

Remerciements

Parmi les équipes travaillant dans ce domaine, certaines se sont regroupées dans le GdR international « Phenics » : (Photo-commutation des molécules organiques : systèmes et applications) (GDRI93). Les auteurs les remercient pour leur aide dans la réalisation de cet article.

Références

- [1] a) Bertelson R.C., *Techniques of Chemistry, III*, G.H. Brown (ed.), Wiley-Interscience, New York, 1971 ; b) *Photochromism, Molecules and Systems*, H. Dürr, H. Bouas-Laurent, (eds), Elsevier, Amsterdam, 2003 ; c) *Organic Photochromic and Thermochromic Compounds*, vol. 1-2., J.C. Crano, R.J. Guglielmetti (eds), Kluwer Academic/Plenum Publishers, New York, 1999 ; d) *Molecular Switches*, B.L. Feringa (ed), Wiley-VCH, Weinheim, 2001.
- [2] Numéro spécial *Photochromism: Memories and Switches*, *Chem. Rev.*, 2000, 100, p. 1683.
- [3] Proceedings of the 4th International symposium on photochromism, photoswitchable molecular systems and devices, vol. 1-2, *Mol. Cryst. Liq. Cryst.*, 2005, 430-431, p. 1. Voir en particulier : Maurel F., Aubard J., Samat A., Rajzmann M., Guglielmetti R., Interplay between theory and experiment in organic photochromism: example of spirooxazine ring opening/closing equilibrium, p. 221 et Colombier I., Spagnoli S., Corval A., Baldeck P.L., Giraud M., Léaustic A., Yu P., Strong photomechanical effects in photochromic organic microcrystals, p. 495.
- [4] a) Varret F., Bleuzen A., Boukheddaden K., Bousseksou A., Codjovi Enachescu C., Goujon A., Linares J., Menendez N., Verdaguer M., *Pure Appl. Chem.*, 2002, 74, p. 2159 ; b) Verdaguer M., Bleuzen A., Lescouëzec R., Marvaud V., Train C., *L'Act. Chim.*, 2005, 290-291, p. 44.
- [5] Poisson L., Raffael K.D., Soep B., Mestdagh J.M., Buntinx G., *J. Amer. Chem. Soc.*, 2006, 128, p. 3169.
- [6] Delbaere S., Micheau J.-C., Vermeersch G., *Org. Lett.*, 2002, 18, p. 3143.
- [7] Metelitsa A.V., Lokshin V., Micheau J.-C., Samat A., Guglielmetti R., Minkin V.I., *Phys. Chem. Chem. Phys.*, 2002, 4, p. 4340.
- [8] a) Demadrille R., Rabourdin A., Campredon M., Giusti G., *J. Photochem. Photobiol. A: Chem.*, 2004, 168, p. 143 ; b) Pimienta V., Frouté C., Deniel M.H., Lavabre D., Guglielmetti R., Micheau J.-C., *J. Photochem. Photobiol. A: Chem.*, 1999, 122, p. 199.
- [9] Launay J.-P., Coudret C., Rapenne G., *L'Act. Chim.*, 2005, 287, p. 45.
- [10] Tian H., Yang S., *Chem. Soc. Rev.*, 2004, 33, p. 85.
- [11] Raymo F.M., Giordani S., *Proc. Natl. Acad. Sci.*, 2002, 99, p. 4941.
- [12] Norsten T.B., Branda N.R., *Adv. Mater.*, 2001, 13, p. 347.
- [13] a) Raymo F.M., Tomasulo M., *J. Phys. Chem. A*, 2005, 109, p. 7343 ; b) Raymo F.M., Tomasulo M., *Chem. Soc. Rev.*, 2005, 34, p. 327 ; c) Fukaminato T., Sasaki T., Kawai T., Tamai N., Irie M., *J. Am. Chem. Soc.*, 2004, 126, p. 14843.
- [14] Létard J.F., Guionneau P., Nguyen O., Sanchez Costa J., Marcén S., Chastanet G., Marchivie M., Goux-Capes L., *Chem. Eur. J.*, 2005, 11, p. 4582.
- [15] Bénard S., Rivière E., Yu P., Nakatani K., Delouis J.F., *Chem. Mater.*, 2001, 13, p. 159.
- [16] Natansohn A., Rochon P., *Chem. Rev.*, 2002, 102, p. 4139.
- [17] a) Lagugné-Labarthe F., Buffeteau T., Sourisseau C., *J. Opt. A: Pure Appl. Opt.*, 2002, 4, p. 235 ; b) Ishow E., Lebon B., He Y., Wang X., Bouteiller L., Galmiche L., Nakatani K., *Chem. Mater.*, 2006, 18, p. 1267.
- [18] Shirota H., *J. Mater. Chem.*, 2005, 15, p. 75.
- [19] Ghivi R., Kottler Z., Berkovic G., Krief P., Sigalov M., Shapiro L., Huppert D., Khodorkovsky V., Lokshin V., Samat A., *Proc. SPIE Int. Soc. Opt. Eng.*, 2005, 5724, p. 13.
- [20] a) Faure D., Gravier J., Labrot T., Desbat B., Oda R., Bassani D.M., *Chem. Commun.*, 2005, p. 1167 ; b) Del Guerso A., Bouas-Laurent H., Desvergne J.-P., Belin C., Reichwagen J., Hopf H., *Mol. Cryst. Liq. Cryst.*, 2005, 431, p. 455 ; c) Ahmed S.A., Sallenave X., Fages F., Miedengundert G., Müller W.M., Müller U., Vögtle F., Pozzo J.L., *Langmuir*, 2002, 18, p. 7096.
- [21] Yu Y., Nakano M., Ikeda T., *Nature*, 2003, 425, p. 145.
- [22] a) Renner C., Moroder L., *ChemBioChem*, 2006, 7, p. 868 ; b) Queiroz M.J.R.P., Abreu A.S., Ferreira P.M.T., Oliveira M.M., Dubest R., Aubard J., Samat A., *Org. Lett.*, 2005, 7, p. 4811 ; c) Zhao J., Micheau J.-C., Vargas C., Schiene-Fischer C., *Chem. Eur. J.*, 2004, 10, p. 6093 ; d) Ipe B.I., Mahima S., Thomas K.G., *J. Am. Chem. Soc.*, 2003, 125, p. 7174.
- [23] a) Byrne R.J., Stitzel S.E., Diamond D., *J. Mater. Chem.*, 2006, 16, p. 1332 ; b) Kimura K., Yokota G., Yokoyama M., Uda R.M., *Macromolecules*, 2001, 34, p. 2262.
- [24] a) Guglielmetti R., Meyer R., Dupuy C., *J. Chem. Educ.*, 1973, 50, p. 413 ; b) Silversmith E.F., *J. Chem. Educ.*, 1970, 47, p. 315 ; c) Petersen R.L., Harris G.L., *J. Chem. Educ.*, 1985, 62, p. 802.
- [25] Irie M., Kobatake S., Horichi M., *Science*, 2001, 291, p. 1769.



