

ミラワット
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～

【ポイント】

- ナノ光構造を用いて、深紫外LEDの光取出し効率を大幅に向上することに成功
- 最も殺菌性の高い波長 265nm、室温・連続動作で、世界最高の光出力 90mW 超を達成
- 殺菌、飲料水・空気の浄化、医療、家電、食品流通、ICT 分野など幅広い分野への展開に期待

国立研究開発法人 情報通信研究機構(NICT、理事長: 坂内 正夫)は、株式会社トクヤマ(社長: 横田 浩)と共同で、深紫外波長^{*1}帯において世界最高出力となる 90mW 超の深紫外LEDの開発に成功しました。

ナノ光構造技術^{*2}により、深紫外LEDの光取出し効率を大幅に向上させることで、小型・高出力な深紫外LED光源を実現しました。今回開発した深紫外LEDは、最も殺菌性の高い波長 265nm、室温・連続動作で、光出力 90mW を達成したこれまでにない実用上要求される水準を十分に上回ったものです。

薬剤を用いないクリーンな殺菌システムの実現や既存の水銀ランプ^{*3}の置き換え、新規市場の創出など大規模な需要が見込め、殺菌から医療、工業、環境、ICT に至るまで幅広い分野の産業、生活・社会インフラに画期的な技術革新をもたらすことが期待されています。

本研究成果は、米国応用物理学会誌 *Applied Physics Letters*(電子版 平成 27 年 4 月 1 日(水)発行予定)に掲載されます。なお、本成果の一部は、国立研究開発法人 科学技術振興機構(JST) A-STEP 事業の支援の下に実施されました。

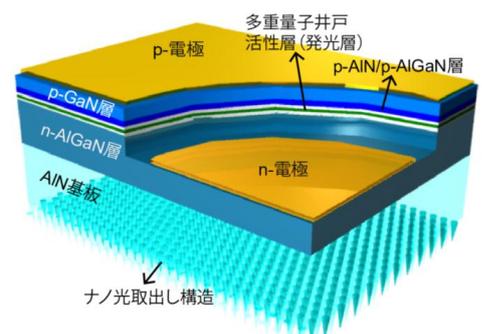
【背景】

深紫外波長帯(200～300 nm)で発光する半導体発光ダイオード(LED)は、ウイルスの殺菌や飲料水・空気の浄化、光加工、樹脂硬化、環境汚染物質の分解、食品流通分野、院内感染予防、光線外科治療、種々の医療機器、ICT 利用など、幅広い分野で、その応用が期待されています。これまで、既存の深紫外光源として、主に、水銀ランプなどのガス光源が用いられていました。しかし、ガス光源は寿命が短く、発光波長がガスの輝線のみで限定される上、水銀などの人体・環境に有害な物質を含みます。また、光源のサイズ、消費電力も極めて大きいことから、その利用範囲は制限されており、代替技術実現への要請が高まっていました。このような背景の下、水銀フリー、低環境負荷で小型、高出力な深紫外LEDの開発が強く望まれています。近年、窒化物系半導体(AIGaN:窒化アルミニウムガリウム)^{*4}を用いた深紫外LEDの開発が世界的に活発化していますが、深紫外LEDでは光取出し効率^{*5}が極めて低いという問題を抱えており、高出力化が困難な状況で、小型、高出力な深紫外LEDを実現するためには、この課題を解決する新しい技術の開発が必要とされていました。

【今回の成果】

今回、新たに開発したナノ光構造技術を駆使して、深紫外LEDの光取出し効率を大幅に向上させることで、深紫外波長帯において世界最高出力となる深紫外LEDを実証することに成功しました。殺菌効果が最も高い発光波長 265nm、電極メサ面積 0.1mm²、室温・連続動作において 90mW を達成し、実用上要求される水準を十分にクリアする、これまでにない小型、高出力な深紫外LEDを実現しました。

