法政大学学術機関リポジトリ
HOSEI UNIVERSITY REPOSITORY

PDF issue: 2025-07-08

窒化物系半導体素子における電流及び光の様態の解明及び素子特性に与える影響に関する研究

林, 賢太郎 / HAYASHI, Kentaro

(開始ページ / Start Page)
1
(終了ページ / End Page)
129
(発行年 / Year)
2023-09-15
(学位授与番号 / Degree Number)
32675乙第256号
(学位授与年月日 / Date of Granted)
2023-09-15
(学位名 / Degree Name)
博士(工学)
(学位授与機関 / Degree Grantor)
法政大学 (Hosei University)
(URL)
https://doi.org/10.15002/00030036

法政大学審査学位論文

窒化物系半導体素子における電流及び光の様態の解明及び素子特性に与える影響に関する研究

林　賢太郎

目次

巻頭言

第 1 章　序論

1.1 研究背景
1.2 窒化物系デバイス
1.2.1 窒化物系パワーデバイス
1.2.2 窒化物系発光デバイス
1.3 本論文の目的
1.4 本論文の構成と独創性

第 2 章　自立 GaN 基板上 p-n ダイオードにおける順方向電流集中領域の直接観察法に関する研究

2.1 背景
2.2 フィッティングによる電流集中領域の算出
2.2.1 目的
2.2.2 フォトンリサイクリング効果
2.2.3 実験条件
2.2.4 フィッティングから算出した電流集中領域
2.3 可視化による電流集中領域の直接観察
2.3.1 目的
2.3.2 実験条件
2.3.3 発光パターンの評価
2.4 GaN エピタキシャル成長層表面モフォロジーの異なるウェハの評価
2.4.1 目的
2.4.2 ノマルスキー干渉顕微鏡による表面モフォロジーの評価
2.4.3 AFM による表面モフォロジーの評価
2.4.4 発光パターンの評価
2.4.5 TOF-SIMS による表面モフォロジーの評価
2.4.6 表面品質がもたらす GaN PND への影響
2.5 HVPE 成長による自立 GaN 基板上 PND の特性
2.5.1 目的

2.5.2 実験条件
2.5.3 高純度 HVPE GaN の PL マッピング
2.5.4 ハイブリッド成長 p-n ダイオードの EL 発光分布
2.5.5 電流－電圧特性
2.6 結論

第 3 章　Junction-Barrier Schottky ダイオードを用いた低電圧領域における大電流化

3.1 背景
3.1.1 JBSD
3.2 目的
3.3 実験方法
3.4 低電圧領域における大電流化
3.5 短トレンチ幅による高耐圧化
3.6 結論

第 4 章　凹面鏡を有する青色窒化物面発光レーザの放射角狭小化

4.1 背景
4.1.1 VCSEL
4.1.2 凹面鏡型 VCSEL
4.1.3 凹面鏡型 VCSEL のレンズおよび凹面鏡の形成
4.1.4 GaN-VCSEL におけるエテンデュ
4.2 デバイス構造と測定条件
4.3 測定結果
4.3.1 レンズ評価
4.3.2 I-L 測定結果とスペクトル
4.3.3 遠視野像
4.4 考察
4.5 結論

第 5 章　結言

謝辞

研究業績一覧

巻頭言

近年、省エネの重要性がますます強く叫ばれるようになった。とりわけここ数年は「ゼロエミッション」という、いわば究極の省エネを志向するような言葉も広く聞かれる。消費エネルギー低減へのあくなき探求はただのスローガンではなく、大学、企業を巻き込んだ大きなうねりとなっている。その中で、窒化物半導体素子はパワーデバイス、光デバイス両方の分野で省エネに貢献できる非常に重要な研究分野である。高い移動度、耐圧などから高効率のパワーデバイスへの応用研究が進んでおり、例えば小型の充電器などに実用化され小売店に並ぶようになった。また、発光特性の進歩は発光ダイオード(LED)、端面出射型レーザ(EEL)の実用化を経て、超低消費電力レーザの代名詞ともいえる面発光レーザ(VCSEL)の研究が盛になりつつある。したがって、本論文では省エネ社会の実現を念頭に、一貫してこれら電子・光デバイスにおける窒化物半導体素子の高性能化を目指す研究を論ずる。電子デバイスについては p-n 接合ダイオードと Schottky ダイオードを、光デバイスについては VCSEL を研究対象とした。

これら 3 つの研究のうち、p-n 接合ダイオードと Schottky ダイオードに関する研究は法政大学在学中に行ったもので、VCSEL に関してはソニーにおいて実施したものである。いずれも窒化物半導体を用いた素子であり、省エネを念頭にした素子の高性能という点で共通するが、それぞれ応用や形態は全く異なる。しかし、これらの全く異なる素子の研究を見比べてみると、類似点が認められる。

いずれの場合も、デバイスを高性能化させるため重要なのはその内部における電流あるいは光の様態を明らかにすることである。これらを調べる際に、例えばシリコン系のデバイスではシミュレーションを使用し、発熱分布などを測定することでこれらの挙動を推定することが多い。一方、窒化物半導体は、直接遷移型であるために電流を光に容易に変換することができ、さらに大きなバンドギャップを有するため素子内部を光(特に可視域の光)が容易に通過する。したがって、素子から外部に取り出される光を通常のカメラで観測でき、それを観測することで素子内部における光の様態をより直接的に推定することが可能である。また電流が光に効率よく変換されることから、光の分布から電流の分布を知ることができる。筆者は、最初に p-n 接合ダイオードの研究においてこの手法を採用し有効性を確認した。のちに VCSEL の研究についても、対象となる素子や原理は異なるものの、外部に取り出される光を観測して素子の様態を考察するという共通の手法を取り、素子特性の改善を実現することができた。こういった

手法をさまざまな素子を横断して活用できるのも、窒化物半導体の研究ならではのアプローチであるといえよう。

また、半導体素子の加工がキーポイントになっている点も重要な共通点である。例えばSchottkyダイオードの研究ではトレンチを形成することで電流の制御を試み、所望の特性を得ることができた。のちに、VCSELの研究では凹面鏡を形成することで光の制御をおこなった。本論文で後述するように、これらトレンチや凹面鏡はそれぞれの素子の特性発現の根幹をなす重要なパーツである。言及すべきは、これらはいずれも反応性イオンエッチング(RIE)という共通の加工技術を用いて実現するものであるということだ。たったひとつの技術を用いることで、時には電流の、時には光の制御を可能にし、全く異なるデバイスの高性能化を引き出すという点も、窒化物素子の研究ならではの醍醐味といえよう。

繰り返しになるが、本論文に登場する最初の2つの研究は、筆者が法政大学在学中に行った電子デバイスに関するもので、3つ目は全く別の場所で行った光デバイスに関するものである。今、改めてこれらの研究を振り返ってみれば、3つ目の研究の礎になったのは最初の 2 つの研究であることがわかる。応用も構造も全く異なるこれらの研究ではあるが、3つ目の研究では、最初の2つの研究で培った知見、外部光の観察による内部様態の考察、そして半導体加工による特殊機能の発現といった、共通のアプローチが活かされている。

本研究を遂行するにあたり、非常に多くの方のご指導を賜った。詳細は謝辞に掲載するが、これらの方々に深く感謝を申し上げる。本論文で紹介された種々のアプローチが、未来の、もっと別の場所、全く異なる素子の研究においても活用され、省エネ社会の実現に向けて人類をさらに進歩させることを期待しつつ、筆をおくこととしたい。

執筆をおえて
2023年4月
林賢太郎

第 1 章　序論

1.1 研究背景

現代社会において、エネルギーの供給は非常に重要な課題となっている。世界的には、電力不足による問題が指摘されており、先進国はもちろんのこと、新興国でも影響が出ていることが明らかになっている。例えば、インドでは 6 億人が影響を受けた大停電が起きた。このような状況において、持続可能なエネルギーの開発が求められている。国内においても、東日本大震災後、これまで日本の電力の 3 割を補っていた原子力発電の稼動率が著しく減少し、電力不足が課題となっている。そんな中で、2021 年、ヨーロッパにおいて「欧州グリーンディール」に関する法案が発表され、CO_2(二酸化炭素)などの温室効果ガスを 2030 年までに 1990 年比で少なくとも 55%削減するという目標が掲げられた。このように、エネルギー消費を最小限に抑え、エネルギーの需要と供給を調整することで、社会的、経済的、環境的な影響を最小限に抑えながら、エネルギーを有効に活用する重要性はますます高まっている。

法案の中で特に大きく取り上げられたのは自動車に関するもので 2035 年までに、自動車による CO_2 排出量を 100%削減するという極めて高い目標のものであった。これにより、ヨーロッパでは 2035 年までにガソリン車、ディーゼルエンジン車、ハイブリッド車についても事実上の販売が禁止され、EV(電気自動)車へのシフトが始まった。これを皮切りに世界中で EV 車へのシフトが始まっており、日本においても 2021 年の国内新車販売実績のうち、EV 販売台数が 2.7%と普及が進んでいる[1]。しかし、現在の電力不足状況に加えて、EV 車が普及することで電力需要が増加し、電力供給が不足する可能性がある。こうした電力不足への解決策として、省エネルギー技術や再生可能エネルギーの導入、スマートグリッドの適用など様々な策はあるが、半導体技術による電気エネルギーの有効利用も貢献できる部分が大きいことから注目を浴びている。中でも、現在、電力変換用デバイスとして大半使われているシリコン(Si)に代わる高電圧や大電流を制御するために用いられるパワー半導体の導入は大きな注目を浴びている[2]。なぜなら、電力が発電所から消費者までの送電や配電をする際に熱や音、電磁波などの形で損失を生じるが、パワー半導体を用いることでこれらの損失を大幅に抑えることができるからである。

パワー半導体として期待される窒化ガリウム(GaN)、ガリウムヒ素(GaAs)、炭化珪素(4H-SiC)と従来から使用されている Si の各材料の物性値を表 1 に示す[3]。GaN、SiC は、表 1 に示すように、現在主流の Si に比べ、バンドギャップエネルギーがおよそ 3 倍であるため、価電子帯から伝導帯への電子の熱励起が起こりにくく、高温動作が可能である。また、絶縁破壊電界がおよそ 10 倍高く、高耐圧の電子デバイスへの応用が可能である。GaN は SiC に比べ電子移動度が

およそ 1.3 倍、AlGaN/GaN 界面に存在する 2 次元電子ガス(2DEG)を電流経路として使う際はおよそ 2.9 倍と高いため、高出力、高周波、および高温デバイスへの応用に適した材料である[4]。これらの特性により、GaN は高効率パワー半導体として大きな注目を集めている。

表 1 各材料の物性値

	Si	GaAs	4H-SiC	GaN
バンドギャップエネルギー [eV]	1.12	1.42	3.26	3.39
電子移動度 [cm^2/V_s]	1450	8500	950	1000 2000(2DEG)
絶縁破壊電界[MV/cm]	0.3	0.4	3	3.3
熱伝導率[W/m・K]	151	46	490	130

また、GaN は直接遷移型半導体であり伝導帯に励起された電子がバンドギャップのエネルギーを光子として放出して価電子帯の正孔と再結合する。これは GaN 同様にワイドバンドギャップ半導体である間接遷移型(電子と正孔は段階的にフォノンを介在することで再結合が起こる)の SiC とは異なり再結合確率が大きく、光を放出する確率が高いため、発光ダイオード(Light Emitting Diode:LED)やレーザダイオード(Laser Diode:LD)といった発光素子に用いることができる。このような直接遷移型半導体の発光素子は小型軽量であり、熱的な問題が少ないため、高い効率で光を放出することができるため、GaN の青色 LED においては効率が 80%を超える製品が市場へ出回っている。また、GaN の LD においても、活性層に InGaN を用いた発振波長 370～530 nm で効率が 40%程度と、非常に高効率である（参考として、放電または電子ビームの励起による気体レーザの場合の効率が 1%未満とであり、光励起の固体レーザも同程度である)。よって、照明やディスプレイといった発光素子を GaN の LED や LD へ置き換えることで消費電力の削減が期待される。

1.2 窒化物デバイスの歴史

1.2.1 窒化物系パワーデバイス

GaN を用いたパワーデバイスはオン抵抗(R_{on})の低さと絶縁破壊電界の高さ故に、Si をベースとしたデバイスの機器に比べて低消費電力化や小型化することができる。応用としては、図 1 に示すような発電所や電気自動車での電力変換などに用いられているインバータである。インバータによる損失には熱損失やスイッチング損失が挙げられるが、図 2 に示すように GaN は現在主流の Si に変わり損失を 5%から 0.75%へ低減できる材料として期待されている。

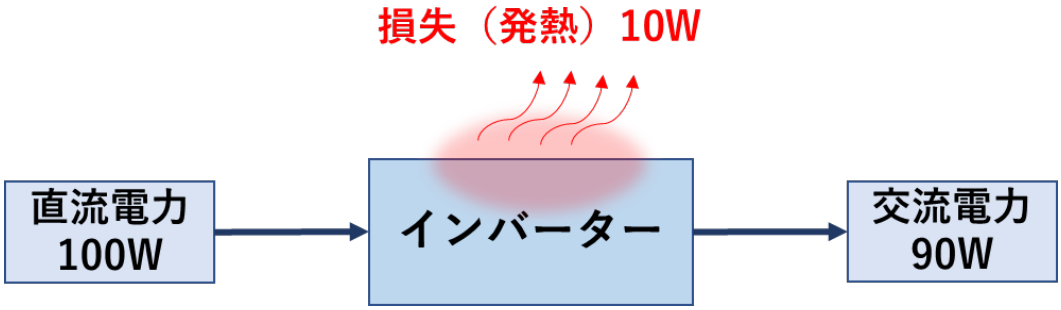


図 1 Si をベースとしたインバータの電力変換モデル(環境省 HP を参考に筆者作成)

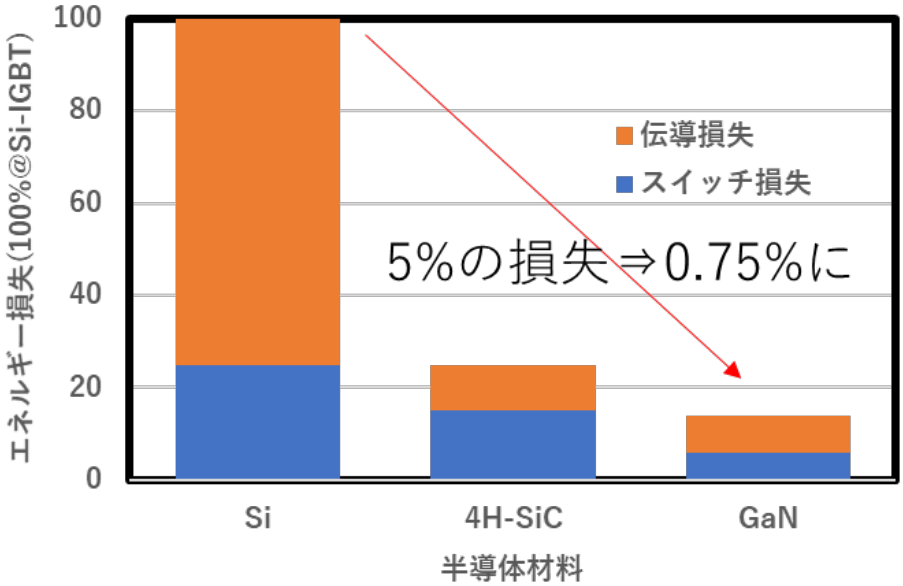


図 2 電力損失の比較(一般社団法人 GaN コンソーシアム HP を参考に筆者作成)

このような高効率デバイスは熱損失などを低減するために低オン抵抗化が必要になるが、同時に高耐圧(V_B)化も重要である。高耐圧化はモジュールを小型化することができる他、電力変換回路やモーター制御回路などに高電圧・高電流が必要なアプリケーショへ使用できる。オン抵抗と耐圧は(1)式に示すようなトレードオフの関係になる。

$$R_{on} = \frac{W_D}{q\mu_n N_D} = \frac{4{V_B}^2}{\varepsilon\mu_e {E_c}^3} \quad (1)$$

ここで W_Dは空乏層幅、q は電荷素量、μ_nは電子移動度、N_Dは不純物濃度、ε は誘電率、Ec は絶縁破壊電界である。(1)式より、オン抵抗と耐圧は絶縁破壊電界に強く依存する。よって、先に述べたように GaN は Si に比べて絶縁破壊電界がおよそ 10 倍高いために、大きな耐圧に耐えることができ、さらに同じ性能を持った Si 部品よりも薄く作ることができるので、大幅に消費電力が削減できる材料として期待されている。また、図 3 に半導体材料によるオン抵抗と耐圧の理論限界を比較したグラフを示す。図 3 より GaN は Si や SiC に比べて高耐圧かつ低オン抵抗のデバイスの作製が可能である。これは GaN が Si に比べて絶縁破壊電界が高いことや SiC よりも電子移動度が高いためである。

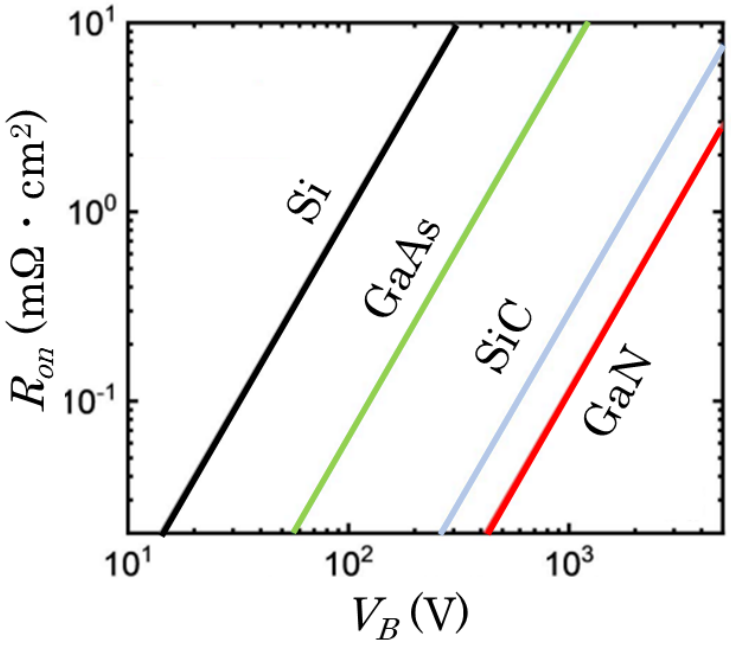


図 3 半導体材料によるオン抵抗と耐圧の理論限界比較

また、図 3 は半導体素子の性能を評価するための指標であり、バリガが提唱したバリガ性能指数(Baliga figure of merit:BFOM)として比較評価されることもある[5]。これはオン抵抗と耐圧を(2)式に示す指標としている。

$$BFOM = \frac{{V_B}^2}{R_{on}} \quad (2)$$

このように、高効率デバイスとして期待される GaN は、スマートフォンやラップトップ PC 向けの急速充電器に搭載されるなど、市場へ出回るようになってきた[6]。その多くは GaN 系トランジスタでありインバータや電源で使用される PFC(力率改善回路)向けのものである。性能としては耐圧 600 V で出力電流が 10～40 A 程度のものであり Si 製のダイオードと低耐圧 IGBT を用いたインバータに比べて電力損失を 60 %以上低減できる。また、効率の向上にも寄与し、特に低出力での効果が大きい。

一方、GaN 系ダイオードは数多くの機関から優れた報告がされている。図 4 の GaN 系ダイオードのデバイス構造に対する耐圧データより、SBD(Schottky Barrier Diode)と PND(p-n 接合ダイオード)は伴に 1 kV を超える高耐圧化に成功している。これは比較的高品質な自立バルク GaN 基板を用いることで縦型デバイスを作製できるためである。Si 基板上のダイオードでは格子定数の違いや熱膨張係数の違いなどから複雑な構造のバッファ層が必要で、この上に成長した GaN には 10^9 cm^{-2} 程度の高密度な貫通転位が存在し、さらにクラック発生の問題から厚い GaN 層の成長ができない。一方、比較的高品質な自立バルク GaN 基板を用いることで、貫通転位欠陥密度の少ない(10^6 cm^{-2} 台以下)結晶をバッファなしでより厚い GaN エピタキシャル層を成長させることができるので、一層の高耐圧デバイスを作製することができる。

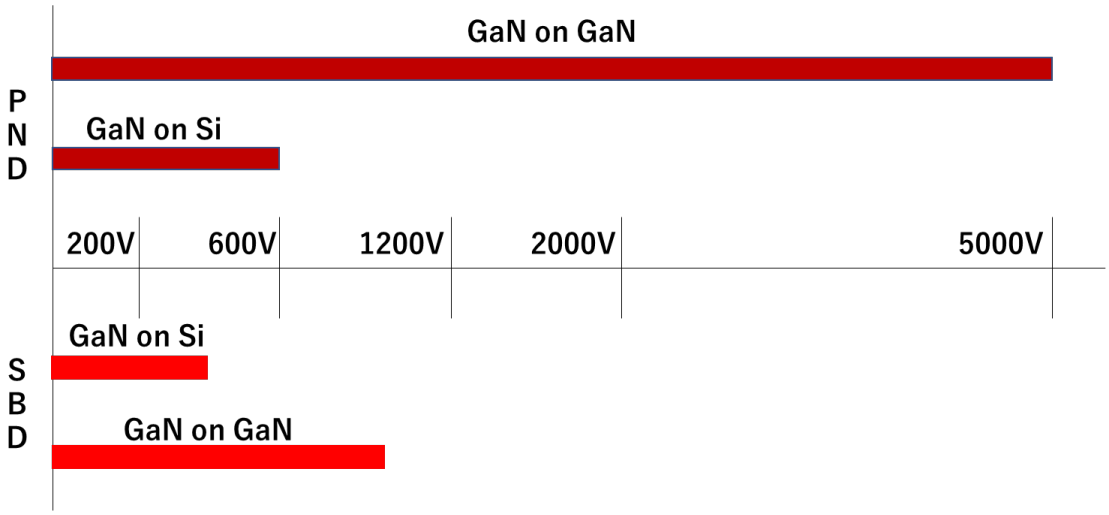


図 4 近年の GaN 系ダイオードのデバイス構造に対する耐圧([7]を参考に筆者作成)

図 4 に示すように GaN 系ダイオードの研究は SBD と PND の構造が主流であり、これらは応用先によって使い分けされている。以降 GaN 系 SBD と PND の報告例について述べる。

GaN 系 SBD は 2010 年に垂直 GaN SBD において絶縁破壊電圧 1.1 kV が報告されている[8]。Saito らは n-GaN の成長条件を最適化することで特定の化合物の励起状態から発生する黄緑色の光を示す Yellow luminescence(YL) 強度を低減し電子移動度 930 cm^2 V^{-1} s^{-1} の高品質化を実現した。また、図 5 に示すようにショットキー電極の端部に集中した電界による早期破壊を防ぐための端部終端として FP(フィールドプレート)構造を設けることで逆方向電圧 1.1 kV を得たとされる。

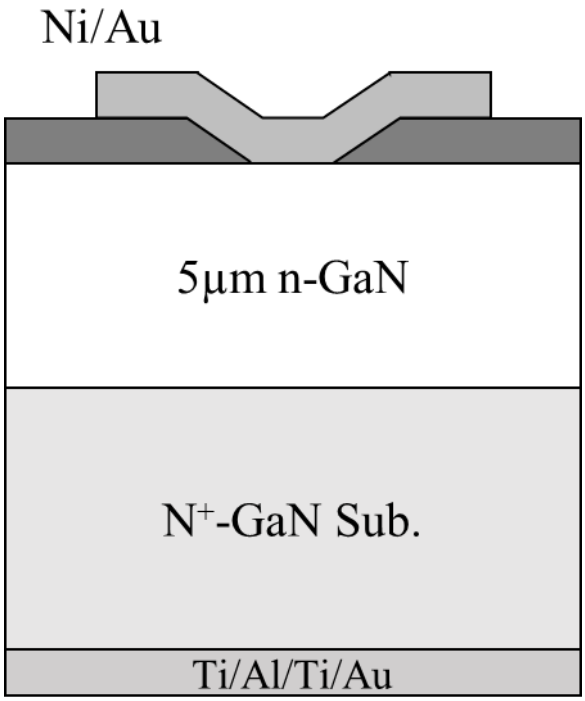


図 5 Saito らによる逆方向耐圧 1.1kV の GaN SBD 構造([8]を参考に筆者作成)

FP 構造とはショットキー電極の端部に絶縁膜を設けることで、電界を横方向に分散させるものであり、Oka らによって FP 構造による電界集中の緩和が報告されている[9]。図 6 に示すように Oka らは平面構造とメサを形成した構造のそれぞれに対する FP 構造の有無による電位分布と絶縁破壊電圧へ影響をシミュレーションと実デバイス結果から評価した。FP 構造とメサのない SBD 構造の場合、電位は主にショットキー電極の端に集まるが、FP 構造を使用することで、空乏層が表面に沿って広がり、エッジでの電界集中が緩和したと述べている。また、FP 構造を使用しないメサ構造においても同様の効果が報告されている。これは裏面(n^+-GaN 基板)に向かって空乏領域が拡大することに起因するとされている。図 7 に示すような FP 構造とメサ構造を組み合わせる構造により、ショットキー電極の端での電界集中はさらに減少した。この構造では、FP 電極を絶縁層上のショットキー電極の端部を覆いかぶせることで、メサの側壁から広がる空乏領域と裏面に向かって空乏層を広げることができるので、電界集中を大幅に緩和したためと述べられている。

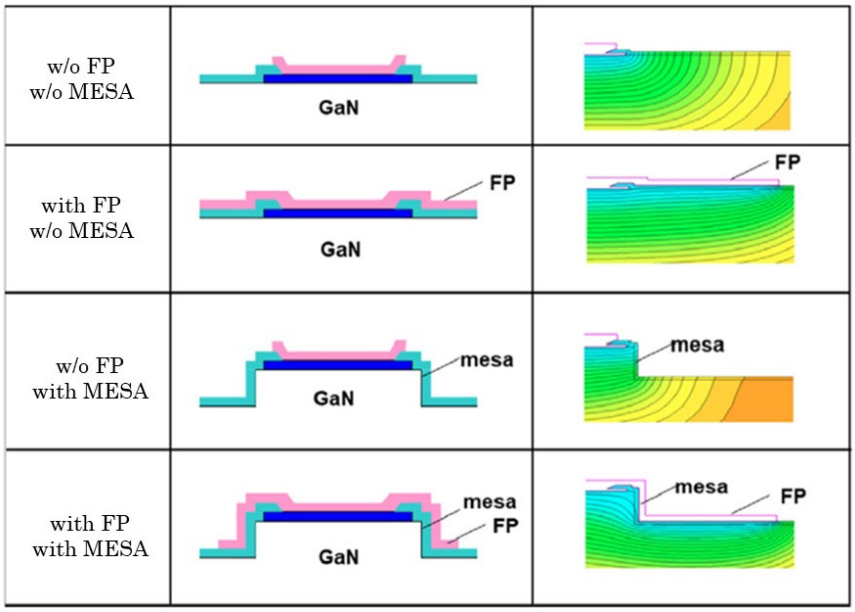


図 6 Oka らによる FP 構造またはメサの有無による SBD の逆バイアス電圧における電位分布をシミュレートした結果[9]

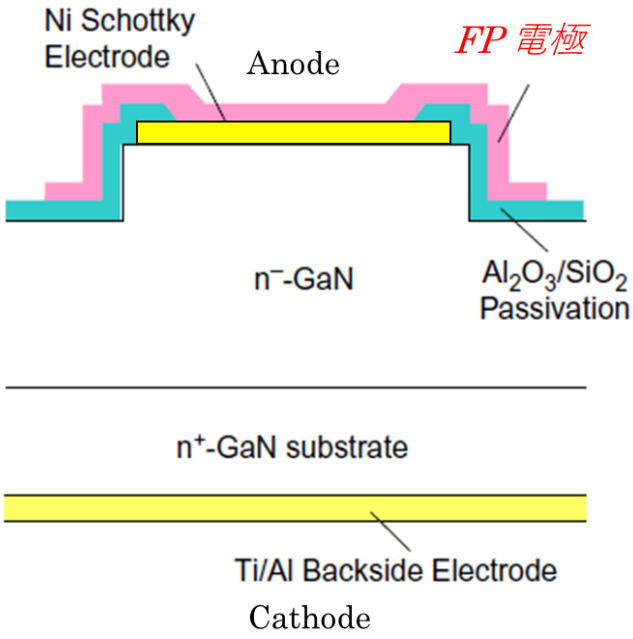


図 7 Oka らによる FP 構造とメサ構造を有する GaN SBD[9]

また、図 8 に示すようにそれぞれの実デバイス構造に対する絶縁破壊電圧結果はシミュレーションによる結果と良好に一致し、FP 構造とメサ構造伴になし

の絶縁破壊電圧が 200 V 未満と最も低く、FP 構造とメサ構造伴にありは 700 V と最も高い値が得られている。これらの結果は FP 構造を有するメサ構造が効果的にショットキー電極の端での電界集中を緩和させ、絶縁破壊電圧の増加をもたらしたためと述べられている。

