

4-2 深紫外光デバイス研究開発

4-2 Research and Development on Deep-ultraviolet Optical Devices

4-2-1 深紫外固体光源デバイス技術の研究開発

4-2-1 Research and Development of Deep-ultraviolet Light-emitting Diodes

井上振一郎

INOUE Shin-ichiro

波長が 280 nm よりも短い UV-C 光を発する深紫外発光ダイオード (DUV-LED) は、情報通信から殺菌、光加工、医療応用に至るまで、幅広い分野においてその重要性が増しており、社会普及への期待が高まっている。近年、AlGaIn 系深紫外 LED デバイスの結晶品質や内部量子効率は大いに向上してきている。しかしながら、その光出力については、従来の深紫外光源である水銀ランプと比較すると、いまだ低い値にとどまっている。一方で、水銀ランプは人体や環境に有害な水銀を含み、大型で環境負荷の高い製品であるため、水銀廃絶に向けた「水銀に関する水俣条約」(2017 年発効) 等において、その代替が強く求められている。この状況を打破するため、筆者らは、内部光吸収や光出力飽和現象 (効率ドループ) の抑制を可能とするナノ光構造技術を基盤とした深紫外 LED の研究を行ってきた。本稿では、単チップにおいて光出力 500 mW を超える、水銀ランプに迫る極めて高出力な 265 nm 帯深紫外 LED を世界で初めて実証した取組などについて紹介する。

Deep-ultraviolet (DUV) light-emitting diodes (LEDs) with UV-C emission wavelengths shorter than 280 nm have huge potential for a wide range of applications, including surface disinfection, air/water purification, medical diagnostics, lithographic microfabrication, and ICT. Rapid progress has been made recently in the development of AlGaIn-based DUV-LEDs. However, DUV-LEDs continue to have much lower output power than traditional mercury vapor lamps. Meanwhile, these lamps are bulky and contain mercury, which is harmful to humans and has a high environmental impact. Today, there is a pressing need to develop alternatives to mercury under the Minamata Convention on Mercury which entered into force in 2017. To solve these problems, we have studied DUV-LEDs with nanophotonic structures to significantly reduce the internal optical absorption and efficiency droop. In this paper, we show the high-power single-chip 265 nm DUV-LEDs with output power in excess of 500 mW, bringing substantial advantages over conventional mercury vapor lamps.

1 まえがき

波長が 280 nm よりも短い UV-C 領域の光を発する深紫外 (Deep-Ultraviolet: DUV) 発光ダイオード (Light-Emitting Diode: LED) は、実現可能な半導体 LED として、最も波長が短い。このため青色 LED に続く研究フロンティアとして、世界中の多くの研究機関において活発に研究開発が進められている [1]–[6]。また、この UV-C 領域の光は、大気中のオゾン層で全て吸収されるため、自然界には存在せず (地表の太陽光の中に含まれない)、ソーラーブラインド領域と呼

ばれる。このため、太陽光の背景ノイズの影響を受けない通信やセンシングが原理上可能となる。さらに深紫外光は、空気中を伝搬できる光の中で最も波長が短い。このため可視・赤外光と比較し、大気中に漂うエアロゾル等の微粒子に対して高い散乱係数を有する。これらの深紫外光の特殊な性質を利用することで、ビルなどの障害物がある見通しが悪い状況下でも通信を可能とする、見通し外 (Non Line of Sight: NLOS) 光空間通信への応用が期待されている [7][8]。また、UV-C 光の存在しない自然環境下で進化してきた生物の DNA は、UV-C 領域の中に強い吸収構造を持ち、深紫

外LEDを使えば、塩素などの薬剤を用いずに、有害な細菌やウイルスなどを効果的に殺菌(不活性化)できる。中でも特に、波長265 nm帯の深紫外LEDは、発光波長がDNAの吸収ピークと重なり最も強い光殺菌作用を有することから[9]、ウイルス感染予防や水の浄化などの殺菌用途において重要な開発ターゲットとなっている。また通信や殺菌用途以外にも深紫外LEDは、光加工・3Dプリンタの高精細化や樹脂の硬化、印刷、環境汚染物質の分解、分光分析、医療応用など、多様な技術領域において今後重要な役割を果たしていくものと期待されている。

従来、深紫外光を照射する光源として、産業的には主に水銀ランプが用いられてきた。水銀ランプは高出力かつ安価であるため現在も広く利用されているが、人体や環境に有害な水銀を含み環境負荷の高い製品である。2017年、水銀廃絶に向け「水銀に関する水俣条約」が発効し、2020年より、水銀を含む製品の製造や輸出入について段階的な制限規制が始まっている。このため、水銀ランプに代わる小型・低環境負荷固体光源として深紫外LEDへの期待が飛躍的に高まっている(図1)。しかしながらこれまで、光出力とコストの両面で水銀ランプに圧倒的な優位性があり、本格的に代替が進むような状況には至っていない。今後、情報通信応用から殺菌、光加工、水銀ランプ代替といったUV-C高出力ニーズに、コストを抑えつつ対応していくためには、深紫外LEDの単チップ当たりの光出力をいかに高めていくかが最重要課題の一つとなる。本稿では、深紫外LEDの高出力化を阻んでいる幾つかの要因について述べたうえで、独自のナノ光構造技術

