

フジサンケイビジネスアイ賞

ナノ光構造技術を用いた150mW 超高出力
深紫外 LED の研究開発

国立研究開発法人 情報通信研究機構 未来 ICT 研究所
深紫外光 ICT デバイス先端開発センター

井上 振一郎

1. 諸言

近年、新型ウィルスの蔓延や飲料水不足、環境汚染などの深刻な懸念が地球規模で広がっている。これまで、細菌やウイルスなどの病原菌は、煮沸や塩素消毒などの伝統的な処理技術により無害化(殺菌)されてきた。しかし、熱殺菌はエネルギーコストが高く、可能な対象物やサイズが限定されていた。また塩素消毒については、残留塩素による河川などの水質汚染や、健康上の有害影響が指摘されている。このような状況の中、伝統的手法の問題点を解決する新しい技術として、深紫外線と呼ばれる、極めて強い殺菌作用を持つ光を発する「深紫外LED(発光ダイオード)」に高い関心が集まっている。

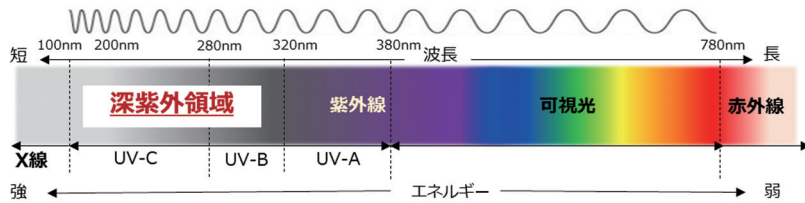
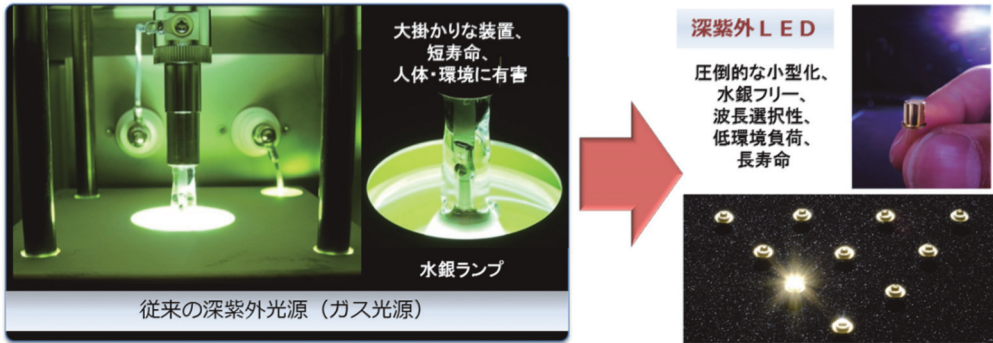
深紫外線とは、紫外線よりも更に短い波長領域(200~300nm)の光の名称である。特に、波長265nm付近の深紫外線が、DNAの吸収ピークと重なるため、最も強い殺菌作用を有する。従来、この深紫外線を発する光源として、主に水銀ランプが用いられてきた。しかし、水銀ランプは、光源としてのサイズや消費電力が極めて大きく、その利用範囲は限定されていた。また水銀は人体・環境に有害である。2017年には「水銀に関する水俣条約」が発効され、水銀廃絶に向けた国際的な取組が加速している。このような背景において、水銀ランプに代わる新しい光源技術の実現が切望されていた(図1)。

これらの課題を解決する新技術として、深紫外LEDが研究されてきた[1]。深紫外LEDは、水銀フリー、小型・ポータブルで、水銀ランプの置き換えや、飲料水の浄化などで重要なだけでなく、従来の水銀ランプでは不可能であった、持ち運び可能なウイルス殺菌システムや、空気清浄器や除菌家電への搭載、院内感染予防のための医療機器応用など、幅広い分野への革新的な貢献が期待される。しかし、これまでの深紫外LEDは、その技術的な困難さから、光出力の微弱なものしか実現できておらず、実用面で普及させるには、高出力化を達成する新しい技術の開発が必要とされていた。

本論文では、独自に開発したナノ光構造技術により、高出力化を阻んでいた技術課題を克服し、世界で初めて実用水準となる光出力100mWを大幅に上回る深紫外LEDの開発に成功したことについて述べる。

2. 開発背景と技術課題

深紫外LEDは、実現可能な発光ダイオードとして、最も波長が短い。青色LEDに続く研究フロンティアとして期待されてきた[2]。材料としては、窒化物系半導体(AIGaN:窒化アルミニウムガリウム)から構成される。従来、AIGaN系深紫外LEDでは、主にサファイア基板が用いられてきた。しかし、LEDを形成するAIGaN層と、下地となるサファイア基板との結晶格子定数差によって歪みが生じる。このため、結晶の内部に10億個/cm²以上という非常に高密度な欠陥(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))。



