

一般セッション(口頭講演) | 15 結晶工学：15.4 III-V族窒化物結晶

2025年3月15日(土) 13:00 ~ 17:30 会 K401 (講義棟)

[15p-K401-1~15] 15.4 III-V族窒化物結晶

本田 善央(名大)、久志本 真希(名大)、嶋 紘平(東北大)、飯田 一喜(名大)

13:00 ~ 13:30

[15p-K401-1]

[第15回化合物半導体エレクトロニクス業績賞 (赤崎勇賞) 受賞記念講演] 窒化物半導体における分極効果の先駆的研究と高効率青紫色面発光レーザーの実証

○竹内 哲也¹ (1.名城大理工)

◆ 奨励賞エントリー

13:30 ~ 13:45

[15p-K401-2]

AlGa_N系UV-Bレーザーダイオードにおける成長温度の影響と発光特性評価○(M1)丸山 竣大¹、山田 凌矢¹、井本 圭紀¹、齋藤 巧夢¹、三宅 倫太郎¹、佐々木 祐輔¹、狩野 祥吾¹、岩山 章¹、三宅 秀人²、上山 智¹、竹内 哲也¹、岩谷 素顕¹ (1.名城大学、2.三重大学)

◆ 奨励賞エントリー

13:45 ~ 14:00

[15p-K401-3]

AlGa_N系UV-B屈折率導波型半導体レーザーの光学特性とエッチング影響○(M1)三宅 倫太郎¹、井本 圭紀¹、山田 凌矢¹、齋藤 巧夢¹、丸山 竣大¹、狩野 祥吾¹、佐々木 祐輔¹、渡辺 峻太¹、宮本 侑菜¹、橘田 直樹¹、加藤 晴也¹、岩山 章¹、岩谷 素顕¹、竹内 哲也¹、上山 智¹、三宅 秀人² (1.名城大理工、2.三重大工)

14:00 ~ 14:15

[15p-K401-4]

AlN上分極ドーピングp型Al_xGa_{1-x}N層のバンドギャップ内準位評価○(M1)小幡 駿介¹、竹久 哲平¹、鈴木 武志²、今井 大地^{1,2}、竹内 哲也^{1,2}、宮嶋 孝夫^{1,2} (1.名城大院理工、2.名城大理工)

14:30 ~ 14:45

[15p-K401-5]

[第57回講演奨励賞受賞記念講演] AlGa_N系UV-B LDにおける急峻なヘテロ接合界面を適用したデバイス性能○齋藤 巧夢¹、三宅 倫太郎¹、山田 凌矢¹、井本 圭紀¹、丸山 竣大¹、佐々木 祐輔¹、狩野 祥吾¹、岩山 章¹、三宅 秀人²、上山 智¹、竹内 哲也¹、岩谷 素顕¹ (1.名城大理工、2.三重大院工)

14:45 ~ 15:00

[15p-K401-6]

AlGa_N系UV-Bレーザーダイオードにおける電子ブロック層とガイド層界面でのAl組成傾斜層がキャリア注入効率に与える影響○(M1)齋藤 巧夢¹、三宅 倫太郎¹、山田 凌矢¹、井本 圭紀¹、丸山 竣大¹、佐々木 祐輔¹、狩野 祥吾¹、岩山 章¹、三宅 秀人²、上山 智¹、竹内 哲也¹、岩谷 素顕¹ (1.名城大理工、2.三重大院工)

◆ 奨励賞エントリー

15:00 ~ 15:15

[15p-K401-7]

AlGaIn系UV-B LDにおけるn型電極低温アニールの効果と特性評価

○(B)渡辺 峻太¹、井本 圭紀¹、山田 凌矢¹、齋藤 巧夢¹、丸山 峻大¹、三宅 倫太郎¹、狩野 祥吾¹、佐々木 祐輔¹、岩山 章¹、三宅 秀人²、上山 智¹、竹内 哲也¹、岩谷 素顕¹ (1.名城大理工、2.三重大院工)

15:15 ~ 15:30

[15p-K401-8]

220-230 nm発光帯AlGaIn量子井戸構造における偏光度の温度依存性

谷 海智¹、落合 俊介¹、村垣 勇飛¹、○室谷 英彰²、倉井 聡¹、岡田 成仁¹、M. Ajmal Khan³、牟田 光弘⁴、祝迫 恭⁴、平山 秀樹³、山田 陽一¹ (1.山口大院・創成科学、2.徳山高専、3.理研、4.日本タングステン)

◆ 奨励賞エントリー

15:30 ~ 15:45

[15p-K401-9]

縦型UV-Bレーザーダイオードにおける支持基板の選定とプロセス工程の最適化

○(M1)佐々木 祐輔¹、井本 圭紀¹、山田 凌矢¹、齋藤 巧夢¹、三宅 倫太郎¹、丸山 峻大¹、狩野 祥吾¹、岩山 章¹、岩谷 素顕¹、竹内 哲也¹、上山 智¹、三宅 秀人² (1.名城大理工、2.三重大院工)

16:00 ~ 16:15

[15p-K401-10]

AlGaIn/AlN歪超格子を有する分極電界誘起第二高調波発生デバイス

○谷川 智之^{1,2}、Shahzeb Malik^{1,2}、正直 花奈子³、伊藤 雅晃^{1,2}、百崎 怜^{1,2}、本田 啓人^{1,2}、三宅 秀人⁴、上向井 正裕^{1,2}、片山 竜二^{1,2} (1.阪大院工、2.阪大OTRIスピン、3.京大院工、4.三重大院工)

16:15 ~ 16:30

[15p-K401-11]

ダブルヘテロ構造を発光層とする226 nm far-UVC LEDの発光効率向上

○赤池 良太^{1,2}、安永 弘樹^{2,3}、中村 孝夫^{1,2}、市川 修平^{4,5}、小島 一信⁴、土谷 正彦⁶、三宅 秀人^{1,2} (1.三重大院工、2.三重大半デセンター、3.三重大研基機構、4.阪大院工、5.阪大電顕セ、6.スタンレー電気)

◆ 奨励賞エントリー

16:30 ~ 16:45

[15p-K401-12]

極薄GaIn量子井戸を用いたFar-UVC LEDの設計と作製

○和泉 篤尚¹、正直 花奈子¹、船戸 充¹、川上 養一¹ (1.京大院工)

16:45 ~ 17:00

[15p-K401-13]

Optics-free Gbps solar-blind communications by using highly-collimated deep-ultraviolet micro-LED with Fresnel zone plate nano-structures

○韋 靈傑¹、Hao Guo-Dong¹、谷口 学¹、井上 振一郎¹ (1.情報通信研究機構)

◆ 英語発表

17:00 ~ 17:15

[15p-K401-14]

AlGaIn-Based Deep-Ultraviolet LEDs Achieving 9.1% Wall-Plug Efficiency by Enhanced Light Extraction Efficiency

○Guodong Hao¹、Manabu Taniguchi¹、Shin-ichiro Inoue¹ (1.NICT)

◆ 英語発表

17:15 ~ 17:30

[15p-K401-15]

Efficiency Analysis of 230 nm far-UVC LED either grown on Bulk AlN or c-Sapphire as a Function of Quantum-well Numbers

○(P)Muhammad Nawaz Sharif¹, Kohei Fujimoto^{1,3}, Yuya Nagata^{1,3}, Hiromitsu Sakai², Hiroyuki Yaguchi³, Yukio Kashima⁴, Muhammad Ajmal Khan¹, Hideki Hirayama¹ (1.RIKEN, 2.Shin-Etsu Chemical, 3.Saitama University, 4.Marubun Corporation, Chuo, Tokyo)

AlGaIn系 UV-B レーザーダイオードにおける成長温度の影響と発光特性評価

Effect of growth temperature on AlGaIn-based UV-B laser diodes and characterization of emission properties

丸山峻大¹, 山田凌矢¹, 井本圭紀¹, 齋藤巧夢¹, 三宅倫太郎¹, 佐々木祐輔¹, 狩野祥吾¹岩山章¹, 三宅秀人², 上山智¹, 竹内哲也¹, 岩谷素顕¹¹名城大・理工, ²三重大・院・工S. Maruyama¹, R. Yamada¹, Y. Imoto¹, T. Saito¹, R. Miyake¹, Y. Sasaki¹, S. Karino¹,S. Iwayama¹, H. Miyake², S. Kamiyama¹, T. Takeuchi¹, M. Iwaya¹¹Meijo University, ²Mie University