K. Nakatani

Keitaro Nakatani

est professeur à l'École Normale Supérieure de Cachan au Laboratoire photophysique et photochimie supramoléculaires et macromoléculaires (PPSM)*.

Jean-Claude Micheau

est directeur de recherches au CNRS dans l'UMR 5623 à l'Université Paul Sabatier de Toulouse**.



J.-C. Micheau

* PPSM, UMR CNRS 8531, ENS Cachan, 61 avenue du Président Wilson, 94235 Cachan.

Courriel : nakatani@ppsm.ens-cachan.fr

** UMR 5623, Université Paul Sabatier, 31062 Toulouse Cedex.

Courriel : michneau@chimie.ups-tlse.fr

L'électroluminescence a fêté ses cent ans en 2007

Pierre Le Barny et Jean-Paul Pocholle

Résumé

Cet article décrit le principe de fonctionnement, la structure et les différents domaines d'applications d'une diode électroluminescente. L'accent est mis sur la mise au point et les perspectives qu'offrent les nouvelles sources blanches pour éclairage. Il rappelle ensuite le principe de l'électroluminescence organique et montre l'intérêt des composés phosphorescents en termes de rendement, les performances des diodes obtenues à partir des molécules évaporées et des polymères, les nouvelles techniques de dépôt des composés de faible masse molaire, et enfin, la situation industrielle des matériaux organiques électroluminescents dans le domaine de la visualisation.

Mots-clés

Diodes électroluminescentes (DEL), jonction p-n, éclairage, électroluminescence organique, matériaux organiques électroluminescents, afficheurs électroluminescents organiques.

