

Chimie et électronique

Jean-Claude Dubois* professeur

Summary : *Chemistry and electronic*

This article describes some aspects of the materials and chemistry for electronics. One can divide the great functions of electronics in signal treatment with the semiconductors, recording and storage systems (magnetic or optical), displays, and batteries for energy providing. In each of these functions and components, examples of materials are given and some aspects of their development are involved. The photoresist and microlithography allow the manufacture of high performances integrated circuits since new semiconductors with higher carriers mobilities are appearing. Liquid crystal are currently developed in displays or the « electronic paper » using new materials is appearing. The ceramics participate to the development of actuators, sensors, and others passive components. The DVD uses the high optical quality polymers such as polycarbonate and the different storage medias acquire higher capacity. Some aspects of the market of these materials are given.

Mot clés : *Matériaux, chimie, électronique, semiconducteurs, photoresists, microlithographie, visualisation, cristaux liquide, tube cathodique, électroluminescence, mémoires optiques, mémoires magnétiques, DVD, polymères conducteurs, batteries, piles à combustible.*

Key-words : *Materials, chemistry, electronic, semiconductors, photoresists, microlithography, displays, liquid crystals, cathode ray tube, electroluminescence, optical memory, magnetic memory, DVD, conducting polymers, batteries, fuel cells.*

Sans chimie, pas d'électronique ! Donc pas d'informatique, de bureautique et autres termes en « ique » qui participent à notre vie de tous les jours. A l'interface de la chimie et de l'électronique, les matériaux pour l'électronique occupent une place de choix. Notre objectif est de montrer comment la chimie est indispensable aux fonctions de traitement du signal, de visualisation et de stockage des données, domaines qui constituent une grande partie des technologies de l'information. Bien sûr, il ne s'agit pas d'une revue exhaustive mais de quelques exemples arbitrairement choisis pour illustrer comment les matériaux interviennent dans la construction des composants de l'électronique. Par exemple, les progrès dans le tube cathodique couleur sont dus avant tout aux progrès sur les luminophores (les produits cathodoluminescents), et on pourrait trouver beaucoup d'autres exemples analogues.

Nous sommes en train de vivre une révolution des moyens de traitement de l'information, en particulier grâce à l'électronique nomade. Un exemple type représentatif des systèmes nomades est l'ordinateur portable (figure 1). Dans cet appareil, on peut distinguer un certain nombre d'ensembles ou composants réalisant des fonctions :

- le microprocesseur pour le traitement des données,
- le système d'enregistrement des données,
- le système de visualisation,
- la batterie qui apporte l'énergie.

* Université P. et M. Curie, Laboratoire de chimie macromoléculaire, tour 44, 1^{er} étage, case 185, 4, place Jussieu, 75252 Paris Cedex 05.
E-mail : jcdubois@cc2.jussieu.fr

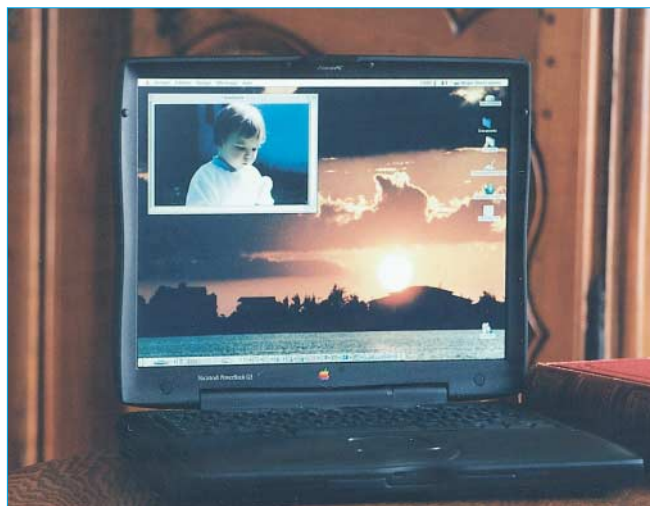


Figure 1 - L'ordinateur portable illustre quelques grandes fonctions et composants de l'électronique nomade : microprocesseur, visualisation, enregistrement de données et source d'énergie (photo de l'auteur).

La plupart des appareils de l'électronique nomade comportent tout ou partie de ces fonctions : téléphones, agendas électroniques, caméra vidéo ou appareils photos numériques dont on voit les développements fulgurants.

Tous ces équipements deviennent de plus en plus puissants, de plus en plus sophistiqués, de même que les composants actifs ou passifs qui entrent dans leur fabrication.

Cette augmentation de puissance et de complexité se traduit d'ailleurs par une augmentation de densité des composants, donc une diminution de volume.

