

Les nouvelles diodes électroluminescentes pour l'émission UV

Julien Brault⁽¹⁾ (Julien.Brault@crhea.cnrs.fr), Benjamin Damilano⁽¹⁾, Jean-Yves Duboz⁽¹⁾ et Bernard Gil⁽²⁾

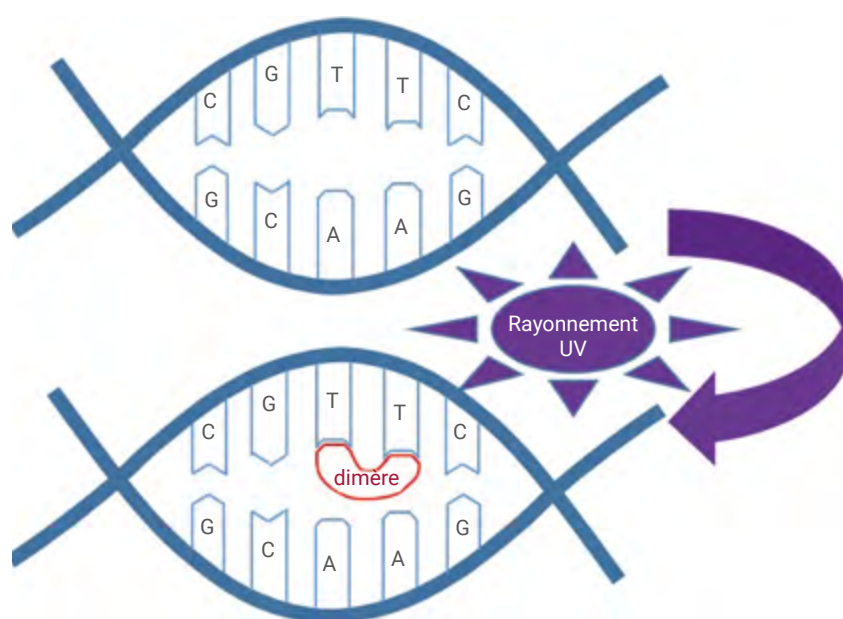
(1) Centre de recherche sur l'hétéro-épitaxie et ses applications (CRHEA, UPR10 CNRS),

Université Côte d'Azur, 06905 Sophia Antipolis Cedex

(2) Laboratoire Charles Coulomb (L2C, UMR 5221 CNRS-Université de Montpellier),

Place Eugène Bataillon, 34095 Montpellier Cedex 5

Les propriétés germicides des rayonnements ultraviolets (UV) suscitent un intérêt de plus en plus important dans les domaines d'applications stratégiques que sont l'environnement et la santé. Les diodes électroluminescentes (LEDs) semi-conductrices à base de nitrure d'aluminium et de gallium représentent les nouvelles sources d'émission UV qui pourront répondre à cette demande. Leurs performances, bien qu'encore modestes, progressent chaque jour et nous vivons le point de bascule entre le laboratoire et le domaine grand public. Pour définitivement parvenir à s'imposer, elles doivent associer efficacité, forte capacité de développement, ainsi que souplesse et facilité d'utilisation, performances qu'aucune source UV n'a encore atteinte jusqu'à présent.