E-mail: 243428042@ccmailg.meijo-u.ac.jp

本研究グループでは、AlGaIn系 UV-B レーザーダイオードの特性向上を目指した検討を進めている。その一環として、MOVPE 成長条件の最適化を試みており、特に結晶成長温度を 1000°C から 850°C に低下させることで、急峻なヘテロ接合界面の実現やキャリア注入効率の向上に伴う特性改善を確認した。一方で、成長温度の低下が活性層の発光特性に及ぼす影響については十分に理解されていない。本報告では、異なる成長温度で作製した AlGaIn 活性層の発光特性を詳細に検討した結果を報告する。

本研究では、2種類の試料構造を作製した。1つは参考文献1で報告されている一般的なデバイス構造であり、もう1つは5周期の AlGaIn 多重量子井戸構造である。これらの試料を、それぞれ結晶成長温度 1000°C および 850°C で作製した。試料の評価は、室温における YAG レーザー励起を用いた光励起レーザー発振特性測定、およびフォトルミネッセンス (PL) 測定とその温度依存性評価を行うことで実施した。これにより、レーザー発振に必要な励起パワー密度、内部量子効率、スペクトル半値幅などを比較した。また、STEM 像、XRD 解析、CL 測定を通じて、試料の結晶構造および光学特性を詳細に評価した。

代表的な結果として、作製したデバイスの光励起レーザー発光強度の励起パワー密度依存性を Fig. 1 に示す。この結果、いずれの試料もレーザー発振が確認されたが、発振に必要な閾値パワー密度には違いが見られた。特に、850°C で成長した試料は、1000°C で成長した試料と比較して約半分の励起パワー密度で発振することが判明した。

さらに、STEM 像および PL スペクトルを比較したところ、850°C で成長した試料の方が急峻な界面を有し、スペクトルの半値幅が狭いことが確認された。この結果は、低温成長が結晶品質の改善に寄与していることを示唆している。さらに、内部量子効率を含むその他の特性についても解析を進めており、その詳細は当日に議論する予定である。

参考文献: [1] R. Kondo *et al.* Appl. Phys. Lett. **121**, 253501 (2020).

謝辞: 本研究の一部は科研費・基盤 A(22H00304) NEDO 先導研究の援助にて実施された。

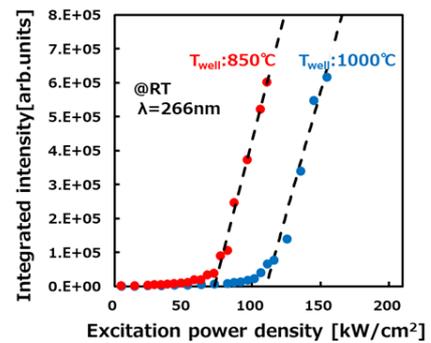


Fig.1 光励起レーザー特性

AlGa_N系 UV-B 屈折率導波型半導体レーザーの光学特性とエッチング影響AlGa_N UV-B refractive index waveguide laser diodes: Optical characteristics and etching effects

○(M1)三宅倫太郎¹, 井本圭紀¹, 山田凌矢¹, 齋藤巧夢¹, 丸山峻大¹, 狩野祥吾¹, 佐々木祐輔¹, 渡辺峻太¹, 宮本侑菜¹, 橋田直樹¹, 加藤晴也¹, 岩山章¹, 岩谷素顕¹, 竹内哲也¹, 上山智¹, 三宅秀人²
¹名城大・理工,²三重大・院・工

○ R. Miyake¹, Y. Imoto¹, R. Yamada¹, T. Saito¹, S. Maruyama¹, S. Karino¹, Y. Sasaki¹, R. Watanabe¹, Y. Miyamoto¹, N. Kitta¹, S. Kato¹, S. Iwayama¹, M. Iwaya¹, T. Takeuchi¹, S. Kamiyama¹, H. Miyake²
 Meijo Univ¹, Mie Univ²

E-mail: 200443073@c alumni.meijo-u.ac.jp

本研究では、格子緩和した高品質 AlGa_N テンプレート上に UV-B 半導体レーザー(LD)を作製し、室温パルス発振を実現した。さらに、UV-B LD の高性能化を目指し、キャリア注入効率(η_i)の向上、光閉じ込め係数の増加、内部損失(α_i)の低減による閾値電流の低減およびスロープ効率の向上に取り組んできた。特に、リッジ導波路構造などの屈折率導波路構造を採用することで特性改善を報告しているが、リッジ深さの依存性などは十分に解明されていない[1]。本報告では、屈折率導波路構造と利得導波路型 UV-B LD を作製し、光閉じ込めとエッチングダメージのトレードオフを検討した結果を示す。

Fig. 1 に作製したデバイス構造を示す。利得導波路型 LD(a)と、参考文献[1]に基づき ICP ドライエッチングと TMAH 溶液を用いてエッチング量を制御した屈折率導波型 LD(b)を作製した。本研究では、活性層からの膜厚を x として、その厚さ依存性を評価した。室温パルス駆動下でデバイスの外部微分量子効率の共振器長依存性を算出し、構造特性を解析した。Fig. 2 に x に対する α_i と η_i の関係を示す。 α_i は x の減少に伴い低減したが、50 nm 以下では増加し LD の特性が明確に低下する傾向が確認された。一方、 η_i は 5.8%~6.9% の範囲でばらつきが見られたが、 x への明確な依存性は確認されなかった。これらの結果より、エッチング量の最適化が UV-B LD 性能向上の重要な要因であることが示唆された。

[1] S. Tanaka *et al*, Appl. Phys. Express **14**, 094009 (2021).

謝辞: 本研究の一部は、科研費・基盤 A (22H00304)、NEDO 先導研究の援助によって実施された。

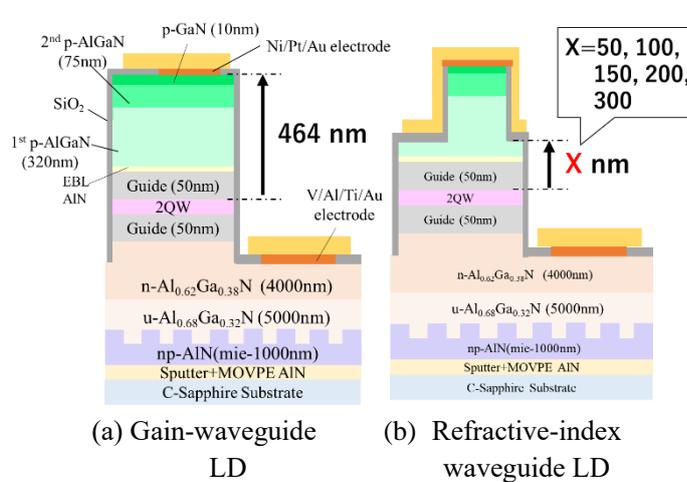


Fig. 1 Schematic sample structure

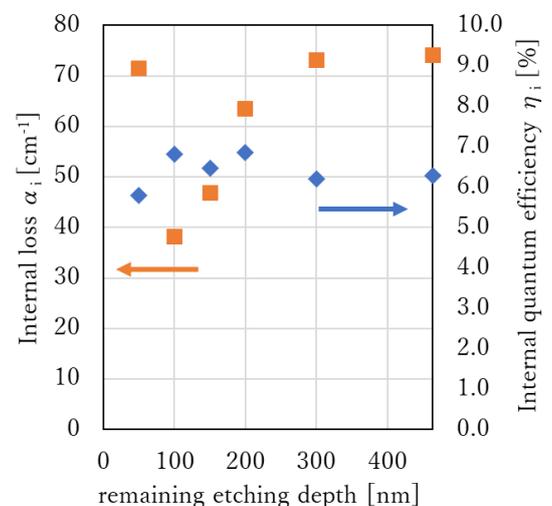


Fig. 2 Relationship between α_i , η_i , and remaining etching depth

AlN 上分極ドーピング p 型 $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ 層のバンドギャップ内準位評価

Analysis of in-gap states in polarization-doped p-type $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ layers on AlN

名城大院理工¹,名城大理工²○(M1)小幡 駿介^{1*}, 竹久 哲平¹, 鈴木 武志²

今井 大地^{1,2**}, 竹内 哲也^{1,2}, 宮嶋 孝夫^{1,2}

Grad. Sch. Sci. Tech., Meijo Univ.¹ Meijo Univ.²,

○S. Obata¹, T. Takehisa¹, T. Suzuki¹, D. Imai¹, T. Takeuchi¹, and T. Miyajima¹

E-mail: *243428014@ccmail.meijo-u.ac.jp, **idaichi@meijo-u.ac.jp

深紫外 LED やレーザーに用いられる $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ 混晶では、Mg により形成されるアクセプタ準位が深いため、低い正孔濃度が素子実用化に対する課題の一つとされている。近年、この打開策として分極ドーピングが注目されているが^[1]、不純物添加が不要とされる分極ドーピング高 Al 組成 $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ 混晶では、正孔生成に対する Mg ドーピング併用の有効性が示唆されている。^{[2],[3]} この要因として、組成傾斜層の格子緩和で生成された電子を Mg が補償する効果^[1]や、Mg に起因した不純物バンド伝導等が予想されているが、^[2] 高 Al 組成 p 型 $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ の高い絶縁性により電氣的なバンドギャップ内準位の評価は困難性が高いと考えられる。そこで今回我々は、薄膜中のバンドギャップ内準位を非接触・高感度に検出可能な光熱偏向分光法(PDS 法)により、分極ドーピング p 型 $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ 層のバンドギャップ内準位観測を試みた。

