

Les polymères se réveillent pour l'électronique !

D'après la conférence de Ian Cayrefourcq

Ian Cayrefourcq est directeur des technologies émergentes du groupe Arkema¹.

1 Les polymères dans la microélectronique

1.1. Un usage quotidien

Dans la microélectronique, les polymères sont quasiment partout. Ils peuvent être visibles sur le packaging, le boîtier d'un téléphone ou d'une tablette, mais peuvent aussi être beaucoup moins visibles, par exemple de nouveau sur le packaging, pour lequel on utilise énormément d'adhésifs d'enrobage pour protéger les surfaces ou pour les isoler du monde extérieur, et donc pour constituer des barrières à l'eau ou à l'humidité afin d'assurer une durée de vie suffisante aux composants qu'ils contiennent (**Figure 1**).

La chimie est aussi indispensable dans la fabrication des circuits intégrés. Elle intervient dans la *lithographie*, technologie permettant la définition des diverses parties

des transistors², qui constituent les circuits électroniques. Les progrès conjugués de l'optique et de la chimie (des résines photosensibles) ont permis à l'industrie des semi-conducteurs de réduire les dimensions critiques de ces composants permettant l'augmentation de leurs performances (augmentation des vitesses de commutation, diminution de la consommation électrique), tout en diminuant le coût unitaire des circuits.

L'augmentation de la vitesse de commutation des transistors, si elle permet d'améliorer la puissance de nos ordinateurs en augmentant le nombre de calculs par seconde, induit de nouvelles

2. Pour entrer dans le détail du fonctionnement des transistors, voir le **Chapitre de Y. Le Tiec** de l'ouvrage *Chimie et technologies de l'information*, EDP Sciences, 2014 et : Sze M. (1969). *Physics of Semiconductor Devices*, Wiley-Interscience.

1. www.arkema.fr

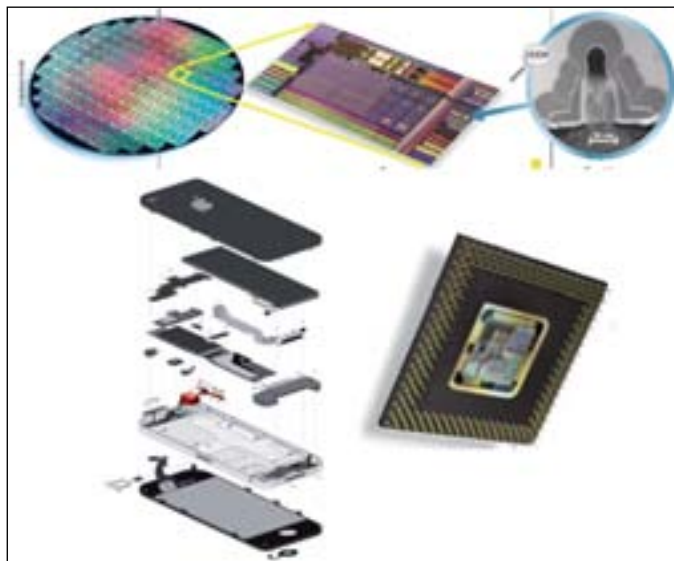


Figure 1

Les polymères sont présents dans de nombreux composants électroniques : dans les enrobages (époxy, polyuréthane, silicones), adhésifs (époxy, cyanoacrylates), les underfills (résines anhydres chargées de silice), substrats et diélectriques (polyester, époxy, polyimide, benzocyclobutène, bismaléimide triazine, fluorocarbène), les filtres pour cartes imprimées (aramide, verre), les photomasques (polymères photosensibles) et les protections (époxy, polyuréthane, élastomère silicone, pérylène).

difficultés techniques. La fréquence des commutations des processeurs actuels se situe dans le régime du gigahertz (soit le milliard de commutations par seconde). À ces fréquences, des phénomènes de couplage entre les lignes connectant les divers transistors des circuits apparaissent et peuvent entraîner des pertes d'informations et des dysfonctionnements des circuits. Ici encore, la science des matériaux a permis de contourner ce problème en réduisant la constante diélectrique des matériaux dans lesquels les lignes de connections sont noyées afin de mieux les isoler.

1.2. Retour historique

C'est le physicien William Bradford Shockley (1910-1989) (Figure 2A), juste après la Seconde Guerre mondiale, qui a démontré le phénomène transistor sur un dispositif de

quelques mm² (Figure 2B). Le premier circuit utilisant un transistor a été fabriqué par Kilby chez Texas Instrument au début des années 1960 (Figure 2C) ; il ne comportait à côté du transistor qu'une capacité et une résistance – on peut tout juste parler d'électronique à ce stade là.

Les premiers vrais circuits électroniques et les premiers microprocesseurs sont apparus au début des années 1970. La Figure 3 donne l'exemple d'un des premiers microprocesseurs (de Texas Instruments) ; il comportait 2 000 transistors. Le pentium4 (fin des années 1990-début des années 2000) en comporte cinquante millions. Le microprocesseur i7 d'Intel, actuellement le plus performant pour les équipements grand public, comporte un milliard et demi de transistors ! On utilise aujourd'hui des microprocesseurs qui comportent jusqu'à deux milliards de transistors : on est ainsi passé de 2 000 à 2 milliards en quelques décennies (Figure 3). En une trentaine d'années, on a su réduire la taille du transistor, l'élément de base de l'électronique, de quelques microns – la taille d'un globule rouge – à des dimensions critiques de quelques dizaines de nanomètres – la taille d'un virus.

