

Zeitschrift: Bulletin Electrosuisse
Herausgeber: Electrosuisse, Verband für Elektro-, Energie- und Informationstechnik
Band: 105 (2014)
Heft: 1

Artikel: La principe de fonctionnement des LED blanches et les développements futurs
Autor: Grandjean, Nicolas
DOI: <https://doi.org/10.5169/seals-856177>

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. [Siehe Rechtliche Hinweise.](#)

Conditions d'utilisation

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. [Voir Informations légales.](#)

Terms of use

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. [See Legal notice.](#)

Download PDF: 19.03.2025

ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, <https://www.e-periodica.ch>

Le principe de fonctionnement des LED blanches et les développements futurs

Un pas de plus vers la lampe idéale

De l'ampoule à incandescence aux tubes fluorescents, des lampes fluocompactes aux lampes à LED, l'éclairage artificiel évolue avec comme objectif de se rapprocher de plus en plus de la lampe idéale. Les LED ont permis d'accomplir un pas décisif dans cette direction. Cet article décrit le fonctionnement, la réalisation et les performances de ces dernières, de la jonction p-n au dispositif final, soit la lampe à LED. Un aperçu des tendances et développements futurs dans le domaine est également donné.

Nicolas Grandjean

Autant de lumière produite par un volume de matière de 10^{-8} cm^3 que par une lampe à incandescence de 60 W ! C'est une performance que seules les LED blanches sont aujourd'hui capables de réaliser. Non seulement le volume est infiniment plus petit, mais le rendement énergétique est très largement supérieur. C'est en définitive une véritable révolution de l'éclairage qui se profile sous l'impulsion de ces sources lumineuses à « l'état solide ».

La fin du corps noir

Revenons un instant sur le développement historique des sources d'éclairage artificielles afin de mieux comprendre l'évolution de leurs performances et de définir par la suite ce que serait la lampe idéale.

Les sources thermiques

Au commencement fut le feu et ses déclinaisons sous la forme de torches, de lampes à huile et, dès la fin du 19^e siècle, de becs de gaz. À la même époque, Thomas Edison perfectionne la lampe à incandescence inventée par Joseph W. Swan. Au final le principe est toujours le même : porter de la matière à haute température pour produire de la lumière. Derrière ce phénomène se cache la loi du « corps noir » qui a valu à Max Planck le prix Nobel de physique en 1918.

La **figure 1** représente les spectres d'émission pour différentes températures : celle de la surface du soleil

(5700 K), celle du filament d'une lampe à incandescence (2700 K), et celle à laquelle un objet devient visible, c'est-à-dire rouge sombre (870 K). Deux informations peuvent être extraites de cette figure :

- La température doit être suffisamment élevée pour couvrir l'ensemble du spectre visible (de $0,4 \mu\text{m}$ à $0,8 \mu\text{m}$).
- La plus grande partie de l'émission se produit en dehors du spectre visible, notamment dans le domaine infra-rouge.

Le rendement lumineux d'une lampe à incandescence est donc par principe très faible. Il est défini par le rapport entre l'intensité de la lumière perçue par l'œil et la puissance électrique. Il s'exprime en lumen par watt (lm/W). Le rendement d'une lampe à incandescence standard est de 15 lm/W et atteint 30 lm/W pour certaines lampes halogènes. Comme il sera montré par la suite, ces valeurs sont très éloignées du rendement lumineux théorique maximal.

Exploitation de la fluorescence

Un pas vers les hauts rendements lumineux a été franchi au cours du 20^e siècle avec le développement des lampes fluorescentes qui affichent aujourd'hui 100 lm/W sous forme de tubes et 40 à 60 lm/W pour les ampoules compactes. Ces sources lumineuses constituent la première grande rupture technologique après des millénaires passés à s'éclairer avec des « corps chauds ». Le principe est le suivant : une décharge électrique produite dans un gaz excite des atomes qui, revenant à leur état fondamental, émettent des photons de longueur d'onde λ fixée par la relation :

