

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<sup>ひら</sup>

## ■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。またさらに、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一貫して進めることで、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30年度の成果

深紫外領域の中でも265 nm付近の波長がDNAの吸収ピークと重なるため、ウイルスや細菌などに対して最も強い殺菌作用を有する。このため、波長265 nm帯の光を発する深紫外LED (発光ダイオード) を開発することが応用上重要なターゲットのひとつとなる。ここで、波長の短い265 nm帯AlGa<sub>n</sub>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。特

に高Al組成のp型AlGa<sub>n</sub>は、ドーパント (Mg) の活性化エネルギーが大きく、室温でのキャリア濃度が極めて低い。このため、p型AlGa<sub>n</sub>に対し低抵抗なオーミック接合を得るためには、p型Ga<sub>n</sub>をコンタクト層として形成する必要がある。しかし、Ga<sub>n</sub>は深紫外光を完全に吸収してしまうため、265 nm帯深紫外LEDでは内部光吸収損失が極めて大きく、これまで高い外部量子効率<sup>ひら</sup>は実現されていない。

平成30年度は、このような課題を解決するため、深紫外LEDの高効率化に向けて、深紫外域で透明なh-BNを用いたp-AlGa<sub>n</sub>層に対する新たなp型ヘテロコンタクト構造の創製に取り組んだ。まずスパッタリング法を用いたh-BN製膜技術の開発を進め、h-BN/AlGa<sub>n</sub>単結晶ヘテロ接合の形成に成功した。さらにp-AlGa<sub>n</sub>層に対するh-BNの特性を評価するために、ヘテロ接合界面における価電子帯と伝導帯それぞれのバンドオフセット特性について角度分解X線光電子分光 (XPS) 法による解析を実施した。この結果、h-BN/Al<sub>0.7</sub>Ga<sub>0.3</sub>N価電子帯バンドオフセットは、約0.01 eVと極めて小さく、h-BNがp-AlGa<sub>n</sub>層に対するホール注入層として極めて優れた特性をもつことを明らかにした。さらにh-BN/Al<sub>0.7</sub>Ga<sub>0.3</sub>N伝導帯バンドオフセットは、約0.89 eVと大きく、h-BNが活性層からの電子オーバーフローを抑制する電子ブロッキング層としても有効に作用することを明らかにした。これらの結果は、h-BN/AlGa<sub>n</sub>ヘテロ構造のバンドアライメントを世界で初めて明らかにしたもので、深紫外LEDに対する新しい透明p型コンタクト構造としてh-BNが有望であることを立証するものである (図1)。本成果は、平成31年1月に米国応用物理学会誌Applied Physics Letters誌に掲載された。

また前年度から引き続き、深紫外LEDの更なる高出力化に向けて、LEDメサ電極構造内の局所電流集中やキャリアオーバーフロー、電流リーク等の抑制を可能とする新規デバイス構造を設計・開発し、その効果を検証した。従来素子と比較し、均一な電流注入発光、効率ドロープやウォールプラグ効率の大幅な改善を実現すると共に、高電流注入時の電流密度低減を実現させる深紫外LED素子の大面積化 (メサ面積: 1.48 mm<sup>2</sup>に拡大) 技