今回開発したAIGaN系深紫外LEDは、結晶欠陥^{*6}の発生を低減できる窒化アルミニウム(AIN)基板^{*7}上に作製していますが、AIN基板は一般



今回開発した深紫外LEDの模式図

的に用いられるサファイア (Al_2O_3) 基板に比べ屈折率が高く、これまでは基板表面での全反射により、極めてわずかな光しか外部に取り出すことができませんでした。この問題を解決する新しい技術として、理論・実験両面の工夫により、従来にない光取出し構造を開発しました。光取出し面となる AlN 基板表面に 2 次元フォトニック結晶^{*8}とサブ波長ナノ構造とを組み合わせたハイブリッド光取出し構造を作製することにより全反射を抑制し、光取出し効率の向上率 196%を達成しました。実用上重要なデバイス性能指標である光出力密度として $90\text{W}/\text{cm}^2$ (発光波長 265nm、室温・連続動作) を実現し、他研究機関を大幅に上回る高出力動作に成功しております。今回新たに得られた小型、高出力な深紫外 LED は、これまで適した光源が無く実現が難しかった様々な新しい深紫外光を利用したアプリケーション開発の可能性を広げることが期待されます。

【今後の展望】

今回、深紫外波長において世界最高となる 90mW 超の小型、高出力な深紫外 LED の開発に成功し、実用上要求される水準を満たす性能を実証したことにより、今後の深紫外 LED の本格的な普及、応用製品群の実現に向けて大きな進展が期待されます。小型・ポータブルで高出力な深紫外 LED の実現は、既存光源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ます。研究グループは、深紫外領域での光取出し技術を一層深化させることで、可視 LED に匹敵する性能を実現するべく今後も取り組んでいくとともに、新しい深紫外光技術を通じた新規産業の創出、安心安全で持続可能な社会づくりへの貢献を目指してまいります。

< 掲載論文 >

米国応用物理学会誌 *Applied Physics Letters*

電子版: <http://scitation.aip.org/content/aip/journal/apl>

掲載論文名: Light extraction enhancement of 265 nm deep-ultraviolet light-emitting diodes with over 90 mW output power via an AlN hybrid nanostructure

著者: Shin-ichiro Inoue, Tamari Naoki, Toru Kinoshita, Toshiyuki Obata, Hiroyuki Yanagi

< 本件に関する問い合わせ先 >

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
Tel: 078-969-2148
E-mail: s_inoue@nict.go.jp

< 広報 >

広報部 報道担当
廣田 幸子
Tel: 042-327-6923 Fax: 042-327-7587
E-mail: publicity@nict.go.jp

<用語解説>

*1 深紫外波長

深紫外 (Deep Ultraviolet: DUV) 波長とは、紫外線よりも更に短い波長領域を示し、ここでは 200~300 nm の波長領域として定義している (より広く 200~350 nm 付近までの波長帯を含める場合もある)。現在のところ、半導体発光ダイオード (LED) を用いて実現できる最も短い発光波長が、この深紫外波長領域に対応する。深紫外光の中でも、特に UVC 領域として分類される 280nm 以下の光は、オゾン層ですべて吸収されるため、280nm 以下の太陽光は地球上には降り注がず、ソーラーブラインド領域と呼ばれる。そのため、この波長領域の小型光源が開発されれば、殺菌から通信、医療など様々な分野で従来にない新しい技術革新が期待される。例えば、生物の DNA や RNA は自然界には存在しない 280nm 以下の光を浴びると損傷される。この特性により、深紫外光を使えば、塩素などの有害な薬剤を用いずに、細菌やウイルスなどを効果的に殺菌・無害化できる。特に、265nm 付近の波長は、DNA の吸収ピークと重なるため、応用上、最も重要なターゲット波長の一つとなる。

*2 ナノ光構造技術

光の波長 (数百ナノメートルオーダー) 以下の微細構造を駆使した光の人工操作技術。ナノメートル (nm) とは、10 億分の 1 メートルを表す単位。今回開発した深紫外 LED では、数十 nm のサブ波長構造と数百 nm のフォトニック結晶をハイブリッドした新しいナノ光構造技術を創出することにより、既存のモスアイ構造やマイクロレンズ構造などと比較して、全反射を大幅に抑制することに成功した。これにより、光取出し効率を大きく向上させることで深紫外 LED の高効率化、高出力化を実現した。

