

# 次世代工業のための半導体レーザー単体による省エネ光ピンセットおよびそのアレイ化技術の創生

三重大学 研究基盤推進機構 半導体・デジタル未来創造センター

濱口 達史

## 1. はじめに

本研究は、近年注目を集める軌道角運動量 (Orbital Angular Momentum: OAM) を有する構造化光 (いわゆる光渦) を、半導体レーザー素子単体により直接発振させることを目的とするものである。対象としたデバイスは、GaN 系材料をベースとする面発光型半導体レーザー (Vertical Cavity Surface Emitting Laser: VCSEL) であり、その光共振器に凹面鏡構造を導入するとともに、凹面状に形成した発光層を組み合わせることで、軌道角運動量を制御可能な新規な共振構造を実現することを目指した。VCSEL は、円形かつ発散角の小さいビーム出力、低電力動作、そして高密度集積適性を兼ね備えた素子として広く研究が進められており、そのさらなる高機能化を図る上で、光渦と呼ばれる構造化光の直接出射を可能とする技術の確立は、次世代光通信、量子情報処理、センシングなど多岐にわたる応用分野において極めて重要な課題であると考えられる。

近年の研究において、凹面鏡を備えた VCSEL における光閉じ込め効果の向上および低しきい値発振の実現が報告されており、青色帯域における室温連続発振の実証もなされている

(Hamaguchi et al., Sci. Rep., 2018)。一方、凹形状の GaN 表面上に InGaN 量子井戸を選択成長させることで、面方位に起因した In 組成の変調が誘起され、同心円状の波長分布を有する多波長発光が可能となることも示されている (Matsuda et al., Phys. Status Solidi RRL, 2024)。本研究ではこれら二つの手法を統合し、円筒対称性を有する光共振場の形成を通じて、構造化光、特に特定次数の Laguerre-Gaussian (LG) モードの選択的発振を実現する新規 VCSEL の構築を試みた。

本研究では、凹面鏡による横方向光閉じ込め特性の改善、凹面状発光層による多波長同時発振の実現、さらに誘電体多層膜 (DBR) による高反射率共振器構造の確立を通じて、従来困難であった構造化光の高効率直接発振を実現するための基礎技術構築を試みた。