製造・電子産業

半導体製造工程、3Dプリンタ、印刷、樹脂硬化、光リソグラフィ

環境

水銀ランプ等の高環境負荷光源の代替、クリーンな水浄化システム

医療、安心・安全

細菌・ウイルス殺菌、パンデミックの抑止、院内感染の予防、ポイントオブケア医療

その他、幅広い応用

空気の除菌（エアコン・空気清浄器）、家電製品（冷蔵庫や歯ブラシ）、トイレ除菌、食品の安全など

図1 深紫外LEDの必要性とインパクト

この課題に対し、近年、従来と比較し一桁から二桁程度、貫通転位を低減するサファイア基板上の結晶成長技術(例えば文献[3])や、貫通転位がほぼ発生しない窒化アルミニウム(AIN)基板上LED[4]が提案された。これらの技術進展により、結晶内部での欠陥の発生が抑えられ、結晶内部の発光効率(内部量子効率)が大幅に改善された。ここで我々NICTでは、株式会社トクヤマおよびスタンレー電気株式会社と共同研究により、AIN基板上LEDの研究開発を進めている。最近、我々は電流注入時の内部量子効率の値を定量化する手法を提案し[5]、特に、AIN基板上LEDでは、内部量子効率の値が約80%という高い値であることを明らかにした。

しかしながら、結晶欠陥の問題が改善した一方で、依然として深紫外LEDの高出力化を阻んでいる、次の2つの重大な課題が残されている。

【課題1】 殆どの光が、チップ内部で吸収されてしまい、外部へ光を取り出せない

AIN基板上LEDでは、基板とLED層との間の格子定数差が殆ど生じないため、転位欠陥の発生が抑えられ、高い内部量子効率の実現が可能だ。しかし、それと引き換えに、LEDチップの外側に光を取り出しにくいという性質を抱えている。

AIN基板は、サファイア基板と比べ、屈折率が高く($n=2.29$ @265nm)、空気との界面で全反射されてしまう角度領域が広い。このため、殆どの光が基板表面で全反射され、光を外部へ取り出すことができない。

さらに深刻なのが、深紫外LED特有の光吸収の問題だ。深紫外光は、LEDとして最も波長が短い。つまり光エネルギーとして考えれば、最もエネルギーが高い(波長265nmで4.68eV)。そのため、深紫外光を透過する電極は存在せず、不透明である。また、低抵抗なオーミック接合を得るために、p型窒化ガリウム(GaN)をコンタクト層として形成する必要があるが、GaNは深紫外光を完全に吸収してしまう。このため、深紫外LEDでは、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。その際、光はAIN基板を通過するが、AIN基板は深紫外光をある程度吸収する性質を持つ。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AIN基板を用いても、265nm帯では 10cm^{-1} 程度の吸収係数を有する[4]。3次元時間領域有限差分(3D-FDTD)法による理論計算の結果、AIN基板上LEDから外部に取り出せる光の割合(光取出し効率)は、わずか4%未満と極めて低い。

これらの原因によって、せっかく高い内部量子効率を得られても、結晶内部で発せられた光の殆どは、外部に取り出される前に再吸収され、熱として失活してしまう。このジレンマの克服がAIN基板上深紫外LEDの最大の課題である。

【課題2】 印加電流を増加させると、光出力が飽和してしまい、高出力化できない

265nm帯AlGaN系深紫外LEDでは、Alの組成比率が70%以上となるため、p型n型どちらも、電流を注入するためのクラッド層の電気抵抗率が高くなる。このため、p電極とn電極間の距離が最も短くなる電極エッジ近傍に電流が集中し、印加電流の増加に伴い、電流密度が非常に高くなる[6]。またさらに上述の通り、光取出し効率が極めて低いため、印加電力の大部分が、素子内部で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効率の低下が起り、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上では重大な問題である。

以上の観点から、我々は、結晶欠陥の問題を改善できるものの、上述したトレードオフの課題を抱えるAIN基板上深紫外LEDに対して、光取出し特性を大幅に向上しつつ、光出力飽和現象も改善する、ナノ光構造技術を活用した新たな高出力化手法の開発に取り組んだ(図

