

## 目次

|                                             |    |
|---------------------------------------------|----|
| 第 1 章 序論 .....                              | 3  |
| 1-1. 本研究の背景 .....                           | 3  |
| 1-2. III 族窒化物半導体の特徴および歴史 .....              | 5  |
| 1-3. 面発光レーザの特徴 .....                        | 8  |
| 1-4. 窒化物半導体面発光レーザの現状と課題 .....               | 10 |
| 1-5. 本研究の目的および構成 .....                      | 15 |
| 参考文献 .....                                  | 17 |
| 第 2 章 面発光レーザ設計に必要な理論モデル .....               | 21 |
| 2-1. はじめに .....                             | 21 |
| 2-2. 発振条件 .....                             | 21 |
| 2-3. 実効共振器長 .....                           | 24 |
| 2-4. 光閉じ込め係数 .....                          | 26 |
| 2-5. 閾値電流 .....                             | 28 |
| 2-6. 外部微分量子効率と光出力 .....                     | 31 |
| 2-7. 層厚の作製誤差と閾値電流の関係および高出力化に向けた反射率の選択 ..... | 35 |
| 2-8. モード利得と閾値電流 .....                       | 39 |
| 2-9. 窒化物半導体面発光レーザのデチューニング .....             | 41 |
| 2-10. まとめ .....                             | 47 |
| 参考文献 .....                                  | 48 |
| 第 3 章 窒化物半導体面発光レーザの設計と作製 .....              | 50 |
| 3-1. はじめに .....                             | 50 |
| 3-2 窒化物半導体面発光レーザ構造 .....                    | 50 |
| 3-3. イントラキャビティ構造を有する窒化物半導体面発光レーザの作製 .....   | 54 |
| 3-3-1. p-GaN 活性化アニール .....                  | 54 |
| 3-3-2. 素子分離(n-GaN 露出) .....                 | 55 |
| 3-3-3. 絶縁層蒸着 .....                          | 57 |
| 3-3-4. 電流狭窄構造の形成 .....                      | 58 |
| 3-3-5. n 電極および PAD 電極の形成 .....              | 59 |
| 3-3-6. スペーサ層および上部誘電体 DBR 蒸着 .....           | 60 |
| 3-4. デバイス特性 .....                           | 62 |
| 3-5. まとめ .....                              | 68 |
| 参考文献 .....                                  | 69 |
| 第 4 章 周期利得活性層を有する窒化物半導体面発光レーザ .....         | 70 |

|                                     |     |
|-------------------------------------|-----|
| 4-1. はじめに .....                     | 70  |
| 4-2. 活性層配置の異なる発光ダイオード .....         | 71  |
| 4-3. EL スペクトル特性およびキャリア輸送 .....      | 73  |
| 4-4. 均一なキャリア分布の見積もり .....           | 80  |
| 4-5. 周期利得構造を有する窒化物半導体面発光レーザ構造 ..... | 85  |
| 4-6. デバイス特性 .....                   | 86  |
| 4-7. 閾値電流の理論結果との相関 .....            | 88  |
| 4-8. まとめ .....                      | 90  |
| 参考文献 .....                          | 92  |
| 第5章 高出力高温動作に向けた検討 .....             | 93  |
| 5-1. はじめに .....                     | 93  |
| 5-2. 窒化物半導体面発光レーザのデチューニング構造 .....   | 93  |
| 5-3. デバイス特性 .....                   | 94  |
| 5-4. 素子温度の見積もり .....                | 97  |
| 5-5. まとめ .....                      | 99  |
| 参考文献 .....                          | 101 |
| 第6章 総括 .....                        | 102 |
| 謝辞 .....                            | 106 |

## 第1章 序論

### 1-1. 本研究の背景

窒化物半導体による青色発光ダイオード(Light-Emitting Diode : LED)が実現されたことにより<sup>1)</sup>、光の三原色である赤色、緑色、青色が揃い、白色光の LED が得られるようになった。LED は、小型・軽量・長寿命・優れた視認性等の特徴を有する。特に青色 LED は、一般照明、フルカラーディスプレイ、歯科医療等の医療機器といった照明・映像・医療分野等、様々な場面で広く用いられている。青色半導体レーザも青色 LED の実現により、高密度 DVD ディスクプレーヤ(Blu-ray)の主要部品として市場に登場した。現在も、レーザ照明、レーザディスプレイ、可視光通信等への応用に向けて、研究開発と商品化が活発となっている。

近年では、窒化物半導体 LED を用いた自動車のヘッドライトが普及しつつある。視認性に優れたヘッドライトは、事故防止に向けた、夜間における歩行者や障害物の素早い発見に必須である。一方で、ヘッドライトのように高出力を必要とするアプリケーションでは、LED を高い電流密度で駆動し、素子あたりの発光量を増大させる必要がある。しかしながら、そのような高電流密度では、その発光効率が減少してしまう現象、いわゆる効率ドループという課題が存在する<sup>2)</sup>。これは、窒化物半導体 LED 特有の現象であり、高出力 LED を実現する上で大きな課題となっている。効率ドループが報告されて以来、10 年以上にわたってその原因が探求されているが、活性層からのキャリアオーバーフロー<sup>3)</sup>や注入キャリア濃度が高くなると非発光オージェ再結合が支配的になる<sup>4)</sup>という、バンド構造に起因する本質的な課題と言われており、根本的な解決は難しいとされている。一方で、この解決策の一つとして、LED による自然放出機構から離れ、半導体レーザによる誘導放出機構を利用するアプローチが提案された<sup>5)</sup>。半導体レーザでは、発振に至れば活性層内の電子・正孔濃度は固定され、それ以上はオージェ再結合が増加せず、高い電流密度でも高効率が期待できる。さらに、ビームの直進性も相まって、近年欧米では、高効率なレーザヘッドライトの搭載が試みられつつある。

また、一般的にヘッドライトをハイビームで使用すると、対向車のドライバ

一は眩惑され、運転の安全性に支障を来す。この問題の解決策として、光の照射領域を部分選択可能なアダプティブヘッドライトが提案され、実用化され始めている<sup>6)</sup>。アダプティブヘッドライトは、集積化された各素子の個別駆動を必要とすることから、小型かつ高出力な光源が必要となる。しかし、現在ではこの個別駆動光源に適用可能なデバイスは LED のみであり、将来的には高効率で小型かつ高出力な光源の利用が望まれる。その候補の一つとして、面発光レーザが挙げられる。面発光レーザは半導体レーザの一種であり、従来の LED や一般的な端面発光レーザと比べ、素子サイズが 1/100 程度の大きさである。そのため、高密度二次元集積化かつその個別駆動により、前方の状況に応じた、照射選択可能な高効率で安全な光源として機能する。

一方、映像の分野では、網膜走査型ディスプレイに面発光レーザの利用が期待されている<sup>7)</sup>。網膜走査型ディスプレイは、網膜が必要とする nW 程度の微弱な出力のレーザ光を網膜に直接照射し、高速走査による残像現象によって、映像として認識できる。レーザ光に加えて、空間からの光も網膜に照射されるため、実際の視野に加えて、ディスプレイによる仮想映像が重ねて表示可能という新しい特徴を有する。さらに、仮想映像は大画面かつ 3 次元表示も可能で、機密性に優れる、といった特徴も有する。面発光レーザを使用すれば、その微小出力のコヒーレント光による超小型光学系が構築でき、眼鏡などのフレーム内にも収納可能になる。すなわち、外観上は一般的な眼鏡と大差ないスマートグラスが実現可能である。

さらに、半導体レーザを用いた高速可視光通信システムも提案されている<sup>8)</sup>。病院内や航空機内など、通信電波の利用が制限されている場所では、有線ケーブルや USB メモリ等を用いる必要がある。有線ケーブルは、配線の扱いなどの煩雑さがあり、USB メモリは、データの持ち出しおよび紛失といった機密性に懸念がある。さらに、データ容量の大きな動画などの画像データを送受信するには高速変調が必要となる。こうした用途に使用可能な無線通信方式として、人間が視覚的に到達範囲を認識できる可視光通信に注目が集まっている。ここでも、理論的に低閾値動作かつ高速変調が可能な面発光レーザを用いれば、高速可視光通信が可能となろう。

以上、面発光レーザは照明・映像・通信分野の次世代光源として大いに期待されている。さらに、上述した各分野が融合することによる新しい応用展開も

視野に入る。しかしながら、赤色面発光レーザは実用化されているものの、青色および緑色面発光レーザは研究段階にとどまっている。窒化物半導体面発光レーザが実現されれば、上述した各分野やそれらの融合分野にて活躍する次世代光源となり、安心・安全かつ次世代情報化社会が実現すると期待される。そのためには、窒化物半導体材料の優れたポテンシャルを十分に引き出すことが求められる。

## 1-2. III 族窒化物半導体の特徴および歴史

III 族窒化物半導体は、窒化アルミニウム( $\text{AlN}$ )、窒化ガリウム( $\text{GaN}$ )、窒化インジウム( $\text{InN}$ )といった化合物半導体とそれらの混晶材料の総称である。表 1-1 に室温における主な半導体の物性値の比較を示す<sup>9-17)</sup>。III 族窒化物半導体の室温・大気圧下で安定な結晶構造は、ウルツ鉱型であり、直接遷移型のエネルギーバンド構造をもつ<sup>18)</sup>。図 1-1 に示すように、 $\text{AlN}$ ,  $\text{GaN}$ ,  $\text{InN}$  のバンドギャップエネルギーは、それぞれ  $6.20 \text{ eV}$ <sup>12)</sup>、 $3.39 \text{ eV}$ <sup>13)</sup>、 $0.65\text{-}0.90 \text{ eV}$ <sup>14,15)</sup>であり、組成を変化させることで、深紫外から赤外領域まで幅広い波長帯をカバーすることが出来る。また、III 族窒化物半導体は、物理的に強固、化学的に安定、熱伝導率が比較的大きいなどの特徴を持つため、苛酷な環境、条件下での動作も可能である。さらに、ヒ素( $\text{As}$ )やリン( $\text{P}$ )などの有毒物質が用いられていないため、人体への影響や環境負荷が低く、安全・安心の材料としても優れた材料である。

現在の青色 LED の構成材料である  $\text{GaN}$  単結晶成長が初めて報告されたのは 1969 年<sup>19)</sup>、同材料を用いた青色 LED が報告されたのは 1971 年である<sup>20)</sup>。その後、 $\text{GaN}$  の基礎物性が徐々に明らかにされたが、実用化研究には進展しなかった。III 族窒化物半導体の実用化研究が進展しなかった大きな理由は、融液からのバルク単結晶の育成の困難さが原因である。 $\text{GaN}$  は窒素の解離圧が  $45000 \text{ Pa}$ <sup>21)</sup>、融点は  $2500^\circ\text{C}$ <sup>22)</sup>と言われており、単結晶の作製は非常に困難であった。そのため、最初の  $\text{GaN}$  単結晶成長の報告は、異種基板であるサファイア基板上に作製され、成長法は水素化物気相成長(Hydride Vapor Phase Epitaxy : HVPE)法であった。格子不整合の大きなヘテロエピタキシャルが原因で、得られた  $\text{GaN}$  結晶は膨大な転位密度や残留不純物が存在し、高性能なデバイス作製は困難であった。

多くの研究機関が III 族窒化物半導体の研究から撤退する中、1986 年に Akasaki、Anano らは、低温堆積緩衝層技術の開発により高品質 GaN 薄膜を実現した<sup>23)</sup>。これは、有機金属化合物気相成長(Metalorganic Vapor-Phase Epitaxy : MOVPE)法を用いて、サファイア基板上に低温(~500°C)で 50 nm 以下の薄い AlN 層を緩衝層として堆積し、その後 1000°C 以上で GaN を成長させる技術である。これにより、結晶品質、光学的特性、電気的特性が格段に向上した。さらに Amano、Akasaki らは、1989 年に Mg をドーピングした GaN に、低加速電子照射による水素脱離によって Mg アクセプタが活性化し、p 型化することを明らかにした<sup>1)</sup>。1990 年には、n 型の不純物としてシリコン(Si)をドーピングすることで、良好な n 型伝導度が制御可能となった<sup>24)</sup>。その結果、世界で初めて pn 接合を有する青色 LED が完成した<sup>25)</sup>。その後、Nakamura らは窒素雰囲気中で熱処理を施すことにより p 型化を実現し<sup>26)</sup>、窒化アルミニウム・ガリウム/窒化ガリウム・インジウム (AlGaIn/GaInN)ダブルヘテロ構造により高効率青色 LED の実現した<sup>27)</sup>。そして、Amano、Akasaki らは、GaInN/GaN 量子井戸を用いた電流注入による誘導放出<sup>28)</sup>を実現し、Nakamura らは青色レーザダイオードの室温連続発振を達成した<sup>29)</sup>。

上述した、Akasaki、Amano、Nakamura による窒化物半導体青色 LED の発明対し、2014 年にノーベル物理学賞が贈与されたことは記憶に新しい。

表 1-1 主な半導体の物性値<sup>9-17)</sup>

| 材料                               | GaN                | AlN                | InN               | GaAs   | Si     |
|----------------------------------|--------------------|--------------------|-------------------|--------|--------|
| 結晶構造                             | ウルツ鉱               | ウルツ鉱               | ウルツ鉱              | 閃亜鉛鉱   | ダイヤモンド |
| バンド構造                            | 直接遷移               | 直接遷移               | 直接遷移              | 直接遷移   | 間接遷移   |
| バンドギャップ<br>[eV]                  | 3.39               | 6.2                | 0.65~0.90         | 1.42   | 1.12   |
| 格子定数 [Å]                         | a=3.819<br>c=5.185 | a=3.112<br>c=4.982 | a=3.548<br>c=5.76 | 5.6533 | 5.4301 |
| 電子移動度<br>[cm <sup>2</sup> /Vs]   | 400                | 300                | -                 | 8000   | 1450   |
| 正孔移動度<br>[cm <sup>2</sup> /Vs]   | 10                 | 14                 | -                 | 400    | 500    |
| 絶縁破壊電界<br>[MV/cm]                | 3.3                | -                  | 2.0               | 0.4    | 0.3    |
| 熱伝導率<br>[W/cmK]                  | 2.1                | 2.9                | 0.8               | 0.5    | 1.5    |
| 飽和電子速度<br>[10 <sup>7</sup> cm/s] | 2.5                | 2.0                | 4.2               | 2.0    | 1.0    |

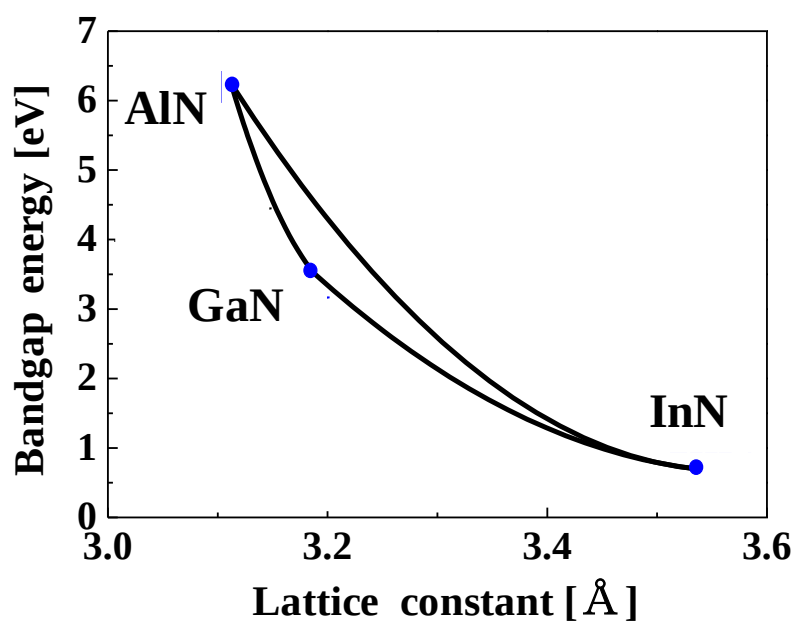


図 1-1 III 族窒化物半導体の a 軸格子定数とバンドギャップエネルギーの関係

### 1-3. 面発光レーザーの特徴

以下、本論文で取り扱う面発光レーザーについて説明する。半導体レーザーとは、一般的に端面発光レーザーを指し、半導体基板の両端面に劈開面による二枚の反射鏡があり、基板表面に対して平行方向にレーザー共振器を形成している。それに対し、面発光レーザーは、基板表面に対して垂直にレーザー共振器を形成させた半導体レーザーであり、垂直共振器型面発光レーザーとも呼ばれる。図 1-2(a)、(b) にそれぞれ端面発光レーザーと面発光レーザーの模式図を示す。

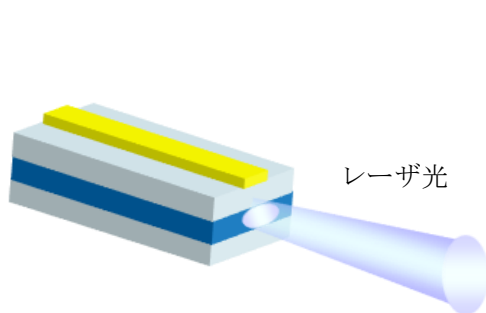


図 1-2(a) 端面発光レーザーの概略図

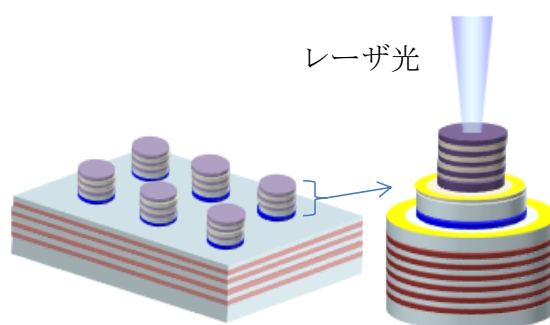


図 1-2 (b) 面発光レーザーの概略図

面発光レーザーには、従来の端面発光レーザーに比べ、以下のような優れた特性がある。

- (1) 低閾値電流、かつ低消費電力での動作。
- (2) 共振器形成のための劈開が不必要。
- (3) チップ化の前に素子特性の評価が可能。
- (4) 短共振器長構造のため単一縦モード動作が可能。
- (5) 10Gbit/s 程度の高速直接変調が可能。
- (6) 高密度 2 次元集積化が可能。

以上のように、面発光レーザーは端面発光レーザーに比べて省エネルギーかつ大量生産が可能等、多くの優れた特徴がある。一方で、以下に挙げるような問題点もある。

- (7) 共振器作製の際に、高精度な膜厚制御が必要。
- (8) 単一モードでは低光出力。

(7)は面発光レーザがレーザとして単一波長での発振および高い発光効率を得るためには、組成の揺らぎを抑え、さらに各膜厚の誤差を1%程度以内に制御する必要がある。反射鏡の反射波長と共振器の膜厚による共振波長、さらに活性層の利得波長を一致させないと、閾値電流の増加や発光効率の低下を引き起こし、レーザとしての特性を著しく低下させてしてしまう。また、面発光レーザの活性層は、光強度定在波分布において腹の位置に設けることで、光定在波と活性層との結合効率を増加させ、光閉じ込め係数の増加を促し、閾値電流を効果的に低減させる。そのためには共振器内の適切な位置に活性層を配置する必要がある。ゆえに、各膜厚の誤差を1%以内の高精度な膜厚制御技術が必要であり、そのためには、膜厚変化の要因となる、基板の温度や成長原料の供給量の不均一、さらには結晶成長ごとのサセプタの状態の変化なども考慮して制御する必要がある。(8)は、短共振器のために活性層の体積が小さいことが原因となっている。単一モードで高光出力を得るためには、大口径かつ横モード制御した構造<sup>30)</sup>が必要となるが、一般的にその両立は困難である。

この面発光レーザは、プレーナ技術で一括生産でき、かつ高密度な集積化を可能とする新しい半導体レーザとして、1977年に Iga らによって提案された<sup>31)</sup>。そして、1979年に温度77Kパルス動作で、初めて電流注入による面発光レーザのレーザ動作が確認された<sup>32)</sup>。反射率90%程度の金薄膜を上下反射鏡とした共振器を形成し、波長1.3  $\mu\text{m}$  帯の砒化リン化ガリウム・インジウム/リン化インジウム(GaInAsP/InP)系が用いられており、閾値電流は700 mAであった。その後、ヒ化ガリウム(GaAs)基板上に誘電体の多層膜を積層させた分布ブラッグ反射鏡(Distributed Bragg Reflector : DBR)を用いた面発光レーザにおいて室温連続動作が確認された<sup>33)</sup>。しかしながら、レーザ特性において端面発光レーザに対する大きな優位性を示すまでには至らなかった。

ところが、1989年に Jewell らが分子線エピタキシャル成長(Molecular Beam Epitaxy : MBE)法やMOVPE法を用いて、反射率99.9%程度の半導体DBRを実現した<sup>34)</sup>。この結果、結晶成長のみで構成される面発光レーザが誕生し、波長帯980 nm 帯において室温連続動作で、閾値電流1.2 mAを達成した<sup>35)</sup>。その後、ヒ化アルミニウム(AlAs)層へのカーボンドーピングによるp型DBRが実現し<sup>36)</sup>、電力変換効率が端面発光レーザと比較して遜色ない値が達成された<sup>37)</sup>。更に、

1994 年に選択酸化法<sup>38)</sup>による電流狭窄構造を用いた面発光レーザが報告され<sup>39)</sup>、発振モードの制御性および長期動作の信頼性が飛躍的に向上した。これは、AlAs 層を横方向から水蒸気で酸化させ、絶縁物にする手法を面発光レーザに導入したものである。選択酸化法が報告されるまでは、プロトン注入による電流狭窄構造が主流となっており、利得導波構造となっていた。選択酸化法では、形成されたアルミナ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ )が絶縁層となって電流狭窄構造を形成すると同時に、屈折率も小さくなって、屈折率導波構造が形成されることにより、上述した飛躍的な向上につながった。

その後、電力変換効率が波長 980 nm 帯で 50%<sup>39)</sup>、850 nm 帯でも 57%<sup>40)</sup>が達成され、高効率デバイスとして認知されるようになった。その他、マイクロアンペアの閾値電流の達成<sup>41-43)</sup>、多モード動作および二次元集積化による高出力化も報告されてきた<sup>44,45)</sup>。上述した技術的発展を重ねて、現在では赤色や近赤外面発光レーザがプラスチック光ファイバやプリンタ用の光源として実用化されている。

一方、窒化物半導体面発光レーザは、1996 年に上下 AlGaIn DBR を用いた、室温での光励起による 360 nm 帯のレーザ発振が初めて確認された<sup>46)</sup>。可視光領域では、2007 年に光励起による 420 nm 帯の発振が報告されている<sup>47)</sup>。翌年の 2008 年に、Lu らが比較的低転位密度である AlN/GaN 半導体 DBR を用いた温度 77K での連続動作<sup>48)</sup>、Higuchi らが上下誘電体 DBR を用いて、室温連続動作を実現した<sup>49)</sup>。その後、2012 年に Gonschorek らは、下部 DBR に GaN と格子整合する窒化アルミニウム・インジウム( $\text{AlInN}$ )を採用することで、本質的に高品質結晶のみで構成される窒化物半導体面発光レーザの可能性を示した<sup>50)</sup>。

#### 1-4. 窒化物半導体面発光レーザの現状と課題

現在、窒化物半導体面発光レーザの電流注入による発振報告は世界で 8 機関のみである。室温連続発振報告もされつつあるが、光出力や効率が低い。表 1-2、1-3 に他研究機関における面発光レーザ構造と特性結果をそれぞれ示す<sup>51-57)</sup>。

表 1-2 他研究機関の面発光レーザー構造<sup>51-57)</sup>

|                              | National Chiao Tung University (NCTU) <sup>51)</sup>     | Nichia <sup>52)</sup>                                      | Panasonic <sup>53)</sup>           | University of California Santa Barbara (UCSB) <sup>54)</sup> | Ecole Polytechnique Federale de Lausanne (EPFL) <sup>55)</sup> | Xiamen University <sup>56)</sup>             | SONY <sup>57)</sup>                                        |
|------------------------------|----------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------|------------------------------------|--------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------|----------------------------------------------|------------------------------------------------------------|
| 上部 DBR                       | 10 pair Ta <sub>2</sub> O <sub>5</sub> /SiO <sub>2</sub> | 7 pair Nb <sub>2</sub> O <sub>5</sub> /SiO <sub>2</sub>    | ZrO <sub>2</sub> /SiO <sub>2</sub> | 13 pair Ta <sub>2</sub> O <sub>5</sub> /SiO <sub>2</sub>     | 7 pair TiO <sub>2</sub> /SiO <sub>2</sub>                      | 14 pair ZrO <sub>2</sub> /SiO <sub>2</sub>   | 11.5 pair Ta <sub>2</sub> O <sub>5</sub> /SiO <sub>2</sub> |
| 電流狭窄構造                       | ITO/SiN <sub>x</sub>                                     | ITO/SiO <sub>2</sub>                                       | ITO/SiO <sub>2</sub>               | Tunnel junction                                              | ITO/p-GaN プラズマ活性化                                              | ITO/SiO <sub>2</sub>                         | Boron implantation                                         |
| 開口径                          | 10 μm                                                    | 8 μm                                                       | 20 μm                              | 7 μm                                                         | 8 μm                                                           | 10 μm                                        | 8 μm                                                       |
| 活性層 (GaInN QWs/GaN barriers) | 2.5 nm/7.5 nm 10QWs                                      | 5QWs                                                       | -                                  | 7 nm/5 nm 5QWs                                               | 5 nm/5 nm 5QWs                                                 | 4 nm/4 nm 5QWs                               | 4 QWs                                                      |
| 下部 DBR                       | 25 pair AlN/GaN                                          | 11.5 pair Nb <sub>2</sub> O <sub>5</sub> /SiO <sub>2</sub> | SiO <sub>2</sub> /ZrO <sub>2</sub> | 16 pair SiO <sub>2</sub> /Ta <sub>2</sub> O <sub>5</sub>     | 41.5 pair Al <sub>0.8</sub> In <sub>0.2</sub> N/GaN            | 17.5 pair SiO <sub>2</sub> /ZrO <sub>2</sub> | 14.5 pair SiO <sub>2</sub> /SiN <sub>x</sub>               |
| 共振器長                         | 7λ                                                       | 7λ                                                         | 35λ                                | 7λ                                                           | 7λ                                                             | 13λ                                          | ~20λ                                                       |
| 基板材料                         | Sapphire                                                 | GaN                                                        | GaN                                | m-plane GaN                                                  | GaN                                                            | Sappaire                                     | GaN                                                        |

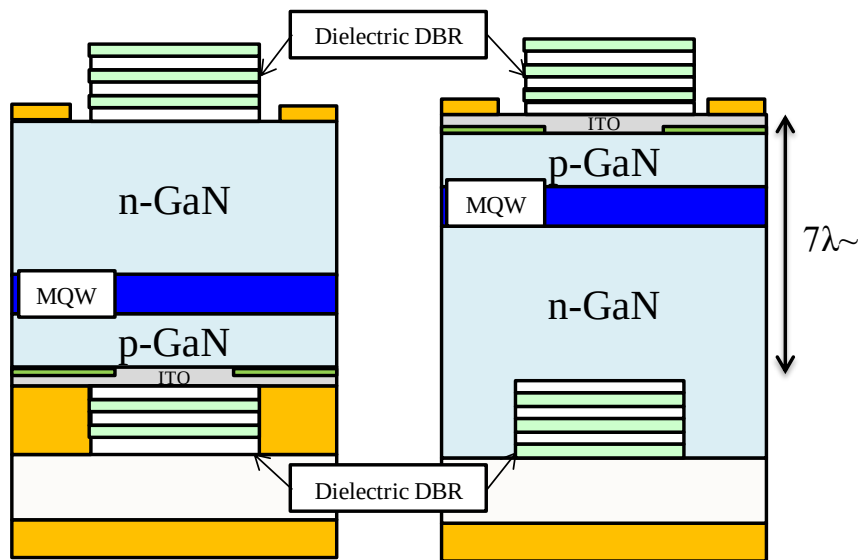
表 1-3 他研究機関の面発光レーザー特性<sup>51-57)</sup>

|                              | NCTU | Nichia | Panasonic              | UCSB   | EPFL   | Xiamen                 | SONY  |
|------------------------------|------|--------|------------------------|--------|--------|------------------------|-------|
| CW/pulsed                    | CW   | CW     | CW                     | Pulsed | Pulsed | CW                     | CW    |
| 最大光出力 [mW]                   | 0.9  | 0.7    | 3.0 x 10 <sup>-3</sup> | 3.5    | 0.3    | 5.0 x 10 <sup>-4</sup> | 1.1   |
| 閾値電流密度 [kA/cm <sup>2</sup> ] | 10.6 | 3      | 0.6                    | 3.5    | 140    | 1.2                    | 35.8  |
| 発光波長[nm]                     | -    | 450    | 410                    | 417    | 421    | 422                    | 453.9 |

現状、窒化物半導体面発光レーザーは、最適な上下反射鏡や電流狭窄構造等、各要素構造が未確立であり、さらに光吸収のある酸化インジウム・スズ(Indium Tin Oxide : ITO)を用いたイントラキャビティ構造により内部損失が増大し、閾値電流が増加するといった問題を有する。一方、赤外面発光レーザーでは上下に導電性を兼ね備えた半導体材料による DBR が利用可能である。これにより、1λ 共振器などの短共振器の作製が可能である。さらに、AlGaAs 層の選択酸化により、簡易なプロセスにて電流狭窄構造と導波構造の形成が可能になっている。このように、赤外面発光レーザーは長年の研究により優れた要素構造や技術が十分確立されているが、窒化物半導体面発光レーザーでは、短共振器化や電流狭窄構造

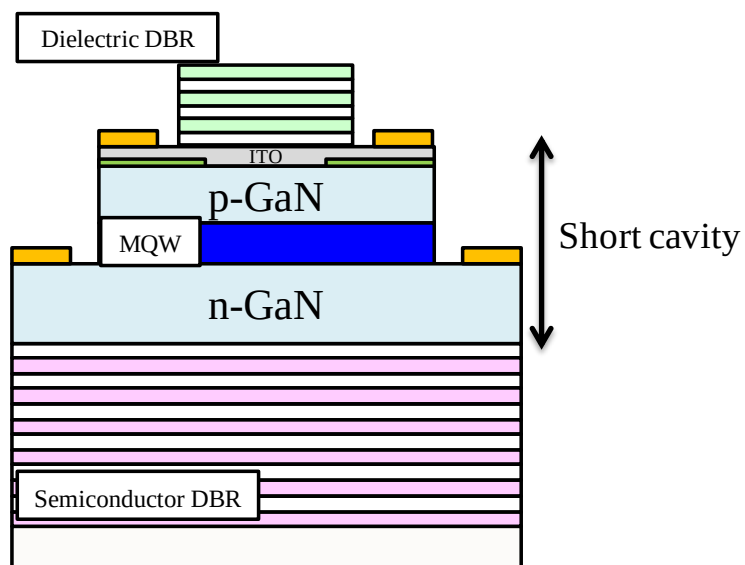
などを実現する構造や形成技術の検討が不十分な状況である。そのため、窒化物半導体面発光レーザでは、短共振器化が困難となる誘電体 DBR や ITO 電極による電流狭窄構造を利用せざるを得ず、さらに、屈折率導波構造利も形成されていないため、面発光レーザとして十分な特性をもたらす素子構造になっていない。ゆえに、閾値電流密度は赤外面発光レーザと比較すると 1 桁以上高く、出力も 1 桁以上低い<sup>58,59)</sup>。高出力かつ低閾値の窒化物半導体面発光レーザを得るには、光閉じ込め係数を増加させ、内部損失の低減とともにミラー損失を最適化し、これらを実現する精密な膜厚制御などが必要である。

これまでに電流注入による動作が実現した窒化物半導体面発光レーザの構造は、二つに大別される。図 1-3(a)、(b)にその二つの面発光レーザ構造の概略図を示す。一つは上下の分布ブラッグ反射鏡 DBR がともに誘電体を用いた二重誘電体 DBR 構造<sup>52-54,56,57)</sup>(図 1-3(a))である。半導体 DBR よりも高屈折率差の材料の組み合わせを利用でき、高反射率による Q 値の高い共振器が設計上実現可能である。しかしながら、上下に誘電体 DBR を配置するために、成長基板の除去、研磨、支持基板への貼り付けなど複雑なプロセスを要するため生産性が低下する。さらに、研削による共振器調整が難しく、短共振器の実現が困難な状況でもある。もう一方の構造は、下部反射鏡に半導体 DBR、上部反射鏡に誘電体 DBR を用いた混成型 DBR 構造<sup>51,55)</sup>(図 1-3(b))である。この構造では、低い屈折率の半導体材料のエピタキシャル成長が難しいことに加え、小さな屈折率差の DBR 材料の組み合わせを用いるため、所望の反射率を得るためには、多くの積層数を必要とする。一方で、結晶成長により面発光レーザ構造を一括成長することができ、精密な共振器長制御、作製工程の簡略化、短共振器化などが可能で、利点も多い。ここで図 1-4 に、混成型 DBR 構造を用いた場合の共振器長と計算による光閉じ込め係数の関係を示す。報告されている  $7\lambda$  共振器と比較して、 $4\lambda$  共振器を用いると約 1.5 倍の光閉じ込め係数増加が期待される。二重誘電体 DBR 構造では、基板剥離工程で活性層をダメージから守るために、 $7\lambda$  程度の厚めの共振器設計が必要となるが、混成型 DBR 構造では  $4\lambda$  の短共振器も作製可能である。



(a)

図 1-3(a) 二重誘電体 DBR 構造を有する窒化物半導体面発光レーザの概略図



(b)