Abstract A century of electroluminescence

This paper is a short state of the art of light emitting diodes (LEDs) and organic light emitting diodes (OLEDs). Special emphasis is put on the newest materials used and on their applications and prospects either in lighting or in flat panel display devices.

Keywords Light emitting diode (LED), p-n junction, lighting, OLED, organic electroluminescent materials, display device.

C'est en 1907 que Henry Joseph Round observe l'électroluminescence (EL) en appliquant une tension électrique à un cristal de carbure de silicium (SiC). À l'époque, il menait des travaux sur les cristaux de SiC pour la détection des ondes radioélectriques à la compagnie Marconi. Trente ans plus tard, Georges Destriau, au Laboratoire de luminescence de la Faculté des Sciences de Paris, publiait un article rapportant l'obtention d'une émission lumineuse en soumettant une poudre de sulfure de zinc (ZnS) à un champ électrique alternatif [1]. C'est à lui que l'on doit le terme d'électroluminescence pour décrire ce processus d'émission lumineuse.

Les diodes électroluminescentes (DEL, ou LED pour « light emitting diode ») sont de loin les composants optoélectroniques les plus répandus au niveau des applications. On les trouve :

- dans les liaisons sans fil : transmission entre casque d'écoute et chaîne audio, entre souris et système informatique, télécommande (clés optiques)... ;
- dans les systèmes d'affichage (états on/off), voire en projection d'images animées sur grandes surfaces (dont la vidéoprojection de poche qui vient d'être commercialisée par Samsung) ;
- dans les systèmes de communication de données en espace libre (plafonnier optoélectronique) ou sur fibres optiques (capteurs, liaisons optiques courtes distances...).

Une révolution est également en route afin d'obtenir de forts niveaux de puissance dans le visible et donc d'aborder l'immense marché de l'éclairage pour l'habitat et les transports (automobile, avionique...), ainsi que pour la signalisation (feux tricolores et panneaux d'affichage). On doit également noter l'emploi de DEL blanches comme flash miniature pour la photographie intégrée aux téléphones portables.

Enfin, le développement de sources UV ou IR peut contribuer à couvrir des domaines allant de la photochimie (photopolymérisation sélective) à la biophotonique (intégration aux biopuces), en passant par la sécurisation (authentification de documents et éclairage discret de scènes).

L'intérêt pour l'électroluminescence organique date seulement du début des années 60 [2]. Mais grâce aux acquis de la microélectronique et de l'industrie des écrans à cristaux liquides, ce domaine a évolué très rapidement vers les applications. On peut dire que depuis 2003, la production de « masse » des systèmes de visualisation basés sur l'utilisation de composés organiques électroluminescents (molécules de faible masse molaire ou polymères) est une réalité.

Après avoir rappelé les mécanismes gouvernant ces deux aspects de l'électroluminescence, cet article dresse un état de l'art du domaine.

Les diodes électroluminescentes

Jonction p-n, principe de fonctionnement et structure d'une DEL

Une diode électroluminescente est constituée d'une jonction entre deux matériaux semi-conducteurs avec

respectivement un dopage p (excédent de trous) et n (excédent d'électrons). Ces couches sont obtenues par dépôts sur un substrat par épitaxie en jet moléculaire (EJM, ou MBE pour « molecular beam epitaxy ») ou en phase vapeur (MOCVD).

Lorsque ces deux couches sont en contact (jonction p-n), les électrons du semi-conducteur de type n vont combler les trous présents dans le semi-conducteur de type p. Cette neutralisation localisée des charges développe une zone de charges d'espace de signes opposés de part et d'autre de la jonction. Il s'ensuit la création d'un champ électrique au niveau de l'interface et le développement d'une différence de potentiel (barrière de potentiel). La *figure 1a* illustre la constitution d'une jonction p-n à l'équilibre thermique.

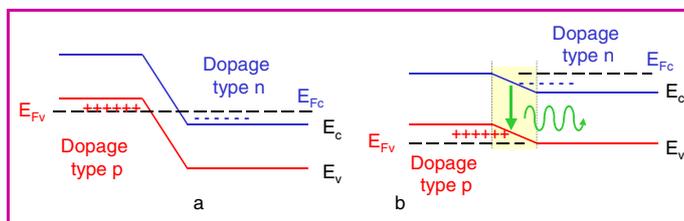


Figure 1 - a) Jonction p-n à l'équilibre thermique.