測定試料は MOCVD 法により AlN/sapphire テンプレート上に積層した組成傾斜 $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ 層($x=0.35-0.9$, 膜厚 60 nm)^[3]である。最上層にあった Hall 測定用 Mg ドープ $\text{Al}_{0.35}\text{Ga}_{0.65}\text{N}$ コンタクト層はドライエッチングにより除去した。^[3]その後、バンドギャップ内準位に対する Mg ドーピング($[\text{Mg}] = 5.2 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$)および活性化アニールの影響を評価した。図 1 にこれらの試料と参照用 AlN テンプレートの PDS スペクトルを示す。4.5 eV 付近のピークは全試料で観測されていることから、下地 AlN テンプレートに由来するものと考えられる。そこで、4.5 eV で規格化した PDS スペクトルを図 2 に示す。およそ 4.75 eV より高エネルギー側ではスペクトル形状に明瞭な違いが観測されており、この領域の信号が組成傾斜 $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ 層に由来する PDS 信号であると考えられる。この領域において PDS 信号は活性化アニールにより減少し、Mg ドーピングにより増大している。よって、このエネルギー領域における PDS 信号の変化は、Mg ドープやエッチングにより生じたアクセプタ準位や欠陥準位のアニールによる変化に対応するものと考えられる。今後は、これらの PDS 信号の起源や素子電気特性との相関について解析を進める。

[1] T. Yasuda et al Appl. Phys. Express, **10**, 025502 (2017). [2] S. Rathkanthiwar et al, Appl. Phys. Lett., **122**, 152105 (2023). [3] 竹久, 他 第 85 回 秋季応物, 20p-C42-5 (2024).

【謝辞】本研究の一部は科研費基盤研究 S (No. 23H05460)、基盤 C (No. 22K04956)、名城大学総合研究所研究成果展開事業費の支援を受けて行われた。

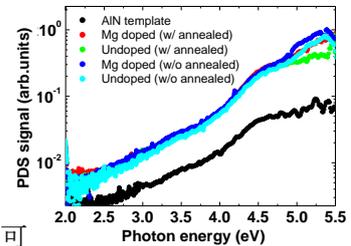


図1 組成傾斜 $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ のPDSスペクトル

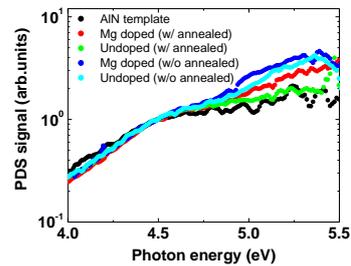


図2 規格化した組成傾斜 $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ のPDSスペクトル

AlGaIn 系 UV-B LD における急峻なヘテロ接合界面を適用したデバイス性能 Device performance with sharp heterojunction interface applied in AlGaIn-based UV-B LDs

(M1) 齋藤巧夢¹, 三宅倫太郎¹, 山田凌矢¹, 井本圭紀¹, 丸山峻大¹, 佐々木祐輔¹, 狩野祥吾¹

岩山章¹, 三宅秀人², 上山智¹, 竹内哲也¹, 岩谷素顕¹

¹名城大・理工、²三重大・院・工

Takumu Saito¹, Rintaro Miyake¹, Ryoya Yamada¹, Yoshinori Imoto¹, Shundai Maruyama¹,

Yusuke Sasaki¹, Shogo Karino¹, Sho Iwayama¹, Hideto Miyake², Satoshi Kamiyama¹,

Tetsuya Takeuchi¹, Motoaki Iwaya¹

¹Meijo University, ²Mie University,

E-mail: 200443034@c alumni.meijo-u.ac.jp

我々は、AlGaIn 系 UV-B レーザーダイオード (LD) の室温パルス発振に成功し、ピーク光出力 150 mW を達成した[1]。しかし、この LD のキャリア注入効率 (η_i) は約 10%にとどまっており、高出力化において η_i の増大が重要な課題となっている。この η_i の低い要因として、電子ブロック層 (EBL) とガイド層の界面に形成される意図しない Al 組成傾斜層が報告されている[2]。本研究では、MOVPE による急峻なヘテロ界面の成長条件の最適化と、その結果得られたデバイス性能について報告する。

本研究では、図 1 に示す LD 構造を図 2 の成長シーケンスで、以下の 3 種類のサンプルを作製した：(1) ガイド層から p-GaN 層まで全て 1000°C で成長させたサンプル、(2) ガイド層から EBL まで 850°C で成長させ、その後 850°C から 1000°C まで昇温しながら約 100 nm 成長させた後、1000°C で維持して成長させたサンプル、(3) 全て 850°C で成長させたサンプルである。これらのサンプルについて断面 STEM 観察を行い、Al 組成傾斜層の膜厚を確認したところ、それぞれ 29、9、および 0 nm であった。STEM 像の結果から高温での成長が意図しない組成傾斜層の形成に大きな影響があることが示唆された。図 3 に同一サイズのデバイスの J-V-L 特性を示す。意図しない Al 組成傾斜層の膜厚が 29 nm から 9 nm へ低減することで、閾値電流密度が 13 kA/cm² から 6.5 kA/cm² へと低減することを確認した。一方、傾斜層膜厚が 0 nm のサンプルでは高抵抗化しデバイス動作を得ることができなかった。本記念講演では、これらの結果を総括し、急峻なヘテロ構造を形成する手法や、高い η_i を実現するために必要な結晶成長技術について詳しく議論する。

謝辞：本研究の一部は、科研費・基盤研究 A (22H00304) および NEDO 先導研究の援助によって実施された。

References

[1] R. Kondo et al. Appl. Phys. Lett. **121**, 253501(2020).

[2] Z. Zhang et al. Appl. Phys. Lett. **124**, 061109 (2024).

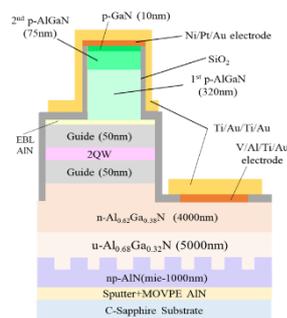


Fig.1 Device Structure

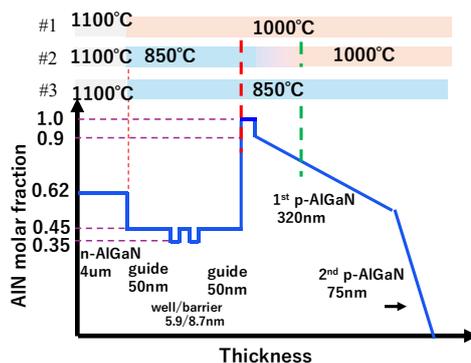


Fig.2 Growth sequence

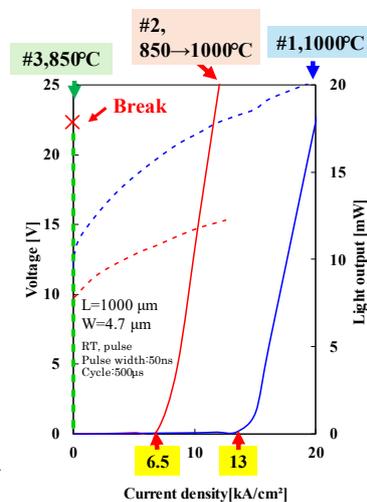


Fig.3 J-V-L curves

AlGaIn系 UV-B レーザーダイオードにおける電子ブロック層とガイド層界面での Al 組成傾斜層がキャリア注入効率に与える影響

The effect of the Al composition gradient layer at the interface between the electron blocking layer and the guide layer on the carrier injection efficiency in AlGaIn-based UV-B laser diodes

(M1) 齋藤巧夢¹, 三宅倫太郎¹, 山田凌矢¹, 井本圭紀¹, 丸山竣大¹, 佐々木祐輔¹, 狩野祥吾¹, 岩山章¹, 三宅秀人², 上山智¹, 竹内哲也¹, 岩谷素顕¹