図 1-3(b) 混成型 DBR 構造を有する窒化物半導体面発光レーザの概略図

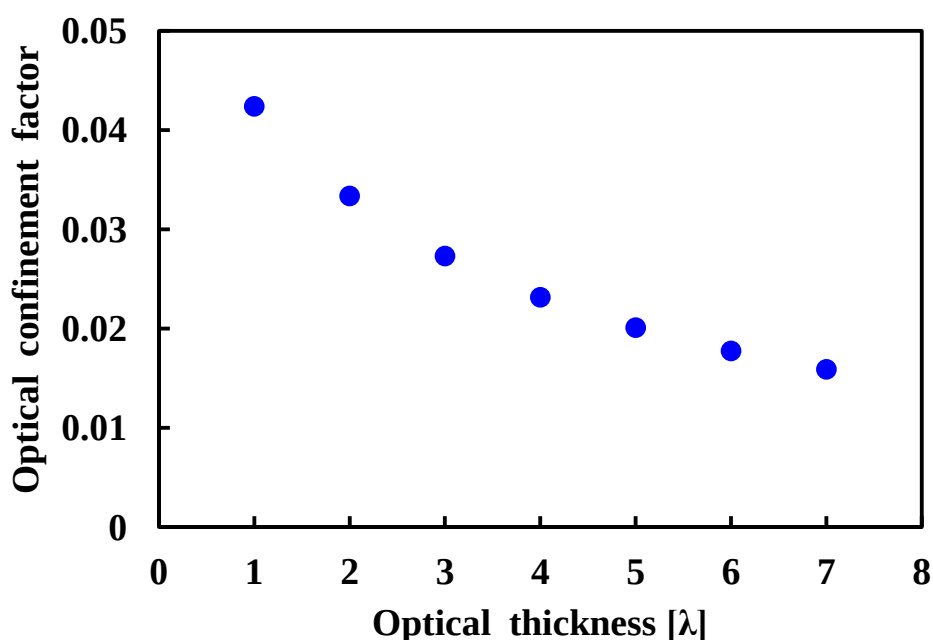


図 1-4 共振器長と計算による光閉じ込め係数の関係

ところで自動車のヘッドライトや、工場およびエンターテイメントで使われるような施設照明では、高出力を得るために高電流密度で使用している。そのため、面発光レーザをこれらのアプリケーションに適用する場合、 $120^{\circ}\text{C}$  以上においても安定的にレーザ動作させることが求められる<sup>60)</sup>。赤外面発光レーザでは、良好な温度特性を得るためにデチューニング設計を行っている<sup>61)</sup>。面発光レーザにおいてデチューニングとは、共振器の共振波長と活性層のゲインスペクトルを温度上昇によるレッドシフトを利用して、意図的にデチューニングする手法である。これにより、高温動作に適した素子を実現することが可能ある。基本的に低い閾値電流を実現するには、共振波長とゲインスペクトルの一致が必須である。その一致を環境温度が高い状況にて実現させるため、レッドシフト量の多い利得波長を室温時に短波長化させておく。また、高出力時にも高電流注入による素子温度の上昇が起こり、このデチューニングは高出力動作を実現するためにも重要な手法である。したがって、窒化物半導体面発光レー

ザにおいても検討すべき重要な設計事項であるが、これまでに検討された報告はない。また、窒化物半導体面発光レーザの発振に関する報告は、室温に留まっており<sup>62)</sup>室温よりも高い温度での、例えば 100°C 付近の発振報告はされていない。

## 1-5. 本研究の目的および構成

本論文では、窒化物半導体面発光レーザの室温連続発振および高性能化、特に高出力化と高温動作を目的とし、4~4.5 $\mu$ m 共振器及び混成型 DBR を用いて以下の三つの観点から検討を行った。

- ・ 混成型 DBR における層厚制御と素子構造の最適化
- ・ 光閉じ込め係数増加に向けた周期利得構造
- ・ 高温動作に向けたデチューニング

各章の構成と概要を以下に示す。

### 第1章 序論

本章では、III 族窒化物半導体の特徴、面発光レーザの歴史と特徴および窒化物半導体面発光レーザの課題と現状について述べる。最後に、本研究の目的を示す。

### 第2章 面発光レーザ設計に必要な理論モデル

本章では、窒化物半導体面発光レーザの設計に向けて、理論計算を行う。以下の章に続く、各々の目的に関する素子構造の最適設計を検討する。

### 第3章 窒化物半導体面発光レーザの設計と作製

本章では、精密な膜厚制御および最適素子構造により、窒化物半導体面発光レーザを作製し、室温連続発振を実現する。作製した面発光レーザの基本的な特性について述べ、課題を明らかにする。

### 第4章 周期利得活性層を有する窒化物半導体面発光レーザ

本章では、高光閉じ込めを可能にする周期利得構造実現に向けた、キャリア注入検討を進め、同構造を有する面発光レーザ特性について理論検討を踏まえて議論する。

## 第5章 高出力高温動作に向けた検討

本章では、高温レーザ動作において重要な手法であるデチューニングについて検討を行い、作製した面発光レーザの温度特性、および高温時において連続動作可能な面発光レーザを実現する。

## 第6章 総括

本章では、総括として本研究で得られた成果を整理し、残された課題、特に赤外面発光レーザと同等性能を得るための必要な検討項目について述べる。

## 参考文献

- 1). H. Amano, M. Kito, K. Hiramatsu, I. Akasaki, Jpn. J. Appl. Phys. **28**, L2112 (1989).
- 2). J. J. Wierer, J. Y. Tsao, and D. S. Sizov, Laser Photonics Rev. **7**, 963 (2013).
- 3). M. H. Kim, M. F. Schubert, Q. Dai, J. K. Kim, F. Schubert, J. Piprek, and Y. Park, Appl. Phys. Lett. **91**, 183507 (2007).
- 4). Y. -C. Shen, G. O. Mueller, S. Watanabe, N. F. Gardner, A. Munkholm, and M. R. Krames, Appl. Phys. Lett. **91**, 141101 (2007).
- 5). J. Y. Tsao, M. H. Crawford, M. E. Coltrin, A. J. Fischer, D. D. Koleske, G. S. Subramania, G. T. Wang, J. J. Wierer, and R. F. Karlicek, Adv. Opt. Mater. **2**, 809 (2014).
- 6). S. -Y. Tu, H. Y. Lin, and T. -X. Lee, SID Symposium Digest of Technical Papers. **47**, 1552 (2016).
- 7). J. L. Jewell and G. R. Olbright, U. S. Patent 5, 325, 386. 1994-06-28.
- 8). H.-H. Lu, Y.-P. Lin, P.-Y. Wu, C.-Y. Chen, M.-C. Chen, and T.-W. Jhang, Opt. Express **22**, 3468 (2014).
- 9). 赤崎 勇 (編著)、III 族窒化物半導体、培風館 (1999).
- 10). 長谷川 文夫、吉川 明彦 (編著)、ワイドギャップ半導体 光・電子デバイス、森北出版株式会社 (2006).
- 11). S. M. Sze and K. K. Ng, Physics of Semiconductor Devices, John Wiley & Sons, Inc. (2007).
- 12). W. M. Yim, E. J. Stofko, P. J. Zanzucchi, J. I. Pankove, M. Ettenbergm, and S. L. Gilbert, J. Appl. Phys. **44**, 292 (1973).
- 13). B. Monemar, Phys. Rev. B **10**, 676 (1974).
- 14). J. Wu, W. Walukiewicz, W. Shan, K. M. Yu, J. W. Ager III, S. X. Li, E. E. Haller, H. Lu, and W. J. Schaff, Appl. Phys. Lett. **94**, 4457 (2003).
- 15). V. Y. Davydov, A. A. Klochikhin, R. P. Seisyan, V. V. Emtsev, S. A. Ivanov, F. Bechstedt, J. Furthmuller, H. Harima, A. V. Mudryi, J. Aderhold, O. Semchinova, and J. Graul, Phys. Status Solidi B **229**, R1 (2002).
- 16). S. Strite and H. Morkoc, J. Vac. Sci. Technol. B **10**, 1237 (1992).
- 17). V. W. L. Chin, T. L. Tansley, and T. Osotchan, J. Appl. Phys. **75**, 7365 (1994).
- 18). H. P. Maruska, and J. J. Tietjen, J. Appl. Phys., **15**, 327 (1969).

- 19). H. P. Maruska, and J. J. Tietjen, Appl. Phys. Lett., **15**, 327 (1969).
- 20). J. I. Pankove, E. A. Miller, D. Richman, and J. E. Berkeyheiser, J. Lumin., **4**, 63 (1971).
- 21). J. Karpinski, J. Jun, and S. Porowski, J. Crystal Growth, **66**, 1 (1984).
- 22). J. A. Van Vechten, Phys. Rev., **B7** 1479 (1973).
- 23). H. Amano, N. Sawaki, I. Akasaki, Y. Toyoda, Appl. Phys. Lett., **48**, 353 (1986).
- 24). H. Amano, and I. Akasaki, MRS Ext. Abst. **EA-21**, 165 (1990).
- 25). I. Akasaki, and H. Amano, MRS Symp. Proc. **242**, 383 (1992).
- 26). S. Nakamura, T. Mukai, M. Senoh, and N. Iwasa, Jpn. J. Appl. Phys., **31**, L139 (1992).
- 27). S. Nakamura, M. Senoh, N. Iwasa, and S. Nagahara, Jpn. J. Appl. Phys., **34**, L797 (1995).
- 28). I. Akasaki, H. Amano, S. Sato, H. Sakai, T. Tanaka, and M. Koide, Jpn. J. Appl. Phys., **34**, L1517 (1995).
- 29). S. Nakamura, M. Senoh, S. Nagahama, N. Iwasa, T. Yamada, T. Matsushita, Y. Sugimoto and H. Kiyoku : Appl. Phys. Lett., **69**, 3034 (1996).
- 30). 内田 武志、面発光レーザの横モード特性解明と単一モード高出力化手法に関する研究、東京工業大学大学院博士学位論文 (2006).
- 31). 伊賀 健一、小山 二三夫 (編著)、面発光レーザ、株式会社オーム社 (1990).
- 32). H. Soda, K. Iga, C. Kinoshita, and Y. Suematsu, Jpn. J. Appl. Phys., **18**, 2329 (1979).
- 33). F. Koyama, S. Kinoshita, and K. Iga, Appl. Phys. Lett. **55**, 221 (1989).
- 34). J. L. Jewell, A. Schere, S. L. McCall, Y. H. Lee, S. J. Walker, J. P. Harbison, and L. T. Florez, Electron. Lett., **25**, 1123 (1989).
- 35). J. L. Jewell, J. P. Harbison, A. Scherer, Y. H. Lee, and L. T. Florez, IEEE J. Quantum Electron, **27**, 1332 (1991).
- 36). B. T. Cunningham, J. E. Baker, and G. E. Stillman, Appl. Phys. Lett. **56**, 836 (1990).
- 37). R. F. Kopf, E. F. Schubert, S. W. Downey, and A. B. Emerson, Appl. Phys. Lett. **61**, 1820 (1992).

- 38). D. L. Huffaker, D. G. Deppe, K. Kumar, and T. J. Rogers, Appl. Phys. Lett. **65**, 97 (1994).
- 39). K. L. Lear, K. D. Choquette, R. P. Schneider, S. P. Kilcoyne, and K. M. Geib, Electron. Lett. **31**, 208 (1995).
- 40). R. Jager, M. Grabherr, C. Jung, R. Michalzick, G. Reiner, B. Weigl, and K. J. Ebeling, Electron. Lett. **33**, 330 (1997).
- 41). D. G. Deppe, D. L. Huffaker, J. Shin, and H. Deng, IEEE Photon. Technol. Lett. **7**, 965 (1995).
- 42). D. L. Huffaker, L. A. Graham, H. Dapkus, and D. G. Deppe, IEEE Photon. Technol. Lett. **8**, 974 (1996).
- 43). G. M. Yang, M. H. MacDougal, and P. D. Dapkus, J. Appl. Phys. **80**, 4837 (1996).
- 44). M. Grabherr, B. Wegi, G. Reiner, R. Michalzick, M. Miller, and K. J. Ebeling, Electron Lett. **32**, 1723 (1996).
- 45). R. Michalzick, M. Grabherr, R. Jaeger, M. Miller, and K. J. Ebeling, Asia Pacific Symposium on Optoelectronics'98. International Society for Optics and Photonics (1998).
- 46). J. M. Redwing, D. A. S. Loeber, J. S. Anderson, M. A. Tischler, and J. S. Flynn, Appl. Phys. Lett. **69**, 1 (1996).
- 47). E. Feltin, G. Christmann, J. Dorsaz, A. Castiglia, J. -F. Carlin, R. Butte, N. Grandjean, S. Christopoulos, G. Baldassarri, H. von Hogersthal, A. J. D. Grundy, P. G. Lagoudakis, and J. J. Baumberg, Electron. Lett. **43**, 924 (2007).
- 48). T. -C. Lu, C. -C. Kao, H. -C. Kuo, G. -S. Huang, and S. -C. Wang, Appl. Phys. Lett. **92**, 141102 (2008).
- 49). Y. Hamaguchi, K. Omae, H. Matsumura, and T. Mukai, Appl. Phys. Express **1**, 121102 (2008).
- 50). M. Gonschorek, "Physical properties of  $\text{Al}_{1-x}\text{In}_x\text{N}/(\text{AlN})/\text{GaN}(0.07 \leq x \leq 0.21)$  heterostructures and their application for high power electronics" (2011).
- 51). D. H. Hsieh, A. J. Tzou, T. S. Kao, F. I. Lai, D. W. Lin, B. C. Lin, T. C. Lu, W. C. Lai, C. H. Chen, and H. C. Kuo, Opt. Express **23**, 27145 (2015).
- 52). D. Kasahara, D. Morita, T. Kosugi, K. Nakagawa, J. Kawamata, Y. Higuchi, H. Matsumura, and T. Mukai, Appl. Phys. Express **4**, 072103 (2013).

- 53). T. Onishi, O. Imafuji, K. Nagamatsu, M. Kawaguchi, K. Yamanaka, and S. Takigawa, *IEEE J. Quantum Electron.* **48**, 1107 (2012).
- 54). J. T. Leonard, E. C. Young, B. P. Yonkee, D. A. Cohen, T. Margalith, S. P. DenBaars, J. S. Speck, and S. Nakamura, *Appl. Phys. Lett.* **107**, 091105 (2015).
- 55). G. Cosendey, A. Castiglia, G. Rossbach, J. –F. Carlin, and N. Grandjean, *Appl. Phys. Lett.* **101**, 151113 (2012).
- 56). W. –J. Liu, X. –L. Hu, L. –Y. Ying, J. –Y. Zhang, and B. –P. Zhang, *Appl. Phys. Lett.* **104**, 251116 (2014).
- 57). T. Hamaguchi, H. Nakajima, M. Ito, J. Mitomo, S. Satou, N. Fuutagawa, and H. Narui, *Jpn. J. Appl. Phys.* **55**, 122101 (2016).
- 58). K. –L. Chi, Y. –X. Shi, X. –N. Chen, J. Chen, Y. –J. Yang, J. –R. Kropp, N. Ledentsov, M. Agustin, N. N. Ledentsov, G. Stepniak, J. P. Turkiewicz, and J. –W. Shi, *IEEE Photon. Technol. Lett.* **28**, 1367 (2016).
- 59). M. Li, X. Yang, N. Cox. J. Beadsworth, and D. Deppe, Record Low Differential Resistance Using Lithographic VCSELs, Conference on Lasers and Electro-Optics, JTh2A, (2016).
- 60). Y. Lai, N. Cordero, F. Barthel, F. Tebbe, J. Kuhn, R. Apfelbeck, and D. Wurtenberger, *Appl. Therm. Eng.* **29**, 1239 (2009).
- 61). R. Michalzik and K. J. Ebeling, “Vertical-Cavity Surface-Emitting Laser Devices”, H. E. Li and K. Iga, eds. 53 (2003).
- 62). T. –C. Lu, T. –T. Wu, S. –W. Chen, P. –M. Tu, Z. –Y. Li, C. –K. Chen, C. –H. Chen, H. –C. Kuo, S. –C. Wang, H. –W. Zan, and C. –Y. Chang, *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron.* **17**, 1594 (2011).

## 第2章 面発光レーザ設計に必要な理論モデル

### 2-1. はじめに

本章では、窒化物半導体面発光レーザの設計のために、第3章から第5章に関連する理論検討を行う。はじめに、面発光レーザに必要となる発振条件、実効共振器長、光閉じ込め係数等の理論式から、モード利得と閾値電流との関係や光出力と外部微分量子効率との関係を導出する。次に、これらの関係式を用いて、設計層厚からの差異による発振への影響、また、最適反射率を把握するための反射率と光出力の関係を算出し、第3章に向けた理論検討を行う。その後、活性層の井戸数と閾値電流の関係から、第4章の周期利得構造を適用した場合の閾値電流を見積もる。最後に、第5章の高温特性検討の際に参照可能な、高温時におけるモード利得のデチューニング量依存性について検討を行う。

### 2-2. 発振条件

熱平衡状態における半導体では、伝導帯より価電子帯に電子が多く存在する。半導体レーザでは、数 nm という膜厚を有する量子井戸に光励起、あるいは電流注入によりキャリアを注入し、価電子帯上端よりも伝導帯下端の電子の存在確率を高くさせている。このような励起状態を反転分布と言う。電子が反転分布している状態において、光子によって伝導帯に存在する電子が低エネルギーの価電子帯に遷移するとき、その光子と同じ位相、周波数、偏光を持った新たな光子が誘導的に放出される。共振器内でこの誘導放出が生じれば、同じ光が次々と放出される、すなわち増幅し、その利得が共振器損失と等しくなることでレーザ発振に至る。

図 2-1 に面発光レーザ共振器の概念図を示す。

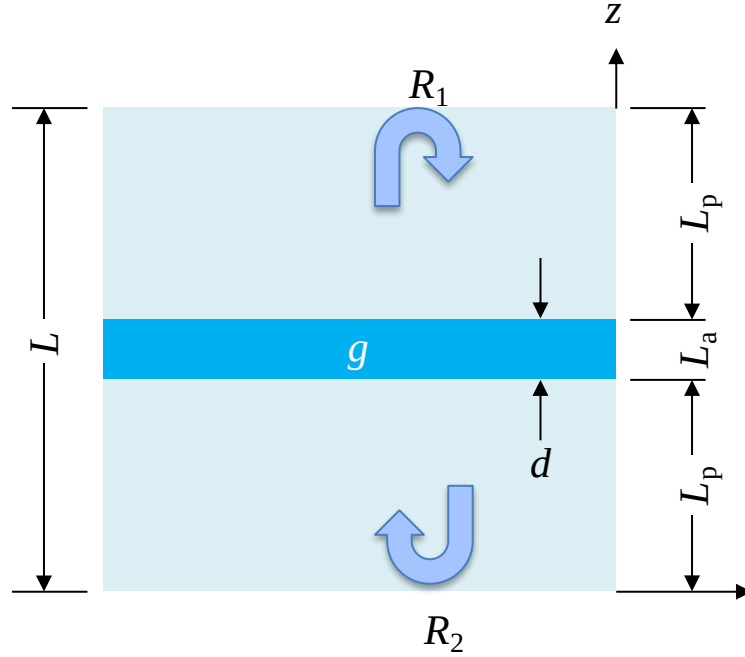


図 2-1 ファブリ・ペロー共振器の概略図

一般的に、レーザ共振器は二つの反射鏡で構成されたファブリ・ペロー共振器と考えることができ、図 2-1 のような面発光レーザが有する垂直共振器では、基板と垂直方向にレーザ光が出射される。この垂直共振器構造において、ある点から出発した光が共振器内を一往復したときに、誘導放出によって得られる利得が損失と一致する条件式は以下で示される。

$$\sqrt{R_1 R_2} \exp(\Gamma_{xy} g_{th} - \alpha_{ia}) L_a \cdot \exp(-\alpha_{ip} L_p) = 1 \quad (1)$$

ここで、図 2-1 に図示したように、 $R_1$ 、 $R_2$  は上部および下部反射鏡の反射率、 $L_a$  は利得領域の長さ、 $L_p$  はクラッド領域の長さである。また、 $\Gamma_{xy}$  は横方向の光閉じ込め係数、 $g_{th}$  は閾値に達するとき、すなわち式(1)を満たす利得、 $\alpha_{ia}$  は利得領域の内部損失、 $\alpha_{ip}$  はクラッド領域の内部損失である。式(1)を  $\Gamma_{xy} g_{th} L_a$  について解くと、

$$\Gamma_{xy} g_{th} L_a = \alpha_{ia} L_a + \alpha_{ip} L_p + \frac{1}{2} \ln \left( \frac{1}{R_1 R_2} \right) \quad (3)$$

となる。共振器長を  $L$ 、全ての光閉じ込め係数を  $\Gamma (= \Gamma_{xy} \Gamma_z \approx \Gamma_{xy} L_a / L)$ 、平均内部損失  $(\alpha_{ia} L_a + \alpha_{ip} L_p) / L$  を  $\alpha_i$ 、ミラー損失を  $\alpha_m = (1/2L) \ln(1/R_1 R_2)$  とすると式(3)は、

$$\Gamma g_{th} = \alpha_i + \alpha_m \quad (4)$$

となり、半導体レーザの一般的な発振条件式が得られる。

図 2-2 に式(3)による反射率と利得の関係を示す。一般的な窒化物半導体の端面発光レーザの反射率は半導体の劈開面と空気との屈折率差により、20%未満の反射率を有する<sup>1)</sup>。一方、面発光レーザが端面発光レーザと同等の閾値利得を得るには、99%以上の反射率が必須となる。

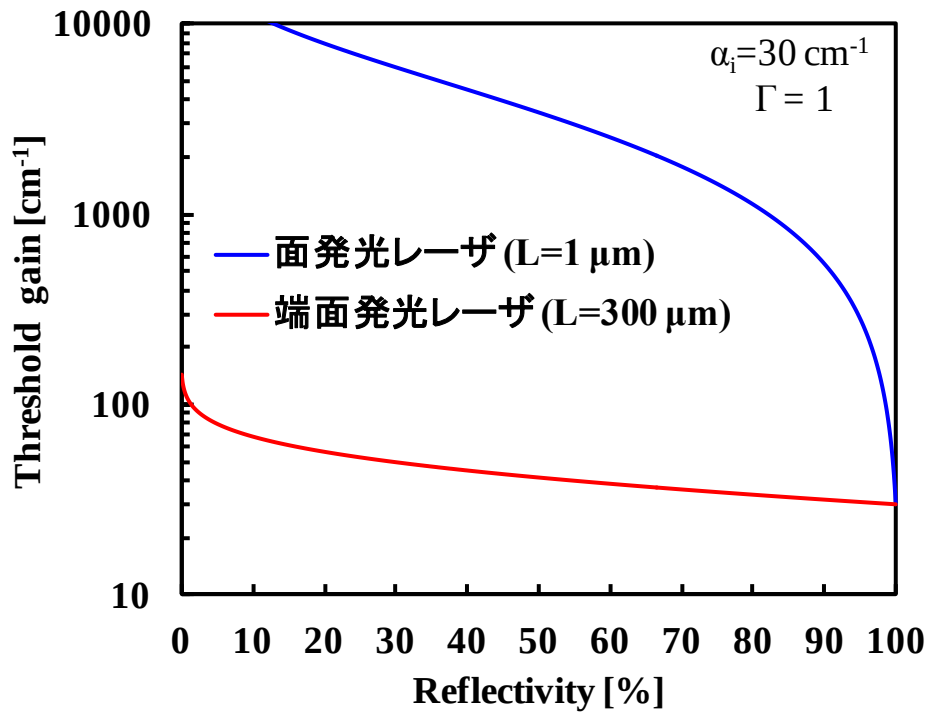


図 2-2 反射率と発振閾値利得の関係

### 2-3. 実効共振器長

実際の面発光レーザでは、ファブリ・ペロー共振器のように反射鏡界面で光強度が急激に低下せず、多層膜反射鏡への光の浸み出しを考慮する必要がある。図 2-3 に示すように、その浸み出しも考慮した共振器長さを実効共振器長  $L_{\text{eff}}$  という。下部および上部反射鏡内への電界の侵入深さをそれぞれ  $\ell_1$ 、 $\ell_2$  とすると実効共振器長は、

$$L_{\text{eff}} = L + \ell_1 + \ell_2 \quad (5)$$

となる。ここで、ひとつの反射鏡内への光の侵入深さを  $\ell$  とし、反射鏡の長さを  $L_{\text{DBR}}$ 、反射鏡を構成する材料の屈折率を  $n_1$ 、 $n_2$  とすると、 $\ell$  は接動法<sup>2)</sup>により、

$$\frac{\ell}{L_{\text{DBR}}} = \frac{1}{2} \frac{\tanh(k \cdot L_{\text{DBR}})}{k \cdot L_{\text{DBR}}} \quad (6)$$

と表わされる。ここで  $k$  は結合係数であり、共振器内の波長  $\lambda$  を用いて以下の様に表わされる。

$$k = \frac{\pi}{\lambda} (n_1 - n_2) \quad (7)$$

また、反射鏡が 1/4 波長の光学的厚さで  $r$  ペア積層された場合反射鏡の長さは、

$$L_{\text{DBR}} = \left( \frac{\lambda}{4n_1} + \frac{\lambda}{4n_2} \right) r \quad (8)$$

となり、式(7)、(8)から、

$$k \cdot L_{\text{DBR}} = \frac{\pi}{4} \left( \frac{n_1^2 - n_2^2}{n_1 \cdot n_2} \right) r \quad (9)$$

となる。したがって、反射鏡内への光の浸み出し長は、各材料の屈折率と反射鏡のペア数のみで決定される。

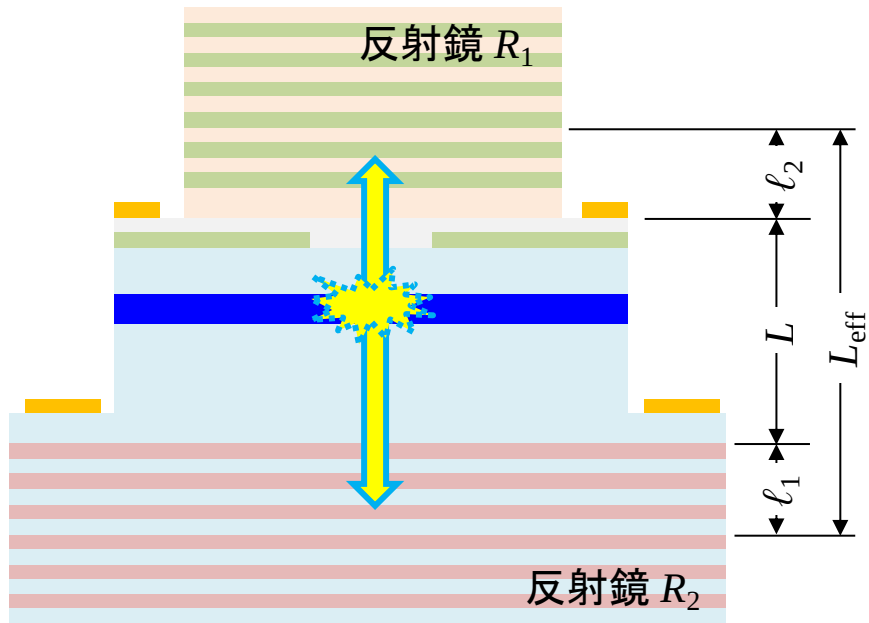


図 2-3 面発光レーザの共振器の概略図

図 2-4 に本研究で用いる中心波長 410 nm の AlInN/GaN 半導体多層膜反射鏡および Nb<sub>2</sub>O<sub>5</sub>/SiO<sub>2</sub> 誘電体多層膜反射鏡における浸み出し長  $\ell$  のペア数  $r$  依存性を示す。内部吸収や散乱の無い理想的な多層膜の場合、AlInN/GaN 半導体反射鏡のペア数が 15 ペア程度から  $\ell$  が飽和し、 $\ell_1 = 221.9$  nm となる。一方、Nb<sub>2</sub>O<sub>5</sub>/SiO<sub>2</sub> 誘電体反射鏡は材料の屈折率差が大きいため、反射鏡層内への電界の侵入が少なく、3 ペア程度で飽和し、 $\ell_2 = 64.3$  nm となる。したがって、AlInN/GaN および Nb<sub>2</sub>O<sub>5</sub>/SiO<sub>2</sub> 反射鏡で構成される面発光レーザの電界の浸み出し深さは  $\ell = 286.2$  nm となる。

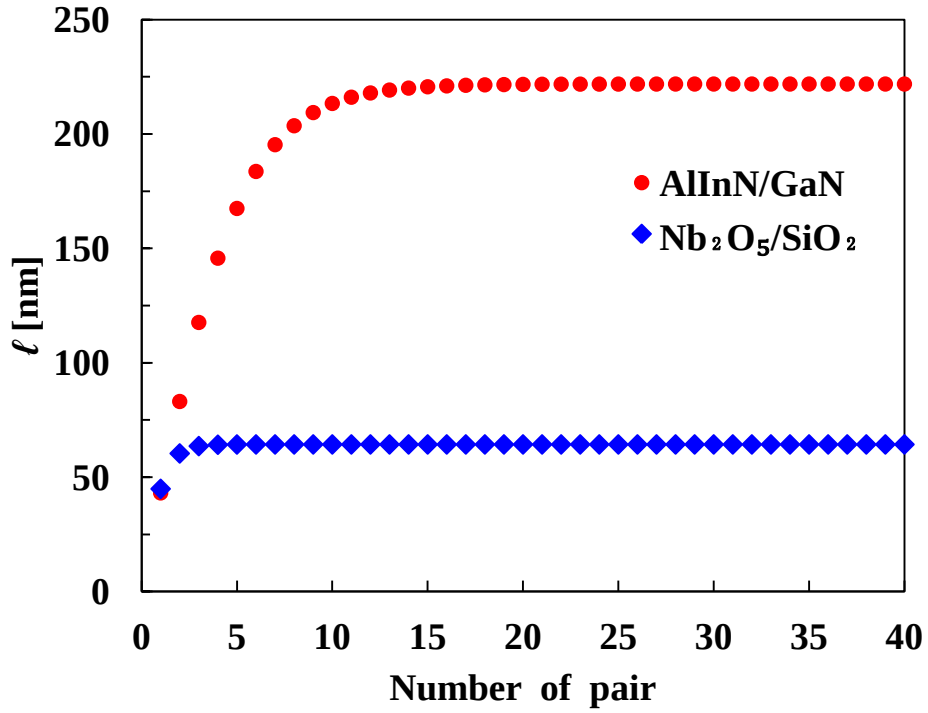


図 2-4 反射鏡ペア数と電界の侵入深さの関係

#### 2-4. 光閉じ込め係数

次に光閉じ込め係数について述べる。光閉じ込め係数  $\Gamma$  は、共振モード内の光が活性層内に閉じ込められる割合を示し、次式のように、横方向の割合  $\Gamma_t$  と縦方向の割合  $\Gamma_\ell$  の積で表される。

$$\Gamma = \Gamma_t \Gamma_\ell \quad (10)$$

$\Gamma_t$  は活性層断面の光モード分布と電流分布に基づく光強度分布で決まり、二つの分布の重なりが大きくなるほど高くなる。また、 $\Gamma_\ell$  は実効共振器内における活性層領域の割合で表される。規格化横方向電界分布  $U(x,y)$  および電界  $E$  を用いて、 $\Gamma_t$  と  $\Gamma_\ell$  はそれぞれ以下の様に表される。

$$\Gamma_t = \frac{\iint_{xy} |U(x, y)|^2 dx dy}{\iint_{xy} |U(x, y)|^2 dx dy} \quad (11)$$

$$\Gamma_\ell = \frac{\int |E|^2 dz}{\int_z |E|^2 dz} \quad (12)$$

共振器長に対して活性層領域が微小である面発光レーザでは、より大きな実効的利得を得るために共振器内の光強度定在波の腹に合わせて活性層を配置することが重要である。一般的な半導体レーザの光閉じ込め係数は数%程度である<sup>3,4)</sup>。

更なる光閉じ込め係数の増加方法として、式(12)の分母を小さくするための短共振器化や式(12)の分子を大きくするための周期利得構造<sup>5,6)</sup>が挙げられる。周期利得構造とは図 2-5 に示す様に、1 つの pn 接合に複数の活性層を光強度定在波の腹に配置し、低閾値化を目指した方法であり、赤外面発光レーザで最初に提案、報告されている<sup>7,8)</sup>。式(12)が示すように、活性層数の増大に伴い、活性層内部の光強度分布が増加して光閉じ込め係数も増加するが、実際には各活性層のキャリア分布も考慮する必要がある。比較的均一なキャリア注入が可能な光励起においては、周期利得構造を有する窒化物半導体面発光レーザの発振が報告<sup>9)</sup>されており、同構造は窒化物半導体面発光レーザにおいても有用であると期待できる。しかし、窒化物半導体では電子と正孔の有効質量や移動度の差異により、電流注入による均一なキャリア注入が実現されにくい<sup>10,11)</sup>ことから、電流注入では周期利得構造を有する窒化物半導体面発光レーザの報告がされていない。本論文では、第 4 章において、周期利得構造を構成する二つの活性層に注目して、各活性層への均一なキャリア注入の検討を行う。

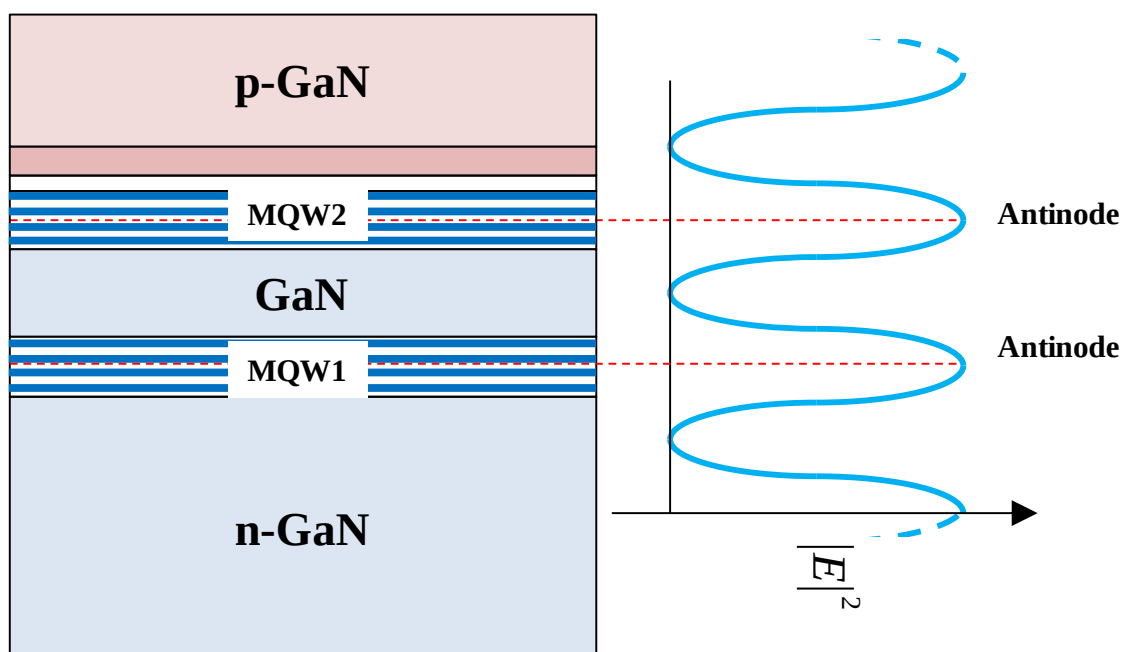


図 2-5 活性層二つの場合における周期利得構造の概略図

## 2-5. 閾値電流

閾値電流密度とは、レーザ発振に至るまでに必要な電流密度を指す。閾値電流密度は、2-2 節で導出した式(4)に、キャリアのレート方程式から得られる電流密度とキャリア密度の関係、さらに利得とキャリア密度の関係を代入することで電流密度と閾値利得の関係が導かれ、導出することができる。