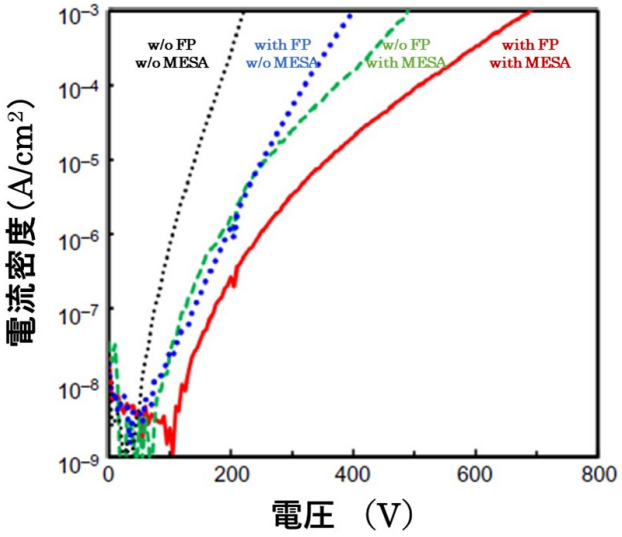


図 8 Oka らによる FP 構造またはメサ構造の有無による SBD の逆方向電流の比較[9]。

また、SBD は PND と比較して順方向電圧が低く逆回復時間が短くなる。Oka らの絶縁破壊電圧 700 V 級 SBD では図 9 に示すように順方向の立ち上がり電圧は 0.7 V であって 2.05 V で 50 A に達し、20 A 以上の微分オン抵抗は 27 mΩ であった。逆回復時間は図 10 に示すように市販の Si ダイオード(FRD)と電流と電圧がほぼ同じ仕様の SiC SBD と比べて最も短いものであり、SiC のものと比べて 1.4～1.9 倍の高速性能を示した。これらの結果は GaN SBD が高速スイッチングに優れていることを実証した。

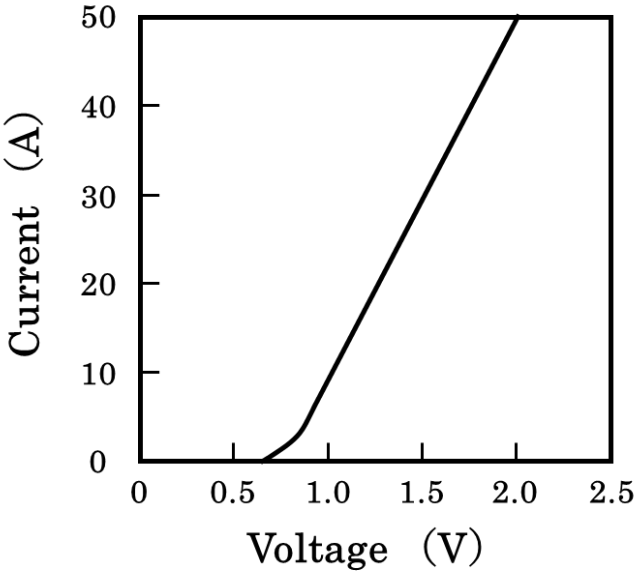


図 9 Oka ら絶縁破壊電圧 700 V 級 SBD の I-V 特性([9]を参考に筆者作成)

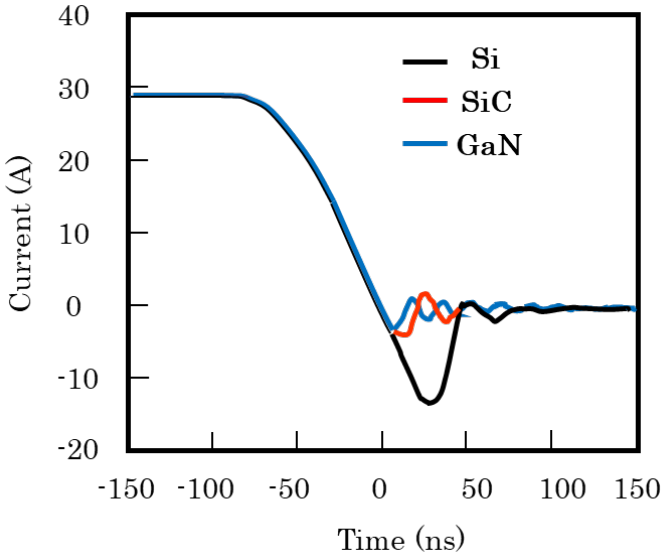


図 10 Oka ら絶縁破壊電圧 700 V 級 GaN SBD と SiC SBD、Si FRD の逆回復特性比較([9]を参考に筆者作成)

SBDは、Schottky障壁による低いターンオン電圧、少数キャリアがないため高速スイッチング、デバイス動作における低い電力変換損失という利点がある。しかし、SBDは高い逆リーク電流と熱安定性の低さに悩まされる。一方、PNDは逆リーク電流が非常に少なく、熱性能が優れている。図11にPNDの典型的な

電流−電圧特性の模式図を示す。GaN PNDに順方向電圧を印加すると約3 Vで急激に電流が流れ、整流器としてはオン状態となる。この電圧をオン電圧(V_{on})と呼びオン電圧は半導体の基礎物性である禁制帯幅に依存する。GaN PNDに逆方向電圧を印加した状態では電流をほとんど流れず、整流器としてはオフ状態である。しかし、ある負電圧から急激に電流が上昇する。この電圧を耐圧または降伏電圧(V_B)と呼ぶ。降伏現象を除いた電流−電圧特性は次の(3)式であらわされる。

$$I = I_0 \left\{ \exp\left(\frac{qV}{nkT}\right) - 1 \right\} \qquad (3)$$

(3)式においてI_0 は比例定数であり、半導体層の物性や温度、ダイオードの面積等によって決まる。qは単位電荷(素電荷)、Vはバイアス電圧、nはダイオードの理想因子であり、SiのPNDのようなキャリアの拡散により電流が支配される場合は1、化合物半導体のような再結合電流が支配的な場合は2に近い数値をとる。しかし、欠陥準位などが多い場合にはそれ以上の値になり得る。kはボルツマン定数、Tは絶対温度である。また、オン電圧以上の十分に電流が流れているときの抵抗をオン抵抗(R_{on})と呼ぶ。オン抵抗は微分抵抗であって$R_{on}=\Delta V/\Delta I$として求める。GaNのような化合物半導体では逆方向特性は拡散電流ではなく発生･再結合電流が支配的になるため、この(3)式であらわされる以上に大きな電流値をとる。その値は結晶の欠陥の種類や密度、プロセスによる影も大きくその解析は困難である。そのため、多くの機関において、順方向のオン抵抗と逆方向の降伏電圧によって結晶性やプロセス評価が行われている。

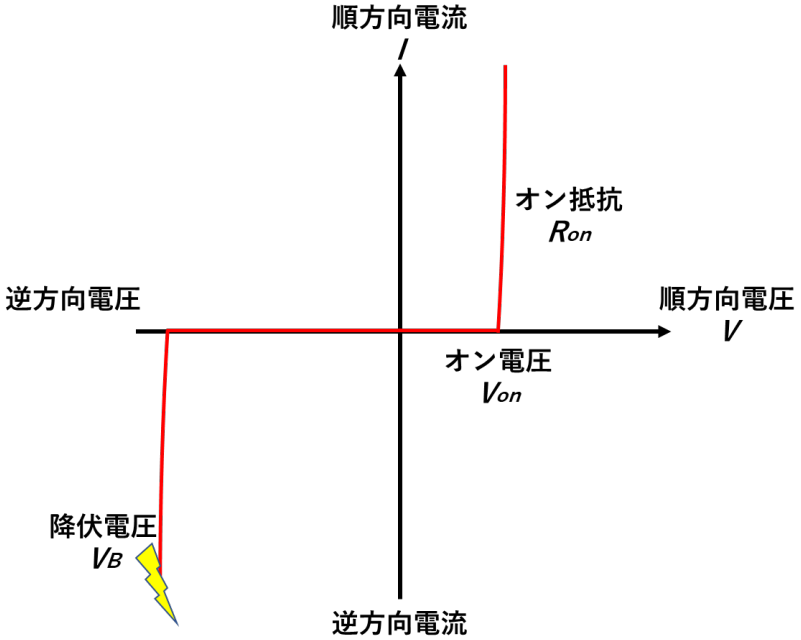


図11 典型的なGaN PNDの電流−電圧特性

GaN系PNDは2010年に垂直GaN PNDにおいて絶縁破壊電圧1kVを達成したのを皮切りに2015年に4 kV、2017年には5 kVとSBDに比べて5倍近い値を報告している[10-12]。これら高耐圧化のためには電界集中を緩和させることが重要であり、GaN SBD同様にメサ構造やFP構造が有効である。GaN PNDのメサ構造についてFukushimaらより、図12に示すような垂直にエッチングされたメサ構造はエッチング深度が増加するほど電界がデバイス全体に均一化されることが報告されている[13]。

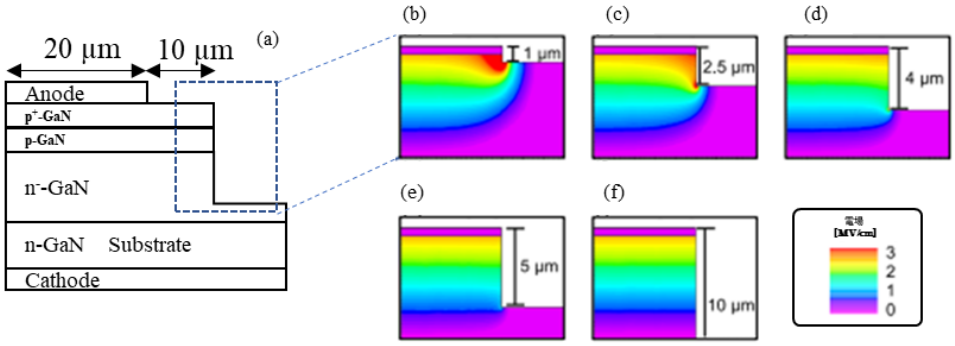


図12 Fukushimaらによる垂直メサ構造GaN PNDの断面図。(b) 1μm、(c) 2.5μm、(d) 4μm、(e) 5μm、(f) 10μmのメサ深さに対して-800 Vの逆バイアスを印加したときのPND電界分布シミュレーション[13]

一方、図13に示すような傾斜を有するベベルメサ構造による電界集中の緩和効果が報告されている[14]。ベベルメサ構造では、PNDの高ドープ層よりも低ドープ層が多くエッチングされるため、空乏層がp層領域にも広がる。これによって、エッチングによるダメージを受けた側壁の破壊を避けることができ、デバイス側壁の電界集中を緩和することができると述べられている。Maedaらによると傾斜角は小さく、かつp、n層のドーピング密度が近いほど電界集中を緩和できることが図13、図14のシミュレーション結果より報告されている[14]。また、Ohtaらより図15に示すようなFP構造と薄いp層とn層をエッチングによって階段をつける2段メサ構造によって、図16に示すような絶縁破壊電圧4.7-4.8 kVの高耐圧を報告している[15]。

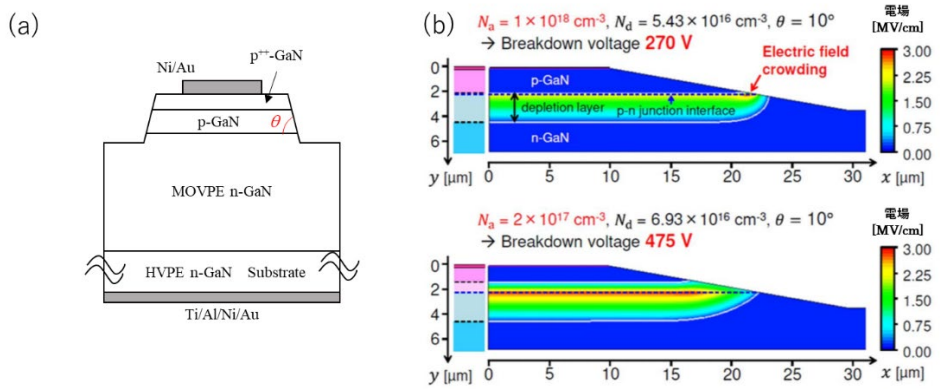


図13 Maedaらによる(a)ベベルメサ構造の断面図(b)ベベルメサ構造とp層ドーピング密度による逆バイアスを印加したときのPND電界分布シミュレーション[14]

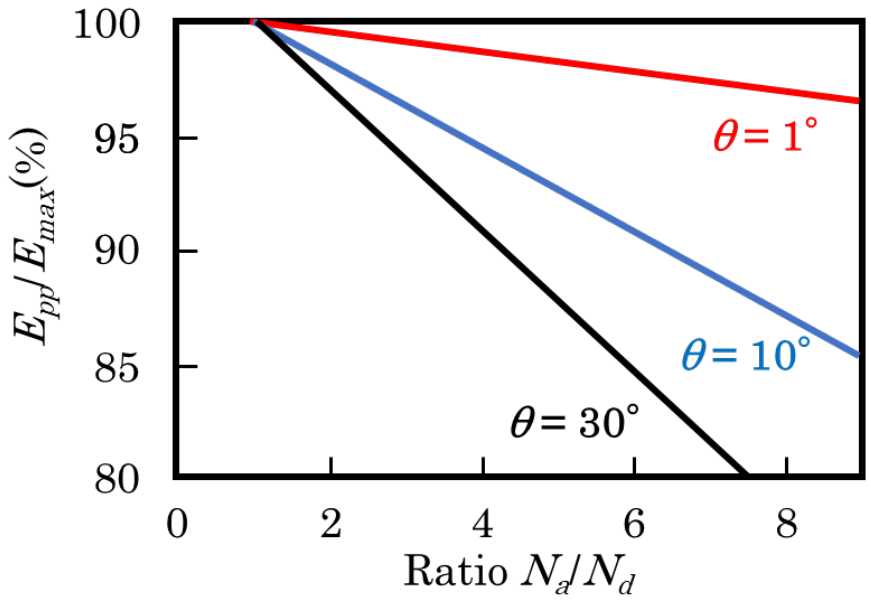


図14 異なる傾斜角とN_a/N_dの関数としての最大電界強度(E_{max})に対する平行面破壊電界強度(E_{pp})の比([14]を参考に筆者作成)

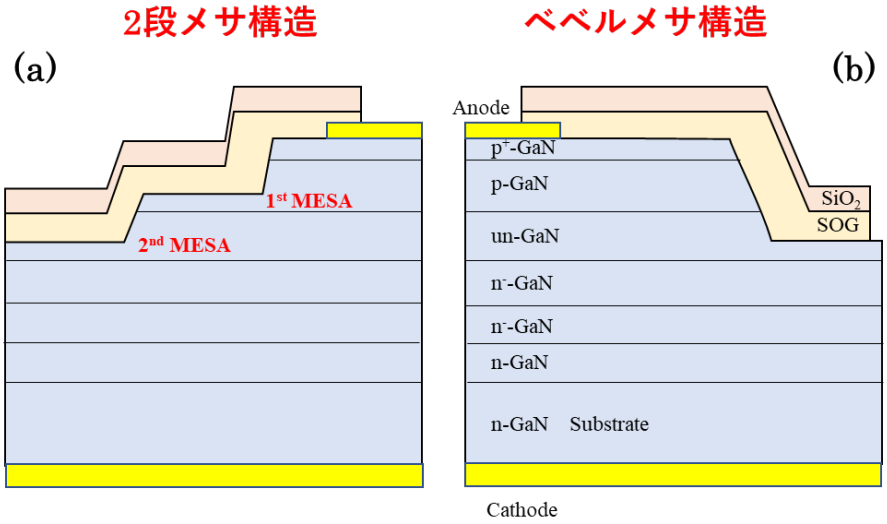


図15 Ohtaらによる(a)2段メサ構造(b)ベベルメサ構造([15]を参考に筆者作成)

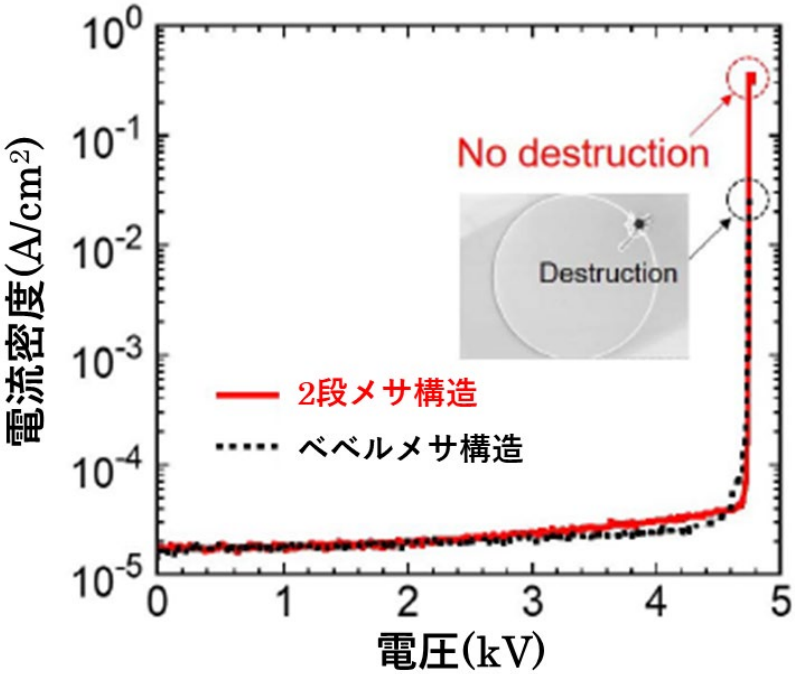


図16 Ohtaらによる2段メサ構造とベベルメサ構造の逆方向電流特性グラフ[15]

その他にガードリング構造による報告がされている[16-17]。Ohtaらは図17に示すような主PNDの周辺にガードリング部を形成し、主PNDとガードリング部の間にポリイミドフィルムからなるリング抵抗素子を挿入した[17]。逆電圧を印加すると、図18に示すように電場は最も外側のリング部分のメサ端に集中した。したがって、リーク電流は最も外側のリング部分のメサ端で流れると述べられている。このリーク電流は、リング抵抗で電圧降下V_dを誘起し、その結果、このガードリング構造を持たないPND[10-13,15]と比較して、V_dによる破壊電圧の改善が期待された。本ガードリング構造によって図19に示すような絶縁破壊電圧5.0 kVの報告がされている[17]。

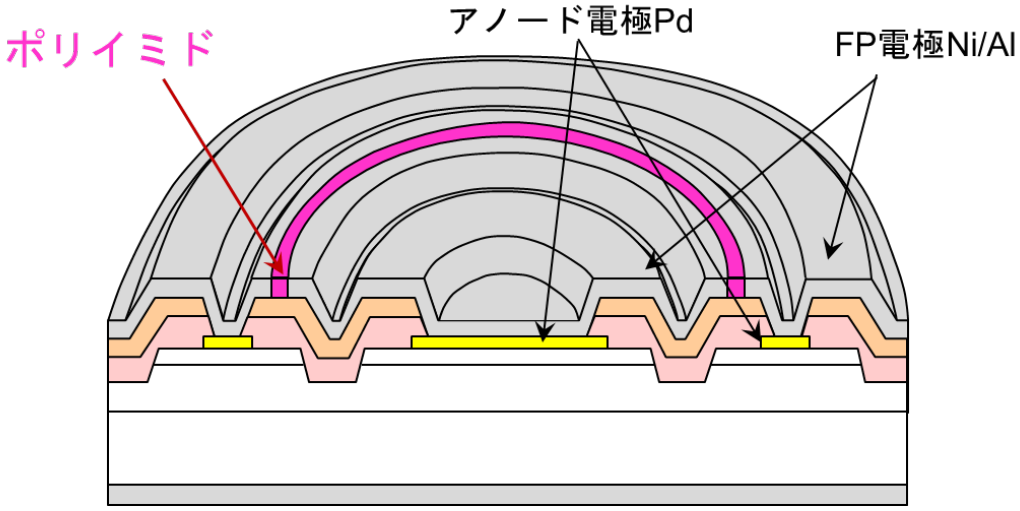


図17 Ohtaらによるガードリング構造を有するGaN PND[17]

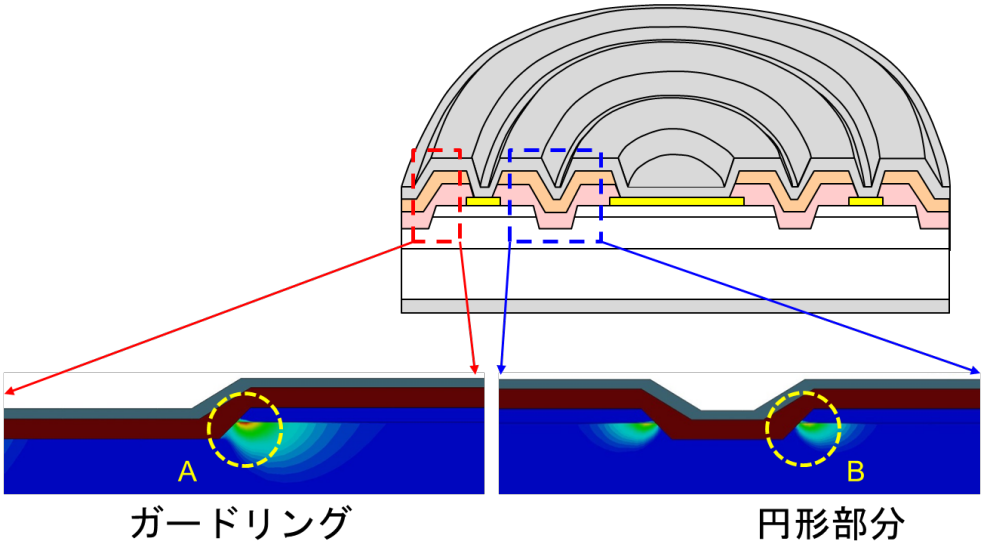


図18 Ohtaらによるガードリング構造GaN PNDの電界分布シミュレーション[17]

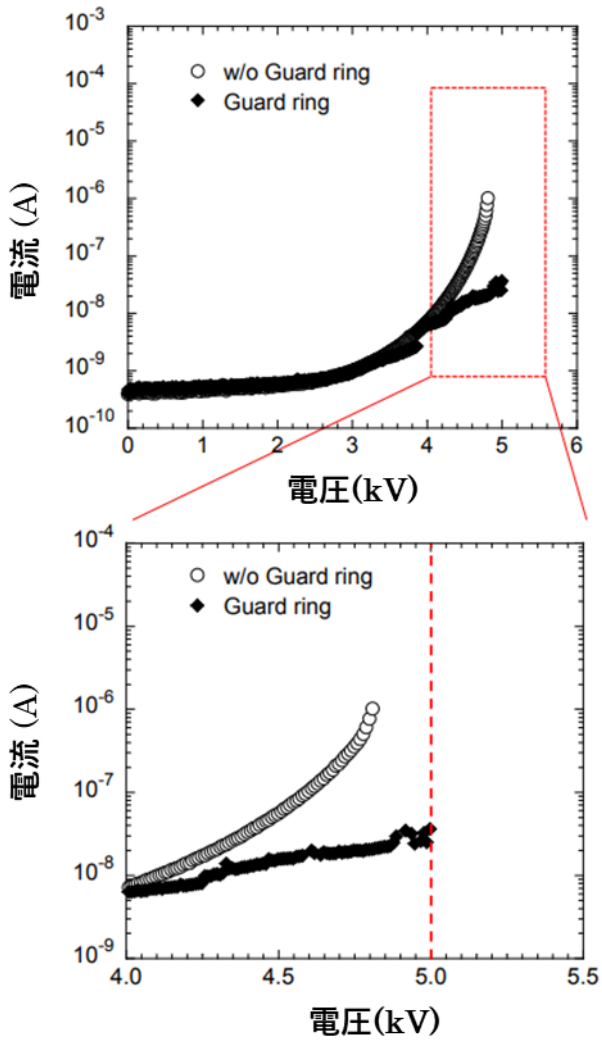


図19 Ohtaらによるガードリング構造有無によるGaN PNDの逆方向電流特性[17]

これらの報告を踏まえFuらはGaN PNDにおけるオン抵抗と耐圧の値を図20にまとめている[18]。図20よりFP構造とガードリング構造による高耐圧化によってGaNが持つ理論限界を超えた結果が報告されている。

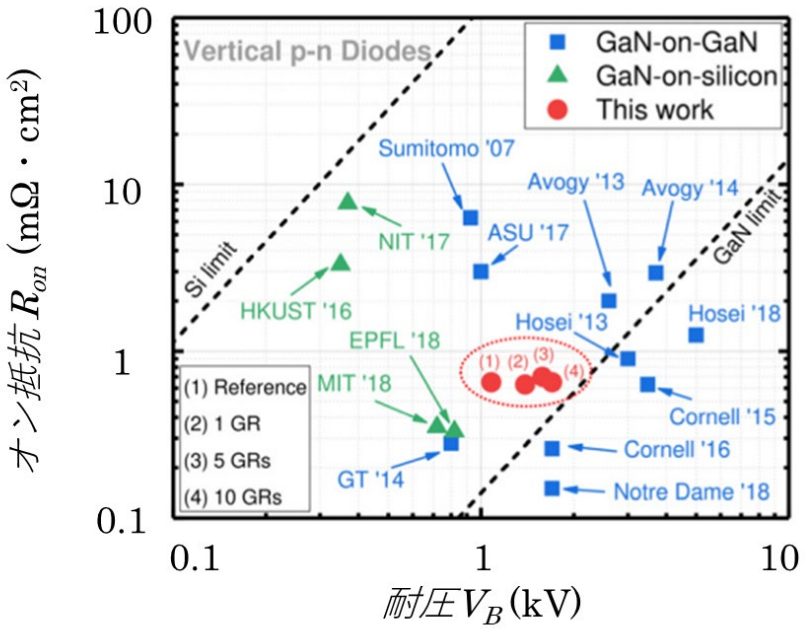


図20 Fuらによる2020年までに報告されているGaN PNDのオン抵抗と耐圧値のまとめ[18]

ここまで挙げたようにGaNダイオードの耐圧に関してはデバイス作製プロセスの工夫により理論限界を超えた結果が報告されている。一方で、オン抵抗に関してはn-GaN層のドーピング濃度や膜厚を最適化することで低オン抵抗化を目指す研究が行われているがGaNの理論限界を超えた報告はされていない[19-21]。これは、GaN基板の転位による高抵抗化が原因とされている。GaN基板は、サファイア基板上へ気相成長または液相成長によって作製されるが、GaNとサファイアの格子定数差が14%と大きいため、転位が形成されやすくなる。転位はn-GaN層に深い欠陥準位を作り、電荷キャリアを捕獲するため、ドナーの補償を引き起こし、高抵抗化する。Ngらはサファイア基板上に成膜した10^{15} - 10^{20} cm^{-3}のSiドープn-GaN層の電子移動度が、図21のようにキャリア濃度に対してベル曲線になることを報告している[22]。これは高キャリア濃度(>5 × 10^{17} cm^{-3})では転位による欠陥準位がn-GaN層の伝導帯から電子を捕獲したことで電子移動度が減少したためと述べられている。

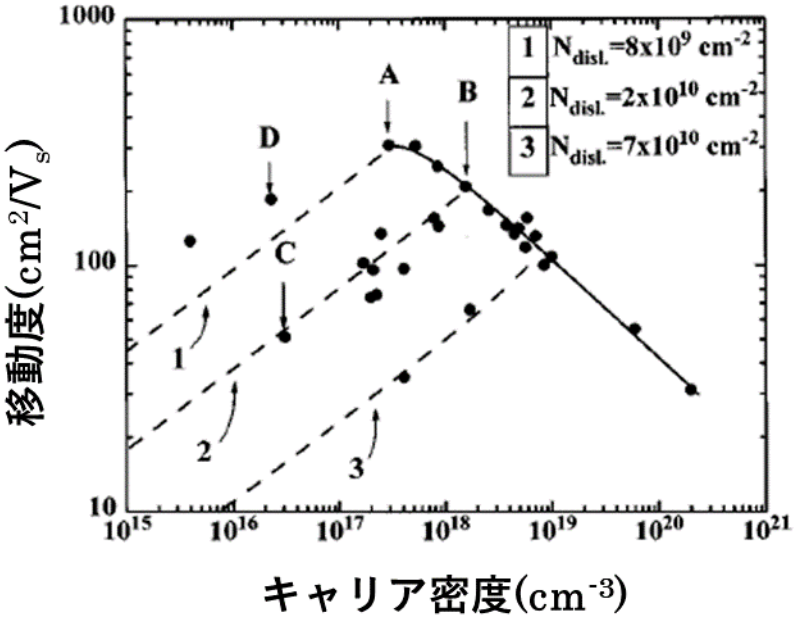


図21 Ngらによるn-GaN層の電子移動度に対するキャリア濃度[22]

また、デバイス作製工程においても、プラズマダメージによる電荷キャリアの捕獲が引き起こされる[23-25]。Jangらはドライエッチングによるp-GaN層及びn-GaN層へのプラズマダメージについて報告をしている[26]。図22に示すようにプラズマダメージにより、n-GaN層では、表面Fermi準位が伝導帯の最もエネルギーが高い状態に向かって1.0 eVシフトしたとされている。これはドライエッチングにより表面近くに形成されたN空孔がn-GaN層の表面バンド曲げを減少させ、金属/半導体界面のトンネル電流値が増加するために、比接触抵抗を増加させたためと述べられている。また、p-GaN層では、表面近傍層をN空孔からの高濃度電子による正孔の補償によりn型層に変化させた。その結果、正孔注入のショットキー障壁が増加し、p-GaN層へのオーム接触が著しく劣化したと述べられている。