E_C et E_V : niveaux d'énergie de la bande de conduction et de la bande de valence. E_{FC} et E_{FV} : niveaux de Fermi liés aux densités de porteurs (électrons et trous). b) En présence d'une tension appliquée en sens direct, on réduit la zone de charge d'espace et la différence de potentiel, ce qui favorise la diffusion des porteurs dans la jonction et leur recombinaison avec émission de photons spontanés.

En appliquant une tension dans le sens direct au niveau de la jonction p-n, on va favoriser la diffusion initiale et par conséquent la recombinaison des électrons et des trous (*figure 1b*), qui s'accompagne d'une émission de photons dont l'énergie correspond approximativement à l'énergie de bande interdite du matériau semi-conducteur employé.

Afin d'accroître l'efficacité de tels mécanismes de recombinaison, on utilise des doubles hétérojonctions (puits quantiques) qui permettent de confiner les porteurs et de localiser la zone de recombinaison.

Domaine et spectre d'émission selon la nature des alliages semi-conducteurs

L'énergie de bande interdite (« bandgap ») est reliée à la longueur d'onde d'émission λ selon la relation :

$$E_{BG}(\text{eV}) = \frac{hc}{q\lambda} \approx \frac{1,24}{\lambda(\mu\text{m})}$$

où h , c et q sont respectivement la constante de Planck, la célérité de la lumière dans le vide et la charge électrique élémentaire de l'électron. En fonction des alliages de composés semi-conducteurs, il est possible d'ajuster le domaine spectral couvert (*figure 2*).

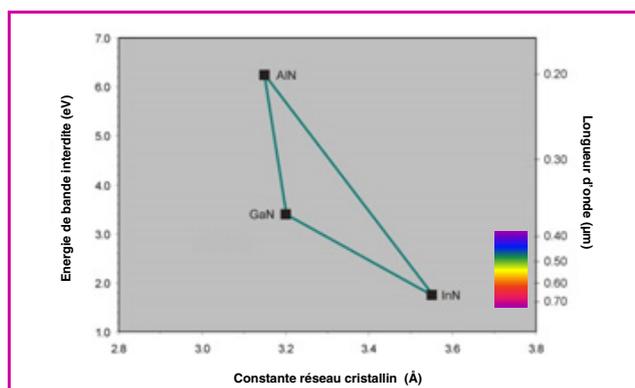


Figure 2 - Évolution de l'énergie de bande interdite en fonction des composés binaires à base de nitrides et du paramètre de maille associé.

À partir de ce diagramme, on peut élaborer la composition de ternaires stables en minimisant la désadaptation de maille. On observe que l'alliage GaAlN permet de couvrir le domaine spectral allant de l'UV (200 nm) au bleu (~ 400 nm).

La tension de jonction est imposée par la nature des matériaux semi-conducteurs, et plus particulièrement par l'énergie de bande interdite. Ainsi, une diode émettant dans le bleu (à la longueur d'onde de 405 nm) verra sa tension de jonction se stabiliser vers 3,1 V.

Applications et perspectives

Les nouveaux domaines d'applications concernent le développement de sources blanches pour l'éclairage. Le domaine de l'éclairage représente 21 % de l'énergie électrique (2 000 tWh) consommée dans le monde. Un gain sur le rendement optique-électrique a donc pour conséquence de réduire cette consommation et participe à la réduction de l'émission de gaz à effet de serre.

Deux concepts sont actuellement développés. Le premier consiste à employer une DEL de forte puissance émettant dans le bleu qui vient exciter un phosphore émettant dans le jaune (figure 3), ou dans l'UV avec plusieurs couches de matériaux phosphorescents (RVB : rouge-vert-bleu).

Le second repose sur l'emploi de trois ou quatre diodes qui couvrent les domaines RVB, permettant d'avoir un bon rendu chromatique au niveau de la perception du blanc tout en pouvant ajuster celui-ci en jouant sur le courant d'alimentation des différentes DEL. Cette solution présente l'avantage d'avoir un meilleur rendement optoélectronique avec l'inconvénient (*a priori*) de nécessiter l'intégration de plusieurs émetteurs.