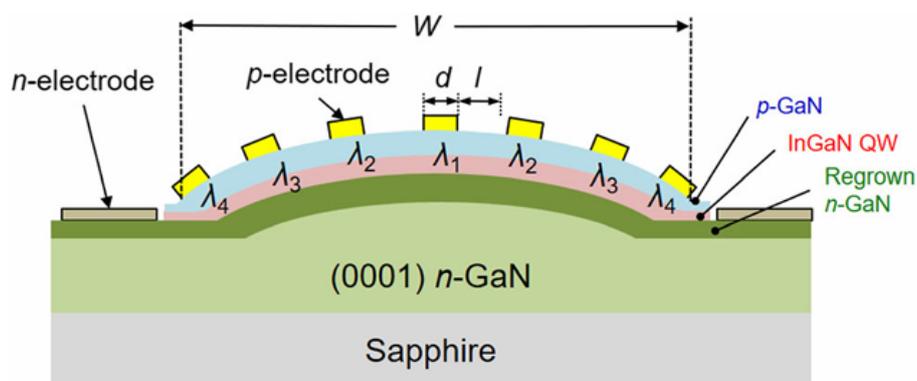


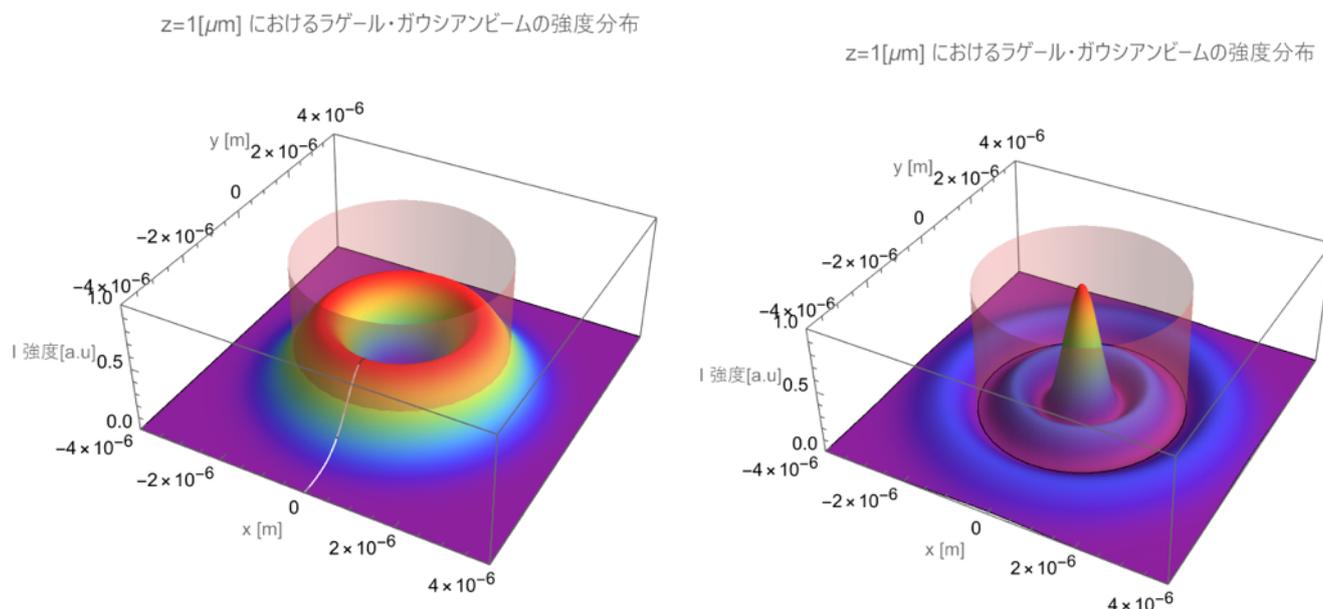
図 1: レンズ状の構造に活性層を成すことで同心円状の波長分布をもった多色発光層が得られる例[2]

## 2. 実験内容と実験結果

### 2.1 共振器設計とモードシミュレーション

本研究においては、共振器構造として一方を凹面鏡、他方を平面鏡とする非対称共振器を採用し、これにより形成される光学モードの空間分布とその安定性を詳細に検討した。特に、本デバイスで実現を目指す Laguerre-Gaussian (LG) モードの発振条件を明確化するため、共振器長 ( $L$ ) および凹面鏡の曲率半径 ( $R$ ) を主要な設計変数とし、構造化光の励起に適したパラメータ領域を数値シミュレーションにより探索した。

得られたシミュレーション結果においては、例えばモード次数  $l = \pm 2$  の LG モードが、共振場内において明瞭なドーナツ状強度分布を示すことが確認された。特に、ビームウエスト位置と活性層との空間的重なりが最大となる設計条件では、選択的に LG モードを励起することが可能であることが明らかとなった。これにより、共振器構造パラメータと光場分布との相関が明確となり、活性層配置の最適化に向けた設計指針が得られ



た。図 2: 種々の条件に対して得られた LG モード光の強度プロファイル例

### 2.2 DBR 設計と形成

反射鏡構造には、可視域の VCSEL で実績のある  $\text{TiO}_2/\text{SiO}_2$  の誘電体多層膜 (Distributed Bragg Reflector: DBR) を採用した。設計に際しては、中心波長  $\lambda_0 = 450 \text{ nm}$  付近における高反射率特性 (反射率  $>99\%$ ) を実現すべく、光学厚さ  $1/4\lambda$  構造に基づく多層設計を行い、膜厚誤差による位相ずれの影響を最小化すべく各層の厚みを  $\pm 1\%$  以内に管理した。

また、この際に円筒形の共振モードを得るためには特定の波長のみを反射させ、増強する必要がある。そこで、反射スペクトル、位相の詳細に立ち入り、 $410\text{nm}$  近辺の波長で良好な共振が得られるように設計を行った。