Le traitement du signal et les semi-conducteurs (composants actifs)

Le cœur de notre ordinateur, c'est le microprocesseur qui réalise le traitement du signal avec l'exploitation de l'effet transistor dans les semi-conducteurs tels que le silicium. D'autres semi-conducteurs (III-V, comme l'arséniure de gallium ou le phosphore d'indium) sont utilisés dans d'autres domaines tels que l'optoélectronique ou les hyperfréquences car les mobilités des porteurs étant plus élevées, les vitesses de transfert et les fréquences de fonctionnement le sont donc aussi. Pour ces composants (dits actifs), la chimie fournit les produits et les plaquettes taillées dans des monocristaux de très haute pureté. La chimie fournit les gaz spéciaux pour la fabrication des couches minces de ces semi-conducteurs par différentes méthodes de dépôts physiques.

La chimie fournit également les gaz de grande pureté permettant le dépôt de couches minces diélectriques (de silice avec les silanes avec Rhodia par exemple) ou de nitrure de silicium. De même, la chimie fournit les gaz spéciaux pour tous les traitements de gravure sèche ou gravure plasma tels que l'oxygène plus ou moins dopé pour obtenir des gravures sélectives (la société Air Liquide par exemple).

L'association sur une même plaquette de plusieurs transistors constitue un circuit intégré, par exemple notre microprocesseur d'ordinateur. L'augmentation continue du niveau d'intégration (very large integrated circuits, VLSI), c'est-à-dire du nombre de dispositifs élémentaires par unité de surface, a permis non seulement la miniaturisation des composants électroniques mais aussi l'amélioration d'autres paramètres caractéristiques : diminution de la puissance consommée, augmentation de la vitesse de fonctionnement, accroissement de la fiabilité. Des circuits intégrés constituent également les mémoires vives ou DRAM (dynamic random access memory).

La loi de Moor (*figure 2*) traduit cette évolution des circuits VLSI qui deviennent de plus en plus rapides avec des dizaines de millions de composants au cm^2 . Les microprocesseurs les plus récents de nos ordinateurs atteignent des fréquences de travail de 500 MHz et des dimensions minimales de 0,13 micron et ce n'est probablement pas terminé (à titre de comparaison, le diamètre du cheveu est de l'ordre de 10 microns).

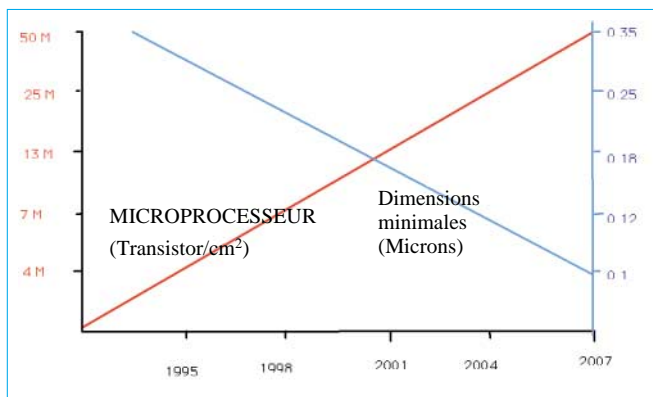


Figure 2 - La loi de Moor traduit une diminution de la taille minimale des éléments de circuits intégrés (en microns) et de l'augmentation de la densité en million d'unités par cm^2 de transistors discrets.

Le marché mondial des composants actifs est de l'ordre de 100 000 M\$, les matériaux représentent environ quelques % de ces chiffres.

Les photopolymères ou « photoresists »

Cette évolution des circuits intégrés a pu se faire grâce à la chimie et à la méthode de gravure appelée microlithographie (de lithos : pierre, micro écriture sur pierre). Cette méthode utilise des photopolymères que l'on appelle photoresists pour réaliser des masques (*figure 3*) permettant la gravure du motif par voie sèche ou par voie humide. C'est la chimie qui fournit ces produits élaborés ainsi que les gaz et liquides utilisés pour la gravure.

Deux paramètres particulièrement importants caractérisent une résine de masquage :

- La sensibilité σ qui traduit l'aptitude de la résine à subir des modifications de structure sous l'effet du rayonnement. Plus la dose de rayonnement requise est faible, plus la résine est dite sensible.

- Le contraste γ qui traduit l'aptitude de la résine à présenter des flancs verticaux et dont dépend en partie la résolution obtenue (nombre de traits/unité de longueur et donc plus petit motif réalisable).

Les photoresists positifs possèdent, en général, un bon contraste et une sensibilité moyenne. C'est l'inverse pour les photoresists négatifs.

