

COMPOSANTS ÉLECTRONIQUES

Les challengers du silicium

LUDOVIC FÉRY [1]

Longtemps indétrônable, le silicium a désormais des concurrents. Matériaux organiques et oxydes métalliques se côtoient et se combinent pour le remplacer, voire le surpasser en répondant aux exigences de composants électroniques plus performants. Reste à trouver les procédés de production compatibles avec les chaînes de fabrication existantes.

La loi de Moore, qui prédit le doublement, à surface équivalente, du nombre de transistors tous les deux ans grâce à la miniaturisation, finira-t-elle par s'es-souffler? C'est la question qui préoccupe aujourd'hui tous les fondeurs de la microélectronique. Si les prédictions de Gordon Moore ne sont pas remises en cause sur le plan théorique, il en va déjà autrement en pratique. Il a ainsi fallu quinze ans de recherche à Intel pour passer du concept de processeur gravé en 22 nanomètres à la réalité. Avec, parmi les ruptures technologiques imposées par la miniaturisation, la présence d'un matériau autre que le silicium dans les transistors, de l'oxyde d'hafnium.

« L'oxyde d'hafnium comme isolant entre la grille et le canal du transistor assure un niveau de fuite de cent à mille fois moins élevé que l'oxyde de silicium », souligne Simon Deleonibus, directeur scientifique du CEA-Leti.

Le graphène, tête de pont de l'électronique organique

Au-delà de la poursuite de la miniaturisation, recourir à d'autres matériaux que l'éternel semi-conducteur pour en surpasser les capacités peut s'avérer pertinent pour certains secteurs de pointe. À l'instar des *smart grids*, qui nécessitent le développement de composants de haute puissance comme les transistors des futurs convertisseurs de courant alternatif. Autre exemple: les télécommunications, avec l'essor des réseaux en fibres optiques, ou encore l'informatique, toujours à la recherche de performances accrues.

Une des voies poursuivies pour supplanter le silicium est celle des matériaux organiques. Leur intérêt réside dans une malléabilité très supérieure à celle des métaux dans la fabrication ou la combinaison à d'autres molécules. Champion incontesté dans cette catégorie: le graphène. Pas un jour ne se passe sans une nouvelle annonce d'un dispositif électronique à base du prolifique matériau constitué d'un atome de carbone d'épaisseur, étalé sur un plan bidimensionnel: électrodes, dissipateurs thermiques, composants de mémoire...

[1] Article extrait de la revue *Industrie & technologies*, n° 958, octobre 2013.

mots-clés
électronique,
composant, recherche
et développement

Ses propriétés conductrices sont en effet exceptionnelles, du fait de la grande mobilité de ses électrons, jusqu'à 100 fois supérieure à celle du silicium à température ambiante. Une supériorité qui constitue paradoxalement le principal frein à son utilisation dans l'industrie du semi-conducteur: la conductivité du graphène pur est impossible à annuler, ce qui pose problème pour la conception de transistors conventionnels, que l'on peut voir comme de simples interrupteurs.

Les chercheurs ont déjà identifié plusieurs parades à cet obstacle. Samsung, par exemple, se concentre sur un nouveau design appelé Barristor, qui combine une couche de graphène avec une électrode en silicium. À l'interface se crée une jonction qui se comporte comme une barrière vis-à-vis du passage des électrons, dès qu'on lui applique un courant de faible tension. Ainsi, on obtient un comportement de type semi-conducteur. Cette approche s'est montrée efficace au stade expérimental en associant le graphène à d'autres semi-conducteurs que le silicium, comme l'arséniure ou le nitrure de gallium.