多層膜設計には光学薄膜設計ソフト「Essential Macleod」を用い、反射率スペクトルとともに位相分布の特性も同時に考慮することで、モード選択性の高い反射特性を実現した。最終設計に基づき、反応性蒸着法を用いて成膜を実施し、基板回転制御および成膜速度調整により面内均一性の向上を図った。

形成は反応性蒸着法により行い、試料面内での膜厚均一性を高めるため、基板回転および成膜速度の最適化を行った。

形成された DBR については、分光反射率測定により、中心波長 450 nm において 99.2% の反射率が確認され、設計値と高い整合性を示した。また、試料面内での反射率ばらつきは±0.5%以下に収まり、成膜工程における再現性と安定性が確保されたことが裏付けられた。

	Thickness[nm]	refractive index	$\alpha$ [cm-1]
pDBR	N/A	N/A	0
Phase Shift layer	46.0	2.545	0
GaN Barrier	13.5	2.506	0
InGaN	1.5	2.734	0
GaN Barrier	13.5	2.506	0
InGaN	1.5	2.734	0
GaN Barrier	13.5	2.506	0
InGaN	1.5	2.734	0
n-GaN	1000.0	2.506	0
nDBR	N/A	N/A	0

図 2: 反射膜として採用した構造の例

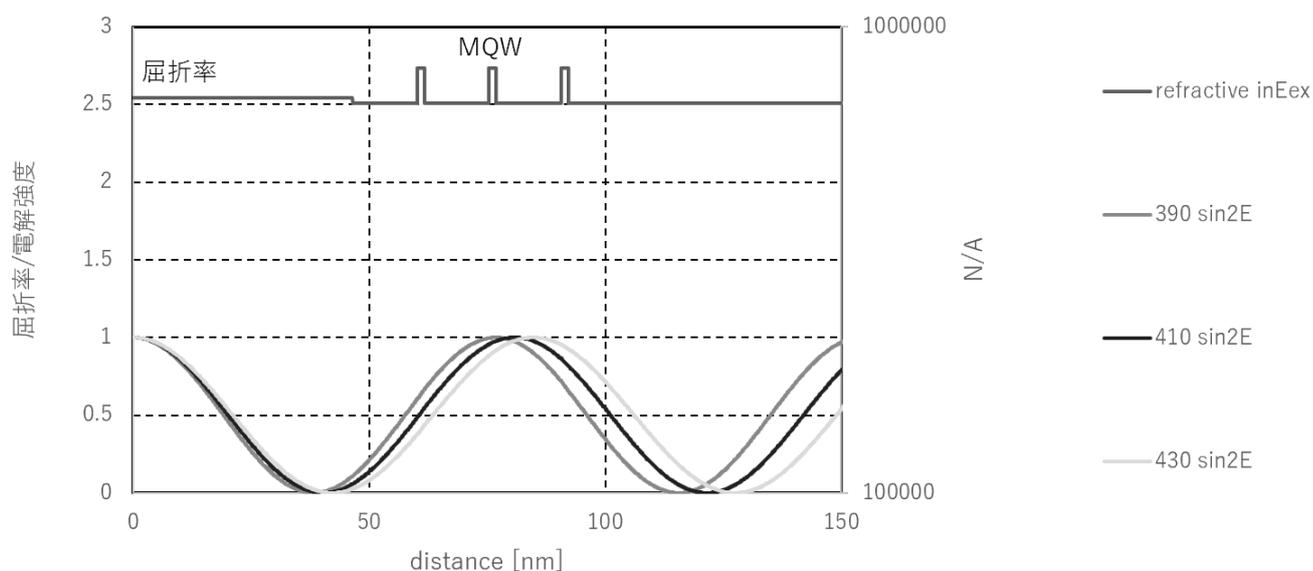


図 3: 反射膜により反射された光の位相と発光層構造の関係

## 2.3 発光層形成

発光層構造には、傾斜面構造を有する凹面状マイクロレンズアレイを(0001)面 GaN 基板上に形成し、当該構造上に有機金属気相成長法 (Metal Organic Vapor Phase Epitaxy: MOVPE) を用いて InGaN 量子井戸 (Quantum Well) 層を選択的に成長させた。凹形状はフォトリソを用いたサーマルリフロー法により形成され、乾式エッチングにより GaN 表面に転写された。