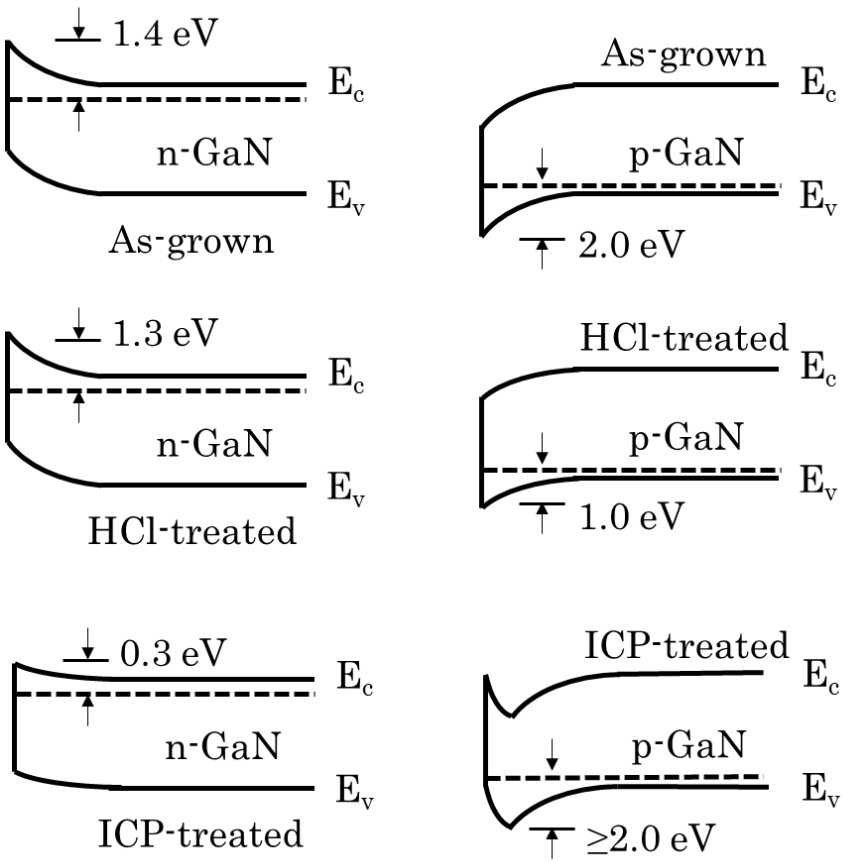


図22 JangらによるGaNへの表面処理有無による表面付近のエネルギーバンド
([26]を参考に筆者作成)

そんな中、Nomotoらはデバイス作製プロセス中のMESA周辺への保護膜形成にスパッタではなくSOG(spinning-on-glass)を使用することでp-GaN層へのプラズマダメージの低減し、オン抵抗値が0.95 mΩ・cm^{2}とGaNの理論限界を超えた報告をしている[27]。このように低オン抵抗化のためにデバイス作製プロセスの工夫によるアプローチ方法も必要である。

LEDのような発光デバイスにおいては電極形状の工夫などデバイス作製プロセスの工夫によるアプローチが行われている。LEDは光取出し効率の観点から、発光パターンの観察が行われている。Wangらは図23に示すような立方体形状LEDと円形LEDにおいて円形LEDの光出力が立方体形状LEDに比べて光出力が10%程高いことを報告している[28-30]。これは円形LEDの方が均一な放射強度のパターンで発光することができるためと述べられている。

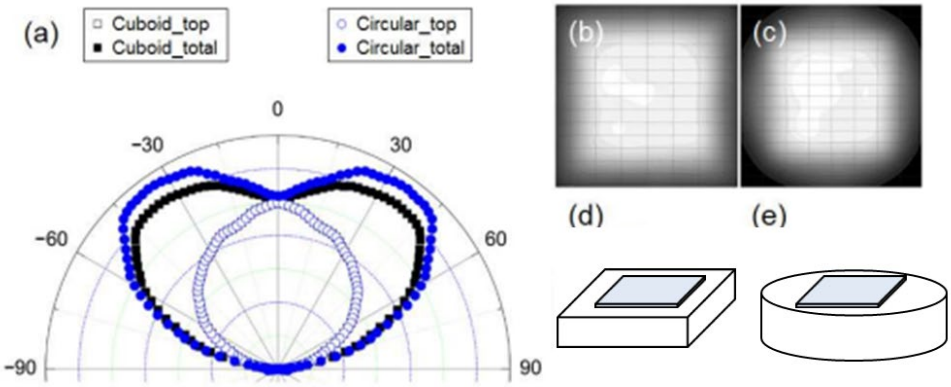


図23 Wangらによる立方体型LEDと円形LEDによる発光パターンの評価結果[28]

また、KimらはLED内の不均一な電流分布に着目し、図24に示すような電極形状を最適化することで出力電力と光出力の増加を報告している[29]。

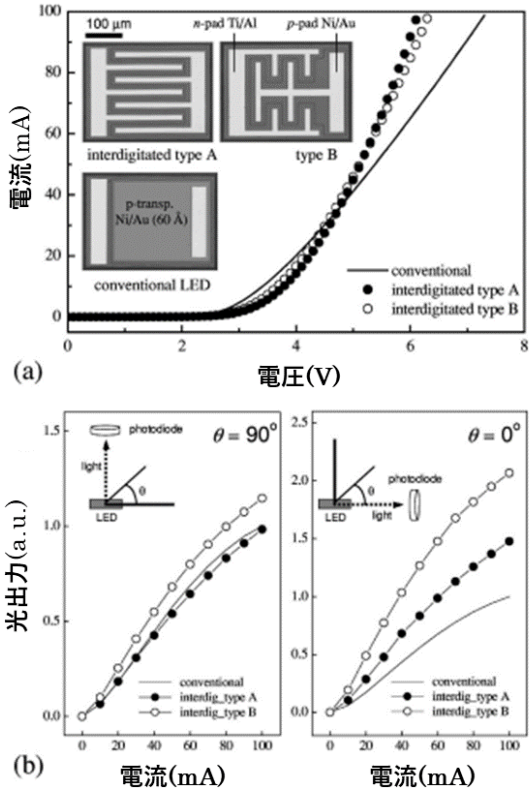


図24 Kimらによる櫛形電極を用いたLED評価結果(a)I-V(b)I-L[29]

これらLEDにおいて報告されている技術はGaN -PNDのような大電流密度(1～10 kA/cm^2)ダイオードに適用した前例は報告されていない。そのため、GaN -PNDにおいても発光パターンの観察や電極形状により低抵抗・高効率デバイスが期待できる。

1.2.2 窒化物系発光デバイス

LED の発光波長は半導体材料のエネルギーバンドギャップ(*Eg*)に依存する。図 25 にⅢ-Ⅴ族化合物半導体の *Eg* を示す[31-32]。窒化物系半導体はエネルギーバンドギャップが AlN 6.2 eV，GaN 3.4 eV，InN 0.65 eV と広範囲であるために、紫外～赤外領域の発光が可能である。

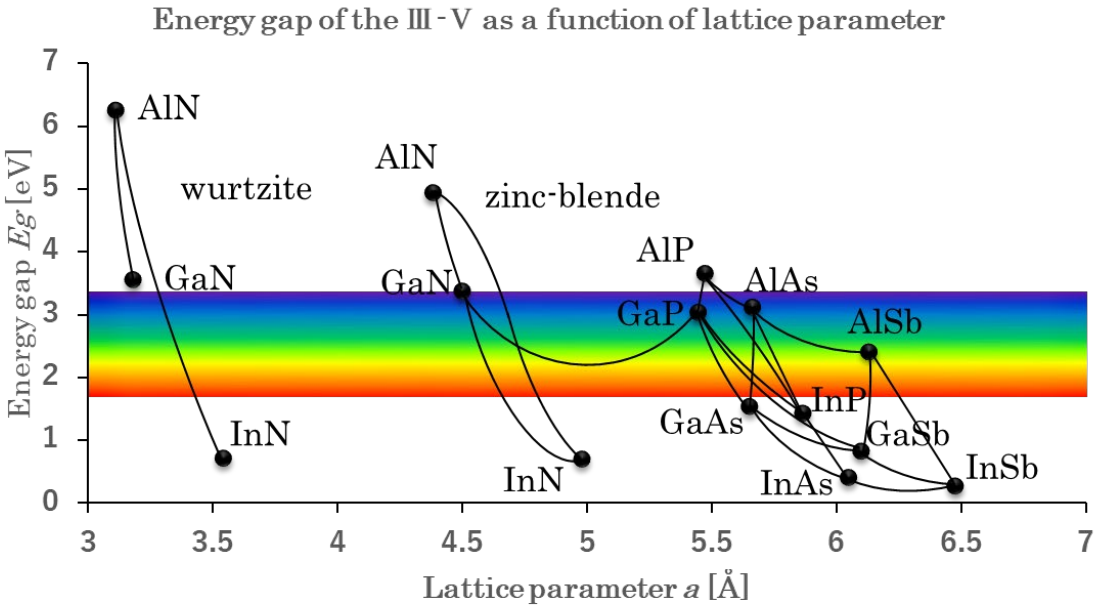


図 25 化合物半導体の格子定数とバンドギャップエネルギー([31-32]を参考に筆者作成)

窒化物系 LED としては主に InGaAlN や InGaN の報告がされている。1969 年に Maruska らによって InGaAlN の報告されている。Maruska らは GaAs, GaP, GaSb における気相成長法を適用することで、GaN 基板として初めて良好な電気的および光学的評価を報告した[33]。しかし、InGaAlN は格子定数および熱膨張係数が異なるサファイア基板上にエピタキシャル成長を行うため、滑らかな表面を得られなかった。その後、Akasaki らによる低温バッファ層技術によりこの課題にブレークスルーをもたらした[34]。1989 年には Matsuoka ら

による InGaN 活性層の報告がされ、これにより高効率の青色 LED と緑色 LED を実現した[35]。1993 年に Nakamura らは図 26 に示すような p-GaN/n-InGaN/n-GaN ダブルヘテロ構造(DH)の青色(450nm)発光ダイオード (LED)を作製し、これにより青色 LED が市場に出回った[36]。青色 LED は黄色やオレンジ色の蛍光体からなる白色 LED として、消費電力の少ない固体照明装置として広く用いられている。

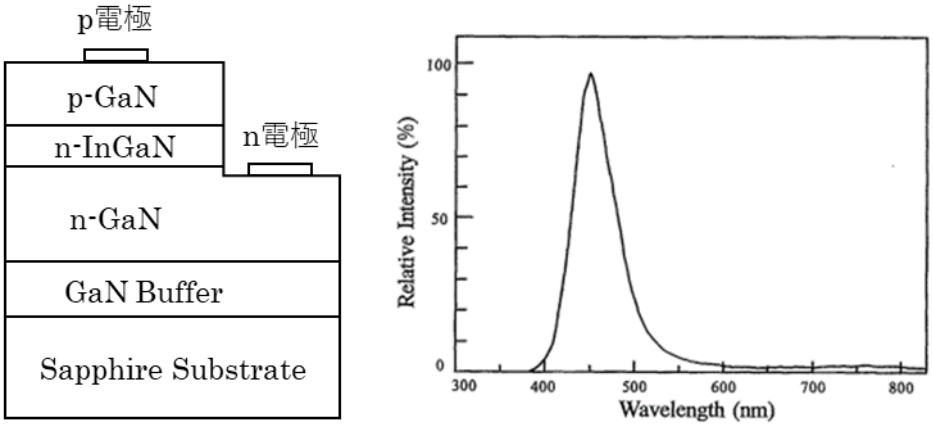


図 26 Nakamura らによる(左) p-GaN/n-InGaN/n-GaN DH 構造 青色 LED 構造 (右)室温におけるフォトルミネッセンススペクトラム[36]

窒化物系青色 LD には活性層として InGaN の使用が不可欠である。1989 年に初めて活性層に InGaN を使用したダブルヘテロ構造青色 LED の報告がされ、バンド発光ではなくドナーアクセプター発光を示した[37-38]。1995 年、Nakamura らは緑色 InGaP 単一量子井戸(Single Quantum Well:SQW)を用いた LED によって GaP のものよりも光度が 100 倍高い報告をし、1996 年には図 27 に示すような InGaN 多量子井戸(Multiple Quantum Well:MQW)を備えた構造により、初めてレーザ発振を実証した。特性としては図 28 に示すような室温パルス電流注入下で発振波長 417 nm の閾電流密度 4 kA/cm^2 であり、当時の半導体レーザの中では最も短い波長であった[39]。これを皮切りに窒化物半導体レーザの開発が盛んになっていった。

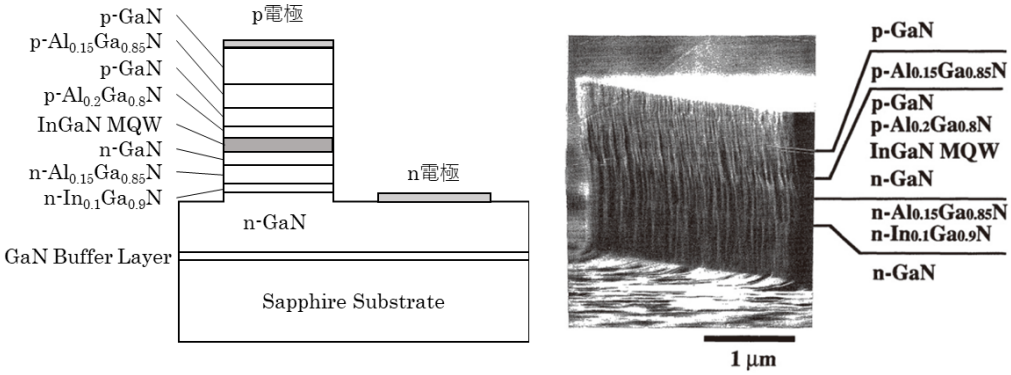


図 27 Nakamura らによる初めてレーザ発振した窒化物 LD の構造と断面図[39]

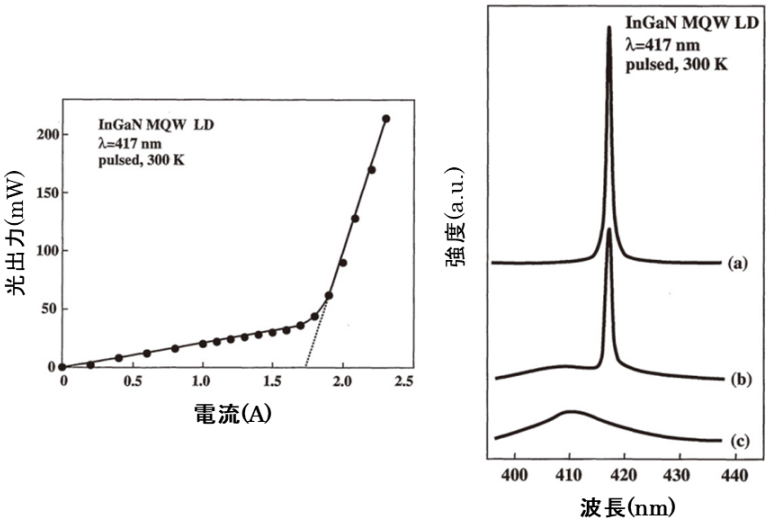


図 28 Nakamura らによる初めてレーザ発振した窒化物 LD の IL 特性並びに発光スペクトル[39]

一方、エピタキシャル成長技術の改良により、レーザ発振波長域が拡大し連続波電流注入(CW) 動作下で UV (365 nm) から青緑色 (482 nm) までのレーザ発振波長を持つ窒化物系 LD の作製に成功した[40-41]。 近年ではフルカラーレーザディスプレイの光源としての応用が提案され青色 (445 nm) LD の開発が急速に進んでいる[42]。レーザ光源を用いたフルカラーディスプレイシステムは、極めて細い波長スペクトルをもつために色再現可能領域が非常に広いという点で利点がある。青色領域では活性層の結晶品質が悪いために波長が約 430 nm、約

460 nm、約 480 nm と長波長化するにつれて閾値電流密度が高くなる傾向があった[43-44, 42]。これは In モル分率の高い GaN と InGaN 間の格子不整合により活性層で転位が発生するため、より長い波長範囲の LD で結晶品質を維持することが困難なためであるが、デバイス構造や成長条件の改善によって 2005 年に Kozaki らによる 200 mW の出力を持つ高信頼性青色（445 nm）LD の作製がされた[42]。しかし、ディスプレイ画面サイズの大型化や低消費電力化の観点から見ると更なる高電力化と高効率化が求められ、組織間での競争が激化した。2006 年に Miyoshi らは n 型自立 GaN 基板上に InAlGaN 膜を有機金属化学蒸着（Metal Organic Chemical Vapor Deposition:MOCVD）法で成長させたリッジ導波路を持つ LD 構造によって発振波長 445 nm において光出力 500 mW、電力変換効率(Wall Plug Efficiency:WPE)21.7%を実現し、その後、パッケージと耐熱性を改善することで光出力 1.17 W、WPE 24.3 %と W 級の高出力化を得た[45]。2018 年、Murayama らは p 層のコンタクト電極に透明で低い抵抗を有する ITO(Indium-Tin-Oxide)を用いることで、発振波長 465 nm において図 29 へ示すように光出力 5.2 W、WPE 37 %を報告している[46]。

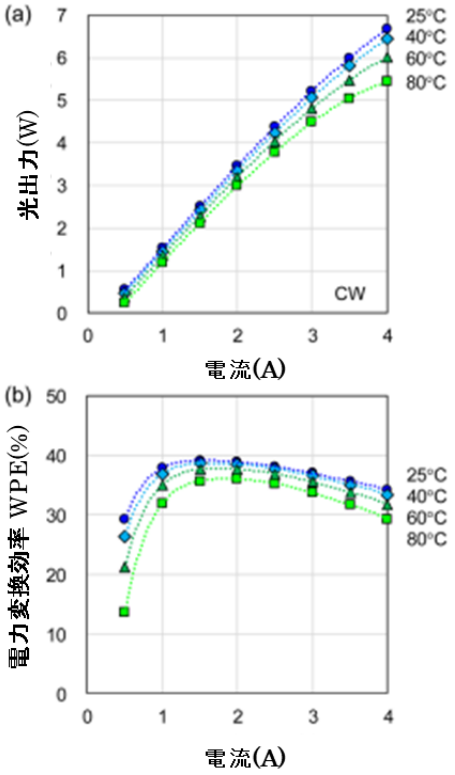


図 29 Murayama らによる高透過・低抵抗 ITO 電極を用いた青色 LD のデバイス特性 (a) I-L (b) WPE[46]

同時期に、キャリアと光閉じ込めの改善により、発振波長 455 nm における光出力 5.34 W、WPE 43.4%を報告している[47]。その後、エピタキシャル成長の最適化と図 30 のデバイス構造により、2020 年に発振波長 455nm において図 31 へ示すように光出力 5.67 W、WPE 48.1 %の報告がされた[48]。図 32 へ示すように GaN 系青色 LD は 2007 年から 2020 年までに光出力としては 10 倍以上、WPE は倍以上と飛躍的な発展を遂げた。

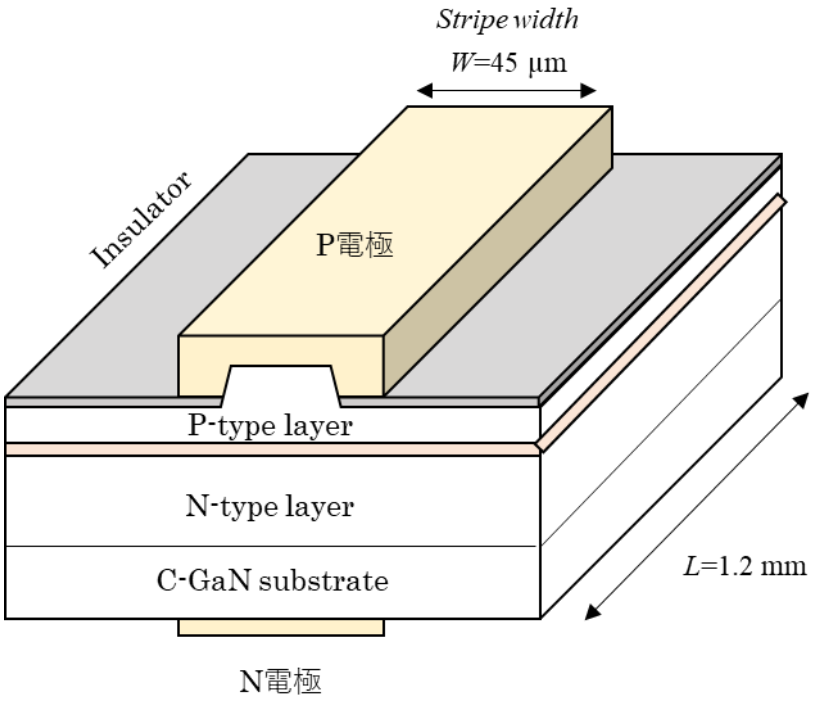


図 30 Nakatsu らによる高効率 GaN 系青色 LD のデバイス構造([48]を参考に筆者作成)

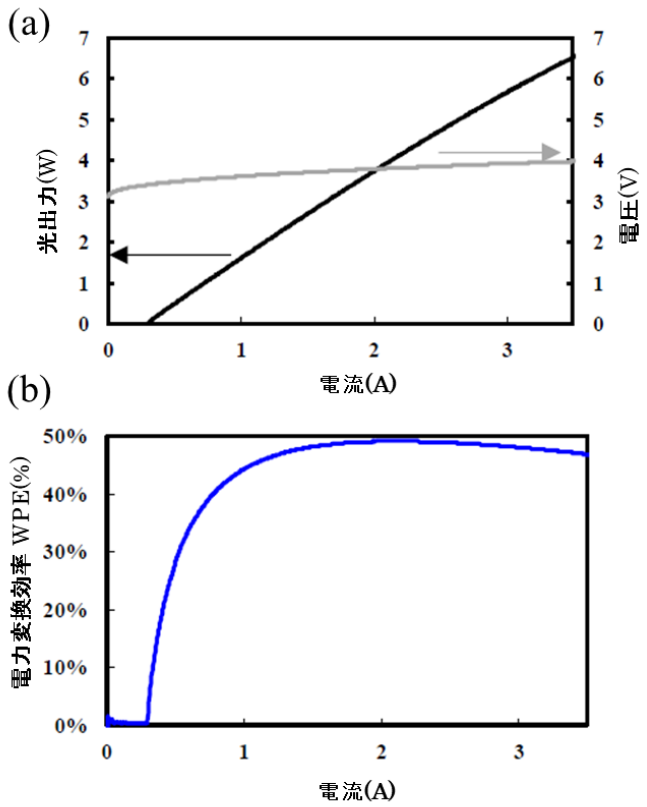


図 31 Nakatsu らによる高効率 GaN 系青色 LD のデバイス特性 (左) I-L (右) WPE[48]

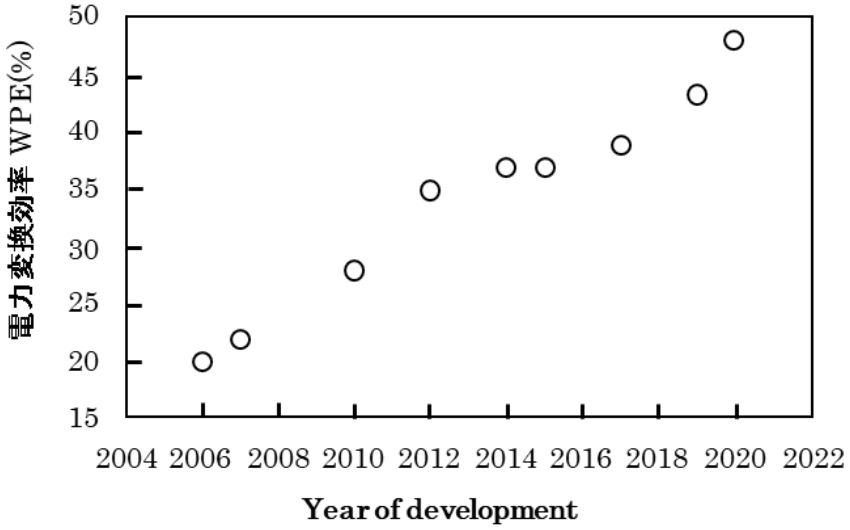


図 32 GaN 系青色 LD の WPE トレンド([48]を参考に筆者作成)

垂直共振器面発光レーザ(Vertical Cavity Surface Emitting Laser:VCSEL)は新しい半導体レーザとして、1977 年に Iga らより考案された[49]。VCSEL は基板の表面と裏面に反射鏡を備えており、これらから光を出射させることを特徴としている。応用としては、光ファイバー通信など通信の用途や、スマートフォンの顔認証システムといったセンシングシステムの光源としての応用が盛んである。また、車載用の LiDAR への応用も期待されており、幅広い分野での実用化が進んでいる。市場規模は、2020 年に 10 億ドルを記録し今後も年平均で 24 %近く成長していくと予測されている[50]。

VCSEL は 1979 年に Iga らより GaInAsP 系の材料を用いた図 33 のデバイス構造によって図 34 に示すように初めて電流注入でのレーザ発振が実現された[51]。1991 年、J. L. Jewell らは直径 0.5～50 μm と活性層厚みが 80 Åのマイクロ共振器により閾電流値 1.2 mA の低閾値化を成し遂げた[52]。

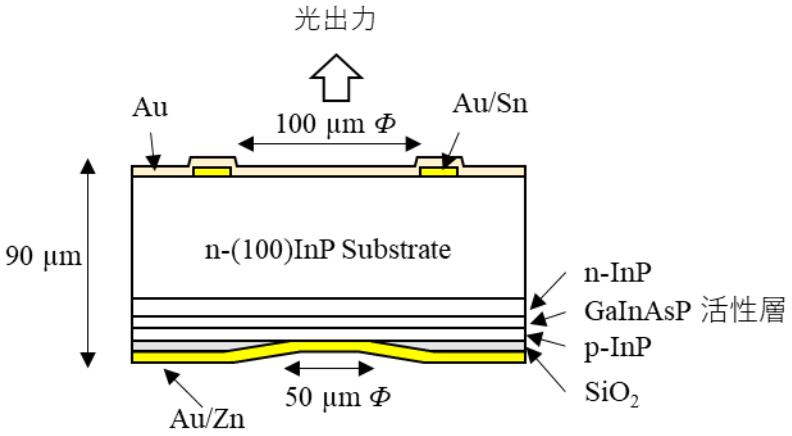


図 33 Iga らによる世界で初めてレーザ発振した VCSEL の構造([51]を参考に筆者作成)

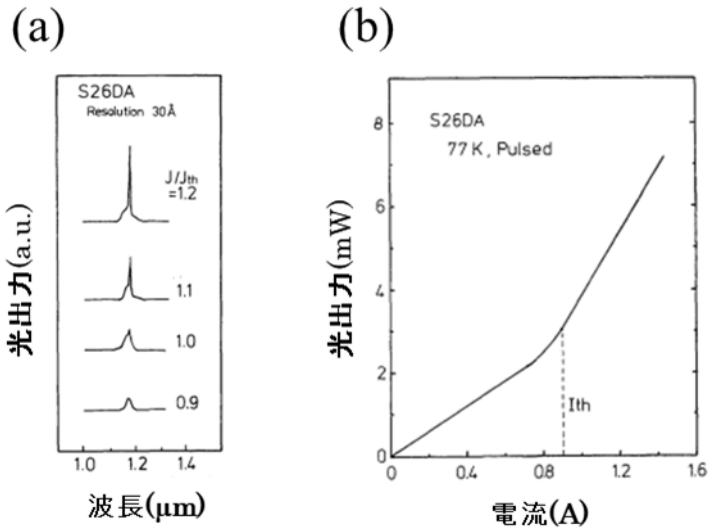


図 34 Iga らによる世界で初めてレーザ発振した VCSEL のデバイス特性 (a) 発光スペクトラム (b) I-L[51]

一方、窒化物 VCSEL は円形対称ビームであるために図 35 に示すような高解像度レーザ印刷、医学診断、バイオセンシングの分野での応用が期待されている[53]。また、青・緑色の実現が可能な材料であるためディスプレイへの応用の期待が高まっている。GaAs 系材料を用いた赤色 VCSEL に窒化物を用いた青と緑の VCSEL を組み合わせることでフルカラーの VCSEL 光源を実現可能である。VCSEL は消費電力が小さくバッテリーサイズを比較的小さくできるため、ウェアラブルディスプレイ用の光源に最適である。また、図 36 に示すように目に損傷を与えないパワーでの動作が可能であるため網膜直描型のディスプレイへの応用も期待できる。網膜直描型ディスプレイは、直接視野に投影されるように設計されたディスプレイである。そのため、ディスプレイのピクセルは非常に小さく、高い解像度が求められる。VCSEL は、非常に小型で狭い光放射を生成することができる。このため、高密度なピクセル配置にも対応でき、高い解像度を実現することができる。また、網膜直描型ディスプレイは、高い輝度やコントラストが求められている。VCSEL は短いパルス幅を実現することができるので、高速で正確な光変調が可能となり、高い輝度やコントラストを実現することができる。さらに、網膜直描型ディスプレイは、色再現性が重要な要素である。窒化物 VCSEL は、波長の調整性能が高く、広い波長範囲で光を発生させることができる。よって、多様な色を再現することができる。