*3 水銀ランプ

水銀ガスを閉じ込めたガラス管内でアーク放電を起こし発光させる光源。254nm や 365nm などの輝線を発し、深紫外領域における最も代表的な光源で、様々な産業、用途において用いられている。しかし、2013 年 10 月「水銀に関する水俣条約」が採択され、人体・環境に有害な水銀の削減・廃絶に向けた国際的な取組が加速しており、2020 年以降、水銀を含む製品の輸出入が原則禁止される見込みとなっている。このような背景から、既存の水銀ランプを置き換える小型固体光源の実用化が強く期待されており、低環境負荷で高効率・長寿命な深紫外 LED の開発実現が強く望まれている。

*4 窒化物系半導体 (AlGaIn: 窒化アルミニウムガリウム)

窒化アルミニウム (AlN) と窒化ガリウム (GaN) の混晶材料。直接遷移型の半導体であり、AlN と GaN の混晶組成比を変えることで、その発光波長を深紫外領域のほぼ全域 (210~365nm) で任意に制御することが可能である。深紫外 LED を実現する上で現在のところ最も適した材料であると考えられており、世界中の研究機関・企業が開発競争を繰り広げている。

*5 光取出し効率

半導体内の活性層で発光した光のうちで LED 外部へ有効に取り出された光の割合。AlGaIn 系深紫外 LED の高効率化・高出力化を阻んでいる最大の要因が、極めて低い光取出し効率の問題である。これは、透明な電極を形成することが困難であるという、発光エネルギーの高い深紫外 LED 特有の問題であり、p 型 GaN 層やコンタクト層での内部吸収や基板界面・表面での全反射などによって、光を外部に取り出すことが難しく、活性層で発光した光の大部分が吸収され熱エネルギーに変換されてしまうことがその原因である。特に、AlN 基板ではサファイア基板などと比較し、屈折率が大きく ($n=2.29$ @265nm)、臨界面角が小さくなり (25.9°)、極めてわずかな光しか外部に取り出すことができない。3 次元時間領域有限差分 (3D-FDTD) 法による理論計算の結果、p 型 GaN 層の吸収なども考慮すると、AlN 基板のフラット表面 (光取出し面) 側から取り出せる光の取出し効率は、約 4% と極めて低い値となる。

*6 結晶欠陥

結晶内では原子が規則正しく並んでいるが、その配列が乱れている部分を結晶欠陥と呼ぶ。半導体 LED では結晶欠陥が多いと電流を注入してできた電子・正孔ペアが欠陥を介して非発光で熱に変換されやすくなるため、結晶の品質を上げ、この欠陥密度をできるだけ少なくすることが応用上重要となる。特に AlGaIn 系窒化物半導体では、一般的にサファイア (Al_2O_3) 基板が用いられるが、LED を形成する AlGaIn 層とサファイア基板との格子定数差 (>13%) や熱膨張係数差が大きいため、 $10^8 cm^{-2}$ 以上という高密度な結晶欠陥 (転位) が活性層内で発生することがよく知られている。

*7 窒化アルミニウム (AlN) 基板

極めて大きなバンドギャップを持つ窒化物半導体であり、波長 200nm 付近までの光に対し透明性を有する。特に、ハイドライド気相成長 (HVPE) 法により作製した AlN 単結晶基板は不純物の取込みが少なく、昇華法などの手法で作製したものよりも高い光透過性を示す。このような AlN 単結晶基板上に AlGaIn 系深紫外 LED を作製することで、従来のサファイア (Al_2O_3) 基板上の LED と比べ、格子定数のミスマッチが解消でき、結晶欠陥 (貫通転位) の極めて少ない高品質な結晶を形成できる。

*8 フォトニック結晶

光波長程度のスケールで屈折率を周期的に空間変調した光ナノ構造物。フォトニック結晶の中では、光分散関係を人為的に操作することができるため、一様媒質中では起こり得ないフォトニックバンドギャップやスローライトなどの特異な光状態を創出することができる。そのような性質を用いて、光をナノ微小領域に閉じ込めたり、逆に、取り出したりするなど、光と物質間の相互作用を人工的に操作することが可能となる。

