

3.6.6 未来 ICT 研究所 深紫外光 ICT デバイス先端開発センター

先端開発センター長(兼務) 井上振一郎 ほか3名

深紫外光 ICT デバイス技術の研究開発により、安心・安全で持続可能な未来を切り拓く

【概要】

波長 200～350 nm の深紫外(Deep Ultraviolet: DUV) 光は、可視・紫外光より波長が短いだけでなく、太陽光スペクトルに含まれないソーラーブラインド光であり、DNA やタンパク質などの吸収ピークに対応するなど、極めて特徴的な波長帯である。このため、高密度光情報記録、菌やウイルスの殺菌、飲料水の浄化、空気の清浄化、バイオセンシング、医療・健康分析、光リソグラフィ、樹脂硬化、生鮮食品の安全流通、環境汚染物質の分解、院内感染予防、光線外科治療など、ICT から殺菌、工業、環境、医療分野に至るまで、幅広い産業、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る。従来、深紫外光源として、水銀ランプを代表とするガス光源が使用されてきた。しかし、ガス光源は寿命が短く、光源サイズ、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きた。また「水銀に関する水俣条約」採択により、水銀など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いる。このため、低環境負荷で小型・低消費電力・長寿命な深紫外半導体固体光源の実現が切望されている。深紫外光 ICT デバイス先端開発センターでは、フォトニック結晶や先端ナノ光構造技術などの基礎研究と、産官連携の取組による応用研究を融合することで、従来性能限界を打破する深紫外半導体固体光源の実現や、新たな深紫外光 ICT デバイスの創出に向けた研究開発に取り組んでいる。

【平成 26 年度の成果】

直接遷移型のⅢ族窒化物半導体 AlGaIn は、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 DUV 領域のほぼ全域 (210～365 nm) で任意に制御することが可能である。AlGaIn 系 DUV-LED の研究開発は近年急速に進んでいるが、青色 LED と比較すると光出力は 1/100 以下と未だ極めて低い値に止まっている。今後、深紫外 LED の本格的な社会普及を実現するためには、その性能を可視や近紫外領域で普及している LED の値に近づけていくことが求められている。

現在、AlGaIn 系 DUV-LED の光出力向上を阻害している最大の課題の 1 つは、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 DUV-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、単結晶 AlN 基板ではサファイアなどと比較し、屈折率が大きく ($n=2.29$ @265 nm)、臨界角が小さくなり (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。結果として、この低光取出し効率の問題が主因となり、これまで極めて低い外部量子効率、出力パワーしか得られていなかった。言い換えれば、DUV-LED の効率向上に関して、大部分が光取出し効率の向上の如何にかかっていると看做される。また、

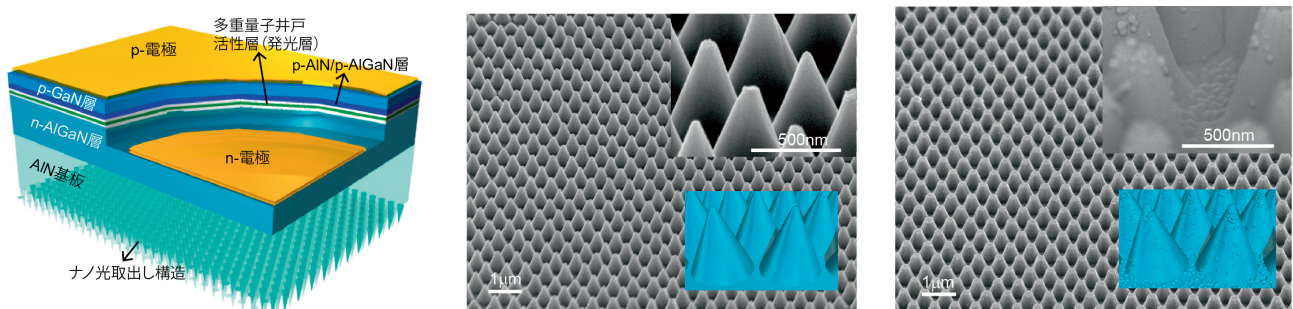


図 1 開発した AlGaIn 系深紫外 LED 素子構造の模式図(左図)、及びナノ光取出し構造として作製されたフォトニック結晶構造(中図)とハイブリッド構造(右図)の走査電子顕微鏡写真

この効率の問題を改善できれば、熱エネルギーに変換される割合も減少するため、出力パワーはもちろん素子寿命や信頼性についても大きく改善されることは言うまでもない。深紫外 LED の性能向上において最大の課題となる光取出し効率の向上について、現在、我々は AlN 基板表面（光取出し面）に独自のナノ光構造を付加し、世界最高の向上率を達成している。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、AlN 基板表面での全反射の大幅な抑制を実現した（図 1）。2 次元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）を人工的に精密制御する技術を用いることにより、光エスケープコーンの拡張とフレネル反射の低減に成功した。