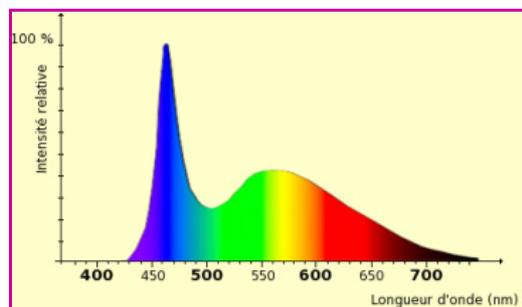


Figure 3 - Le flux lumineux provenant d'une DEL émettant dans le bleu vient exciter un phosphore qui présente un maximum d'émission dans le jaune. La superposition des émissions primaire et secondaire donne une température de couleur blanche.

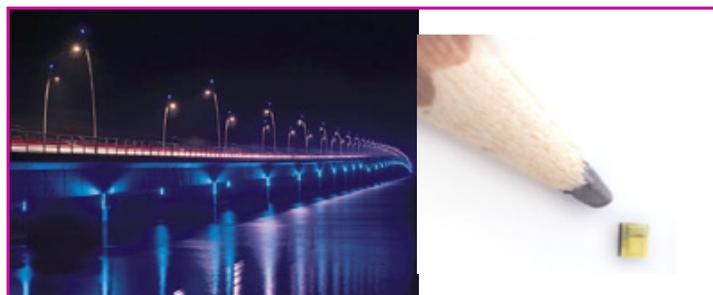


Figure 4 - Le pont d'Oléron illuminé par DEL (© Schröder Group) et une DEL blanche pour flash (Luxeon® Flash de Lumileds).

On bénéficie ainsi des avantages d'intégration propres à l'électronique et au traitement collectif des différentes opérations technologiques à partir de substrats de grandes dimensions (épitaxie de couches, prises de contacts électriques, gestion thermique...).

Les avantages inhérents à l'emploi de ce composant en éclairage sont une grande durée de vie (100 000 h comparées au 10 000 h d'un tube fluorescent conventionnel), un fonctionnement instantané sous faible tension électrique (emploi possible sur batterie), un faible encombrement... et surtout un meilleur rendement de conversion électrique/optique. À titre de comparaison, on obtient en laboratoire des efficacités de l'ordre de 100 lm⁽¹⁾/W (en juin 2006, la société CREE obtenait 131 lm/W) que l'on peut comparer aux efficacités obtenues à partir de sources conventionnelles (lampe à filament : 10 à 20 lm/W ; halogène : 20 lm/W ; lampe compacte fluorescente : 40 à 50 lm/W). On s'approche des efficacités obtenues avec des tubes fluorescents (90 lm/W).

Une illustration récente de l'intégration de tels composants est représentée par la mise sur le marché par Samsung d'un vidéoprojecteur de poche (résolution 800 x 600, contraste 1000:1, de dimensions 128 x 85 x 53 mm), pesant 680 g, avec une autonomie de 2,5 h sur batterie. En 2005, Sony et Samsung proposaient un écran TV haute définition LCD de 46" incorporant des DEL blanches garantissant une durée de vie de 100 000 h.

Les industriels concernés par le développement de ces composants couvrant le domaine de l'éclairage sont Lumileds Lightning (à l'origine société à capital-risque entre Agilent Technologies et Philips Lightning, intégrée depuis 2005 au groupe Philips), qui commercialisent des DEL RVB et blanches. La production annuelle est de plusieurs milliards d'unités. La figure 4 illustre des applications en éclairage. CREE, Nichia et OSRAM sont également des acteurs majeurs dans ce domaine. L'impact commercial est d'une telle ampleur que l'on conçoit que les industriels de l'éclairage se soient engagés dans la maîtrise de cette nouvelle technologie. Des projections envisagent l'obtention de flux lumineux supérieurs à 200 lm (250 à 1 000 lm) émis par une surface de 1 mm², pour un coût de un à deux euros.