¹名城大・理工, ²三重大・院・工

Takumu Saito¹, Rintaro Miyake¹, Ryoya Yamada¹, Yoshinori Imoto¹, Shundai Maruyama¹, Yusuke Sasaki¹, Shogo Karino¹, Sho Iwayama¹, Hideto Miyake², Satoshi Kamiyama¹, Tetsuya Takeuchi¹, Motoaki Iwaya¹

¹Meijo University, ²Mie University,

E-mail: 200443034@c alumni.meijo-u.ac.jp

我々は、AlGaIn系 UV-B レーザーダイオード (LD) の室温パルス発振に成功し、150 mW のピーク光出力を達成した[1]。しかし、キャリア注入効率 (η_i) が約 10%にとどまっており、さらなる高出力化には η_i の向上が不可欠である。その低効率の要因として、電子ブロック層 (EBL) とガイド層の界面に形成される意図しない Al 組成傾斜層が報告されているが、その η_i への影響は系統的に理解されているとは言い難い[2]。本研究では、MOVPE により作製した UV-B LD において、この Al 組成傾斜層が η_i に与える影響を調査した。

本研究では、シミュレーションと実験により検証を行った。シミュレーションには SiLENSe 6.5 を用い、Figure 1 に示すような AlN モル分率の膜厚分布を持つ構造を計算した。特に、EBL とガイド層に AlN モル分率が線形に変化する層があると仮定し、電流密度 10 kA/cm² 時の η_i を見積もり、その影響を調査した。一方、実験的には MOVPE の成長条件を変化させることで Al 組成傾斜層を形成し、STEM の Z-contrast 法を用いてその膜厚を推定した。さらに、 η_i は外部微分量子効率の逆数と共振器長依存性から見積もった。

STEM 像によれば、作製した LD の各ウェハには EBL とガイド層に約 2~29 nm の Al 組成傾斜層が形成されていた。これらの各ウェハを LD 化し、 η_i を見積もり、その意図しない Al 組成傾斜層膜厚依存性を Figure 2 にプロットした。また、同図にはシミュレーションで見積もった η_i の Al 組成傾斜層膜厚依存性も示した。結果として、意図しない Al 組成傾斜層の膜厚が 29 nm から 2 nm に減少するにつれて、 η_i が約 3 倍程度増加するという明確な傾向が確認された。この傾向はシミュレーション結果とも定性的に一致していた。これらの結果は、意図しない Al 組成傾斜層膜厚の低減が η_i の向上に極めて重要であり、高効率紫外 LD の実現において重要な知見であることを示している。当日は、結晶成長条件などの詳細についても議論する予定である。

謝辞：本研究の一部は、科研費・基盤 A (22H00304)、NEDO 先導研究の援助によって実施された。

References

[1] R. Kondo *et al.* Appl. Phys. Lett. **121**, 253501(2020).

[2] Z. Zhang *et al.* Appl. Phys. Lett. **124**, 061109 (2024).

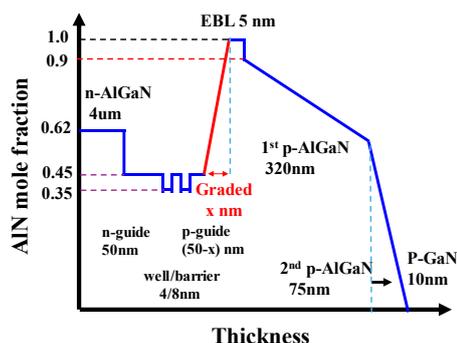


Fig.1 Simulation structure design

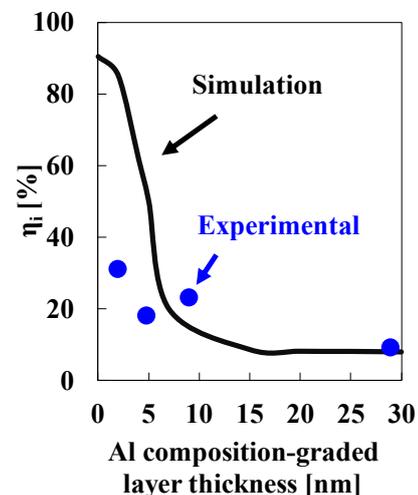


Fig.2 η_i vs. Al composition-graded layer thickness

AlGaN 系 UV-B LD における n 型電極低温アニールの効果と特性評価

Effects and characterization of low-temperature annealing of n-electrodes in AlGaN-based UV-B LDs

○^(B4) 渡辺峻太¹, 井本圭紀¹, 山田凌矢¹, 齋藤巧夢¹, 丸山峻大¹, 三宅倫太郎¹, 狩野祥吾¹,
佐々木祐輔¹, 岩山章¹, 三宅秀人², 竹内哲也¹, 上山智¹, 岩谷素顕¹

¹名城大・理工, ²三重大・院・工

°R. Watanabe¹, Y. Imoto¹, R. Yamada¹, T. Saito¹, S. Maruyama¹, R. Miyake¹, S. Karino¹, Y. Sasaki¹,
S. Iwayama¹, H. Miyake², T. Takeuchi¹, S. Kamiyama¹, M. Iwaya¹

Meijo Univ¹, Mie Univ²

[E-mail: 210443085@c alumni.meijo-u.ac.jp](mailto:210443085@c alumni.meijo-u.ac.jp)

本研究グループでは, AlGaN 系 UV-B レーザーダイオード (LD) の高性能化に向けた取り組みを進めている. その一環として, MOVPE による結晶成長温度を 850°C まで低温化することで急峻なヘテロ接合の形成が可能となり, キャリア注入効率が增大する傾向を確認した. しかし, AlGaN 系材料では, n 型電極のオーミック接触形成に 800~900°C 程度の比較的高温でのアニールが必要とされ, 本研究の LD でも 900°C で 3 分間のアニールによってオーミック電極を形成している. 本報告では, n 型電極アニールの低温化およびその LD 性能への影響について検討した結果を示す.

本検討では, Cl₂-ICP エッチング法を用いて n 型 AlGaN 層までエッチングしたウェハー上に, V/Al/Ti/Au 構造の TLM パターンを形成し, 複数のアニール条件で I-V 特性を評価した. さらに, 最適なアニール条件で作製した利得導波型 UV-B LD と, 従来の 900°C・3 分アニール条件で作製した LD を比較し, その性能への影響を検証した.

Fig. 1 に, 900°C・3 分および 700°C でアニール時間を変化させた TLM 試料の I-V 特性を示す. 900°C・3 分のアニールでは良好なオーミック接触が得られた一方, 700°C・3 分のアニールではショットキー接触であった. しかし, アニール時間を 20 分以上 (20 分, 30 分, 40 分) に延長することでオーミック接触が得られた. TLM 測定によるコンタクト比抵抗評価では, 20 分アニール時に最も低い $8 \times 10^{-4} \Omega \text{cm}^2$ が得られ, この値は 900°C・3 分のアニールの場合とほぼ同等であった. これにより, n 電極のアニールにおいて, アニール時間を長くすることでオーミック電極形成が可能であることが明らかになった. Fig. 2 には, 異なるアニール条件で作製した LD の室温・パルス駆動時の I-V-L 特性を示す. 低温アニール (700°C・20 分) を施した LD では, スロープ効率の改善傾向が確認された. また, 動作電圧はほぼ同等であった. 当日は, 外部微分量子効率や共振器長依存性を用いたキャリア注入効率の評価結果, ならびに STEM 測定結果との比較を通じて, 得られた成果について議論する.

謝辞: 本研究の一部は, 科研費・基盤 A (22H00304), NEDO 先導研究の援助によって実施された.

