

ultraviolets de cinq électronvolts (un électronvolt est l'énergie acquise par un électron soumis à une tension de un volt). Un photon du spectre visible a une énergie plus faible, comprise entre deux (pour le rouge) et trois (pour le bleu) électronvolts. Lors de la fluorescence, la différence d'énergie entre le photon ultraviolet absorbé et le photon visible émis est convertie en chaleur sur les parois de la lampe. Pour obtenir un rendement maximal, il faudrait exciter un atome qui retournerait à son état fondamental en émettant directement un photon de longueur d'onde correspondant à la lumière visible.

Cette idée est applicable dans les semi-conducteurs. Dans un tel matériau, les électrons ne peuvent occuper que certaines gammes d'énergie, nommées bandes. Entre la « bande de valence » – la dernière bande remplie d'électrons – et la « bande de conduction », d'énergie supérieure, il existe une bande interdite correspondant à des énergies inaccessibles aux électrons. Lorsqu'un électron est excité avec une énergie suffisante, il peut passer de la bande de valence à la bande de conduction en laissant un « trou » dans la première. Lorsqu'il revient dans son état fondamental, l'électron se recombine avec un trou de la bande de valence en émettant un photon.

L'énergie de ce photon correspond à la différence d'énergie entre les deux bandes autorisées – la hauteur de la bande interdite. Certains semi-conducteurs présentent des configurations permettant l'émission de photons de longueur d'onde appartenant au domaine visible (voir l'encadré page 35).

■ **LA LUMIÈRE BLANCHE** est le résultat de l'addition des différentes couleurs du spectre électromagnétique visible (380 à 780 nanomètres de longueur d'onde). Il est possible d'obtenir de la lumière blanche en additionnant seulement deux couleurs, telles le bleu et le jaune.

■ **LE LUMEN** est l'unité de flux lumineux. Cette grandeur tient compte de la sensibilité spécifique de l'œil humain aux différentes longueurs d'onde de la lumière visible. Le rendement lumineux d'une lampe, exprimé en lumens par watt, est le rapport du flux lumineux à la puissance électrique.

■ **LA TEMPÉRATURE DE COULEUR** caractérise la lumière blanche qui peut être « chaude » ou « froide » selon que sa composante jaune ou bleue domine.

■ **L'INDICE DE RENDU DES COULEURS** caractérise la qualité d'une lumière blanche et la fidélité du rendu des couleurs perçues. La valeur maximale est de 100 pour la lumière du Soleil.

Lorsque la source d'excitation de l'électron est un courant électrique, on parle de phénomène d'électroluminescence. Cet effet a été observé pour la première fois en 1907 par le physicien anglais Henry Joseph Round. Ce processus est aujourd'hui largement mis à profit dans les diodes électroluminescentes et les lasers à semi-conducteurs. La première LED émettant dans le spectre visible – une LED rouge à base d'arséniure de gallium – fut réalisée par Nick Holonyak en 1962.

LED bleues pour lumière blanche

Durant la décennie suivante, les chercheurs ont développé de nouveaux matériaux semi-conducteurs et le domaine d'émission des LED a été étendu au bleu, avec le carbure de silicium, et au jaune-vert, avec le phosphore de gallium. Mais à l'exception des LED rouges, dont la forte luminosité a permis de les utiliser dans les feux « stop » des véhicules, les LED bleues et vertes sont restées peu efficaces jusqu'au début des années 1990. Leurs applications se sont donc limitées surtout aux témoins lumineux et à l'affichage.