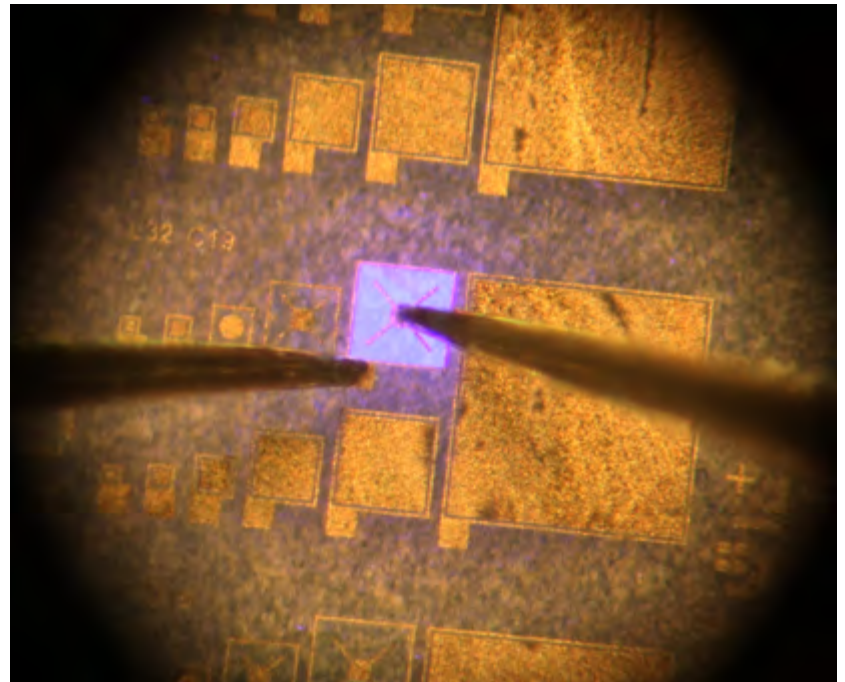


1. Création d'un dimère dans une molécule d'ADN irradiée aux UV.

En haut : représentation d'un fragment d'une structure simplifiée d'ADN en double hélice, avec les différentes bases : adénine (A), guanine (G), thymine (T) et cytosine (C). En bas : exemple de création d'un dimère de pyrimidine (T-T), après absorption d'un rayonnement ultraviolet [2].

L'émission ultraviolette pour l'environnement et la santé

La lumière ultraviolette (UV) correspond à une radiation électromagnétique invisible, dont la longueur d'onde est inférieure à 400 nm – rayonnement visible correspondant au violet – et supérieure à 100 nm, limite des rayons X. Le rôle germicide des UV fut observé par Downes et Blunt qui mirent en évidence leur action contre le développement des bactéries [1]. L'illumination UV permet d'éliminer les agents biologiques pathogènes (bactéries et virus) en modifiant la structure de leurs acides ribonucléique (ARN) ou désoxyribonucléique (ADN), éléments assurant la transmission de l'information génétique. L'ADN et l'ARN absorbent l'UV aux longueurs d'onde inférieures à



Photographie d'une diode électroluminescente ultraviolette en fonctionnement.

L'injection du courant est effectuée *via* des micropointes et contrôlée à l'aide d'une alimentation électrique. La LED repose sur une photodiode calibrée, qui permet de détecter le rayonnement UV et ainsi de déterminer la puissance optique émise par la LED.

300 nm, avec un maximum d'efficacité vers 265 nm, c'est-à-dire dans l'UV dit « profond » (UV-C). Ce sont la thymine et la cytosine, bases présentes dans les acides nucléiques constituant l'ADN/ARN, qui sont les plus réactives aux UV. Une base excitée peut créer des liaisons covalentes avec une base voisine, ce qui conduit à la création d'un dimère (fig. 1). Ces dimères interrompent la structure de l'ADN/ARN et vont empêcher sa répllication [2].

Les UV sont déjà largement utilisés pour la purification de l'eau. C'est également un outil thérapeutique étudié dès les années 1930 [1]. Aujourd'hui, avec la pandémie de la Covid-19, les UV représentent l'une des principales solutions envisagées pour désinfecter les lieux publics et limiter la propagation du virus [3].

À l'heure actuelle, la source UV la plus utilisée est la lampe à mercure, qui émet principalement autour de 254 nm (donc proche de 265 nm), avec un rendement global ou rendement « à la prise » (rapport entre puissance optique émise et puissance électrique appliquée) de l'ordre de 30%. Cependant, les limites technologiques (puissances de fonctionnement élevées, matériel volumineux et massif), ainsi que la toxicité du mercure, incitent à développer de nouvelles sources

portables, efficaces et non polluantes. Dans ce contexte, une technologie commence à s'imposer : les diodes électroluminescentes (LEDs).

Les diodes électroluminescentes ultraviolettes

Les LEDs UV sont fabriquées à partir d'un empilement de couches cristallines de matériaux semi-conducteurs $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ (fig. 2a, p. 19). Un intérêt majeur des semi-conducteurs repose dans la possibilité de les doper pour leur donner selon le dopant utilisé une conductivité de type n (électrons dans la bande de conduction) ou p (« trous » dans la bande de valence). Les LEDs sont basées sur une jonction p-n, superposition d'une zone n et d'une zone p [4]. En polarisation directe (tension positive sur la partie p), les électrons sont entraînés de la zone n vers la zone p, et les trous de la zone p vers n. Les deux se rencontrent à l'interface entre les zones p et n dans une région (« zone active ») généralement constituée de puits quantiques (PQ), se recombinent, et l'énergie ainsi libérée permet l'émission de lumière.

