

高出力深紫外 LED 光源の開発

井上 振一郎

情報通信研究機構 (〒651-2492 神戸市西区岩岡町岩岡 588-2)

Development of high power deep-ultraviolet light-emitting diodes

Shin-ichiro Inoue

National Institute of Information and Communications Technology, 588-2 Iwaoka, Nishi-ku, Kobe 651-2592

Deep-ultraviolet (DUV) AlGaIn-based light-emitting diodes (LEDs) have many potential applications which include non-line-of-sight deep ultraviolet (UV) solar blind communications. However, despite their potential importance and numerous development efforts, DUV-LEDs continue to have much lower output powers than the visible LEDs. Here, we have demonstrated high-power 265 nm DUV AlGaIn-based LEDs with high efficiency light-extraction technologies. The LED with the AlN nanophotonic light-extraction structure shows considerably wider and stronger light emission in both its near-field and far-field patterns, very low efficiency droop, and an approximately 20-fold increase in output power over that of a conventional flat-surface LED. A single-chip DUV-LED has demonstrated record continuous-wave output power in excess of 150 mW for an injection current of 850 mA at a peak emission wavelength of 265 nm.

Key Words: Deep-ultraviolet, Light-emitting diode, Light-extraction

1. はじめに

深紫外光 (波長 200~300 nm) 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し、情報通信から殺菌、安全衛生、環境、医療分野まで幅広い応用が期待されている¹⁾。特に UV-C 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、太陽光のバックグラウンドノイズの影響を受けない光信号の送受信が可能となる。また DUV 光は波長が短く大気中の散乱係数が高いため、NLOS (Non-line of sight) 光通信への利用可能性が期待されている。さらにセンシング、薬剤を用いないウィルスの殺菌、飲料水の浄化、光リソグラフィ、環境汚染物質の分解、院内感染予防、光線外科治療など、多様な技術分野において近年 DUV 光の重要性が増している。これらの応用を実現するには、小型ポータブルで高出力な深紫外 LED 光源を実現する必要があるが、深紫外波長領域において、従来光源である水銀ランプを置き換えるレベルの高出力な LED は技術的な困難さから未だ実現されていない。現在、深紫外 LED 光源の光出力向上を阻害している問題として、LED チップからの光取出し効率が低いことに加え、注入電流の増加に対する光出力の飽和現象 (ドループ) などの課題が挙げられる。本研究では、AlGaIn 系深紫外 LED における光出力飽和現象の抑制技術開発や、光取出し効率を向上させる AlN ナノ光構造の大面積形成などの取組みにより、室温 CW 動作において 150mW を超える高出力な 265nm 帯 DUV-LED の開発に成功したことなどについて報告する。

2. DUV-LED 開発内容及び結果

従来 AlGaIn 系深紫外 LED では、主にサファイ

ア基板が用いられてきたが、AlGaIn 層とサファイア基板との格子定数差が大きく、高密度な転位欠陥が活性層付近で発生し、内部量子効率や信頼性の低下が問題となっていた。このため、我々はトクヤマ及びスタンレーとの共同研究により単結晶 AlN 基板の上の深紫外 LED について研究開発を進めているが、AlN 基板上深紫外 LED では、格子定数差が殆ど無く低転位を実現可能である一方、それと引き換えに極めて低い光取出し効率の問題が発生する。AlN 基板はサファイアと比較し、屈折率が大きく ($n=2.29$ @265nm)、基板/空気界面での全反射角が増大し、わずかな光しか外部に取り出すことができない。またさらに HVPE 法で作製した透明度の高い AlN 基板を用いても 265nm 帯では 10cm^{-1} 程度の吸収係数を有し不透明である。このため、半導体内部で発光した光の殆どはチップ内で再吸収され熱となる。よって AlN 基板上深紫外 LED は、内部量子効率は比較的高いものの光取出し効率はどうしても低くなり、トレードオフの関係にある。このジレンマの克服が AlN 基板上深紫外 LED では課題となる。またさらに、光取出し効率の向上だけでなく、深紫外 LED 特有の高電流注入時の光出力飽和 (発光効率の低下: ドループ現象) の改善も、ハイパワー深紫外 LED の実現に向けて、重要な課題である。メサ型 AlGaIn 系深紫外 LED では、Al の組成比率が 70% 以上となるため、p 型及び n 型クラッド層どちらの抵抗率も高くなる。そのため、p-n 間の距離が最短となる p 電極メサ構造のエッジ近傍に電流が

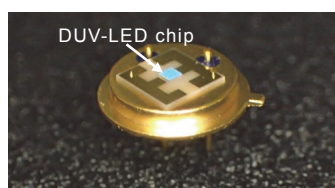


Fig. 1. Photograph of our fabricated DUV-LED package.

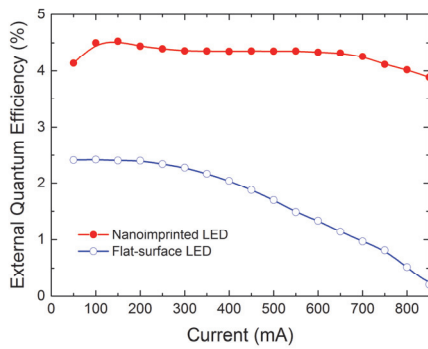


Fig. 2. EQEs as a function of continuous injection current of DUV-LED with nanoimprinted AlN nanophotonic light-extraction structure and conventional flat-surface DUV-LED.