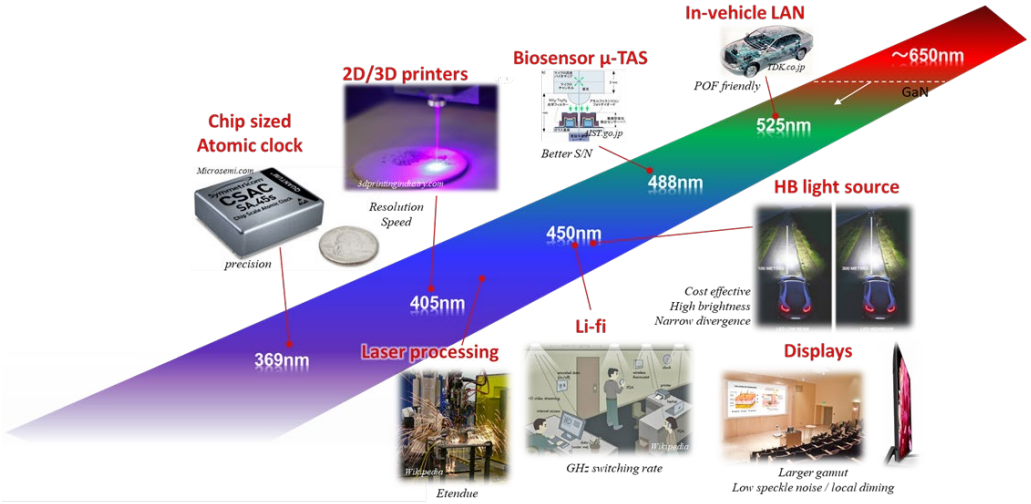


図 35 窒化物 VCSEL の応用例[53]

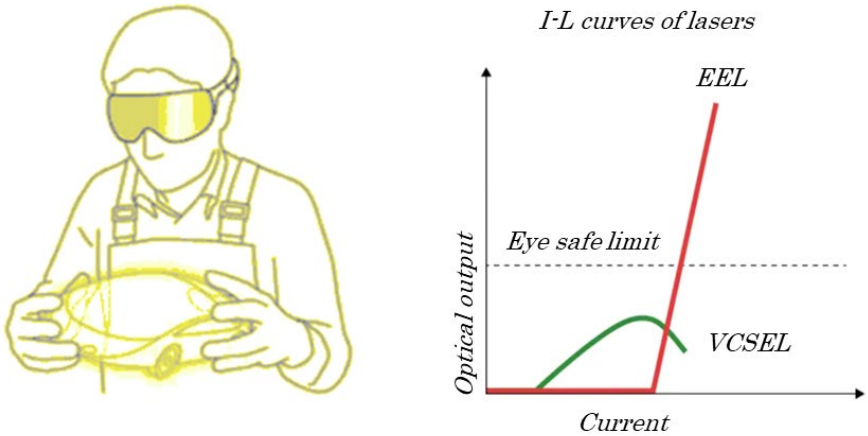


図 36 窒化物 VCSEL は網膜直描型ディスプレイへの期待が高い([54]を参考に筆者作成)

窒化物 VCSEL の報告がされたのは 1999 年に Someya らの InGaN 多重量子井戸により光励起下で 399 nm のレーザ発振である[55]。以降、GaN をベースとした窒化物 VCSEL の研究がされていたが、エピタキシャル成長した DBR(Distributed Bragg Reflector)構造の作製しにくさと MQW 活性層にキャリアを注入するための高い透明性と良好な伝導性の接触が得にくいために、電流注入での報告はされていなかった。2008 年、Lu らはクラックがない AlN/GaN のエピ DBR と Ta_2O_5/SiO_2 の誘電体 DBR からなる高反射率ミラーと、高透過かつ導電性の高い ITO 電極を用いることで、図 37 に示すような 77 K での CW

電流注入下で 1.4 mA の低いしきい値電流と波長 462.8 nm でのレーザ発振を達成した[56]。

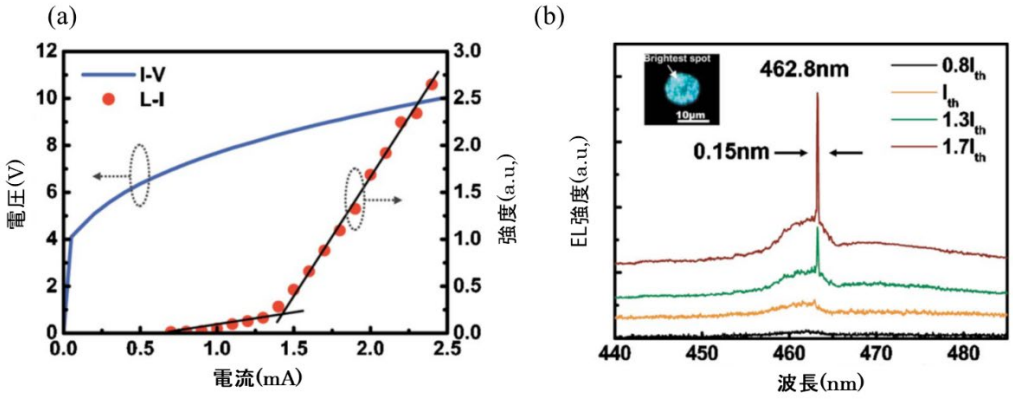


図 37 Lu らによる電流注入でのレーザ発振に初めて成功した GaN-VCSEL のデバイス特性 (a) I-L (b)発光スペクトラム[56]

また、緑色 GaN-VCSEL の開発も進んでおり、2011 年に Kasahara らより、図 38 に示すようにパルス電流動作で波長 503 nm でのレーザ発振が報告されている[57]。2020 年には Hamaguchi らより、図 39 に示すような GaN 系の青・緑色 VCSEL と As 系の赤色 VCSEL を重ね合わせることで白色を映し、VCSEL による光の三原色を実現した[58]。

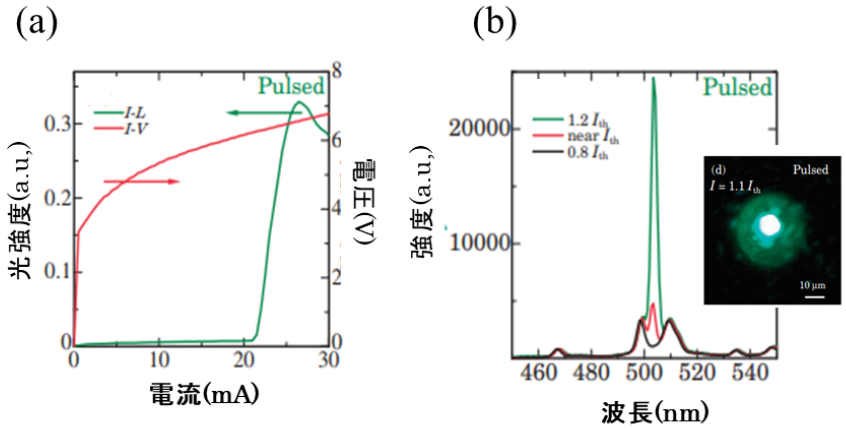


図 38 Kasahara らによる緑色 GaN-VCSEL のレーザ発振に初めて成功した GaN-VCSEL のデバイス特性 (a) I-L (b)発光スペクトラム[57]

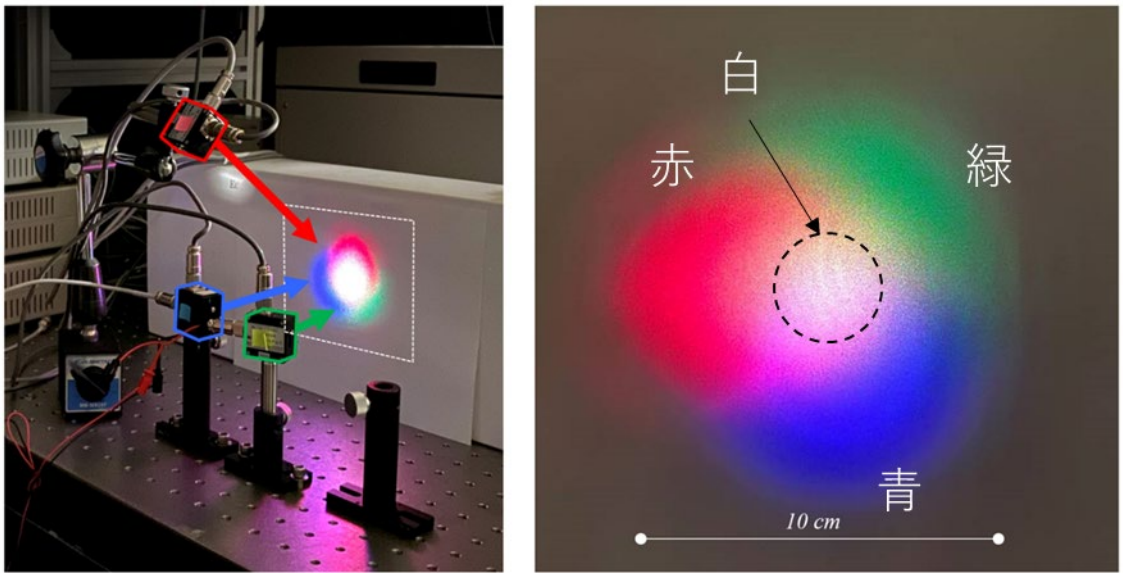


図 39 Hamaguchi らによるフルカラーVCSEL 光源の実現[58]

これまでに述べたように、窒化物系発光デバイスは高い効率で光を発生するため、少ない電力で高い出力を得ることができる。そのため、窒化物系発光デバイスを使用することで、省エネルギーが実現されることが期待される。一方、半導体レーザにおいては放射形状にも留意する必要がある。特にレーザ光源を使用する走査型ディスプレイにおいては、単一のガウス型ビーム形状(シングル横モード)が必要となる。一般的に、レーザを用いた走査型ディスプレイにおいては、発振するレーザ光が光画素を構成するための走査面上に集光される。この際、高速な走査が要求されるが、シングル横モードのレーザを使用し、高速変調を行うことにより、走査速度を向上させることができる。シングル横モードのレーザは、ビームの直径が小さく、高い光集束度を持つため、高速変調に適しているとされている。

また、放射角についても留意する必要がある。例えば、網膜走査型ディスプレイにおいては、小型ディスプレイパネルから放射される光が、網膜上に直接投影されるため、放射角の最適化が重要である。放射角が広すぎる場合、投影画像が歪み、周囲の環境光の影響を受けやすくなる。一方、放射角が狭すぎる場合、画像が小さくなり、ユーザーの視野角を十分に補うことができなくなる。したがって、放射角を最適化することが求められる。また、車載用のヘッドアップディスプレイ(HUD)では、ドライバーが視線を移動せずに情報を得るために、高い輝度が必要とされる。ただし、放射角が広い場合、想定された位置にレーザ光を当てることができず、放射角を狭めるためには光学的な手段、たとえばレンズなどを用いて光を集光する必要がある。この場合、レンズによる光吸収や反射などの光損失が発生し、光取り出し効率が低下する可能性がある。したがって、レーザの

放射角は、可能であれば狭く設定することが望ましいとされている。

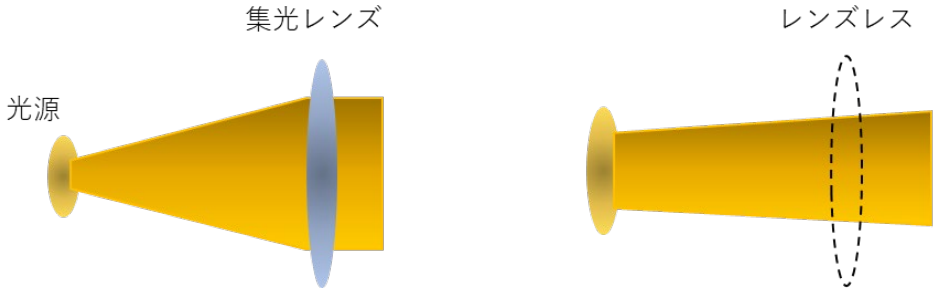


図 40 レーザの放射角に対する光学モジュールの模式図

また、上述において窒化物半導体レーザには、端面出射型と VCSEL の 2 つのタイプがあることを述べたが、これらのレーザの出射パターン形状は異なる。端面出射型レーザは、矩形状の発振領域から発生するため、出射する光の断面形状が矩形に近くなる。ただし、発振領域は光を放出する方向と垂直な方向の両方に対して異なる反射率を持っているため、放出される光の断面形状が異なり、図 41 に示すような楕円形のビーム形状が生じる[59]。これは、発振領域が縦横比の異なる楕円形になり、発振領域の長軸方向に沿って光が強く放出されるためである。

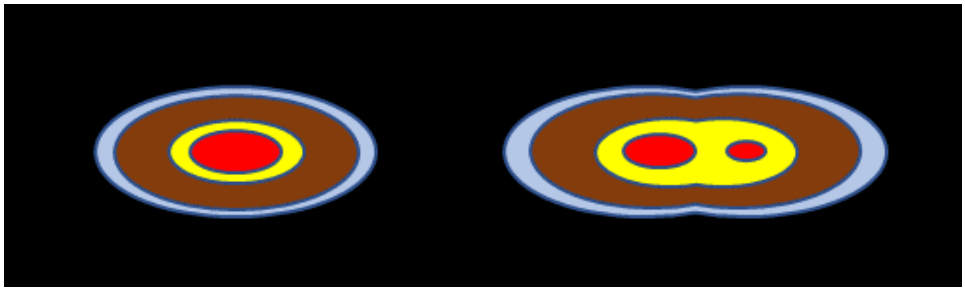


図 41 端面出射型 LD の NFP 例([59]を参考に筆者作成)

一方、VCSEL は共振器が円形や近似した輪郭形状をしているため、レーザ光が放出される領域も円形またはそれに近い形状になる。そのため、VCSEL から放出される光の断面形状が円形に近くなる。また、共振器が円形対称であることで、共振周波数が偏向することなく、あらゆる方向に対して等方的になり、放射パターンが全方向に等しく放射される。よって、VCSEL から放出される光の断面形状は円形に近くなる。ディスプレイにおいては、レーザの放射パターン形状が円形であることが望ましい場合がある。これは、光源の光が均等に画面全体に広がり、画像を均等に表示することができるためである。楕円形の放射パターン

の場合、画面上での光の分布が偏り、画像の一部が暗くなってしまう可能性がある。したがって、ディスプレイ向けの窒化物系発光デバイスを使用する場合、VCSEL が望ましく、また、放射形状は単一のガウス型ビーム形状であることが望ましく、放射角の最適化や用途によっては狭い放射角が適している。

1.3 本論文の目的

GaN デバイスを電気特性と光放射特性の観点から評価を進めることで、省エネ効果が期待される GaN デバイスの潜在的な可能性を引き出すことを本論文の総合的目的とした。電気特性に着目すると、潜在的な能力を示す指標として、オン抵抗と耐圧からなるバリガの性能指数がある。1.2 節で述べた内容より、耐圧については電界集中緩和技術が報告されている。オン抵抗を下げることに特化した技術では n-GaN 層などエピタキシャル成長条件の最適化によるアプローチ方法が行われているが、GaN の潜在的な能力を示す程の報告例はない。これは GaN 基板の転位に起因するものである。よって、本論文ではエピタキシャル成長技術ではなくデバイス作製プロセスの観点から GaN の潜在的な能力を引き出す方法を提案する。また、GaN は材料がもつバンドギャップエネルギーから青・緑色の発光が実現できる。そのため、ディスプレイといったフルカラー光源を必要とする発光デバイスとして使用することができる。また、GaN は直接遷移型半導体であるため、再結合確率が大きく、光を放出する確率光の発光効率が高くなる。そのため、低閾値化や高効率といったデバイス特性に関する報告は多くされている。しかし、光放射特性に着目すると外部に放出される光の様態に関しては研究途上である。特に、半導体レーザの場合、放射角の拡がりやパターン形状により光学部品や他の光学素子との結合時にカップリング効率が低下することが問題である。この課題を克服するために、デバイスとしては放射パターン形状が円形になる VCSEL が望ましく、より高いカップリング効率を実現するための新しい開発が必要である。本論文では GaN の VCSEL デバイス構造の工夫により放射角を狭小化することで高効率デバイスとしての潜在能力を引き出すこととする。2 章以下で述べる内容の詳細な課題や目的は以下の通りである。

第 2 章では GaN p-n ダイオード電流分布の可視化とエピタキシャル層品質との対応の解明を目的とした。LED のような光デバイスでは、光取出し効率の観点から、発光パターンの観察は行われていたが、高効率電力変換をターゲットにした大電流密度(1～10 kA/cm^2)ダイオードではこのような評価の前例がなかった。また、エピタキシャル層の光学的特性や物質中の欠陥や不純物などの影響を評価する方法として PL(Photoluminescenc)評価があるが、PL 評価は物質中に光を照射することで、その物質中の電子やエキシトン(励起子)を励起するため、電気的に駆動された物質からの発光を観測することができない。本章ではこの評価法を確立し、さらに、ミクロンオーダーの高分解能で評価することでパワーデバイス内の電流分布を可視化指標とした。

第 3 章では SBD の立上り電圧の低さ、PND の大電流領域の低オン抵抗と逆方向耐圧の高さの 3 つの条件を併せ持つジャンクション・バリア・ショットキ

ーダイオード(JBSD)の実現を目的とした。従来、イオン注入で p 型領域が形成できる Si や SiC では JBSD の試作から製品化まで行われていたが、GaN ではイオン注入で p 型層が形成できていなかったため、類似の JBSD の報告例はなかった。PND の p 型層をドライエッチで掘りこみ、n 型ドリフト層と残存 p 型層に同時に電極を形成して JBSD を作る試みもなされたが、500 nm 程度の厚みのある p 型層をエッチングする際にイオン照射で形成されるダメージでショットキー障壁の低下や p 型層の中性化が起こり期待される JBSD の動作が実現できていなかった。本研究では極めて浅い p-n 接合を新規に JBSD に利用することで、これらの多くの課題を同時に克服することを目指した。

第 4 章では超小型網膜投射型レーザディスプレイを可能とする放射角の小さい VCSEL の実現を目的とした。電力変換効率の高い半導体レーザは主に端面出射型の構造が使われているが、ビーム形状が楕円になるため、円形ビーム形状でのカップリングを必要とする光ファイバー等のアプリケーションでは、集光レンズが使われるため光取り出し効率が低くなるという課題がある。一方で、基板に対して垂直共振器構造の VCSEL では開口径を容易に円形にできるため、円形ビーム形状でのカップリングを必要とするアプリケーションにおいてはレンズレス構造が期待できる。しかし、1.2 節にあるように半導体レーザの共振器は基板に対して平行または垂直に鏡を形成する平面鏡型のものが主流であり、開口径を大きくすると回折の影響により横モードがマルチモードになるため、放射角の狭小化が困難であった。GaN-VCSEL においても同様であり開口径 6 μm 以上におけるシングル横モードの報告はなく、開口径の制約により、ビーム径の拡大が難しく、FFP の半値全幅は 5°に滞っていた。凹面鏡型の共振器構造を備えた GaN-VCSEL では回折光を閉じ込めることができるので開口径 6 μm 以上の素子においてシングル横モードが期待できるが、曲率半径の大きな凹面鏡の作製が困難なためビーム径が小さく、FFP の半値全幅は 8.5°と平面鏡型と比べて大きかった。凹面鏡はフォトレジストをサーマルリフローにより球面形状にし、これをマスクに RIE で転写することで形成するが、この方法ではレジストの濡れ特性から曲率半径を大きくすることが困難であった。本章では後退型マスク材等に直すことで、この課題を解決し、従来にない大きな曲率半径を実現した。

1.4 本論文の構成と独自性

本論文の構成を説明する。本論文は全 5 章より構成される。第 1 章では GaN デバイスの歴史を述べた後に本論文の目的及び構成について述べる。

第 2 章では、GaN -PND の裏面に透明 ITO 電極を形成し、p-n 接合で発生する GaN の *Eg*=3.9 eV 以下の透明領域の光を基板側から観測する手法を考案し実施した。発光パターンは顕微鏡で撮影するだけでは定量的な比較評価ができないため、顕微ラマン分光装置の顕微マッピング機能を利用して、マウントやステージの改造により面内発光分布の精密な測定ができるようにした。通常のラマン分光測定と異なり、基板奥の p-n 接合面に発光強度が最大となる位置を合わせるには基板の屈折率を考慮した焦点距離調整が必要であった。この方法で、電流密度分布に対応した発光強度分布を明らかにしたのは本研究が初めてである。

第 3 章では、p 層に厚さが 20 nm の高濃度 p^+-GaN 層のみを用いた JBSD を作製した。薄い p^+-GaN 層は短時間でのドライエッチングを可能とし、プラズマダメージを低減できるため JBSD の作製に適性であると考案し実施した。第 2 章の知見に基づき、PND 部分が正常に動作していれば、基板裏面から同心円状の発光が観測できるはずである。したがって、第 2 章と同様に裏面電極を ITO にし、動作中の発光パターンの撮影を初めて実施した。

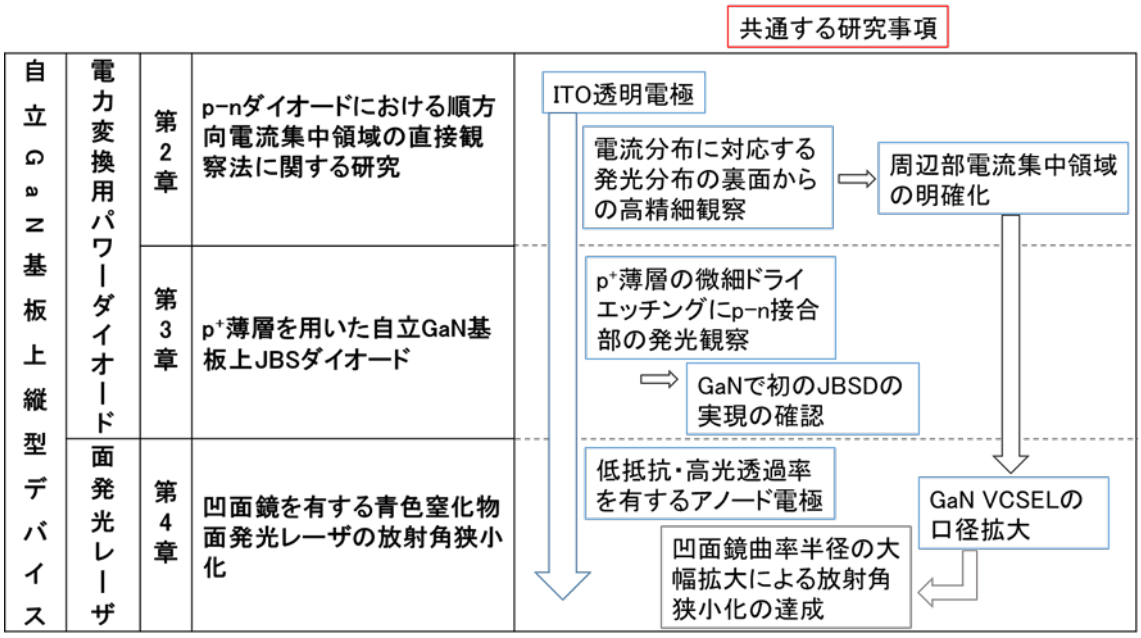
第 4 章では、GaN デバイスから出射される光の様態に着目し、円形ビーム形状が可能な VCSEL の出射光について述べる。凹面鏡型の共振器を備えた GaN-VCSEL 構造において、凹面鏡の曲率半径を大きくすることで放射角の狭小化が可能であると考案し実施した。また、凹面鏡の曲率半径を大きくするためのアプローチ方法を提案し、従来にない大きな曲率半径の形成を試みた。これにより、半導体レーザの中でも特に VCSEL で避けられなかった顕著な放射角の拡がりを制御できるとする理論予想を初めて実証することを目指した。さらに第 2 章の知見を活かし、半導体とのコンタクト電極に注入電流の均一化ができる径の ITO 電極を形成することで横モードの単一性に影響を及ぼさない設計を実施した。

第 5 章では、本論文の総括を述べる。

なお、上記において説明した第 2 章以下部分の研究内容を簡単に表にまとめると以下のようになる。全ての章において GaN デバイスに ITO 電極を用いることで、p-n 接合で発生する光の様態について評価した。構造に用いた ITO 電極は p-GaN 層と n-GaN 層の両半導体に対してオーミック接触を得られる程に低抵抗であり、445 nm の波長に対して VCSEL のレーザ発振が得られる程に高透過率を有するものである。第 2 章では、GaN-PND の裏面に透明 ITO 電極を形成することで順方向電圧印加時の電流分布に対応する発光分布から電極内に

おける電流集中領域の存在を明らかにした。第 2 章で得られた電極内での電流分布の知見から第 4 章における VCSEL の電極構造の設計へ適用した。凹面鏡型の共振器を備えた VCSEL 構造において、凹面鏡の曲率半径を大きくすることで放射角を狭小化する手法を検討するが、VCSEL 内に電流密度の高い領域が存在する場合には横モードが高次モードになる懸念があるので電流分布は均一であることが望ましい。また、第 3 章においては JBSD の裏面に ITO 電極を形成し、順方向電圧印加時の発光とパターンを観察することで JBSD の実現を明らかにした。GaN- JBSD は p-GaN 層をドライエッチングにより部分的に取り除くが、p-GaN 層へのプラズマダメージにより実現が困難であった。そのため、20 nm と極薄の p^+-GaN を使用することでドライエッチング時間を短縮し p-GaN 層へのプラズマダメージを低減することで GaN- JBSD の動作を実現した。

表 2　本論部分の研究内容の関連



第１章　参考文献

[1] 日本自動車工業会（2022年1月27日）「2021年度国内新車販売実績」

[2] Power Semiconductor Market – Growth, Trends, COVID-19 Impact, and Forecasts (2021 – 2026).

[3] 中村徹・三島友義　共著,『超高速エレクトロニクス』, コロナ社 ,2003

[4] A. Wakejima et al., Electron. Lett. **42**, 1349-1350 (2006).

[5] B. J. Baliga et al., IEEE Electron Device Lett. **10**, 455–7 (1989).

[6] S. Lu et al., Semicond. Sci. Technol. **36**, 034006 (2021).

[7] H. Amano et al., J. Phys. D: Appl. Phys. **51**, 163001 (2018).

[8] Y. Saito et al., Appl. Phys. Express **3**, 081001 (2010).

[9] T. Oka et al., Semiconductors and Semimetals **102**, 219-242 (2019).

[10] Y. Hatakeyama et al., Jpn. J. Appl. Phys **52**, 028007-1 (2013).

[11] I. C. Kizilyalli et al., IEEE Electron Devices Lett. **36**, 1073 (2015).

[12] H. Ohta, et al., IEEE Electron Device Lett. **36**, 1180 (2015).

[13] H. Fukushima et al., Appl. Phys. Express **12**, 026502 (2019).

[14] T. Maeda et al., IEEE Electron Device Lett. **40**, 6, 941–944 (2019).

[15] H. Ohta et al., IEEE Electron Device Lett. **41**, 1, 123–126 (2019).

[16] H. Fu et al., IEEE Electron Device Lett. **41**,1 (2020).

[17] H. Ohta et al., Jpn. J. Appl. Phys **57**, 4S (2018).

[18] H. Fu et al., IEEE Trans. Electron Devices **68**, 7 (2021).

[19] J. B. Limb et al, Electron. Lett. **42**, 22,1313-1314 (2006).

[20] I.C. Kizilyalli et al, IEEE Electron Device Lett. **35** 2 (2014).

[21] K. Nomoto et al, IEEE Electron Device Lett. **37**, 2 (2016).

[22] H. M. Ng et al., Appl. Phys. Lett **73**, 6 (1998).

[23] Y. Li et al, Proceedings of Solid State Lighting and Solar Energy Technologies **6841**, 68410X (2008).

[24] X. A. Cao et al, Appl. Phys. Lett. **75**, 2569 (1999).

[25] R. J. Shul et al, MRS Online Proceedings Library **573**, 271–280 (1999).

[26] H. W. Jang et al., Journal of The Electrochemical Society **150**, 9, G513-

G519 (2003).

[27] K. Nomoto et al., IEDM Tech. Dig.,971-974 (2015).

[28] X.H. Wang et al., OPTICS EXPRESS **17**, 25, 22311 (2009).

[29] H. Kim et al., Appl. Phys. Lett. **81**, 7 (2002).

[30] H. Kim et al., IEEE Trans. Electron Devices **48**, 6, 1065-1069 (2001).

[31] I. Vurgaftman, et al., J. Appl. Phys **89**, 5815 (2001).

[32] T. D. Veal et al., Indium Nitride and Related Alloys CRC Press, (2009).

[33] H. P. Maruska et al., Appl. Phys. Lett. **15**, 327 (1969).

[34] I. Akasaki, J. Crystal Growth **237-239**, 2, 905-911 (2002).

[35] T. Matsuoka et al., Inst. Phys.Conf.Ser.**106**,141 (1989).

[36] S. Nakamura et al, Jpn. J. Appl. Phys. **32**, L8-L11 (1993).

[37] N. Yoshimoto et al., Appl. Phys. Lett. **59**, 2251 (1991).

[38] S. Nakamura et al., Jpn. J. Appl. Phys. **34**, L1332 (1995).

[39] S. Nakamura et al., Jpn. J. Appl. Phys. **35**, L74-L76.S (1996).

[40] S. Masui et al., Jpn. J. Appl. Phys. **42**, L1318-L1320 (2003).

[41] S. Nagahama et al., Proceeding of SPIE **5738**,57-62 (2005).

[42] T. Kozaki et al., 2005 Society for Information Display Int. Symp., Boston, Dig. Tech. Papers **36**, 1, 1605-1607 (2005).

[43] S. Nagahama et al., Jpn. J. Appl. Phys. **40**, 3075-3081 (2001).

[44] S. Nagahama et al., Proceeding of SPIE **4995**, 108-116 (2003).

[45] A. Michiue et al., IEICE Trans. Electron **E92**, 194 (2009).

[46] M. Murayama et al., Phys. Status Solidi **A 215**, 1700513 (2018).

[47] S. Masui et al., Proceeding of SPIE **10104**,101041H (2017).

[48] Y. Nakatsu et al., Proceeding of SPIE **10918**, 109181D (2019).