発光素子の量子井戸活性層において、電流注入によりキャリアが発生し、発光再結合や非発光再結合、そしてキャリアの漏れなどによりキャリアが消費される。キャリア密度を  $N$  とすると、これらをレート方程式は次のように書かれる。

$$\frac{dN}{dt} = G_{\text{gen}} - R_{\text{rec}} \quad (13)$$

ここで、 $G_{\text{gen}}$  は活性層にて単位時間あたりに生成される、すなわち注入されるキャリアの濃度であり、 $R_{\text{rec}}$  は活性層にて単位時間あたりに消費される、すなわち再結合されるキャリア濃度である。活性層には毎秒  $\eta_i I/q$  個のキャリアが注入されるため、キャリア生成項は、

$$G_{\text{gen}} = \frac{\eta_i I}{qV} \quad (14)$$

と表される。 $\eta_i$  は注入効率、 $I$  は電流、 $q$  は素電荷量、 $V$  は活性層の体積である。一方、再結合過程には自然再結合レート  $R_{\text{sp}}$ 、非発光再結合レート  $R_{\text{nr}}$ 、キャリア漏れの割合  $R_{\text{l}}$ 、そして、レーザで重要な誘導放出レート  $R_{\text{st}}$  が存在する。したがって、キャリア消費項である  $R_{\text{rec}}$  は次のように表わされる。

$$R_{\text{rec}} = R_{\text{sp}} + R_{\text{nr}} + R_{\text{l}} + R_{\text{st}} \quad (15)$$

式(15)の右辺の第3項までは自然放出時、すなわち非誘導の減衰過程を表わす。第4項の  $R_{\text{st}}$  は、光子によりキャリアが影響を受ける誘導的な減衰過程である。通常、自然放出におけるキャリアの減衰に対するレート方程式は、

$$\frac{dN}{dt} = -\frac{N}{\tau} = -(R_{\text{sp}} + R_{\text{nr}} + R_{\text{l}}) \quad (16)$$

このレート方程式によってキャリア寿命  $\tau$  が定義される。この自然減衰レートの各項はキャリア濃度に依存するため、各項はキャリア密度  $N$  のべき級数で表現できる。したがって、式(15)は以下のように書き表される。

$$R_{\text{rec}} = \frac{N}{\tau} + R_{\text{st}} \quad , \quad (17a)$$

$$R_{\text{rec}} = BN^2 + (AN + CN^3) + R_{\text{st}} \quad (17b)$$

ここで、 $B$  は発光再結合係数、 $A$  は非発光再結合係数、 $C$  はオージェ再結合係数やリーク電流に関する係数である。式(17b)右辺の第2項と第3項は非発光の減衰レートを表す。第2項は、レーザ動作のような高電流注入時には無視することができる。窒化物半導体におけるオージェ再結合については、効率ドロップの原因としてその存在が報告されているが、現在も議論が続いている<sup>12,13)</sup>。本論文では、簡略のためオージェ再結合も無視する。式(13)、(14)、(17a)から活性層に対するレート方程式は次のように表わされる。

$$\frac{dN}{dt} = \frac{\eta_i I}{qV} - \frac{N}{\tau} - R_{st} \quad (18)$$

発振に到達した時点での電流、すなわち閾値電流を  $I_{th}$ 、その時のキャリア密度を  $N_{th}$  とし、式(18)の定常状態( $dN/dt = 0$ )を考える。このとき、誘導放出光は十分小さい、すなわち  $R_{st} = 0$  と考えられるため、式(13)と(17b)から、

$$\frac{\eta_i I_{th}}{qV} = B N_{th}^2 \quad (19)$$

と表わされる。このように閾値電流は、再結合レートを通じて閾値キャリア密度と関係しており、 $N$  の多項式で表わせる。

次に、利得とキャリア密度の関係は、透明キャリア密度  $N_{tr}$ 、利得係数  $g_0$  を用いて、一般的に以下のように表わされる。

$$g = g_0 \ln \frac{N}{N_{tr}} \quad (20)$$

式(20)を式(4)に代入することで、閾値キャリア密度  $N_{th}$  が得られる。

$$N_{th} = N_{tr} \exp\left(\frac{g_{th}}{g_0}\right) = N_{tr} \exp\left(\frac{\alpha_i + \alpha_m}{\Gamma g_0}\right) \quad (21)$$

さらに、式(19)と(21)から閾値電流  $I_{th}$  が得られる。

$$I_{\text{th}} \cong \frac{qV}{\eta_i} B N_{\text{tr}}^2 \exp\left(\frac{\alpha_i + \alpha_m}{\Gamma g_0}\right)^2 \quad (22)$$

現在の多くの半導体レーザは、多重量子井戸(Multiple-Quantum-Well : MQW)構造を用いているため、式(22)の光閉じ込め係数  $\Gamma$  と活性層体積  $V$  は、単一井戸の光閉じ込め係数  $\Gamma_1$  と体積  $V_1$  に井戸数  $N_w$  を掛けたものを使用してもよい。つまり、MQW レーザの場合次のように書かれる。

$$I_{\text{thMQW}} \cong \frac{qN_w V_1}{\eta_i} B N_{\text{tr}}^2 \exp\left(\frac{\alpha_i + \alpha_m}{N_w \Gamma_1 g_0}\right)^2 \quad (23)$$

MQW では上記の式を最小にする最適な井戸数  $N_w$  が存在する。そして、内部損失、ミラー損失、光閉じ込め係数、利得係数は指数関数的に閾値に影響することが分かる。特に、内部損失、ミラー損失および光閉じ込め係数は、材料物性だけでなく、使用する共振器構造によって大きく変化するため、レーザを設計する上で非常に重要なパラメータである。

## 2-6. 外部微分量子効率と光出力

レーザ共振器において光子の損失は、共振器内部での光吸収や光散乱によって起こると共に、レーザにとって必要不可欠な反射鏡での透過によって起こる損失、すなわちミラー損が存在する。ここで、キャリア損失の取り扱いと同様に光子寿命を  $\tau_p$  で表わすと、共振器における単一光子密度  $N_p$  に対する光子密度レート方程式は次のように示される。

$$\frac{dN_p}{dt} = \Gamma R_{\text{st}} + \beta_{\text{sp}} R_{\text{sp}} - \frac{N_p}{\tau_p} \quad (24)$$

上式より、 $\beta_{\text{sp}}$  は自然放出係数であり、全自然放出光のうちでレーザモードに結合される割合として定義される。 $R_{\text{st}}$  は、光子により誘起される電子・正孔の

再結合、すなわち誘導放出の生成割合を表し、これによって同じ光子が多数発生、すなわち増幅する。ここで、微小長さ  $\Delta z$  の活性層を光子が通過するときに、この増幅により入射光子密度  $N_p$  から出射光子密度  $N_p + \Delta N_p$  に光子密度が増加した状態を考える。出射光子密度は単位長さあたりの利得  $g$  を用いて、次のように記述できる。

$$N_p + \Delta N_p = N_p \exp(g \Delta z) \quad (25)$$

面発光レーザのような、共振器に対して活性層厚  $\Delta z$  が十分小さい場合、 $\exp(g \Delta z) \approx 1 + g \Delta z$  である。また、 $v_g$  を群速度として、 $\Delta z = v_g \Delta t$  を用いると、 $\Delta N_p = N_p g v_g \Delta t$  が得られる。よって、 $dN_p/dt$  に対する発生項は次のように書かれる。

$$\left( \frac{dN_p}{dt} \right)_{\text{gen}} = R_{\text{st}} = \frac{\Delta N_p}{\Delta t} = v_g g N_p \quad (26)$$

上式から、活性層に対するキャリア密度(式(18))と光子密度のレート方程式(式(24))は次のように示される。

$$\frac{dN}{dt} = \frac{\eta_i I}{qV} - \frac{N}{\tau} - v_g g N_p \quad (25)$$

$$\frac{dN_p}{dt} = \Gamma v_g g N_p + \Gamma \beta_{\text{sp}} R_{\text{sp}} - \frac{N_p}{\tau_p} \quad (26)$$

また、定常状態( $dN_p/dt = 0$ )の時、自然放出がレーザモードにほとんど寄与しない( $\beta_{\text{sp}} = 0$ )と仮定すると、内部損失による光子寿命  $\tau_i$  と反射損失による光子寿命  $\tau_m$  として、式(26)から閾値利得モードが得られる。

$$\Gamma g_{\text{th}} = \frac{1}{v_g \tau_p} = \frac{1}{v_g (\tau_i + \tau_m)} = \alpha_i + \alpha_m \quad (27)$$

式(25)、(26)のレート方程式は閾値の前後で成立している。ここでは、閾値後のレーザモードにおける光出力を算出する。まず、閾値以下における次の定常

状態のキャリアレート方程式を用いる。

$$\frac{\eta_i I}{qV} = (R_{sp} + R_{nr} + R_l)_{th} = (AN + BN^2 + CN^3)_{th} = \frac{N_{th}}{\tau} \quad (28)$$

この時、閾値に達するまでキャリア密度は増加し、閾値後における  $R_{sp}+R_{nr}+R_l$  は閾値での値に固定される。従って、式(25)と(28)から閾値後のキャリアレート方程式が得られる。

$$\frac{dN}{dt} = \eta_i \frac{I - I_{th}}{qV} - v_g g_{th} N_p \quad (I > I_{th}) \quad (29)$$

ここで、 $\eta_i$  はレーザモードでは電流に依存しないと仮定する。上式から、閾値利得  $g_{th}$  を用いて、レーザモードにおける定常状態の光子密度を計算することができる。

$$N_p = \frac{\eta_i(I - I_{th})}{qv_g g_{th} V} \quad (30)$$

ここから、反射鏡を通過した出力パワー  $P_o$  は、共振器に蓄積された光エネルギーと式(27)より求められる反射鏡を通過するエネルギーの損失レート  $v_g \alpha_m = 1/\tau_m$  から以下のように得られる。

$$P_o = v_g \alpha_m N_p h\nu V_p \quad (31)$$

ここで、 $h\nu$  は光のエネルギー、 $V_p$  は共振器体積である。式(31)、(30)、(27)と  $\Gamma = V/V_p$  を用いると光出力は以下のように示される。

$$P_o = \eta_i \frac{\alpha_m}{\alpha_i + \alpha_m} \frac{h\nu}{q} (I - I_{th}) \quad (I > I_{th}) \quad (32)$$

レーザ光は、ミラーを介して出力されるためミラーの反射率に依存する。注

入された電子数に対して、放出される光子数の割合を外部微分量子効率  $\eta_d$  とい  
い、次の式で表わされる。

$$\eta_d = \frac{\eta_i \alpha_m}{\alpha_i + \alpha_m} \quad (33)$$

また、実験により外部微分量子効率を求める場合、閾値電流以降のレーザ動  
作時のスロープ効率  $\Delta P_o / \Delta I$  を測定し、 $\Delta P_o$  に  $\lambda/hc$  を、 $\Delta I$  に  $1/q$  を掛けることで、  
次式のように、素子に注入した電子数の変化に対する素子から取り出された光  
子数の変化の割合が得られる。

$$\eta_d = \frac{q\lambda}{hc} \frac{dP_o}{dI} \quad (I > I_{th}) \quad (34)$$

ここで、 $c$  は光速、 $h$  はプランク定数、 $\lambda$  は光の波長である。式(32)は次のよう  
に簡略化できる。

$$P_o = \eta_d \frac{h\nu}{q} (I - I_{th}) = \eta_d \frac{h\lambda}{qc} (I - I_{th}) \quad (I > I_{th}) \quad (35)$$

閾値電流を下げるためには反射率を高める必要がある。一方で、外部微分量  
子効率を高くして高出力化するには反射率を下げる必要がある。つまり、反射  
率の観点からは、高出力化と低閾値化はトレードオフの関係である。言い換え  
ると、必要な光出力に対して最適な反射率が存在し、その値は内部損失にも影  
響する。少なくとも、片側の反射率を最大限に高めることで、片方から得られ  
る出力を最大化できる。特に、面発光レーザでは多層膜のペア数を変更するこ  
とで容易に反射率を変えられることは利点の一つである。

以下に、必要パワー  $P_{o1}$  を得るために必要な電流値を次式に示す。

$$I \cong \frac{qP_{o1}(\alpha_i + \alpha_m)}{F_1 \eta_i h\nu \alpha_m} + I_{th} \quad (36)$$

ここで、右辺第 1 項は必要パワー $P_{01}$ を得るために、閾値以降に必要となる過剰電流である。因子  $F_1$  は全出力のうちで反射鏡 1 から得られる割合<sup>14)</sup>である。次節 2-7 にて、所望のパワーを得るために必要電流が最小となる多層膜の反射率を選択すればよい。

## 2-7. 層厚の作製誤差と閾値電流の関係および高出力化に向けた反射率の選択

本研究では、電流狭窄層としてイントラキャビティ構造も兼ね備えた、ITO を用いる。表 2-1 に共振器の材料となる ITO、p-(Al)GaN、n-GaN の吸収係数<sup>15,16)</sup>を示す。ITO 層の吸収による損失を最小限に抑えるためには、ITO 層をできるだけ薄膜化し、かつ光強度定在波の節に配置する必要がある。本グループによる以前の報告<sup>17)</sup>より、ITO 膜厚として、大幅な抵抗増加が生じない 20 nm が適切であると報告されており、その値を使用した。設計上、ITO 膜の中心は定在波の節に、活性層の中心は腹に配置されるが、実際には作製上の誤差が生じる。作製誤差により各位置関係に差異が生じると、活性層と光強度定在波とのオーバーラップ量の減少により、縦方向の光閉じ込め係数は減少する。さらに、ITO 層と光強度定在波とのオーバーラップが増加すると、光吸収による内部損失が急増する。光強度定在波と ITO 層、p-(Al)GaN、n-GaN の各層の位置関係が設計値に対して、差異が生じた場合の縦方向光閉じ込め係数と内部損失を図 2-6 に示す。さらに、これらの値を用いて求めた、上記差異と閾値電流の関係を図 2-7 に示す。 $\pm 10$  nm 以上の差異が生じると、閾値電流が大幅に増加することが分かる。この結果から、閾値電流の上昇を抑えるためには、共振器長約 1  $\mu\text{m}$  に対して 10 nm 以内、すなわち $\pm 1\%$ 以内に差異量を抑える必要がある。このためには、半導体結晶成長装置の酸化物蒸着装置の成長・蒸着レートを十分制御するとともに、実際の構造が設計からどれだけの差異を有しているのかを正しく見積もるための精密な測定手法の確立も重要である。この差異量を上記要求範囲内に制御する具体的な手法は第 3 章で述べる。

表 2-1 各層の吸収係数<sup>15,16)</sup>

|                         | ITO  | p-(Al)GaN | n-GaN |
|-------------------------|------|-----------|-------|
| 吸収係数[cm <sup>-1</sup> ] | 2000 | 100       | 10    |

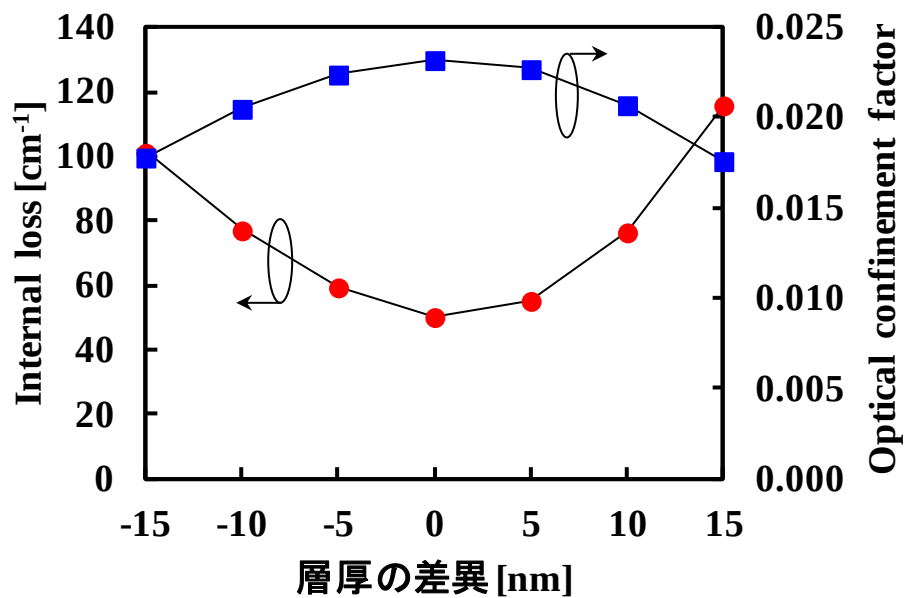


図 2-6 設計膜厚からの差異が生じた場合の縦方向光閉じ込め係数と内部損失

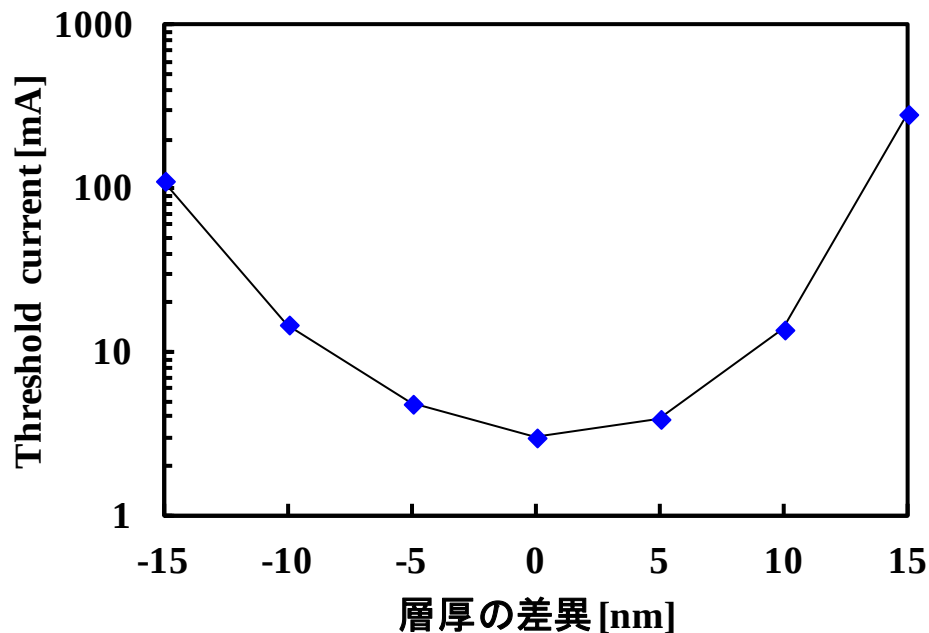


図 2-7 差異量と閾値電流の関係

次に、本研究で用いる反射率を理論検討から決定する。上部誘電体反射鏡には屈折率差 40%が得られ、かつ層厚制御性の良好な  $\text{Nb}_2\text{O}_5/\text{SiO}_2$  を選択する。8 ペアにすることで、波長 410 nm において理論上 99.96%の反射率が得られる。一方、下部半導体反射鏡には GaInN 活性層のバンドギャップエネルギーよりも大きい材料かつ、比較的大きな屈折率差が得られ、かつ格子整合する材料の組み合わせである  $\text{Al}_{0.82}\text{In}_{0.12}\text{N}$  と GaN を用いる<sup>18)</sup>。波長 410 nm において、40 ペア  $\text{Al}_{0.82}\text{In}_{0.12}\text{N}/\text{GaN}$  の反射率は 99.7%である。光の出射面ではない方の反射率を上述の二通りに固定した場合に、所望の光出力を得るために必要な電流値の上部および下部の反射率依存性を図 2-8 に示す。今回、閾値電流成分は発光再結合のみ考慮しており、発熱による悪影響も含まれていない。式(36)に関して、用いたパラメータを表 2-2 に示す<sup>14, 19)</sup>。図 2-8 より、必要な光出力によって、最小となる電流値が異なり、最適な反射率が存在することが分かる。また、低反射率側から光を取り出すことで、高出力が得られつつ必要な電流値も減少する。したがって、高反射率側には誘電体 DBR で可能な 99.96%を利用し、所望の光出力を得るために、半導体 DBR 側の反射率を選択する、という設計方針となる。出射側である半導体 DBR 側の反射率を 99.7%に設定した場合、6.5 mA で約 3 mW の

光出力が得られる可能性がある。

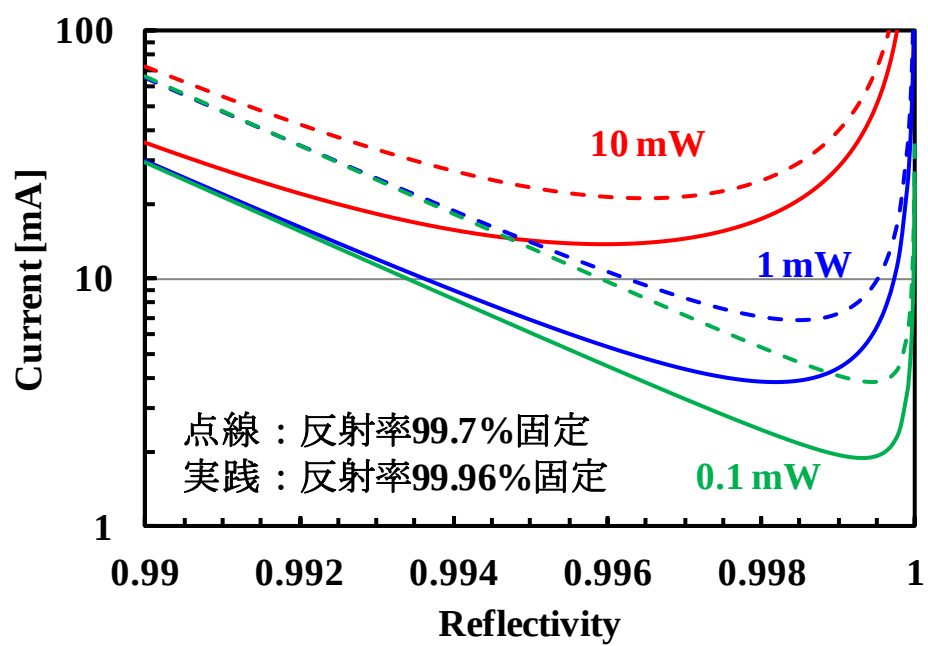


図 2-8 所望の光出力を得るために必要な電流値の出射側反射率依存性

表 2-2 計算に用いた各パラメータ値<sup>14, 19)</sup>

|                  |                                                    |
|------------------|----------------------------------------------------|
| $q$              | $1.602 \times 10^{-19} \text{ C}$                  |
| $P_{01}$         | 0.1、1、10 mW                                        |
| $\alpha_i$       | $30 \text{ cm}^{-1}$                               |
| $\eta_i^{12)}$   | 89%                                                |
| $h$              | $6.626 \times 10^{-34} \text{ m}^2\text{kgs}^{-1}$ |
| $c$              | $2.998 \times 10^8 \text{ ms}^{-1}$                |
| $\lambda$        | 410 nm                                             |
| $N_w$            | 5                                                  |
| $V_1$            | $1.508 \times 10^{-13} \text{ cm}^3$               |
| $B^{19)}$        | $2.000 \times 10^{-11} \text{ cm}^3\text{s}^{-1}$  |
| $N_{tr}^{14)}$   | $8.0 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$               |
| $\Gamma_1$       | 2.8%                                               |
| $g_0^{14)}$      | $2400 \text{ cm}^{-1}$                             |
| $L_{\text{eff}}$ | 945 nm                                             |
| $R_1$            | 0.9996                                             |
| $R_2$            | 0.9970                                             |

## 2-8. モード利得と閾値電流

次に、活性層の最適井戸数を把握するために、井戸数を変化させた場合のモード利得  $\Gamma g_{\text{th}}$  の注入電流依存性を図 2-9 に示す。図 2-9 は式(23)を用いて算出され、使用したパラメータを表 2-3 に示す。今回、計算に使用した値は、一般的に報告されている窒化物半導体面発光レーザの数値を使用している。また、横方向の光閉じ込め係数は、1 に設定している。いま、共振器損失が  $20 \text{ cm}^{-1}$  程度と低い場合を仮定すると、必要なモード利得も同じ値になり、量子井戸数が 2 で最も低い閾値電流が得られる。一方、共振器損失が  $100 \text{ cm}^{-1}$  の様なデバイスでは、量子井戸数が 10 以上で閾値電流が最低となる。この様に、デバイスの共振器損失によって、最低閾値をもたらす最適な井戸数が異なることがわかる。第 4 章では、基本構造(5QWs)と周期利得構造(10QWs)の実験データを理論値と比較

しながら議論する。

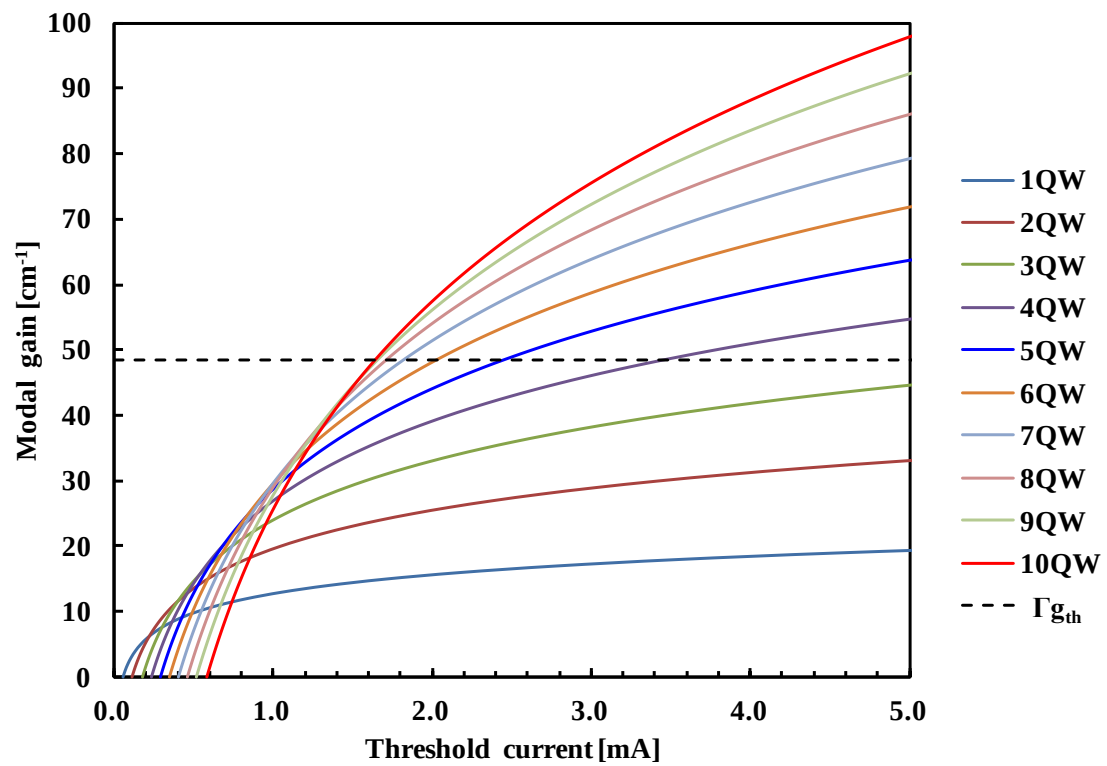


図 2-9 量子井戸数を変化させた場合のモード利得対閾値電流の関係

表 2-3 計算に用いた各パラメータ値<sup>14, 19)</sup>

|                  |               |                                                     |
|------------------|---------------|-----------------------------------------------------|
| $q$              |               | $1.602 \times 10^{-19} \text{ C}$                   |
| $N_w$            |               | 1~10                                                |
| $V_1$            |               | $1.508 \times 10^{-13} \text{ cm}^3$                |
| $N_{tr}$         |               | $8.0 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$                |
| $\eta_i$         |               | 0.89                                                |
| $\Gamma_1$       | $\Gamma_t$    | 1                                                   |
|                  | $\Gamma_\ell$ | 0.0232                                              |
| $g_0$            |               | $2400 \text{ cm}^{-1}$                              |
| $B$              |               | $2.000 \times 10^{-11} \text{ cm}^3 \text{ s}^{-1}$ |
| $L_{\text{eff}}$ |               | 945 nm                                              |
| $R_1$            |               | 0.9996                                              |
| $R_2$            |               | 0.9970                                              |
| $\alpha_i$       |               | 30                                                  |
| $\alpha_m$       |               | 18.5                                                |

## 2-9. 窒化物半導体面発光レーザのデチューニング

窒化物半導体面発光レーザの高温動作や高出力動作を必要とするアプリケーションへの応用にむけて、デチューニングの導入を検討する。デチューニングとは、素子温度上昇によるゲインスペクトルのレッドシフトを考慮し、高温動作時、あるいは高出力動作時などの素子温度が高い状況下において、利得波長と共振波長が一致するように、室温時には意図的にそれらの波長が一致しない(デチューニング)状況にさせて高温・高出力動作時における特性の改善を目指す設計方法である<sup>20-22)</sup>。図 2-10(a)、(b)に、Essential Macleod (シミュレータ)により算出した反射スペクトルの温度依存性とその共振波長シフト量をそれぞれ示す。計算に使用した構造は、上部  $\text{Nb}_2\text{O}_5/\text{SiO}_2$  8 ペア DBR と下部  $\text{AlInN}/\text{GaN}$  40 ペア DBR で構成された 4  $\lambda$  共振器であり、 $\text{AlInN}/\text{GaN}$  の屈折率分散は、Aschenbrenner ら<sup>23)</sup>の値を参照した。温度は 20°C から 100°C まで 20°C 間隔で上昇させた。温度上昇によりレッドシフトを確認し、図 2-10(b)より、共振波長のレッドシフト

量を見積もると、 $0.010 \text{ nm}/^\circ\text{C}$  となった。同様に、図 2-11(a)、(b)に SiLENSe (シミュレータ) により算出した GaInN 活性層のゲインスペクトル温度依存性とそのピークシフト量をそれぞれ示す。計算では、GaInN(3 nm)/GaN(6 nm)の 5 周期活性層を  $27^\circ\text{C}$  から  $127^\circ\text{C}$  まで  $20^\circ\text{C}$  間隔で温度上昇させた。温度上昇により、ゲインスペクトルのレッドシフトとゲインの低下を確認した。図 2-11(b)より、ゲインスペクトルは  $0.062 \text{ nm}/^\circ\text{C}$  と見積もられた。