$$\lambda = hc / \Delta E \quad (1)$$

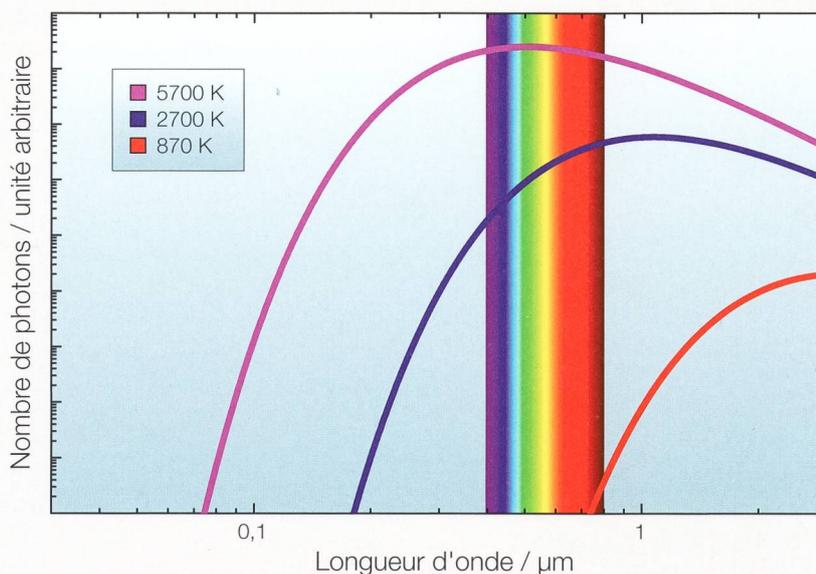


Figure 1 Spectre d'émission du corps noir pour différentes températures : soleil (5700 K), lampe à incandescence (2700 K) et 600 °C (870 K), ce qui correspond au début de l'émission dans le visible.

avec h la constante de Planck, c la vitesse de la lumière et ΔE la différence d'énergie entre niveaux électroniques.

Les lampes à vapeur de sodium haute pression, largement répandues dans les espaces publics, fonctionnent sur ce principe. Elles possèdent un rendement de 150 lm/W, le plus élevé de toutes les sources lumineuses commerciales. Malheureusement, il n'est actuellement pas possible de créer de la lumière blanche par combinaison de différentes espèces atomiques. La solution consiste alors à générer des photons de haute énergie (lumière UV) par excitation d'atomes de mercure qui à leur tour excitent des matériaux fluorescents (luminophores) déposés sur les parois de la lampe.

Le résultat est efficace, mais le rendement lumineux est réduit par effet de cascade d'énergie puisque des photons UV d'une énergie de 5 eV donnent lieu à des photons dans le spectre visible, c'est-à-dire d'énergie comprise entre 2 et 3 eV. Cette perte d'énergie se retrouve sous forme de chaleur, dont tout un chacun peut faire l'expérience en touchant les parois de la lampe.

Vers la lampe idéale

Ces constatations donnent une idée un peu plus précise de ce que devrait être à même de faire une lampe idéale : produire uniquement de la lumière blanche avec un rendement de conversion de l'énergie électrique de 100%. Une telle lampe aurait un rendement lumineux d'environ 350 lm/W. À noter que cette valeur est indicative car elle dépend sensiblement de la composition du spectre de lumière blanche. À ce propos, il convient de définir plus précisément ce que l'on entend par lumière blanche.

Le rendu des couleurs

La lumière blanche est généralement considérée comme un spectre plus ou moins continu dans le domaine visible. Or l'œil peut percevoir du blanc avec le stimulus de seulement deux couleurs, le bleu et le jaune. Mais si l'œil juge cette lumière blanche comme parfaite, les objets éclairés sont eux très sensibles à la composition spectrale. Aussi a-t-on introduit un indice de rendu des couleurs (IRC) qui permet de qualifier la qualité de la lumière.

Un IRC de 100 correspond à la lumière du jour, les lampes à incandescence en sont très proches. Un IRC de 80 indique une lumière de piètre qualité, plutôt destinée à un éclairage urbain ou industriel. Il faut compter un IRC d'au moins 85, voire de 90, pour que le rendu des couleurs soit satisfaisant, notamment pour que les teintes rouges ressortent convenablement.

La température de couleur

Enfin, un dernier paramètre permet de distinguer un blanc froid d'un blanc chaud, il s'agit de la température de couleur. Comme illustré dans la **figure 1**, plus la température est élevée, plus la composante dans le bleu est importante et plus le blanc sera froid ($T > 4000$ K). Réciproquement, à une température de couleur plus faible correspondra un blanc plus chaud ($T < 2700$ K).

La LED à semi-conducteur

Le principe d'une diode électroluminescente ou LED, abréviation de « light emitting diode », repose sur l'utilisation d'un matériau semi-conducteur dont la caractéristique principale est l'existence de deux bandes d'énergie pour les élec-

trons, appelées bande de valence et bande de conduction. La différence d'énergie entre celles-ci est appelée bande interdite (ou gap).

Lorsqu'un semi-conducteur parfait (sans défauts ni impuretés) possède un gap largement supérieur à l'énergie thermique à température ambiante ($kT = 25$ meV), il devient isolant : la bande de valence est totalement occupée par les électrons, donc pas de déplacement possible de ceux-ci, et la bande de conduction est parfaitement vide. Il devient par contre conducteur à haute température si une fraction non négligeable des électrons de la bande de valence passe dans la bande de conduction par activation thermique.

Le dopage des semi-conducteurs

Il est aussi possible de contrôler la conductivité électrique d'un semi-conducteur en incorporant dans le matériau des atomes exogènes dont la dernière couche électronique possède un électron de plus (atome donneur) ou de moins (atome accepteur). Cette technique est appelé « dopage » et les impuretés « dopants » (**figure 2a**).