2(b))。

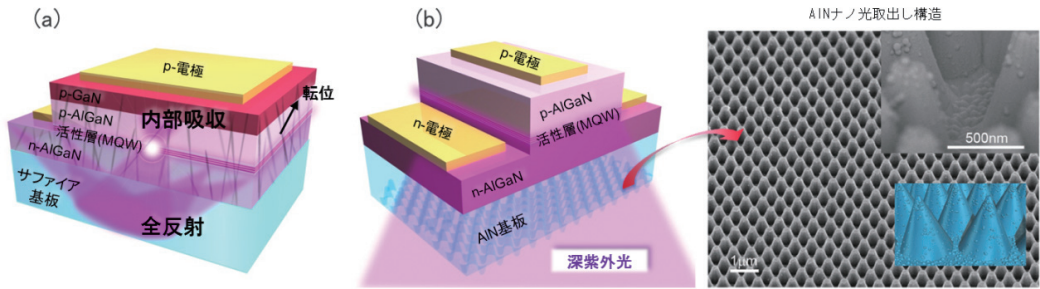


図2 (a)深紫外LEDの従来技術課題の模式図と(b)我々の用いるナノ光構造技術を活用した深紫外LEDのデバイス構造の模式図と電子顕微鏡写真

3. 深紫外LEDの高出力化技術

3.1 AlN ナノ光構造による深紫外LED光取出し技術

AlN基板上深紫外LEDでは、AlN基板と空気の界面において最も屈折率差が大きくなり、そこで全反射が生じる。臨界角は 25.9° であり、殆どの光は全反射された後、LEDチップ内のAlN基板やp型GaInコンタクト層で再吸収され、外部に取り出すことができない。従来、全反射を抑制する手法として、樹脂で封止して屈折率差を緩和する方法や、裏面に反射構造を形成し何度も光線を折り返して取り出す方法が用いられてきた。しかし、AlN基板上深紫外LEDでは、これらの手法は適用できない。前者は、樹脂が深紫外線で劣化するため使用できず、後者は、LEDチップ内で強い光吸収が起こるためにマルチパスの利用が不可能だからだ。

我々は、この問題を解決するために、光取出し面となるAlN基板表面に、全反射を抑制する独自のAlNナノ光構造を組込んだ深紫外LEDを開発した。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、それよりも十分にサイズの小さなサブ波長テクスチャ構造を組合せた、全く新たなハイブリッド構造を提案した。

図2(b)にその構造の電子顕微鏡写真を示す。光を取り出すメカニズムと各構造の役割は以下の通りである。まず波長スケールのフォトニック結晶構造により、光の分散関係(光バンド構造)、すなわち光の回折角度や伝播方向を人工的に制御することが可能となる[7]、[8]。3D-FDTD法により、周期や高さ、AlNコーン形状などを理論的に最適化し、最も光取出しに適した構造を探し出した。また、サブ波長テクスチャ構造では、エバネッセント光と呼ばれる、全反射時に界面にしみ出る光の生成と界面導波を制御した。以上の2つの機能を組合せることにより、全反射が高度に抑制され、光取出し特性が改善された深紫外LEDが得られる。

図3に光伝播をシミュレーションした結果を示す。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ことを発見した[9]。

次に、このような構造を作製するため、加工の難しい AlN に対し、誘導結合プラズマ (ICP) ドライエッチングと塩酸ウェットエッチングを組合せた高精度なナノ微細加工技術を確立した(次節に詳細を記述)。そして実際に、深紫外 LED 上に、上述の AlN ナノ光構造を形成し、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、フォトニック結晶単体はもとより、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構造よりも、40~50% 以上も高い、画期的な結果である [9], [10] (報道事例1-10)。