Un concept différent de transistor exploite une autre propriété électrique exceptionnelle du polymère: le fait qu'il oppose, sous certaines conditions, une résistance négative au passage du courant, c'est-à-dire que le matériau provoque une baisse de la tension. Ce phénomène pourrait donner naissance à des transistors particulièrement puissants, d'une fréquence de plus de 500 gigahertz, selon les modèles prédictifs. Des chercheurs californiens sont ainsi parvenus à concevoir un circuit logique à une porte avec trois transistors en graphène, là où il faut normalement huit transistors en silicium. L'Europe a quant à elle décidé de consacrer un milliard d'euros et dix années de recherches à la fameuse molécule, via son programme FET Flagship. La feuille de route prévoit en outre l'étude d'autres cristaux bidimensionnels à un atome d'épaisseur, isolés à la manière du graphène, tels le nitrure de bore ou certains métaux dichalcogénides. Leurs propriétés pourraient se révéler tout aussi intéressantes pour l'électronique.

Des oxydes métalliques aux aimantations différentes

Outre les molécules organiques, d'autres matériaux sont intégrés à des composants à l'architecture originale. C'est notamment le cas des mémoires magnétiques appelées MRAM. Les produits de la société Everspin, reposant sur l'électronique de spin, combinent deux couches métalliques avec des aimantations différentes séparées par un matériau isolant. Par rapport à ses concurrentes, cette mémoire magnétique combine

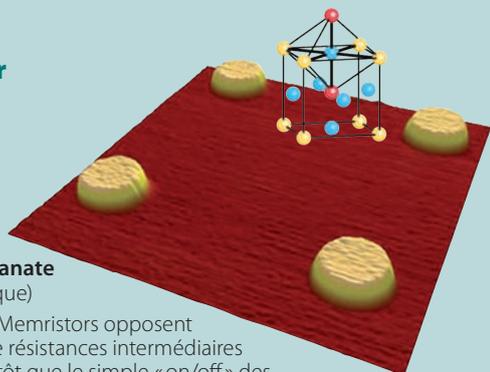
5 composants misent sur des alternatives

Memristor

MATÉRIAU:
baryum de titanate
(oxyde métallique)

INTÉRÊT: les Memristors opposent une gamme de résistances intermédiaires au courant plutôt que le simple « on/off » des transistors classiques. De tels composants simplifieraient la transmission d'informations dans les puces.

EXPERTS: CNRS-Thales



Diode Vcsel

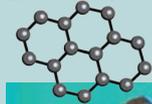
MATÉRIAU:
arséniure de gallium
(alliage métallique III-V)

INTÉRÊT: les lasers Vcsel sont une solution relativement peu coûteuse et performante pour réaliser des commutateurs dans les réseaux de télécommunications à fibres optiques.

EXPERTS: QD Laser (Japon)



Électrode transparente

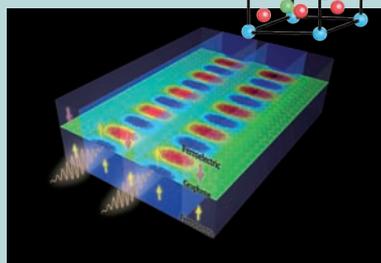
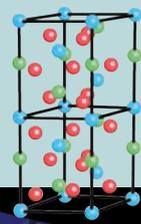


MATÉRIAU:
graphène (molécule organique)

INTÉRÊT: le graphène, du fait de sa transparence et de sa grande disponibilité (graphite), constitue une alternative pour la conception d'électrodes pour écrans tactiles, actuellement en oxyde d'indium-étain.

EXPERTS: Samsung

Guide d'onde plasmonique

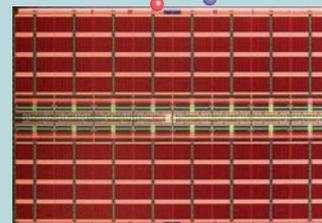
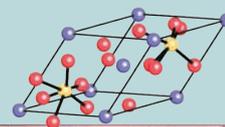


MATÉRIAU:
graphène en sandwich entre deux couches
de niobate de lithium (oxyde métallique)

INTÉRÊT: le guide d'onde utilise la lumière plutôt que l'électricité pour véhiculer de l'information, dans les puces photoniques. Le graphène exploite un phénomène optique particulier, la plasmonique, pour doper la puissance des guides d'onde d'un facteur dix.