Dopage de type n

À titre d'exemple, des atomes d'arsenic (As) rendent le silicium (Si) conducteur. L'électron supplémentaire de l'As passe sous l'effet de l'activation thermique dans la bande de conduction. Le transport de courant intervient uniquement dans cette dernière et la conductivité dépend de la concentration en As. Les niveaux de dopage sont plutôt faibles et se situent généralement entre 10^{15} et 10^{19} atomes/cm³, à comparer aux 10^{22} à 10^{23} atomes/cm³ pour le semi-conducteur lui-même.

Dopage de type p

Dans le cas du dopage avec des atomes accepteurs (exemple du bore dans le silicium), un électron de la bande de valence est piégé sur l'impureté, laissant derrière lui une lacune dans la bande de valence. Cette lacune est appelée un « trou » et est l'équivalent de l'électron dans la bande de conduction, mais avec une charge associée positive. Le courant est vu comme le déplacement de ces trous dans la bande de valence.

En résumé, il est non seulement possible de contrôler la conductivité d'un semi-conducteur, mais aussi de choisir le type de conductivité : par électrons dans la bande de conduction (semi-conducteur de type n) ou par trous dans la bande de valence (semi-conducteur de type p).

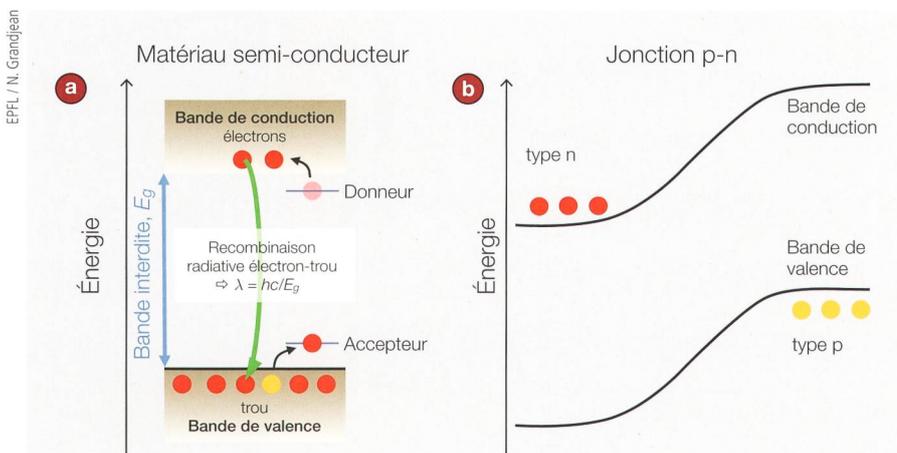


Figure 2 (a) Diagramme d'énergie d'un semi-conducteur et (b) structure de bande d'une jonction p-n à l'équilibre.

La jonction p-n

Imaginons maintenant un semi-conducteur dont une partie dopée serait de type p et l'autre de type n. Ceci n'est autre qu'une jonction p-n dont la caractéristique est d'être une diode.

Revenons sur ce qui se passe à l'interface entre type p et type n. Les électrons et les trous diffusent de part et d'autre de l'interface sous l'effet du gradient de concentration. Ce faisant, ils rompent la neutralité électrique en laissant derrière eux les impuretés chargées, positivement pour les atomes donneurs, négativement pour les accepteurs. Ces charges fixes créent à leur tour un champ électrique qui tend à ramener les électrons et les trous vers leurs couches d'origine. La

situation d'équilibre est atteinte lorsque le courant dû au champ électrique compense exactement le courant de diffusion. Le diagramme d'énergie d'une jonction p-n à l'équilibre est reporté en **figure 2b**.

Si une tension est appliquée de sorte qu'elle réduise le champ électrique interne, alors l'équilibre est rompu et un courant de diffusion apparaît. Les électrons (trous) ayant diffusé vers le type p (n) sont très minoritaires et se recombinent très rapidement avec les porteurs majoritaires que sont les trous (électrons). Ces mécanismes de recombinaison rompent localement la neutralité électrique du matériau, ce qui engendre un apport de charges de l'extérieur, d'où l'établissement d'un courant.

Émission de photons lors de la recombinaison

Les recombinaisons électron-trou peuvent être radiatives (émission de photons) ou non radiatives. L'efficacité radiative dépend de la qualité des matériaux mais surtout du type de semi-conducteur. Par exemple, le silicium possède un gap « indirect » pour lequel les recombinaisons radiatives sont fortement inhibées. Il faut donc plutôt choisir des semi-conducteurs à gap direct pour obtenir une émission de lumière efficace lors du passage d'un courant électrique (phénomène d'électroluminescence). C'est le cas de l'arséniure de gallium (GaAs) qui a permis la réalisation du premier laser à semi-conducteur utilisé à partir des années 80 dans les lecteurs CD.