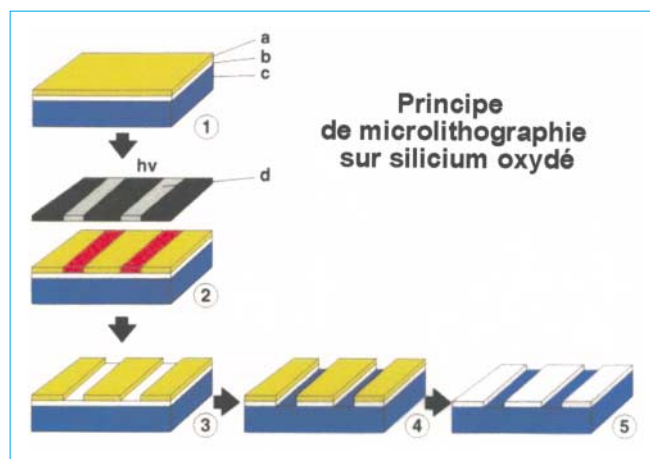


Figure 3 - Principe de réalisation des masques de gravure par des photoresists positifs ou négatifs. Les photoresists négatifs sont réticulés par insolation et deviennent insolubles alors que c'est l'inverse pour les photoresists positifs. Dans la figure ci-dessus, dans l'étape 1, le photoresist a est déposé sur un substrat de silicium c portant une couche de silice b. L'insolation est faite à travers le masque d dans l'étape 2. Dans l'étape 3 se fait le développement de la résine, puis la gravure de la silice dans l'étape 4. Dans l'étape 5, on réalise l'élimination de la résine. On peut ensuite réaliser différentes opérations nécessaires à la fabrication du composant.

La résolution minimale de ces photoresists dépend de la longueur d'onde utilisée pour les irradier (c'est la tache de diffraction qui donne la limitation dimensionnelle). Pour obtenir des motifs de plus en plus petits, les chercheurs sont passés du masquage dans les longueurs d'onde visible (le bleu vers 400 nm) à la lithographie en UV lointain (200-300 nm) qui est de plus en plus utilisée industriellement. Les rayons X et les électrons permettent de réaliser des motifs atteignant moins de 0,1 micron.

La mise au point de nouveaux photoresists permet la lithographie en longueur d'onde UV (figure 4).

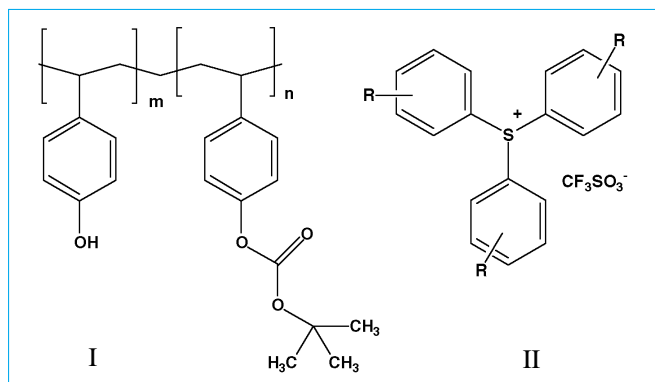


Figure 4 - Un exemple de photoresist positif mis au point par IBM : l'APEX-E (tBOC-PHS), constitué d'un photogénérateur d'acide (le triflate de triphényl sulfonium) II et d'un polymère porteur d'un groupement tert-butoxy carbonyl I. L'action des UV sur II va fournir l'acide sulfonique qui va libérer le tBOC de I en donnant une fonction phénol. Le polymère est alors soluble dans un révélateur basique.

Les composants passifs

Les composants passifs sont mis au point avec différents matériaux spéciaux céramiques, polymères ou métalliques, ils représentent un marché équivalent au marché des composants actifs.

Les matériaux céramiques pour l'électronique participent à la réalisation de composants aussi variés que les capteurs, les condensateurs ou les boîtiers de protection.

Les ferro/piézoélectriques à base d'oxydes métalliques présentent des effets mécaniques réversibles sous l'action d'un champ électrique. Ces matériaux sont utilisables dans des capteurs (de pression, d'accélération...) pour l'aéronautique ou l'automobile ou dans des actuateurs. On assiste d'ailleurs à un développement considérable des études dans ce domaine dans des pays tels que les États-Unis, le Japon, l'Allemagne, dans la conception de systèmes « intelligents » à l'échelle macroscopique (amortissement de vibrations, composites auto-déformables) ou mésoscopiques (microsystèmes). Les ferro-électriques sont également utilisés dans les condensateurs céramiques (figure 5) en raison de leur grande constante diélectrique.