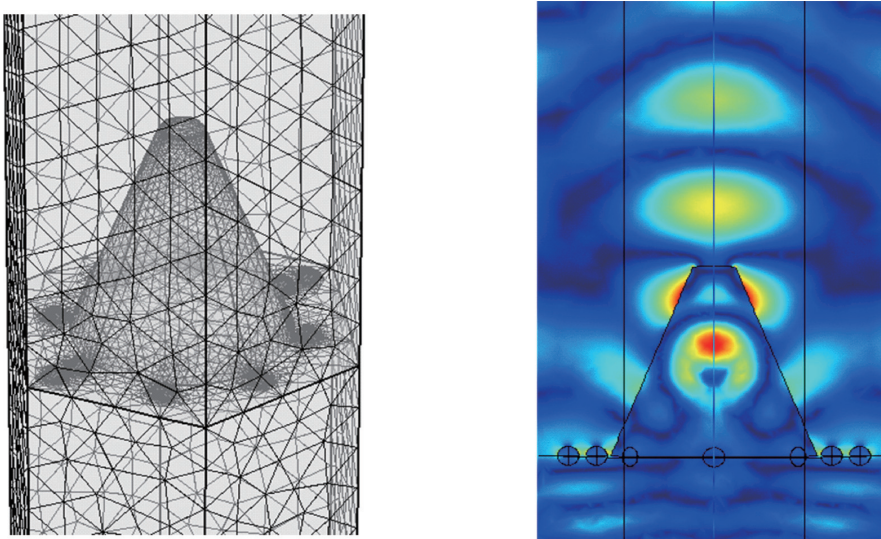


図3 AlN ナノ光構造周辺の電場分布(波長265nm)の計算結果

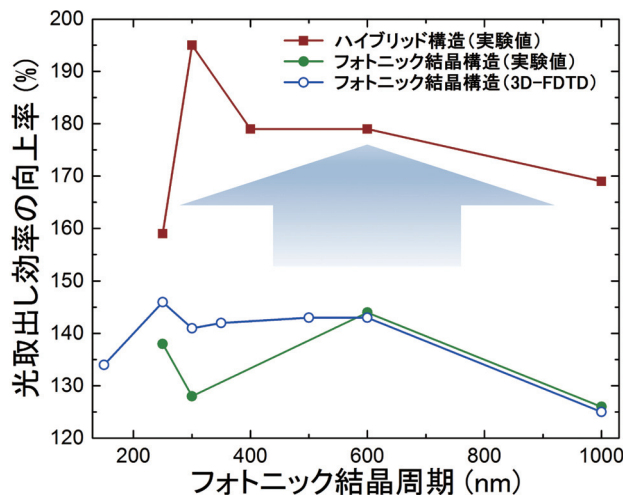


図4 265nm 帯深紫外 LED の AlN ナノ光構造を付加した場合の光取出し効率の向上率

3.2 高スループット・高均一な大面積 AlN ナノ光構造一括形成技術

深紫外 LED 上に、上述の AlN ナノ光構造を形成することで、最大の課題である低光取出し効率の問題を解決した LED を実現できる。しかし、このようなナノ光構造を利用する場合は、作製に掛かるコストについても同時に考慮せねばならない。ここで我々は、微細加工の難しい AlN に対して、量産に適したナノインプリント技術を活用した、ナノ光構造の大面積一括形成手法の開発に取り組んだ。

従来のナノサイズ加工では、電子ビーム描画装置や縮小投影型露光装置(ステッパー)が用いられ、大掛かりな装置と莫大な設備投資、ランニングコストを要する。LED のような低コスト化を要求されるプロセスには不向きである。これに対し、ナノインプリント技術は、ナノレベルの凹凸が形成された型(テンプレート)を樹脂薄膜(レジスト)に押し付けて成型するシンプルな加工技術で、高スループット、低コスト化を実現可能な量産技術である [11]。しかしながら、これまでシリコンやサファイアなどの一般的な材料に対する加工実績はあったが、AlN のような加工の難しい特殊な材料に対して適用された例はなかった。

図5に開発した作製フローを示す。面内均一性を確保するためには、ナノインプリント用樹脂の膜厚を薄くする必要がある。しかし、それでは AlN をエッチングするためのマスクとしての役割を果たせない。そこで我々は、ポリマー犠牲層、酸化シリコン層、UV インプリント樹脂からなる3層構造を用いて、最終的にニッケル金属マスクにパターンを転写する手法を開発した。このような手法で作製した AlN ナノ光構造の電子顕微鏡写真を図6に示す。深紫外 LED 光取出し面上の全面に AlN ナノ光構造が、むらや欠陥なく、ナノスケールで均質に形成されていることが確認できる [12], [13]。