Les puissances des microprocesseurs aujourd'hui n'ont ainsi rien à voir avec ce qui se faisait dans le passé. C'est ce qui permet d'avoir des ordinateurs, tablettes ou téléphones assez puissants pour naviguer sur Internet par exemple. Mais la diffusion de

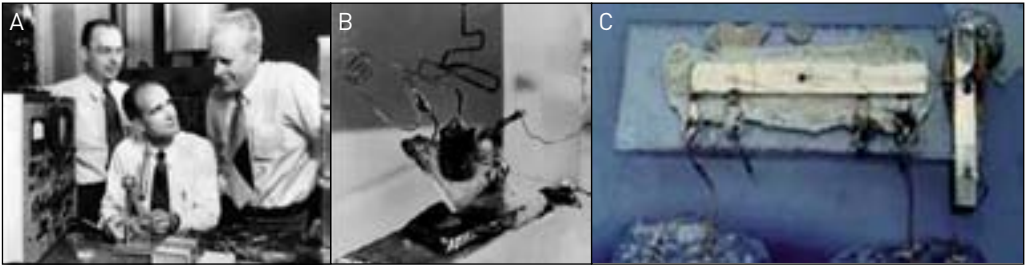
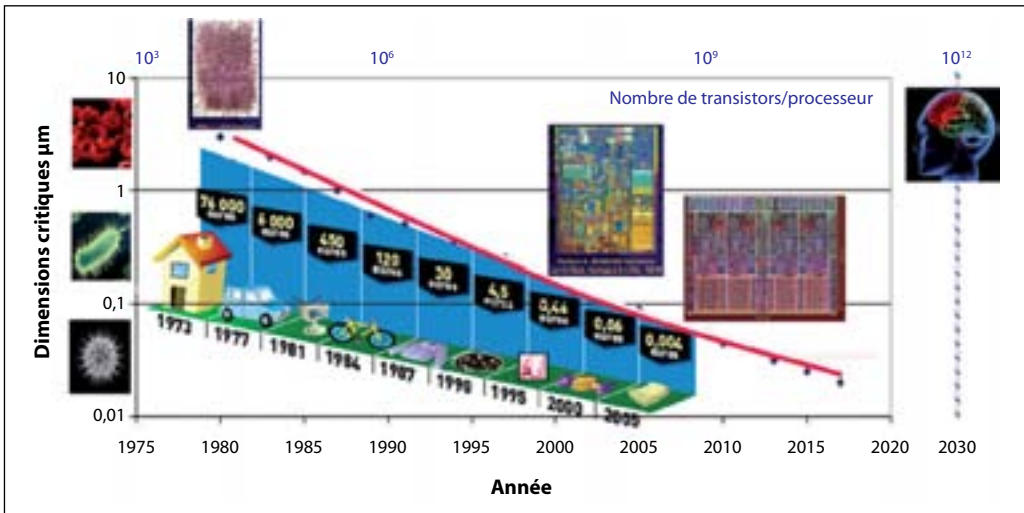


Figure 2

William Bradford Shockley (A) et le premier transistor 5 mm (Bell labs, 1947) (B) ; premier circuit (Kilby, TI, 1958) (C).



ces équipements n'a été possible que grâce à la réduction en échelle, qui a permis de réduire les coûts de fabrication de façon presque proportionnelle. Fabriquer un million de transistors dans les années 1970 coûtait environ 70 000 euros, le prix d'une maison ; aujourd'hui, on est à moins d'un centime d'euros. La clé, derrière ces progrès considérables qui ont permis l'essor des technologies de l'information, c'est la lithographie.

2 Les progrès de la lithographie

En ce qui concerne les structures composant les circuits imprimés, sur les plaques de silicium (appelées « wafer », **Figure 4**), passer d'une taille micrométrique à nanométrique paraissait tout à fait impossible, et pourtant cela a été réalisé en quarante ans, grâce aux progrès qualitatifs dans la technique de gravure utilisée, qui est la lithographie.

Figure 3

Évolution du nombre de transistors par microprocesseurs selon la loi de Moore.

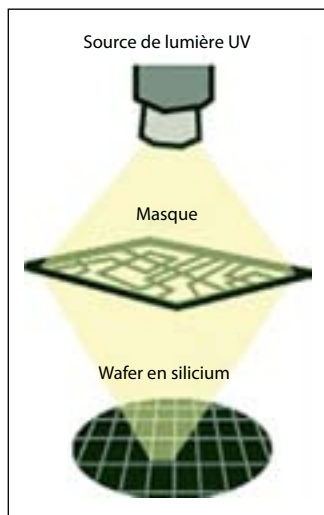


Figure 4

La lithographie pour imprimer des circuits sur une plaque de silicium (wafer) à l'aide d'une source de lumière et d'un masque.

À la base, la lithographie est issue de la photographie, et donc soumise à la loi toute simple selon laquelle la résolution que l'on peut obtenir est de l'ordre de grandeur de la longueur d'onde de la lumière utilisée³. Pour atteindre des dimensions nanométriques, il faudrait donc de la lumière à l'UV dur ou même à des rayons X.

Dans la course aux courtes longueurs d'ondes, on a commencé à employer du bleu-vert (436 nanomètres), puis on est descendu dans l'UV proche du bleu profond (365 nm puis 248 nm). Aujourd'hui on est à 193 nm, ce qui théoriquement permet de dessiner des structures de 148 nm au maximum. Dans les faits, aujourd'hui, on est bien en dessous, grâce à plusieurs ajustements de la technique : on a joué sur l'ouverture numérique et on a pu l'augmenter ; puis on a fait de la lithographie par immersion pour jouer sur la réfraction. La limite réelle devrait être aux alentours de 90 nm.

On arrive à diminuer encore les dimensions en jouant sur des corrections de proximité par lesquelles on corrige les déformations dues au fait que l'on pousse les performances aux limites physiques. De nouveaux perfectionnements ont pu être apportés à ces procédés, comme l'utilisation d'une technique de « multi-patterning » (Figure 5) qui permet de multiplier la résolution par

deux ou trois. Cette technique apparaît cependant comme trop coûteuse.

L'objectif fixé à l'industrie est d'atteindre l'échelle de 10 nm qui est techniquement problématique, même si aujourd'hui on maîtrise l'échelle des 30 nm. Une technique qui fait l'objet de nombreuses recherches est l'utilisation de l'ultraviolet très profond. Des efforts pour réaliser une source de lumière à 13,6 nm sont prometteurs mais buttent sur la nécessité d'obtenir une puissance suffisante à un coût acceptable. Avec le savoir-faire actuel, une machine utilisant cette technique au rythme d'une centaine de wafers par heure coûterait entre cent et cent cinquante millions de dollars. Une usine complète atteindrait le coût prohibitif de cinq à six milliards de dollars !