本構造においては、凹面内の局所的な結晶方位の傾斜角に起因して In の取り込み効率が位置ごとに変化するため、In 組成の空間分布が自然に導入される。この結果として、単一チップ上において面内で波長分布のある多色発光領域が実現され、光強度・波長に空間依存性を持つ発光層を得ることができた。形成されたマイクロレンズ構造上の InGaN 量子井戸は、傾斜面位置に応じた発光ピーク波長のシフトを示し、位置選択的な多波長発光が可能であることを実証した。可視域で約 60 nm のスペクトル幅を持つ連続分布が得られた。なお、本部分は、共同研究先の京都大学船戸研究室が中心となって実施した。

## 2.4 CMP による基板薄膜化と鏡面化

共振器下部に形成する凹面鏡と相対する平面鏡の前処理工程として、GaN 基板の厚さ制御および表面鏡面化を目的とした化学機械研磨 (Chemical Mechanical Polishing: CMP) を実施した。GaN は硬脆材料であるため、適切な研磨条件の設定が求められた。研磨条件として、荷重、研磨時間、回転速度を系統的に変化させ、研磨量および表面粗さ (RMS) への影響を評価した。CMP 実験では、荷重 300 g、研磨時間 20 分、回転数 80 rpm の条件で、研磨量が最大かつ表面平滑性も良好であった。一方で荷重を過大に設定した場合には、エッジ部の研磨過多や表面荒れが観察された。最適条件で処理を行った基板について、原子間力顕微鏡 (Atomic Force Microscopy: AFM) による面粗さ評価を実施した結果、表面の RMS (Root Mean Square Roughness) は 0.28 nm を示し、光学用途として要求される鏡面基準を十分に満たす高い平滑性が得られた。最適条件においては、膜厚 50  $\mu\text{m}$  以下、表面粗さ 0.3 nm 以下を達成した。なお、本実験で使用した研磨パッド、スラリー、及び膜厚評価用基準サンプル等の備品は、すべて本助成金の支援により調達されたものであり、適切な実験体制の整備に大きく貢献したことを付記する。