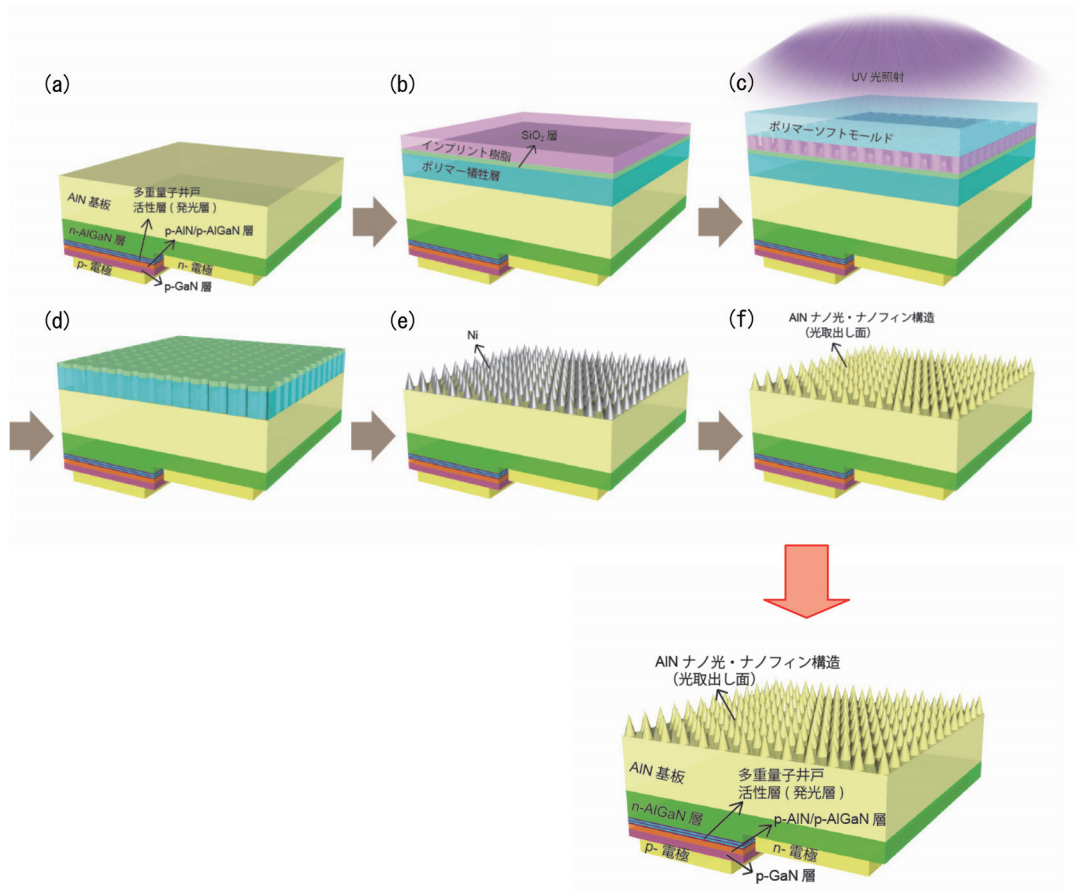


図5 ナノインプリント技術を活用した AlN ナノ光構造の作製フロー
 (a) メサ形成及び p, n 電極形成後の深紫外 LED (b) ポリマー犠牲層、SiO₂ 層、インプリント樹脂の形成
 (c) ソフト UV インプリント工程 (d) ドライエッチング工程 (e) Ni ハードマスクリフトオフ工程
 (f) ドライ & ウェットエッチング工程

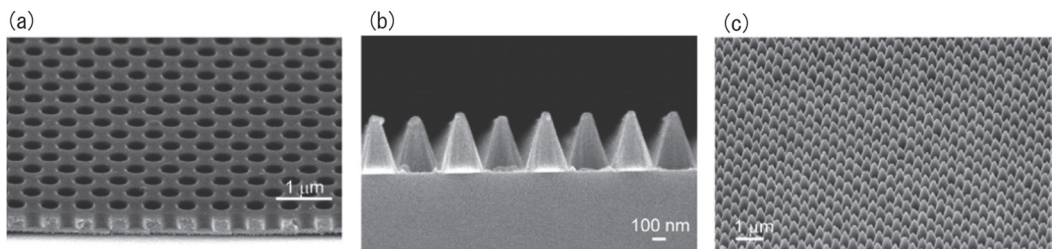


図6 (a) ソフト UV インプリント後の樹脂パターン (b) AlN 表面上の Ni リフトオフパターン
 (c) 深紫外 LED 光取出し面上の全面に形成された AlN ナノ光構造の電子顕微鏡写真

3.3 光出力飽和現象が抑制され高出力な深紫外LEDの実証

前節の技術を用いて開発した深紫外LEDの外観を図7に示す。チップサイズ 1mm^2 のLEDチップをAINサブマウント上にフリップチップ実装している。光の干渉を起こすAINナノ光構造が、チップ全面に形成されているのが分かる。本節では、今回開発した深紫外LEDのデバイス特性について説明する。

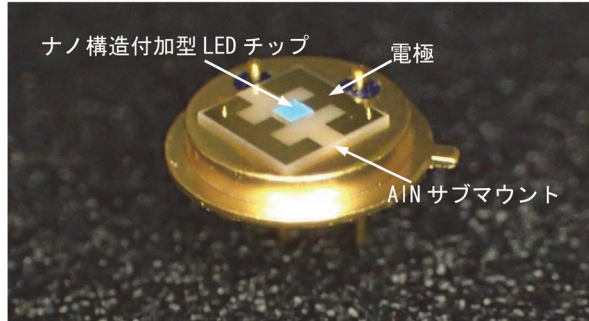


図7 マウントへのフリップチップ接合後の深紫外LEDの外観

図8に深紫外LEDの遠視野放射パターンを示す。従来品(表面加工無し)では、中心付近の一部を除き、弱い光強度しか得られていない。一方、今回開発したAINナノ光構造を付加した深紫外LEDでは、より広い角度範囲で、且つより強い光放射強度が観測された。この結果は、狭かった光取出し角を、大幅に拡大できていることを示している。