2.1. Une résine aux propriétés modulables

C'est la chimie qui permet d'atteindre l'objectif en proposant un changement complet de la technique de la lithographie. Au lieu d'avoir une résine passive qui réagit en fonction des zones que l'on illumine puis que l'on développe comme une photo, la « Directed Self Assembly » définit le motif grâce à l'auto-assemblage de copolymères⁴ blocs (« copo-blocs ») le long de guides de résolutions inférieures préalablement définis par une lithographie classique. Dans cette technique,

3. Pour un instrument optique d'ouverture circulaire de diamètre D , la résolution en radian est donnée par la formule $1,22 \cdot \lambda / D$, où λ est la longueur d'onde.

4. Un copolymère est un polymère issu de la polymérisation d'au moins deux types de monomères.

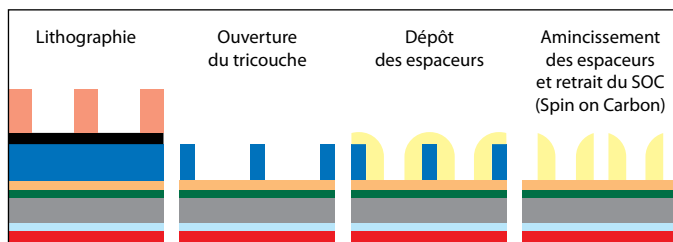


Figure 5

Multiplication de la résolution à partir d'une lithographie donnée.

on agit sur le design du polymère ; on définit au stade de sa fabrication une structure périodique (lamellaire ou cylindrique) définie par sa composition dont la période et les dimensions critiques sont définies par les masses moléculaires des blocs en présence.

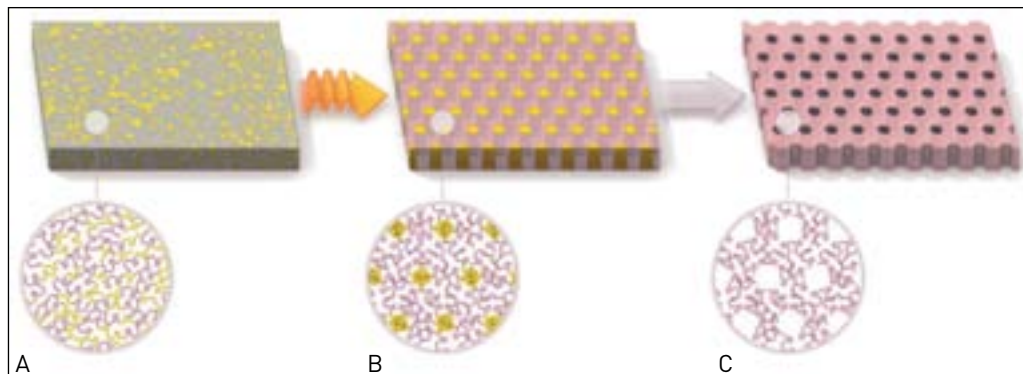
La technique utilise les propriétés des copolymères blocs (voir l'**Encart : « L'étrange comportement des copolymères blocs : l'auto-organisation »**) mettant en jeu les caractéristiques d'immiscibilité des constituants moléculaires. On étale une solution bien choisie de ces copolymères, la résine, sur les surfaces de wafers afin d'obtenir une couche uniforme de l'ordre de 20 à 50 nm. On apporte ensuite un peu d'énergie au système (on chauffe la couche entre

150 et 250 °C en fonction du matériau) afin que le polymère s'organise, et afin de diminuer l'énergie libre du système. Ces copolymères seront donc, selon les conditions, adaptés à la formation de petits trous arrangés périodiquement si leurs structures internes présentaient des cylindres, ou de petites lignes périodiques dans le cas où elles seraient en forme de lamelles. Ce sont les deux structures principales rencontrées lors de la fabrication des microprocesseurs.

Une maîtrise précise de la physico-chimie des copolymères, telle que la société Arkema l'a acquise, est nécessaire à la maîtrise de ces procédés (Figure 6). Une étape chimique ultérieure élimine l'un des deux blocs, selon l'objectif, conduisant à

Figure 6

Du copolymère à une structure à trous. A) Un mélange de copolymères blocs à deux composants est étalé dans un moule ; B) un chauffage conduit le polymère à s'orienter de manière à ce qu'un composant soit tourné vers l'intérieur ; C) ce composant peut être enlevé par décapage, laissant une matrice de trous nanométriques.



L'ÉTRANGE COMPORTEMENT DES COPOLYMÈRES BLOCS : L'AUTO-ORGANISATION

Les mélanges de composés moléculaires liquides non-miscibles sont intrigants, et comme tels, ils intéressent les scientifiques, physico-chimistes ou physiciens.

Le prototype en est le mélange d'eau et d'huile. Les molécules d'eau, très polaires (où les électrons des atomes d'hydrogène sont entraînés vers les atomes d'oxygène, très avides d'électrons, qui deviennent électriquement négatifs, ce qui rend les atomes d'hydrogène électriquement positifs), n'ont que peu d'affinité pour les molécules d'huile (hydrocarbures d'hydrogène), où les atomes restent électriquement neutres, alors qu'elles se fixent volontiers avec leurs congénères molécules d'eau. Le résultat est d'expérience courante : le mélange donne naissance à des gouttes d'huile dans l'eau ou, selon la quantité des composants, d'eau dans l'huile. La structure du mélange sépare les deux composants à l'échelle microscopique en minimisant leurs surfaces de contact.

Cette situation prototype se rencontre dans de nombreux cas, mais elle est particulièrement intéressante quand elle s'applique aux polymères. Ces derniers, on le sait, sont généralement de longues chaînes linéaires de molécules, identiques ou différentes, attachées les une aux autres en colliers de perles. Si l'on a affaire à un couple de molécules non miscibles (comme le sont l'eau et l'huile du cas prototype), et si l'on forme un polymère en liant une chaîne de A à une chaîne de B, puis de nouveau à une chaîne de A puis à une chaîne de B, et ainsi de suite de nombreuses fois, on obtient ce qu'on appelle un copolymère bloc : on le schématise par A-B-A-B-A-B-...