En 1993, Shuji Nakamura, alors ingénieur de l'entreprise japonaise *Nichia*, annonça la mise au point de la première LED bleue à forte luminosité, constituée de nitrure de gallium (GaN). Son rayonnement était dix fois plus intense que celui des autres LED bleues existantes. Cette étape était cruciale pour le développement des LED blanches : en ajoutant un matériau fluorescent qui absorbe une fraction de la lumière

LAMPE À INCANDESCENCE



Rendement (en lumens/watt)

12-20

Indice de rendu des couleurs

100

Durée de vie (en heures)

1 000-2 000

TUBE FLUORESCENT



Rendement (en lumens/watt)

70-120

Indice de rendu des couleurs

40-90

Durée de vie (en heures)

6 000-15 000

LAMPE FLUOCOMPACTE



Rendement (en lumens/watt)

50-80

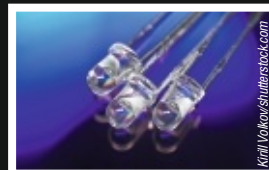
Indice de rendu des couleurs

85-90

Durée de vie (en heures)

6 000-15 000

LAMPE À LED BLANCHE



Rendement (en lumens/watt)

70-100

Indice de rendu des couleurs

80-85

Durée de vie (en heures)

25 000-50 000

1. DIFFÉRENTS SYSTÈMES D'ÉCLAIRAGE ont été développés ces 130 dernières années. Si la lampe à incandescence s'est imposée grâce à la qualité de sa lumière et au faible coût de fabrication d'une

ampoule, son rendement est très faible : une grande partie de l'énergie est dissipée sous forme de chaleur. Les lampes à LED présentent un rendement élevé, qui peut encore être amélioré.

Semi-conducteurs et jonction $p-n$

Dans un matériau cristallin, les électrons susceptibles de conduire le courant occupent des niveaux d'énergie inclus dans deux bandes d'énergie (la bande de valence et la bande de conduction) séparées par une bande interdite ou *gap*. Dans un semi-conducteur, aucun électron n'est dans la bande de conduction à température ambiante, car l'énergie thermique est négligeable par rapport à l'énergie du *gap*. La bande de valence est complètement remplie, les électrons ne peuvent se mouvoir, à l'image d'une foule compacte. Le matériau est un isolant. Sous l'effet d'une excitation extérieure, un électron peut passer dans la bande de conduction, laissant un trou dans la bande de valence. L'électron et le trou sont alors mobiles dans le matériau. Quand l'électron revient dans la bande de valence, l'énergie qu'il perd est émise sous la forme d'un photon (a).

On peut contrôler la conductivité électrique en incorporant des atomes étrangers dans le matériau – on parle de dopage –, ce qui crée un niveau d'énergie dans la bande interdite. Un niveau d'énergie à proximité de la bande de valence peut alors piéger un élec-

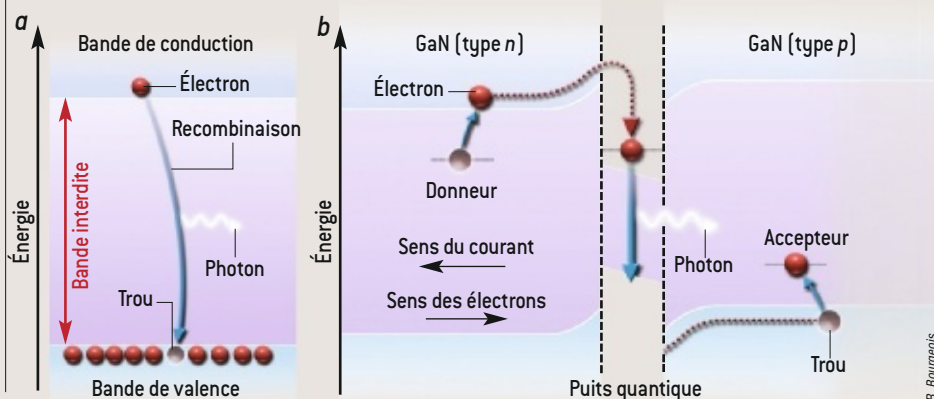
tron de cette bande – on parle d'accepteur (b). Ce « dopage de type p » libère des trous dans la bande de valence, qui peuvent circuler sous l'effet d'un champ électrique. Inversement, on peut ajouter des atomes riches en électrons, des donneurs, avec un niveau d'énergie proche de la bande de conduction. Les électrons passent alors aisément dans la bande de conduction et participent au courant. C'est le dopage de type n .