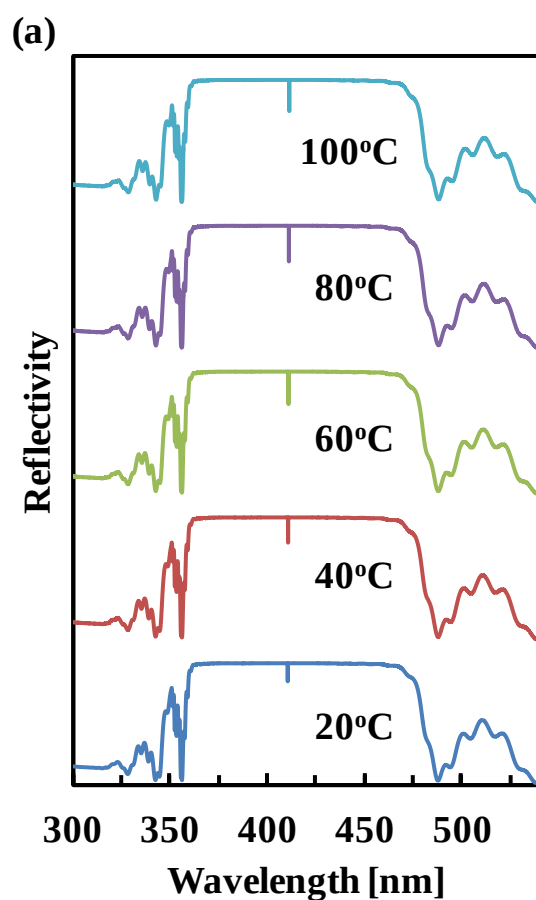


図 2-10(a) シミュレーションによる反射スペクトルの温度依存性

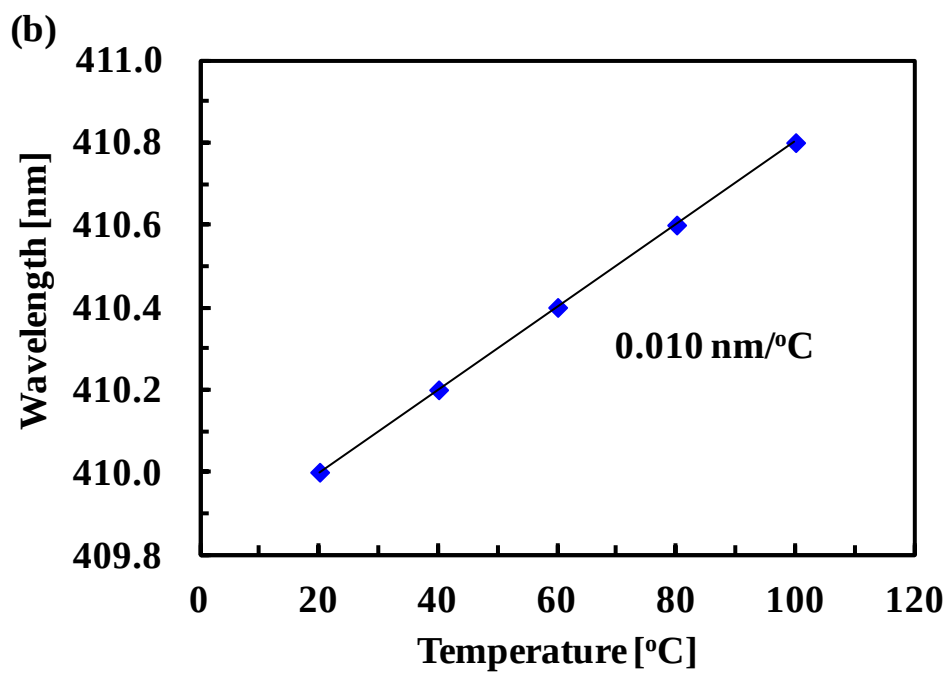


図 2-10(b) シミュレーションによる共振波長の温度依存性

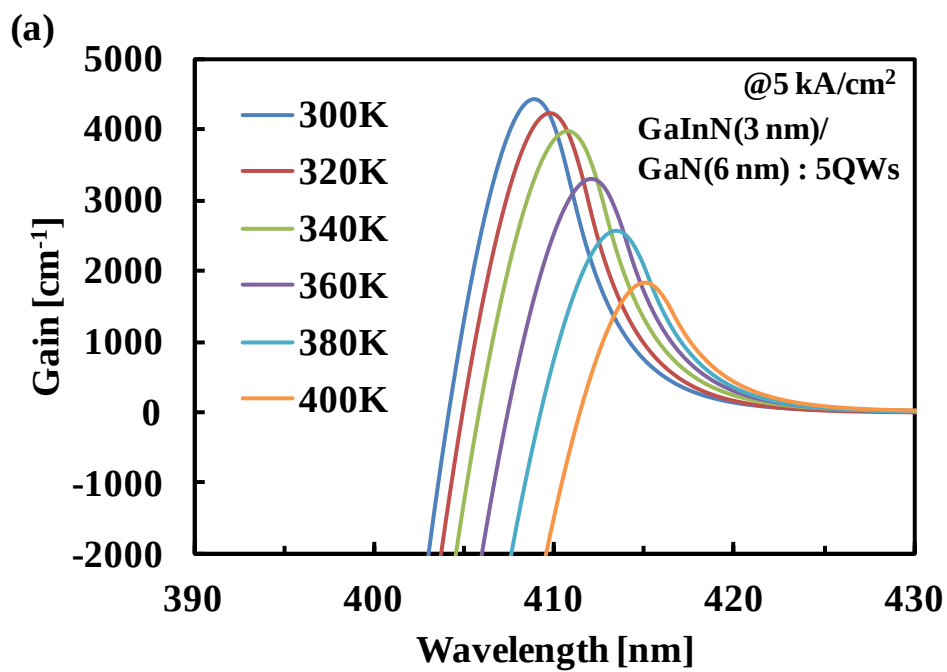


図 2-11(a) シミュレーションによるゲインスペクトルの温度依存性

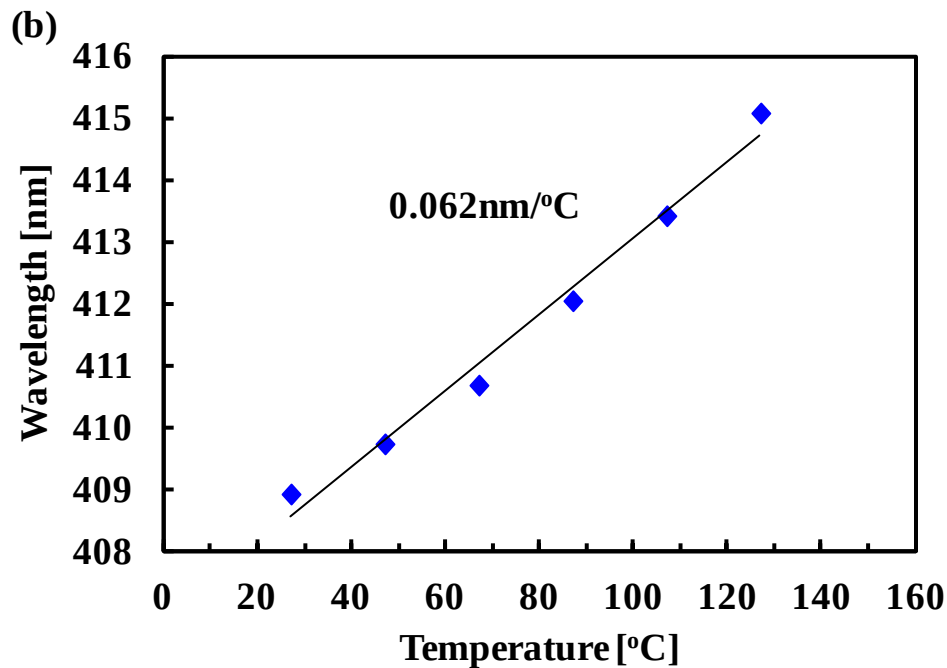


図 2-11 シミュレーションによるマキシマムゲインを与える波長の温度依存性

続いて、図 2-12 にゲインスペクトルと各共振波長の位置を示す。デチューニング量は以下のように定義した。

$$\text{デチューニング量} = \text{共振波長} - \text{ゲインスペクトル}$$

デチューニング量がマイナスである①の場合、室温で既にゲインスペクトルが長波長側に位置しているため、発振の可能性が低く、仮に発振しても温度が上昇すると、ゲインスペクトルのレッドシフトにより発振しなくなる。計算により、温度上昇によるレッドシフトは、共振波長よりもゲインスペクトルの方が大きいため、徐々に二つの波長差は大きくなる。次に、②のデチューニング量が 0 の場合、室温で二つの波長は一致しているため、室温では最も低い閾値電流が得られる。しかし、温度上昇によりゲインスペクトルがレッドシフトすると高温では高い閾値電流となる。最後に、デチューニング量がプラスの③の場合、室温では閾値電流が②の状況に比べ増大するものの、共振波長におけるゲインは高温では上昇するため、より発振しやすい状況となる。以上により、

良好な温度特性を得るためには、プラスのデチューニング設計が必要である。1300 nm 帯の赤外面発光レーザでは、環境温度 132°C の動作で 32 nm のデチューニング量となっている<sup>20)</sup>。一方、窒化物半導体のゲインスペクトルのシフトは 0.062°C であり、赤外面発光レーザと比較すると 1/10 程度であるため、デチューニング量を 0、+4、+8 nm として検討する。

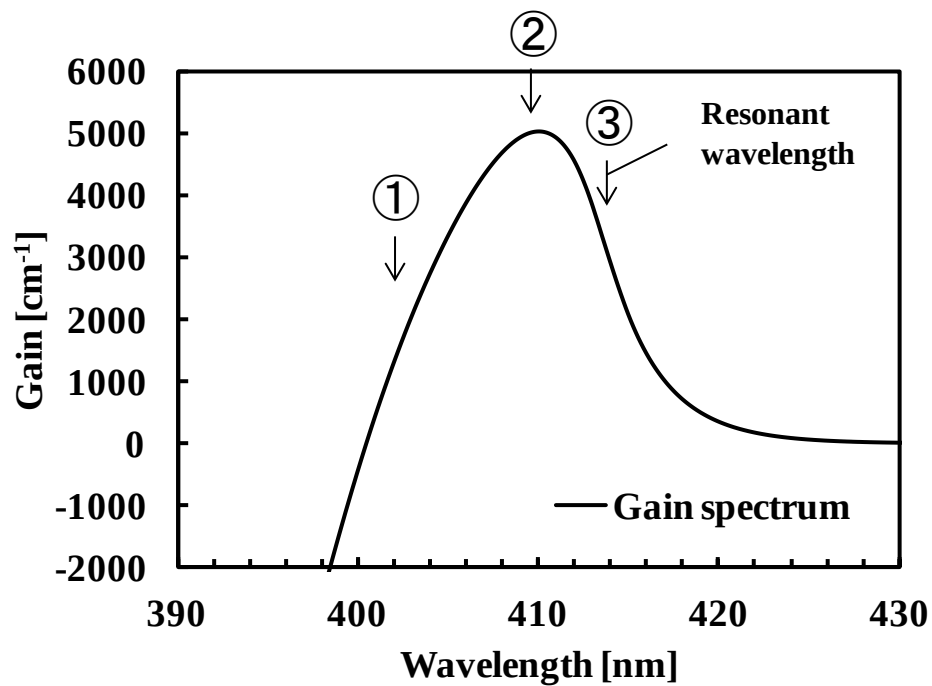


図 2-12 ゲインスペクトルと各共振波長の位置

次に、共振波長とゲインスペクトルの温度上昇によるレッドシフト量から、各デチューニング量についてマキシマムゲインとなる温度を見積もる。図 2-13 にシミュレーションによるマキシマムゲインと各デチューニング量のゲインの温度依存性を示す。デチューニング量が増加するにつれて、高温でのゲインの上昇が確認されるため、高温での発振が期待できる。そして、デチューニングが 0 nm の場合では、20°C でゲインが最大となり、+4 nm では 87°C、+8 nm では 147°C となった。したがって、このようなデチューニングを設けることにより、100°C 以上の温度においても、閾値電流の上昇が抑制され、レーザ発振の可能性があると考えられる。

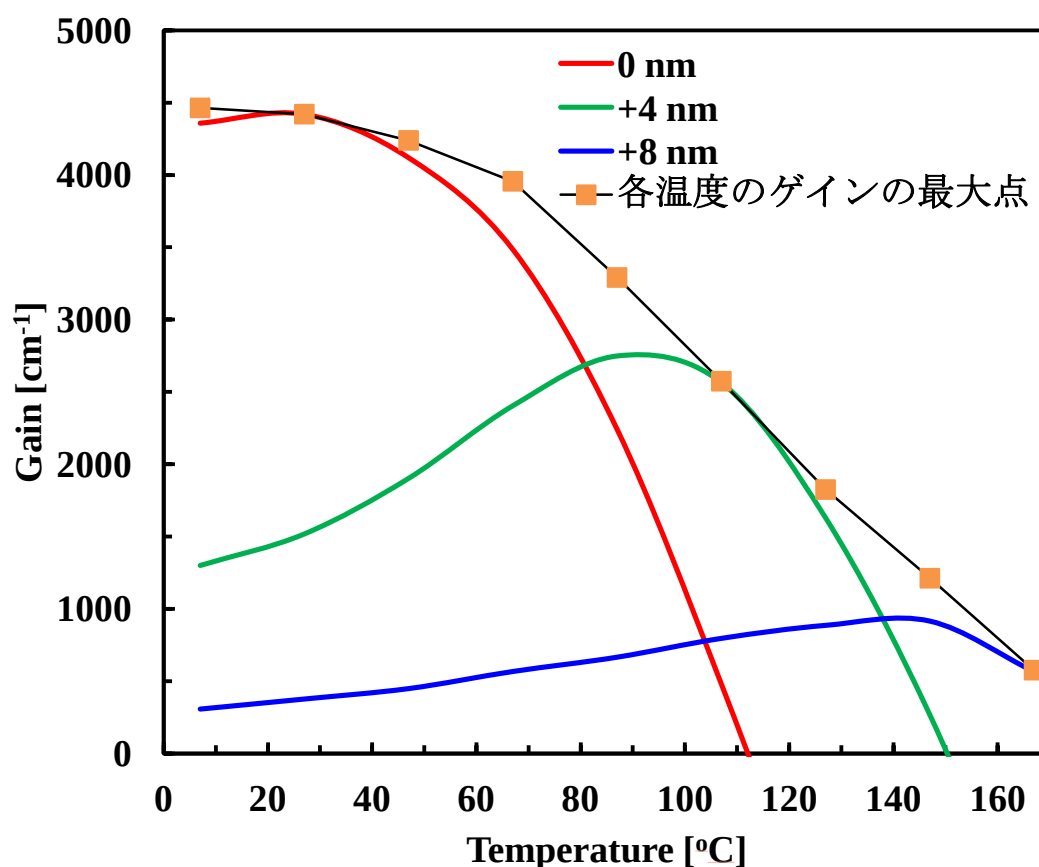


図 2-13 各デチューニング量の温度上昇による波長シフトの関係

## 2-10. まとめ

本章では、窒化物半導体面発光レーザの室温連続発振および高性能化に向けて理論検討を行った。以下に、本検討により得られた知見をまとめる。

- ・面発光レーザにおいて、層厚の制御は閾値電流に大いに影響する。活性層は電界強度の腹に配置し、吸収の大きい層は節に配置する。閾値電流増加を抑制するためには、 $\pm 1\%$ 以内の差異を制御する必要がある。また、高出力を得るための設計として、低反射率側からの光出射を選択する必要がある。本研究で用いる  $\text{Nb}_2\text{O}_5/\text{SiO}_2$  および  $\text{AlInN}/\text{GaN}$  反射鏡では、高反射率を得にくい方の 40 ペア  $\text{AlInN}/\text{GaN}$  反射鏡からの光取出しを検討する。

- ・量子井戸数を変化させた場合のモード利得と閾値電流の関係から、共振器損失の値により、閾値電流が最低となる最適な井戸数が異なる。損失が小さい場合は、井戸数を少なく設計し、反対に損失が大きい場合は井戸数を増やす必要がある。

- ・デチューニング量の増加に伴い、利得波長のレッドシフト量が必要となるため、閾値電流が増加すると考えられる。しかしながら、デチューニング量+8 nm の場合、 $100^\circ\text{C}$  以上での高温の発振も期待される。

## 参考文献

- 1). M. Kneissl, D. P. Bour, N. M. Johnson, L. T. Romano, B. S. Krusor, R. Donaldson, J. Walker, and C. Dunnrowicz, Appl. Phys. Lett. **72**, 1539 (1998).
- 2). F. Koyama, Y. Suematsu, S. Arai, and T. Tawee, IEEE J. Quantum Electron. **QE-19**, 1042 (1983).
- 3). G. Frankowsy, F. Steuber, V. Harle, F. Scholz, and A. Hangleiter, Appl. Phys. Lett. **68**, 3746 (1996).
- 4). Y. C. Yeo, T. C. Chong, M. F. Li, and W. J. Fan, J. Appl. Phys. **84**, 1813 (1998).
- 5). S. W. Corzine, R. S. Geels, R. H. Yan, J. W. Scott, L. A. Coldren, and P. L. Gourley, IEEE Photonics Technol. Lett. **1**, 52 (1989).
- 6). M. Y. A. Raja, S. R. J. Brueck, M. Osinski, C. F. Schaus, J. G. McInerney, T. M. Brennan, and B. E. Hammons, Electron. Lett. **24**, 1140 (1998).
- 7). S. Rapp. and K. Streubel, Mater. Sci. Eng. B **44**, 373 (1997).
- 8). Y. Sun, Y. Ning, T. Li, L. Qin, C. Yan, and L. Wang, J. Lumin. **119**, 556 (2006).
- 9). T. Wunderer, J. E. Northrup, Z. Yang, M. Teepe, A. Strittmatter, N. M. Johnson, P. Rottella, and M. Wraback, Appl. Phys. Lett. **99**, 201109 (2011).
- 10). R. Charash, P. P. Maaskant, L. Lewis, C. McAleese, M. J. Kappers, C. J. Humphreys, and B. Corbett, Appl. Phys. Lett. **95**, 151103 (2009).
- 11). J. -Y. Zhang, L. -E. Cai, B. -P. Zhang, X. -L. Hu, F. Jiang, J. -Z. Yu, and Q. -M. Wang, Appl Phys. Lett. **95**, 161110 (2009).
- 12). J. Iveland, L. Martinelli, J. Peretti, J. S. Speck, and C. Weisbuch, Phys. Rev. Lett. **110**, 177406 (2013).
- 13). X. Meng, L. Wang, Z. Hao, Y. Luo, C. Sun, Y. Han. B. Xiong, J. Wang, and H. Li, Appl. Phys. Lett. **108**, 013501 (2016).
- 14). H. Y. Ryu, K. H. Ha, J. K. Son, S. N. Lee, H. S. Paek, T. Jang, Y. J. Sung, K. S. Kim, H. K. Kim, Y. Park, and O. H. Nam, Appl. Phys. Lett. **93**, 011105 (2008).
- 15). J. T. Leonard, D. A. Cohen, B. P. Yonkee, R. M. Farrell, T. Margalith, S. Lee, S. P. DenBaars, J. S. Speck, and S. Nakamura, Appl. Phys. Lett. **107**, 091105 (2015).
- 16). M. Kuramoto, C. Sasaoka, N. Futagawa, M. Nido, and A. A. Yamaguchi, Phys. Stat. sol. A **192**, 329 (2002).
- 17). 堀川 航佑、しきい値低減に向けた窒化物半導体面発光レーザに関する研究、名城大学大学院修士学位論文 (2016).

- 18). Y. Kozuka, K. Ikeyama, T. Yasuda, T. Takeuchi, S. Kamiyama, M. Iwaya, and I. Akasaki, MRS Proc. **1736**, 1 (2015).
- 19). Y. C. Shen, G. O. Mueller, S. Watanabe, N. F. Gardner, A. Munkholm, and M. R. Krames, Appl. Phys. Lett. **91**, 141101 (2007).
- 20). J. Piprek, M. Mehta, and V. Jayaraman, SPIE Proc., Physics and Simulation of Optoelectronic Devices XII, **5349**, 175 (2004).
- 21). E. S. Bjorlin, J. Geske, M. Mehta, J. Piprek, and J. E. Bowers, IEEE Photon. Technol. Lett. **17**, 944 (2005).
- 22). A. Mircea, A. Caliman, V. Iakovlev, A. Mereuta, G. Suruceanu, C. –A. Berseth, P. Royo, A. Syrbu, and E. Kapon, IEEE Photon. Technol. Lett. **19**, 121 (2007).
- 23). T. Aschenbrenner, H. Dartsch, C. Kruse, M. Anastasescu, M. Stoica, M. Gartner, A. Pretorius, A. Rosenauer, T. Wagner, and D. Hommel, J. Appl. Phys. **108**, 063533 (2010).

## 第3章 窒化物半導体面発光レーザの設計と作製

### 3-1. はじめに

本章では、第2章の理論検討で得られた層厚の制御指針と反射率設計指針をもとに窒化物半導体面発光レーザを作製し、その層厚を高い精度で見積もることで室温連続発振を得ることを目的とする。面発光レーザの設計において、共振器内の光強度定在波の腹節に活性層とITO層をそれぞれ適切に配置するとともに、共振波長と利得波長もそれぞれ一致させなければ、レーザとして機能しない。また、高い発光出力を得るためには、反射率の低いDBR側から光を取り出す必要がある。

ここでは、結晶成長後、ITO層蒸着後、スペーサ層蒸着後の各々のウェハにおける反射スペクトルにより共振波長を確認し、設計層厚からの差異を $\pm 1\%$ 以下に制御する制御方法について述べる。また、上部誘電体反射鏡よりも、低い反射率になる下部AlInN/GaN半導体DBRからの光取出しを選択することで、高い光出力を目指す。

### 3-2 窒化物半導体面発光レーザ構造

本研究で用いる窒化物半導体面発光レーザの概略図を図3-1に示す。共振波長410 nm設計として、上下DBR間の光学膜厚は $4\lambda$ とした。下部DBRは、40ペア $\text{Al}_{0.82}\text{In}_{0.18}\text{N}/\text{GaN}$ 半導体DBRである。AlInN層の成長温度は $815^\circ\text{C}$ 、In/Al比は1.5、成長レートは $0.5\text{ }\mu\text{m}/\text{h}$ の高速成長<sup>1)</sup>を用いた。AlInN層とGaN層の膜厚は共に約45 nmであり、下部DBRの総膜厚は約 $3.6\text{ }\mu\text{m}$ である。下部DBRの成長後、400 nmのn-GaN、5QWのGaInN/GaN活性層を順に成長した。活性層の構造は、3 nmのGaInN井戸層と6 nmのGaNバリア層を5周期積層した構造である。その後、20 nmのp-AlGaN電子ブロック層、60 nmのp-GaN、10 nmの $\text{p}^+$ -GaNコンタクト層を順に成長した。電流狭窄構造は厚さ20 nmのITOと、電流注入のための $8\text{ }\mu\text{m}$ 径の開口部を有する、厚さ10 nmの $\text{SiO}_2$ により形成された。ゆえに、電流注入により利得を生じる領域の直径は $8\text{ }\mu\text{m}$ 径である。そして、 $4\lambda$ 共振

器長形成に向けた膜厚調整用のスペーサ層として、五酸化ニオブ( $\text{Nb}_2\text{O}_5$ )を用いた。共振器形成後、マグネトロンスパッタリング装置により、8 ペア  $\text{Nb}_2\text{O}_5/\text{SiO}_2$  の上部 DBR を蒸着し、n 電極と PAD 電極は Cr/Ni/Au で形成した。

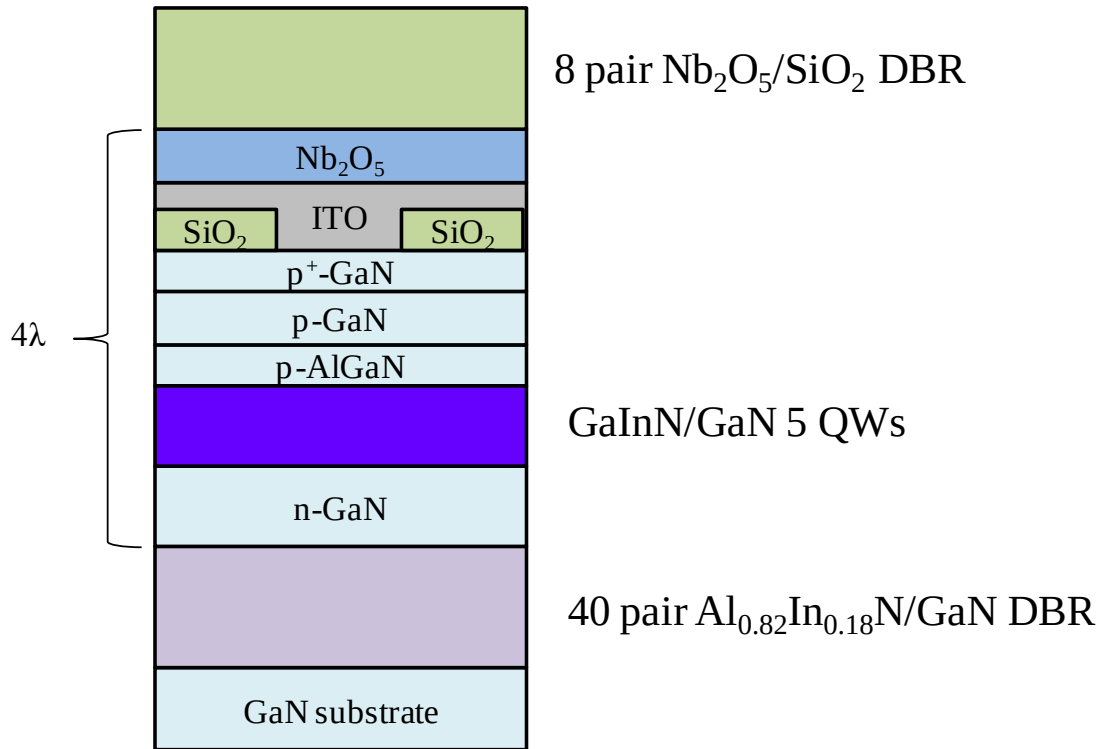


図 3-1 窒化物半導体面発光レーザの概略図

設計共振波長が 410 nm である  $4\lambda$  共振器面発光レーザの光強度定在波分布と各層の屈折率分布を図 3-2 に示す。特に、緻密な配置制御を必要とする層は活性層と ITO 層である。活性層中央を光強度定在波の  $3\lambda$  の位置に配置し、共振器の光学的距離が  $3.625\lambda$  に到達した時点で結晶成長を終了する。その後、膜厚 20 nm(光学的距離  $0.175\lambda$ )の ITO 層を堆積することで、ITO 膜の中央が  $3.75\lambda$  の節に配置され、吸収による損失を最小限にすることができる。その後、共振器長を  $4\lambda$  に合わせるために  $\text{Nb}_2\text{O}_5$  スペーサ層を導入するが、設計値通りに層厚が堆積されていれば必要な膜厚は 32.8 nm となる。図 3-3(a)、(b)にシミュレーションによる各工程の反射率スペクトルと実験による反射率スペクトルをそれぞれ示す。各工程は、結晶成長後、ITO 層蒸着後、そしてスペーサ層蒸着後の測定結果となっている。結晶成長後および ITO 層蒸着後の反射率スペクトルでは、設計通り層厚が制御されていれば波長 400 nm の位置に共振ディップが観測される。その

後、スペーサ層を 32.8 nm 蒸着することで、共振波長であるディップが波長 410 nm において確認される。このディップと利得波長である PL スペクトル、上下 DBR のストップバンド中心付近を一致させることで、最も損失が少なく、最も利得が高い状態で光が共振しレーザ発振が得られる。

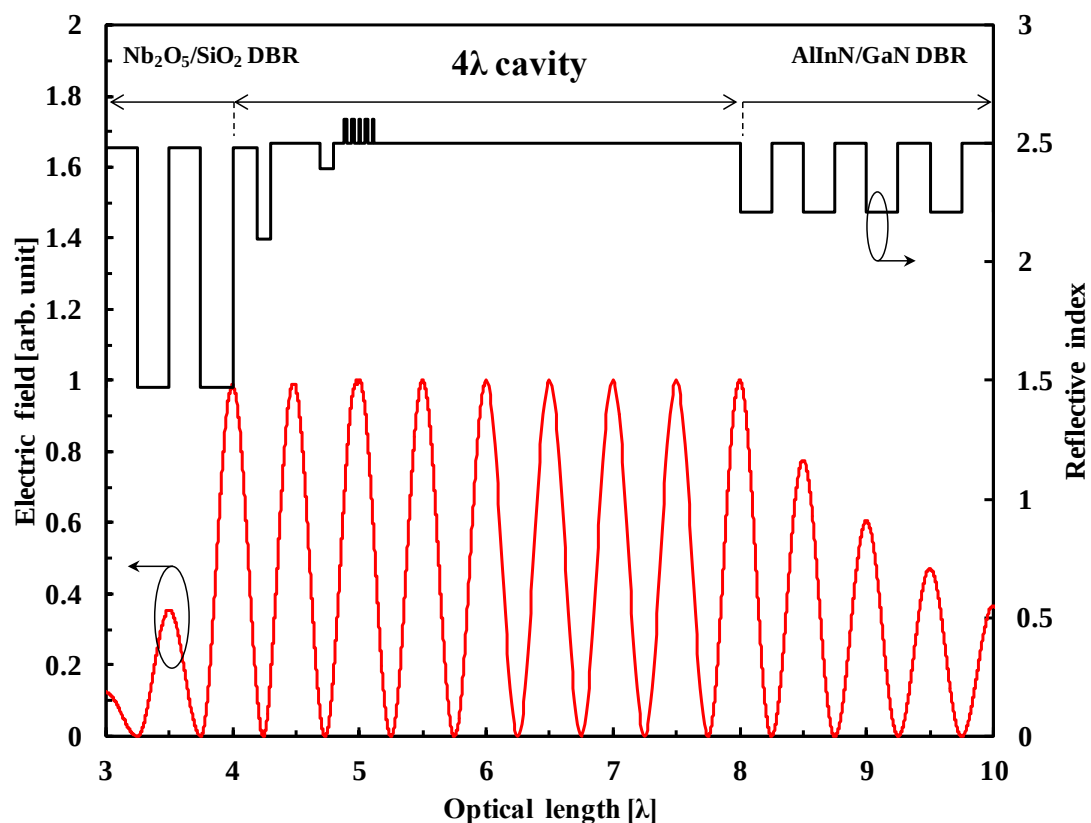


図 3-2 4λ 共振器の電界分布と屈折率分布

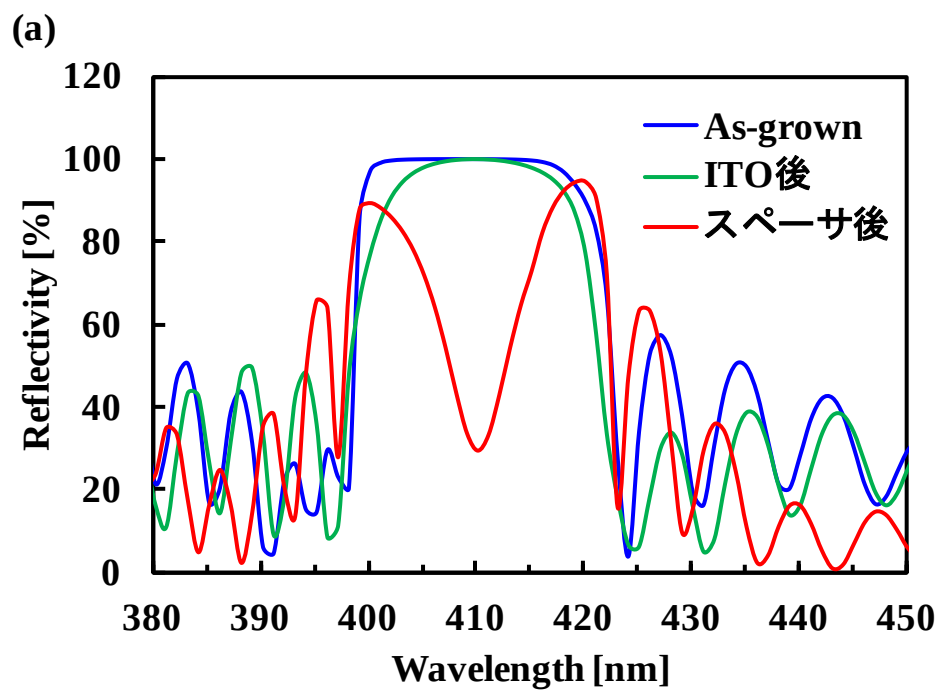


図 3-3(a) シミュレーションによる各工程後の反射スペクトル

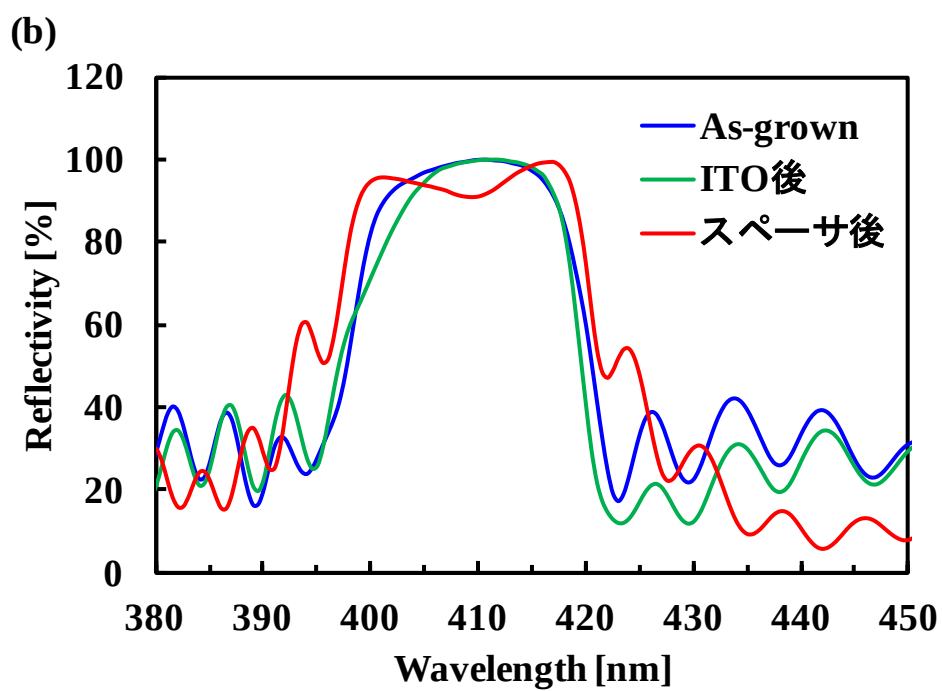


図 3-3(b) 各工程後の反射率結果

### 3-3. イントラキャビティ構造を有する窒化物半導体面発光レーザの作製

本研究で用いる、ITO イントラキャビティ構造を有する窒化物半導体面発光レーザの作製工程を以下に記す。

#### 3-3-1. p-GaN 活性化アニール

p-GaN にはドーパメントとして Mg がドーピングされているが、結晶成長した直後では Mg が水素原子(H)と結合しているためアクセプタとして機能していない。そこで、アニール装置を用いて、窒素雰囲気中で熱処理を行うことにより Mg と H の結合を切り、Mg をアクセプタとして機能させ GaN を p 型化させる。表 3-1 に p-GaN 活性化アニールの工程を示す。

表 3-1 p-GaN 活性化アニールの工程

|   | 工程            | 使用装置   | 条件                                                    |
|---|---------------|--------|-------------------------------------------------------|
| 1 | 洗浄            | US 洗浄機 | リムーバー : 5 min                                         |
|   |               | ドラフター  | 水洗 : 5 L                                              |
|   |               |        | 王水 : 5 min                                            |
|   |               |        | 水洗 : 5 L                                              |
|   |               |        | 硫酸+過酸化水素水(硫酸過水) : 5 min                               |
|   |               |        | 水洗 : 5 L                                              |
|   |               |        | フッ酸 : 5 min                                           |
|   |               |        | 水洗 : 10 L                                             |
| 2 | p-GaN 活性化アニール | アニール装置 | 雰囲気ガス : N <sub>2</sub><br>保持温度 : 500°C<br>時間 : 15 min |
| 3 | 洗浄            | US 洗浄機 | リムーバー : 5 min                                         |
|   |               | ドラフター  | 水洗 : 5 L                                              |
|   |               |        | 王水 : 5 min                                            |
|   |               |        | 水洗 : 5 L                                              |
|   |               |        | 硫酸過水 : 5 min                                          |
|   |               |        | 水洗 : 5 L                                              |

| 工程   | 使用装置  | 条件        |
|------|-------|-----------|
| 3 洗浄 | ドラフター | フッ酸：5 min |
|      |       | 水洗：10 L   |

### 3-3-2. 素子分離(n-GaN 露出)

結晶成長後の構造は、GaN 基板上全面に n-GaN、活性層、p-GaN 等、成長されているため、活性層に電流を供給するには、素子分離をするとともに n-GaN を露出する必要がある。p-GaN 活性化アニール後、フォトリソグラフィーの工程を経て、反応性イオンエッチング(Reactive Ion Etching : RIE)を用いて素子分離を行う。本研究に用いた装置は誘導結合プラズマ型(Inductive Coupled Plasma : ICP-RIE)である。表 3-2 に素子分離の(n-GaN 露出)の工程を示す。

表 3-2 素子分離の工程

| 工程             | 使用装置     | 条件                                                            |
|----------------|----------|---------------------------------------------------------------|
| 1 フトリソグラフィー    | スピコーター   | 界面活性剤：OAP (東京応化工業株式会社)                                        |
|                |          | レジスト溶液：AZ5200NJ (AZ エレクトロニックマテリアルズ株式会社)                       |
|                | ベーク処理装置  | 温度：110°C<br>ベーク時間：90 sec                                      |
|                | マスクアライナー | 露光時間：2 sec                                                    |
|                | ベーク処理装置  | 温度：110°C<br>ベーク時間：90 sec                                      |
|                | マスクアライナー | 露光時間：170 sec<br>現像時間：1 min                                    |
| 2 洗浄           | ドラフター    | 水洗：5 L                                                        |
| 3 200 nm エッチング | ICP 装置   | 雰囲気ガス：塩素(Cl <sub>2</sub> )<br>エッチング出力：150 W<br>エッチング時間：65 sec |
| 4 マスク剥離        | US 洗浄機   | リムーバー：5 min                                                   |
|                | ドラフター    | 水洗：5 L                                                        |
|                |          | 王水：5 min                                                      |
|                |          | 水洗：5 L                                                        |
|                |          | 硫酸過水：5 min                                                    |
|                |          | 水洗：5 L                                                        |
|                |          | フッ酸：5 min                                                     |
|                |          | 水洗：10 L                                                       |

