

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-

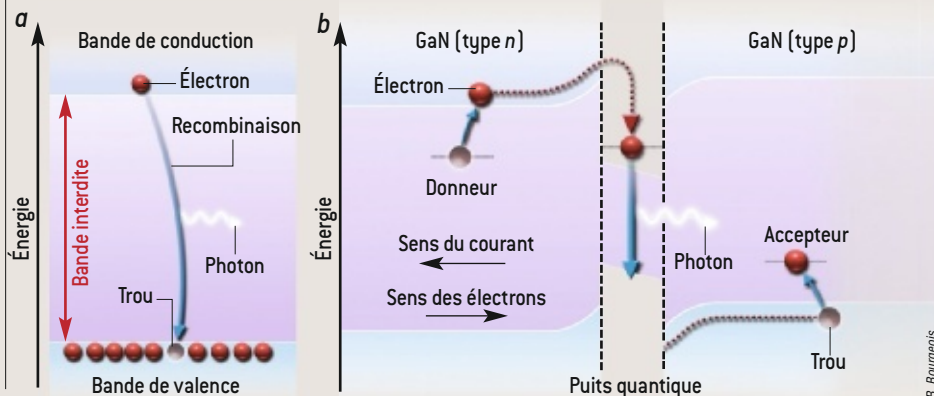
tron de cette bande – on parle d'accepteur (b). Ce « dopage de type p » libère des trous dans la bande de valence, qui peuvent circuler sous l'effet d'un champ électrique. Inversement, on peut ajouter des atomes riches en électrons, des donneurs, avec un niveau d'énergie proche de la bande de conduction.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



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

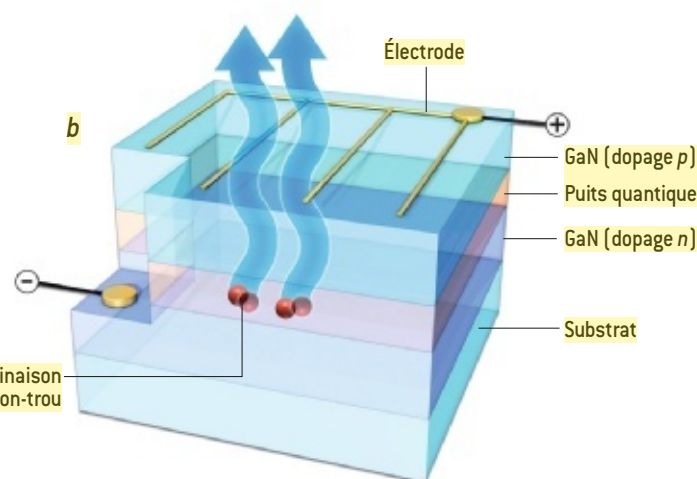
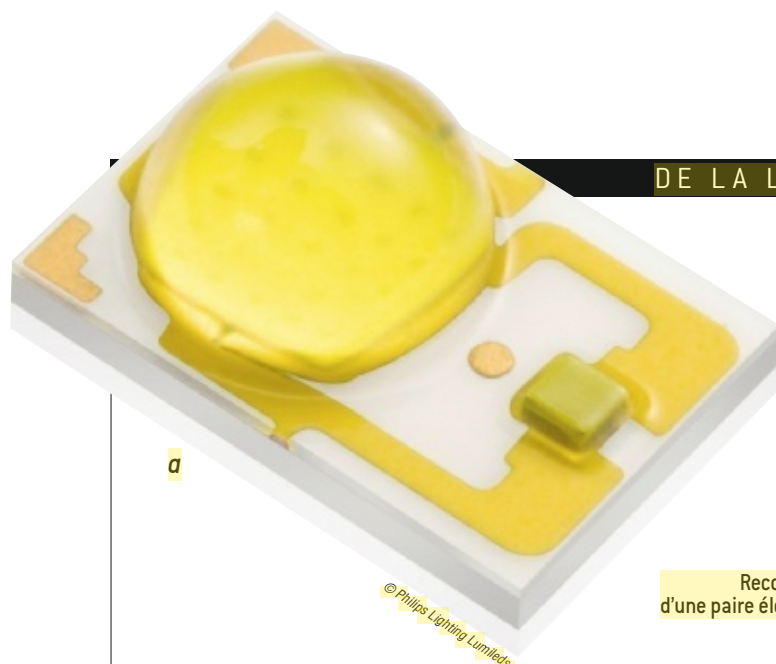
deux difficultés majeures : il était difficile de fabriquer des cristaux de bonne qualité, et le dopage de type p n'était pas maîtrisé. Seules quelques équipes japonaises ont poursuivi leurs travaux sur le nitrure de gallium. En 1989, l'équipe d'Isamu Akasaki, de l'Université de Nagoya, élaborait une 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



