

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 sur-nombre 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.

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.

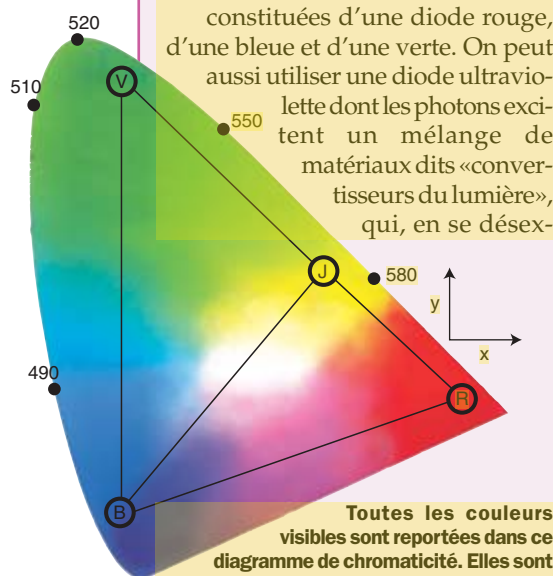
Nous avons mis au point une autre solution, qui supprime le dépôt du matériau convertisseur et réduit le coût de fabrication : on produit simultanément les photons bleus et jaunes au cœur même de la puce. Dans cette nouvelle diode blanche, la zone active de la puce (où se recombinent les électrons et 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).