 mKelvin¹²).

BOTTOM-UP

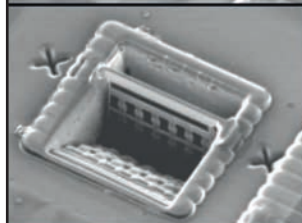
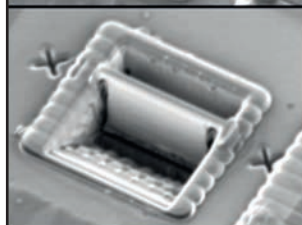
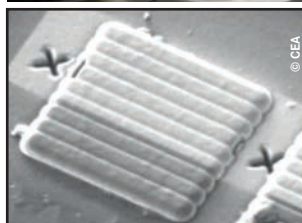
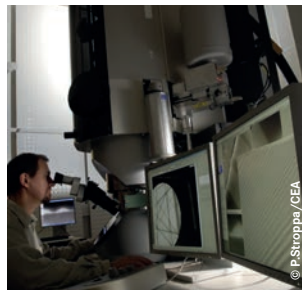
La voie bottom-up fait appel à des connaissances fondamentales de physique et de chimie ; elle permet de concevoir les composants entièrement nouveaux de l'électronique moléculaire.

Mais si la fabrication atome par atome de nano-composants est possible, elle est inenvisageable industriellement car elle prendrait un temps infini. À défaut de construire un circuit complet, les chercheurs envisagent la conception d'entités moléculaires dotées de fonctions électroniques capables de s'organiser seules. Pour les fabriquer, ils disposent de quatre briques de base : les molécules de synthèse, les biomolécules comme l'ADN, les nanoparticules métalliques ou semi-conductrices et les nanotubes de carbone.

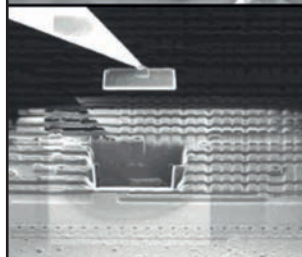
En 1974, la première diode moléculaire a été réalisée sur une couche de molécules individuelles. Non plus faite en silicium, elle a été obtenue par la mise en contact de deux morceaux de semi-conducteurs : l'un comportant de nombreux électrons, alors que le deuxième en est extrêmement pauvre. Des molécules qui présentent cette même asymétrie ont ensuite été conçues ; puis un transistor dans lequel le canal était formé d'une de ces molécules. Ce dispositif a donné des preuves flagrantes du comportement quantique des électrons.

Mais la voie de l'auto-assemblage est difficile : il faut réussir à contrôler le positionnement des briques.

➔
Microscope électronique à transmission pour la caractérisation des nanomatériaux.



➔
Le Focus-Ion-Beam : un scalpel à l'échelle nanométrique. Extraction d'une lamelle (20 microns de longueur, 100 nm d'épaisseur) contenant un transistor de circuit intégré.



12- Le kelvin (symbole K, du nom de William Thomson Kelvin) est l'unité de température thermodynamique. 0 K = -273,15 °C et correspond au zéro absolu.



D. Guillaud/CEA

↑ Tests de MRAM : mesure de la résistance, du TMR (Tunneling Magnetic Resist), du retournement et de la dispersion de ces valeurs sur le wafer complet.

LES AVIEZ-VOUS?

SPIN

Les électrons ont trois particularités physiques : leur masse, leur charge et leur spin.

Pour cette dernière caractéristique intrinsèque, tout se passe comme si le moment magnétique de l'électron s'apparentait au sens de rotation interne de celui-ci autour d'un axe fixe imaginaire.

Pour les électrons, le spin ne peut prendre que deux valeurs : $+1/2$ spin dit « up » ou $-1/2$ spin dit « down », correspondant ainsi au fait qu'il ne peut tourner que dans un sens ou dans l'autre.

Il est ainsi possible de coder une information en langage binaire (0 ou 1).