今回開発した深紫外LED

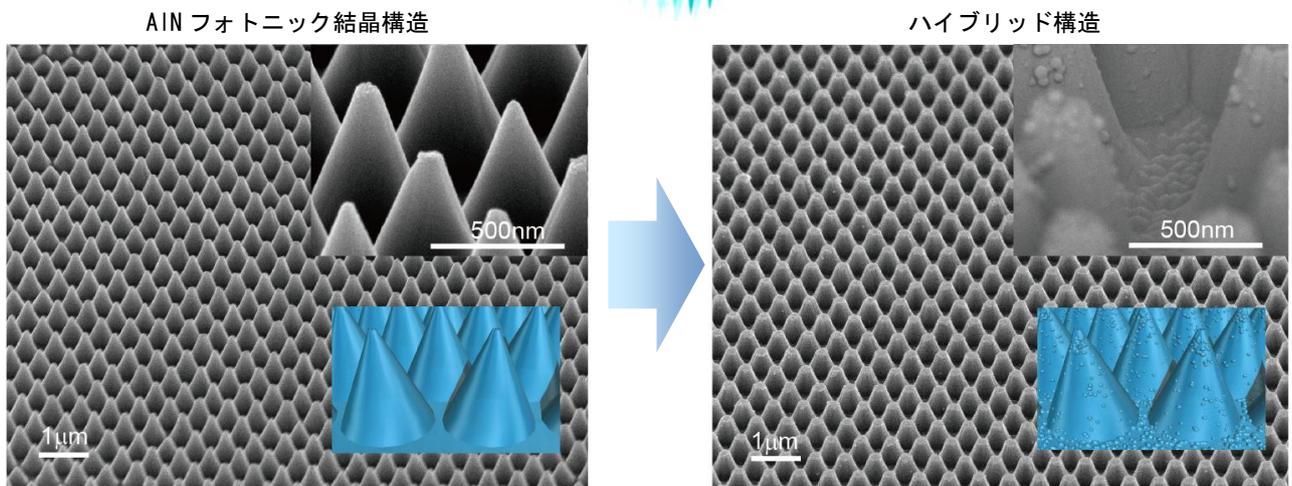
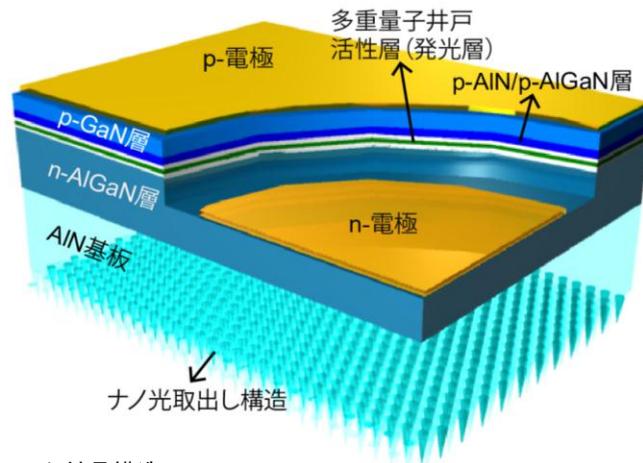


図1 今回開発した AlGaIn 系深紫外 LED 素子構造の模式図(上図)、
ナノ光取出し構造として作製された AlN フォトニック結晶構造(左図)とハイブリッド構造(右図)の走査電子顕微鏡写真