集中し、印加電流の増加に伴い電流密度が非常に高くなる。この結果、従来の可視や UV の LED と比べ、注入電流の増加に対し、光出力が極めて速く飽和してしまう現象が生じる。高出力化に対しては重大な問題である。

この局所電流集中の問題に対して、我々は電流-熱連成理論計算解析を実施して、発光層への均一な電流注入を可能とする電極メサ構造を開発した²⁾。また本技術を基盤として、電流密度を低減するために発光領域の面積化に取り組んだ。その結果、発光アクティブ領域を大幅に拡大し ($0.1 \rightarrow 0.35 \text{mm}^2$)、且つ均一な注入電流拡散と発光分布を得ることが可能なデバイス構造を開発した。また発光領域を増加させたことに伴い、光取出し効率を向上させる AlN 基板上のナノ光取出し構造を、従来よりも遥かに大面積に作製することが必要となる。これまでの研究において我々は、独自の AlN ナノ光取出し構造を開発し、AlN 基板上深紫外 LED に対して、高い光取出し効率を達成しているが³⁾、そのような構造を従来の電子ビーム (EB) リソグラフィではなく、独自に開発したナノインプリントプロセス技術を用いて作製した。深紫外 LED の社会普及を目指すには、高出力化への取組と共に、低コスト化への検討も必須である。本ナノインプリント技術を用いることで、高コスト化し易いナノ構造を駆使した光出力の向上技術でありながら、従来の EB 等の加工法を用いる場合と比較すると、圧倒的な製造時のコスト低減が可能となる。

これらの要素技術を統合し LED チップ全面に

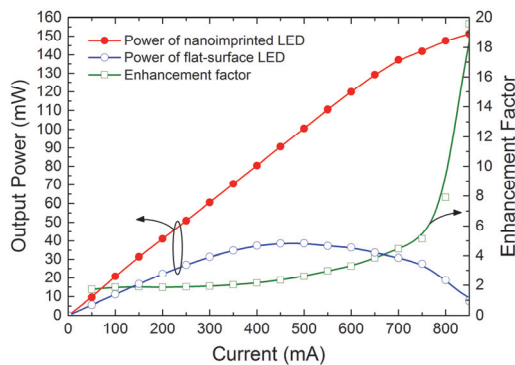


Fig. 3. Output power and enhancement factor as a function of continuous injection current of DUV-LED with nanoimprinted AlN nanophotonic light-extraction structure and conventional flat-surface DUV-LED.

光取出し特性と放熱特性を同時に向上させる独自のナノ光・ナノフィン構造を形成した AlN 基板上深紫外 LED を試作し (Fig.1)、その特性を評価した。外部量子効率の結果 (Fig.2) において、従来型素子では、注入電流の増加に伴い、急速に低下してしまう現象 (ドループ) が見られたが、今回新たに開発したナノ光・ナノフィン構造を形成した深紫外 LED では、注入電流の増加 (最大 850mA まで) に対し、効率がほとんど低下せず、ドループ現象の明確な抑制に成功した。同時にスペクトル解析により、高注入電流時での LED のジャンクション温度の上昇が従来構造に対し抑制されていることを明らかにしている。また深紫外 LED の発光ニアフィールド (近視野) 像において、従来型素子では、電極メサ構造 (アクティブ領域) の形状とほぼ同一の放射パターンが観測された一方、今回新たに開発したナノ構造付加型素子では、LED チップ全体の広い領域からの光放射を観測した。これは開発素子において、光取出し角が大幅に拡大していることを示すものである⁴⁾。この結果、光出力特性 (Fig.3) において、従来構造に対し、約 20 倍 (@850mA) もの大幅な出力向上に成功し、シングルチップ、発光波長 265nm、室温・連続駆動下の深紫外 LED において、深紫外波長帯 世界最高出力となる光出力 150mW 超を達成した。

3. まとめ

室温 CW 動作において 150mW 超の世界最高出力となる 265nm 帯 DUV-LED の実証に成功した。深紫外 LED は、情報通信から安全衛生、環境、医療応用に至るまで、広範な分野での利用が期待されている。既存の水銀ランプを置き換える低環境負荷、小型ポータブル、ワット級の深紫外 LED 光源の開発とその応用実現に向け、今後も引き続き深紫外光デバイス技術を深化させ、先導的な研究を果たしていきたい。

謝 辞

本稿で紹介した研究成果の一部は JST 研究成果展開事業 A-STEP ステージ II シーズ育成タイプ (AS2525010J, AS2715025R) の支援、産官連携の取組みのもとに実施された。

参考文献

- 1) M. Kneissl, T. Kolbe, C. Chua, V. Kueller, N. Lobo, J. Stellnach, A. Knauer, H. Rodriguez, S. Einfeldt, Z. Yang, N. M. Johnson and M. Weyers: *Semicond. Sci. Technol.* **26**, (2011) 014036.
- 2) G.-D. Hao, M. Taniguchi, N. Tamari, and S. Inoue: *J. Phys. D: Appl. Phys.* **49**, (2016) 235101.
- 3) S. Inoue, N. Tamari, T. Kinoshita, T. Obata, and H. Yanagi: *Appl. Phys. Lett.* **106**, (2015) 131104.
- 4) S. Inoue, N. Tamari, and M. Taniguchi: *Appl. Phys. Lett.* **110**, (2017) 141106.