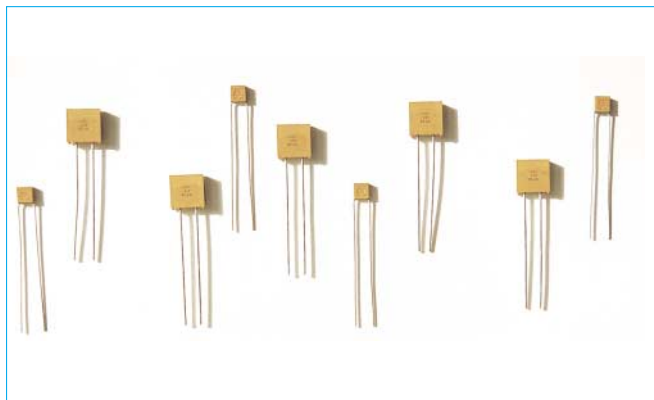


Figure 5 - Un exemple de composant passif : les condensateurs. Les condensateurs font appel à des céramiques ou des polymères spécifiques ainsi qu'à des boîtiers ou des résines de grande pureté. Quelques sociétés sont spécialisées dans la fourniture de produits pour l'électronique tels que polymères conducteurs chargés ou résines d'encapsulation (photo Protavic).

Le marché des matériaux pour condensateurs céramiques est important avec 1,8 Md \$. Les céramiques piézoélectriques représentent environ (1 Md \$), puis les capteurs de gaz (0,2 Md \$), important pour l'environnement, (il existe aussi des ferroélectriques polymères et moléculaires).

Les ferrites, matériaux magnétiques « durs » ou « mous », sont utilisés, par exemple, dans les bagues pour tube télévision ou les alimentations à découpage et représentent un CA de 0,7 Md

L'acheminement du signal et la connectique

Les liaisons (ou connections) entre les VLSI est faite par des circuits imprimés souples ou rigides qui sont également classés dans les composants passifs. Ils utilisent également des matériaux de grande technicité. Les photoresists sont également utilisés pour effectuer la gravure les circuits imprimés (gravure du cuivre). On estime que, dans un proche avenir, les limitations, en capacité de traitement du signal pour certains équipements viendront moins des capacités des circuits intégrés, processeurs ou mémoires, que des techniques d'interconnexion telles qu'elles sont mises en œuvre actuellement. Dans ces domaines, non seulement les propriétés diélectriques mais aussi les propriétés thermomécaniques et la stabilité dimensionnelle, particulièrement pour les substrats, ont une grande importance. L'absorption d'eau doit être faible, particulièrement dans le cas de l'encapsulation. Dans tous les cas, la résistance au feu et la tenue en température sont de plus en plus importantes.

Les polymères thermostables sont particulièrement intéressants dans ce domaine et, en particulier, les polyimides, non seulement en raison de leur stabilité thermique qui leur permet de résister au flux de soudure, mais aussi en raison de leur stabilité thermomécanique. Les polyimides permettent la réalisation de circuits imprimés multicouches ou des circuits souples utilisés dans tous les appareils grand public. Les polyimides dérivés de l'acide pyromellitique et de diamines aromatiques sont particulièrement intéressants. Une grande variété de dianhydrides ou de diamines (aliphatiques ou aromatiques) peuvent être utilisés, mais les composés aromatiques sont principalement employés. De nouvelles générations de polyimides apparaissent dont la mise en forme est plus aisée, elles sont thermoplastiques et/ou solubles (figure 6).

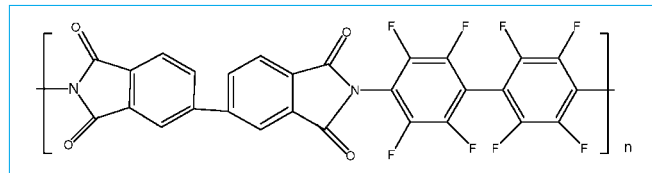


Figure 6 - Les polyimides présentent, avec d'autres matériaux thermostables [poly(sulfones) PES, poly(éther-éther cétone) PEEK], des propriétés de stabilité dimensionnelle et thermiques. Ils sont utilisés dans l'électronique comme substrats ou produit d'encapsulation. Le polyimide représenté ici est utilisé (Matsushita) dans les cellules à cristaux liquides comme couche d'orientation.

Il faut faire mention ici des polyimides photoréticulables (photoresists négatifs) bien que ces produits ne soient pas directement utilisables pour la fabrication des VLSI. Ce sont des produits intéressants pour réaliser des couches d'isole-

ment de formes définies. Ces résines sont toutes constituées en utilisant un groupement photoréactif (acrylique) sur l'acide polyamique. Après photoréticulation et développement, la couche résiduelle est chauffée et transformée en polyimide avec départ du groupe acrylique.

Plusieurs polyimides de ce type sont commercialement disponibles (Hoechst).

Les circuits hybrides, destinés également à la connectique des différents composants utilisent essentiellement des substrats et des pâtes céramiques. Le marché des matériaux pour hydrides et des boîtiers céramiques représente environ plusieurs Md \$ auxquels il faut ajouter les produits nécessaires à leur fabrication. D'autres produits récents ont ou vont changer les techniques de la connectique, par exemple les communications optiques ou les supraconducteurs. En effet, l'utilisation de la lumière comme vecteur de l'information en remplacement de l'électron permet de gagner encore dans la vitesse de transmission et de traitement du signal.