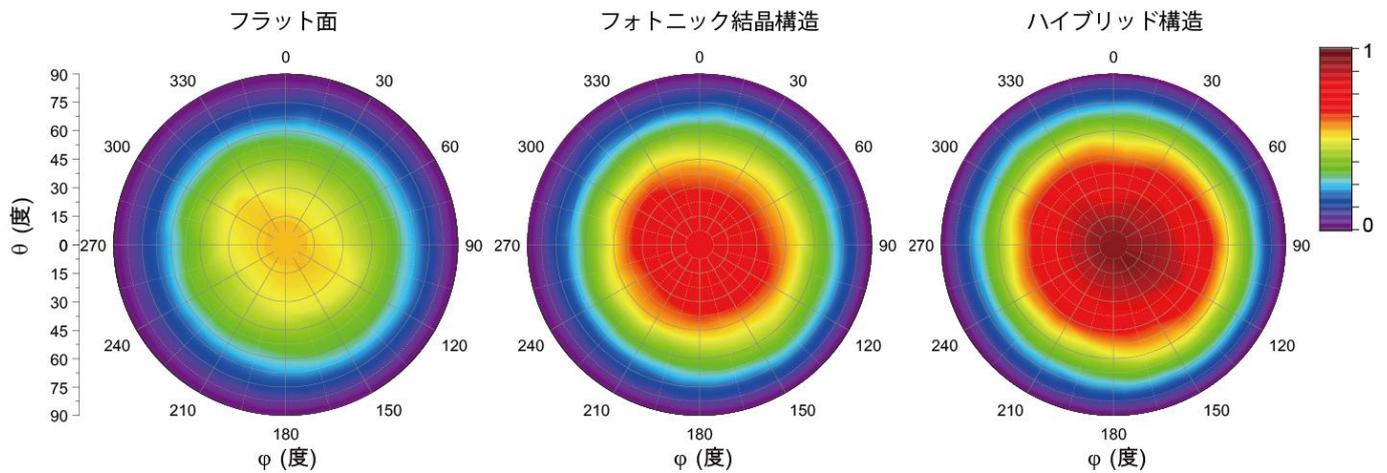


図2 今回開発した深紫外 LED のファーフールド放射パターンの評価結果：
光取出し面に何も加工していないフラット面と比較し、フォトニック結晶構造を付加することで大きく光強度が増加し、
さらに、ハイブリッド構造にすることで劇的に光強度が増加していることが分かる。

深紫外 LED の性能向上において最大の課題となる低光取出し効率の問題に対し、今回開発した深紫外 LED では、AIN 基板表面(光取出し面)に独自のナノ光構造を付加することで、光取出し効率の大幅な向上を達成しました。発光波長オーダーの理論的に最適化された周期凹凸構造(フォトニック結晶)に加えて、それより十分に小さなサブ波長構造をハイブリッドした全く新たな光取出し構造を発案・創製することにより、エスケープコーンの拡張(全反射の抑制)とフレネル反射の低減に成功しました。本構造は、光取出し効率の向上だけでなく、素子間の光出力均一性、作製コスト、歩留りの向上などにも配慮した高機能構造であり、難加工性 AIN 基板を用いた深紫外 LED に対する微細加工技術を確認することで、極めて高精度・高均一なナノ光構造加工に成功しております。