[49] K. Iga, Jpn. J. Appl. Phys. **47**, 1 (2008).

[50] 月刊OPTRONICS, 2016年9月号掲載

[51] H. Soda et al., Jpn. J. Appl. Phys. **18**, 12 (1979).

[52] J. L. Jewell et al., IEEE Journal of Quantum Electronics **27**,.6 (1991).

[53] 濱口 達史, 応用電子物性分科会研究例会, 窒化物半導体光デバイスの最前線～最先端レーザと物性応用デバイス～, 演題5 (2022)

[54] ソニーグループ株式会社 R&Dセンター HP

[55] T. Someya et al., Science **285**, 1905 (1999).

[56] T. C. Lu et al., Appl. Phys. Lett. **92**, 141102 (2008).

[57] D. Kasahara et al., Appl. Phys. Express **4**, 072103 (2011).

[58] T. Hamaguchi et al., Applied Physics Express **13**, 041002 (2020).

[59] S. Nakamura et al., MRS Online Proceedings Library **537**, Symposium G – GaN and Related Alloys (1998).

第 2 章　自立 GaN 基板上 p-n ダイオードにおける順方向電流集中領域の直接観察法に関する研究

2.1 背景

GaN は高効率パワーデバイスとして大きな注目を集め、GaN ダイオードやトランジスタなど、多くの研究者によって広く研究されている[1-16]。近年の論文では、4.7 kV の高耐圧かつ 1.7 mΩ･cm^2 の低オン抵抗を達成したと報告され、インバータやコンバータへの適用により、大幅なエネルギー損失の低減が期待される[17]。こうした研究により、GaN デバイスは成長し続けているが課題も多く残っている。特に、GaN デバイスの結晶成長およびデバイス製造技術は、Si および SiC のものほど成熟していない[18-19]。結晶成長の工程は、作製した素子の電気特性を大きく左右するため、依然として研究が必要である。GaN は直接遷移のエネルギーバンドギャップを有し、順方向バイアス印加時、電子と正孔が再結合することにより強いエレクトロルミネッセンス(Electroluminescence：EL)が発生し、オン抵抗(R_{on})が大幅に減少する[20]。 EL 強度は注入電流に比例する。したがって、微視的な EL マッピングは、p-n 接合界面における局所電流分布に関する情報を与えることができる。本節では、透明カソード電極を導入することにより、明瞭な EL 像を得ることに成功した。更に、GaN p-n 接合エピタキシャルウェーハの表面形状に対応するストライプパターンを有する異常な EL 像も初めて見出した。表面平坦性の良いウェハを用いることで電流－電圧特性を改善することができた。

2.2 フィッティングによる電流集中領域の算出

2.2.1 目的

前節で述べたように、GaN-PND の高耐圧化の実証など逆方方向特性においては顕著な研究報告がされているが、順方向特性の検証については不十分である。そこで、過去の Mochizuki らの報告に注目し、順方向電流注入時のアノード電極下の電流集中領域について検証した[21]。Mochizuki らは図 1 に示すような、TLM の短形電極の実験とシミュレーションより、アノード電極端からおよそ 10 μm 内において p-GaN 層が低抵抗化するフォトンリサイクリング効果が生じていると推測している[21]。フォトンリサイクリング効果については 2.2.2 にて説明する。本節では、円形電極メサ構造ダイオードを試作し実測電流値からフィッティングにより電極端からの電流集中領域を求めた。

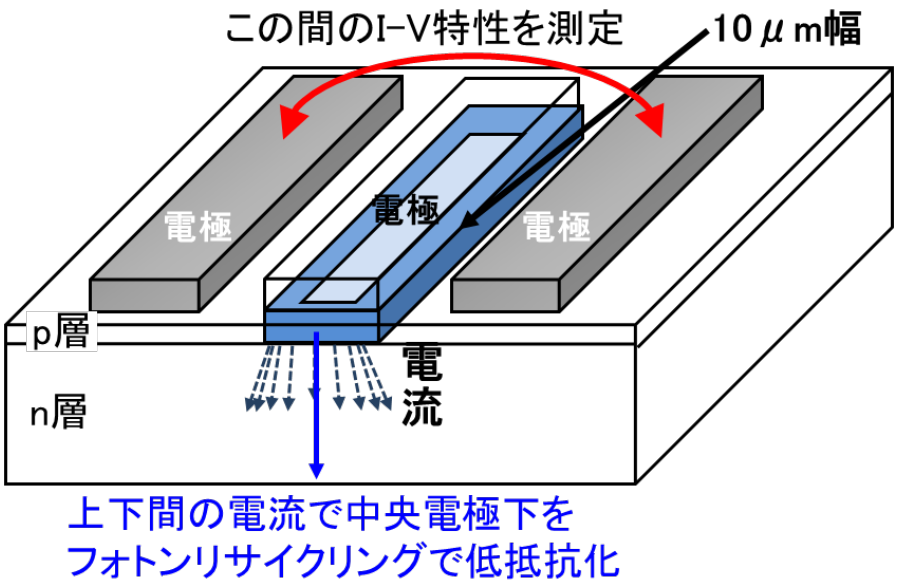


図 1 Mochizuki らによる TLM 測定[21]

2.2.2 フォトンリサイクリング効果

図 2 にフォトンリサイクリングの模式図を示す。PND へ順方向電流を注入すると電子と正孔が再結合しフォトンが発生され発光する。発生したフォトンによって常温では低いイオン化率の Mg アクセプタがイオン化され正孔が生成される。増加した正孔により抵抗が低減しその領域の電流が増加され、フォトンの発生の増加へとフィードバックされる。このサイクルがフォトンリサイクリングである。フォトンリサイクリングによって GaN の PND におけるオン抵抗が低減される要因となる。円形電極ダイオードではこのポジティブフィードバックが電界強度の高い電極周辺で特に強く発生すると考えられる。

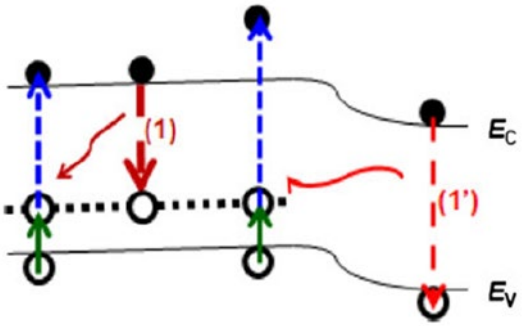


図 2 順方向電圧印加時の GaN PND におけるフォトンリサイクリング効果

2.2.3 実験条件

本実験で用いたデバイス構造を図 3 示す。基板条件はサイオクス製 p^+-GaN (Mg: 2×10^{20} cm^{-3}, 20 nm)/ p-GaN (Mg: 5×10^{17} cm^{-3}, 500 nm)/ n^--GaN (表 1 参照)/ n-GaN (Si: 2×10^{18} cm^{-3}, 2 μm)/ n^+-GaN 基板(1×10^{18} cm^{-3}, 400 μm)と n^--GaN の条件が異なる 3 種類の基板である。活性化アニールは N_2 雰囲気中で 850℃において 30 分間処理を行った。デバイスの素子分離は ICP ドライエッチングによって 1 μm 以上削ることにより達成した。裏面電極は n-GaN 基板上に Ti/Al(50/250 nm)を用いて形成し、オーミック電極は p^+-GaN 層上に Pd/Ni(200/100 nm)を用いて形成し、電界集中緩和のために FP 電極 Ti/Al(30/250 nm)を用いて形成した。いずれの電極も熱処理は行っていない。ダイオードは電極直径 10、15、20、30、60、100 μm で Keithley 237 を用いて測定を行った。

表 1 各サンプルにおける n^--GaN 層の条件

サンプル	①	②	③(1 層目/2 層目)
Si 濃[cm^{-3}]	9.0×10^{15}	3×10^{16}	$1.0 \times 10^{15}/8.0 \times 10^{15}$
膜厚 [μm]	1.5	10	2/23

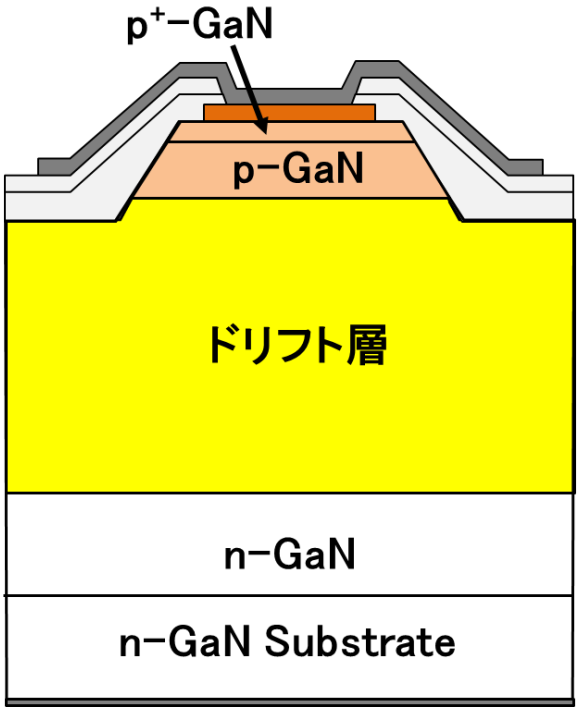


図 3 デバイス構造

自立 GaN 基板上 PND の同エピタキシャル層における R_{on} は、アノード電極径 50 μm の 0.4 mΩcm² に比べ 3000 μm では 124 mΩcm² と高いことから、短アノード電極径ほど R_{on} が低いことが報告されている[5,12]。このことから、アノード電極内において電流密度の異なる領域がいくつか存在し、並列回路化していることが考えられる。また、電極径が大きくなるにつれて、R_{on} が増加傾向にあることから、電極内における電流密度の低い領域の占める割合は高く、Mochizuki らによる TLM 測定とシミュレーションから電極端における電流密度が最も高いことがわかる[21]。これらを踏まえ、図 4 に示す、アノード電極径内を 4 つの領域に分け、電極径の内側になるほど、電流密度が高くなるようなモデルを作製した。フィッティングにおいて n 層におけるフォトンリサイクリングによる p 層からの正孔の注入を考慮し電流集中領域は p 層だけでなく n 層においても考慮した。また、n 層における電流集中領域範囲を拡散長 L_n として表し、n 層における電流の広がりも考慮したモデルである。

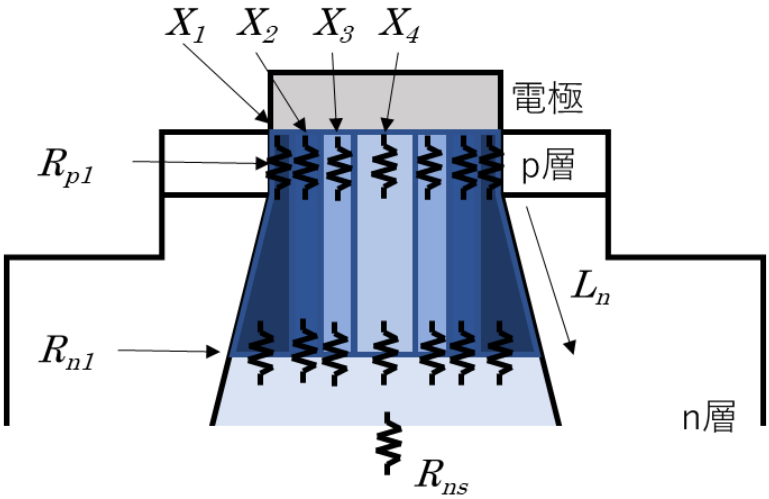


図 4 フィッティングモデル

2.2.4 フィッティングから算出した電流集中領域

図 5 に各基板の順方向電流電圧特性結果を示す。ドリフト層が薄いほど、低抵抗化するため、オン抵抗値が低いことがわかる。このオン抵抗値の異なる 3 つの基板の各電極径における 5 V 電圧印加時の実測電流値を用いてフィッティングを行う。図 6 に基板③における実測電流値とフィッティングにより算出した電流値との比較を示す。図 4 のフィッティングモデルから X_1、X_2、X_3、X_4 の領域における電流値は

$$I_{X1\sim4} = (5x\frac{R_p}{R})/(\rho_{p1\sim4}x\frac{d_p}{S_{p1\sim4}}) \quad (1)$$

となる。R は

$$R = R_p + R_{n1} + R_{n2} \quad (2)$$

であり、R の値が実測定結果の $5/I_{実測値}$ と同値になるように右辺 3 つの抵抗値のパラメータをフィッティングする。

S_p は X_1～X_4 の領域における p 層の面積であり

$$S_{p0} = (\frac{L_1}{2})^2 \times \pi \quad (3)$$

$$S_{p1} = S_{p0} - ((\frac{X_0}{2} - X_{p1}) \times 10^{-6})^2 \times \pi \quad (4)$$

$$S_{p2} = ((\frac{X_0}{2} - X_{p1}) \times 10^{-6})^2 \times \pi - ((\frac{X_0}{2} - X_{p1} - X_{p2}) \times 10^{-6})^2 \times \pi \quad (5)$$

$$S_{p3} = ((\frac{X_0}{2} - X_{p1} - X_{p2}) \times 10^{-6})^2 \times \pi - ((\frac{X_0}{2} - X_{p1} - X_{p2} - X_{p3}) \times 10^{-6})^2 \times \pi \quad (6)$$

$$S_{p4} = ((\frac{X_0}{2} - X_{p1} - X_{p2} - X_{p3}) \times 10^{-6})^2 \times \pi \quad (7)$$

として求められここで、L_1は電極直径であり、

$$L_1 = X_0 \times 10^{-6} \quad (8)$$

となる。S_nについても S_p と同様に求めるが、n 層内においては電流の広がりを考慮し、S_{n1}は電流の広がりは 45°であると仮想し計算した。
R_pは p 層の抵抗値であり、

$$R_p = \frac{(d_p \times \rho_{p1} \times \rho_{p2} \times \rho_{p3} \times \rho_{p4})}{(S_{p1} \times \rho_{p2} \times \rho_{p3} \times \rho_{p4} + S_{p2} \times \rho_{p1} \times \rho_{p3} \times \rho_{p4} + S_{p3} \times \rho_{p1} \times \rho_{p2} \times \rho_{p4} + S_{p4} \times \rho_{p1} \times \rho_{p2} \times \rho_{p3})} \quad (9)$$

として求められ、R_{n1}、R_{n2}についても同様の方法で求められる。
式(1)によって得られる 4 つの領域における電流値が実測電流値にフィットするように、式(1)～(9)における、抵抗率(ρ_p、ρ_n)、拡散長(L_n)、電流集中領域幅(X_1、X_2、X_3)をそれぞれのパラメータとしてフィッティングを行った。図 6 から実測電流値とフィッティングによって計算した値が良く一致していることがわかる。残り 2 枚の基板においても同様のフィッティングを行い、得られた電流集中領域幅を表 2 に示す。電流集中領域幅は電極端から X_1は 9 μm、X_2は 11 μm、X_3は 11 μm となり、Mochizuki らによる TLM の短形電極の実験とシミュレーションから求めた、電極端から 10 μm と同等の結果が得られた。また、図 7 に基板②の電極径 100 μm における電極径内の電流密度分布を示す。これより、電極端から 11 μm における領域と電流密度の最も低い 100 μm における値とでは、最小で 5 倍、最大で 10 倍の差が生じた。また、電極端ほど電流密度が高いことから、電極端ほど電界が高く、フォトンリサイクリング効果による正孔の注入量が多くなることで、低抵抗化することがわかる。

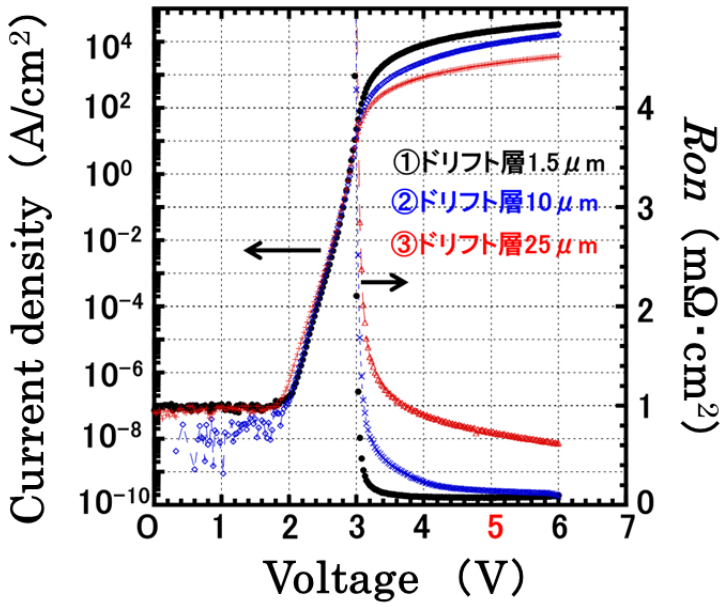


図 5 順方向電流－電圧特性

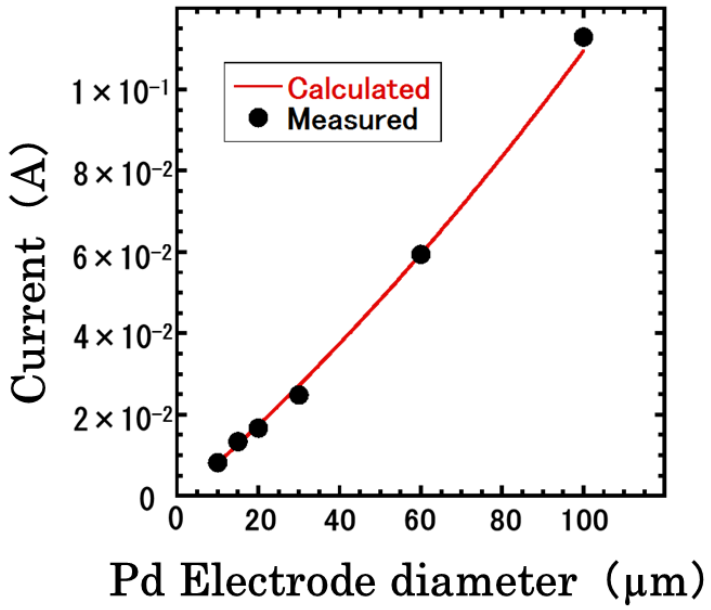


図 6 フィッティング結果

表 2 各基板における電流集中領域

ウェハ	X_1 (μm)	X_2 (μm)	X_3 (μm)	計 (μm)
①	2.0	2.0	5.0	9
②	1.1	3.9	6.0	11
③	1.0	4.0	6.0	11

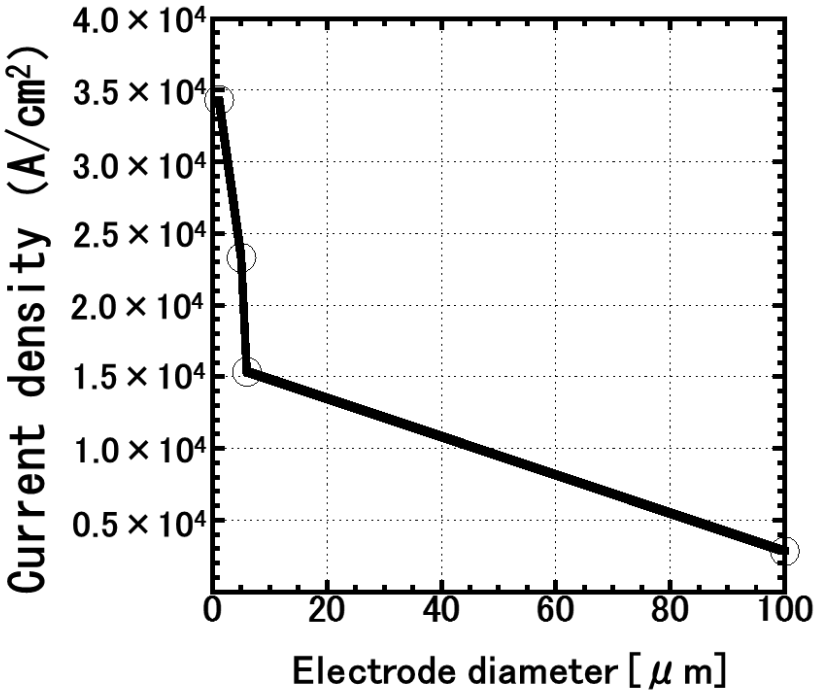


図 7 基板②電極径 100 μm における電流密度

2.3 可視化による電流集中領域の直接観察

2.3.1 目的

一定電圧での順方向電流と電極径 X との関係は本来、二乗に比例する不定元が一つの多項式となるが、図 6 の電極径に対する電流グラフから、電流は電極径に比例する二つの不定元を含む多項式となった。これより、実測定結果からフィッティングを行い、電極端より 9～11 μm において、電流密度が高いと仮説を立てた。GaN は直接遷移半導体であるため、順方向のキャリア注入で紫外光を発生させる。これによるフォトンリサイクリング効果で電流密度の高い領域の抵抗が下がることでさらに電流が集中することが考えられる。そこで、この仮説を証明するため、電流集中箇所の可視化による直接観測を行うことを目的とする。

2.3.2 実験方法・条件

本実験で用いたデバイス構造を図 8 に示す。ボイドアシスト分離(VAS)法により製造された貫通転位密度 3×10^6 cm^2 以下を有する自立 GaN 基板上に、有機金属気相成長(MOVPE)法により、p^{++}-GaN(Mg = 2×10^{20} cm^{-3}, 30 nm) /p-GaN(Mg = 1×10^{18} cm^{-3}, 500 nm) / n^--GaN(Si = 1×10^{15} cm^{-3}, 2 μm) / n^--GaN(Si = 8×10^{15} cm^{-3}, 15 μm) / n-GaN(Si = 1×10^{18} cm^{-3}, 2 μm)の層構造を成長させた基板を用いた。活性化アニールは N_2 雰囲気中で 850 ℃において 30 分間処理を行った。図 9 はデバイス素子分離のために ICP ドライエッチングによって 1 μm 以上削ることにより達成した。次に、図 10 に示すように、GaN 基板の裏面に ITO を 500 nm 蒸着し、p-n 接合部の EL 発光強度を直接評価するための透明なカソード電極を形成した。 ITO を堆積後、酸素欠陥を補償することで透過率が増加するため、空気雰囲気下 500℃で 30 分間ポスト熱アニールを行った。次に、図 11 に示すように、p^+ -GaN 層上に直径 200 μm の Pd / Ni (200 nm / 100 nm) 円形電極をオーミックコンタクトとして堆積させた。保護膜は spin-on glass (SOG)膜を塗布し 450 ℃で 30 分間熱処理を行い形成した。また、スパッタ装置を用いて SiO_2 膜を 190 nm 堆積させた。最後に、フィールドプレート Ti / Al (30 nm / 250 nm) (FP)金属電極をオーミック金属上に堆積させた。FP 構造は電界緩和に有効であることが報告されている[22]。室温で超高圧ユニットと組み合わせた Agilent B1505A を使用して、電流－電圧(I-V)特性を評価した。 EL マッピングは、Horiba の LabRAM HR システムによって、ダイオードの背面から実施した。図 12 は評価用のマウントである。

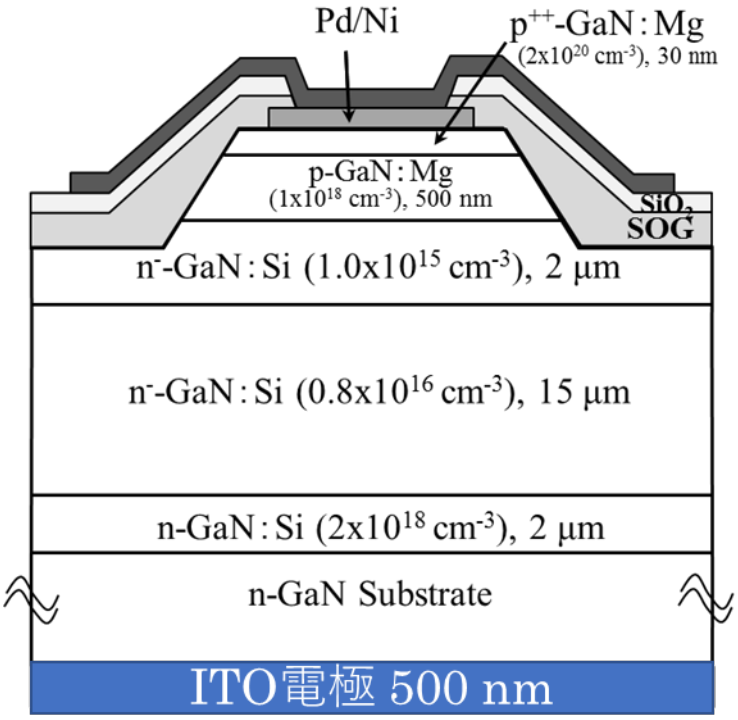


図 8 デバイス構造[31]

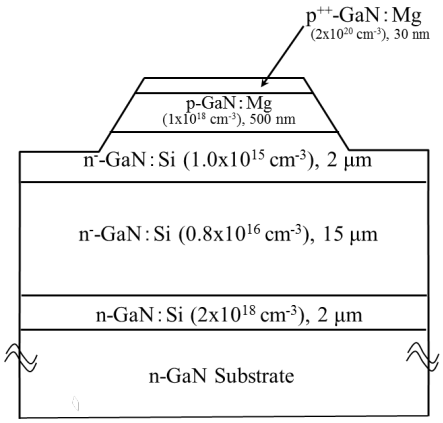


図 9 MESA

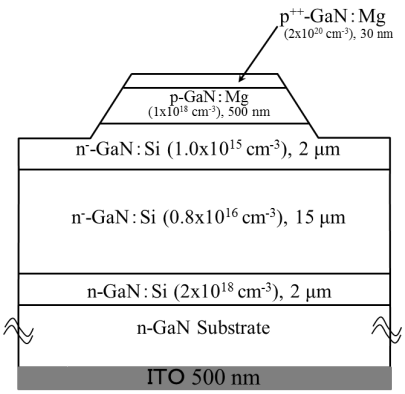


図 10 with ITO

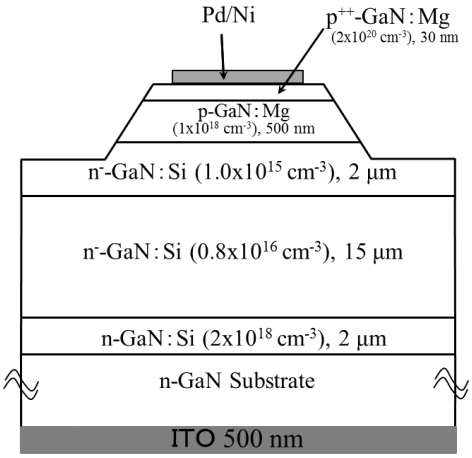


図 11 without passivation

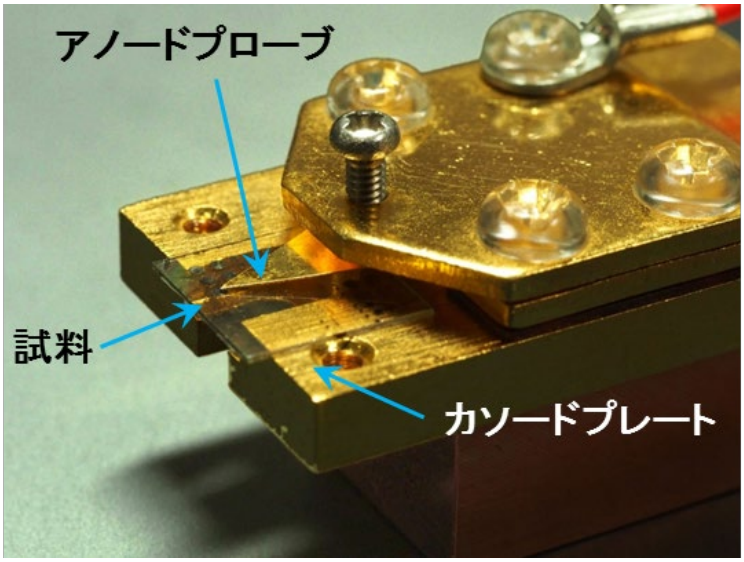


図 12 評価用マウントの外観

2.3.3 発光パターンの評価

図 13、図 14、図 15、図 16 にマウントを用いた電流注入による発光の様子を示す。電圧は 6 V 印加時のものである。図 13 は上面のアノード電極にプローブを置いた状態であり、図 14 はプローブの先端を拡大したものである。図 15 のようにマウントを引っくり返すことで p-n 接合領域の発光を裏面から観測することが可能となる。この状態でマッピングを行う。