Ce sont surtout les transmissions par fibres optiques utilisant des diodes lasers qui retiennent l'attention, c'est ainsi que les fibres optiques de silice/silice dopée permettent d'acheminer les informations avec de grands débits sur des distances importantes mais aussi dans les appareils grand public. Quant aux fibres plastiques, elles sont utilisables pour les liaisons de courtes distances.

La découverte de céramiques supraconductrices à des températures de plus en plus élevée (90 K-120 K) est une véritable révolution technique. Les produits à base d'oxydes métalliques (yttrium, baryum, cuivre) permettent d'obtenir une résistance nulle à la température de l'azote liquide. Il sera peut-être possible de bâtir une électronique beaucoup plus rapide que l'électronique actuelle si l'on arrive à améliorer certaines propriétés. Les applications potentielles en hyperfréquence et dans le domaine des capteurs sont aussi très importantes.

Les matériaux de l'enregistrement et du stockage des données

La nécessité de stocker de plus en plus d'informations a conduit à la mise au point de différents médias dans lesquels les matériaux et la chimie jouent un rôle clé. Les médias magnétiques traditionnels sont concurrencés de plus en plus par les médias optiques ou magnétooptiques.

Les **magnétoscopes** et les magnétophones sont de grands consommateurs de bandes magnétiques. L'ensemble du CA pour les médias magnétiques (bande magnétique audio et vidéo, floppy disc et disques durs) dépasse les 10 Md \$. Pour les fabrications de bandes magnétiques, on utilise un polymère, des pigments magnétiques et des liants. Le polymère support est le PET (polyéthylène glycol téréphtalate, marques : Mylar, Terphane...).

Les performances des disques durs des ordinateurs évoluent parallèlement vers la miniaturisation et la densité de stockage. Par exemple, le dernier disque dur d'IBM (le Microdrive) ne mesure que 2,5 cm² et peut stocker 340 mégaoctets (MO).

Le **disque optique audio ou vidéo** (figure 7) utilise des polymères de haute pureté et de grande transparence (le poly-



Figure 7 - Le disque compact à lecture optique (audio ou vidéo) a évolué très rapidement depuis sa création. Le DVD (digital versatile disc) permet de stocker un film complet sur un disque de diamètre 2,5 (photo de l'auteur).

carbonate) et des photopolymères. La figure 8 représente le principe de réalisation d'un disque optique ; là aussi, différents matériaux spécifiques et la chimie interviennent. Le « compact disc » (CD), support de logiciels de toutes sortes dont les jeux, est en croissance rapide et accompagne le développement des ordinateurs individuels et du cinéma à domicile. Le dernier média arrivé sur le marché est le DVD (digital versatile disc) ; celui-ci, disque classique (2.5''), permet de stocker la durée d'un film entier.

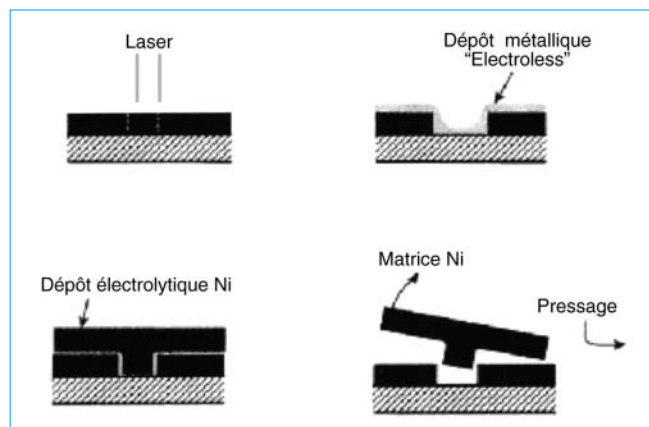


Figure 8 - Schéma de réalisation d'un disque compact. L'inscription est effectuée par un laser modulé sur un photoresist. Un dépôt métallique « electroless » puis un dépôt électrolytique permettent de réaliser une matrice de nickel qui permettra le pressage ultérieur. Différents produits chimiques de spécialité sont utilisés au cours de ces opérations.

Là aussi, une évolution très rapide des médias d'enregistrement est en train de se produire. Une âpre compétition a lieu entre les trois types de média : le disque optique, le disque et la bande magnétique et les mémoires silicium, les DRAM. Les capacités de stockage ne cessent de croître. Si les DRAM sont encore loin, les disques optiques permettent de stocker plusieurs Gbytes (un byte = un octet,) soit plusieurs encyclopédies et les médias magnétiques ne cessent d'évoluer vers de plus grande densités de stockage (figure 9).

Les nouveaux matériaux permettent le développement de nouvelles sources de lumière telles que lasers solides bleus à base de nitrure d'aluminium (sociétés Nichia, Sony) qui permettent des inscriptions-lectures de plus grande densité.