Il existe une large panoplie de semi-conducteurs à gap direct couvrant un vaste domaine de longueurs d'onde. Il faut se tourner vers les nitrures d'éléments III (GaN, InN, AlN et leurs alliages) ou les semi-conducteurs II-VI (ZnSe, ZnS, MgSe et leurs alliages) pour réaliser une LED ou un laser à courte longueur d'onde et notamment dans le bleu. Les semi-conducteurs II-VI ont ainsi fait l'objet d'intenses recherches au cours des années 80 par des compagnies comme Philips ou Sony. Malheureusement, la fragilité intrinsèque de ces matériaux, liée à leur fort caractère ionique, a interdit le développement de dispositifs fiables. En parallèle, quelques groupes de recherches, principalement au Japon, travaillaient sur le semi-conducteur GaN, avec un succès très relatif. Le matériau était en effet très difficile à synthétiser et la maîtrise du dopage p restait problématique.

La première LED bleue de forte puissance

Pourtant, en 1994, Shuji Nakamura, un ingénieur jusque-là inconnu qui travaillait pour le compte d'une compagnie japonaise (Nichia) publie les résultats de ses travaux sur la première LED bleue de forte puissance à base de semi-conducteur GaN. C'est une véritable révolution. Deux années plus tard, le même chercheur annonce le premier laser bleu qui deviendra plus tard le composant clé des lecteurs DVD Blu-ray.

Il est intéressant de faire remarquer que la compagnie Nichia produisait des luminophores pour les lampes fluorescentes et que leur stratégie était sans aucun doute orientée vers la réalisation de LED blanches. Et en effet, en 1997,

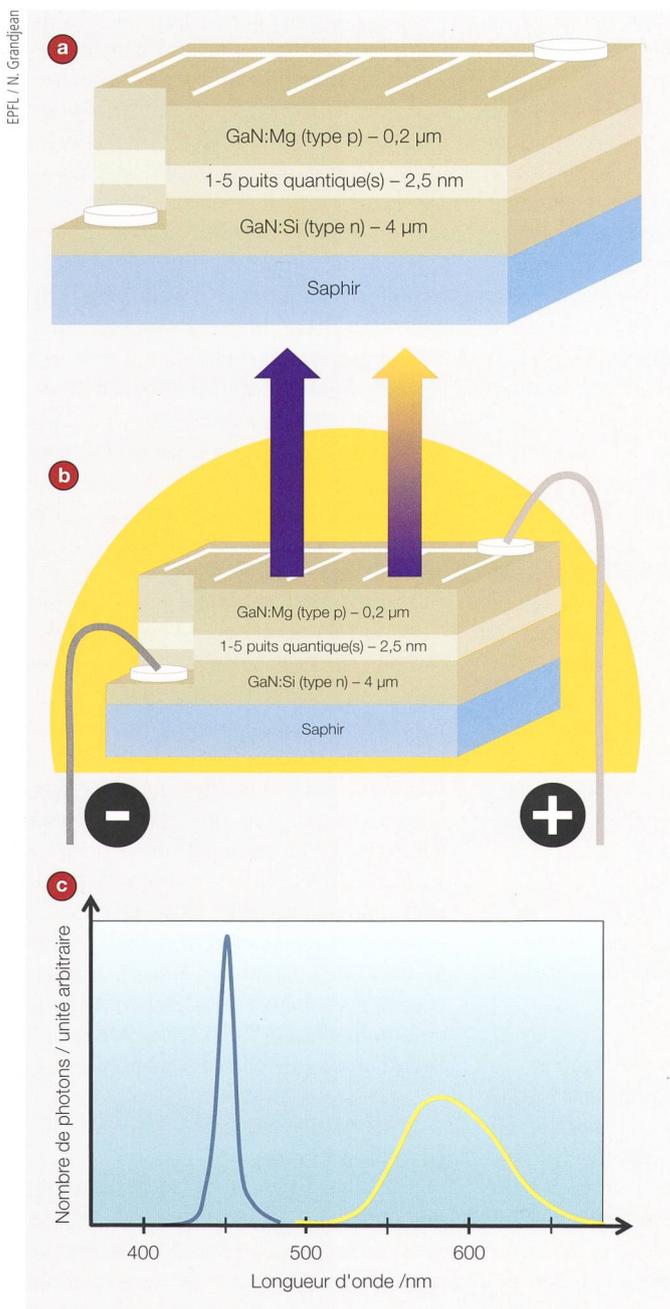
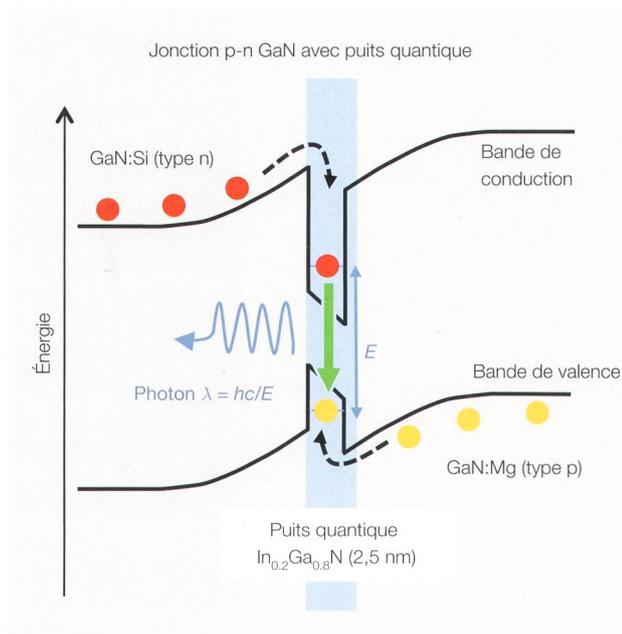