EXPERTS: Massachusetts Institute of Technology

MRAM



MATÉRIAU:
ferrite de bismuth (oxyde métallique)

INTÉRÊT: contrairement aux autres composants de mémoire, la mémoire Mram combine plusieurs avantages: non-volatilité des données et rapidité de transmission.

EXPERTS: CNRS-Thales

plusieurs atouts, dont le débit, la capacité et la non-volatilité des données. Un produit MRAM d'Everspin a par exemple été intégré à l'Airbus A350-XWB, pour stocker les informations de l'ordinateur de vol.

Des sandwichs de métaux pour de hautes performances

Riber est l'un des deux seuls industriels qui fabriquent les machines capables de réaliser les alliages pour ce type de composants. Ce sont essentiellement des semi-conducteurs en matériaux III-V (comme le nitrure de gallium ou l'antimoniure de gallium, qui intègrent un ou plusieurs éléments de la colonne III du tableau périodique des éléments – bore, aluminium, gallium... – et un ou plusieurs éléments de la colonne V – azote, phosphore, arsenic, antimoine...) ou II-VI. Ces semi-conducteurs composés d'un alliage de plusieurs matériaux n'ont pas vocation à

remplacer directement le silicium, mais sont intégrés dans des produits où le silicium seul ne répond pas aux contraintes de fabrication ou aux exigences de performances. Cela concerne par exemple l'éclairage avec les leds, les diodes laser, les cellules photovoltaïques à concentration, les puces à radiofréquence ainsi que les nouvelles générations de microprocesseurs.

Autre piste de recherche suivie parmi les métaux: celle des oxydes avec une structure dite pérovskite. Cet arrangement atomique particulier donne la possibilité de combiner des ions de métaux avec des ions d'oxygène, pour leur conférer des propriétés très variées. Surtout, il est possible d'empiler plusieurs pérovskites les unes sur les autres, comme un sandwich. « Cela permet de générer des propriétés électroniques inédites, par exemple une interface supraconductrice entre deux couches de matériaux isolants », détaille Manuel Bibes, chercheur sur le sujet

dans l'unité mixte de recherche CNRS/Thales à Palaiseau. Dans l'informatique, ses travaux ainsi que ceux des autres équipes pourraient conduire à la conception de transistors moins gourmands en énergie ou encore de mémoires magnétiques avec une haute densité de stockage. Pour s'imposer, tous ces challengers du silicium doivent faire la preuve que leur fabrication est bel et bien industrialisable et que la technologie de production est compatible avec la lithographie. Pour relever le défi, plusieurs procédés sont dans la course tant pour le graphène que pour les alliages métalliques. Tous, à condition de maîtriser correctement les paramètres de la réaction, aboutissent à des revêtements d'une qualité compatible avec la microélectronique. Mais aucun n'atteint encore le rendement phénoménal des fonderies, capables de sortir plusieurs millions de *wafers* par mois. En effet, les vitesses de dépôt des techniques les plus productives, épitaxie par jet moléculaire (MBE) ou dépôt chimique en phase vapeur (CVD), n'excèdent pas quelques microns par heure.

Toujours plus loin que la loi de Moore

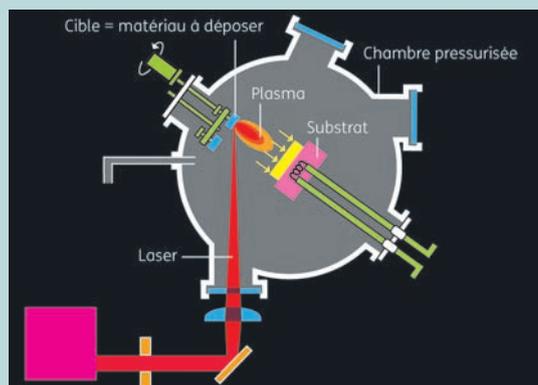
C'est peut-être en empruntant le meilleur des deux mondes, lithographie d'un côté, fabrication de couches minces de l'autre, que l'électronique organique et l'oxytronique (composants à base d'oxydes métalliques) arriveront véritablement à percer. L'an dernier, des chercheurs américains apportaient ainsi la preuve de concept d'une méthode de fabrication en deux étapes des transistors en graphène de haute fréquence (427 gigahertz) : dans un premier temps, la réalisation d'un masque sur silicium par photolithographie, afin de positionner le drain et la source des futurs transistors par transfert sur du graphène produit par CVD.