に立脚し、単チップで小型低圧水銀ランプに迫る光出力500 mW超(世界最高出力)の265 nm帯深紫外LEDの実証に成功した研究成果を中心に紹介する。

2 深紫外LEDの技術課題

2.1 高密度な結晶欠陥生成

深紫外LEDは、窒化アルミニウムガリウム(AlGaIn)から構成される。窒化アルミニウム(AlN)と窒化ガリウム(GaN)の混晶組成比を変えることで、その発光波長を広範囲(210 ~ 365 nm)で任意に制御でき、深紫外のほぼ全域をカバーする。AlGaIn系深紫外LEDは通常、有機金属気相成長(Metal Organic Chemical Vapor Deposition: MOCVD)法を用いてサファイア基板上に形成される。しかし従来、AlGaIn層とサファイア基板との格子定数差に起因し、結晶内部に 10^9 cm^{-2} 以上という非常に高密度な結晶欠陥(貫通転位)が発生し、素子の性能が大きく低下してしまう問題を長らく抱えていた(図2(a))。この課題に対し、 $10^7 \sim 10^8 \text{ cm}^{-2}$ 程度まで貫通転位を低減するパターン形成されたサファイア基板上の結晶成長技術や[10]、貫通転位がほぼ発生しない($< 10^6 \text{ cm}^{-2}$) AlN基板上LED形成技術等が[11][12]、近年多数報告されている。これらの結晶品質の向上によって、結晶内部の発光効率については大幅に改善されてきている。最近、我々は電流注入時の内部量子効率(Internal Quantum Efficiency: IQE)やキャリア注入効率(Carrier Injection Efficiency: CIE)の値を定量化する新しい技術を開発し、連続駆動中の265 nm帯 AlN基板上深紫外LEDのIQEが78%とい