L'électroluminescence organique

Principe

Les phénomènes mis en jeu dans l'électroluminescence (EL) organique sont complexes et encore incomplètement compris. Néanmoins, il est admis que les quatre étapes suivantes interviennent successivement :

- injection d'électrons et de trous respectivement par la cathode et par l'anode,

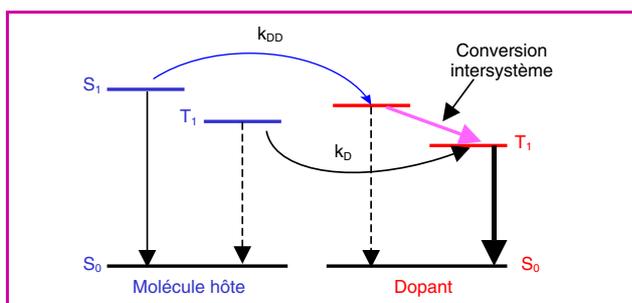


Figure 5 - Les différents mécanismes impliqués dans l'électrophosphorescence.

Les excitons T de la matrice hôte peuvent être collectés soit par transfert de type Förster vers l'état S excité du dopant suivi d'une conversion intersystème vers l'état T excité de celui-ci, soit directement par transfert de Dexter de l'état T de l'hôte vers l'état excité T du dopant.

- transport des charges dans le matériau sous forme d'espèces chargées appelées polarons,
- recombinaison des porteurs de charge opposée en un état excité neutre appelé exciton,
- désactivation de l'exciton.

25 % des excitons formés sont dans un état singlet S, les 75 % restant étant dans un état triplet T. Les premiers travaux mettaient en œuvre des matériaux fluorescents, ce qui limitait le rendement d'électroluminescence η_{EL} à $0,25 \eta_{PL}$ (η_{PL} étant le rendement de photoluminescence à l'état solide du matériau). Depuis 1998, l'introduction de dopants phosphorescents a permis d'utiliser les états triplets et de faire ainsi tendre η_{EL} vers η_{PL} (figure 5).

Structure standard d'une diode EL

Une meilleure compréhension des mécanismes mis en jeu dans l'EL organique a conduit aux structures multicouches schématisées figure 6. On remarque que les diodes à base polymères sont bicouches alors que celles utilisant des molécules de faible masse molaire sont multicouches, ce qui permet une très bonne maîtrise de l'équilibre des courants de trous et d'électrons.

Pour obtenir une injection aisée d'électrons, il faut que le niveau de Fermi de la cathode soit proche de la LUMO du matériau. Seules les cathodes à faible travail d'extraction comme le calcium, le baryum, voire les alliages de magnésium-argent conviennent. Depuis 1997, sont apparues des cathodes bicouches moins réactives vis-à-vis de l'oxygène et de l'humidité, formées d'un film mince (quelques angströms) d'un diélectrique comme LiF ou CsF sur lequel on dépose l'aluminium. De manière symétrique, le

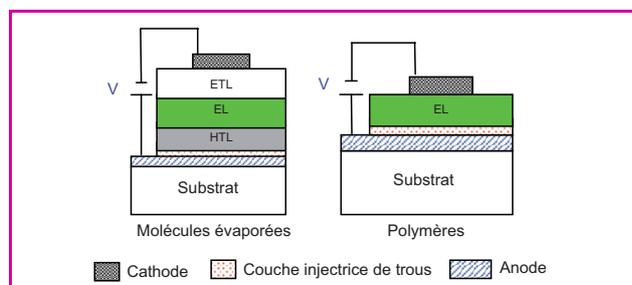


Figure 6 - Structure simplifiée des diodes EL à base de molécules de faible masse molaire et de polymères.

L'épaisseur totale des matériaux organiques est de l'ordre de 100 nm. ETL : couche transporteuse d'électrons ; EL : matériau EL ; HTL : couche transporteuse de trous.

niveau de Fermi de l'anode doit être voisin de la HOMO du matériau. De plus, l'anode doit être transparente. L'oxyde d'indium et d'étain (ITO) s'est rapidement imposé comme anode dans les diodes EL organiques.

Enfin, l'injection de trous est améliorée en interposant un film conducteur mince (quelques nm d'épaisseur) entre l'ITO et les matériaux organiques. Typiquement, la phtalocyanine de cuivre et le polymère, complexe à transfert de charge PEDOT/PSS⁽²⁾, sont respectivement utilisés dans les dispositifs EL à base de petites molécules et de polymères.

Les caractéristiques luminance-tension et efficacité lumineuse-tension des dispositifs EL ont un comportement fortement non linéaire et présentent une tension seuil qui autorise le multiplexage des afficheurs fabriqués à partir de ces matériaux. L'autre avantage des EL organiques est leur faible tension seuil (de 3 à 5 V). Enfin, des luminances crêtes très élevées peuvent être obtenues (quelques dizaines de milliers de cd/m^2 , cd : candela).