DE NOUVELLES TECHNOS

Spintronique, photonique, électronique moléculaire... autant de technologies à l'étude pour miniaturiser davantage les transistors et développer de nouvelles fonctions.

Spintronique, marier l'électronique et le magnétisme

Alors que l'électronique actuelle exploite la charge électrique de l'électron, la spintronique repose sur une autre de ses propriétés quantiques : le spin, qui correspond au moment magnétique élémentaire porté par l'électron. Cette propriété permet d'obtenir des fonctionnalités nouvelles pour coder, traiter ou transmettre une information.

Des dispositifs innovants, combinant des matériaux magnétiques qui servent de polariseur ou d'analyseur en spin et des matériaux conducteurs, isolants ou semiconducteurs, peuvent ainsi être réalisés. Certains sont déjà utilisés dans les disques durs d'ordinateurs. Ces capteurs, dont la résistance électrique varie en fonction du champ magnétique appliqué, permettent de relire l'information magnétique enregistrée sur le disque magnétique. La spintronique permet d'envisager de pousser la capacité de stockage au-delà du téraoctet (10^{15} bits) par pouce carré, c'est-à-dire 155 milliards de bits/cm².

D'autres applications industrielles sont en train de voir le jour : des mémoires magnétiques MRAM (*Magnetic Random Access Memory*), qui ne disparaissent pas en cas de coupure d'alimentation, sont très

rapides (écriture et lecture ne durent que quelques nanosecondes) et insensibles aux rayonnements ionisants, et des composants radiofréquence pour les télécommunications et les réseaux sans fil par exemple.

Photonique, la lumière pour coder l'information

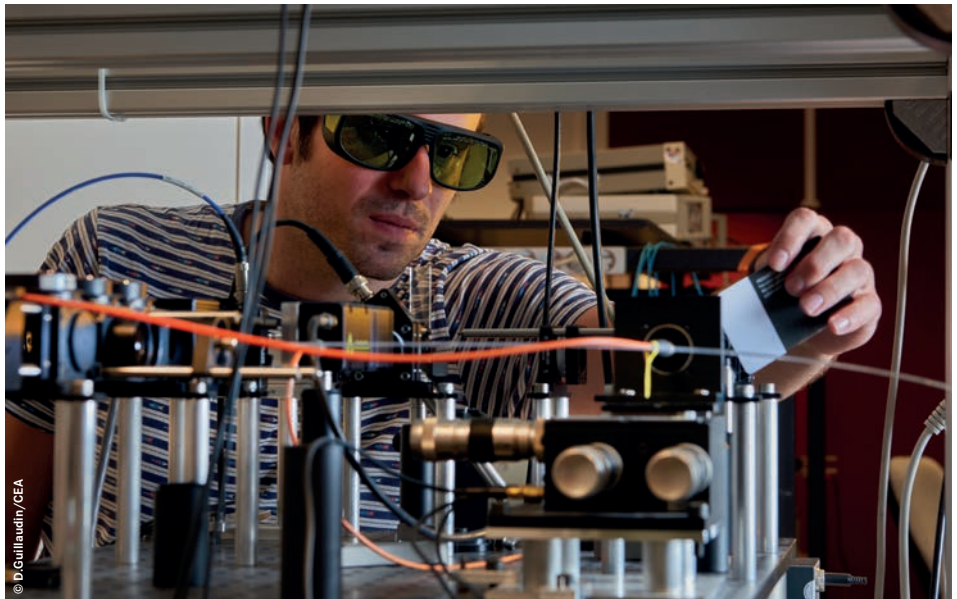
Tous les systèmes actuels (une puce d'ordinateur, un circuit intégré, un transistor) sont basés sur le transport, le confinement et les propriétés physiques de l'électron. Mais si, pour aller plus vite, il était remplacé par le photon ? Celui-ci, outre qu'il se déplace à la vitesse de la lumière (300 000 km/s), provoque peu de dissipation de chaleur lors de son déplacement.

