

Que la lumière blanche soit

Les diodes électroluminescentes fabriquées aujourd'hui émettent des longueurs d'onde dans l'ensemble du spectre visible, entre 400 nanomètres et 750 nanomètres. La couleur d'une diode électroluminescente classique dépend du semi-conducteur utilisé : avec les phosphures, on obtient des longueurs d'onde allant du rouge au jaune-vert et, avec les nitrures, du vert au bleu. En revanche, la lumière blanche ne correspond pas à une longueur d'onde précise, mais à un mélange de plusieurs longueurs d'onde. La production de lumière blanche à partir de diodes électroluminescentes nécessite la combinaison de plusieurs couleurs.

Étudions un diagramme de chromaticité : toutes les couleurs visibles sont représentées. Quand on dispose d'une diode rouge (R), d'une verte (V), et d'une bleue (B), on peut les combiner et produire une multitude de couleurs en jouant sur l'intensité de chacune d'elles, et l'on peut même obtenir une lumière blanche. Les diodes blanches sont ainsi souvent constituées d'une diode rouge,

d'une bleue et d'une verte. On peut aussi utiliser une diode ultraviolette dont les photons excitent un mélange de matériaux dits « convertisseurs du lumière », qui, en se désexcitant, émettent des photons « rouges », « verts » et « bleus », qui forment une lumière blanche. Cette deuxième méthode est moins efficace que la première, car on perd beaucoup de photons par dispersion et par absorption dans le matériau fluorescent.

On peut produire une lumière blanche en combinant trois couleurs, mais aussi deux, le bleu et le jaune, par exemple. En pratique, la puce d'une diode bleue à base de nitrure de gallium est recouverte d'un matériau convertisseur de lumière, qui transforme une partie des photons « bleus » émis par la diode électroluminescente en photons « jaunes », par une succession d'excitations et de désexcitations avec émissions de photons. La proportion de photons bleus convertis dépend de l'épaisseur du matériau convertisseur. En ajustant le nombre de photons bleus et jaunes, on obtient une lumière blanche. Cette troisième solution est moins onéreuse que les précédentes. En revanche, le dépôt du convertisseur nécessite une étape supplémentaire par rapport à l'utilisation directe des diodes de couleur.

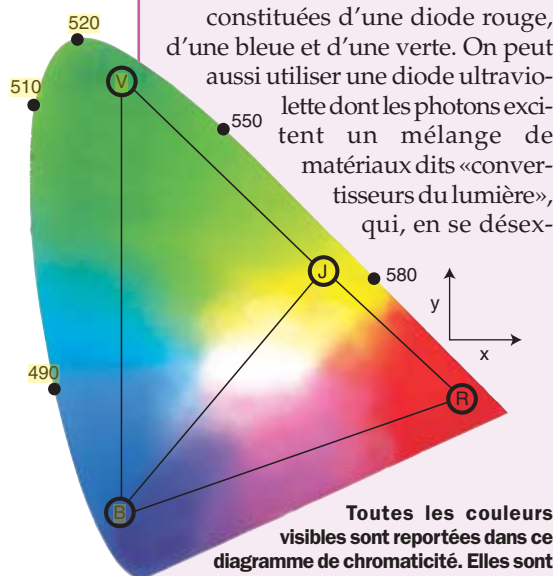
Nous avons mis au point une autre solution, qui supprime le dépôt du matériau convertisseur et réduit le coût de fabrication : on produit simultanément les photons bleus et jaunes au cœur même de la puce. Dans cette nouvelle diode blanche, la zone active de la puce (où se recombinent les électrons et les trous) n'est plus constituée d'une seule couche, mais de plusieurs, composées de différents matériaux semi-conducteurs (des nitrures de gallium capables d'émettre d'autres longueurs d'onde que le bleu-vert). Chacune des couches émet des photons d'une longueur d'onde particulière, et les photons de « couleur » différente produits par chacune des couches se combinent en une lumière blanche. Nous cherchons à optimiser le choix des longueurs d'onde et à ajuster le nombre de couches et leurs positions respectives, afin d'obtenir un blanc éclatant.

Nicolas GRANDJEAN, Centre de recherche sur l'hétéroépitaxie et ses applications à Sophia-Antipolis (CNRS)

l'indium et le phosphore par exemple, dopés avec du tellure ou du magnésium. En ajustant avec précision la concentration des éléments constitutifs, les physiciens fabriquent des diodes électroluminescentes qui émettent des longueurs d'onde rouges, orange ou jaunes. Au début des années 1970, la luminosité des diodes rouges contenant du phosphore et de l'arséniure de gallium était suffisante pour les premières calculatrices et pour les horloges à affichage numérique.

Des progrès ont encore été réalisés quand les chercheurs ont découvert que l'empilement de matériaux différents améliorerait le rendement interne de la diode. En effet, les premières diodes électroluminescentes étaient des homojonctions. Elle étaient composées d'une même couche, dopée de façon à être *n* sur une face et *p* sur l'autre, mais ne contenaient pas de couche active. Les diodes de deuxième génération sont des hétérojonctions : une couche de composition différente est introduite entre les couches *n* et *p*. Cette couche active très mince (quelques épaisseurs d'atomes) crée un « puits de potentiel » entre les couches *n* et *p*, où les électrons et les trous se recombinent. Cette couche augmente la probabilité de recombinaison et, par conséquent, le rendement.