Mais la longue chaîne formée placée dans un solvant a tendance à se replier, comme le font tous les polymères dans un solvant. Compte tenu de leurs affinités réciproques, les molécules A d'une même chaîne vont se regrouper autant que faire se peut, ainsi que les molécules B. Le résultat en est une structuration du polymère en figures géométriques qui minimisent leurs surfaces d'interactions. Cela conduit à la formation d'empilement lamellaires par exemple pour des concentrations 50 %/50 % (**Figure 7A**), ou cylindriques pour des concentrations 70 %/30 % (**Figure 7B**), ou d'autres figures, selon les rapports des concentrations. On parle alors d'auto-organisation.

Après évaporation du solvant, ces structures périodiques (si les successions de A et de B sont régulières) se maintiennent et donnent naissance à des phases condensées à structures régulières. La surface des couches correspondantes fait apparaître soit des lignes (lamelles vues de côté) soit des trous (cylindres vus de dessus).

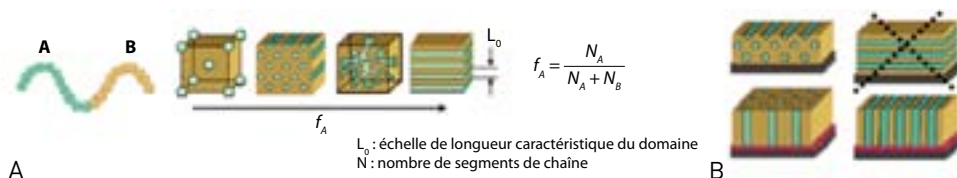


Figure 7

A) Évolution de la structure en fonction de la composition du copolymère ; B) différents types de structures, lamellaires ou cylindriques. La structuration de la résine ne se fait plus via son illumination à travers un masque mais est définie par les caractéristiques intrinsèques du matériau : période, dimensions, structure, orientation, masse molaire, composition, énergie de surface.

la formation d'un masque utilisé dans les étapes suivantes du procédé de fabrication des transistors. Les masques polymères sont ensuite transférés sur support silicium.

Les dimensions obtenues par ce type de technique sont définies lors de la synthèse des copolymères, en choisissant la longueur des blocs qui détermine les périodes de l'organisation des chaînes polymères. La **Figure 8A** donne des exemples avec des cylindres de 20 à 50 nm, et des lignes de 19 à 30 nm ; des démonstrations ont pu être faites jusqu'à 10 nm de période, ce qui nous assure qu'on saura remplir les objectifs encore pour les vingt

prochaines années de développement de l'électronique...

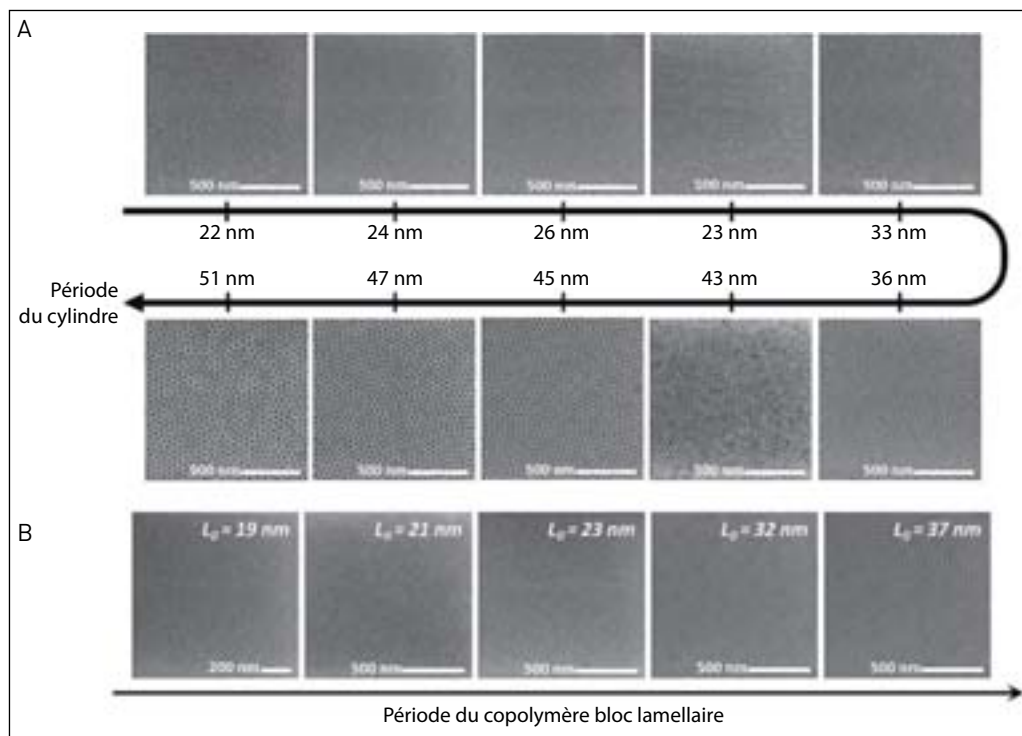
La **Figure 8A** montre qu'un degré de désordre persiste : on a une périodicité sur de petits secteurs, puis on a des défauts sur certaines zones qui ressemblent à des empreintes digitales.

La **Figure 8B** est une photo agrandie d'une des structures cylindriques à dimension critique d'environ 20 nm, dont on peut apprécier la régularité des figures obtenues par l'utilisation des propriétés des copolymères blocs (les « polymères intelligents »), ainsi que par la technique de leur transfert sur support silicium.

Figure 8

A) Évolution de la disposition des cylindres (les deux premières rangées) et des lignes (rangée du bas). B) Photo agrandie d'une structure cylindrique transférée sur plaque silicium.

Source : CEA-LETI.