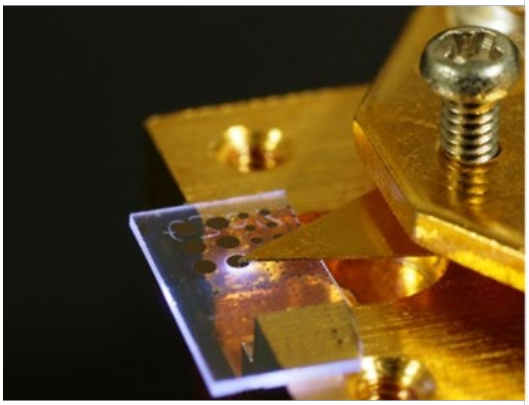


図 13 表面

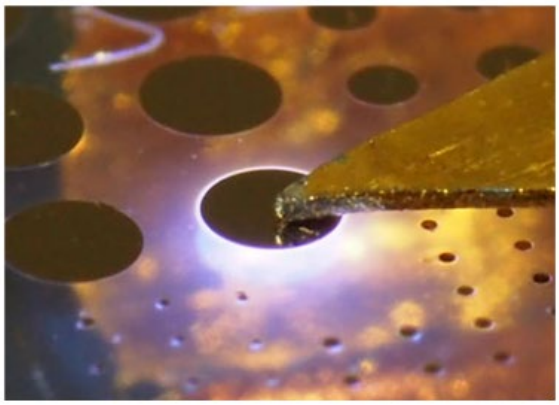


図 14 拡大

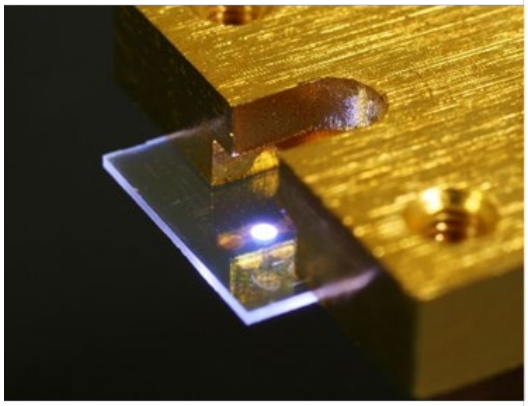


図 15 裏面

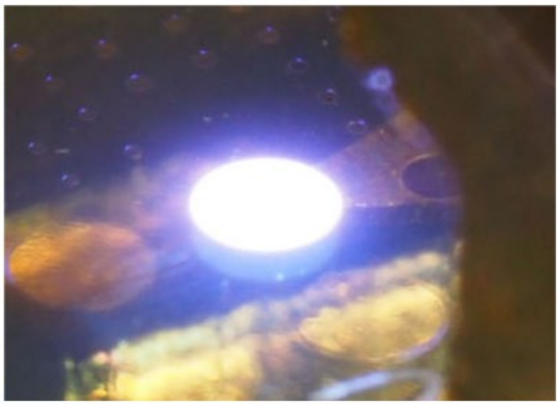


図 16 拡大

図 17、図 18 に電極径 400 μm における EL マッピングの結果を示す。図 17 は電流注入前の光学顕微鏡像であり、図 18 は電流注入中の顕微 EL マッピング像である。マッピングにおける強度比は赤色で示す領域が最も発光強度が高く、電流の集中している領域である。図 18 から、赤色の発光強度の高い領域が電極端に存在し電極端において電流が集中していることが分かる。また、EL 強度は電極端から約 20 μm の範囲で中心に比べ約 2 倍高くなっている。しかし、ステージのステップ送り幅が 11 μm と広く、対物レンズ(5 倍)の解像度が不十分なために実際の電流集中領域幅はさらに小さく、その領域の EL 強度はこの測定結果よりも高いと考えられる。これより、2 章で立案したモデルと Mochizuki らのシミュレーションによる仮説、すなわち、電極端における電流集中を直接的に証明することができた。

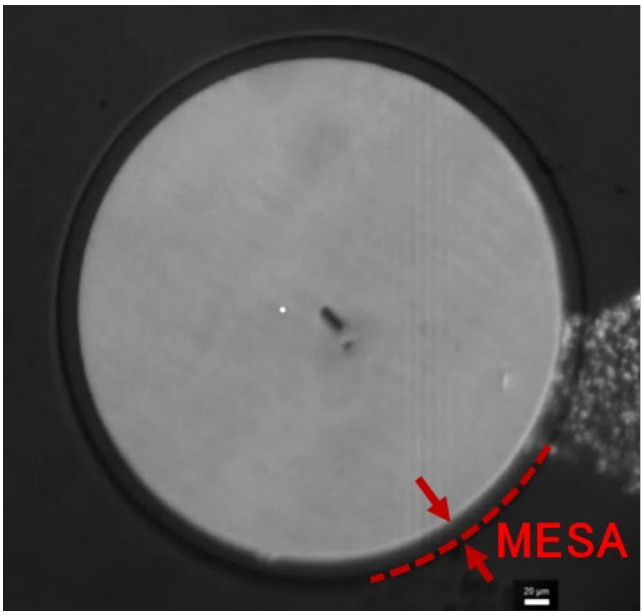


図 17 光学顕微鏡像

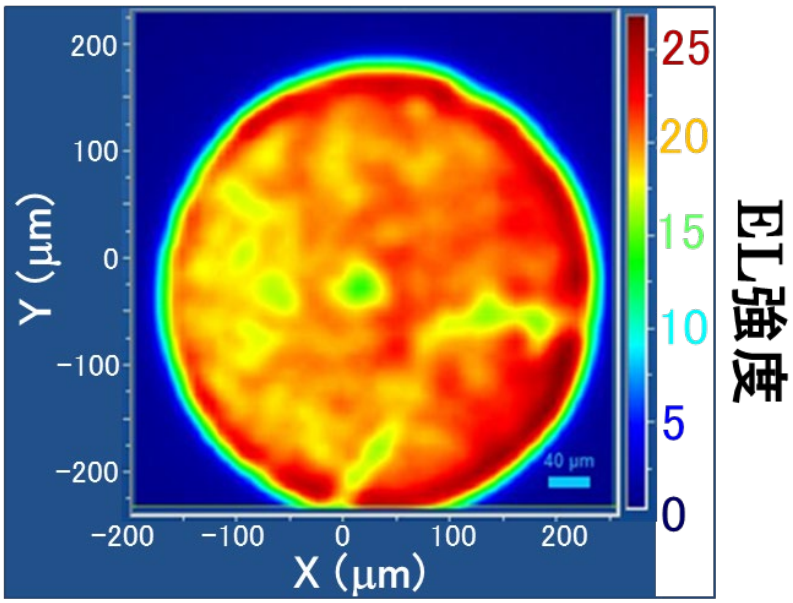


図 18 顕微 EL マッピング像

2.4 GaN エピタキシャル成長層表面モフォロジーの異なるウェハの評価

2.4.1 目的

GaN 系半導体において高耐圧かつ低オン抵抗のデバイスを実現するためには、結晶欠陥を最小化する歩留まりと結晶品質の信頼性は重要な問題である。自立 GaN 基板上のダイオードにおける結晶欠陥が、低順方向電圧、低逆方向電圧において高いリーク電流を示す原因となることが既に報告されている[23]。また、GaN 基板上の InGaN 層において、GaN 基板のオフ角によって形成される表面粗さが In の取り込み量に影響することが報告されている。オフ角の均一な GaN 基板の作製が現状、困難であるため、In の取り込み量の違いは、レーザ用途の InGaN 量子井戸の発光波長に強く影響を及ぼし、歩留まりの悪化の起因となる[24]-[26]。本節では、自立 GaN 基板上に MOVPE 法によって成長させた PND によって形成された表面モフォロジーによる、デバイス特性への影響を評価した。

2.4.2 ノマルスキー干渉顕微鏡による表面モフォロジーの評価

図 19、図 20 に自立 GaN 基板上 PND におけるエピタキシャル層表面をノマルスキー干渉顕微鏡によって観測した像を示す。図 19 に示す領域は、2.2.3 発光パターンの評価において使用した基板、領域共に同じである。同一基板面内において図 19 のように平坦性の良い領域と図 20 のようにすじ状のモフォロジーがある部分が存在することがわかる。これらは、結晶成長の際の GaN 基板の特定の範囲のオフ角で発生する[23]。

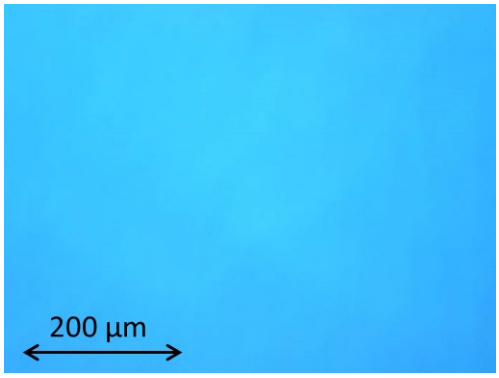


図 19 平坦性の良い領域

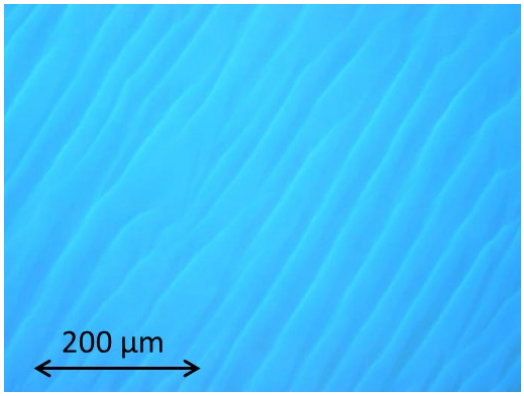


図 20 すじ状モフォロジーのある領域

2.4.3 原子間力顕微鏡(AFM)による表面モフォロジーの評価

2.3.2 ノマルスキー干渉顕微鏡による表面モフォロジーの評価における 2 つの領域の表面粗さ評価に原子間力顕微鏡(AFM)を用いた。図 21、図 22 は図 19、図 20 の領域中の 100 μm 角内における AFM 像を、図 23、図 24 は AFM 像中の実線部における段差測定結果を示す。図 23 よりノマルスキー干渉顕微鏡から平坦性が良いと評価した領域は 13.6 nm の高さをもつ緩やかなうねりが形成され平坦なことがわかる。一方、図 24 のすじ状モフォロジーのある領域では、ラフネスが大きく 70 nm 程度の緩やかなうねりがあることがわかる。また、図 24 より、形成された緩やかなうねりには傾斜に差があり、基板と傾斜面の角度が 0.18° の緩斜面と、0.46° の急斜面があることがわかる。

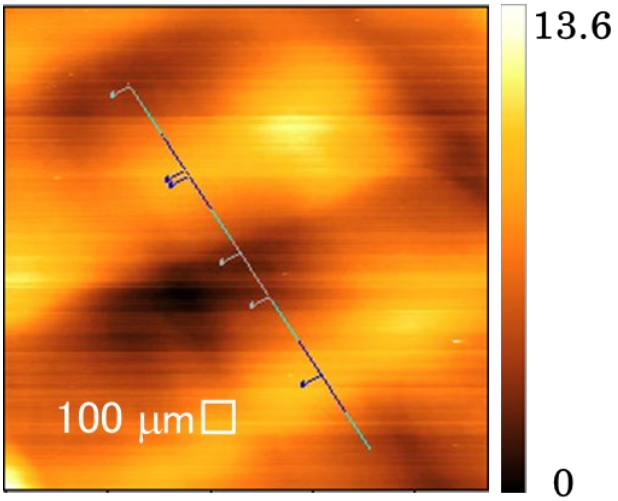


図 21 平坦性の良い領域の AFM 像

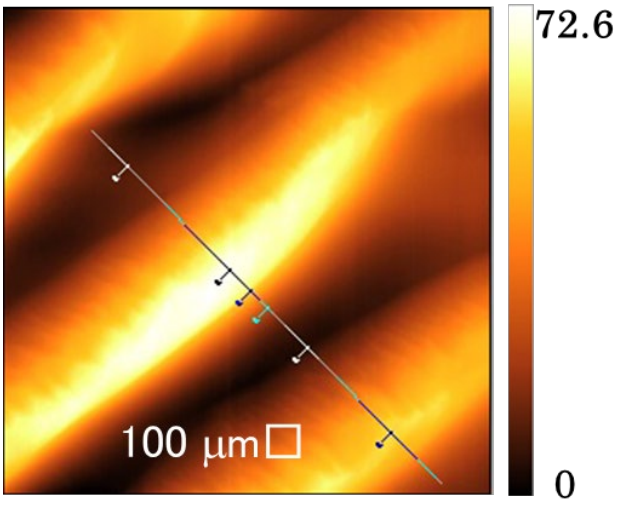


図 22 すじ状モフォロジーのある領域の AFM 像[31]

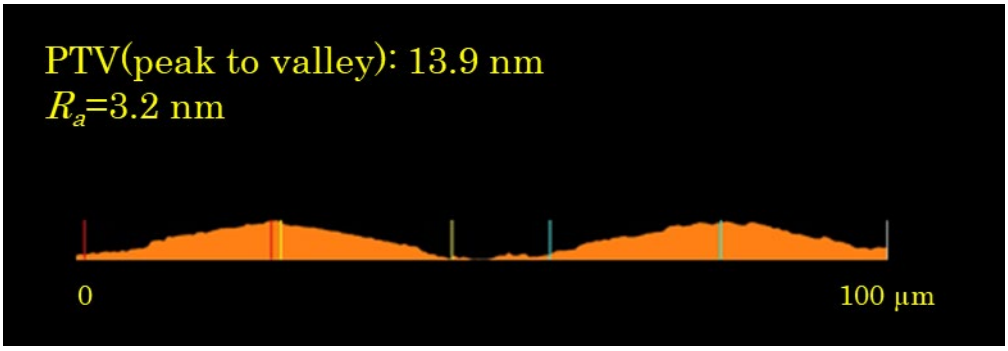


図 23 平坦性の良い領域の段差

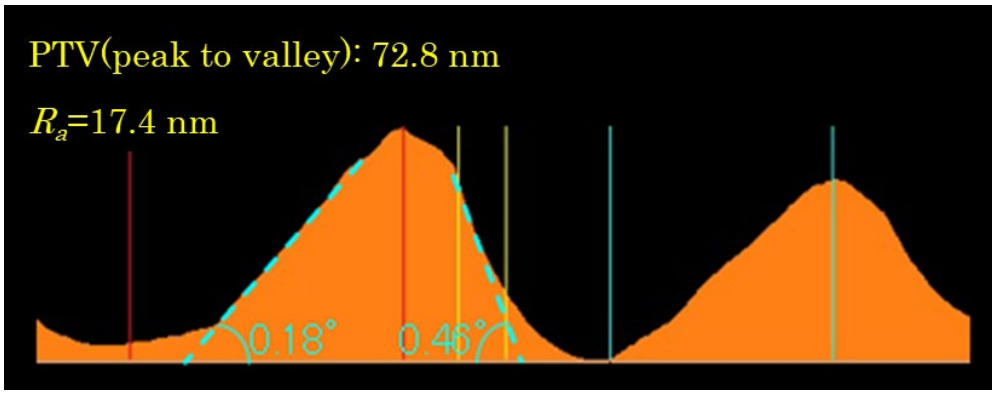


図 24 すじ状モフォロジーのある領域の段差[31]

2.4.4 発光パターンの評価

2.3.2 にて示した基板構造、PND 作製プロセスと同様の方法にて、図 20 のす

じ状モフォロジーのある領域上に PND を作製し、EL 発光パターンの観測を行った。図 25、図 26 に、電極径 400 μm における PND の光学顕微鏡像と順方向電圧印加時の EL マッピング像を示す。両図から、EL 発光強度の高い部分がすじ状のモフォロジーの緩やかなうねりに対応していることがわかる。また、図 18 に示す平坦性の良い領域の EL 結果において観測された、電極端における EL 強度の高い部分も一部観測された。

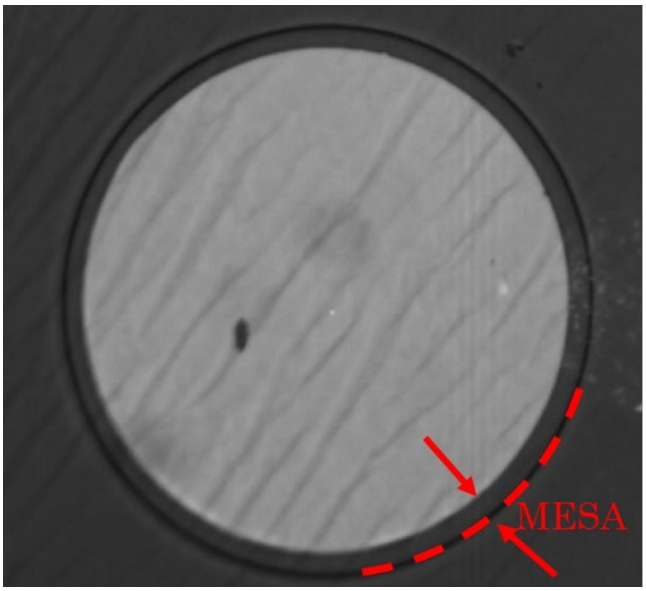


図 25 光学顕微鏡像[31]

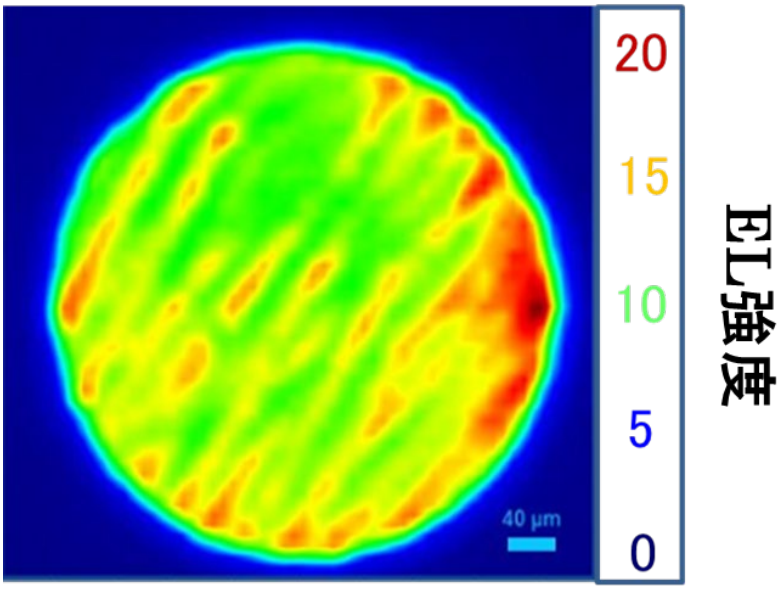


図 26 顕微 EL マッピング像[31]

2.4.5 TOF-SIMS による表面モフォロジーの評価

図 26 において観測された不均一な EL 発光の原因を明らかにするため、TOF-SIMS（Time-of-Fright Secondary Ion Mass Spectrometry）によって、すじ状モフォロジーのある領域におけるエピタキシャル層表面の不純物濃度分布をマッピング評価した。TOF-SIMS は空間分解能に優れているが、深い領域まで測定することは困難なため、p 型層の Mg 分布を評価した。評価範囲を図 27 に示す。図 24 の AFM 像から、エピタキシャル層表面上に傾斜角度の異なる緩やかなうねりがあることを示したが、図 28 より緩斜面の Mg 濃度が急斜面より約 20 %高いことが分かる。また、図 29、図 30 に急斜面、緩斜面の AFM 像を示す。図 29 の急斜面においては、段差が最大 0.4 nm と低く平坦が良いのに対し、図 30 の緩斜面においては、段差が最大 4.7 nm の緩やかなうねりが形成されていることがわかる。このことから、MOVPE 成長中の Mg の捕獲効率は、AFM で多くの原子ステップが観察された緩斜面で、より高くなることが考えられる。

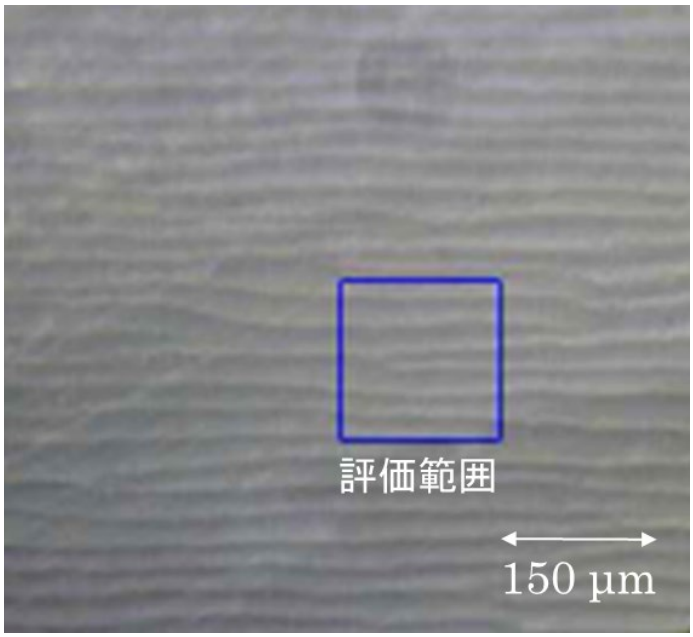


図 27 SEM 像

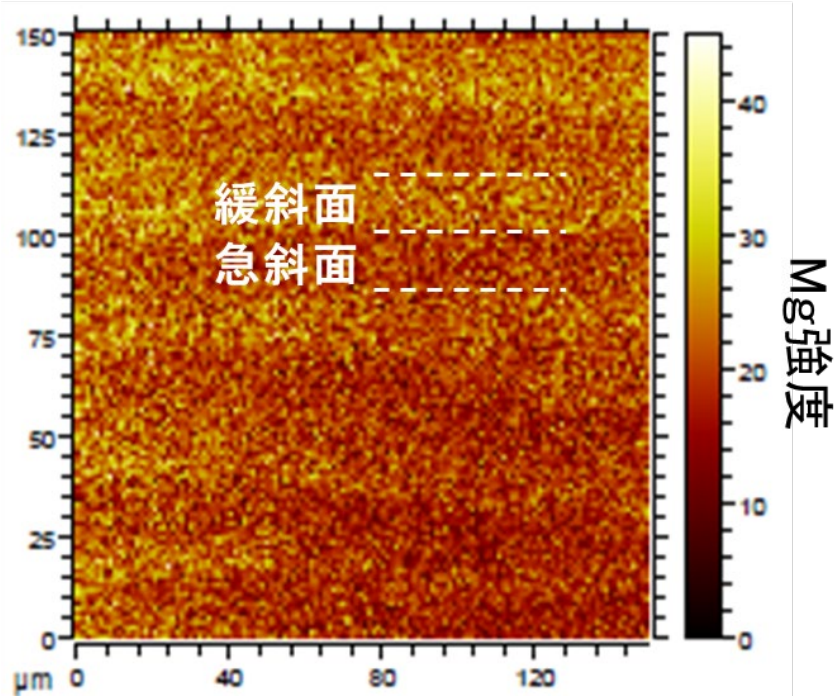


図 28 TOF-SIMS マッピング像(Mg 分布) [31]

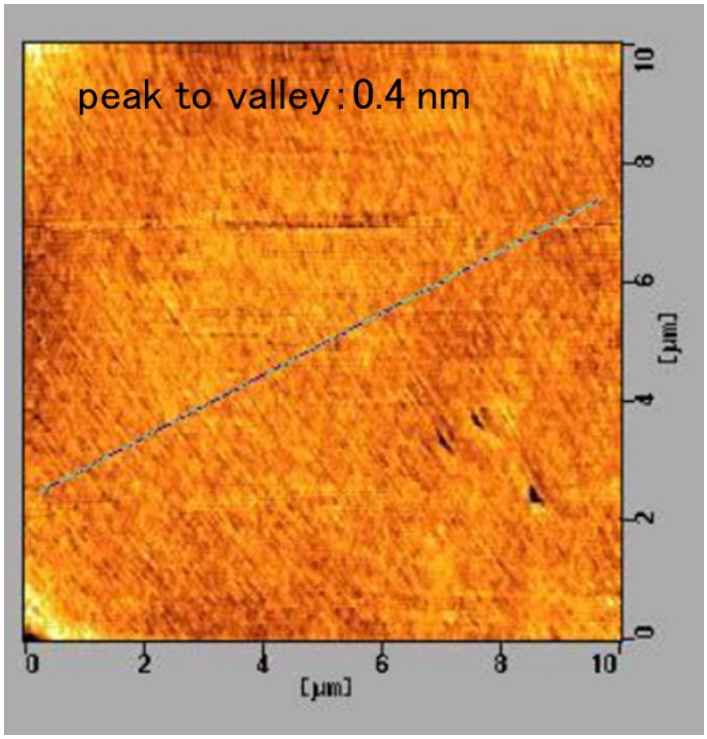


図 29 急斜面の AFM 像

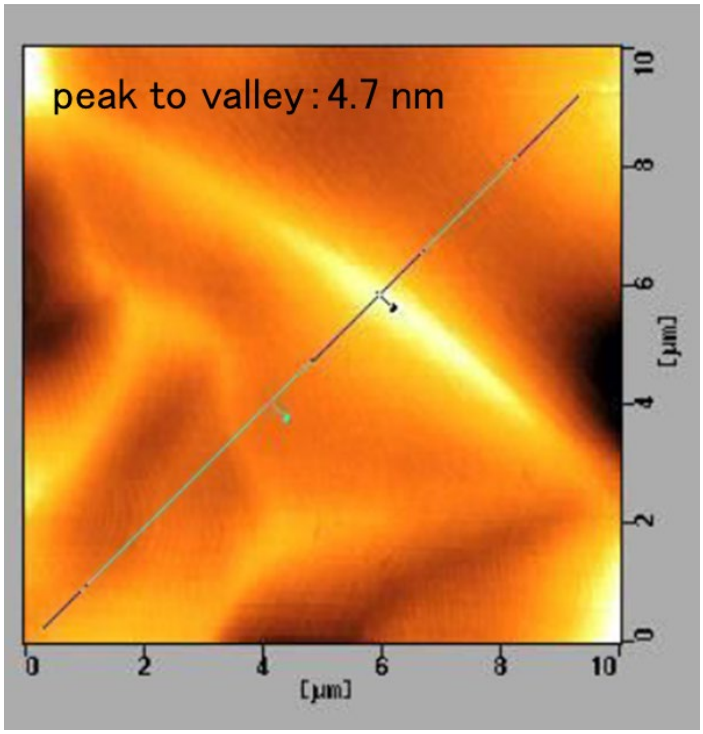


図 30 緩斜面の AFM 像

2.4.6 表面品質がもたらす GaN PND への影響

自立 GaN 基板上 PND における表面粗さが、デバイス特性にどのような影響を及ぼすのか検討するため、順方向電流－電圧特性と逆方向耐圧測定によって評価した。本節では表面段差が<20 nm の平坦性の良い領域と>50 nm の平坦性の劣る領域上に PND を作製し評価した。図 31 に順方向電流－電圧特性結果を示す。2 つの領域において、電流密度<10 A/cm^2 における特性に変わりはなく、ダイオードの理想因子は 1.3 (2.85-2.95 V)である。これより両領域においてリーク電流がないことがわかる。しかし、高電流密度>100 A/cm^2 における R_a は平坦性の劣る領域に比べ平坦性の良い領域の方が低い値を示した。図 32 に、2 つの領域で作製した PND の R_{on} を比較したものを示す。平坦性の良い領域における R_{on} は 2%未満の小さな偏差を有するのに対し、すじ状モフォロジーのある領域では 7%の偏差があった。

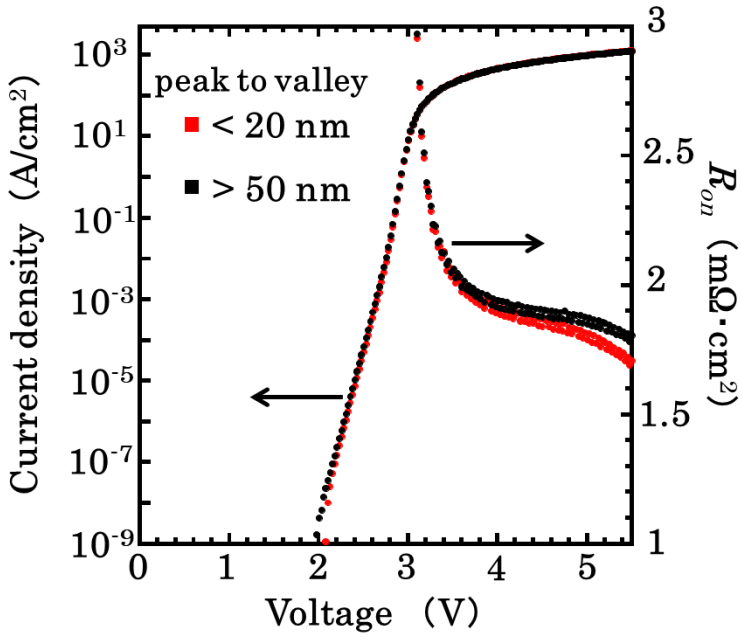


図 31 順方向電流－電圧特性[31]

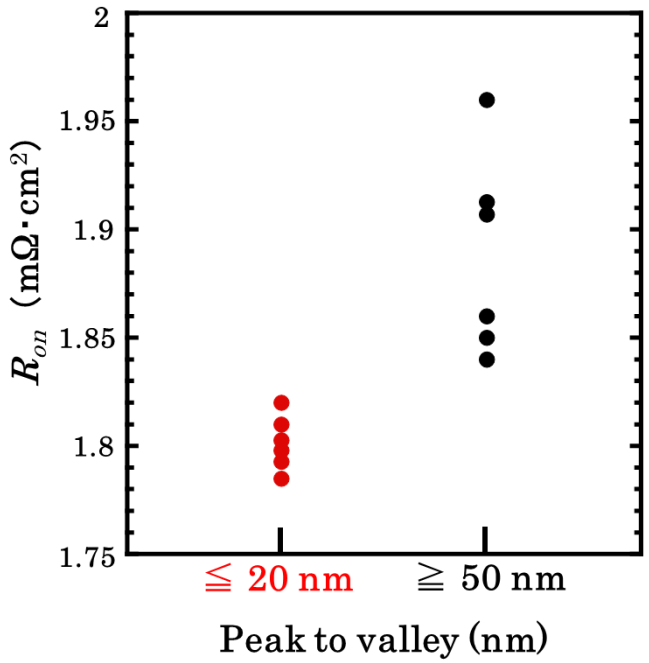


図 32 R_{on} の比較[31]

