

深紫外光デバイス技術により安心・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、実用可能な半導体素子から発せられる光として最短波長帯に対応する。特にUV-C領域として分類される280 nm以下の光は、オゾン層ですべて吸収されるため、地球上には降り注がず、ソーラ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。また生物のDNAやタンパク質は自然界には存在しない280 nm以下の光に対して強い吸収ピークを持つ。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極めて効果的に殺菌・無害化できる。よって深紫外光は、殺菌から安全衛生、環境、医療、情報通信分野まで、多様な技術分野において、その重要性が増している。従来、この深紫外光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、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、2017年「水銀に関する水俣条約」が発効され、人体や環境に対し有害な水銀の削減・廃絶に向けた国際的な取組が加速している。このような状況から、これまでにない低環境負荷で小型・高出力・長寿命な深紫外半導体固体光源の実現と、その早期社会展開が切望されている。深紫外光ICTデバイス先端開発センターでは、ナノ光デバイス技術などに係る基礎研究から産官連携による応用技術開発の取組までを戦略的に進めることで、従来性能限界を打破する深紫外半導体固体光源や新たな深紫外光ICTデバイスの創出とその社会実装を目標とした研究開発に取り組んでいる。

■平成29年度の成果

深紫外LEDは、最も波長が短い発光ダイオードであり、青色LEDに続く研究フロンティアとして期待されている。材料として、窒化物系半導体（AlGa_N：窒化アルミニウムガリウム）から構成され、従来、サファイア基板が用いられてきた。しかし、LEDを形成するAlGa_N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ひずみが生じ、結晶の内部に高密度な欠陥（転位）が発生する。青色LEDでは、構成材料として高密度な転位欠

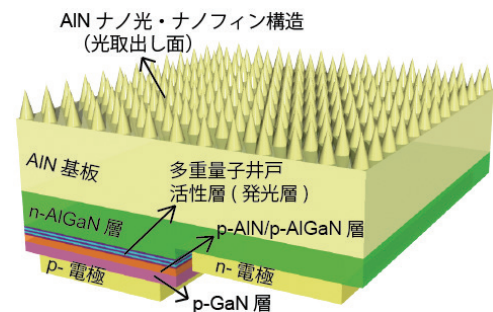


図1 研究開発を実施した深紫外LEDの模式図

陥があっても高い発光効率を維持できるInGa_Nを用いることができるため、この問題は顕在化しなかったが、AlGa_N系深紫外LEDでは深刻な課題となる。ここで我々は、格子不整合のほぼ生じないAIN基板上深紫外LEDを用いることで、この問題を回避している。しかしながら、AIN基板上深紫外LEDでは、転位欠陥の問題を改善できるものの、光取出し特性や光吸収などの面で、トレードオフとなる課題を有する。平成29年度は主に、これらの課題を克服するため、AlGa_N系深紫外LEDの動作メカニズムの解明に向けた新規評価手法の開発や、前年度から継続してナノ光構造技術による光出力飽和現象の抑制技術やLED高出力化技術の研究開発に取り組んだ（図1）。

今回我々は、深紫外LEDの高効率化、高出力化を阻むメカニズムを解明するため、電流注入時の深紫外LED実素子の内部量子効率と電流注入効率を定量化する新たな手法を開発した。測定により数値化可能な外部量子効率の電流密度依存性から、4次のレート方程式で発光再結合・非発光再結過程を定量化する手法を提案し、深紫外領域で、電流注入時の内部量子効率と電流注入効率を世界で初めて独立に定量化することに成功した。この結果、内部量子効率77%という極めて高い値を、実駆動の深紫外LEDにおいて世界初で達成した（図2）。本成果は、Opt. Express誌に論文掲載され、優れた成果としてハイライト論文に選出された。

次に、AlGa_N系深紫外LEDの高出力化に向けた取組を実施した。上述のとおり、我々は内部量子効率を大きく改善することができたが、その一方で、深紫外LEDには依然として高出力化を阻んでいる重大な課題が残されて

