

Les diodes éclairent le futur

GEORGE CRAFTORD • NICK HOLONYAK • FREDERICK KISH

Les diodes électroluminescentes sont de plus en plus utilisées, et les diodes blanches remplaceront bientôt les ampoules à incandescence découvertes par Edison il y a plus d'un siècle.

En 1995, la Fondation des sciences et de la technologie du Japon a remis, comme chaque année, le prestigieux Prix du Japon à deux scientifiques du monde entier pour leurs découvertes originales en sciences ou en technologies ; Nick Holonyak, inventeur des diodes électroluminescentes, fut récompensé pour ses travaux pionniers sur les semi-conducteurs émetteurs de lumière et sur les lasers. Interrogé sur l'avenir de cette technique, N. Holonyak se contenta de pointer le doigt vers les lampes du plafond et professa : « Tout ceci va disparaître. »

De grands changements sont en cours dans le monde de l'éclairage et de l'électronique, grâce à des dispositifs semi-conducteurs : les diodes électroluminescentes. Ces diodes sont des petites lumières, rouges ou vertes le plus souvent, présentes, par exemple, dans les ordinateurs. Elles remplacent peu à peu les ampoules classiques à incandescence, dont le filament, parcouru par un courant électrique, s'échauffe par effet Joule à plus de 2 500 °C, et émet de la lumière. Pourquoi les diodes électroluminescentes détrônent-elles les ampoules centenaires ? Parce qu'elles convertissent l'électricité en lumière colorée plus efficacement que leurs cousines à incandescence ; pour la lumière rouge, par exemple, l'efficacité est dix fois meilleure. Les diodes sont également plus résistantes : certaines, composées de nitrure de gallium, fonctionnent plus de 100 000 heures, soit dix ans en utilisation régulière, tandis que les ampoules à incan-

descence ont une durée de vie 100 fois plus courte, en moyenne. Parce que leur intensité est aujourd'hui suffisante et que la palette de couleurs qu'elles offrent est large, on utilise les diodes pour fabriquer de grands écrans d'affichage. L'exemple le plus impressionnant est sans doute l'écran géant, haut de huit étages, du Nasdaq, à New York.

Les ingénieurs s'efforcent de réduire les coûts de fabrication, d'améliorer le rendement et d'élargir encore le choix des couleurs disponibles, en y intégrant la couleur blanche. Cette couleur résulte de la somme de toutes les longueurs d'onde et, par conséquent, on ne peut pas la produire directement. Il est déjà possible de combiner les lumières de diodes électroluminescentes rouges, vertes et bleues pour produire une lumière blanche, mais de telles diodes restent onéreuses. Dès qu'elles seront bon marché, elles supplanteront les ampoules à incandescence inventées par Thomas Edison.

70 pour cent des voitures déjà équipées

Les diodes électroluminescentes rouges et orange remplacent déjà les ampoules à incandescence dans de nombreuses applications. Dans l'automobile par exemple, 60 à 70 pour cent des voitures produites en Europe utilisent des diodes électroluminescentes pour les feux de freinage (les États-Unis s'orientent dans la même direction). On utilise des diodes également pour les feux arrière, les cli-

gnotants et les feux latéraux des bus et des poids lourds. D'ici une dizaine d'années, elles seront utilisées pour la plupart des feux extérieurs, rouges et orange, des véhicules. Les feux de signalisation routière en utilisent aussi de plus en plus.