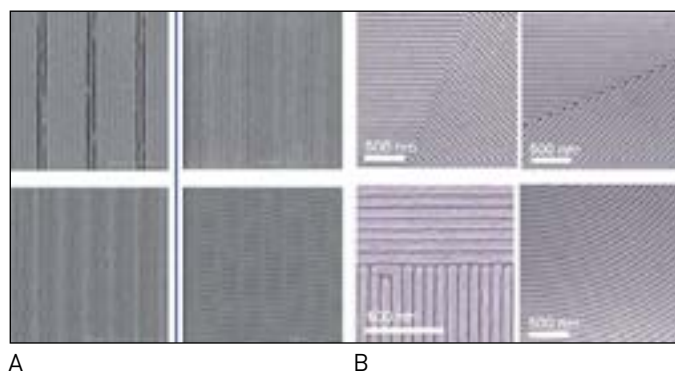


Figure 9

A) Exemples de structures nanométriques réalisées par utilisation des copolymères blocs : au laboratoire CEA-LETI (A) et au laboratoire américain de P. Nealey (B).

2.2. Application de la résine en microélectronique

Ces figures nanométriques que permet la chimie des polymères sont mises à profit pour la fabrication des circuits microélectroniques dans le cadre d'un procédé en deux étapes. On commence par une lithographie classique avec une résolution de 100 à 180 nm. Les dessins qui résultent de cette lithographie, inscrits sur le wafer, servent de guides et sont ensuite remplis par la résine copolymère, qui permet ainsi d'augmenter la résolution des structures définies sur les wafers.

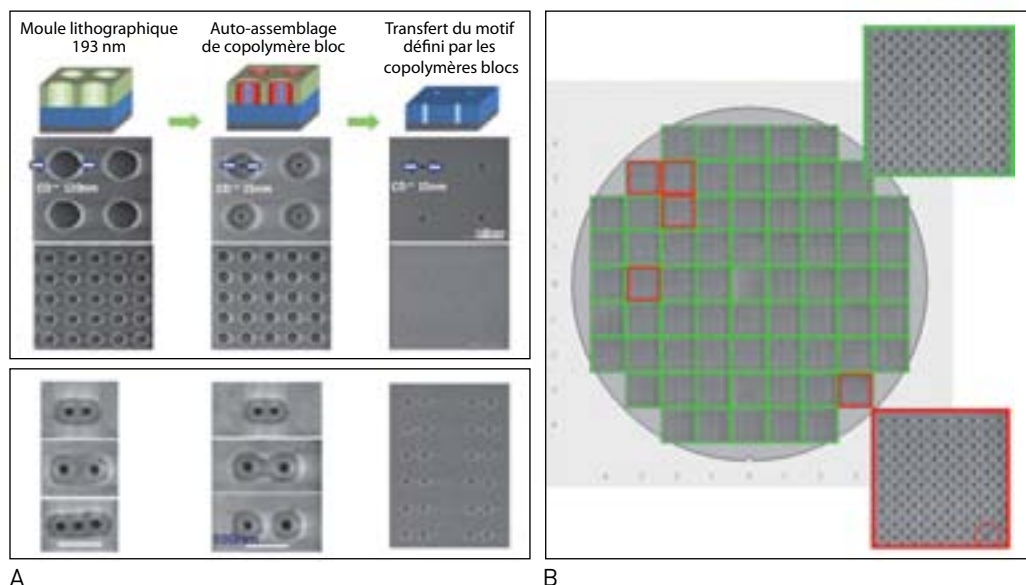
La **Figure 9A** montre des exemples qui concernent la structure en lignes. Ils sont issus d'une collaboration entre l'entreprise Arkema et le CEA-LETI⁵. Cela donne une occasion de souligner qu'il est absolument critique que les chimistes (Arkema en l'occurrence) s'allient avec les électroniciens (le LETI en l'occurrence) afin de bien définir les spécifications et d'optimiser le couple matériaux/procédé.

5. LETI : Laboratoire d'électronique et de technologie de l'information (www-leti.cea.fr).

Autre exemples : P. Nealey aux États-Unis a pu construire des lignes segmentées, des coudes, localement créer une forme de T, des arcs de cercles des figures circulaires (**Figure 9B**). Les designers de microélectronique peuvent ainsi libérer leur imagination pour concevoir de nouveaux circuits en sachant qu'on saura les fabriquer !

Les mêmes techniques ont été appliquées avec succès à un autre problème, celui de la réduction de la taille des contacts (au CEA-LETI). Puisque la taille des transistors diminue, il faut bien que les contacts qui les relient aux lignes conductrices en cuivre diminuent également. Dans la **Figure 10**, une lithographie a d'abord permis de réaliser des cercles d'environ 120 nm de diamètre ; on a ensuite rempli les cercles du copolymère bloc pour arriver à un diamètre critique de 15 nm (**Figure 10A**). En répétant le processus plusieurs fois, on augmente la densité des nano-contacts.

On peut aller plus loin en jouant sur la forme des guides et réussir à multiplier encore les contacts. Dans une structure d'environ 120 nm, on peut placer deux puis trois contacts au lieu d'un seul ; en jouant sur les formes on peut les éloigner les uns des autres si on le souhaite (**Figure 10A**). La **Figure 10B** montre la maturité à laquelle les techniques de fabrication sont parvenues : on effectue la manipulation sur l'ensemble de la surface d'un wafer de 300 mm, on forme ainsi des milliards de trous que l'on caractérise ensuite pour évaluer le nombre de défauts



rencontrés, la variation des dimensions, de leur positionnement, etc. Sur quelques 25 000 trous, l'observation a montré que seuls cinq des trous attendus manquaient. Pourtant, ce rendement de 99,9 % n'est pas suffisant pour l'industrie : il faut en rajouter encore quelques neuf ! Une fois de plus, ce n'est qu'à travers une étroite collaboration entre chimistes, instituts tels que le CEA-LETI, industriels tels que STMicroelectronics, que la microélectronique parvient à un tel contrôle de sa technologie.