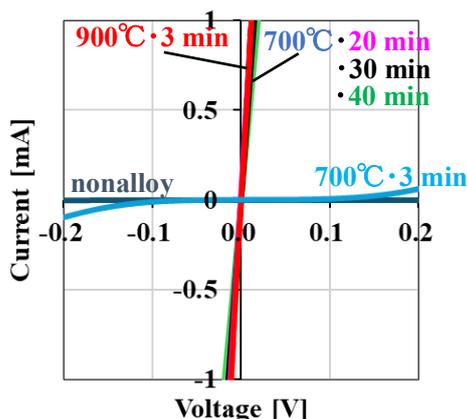


Fig. 1 I-V characteristics of TLM

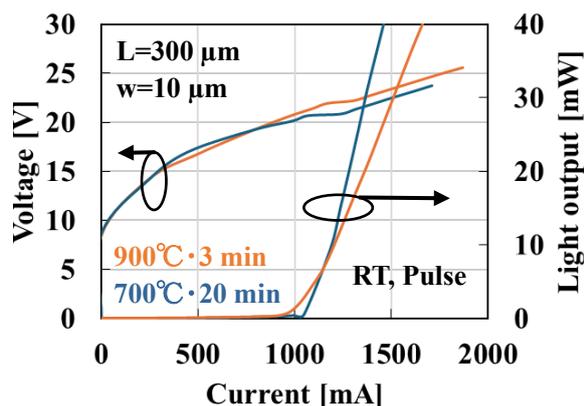


Fig. 2 I-V-L characteristics of UV-B LDs

220-230 nm 発光帯 AlGaIn 量子井戸構造における偏光度の温度依存性

Temperature dependence of polarization degree in AlGaIn-based MQWs
with emission wavelengths of around 220-230 nm山口大院・創成科学¹, 徳山高専², 理研³, 日本タングステン⁴谷海智¹, 落合俊介¹, 村垣勇飛¹, [○]室谷英彰², 倉井聡¹, 岡田成仁¹,M. Ajmal Khan³, 牟田光弘⁴, 祝迫恭⁴, 平山秀樹³, 山田陽一¹Yamaguchi Univ.¹, NIT, Tokuyama Coll.², RIKEN³, Nippon Tungsten Co., Ltd.⁴K. Tani¹, S. Ochiai¹, Y. Muragaki¹, [○]H. Murotani², S. Kurai¹, N. Okada¹,M. Ajmal Khan³, M. Muta⁴, Y. Iwaisako⁴, H. Hirayama³, and Y. Yamada¹

E-mail: murotani@tokuyama.ac.jp

AlGaIn 系量子井戸構造では、格子歪、量子閉じ込め効果、内部電界の影響により、高 Al 組成領域において価電子帯上端のバンドが入れ替わるために、バンド端発光の偏光特性が変化することが確認されている[1]。これまでに我々は、220 nm 帯、240 nm 帯および 260 nm 帯で発光する AlGaIn 系量子井戸構造においてバンド端発光の偏光特性の温度依存性を評価してきた[2]。今回、バンド端発光において *c* 軸偏光が優勢な 220-230 nm 帯で発光する AlGaIn 系量子井戸構造において偏光特性の温度依存性を評価し、その発光波長依存性について検討したので報告する。

測定に用いた試料は、*c* 面サファイア基板上に AlN 層及び n-AlGaIn 層を介し、有機金属化合物気相成長法によって成長された 4 周期の Al_xGa_{1-x}N/Al_yGa_{1-y}N 量子井戸構造である。井戸層幅は 3 nm、障壁層幅は 1 nm であり、最上部は幅 6 nm の障壁層で終端されている。発光ピーク波長が約 225 nm (Sample 225: *x* = 0.86, *y* = 0.94) の試料と約 230 nm (Sample 230: *x* = 0.82, *y* = 0.94) の試料を用いた。バンド端発光の偏光依存性の測定は、試料表面を励起し、端面から PL 光を検出する配置で行った。

図 1 に 10 K および 295 K での (a)Sample 225 および (b)Sample 230 における PL スペクトルの偏光依存性を示す。いずれの試料においても *c* 軸偏光(*E*||*c*)の PL 強度が *c* 面内偏光(*E*⊥*c*)よりも高いことが分かる。図 2 に PL スペクトルの偏光依存性から導出した(a)Sample 225 および (b)Sample 230 における偏光度 $\rho = (I_{\perp} - I_{\parallel}) / (I_{\perp} + I_{\parallel})$ の温度依存性を示す。偏光度は、Sample 225 において 10 K で $\rho = -0.76$ 、295 K で $\rho = -0.40$ 、Sample 230 において 10 K で $\rho = -0.49$ 、295 K で $\rho = -0.17$ と見積もられた。いずれの試料においても偏光度の絶対値は温度上昇に伴い減少していることが分かる。これは、温度上昇に伴う価電子帯間のキャリアあるいは励起子の分布の変化によるものと考えられる。図中の破線はキャリアあるいは励起子の分布がボルツマン分布に従うと仮定したモデル[3]によるフィッティング解析の結果であり、結晶場分裂正孔(ch)バンドと重い正孔(hh)バンドのエネルギー間隔は、Sample 225 で 11 meV、Sample 230 で 6 meV と見積もられた。このことは、Sample 225 の偏光度の絶対値が Sample 230 より大きいことと矛盾しない。

本研究の一部は、JSPS 科研費 JP20K04585 および JP23K03948 の援助を受けて行われた。

[1] R. Banal *et al.*, Phys. Rev. B **79**, 121308(R) (2009). [2] 姫野他, 第 70 回応用物理学会春季学術講演会 17p-B401-11. [3] K. Kojima *et al.*, Phys. Status Solidi C **5**, 3038 (2008).

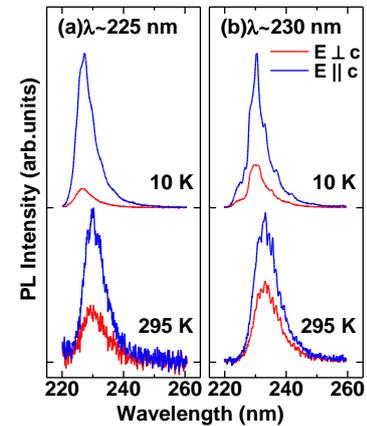


Fig.1. Polarization dependence of PL spectra at 10 and 295 K taken from AlGaIn MQWs with emission wavelengths of about (a) 225 nm and (b) 230 nm.

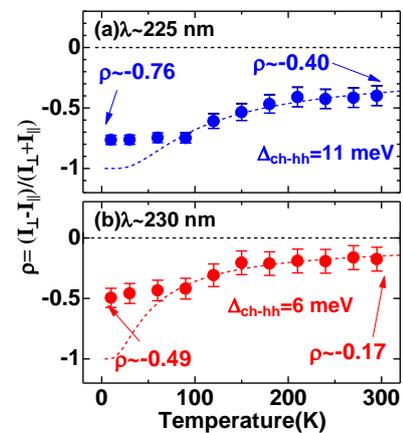


Fig.2. Temperature dependences of polarization degree taken from AlGaIn MQWs with emission wavelengths of about (a) 225 nm and (b) 230 nm.

縦型 UV-B レーザーダイオードにおける支持基板の選定とプロセス工程の最適化 Selection of substrate for vertical UV-B laser diode and optimization of process steps

○(M1)佐々木祐輔¹, 井本圭紀¹, 山田凌矢¹, 齋藤巧夢¹, 三宅倫太郎¹, 丸山竣大¹, 狩野祥吾¹
岩山章¹, 岩谷素顕¹, 竹内哲也¹, 上山智¹, 三宅秀人²

¹名城大・理工,²三重大・院・工

Y. Sasaki¹, Y. Imoto¹, R. Yamada¹, T. Saito¹, R. Miyake¹, S. Maruyama¹, S. Karino¹

S. Iwayama¹, M. Iwaya¹, S. Kamiyama¹, T. Takeuchi¹, H. Miyake²

¹Meijo University, ²Mie University

Email: 200443036@ccmailg.meijo-u.ac.jp

本研究グループは、サファイア基板上に形成した AlN ピラー上に AlGaIn を 3 次元成長させることで、格子緩和した AlGaIn 上での UV-B レーザーダイオード (LD) の室温パルス駆動に成功している。また、前回の応用物理学会では、加熱・加圧水を用いた基板剥離法による縦型 UV-B LD の室温パルス駆動に成功したことを報告した。しかし、詳細なプロセス工程や最適な支持基板の選定など、多くの課題が残されている。本発表では、これらの詳細なプロセス工程や支持基板の選択に関する検討結果を報告する。

本発表では、支持基板の選択について議論する。本グループで作製している AlGaIn LD 構造は、導電性のある n 層を上部に持ち、トータルで 5~6 μm 程度の膜厚である。そのため、支持基板が必要となる。この支持基板は、レーザーのミラー端面を形成することが求められる。本研究では、この要件に基づき、2 種類の支持基板を検証した。一つは単結晶 SiC 基板で、もう一つは多結晶 AlN 焼結基板である。単結晶 SiC 基板は劈開性があり、ミラー端面を形成しやすい利点がある一方で、LD ウェハーと接合する際に AlGaIn の劈開面と SiC のそれが揃わない場合、良好な端面が形成されにくいという懸念がある。一方、多結晶 AlN は粉末の AlN を焼結した基板で、劈開性はないが、比較的どの方向でも割れやすいため、アライメントが不要となる可能性があると考えられる。本実験では、これら 2 つの支持基板を用いて作製した縦型 LD と横型 LD の比較を行った。