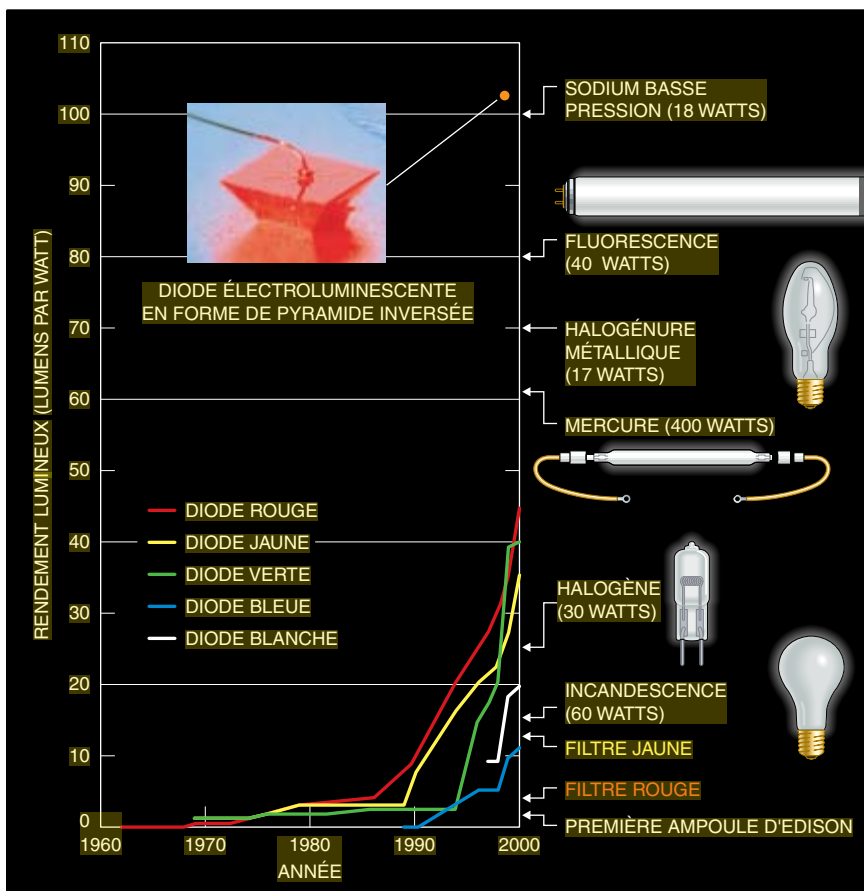
Jusqu'à présent, les feux de signalisation et les autres lampes colorées étaient des ampoules à incandescence recouvertes d'un filtre teinté. Même si les ampoules émettent une lumière qui ne coûte que quelques centimes par lumen (l'unité de mesure du flux lumineux), c'est une façon peu efficace de produire de la lumière. Un filtre rouge, par exemple, bloque environ 80 pour cent de la luminosité, de sorte que la puissance de la lumière émise par l'ampoule passe d'environ 17 à quatre lumens par watt.

Certes, chaque lumen issu d'une diode électroluminescente rouge revient à environ 90 centimes, mais la lumière émise a directement la couleur souhaitée. En outre, ces diodes ne consomment que 10 à 25 watts, tandis qu'une ampoule à incandescence de luminosité comparable consomme entre 50 et 150 watts. Ainsi, l'économie d'énergie compense le surcoût de la diode électroluminescente en un an seulement. Enfin, les coûts d'entretien et de main-d'œuvre des diodes électroluminescentes sont inférieurs à ceux des ampoules.

1. LE PLUS GRAND ÉCRAN du monde contient quelque 18 677 760 diodes électroluminescentes couvrant une surface de près de 1 000 mètres carrés. Il est placé sur la tour du marché des nouvelles technologies, le Nasdaq, à New York.



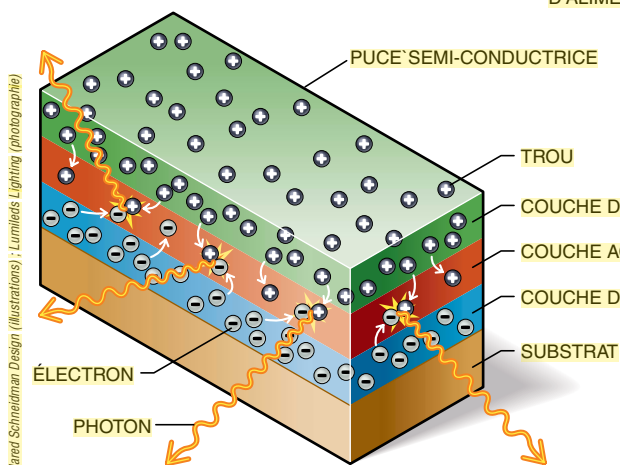
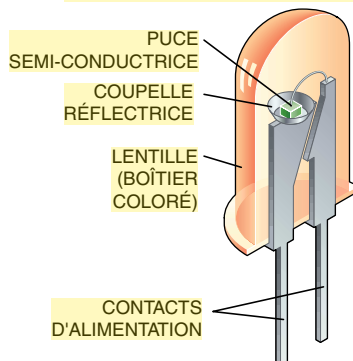
Peter Murphy



2. LES DIODES ÉLECTROLUMINESCENTES ont aujourd'hui un meilleur rendement que beaucoup d'autres types de lumière. La plus performante est une diode prototype de couleur rouge-orangée en forme de pyramide inversée.

