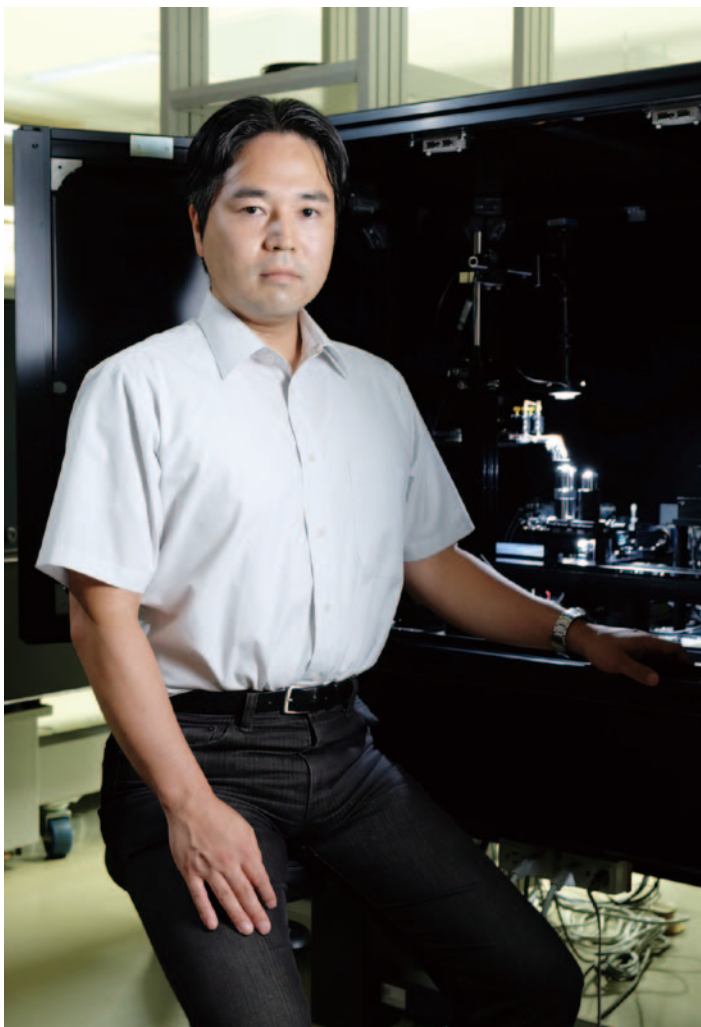


ナノ光構造技術による深紫外 LED の高性能化と実用化開発

深紫外 LED により 安心・安全で持続可能な 社会を実現する

今年 8 月 1 日より「深紫外光 ICT デバイス先端開発センター」が発足しました。水銀フリーかつ小型・高効率、長寿命な、これまでにない深紫外固体光源や深紫外 ICT デバイスを開発することで、ウィルスの殺菌、水や空気の浄化といった生活・社会インフラ、巨大ビジネスへの技術革新や、安心・安全で持続可能な社会づくりへの貢献を目指す、本センターの取り組みを紹介します。



はじめに：深紫外 (DUV) 小型光源 の開発必要性

紫外 (Ultraviolet: UV) 光よりも、さらに短い波長 (200~300 nm) である深紫外 (Deep Ultraviolet: DUV) 光は、高密度光情報記録や、細菌やウィルスの殺菌、飲料水・空気の浄化、バイオセンシング、生体・材料分析、光リソグラフィ、半導体生産工程、生鮮食品の安全流通、院内感染予防、光線医学治療など、情報通信から安全衛生、環境、家電、半導体産業、医療に至るまで、極めて幅広い分野でその重要性を増しており、今日の社会を支える重要な基盤となりつつあります (図1)。

深紫外光 ICT デバイス
先端開発センター
センター長

井上 振一郎

Shin-ichiro Inoue

博士 (工学)

略歴

2004年、東京工業大学大学院博士課程修了。同年、理化学研究所 基礎科学特別研究員、2007年、九州大学 先端物質化学研究所 助教を経て、2010年 NICT未来 ICT 研究所に入所、主任研究員を経て、現職。神戸大学 工学研究科 准教授 (連携講座)、理化学研究所 客員研究員、および JST さきがけ研究者を兼任。船井情報科学奨励賞、安藤博記念学術奨励賞、光科学技術研究振興財団研究表彰など受賞。