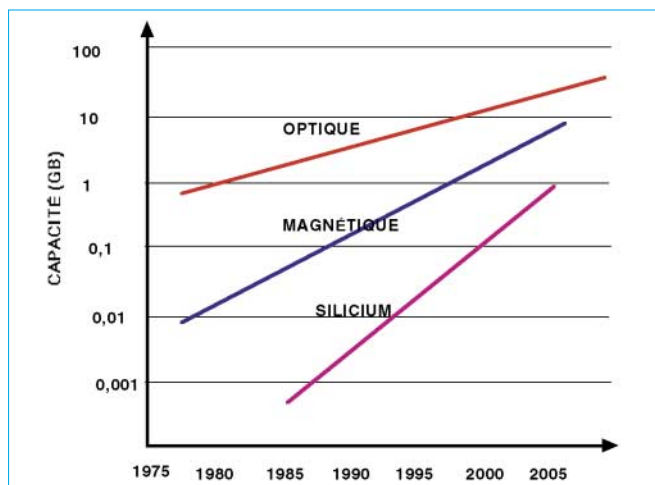


Figure 9 - Évolution prévisible des capacités mémoires (GB = gigabytes) dans les différents médias : optique (disque optique, DVD ou CDROM), magnétiques (bande et disque), silicium (DRAM).

Matériaux pour visualisation

Toutes ces informations doivent être visualisées, les écrans de visualisation sont constitués, par exemple, d'un tube cathodique ou, dans le cas des appareils portables, par un écran à cristaux liquides. Dans les deux cas, la chimie a permis la préparation des luminophores (ou « phosphors ») de la cathode du tube cathodique ou encore la synthèse des cristaux liquides et la mise en forme des cellules de visualisation.

Tube cathodique

Que ce soit dans le domaine de la télévision ou de l'ordinateur, le tube cathodique représente toujours le système de visualisation le plus développé et le moins cher. Il est sans cesse perfectionné et représente de loin le chiffre d'affaires le plus important dans ce domaine. Son perfectionnement a pu se faire grâce aux matériaux cathodoluminescents (les phosphors ou luminophores) pour lesquels la chimie des terres rares joue un rôle important (Rhodia en est le 1^{er} fournisseur) : le luminophore rouge le plus efficace est un oxy-sulfure d'yttrium dopé à l'euporium.

Le tube cathodique sera peut-être concurrencé par un nouveau venu : le tube plasma. Cependant, la difficulté d'obtenir une luminance suffisante et le prix élevé de ce produit constituent encore un obstacle important à son développement. Il est probable que, là encore, les progrès des matériaux et de la chimie permettront d'abaisser les coûts de fabrication et d'améliorer les rendements et les performances.

Les cristaux liquides

Ce sont des molécules allongées qui donnent des phases intermédiaires entre les cristaux et les liquides. Ils sont liquides et anisotropes, et s'orientent sous champs électriques (figure 10).

Ils contribuent à la réalisation d'une nouvelle génération d'écrans plats. Ils constituent l'écran de visualisation idéal

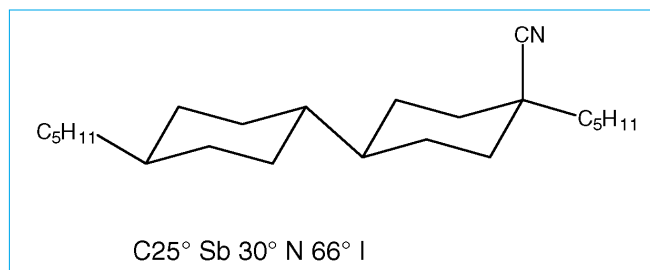


Figure 10 - Un exemple de molécule cristalline liquide utilisée dans les écrans de visualisation. Celle-ci présente plusieurs phases cristalline (ou mésophases) : smectique B (S_B de 25-30 °C et nématique (N) de 30 à 66 °C. La phase C symbolise la phase cristalline.

pour l'électronique nomade (téléphone, ordinateurs, jeux...) car ils consomment très peu d'énergie. La chimie fine a permis la mise au point de ces cristaux liquides avec des propriétés parfaitement adaptées. De même, les produits de traitement de surface tels que les polyimides ont permis l'orientation de surface dans les cellules de visualisation (figure 11).