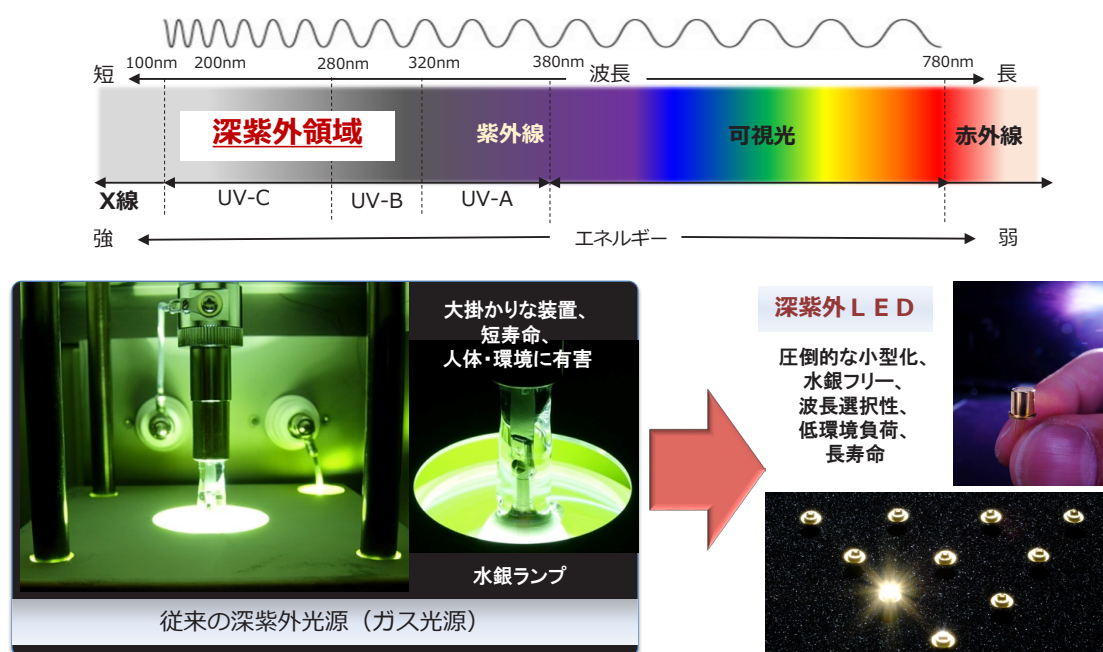


図1 深紫外波長領域の従来光源と深紫外LEDの必要性

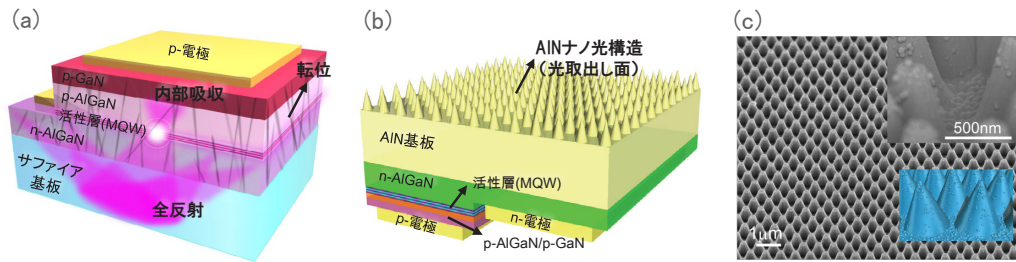


図2 (a) 深紫外LED技術課題の模式図、(b) 本研究で用いたナノ光構造付加型深紫外LEDデバイス構造の模式図と(c) その電子顕微鏡写真

う、青色LEDに匹敵する極めて高い値にまで達していることを報告している[13]。

2.2 p-AlGaIn中の深いアクセプター準位

しかし、これらの近年の研究進展により結晶品質に係る問題が大きく改善された一方で、依然として深紫外LEDの高出力化を阻んでいる幾つかの重大な課題が残されている。まず、265 nm帯のようなAl組成比の高いAlGaIn系深紫外LEDでは、p型層として形成されるp-AlGaIn中のアクセプター準位(ドーパント:Mg)が非常に深くなる[14]。一般に、Al組成比率70%程度において、その活性化エネルギーは400 meV前後にもなる[15]。このため室温でのホール濃度が極めて低く、p側金属電極との間の低抵抗なオーミック接合を得ることが難しい。この問題を避けるために、p-AlGaIn上に、高ホール濃度のp-GaN層をp電極との間のコンタクト層として形成することが一般的である。しかしp-GaNはオーミック接合を可能とする一方で、深紫外光を完全に吸収する。つまり、このような265 nm帯深紫外LEDでは、活性層から放射された光のうちp電極方向に放射された約半分の光は、ほとんど全て吸収され損失となる。また、可視光LEDと異なり深紫外領域では、ITO(Indium-Tin Oxide)のような効率よく電流拡散を行える透明電極も存在しない。このため、深紫外LEDでは必然的に、発光した光を基板側から取り出すフリップチップ実装と呼ばれる配置をとる。

2.3 極めて低い光取出し効率

深紫外LEDでは、深紫外光によって樹脂が劣化するため、可視光LEDのような透明・半球状の樹脂封止技術の利用は難しい。このため、基板と空気との界面で大きな屈折率差による全反射が生じ、光を取り出せる角度領域が狭い。さらに深紫外LEDでは一般的に、p-GaNや電極などによる内部吸収が大きいため、基板界面で全反射された光を再度デバイス裏面から折り返して取り出すマルチパスの利用も難しい。特に、AlN基板は屈折率が高く($n=2.29$ @265 nm)、光取出

し角度が狭い(臨界角:25.9°)うえに、基板自体が深紫外光をある程度吸収する性質を持つため、この問題はより深刻となる。ハイドライド気相成長法で作製した比較的透明度の高いAlN基板を用いても、265 nm帯では 10 cm^{-1} 程度の吸収係数を有する[16]。3次元時間領域有限差分(Finite-Difference Time-Domain: FDTD)法により計算を行うと、AlN基板上深紫外LEDの光取出し効率(Light Extract Efficiency: LEE)は、僅か3%程度と極めて低い。これらの原因によって、せっかく転位欠陥密度を下げて高い内部量子効率を得られても、活性層で発せられた光のほとんどは、外部に取り出される前に結晶内部で再吸収され、熱として失活してしまう。このジレンマの克服が深紫外LEDの最大の課題である。

2.4 光出力飽和現象(効率ドループ)

265 nm帯AlGaIn系深紫外LEDでは、透明性を維持するために、電流を注入するためのクラッド層のAlの組成比率が70%程度以上と極めて高くなるため、p型n型どちらも電気抵抗率が高くなる。このため、p電極とn電極の間の距離が最も短くなる電極メサ構造のエッジ近傍に電流が集中しやすく、印加電流の増加に伴い電流密度が非常に高くなる問題が発生する[17][18]。またさらに前述のとおり、LEEが極めて低いため、その印加電力の大部分が、素子内部で局所的に熱に変換されてしまう。この結果、注入電流の増加に伴ってLED活性層温度の急激な上昇(自己発熱)と、量子効率の低下が起こり、従来の可視や近紫外のLEDと比べ、光出力が極めて早く飽和してしまう現象(ドループ)が生じる。高出力化を実現するうえでは深刻な課題である。

3 高出力深紫外LEDの開発

3.1 ナノ光構造を駆使した高光取出し技術

一般に、半導体のバンドギャップの大きさとドーパント制御による電氣的伝導性(及びn/p型両極性)とは相反する性質となる。短波長化や透明性を優先すれば、

トレードオフで導電性に不利が生じる。また、AlN 基板を用いて格子定数差の解消、貫通転位密度の低減を優先すれば、光取出し特性の面で大きな問題を抱えてしまう。よって、深紫外 LED においては選択する材料的なアプローチとともに、その裏側に発現する物性的弱点をデバイス構造としてどう補完していくのかという総合的なデザインが求められる。本研究では、最も殺菌性の高い 265 nm 帯の光を発し、高出力で高安定電流駆動の深紫外 LED を実現するため、素子内に AlN 基板や p-GaN コンタクト層などの光吸収媒質が含まれていても、活性層から放射された深紫外光を、シングルパスで吸収される前に素子外部に効果的に取出せる手法の創出を目指した。