研究分野

ナノ光エレクトロニクス

近況

センターの研究環境立ち上げに奮闘中です。ジョギングや週末に子供3人と触れ合う時間でリフレッシュをはかっています。

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、オゾン層で全て吸収されるため、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ています。そのため、この波長領域の小型光源が開発されれば、通信や医療など従来にない新しい技術革新が期待されます。例えば、生物のDNAは自然界には存在しない280nm以下の光を浴びると破壊されてしまいます。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・無害化できます。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1つとなります。

従来、それらの深紫外光源として、主に水銀ランプやエキシマレーザーなどのガス光源が使用されてきました。しかし、ガス光源は、ガス種により使える波長が限定されてしまうだけでなく、素子寿命が短く、さらには光源のサイズ、コスト、消費電力量も大きいことから、その利用範囲は制限され、小型・低コスト・低消費電力で波長を自由に選択できる

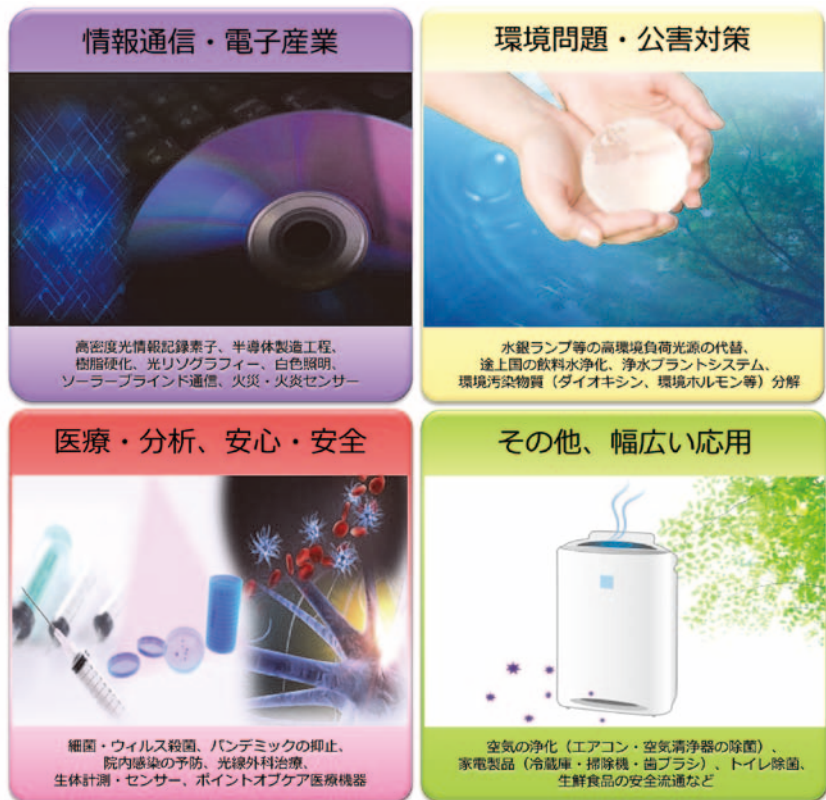


図1 深紫外光の多様な応用可能性とその社会的価値

半導体固体光源への置き換えが強く切望されています。

また近年、強毒性ウイルスの蔓延（パンデミック）や生物テロ、院内感染など、有毒ウイルスの世界的拡散の脅威が急速に増しており、さらには、食品・流通における細菌汚染の不安が国民に広がるなど、より身近で小型・効率的な殺菌デバイスの創出実現がますます期待されています。

さらに昨2013年10月に「水銀に関する水俣条約」が採択され、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り、既存の水銀ランプの代替光源として、深紫外半導体固体光源の実用化が強く期待されています。このような背景から、水銀やフッ素、そして殺菌用の有害な薬剤といった人体・環境に有害な物質の削減・廃絶に向けて国際的な取り組みが加速しており、低環境負荷で高効率・長寿命な深紫外発光ダイオード(LED)の実用化が強く望まれています(図2)。

深紫外LEDの技術的な進展と課題

直接遷移型の窒化物半導体AlGaInは、AlNとGaIn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(210~365nm)で連続的に変えることが可能です。このため、深紫外LEDを実現するために最も適した材料であり、世界的に数多くの研究機関・