### 3-3-3. 絶縁層蒸着

素子毎の絶縁を取るために、絶縁層として  $\text{SiO}_2$  を堆積させる。側壁を露出させないように、メサ周りの絶縁層はマグネトロンスパッタリング装置により、エッチング量よりも多い 250 nm 蒸着される。表 3-3 に絶縁層蒸着の工程を示す。

表 3-3 絶縁層蒸着の工程

| 工程                          | 使用装置            | 条件                                                                  |
|-----------------------------|-----------------|---------------------------------------------------------------------|
| 1 フォトリソグラフィ                 | スピンコーター         | レジスト溶液：ZPN1150-90<br>(日本ゼオン株式会社)                                    |
|                             | ベーク処理装置         | 温度：110°C<br>ベーク時間：5 min                                             |
|                             | マスクアライナー        | 露光時間：3 sec                                                          |
|                             | ベーク処理装置         | 温度：110°C<br>ベーク時間：5 min                                             |
|                             |                 | 現像時間：50 sec                                                         |
| 2 洗浄                        | ドラフター           | 水洗：5 L                                                              |
| 3 $\text{SiO}_2$ 蒸着(250 nm) | マグネトロンスパッタリング装置 | 雰囲気ガス：アルゴン(Ar)<br>ガス流量：250 sccm<br>温度：RT<br>出力：200 W<br>時間：2000 sec |
| 4 リフトオフ                     | US 洗浄機          | アセトン：5 min                                                          |
|                             | ドラフター           | 水洗：5 L                                                              |
|                             | US 洗浄機          | メタノール：5 min                                                         |
|                             | ドラフター           | 水洗：5 L                                                              |
|                             | US 洗浄機          | リムーバー：5 min                                                         |
|                             | ドラフター           | 水洗：5 L                                                              |

### 3-3-4. 電流狭窄構造の形成

本研究で作製する面発光レーザの電流狭窄層は、10 nm の  $\text{SiO}_2$  絶縁層でアパッチャを形成し、その上に ITO 透明電極を 20 nm 蒸着する。本工程の  $\text{SiO}_2$  と ITO は、それぞれ電子ビーム(Electron Beam : EB)蒸着装置とマグネトロンスパッタリング装置により蒸着される。ITO 蒸着後は、図 3-3(b)に示すように共振波長の確認のための反射率を測定する。表 3-4 に電流狭窄構造形成の工程を示す。

表 3-4 電流狭窄構造形成の工程

| 工程                  | 使用装置     | 条件                          |
|---------------------|----------|-----------------------------|
| 1 フトリソグラフィ          | スピコート    | レジスト溶液 : ZPN1150-90         |
|                     | ベーク処理装置  | 温度 : 110°C<br>ベーク時間 : 5 min |
|                     | マスクアライナー | 露光時間 : 3 sec                |
|                     | ベーク処理装置  | 温度 : 110°C<br>ベーク時間 : 5 min |
|                     |          | 現像時間 : 50 sec               |
| 2 洗浄                | ドラフター    | 水洗 : 5 L                    |
| 3 $\text{SiO}_2$ 蒸着 | EB 装置    | 温度 : RT<br>膜厚 : 10 nm       |
| 4 リフトオフ             | US 洗浄機   | アセトン : 5 min                |
|                     | ドラフター    | 水洗 : 5 L                    |
|                     | US 洗浄機   | メタノール : 5 min               |
|                     | ドラフター    | 水洗 : 5 L                    |
|                     | US 洗浄機   | リムーバー : 5 min               |
|                     | ドラフター    | 水洗 : 5 L                    |
| 5 フトリソグラフィ          | スピコート    | レジスト溶液 : ZPN                |
|                     | ベーク処理装置  | 温度 : 110°C<br>ベーク時間 : 5 min |
|                     | マスクアライナー | 露光時間 : 3 sec                |
|                     | ベーク処理装置  | 温度 : 110°C                  |

| 工程              | 使用装置            | 条件                                                                      |
|-----------------|-----------------|-------------------------------------------------------------------------|
| 5 フォトリソグラフィ     | ベーク処理装置         | ベーク時間：5 min                                                             |
|                 |                 | 現像時間：50 sec                                                             |
| 6 ITO 蒸着(20 nm) | マグネトロンスパッタリング装置 | 雰囲気ガス：Ar、酸素<br>ガス流量：50、0.1 sccm<br>温度：RT<br>出力：20 W<br>時間：1000 sec (調整) |
| 7 リフトオフ         | US 洗浄機          | アセトン：5 min                                                              |
|                 | ドラフター           | 水洗：5 L                                                                  |
|                 | US 洗浄機          | メタノール：5 min                                                             |
|                 | ドラフター           | 水洗：5 L                                                                  |
|                 | US 洗浄機          | リムーバー：5 min                                                             |
|                 | ドラフター           | 水洗：5 L                                                                  |
| 8 ITO 電極アニール    | アニール装置          | 雰囲気ガス：N <sub>2</sub><br>保持温度：600°C<br>時間：5 min                          |

### 3-3-5. n 電極および PAD 電極の形成

素子分離後の n-GaN 上に n 電極として、EB 蒸着装置を用いてクロム(Cr)/ニッケル(Ni)/金(Au)をそれぞれ、10/20/170 nm 蒸着する。同時に、ITO 周囲に蒸着することで、イントラキャビティに電流を注入する PAD 電極としての役割も果たす。n 電極および PAD 電極蒸着の工程を表 3-5 に示す。

表 3-5 n 電極および PAD 電極蒸着の工程

| 工程            | 使用装置               | 条件                                     |
|---------------|--------------------|----------------------------------------|
| 1 フォトリソグラフィ   | スピンドーター            | レジスト溶液：ZPN1150-90                      |
|               | ベーク処理装置            | 温度：110°C<br>ベーク時間：5 min                |
|               | マスクアライナー           | 露光時間：3 sec                             |
|               | ベーク処理装置            | 温度：110°C<br>ベーク時間：5 min                |
|               |                    | 現像時間：50 sec                            |
|               | スピンドーター<br>ベーク処理装置 | レジスト溶液：ZPN<br>温度：110°C<br>ベーク時間：5 min  |
| 2 洗浄          | ドラフター              | 水洗：5 L                                 |
| 3 Cr/Ni/Au 蒸着 | EB 装置              | 温度：RT<br>膜厚：Cr/Ni/Au ;<br>10/20/170 nm |
| 4 リフトオフ       | US 洗浄機             | アセトン：5 min                             |
|               | ドラフター              | 水洗：5 L                                 |
|               | US 洗浄機             | メタノール：5 min                            |
|               | ドラフター              | 水洗：5 L                                 |
|               | US 洗浄機             | リムーバー：5 min                            |
|               | ドラフター              | 水洗：5 L                                 |

### 3-3-6. スペーサ層および上部誘電体 DBR 蒸着

ここでは、共振器作製の最終段階である  $\text{Nb}_2\text{O}_5$  スペーサ層と 8 ペアの  $\text{Nb}_2\text{O}_5/\text{SiO}_2$  上部誘電体 DBR をマグネトロンスパッタリング装置により蒸着する。スペーサ層蒸着後は、図 3-3 に示すように共振波長が所望の設計波長と一致していることを確認する。そして、ストップバンドの中心波長を共振波長に調整した  $\text{Nb}_2\text{O}_5/\text{SiO}_2$  誘電体 DBR を蒸着する。表 3-6 に、スペーサ層および上部誘電体

DBR 蒸着の工程を示す。

表 3-6 スペーサ層および上部誘電体 DBR 蒸着の工程

| 工程                                                              | 使用装置            | 条件                                                                                                                                                                                      |
|-----------------------------------------------------------------|-----------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 1 フォトリソグラフィー                                                    | スピンコーター         | レジスト溶液：ZPN1150-90                                                                                                                                                                       |
|                                                                 | ベーク処理装置         | 温度：110°C<br>ベーク時間：5 min                                                                                                                                                                 |
|                                                                 | マスクアライナー        | 露光時間：3 sec                                                                                                                                                                              |
|                                                                 | ベーク処理装置         | 温度：110°C<br>ベーク時間：5 min                                                                                                                                                                 |
|                                                                 |                 | 現像時間：50 sec                                                                                                                                                                             |
| 2 洗浄                                                            | ドラフター           | 水洗：5 L                                                                                                                                                                                  |
| 3 Nb <sub>2</sub> O <sub>5</sub> スペーサ層蒸着                        | マグネトロンスパッタリング装置 | 雰囲気ガス：Ar<br>ガス流量：100 sccm<br>温度：RT<br>出力：150 W<br>時間：570 sec (調整)                                                                                                                       |
| 4 8pair Nb <sub>2</sub> O <sub>5</sub> /SiO <sub>2</sub> DBR 蒸着 | マグネトロンスパッタリング装置 | 雰囲気ガス：Ar<br>ガス流量：100 sccm<br>温度：RT<br>出力：200 W(SiO <sub>2</sub> )、150 W(Nb <sub>2</sub> O <sub>5</sub> )<br>時間：550 sec(SiO <sub>2</sub> )、584 sec(Nb <sub>2</sub> O <sub>5</sub> ) (調整) |
| 5 リフトオフ                                                         | US 洗浄機          | アセトン：5 min                                                                                                                                                                              |
|                                                                 | ドラフター           | 水洗：5 L                                                                                                                                                                                  |
|                                                                 | US 洗浄機          | メタノール：5 min                                                                                                                                                                             |
|                                                                 | ドラフター           | 水洗：5 L                                                                                                                                                                                  |
|                                                                 | US 洗浄機          | リムーバー：5 min                                                                                                                                                                             |
|                                                                 | ドラフター           | 水洗：5 L                                                                                                                                                                                  |

図 3-4 に、完成後の素子の上面図を示す。素子のサイズは  $110\ \mu\text{m} \times 205\ \mu\text{m}$  であり、メサ径は  $40\ \mu\text{m}$  である。図 3-4 の左側が p 電極、右側が n 電極となっている。

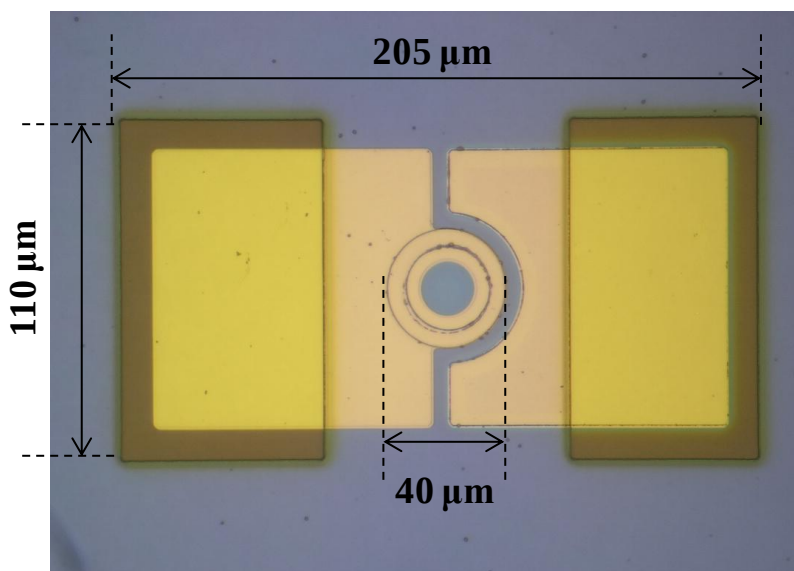


図 3-4 作製した素子の上面図

#### 3-4. デバイス特性

図 3-5 に、電流 - 電圧および半導体 DBR 側から測定した電流 - 光出力特性を示す。測定条件は室温での直流電流を用いた。作製した面発光レーザの閾値電流は  $7.2\ \text{mA}$  であり、閾値電流密度は  $14.4\ \text{kA/cm}^2$  であった。この値は、同じ混成型 DBR を用いている NCTU の報告結果<sup>2)</sup>とほぼ同等であるが、二重誘電体 DBR を用いている報告<sup>3,4)</sup>と比較すると 4 倍以上高い。構造起因であるとする、活性層のボリュームがモード利得に対して最適化されていない、また、反射率も最適化されていないことなどが考えられる。レーザ発振時の動作電圧は  $5.0\ \text{V}$  であった。この値は、他研究機関の ITO 内部共振器構造と比較して、ほぼ同等な電圧を示している。最大光出力は  $3.0\ \text{mW}$  であり、外部微分量子効率<sup>5)</sup>は  $13.0\%$  であった。電流 - 光出力特性に見られる振動は基板側からの戻り光の影響であると思われる。

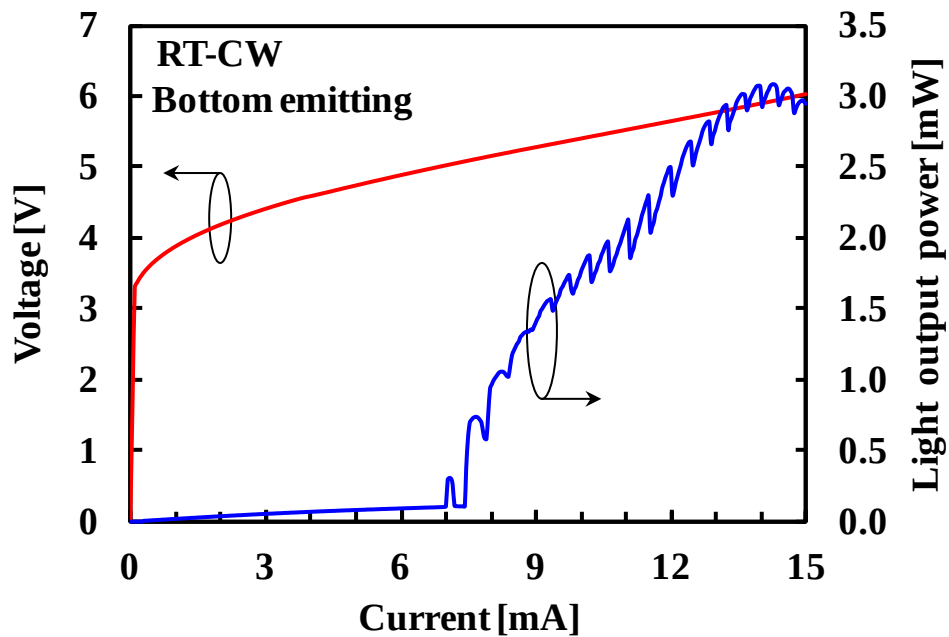


図 3-5 作製した窒化物半導体面発光レーザの電流 - 電圧 - 光出力特性

図 3-6 に閾値前後の室温での発光スペクトルを示す。注入電流増加に伴い、発光強度は  $1.1 I_{th}$  において著しく増加した。波長  $410.9 \text{ nm}$  にて半値幅  $0.04 \text{ nm}$  の鋭利なスペクトルが観測された。また、注入電流  $0.9 I_{th}$  から  $1.1 I_{th}$  の増加より、発光波長が  $410.6 \text{ nm}$  から  $410.9 \text{ nm}$  へレッドシフトすることが観測された。これは、素子温度上昇により、屈折率が大きくなり、共振器長が長波長化したためである。この電流注入による発振波長の長波長化により、素子温度の上昇を見積もることが可能であり、第 5 章にて詳しく記載する。

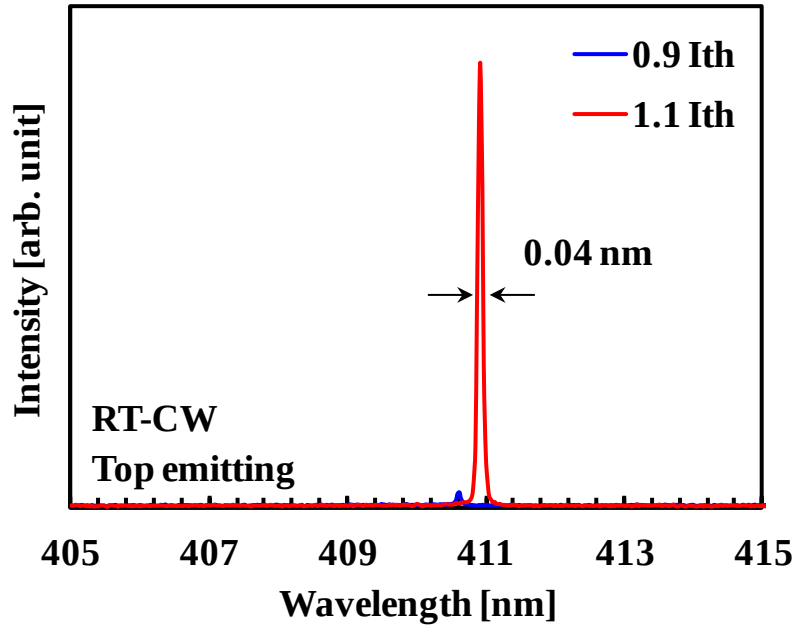


図 3-6 閾値電流前後の EL スペクトル

一般に、レーザ光は波長のみならず、偏光も一致する。その偏光の度合いを表すために、偏光度が用いられる。偏光成分の光強度を  $I_{\max}$ 、非偏光成分の光強度を  $I_{\min}$  とすると、偏光度  $P$  は、

$$P = \frac{I_{\max}}{I_{\max} + I_{\min}} \quad (37)$$

と表わされる。偏光度は、全光強度に対する偏光した光強度の割合を示す。

図 3-7 に、 $1.1 I_{\text{th}}$  電流注入時の偏光特性を示す。最大強度と最小強度間の角度は  $90^\circ$ 、偏光度は 97%であった。以上、述べたように、I-L 特性における急激な発光強度の増加、極めて狭い発光スペクトル、そして高い偏光度の三つの結果から、室温連続発振の実現が確認された。

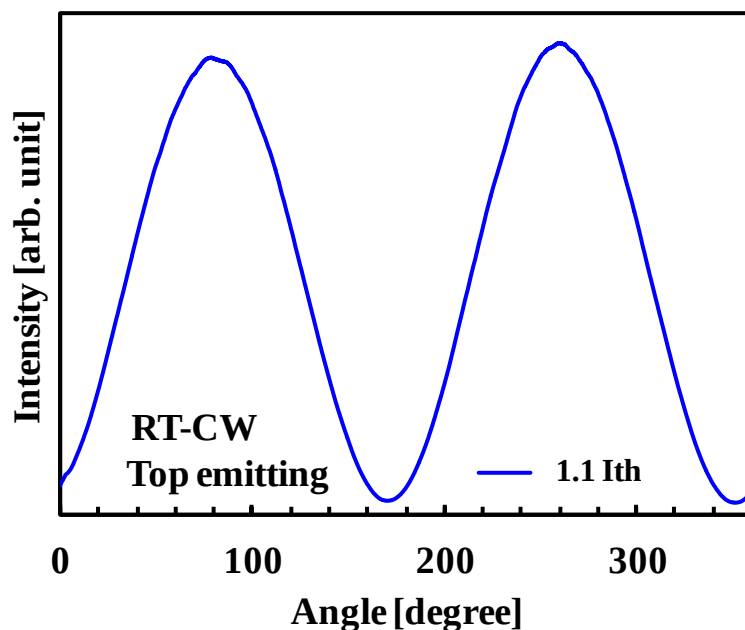


図 3-7 電流注入  $1.1 I_{th}$  時の偏光特性

表 3-7 に閾値電流前後の近視野(Near Field Pattern : NFP)測定結果および x 軸方向の光強度プロファイル結果を示す。 $0.9 I_{th}$  では、電流注入領域に相当する直径約  $8 \mu\text{m}$  の発光パターンを示し、中心付近の光強度が比較的強いことがわかる。閾値  $1.0 I_{th}$  に達すると、中心付近の光強度がさらに増加し、 $1.1 I_{th}$  では、中心付近の強度が大幅に増加した、鋭い強度分布を示していることが分かる。キンク後の電流注入領域である  $12 \text{ mA}$  では、マルチモードの発光パターンを示し、中心付近の強度が低下したプロファイルとなった。このような NFP の変化は、電流集中による温度上昇で中心付近の屈折率が変化し、ビーム径の縮小とモード変化する熱レンズ効果<sup>5)</sup>を示していると考えられる。

表 3-7 近視野測定結果と x 軸方向プロファイル

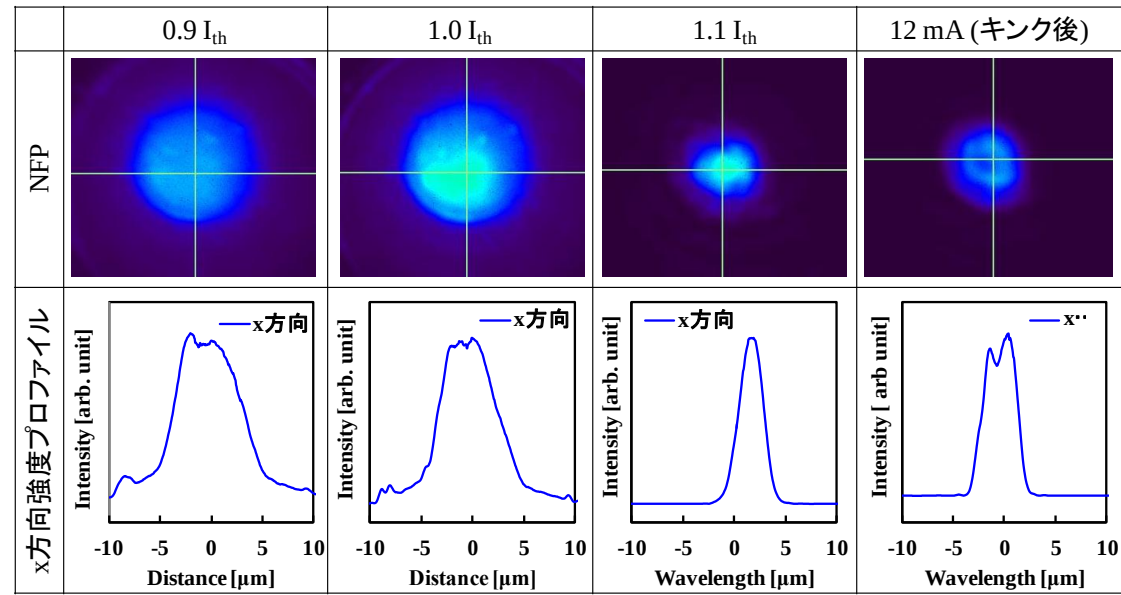


表 3-8 に遠視野(Far Field Pattern : FFP)測定結果を示す。電流を 10 mA 注入した場合の光強度分布は、中心が最大となるガウス型のプロファイルを示しており、シングルモードとなっている。キंक付近の 11 mA 電流注入時では、10 mA と比較してブロードなプロファイルを示しており、モードの移り変わりを示している。さらに、12 mA 電流注入した場合では、発光パターンを中心部分の強度が低くなるといったプロファイルを示した。

次に、キंक前後の電流注入領域における、EL スペクトルを図 3-8 に示す。10 mA 時には、単一スペクトルを示しているが、12 mA 時には、高次モードと見られる二つ目のピークが短波長側に確認できる。これは、初期型の赤外面発光レーザにおいても同様のキंकとモードの移り変わり<sup>5)</sup>が確認されており、本研究においても、利得導波構造による横モードの不安定さを示していると考えられる。

表 3-8 遠視野測定結果と x 方向プロファイル

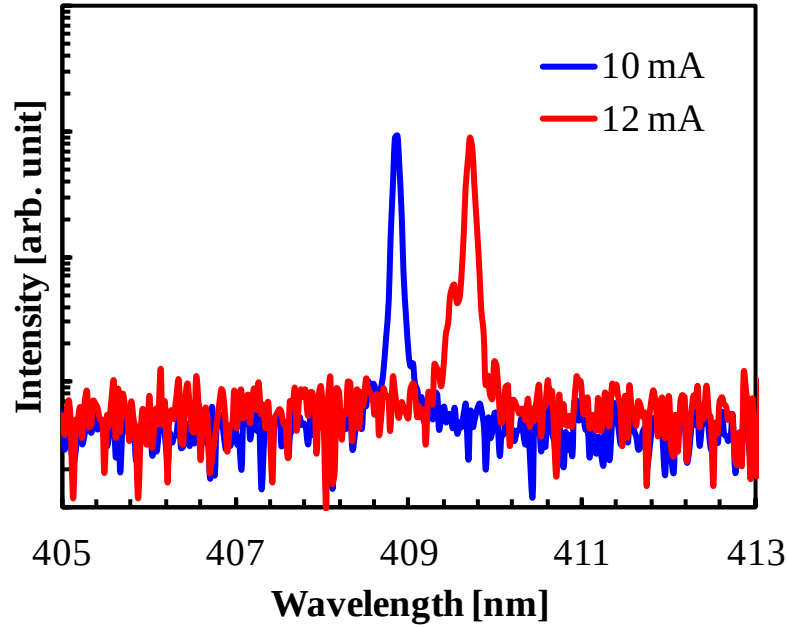
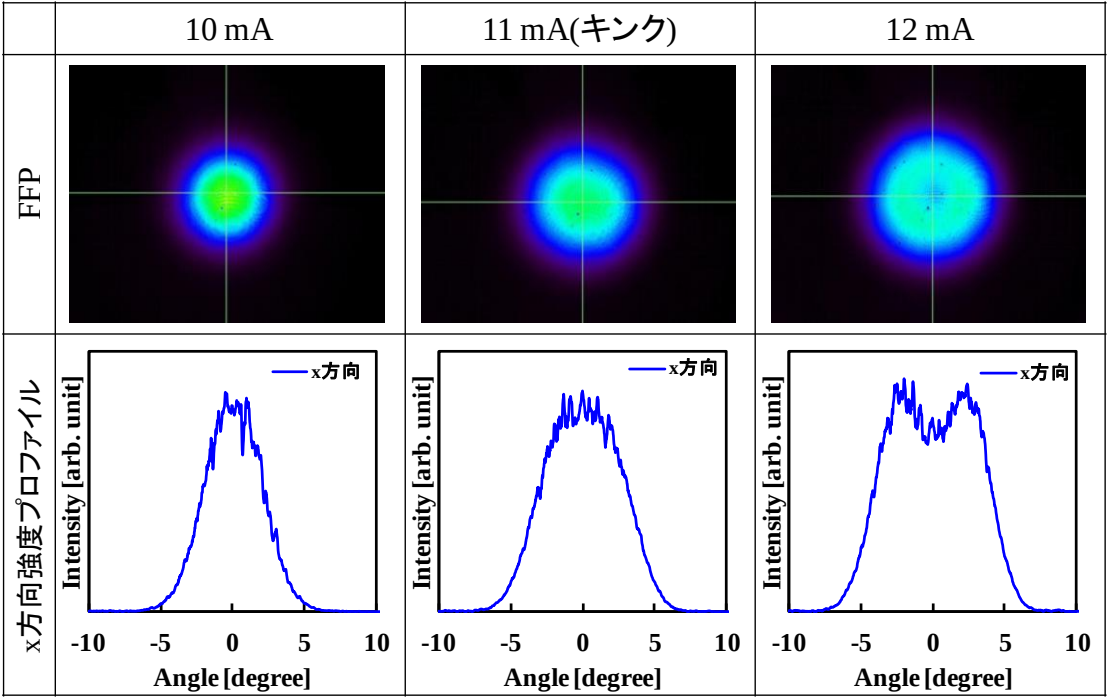


図 3-8 キンク前後の EL スペクトル

### 3-5. まとめ

本章では、窒化物半導体面発光レーザの室温連続発振の実現に向けて、理論検討で得られた層厚の制御指針と反射率設計指針をもとに、混成型 DBR 構造を有する面発光レーザを作製し、レーザ特性を検討した。以下に、本検討により得られた知見をまとめる。

- ・共振器の作製において、結晶成長後、ITO 層蒸着後、スペーサ層蒸着後の各々のウエハにおける反射スペクトルにより共振波長を確認し、設計層厚からの差異を $\pm 1\%$ 以下に制御することが可能である。

- ・作製したサンプルは、室温での直流電流において、閾値電流 7.2 mA、最大出力 3.0 mW であった。また、EL スペクトルにより、発振波長 410.9 nm、半値幅 0.04 nm と鋭利なスペクトルを示した。さらに、偏光度は 97% であった。以上の結果から、窒化物半導体面発光レーザの室温連続発振を実現した。

- ・発振後の NFP および FFP 測定において、熱レンズ効果の影響と思われる基本モードから高次モードの推移を観測した。

参考文献

- 1). Y. Kozuka, K. Ikeyama, T. Yasuda, T. Takeuchi, S. Kamiyama, M. Iwaya, and I. Akasaki, MRS Proc. **1736**, 1 (2015).
- 2). D. H. Hsieh, A. J. Tzou, T. S. Kao, F. I. Lai, D. W. Lin, B. C. Lin, T. C. Lu, W. C. Lai, C. H. Chen, and H. C. Kuo, Opt. Express **23**, 27145 (2015).
- 3). D. Kasahara, D. Morita, T. Kosugi, K. Nakagawa, J. Kawamata, Y. Higuchi, H. Matsumura, and T. Mukai, Appl. Phys. Express **4**, 072103 (2011).
- 4). J. T. Leonard, E. C. Young, B. P. Yonkee, D. A. Cohen, T. Margalith, S. P. DenBaars, J. S. Speck, and S. Nakamura, Appl. Phys. Lett. **107**, 091105 (2015).
- 5). G. C. Wilson, D. M. Kuchta, J. D. Walker, and J. S. Smith, Appl. Phys. Lett. **64**, 542 (1994).
- 6). R. P. Schneider, K. D. Choquette, J. A. Lott, K. L. Lear, J. J. Figiel, and K. J. Malloy, IEEE Photon. Technol. Lett. **6**, 313 (1994).