我々は IQE を高められる AlN 基板上 LED 構造を用いて、光取出し面となる AlN 基板表面に、全反射を抑制する AlN ナノ光構造を組込んだ深紫外 LED を開発した(図 2(b))。ナノ光構造として、フォトニック結晶と呼ばれる波長スケールの 2 次元周期凹凸構造と、波長の 1/10 程度のサイズのサブ波長テクスチャ構造を組み合わせた、全く新たなハイブリッド構造を設計した。

作製したハイブリッド型 AlN ナノ光構造の電子顕微鏡写真を図 2(c)に示す。このハイブリッド型ナノ光構造では、波長スケールのフォトニック結晶構造により深紫外域の光分散を人為的に制御すると同時に、サブ波長テクスチャ構造により界面全反射時のエバネッセント光の生成とその界面導波特性を制御した。図 3 に光伝播の様子を計算した結果を示す。サブ波長テクスチャ構造の近傍で生成されたエバネッセント光は、最適に設計された AlN コーンの側面を昇るように導波していき、その頂点で高効率に外部伝搬モードとカップリングする様子が見て取れる。これらの極めてユニークな原理によって、本来、全反射され内部吸収されてしまう光成分の多くを、外部に取り出すことができる。

光取出しに関する効果を評価した結果を図 4 に示す。従来素子(表面加工無し)と比較し、光取出し効率が、約 2 倍と大幅に向上した。これは、最適化されたフォトニック結晶構造単体はもとより、表面ラフニング構造や、マイクロレンズ構造、モスアイ(蛾の眼)構造など、従来提案されてきた種々の光取出し構造よりも、40 ~ 50 % 以上も高い結果である [5]。

3.2 ナノ構造付加型発光デバイスの大面積化・高スループット化技術

265 nm 帯 AlGaN 系深紫外 LED では、先に述べたとおり印加電流の増加に伴い光出力が極めて早く飽和してしまうドループ現象が生じる。このため、高出力

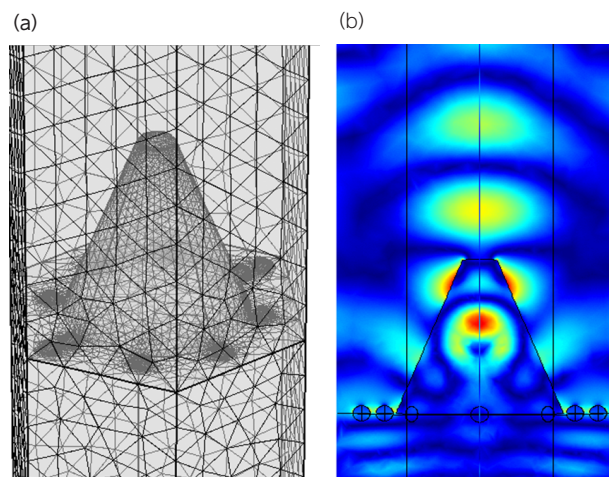


図 3 ハイブリッド型 AlN ナノ光構造周辺の電場分布(波長 265 nm)の計算結果
(a) 計算構造モデル、(b) 電場分布

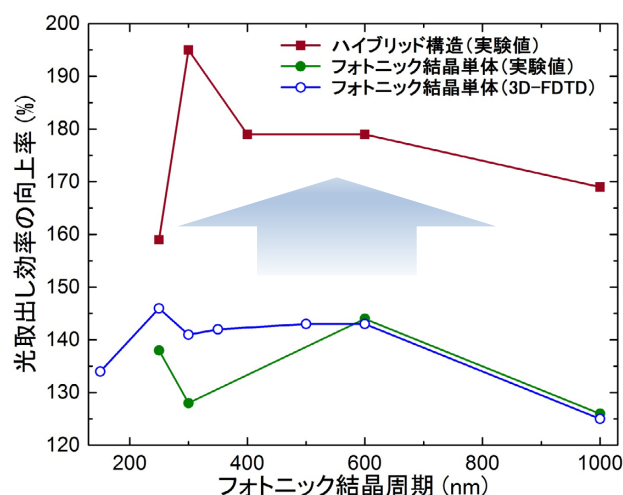


図 4 265 nm 帯深紫外 LED の AlN ナノ光構造付加による光取出し向上率

化を実現するうえでは、高電流注入時の電流密度を低減するため、実効発光面積の拡大に取り組むことも重要である。まず、深紫外 LED デバイス内の局所電流集中の問題に対して、我々は電流拡散や自己発熱特性について電流-熱連成計算解析を行い、大面積化した場合でもエッジ近傍に電流が集中せず、発光層への均一な電流拡散を可能とする電極メサ構造を設計した [19]。次に、発光領域の増大に伴い、光取出し効率を向上させる AlN 基板上のナノ光取出し構造についても大面積化することが必要となる。これまでの研究ではナノサイズ加工に対し、精度や設計柔軟性の面から電子ビーム (EB) 描画技術を用いていたが、LED のような低コスト化が何よりも重視されるプロセスには不向きである。そこで本研究では、将来の産業応用を見据え、EB 描画ではなく大面積・高スループット加工・低コスト化が実現可能なナノインプリント技術を用いて作製した。AlN のような加工の難しい材料を用いてナノ構造を駆使した光出力の向上を目指しながら、