La famille de semi-conducteurs $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ permet d'avoir une émission dans l'UV, couvrant une gamme de

longueurs d'onde allant de 210 nm pour l'AlN à 360 nm pour le GaN. Les longueurs d'onde intermédiaires s'obtiennent de manière continue en changeant la composition x de l'alliage $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$. Il est possible également de faire varier la longueur d'onde d'émission en réalisant, dans la zone de recombinaison, des puits quantiques (PQ) formés par une couche « puits » constituée d'un alliage $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$, entourée de couches « barrières » $\text{Al}_y\text{Ga}_{1-y}\text{N}$. La composition y est nécessairement supérieure à x pour que les porteurs de charge puissent être confinés dans la couche « puits », dont l'épaisseur est typiquement de quelques nanomètres. Ce confinement force la localisation des électrons et des trous dans une zone de dimensions réduites et, au final, l'efficacité de la LED s'en trouve améliorée. Le confinement a également un impact sur la longueur d'onde d'émission qui augmente avec la largeur du puits. L'utilisation de puits quantiques a donc l'avantage d'offrir un degré de liberté plus grand que des couches simples pour obtenir la longueur d'onde désirée.

Toutefois, il existe des limites dans le dessin des structures de zone active de LEDs UV à base d' $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$. En effet, le paramètre de maille de cette solution solide diminue lorsque la composition

>>>

1) Recombinaisons radiatives/non radiatives

L'efficacité quantique interne (η_{EQI}), c'est-à-dire l'efficacité de l'émission de lumière, est déterminée comme le rapport du taux de recombinaisons radiatives G_r au taux de recombinaisons total (radiatives et non radiatives) $G_r + G_{nr}$, ou peut être exprimée en fonction des durées de vie caractéristiques τ_r et τ_{nr} . Elle s'écrit :

$$\eta_{EQI} = G_r / (G_r + G_{nr}) = \tau_r^{-1} / (\tau_r^{-1} + \tau_{nr}^{-1}) \quad (1)$$

Une mesure directe de η_{EQI} est d'importance capitale pour caractériser les performances d'un composant. La partie non radiative s'exprime comme une puissance thermique $P_{thermique}$ qui peut être mesurée en microcalorimétrie par l'élévation de température, sous éclairage monochromatique, d'un échantillon plongé dans l'hélium 3. La partie radiative est obtenue en mesurant la puissance lumineuse $P_{lumière}$ émise dans l'ensemble de l'angle solide (4π) à l'aide d'une sphère intégratrice. Ces expériences sont ensuite extrapolées à la température (T) opérationnelle du composant. Pour cela, il est nécessaire d'effectuer une mesure complémentaire de l'intensité de photoluminescence (PL) en température. À toute température, η_{EQI} est alors calculée à partir de sa valeur à basse T, sur la base d'un argument de proportionnalité en fonction de la température.

2) Paires électrons (e) - trous (h) localisées/libres

L'analyse des formes de raies d'émission UV et de leurs énergies permet de séparer pour toute température la proportion de paires e-h en interaction électrostatique piégées dans des régions du cristal énergétiquement favorables à leur localisation, de la proportion de paires mobiles. Les premières contribuent quasi intégralement à l'émission radiative, alors que les secondes contribuent à l'émission de lumière ou se recombinent non radiativement. La proportion de recombinaisons non radiatives augmente avec T lorsque la probabilité d'interaction des paires libres avec les défauts augmente. Une redistribution des proportions de paires e-h localisées et libres est aussi thermiquement activée, ce qui impacte G_r , G_{nr} et donc η_{EQI} qui diminue.

3) Temps de déclin de la photoluminescence (PL)

L'utilisation de la spectrométrie de PL résolue en temps donne accès à une valeur directe des temps de déclin. La décroissance en fonction du temps de la PL d'un échantillon homogène et parfait (η_{EQI} égal à 100%) est mono-exponentielle. Le temps caractéristique est le temps de vie radiatif ; il évolue avec la température T selon une loi de puissance $T^{d/2}$ où d est la dimensionnalité du cristal. En revanche, le déclin de PL n'est pas forcément mono-exponentiel dans le cas d'un cristal riche en défauts non radiatifs : il décroît, voire même s'effondre avec T. Le déclin de PL se décompose généralement en deux temps caractéristiques τ_{fast} et τ_{slow} , en proportions respectives A_{fast} and $1-A_{fast}$, ce qui permet d'encadrer assez précisément la valeur de η_{EQI} à basse température :