図2：既存の深紫外光源に対する深紫外LEDのインパクト、およびCANパッケージング化したDUV-LEDデバイス

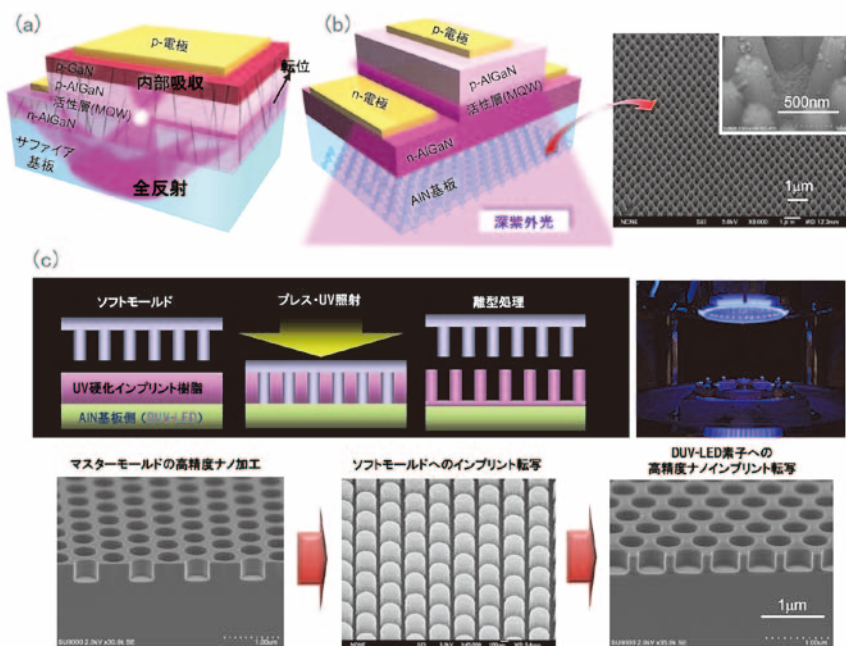


図3：AlGaIn系深紫外LEDの素子構造
(a) 深紫外LEDの技術的な課題（高密度な結晶欠陥、極めて低い光取出し効率の問題）を表す模式図と、(b) ナノ光構造を用いた光取出し構造の模式図と走査電子顕微鏡(SEM)写真、および(c) ナノインプリント法によるDUV-LEDナノ微細パターンニング技術の開発

光取出し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ませんでした。逆にいえば、DUV-LEDの効率向上に関して、96%もの部分が光取出し効率の向上の如何にかかっているといえます。また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ありません。

ナノ光構造を駆使した深紫外LEDの高性能化

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、現在私たちは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ます。発光波長オーダーの周期凹凸構造(フォトリソニック結晶)に加えて、それより十分に小さな微細凹凸構造を組み合わせ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抑制を実現しました(図3(b))。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、AlN基板DUV-LEDに対するナノ微細加工技術を確立することで、極めて高精度・高均一なナノ光構造加工に成功しています(図3(b))。本構造を備えた深紫外LEDの光出力は、この

企業がAlGaIn系DUV-LEDの開発を進めています。AlGaIn系DUV-LEDでは、これまで一般的にサファイア(Al_2O_3)基板が用いられてきました。しかしLEDを形成するAlGaIn層とサファイア基板との格子定数差(>13%)は非常に大きく、さらに熱膨張係数差も大きいことから 10^8cm^{-2} 以上という高密度な結晶欠陥(転位)が活性層内で発生してしまいます(図3(a))。この結果、極めて低い内部発光効率や短い素子寿命しか得られないという課題がありました。しかし近年、格子不整合を緩和するバッファ層技術やAlN単結晶基板の開発といった研究進展により、この問題は改善しつつあります。特に私たちNICTでは、株式会社トクヤマとの共同研究により、単結晶AlN基板を用いた深紫外LEDについて研究開発を進めています。AlN基板上DUV-LEDでは、格子定数差や熱膨張係数差がほとんどなく、 10^6cm^{-2} 以下という圧倒的な結晶欠陥の低減(低転位化)をDUV-LED素子内で実現できることから、サファイア基板などの異種基板を利用

する従来の手法に対し、素子寿命やデバイス信頼性などにおいて高い優位性を有しています。

ここで現在、DUV-LEDの効率向上を阻害している残された最大の課題は、極めて低い光取出し効率の問題です。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GaIn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熱エネルギーに変換されてしまうことがその原因です(図3(a))。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($n=2.29$ @265nm)、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ません。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GaIn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ります。結果として、この

