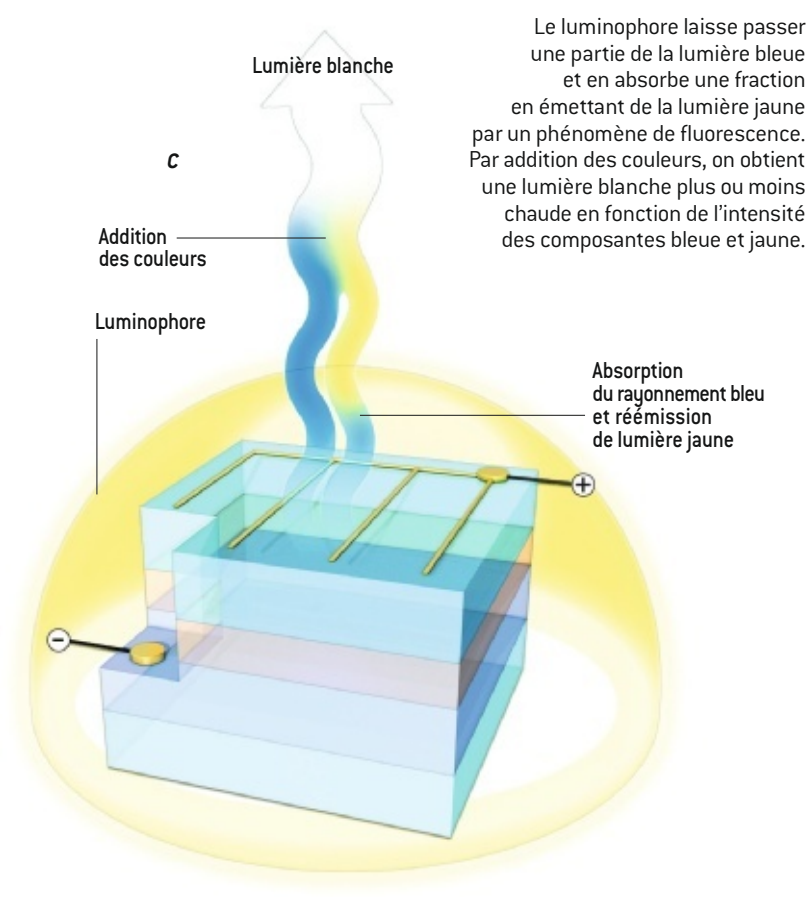




nue à partir des photons de la LED bleue dont une partie traverse le luminophore et l'autre excite le matériau fluorescent, qui réémet dans le jaune (voir l'encadré ci-contre). On peut moduler les émissions bleue et jaune en choisissant l'épaisseur du luminophore – qui absorbe ainsi plus ou moins le bleu –, de façon à produire un blanc au ton chaud ou froid. Certains luminophores ont un aspect plus orangé, ce qui donne un blanc chaud. Le rendement de conversion du luminophore est un facteur important : pour les meilleurs d'entre eux, il est de 90 pour cent et ne se dégrade pas au fil du temps. Toutefois, la fluorescence dégrade inéluctablement une partie de l'énergie, puisque la conversion d'un photon bleu en photon jaune s'accompagne d'une perte d'énergie sous forme de chaleur.

Trois LED pour de la lumière blanche ?

Une solution favorable sur le plan énergétique consisterait à s'affranchir du luminophore et à produire de la lumière blanche en combinant trois LED constituées de semi-conducteurs émettant dans le bleu, le vert et le rouge, respectivement. Si les LED bleues et rouges présentent d'excellents rendements lumineux, ce n'est pas le cas des LED vertes, conçues avec les mêmes matériaux que les LED bleues et pour lesquelles le rendement quantique interne s'écroule lorsqu'on augmente la longueur d'onde : il passe de 90 à 30 pour cent. Si les semi-conducteurs à base de nitrure de gallium sont peu performants dans le vert, les autres matériaux ne font guère mieux. C'est le *green gap*, qui est au cœur des recherches dans le domaine des matériaux pour l'optoélectronique.