$$\eta_{EQI} = 1 - A_{fast} (\tau_{fast} / \tau_{slow}) \quad (2)$$

La physique sous-jacente est assez simple. Le faisceau laser excite une zone inhomogène du cristal : une proportion de la surface excitée (A_{fast}) est riche en défauts et le temps de déclin y est court, alors que dans l'autre proportion de la surface excitée ($1-A_{fast}$), de bonne qualité structurale, le temps de déclin τ_{slow} est long. L'obtention de η_{EQI} se fait à partir d'équations aux dérivées ordinaires couplées, de type Lotka-Volterra [proie(s)-prédateur(s)] [9]. En l'absence de prédateurs (centres de recombinaisons non radiatives) les proies (paires e-h) ont une durée de vie longue, alors qu'elle se raccourcit lorsque la probabilité de faire face à un prédateur augmente. Les relations importantes reliant les équations (1) et (2) sont :

$$\tau_r = \tau_{slow} \quad \text{et} \quad \tau_{fast}^{-1} = \tau_{nr}^{-1} + \tau_r^{-1} \quad (3).$$

Ceci est raisonnable à très basse T, mais n'est plus vrai dès que l'agitation thermique du réseau augmente, créant une porosité pour les porteurs entre les zones riches et pauvres en défauts. La nature des recombinaisons dans la zone du cristal ($1 - A_{fast}$), de bonne qualité structurale n'est plus strictement radiative, dès lors que des porteurs initialement piégés se libèrent. Plutôt que résoudre les équations de Lotka-Volterra à l'aide de paramètres d'interaction mal maîtrisés, on préfère retrouver la dépendance de η_{EQI} en température avec l'argument de proportionnalité et le rapport des intensités de photoluminescence intégrées en temps.

>>>

en aluminium augmente, entraînant un désaccord paramétrique qui atteint 2,5% entre GaN et AlN. Il n'est ainsi pas possible d'épitaxier plus de 3 nm de GaN sur AlN sans créer des défauts cristallins, à l'influence délétère à tous points de vue.

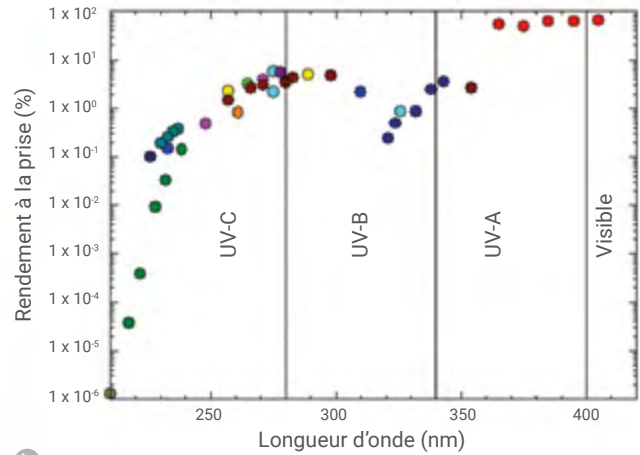
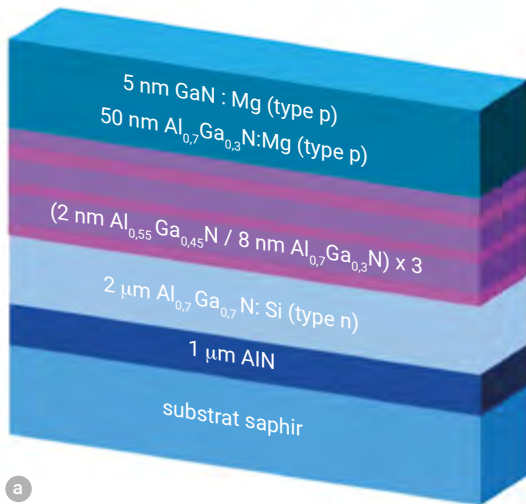
Une structure classique de LED UV émettant autour de 265 nm va être constituée d'un empilement de couches épitaxiées sur un substrat saphir (fig. 2a). Cette combinaison non triviale ne découle pas du hasard, mais résulte d'une utilisation subtile des prédictions conjointes de la science des matériaux et de la théorie quantique des solides appliquées aux semi-conducteurs.

La fabrication se fait par des techniques de croissance de films minces : épitaxie en phase vapeur aux organométalliques (EPVOM) et épitaxie par jets moléculaires (EJM) (voir la note (a), p. 19). Les LEDs UV-C ont actuellement un rendement à la prise qui est au mieux de quelques pourcents seulement (fig. 2b). Pour pleinement s'imposer comme sources UV, ce rendement doit être amélioré.