Figure 3

(a) Structure des couches d'une LED bleue. (b) LED bleue recouverte du luminophore jaune. (c) Spectre d'émission schématisé d'une LED blanche.



EPFL / N. Grandjean

Figure 4 Structure de bande d'une LED bleue à puits quantique polarisée en direct ($V > 0$).

Nichia annonce la première LED blanche par addition de couleurs en combinant une LED bleue et un luminophore jaune.

La LED blanche aujourd'hui

Les LED blanches destinées à l'éclairage sont à l'heure actuelle toutes à base de nitrures d'éléments III. La technologie la plus répandue repose toujours sur la combinaison d'une LED bleue et d'un luminophore jaune.

Fabrication

La fabrication d'une LED bleue commence par la croissance en couche mince (5 μm d'épaisseur) de ces nitrures d'éléments III sur un substrat (figure 3a). Celui-ci est en principe du saphir mais l'on trouve aussi du carbure de silicium (SiC) et plus récemment du silicium. Ces substrats ont des diamètres de 10 cm pour le saphir et jusqu'à 20 cm pour le silicium.

Au cœur de la jonction p-n réalisée à partir de couches GaN dopées Mg (type p) et Si (type n), sont introduites une ou plusieurs couches supplémentaires appelées puits quantiques. Un puits quantique est une couche ultra-mince de quelques nanomètres d'épaisseur dont le gap est plus petit que celui du matériau dans lequel il est inséré. Le rôle de ce puits quantique est double : il sert, d'une part, à piéger les porteurs (électrons et trous) pour favoriser les recombinaisons radiatives et, d'autre part, à ajuster la longueur d'onde d'émission par effet de confinement quantique des porteurs. La structure de bande d'énergie d'une LED bleue

est représentée sur la figure 4 dans le cas d'une jonction p-n GaN avec un seul puits quantique.

La fabrication de la LED se poursuit par le dépôt des contacts métalliques. Le saphir étant isolant, on peut soit le retirer et prendre le contact face arrière, soit graver la couche jusqu'au GaN de type n (figure 3a). La dernière étape consiste à recouvrir la LED bleue par le luminophore (figure 3b).

La lumière blanche est finalement obtenue par combinaison d'une partie de la lumière bleue produite par la LED et de la lumière jaune issue de l'excitation du luminophore par cette dernière (figures 3b et 3c). La longueur d'onde de la pompe bleue se situe généralement autour de 450-460 nm. Le luminophore possède quant à lui une composante plus ou moins marquée dans l'orange, voire dans le rouge, afin de diminuer la température de couleur et augmenter l'IRC.

Performance des LED blanches

L'efficacité lumineuse d'une LED blanche dépend de plusieurs facteurs, à commencer par les performances de la LED bleue.

Les rendements des LED bleues

Le rendement quantique interne (IQE) d'une LED est tout d'abord défini comme le rapport du nombre de photons émis par le ou les puits quantiques sur le nombre d'électrons injectés. Ce rendement dépend de la qualité de la jonction et des matériaux. Il dépasse 90% dans les LED bleues produites par les leaders du domaine.

Cependant, si rien n'est fait, seule une petite fraction (20%) des photons émis sort réellement de la LED. Ceci est dû au phénomène de réflexion totale interne apparaissant au-delà d'un angle critique qui est très faible en raison de l'indice de réfraction du GaN équivalant à 2,5. La solution pour augmenter l'extraction des photons consiste à créer une forte rugosité à la surface de la LED afin de diffuser la lumière (figure 5). Cette technique conduit à des efficacités d'extraction (η_{ext}) pouvant dépasser 80%. Au final, l'efficacité quantique externe (EQE) :

$$\text{EQE} = \text{IQE} \cdot \eta_{\text{ext}} \quad (2)$$

c'est-à-dire le nombre de photons émis par la LED sur le nombre d'électrons injectés, atteint aujourd'hui le chiffre record de 80% pour les LED bleues. Cette valeur, bien qu'impressionnante, doit être tempérée par le fait qu'il s'agit d'un rendement quantique et non énergétique. En effet, une même efficacité quantique externe peut être obtenue avec une tension de 3 V ou de 30 V !