図 33 に、2 つの領域における逆方向電流－電圧特性結果を示す。図 33 より、耐圧にバラつきはあるが、2 つの領域の耐圧は同値であった。過去の研究において、自立 GaN 基板上 PND の逆方向電流値は、R_a<50 nm においては 10^{-8}－10^{-7} A と逆方向電流値に差がなく、R_a>50 nm においては逆方向電流値が 10^{-5}－10^{-3} A と R_a<50 nm に比べ 2 桁増えることが報告されている[27]。本節で用いた平坦性の良い領域の R_a は 3.2 nm、劣る領域の R_a は 17.4 nm と、2 つの領域は R_a<50 nm であるため逆方向電流に差が生じず、同値の耐圧を示したと考えられる。

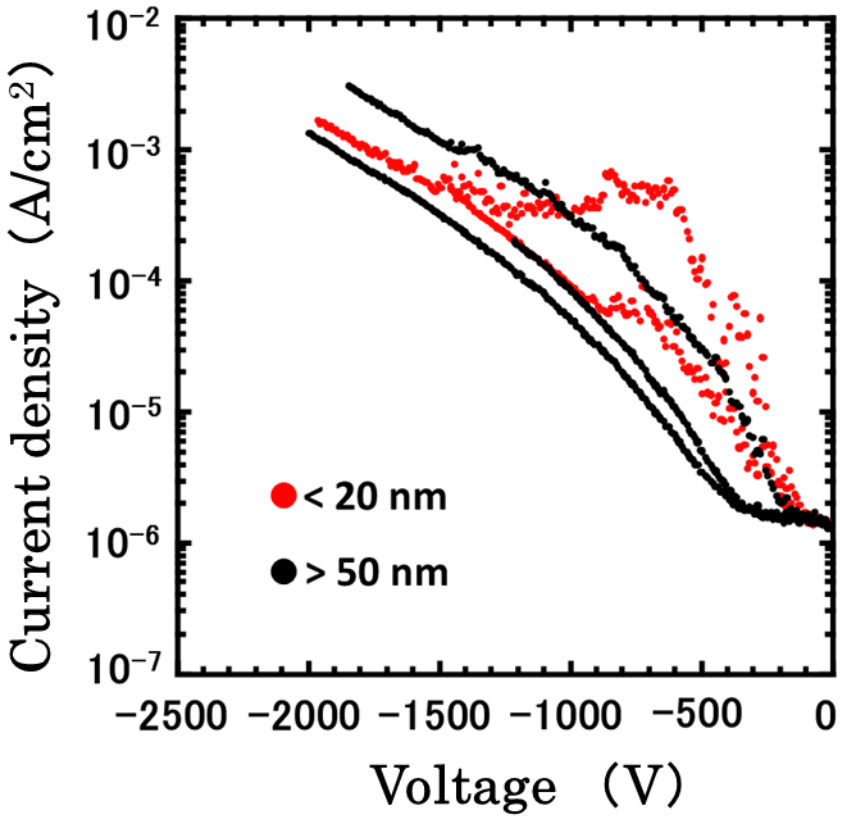


図 33 逆方向電流－電圧特性

図 34(a)、(b)、図 35(a)、(b)に平坦性の良い領域、すじ状モフォロジーのある領域のダイオードの破壊後の表面をノマルスキー顕微鏡で観測した結果を示す。図 34(a)、(b)に示す平坦性の良い領域では、フィールドプレート電極端で壊れていることがわかる。これは、フィールドプレート構造を用いることにより電極端に集中する電界が緩和され、フィールドプレート電極端に電界集中して壊れたためである[22]。図 35(a)、(b)に示すすじ状モフォロジーのある領域におけるダ

イオードの破壊箇所は平坦性の良い領域と同じフィールドプレート電極端で壊れた。つまり、本節で用いた R_a が 17.4 nm のレベルではすじ状モフォロジーの傾斜部において過剰なリーク電流が発生しないことから、傾斜部での破壊がなく耐圧に影響がなかったことがわかる。しかし、Avogy の報告にあるように、R_a>50 nm においては傾斜部におけるリーク電流が発生し、耐圧に影響がでることが考えられる[27]。これらの結果から、すじ状モフォロジーの傾斜部はダイオード特性劣化の原因となることがわかる。このことから、エピタキシャル層の精密な制御は表面品質のために重要な技術となる。今後、高性能の大型自立 GaN 基板上 PND の作製には平坦性の良いエピタキシャル層を形成することが好ましい。

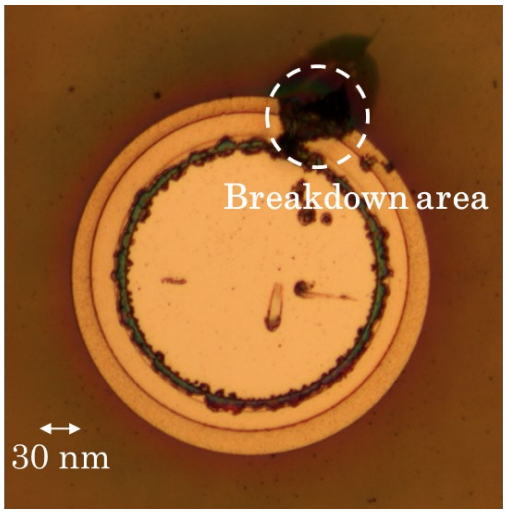


図 34(a) 平坦性の良い領域(例 1)

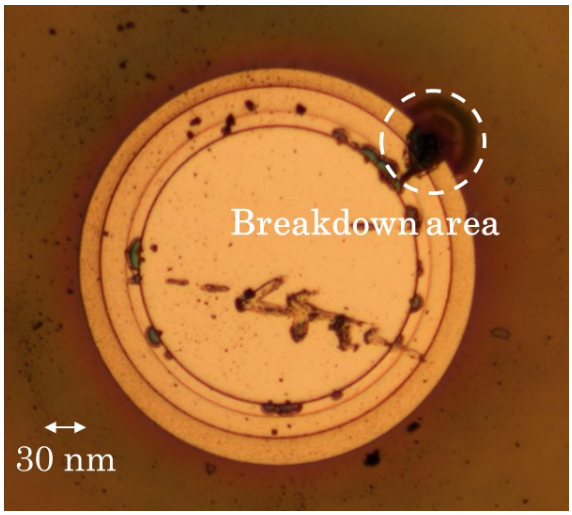


図 34(b) 平坦性の良い領域(例 2)

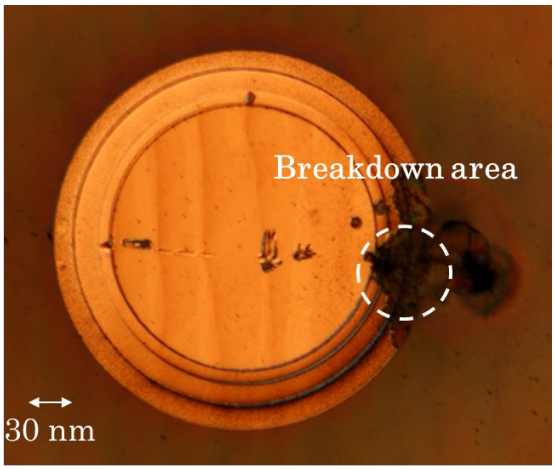


図 35(a) すじ状モフォロジー

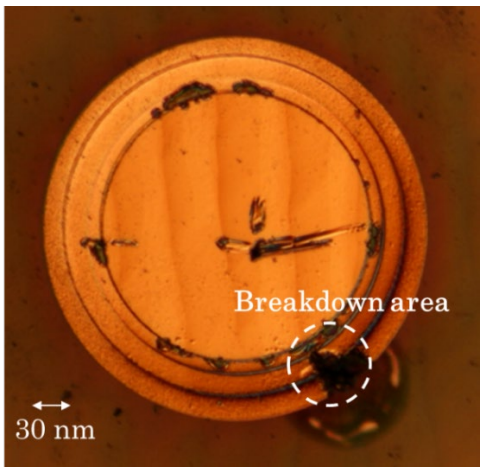


図 35(b) すじ状モフォロジー

2.4 HVPE 成長による自立 GaN 基板上 PND の特性

2.4.1 目的

2.3 にて、自立 GaN 基板上 PND においてアノード電極下の EL 分布から、エピタキシャル層表面のすじ状モフォロジーに対応した不均一な電流分布があることを示した。この原因はすじ状モフォロジーの緩斜面側で Mg 濃度が高く、不均一な電流分布は Mg 濃度に対応した正孔注入量の違いであると考察した。しかし、図 36 のような高濃度に Mg をドープした極めて薄い p^+-GaN 層を用いたダイオードにおいても同様のすじ状モフォロジーに対応した明瞭な発光分布が見られた。厚さわずか 20 nm の 2×10^{20} cm^{-3} の高 Mg 濃度の p^+-GaN 層のため、多少の Mg 分布は正孔注入量に影響を及ぼすことはない。よって、不均一な電流分布には Mg 濃度の不均一以外にもあることが考えられる。Shiojima らの研究より、自立 GaN 基板上に MOVPE 法によって n-GaN 層を成長させた基板をマッピングによって評価した結果、YL 強度がすじ状モフォロジーに対応した分布があることが報告されている[28]。また、Horikiri らの研究によると、n-GaN 層中の不純物濃度はオフ角に依存することが示されている[29]。その内容は、オフ角が小さくなることによりカーボン取り組み量が増え、カーボンによる補償効果によって実効ドナー濃度が減少すると報告されている。つまり、すじ状モフォロジーの不均一な電流分布は p-GaN 層中の Mg 量だけでなく n-GaN 層中のカーボン量にも影響を受けることが考えられる。そこで、Fujikura らが開発した自立 GaN 基板上にハイドライド気相成長(HVPE)法によって n-GaN 層を成長させたデバイスに着目した。Fujikura らは、HVPE システムにおいて高温となる領域に石英を含まない独自技術の開発によって、Si 濃度が 5×10^{14} cm^{-3} 未満と極めて低く、酸素とカーボンに関しても SIMS の検出限界以下である高純度 GaN 層を実現させた[30]。本節では、自立 GaN 基板上に HVPE 法によって n-GaN 層を成長させたショットキー構造の基板と MOVPE 法によって p-GaN 層を再成長させた p-n 接合構造の基板を用いて、すじ状モフォロジーがデバイス特性に影響を及ぼすか評価した。

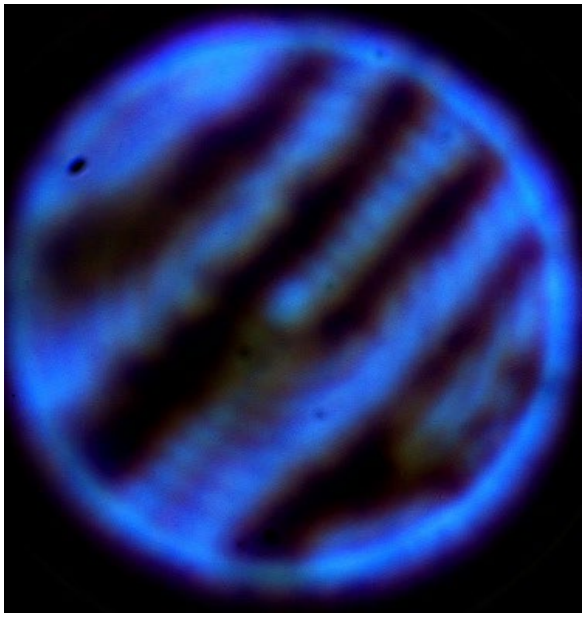


図 36 EL 発光写真

2.4.2 デバイス条件

本実験で用いたデバイス構造を図 37、図 38 に示す。ボイドアシスト分離(VAS)法により製造された貫通転位密度 3×10^6 cm^2 以下を有する自立 GaN 基板上に、ハイドライド気相成長(HVPE)法により、n^--GaN($N_d - N_a = 2 \times 10^{15}$ cm^{-3}, 33 μm) / n-GaN(Si = 1×10^{18} cm^{-3}, 2 μm)のショットキー構造の基板を用いて PL 測定によって YL マッピングを行った。その後、MOVPE 法にて p^{++}-GaN(Mg = 2×10^{20} cm^{-3}, 20 nm) /p-GaN(Mg = 1×10^{19} cm^{-3}, 100 nm)を再成長し、p-n 接合の構造の基板を用いてダイオードを作製した。活性化アニールは N_2 雰囲気中で 850℃において 30 分間処理を行った。図 39 の MESA 構造はデバイス素子分離のために ICP ドライエッチングによって 500 nm 以上削ることにより形成した。次に、図 40 に示すように、p^+ -GaN 層上に直径 200 μm の Pd / Ti / Al (200 nm / 30 nm / 250 nm)円形電極をオーミックコンタクトとして蒸着した。この裏面電極のない構造で裏面側から EL マッピングを行った。EL マッピングは Horiba の LabRAM HR システムを用いて実施した。最後に図 41 に示すように、GaN 基板の裏面に Ti / Al (50 nm / 250 nm)を蒸着し PND を作製した。室温で超高圧ユニットと組み合わせた Agilent B1505A を使用して、電流－電圧（I-V）特性を評価した。

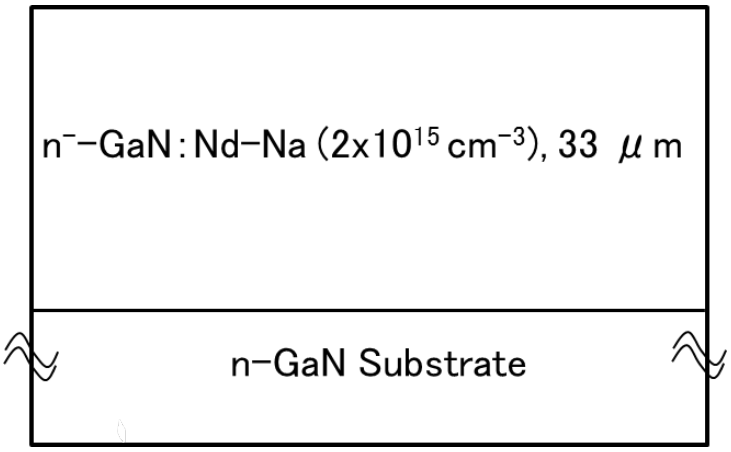


図 37 SB 構造（HVPE）

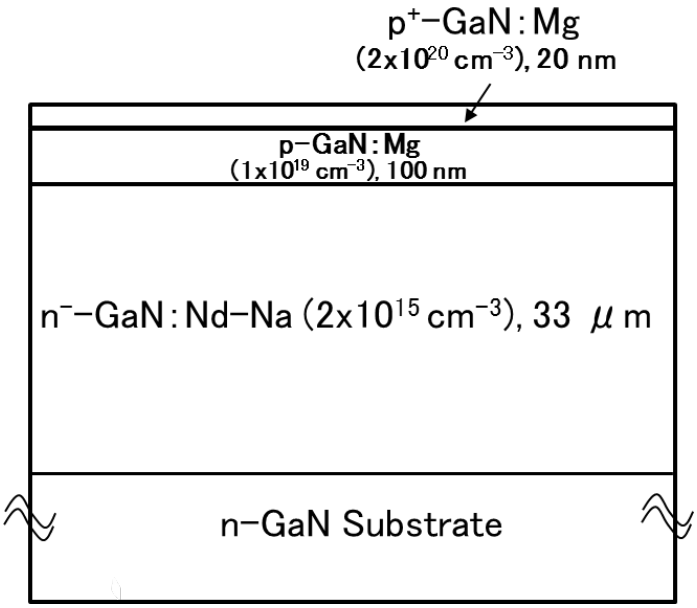


図 38 PN 構造（HVPE + MOVPE）

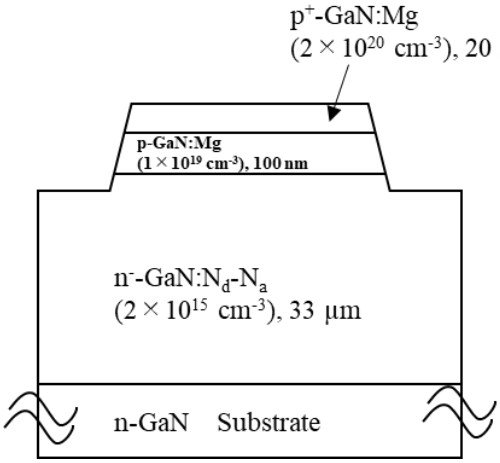


図 39 MESA

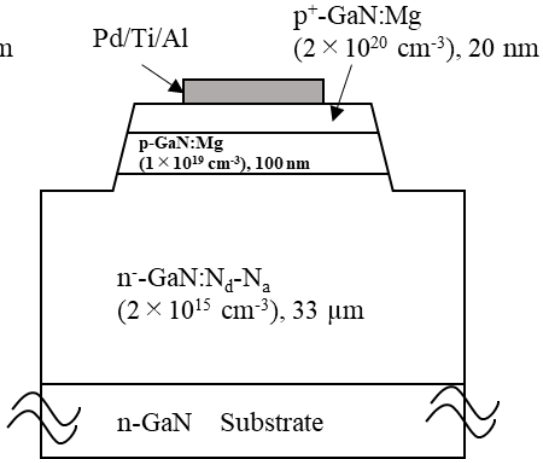


図 40 EL 測定用デバイス

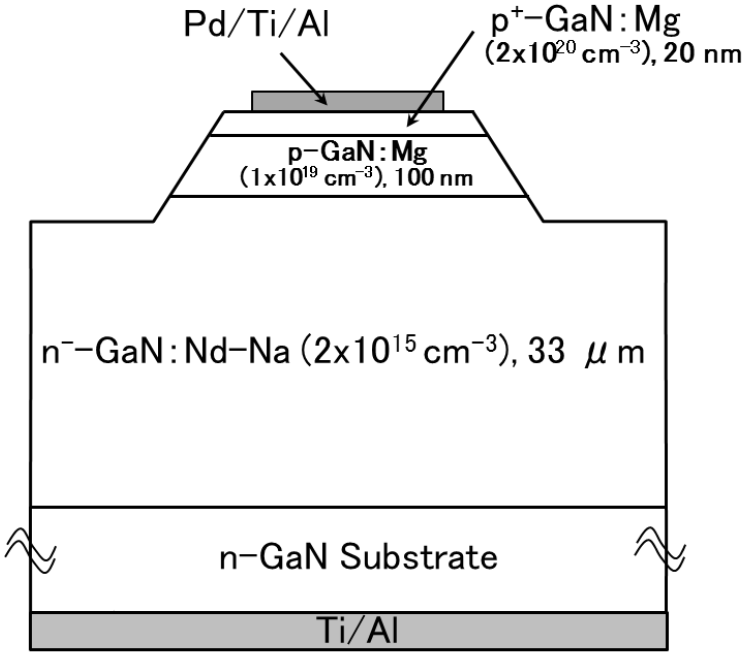


図 41 PND

2.4.3 高純度 HVPE GaN の PL マッピング

図 42、図 43 に自立 GaN 基板上に HVPE 法によって n-GaN 層を成長させた基板のノマルスキー顕微鏡像と PL 測定によって評価した YL 強度マッピング像を示す。顕微鏡像と評価領域を一致させるために、特徴的なパーティクルが乗った領域を評価した。図 43 から YL 強度はすじ状モフォロジーに対応した分布がなく、ほぼ均一であることが分かる。

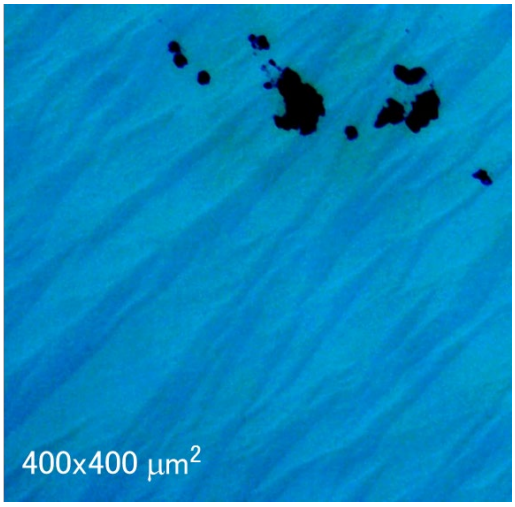


図 42 ノマルスキー顕微鏡像

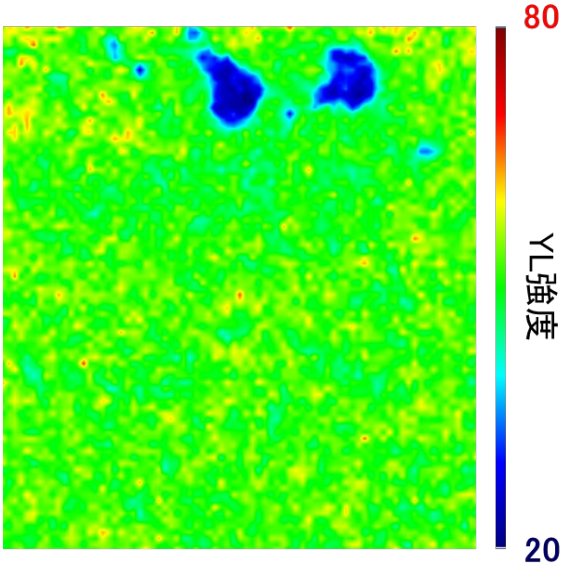


図 43 YL 強度マッピング像

2.4.4 ハイブリッド成長 p-n ダイオードの EL 発光分布

図 44 にエピタキシャル層表面を AFM によって評価した像を示す。表面は MOVPE 法によって作製した基板に比べて平坦な領域の割合が大きいが、場所によって、図 44 のような約 50 nm の傾斜面を有する、すじ状モフォロジーが形成されている。このような領域上に HVPE 法と MOVPE 法による再生成長 PND を作製し、すじ状モフォロジーがデバイス特性に影響を及ぼすのか評価した。

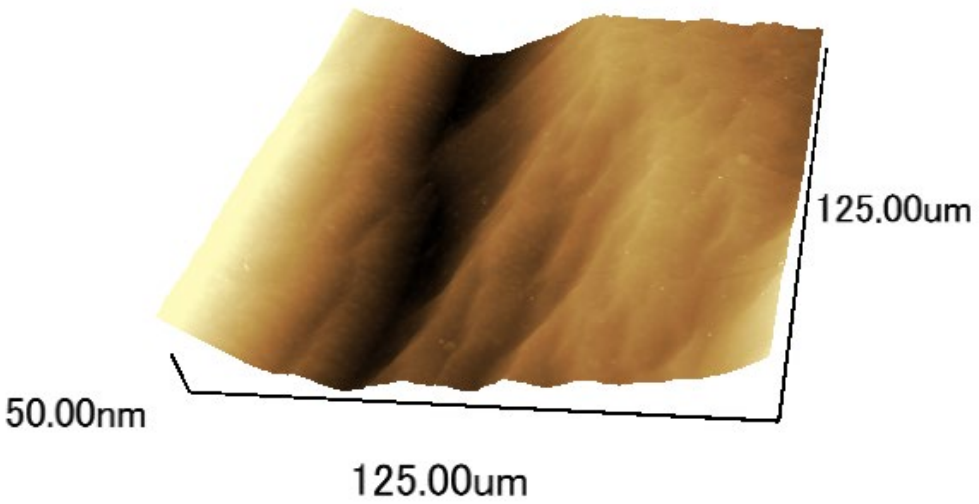


図 44 AFM 像

電極径 200 μm における HVPE 法と MOVPE 法による再生成長 PND の EL マッピング結果を以下に示す。図 45 は電流注入前の光学顕微鏡像であり、図 46 は順方向電流注入時の顕微 EL マッピング像である。図 45 からすじ状モフォロジーが電極の右下領域に存在することがわかるが、図 46 よりすじ状のモフォロジーに対応した EL 強度分布は見られなかった。さらに、電極上部の電極端にて EL 強度の高い部分が存在し、平坦性の良い MOVPE 法によって作製した図 18 のダイオードと類似の結果となった。

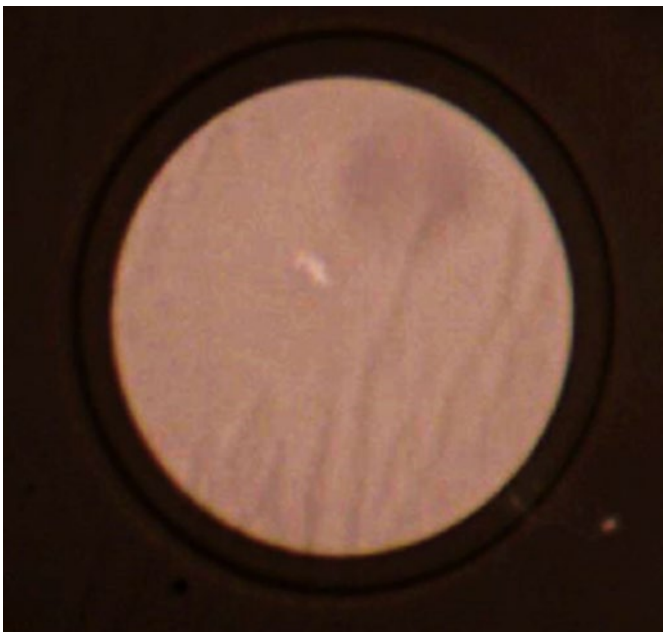


図 45 光学顕微鏡像

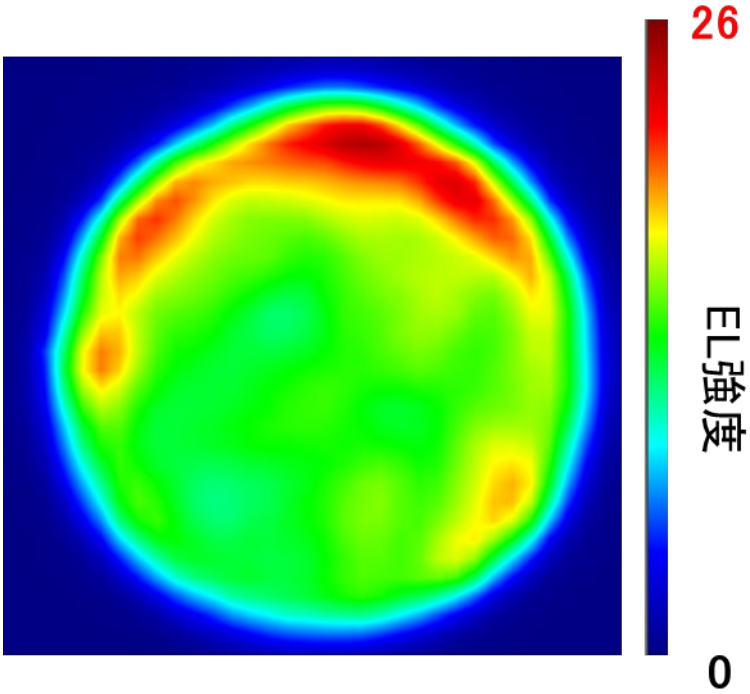


図 46 顕微 EL マッピング像

また、図 47 に n-GaN 層を HVPE 法によって再成長させた基板と MOVPE 法によって成長させた基板を通常の弱励起における PL スペクトルによって比較したグラフを示す。p-GaN は通常発光効率が悪く、かつ、再成長基板の構造では 130 nm と薄いのでスペクトルは大部分 n-GaN 層を反映していると考えられる。グラフ中の YL バンド(2.0 eV－2.35 eV：図 47 中の黄色枠)領域における MOVPE 法の PL 強度値が 1 × 10^3 に対し、HVPE 法は 410^2 と MOVPE 法に比べ、1/2 以下であることがわかる。これらの結果から、n-GaN 層中のカーボンはデバイス特性を劣化させ、カーボン濃度分布がすじ状モフォロジーによる電流分布の不均一を引き起こす原因となることがわかる。

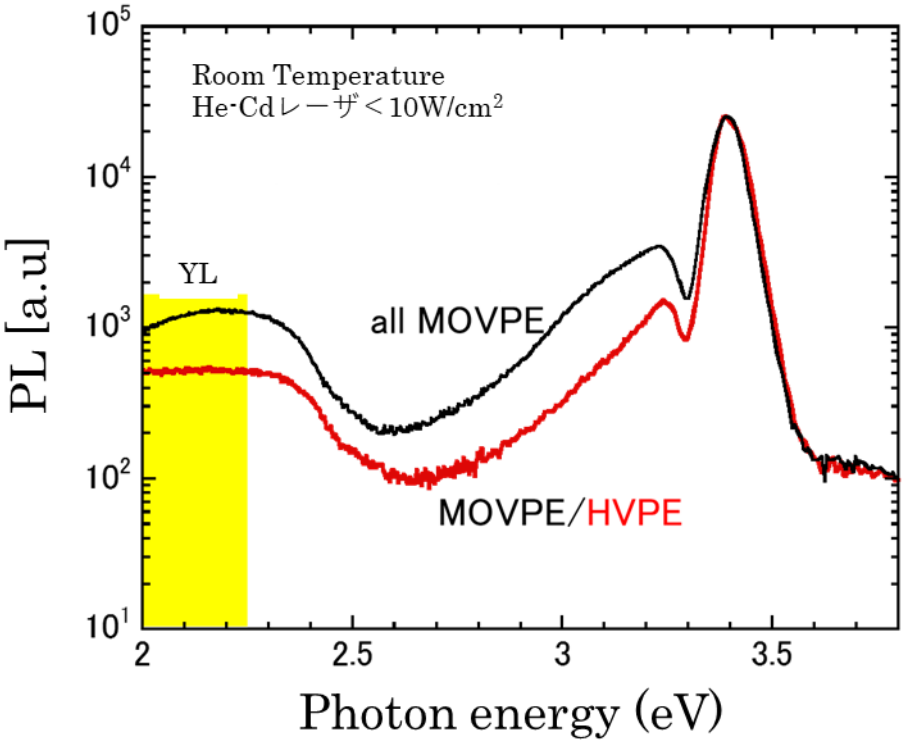


図 47 PL 強度

2.4.5 電流－電圧特性

図 48、図 49 に電極径 200 μm における HVPE 法と MOVPE 法による再成長 PND の順方向電流－電圧特性の線形表示と対数表示グラフを示す。線形表示グラフからダイオードが 3.5 V 付近で立ち上がっていることから PND の動作をしていることが確認できる。しかし、対数表示グラフより、ダイオードの理想因子は 2.87 (2.9-3.0 V)と良好な値を得ることが出来なかった。原因として、再成長法に問題があると考えられる。再成長法は、HVPE 法により n-GaN 層