Les défis et les solutions technologiques

Le rendement quantique externe (nombre de photons émis sur nombre d'électrons injectés) dépend de trois processus [6]. Premièrement, les électrons et les trous doivent se rencontrer et se recombiner dans la zone active et pas ailleurs. Deuxièmement, la recombinaison doit produire de la lumière et non de la chaleur. Troisièmement, le photon doit sortir de la LED et ne pas rester piégé par réflexion interne totale. Le rendement quantique externe est le produit des rendements de ces trois processus, η_{INJ} , η_{EQI} (voir l'encadré 1) et η_{EXT} respectivement. Le rendement à la prise (défini p. 17) est proportionnel au rendement quantique externe et dépend aussi du rapport entre l'énergie des photons émis et la tension de fonctionnement de la LED.

Une première difficulté majeure vient du dopage de type p très difficile dans l' $Al_xGa_{1-x}N$ dont les couches et contacts associés sont très résistifs, conduisant à des tensions élevées qui ruinent le rendement à la prise. Des solutions sont à l'étude, comme un pompage par faisceau d'électrons qui



2. LED UV à base de nitrure d'aluminium et de gallium.

(a) À gauche : structure classique d'une LED UV émettant à la longueur d'onde de 265 nm. La zone active de la LED est constituée de trois puits quantiques d' $\text{Al}_{0,55}\text{Ga}_{0,45}\text{N}$ (en rose) séparés par des barrières d' $\text{Al}_{0,7}\text{Ga}_{0,3}\text{N}$ (en violet). (b) À droite : état de l'art du rendement à la prise des LEDs UV en fonction de leur longueur d'onde d'émission.

“La réalisation de LEDs UV [de hautes performances] requiert de combiner des techniques de croissance sophistiquées, et de contrôle du dépôt de matière à l'échelle atomique, aux frontières de notre connaissance.”

permet de s'affranchir du dopage p, ou bien encore le remplacement de l' $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ par un autre matériau, le nitrure de bore, dont l'énergie de bande interdite proche de celle de l'AlN pourrait ouvrir des solutions alternatives ou complémentaires. Récemment, l'insertion d'une jonction tunnel (JT) pour convertir les électrons en trous et les injecter dans la LED a été proposée, permettant d'améliorer à la fois η_{INJ} et η_{EXT} (encadré 2). Par ailleurs, l'impossibilité d'obtenir des substrats d' $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ nécessite l'utilisation de substrats de nature différente, ce qui conduit généralement à de fortes densités de dislocations dans le matériau. Les dislocations étant des centres de recombinaison non radiative, elles entraînent une chute de η_{EQE} . Deux grandes stratégies, compatibles, existent pour résoudre ce problème. La première, naturelle, consiste à réduire la densité de dislocations. Les substrats AlN sont une solution, mais restent très difficiles à fabriquer. La croissance d'AlN à haute

température sur saphir améliore la qualité cristallographique, mais il semble que le recuit à haute température (> 1600°C) de couches AlN fines (quelques centaines de nm) sur saphir soit une approche plus simple et plus efficace. L'autre stratégie consiste à créer une structuration latérale du potentiel pour localiser les porteurs et les empêcher de rejoindre les dislocations. Cette structuration de potentiel à l'échelle nanométrique dans la zone active peut être obtenue par des fluctuations de composition qui modulent la concentration en Al dans le plan des couches, le cas extrême étant la création de boîtes quantiques (BQ), c'est-à-dire de domaines de confinement tridimensionnel en remplacement des domaines bidimensionnels (PQ).

Parmi ces différentes approches, nous cherchons, au CRHEA à Valbonne et en collaboration avec le L2C à Montpellier, à développer de nouvelles architectures de LEDs qui mettent à profit, en particulier, l'utilisation de boîtes quantiques et de jonctions tunnel.

>>>

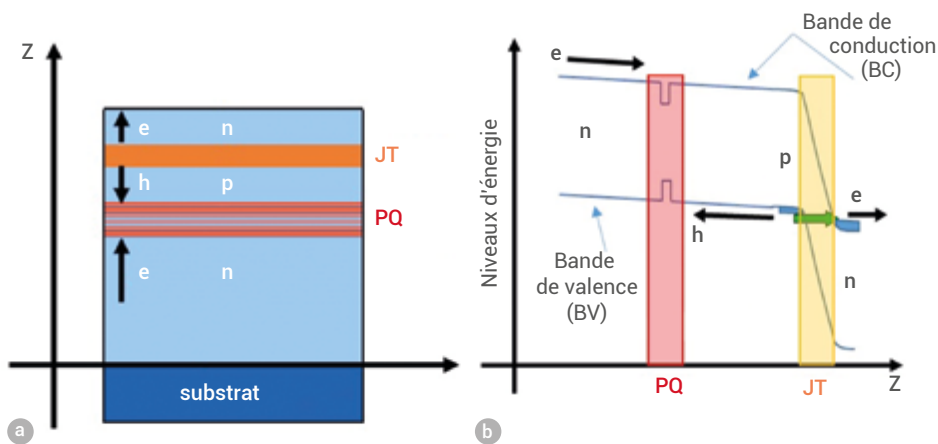
(a) L'épithaxie consiste à faire croître des couches monocristallines sur un substrat monocristallin, qui possède généralement la même structure cristalline et idéalement le même paramètre de maille.