作製した LD の室温パルス駆動で評価した J-V-L 特性を Fig. 1 に示す。結果として、SiC 基板、AlN 基板ともに発振を確認した。また、同一ウェハーから作製したにもかかわらず、縦型のほうが横型 LD に比べて閾値電流密度が低い傾向が見られた。さらに、Fig. 2 にミラー端面の SEM 像を示すが、両支持基板を用いても良好な端面が形成されていることが確認された。ただし、ミラーロスの変化によって閾値電流密度の変化を定量的に説明することはできなかった。また、動作電圧の違いを含めたデバイス特性の違いや、支持基板の違いによるプロセス工程の違いについては、当日議論する予定である。

謝辞：本研究の一部は、科研費・基盤 A(No. 22H00304)、NEDO 先導研究の援助により実施した。

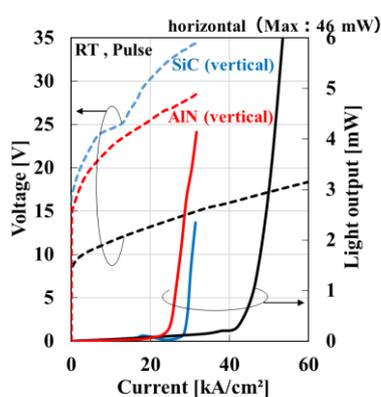
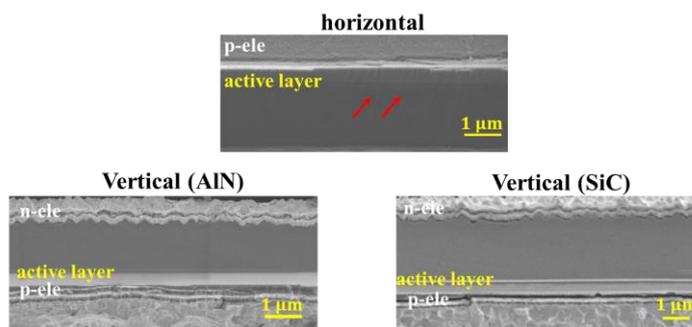


Fig. 1 J-V-L curves



Figs. 2 Cross-sectional SEM images of mirror facets

AlGaN/AIN 歪超格子を有する分極電界誘起第二高調波発生デバイス

Polarization-Field-Induced SHG Device with AlGaN/AIN Strained-Layer Superlattice

阪大院工¹, 阪大 OTRI スピン², 京大院工³, 三重大院工⁴, [○]谷川 智之^{1,2}, Shahzeb Malik^{1,2},
正直 花奈子³, 伊藤 雅晃^{1,2}, 百崎 怜^{1,2}, 本田 啓人^{1,2}, 三宅 秀人⁴, 上向井 正裕^{1,2}, 片山 竜二^{1,2}

Osaka Univ.¹, Kyoto Univ.², Mie Univ.³, [○]T. Tanikawa¹, S. Malik¹, K. Shojiki², M. Ito¹,

R. Momosaki¹, H. Honda¹, H. Miyake³, M. Uemukai¹, R. Katayama¹

E-mail: tanikawa.tomoyuki.eei.eng@osaka-u.ac.jp

AIN は遠紫外光に対する透明性と強い光学非線形性を有し、遠紫外第二高調波発生 (SHG) デバイスに用いることができる。我々はこれまでに AIN 極性反転構造を用いた横型擬位相整合デバイスを提案し、波長 229 nm の遠紫外 SHG を実証してきた[1]。本研究では、極性反転構造が不要な高効率 SHG デバイスの実現に向けて、AlGaN と AIN の分極不連続により生じる分極電界を利用した SHG デバイスを新たに提案・作製し、波長 230 nm の SHG を実証したので報告する。

波長 460 nm の基本波 TM₀₀ モードと波長 230 nm の SH 波 TM₀₂ モードが位相整合する高さ 270 nm、幅 1.2 μm のチャネル導波路に対し、TM₀₂ モードの中央の腹の位置に AlGaN/AIN 歪超格子 (SLS) を配置すると、Fig. 1 に示すように分極電界 E_{Pol} がかかり、極性反転構造と同様に実効的な二次の非線形光学定数が空間変調され、高効率な波長変換が期待できる。

高さ 270 nm の導波路内に AlGaN/AIN SLS を作製するために、スパッタアニール法と有機金属気相成長 (MOVPE) 法を併用した結晶成長を試みた。スパッタ後のアニール温度の最適化によりステップテラス構造を有する原子層レベルで平坦な膜厚 84 nm の AIN 膜が得られ、その上に Al_{0.88}Ga_{0.12}N/AIN (2.1 nm/4.0 nm) SLS および膜厚 115 nm の AIN 膜を MOVPE 成長させることで成長表面の平坦性が維持され、急峻なヘテロ界面を持つ 13 周期の SLS が得られた (Fig. 2)。

Fig. 1 の断面形状をもつチャネル導波路を形成し、波長可変フェムト秒レーザを用いて SHG 実験を行った。基本波波長 460 nm の TM 光を導波路に端面結合したところ、波長 230 nm の SH 波が得られた (Fig. 3)。SH 波強度は基本波パワーの二乗に比例し、二次の非線形光学過程によるものであることを確認した。

謝辞：本研究は科研費 JP22H01970, JP22K14612, JP23H01879, JST FOREST JPMJFR2031, NEDO 先端研究の助成を受けたものです。

[1] H. Honda *et al.*, Appl. Phys. Express **16**, 062006 (2023).

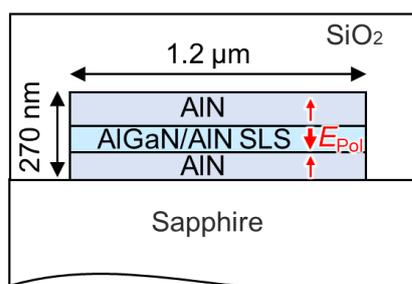


Fig. 1. Schematic of AlGaN/AIN SLS 230 nm SHG waveguide.

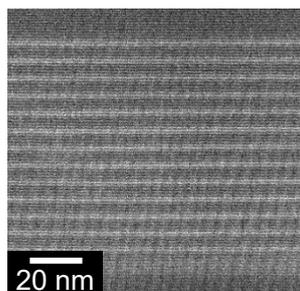


Fig. 2. HAADF-STEM image of AlGaN/AIN SLS.

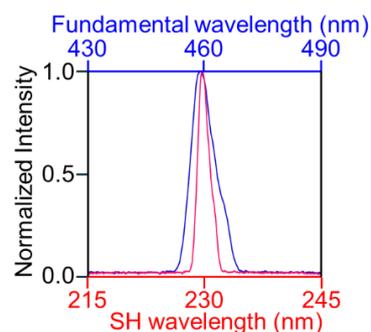


Fig. 3. Spectra of fundamental and second harmonic (SH) waves.

ダブルヘテロ構造を発光層とする 226 nm far-UVC LED の発光効率向上

Improving the luminous efficiency of 226 nm far-UVC LEDs

with a double heterostructure as the light-emitting layer

三重大院工¹, 三重大半デセンター², 三重大研基機構³,

阪大院工⁴, 阪大電顕セ⁵, スタンレー電気⁶

○赤池 良太^{1,2}, 安永 弘樹^{2,3}, 中村 孝夫^{1,2}, 市川 修平^{4,5}, 小島 一信⁴, 土谷 正彦⁶, 三宅 秀人^{1,2}

Mie Univ.^{1,2,3}, Osaka Univ.^{4,5}, Stanley Electric Co.⁶

R. Akaike^{1,2}, H. Yasunaga^{2,3}, T. Nakamura^{1,2}, S. Ichikawa^{4,5}, K. Kojima⁴, M. Tsuchiya⁶, H. Miyake^{1,2}

E-mail: akaike@elec.mie-u.ac.jp

波長 230 nm 以下の far-UVC 光は人体に損傷を与えることなく細菌・ウイルスの不活性化が可能であり、AlGaIn 系 far-UVC LED の高効率化が進められている。外部量子効率(EQE)の要素の 1 つである電流注入効率(CIE)に着目すると、電子ブロック層(EBL)直下のバリア層の構造検討 [1]や 20 周期の多重量子井戸(MQW)の採用[2]などにより CIE が向上し、far-UVC LED の EQE が向上したとの報告がある。我々は、MQW 構造ではなく発光層幅の大きい(≧数 10 nm)ダブルヘテロ構造(DH)の採用により、波長 230 nm の far-UVC LED の EQE 向上を報告してきた[3]。本研究では、波長 226 nm の far-UVC LED について DH 構造と MQW 構造との比較を行った。

c 面サファイア基板の上に膜厚 600 nm の AlN を RF スパッタ法により堆積させて高温アニールを施すことによって AlN テンプレート(FFA Sp-AlN[4])を作製した。続いて有機金属気相成長法により、n 型 Al_{0.88}Ga_{0.12}N、20QWs(バリア 3 nm, 井戸 2 nm)あるいは 100 nm の単層 AlGaIn 発光層、AlN-EBL、graded AlGaIn、p 型 GaN を成長させた。Fig. 1 に、In 電極の on-wafer で測定した far-UVC LED のピーク波長とピーク EQE の関係を示す。波長 232 nm, 226 nm とともに DH 構造 LED のほうが EQE が高く、特に波長 226 nm LED では 2.6 倍である。この結果は、SiLENSe を用いたシミュレーションから CIE 向上の寄与が大きいと考えられる。

[1] M. Jo *et al.*, *Appl. Phys. Lett.* **120**, 211105 (2022).