3. LA PUCE À SEMI-CONDUCTEUR est l'élément principal de la diode électroluminescente. Une différence de potentiel appliquée sur la puce semi-conductrice repousse, vers la couche active, des «trous» (des «charges positives») de la couche de type *p*, et des électrons de la couche de type *n*. Lorsqu'ils se rencontrent, ils libèrent des photons. La «couleur» de ces photons, c'est-à-dire leur longueur d'onde, dépend de la composition chimique des couches, et non des boîtiers colorés dans lesquels les fabricants logent les diodes de manière à les identifier.

DIODE ÉLECTROLUMINESCENTE : VUE DE L'INTÉRIEUR



Les architectes d'intérieur se sont intéressés aux diodes dès l'apparition des premiers modèles à haute luminosité et en couleur, il y a quelques années. Ils combinent des diodes électroluminescentes de différentes teintes, et créent ainsi toute une gamme de couleurs. Par exemple, une lumière blanche composée de diodes électroluminescentes rouges, vertes et bleues devient plus «froide» quand on éteint la plupart des diodes rouges et qu'on allume les bleues.

Cette flexibilité va bouleverser notre utilisation de la lumière. Jusqu'à présent, pour modifier la luminosité dans une pièce, on changeait le papier peint ou l'on repeignait la pièce d'une autre couleur. Aujourd'hui, inutile de sortir les pinceaux : on ajuste la proportion des différentes longueurs d'onde émises, en jouant sur les combinaisons de diodes électroluminescentes. Le *Metropolitan Museum of Art* à New York, par exemple, a déjà choisi ce type d'éclairage pour illuminer une exposition des costumes des Beatles, en 1999 ; cet éclairage met en valeur les costumes et n'endommage pas les étoffes, car la source ne dégage pas de chaleur. De même, les photographes peuvent désormais contrôler les sources de lumière artificielle sans recourir aux différents filtres placés devant les projecteurs.

La recherche médicale s'intéresse également aux propriétés de ces diodes. Dans la lutte contre le cancer, par exemple, elles facilitent le traitement local des tumeurs, par photochimiothérapie. Cette méthode vise les tumeurs malignes peu volumineuses pour lesquelles les moyens thérapeutiques classiques sont inutilisables ou inefficaces. Tout d'abord, on injecte par voie intraveineuse un agent photosensible. Il est capté préférentiellement par le tissu tumoral, qui l'élimine plus lentement que les tissus normaux. Puis on active cet agent par un rayonnement lumineux dont la longueur d'onde est adaptée ; la substance devient toxique pour les tissus quand elle est activée, de sorte qu'elle détruit les cellules cancéreuses qui ont fixé l'agent photosensible. Grâce à des assemblages de diodes électroluminescentes, on produit ainsi un faisceau uniforme qui stimule les substances photosensibles sans chauffer la peau, car les diodes électroluminescentes ne sont pas des sources lumineuses chaudes.

Au cœur d'une diode

Pour observer en détail les diodes électroluminescentes, prenons par exemple un feu rouge de bicyclette. À l'intérieur se trouvent deux piles reliées à un circuit contenant une série de cylindres transparents et incolores, de quelque huit millimètres de hauteur et cinq millimètres de diamètre : ce sont les diodes électroluminescentes. Appuyez sur le bouton «marche» et elles deviennent rouges, avec une intensité si forte qu'on a du mal à les fixer. Si vous les arrêtez, puis que vous les examinez de près, vous verrez un fil se faufilant à travers le dispositif et une sorte de coupelle miniature à mi-hauteur. Cette coupelle est un réflecteur, où se trouve une puce de la taille d'un grain de sable, le «cœur» de la diode électroluminescente. Cette puce est constituée d'un empilement de couches : la première, déposée sur un support, présente un excès d'électrons ; elle est dite de type *n* (pour «négatif»). Une autre, située au-dessus de la puce, présente au contraire un déficit d'électrons, ou encore un excès de particules chargées positivement, nommées «trous». Ce matériau est de type *p* (pour «positif»). À la jonction de ces deux couches *n* et *p* se trouve la couche dite active, d'où la lumière est émise. Lorsqu'une tension est appliquée, les électrons et les trous se dirigent vers la couche active, où ils se rencontrent, se «recombinaient» et émettent des photons. Schématiquement, les électrons présents dans la couche active se désolent et émettent un photon. La nature et la struc-



4. LES DIODES ÉLECTROLUMINESCENTES BLANCHES existent, mais il faudra attendre une dizaine d'années avant qu'elles ne deviennent assez puissantes pour éclairer une pièce et assez bon marché pour qu'elles soient compétitives avec les ampoules classiques.

ture atomique des différentes couches déterminent le nombre de photons émis (soit le rendement de la diode électroluminescente), ainsi que leurs longueurs d'onde.