低コスト化への適応性も並行して検討した。開発した作製技術の詳細は、参考文献 [20] を参照いただきたい。

3.3 265 nm 帯深紫外 LED の高出力化実証

ナノインプリント技術を用いて形成した AlN ナノ光構造付加型深紫外 LED (チップ面積: 約 1 mm^2 、メサ面積: 0.35 mm^2) を TO パッケージにフリップチップ実装した外観写真を図 5 に示す。光の干渉を起こす AlN ナノ光構造が、チップ全面にむらなく均一に形成されているのが分かる。同素子の光出力特性を図 6 に示す。従来素子 (表面加工無し) では、注入電流の増加に伴い、急速に光出力が飽和してしまう現象 (ドループ) が見られた。一方、AlN ナノ光構造を形成した深紫外 LED では、光出力が増大するとともに、注入電流を増加させても、ドループの発生が抑制された。この結果、従来素子に対し、高電流値において約 20 倍 (@850 mA) もの大幅な出力向上が得られた [20]。ナノ光構造の効果を検証するため、図 7 に両素子の遠視野及び近視野像を示す。どちらのプロファイルにおいても、従来素子に対しナノ光構造を付加した深紫外 LED では、高強度かつより広い角度範囲で深紫外光放射が観測された。開発した AlN ナノ光構造により、光取出し角度が大幅に拡大されていることを明確に示す実験