Les matériaux

Deux familles de matériaux sont en compétition : les molécules de faible masse molaire (étudiées depuis le début des années 60) et les polymères π conjugués découverts en 1990 par le groupe de Cambridge. Elles se distinguent par les techniques de dépôt en couche mince qui leur sont associées. Ainsi, les molécules de faible masse molaire sont déposées par évaporation sous vide ($P < 10^{-6}$ mm Hg), alors que les films de polymères sont obtenus par centrifugation (« spin-coating »). Aujourd'hui, les diodes préparées à partir des molécules de faible masse molaire présentent des efficacités et des durées de vie un peu meilleures que celles obtenues avec les polymères π conjugués. Ceci est en partie dû à la très grande facilité de réalisation de diodes multicouches et à la possibilité de doper les couches émettrices par co-évaporation.

La figure 7 donne quelques exemples de complexes organométalliques fluorescents et phosphorescents et de polymères π conjugués.

Les performances des diodes EL obtenues en 2005 (tableau 1) sont suffisantes pour autoriser la fabrication à l'échelle industrielle d'afficheurs plus ou moins complexes. On note que quel que soit le type de matériau utilisé, le bleu souffre d'une durée de vie encore trop limitée.

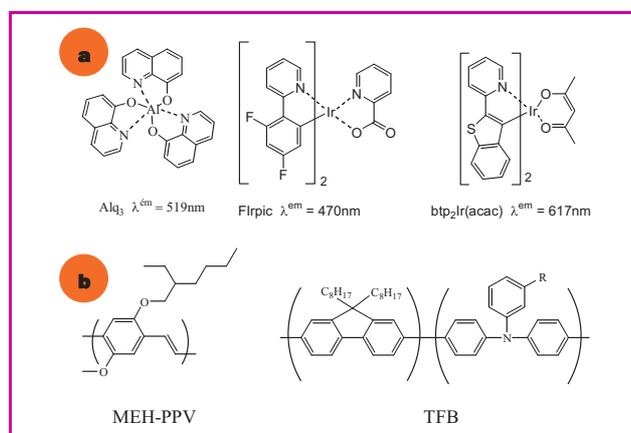


Figure 7 - a) Exemples de complexes EL.

Alq₃ est fluorescent, tandis que les complexes à base d'iridium sont phosphorescents.

b) Exemples de polymères EL.

Le MEH-PPV émet dans le rouge orange et le TFB émet dans le bleu.

Tableau I - Performances des diodes obtenues à partir de molécules évaporées (rouge Kodak, vert Idemitsu Bleu Kodak) et de polymères.

Matériau	Durée de vie (h)	Luminance (cd/m ²)
Rouge Kodak	37 000	1 000
Vert Idemitsu	40 000	1 000
Bleu Kodak	12 000	500
Polymère rouge	> 70 000	100
Polymère jaune	>130 000	100
Polymère vert	> 70 000	100
Polymère bleu	> 17 000	100

Les applications en visualisation

Les matériaux organiques EL offrent la possibilité unique d'obtenir des écrans émissifs en couleur, extraplats, potentiellement sur substrat souple et fonctionnant sous basse tension, ce qui explique l'effort important de R & D fait dans ce domaine à travers le monde. Outre la quête de matériaux toujours plus performants, un certain nombre de verrous technologiques restent encore à lever, en particulier la mise au point de techniques de dépôt industrialisables, permettant d'accéder aux écrans pleine couleur, et l'adressage.

Les techniques de dépôt

Il existe aujourd'hui des machines en ligne de dépôt sélectif de molécules émettant dans le rouge, le vert et le bleu. Elles assurent toutes les étapes de fabrication depuis la purification ultime des matériaux jusqu'à l'encapsulation, en passant par les différents dépôts de molécules sur le substrat. La technique d'évaporation à travers un masque présente cependant l'inconvénient de ne pas pouvoir assurer simultanément la réalisation de petits pixels pour la haute résolution et le dépôt sur des dalles de verre de grande dimension (pour la production de masse). Pour cette raison, d'autres approches sont dans la phase de mise au point, parmi lesquelles :

- le transfert thermique induit par laser (LITI pour « laser induced thermal imaging »), introduit par Samsung en collaboration avec 3M ;
- le transfert par sublimation induite par un laser (RIST pour « radiation-induced sublimation transfer »).