3 Une nouvelle génération d'équipements : l'électronique sur support flexible

3.1. Les technologies existantes

On vient de voir quels progrès spectaculaires sont apportés

par les travaux des chimistes qui ont su maîtriser les copolymères blocs. Mais la chimie apporte encore bien d'autres bouleversements. En particulier la maîtrise de la chimie organique et le développement de matériaux conducteurs et semi-conducteurs organiques ouvrent la voie à une nouvelle électronique : l'électronique imprimée. Le caractère organique de ces matériaux permet de les formuler sous forme d'encres et d'envisager ainsi des techniques de fabrication de composants plus proches de l'impression papier que de l'industrie du semi-conducteur classique.

Ce changement constitue une véritable rupture technologique et ouvre de nouveaux champs tant il permet d'envisager la réalisation de systèmes sur de très larges surfaces, des substrats souples à de très bas coûts.

Ces technologies commencent à apparaître, et des

Figure 10

A) Évolution des diamètres critiques en fonction de la diminution de la taille des contacts ; B) wafer de 300 millimètres, rendement 99,95 %.

premiers produits entrent sur le marché. Les années à venir verront l'apparition de nombreuses nouvelles applications (luminaire OLED, panneaux photovoltaïques transparents, détecteurs de présence...). Certains de ces nouveaux dispositifs sont déjà en phase de mise sur le marché, d'autres sont encore dans les laboratoires.

L'un des plus connus de ces dispositifs est l'écran OLED (« *organic light emitting diode* », voir le **Chapitre de J.-C. Flores** de *Chimie et technologies de l'information*, EDP Sciences, 2014), produit que l'on trouve maintenant régulièrement sur nos téléphones portables et qui entre de plus en plus dans nos salons. Outre une qualité d'image supérieure aux écrans LCD, cette technologie permet aux designers d'inventer de nouvelles formes d'écrans, très fins, courbés... augmentant encore l'expérience ressentie par l'utilisateur. La **Figure 11** montre divers types d'application OLED allant de l'illumination aux écrans de toutes formes et tailles démontrant ainsi la maturité industrielle de la technologie OLED.

On entend par ailleurs beaucoup parler du photovoltaïque organique (OPV), technologie déjà pratiquement mûre mais

pas encore disponible sur le marché. Pour les utilisations classiques du photovoltaïque, il sera probablement difficile de concurrencer le silicium ; par contre, sur des applications flexibles transparentes, portables, il y a de gros avantages au photovoltaïque organique. Avec une société qui va de plus en plus vers le nomade, il est clair qu'il y aura un marché pour ce genre de technologie.

Le « lighting », une technique d'éclairage high-tech faite à partir d'une technologie de chimie organique pour améliorer les actuelles diodes électroluminescentes, est également proche de la mise sur le marché.

On ne se penchera pas ici sur ces applications mais sur une autre qui est de répondre au besoin largement exprimé dans la société de se construire un « environnement intelligent ».

3.2. Vers des capteurs avancés

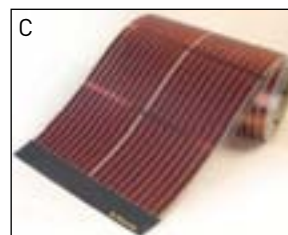
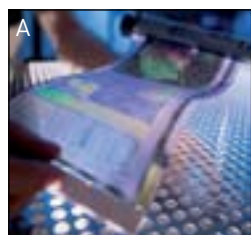
3.2.1. Vers de nouvelles demandes pour la microélectronique

Une demande encore peu exprimée mais en croissance chez les consommateurs est de vivre dans un

Figure 11

OLED, OPV... les technologies de l'électronique grande surface.

Source : A) Wikipédia Licence CC-BY-2.0, RDECOM ; B) Wikipédia Licence CC-BY-2.0.



LES MATÉRIAUX PIÉZOÉLECTRIQUES

Un matériau piézoélectrique est avant tout un matériau ferroélectrique, c'est-à-dire composé de domaines affectés de moments dipolaires (dipôles), qui créent intrinsèquement un petit champ électrostatique*.

À priori, tous les dipôles sont dans des orientations aléatoires, et le matériau en entier n'est producteur d'aucun champ. Quand on lui applique une tension électrique, on oriente tous les dipôles qui prennent alors une résultante non-nulle, et le matériau crée un champ électrique. Les matériaux ferroélectriques ont la propriété suivante : lorsqu'on enlève la tension électrique appliquée, les domaines restent orientés ; il reste donc un champ permanent (**Figure 11**).

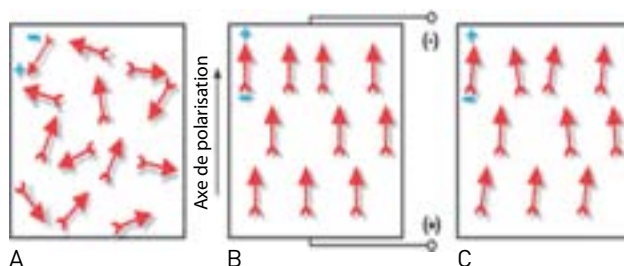


Figure 11

Champs électriques au sein d'un matériau ferroélectrique. A) Orientation aléatoire de domaines polaires avant polarisation ; B) polarisation en champ électrique de courant continu ; C) polarisation rémanente après suppression du champ électrique.

Cette propriété est à l'origine du phénomène d'hystérésis (**Figure 12**) : on part d'un matériau désorienté, on applique une tension qui l'oriente, on enlève la tension, un champ rémanent demeure. Pour le supprimer, il faut appliquer une tension dans le sens inverse pour faire tourner les domaines. Un ferroélectrique constitue ainsi un système bistable et peut être utilisé pour faire des mémoires : on met une tension dans un sens, c'est un 1, dans l'autre sens, un 0. Le piézoélectrique possède cette même propriété, mais en plus, sa maille cristalline se déforme par application du champ électrique. On peut ainsi le faire vibrer en lui appliquant une tension électrique alternative. Symétriquement, il réagit à une contrainte mécanique en créant un champ électrique. La première propriété est par exemple utilisée pour faire un haut-parleur (qui transforme le courant électrique de la radio en son en faisant vibrer une membrane). La seconde est utilisée pour faire un microphone (qui transforme la vibration de la membrane actionnée par la voix en courant électrique pour aller actionner un haut-parleur).