Lorsqu'on met en contact un matériau dopé n et un matériau dopé p , les porteurs de charge (les trous côté p et les électrons côté n) proches de la jonction diffusent dans le matériau voisin. Par exemple, les trous du matériau dopé p migrent dans le

matériau dopé n , puis se combinent avec les électrons de cet élément. À la jonction, il se forme une zone pauvre en porteurs de charge. La perte d'électrons du matériau dopé n crée une charge électrique positive et, symétriquement, on obtient une charge négative dans le matériau dopé p . Cette différence de charges crée, dans la jonction $p-n$, un champ électrique, qui est à l'origine de l'effet « diode » : si une tension externe est appliquée et s'oppose au champ électrique interne, l'équilibre dans la distribution des charges est rompu et un courant s'établit. Le processus de recombinaison entre électrons et trous est alors important.

Dans le nitrure de gallium, le processus de recombinaison est

principalement radiatif, avec l'émission d'un photon. Dans les LED modernes, on favorise les recombinaisons radiatives en confinant spatialement les porteurs à proximité de la jonction. Pour ce faire, on insère une couche d'un matériau de la même famille, mais ayant une bande interdite plus étroite ; on parle de puits quantique (b). Pour le nitrure de gallium, il s'agit d'une couche de 2 à 3 nanomètres contenant 15 pour cent d'indium, de façon que le *gap* corresponde à un photon bleu. Ce puits quantique, en confinant les porteurs de charge sur des niveaux d'énergie discrets – par opposition aux bandes –, favorise la recombinaison.



B. Bourgeois

bleue et réémet du jaune, il était désormais possible d'obtenir de la lumière blanche, par addition du bleu et du jaune.

Le cœur des LED blanches à haute efficacité est donc constitué de semi-conducteurs inorganiques, composés de nitrures de gallium, d'aluminium ou d'indium. Ces matériaux étaient connus depuis longtemps pour leur capacité à émettre de la lumière aux courtes longueurs d'onde et avaient fait l'objet de nombreuses études à la fin des années 1960. Afin de forcer les recombinaisons électron-trou, donc l'émission de photons, on met en contact deux semi-conducteurs « dopés » avec des impuretés différentes, de façon à augmenter le nombre de trous dans la bande de valence (dopage p) et le nombre d'électrons dans la bande de conduction (dopage n). On forme ainsi une jonction $p-n$ (voir l'encadré ci-dessus).

Les chercheurs étudiant le nitrure de gallium étaient, à l'époque, confrontés à

deux difficultés majeures : il était difficile de fabriquer des cristaux de bonne qualité, et le dopage de type p n'était pas maîtrisé. Seules quelques équipes japonaises ont poursuivi leurs travaux sur le nitrure de gallium. En 1989, l'équipe d'Isamu Akasaki, de l'Université de Nagoya, élaborait une technique pour doper le nitrure de gallium. Cette avancée permit la fabrication de jonctions $p-n$ et le développement de la LED de S. Nakamura, qui inventa par la suite le premier laser bleu, aujourd'hui au cœur des lecteurs DVD *Blu-ray*.

Du nitrure de gallium

Le désintérêt des chercheurs pour le nitrure de gallium pendant plus de 20 ans, entre 1970 et 1990, tient pour une bonne part à la piètre qualité des matériaux synthétisés. Le nitrure de gallium est difficile à produire sous forme d'un cristal massif, qui est ensuite découpé en éléments indi-

viduels (sur le même principe que les galettes de silicium de l'industrie électronique). Cela tient aux conditions extrêmes de température et de pression requises pour sa croissance (près de 2000 °C et 2 kilobars). Le nitrure de gallium existe donc presque exclusivement en couches minces, de quelques micromètres d'épaisseur, déposées sur des cristaux de nature différente tels que le saphir.

Cependant, faire croître du nitrure de gallium sur du saphir n'est pas aisé, leurs natures chimiques et leurs structures cristallines étant très différentes. Comme l'espacement entre les atomes du substrat et ceux du nitrure de gallium est différent, des défauts nommés dislocations se forment dans le semi-conducteur pour raccorder les mailles cristallines à l'interface. On dénombre près d'un milliard de dislocations par centimètre carré, densité si élevée que l'émission de lumière par le semi-conducteur n'est, en principe, plus