Une lampe composée de trois LED serait complexe à réaliser, car en plus du manque de vert efficace, le rendement des LED rouges et leurs longueurs d'onde varient avec la température. La lampe nécessiterait alors un système d'alimentation complexe, qui pourrait inclure par exemple un contrôle continu de la qualité du blanc. Si ces problèmes étaient résolus, cette lampe serait sans doute la source de lumière idéale : elle présenterait un excellent rendement lumineux et pourrait fournir un blanc modulable à volonté, capable de reproduire l'atmosphère bleutée de l'aube ou le rougeolement du couchant.

Les lampes à LED blanches disponibles sur le marché ont des caractéristiques

2,7 électronvolts, il faut exciter un électron avec la même énergie. Or l'énergie d'un électron est le produit de sa charge électrique par la tension appliquée. Idéalement, une LED bleue devrait ainsi fonctionner avec une tension d'environ 2,7 volts. Cependant, si la conductivité électrique des matériaux est mauvaise ou si les contacts métalliques déposés sur les semi-conducteurs présentent une certaine résistance, il faut augmenter la tension d'alimentation.

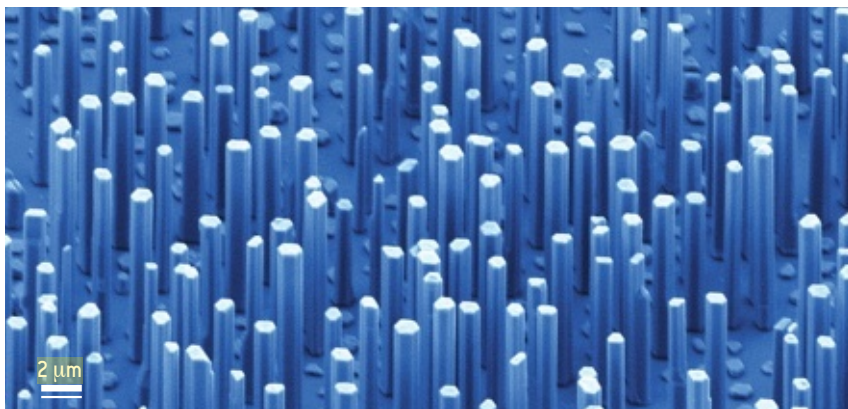
Ce problème est d'importance avec les LED au nitrure de gallium, car elles fonctionnent avec un courant intense. En effet, le nitrure de gallium étant coûteux, on l'utilise dans des dispositifs de petite taille. Dès lors, pour compenser les dimensions réduites et produire un maximum de lumière, un courant élevé, de l'ordre de l'ampère, est nécessaire. Mais, en plus d'abaisser le rendement à la prise, les effets résistifs se traduisent par un échauffement notable du dispositif, qui peut détériorer ses performances et sa durée de vie.

La qualité des matériaux et des contacts dans les LED au nitrure de gallium a connu

d'importants progrès, mais l'usage de courants intenses se heurte à un autre phénomène qui limite le rendement. L'efficacité peut chuter de plus de 50 pour cent entre sa valeur maximale obtenue à faible courant (typiquement quelques milliampères pour un dispositif de un millimètre carré) et celle mesurée à un ampère.

Ce phénomène serait dû à « l'effet Auger », où l'énergie libérée par la recombinaison électron-trou ne se retrouve pas sous forme de photon, mais est transférée à un électron de la bande de conduction sous la forme d'énergie cinétique. Comme cet effet est proportionnel au cube de la densité de porteurs de charge, il devient vite prépondérant aux courants intenses. Ainsi, les LED blanches sont généralement alimentées par un courant plus faible, de l'ordre de 0,35 ampère.

Malgré toutes les difficultés mentionnées, il est aujourd'hui possible de produire des LED bleues efficaces. Pour obtenir de la lumière blanche, la LED est encapsulée dans un luminophore, un matériau fluorescent. La lumière blanche est alors obtenue



© J. Embrey, CEA INAC

2. DES COLONNES DE NITRURE DE GALLIUM de quelques centaines de nanomètres de diamètre, observées au microscope électronique à balayage, sont une piste d'avenir pour fabriquer des cristaux sans défauts sur un substrat de silicium. Chaque colonne pourrait être transformée en une LED. Mises en parallèle, ces LED formeraient des lampes aux performances exceptionnelles.

■ L'AUTEUR



Nicolas GRANDJEAN est professeur de physique et dirige l'Institut de physique de la matière condensée à l'École

polytechnique fédérale de Lausanne (EPFL), en Suisse.