[2] H. Kobayashi *et al.*, *Appl. Phys. Lett.* **122**, 101103 (2023).

[3] K. Uesugi *et al.*, *Appl. Phys. Express* **17**, 042008 (2024).

[4] H. Miyake *et al.*, *J. Cryst. Growth* **456**, 155 (2016).

【謝辞】本研究の一部は科研費(22H01970)、JST-SICORP (JPMJSC22C1)、NEDO「脱炭素社会実現に向けた省エネルギー技術の研究開発・社会実装促進プログラム」、「官民による若手研究者発掘支援事業」(21502153-0)、先導研究の支援により行われた。

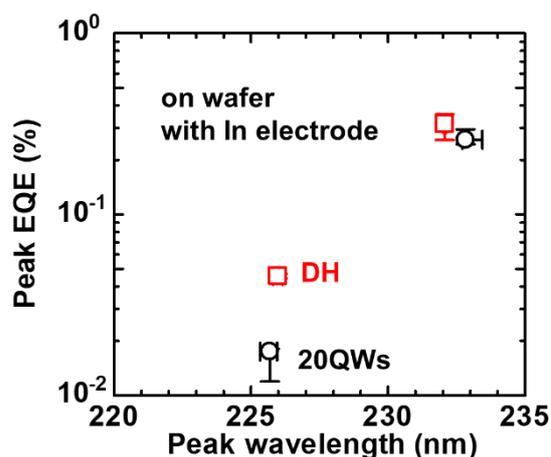


Fig. 1 Relationship between peak wavelength and peak EQE of MQW-based and DH-based far-UVC LEDs.

極薄 GaN 量子井戸を用いた Far-UVC LED の設計と作製

Design and fabrication of Far-UVC LEDs based on ultrathin GaN quantum wells

京大院・工 〇和泉 篤尚, 正直 花奈子, 船戸 充, 川上 養一*

Kyoto Univ. 〇Atsuhisa Izumi, Kanako Shojiki, Mitsuru Funato, Yoichi Kawakami

E-mail: izumi.atsuhisa.38x@st.kyoto-u.ac.jp, *kawakami@kuee.kyoto-u.ac.jp

【背景】波長 240 nm 未満の Far-UVC 光は、人体に無害でありながらウイルスを不活化できることから最近注目を集めている [1]. その光源として、環境にやさしく、小型で、高効率発光が期待できる点で AlGaIn 系 LED が有望であるが、現状では、外部量子効率(EQE)が~1%と低いことが問題となっている. この問題を解決するために分子層レベルで薄い GaN 量子井戸 (QW) の利用が提案されている [2,3]. しかし、LED 設計に関する系統的な検討はまだなされておらず、加えて、極薄 GaN QW を現在の窒化物半導体デバイスの主たる結晶成長法である有機金属気相成長法 (MOVPE) により作製した例は極めて限定的である [4]. 本発表では、極薄 GaN QW をもつ Far-UVC LED について、デバイスシミュレータを用いた設計と、設計に基づいた MOVPE 成長について報告する.

【実験および結果】シミュレーションには SiLENSe を用いた. 図 1 はシミュレーションに用いた構造を示す. ここでは特に $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ 障壁層の Al 組成 x に注目し、それを 1.00, 0.95, 0.90, 0.85 としたときの極薄 GaN/ $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ QW の発光波長とそこへの電流注入効率(CIE)を計算した. その結果を図 2 に示す. 障壁層を $\text{Al}_{0.9}\text{Ga}_{0.1}\text{N}$ としたとき、Far-UVC 領域で発光させつつ、CIE を AlN 障壁の場合の 23%から 76%へと劇的に向上できる可能性があることを見出した. この設計に基づき極薄 GaN/ $\text{Al}_{0.9}\text{Ga}_{0.1}\text{N}$ QW をもった LED(層構造は図 1 とほぼ同じ)を MOVPE 法で試作した. 図 3 は室温 EL スペクトルであり、単峯性の発光が波長 245 nm に観測された. 今後、さらなる短波長化のために構造の最適化を図る. 当日は、シミュレーションと MOVPE 成長の詳細を報告する.

[1] D. Welch *et al.*, *Sci. Rep.* **8**, 2752 (2018). [2] C. Liu *et al.*, *Appl. Phys. Lett.* **112**, 011101 (2018). [3] J. Nicholls *et al.*, *Appl. Phys. Lett.* **123**, 051105 (2023). [4] H. Kobayashi *et al.*, *Adv. Opt. Mater.* **7**, 1900860 (2019).

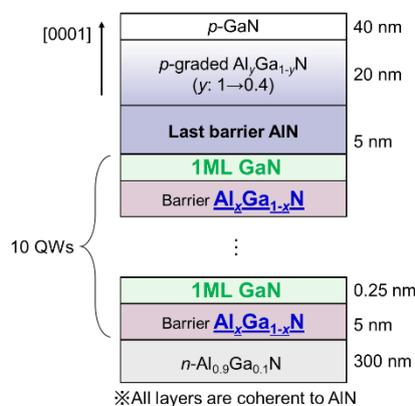


図 1: シミュレーション用の LED 構造

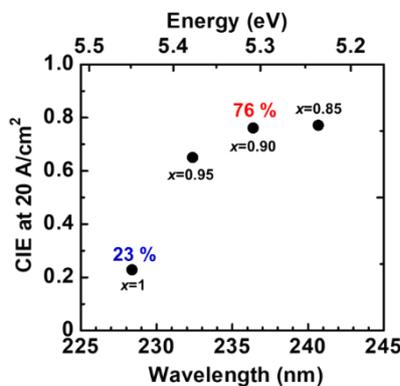


図 2: シミュレーションにより求めた CIE と発光波長の関係

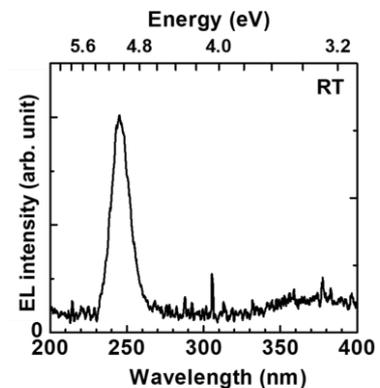


図 3: 試作した LED の室温 EL スペクトル

Optics-free Gbps solar-blind communications by using highly-collimated deep-ultraviolet micro-LED with Fresnel zone plate nano-structures

NICT, Lingjie Wei, Guo-Dong Hao, Manabu Taniguchi, and Shin-ichiro Inoue

E-mail: lj_wei@nict.go.jp, s_inoue@nict.go.jp

Deep-ultraviolet light-emitting diodes (DUV-LEDs) with emission wavelengths ranging from 200 nm to 280 nm could potentially be used as light sources for solar-blind communications. Micro-LEDs offer the advantages of small size, highly-uniform current distribution, and rapid heat dissipation. These features give them low resistor-capacitor (RC) time constants and short carrier lifetimes due to their low capacitance and ability to operate at high current densities. These advantages bring micro-LEDs much higher bandwidth compared to conventional LEDs, which enable them to achieve high-speed communications due to enhanced channel capacity. For practical communication applications, a transmitter with highly-collimated DUV light source is preferred. High-purity quartz lenses are commonly adopted for DUV beam collimation. However, these additional optical components cause high costs and heavy optical burdens. Moreover, a large amount of light is wasted without being collimated due to the small effective aperture of conventional optical lenses, which limits their applications in DUV communications. We have previously demonstrated highly-collimated optics-free DUV micro-LEDs on both sapphire and aluminum nitride (AlN) substrates with Fresnel zone plate (FZP) nano-structures [1, 2]. In this work, we demonstrate an optics-free solar-blind communications using our highly-collimated DUV micro-LEDs. As a result, the data rate was significantly enhanced compared to the conventional flat-surface DUV-LED, achieving Gbps-class communication speed.