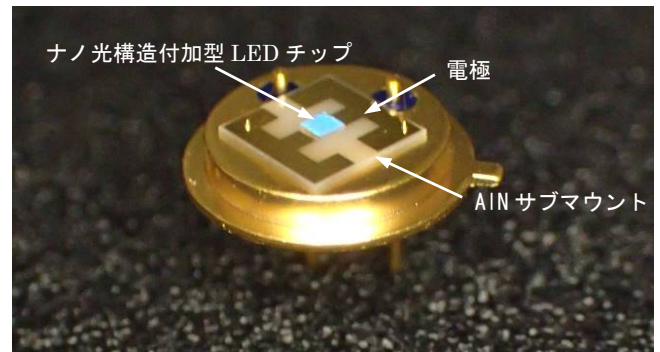


図 5 AlN サブマウントへのフリップチップ接合後の深紫外 LED の外観

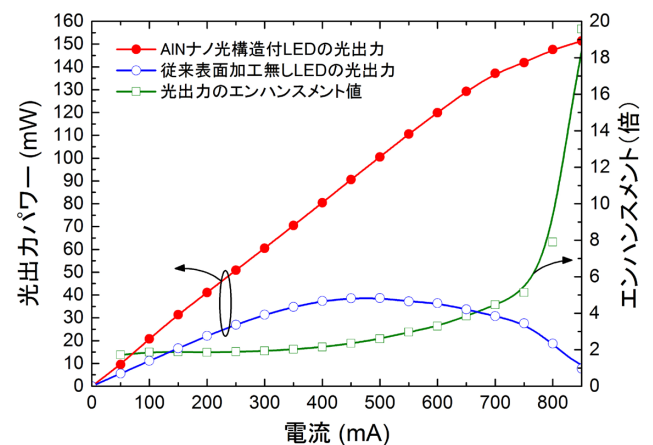


図 6 開発した深紫外 LED の注入電流に対する光出力とエンハンスメント

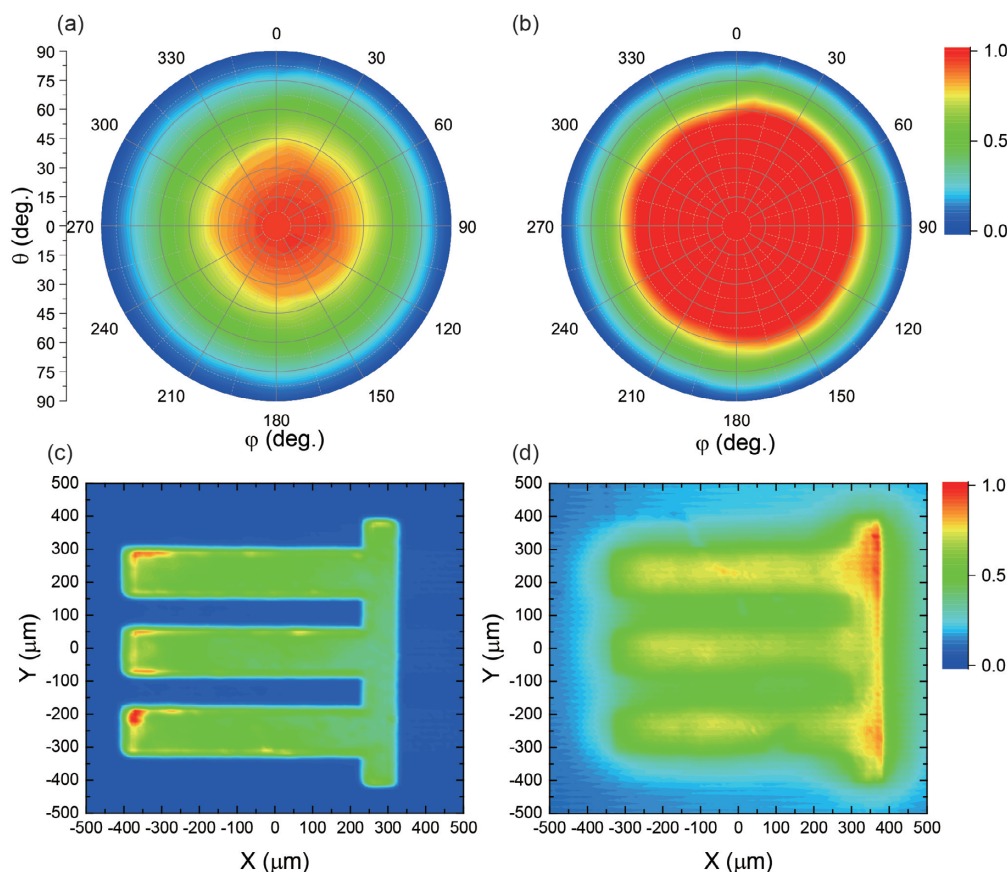


図 7 (a) 従来型 (表面加工無し) と (b) AlN ナノ光構造付加型の遠視野像比較、(c) 従来型 (表面加工無し) と (d) AlN ナノ光構造付加型の近視野像比較

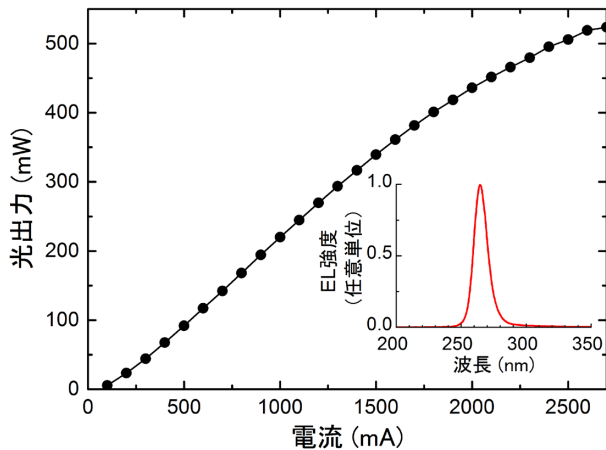


図8 面積を拡大したナノ光構造付加型深紫外 LED の注入電流に対する光出力。挿入図は 1 A 時の EL スペクトル

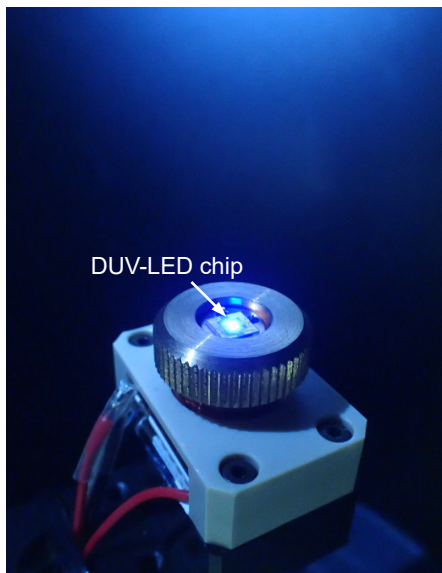


図9 実装後、電流を印加し発光中の深紫外 LED の外観写真

結果である。最後に、LED チップ及び AlN ナノ光取出し構造の面積を $1.8 \times 1.8 \text{ mm}^2$ に拡大したデバイスの光出力特性を図8に示す。発光領域を拡大しドレープを更に抑制することで、発光波長 265 nm、シングルチップ、室温・連続駆動下の深紫外 LED において(図9)、光出力 520 mW 超という小型低圧水銀ランプに匹敵する特性が得られた。

4 今後の展望とまとめ

環境にやさしく、小型・ポータブルで高出力な深紫外 LED の実現は、水銀ランプの置き換えだけではなく、持ち運び可能なウイルス殺菌システムやポイントオブケア型医療、家電搭載など、これまでにない小型 DUV 光源の特色を活かした様々な新しい応用分野の開拓が期待される。本稿で取り上げた単チップでの