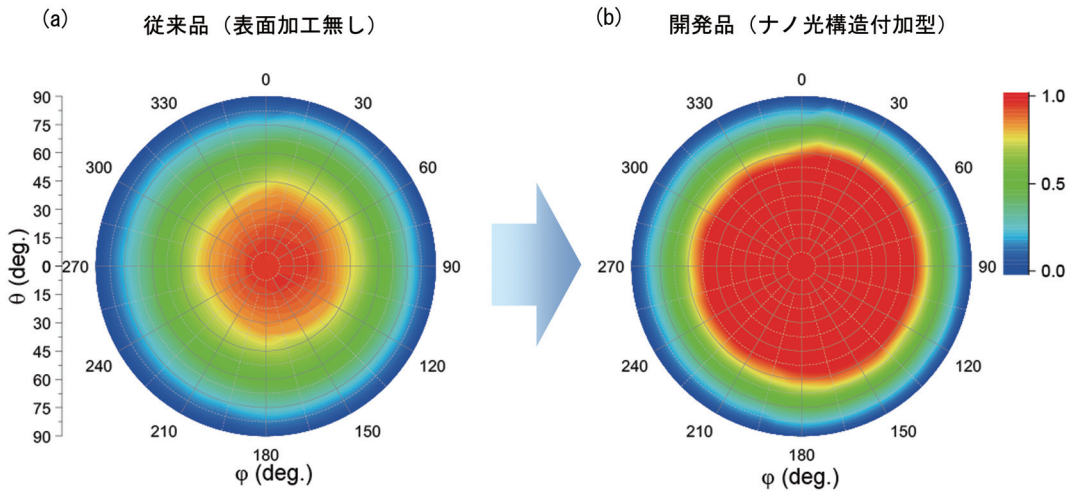


図8 深紫外LEDの3次元ファーフールド放射パターン

図9に深紫外LEDの発光スペクトルを示す。最も殺菌力の高い、波長265nm付近で発光していることを確認した。スペクトル上でも、AlNナノ光構造を付加することで、単一ピークを維持したまま、大幅な光強度の増大が観測された。

またスペクトルの電流値依存性の結果から、新たな視点の大きな発見があった。従来品(表面加工無し)では高電流値において、大きなレッドシフト(発光ピークの長波長側へのシフト)が観測されたのに対し、開発したAlNナノ光構造付加型深紫外LEDでは、レッドシフト量が極めて少なく抑えられていることを見出した。レッドシフト量とLEDのジャンクション温度(発光部の温度)は、直接的な相関関係にある。この結果、AlNナノ光構造は、光取出し特性を向上させるだけでなく、ナノフィン構造として機能し、熱放射特性をも向上させていることが明らかとなった。これは高出力化に対し、極めて有効な特性の発見である。

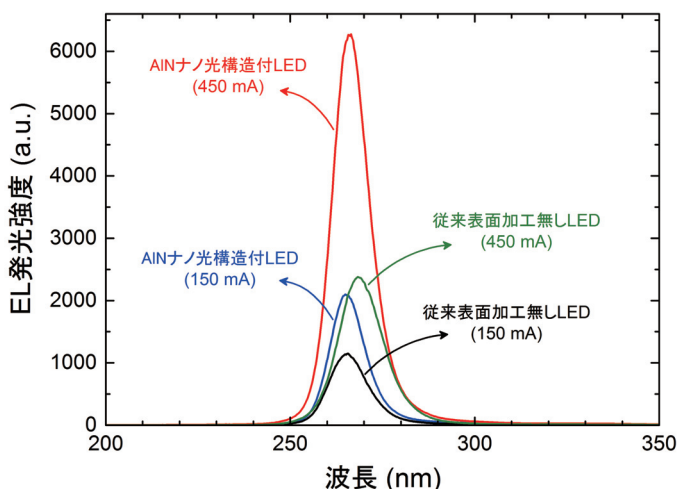


図9 深紫外LEDの各注入電流値に対するELスペクトル

図10に深紫外LEDの光出力特性を示す。従来品(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、注入電流を増加させても(最大850mAまで)、ドループの発生が明確に抑制された。これは、AlNナノ光構造による光取出し効率の改善(熱損失の低減)と、熱放射特性の向上という2つの効果が発揮されたためである。この結果、従来品に対し、高電流値において約20倍(@850mA)もの大幅な出力向上に成功した。

以上の開発技術によって、発光波長265nm、シングルチップ、室温・連続駆動下の深紫外LEDにおいて、世界最高出力となる光出力150mW超を達成した[12], [14](報道事例11-19)。

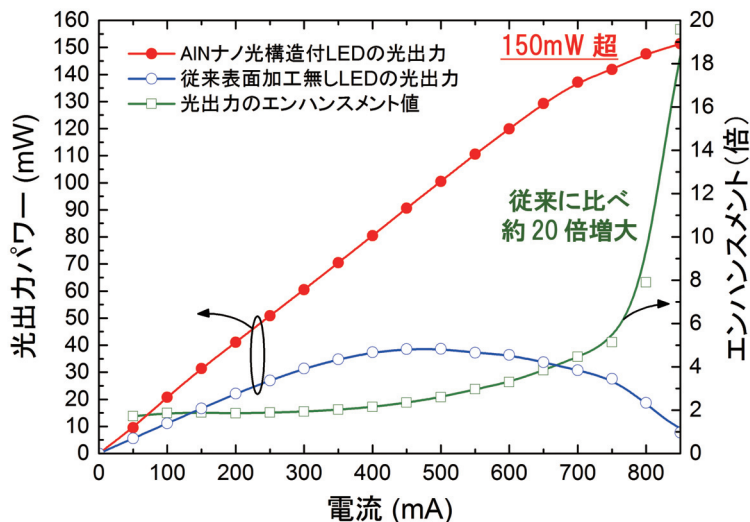


図10 深紫外LEDの注入電流に対する光出力とエンハンスメント

4. 高出力深紫外LEDによる展開

～深紫外LEDが拓く安心・安全な社会～

深紫外LEDは、その高い光エネルギーにより、極めて強い殺菌作用を持ち、ウイルスの殺菌、飲料水・空気の浄化をはじめ、食品の安全・衛生分野や、院内感染の予防といった医療分野などでその活用が期待されている(図11)。また同時に、最も発光波長の短いLEDであることから、殺菌用途以外にも、3Dプリンタやスキャナの高精細化、樹脂の硬化、印刷、環境汚染物質の分解、センシング・分析、ICT応用など、幅広い領域でその利用が期待されている。