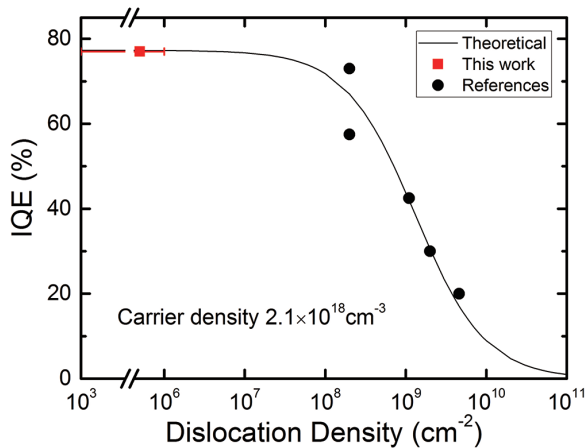


図2 開発した深紫外LEDの内部量子効率の評価結果

いる。AlN基板上AlGaIn系深紫外LEDでは、たとえ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ほとんどは、外部に取り出される前に素子内で再吸収され、熱として失活してしまう。このため、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。我々は、このような問題を解決するために、前年度に引き続き、光取出し特性と放熱特性を同時に向上させるナノ光・ナノフィン構造の改良や、ウォールプラグ効率（WPE）や電流均一性を向上させるLEDメサ電極構造の開発、そしてデバイス・パッケージ構造の最適設計による光サーマルマネジメント技術の開発を実施した。

図3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265 nm付近で発光していることを確認した。開発した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、LEDのジャンクション温度を定量化した。従来型素子（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、

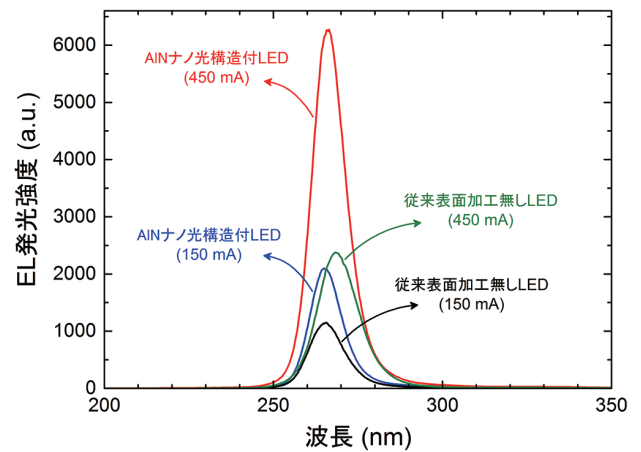


図3 深紫外LEDの各注入電流値に対するELスペクトル

新たに開発した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いだした。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・ナノフィン構造（特許出願済）を搭載した新構造では、従来構造に対し、ジャンクション温度を約48℃も大幅に低減できることを明らかにした。ジャンクション温度は最大光出力、寿命などのLED性能に直結する要素であり、重要な進捗である。

図4に深紫外LEDの遠視野放射パターンを示す。従来型素子（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AlN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、かつ、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し、光取出し特性を大きく改善できていることを直接的に証明している。これらの結果、シングルチップ、連続駆動、波長265 nmの深紫外LEDにおいて200 mWを超える世界最高出力値の実証に成功した。本成果については、報道発表を行い、日経産業新聞、日刊工業新聞など多数の新聞、メディアに掲載され、本分野の重要なブレークスルーとして取り上げられた。

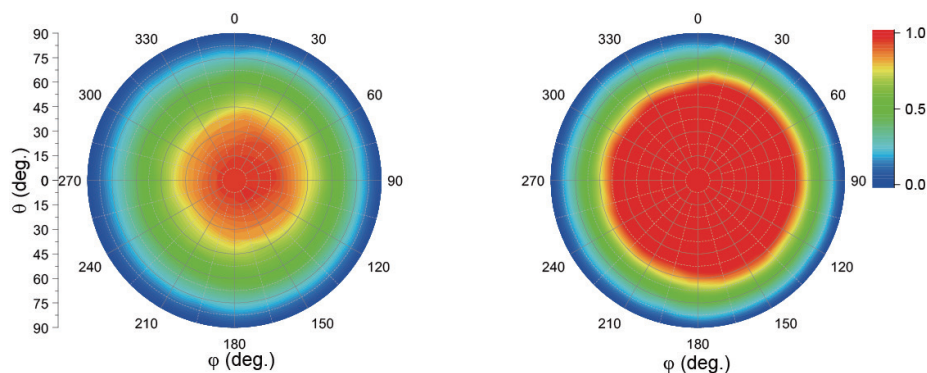


図4 深紫外LEDの3次元ファーフールド放射パターン