Mais le silicium, vedette de la microélectronique, est une piètre source de lumière... à l'état macroscopique. Soumis aux lois étranges du monde quantique, un cristal de silicium nanostructuré (une dizaine de nm seulement) voit ses performances d'émission fortement modifiées ! Un cristal photonique guide ensuite ces photons. Constitués en perçant de minuscules trous de manière périodique dans un semi-conducteur, ces cristaux réfléchissent et dirigent la lumière. Ils peuvent aussi la filtrer, en agissant sur des longueurs d'onde particulières et permettent de la confiner dans un volume extrêmement faible (quelques centaines de nm³).

Pour aller vers l'ordinateur à photons, de nombreuses recherches sont en cours pour la modulation, le multiplexage¹³ et le décodage des signaux.

13- Multiplexage : Combinaison de signaux indépendants en un seul signal composite destiné à être transmis sur une voie commune.

Mise au point de nanolaser sur puce.



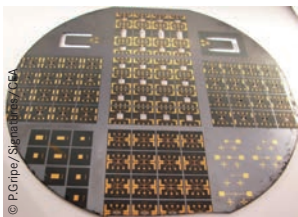
© D.Guillaudin/CEA

DES LABORATOIRES AUX START-UPS

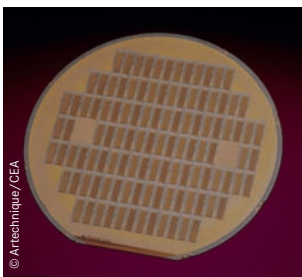
STMicroelectronics et Soitec

En France, l'aventure du silicium sur isolant (*Silicon On Insulator*) a démarré en 1974, pour répondre à des applications militaires qui exigent une électronique « durcie », résistant aux effets des rayons ionisants. L'Institut Leti du CEA est alors devenu un des rares endroits au monde – avec quelques entreprises américaines travaillant pour la défense des États-Unis – où de tels circuits étaient développés. Depuis 1992, en fournissant les substrats supports des composants, Soitec joue un rôle clé dans l'industrie de la microélectronique.

STMicroelectronics conçoit et produit des matériaux semi-conducteurs innovants, offre des solutions inédites et compétitives pour que se poursuive la miniaturisation des puces, l'augmentation de leurs performances et la réduction de leur consommation d'énergie. Ces produits sont utilisés dans les smartphones, les tablettes, les ordinateurs, les serveurs informatiques ou les data centers¹⁴. On les retrouve aussi dans les composants électroniques des automobiles, les objets connectés, les équipements industriels et médicaux.



↑
Substrat 4 pouces pour la fabrication de MEMS.



↑
Wafer contenant les matrices de bolomètres infrarouge non-refroidis.

Du thermomètre au bolomètre

Au début des années 1980, la production à grande échelle des premiers capteurs de pression MEMS (*Micro Electro Mechanical Systems*) a donné un nouvel essor à une technologie de détection du rayonnement infrarouge : la détection thermique. Le CEA et la DGA¹⁵ ont lancé, à partir de 1992, le développement d'une filière nationale de détecteurs infrarouge non refroidis à base de microbolomètres. Cette technologie a été transférée en 2000 à Sofradir, qui a créé en 2002 la filiale Ulis grand public chargée de son industrialisation.

À l'origine, les produits concernaient des systèmes de vision nocturne pour la surveillance et la sécurité, ou des caméras de thermographie pour des applications haut de gamme (contrôle de procédé, maintenance d'installations, caméra pour pompiers). La réduction des coûts de fabrication a permis de les intégrer dans un nombre croissant d'applications grand public : bâtiments connectés, voitures, téléphones portables...

¹⁴- Data center ou centre de données : site physique regroupant des installations informatiques (serveurs, routeurs, disques durs...) chargées de stocker et de distribuer des données à travers un réseau interne ou via Internet.