Dans les premières diodes électroluminescentes rouges, fabriquées dans les années 1960 à partir de gallium, d'arsenic et de phosphore, les électrons rencontraient rarement les trous : un seul photon rouge était émis pour 1 000 électrons qui migraient dans la couche active. Une telle diode produisait moins d'un dixième de la lumière produite par une ampoule à incandescence de puissance comparable et pourvue d'un filtre rouge. Peu à peu, le rendement des diodes électroluminescentes augmenta, surtout vers les longueurs d'onde situées dans la zone rouge du spectre visible. Aujourd'hui, le rendement interne des diodes rouges atteint 100 pour cent, c'est-à-dire que chaque électron produit un photon. Cependant, ces photons restent piégés dans la puce, et

l'on doit «extraire» cette lumière. Ainsi, le rendement réel (ou externe) des diodes électroluminescentes rouges est d'environ 25 pour cent.

Les chercheurs ont augmenté le rendement en modifiant la composition des couches. Ils les «dopent» avec des atomes différents, nommés des «impuretés». Ce dopage modifie les caractéristiques des couches. Examinons l'exemple le plus simple, le silicium. Il appartient au groupe IV de la classification périodique des éléments, c'est-à-dire qu'il possède quatre électrons disponibles pour des liaisons avec quatre autres atomes. Dans la forme cristalline du silicium, chaque atome partage ses électrons avec les atomes adjacents. Les électrons sont engagés dans ces liaisons et ne sont pas libres de se déplacer. Lorsqu'un petit nombre d'atomes du groupe III de la classification périodique, ayant trois électrons sur leur niveau d'énergie le plus élevé, par exemple le bore, sont incorporés dans un cristal de silicium, le nombre d'électrons participant aux liaisons entre les atomes est insuffisant, et des déficits d'électrons apparaissent localement, ce qui crée des trous et rend donc ce matériau – du silicium dopé au bore – de type *p*. Inversement, lorsque le silicium est dopé avec du phosphore (du groupe V du tableau périodique), qui a cinq électrons disponibles, le cristal a un excès d'électrons, ce qui rend le matériau de type *n*. Les électrons en surnombre sont libres de se déplacer. Dans les diodes électroluminescentes, le cristal n'est pas du silicium pur, mais un mélange d'éléments des groupes III et V, tels l'aluminium, le gallium, et

Diodes électroluminescentes et lasers

Quelle est la différence entre les diodes électroluminescentes et les diodes lasers ? Les deux types sont constitués de matériaux semi-conducteurs, mais ce sont des dispositifs très différents.

Les diodes lasers sont composées d'un matériau semi-conducteur placé entre deux miroirs séparés par ce que l'on nomme une «cavité de résonance». Lorsque de l'électricité traverse le semi-conducteur, il y a émission de photons, qui sont réfléchis sur les parois de la cavité dans un sens, puis dans l'autre. Ce faisant, ils excitent des électrons qui émettent, à leur tour, des photons de la même longueur d'onde. L'intensité lumineuse augmente et, parce qu'ils se réfléchissent de conserve sur les miroirs, tous les photons «marchent au pas» : ils sont en phase (on dit aussi qu'ils sont cohérents). L'un des miroirs est



LES LECTEURS DES CODES-BARRES contiennent des lasers à semi-conducteurs.

semi-réfléchissant et permet à quelques photons de s'échapper, tous de même longueur d'onde et de même phase. Ils produisent un faisceau de lumière étroit, monochromatique et intense. Ce faisceau est l'une des principales caractéristiques d'un laser. Acéré comme un scalpel, il est utilisé pour balayer et lire les sillons des disques compacts ou les codes-barres.

Au contraire, dans les diodes électroluminescentes, les photons ne sont pas confinés dans une cavité, entre deux miroirs : ils sont «incohérents». La lumière, sous forme d'un faisceau large et diffus, est composée de plusieurs longueurs d'onde, qui sont pourtant assez proches pour que l'œil les perçoive comme étant de la même couleur.