## 第4章 周期利得活性層を有する窒化物半導体面発光レーザー

### 4-1. はじめに

本章では、窒化物半導体面発光レーザーの性能向上を目指し、周期利得構造を有する窒化物半導体面発光レーザーを検討した。周期利得構造は、複数の活性層を光強度定在波の腹に配置することで、光閉じ込め係数が増加し、閾値電流を低減することが可能である。赤外面発光レーザーでは、周期利得構造に関する報告<sup>1,2)</sup>がされており、発振も実現している。一方、窒化物半導体面発光レーザーでは、光励起による発振の報告<sup>3)</sup>がされているが、電流注入による報告はされていない。なぜなら、周期利得構造では、効率よくレーザー発振させるために、各層に均一にキャリアを注入する必要がある。しかし、単一のpn接合内に二つ以上の活性層を配置された場合、電子と正孔の非対称性によりその二つ以上への均一なキャリア注入は難しい。特に、窒化物半導体では、その非対称性が大きく<sup>4,5)</sup>、周期利得構造では大きな課題になると考えられる。以下に、本章における検討内容を示す。

初めに、キャリア注入の検討として、単一のpn接合内に二つの活性層を有する発光ダイオードを用いる。上述のように、キャリアの非対称性によりn側活性層(p型半導体から遠い方)への正孔注入が課題である。本研究では、活性層間の中間層にMgをドーピングすることで、n側活性層への正孔注入を促進し、均一なキャリア注入の実現を目指す。通常、周期利得構造では同一の活性層を複数配置するが、同一活性層の場合、その発光スペクトルを観測しても、どちらの活性層からの発光かは見分けられない。そこで、発光波長が異なる二つの活性層を有する発光ダイオードを用いて、各発光波長の発光強度比を比較することで各活性層への注入量を検討する。ただし、この場合、発光波長の違い、すなわちバンドギャップの違いによるキャリア注入の影響を差し引くため、それらの活性層を逆に配置した発光ダイオードの計二種類のサンプルも用意した。この二つの素子を用いて、ELスペクトルの中間層Mgドーピング濃度依存性から、n側活性層への正孔注入の促進を検討する。そして、中間層のMg濃度が異なる複数のサンプルのELスペクトル強度比から、周期利得構造として最適なMg濃度を見積もる。

次に、これらの事前検討で得られた結果をもとに、周期利得構造を有する面発光レーザを作製し、その特性を評価する。評価法として、電流 - 光出力特性、発光スペクトル半値幅、偏光特性を測定し、第 3 章で得られた周期利得構造を含まない面発光レーザと比較し、周期利得構造の適用による効果を検証する。さらに、第 2 章での理論計算の結果とも比較検討する。

#### 4-2. 活性層配置の異なる発光ダイオード

本研究で用いた活性層配置の異なる二つの LED 構造を図 3-1(a)、(b)に示す。

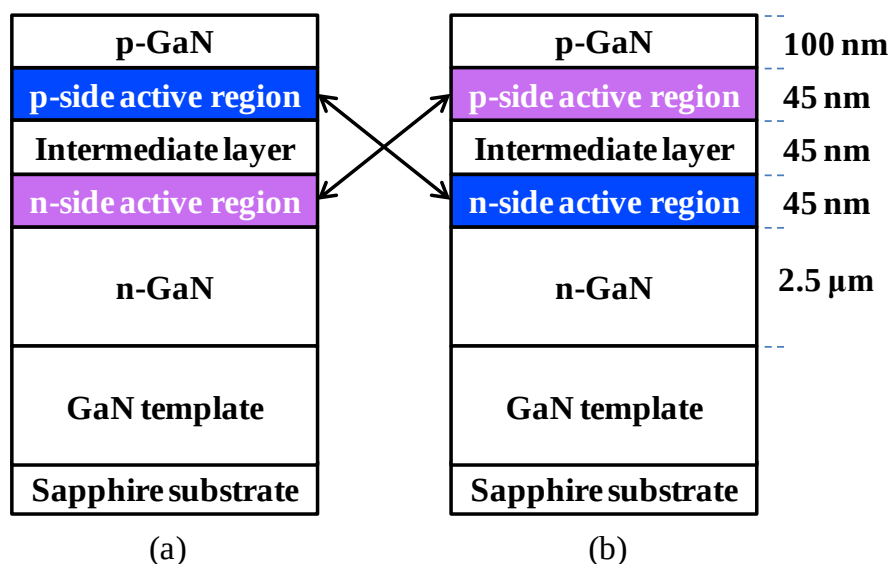


図 4-1 二つの活性層を有する LED 構造。(a)順配置構造、(b)逆配置構造

全ての LED 構造は MOVPE 法により c 面サファイア上に成長された。GaN テンプレートは、30 nm の低温バッファ層と 2  $\mu\text{m}$  のアンドープ GaN 層によって形成された。その後、2  $\mu\text{m}$  の n 型 GaN 層、n 側活性層として 5 周期のアンドープ GaInN/GaN 層、45 nm の中間層、p 側活性層として 5 周期のアンドープ GaInN/GaN 層、20 nm の p 型 AlGaIn 電子ブロック層、60 nm の p 型 GaN 層、10 nm の p<sup>+</sup>型 GaN コンタクト層を順に成長させた。各活性層は、3 nm の GaInN 井戸層と 6 nm の GaN バリア層で構成された。ここで、図 4-1(a)に示されるように、発光波長 420 nm を有する p 側活性層と発光波長 400 nm を有する n 側活性層で形成される構造を順配置構造とし、図 4-1(b)に示されるような発光波長 400 nm を有する p

側活性層と発光波長 420 nm を有する n 側活性層で形成される構造を逆配置構造とした。加えて、二つの活性層間に異なる濃度の Mg をドーピングした中間層を挿入した。その Mg ドープ濃度として、順配置構造には、アンドープである  $0 \text{ cm}^{-3}$  と  $3.8 \times 10^{18}$ 、 $5.6 \times 10^{18}$ 、 $1.6 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ 、逆配置構造には、0、 $3.8 \times 10^{18}$ 、 $5.6 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$  の計 7 サンプルを用意した。Mg 濃度は SIMS 法により測定し、各サンプルの中間層内の最大濃度と決定した。中間層 Mg 濃度  $3.8 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$  を有する順配置構造と、中間層 Mg 濃度  $5.6 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$  を有する逆配置構造の Mg 原子と In 原子の深さ方向の濃度プロファイルをそれぞれ図 4-2(a)、(b)に示す。

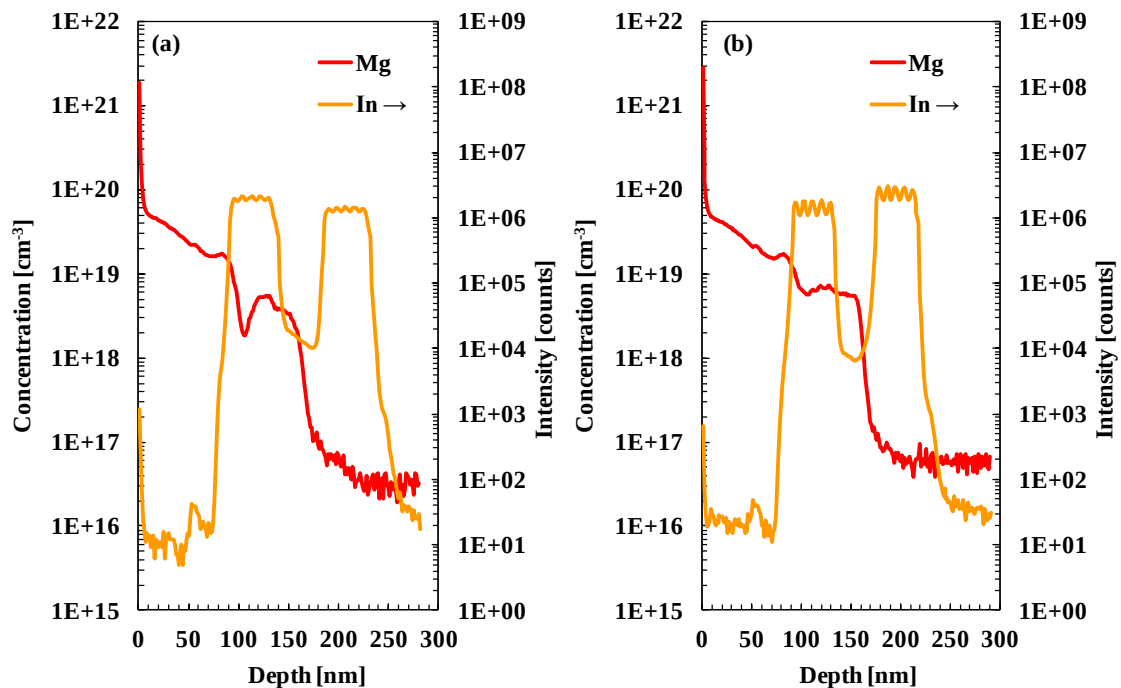


図 4-2 Mg と In 原子の深さ方向のプロファイル。(a) 順配置構造の中間層 Mg 濃度  $3.8 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$  サンプル、(b)逆配置構造の中間層 Mg 濃度  $5.6 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$  サンプル

p 側活性層に  $1 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$  以上の高い Mg 濃度の取り込みが確認される。これは、Mg メモリー効果、すなわち、Mg の偏析などによる Mg 供給の立ち下がり  
の遅延<sup>6)</sup>によるものと考えられる。通常、活性層に Mg が混入すると発光強度が  
低下することが懸念される。これについては 4-4 節で検討する。また、順配置構  
造と逆配置構造で活性層の In 原子の強度が反転していることも確認できる。図  
4-3(a)、(b)にそれぞれ、順配置構造と逆配置構造の室温での PL スペクトルを示  
す。励起光源には、波長 325 nm のヘリウム-カドミウム(He-Cd)レーザを用いた。

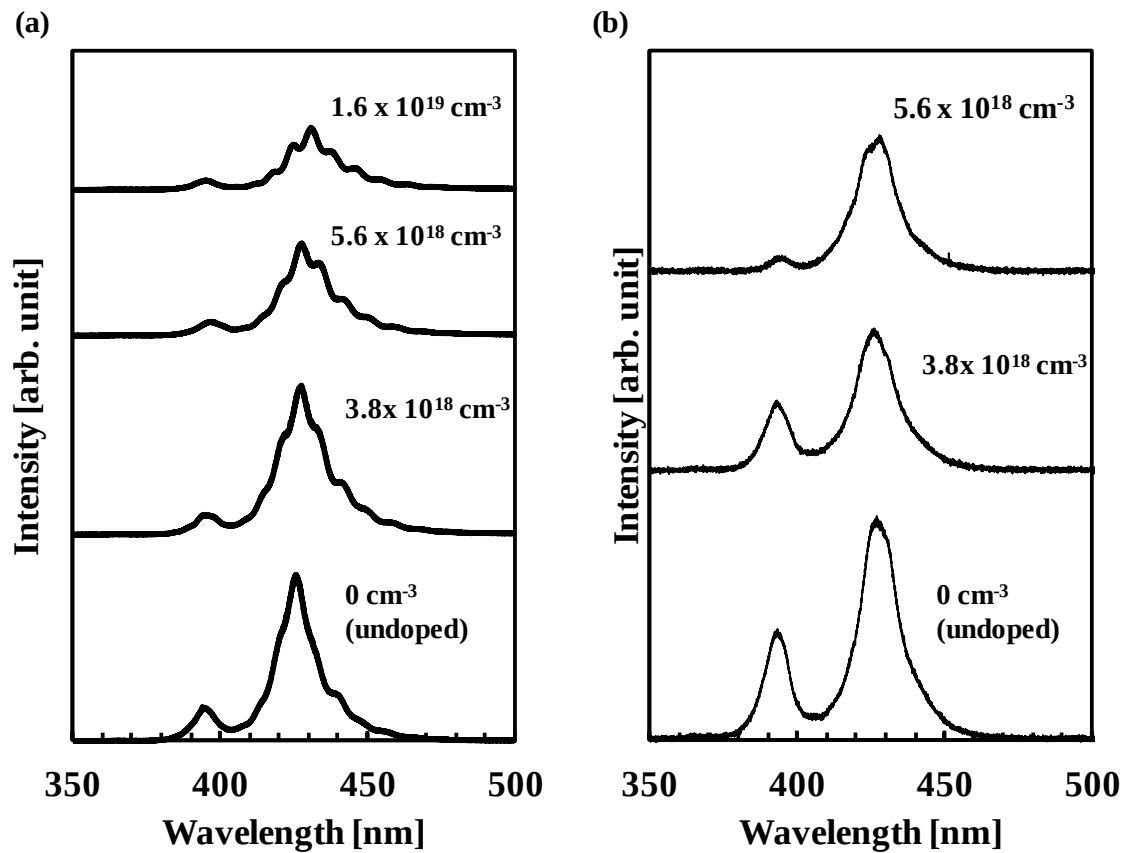


図 4-3 全サンプルの PL スペクトル。(a)順配置構造、(b)逆配置構造

結晶成長の後、一般的な作製プロセス<sup>7)</sup>により LED を作製した。ここでは、レーザ駆動に必要な数  $\text{kA}/\text{cm}^2$  程度の電流密度領域での動作を可能にする直径  $25\ \mu\text{m}$  の小さい発光径を有する LED を作製した。

#### 4-3. EL スペクトル特性およびキャリア輸送

室温での電流密度  $2.5\ \text{kA}/\text{cm}^2$  注入時における、順配置構造と逆配置構造の EL スペクトルをそれぞれ図 4-4(a)、(b)に示す。実線と点線の矢印は図 4-3 の PL スペクトルにおける n 側活性層と p 側活性層のピーク波長をそれぞれ示している。各サンプルは、中間層 Mg 濃度が異なるサンプル間で、さらには異なる活性層配

置を有するサンプル間でも、異なる EL スペクトルパターンを示すことがわかる。より詳しくは、図 4-4(a)に示すように、順配置構造における Mg ドープ濃度  $0 \text{ cm}^{-3}$  のサンプルでは、p 側活性層からの発光が支配的であり、Mg ドープ濃度  $5.6 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$  のサンプルでは n 側活性層からの発光強度増加が確認できる。そして、 $1.6 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$  のサンプルでは n 側活性層からの発光のみが観測されるほど顕著になった。中間層の Mg 濃度が高くなるにしたがって、n 側活性層からの発光強度が増大する、すなわち、n 側活性層への正孔注入が促進されたことがわかる。ただし、上述したように p 側活性層への Mg 混入の影響により、p 側活性層からの発光効率が低下し、キャリアが注入された割には発光していない可能性も考慮する必要がある。一方、逆配置構造においても、図 4-4(b)が示すように、順配置構造の結果と同様、中間層の Mg 濃度が高くなることで、n 側活性層の発光強度が増大する。しかし、順配置構造と比較すると、Mg ドープ濃度  $0 \text{ cm}^{-3}$  のサンプルにおいて、既に p 側活性層のみならず n 側活性層からの比較的強い発光も確認され、順配置構造よりも n 側活性層への正孔注入が促進されていると考えられる。いずれにせよ、中間層内 Mg ドープ濃度  $5.5 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$  を有する逆配置構造では、二つの活性層からの発光強度がほぼ等しいことが観測され、二つの活性層にキャリアが均一に注入されたと考えられる。

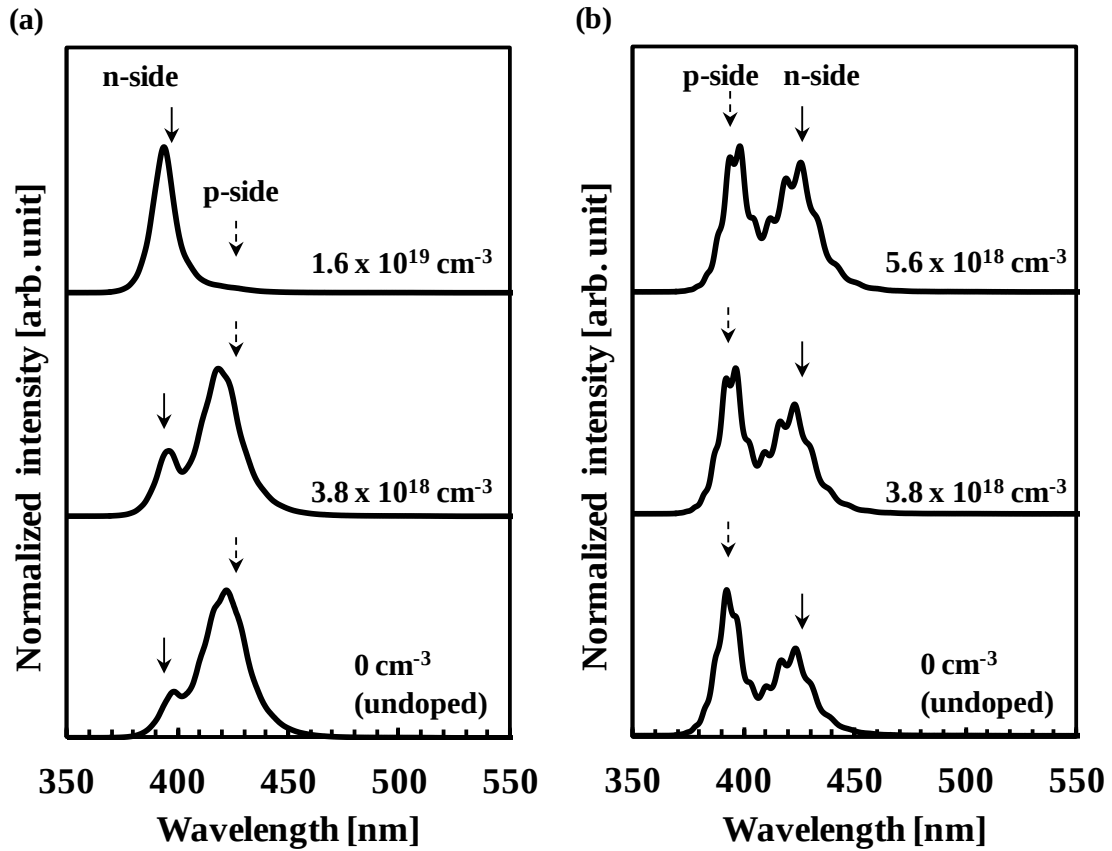


図 4-4 電流密度  $2.5 \text{ kA/cm}^2$  の EL スペクトル。(a) 順配置構造、(b) 逆配置構造

次に、実験によって得られた EL スペクトル特性の傾向を理論計算に基づいて考察する。シミュレーションに用いた構造は、上記 EL スペクトルを測定したサンプル構造と同様であり、中間層 Mg ドープ濃度  $0$ 、 $3.8 \times 10^{18}$ 、 $1.6 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$  の順配置構造と、Mg ドープ濃度  $0$ 、 $3.8 \times 10^{18}$ 、 $5.6 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$  の逆配置構造である。図 4-5(a)、(b)に、シミュレーションにより計算した、各サンプル構造の電流密度  $2.5 \text{ kA/cm}^2$  におけるバンドプロファイルを示す。両構造とも、中間層の Mg 濃度が増加するにつれて中間層のポテンシャルが上昇することが確認される。図 4-6(a)、(b)に、順配置構造におけるシミュレーションにより算出した、n 側および p 側井戸層内のキャリア濃度をそれぞれ示す。中間層の Mg 濃度の増加に伴い、p 側活性層への電子注入の抑制および n 側活性層への正孔注入の促進が確認できる。つまり、中間層への Mg ドープにより、ポテンシャルが上昇し、各活性層へのキャリア注入が制御可能であると考えられる。次に、異なる活性層配置

の各活性層のキャリア濃度を図 4-7 に示す。逆配置構造では、n 側活性層のバンドギャップエネルギーが小さいため、より多くのキャリアの捕獲が確認される。したがって、逆配置構造の EL スペクトルでは順配置構造と比較して n 側活性層の発光強度増加により、均一なキャリア濃度が得られたと考えられる。

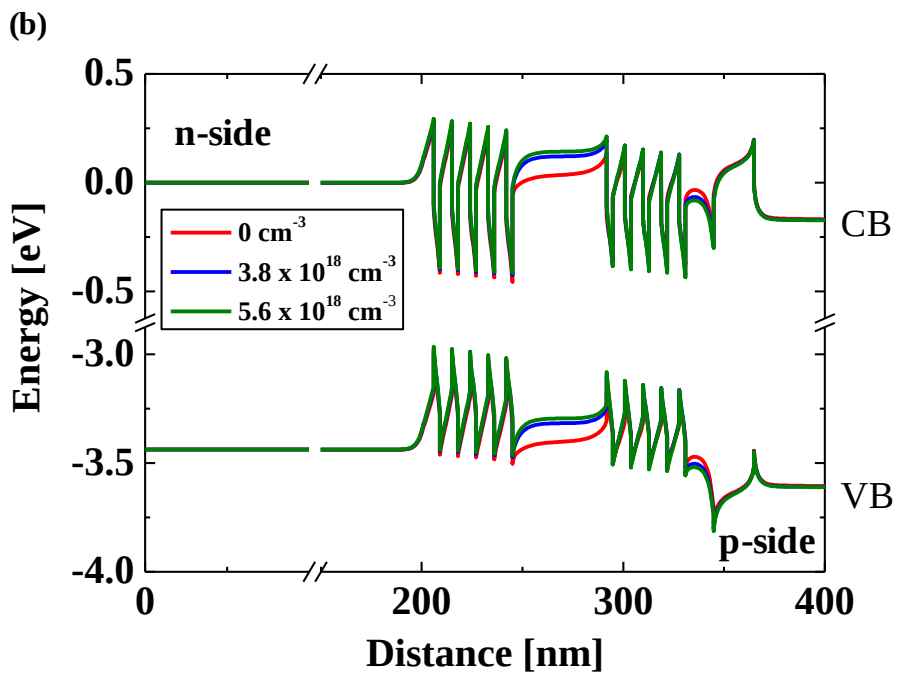
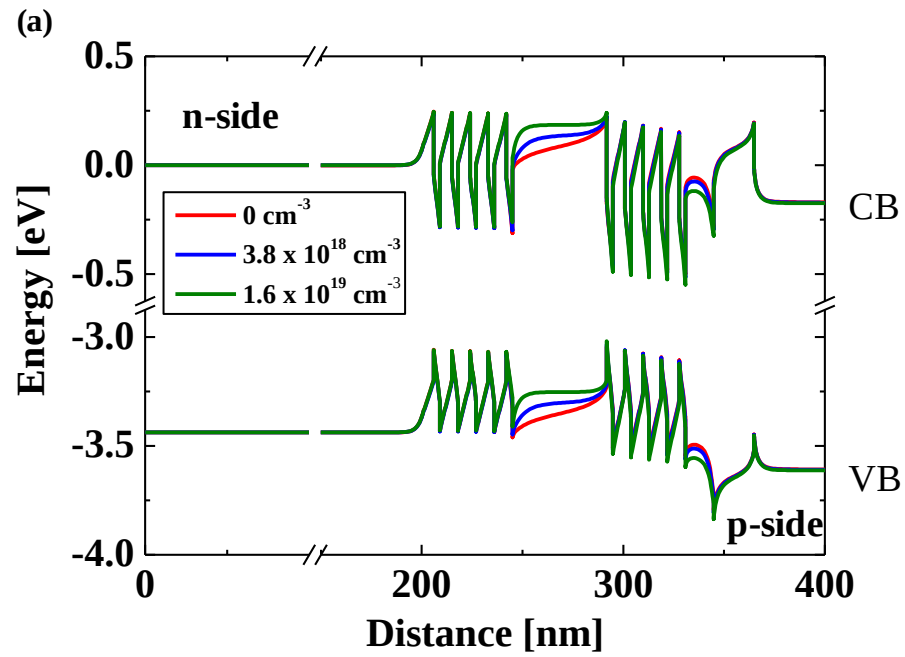


図 4-5 中間層 Mg 濃度依存性におけるシミュレーションバンド図。  
(a)順配置構造、(b)逆配置構造

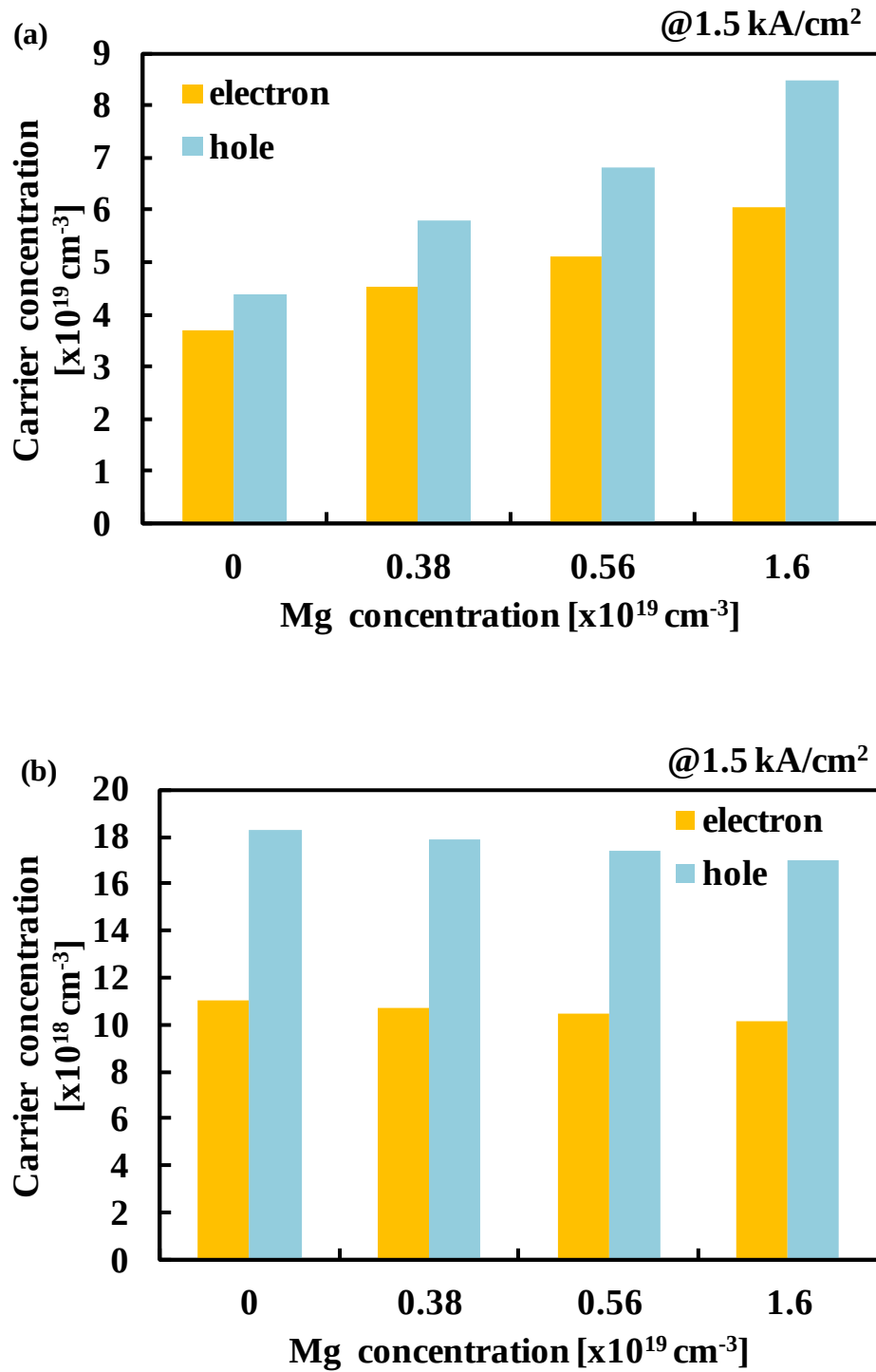


図 4-6 各活性層内のキャリア濃度の中間層 Mg 濃度依存性。  
(a)n 側活性層、(b)p 側活性層

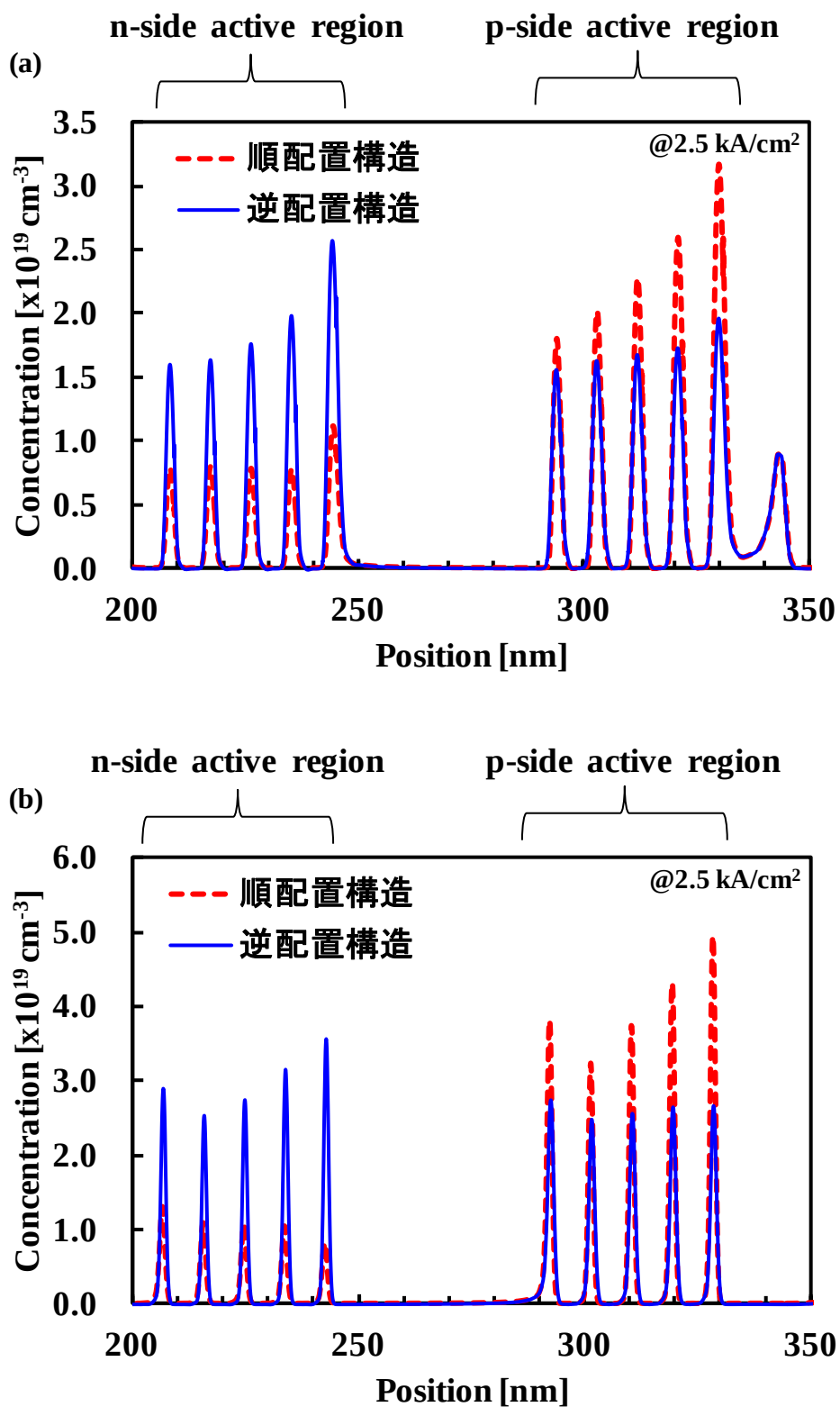


図 4-7 異なる活性層配置のキャリア分布。(a)電子濃度、(b) 正孔濃度

#### 4-4. 均一なキャリア分布の見積もり

次に、全サンプルにおける二つの活性層からの強度比の電流密度依存性を検討する。図 4-8(a)、(b)にそれぞれ、順配置構造と逆配置構造の二つの活性層における EL 強度比の 1~5 kA/cm<sup>2</sup> 電流注入した電流密度依存性を示す。図 4-8 の縦軸は発光強度比であり次式のように示される。

$$\text{Emission intensity ratio} = \frac{\text{n 側活性層の発光強度}}{\text{n 側活性層の発光強度} + \text{p 側活性層の発光強度}} \quad (38)$$

式(38)は、発光強度比が 1 に近づくほど n 側活性層の強度が支配的になり、0 に近づくほど p 側発光強度が支配的になる。図 4-8 が示すように、全てのサンプルは、数 kA/cm<sup>2</sup> の電流領域においてほぼ一定の強度比を示すことがわかった。また上述したように、どちらの構造においても、中間層の Mg ドープ濃度が増加するにつれて n 側活性層の強度が支配的になることもわかる。

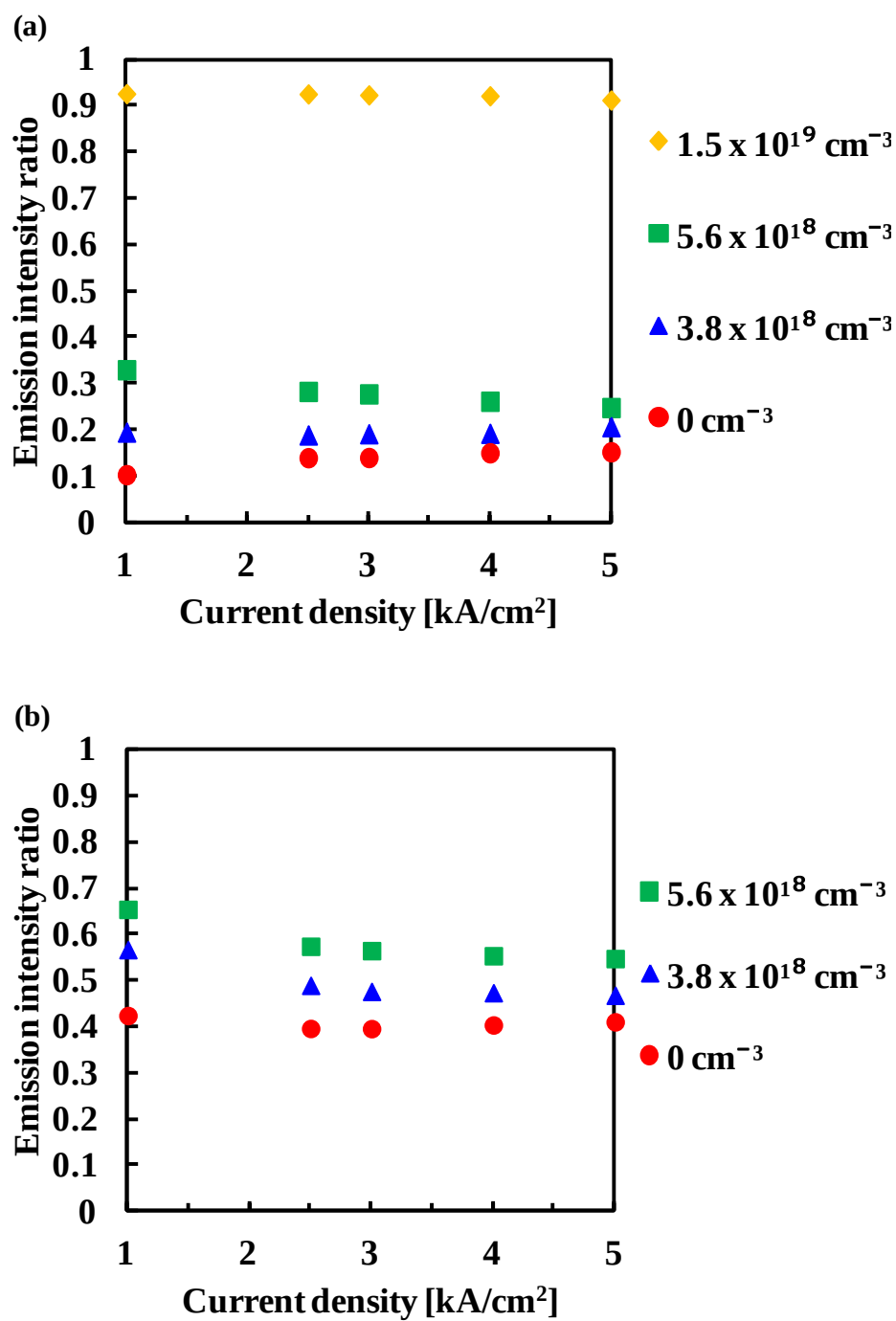


図 4-8 各サンプルの EL スペクトルにおける電流密度依存性。  
(a) 順配置構造、(b)逆配置構造

次に、二つの活性層を周期利得構造として適用するために、最適な中間層の Mg ドープ濃度を検討する。図 4-9(a)には、電流密度  $2.5 \text{ kA/cm}^2$  における順配置構造と逆配置構造の発光強度比に対する中間層 Mg ドープ濃度依存性を示す。上述した通り、中間層 Mg ドープ濃度増加に伴い、発光強度比の増加が確認される。さらに、逆配置構造では、順配置構造と比較して、中間層の Mg 濃度が同等であっても、n 側活性層からの発光強度が強いことが確認できる。この理由はすでに述べたように、n 側活性層の狭いバンドギャップによる正孔注入の促進のためであり、二つの構造の活性層波長(バンドギャップエネルギー)の違いがキャリア注入に大きく影響を与えることを示唆している。したがって、同一波長の活性層を有する周期利得構造の発光強度比は、順配置構造と逆配置構造で得られた値の平均値になることが予想され、図 4-9(b)が示すようにシミュレーションにおいてもそうなることが示されている。ただし、シミュレーションでは、活性層内への Mg の取り込みによる非発光再結合の影響を考慮していないため、高濃度の Mg ドープでは p 側活性層の発光強度低下の影響は加味していない。ゆえに、Mg の取り込みの悪影響が少ない、周期利得活性層における発光強度比の Mg 濃度依存性は、図 4-9(a)における点線で示される。その結果、発光強度比が 0.5 になる二つの活性層への均一なキャリア注入を可能にする中間層への Mg 濃度は、約  $7 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$  と見積もられる。