265 nm 帯深紫外 LED の高出力動作実証は、それらの普及へ鍵となる光源の高出力化と低コスト化、両面に対して大きく貢献する技術である。

また一方で、深紫外 LED には外部量子効率 (External Quantum Efficiency: EQE) や長期信頼性など、いまだ改善すべき点が多いことも付記しておく。我々は 265 nm 帯深紫外 LED の EQE として最も高い 6.3 % を報告している [5]。また、より長波長 (より低 Al 組成) の 275 ~ 280 nm 帯の深紫外 LED では、p-GaN を使わず p-AlGaIn に直接コンタクトを取ることで、比較的低出力であるものの 10 ~ 20 % 程度の EQE も最近報告されている [21][22]。2000 年代前半まで UV-C 領域の EQE が 0.5 % 未満程度であったことを考えれば大きく進展しているものの、80 % 超の EQE も実現されている青色 LED の効率 [23] と比較するといまだ低い値にとどまっている。今後、新しいコンタクト材料の開発 [24] やナノ光構造を用いた DUV 光制御技術の更なる発展はもちろん、周囲のパッケージ構造まで含めた新たな工夫の導入を考えている。発光波長が最も短く、あらゆる箇所での光吸収、自己発熱や経時劣化が生じやすい深紫外 LED においては、それらの課題に総合的に対処し、性能だけではなく信頼性まで含めた議論を積み重ねて進展していくことが重要である。

今後は、深紫外 LED だけでなく深紫外レーザーダイオード (LD) も含め、水銀フリーかつ小型・高出力・高効率、長寿命な深紫外固体光源システムの研究開発を更に発展させ、その社会実装を実現していくとともに、これまでになかったソーラーブライントな特徴を活かした様々な新しい DUV-ICT の開発可能性を世界に先駆け実証していくことで、安心・安全でクリーン、持続可能な社会の構築に貢献することを目指していく。

謝辞

本稿で紹介した研究は、深紫外光 ICT デバイス先端開発センターのメンバーの協力及び株式会社トクヤマ並びにスタンレー電気株式会社との共同研究の下、実施されたものである。また本研究は、科学技術振興機構 (JST) の研究成果展開事業 A-STEP (AS2525010 J、AS2715025 R) からの支援の下に遂行された。協力いただいた関係者の皆様にこの場を借りて深く感謝申し上げる。

【参考文献】

- 1 A. Khan, K. Balakrishnan, and T. Katona, "Ultraviolet light-emitting diodes based on group three nitrides," Nat. photon., vol.2, pp.77, 2008.
- 2 M. Kneissl, T. Y. Seong, J. Han, and H. Amano, "The emergence and prospects of deep-ultraviolet light-emitting diode technologies," Nat. photon., vol.13, p.233, 2019.

