

戦略的創造研究推進事業(ALCA)
技術領域(プロジェクト名)「革新的省・創エネルギー
システム・デバイス」
課題名「水銀ランプ殺菌灯の代替となる縦型高効
率・深紫外 LED の開発」

終了報告書

研究開発期間 平成27年10月～令和2年3月

研究開発代表者：平山 秀樹
(国立研究開発法人理化学研究所、開
拓研究本部、平山量子光素子研究室、
主任研究員)

○報告書要約（和文）

研究開発代表研究者：理化学研究所 主任研究員 平山 秀樹

研究開発課題名：水銀ランプ殺菌灯の代替となる縦型高効率・深紫外 LED の開発

1. 研究開発の目的

高い殺菌効果を有する深紫外線は、直接表面殺菌、浄水、空気浄化、皮膚治療、院内感染防止などの医療、食品の衛生管理など幅広い利用が期待されている。殺菌用の水銀ランプは、環境負荷が大きく今後廃止されるため、環境に無害な深紫外 LED の殺菌利用が注目されている。

本研究は、AlGaIn 深紫外 LED の効率を飛躍的に向上させ、「水銀ランプ殺菌灯の代替となる深紫外 LED」を実現する事を目的としている。現在、深紫外 LED の効率は低く、水銀ランプの効率に遠く及んでいない。その要因は、素子内部で光が吸収され、深紫外 LED の光取り出し効率が非常に低いことにある。本研究では、透明コンタクト層、反射電極、反射フォトニック結晶、加工サファイア基板、レンズ等を用いて光取り出し効率を向上させ、最終的に効率 20%を超える殺菌用深紫外 LED を実現することを目標としている。深紫外 LED の高効率化により、消費電力ロスを大幅に低減させ、低炭素社会の実現に大きく寄与できると考えられる。

2. 研究開発の概要

(1)内容：殺菌波長の AlGaIn 深紫外 LED は、光取り出し効率が非常に小さく、そのため、全体としての効率が 1～2%程度と低いことが問題であった。本研究では、深紫外 LED の光取り出し効率の改善により、最終的に 20%程度の効率を実現することを目標として研究を行った。光取り出し効率は、p 型 GaN コンタクト層による光吸収により著しく低下する。本研究では初めに、透明コンタクト層と高反射電極の導入を行った。透明コンタクト層を導入すると、電極のコンタクト抵抗が向上し効率の低下が起こるため、さらに我々は、反射フォトニック結晶による高反射効果を用い、光取り出し効率の向上を検討した。加えて、加工サファイア基板を用いた光散乱構造、実装チップへのレンズ接合による光取り出し効率の向上を検討した。また、実用化を考慮し、実装素子における n 型 p 型電極の低抵抗化と高出力化の検討を行った。

(2)成果：深紫外 LED に、反射フォトニック結晶、レンズ、加工サファイア基板、反射パッケージを導入したときの光取り出し効率の向上効果を、解析により求めた。反射フォトニック結晶を用いた場合、光取り出し効率が 3 倍以上向上することを明らかにした。解析を元に、AlGaIn 深紫外 LED に反射フォトニック結晶を導入し、光取り出し効率の向上効果を実証した。また、外部量子効率 10%程度の高効率動作を得た。さらに、深紫外 LED に、透明コンタクト層、反射電極、加工サファイア基板、及び、レンズ状樹脂モールドを用いて光取り出し効率の向上を行った結果、効率は従来に比べ 5 倍向上し、外部量子効率 20.3% (世界最高値) を実現した。同実験で、透明コンタクト層と反射電極の導入で約 3 倍、加工サファイア基板、及び、レンズ効果でそれぞれ 1.3 倍程度、光取り出し効率が向上することを実証した。また、透明コンタクト層を用いた深紫外 LED においてコンタクト抵抗の低減を行い、電力変換効率 10.8% (世界最高値) を実現した。深紫外 LED の n 型 p 型電極の低抵抗化と高出力化の検討を行い、275nm の LED に於いて 140mW の出力を実現した。