¹⁵- Direction générale de l'armement

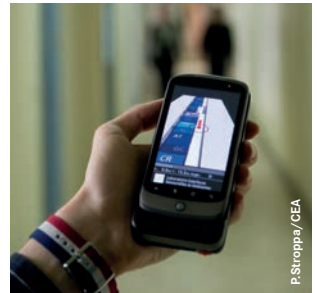
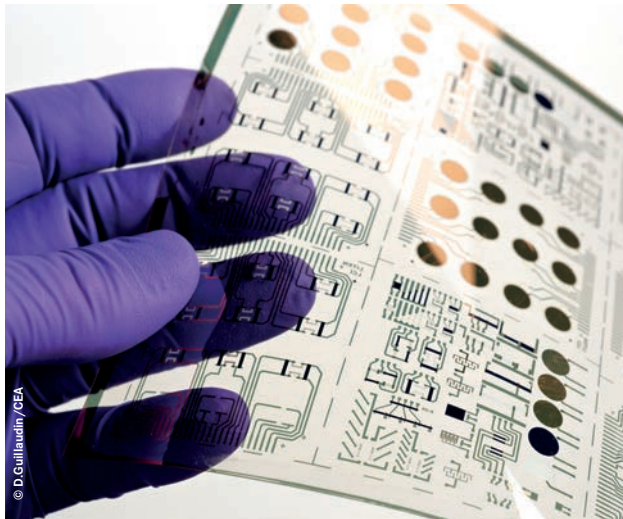
Movea capture les mouvements

Des laboratoires du CEA travaillent depuis plusieurs décennies à la miniaturisation des capteurs de mouvements et leur intégration dans des circuits électroniques. La start-up Movea est née en 2007 de l'idée d'embarquer ces capteurs – et leurs logiciels d'exploitation – dans des objets grand public, pour des applications dans les domaines des loisirs, de la santé ou du sport.

Isorg et l'électronique imprimée

En s'appuyant sur une technologie issue du CEA, la société Isorg a acquis une expertise industrielle unique au monde dans l'impression de matériaux semi-conducteurs en solution, à température et air ambiants, mais également dans la mise au point de photodiodes organiques sur des surfaces allant de quelques millimètres carrés à plusieurs décimètres carrés.

Elle conçoit et fabrique des photodétecteurs organiques souples et imprimables sur tout type de surface. Ces nouveaux capteurs photosensibles, minces, légers et conformables, offrent des avantages uniques par rapport aux capteurs traditionnels, tels que le coût de fabrication, la gamme spectrale, l'intégration mécanique et la résistance aux chocs. Cette technologie de rupture permet de transformer des surfaces de toutes natures, comme par exemple en plastique ou en verre, en surfaces intelligentes capables de vision ou d'interactivité. Avec ses produits, la société vise les marchés de la santé (imagerie par rayons X), de l'industrie (capteurs pour l'industrie du futur et objets connectés, comme par exemple la métrologie et la logistique) et de l'électronique grand public (écrans interactifs).



↑ Système de localisation utilisant la cartographie des bâtiments.

◆ Feuille d'électronique imprimée.



LA COLLECTION

- 1 > L'atome
- 2 > La radioactivité
- 3 > L'homme et les rayonnements
- 4 > L'énergie
- 5 > L'ADN
- 6 > Les réacteurs nucléaires
- 7 > Le cycle du combustible nucléaire
- 8 > La microélectronique
- 9 > Le laser
- 10 > L'imagerie médicale
- 11 > L'astrophysique nucléaire
- 12 > L'hydrogène
- 13 > Le Soleil
- 14 > Les déchets radioactifs
- 15 > Le climat
- 16 > La simulation numérique
- 17 > Les séismes
- 18 > Le nanomonde
- 19 > Energies du XXI^e siècle
- 20 > La chimie pour l'énergie

DE LA RECHERCHE À L'INDUSTRIE

cea

© Commissariat à l'énergie atomique et aux énergies alternatives, 2018
Direction de la communication
Bâtiment Siège
91191 Gif sur Yvette cedex - www.cea.fr

ISSN 1637-5408