■ BIBLIOGRAPHIE

L. Zuppiroli et D. Schlaepfer, *Lumières du futur*, Presses Polytechniques et Universitaires Romandes, 2011.

P. Mottier, *Les diodes électroluminescentes pour l'éclairage*, Hermes/Lavoisier, 2008.

B. Johnstone, *Brilliant 1: Shuji Nakamura and the Revolution in Lighting Technology*, Prometheus Books, 2007.

très compétitives, avec un rendement lumineux s'élevant jusqu'à 100 lumens par watt (pour des densités de courant de l'ordre de 35 milliampères par millimètre carré), une bonne qualité de lumière et une durée de vie de l'ordre de 50 000 heures. Cependant, le prix d'achat est l'obstacle principal à leur diffusion massive. Il faut déboursier environ 40 euros pour une lampe à LED équivalente à une ampoule à incandescence de 60 watts.

Si les prix ont baissé de 40 pour cent aux États-Unis en 2011, de nouvelles techniques de production peuvent encore les réduire. Le nitrure de gallium est aujourd'hui fabriqué sur un substrat de saphir de 100 millimètres de diamètre. Il serait possible de doubler le diamètre du substrat d'ici quelques années.

Une autre approche serait de remplacer le saphir par du silicium, qui est moins cher et dont la taille standard est de 30 centimètres de diamètre. Le nitrure de gallium produit sur du silicium rattrape en qualité celui fabriqué sur du saphir, ce qui était le principal obstacle de cette technique.

Toujours dans l'optique de fabriquer moins cher, une solution innovante consiste à faire croître le nitrure de gallium en colonnes ou pyramides de tout petit diamètre, de 0,1 à 1 micromètre (voir la figure 2). Cette technique permet non seulement d'obtenir une qualité cristalline parfaite, mais aussi un coefficient d'extraction des photons très élevé, en raison de la grande surface présentée par cette structure. La fabrication du nitrure de gallium de qualité sur un substrat de silicium permettrait d'obtenir un semi-conducteur bon marché. Cependant, il faut garder à l'esprit

que la LED n'est qu'un des éléments qui constituent la lampe. Elle ne représente que 15 à 20 pour cent du coût total. Il faut considérer, par exemple, le système d'alimentation électrique pour adapter la tension au fonctionnement de la LED.

Un autre enjeu majeur des lampes à LED est l'aspect thermique. Le rendement à la prise est dix fois supérieur à celui d'une lampe à incandescence, mais près de la moitié de l'énergie électrique est dissipée en chaleur dans le petit volume de la LED, à cause des effets résistifs et de la perte d'énergie par la fluorescence dans le luminophore. La gestion de la température est cruciale pour ne pas endommager la lampe. Des dissipateurs thermiques en aluminium évacuent la chaleur et évitent que la LED se dégrade.

Un point à considérer lors de la conception d'une lampe à LED concerne la diffusion de la lumière. Une LED est une source lumineuse ponctuelle et, *de facto*, peu agréable pour l'œil. L'une des solutions envisagées par de nombreux constructeurs consiste à intégrer un grand nombre de LED de faible puissance afin de limiter l'éblouissement. Une autre solution repose sur l'intégration du luminophore au diffuseur de la lampe.

Des lampes peu polluantes

Les contraintes techniques pour le bon fonctionnement des lampes à LED blanches font qu'elles resteront probablement assez coûteuses à fabriquer. Néanmoins, si l'on tient compte de leur durée de vie exceptionnelle et de leur rendement, ces sources de lumière sont tout à fait compétitives. D'un point de vue environnemental, une étude du Département de l'énergie des États-Unis a comparé le cycle de vie, de la fabrication au recyclage, des lampes fluocompactes et des lampes à LED blanches. Les secondes sont beaucoup moins nocives et n'utilisent par exemple pas de mercure, contrairement aux premières.

La même étude compare aussi la consommation électrique de ces deux types de lampes de nouvelle génération. Aujourd'hui, les lampes à LED ont déjà un rendement équivalent, voire supérieur, à celui des lampes fluocompactes pour produire la même quantité de lumière. Elles présentent en plus d'importantes perspectives d'innovation et d'optimisation, ce qui devrait leur assurer un bel avenir. ■