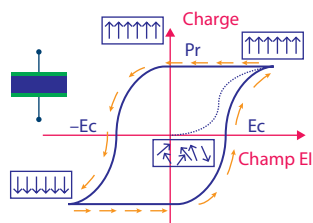


Figure 12

Graphe de principe de fonctionnement d'un hystérésis.

*Un dipôle possède un pôle positif et un pôle négatif. Au sein d'un dipôle il existe donc une différence de potentiel V . Ainsi, avec $E = -\text{grad}(V)$, le dipôle possède un champ électrique intrinsèque E .

environnement rassurant, qu'on peut appeler « un environnement intelligent » ; on veut être capable de connaître la qualité de l'air, la température du lieu où l'on vit, le nombre de personnes qui passe à tel endroit etc., en bref on a besoin de capteurs partout.

Bien évidemment, ces besoins ne pourront être satisfaits par des dispositifs électroniques que si ceux-ci peuvent être produits à très bas coût. La solution envisagée pour y parvenir est de faire appel à l'électronique imprimée – substituant une technologie de production de masse à bas coût à la technologie coûteuse de la lithographie. Les techniques de l'imprimerie de livres ou journaux, tellement répandues depuis si longtemps et tellement bon marché, peuvent en effet être adaptées au problème posé. L'électronique organique, en permettant la fabrication d'encres actives, permet donc de faire rentrer l'électronique dans le monde de l'imprimerie.

La fabrication des ces capteurs de pression repose sur

l'utilisation de matériaux piézoélectriques qui ont la propriété de se déformer sous l'application d'un champ électrique (voir l'*Encart « Les matériaux piézoélectriques »*), et inversement de produire un champ électrique lorsqu'on les déforme.

La *Figure 13* schématise le parti que l'on peut tirer de ces propriétés. On peut les utiliser comme « capteurs » (quand on les touche, ils envoient un signal électrique. Ils peuvent par exemple détecter la présence ou le passage d'un individu), ou comme « actuateurs » – quand on leur applique une tension électrique, ils répondent par un signal mécanique (une légère déformation).

3.2.2. Les polymères fluorés

Pour combiner la piézoélectricité d'un matériau et sa facilité de mise en forme, les laboratoires se sont tournés vers les matériaux polymères. Le matériau de référence considéré est le PVDF (polydifluorovinylidène).

Le monomère de départ, le difluorovinylidène (VF₂), est

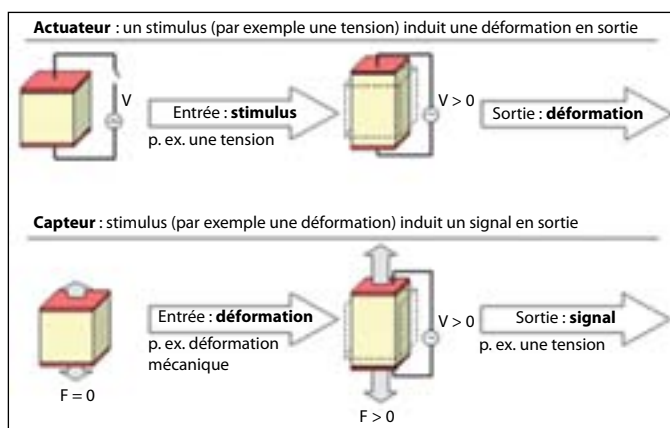


Figure 13

Schéma de principe matériaux piézoélectriques.

constitué de deux atomes de carbone, dont l'un porte deux atomes d'hydrogène (électropositifs) et l'autre deux atomes de fluor (électronégatifs). Il porte donc un dipôle électrique. Quand on le polymérise, on dispose ces monomères (qui sont des dipôles) en chaîne les uns derrière les autres, les dipôles des monomères étant quasi parallèles les uns aux autres et conférant un dipôle résultant à la chaîne entière. En phase condensée, on peut avoir plusieurs situations : les dipôles des différentes chaînes sont orientés aléatoirement les uns par rapport aux autres et le composé final ne présente pas de dipôle résultant ; ou bien les chaînes ont leurs moments dipolaires orientés parallèlement les uns aux autres – c'est la phase β (la **Figure 14** résume cette situation). Dans cette phase, on peut envisager d'agir sur les moments dipolaires en appliquant un champ électrique et

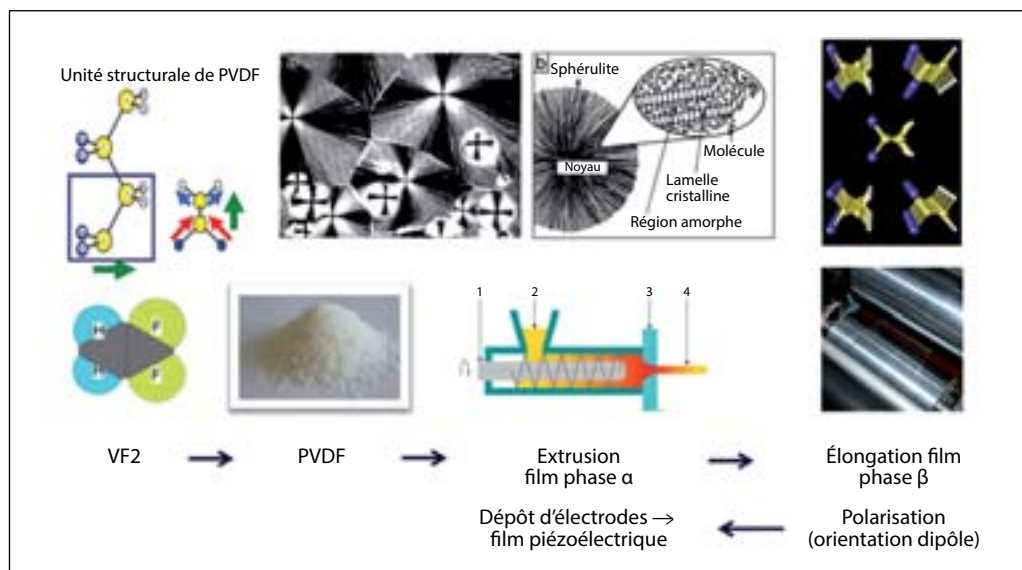
de modifier ainsi l'orientation des chaînes. Cette phase β présente ainsi des propriétés piézoélectriques.