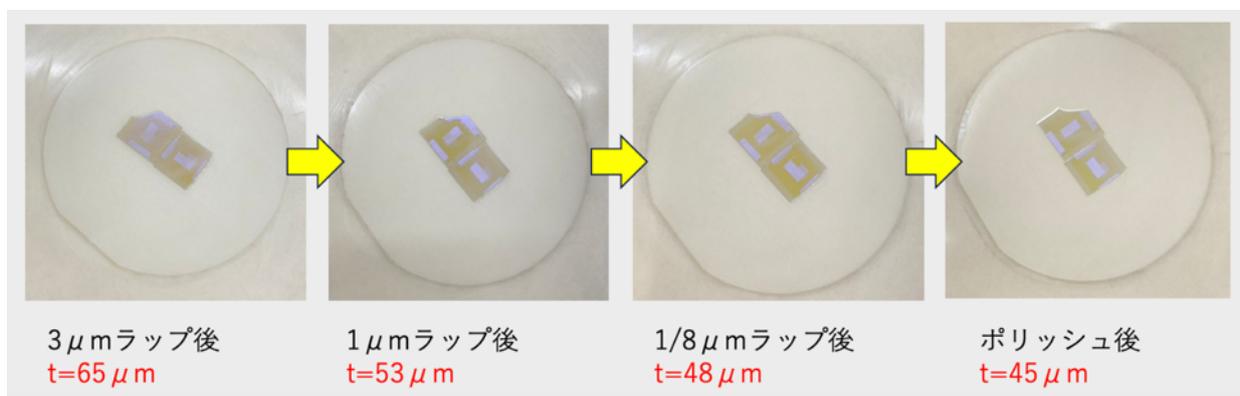


図 4: 50  $\mu\text{m}$  以下まで極薄膜化した本研究のサンプル。顕著な割れは見られなかった。

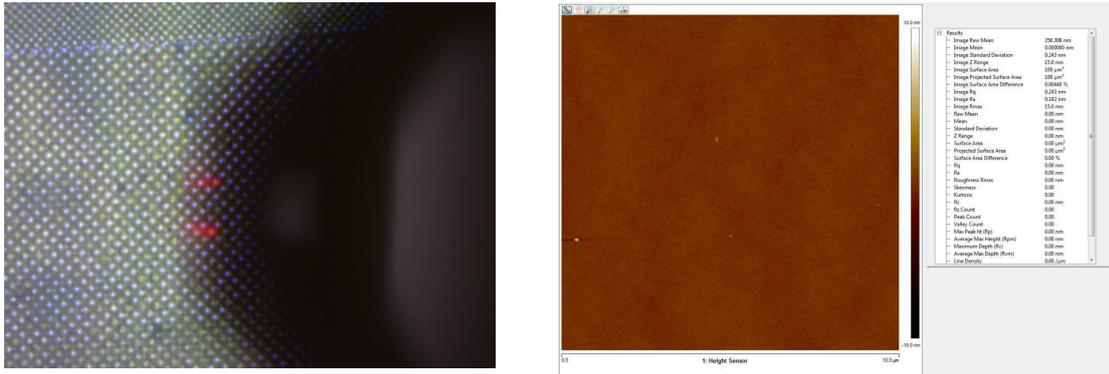


図 5: 研磨後の反射面の AFM 測定結果。RMS0.3nm 以下と極めて高い平滑性を得た

### 3. まとめ

本研究では、GaN 系 VCSEL における構造化光の発振実現を目的とし、凹面鏡・凹面発光層を組み合わせた新たな共振器構造の設計・試作・評価を行った。以下に本研究の成果を要点として整理する。

- 平面-凹面鏡構造を有する共振器において、LG モード ( $l = \pm 2$ ) を安定に共振させることが可能であり、光学モードの空間分布は設計パラメータ (キャビティ長・鏡曲率) により定量的に制御可能であることを示した。
- DBR については、反射波長選択性と高反射率 (>99%) を両立する構造を設計し、分光測定により膜厚精度および位相特性二必要なレベルの再現性が検証された。
- 凹面鏡形成に先立つ GaN 基板の研磨処理では、 $50 \mu\text{m}$  以下への薄膜化と  $\text{RMS} < 0.3 \text{ nm}$  の高平滑性を達成し、光学品質に十分適した鏡面基板を得た。

本研究を通して、狙い通りの設計を有する VCSEL 共振器を得ることができた。当初の計画どおり、これを光励起試験にかけ、どのような発振挙動を示すかの調査を行っているところである。発振すれば非常に大きな一歩、成果であり、論文化などを進めていきたいと考えている

## 謝辞

本研究を遂行するにあたり、三重大学の研究基盤推進機構、社会連携チーム、工学研究科など、多方面より多大なご支援を頂きました。特に、一緒に本研究を推進した大西一生助教、学生の皆様の、献身的な努力に深く感謝を申し上げます。また、名古屋大学未来材料・システム研究所の皆様には装置借用など、多大なご協力を賜りました。京都大学船戸研究室の皆様には、共同研究のために多大なるご支援とご協力を頂戴しました。多くの企業の方や関係者のみなさま、ご協力を頂戴いたしました。ここに記して謝意を示します。

また、なによりも、本研究を支えてくださった、天野工業技術研究所の皆様、本助成を執行くださいました財団の関係者のみなさまに、深く感謝を申し上げます。

## 参考文献

- 1) T. Hamaguchi et al., “Lateral optical confinement of GaN-based VCSEL using an atomically smooth monolithic curved mirror”, *Sci. Rep.* **8**, 10350 (2018).
- 2) Y. Matsuda, H. Miyawaki, M. Funato, and Y. Kawakami, *Phys. Status Solidi RRL* **18**, 2400094 (2024).