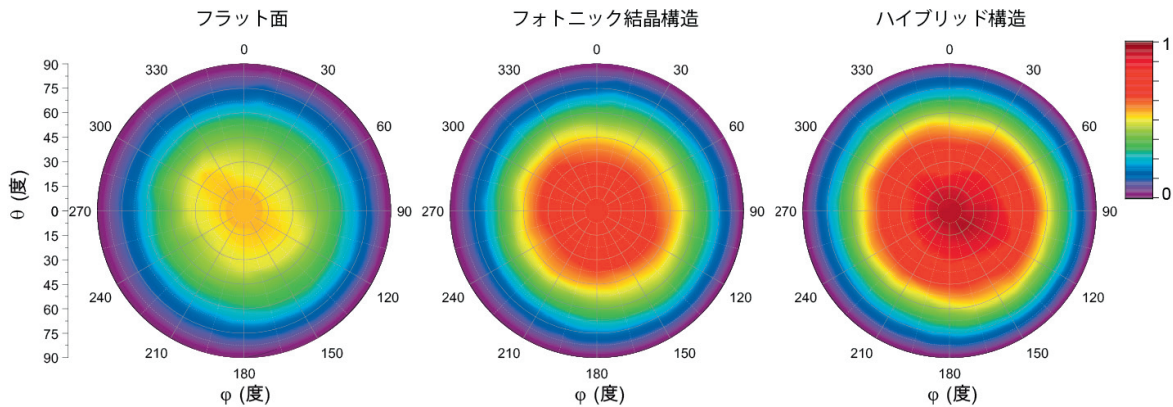


図 2 開発した深紫外 LED の 3 次元ファーフールド放射パターンの評価結果

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、歩留まりの向上などにも配慮した高機能構造であり、難加工性の AlN 基板 DUV-LED に対するナノ微細加工技術を世界で初めて確立することで、極めて高精度・高均一なナノ光構造加工に成功している（図 1）。独自に開発したナノ光取出し構造の優位性を別角度から検証するために、DUV-LED の 3 次元ファーフールドパターンの実験的評価も行った（図 2）。この結果、標準的なフラット表面に対し、フォトニック結晶構造、ハイブリッド構造を付加した DUV-LED の光強度が向上していることを確認し、特にハイブリッド構造では、著しい強度増強が確認された。これは、実使用上、最も重要となるファーフールドにおいて、著しい効果を示す立証データである。

本構造を備えた深紫外 LED の光出力は、フラットな DUV-LED サンプルと比較した結果、光出力比として最大約 2 倍と大幅に増大した（図 3）。また、素子間の光出力比の標準偏差は 0.03 以下であり、実用化に不可欠な素子間の光出力比のバラつきについても高度に抑制することに成功している。実素子として深紫外 LED を試作した結果、最も殺菌効果の高い発光波長 265 nm、電極メサ面積 0.1 mm²、室温・連続動作において、90 mW 超の光出力値を実証し（図 3）、深紫外領域における LED の世界最高出力値を達成した。

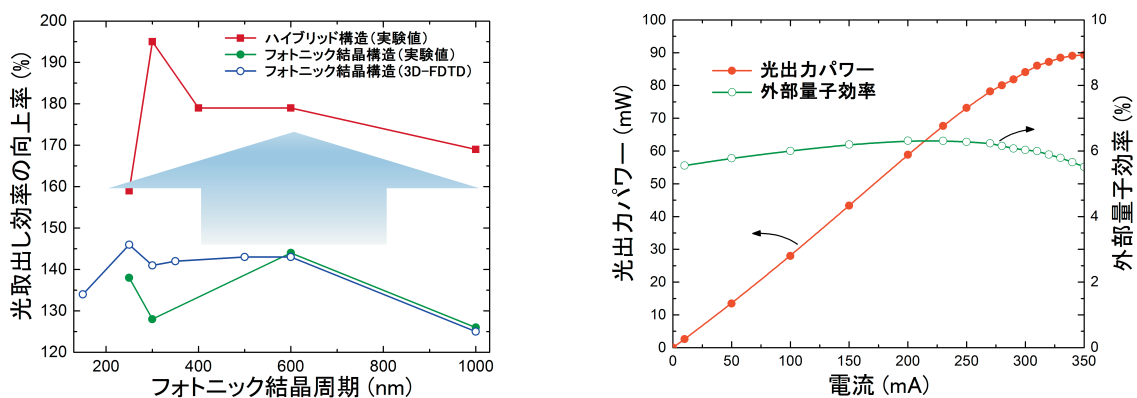


図 3 265nm 帯深紫外 LED のナノ光取出し構造を付加した場合の光取出し効率の向上率（左図）と注入電流に対する光出力と外部量子効率（右図）