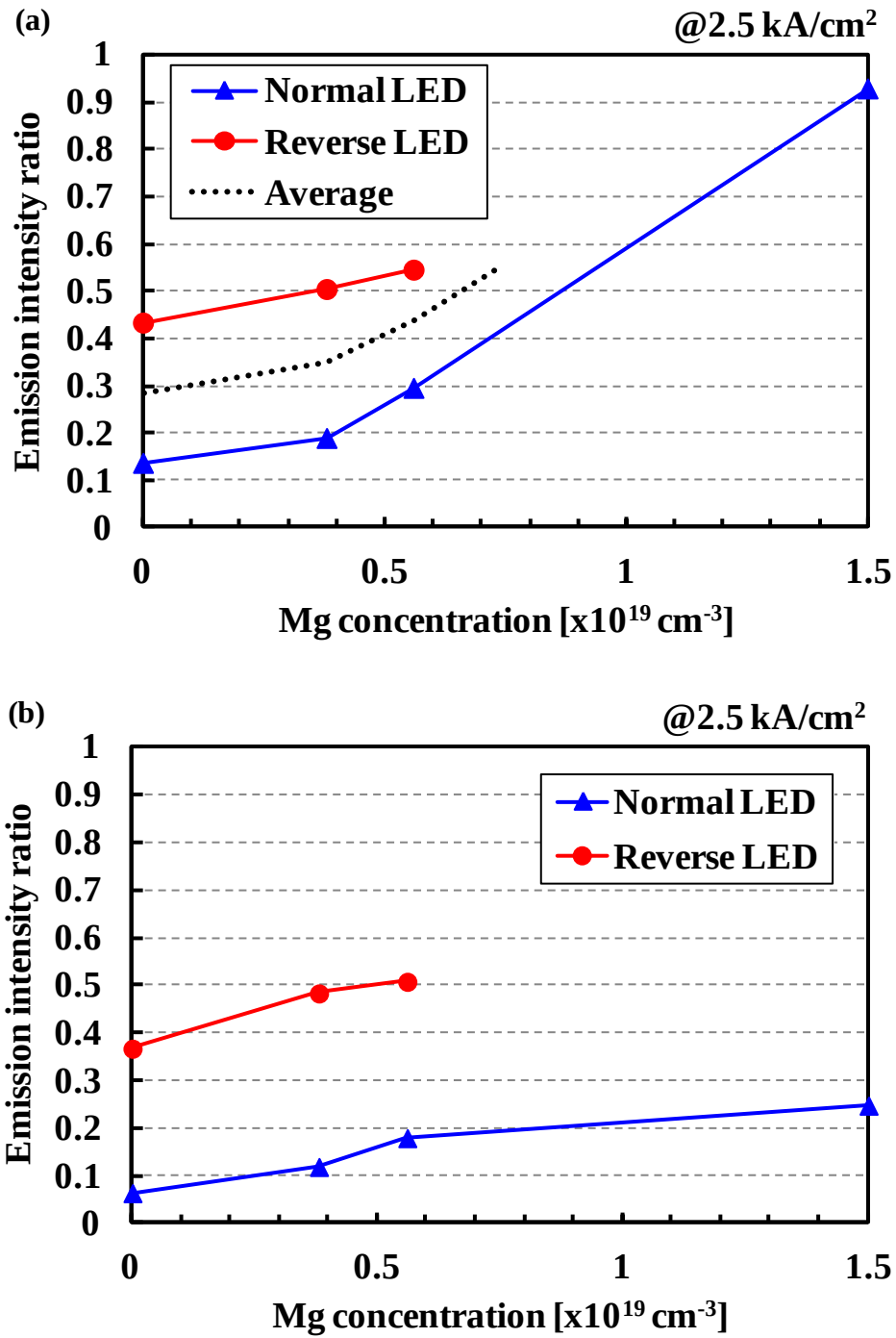


図 4-9 各サンプル電流密度 2.5 kA/cm<sup>2</sup>における  
発光強度比の中間層 Mg ドープ濃度依存性。  
(a)実験結果、(b)シミュレーション結果

ここで、順配置構造における電流密度  $20 \text{ kA/cm}^2$  まで電流注入した際の電流 - 光出力特性を図 4-10 に示す。ここでの光出力は二つの活性層からの全ての発光による強度である。中間層の Mg ドープ濃度増加が、 $5.6 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$  以上になると、光出力が低下することがわかった。これは、図 4-2 の SIMS 結果が示すように、p 側活性層への意図しない Mg 混入により活性層品質が低下することが原因であると考えられる。したがって、図 4-9 が示すように、周期利得構造においてバランスの良い強度比が得られる Mg ドープ濃度は約  $7 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$  と見積もられたものの、この濃度では発光強度が低下してしまうため、発光強度比が 0.35 と若干低い、すなわち n 側活性層への正孔注入が低い、光出力の低下が観測されなかった Mg ドープ濃度  $3.8 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$  が最適値であると判断した。

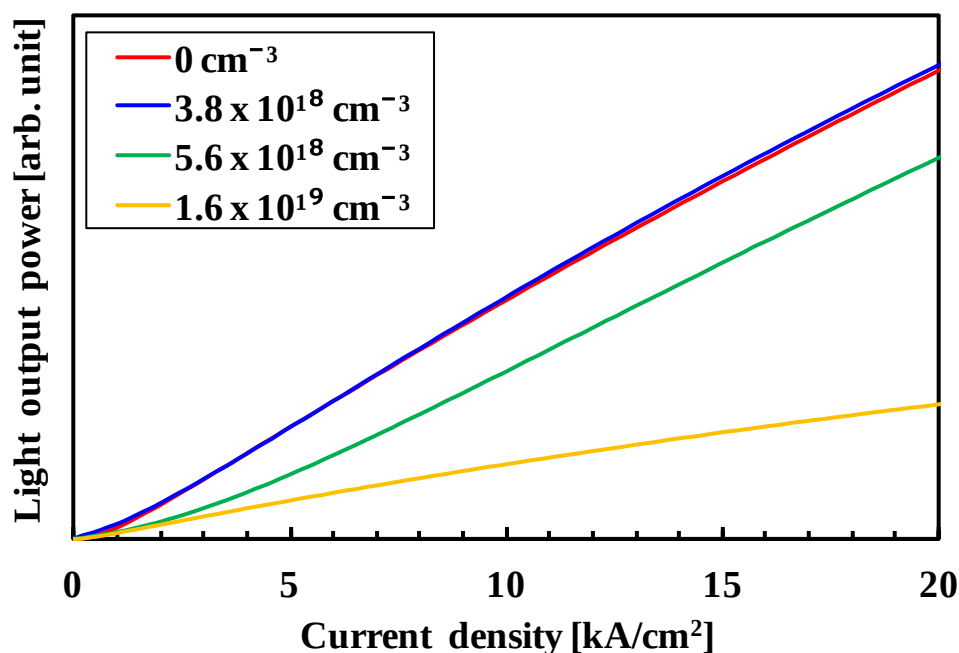


図 4-10 中間層 Mg 濃度変化における電流 - 光出力特性

#### 4-5. 周期利得構造を有する窒化物半導体面発光レーザ構造

続いて、周期利得構造を有する面発光レーザを、c 面 GaN 基板上に MOVPE 法によって成長した。周期利得構造を有する面発光レーザの概略図を図 4-11 に示す。

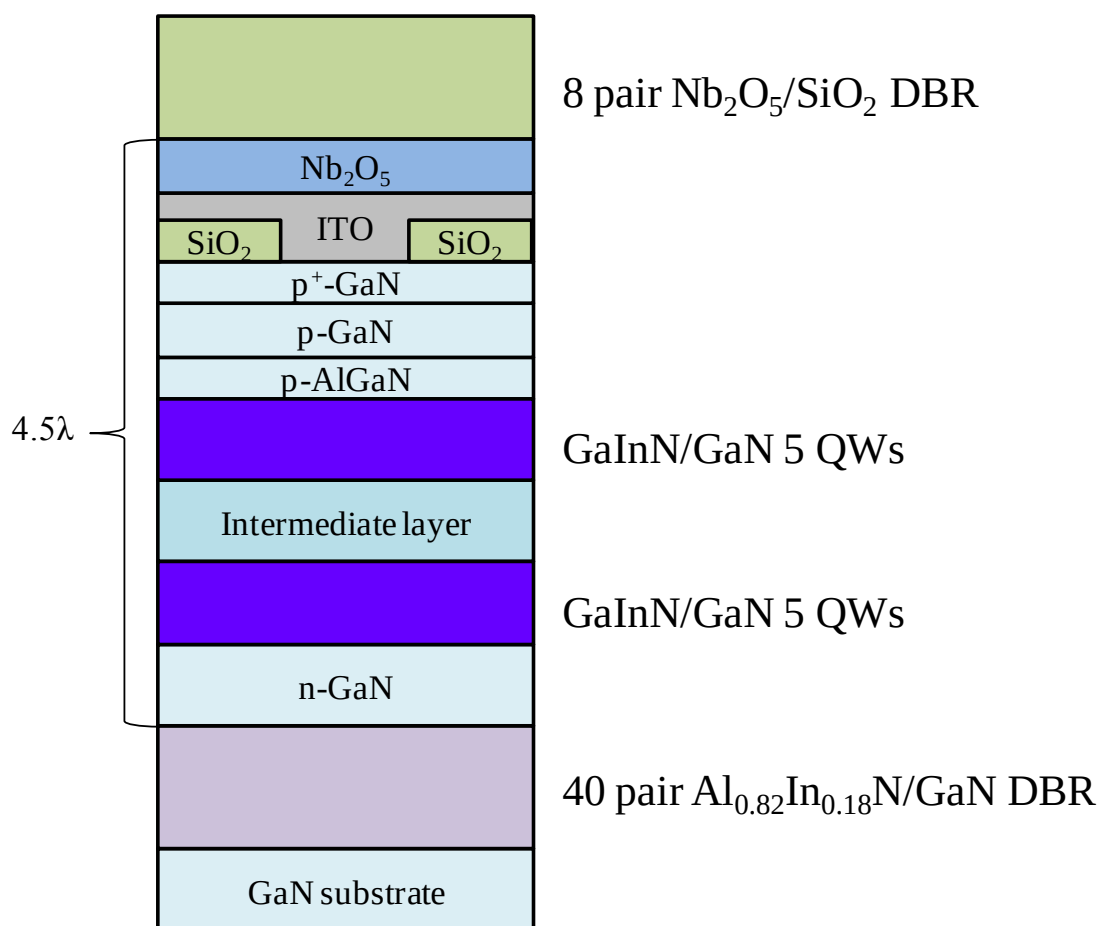


図 4-11 周期利得構造を有する面発光レーザの概略図

共振波長を 410 nm とし、かつ、4.5λ 共振器を有する面発光レーザを設計・作製した。下部 DBR、n-GaN、p-AlGaN、p-GaN、p<sup>+</sup>-GaN コンタクト層、電流狭窄構造、スペーサ層、上部 DBR、電極構造および発光径は、第 3 章の基本構造の面発光レーザと同一のため省略する。共振器長以外に基本構造と異なる部分は、第二活性層と中間層の追加である。n 側活性層に相当する第一活性層の GaInN/GaN 5QW 成長後、45 nm 中間層と第二活性層の GaInN/GaN 5QW を成長

した。中間層の Mg ドープ濃度は、4-4 節での検討により見積もられた最適値  $3.8 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$  とアンドープである  $0 \text{ cm}^{-3}$  を用いた。中間層の厚さを 45 nm に設定することで、二つの活性層が電界定在波の腹に配置される。

#### 4-6. デバイス特性

作製した周期利得構造を有する窒化物半導体面発光レーザの電流－電圧および電流－光出力特性を図 4-12 に示す。ここで、光出力は誘電体 DBR 側から測定した値であり、測定条件は室温での直流電流を用いた。中間層の Mg ドープ濃度が  $3.8 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$  の面発光レーザは、閾値電流が 6.0 mA であり、閾値電流密度は  $12 \text{ kA/cm}^2$  であった。レーザ動作電圧は 5.0 V、最大光出力は 0.40 mW、外部微分量子効率 は 2.6% であった。一方、中間層がアンドープの面発光レーザは、閾値電流が 6.8 mA、閾値電流密度は  $13.6 \text{ kA/cm}^2$ 、レーザ動作電圧は 5.0 V、最大出力は 0.09 mW、外部微分量子効率は 0.6% であった。

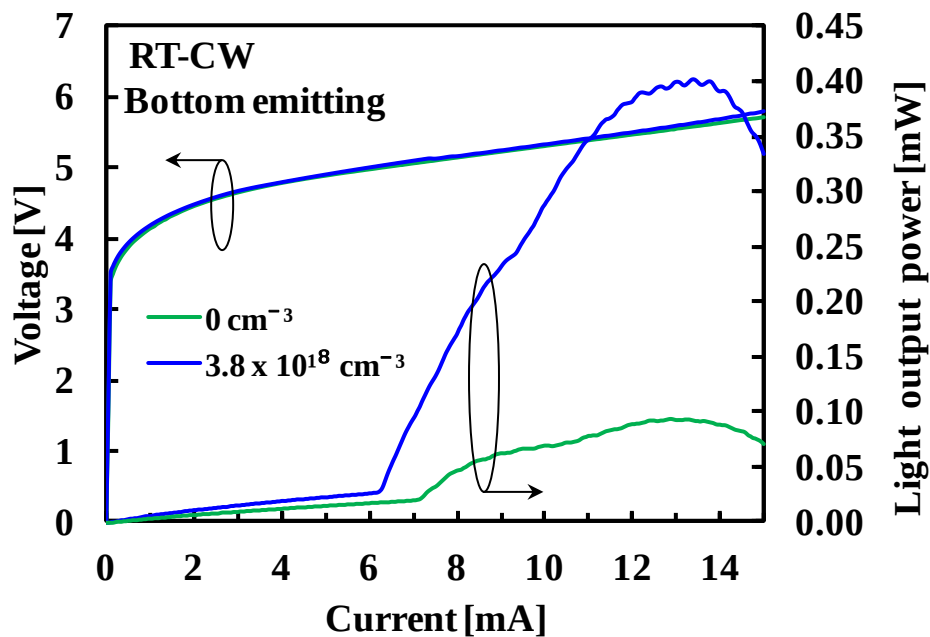


図 4-12 周期利得構造を有する窒化物半導体面発光レーザの電流 - 電圧 - 光出力特性

次に、第3章で作製した基本構造の面発光レーザと中間層の Mg ドープ濃度  $3.8 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$  と特性を比較する。基本構造の面発光レーザは、閾値電流は 7.4 mA、閾値電流密度  $14.8 \text{ kA/cm}^2$  であった。また、発振閾値での動作電圧は 5.1 V であった。最大光出力は 0.40 mW であり、外部微分量子効率 は 3.2% であった。なお、上下の反射率比から半導体 DBR 側からの最大光出力を換算すると、両構造とも約 3 mW である。基本構造と周期利得構造面発光レーザの光出力特性において、各々 11 mA と 9.3 mA 時に、高次の横モード動作によるキンク<sup>8)</sup>が観測された。

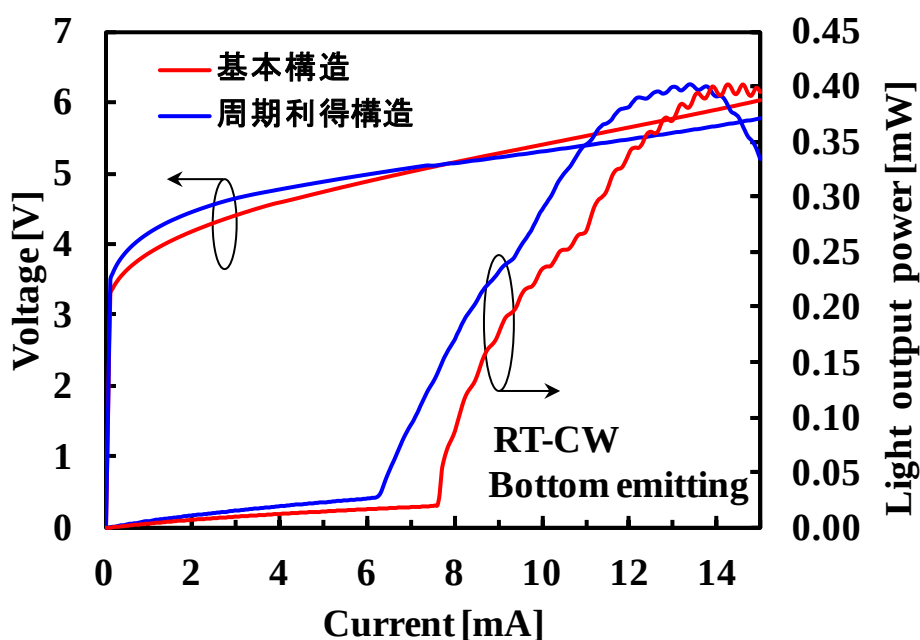


図 4-13 異なる構造の面発光レーザにおける電流 - 電圧 - 光出力特性  
(誘電体 DBR 側から計測)

図 4-14 に発振閾値前後の電流注入時における、Mg ドープ濃度  $3.8 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$  の周期利得構造面発光レーザの室温での発光スペクトルを示す。注入電流増加に伴い、発光強度は  $1.1 I_{th}$  において著しく増加するとともに、半値幅 0.04 nm の鋭いスペクトルが観測された。注入電流  $0.9 I_{th}$  から  $1.1 I_{th}$  の増加より、410.6 nm から 410.9 nm ヘレッドシフトが観測された。

以上より、周期利得構造を有する面発光レーザは閾値電流 6.0 mA での発振が実証され、周期利得構造を有しない通常の面発光レーザに比べ、約 17%の閾値電流の低減が観測された。

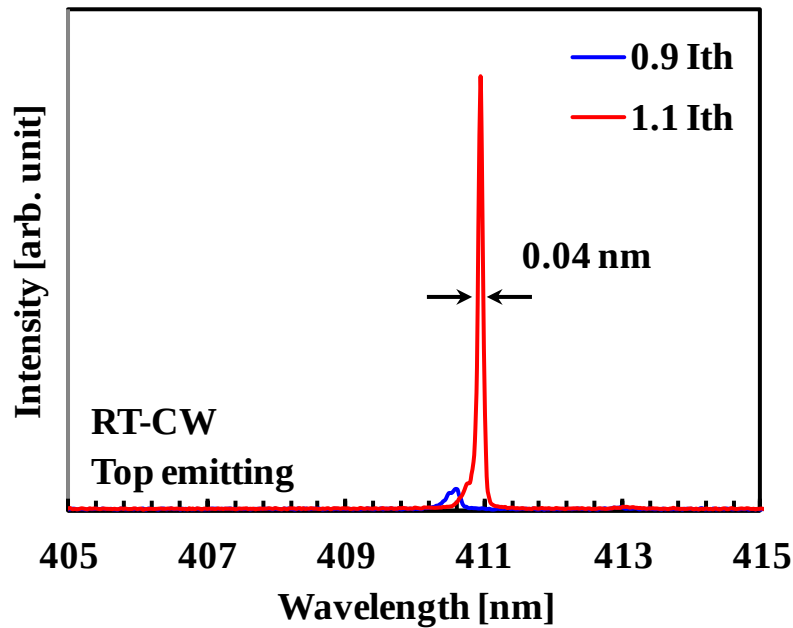


図 4-14 周期利得構造を有する面発光レーザの発振前後の EL スペクトル

#### 4-7. 閾値電流の理論結果との相関

基本構造および周期利得構造面発光レーザの閾値電流は、それぞれ 7.2 mA、6.0 mA であった。これらの結果を受けて、周期利得構造を用いることで得られた閾値低下の妥当性を、理論計算から検討する。今回、計算に用いたパラメータを表 4-1 に示す。また、これらのパラメータ値を用いて、量子井戸数を変化させた場合のモード利得に対する閾値電流の関係を図 4-15 に示す。計算では、5 周期活性層と 10 周期活性層の閾値電流を比較すると、10 周期活性層を用いることで 1/2 以下まで低減する。しかしながら、実験では約 17% の低減であった。理論計算と実験結果が異なる理由は次の二点が考えられる。一つ目に、周期利得構造のキャリアのアンバランスが挙げられる。中間層がアンドープの周期利得構造では、見積もられた発光強度比が 0.3 であり、Mg ドープ濃度  $3.8 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$  と比較して低いため、キャリア濃度が低いと思われる n 側活性層では誘導放出に至っておらず、本来の特性が得られていないと考えられる。二つ目に、計算に使用したパラメータが本デバイスと異なることが挙げられる。本来であれば、各構造の内部損失および注入効率は、実験から導出された値を用いる必要があ

るが、表 4-1 に示すように、報告値を参考に行しているため、今回のデバイスの実際の値と異なる可能性が高い。

表 4-1 計算に用いたパラメータ値

|            |            |                                                     |
|------------|------------|-----------------------------------------------------|
| $q$        |            | $1.602 \times 10^{-19} \text{ C}$                   |
| $N_w$      |            | 1~10                                                |
| $V_1$      |            | $1.508 \times 10^{-13} \text{ cm}^3$                |
| $N_{tr}$   |            | $7.000 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$              |
| $\eta_i$   |            | 0.89                                                |
| $\Gamma_1$ | $\Gamma_t$ | 0.7                                                 |
|            | $\Gamma_l$ | 0.0232                                              |
| $g_0$      |            | $2400 \text{ cm}^{-1}$                              |
| $B$        |            | $2.000 \times 10^{-11} \text{ cm}^3 \text{ s}^{-1}$ |
| $L_{eff}$  |            | 945 nm                                              |
| $R_1$      |            | 0.9996                                              |
| $R_2$      |            | 0.9970                                              |
| $\alpha_i$ |            | 30                                                  |
| $\alpha_m$ |            | 18.5                                                |

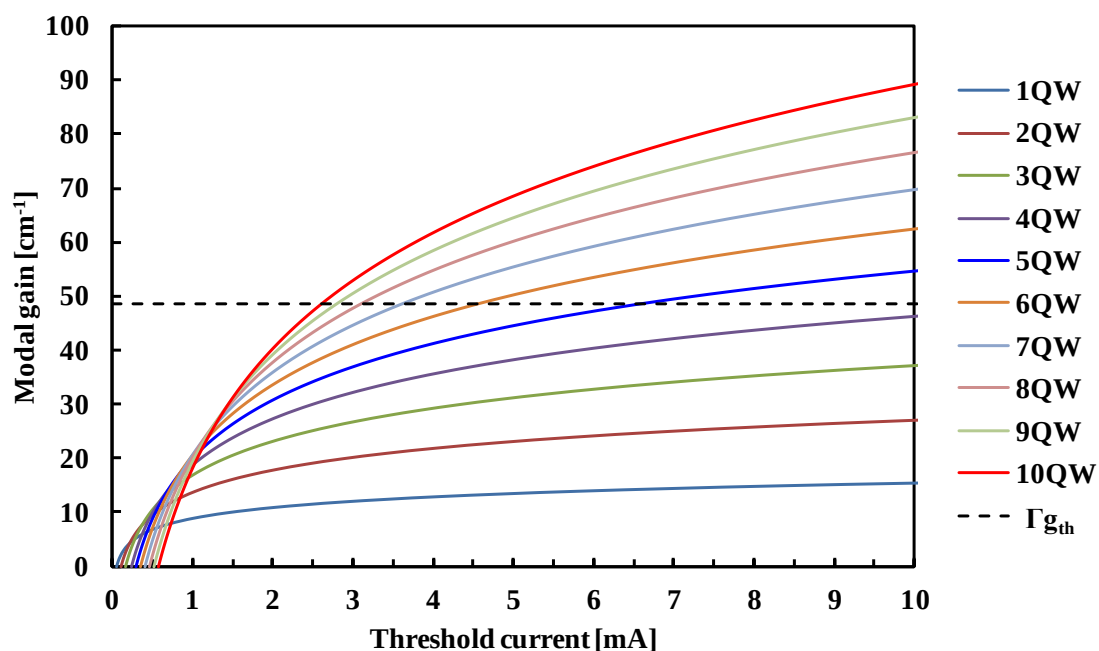


図 4-15 基本構造と周期利得構造を有する面発光レーザのモード利得対閾値電流の関係

#### 4-8. まとめ

本章では、周期利得構造を窒化物半導体面発光レーザの適用に向けて、二つの活性層を有する LED を用いて各活性層への均一なキャリア注入を検討した。異なる濃度の Mg ドープした中間層を活性層間に配置することで、n 側活性層への正孔注入の促進を試みた。活性層配置が異なる二種類の構造を用いて、中間層の Mg ドープ濃度依存性から、各々の構造におけるキャリア輸送を検討した。最後に、窒化物半導体面発光レーザの性能向上を目指し、周期利得構造を有する窒化物半導体面発光レーザを検討した。以下に、本検討により得られた知見をまとめる。

- ・順配置と逆配置の両方を用意することで、活性層が同一の周期利得構造における中間層の最適な Mg 濃度の決定が可能になった。
- ・周期利得構造に向けた最適な中間層の Mg ドープ濃度は、発光強度低下が確認されず、かつ発光強度比が 0.35 となる  $3.8 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$  であると決定した。
- ・中間層の Mg 濃度を  $3.8 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$  として、周期利得構造を有する窒化物半導

体面発光レーザの特性評価した結果、閾値電流 6.0 mA が得られた。周期利得構造を用いない場合と比較して、約 17%の閾値電流の低減を実証した。

## 参考文献

- 1). S. Rapp. and K. Streubel, Mater. Sci. Eng. B **44**, 373 (1997).
- 2). Y. Sun, Y. Ning, T. Li, L. Qin, C. Yan, and L. Wang, J. Lumin. **119**, 556 (2006).
- 3). T. Wunderer, J. E. Northrup, Z. Yang, M. Teepe, A. Strittmatter, N. M. Johnson, P. Rottella, and M. Wraback, Appl. Phys. Lett. **99**, 201109 (2011).
- 4). R. Charash, P. P. Maaskant, L. Lewis, C. McAleese, M. J. Kappers, C. J. Humphreys, and B. Corbett, Appl. Phys. Lett. **95**, 151103 (2009).
- 5). J. -Y. Zhang, L. -E. Cai, B. -P. Zhang, X. -L. Hu, F. Jiang, J. -Z. Yu, and Q. -M. Wang, Appl Phys. Lett. **95**, 161110 (2009).
- 6). H. Xing, D. S. Green, H. Yu, T. Mates, P. Kozodoy, S. Keller, S. P. Denbaars, and U. K. Mishra, Jpn. J. Appl. Phys. **42**, 50 (2003).
- 7). 松井 健城、二つの活性層を有する窒化物半導体発光ダイオードに関する研究、名城大学大学院修士学位論文 (2014).
- 8). R. P. Schneider, K. D. Choquette, J. A. Lott, K. L. Lear, J. J. Figiel, and K. J. Malloy, IEEE Photon. Technol. Lett. **6**, 313 (1994).

## 第5章 高出力高温動作に向けた検討

### 5-1. はじめに

自動車のヘッドライトや施設照明のような屋外で高出力を必要とする場面では、 $100^{\circ}\text{C}$  を超える高温領域でのレーザ動作が必要になる<sup>1)</sup>。しかしながら、現状の窒化物半導体面発光レーザは、室温よりも高い温度領域での発振報告はされていない<sup>2)</sup>。本章では、良好な温度特性を有する窒化物半導体面発光レーザの実現を目指し、窒化物半導体面発光レーザにおける最適なデチューニング量を見積もる。デチューニングは赤外面発光レーザにおいて、高温での温度特性の改善のために利用されている設計方法<sup>3-5)</sup>であるが、窒化物半導体面発光レーザにおいては報告例がない。また、実装による温度特性の改善方法もあるが、本研究では、デチューニングの初期的な検討として、オンウエハの状態を検討する。第3、4章で作製した面発光レーザは、温度上昇の影響により、高電流注入時における光出力飽和、いわゆるロールオーバーが観測された。したがって、高出力化には、ロールオーバーする電流値を増大させて、飽和する光出力を増大させることが重要である。この光出力飽和は、素子温度の上昇により引き起こされることから、温度上昇による共振波長のシフトから素子内部の温度を見積もり、高温・高出力動作改善に向けた方針について述べる。

### 5-2. 窒化物半導体面発光レーザのデチューニング構造

2-9節では、良好な温度特性を得るために、プラスのデチューニング設計が望ましいことが示された。赤外面発光レーザのゲインスペクトルの温度上昇による波長シフト量は、窒化物半導体と比較して6倍程度<sup>6)</sup>である。また、 $\text{AlInN}/\text{GaN}$  半導体 DBR のストップバンド幅は、約 20 nm と誘電体 DBR と比較して狭いため、デチューニング量に制限を有する。そのため、本研究ではデチューニング量を+10 nm を限度とした。ゆえに、デチューニング量が 0、+4、+8 nm の計 3 サンプルを作製し、その素子特性を詳細に評価した。各面発光レーザサンプルは、第3章と同様に層厚を制御し作製された。

### 5-3. デバイス特性

図 5-1 に直流電流による全サンプルの電流 - 光出力特性を示す。全てのサンプルにおいて、光出力は誘電体 DBR 側から測定した。デチューニング量 0 nm のサンプルの閾値電流は 3.8 mA、最大出力の電流値は 11.8 mA であった。次に、デチューニング量+4 nm のサンプルの閾値電流は 6.6 mA、最大出力の電流値は 11.6 mA であった。最後に、デチューニング量+8 nm のサンプルの閾値電流は 8.0 mA、最大出力の電流値は 15.7 mA であった。以上の結果より、デチューニング量が大きいほど閾値電流が増加するとともに、最大光出力の電流値が増加することも観測された。閾値電流の増加は、2-9 節で述べたように、プラスのデチューニング量を有する素子では、高温にて利得波長と共振波長が一致するために、デチューニング量が大きい素子では、電流注入による温度上昇を必要とする。ゆえに、デチューニング量が大きい素子ほど、閾値電流が増加すると考えられる。5-4 節に、各デチューニングと最大光出力の素子温度を見積もる。

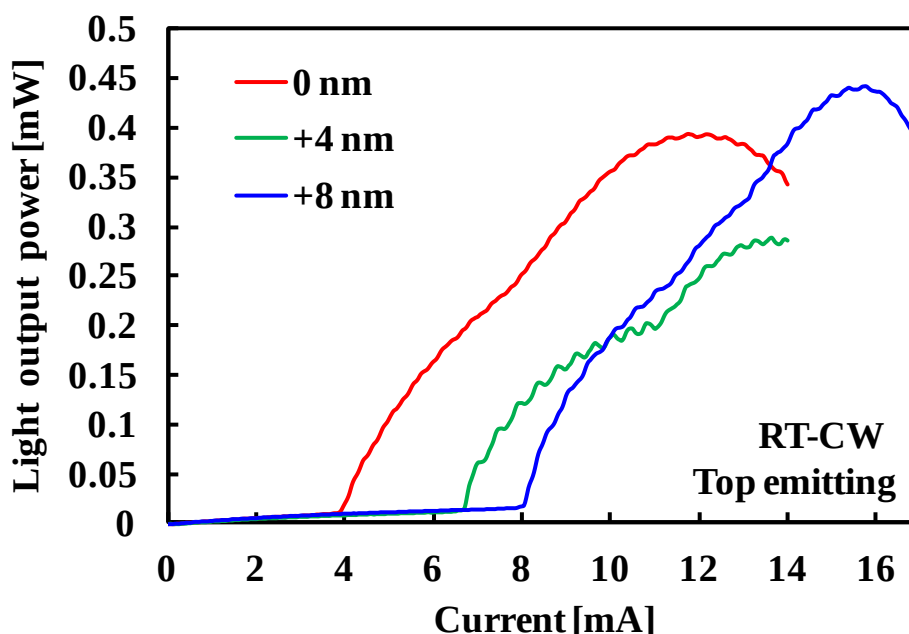


図 5-1 デチューニング量が異なるサンプルの電流 - 光出力特性

次に、各デチューニング量 0、+4、+8 nm の閾値電流の温度依存性を図 5-2 に

示す。直流電流による連続動作での測定結果が図 5-2(a)、パルス駆動による測定結果が図 5-2(b)である。パルス駆動条件は、パルス幅 5  $\mu$ s、パルス周期 500  $\mu$ s の duty1%を用いた。測定温度は 20°C から 10°C 間隔で上昇させた。図 5-2(a)より、0、+4、+8 nm の各デチューニングサンプルの最低閾値温度は、それぞれ 20、40、70°C であった。また、パルス駆動の場合の最低閾値温度は、図 5-2(b)より、それぞれ 20、30、50°C であった。連続駆動とパルス駆動では、測定した素子が異なるため面内分布に基づく誤差を含むと考えられるが、どちらの測定方法においても、デチューニング量が大きくなるほど高温で閾値電流の最下点を示した。さらに、最大発振温度もデチューニング量の増加に伴い、高いことが分かる。直流電流による連続駆動の最大発振温度は、デチューニング量が小さい順に、60、70、90°C、パルス駆動においては、80、130、150°C であった。本研究のパルス駆動と連続駆動の結果から素子内部温度を比較すると、連続駆動により 20~60°C 程度素子温度が上昇していると考えられる。さらに、パルス駆動の結果において、閾値電流が急激に増大する温度(70、100、110°C)は、連続駆動において発振が停止してしまう温度と比較的近いことも分かった。2-9 節の理論検討で得られた、各デチューニング量のマキシマムゲインと実験結果による最低閾値温度が異なる理由については、活性層温度と測定温度の差によるものであると考えられる。発振波長から見積もった測定温度は共振器全体の平均的な温度を測定している一方、実際の活性層温度はこの測定温度よりも高いことが予想される。

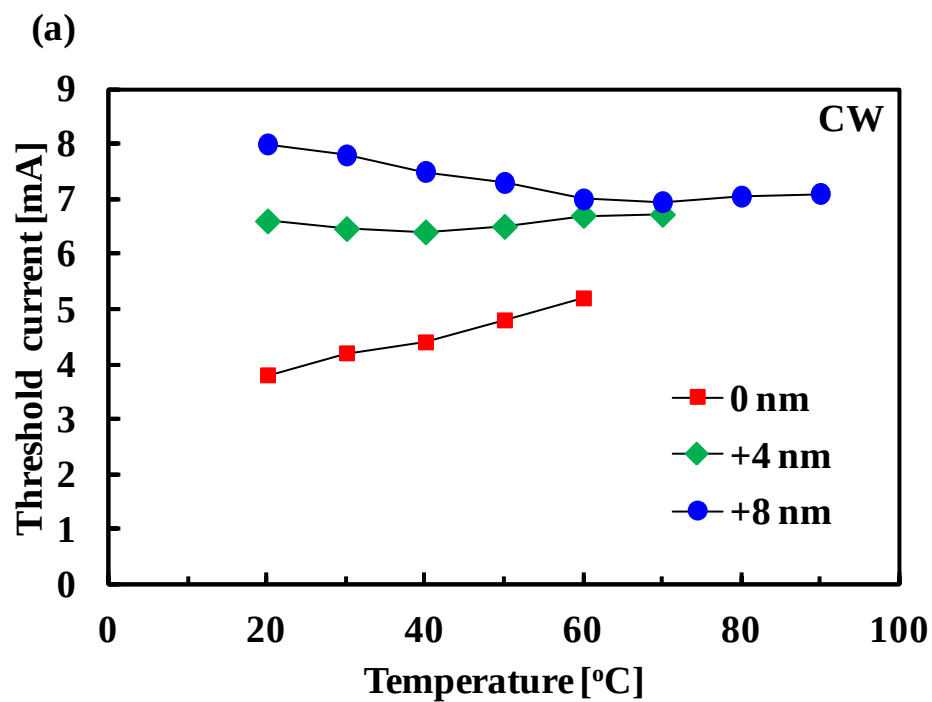


図 5-2(a) 各デチューニングサンプルの閾値電流の温度依存性(CW)