Enfin, les cristaux que l'on fabrique aujourd'hui sont quasiment dépourvus de défauts, ce qui augmente le rendement des diodes. Une des techniques utilisées est le dépôt en phase vapeur : des gaz maintenus à haute température sont canalisés au-dessus du substrat ; ils se dégradent à cause de la température élevée, et leurs produits de décomposition se déposent en un film mince. Cette technique a été utilisée pour la première fois pour la fabrication industrielle de diodes électroluminescentes par la société Monsanto, à la fin des années 1960. En 1977, Russell Dupuis, de l'Université du Texas, mit au point un procédé différent de dépôt en phase vapeur utilisant des gaz froids dirigés sur le substrat chaud. Cette technique permet la croissance d'une grande variété de matériaux et a ouvert la porte à la fabrication des diodes de haute qualité. Shuji Nakamura, aujourd'hui à l'Université de Santa Barbara, développe chez Nichia Chemical Industries (Japon) une variante de cette



Toutes les couleurs visibles sont reportées dans ce diagramme de chromaticité. Elles sont représentées par leurs coordonnées chromatiques (x, y). Les couleurs qui constituent le contour supérieur du lobe sont des couleurs dites pures, car elles correspondent à une longueur d'onde précise (indiquée en nanomètres). Les diodes rouge (R), verte (V) et bleue (B) définissent un triangle, à l'intérieur duquel chaque couleur peut être obtenue en jouant sur l'intensité de chacune des diodes. On obtient ainsi la couleur blanche en ajoutant des photons « verts », « rouges » et « bleus », ou aussi des photons « bleus » et « jaunes » grâce à une diode jaune (J).

technique pour fabriquer, en 1993, un cristal de nitrure de gallium qui émettait de la lumière bleue, la couleur qui manquait à la panoplie des diodes électroluminescentes. En effet, les photons bleus ont une longueur d'onde plus courte, et doivent avoir une énergie supérieure à celle des photons rouges ou orange : ils sont plus difficiles à produire.

Enfin, dans la course au rendement, Michael Krames et ses collègues de la Société *Hewlett-Packard* ont établi un record en 1999 en fabriquant des diodes électroluminescentes rouges qui ont un rendement réel de plus de 55 pour cent. Ils ont enlevé le substrat (une tranche d'arséniure de gallium) originel, l'ont remplacé par une tranche transparente de phos-

phure de gallium, puis ils ont sculpté une diode en forme de pyramide inversée. Cette forme diminue le nombre de réflexions internes et augmente notablement la quantité de lumière qui s'échappe de la puce.

Une autre technologie de diodes électroluminescentes est fondée sur des matériaux organiques. L'électroluminescence des composés organiques a été observée dès les années 1960 sur l'anthracène, puis sur des polymères organiques semi-conducteurs. Depuis les années 1990, les diodes électroluminescentes organiques sont très étudiées, surtout pour la fabrication d'écrans plats flexibles. Ces diodes sont brillantes, bon marché, et disposent d'une large gamme de longueurs d'onde. Cependant, leur

Les diodes électroluminescentes éclairent les profondeurs

Lorsque les biologistes veulent filmer des animaux vivant dans les eaux profondes, tels les cachalots, ils se heurtent à de nombreuses difficultés. Ces mammifères plongent à plusieurs milliers de mètres de profondeur, où il fait nuit noire et où la pression est très élevée. En outre, toute lumière visible modifie le comportement des animaux et de leurs proies, les attire ou, au contraire, les fait fuir. L'éclairage sous-marin classique est inadapté pour les films en profondeur.

En revanche, on peut utiliser des diodes électroluminescentes compactes qui émettent une lumière dont la longueur d'onde est proche de l'infrarouge, visible par une bande vidéo, mais... pas par les animaux. Placées dans un cylindre métallique, les diodes fonctionnent comme des phares invisibles : elles illuminent les animaux présents à deux ou trois mètres de distance, sans modifier leur comportement. Le dispositif contient aussi une caméra automatique et divers équipements, tels des microphones, des capteurs

de profondeur, de température, de direction et de vitesse. Cette «caméra» est assez compacte pour être placée sur le dos d'une baleine, d'un phoque, d'un dauphin, d'un pingouin, d'une otarie, etc. On observe alors les animaux à travers les yeux de leurs congénères. À la fin du tournage, un boîtier se détache automatiquement de la caméra et remonte à la surface.

Cette caméra qui filme dans l'obscurité est le résultat de 14 années d'expérimentation. Lorsque les premières diodes électroluminescentes bleues furent commercialisées, il y a environ quatre ans, elles coûtaient 250 francs pièce, mais elles émettaient une lumière trop visible pour

les animaux qui nageaient aux alentours. En revanche, des caméras contenant des diodes électroluminescentes dont la longueur d'onde est proche de l'infrarouge évitent cet écueil, et ont été fixées sur divers animaux marins. Les biologistes ont ainsi découvert des comportements qui n'avaient jamais été observés auparavant, tels des phoques soufflant des bulles ou «chantant» lors de rituels amoureux.



CACHALOTS éclairés par les diodes électroluminescentes d'une caméra sous-marine.