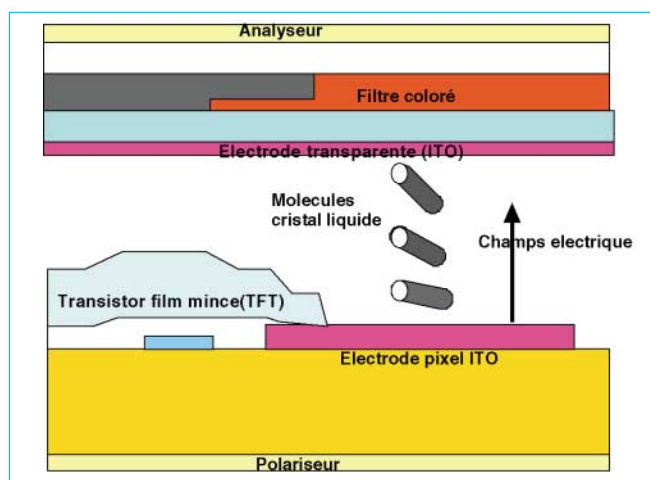


Figure 11 - Coupe d'une cellule de visualisation à cristaux liquides à matrice active. Les matériaux contribuent à la réalisation, depuis le cristal liquide jusqu'aux filtres colorés, en passant par les électrodes transparentes en oxyde d'étain-indium, les transistors, les couches d'alignement du cristal liquide et les polariseurs.

Électroluminescence organique

Les composés organiques porteurs de doubles liaisons conjuguées, polymères ou petites molécules présentent des propriétés de conductivité et semiconductrices intéressantes. Par exemple, des polymères insaturés tels que le polypyrrole et le polythiophène deviennent conducteurs après dopage. Ils peuvent atteindre des conductivités de deux ordres de grandeur en-dessous du cuivre et peuvent également être oxydés ou réduits par voie électrochimique.

Ces produits sont activement étudiés pour la réalisation des diodes lasers électroluminescentes (LED) (voir *L'Actualité chimique*, n° 6, juin 1999). Le poly(paraphénylènevinylène) (PPV) ou ses dérivés, par exemple MEH-PPV, sont étudiés par différents laboratoires. Des LED rouge, verte et bleue ont été préparées, Pioneer développe un écran de ce type.

La visualisation n'a pas terminé son évolution

L'avènement de la TVHD est un aspect de la tendance de l'augmentation de la résolution et du nombre lignes-colonnes qui augmentent de plus en plus. Pour la télévision, la taille des écrans augmente également. Le tube cathodique trop lourd pour les dimensions au-dessus de 34'' sera sans doute remplacé par des systèmes de projection ou des tubes plasma. Les différents écrans de visualisation occupent des créneaux différents.

Le livre, l'écran et le « papier électronique »

Le papier est-il appelé à disparaître ?

L'ordinateur simplifié fournit depuis peu un nouveau produit commercial : le « livre électronique ». De la taille d'un livre de Jules Verne, un livre électronique peut stocker jusqu'à l'équivalent de 10 livres papier, voir plus si l'on ajoute des extensions mémoire. Nul besoin de se rendre dans une librairie pour feuilleter un nouvel ouvrage : il suffit de se brancher sur Internet et de télécharger le titre désiré. Plus qu'une alternative au livre papier traditionnel, le livre électronique ouvre de nouvelles possibilités de lecture tout en améliorant le confort des utilisateurs. De plus, il peut être doté d'un dictionnaire et se lire dans sa langue maternelle ou afficher le journal du jour. Il possède un écran (Everybook) ou deux écrans (Dedicated Reader) comme un vrai livre.

L'écran plat va-t-il remplacer le papier et son agréable contact physique ?... On voit déjà apparaître ce qui est appelé par leurs créateurs du « papier électronique ». Ces écrans souples sont basés sur des effets de champs électriques : par exemple, Xerox utilise la rotation de microsphères noires d'un côté et blanches de l'autre. Un autre procédé, issu du MIT (E-ink), utilise le déplacement d'un pigment noir (noir de carbone) et d'un pigment blanc (TiO_2). Pour l'instant, seuls existent des afficheurs simples, tels que des posters.

Alors que dans ce numéro de *L'Actualité chimique*, on parle du papier et des encres, on peut débattre de ce que sera l'avenir en terme philosophique ou environnemental. Le papier est-il appelé à disparaître ? Le symbole d'une société telle que Nokia qui fabriquait du papier et qui s'est entièrement reconverti dans le téléphone portable et les produits de l'information est-il prémonitoire ?

On ne peut parler de papier et d'électronique sans rappeler la place énorme de la **reprographie** qui permet la photocopie.

Les photoconducteurs, matériaux de base de la reprographie présentent une variation de conductivité sous l'action de la lumière. Ce, sont des semi-conducteurs organiques ou minéraux qui sont utilisés. Le sélénium a constitué la base du premier produit commercial de reprographie (xérographie) ; d'autre matériaux (polymères ou hybrides), issus de la recherche de la chimie, sont maintenant utilisés dans les poudres de « toners » noires ou colorées.