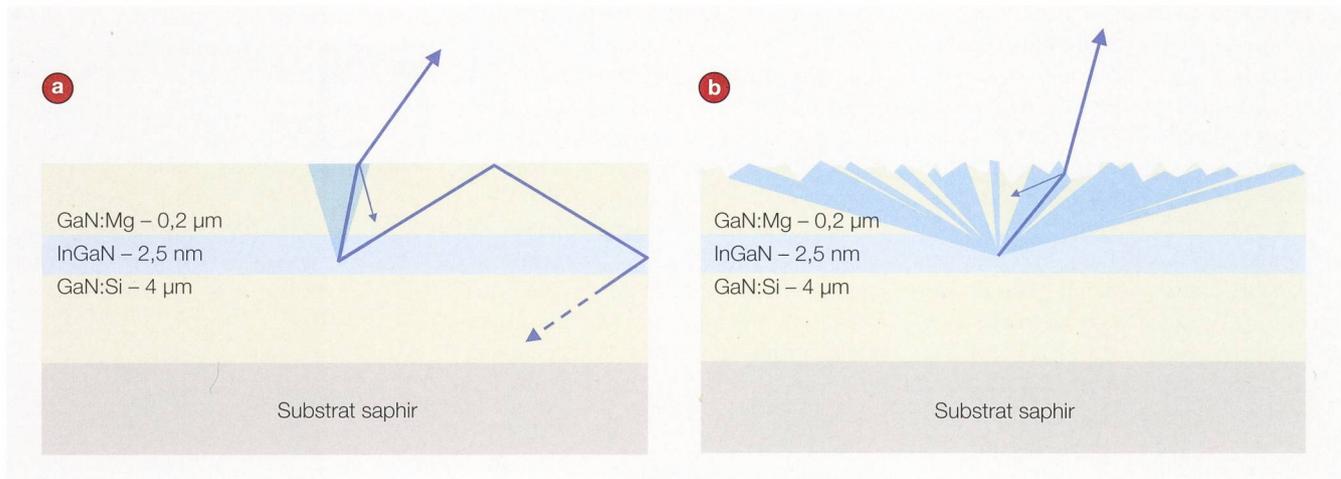
La figure de mérite pertinente est le rendement à la prise (Wall Plug Efficiency, WPE) défini comme la puissance lumineuse sur la puissance électrique injectée. Il tient compte du rendement quantique externe et des pertes par effet Joule dues à la résistance des matériaux et des contacts. Le rendement à la prise des LED bleues est de 50 à 60%, ce qui reste tout à fait exceptionnel.

L'efficacité lumineuse de la LED blanche

Pour les LED blanches, il sera question d'efficacité lumineuse (lm/W), définie comme la puissance lumineuse ramenée à la sensibilité de l'œil sur la puissance électrique. Bien que des efficacités lumineuses record de 250 lm/W aient été démontrées en laboratoire, les LED blanches du commerce atteignent difficilement les 100 lm/W . D'où vient cette différence ? Certes, il existe toujours un décalage de quelques années entre les résultats en laboratoire et les produits commerciaux, mais l'explication est à chercher ailleurs dans ce cas précis.

La chute d'efficacité ou « efficiency droop »

L'une des raisons réside dans le fait que l'efficacité lumineuse dépend fortement du courant, ou plus précisément de la densité de courant. Elle augmente à très faible courant, atteint un maximum



EPFL / N. Grandjean

Figure 5 (a) Trajet de la lumière dans une LED bleue standard : tout faisceau en dehors du cône d'extraction (triangle bleu) subit une réflexion totale. (b) Trajet de la lumière dans une LED bleue à surface rugueuse : l'extraction est fortement augmentée par simple effet de géométrie.

(autour de 10 A/cm²), puis chute rapidement à très fort courant.

Depuis près de 10 ans, ce phénomène appelé « efficiency droop » a fait l'objet de nombreuses controverses. Il semble aujourd'hui bien établi que cette chute d'efficacité soit le résultat d'un effet physique intrinsèque qui a pour nom « effet Auger ». C'est un processus non radiatif mettant en jeu trois porteurs et qui varie par conséquent proportionnellement à la densité de porteurs au cube.

Il n'y a pas grand-chose à faire pour s'en débarrasser si ce n'est réduire la densité de porteurs dans les puits quantiques en augmentant leur épaisseur. Là où le bât blesse, c'est qu'il n'est pas possible d'augmenter l'épaisseur des puits quantiques en raison d'un autre effet physique présent dans ces structures : le champ piézo-électrique.