Dans l'épithaxie par jet moléculaire (EJM), des molécules (obtenues par évaporation sous vide d'une source chauffée) sont envoyées à la surface d'un substrat sous ultraviolet. La croissance se fait couche par couche.

L'épithaxie en phase vapeur aux organo-métalliques (EPVOM) consiste à balayer le substrat par un gaz vecteur contenant les éléments à épithaxier. Les molécules du gaz se pyrolysent sur le substrat chauffé et les éléments souhaités s'y déposent. La vitesse de croissance est plus élevée que dans la technique EJM.

Si l'émission optique UV de puits (PQ) ou de boîtes quantiques (BQ) $Al_xGa_{1-x}N$, insérées dans des barrières $Al_yGa_{1-y}N$ plus riches en Al ($y > x$), ne pose pas de problème fondamental sous pompage optique et peut en principe atteindre une forte efficacité quantique, il n'en va pas de même pour l'émission sous pompage électrique. En effet, les densités d'électrons et de trous disponibles dans les couches contacts $Al_yGa_{1-y}N$ diminuent au fur et à mesure que y augmente et que les niveaux donneurs et accepteurs s'approfondissent. Dans la couche de type n, le dopant silicium peut conserver un caractère donneur avec une énergie d'activation qui passe de 26 meV dans GaN à 70 meV environ dans AlN. La situation du germanium (alternative au silicium) est plus délicate. Mais, dans les deux cas, on peut obtenir des couches $Al_{0,7}Ga_{0,3}N$ utilisables dans l'UV profond avec des densités électroniques supérieures à 10^{17} cm^{-3} , et donc des couches contact conductrices et des contacts métalliques peu résistifs. On obtient aussi une injection d'électrons (e) forte au niveau des puits quantiques. En revanche, du côté des couches de type p, la situation est beaucoup plus difficile, car le dopant magnésium voit son énergie d'activation passer de 200 meV dans GaN à 600 meV dans AlN. Dans $Al_{0,7}Ga_{0,3}N$, la densité de trous (h) est famélique (10^{15} cm^{-3}), les contacts sont très résistifs et l'injection de trous est très faible. La forte tension fait chuter l'efficacité à la prise et crée un échauffement préjudiciable de la LED. Le déséquilibre entre les injections de trous et d'électrons au niveau des puits quantiques entraîne une perte de recombinaison radiative. La solution usuelle consiste à insérer une couche de faible bande interdite (typiquement GaN) au niveau du contact p, ce qui réduit les tensions d'accès et permet une injection de trous hors équilibre à travers la couche $Al_yGa_{1-y}N$ jusqu'au puits. Le prix à payer est une forte absorption optique UV de cette couche.

Une solution plus récente consiste à insérer une jonction tunnel (JT), c'est-à-dire à déposer une couche AlGaN fortement dopée n sur la couche AlGaN fortement dopée p de la LED (fig. E1). Le contact supérieur devient alors un contact n, beaucoup moins résistif. Le matériau reste transparent, ce qui supprime l'absorption parasite. Quand la LED est polarisée en direct, la jonction est polarisée en inverse et injecte des trous dans la couche AlGaN proche des puits quantiques et donc vers ces derniers. Cette solution résout tous les problèmes, à la condition que la chute de tension aux bornes de la JT soit faible. L'effet tunnel étant *a priori* faible dans les matériaux à large bande interdite, cette solution a été négligée assez longtemps. Mais les forts champs piézoélectriques dans les hétérostructures nitrures apportent une aide capitale : en insérant une très fine couche de GaN, voire de InGaN, au milieu de la jonction en AlGaN, les distances tunnel sont réduites et l'effet tunnel exacerbé. Des courants importants de l'ordre de 1 kA/cm^2 sont atteints pour des tensions de l'ordre de quelques volts aux bornes de la jonction tunnel.