今回開発に成功した深紫外LEDでは、実用水準となる光出力100mW台を世界で初めて突破した。殺菌から環境、工業、ICT、医療分野に至るまで、広範囲にわたる応用分野への普及を飛躍的に加速させる画期的な技術といえる。

水銀フリー、有害な薬剤を使用しない深紫外LEDによる水の浄化は、直近の有望用途として、特に強い期待を集めている。塩素などの残留や有害な副生成物も生じず、自然環境や人の健康を守ることができる。また近年、塩素に耐性をもつ寄生虫(クリプトスポリジウム)による集団感染事例が世界中で多数報告されており、深紫外線処理がその対策の柱に位置付けられている。さらに加えて、海の生態系を保全する取組みのため、船舶のバラスト水の殺菌を義務付ける「バラスト水管理条約」も2017年に発効されるなど、ますます薬剤を用いない深紫外線を用いたクリーンな殺菌処理に対する需要が高まっている。

これまで光出力とコストの面で、まだまだ水銀ランプに優位性があり、深紫外LEDの普及は進んでいなかったが、今回の開発により、複数チップを搭載したモジュールを想定した場合、ついに水銀ランプに遜色ない光出力を実現できることが示された。また冒頭で述べた通り、「水銀に関する水俣条約」が2017年に発効され、人体や環境に悪影響を与える水銀ランプの輸出入や製造は、徐々に制限されていく見通しである。コストを含む総合的な観点か

らも、極めて近い将来、深紫外 LED への代替が本格的に始まるものと見込まれる。

我々 NICT では、共同研究先であるスタンレー電気株式会社 (2017年1月に株式会社トクヤマの深紫外 LED 事業を取得) に対し、社会実装に向けた技術移転活動を進めており、2018年度内にはスタンレー電気から、本論文で述べたナノ光構造技術が搭載された深紫外 LED の量産、製品出荷が開始される見込みである。

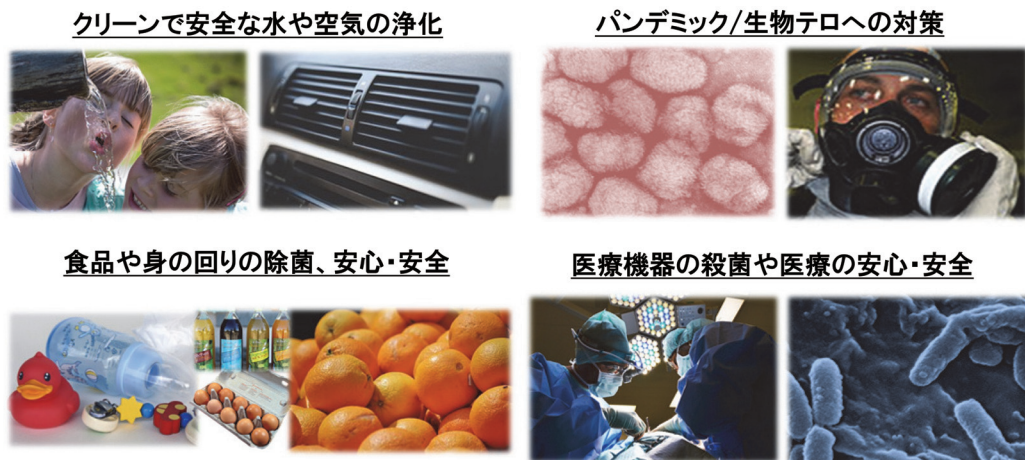


図 11 高出力深紫外 LED を用いた殺菌用途の可能性

5. 結 言

室温・連続動作において 150 mW 超の世界最高出力となる 265nm 帯深紫外 LED の実証に成功した。AIN ナノ光構造技術により、深紫外 LED の最重要課題であった光取出し特性の向上と、光出力飽和現象の改善を達成した。また性能面の向上だけでなく、作製に掛かるコスト低減に配慮した、ナノインプリント技術を活用した AIN ナノ光構造の大面積一括形成手法の開発にも世界初で成功した。深紫外 LED の社会普及実現に向け長らくの課題であった、高出力化と低コスト化に大きく貢献する点で、重要なブレイクスルーとなる技術である。

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、既存市場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の医療診断・分析など、これまでにない様々な新規市場の創出も期待される。我々は、今後も深紫外 LED に関する研究開発を一層進化させていくことで、安心安全で持続可能な社会づくりに貢献していきたいと考えている。

謝 辞

本研究は、科学技術振興機構 (JST) の研究成果展開事業 A-STEP (AS2525010J、AS2715025R) からの支援のもとに実施されたものである。また本研究は、株式会社トクヤマおよびスタンレー電気株式会社との共同研究のもと実施されたものである。また最後に、情報通信研究機構および共同研究機関の関係者のご協力に心より感謝申し上げる。