(3)今後の展開：本プロジェクトで、外部量子効率 20%程度、電力変換効率 10%程度の深紫外 LED が実現した。今後は、これらの効率をさらに向上させるとともに、効率を維持したまま高出力化する事が期待される。反射フォトニック結晶を用いることにより、低い電極抵抗を維持したまま 3 倍の効率が期待できる。加えて、レンズ、反射パッケージを併用すれば、40%程度の光取り出し効率が期待できる。したがって、将来的には、電力変換効率 20%程度、ワットクラスの高出力深紫外 LED が可能になると考えられる。現在、素子化プロセスが開発途上にあり、まだ高効率化と高出力化が両立しない状況にあるが、実装素子化プロセスを進めれば、現在の素子に比べさらに大幅な高出力化が期待できる。

○Report summary (English)

Principal investigator: RIKEN, Chief Scientist Hideki Hirayama

R & D title: Study of high efficiency deep-UV LEDs that can replace mercury germicidal lamps

1. Purpose of R & D

Deep-ultraviolet (UV) rays, which have a high bactericidal effect, are expected to be widely used for direct surface sterilization, water purification, air purification, skin treatment, medical treatment such as nosocomial infection prevention, and food hygiene control. Since mercury lamps have a large environmental impact and will be abolished in the future, the use of sterilizing deep-UV LEDs, which are harmless to the environment, is drawing attention.

The purpose of this research is to dramatically improve the efficiency of AlGaIn deep-UV LEDs and realize "deep-UV LEDs that can replace mercury germicidal lamps". Currently, the efficiency of deep-UV LEDs is low, far below the efficiency of mercury lamps. The reason is that the UV light is absorbed inside the device and the light-extraction efficiency (LEE) of the deep-UV LED is very low. In this research, the LEE is improved by using a transparent contact layer, a reflective electrode, a reflective photonic crystal, a patterned sapphire substrate (PSS), and a lens. The goal is to finally realize a deep-UV LED for sterilization with an efficiency exceeding 20%. By improving the efficiency of deep UV LEDs, it is thought that power consumption loss will be greatly reduced and that it will contribute significantly to the realization of a low-carbon society.

2. Outline of R & D

(1) Contents: We conducted research aiming at finally achieving an efficiency of about 20% of AlGaIn deep-UV LED by improving the LEE. The LEE is significantly reduced by light absorption by the p-type GaN contact layer. So, we first introduced a transparent contact layer and a highly reflective electrode. Since the introduction of the transparent contact layer increases the contact resistance of the electrode, we also introduced a highly-reflective photonic crystal (HR-PhC) to improve the LEE. In addition, the improvements of the LEE by the light scattering effects using the PSS and by bonding the lens were examined. Also, in consideration of practical use, we examined the increase of the output power of deep-UV LEDs by achieving low resistances of n-, and p-type electrodes.

(2) Achievements: We analyzed the effect of improving the LEE when we introduce a HR-PhC, a lens, a PSS, and a highly-reflective package into a deep-UV LED. It was clarified that the LEE was improved more than 3 times when the HR-PhC was used. We introduced a HR-PhC into an AlGaIn deep ultraviolet LED and demonstrated the effect of improving the LEE. High efficiency operation with external quantum efficiency (EQE) of about 10% was obtained. Further, the LEE was improved by using a transparent contact layer, a reflective electrode, a PSS, and a lens-shaped resin mold for the deep ultraviolet LED. The efficiency was improved by 5 times than before, and we achieved 20.3 % EQE (the record highest value). In addition, we have reduced the contact resistance of deep-UV LEDs with a transparent contact layer and achieved a wall plug efficiency (WPE) of 10.8% (the record highest value). We also realized the output of 140 mW in the 275 nm LED.

(3) Future developments: This project has realized a deep-UV LED with an EQE of approximately 20% and WPE of approximately 10%. In the future, it is expected that these efficiencies will be further improved and that the output power will be increased while maintaining the efficiencies. By using a HR-PhC, it is possible to expect triple efficiency while maintaining low electrode resistance. In addition, if a lens and a reflective package are used together, a LEE of about 40% can be expected. Therefore, in the future, it is expected that power conversion efficiency of about 20% and high power deep UV LED of watt class will be possible. Currently, the LED fabrication process is in the process of development, and it is still in a situation where high efficiency and high output are not compatible. If the fabrication process is advanced in future, it is expected that the output will be dramatically increased from the current device.