La même démarche est en cours avec les alliages métalliques. En 2012, Riber a ainsi fourni un système MBE à l'Institut de microélectronique et composants de Louvain, en Belgique, pionnier dans l'approche *more than Moore* (littéralement : plus que la loi de Moore), afin d'intégrer la technique de dépôt moléculaire dans sa chaîne de production silicium. «Le but est d'assurer la bonne interface entre les matériaux III-V et le silicium, grâce à une couche d'oxyde déposée à l'interface », détaille Frédéric Goutard, PDG de Riber.

Prometteurs, ces dispositifs pourraient révolutionner l'électronique. À quelle échéance? Pour les transistors moins énergivores à oxydes métalliques de structure pérovskite, Manuel Bibes parie sur de premiers débouchés commerciaux d'ici dix ans au mieux. Dix ans : c'est aussi le temps qu'il faudra sans doute attendre avant que le premier carbone ne gagne significativement du terrain au sein des microprocesseurs. D'ici là, « dans l'éclairage, on pourrait utiliser du graphène polycristallin comme dissipateur thermique dans les leds à base de nitrure de gallium ou d'oxyde de zinc », estime Simon Deleonibus. Henri Happy, chercheur à l'IEMN, une des équipes impliquées dans le FET Flagship, complète: le film de carbone sera vraisemblablement réservé dans un premier temps aux

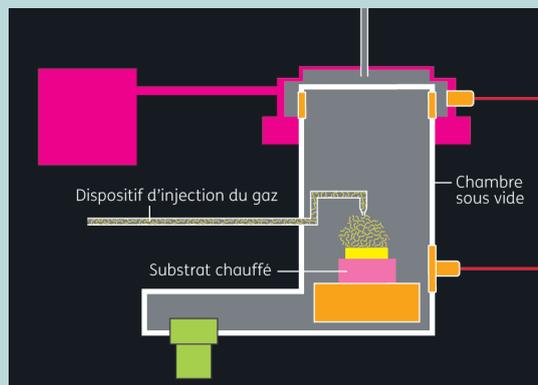
applications analogiques : capteurs chimiques, instrumentation, dispositifs radiofréquences... Une chose est sûre : la prochaine génération de composants électroniques devra compter avec l'élargissement de la palette de matériaux. ■

Les procédés de l'oxytronique et de l'électronique organique



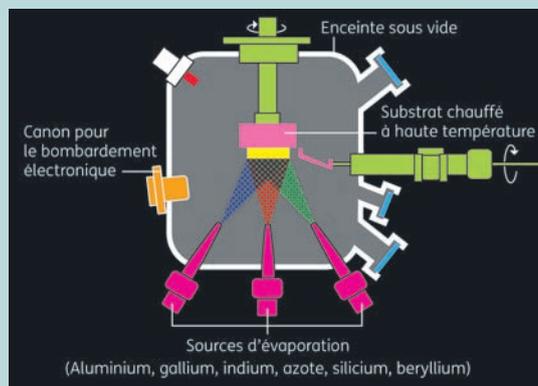
Ablation laser pulsée (PLD)

Dans une chambre pressurisée, le matériau que l'on souhaite déposer est soumis à un laser de forte puissance qui le transforme en plasma. Celui-ci se dépose en monocouche sur le substrat en vis-à-vis.



Dépôt chimique en phase vapeur (CVD)

Dans une chambre sous vide, un gaz contenant la molécule à déposer est injecté à la surface d'un substrat. Ce dernier joue aussi le rôle de catalyseur pour casser les liaisons atomiques et éliminer les éléments indésirables.



Épitaxie par jet moléculaire (MBE)

Les molécules sont transformées en flux par évaporation et envoyées vers un substrat également chauffé à haute température. La réaction a lieu sous vide.

© ELORENT ROBERT