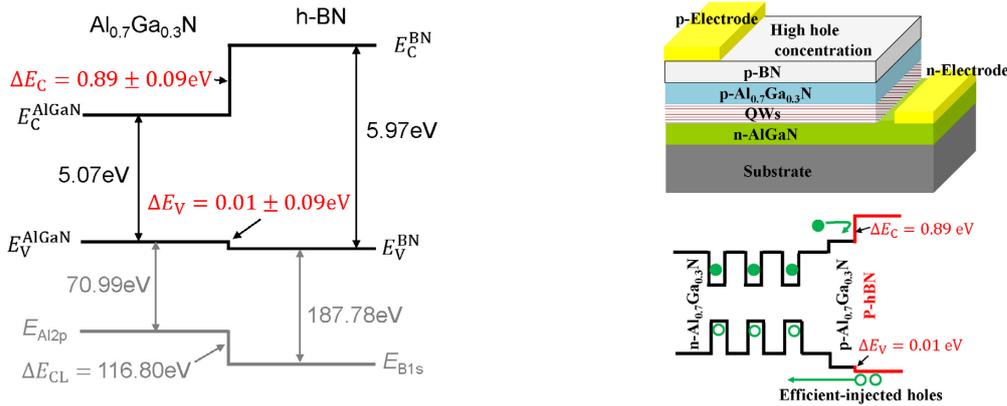


図1 h-BN/Al<sub>0.7</sub>Ga<sub>0.3</sub>Nヘテロ構造のバンドアライメントと深紫外LEDデバイス構造の模式図

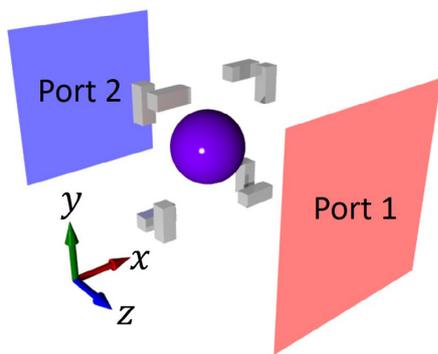


図2 磁気カイラルメタマテリアル構造の模式図

術の確立にも成功した。これらの技術により、シングルチップ・室温・連続駆動の深紫外LEDにおいて、世界最高出力値を大幅に更新する光出力500 mW超を達成した。これらの成果により、平成30年7月に「第32回 独創性を拓く 先端技術大賞フジサンケイビジネスアイ賞」を受賞した。

次に、深紫外領域での新たな光波制御技術の創出に向けて、深紫外光非相反デバイスの研究開発についても実施した。金属メタマテリアル構造と磁性体ナノ粒子を組み合わせた新しい光デバイス構造を提案し、光非相反特性を解析する基礎理論を構築した。深紫外光領域においては、磁性体の光学遷移に伴う共鳴が存在している。この共鳴を利用することで、磁気カイラル効果の起源となる電流を微細構造中に誘起できる。磁性とカイラリティが共存する系では、時間及び空間反転対称性が同時に破れる。よって磁気カイラル効果は、物質のある方向から電磁波を入射すると透過し、その逆方向から入射すると

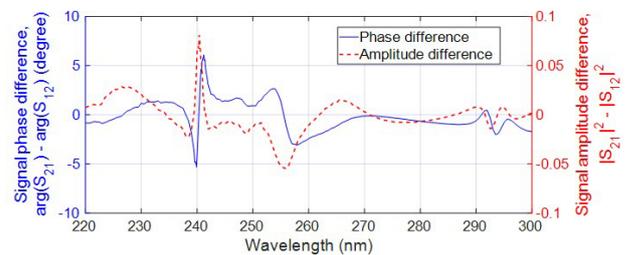


図3 深紫外領域の磁気カイラルメタマテリアル透過率の位相及び強度差スペクトル

吸収する現象であり、新しい原理による光アイソレータなどの実現が期待される。深紫外光領域で、この磁気カイラル効果が増強されるように設計したメタマテリアル構造の電磁応答を理論計算により解析した。本研究で扱ったメタマテリアル構造は、図2に示すように直交したAlナノロッドと磁性体ナノ粒子から構成されている。この系の表及び裏から光を入射した場合の透過率差スペクトルを図3に示す。

深紫外領域で巨大磁気カイラル効果が発現するように構造パラメータを調整することで、波長240 nm付近を中心に位相及び強度差スペクトルに共鳴構造が見られ、その結果として従来より2桁以上大きな非相反電磁応答特性が得られることを初めて明らかにした。従来になかった深紫外領域での高性能、高集積な光アイソレータ素子を実現できる可能性を示すものである。本成果は、平成30年12月に米国物理学会誌Physical Review A誌に掲載された。