In the experiments, a micro-LED with a mesa size of 100 μm was fabricated by standard LED fabrication techniques on a wafer grown on a sapphire substrate. A nickel hard mask was formed on the surface of sapphire substrate (light extraction surface) by high-precision electron-beam lithography and electron-beam evaporation processes. The FZP nanostructures with a diameter of 2000 μm were then fabricated by inductively coupled plasma etching with a gas mixture of $\text{Cl}_2/\text{BCl}_3/\text{Ar}$. The fabricated DUV micro-LED with FZPs was then used as a transmitter to construct a free space optical communication system with DCO-OFDM (direct current optical orthogonal frequency-division multiplexing) protocol without any extra optical components. As a result, a data rate reaching Gbps-class with a very low bit error rate was achieved using the QAM (quadrature amplitude modulation) method. This is the first demonstration of optics-free DUV-LED communications achieving Gbps-class data rate. More details will be presented at the conference.

[1] L. Wei and S. Inoue, *Phys. Status Solidi A* **2024**, 2400081 (2024).

[2] L. Wei, M. Taniguchi, G. D. Hao, and S. Inoue, *J. Phys. D: Appl. Phys.* **57**, 045104 (2023).

AlGaN-Based Deep-Ultraviolet LEDs Achieving 9.1% Wall-Plug Efficiency by Enhanced Light Extraction Efficiency

NICT, Guo-Dong Hao, Manabu Taniguchi, and °Shin-ichiro Inoue

E-mail: s_inoue@nict.go.jp

AlGaN-based deep ultraviolet (DUV) light-emitting diodes (LEDs) have received considerable attention for their eco-friendliness, compact size, low voltage, and long lifetime. With the rapid increase in light output power,¹ DUV-LEDs are now applicable in various applications, such as disinfection and sterilization, water and air purification, UV curing, lithographic microfabrication, and solar-blind communications.^{2,3} However, achieving high wall-plug efficiency (WPE) remains a challenge, with typical values below 5%. One of the primary challenges is the low light extraction efficiency (LEE), which results from total internal reflection at interfaces and significant light absorption by electrode and ohmic contact layers on the p-side. In this talk, we present an approach to enhance the WPE of flip-chip DUV-LEDs by improving the LEE while maintaining high electrical efficiency.

The AlGaN-based DUV-LED wafer used in this study was grown on (0001) sapphire substrate by metal-organic chemical vapor deposition (MOCVD). The DUV-LED structure consists of an AlN layer, an n-AlGaN layer, several $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}/\text{Al}_y\text{Ga}_{1-y}\text{N}$ multiple quantum wells (MQWs), a p-AlGaN electron blocking layer, a p-AlGaN hole injection layer, and a p-GaN ohmic contact layer. The micro-sized mesh-like p-electrode was fabricated on p-GaN surface. The remaining p-GaN within the mesh openings was removed by ICP etching, and an extra HfO_2 layer was deposited on the exposed p-AlGaN layer where the p-GaN had been removed. Nanostructures were then fabricated on the HfO_2 layer. The light was extracted from the sapphire substrate. The light output power of the DUV-LEDs was measured using a calibrated integrating sphere during DC operation at room temperature without external heat management.

The LEE was enhanced by a factor of approximately 1.7 times compared to conventional DUV-LEDs with p-electrode covering the entire mesa. The driving voltage remained as low as 5.0 V at 20 mA, with no obvious degradation. As a result, the WPE reached 9.1% and the EQE was approximately 10.1% after encapsulation for DUV-LEDs emitting at 275 nm. These results represent one of the highest reported WPE values to date. A more detailed analysis will be provided during the conference presentation.

¹ S. Inoue, N. Tamari, and M. Taniguchi, *Appl. Phys. Lett.* **110**, 141106 (2017).

² H. Ueki, M. Ito, Y. Furusawa, S. Yamayoshi, S. Inoue, and Y. Kawaoka, *mSphere* **7**, e00941 (2022).

³ H. Kurosawa, S. Tsuzuki, M. Taniguchi, and S. Inoue, *IEEE Photon. J.* **15**, 7302605 (2023).

Efficiency Analysis of 230 nm far-UVC LED either grown on Bulk AlN or c-Sapphire as a Function of Quantum-well Numbers

¹RIKEN, ²Shin-Etsu Chemical, ³Saitama Univ, ⁴Marubun Corp. [○]M. Sharif Nawaz¹, Kohei Fujimoto^{1,3}, Yuya Nagata^{1,3}, Hiromitsu Sakai², Hiroyuki Yaguchi³, Yukio Kashima⁴, M. Ajmal Khan¹, Hideki Hirayama¹

e-mail: muhammadnawaz.sharif@riken.jp

AlGa_{0.18}N-based 230 nm-band far-ultraviolet-C (far-UVC) light sources can safely be used as a germicidal application in both manned as well as unmanned environments against any viruses and microbes including SARS-CoV-2 and bacteria methicillin-resistant *Staphylococcus aureus* (MRSA) [1]. Previously, the 230 nm far-UVC LED grown on c-sapphire with an emission power of 3 mW and the external quantum efficiency (EQE) of 0.4% on the wafer was reported by our Lab, however, the multi quantum-well (MQWs) was not optimized in the context of relaxation ratios [2]. The low relaxation ratio underneath the MQWs is critical for suppressing transverse magnetic (TM)-mode emission and promoting the transverse electric (TE)-mode emission. Therefore, herein, we conducted a systemic analysis on optimizing QW numbers for 230 nm far-UVC LED while considering various degrees of relaxation and threading dislocation density (TDD), calculated by SiLENSe. The results show that with a relaxation of 35% and TDD of $1 \times 10^9 \text{ cm}^{-2}$ assuming to fabricate the LED on the c-sapphire substrate, the carrier injection efficiency (CIE) increases as the number of QWs increases. In contrast, internal quantum efficiency (IQE) decreases due to a reduction in radiative recombination rate (see Fig. 1(a) and (b)).

For a 0-degree relaxation referred to as pseudomorphic growth with TDD of $1 \times 10^4 \text{ cm}^{-2}$, both CIE and IQE increase as the number of QWs are added due to the higher radiative recombination rate and reduced electron leakage (see Fig. 1(c) and (d)) [3]. Furthermore, when various TDDs corresponding to the degree of relaxation were studied using 8 QWs for structure in Fig. 1a, it was found that as the TDD increases along with the relaxation, the CIE increases while there is a reduction in IQE. This reduction is non-linear and results in higher electron leakage and reduced radiative recombination rate which is attributed to a higher polarization effect and quantum confined stark effect (QCSE).

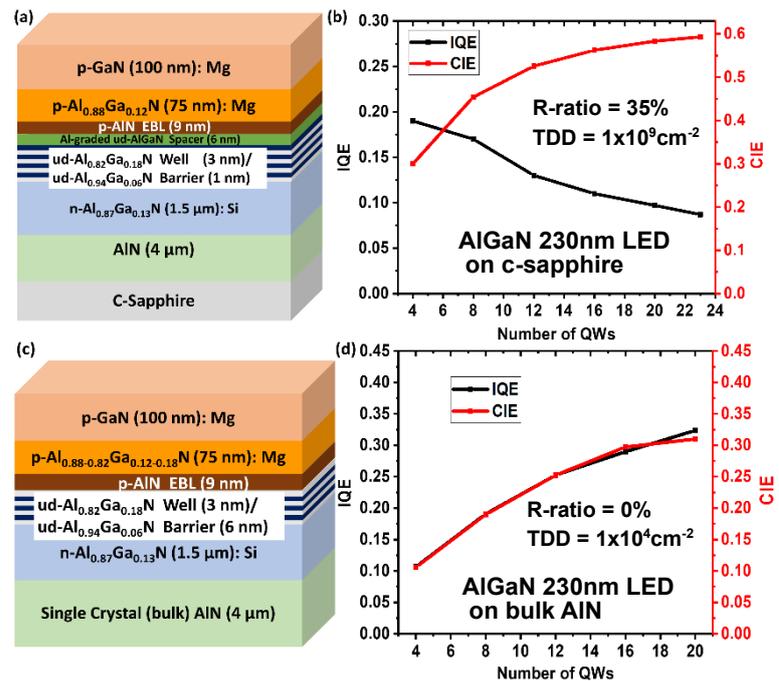


Fig. 1 Schematic structures of 230 nm AlGa_{0.18}N QW far-UVC LEDs ((a) and (c)) and calculated IQE and CIE values as a function of QW number ((b) and (d)) assuming to fabricate on c-sapphire and AlN single-crystal substrates, respectively.

References

- [1] Khan and Hirayama et al. Phys. Status Solidi A, 221, 2400064 (2024).
- [2] Khan and Hirayama et al. 2024 IEEE Photonics Conference (IPC), Rome, Italy, 2024, pp. 1-2.
- [3] Kobayashi et al. Applied Physics Letters, 122(10), (2023).