Ce champ électrique est la conséquence de la phase cristalline hexagonale des nitrures d'éléments III et des différences de paramètres cristallins entre matériaux qui induisent une contrainte dans les puits quantiques. Or un tel champ électrique sépare les électrons des trous et réduit par là même la probabilité de recombinaison radiative. Pour limiter cet effet, les puits quantiques des LED bleues sont très fins, de l'ordre de 2-3 nm. Ce champ piézo-électrique est aussi plus élevé dans les LED vertes, ce qui explique que ces dernières soient moins efficaces que les bleues.

Influence du coût

Si l'efficacité lumineuse diminue pour les forts courants alors pourquoi ne pas fixer le courant de fonctionnement à la valeur optimale ? C'est une question de coût, car une faible densité de courant impose une grande surface active de

LED. Or la fabrication des LED blanches reste un processus complexe et par conséquent onéreux : il faut donc tirer un maximum de lumière d'un minimum de matière (surface).

Cependant, la croissance rapide de ce marché a déjà fait baisser les coûts de production. On observe actuellement une tendance à l'augmentation de la taille des LED : de 400x400 μm² il y a 10 ans, à plus de 3x3 mm² aujourd'hui. L'état de l'art (au niveau de la R&D) en termes d'efficacité lumineuse est de 150 lm/W pour une LED blanche de 1x1 mm² à 350 mA. Il s'agit d'une valeur pour un blanc froid et pour une densité de courant supérieure à la valeur correspondant au pic d'efficacité. Enfin, il faudra compter 20 à 30 lm de moins pour un blanc chaud à cause des pertes par cascade d'énergie dans le luminophore.

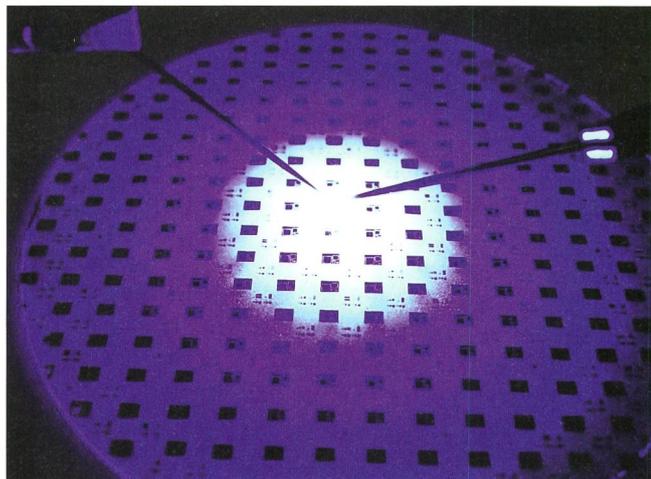
Les performances de la lampe à LED

Précisons pour finir que l'efficacité d'une lampe à LED est inférieure à celle

de la LED elle-même en raison des pertes dans le driver, relativement faibles cependant, et de la géométrie de la lampe. Au final, les lampes à LED commerciales ont d'ores et déjà des caractéristiques supérieures à celles des lampes fluocompactes :

- Leur efficacité lumineuse varie entre 70 lm/W et 100 lm/W suivant la température de couleur.
- L'IRC est de 80 à 85.
- L'allumage est instantané.
- En outre, elles sont insensibles aux cycles d'allumage.

La durée de vie est sans doute le point le plus délicat à déterminer, tant l'évolution des caractéristiques dans le temps est lente. C'est pourquoi des protocoles de mesures plus précis sont actuellement en cours d'élaboration. Toutes les LED blanches ne se ressemblent pas et la probabilité de défaillance critique dépend de la technologie employée. Comme souvent, les performances sont directement liées au prix d'achat.



EPFL / LASPE

Figure 6 Électroluminescence d'une LED GaN sur substrat de saphir.

Tendances et perspectives

Les LED s'imposent de plus en plus massivement dans le domaine de l'éclairage industriel. La réduction importante du prix des lampes à LED ces dernières années, qui se poursuivra dans un futur proche, accélérera aussi la pénétration chez le particulier.

Le marché des LED pour l'éclairage devrait atteindre plusieurs dizaines de milliards de USD en 2020 avec deux tiers de l'éclairage à base de LED. C'est un secteur très concurrentiel où le facteur coût de production est important. L'une des clés réside dans le passage sur substrat de silicium afin de profiter des lignes de fabrication développées pour la technologie CMOS Si.

Un autre aspect du futur des LED concerne la qualité de la lumière et plus précisément le rendu des couleurs. Une solution pour améliorer ce point consiste à utiliser une LED émettant de l'ultraviolet au violet (370 à 410 nm) pompant plusieurs luminophores. L'IRC est alors excellent, typiquement 95, mais le rendement lumineux est dégradé par effet de cascade d'énergie.