C'est la technique jet d'encre (IJP pour « ink jet printing ») qui s'est imposée ces dernières années pour réaliser les écrans EL pleine couleur à base de polymère. L'une des difficultés de cette voie réside dans le positionnement des gouttes d'encre sur le substrat et l'obtention après évaporation des solvants d'un film d'épaisseur homogène.

L'adressage

Les caractéristiques des diodes EL organiques sont fortement non linéaires et présentent un seuil. Le multiplexage direct des écrans est donc possible. Néanmoins, l'émission par les organiques EL ne s'accompagnant pas du phénomène de rémanence, cette technique d'adressage peu coûteuse est limitée aux afficheurs de faible résolution. L'utilisation d'une matrice active (TFT) permet de s'affranchir de ce problème et d'accéder à des écrans de haute définition. L'adressage dans le cas de l'EL se faisant en courant, deux transistors au moins sont donc nécessaires par pixel. Par ailleurs, il semble que l'utilisation du silicium polycristallin,

dont la mobilité est beaucoup plus élevée que celle du silicium amorphe, soit indispensable pour réaliser les transistors. Mais le manque d'homogénéité de la tension seuil présentée par les TFT fabriqués sur un même substrat de grande dimension implique d'améliorer la conception de la matrice active afin d'obtenir un pixel tolérant. Cette situation conduit à utiliser jusqu'à quatre transistors par pixel, ce qui diminue le taux d'ouverture de l'écran. Un moyen de pallier cette difficulté est de considérer la possibilité d'émettre par le haut (« top emission »), c'est-à-dire à travers la face opposée à celle où se trouve la matrice active. Des démonstrateurs ont déjà été proposés, en particulier par Hitachi Displays Ltd.

Les réalisations industrielles

Il y a une vingtaine de sites de production dans le monde appartenant à Pioneer, RiTdisplay, Samsung SDI, TDK, Sanyo/Kodak(AM), Teco, Univision, Ness pour les molécules évaporées, et Delta Optronics, DuPont/RiTdisplay, OSRAM pour les polymères.

En 2003, la vente des afficheurs à matrice passive est estimée à vingt millions et celle des afficheurs à matrice active à deux millions, soit un chiffre d'affaires de 219 millions de dollars. On retrouve les afficheurs à matrice passive dans les panneaux frontaux des autoradios, les téléphones portables, les lecteurs MP3. Enfin, des microdispositifs de visualisation sont proposés par Micro Emissive Displays et eMagin.

Conclusions

Les diodes électroluminescentes sont devenues des composants grand public incontournables, en particulier dans le domaine de l'éclairage. Elles offrent en outre des perspectives intéressantes en optoélectronique.

Les énormes progrès réalisés depuis la découverte de l'électroluminescence dans les matériaux organiques ont permis la création d'une industrie des petits afficheurs passifs. Pour aller au-delà, il est indispensable d'améliorer les durées de vie et de diminuer les coûts de production, ce qui semble difficile dans la mesure où le développement et la production se font en même temps. Il n'en demeure pas moins que les EL organiques, par la qualité des images qu'ils génèrent, sont voués à prendre une part du marché des écrans plats.

(1) lm : le lumen (du latin, *lumière*) est l'unité dérivée du système international utilisée pour le flux lumineux.

(2) PEDOT/PSS : poly(3,4-éthylène dioxythiophène)/poly(styrènesulfonique acide).

[1] Destriau G., *J. Chim. Phys.*, **1936**, 33, p. 587.

[2] Pope M., Kallmann H.P., Magnante P., *J. Chem. Phys.*, **1963**, 38, p. 2042.

Pour en savoir plus

- Moliton A., *Optoélectronique moléculaire et polymère : des concepts aux composants*, Collection Technique et Scientifique des Télécommunications, Springer, **2003**.
- Organic Electroluminescence, Z.H. Kafafi (ed), Taylor & Francis, **2005**.



P. Le Barroy

Pierre Le Barroy est responsable du Laboratoire de chimie des matériaux organiques et **Jean-Paul Pocholle** est expert scientifique senior, Thales Research and Technology-France*.



J.-P. Pocholle

* Thales Research and Technology-France, Route Départementale 128, 91767 Palaiseau.
Courriel : pierre.lebarroy@thalesgroup.com