Le cœur d'une LED blanche (a) est constitué d'une LED bleue. Celle-ci (b) se compose généralement d'un substrat en saphir sur lequel sont déposées des couches de nitrure de gallium de quelques micromètres d'épaisseur. Des atomes de silicium sont incorporés dans la première couche de nitrure de gallium pour obtenir un dopage de type *n*. La couche supérieure a un dopage de type *p* grâce à l'insertion d'atomes de magnésium. Entre ces deux couches est placé un puits quantique (une ou plusieurs couches) composé d'un alliage de nitrure de gallium et d'indium d'une épaisseur de quelques nanomètres. L'ensemble est relié à une alimentation électrique. Pour cela, on dépose un contact métallique sur le nitrure de gallium de type *p*

en prenant soin de ne pas recouvrir toute la surface, pour ne pas absorber la lumière émise. Le deuxième contact est placé sur la couche de type *n* après gravure de la structure. La taille des LED varie de 0,3 millimètre de côté pour les LED standards à plus d'un millimètre pour les LED blanches de puissance.

Dans le puits quantique, les électrons et les trous se recombinent et émettent un rayonnement bleu (b). La LED est recouverte d'un luminophore qui absorbe de la lumière bleue et réémet dans le jaune (c). L'épaisseur du luminophore est choisie de telle sorte qu'une partie seulement de la lumière bleue est absorbée. En ajustant les rapports d'intensité entre bleu et jaune, la lumière perçue est blanche.

possible. Ces défauts créent en effet des niveaux d'énergie autorisés dans la bande interdite. Les électrons ne passent alors plus directement de la bande de conduction à la bande de valence en émettant un photon visible. Ils sont captés par ces nouveaux états, des « pièges » qui dissipent l'énergie de l'électron sous forme de vibrations du réseau cristallin. Il n'y a plus émission de photon : le retour à l'état fondamental de l'électron est « non radiatif ».

On a pu contourner cet obstacle dans les LED bleues à base de nitrure de gallium et obtenir un bon rendement quantique interne. Ce dernier est défini comme le rapport du nombre de photons émis au nombre d'électrons injectés provenant du courant électrique qui alimente la jonction *p-n*. Si les électrons étaient captés par les pièges non radiatifs, le rendement quantique interne serait très faible. Cependant, en ajoutant dans le semi-conducteur une couche de quelques nanomètres d'épaisseur de nitrure de gallium contenant de l'indium, on crée un puits quantique, où les électrons et les trous tombent (voir l'enca-

dré page 35). Les puits quantiques constitués de nitrure ont la particularité de piéger les électrons et les trous qui n'ont plus la possibilité de se déplacer et, ainsi, rencontrer une dislocation. En revanche, les porteurs de charge se recombinent et donnent ainsi lieu à une émission de photons.

Extraire les photons

Il ne suffit pas d'avoir un excellent rendement quantique interne, encore faut-il pouvoir extraire les photons du cœur de la LED avant qu'ils ne soient réabsorbés par le matériau lui-même. Or du fait de la forte interaction entre la lumière et la matière dans les semi-conducteurs, l'indice de réfraction est élevé (2,4 pour le nitrure de gallium). Le photon doit parvenir quasi perpendiculairement à la surface pour s'échapper ; sinon, il est réfléchi vers l'intérieur du matériau et finit par être réabsorbé. Seule une petite fraction de photons sortira de la LED.

Pour y remédier et augmenter le rendement, deux approches sont possibles.

D'une part, on peut réduire le volume total du dispositif, afin de limiter la probabilité que le photon soit réabsorbé. Pour ce faire, la couche de semi-conducteur doit être très mince, inférieure au micromètre, ce qui limite le trajet du photon et les risques d'absorption. D'autre part, on peut limiter les réflexions internes multiples si la surface est très rugueuse : un plus grand nombre d'orientations de la surface augmente la probabilité que le photon y arrive avec un bon angle. Le coefficient d'extraction – la proportion de photons qui sortent de la LED – dans une LED bleue dépasse 90 pour cent. Mais une part des photons est perdue à cause d'autres phénomènes de réflexion et d'absorption qui apparaissent lors de l'intégration de la LED au sein de la lampe.

Le rendement quantique interne et l'efficacité d'extraction ne sont pas tout. Il faut aussi considérer le rendement à la prise, c'est-à-dire la puissance optique émise par rapport à la puissance électrique injectée. Il est de 60 pour cent pour les meilleures LED bleues. Pourquoi n'est-il pas plus élevé ? Pour obtenir un photon bleu de