Une autre alternative pour augmenter l'IRC, plus coûteuse mais plus efficace en termes de rendement lumineux, repose sur la combinaison de LED rouges, vertes et bleues. Malheureusement, les LED vertes à base de semi-conducteur GaN ont une efficacité 3 fois plus faible que celle des LED bleues et il n'existe à

l'heure actuelle aucun autre matériau qui puisse se substituer au GaN. C'est ce que l'on appelle le fameux « green gap ».

La recherche est très active dans ce domaine et les études se concentrent aujourd'hui sur une approche à base de nanofils. Ces objets 3D de moins d'un micron de diamètre pourraient un jour combler ce « green gap ». Nous aurions alors des lampes à LED dont la température de couleur pourrait varier du soir au matin, distiller une couleur à la demande, et le tout pour une efficacité lumineuse de 200 lm/W!

Informations sur l'auteur



Nicolas Grandjean a reçu un doctorat en physique de l'Université de Nice - Sophia Antipolis en 1994. Il est professeur ordinaire de physique à l'EPFL (École polytechnique fédérale de Lausanne) et y dirige depuis 2012 l'Institut de Physique de la Matière Condensée.

Il a été lauréat du « Programme pour la relève universitaire » piloté par la Fondation de Famille Sandoz et a reçu le prix « Nakamura Lecturer » de la part de l'Université de Californie à Santa Barbara. Ses activités de recherche se concentrent aujourd'hui sur la physique et la technologie des semi-conducteurs à base de GaN pour les applications optoélectroniques et électroniques.

EPFL, Station 3, 1015 Lausanne,
 nicolas.grandjean@epfl.ch

Zusammenfassung **Das Funktionsprinzip von weissen LEDs sowie**

künftige Entwicklungen

Dem perfekten Leuchtmittel einen Schritt näher

Von der Glühlampe zur Leuchtstoffröhre, von der Kompaktleuchtstofflampe zur LED-Lampe – im Bereich des künstlichen Lichts nähern wir uns immer mehr dem perfekten Leuchtmittel. LEDs haben einen entscheidenden Anteil an dieser Entwicklung.

Der vorliegende Artikel beschreibt das Funktionsprinzip und die Herstellung von LEDs, angefangen bei den physikalischen Eigenschaften der Halbleitermaterialien, über die Dotierung, den pn-Übergang und die Emission von Photonen während der Rekombination bis hin zur Bedeutung der Einbeziehung der Quantentöpfchen zur Bestimmung der Wellenlänge. Anschliessend erfolgt eine detaillierte Analyse der Leistungskriterien weisser LEDs, von der internen Quanteneffizienz einer blauen LED bis zur Lichtausbeute einer weissen LED. Einschränkungen, die auf den so genannten «efficiency droop» (Effizienzabfall) zurückzuführen sind, werden ebenfalls erläutert.

Die im Handel erhältlichen LED-Lampen weisen bereits heute zahlreiche Vorteile gegenüber Leuchtstofflampen auf. Technische Neuerungen, wie z.B. die Verwendung von «UV- bis violett»-LEDs mit mehreren Leuchtstoffen, die Kombination aus roten, grünen und blauen LEDs oder auch die Einführung einer auf Nanodrähten basierenden LED-Technologie werden diesen Vorsprung sicher noch vergrössern.

CHe

Anzeige

Die IBZ | zti Schulen bilden Sie weiter.

Höhere Fachschule

Dipl. Techniker/in HF (eidg. anerkannt)

- Maschinenbau
- Betriebstechnik
- Unternehmensprozesse (Vertiefung Logistik)*
- Elektrotechnik
- Informatik
- Kunststofftechnik
- Hochbau und Tiefbau
- Haustechnik

Instandhaltungsfachmann/-frau

- Bauführer/in (IBZ-Diplom)
- Bauleiter/in Hochbau
- Bauleiter/in Tiefbau
- Metallbau-Werkstatt- und Montageleiter/in
- Elektro-Installateur/in
- Elektro-Projektleiter/in
- Elektro-Sicherheitsberater/in
- Praxisprüfung gemäss NIV

Start: April / Oktober

Standorte: Aarau Basel Bern Sargans
 Sursee Winterthur Zug Zürich

*im Anerkennungsverfahren

ISO 9001 • eduQua

Höhere Berufsbildung

- Logistikfachmann/-frau
- Prozessfachmann/-frau
- Industriemeister/in
- Technische/r Kaufmann/Kauffrau
- Qualitätsfachmann/-frau

Nachdiplomstudien

HF-NDS Betriebswirtschaftslehre für Führungskräfte (Managementkompetenz)



IBZ | zti

IBZ Schulen für Technik Informatik Wirtschaft AG
 Höhere Fachschulen mit eidg. anerkannten Lehrgängen
 Zentralsekretariat
 Tellstrasse 4, CH-5000 Aarau
 Telefon +41 62 836 95 00, ibz@ibz.ch, www.ibz.ch