L'utilisation de cette propriété toutefois nécessite que la phase β soit mise sous forme de film, ce qui est une opération compliquée. On peut contourner cette difficulté en utilisant des PVDF dont le taux de cristallinité ne dépasse pas 50 %, mais une solution plus efficace est le recours à la copolymérisation. En polymérisant les monomères de VF2 avec un autre monomère, on peut réaliser un copolymère capable de cristalliser directement en phase β permettant la réalisation d'une encre et de procéder à l'impression de dispositifs piézoélectriques – détecteurs ou actionneurs.

Dans des développements récents, Arkema a mis au point un « ter-polymère » (on rajoute donc un troisième monomère) qui permet de vraiment faire l'ingénierie

Figure 14

Principe de fonctionnement du procédé utilisant le PVDF.



de la structure cristalline et d'optimiser les performances notamment pour les utilisations en actuateur. On a pu augmenter le module d'Young⁶ du matériau tout en gardant une déformation importante (7 à 10 %), ce qui permet d'obtenir des actuateurs très performants ». La plupart des polymères sont trop mous, si bien que leur déplacement au toucher ne transmet pas de sensation ou ne permet pas de déplacer ou appréhender un objet ; à l'inverse, les céramiques sont très dures, se déforment trop peu (moins de 0,1 %) et vibrent trop rapidement pour faire de bons actuateurs. Avec les ter-polymères, on a le bon équilibre (des modules d'Young de 1 à 1,5 Gigapascal et des déformations qui vont jusqu'à 10 %).

3.3. Les applications

À quoi ces nouveaux dispositifs peuvent-ils servir ? La parole est à l'imagination.

Pour les applications de la fonction « capteur », beaucoup de propositions concernent le domaine du soin hospitalier :

- certains les utilisent pour faire des microphones par contact qui pourraient ainsi détecter des apnées, un trouble dangereux fréquent chez les enfants ou les personnes âgées ;
- on peut aussi en faire des capteurs de mouvements pour

la surveillance des enfants du premier âge ;

- une autre application serait de faire, grâce à ces dispositifs, des « lits intelligents » qui détectent l'état, la température où les mouvements d'un malade pour déclencher une alerte et prévenir une infirmité.

Mais cette liste d'applications n'est pas exhaustive !

En ce qui concerne la fonction « actuateur », pour laquelle l'utilisation d'un ter-polymère apporte des progrès décisifs (voir plus haut), un travail de développement est en cours avec le Laboratoire d'Innovation pour les Technologies des Énergies Nouvelles et les nanomatériaux (CEA-LITEN). On a démontré qu'on était capable de faire une encre aux fonctions d'actuateurs et de les imprimer, l'objectif clé puisqu'il s'agit bien de développer des solutions compatibles avec les techniques de l'impression pour avoir des systèmes peu onéreux (Figure 15).

Un autre exemple de l'utilisation de ces polymères vient de la société Novasensis, aux États-Unis, qui a fabriqué avec ces ter-polymères un clavier complètement plat. En utilisant la fameuse tablette de Microsoft avec le petit clavier incorporé dans l'ouverture, on n'a pas l'impression de taper sur un clavier mais juste sur une surface plane. Ici, quand on active le clavier, de petites bosses se forment sur les lettres (Figure 16), et quand on tape sur une touche, on a l'impression d'un véritable clavier avec un retour de force. C'est l'avenir des claviers, ils sont



Figure 15

Circuit imprimé.

Source : Arkema.

6. Le module d'Young est ce qui lie la contrainte que l'on applique à un matériau et sa déformation. Plus le module d'Young est fort, plus il faut d'énergie pour déformer ce matériau.



très fins (2 mm), mais quand on les utilise, on a l'impression d'un vrai clavier.

D'autres applications touchent à d'autres domaines. C'est le cas d'une lentille autofocus qui comporte une cavité remplie de liquide et fermée par une membrane. La tension appliquée sur cette dernière modifie la focale de la lentille. Cette intéressante application, que les fabricants

de téléphones portables voudraient inclure dans leurs appareils, est aujourd'hui bloquée par son coût excessif. Elle fait l'objet d'études d'adaptation à la technique de l'impression qui pourrait réaliser des millions et des millions de lentilles de ce type sur quelques centaines de mètres carrés et permettre à cette application optique de voir le jour pour le grand public.

Figure 16

Clavier plat et déformation d'une touche du clavier.

Source : www.novasentis.com

La chimie au cœur de la microélectronique

On comprend que les domaines abordés dans ce chapitre et les exemples d'application de la chimie qui ont été présentés ne sont qu'une petite sélection parmi les nombreux travaux de recherche en cours dans le monde. On comprend aussi que les solutions de matériaux nouveaux apportés par la chimie des polymères ouvrent des possibilités toutes nouvelles. L'utilisation de matériaux flexibles pour les dispositifs sera ainsi une véritable révolution pour les utilisateurs.

Et si la chimie est déjà au cœur de l'électronique, elle en conditionne aussi les évolutions futures. Car elle recèle évidemment d'autres possibilités que celles qui sont identifiées aujourd'hui, au vu de la quasi-infinité du

nombre des molécules qu'elle est capable de concevoir et de réaliser, et de la richesse des combinaisons qui leur confèrent des propriétés nouvelles.

Pour tirer parti de ces possibles techniques, il faut mobiliser toutes les compétences – celles des chimistes n'en étant qu'une partie. La recherche en partenariat, entre disciplines, entre fundamentalistes et réalisateurs, entre dispositifs et procédés et même plus généralement entre scientifiques, ingénieurs, industriels et commerciaux, est devenue un incontournable impératif.