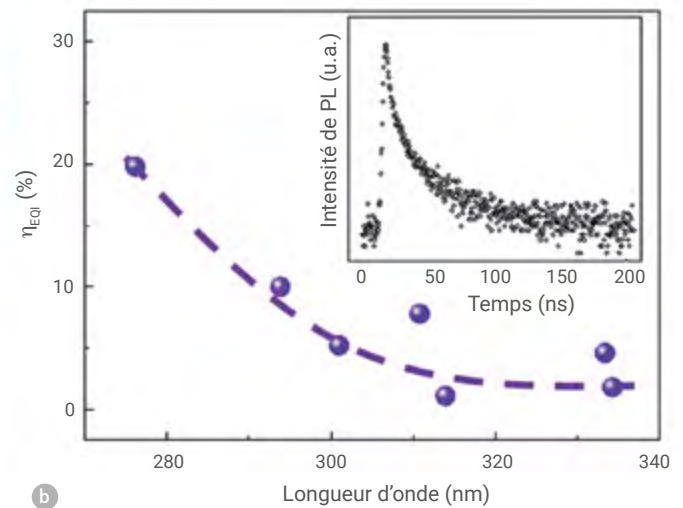
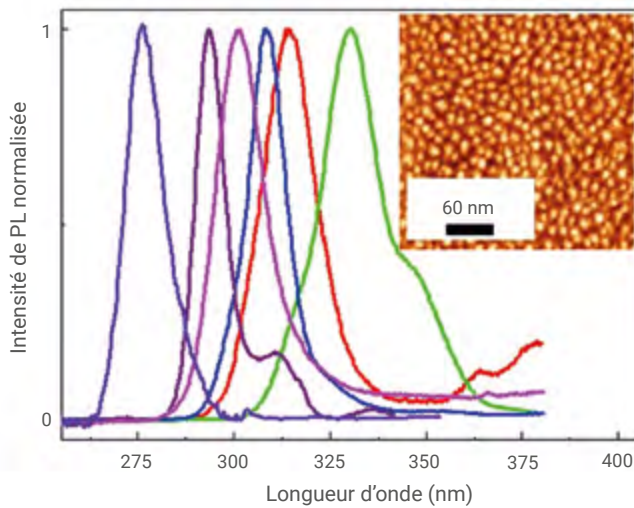
E1. (a) Schéma d'une structure LED à jonction tunnel (JT).
(b) Représentation schématique de la structure de bandes de la LED à jonction tunnel.

>>>

L'un des principaux intérêts des BQ est la localisation des porteurs. Dans les couches d' $Al_xGa_{1-x}N$, les densités de dislocations en général très élevées (10^{10} cm^{-2}) entraînent une chute de l'intensité de photoluminescence des PQ de deux à trois ordres de grandeur entre les basses températures et la température ambiante, température à laquelle les porteurs ne sont plus confinés dans les couches. Dans le cas des BQ, l'intensité de photoluminescence ne varie que très faiblement (par un facteur inférieur à 5) dans cette gamme de températures, car le confinement des porteurs permet de conserver une forte recombinaison radiative dans des matériaux aussi disloqués. La formation de BQ est due à la différence de paramètre de maille entre GaN et AlN, qui provoque une croissance d'îlots 3D cohérents (c-à-d sans défauts) de dimensions nanométriques. Nous avons réalisé des zones actives à BQ $Al_xGa_{1-x}N$ en faisant varier leur composition x ainsi que leurs dimensions. Ces études ont conduit à la fabrication de boîtes quantiques émettant dans une large gamme spectrale (fig. 3) et montré qu'il était possible d'augmenter η_{EQI} à densité de dislocations constante en optimisant les conditions de croissance des BQ et la longueur d'onde d'émission.

L'approche poursuivie pour résoudre le problème du dopage p de AlGaN, en collaboration avec le LETI à Grenoble, est d'insérer une jonction tunnel (JT) (encadré 2). L'amélioration de l'efficacité d'injection est spectaculaire, puisqu'une augmentation d'un facteur 5 a été observée sur certaines structures (fig. 4). Les LEDs élaborées sont réalisées en combinant les procédés d'épitaxie EJM et EPVOM (a). Cette approche hybride, utilisée par la majorité des groupes dans le monde, permet de résoudre un problème de repassivation du magnésium de la zone p lors de la croissance de la JT.

Ce qui est original, en revanche, est l'utilisation du dopage par du germanium au lieu de silicium, qui permet d'atteindre des concentrations de dopant n plus élevées ($\leq 4 \times 10^{20} \text{ cm}^{-3}$) et plus reproductibles. Les perspectives sont désormais d'améliorer la qualité cristallographique des couches pour pouvoir faire une optimisation plus fine et reproductible des JT. Des couches d'AlN recuites sont en développement dans cette optique.