Les polymères conducteurs ioniques et l'énergie

Les batteries

Dans le domaine de l'énergie, et plus particulièrement des batteries, les propriétés des matériaux et des polymères conducteurs, en particulier, sont des plus prometteuses. En effet, on cherche de plus en plus, spécialement pour l'électronique nomade, à stocker de grandes densités d'énergie avec des formes adaptables. On connaît bien les inconvénients de prix et de poids des batteries au plomb ou des batteries Cd-nickel.

Les batteries au lithium utilisant des composés d'insertion (LiCoO_2 /graphite) avec des polymères conducteurs ioniques ont des performances qui les rendent tout à fait intéressantes et qui viennent d'ailleurs d'être développées avec des densités volumiques de 130 Wh/kg (batteries lithium-ion NEC, Saft, Sony).

Les piles à combustible

Elles constituent également un moyen de fournir de l'énergie dans l'électronique nomade et aussi dans bien d'autres domaines. Elles transforment directement les combustibles (hydrogène, méthane, méthanol) en énergie électrique avec un excellent rendement. Elles utilisent entre autres (pour certains types) comme les batteries lithium, des polymères conducteurs ioniques sous forme de membranes (voir *L'Actualité chimique*, n° 1, janvier 1999).

Conclusion

L'évolution technologique amorcée depuis plusieurs années va s'amplifier : augmentation des performances, (c'est-à-dire rapidité de traitement du signal), augmentation des capacités mémoires des composants à semi-conducteurs. Cette évolution va se faire dans les deux domaines de réduction de taille et d'adaptation continue des matériaux semi-conducteurs ou non.

La participation de nouveaux semi-conducteurs résultant de l'association ou de la combinaison du silicium avec d'autres éléments permettra d'obtenir de nouvelles performances. L'association de ces éléments, en couches très minces, c'est-à-dire à l'échelle de quelques atomes, permet d'ailleurs d'obtenir une nouvelle génération de composants « quantiques ».

Dès maintenant apparaissent des matériaux complètement différents des matériaux traditionnels pour le traitement du signal et la photonique, par exemple les matériaux pour la microlithographie ou la visualisation.

Les céramiques évoluent également dans les domaines des composants passifs, de l'encapsulation et ouvrent la voie à des microsystèmes associés aux circuits intégrés dont on ne connaît pas encore les limites. Les procédés sol-gel permettent d'obtenir des précurseurs de céramiques en couches minces.

De nouveaux matériaux commandables permettront sans doute, dans le futur, de créer de nouveaux produits pour le bien-être de chacun de nous.

Références

- Dubois J.C., Diélectrique plastiques, *Les Techniques de l'ingénieur*, E1850 et E3140.
- Dubois J.C., Les matériaux pour l'électronique, *Encyclopédie de la chimie*, Masson, **1992**.
- Abadie J.M., Sillion B., Photosensitive polyimides, *Polyimides and other high temperature polymers*, STEPI 2, Elsevier, **1991**.
- Eranian A., Dubois J.C., Résines pour microlithographie, *Revue Tech. Thomson-CSF*, **1987**, vol. 19, 1.
- Dubois J.C., *Propriétés électriques des polymères*, GFP Editeur, août **1992**, vol. 8.
- Dubois J.C., Michel P., Polymères conducteurs, *Les techniques de l'ingénieur*, **1993**, E1860.
- Dubois J.C., Rabilloud G., Les polymères hétérocycliques thermostables, *Les Techniques de l'ingénieur*, **1994**, E 1855.
- Dubois J.C., Faure J., Les matériaux moléculaires organisés, C.R. Colloque SEE, ENS-Cachan, *L'Onde Électrique*, juillet-août **1994**, vol. 74, n° 4.
- Dubois J.C., Electrooptical properties of polymers, Frontier polymers, Kuala-Lumpur, **1995**, conférencier invité.
- Dubois J.C., Robin P., Ferroelectric polymers and ir detection, *Ferroelectrics*, **1995**, vol. 171, p. 253-258.
- Dubois J.C., Bouteiller L., Le Barny P., Robin P., Polymer dispersed liquid crystals for electronic applications, *Advanced New Materials and Emerging New Technologies*, **1995**.
- Dubois J.C., Le Barny P., Mauzac M., Noel C., Behavior and properties of side group thermotropic liquid crystal polymers, *Handbook of Liquid Crystals*, **1995**, vol. 3 chapitre 4, p. 207-302.
- Dubois J.C. *et al.*, Organic electroluminescence and applications, NATO Advanced Research Workshop « Photoactive Organic Materials », Avignon, **1995** ; Kajzar F., *Photoactive Organic Materials*, Gluwer Publ., **1996**.
- Dubois J.C., Polymer dispersed liquid crystals and applications, ICAPT 96, Montréal., conférencier invité.
- Dubois J.C., Les piles à combustible et la voiture électrique, *L'Actualité Chimique*, **1999**, 1, p. 19-26.
- Dubois J.C., Électroluminescence organique et applications, séminaire Visu 99, Grenoble.