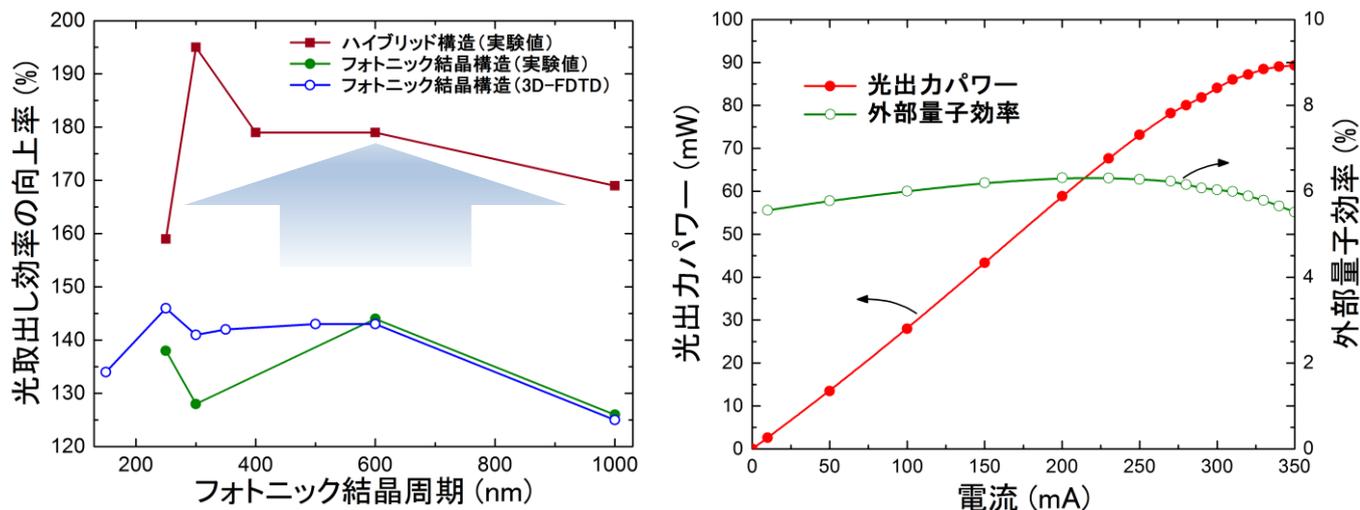


図3 265nm 帯深紫外 LED のナノ光取出し構造を付加した場合の光取出し効率の向上率(左図)と注入電流に対する光出力と外部量子効率(右図)

作製された深紫外 LED の光取出し面からの光出力向上比を評価した結果、フラット表面と比較し、ハイブリッド光取出し構造を付加した場合の光取出し効率の向上率は196%と大幅に向上しました。光出力パワーの測定の結果、室温・連続動作、電極メサ面積 0.1mm²、発光波長 265nm の AlGaIn 系深紫外 LED において、深紫外領域の世界最高値に相当する 90mW という高出力動作を実証しました。外部量子効率としても、発光波長 270nm 以下における世界最高値 6.3%(200mA 時)が得られております。

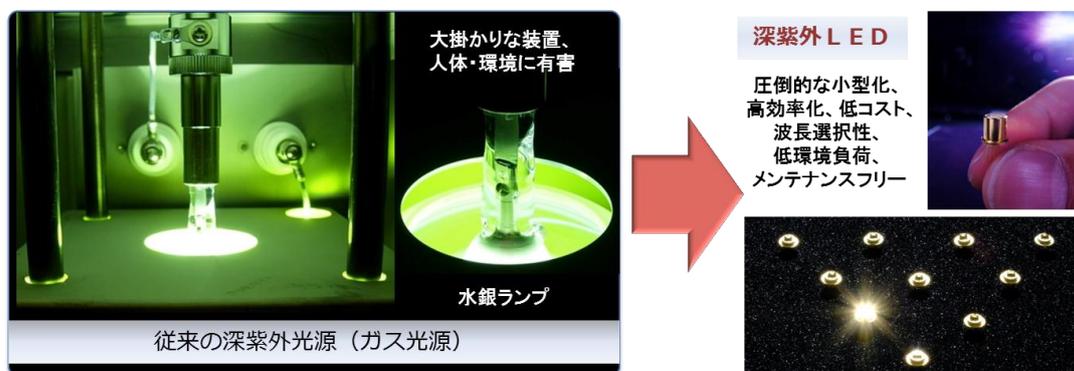


図4 水銀ランプなどの既存の深紫外光源に対する深紫外 LED 実現のインパクト

従来の深紫外光源としては、主に、水銀ランプなどのガス光源が使用されてきましたが、ガス光源は波長が限定的であり、寿命も短く、そのサイズ、消費電力も極めて大きいことから、その利用範囲は制限されていました。また、2013年10月「水銀に関する水俣条約」が採択され、水銀などの人体・環境に有害な物質の削減・廃絶に向けた国際的な取組が加速しており、2020年以降、水銀を含む製品の輸出入が原則禁止される見込みとなっております。このため、既存の水銀ランプなどのガス光源を置き換える新たな光源の開発実現が切望されています。今回開発した深紫外LEDは、半導体光源特有の低環境負荷、波長選択性、長寿命、メンテナンスフリーなどの特徴を有することはもちろん、小型、高出力、高効率な特徴も備え、殺菌、情報通信・電子産業、環境、医療、流通など、極めて幅広い分野に対するインパクト、応用展開が期待されます。



図5 深紫外LED光源の広範な応用可能性