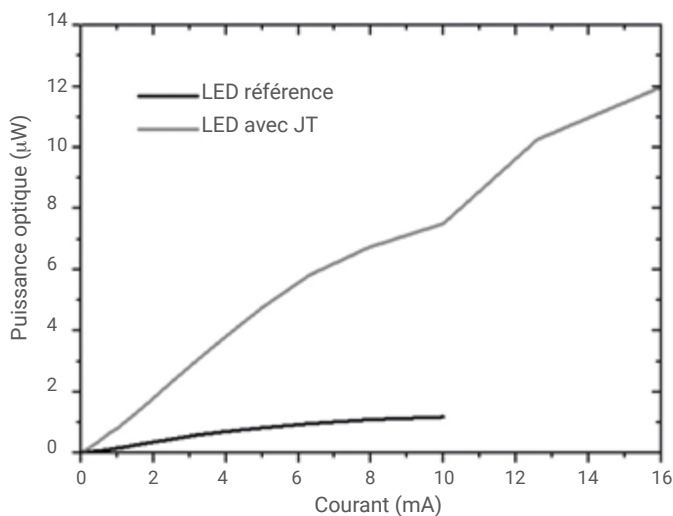
3. Diodes électroluminescentes Al_xGa_{1-x}N à boîtes quantiques (BQ)

(a) Spectres de photoluminescence (PL) de BQ AlGaIn présentant des compositions en Al et/ou des dimensions différentes. En encart, image de BQ AlGaIn. (b) Variation de l'efficacité quantique interne η_{EOI} de BQ AlGaIn à 300 K en fonction de la longueur d'onde d'émission. En encart, déclin de l'intensité de la photoluminescence de boîtes quantiques AlGaIn, montrant une décroissance non exponentielle en fonction du temps (voir l'encadré 1, p. 18) [7].

Conclusion

Les LEDs UV représentent un enjeu technologique d'importance stratégique en termes de santé publique, d'écologie, mais aussi pour d'autres applications telles que les télécommunications spatiales. La réalisation de tels objets avec des conditions de fonctionnement peu consommatrices en énergie requiert de combiner des techniques de croissance sophistiquées,

de contrôle du dépôt de matière à l'échelle atomique avec des procédés technologiques délicats, aux frontières de nos connaissances. De la versatilité de leurs applications, il résulte un engouement des chercheurs pour les LEDs UV qui pourraient connaître un brillant avenir, dans la lignée de leurs sœurs aînées les LEDs bleues, utilisées pour l'émission de lumière blanche de tous les éclairages modernes. ■



4. Puissance optique émise par des LEDs UV émettant à 300 nm en fonction du courant, avec et sans jonction tunnel [8].



- 1• N.G. Reed, "The History of Ultraviolet Germicidal Irradiation for Air Disinfection", *Public Health Reports* **125** (2010) 15-27.
- 2• T. Douki, « Impact cellulaire des UV solaires », publié dans *Encyclopédie de l'environnement*, section « Vivant et facteurs du milieu » (24 mars 2018). www.encyclopedie-environnement.org/vivant/impact-cellulaire-uv-solaires/
- 3• F.J. García de Abajo *et al.*, "Back to Normal: An Old Physics Route to Reduce SARS-CoV-2 Transmission in Indoor Spaces", *ACS Nano* **14** (2020) 7704-7713.
- 4• U.W. Pohl, *Epitaxy of Semiconductors*, Springer International Publishing (2020).
- 5• B. Damilano *et al.*, « Diodes électroluminescentes blanches pour l'éclairage », *Images de la Physique*, Éditions du CNRS (2006), p. 86.
- 6• H. Amano *et al.*, "The 2020 UV Emitter Roadmap", *J. Phys. D: Appl. Phys.* **53** (2020) 503001.
- 7• J. Brault *et al.*, "Internal quantum efficiencies of AlGaIn quantum dots grown by molecular beam epitaxy and emitting in the UVA to UVC ranges", *J. Appl. Phys.* **126** (2019) 205701.
- 8• V. Fan Arcara *et al.*, "Ge doped GaN and Al_{0.5}Ga_{0.5}N-based tunnel junctions on top of visible and UV light emitting diodes", *J. Appl. Phys.* **126** (2019) 224503.
- 9• A.A. Berryman, "The origins and evolution of predator-prey theory", *Ecology* **73** (1992) 1530.