参考文献

- [1] A. Khan, K. Banakrishnan, and T. Katona, “Ultraviolet light-emitting diodes based on group three nitrides”, *Nature Photonics* **2**, 77 (2008).
- [2] 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.* **26**, 014036 (2011).
- [3] 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* **4**, 092102 (2011).
- [4] 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* **5**, 122101 (2012).
- [5] 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* **25**, A639 (2017).
- [6] 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.* **49**, 235101 (2016).
- [7] **S. Inoue**, S. Yokoyama, and Y. Aoyagi “Direct determination of photonic band structure for waveguiding modes in two-dimensional photonic crystals”, *Opt. Express* **16**, 2461 (2008).
- [8] **S. Inoue**, and Y. Aoyagi “Design and Fabrication of Two-Dimensional Photonic Crystals with Predetermined Nonlinear Optical Properties”, *Phys. Rev. Lett.* **94**, 103904 (2005).
- [9] **S. Inoue**, N. Tamari, T. Kinoshita, T. Obata, and H. Yanagi, “Light extraction enhancement of 265nm deep-ultraviolet light-emitting diodes with over 90 mW output power via an AlN hybrid nanostructure”, *Appl. Phys. Lett.* **106**, 131104 (2015).
- [10] 井上 振一郎、溜 直樹：“半導体発光素子およびその製造方法”、再公表特許 国際公開番号：WO2015/016150
- [11] S. Y. Chou, P. R. Krauss, and P. J. Renstrom, “Imprint of sub - 25 nm vias and trenches in polymers”, *Appl. Phys. Lett.* **67**, 3114 (1995).
- [12] **S. Inoue**, N. Tamari, and M. Taniguchi, “150 mW deep-ultraviolet light-emitting diodes with large-area AlN nanophotonic light-extraction structure emitting at 265nm”, *Appl. Phys. Lett.* **110**, 141106 (2017).
- [13] 井上 振一郎、溜 直樹：“凹凸構造を含む基板の製造方法及び半導体発光素子の製造方法”、公開特許公報 特開2017-63099
- [14] 井上 振一郎：“高出力深紫外 LED の研究開発”、一般財団法人光産業技術振興協会 オプトニュース Vol.12, N0.4, 6-11 (2017).

関連の報道事例

1. 日本経済新聞「10倍強い深紫外線照射 殺菌効果高いLED 情報機構など」2015年4月7日
2. プレスリリース「世界最高出力(90mW超)の深紫外LEDの開発に成功 ～ナノ光構造により、光取出し効率を劇的に向上～」国立研究開発法人情報通信研究機構、2015年4月1日
3. TV報道「深紫外LED実用化に向けて進展」テレビ東京 Mプラス11、2015年4月2日
4. 日経産業新聞「LED殺菌力向上 深紫外波長領域 出力9倍に」2015年4月7日
5. 日刊工業新聞「情報機構など 小型深紫外LED開発」2015年4月2日
6. 電波タイムズ「ナノ光構造で光取出し効率劇的に向上」2015年4月8日
7. 科学新聞「世界最高出力の深紫外LED開発 医療分野などへ展開期待」2015年4月10日
8. 化学工業新聞「世界最高出力を実現 ナノ光構造で高効率」2015年4月3日
9. 日経ビジネス「深紫外LED 未来の光でカビに勝利」2015年11月9日
10. 日経テクノロジーオンライン「深紫外LEDの光取り出し効率を驚異的に改善」2017年3月10日
11. 日経産業新聞「出力10倍 殺菌用LED 20年までに実用化へ 情通機構など」2017年4月5日
12. プレスリリース「150mW超(発光波長265nm)世界最高出力の深紫外LEDの開発に成功 ～殺菌、医療から環境、ICT分野まで従来技術の革新に期待～」国立研究開発法人情報通信研究機構、2017年4月4日
13. 日刊工業新聞「深紫外LED 世界最高出力150ミリワット超 情通機構など開発 殺菌・医療向け活用」2017年4月5日
14. 日本経済新聞・電子版「NICT、150mW超(発光波長265nm)出力の深紫外LEDの開発に成功」2017年4月4日
15. 朝日新聞デジタル「150mW超(発光波長265nm)世界最高出力の深紫外LEDの開発に成功 ～殺菌、医療等応用が期待～」2015年4月5日
16. 化学工業日報「深紫外LED世界最高出力を達成チップ全面にナノ構造」2017年4月5日
17. Japan Chemical Daily「NICT and Tokuyama Develop Deep UV LED, Record New World High in Output」2015年4月7日
18. 電波タイムズ「世界最高出力深紫外LEDを開発 150mW超え、医療技術などの革新に期待 NICT」2017年4月10日
19. 日経エレクトロニクス「深紫外でLED大競争再び、技術にブレークスルー続々」2017年9月20日