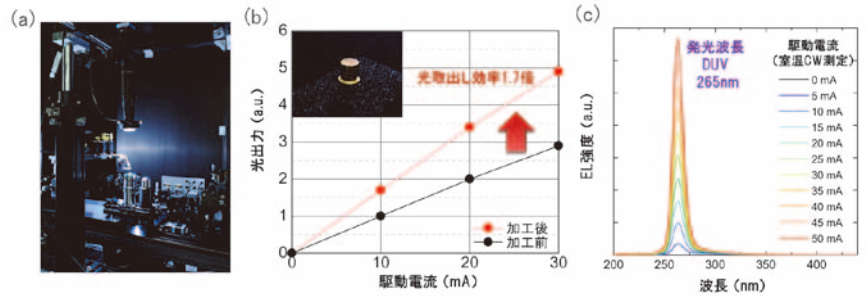
図4：(a) DUV-LEDを評価するために構築したシステム、(b) ナノ光取出し構造によるDUV-LEDの出力性能の向上結果および(c) 各印加電流に対する発光スペクトル特性

ナノ微細加工をしていない素子未加工サンプルと比較した結果、光出力比として1.7倍以上と大幅に増大しました(図4)。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ます。実際にトクヤマとの共同で発光波長265 nmの深紫外LEDを試作し、30mW以上の光出力値を達成しています。さらに寿命試験において、265 nmで発光するDUV-LED素子が6,000時間以上(150 mA駆動時)の素子寿命が得られることを確認しています。本成果は、深紫外LEDの性能、信頼性の向上、および実用化に向けて今後大きな進展をもたらすと期待されます。

新センターの研究開発体制

本センターでは、光取出し効率を大幅に向上させるNICT独自の最先端技術の活用や外部連携(企業・大学など)の取り組みによって、本分野が抱える課題を解決し、従来技術では実現不可能であった小型、高効率、長寿命な深紫外LED、深紫外ICTデバイスを開発することを目指します。

また要素技術開発や素子性能の高性能化だけでなく、高スループット・低コストな作製プロセスの確立といった実用化にマッチした素子作製技術の開発も行い、実用化を見据えた民間企業への技術移転、社会還元活動にも積極的に取り組みます。また昨2013年12月より、独立行



政法人科学技術振興機構(JST)の研究成果展開事業A-STEP(産学共同促進ステージ(ステージII)シーズ育成タイプ)に採択されており、JSTからの助成・支援も受けつつ産官連携(NICT、トクヤマ、東京農工大学ほか)によるDUV-LEDの実用化開発を本格的に展開します。新センターの発足に伴い未来ICT研究所内の深紫外光ICTデバイスに関する研究開発体制を、小規模でも組織的な開発体制に整備し直すことで、いち早く競争力のある技術を確立し、実用化フェーズへの移行を加速させていきます。

今後の戦略展開

従来にない高効率なDUV小型光源の開発が実現されれば、社会的な要望の高まり、巨大な市場潜在力から新たな産業が創出されることは間違いなく、今後も世界中の研究機関・企業が各々の特徴を打ち出しながら開発競争を繰り広げていくことが予測されます。私たちは、DUV光に対して透明な単結晶AIN基板上の深紫外LEDの性能向上において、光取出し効率の劇的な向上技術や光出力比のバラつき抑制技術を有する世界で唯一のグループです。サファイア基板や昇華法AIN基板を用いた他の競合技術に対し、素子の高パワー化や長寿命化において強力な優位性を有しています。この先私たち

は、ナノ光構造技術を駆使した光取出し効率のさらなる向上、100mW～数WクラスのDUV-LED実現に向け取り組んでいくと共に、ナノインプリント技術など素子の量産・低コスト化技術についても確立していきます。

さらに本センターでは、深紫外LEDの高性能化、低コスト化への取り組みだけでなく、パッケージング技術も含めた総合的なDUV光制御技術についても開発を進めていきます(図2参照)。深紫外光は、LEDだけでなくレーザーダイオード(LD)やフォトダイオード(PD)応用も含めれば、ソーラーブラインドな特徴を活かした情報通信や火災センサー、災害早期発見システムなど、深紫外特有のこれまでにないDUV-ICTデバイスへの展開も可能です。新たなDUV光制御技術の開発により、小型・ポータブルなウィ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、安全衛生や医療における新たな貢献、市場創出も期待されます。本センターでは、水銀フリーかつ小型・高効率、長寿命な深紫外固体光源システムを実現することで、これまでになかった様々な新しいDUVアプリケーションの開発可能性を広げ、安全・安心でクリーンな生活環境、持続可能な活気ある社会の構築に貢献することを目指していきます。