- 3 M. Shatalov, W. Sun, R. Jain, A. Lunev, X. Hu, A. Dobrinsky, Y. Bilenko, J. Yang, G. A. Garrett, L. E. Rodak, M. Wraback, M. Shur, and R. Gaska, "High power AlGaIn ultraviolet light emitters," *Semicond. Sci. Technol.*, vol.29, 084007, 2014.
- 4 M. Kneissl and J. Rass, "A Brief Review of III-Nitride UV Emitter Technologies and Their Applications," *III-Nitride Ultraviolet Emitters Technology and Applications*, Springer, 2016.
- 5 S. Inoue, N. Tamari, T. Kinoshita, T. Obata, and H. Yanagi, "Light extraction enhancement of 265 nm deep-ultraviolet light-emitting diodes with over 90 mW output power via an AlN hybrid nanostructure," *Appl. Phys. Lett.*, vol.106, 131104, 2015.
- 6 井上振一郎, "ナノ光構造技術を用いた高出力深紫外 LED" *応用物理*, vol.88, no.10, pp.663-667, 2019.
- 7 G. Chen, Z. Xu, and B. M. Sadler, "Experimental demonstration of ultraviolet pulse broadening in short-range non-line-of-sight communication channels," *Opt. Express*, vol.18, 10500, 2010.
- 8 G. Chen, Z. Xu, H. Ding, and B. M. Sadler, "Path loss modeling and performance trade-off study for short-range non-line-of-sight ultraviolet communications," *Opt. Express*, vol.17, 3929, 2009.
- 9 M. Kneissl, T. Kolbe, C. Chua, V. Kueller, N. Lobo, J. Stellnach, A. Knauer, H. Rodriguez, S. Einfeldt, Z. Yang, N. M. Johnson, and M. Weyers, "Advances in group III-nitride-based deep UV light-emitting diode technology," *Semicond. Sci. Technol.*, vol.26, 014036, 2011.
- 10 M. Kim, T. Fujita, S. Fukahori, T. Inazu, C. Pernot, Y. Nagasawa, A. Hirano, M. Ippommatsu, M. Iwaya, T. Takeuchi, S. Kamiyama, M. Yamaguchi, Y. Honda, H. Amano, and I. Akasaki, "AlGaIn-Based Deep Ultraviolet Light-Emitting Diodes Fabricated on Patterned Sapphire Substrates," *Appl. Phys. Express*, vol.4, 092102, 2011.
- 11 J. R. Grandusky, J. Chen, S. R. Gibb, M. C. Mendrick, C. G. Moe, L. Rodak, G. A. Garrett, M. Wraback, and L. J. Schowalter, "270 nm Pseudomorphic Ultraviolet Light-Emitting Diodes with Over 60 mW Continuous Wave Output Power," *Appl. Phys. Express*, vol.6, 032101, 2013.
- 12 T. Kinoshita, T. Obata, T. Nagashima, H. Yanagi, B. Moody, S. Mita, S. Inoue, Y. Kumagai, A. Koukitu, and Z. Sitar, "Performance and Reliability of Deep-Ultraviolet Light-Emitting Diodes Fabricated on AlN Substrates Prepared by Hydride Vapor Phase Epitaxy," *Appl. Phys. Express*, vol.6, 092103, 2013.
- 13 G.-D. Hao, N. Tamari, T. Obata, T. Kinoshita, and S. Inoue, "Electrical determination of current injection and internal quantum efficiencies in AlGaIn-based deep-ultraviolet light-emitting diodes," *Opt. Express*, vol.25, A639, 2017.
- 14 M. L. Nakarmi, N. Nepal, J. Y. Lin, and H. X. Jiang, "Photoluminescence studies of impurity transitions in Mg-doped AlGaIn alloys," *Appl. Phys. Lett.*, vol.94, 091903, 2009.
- 15 M. L. Nakarmi, K. H. Kim, M. Khizar, Z. Y. Fan, J. Y. Lin, and H. X. Jiang, "Electrical and optical properties of Mg-doped $\text{Al}_{0.7}\text{Ga}_{0.3}\text{N}$ alloys," *Appl. Phys. Lett.*, vol.86, 092108, 2005.
- 12 T. Kinoshita, K. Hironaka, T. Obata, T. Nagashima, R. Dalmau, R. Schlessler, B. Moody, J. Xie, S. Inoue, Y. Kumagai, A. Koukitu, and Z. Sitar, "Deep-Ultraviolet Light-Emitting Diodes Fabricated on AlN Substrates Prepared by Hydride Vapor Phase Epitaxy," *Appl. Phys. Express*, vol.5, 122101, 2012.
- 17 W. Sun, M. Shatalov, J. Deng, X. Hu, J. Yang, A. Lunev, Y. Bilenko, M. Shur, and R. Gaska, "Efficiency droop in 245–247 nm AlGaIn light-emitting diodes with continuous wave 2 mW output power," *Appl. Phys. Lett.*, vol.96, 061102, 2010.
- 18 G.-D. Hao, M. Taniguchi, N. Tamari, and S. Inoue, "Enhanced wall-plug efficiency in AlGaIn-based deep-ultraviolet light-emitting diodes with uniform current spreading p-electrode structures," *J. Phys. D: Appl. Phys.*, vol.49, 235101, 2016.
- 19 G.-D. Hao, M. Taniguchi, N. Tamari, and S. Inoue, "Current crowding and self-heating effects in AlGaIn-based flip-chip deepultraviolet light-emitting diodes," *J. Phys. D: Appl. Phys.*, vol.51, 035103, 2018.
- 20 S. Inoue, N. Tamari, and M. Taniguchi, "150 mW deep-ultraviolet light-emitting diodes with large-area AlN nanophotonic light-extraction structure emitting at 265 nm," *Appl. Phys. Lett.*, vol.110, 141106, 2017.
- 21 M. Shatalov, W. Sun, R. Jain, A. Lunev, X. Hu, A. Dobrinsky, Y. Bilenko, J. Yang, M. Shur, R. Gaska, C. Moe, G. Garrett, and M. Wraback, "AlGaIn Deep-Ultraviolet Light-Emitting Diodes with External Quantum Efficiency above 10%," *Appl. Phys. Express*, vol.5, 082101, 2012.
- 22 T. Takano, T. Mino, J. Sakai, N. Noguchi, K. Tsubaki, and H. Hirayama, "Deep-ultraviolet light-emitting diodes with external quantum efficiency higher than 20% at 275 nm achieved by improving light-extraction efficiency," *Appl. Phys. Express*, vol.10, 031002, 2017.
- 23 Y. Narukawa, M. Ichikawa, D. Sanga, M. Sano, and T. Mukai, "White light emitting diodes with super-high luminous efficacy," *J. Phys. D: Appl. Phys.*, vol.43, 354002, 2010.
- 24 G.-D. Hao, S. Tsuzuki, and S. Inoue, "Small valence band offset of h-BN/ $\text{Al}_{0.7}\text{Ga}_{0.3}\text{N}$ heterojunction measured by X-ray photoelectron spectroscopy," *Appl. Phys. Lett.*, vol.114, 011603, 2019.



井上振一郎 (いのうえ しんいちろう)

未来 ICT 研究所
深紫外光 ICT デバイス先端開発センター
センター長
博士 (工学)
ナノ光エレクトロニクス