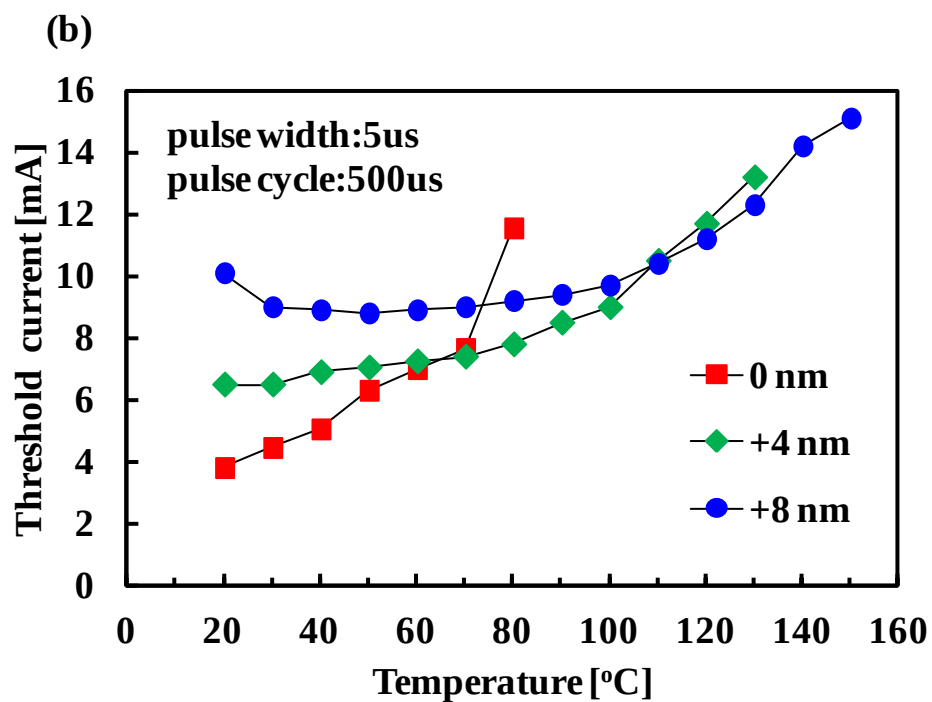


図 5-2(b) 各デチューニングサンプルの閾値電流温度依存性(パルス)

続いて、各デチューニングサンプルの 20°C 時の最大光出力を規格化した場合における、最大光出力の温度依存性を図 5-3 に示す。測定条件は、測定温度を 20°C から 10°C 間隔で上昇させ、連続動作させた。全てのサンプルにおいて、測定温度上昇に伴い、最大光強度が低下した。しかし、デチューニング量によって、温度上昇に対する光強度の低下の割合が異なった。デチューニング量 0 nm のサンプルは、発振が確認されなくなる 60°C まで  $-0.023^{\circ}\text{C}^{-1}$  のほぼ一定の割合で光強度が低下した。次に、デチューニング量 +4 nm のサンプルは、40°C まで  $-0.011^{\circ}\text{C}^{-1}$  の緩やかな光強度の低下を示し、40°C 以降では  $-0.026^{\circ}\text{C}^{-1}$  となり二段階の低下を示した。最後に、デチューニング量 +8 nm のサンプルは、40°C まで  $-0.008^{\circ}\text{C}^{-1}$  の最も緩やかな低下を示し、40°C 以降も  $-0.013^{\circ}\text{C}^{-1}$  の割合で減少し、デチューニング量 +4 nm と同様に二段階の低下を示した。以上の結果から、デチューニング量が増加するに従い、緩やかな光強度の低下を示した。

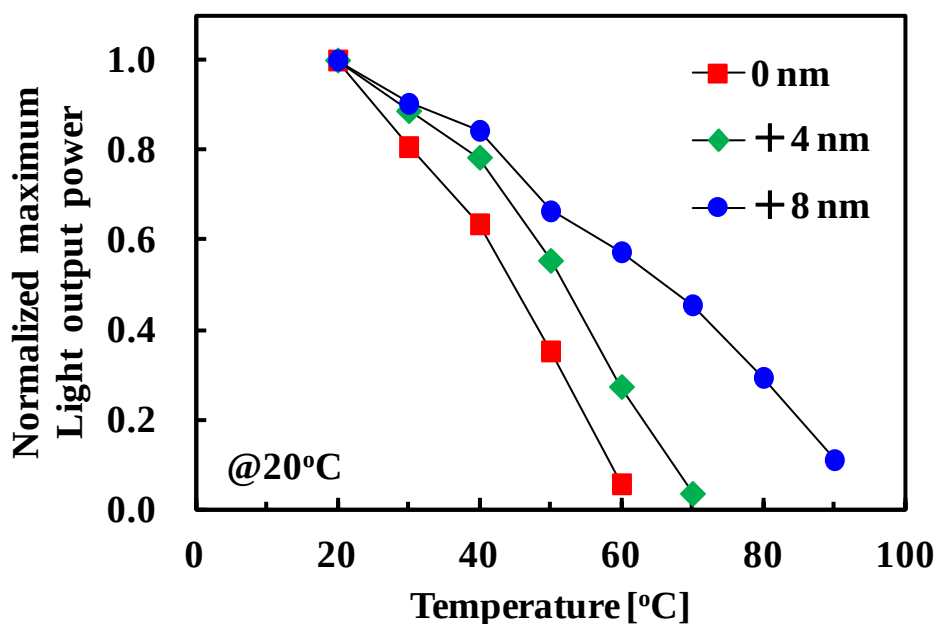


図 5-3 20°C 時の最大出力を規格化した場合の最大光出力温度依存性

#### 5-4. 素子温度の見積もり

次に、温度上昇による共振波長のレッドシフトから、素子の温度を見積もる。図 5-4(a)に、各デチューニングサンプルにおける 9 mA 固定時の波長シフトを示

す。電流値は、十分に発振が確認される 9 mA を選択し、測定条件は、パルス幅 5  $\mu$ s、パルス周期 500  $\mu$ s の duty1%を用いた。各チューニングサンプル 0 nm、+4 nm、+8 nm において、温度上昇の波長シフト量は、それぞれ 0.008 nm/ $^{\circ}$ C、0.012 nm/ $^{\circ}$ C、0.013 nm/ $^{\circ}$ C であった。これらの値は、第 2 章で算出した共振波長シフト量 0.010 nm/ $^{\circ}$ C とほぼ同等の値である。これらの実験結果を用いて、素子温度を見積もった結果を図 5-4(b)に示す。全てのサンプルは、閾値付近から温度が上昇し、デチューニング量が多いほど高温に達する電流値が大きいことが分かった。また、各素子のロールオーバー時の素子温度はいずれの素子でも約 140 $^{\circ}$ C と見積もられた。光出力を向上するには、実装により放熱性を改善し、素子温度を 140 $^{\circ}$ C 未満に抑える必要があると考えられる。

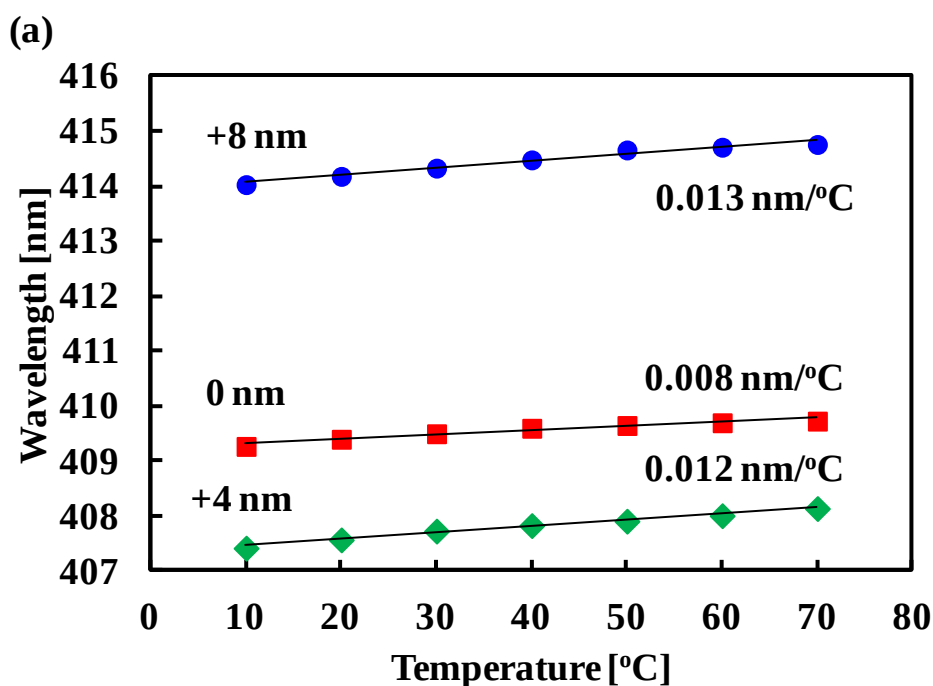


図 5-4(a) 各デチューニングサンプルにおける 9 mA 固定時の波長シフト

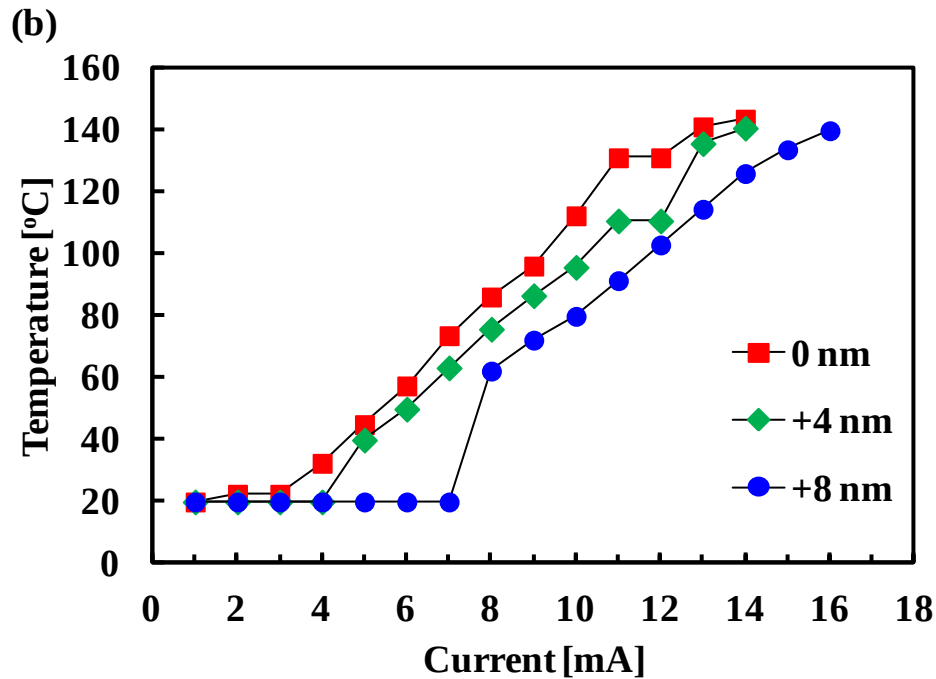


図 5-4(b) 電流上昇による素子温度変化

#### 5-5. まとめ

本章では、良好な温度特性を有する窒化物半導体面発光レーザの実現を目指し、窒化物半導体面発光レーザにおけるデチューニング量を検討した。異なるデチューニング量 0、+4、+8 nm の計 3 サンプル用いて、閾値電流および光出力の温度特性、素子温度を見積もった。以下に、本検討により得られた知見をまとめる。

- ・デチューニング量が大きくなるほど高温で閾値電流の最下点を示した。さらに、発振温度もデチューニング量の増加に伴い高くなることを明らかにした。最大発振温度は、連続動作で 90°C、パルス動作で 150°C 以上であった。

- ・光出力の温度依存性では、デチューニング量が大きくなるほど緩やかな光出力の低下を示した。

- ・共振波長のレッドシフトから素子温度を見積もると、全てのサンプルにおいてロールオーバー時の素子温度は約 140°C であった。

#### 参考文献

- 1). Y. Lai, N. Cordero, F. Barthel, F. Tebbe, J. Kuhn, R. Apfelbeck, and D. Wurtenberger, *Appl. Therm. Eng.* **29**, 1239 (2009).
- 2). T. -C. Lu, T. -T. Wu, S. -W. Chen, P. -M. Tu, Z. -Y. Li, C. -K. Chen, C. -H. Chen, H. -C. Kuo, S. C. Wang, H. -W. Zan, and C. -Y. Chan, *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron.* **17**, 1594 (2011).
- 3). J. Piprek, M. Mehta, and V. Jayaraman, *SPIE Proc., Physics and Simulation of Optoelectronic Devices XII*, **5349**, 175 (2004).
- 4). E. S. Bjorlin, J. Geske, M. Mehta, J. Piprek, and J. E. Bowers, *IEEE Photon. Technol. Lett.* **17**, 944 (2005).
- 5). A. Mircea, A. Caliman, V. Iakovlev, A. Mereuta, G. Suruceanu, C. -A. Berseth, P. Royo, A. Syrbu, and E. Kapon, *IEEE Photon. Technol. Lett.* **19**, 121 (2007).
- 6). H. Li, P. Wolf, P. Moser, G. Larisch, A. Mutig, J. A. Lott, and D. H. Bimberg, *IEEE J. Quantum Electron.* **50**, 613 (2014).

## 第6章 総括

本研究では、窒化物半導体面発光レーザの室温連続発振および高性能化を目的とし、層厚制御と素子構造の最適化、高光閉じ込めに向けた周期利得構造、高温動作に向けたデチューニングの三つの観点から検討を行った。その結果、世界において最高光出力となる 3.0 mW と最高発振温度となる 90°C を実証した。また、上記三つの検討項目において、実験結果と理論検討との妥当性を考察した。

以下に各章ごとに得られた結果をまとめ、最後に今後の課題を述べる。

### 第1章 序論

本章では、本研究の背景として III 族窒化物半導体の特徴、面発光レーザの歴史と特徴および窒化物半導体面発光レーザの課題と現状について述べた。最後に本研究の目的と検討項目を示した。

### 第2章 面発光レーザ設計に必要な理論モデル

本章では、窒化物半導体面発光レーザの設計に向けて、理論計算を行った。以下に示すように、各検討項目に関する素子構造の最適設計を検討した。

- ・層厚の制御は閾値電流に大きく影響し、閾値電流の増加を抑制するためには層厚の差異を±1%以内に制御する必要があることを示した。また、低反射率である、AlInN/GaN DBR 側からの光取り出しにより、高出力が得られることが示された。

- ・モード利得と閾値電流の関係から、共振器損失の値により、最低の閾値電流となる量子井戸数が異なることを示した。

- ・デチューニング量の増加に伴い、マキシマムゲインが高温側にシフトすることから、高温での発振が期待された。

### 第3章 窒化物半導体面発光レーザの設計と作製

本章では、精密な膜厚制御および最適素子構造により、以下に示すように、窒化物半導体面発光レーザを作製し、デバイス特性を検討した。

- ・共振器の作製において、結晶成長後、ITO 層蒸着後、スペーサ層蒸着後の各々のウェハにおける反射スペクトルにより共振波長を確認し、設計層厚からの差異を±1%以下に制御できることを示した。

- ・作製した窒化物半導体面発光レーザは、室温での連続動作による測定において、閾値電流 7.2 mA、最大出力 3.0 mW、外部微分量子効率 13%であった。また、発振波長 410.9 nm、半値幅 0.04 nm と鋭いスペクトルを示し、偏光度は 97%であった。以上の結果から、窒化物半導体面発光レーザの室温連続発振を実現し、従来の最大出力であった 1.1 mW を越える 3.0 mW の光出力を得た。

- ・発振後の電流 - 光出力特性のキンク前後において、NFP および FFP 測定の結果から、基本モードから高次モードへの推移を観測した。これは、利得導波と熱レンズ効果によるものであると思われる。

### 第4章 周期利得活性層を有する窒化物半導体面発光レーザ

本章では、周期利得構造を窒化物半導体面発光レーザの適用に向けて、二つの活性層を有する LED を用いて各活性層への均一なキャリア注入を検討した。異なる濃度の Mg をドーピングした中間層を活性層間に配置することで、n 側活性層へのホール注入の促進を試みた。活性層配置が異なる二種類の構造を用いることで、活性層の発光波長が同一の場合の最適な Mg ドープ濃度を検討した。最後に、窒化物半導体面発光レーザの性能向上を目指し、周期利得構造を有する窒化物半導体面発光レーザを検討した。以下に、本検討により得られた知見をまとめる。

- ・通常配置と逆配置の両方を用意することで、活性層が同一の周期利得構造における中間層の最適な Mg 濃度の決定が可能になった。

- ・周期利得構造に向けた最適な中間層の Mg ドーピング濃度は、発光強度低下が確認されず、かつ発光強度比が 0.35 となる  $3.8 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$  であると決定した。

- ・中間層の Mg 濃度を  $3.8 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$  として、周期利得構造を有する窒化物半導体面発光レーザの特性評価した結果、閾値電流 6.0 mA が得られ、電流注入による周期利得構造の窒化物半導体面発光レーザを実現した。周期利得構造を用いない場合と比較して、約 17%の閾値電流の低減を実証した。

## 第 5 章 高出力高温動作に向けた検討

本章では、窒化物半導体面発光レーザの高出力高温動作に向けてデチューニングの検討を行った。良好な温度特性を有する窒化物半導体面発光レーザの実現を目指し、窒化物半導体面発光レーザにおけるデチューニング量を検討した。異なるデチューニング量 0、+4、+8 nm の計 3 サンプル用いて、閾値電流および光出力の温度特性、素子温度を見積もった。以下に、本検討により得られた知見をまとめる。

- ・デチューニング量が大きくなるほど高温で閾値電流の最下点を示した。さらに、発振温度もデチューニング量の増加に伴い高くなることを明らかにした。従来の最大発振温度は、27°C であったが、デチューニングを施すことで、連続動作で 90°C、パルス動作では 150°C 以上の温度において発振を実証した。

- ・光出力の温度依存性では、デチューニング量が大きくなるほど緩やかな光出力の低下を示した。

- ・共振波長のレッドシフトから素子温度を見積もると、全てのサンプルにおいてロールオーバー時の素子温度は約 140°C であった。

最後に、本研究で残された課題および今後の窒化物半導体面発光レーザに関する研究について期待される事項を述べる。

第 3 章では、窒化物半導体面発光レーザの設計と作製について、共振器の層厚の制御と上下二つの反射鏡からの光取り出しを選択することで、室温連続動作を達成した。しかしながら、本研究で得られた窒化物半導体面発光レーザの特性は、製品化されている赤外面発光レーザと比較して効率が低い。今後は、閾値電流の低減として横方向の光閉じ込め構造の確立、内部損失の低減、短共振器化による光閉じ込め係数の増加等が検討課題となる。一方、光出力および効率の改善策については、内部損失を低減しつつ、その低い内部損失にて上下反射率を最適化することが必要である。

第 4 章では、窒化物半導体面発光レーザに、二つの活性層を有する周期利得構造を適用し、室温連続動作を実現した。しかしながら、理論検討で示された約 1/2 の低閾値電流は得られなかった。今後の検討項目として、活性層のキャリアバランスの改善による低閾値化のために、正孔注入をさらに促進させた構造が必要となる。例えば、中間層に Mg の添加に代わる分極ドーピングや超格子構造を取り入れること等が考えられる。また、本デバイスの未確定パラメータである、内部損失や注入効率の導出も必要である。これらが明らかになることで、面発光レーザの最適な設計が可能となる。

第 5 章では、窒化物半導体面発光レーザのデチューニング検討により、良好な温度特性を実現した。今後の課題では、温度上昇による光出力低下を改善することが挙げられる。そのためには、素子温度上昇を抑制させる構造が必要となる。例えば、素子を構成する材料(絶縁層、誘電体 DBR 等)を良好な熱伝導率の良い材料に変更し、実装まで行うことで特性改善が期待できる。

以上のように、残された検討課題は多いが、本研究の成果およびこれらの課題を解決することで、今後の III 族窒化物半導体面発光レーザの研究開発、さらには様々なアプリケーションへの実用化に繋がると期待される。

## 謝辞

本研究の遂行ならびに本論文の作成にあたり、終始御親切な御指導と御鞭撻を賜りました名城大学理工学材料機能工学科教授 竹内 哲也 先生に深く感謝致します。

本研究の遂行ならびに本論文の作成にあたり、貴重な御指導と御鞭撻を賜りました名城大学理工学研究科終身教授 赤崎 勇 先生に深く感謝致します。

本研究の遂行ならびに本論文の作成にあたり、終始御親切な御指導と御鞭撻を賜りました名城大学理工学材料機能工学科教授 上山 智 先生に深く感謝致します。

本研究の遂行ならびに本論文の作成にあたり、終始御親切な御指導と御鞭撻を賜りました名城大学理工学材料機能工学科准教授 岩谷 素顕 先生に深く感謝致します。

本研究の遂行にあたり、結晶成長および試料評価に関する貴重な御協力を頂きましたスタンレー電気株式会社 赤木 孝信 氏、名城大学理工学研究科大学院生 加賀 充 氏（現：東海理化株式会社）、森田 隆敏 氏（現：株式会社シャープ）、鈴木 智行 氏（現：豊田合成株式会社）、池山 和希 氏（現：株式会社トヨタ自動車）、小森 大資 氏（現：株式会社三菱電機）、小塚 祐吾 氏に深く感謝致します。

本研究の遂行にあたり、半導体プロセスおよび試料評価に関する貴重な御討論および御協力を頂きました名城大学理工学研究科大学院生 堀川 航佑 氏、（現：スタンレー電気株式会社）、山下 浩司 氏、古田 貴士 氏、林 菜摘 氏に深く感謝致します。

最後に、日頃からの実験および本論文の作成にあたり御協力を頂きました名城大学理工学研究科半導体工学研究室の諸氏ならびに卒業生の皆様に心より感謝申し上げます。

## 本研究および共同研究に関する論文

### 本研究に関する学術論文

1. “Carrier Injections in Nitride-Based Light Emitting Diodes Including Two Active Regions with Mg-Doped Intermediate Layers” : Kenjo Matsui, Koji Yamashita, Mitsuru Kaga, Takatoshi Morita, Tomoyuki Suzuki, Tetsuya Takeuchi, Satoshi Kamiyama, Motoaki Iwaya, and Isamu Akasaki, Jpn. J. Appl. Phys. 52, (2013) 08JG02.
2. “Optimization of Carrier Distributions in Periodic Gain Structures toward Blue VCSELs” : Kenjo Matsui, Kosuke Horikawa, Yugo Kozuka, Kazuki Ikeyama, Tetsuya Takeuchi, Satoshi Kamiyama, Motoaki Iwaya, and Isamu Akasaki, MRS Proc. 1736, (2014) mrsf14-1736-T04-08.R1.
3. “GaN-based vertical cavity surface emitting lasers with periodic gain structures” : Kenjo Matsui, Yugo Kozuka, Kazuki Ikeyama, Kosuke Horikawa, Takashi Furuta, Takanobu Akagi, Tetsuya Takeuchi, Satoshi Kamiyama, Motoaki Iwaya, and Isamu Akasaki, Jpn. J. Appl. Phys. 55, (2016) 05FJ08.

### その他学術論文

1. “Room-temperature continuous-wave operation of GaN-based vertical-cavity surface-emitting lasers with n-type conducting AlInN/GaN distributed Bragg reflectors” : Kazuki Ikeyama, Yugo Kozuka, Kenjo Matsui, Shotaro Yoshida, Takanobu Akagi, Yasuto Akatsuka, Norikatsu Koide, Tetsuya Takeuchi, Satoshi Kamiyama, Motoaki Iwaya, and Isamu Akasaki, Appl. Phys. Lett. 9, (2016) 102101.
2. “Room-temperature CW operation of a nitride-based vertical-cavity surface-emitting laser using thick GaInN quantum wells” : Takashi

Furuta, Kenjo Matsui, Kosuke Horikawa, Kazuki Ikeyama, Yugo Kozuka, Shotaro Yoshida, Takanobu Akagi, Tetsuya Takeuchi, Satoshi Kamiyama, Motoaki Iwaya, and Isamu Akasaki, Jpn. J. Appl. Phys. 55, (2016) 05FJ11.

3. “ドループ改善に向けた窒化物半導体 np 接合 LED の作製”：森田 隆敏、加賀 充、桑野 侑香、松井 健城、竹内 哲也、上山 智、岩谷 素顕、赤崎 勇、電子情報通信学会技術研究報告第 112 巻 62、2012 年

本研究に関する研究発表(国際学会)

1. “3-mW RT-CW GaN-Based VCSELs and Their Temperature Dependence” : Kenjo Matsui, Takashi Furuta, Natsumi Hayashi, Takanobu Akagi, Tetsuya Takeuchi, Satoshi Kamiyama, Motoaki Iwaya, and Isamu Akasaki, International Workshop on Nitride Semiconductors 2016 (IWN2016), B1.1.04, October 2016.
2. “MOVPE-grown GaN-based vertical cavity surface emitting lasers” : Kenjo Matsui, Takashi Furuta, Natsumi Hayashi, Yugo Kozuka, Takanobu Akagi, Tetsuya Takeuchi, Satoshi Kamiyama, Motoaki Iwaya, and Isamu Akasaki, Energy Materials Nanotechnology Meeting on Epitaxy 2016 (EMN2016), A09, September 2016.
3. “Room temperature CW operation of GaN-based VCSELs” : Kenjo Matsui, Takashi Furuta, Natsumi Hayashi, Yugo Kozuka, Takanobu Akagi, Tetsuya Takeuchi, Satoshi Kamiyama, Motoaki Iwaya, and Isamu Akasaki, 2016 Lester Eastman Conference on High Performance Devices (LEC2016), August 2016.
4. “GaN-based VCSELs using periodic gain structures” : Kenjo Matsui,

Kazuki Ikeyama, Takashi Furuta, Takanobu Akagi, Tetsuya Takeuchi, Satoshi Kamiyama, Motoaki Iwaya, and Isamu Akasaki, The 4th International Conference on Light-Emitting Devices and Their Industrial Applications (LEDIA'16), LED8-2, May 2016.

5. "Nitride-based VCSELs using a Periodic Gain Structures consisting of two GaInN 5 QWs" : Kenjo Matsui, Yugo Kozuka, Kazuki Ikeyama, Kosuke Horikawa, Takashi Furuta, Takanobu Akagi, Sho Iwayama, Norikatsu Koide, Tetsuya Takeuchi, Satoshi Kamiyama, Motoaki Iwaya, and Isamu Akasaki, 2015 Materials Research Society Fall Meeting and Exhibit (MRS2015), RR8.03, December 2015.
6. "A nitride-based VCSEL using a periodic gain structure" : Kenjo Matsui, Yugo Kozuka, Kazuki Ikeyama, Kosuke Horikawa, Takashi Furuta, Takanobu Akagi, Tetsuya Takeuchi, Satoshi Kamiyama, Motoaki Iwaya, and Isamu Akasaki, The 6th International Symposium on Growth of III-Nitrides (ISGN-6), We-B5, November 2015.
7. "Optimization of periodic gain structures toward blue VCSELs" : Kenjo Matsui, Daisuke Komori, Kosuke Horikawa, Tetsuya Takeuchi, Satoshi Kamiyama, Motoaki Iwaya, and Isamu Akasaki, The 3rd International Conference on Light Emitting Devices and Its Industrial Applications (LEDIA'15), LEDp2-48, April 2015.
8. "Optimization of Carrier Distributions in Periodic Gain Structures toward Blue VCSELs" : Kenjo Matsui, Kosuke Horikawa, Yugo Kozuka, Kazuki Ikeyama, Tetsuya Takeuchi, Satoshi Kamiyama, Motoaki Iwaya, and Isamu Akasaki, 2014 Materials Research Society Fall Meeting and Exhibit (MRS2014), T4.08, December 2014.
9. "Roles of Mg Doping in Nitride Semiconductor-Based Light Emitting

Diodes with Two Active Regions” : Kenjo Matsui, Takatoshi Morita, Tomoyuki Suzuki, Tetsuya Takeuchi, Satoshi Kamiyama, Motoaki Iwaya, and Isamu Akasaki, The 3rd International Conference on LED and Its Industrial Application (LEDIA'14), LED4-5, April 2014.

10. “Stable Balance of Emission Intensities from Two Active Regions in Nitride Semiconductor-Based Light Emitting Diodes” : Kenjo Matsui, Koji Yamashita, Mitsuru Kaga, Takatoshi Morita, Yuka Kuwano, Tomoyuki Suzuki, Tetsuya Takeuchi, Satoshi Kamiyama, Motoaki Iwaya, and Isamu Akasaki, 10th International Conference on Nitride Semiconductors 2013 (ICNS2013), BP2.13 August 2013.
11. “Carrier injections in nitride-based light emitting diodes including two active regions with Mg-doped intermediate layers” : Kenjo Matsui, Koji Yamashita, Mitsuru Kaga, Takatoshi Morita, Tomoyuki Suzuki, Tetsuya Takeuchi, Satoshi Kamiyama, Motoaki Iwaya, and Isamu Akasaki, International Workshop on Nitride Semiconductors 2012 (IWN2012), OD4-4, October 2012.

#### その他の研究発表(国際学会)

1. “1.7-mW nitride-based vertical-cavity surface-emitting lasers using AlInN/GaN bottom DBRs” : Takashi Furuta, Kenjo Matsui, Shotaro Yoshida, Natsumi Hayashi, Takanobu Akagi, Norikatsu Koide, Tetsuya Takeuchi, Satoshi Kamiyama, Motoaki Iwaya, and Isamu Akasaki, The 25th International Semiconductor Laser Conference 2016 (ISLC2016), ThD4, September 2016.
2. “Light emitting diodes with conductive AlInN/GaN Distributed Bragg Reflectors” : Kazuki Ikeyama, Yugo Kozuka, Kenjo Matsui, Masataka Ino,

Takanobu Akagi, Sho Iwayama, Norikatsu Koide, Tetsuya Takeuchi, Satoshi Kamiyama, Motoaki Iwaya and Isamu Akasaki, 2015 Materials Research Society Fall Meeting and Exhibit (MRS2015), RR8.02, December 2015.

3. “A pulsed operation of a VCSEL using thick GaInN quantum wells” : Takashi Furuta, Kenjo Matsui, Kosuke Horikawa, Kazuki Ikeyama, Takanobu Akagi, Tetsuya Takeuchi, Satoshi Kamiyama, Motoaki Iwaya, and Isamu Akasaki, The 6th International Symposium on Growth of III-Nitrides (ISGN-6), We-B4, November 2015.
4. “Quantitative evaluation of electron overflow by monitoring emissions from second active region in nitride-based blue LEDs” : Kento Hayashi, Kenjo Matsui, Takatoshi Morita, Tomoyuki Suzuki, Tetsuya Takeuchi, Satoshi Kamiyama, Motoaki Iwaya, and Isamu Akasaki, Japan Society of Applied Physics-Materials Research Society (JSAP-MRS), 16p-PM1-24, September 2013.
5. “Nitride-Based p-side Down LEDs on Tunnel Junction” : Takatoshi Morita, Mitsuru Kaga, Yuka Kuwano, Kenjo Matsui, Masahiro Watanabe, Tetsuya Takeuchi, Satoshi Kamiyama, Motoaki Iwaya, and Isamu Akasaki, The 3rd International Conference on LED and Its Industrial Application (LEDIA'13), LED2-6, April 2013.
6. “Direct Evidence of Electron Overflow by Monitoring Emissions from Second Active region in Nitride-Based Blue LEDs” : Kento Hayashi, Kenjo Matsui, Takatoshi Morita, Tomoyuki Suzuki, Tetsuya Takeuchi, Satoshi Kamiyama, Motoaki Iwaya, and Isamu Akasaki, The 3rd International Conference on LED and Its Industrial Application (LEDIA'13), LED2-5, April 2013.

本研究に関する研究発表(国内学会)

1. “二つの 5 周期活性層を有する周期利得構造を用いた窒化物半導体面発光レーザー”：松井 健城、古田 貴士、小塚 祐吾、赤木 孝信、竹内 哲也、上山 智、岩谷 素顕、赤崎 勇、第 35 回電子材料シンポジウム(EMS35)、We2-17、2016 年 7 月
2. “二つの活性層を有する発光ダイオードにおける Mg の影響”：松井 健城、竹内 哲也、上山 智、岩谷 素顕、赤崎 勇、第 6 回窒化物半導体結晶成長講演会、St-1、2014 年 7 月
3. “窒化物半導体二波長発光ダイオードにおける発光強度比の安定性”：松井 健城、山下 浩司、加賀 充、森田 隆敏、鈴木 智行、竹内 哲也、上山 智、岩谷 素顕、赤崎 勇、第 60 回応用物理学会学術講演会、29pG21-16、2013 年 3 月
4. “Mg ドープ中間層を用いた二波長発光ダイオードにおける電流注入依存性量の検討”：松井 健城、山下 浩司、加賀 充、森田 隆敏、鈴木 智行、竹内 哲也、上山 智、岩谷 素顕、赤崎 勇、第 73 回応用物理学会学術講演会、14pH10-4、2012 年 9 月
5. “中間層を用いた窒化物半導体二波長発光ダイオードにおけるキャリア注入の検討”：松井 健城、山下 浩司、加賀 充、森田 隆敏、鈴木 智行、竹内 哲也、上山 智、岩谷 素顕、赤崎 勇、第 4 回窒化物半導体結晶成長学会、SA-14、2012 年 4 月
6. “二つの活性層を有する窒化物半導体発光ダイオードのキャリア注入制御”：松井 健城、山下 浩司、加賀 充、森田 隆敏、鈴木 智行、竹内 哲也、上山 智、岩谷 素顕、赤崎 勇、第 59 回応用物理学会学術講演会、18p-F12-8、2012 年 3 月

その他の研究発表(国内発表)

1. “n 型 AlInN/GaN DBR を有する微小共振器 LED”：池山 和希、小塚 祐吾、吉田 翔太郎、松井 健城、赤木 孝信、岩山 章、竹内 哲也、上山 智、岩谷 素顕、赤崎 勇、第 63 回応用物理学会学術講演会、22p-H121-1、2016 年 3 月
2. “GaInN トンネル接合素子の低抵抗化”：森田 隆敏、加賀 充、桑野 侑香、松井 健城、渡邊 雅大、竹内 哲也、上山 智、岩谷 素顕、赤崎 勇、第 60 回応用物理学会学術講演会、28p-G11-12、2013 年 3 月
3. “電子ブロック層上活性層による電子オーバーフローの直接観測”：林 健人、松井 健城、森田 隆敏、鈴木 智行、竹内 哲也、上山 智、岩谷 素顕、赤崎 勇、第 60 回応用物理学会学術講演会、29p-G21-12、2013 年 3 月
4. “ドループ改善に向けた窒化物半導体 np 構造 LED の作製”：森田 隆敏、加賀 充、桑野 侑香、松井 健城、竹内 哲也、上山 智、岩谷 素顕、赤崎 勇、電気情報通信学会技術研究報告、ED2012-79、2012 年 11 月
5. “III 族窒化物半導体トンネル接合を用いた n-p 接合 LED”：森田 隆敏、加賀 充、桑野 侑香、松井 健城、竹内 哲也、上山 智、岩谷 素顕、赤崎 勇、第 73 回応用物理学会学術講演会、14pH10-6、2012 年 9 月
7. “III 窒化物半導体を用いた低抵抗トンネル接合”：森田 隆敏、加賀 充、桑野 侑香、山下 浩司、松井 健城、竹内 哲也、上山 智、岩谷 素顕、赤崎 勇、第 4 回窒化物半導体結晶成長学会、SA-18、2012 年 4 月