を成長後、MOVPE 法で p-GaN 層を成長させるために、一度、大気中に基板を取り出す必要がある。そのため、大気中に取り出した際に基板表面の n-GaN 層に大気中に浮遊する Si が付着し、Si 濃度 $10^{17}cm^{-3}$ 程度の高濃度層が形成されデバイス特性を劣化させたと考えられる。これは、図 50 の逆方向電流－電圧特性においてもいえる。本節で用いたデバイス構造では、5 kV 以上の高耐圧が見込めるのに対し、実験結果は 2 kV 程度と低い値であった。フィールドプレート構造を用いていないものの、3 kV 近い耐圧の損失は p-n 界面における Si による高濃度層の形成が電界集中を引き起こし、低電圧領域で破壊された原因となったことが考えられる。

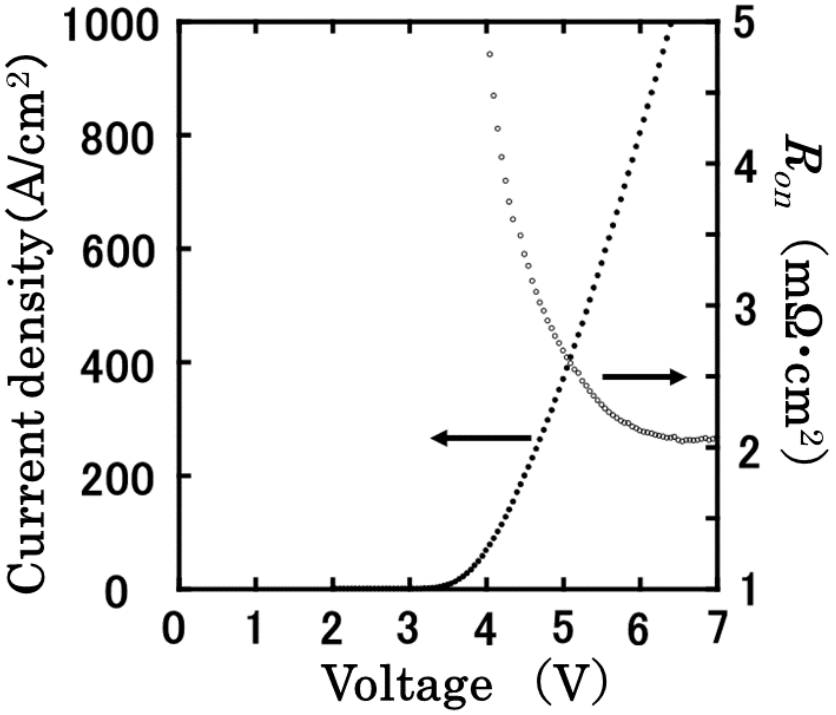


図 48 順方向電流－電圧特性（線形表示）

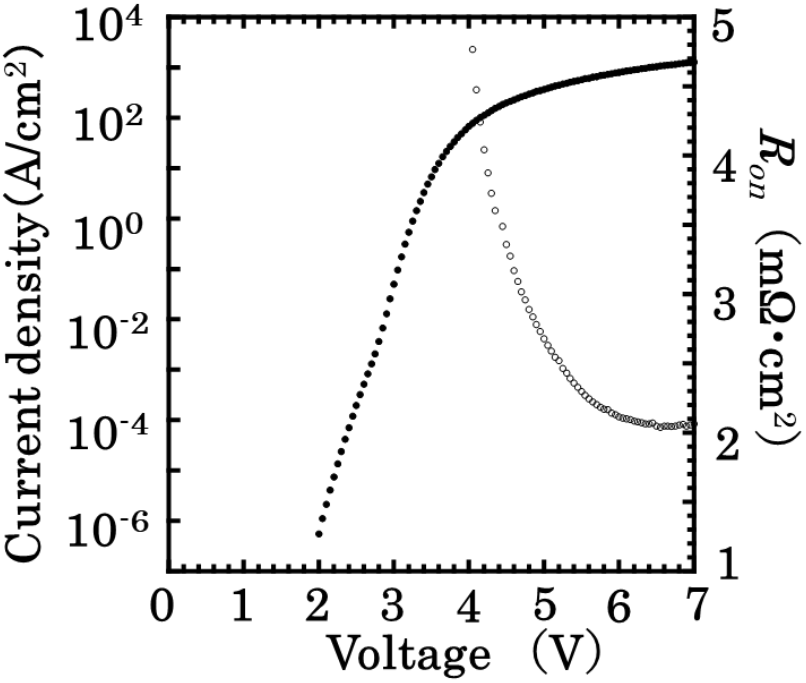


図 49 順方向電流－電圧特性(対数表示)

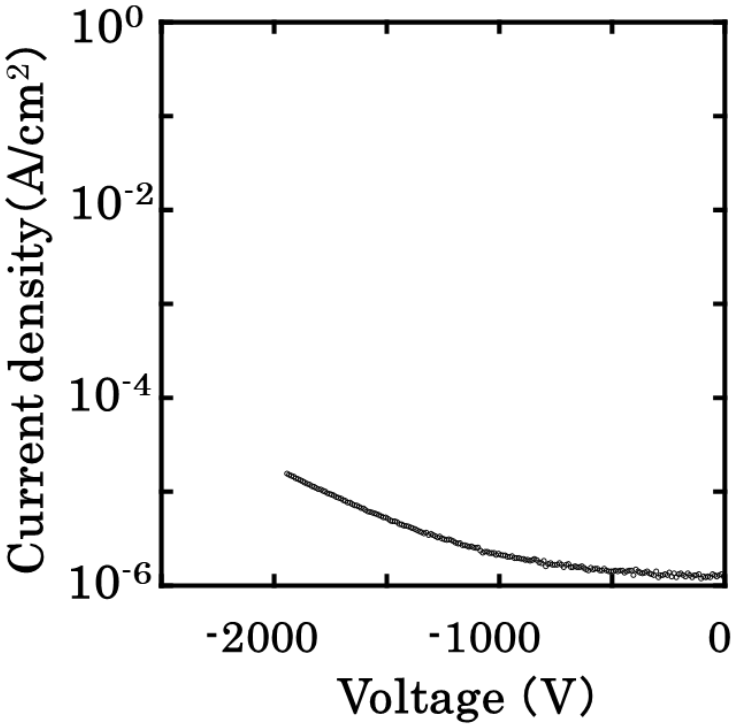


図 50 逆方向電流－電圧特性

2.5 結論

試作したPNDの順方向電流－電圧特性評価結果をもとに、電流分布モデルを用いてフィッティングによってアノード電極内における電流集中領域を求めた。その結果、アノード電極内において電流密度は連続的に変化し、電極端から約10 μmの領域において電極中心付近に比べ10倍程度高い値を示した。また、カソード電極にITO電極を堆積し、EL発光強度を裏面側から観測することにより電流強度を可視化する独自技術開発し、電極端における電流集中領域の存在を証明した。この電流集中領域を考慮した電極構造などのデバイス設計をすることで極めてオン抵抗の低いダイオードの試作が期待できる。

また、GaNエピタキシャル層表面に存在するすじ状モフォロジーのダイオード特性への影響について評価を行った。表面にすじ状モフォロジーのある領域にPNDを作製し、順方向電圧印加時のEL発光強度分布を評価した。その結果、すじ状モフォロジーに対応した不均一なEL発光強度分布が存在することがわかった。TOF-SIMSによるエピタキシャル層表面の不純物濃度分布評価結果から、この不均一なEL発光強度分布の原因は緩やかなうねりの緩斜面側におけるMg濃度分布が高いことに起因するため、正孔注入量の違いであることを示した。また、順方向電流－電圧特性評価結果から、平坦性の良い領域に作製したPNDは、すじ状モフォロジーのある領域に作製したPNDに比べ小さな偏差を有する低いオン抵抗値を示した。大型の大電流デバイスの作製には、GaNエピタキシャル層表面の平坦性は重要である。

さらに、n-GaN層内の不純物であるCに着目し、GaNエピタキシャル層表面のすじ状モフォロジーの存在のみでは説明が困難であるEL発光強度分布の不均一の原因について検討を行った。GaN中のC濃度の減少が期待できるハイドライド気相成長（HVPE）法によって作製されたn-GaN層のPhotoluminescence (PL)測定によるYL強度マッピングおよび、同n-GaN層上にMOVPE法によってp-GaN層を再成長させたハイブリッド成長PNDのマッピングによるEL発光強度分布評価結果から、EL発光強度の不均一化はn-GaN層内におけるC濃度も関与することを示した。また、電流 - 電圧特性評価によってハイブリッド成長PNDにおいてもPND動作を確認した。しかし再成長の際p-n接合界面に形成される高濃度Si層による耐圧低下が観測され、成長方法に課題が残された。

第２章　参考文献

[1] Y. Hatakeyama et al., Jpn. J. Appl. Phys. **52**, 028007-1 (2013).
[2] H. Ohta et al., IEEE Electron Device Lett. **36**, 1180 (2015).
[3] I. C. Kizilyalli et al., IEEE Electron Devices Lett. **36**, 1073 (2015).
[4] K. Nomoto et al., Phys. Stat. Sol. **A 208**, 1535 (2011).
[5] Y. Hatakeyama et al. IEEE Electron Device Lett. **32**, 1674 (2011).
[6] T. Oka et al., Appl. Phys. Exp. **7**, 021002 (2014).
[7] D. Disney et al., in Proc. IEEE Int. Symp. Power Semicond. Devices ICs **59** (2013).
[8] B. Lu et al., IEEE Electron Device Lett. **31**, 951 (2010).
[9] I. C. Kizilyalli et al., IEEE Trans. Electron Devices **60**, 3067 (2013).
[10] Y. Yoshizumi et al., J. Cryst. Growth **298**, 875 (2007).
[11] J. B. Limb et al., Electron. Lett. **42**, 1313 (2006).
[12] K. Nomoto et al., Intl. Conf. Silicon Carbide and Related Materials, We-P-76 (2011).
[13] I. C. Kizilyalli et al., IEEE Electron Device Lett. **35**, 247 (2014).
[14] I. C. Kizilyalli et al., IEEE Trans. Electron Devices **62**, 414 (2015).
[15] A. M. Ozbek et al., IEEE Electron Device Lett. **32**, 300 (2011).
[16] O. Aktas et al., IEEE Electron Device Lett. **36**, 890 (2015).
[17] N. Mohan et al, Power Electronics, A First Course. Hoboken, NJ, USA,Wiley, (2012).
[18] J. Palmour et al., in Proc. IEEE Int. Conf.Power Electron., 1006 (2010).
[19] K. Mochizuki et al., IEDM Tech. Dig **26**, 3, 1 (2011).
[20] B. J. Baliga et al., Fundamentals of Power Semiconductor Devices, 209 (2008).
[21] K. Mochizuki et al., Jpn. J. Appl. Phys. **52**, 8S (2013).
[22] A. Wakejima et al., Electron. Lett. **42**, 1349-1350 (2006).
[23] F. Horikiri et al., Proc. CS ManTech, 275 (2016).
[24] M. Sarzynski et al., Cryst. Res. Technol. **47**, 321 (2012).
[25] M. Sarzyński et al., Appl. Phys. Express **5,** 021001 (2012).
[26] I. C. Kizilyalli et al., Proc. SPIE **8262,** 826208 (2012).
[27] I. C. Kizilyalli et al., Microelectronics Reliability **55**, 9-10, 1654-1661 (2015).
[28] K. Shiojima:2016年第 77 回応用物理学会 秋季術講演(新潟)[15a -B1 -10].
[29] F. Horikiri. et al., Jpn. J. Appl. Phys. **56**, 061001 (2017).
[30] H. Fujikura. et al., Jpn. J. Appl. Phys. **56**, 085503 (2017).

[31] Kentaro Hayashi et al., Phys. Status Solidi A **215**, 1700501 (2018).

第 3 章　Junction-Barrier Schottky ダイオードを用いた低電圧領域における大電流化

3.1 背景

GaN 半導体は、高いキャリア移動度と短い電子移動距離を有するため、高速なスイッチング動作が可能である。このため、GaN を用いたダイオードは高速かつ効率的なスイッチングができ、エネルギー効率の高い電力変換が可能になる。従来のシリコン半導体を使用したダイオードに比べて、高速スイッチングが可能であるため、無線通信システム、高速信号処理システム、衛星通信、レーダーなどの高周波電力変換アプリケーションに特に適している。また、GaN は高いバンドギャップエネルギーを持つため高耐圧性能があり、高い熱伝導性を有するため高温動作にも適しており、高電圧や高温度環境下でも使用できる利点がある。

3.1.1 JBSD(Junction-Barrier Schottky deiode)

1 章で述べたように、GaN を用いたダイオードには SBD と PND がある。しかし、高周波電力変換アプリケーションにはどちらのダイオードにもメリットとデメリットがある。GaN の SBD はスイッチング損失が少なく、回復時間が短いため、高速スイッチングに適している。また、金属/半導体接合部に比較的低いバリア高さを持つため、1 V 程度の低いオン電圧で駆動できる。しかし、高電圧が印加された場合、金属/半導体接合部に大きな電界が発生し、バランスを崩した電荷キャリアが放出され、逆方向バイアス下でキャリアの蓄積が発生することになる。この現象が頻繁に起こると、SBD の耐圧性能に悪影響を与え、最終的には SBD の破壊につながり高耐圧化できない。GaN の PND は p-n 接合によって形成されたバリアが SBD に比べて高くなるため、高電圧をかけた際に電界が分散し、バリアが破壊されるのを防ぐことができるので耐圧性能に優れている。しかし、p-n 接合では拡散電位よりオン電圧が 3V 程度と高くなる。

一方、PND と SBD の特徴を組み合わせた JBSD の報告がされている[1]。JBSD は金属/n 型半導体および金属/p 型半導体の 2 つの異なる接合を持ち、これにより、バリア領域が形成される。このバリア領域において、電子が容易に流れるため、高速なスイッチング速度を実現できる。また、SBD と同様に、ショットキーバリアを有することから、低電圧でも高速にスイッチングが可能である。さらに、JBSD は逆方向電圧の印加により PND のような空乏層の拡がりを生じるため、リーク電流が低く高耐圧性能である。よって、高速かつ効率的なスイッチングが可能であるので、高周波電力変換アプリケーションとして使用されている。既に Si や SiC においては試作から製品化まで行われている[2-3]。これらの材料が製品化まで行われているのはイオン注入により p 型領域が形成で

きるためである[2]。しかし、高速スイッチングによる損失が大きいことや高温動作において劣化や故障が生じるという課題が Si や SiC の JBSD に存在している。そのため、これらの課題を解決するためには、GaN を用いた JBSD への置き換えが有効であると考えられる。GaN は高い電子移動度と熱伝導性を持ち、高速スイッチングによる損失を抑えることができるため、高温動作においても劣化や故障が生じにくいという特性を持っている。したがって、GaN を用いた JBSD により、高温・高周波電力変換アプリケーションにおいて、より高い性能が期待できる。しかし、GaN ではイオン注入で p 型層が形成できていなかったため、類似の JBS の報告例はなかった。PND の p 型層をドライエッチで掘りこみ、n 型ドリフト層と残存 p 型層に同時に電極を形成して JBSD を作る試みもなされたが、500nm 程度の厚みのある p 型層をドライエッチングする際にプラズマダメージにより、p-GaN 層に欠陥準位が生成され、ショットキー障壁の低下や p 型層の中性化が起こり期待される JBS の動作が実現できていなかった[4]。

3.2 目的

GaN 基板上 GaN ダイオードとして、GaN SBD と GaN PND が報告されているが、GaN SBD はオン電圧が低いもののオン抵抗が高く、GaN PND はオン抵抗が低いもののオン電圧が高いという課題があった[45-14]。そこで、低オン電圧と低オン抵抗を目的として作製されたのが、Junction-Barrier Schottky (JBS) である[4,15-16]。GaN 基板上 JBS ダイオードは PND と SBD を組み合わせた構造であり、順方向の低オン電圧化や逆方向リーク電流の抑制が期待される。本章では、従来構造である p^+-GaN / p-GaN / n-GaN 縦型 PND の p-GaN 層を省略し、n-GaN 層上に薄膜、高濃度 Mg ドープ p^+-GaN 層を直接成長した PND 構造を用いることにより、エッチングによるダメージを低減し GaN を用いた JBSD 動作と低オン抵抗化を目的とする。

3.3 実験方法

自立 GaN 基板上に MOVPE 法で n-GaN(Si：1 × 10^{16} cm^{-3}, 5 μm)および p^+-GaN(Mg：2 × 10^{20} cm^{-3})層を成長した。p^+-GaN 層の厚さは 20 nm とした。Mg の活性化は窒素雰囲気中 850℃、30 分間のアニールにより行った。図 1 に示すようにメサ構造を形成した後、図 2 に示すように、メサ上 p^+-GaN 層表面に深さ約 100 nm、幅 2.5 μm の多重リング状トレンチ構造を形成した。トレンチ形成後、図 3 に示すように表面に Pd / Ni(200 nm/100 nm)円形電極をオーミックコンタクトとして堆積させた。保護膜は spin-on glass (SOG)膜を塗布し 450℃で 30 分間熱処理を行い形成した。また、スパッタ装置を用いて SiO_2 膜を 190 nm 堆積させた。図 4 に示すようにフィールドプレート Ti/Al(30 nm/250 nm)金属電極をオーミック金属上に堆積させ、最後に裏面に Ti/Al(50 nm/250 nm)を堆積した。

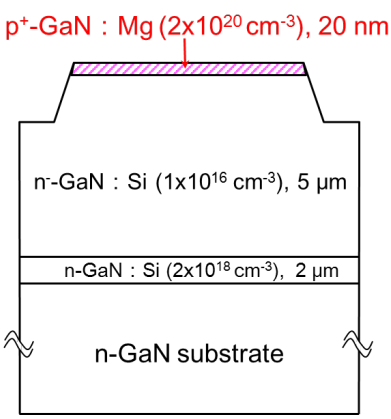


図 1 MESA

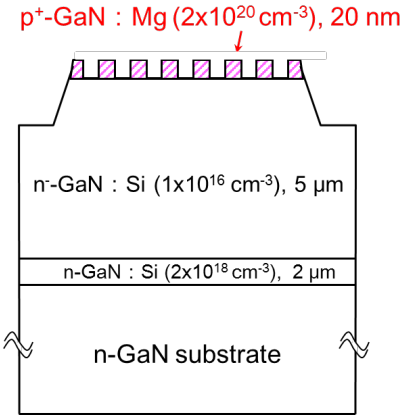


図 2 TRENCH

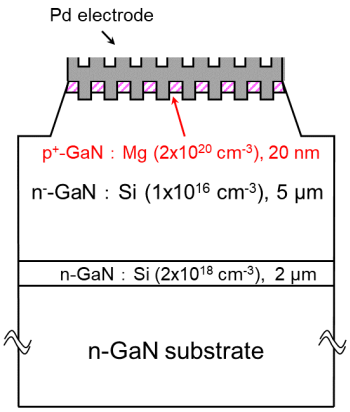


図 3 Pd 電極形成

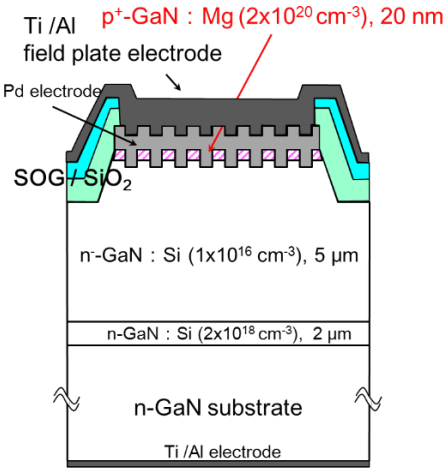


図 4 FP 構造 JBSD

3.4 低電圧領域における大電流化

図 5 に電極径 60 μm におけるトレンチ幅 2.5 μm の JBSD と同一ウェハ内で作製した SBD、PND の順方向電流－電圧特性結果を示す。

JBSD は SBD の立ち上がり電圧約 1 V と同等の値を示し、4.5 V 付近において SBD の電流密度 4.0 kA/cm² に対し 4.4 kA/cm² と高く、PND と同等の傾きで電流が上昇する結果となった。また、印加電圧 7 V において電流密度が 12 kA/cm² 以上と SBD に比べ 2 倍以上高い値となった。順方向電流密度が 500 A/cm² を示した時の R_{on} は 1.0 mΩ･cm²、印加電圧 5 V における R_{on} は 0.18 mΩ･cm² とこれまでに報告されている JBSD の中で最も低い値を得ることができた [11-13]。これは、p-GaN 層を省くことで p-GaN 層の直列抵抗分を低減できた効果であると考えられる。図 6 に 5 V での順方向動作時、JBSD のアノード電極下における発光の様子を基板の裏面側から撮影した画像を示す。なお、この素子に限っては 2 章の “可視化による電流集中領域の直接観察”方法を使用し、裏面電極に透明な ITO 電極を用いている。リング状に紫色に発光している部分が PND であり、発光していない SBD 部分のショットキー電流に PND の再結合電流が重畳していることがわかる。これにより JBSD 動作が目視でも確認できた。

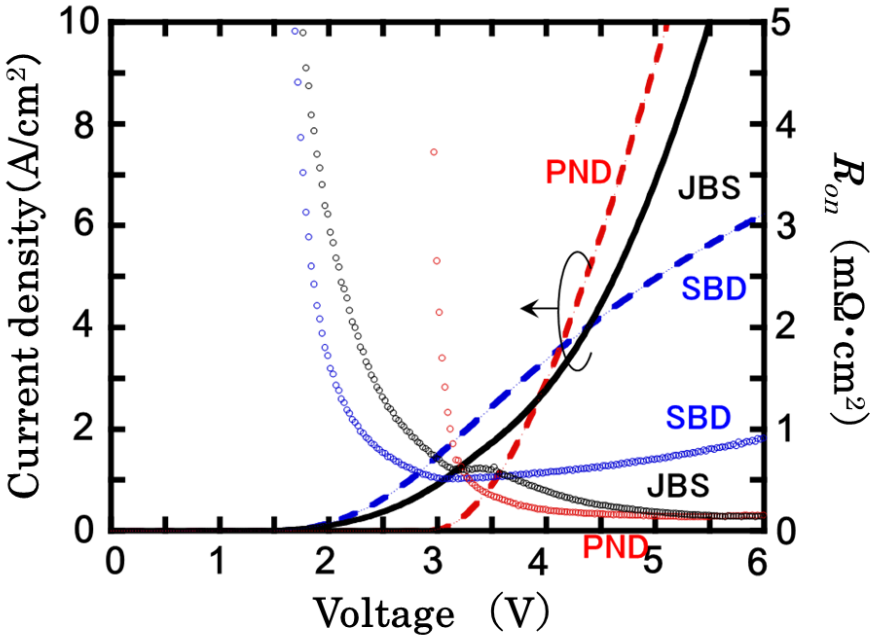


図 5 順方向電流－電圧特性

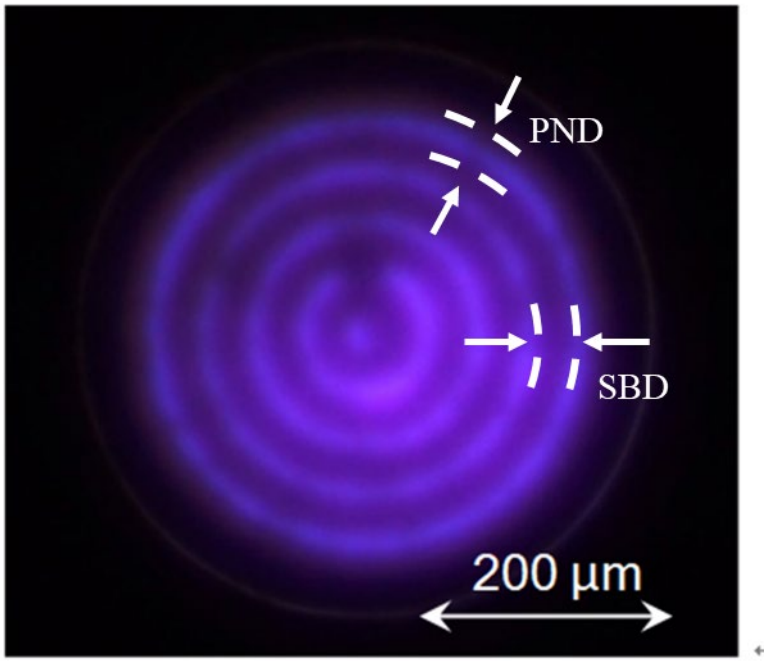


図 6 JBSD の順方向通電時におけるアノード電極下での発光の様子[17]

3.5 短トレンチ幅による高耐圧化

JBSD は逆方向電圧印加時に空乏層を互いに連結させ、表面における電界強度を低下させるため、リーク電流の大きい SBD よりも高耐圧化が可能である。この空乏層の連結(ピンチオフ)のためには分離した p-GaN 層の距離、すなわちトレンチ幅が重要となる。そこで、図 7 に電極径 60 μm におけるトレンチ幅 2.5 μm、3.0 μm、3.5 μm、4.0 μm、5.0 μm、6.0 μm の逆方向電流－電圧特性結果から、本デバイス構造のピンチオフに必要なトレンチ幅を求めた。ドリフト層内における空乏層幅 W_n は(1)式を用いて算出した。

$$W_n = \sqrt{\frac{2\varepsilon_s N_a}{qN_d(N_a+N_d)}(\emptyset_B - V_R)} \quad (1)$$

ここで、ε_s は GaN の誘電率 ε_s（=8.9× 真空誘電率）で与えられ、アクセプタ濃度 N_a=3.3 × 10^{18} cm^2、ドナー濃度 N_d=1.0 × 10^{16} cm^2、臨界電界 ε_c=2 MV/cm と仮定した。V_R は JBSD の耐圧である。

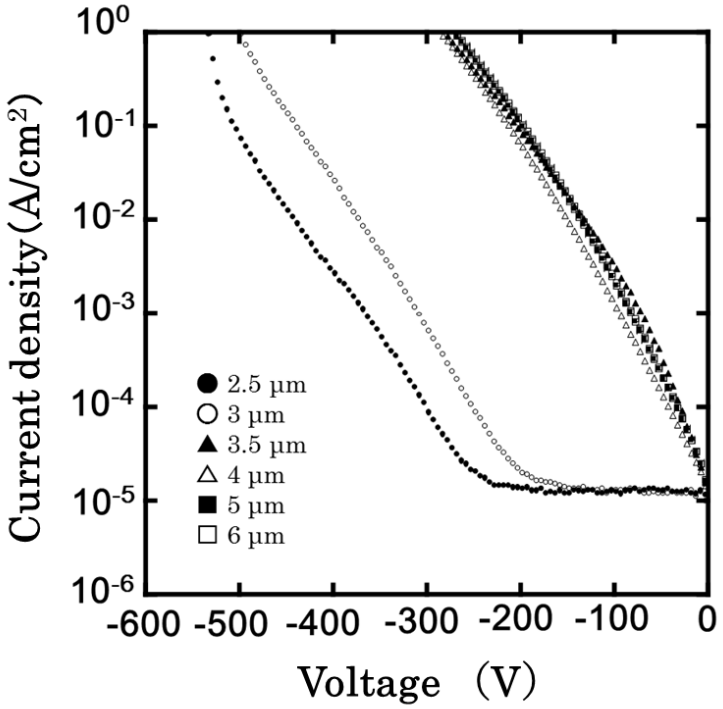


図 7 逆方向電流－電圧特性

表 1 空乏層幅算出結果

トレンチ幅[μm]	2.5	3.0	3.5	4.0	5.0	6.0
空乏層幅 W_n [μm]	7.5	7.3	5.3	5.3	5.3	5.3
d_n [μm]	3.7	3.6	2.6	2.6	2.7	2.7
耐圧 [V]	530	500	265	265	270	270

図 6 の耐圧結果から、トレンチ幅≦3 μm では 500 V 以上あるのに対し、トレンチ幅>3 μm では 300 V 以下と 200 V 程低い値であった。その原因として、トレンチ幅>3 μm ではトレンチ幅に対する空乏層幅が足りず、ピンチオフが生じなかったことが考えられる。表 1 に(1)式を用いてトレンチ幅に対する空乏層幅の算出結果を示す。ピンチオフを生じさせるためには、分離した p-GaN 層から広がる空乏層が互いに接合させるため、少なくとも d_n(空乏層幅 W_n の半分)以上が必要となる。トレンチ幅≦3 μm ではドリフト層内の空乏層の伸びが d_n>トレンチ幅を満たし、ピンチオフが生じ耐圧が向上した。また、d_n<トレンチ幅ではピンチオフが生じないため、耐圧は SBD に類似した結果となることが考えられる。このことから、本デバイス構造においては、トレンチ幅≦3 μm が好ましい。

図 8 に電極径 60 μm における JBSD、PND、SBD の逆方向電流－電圧特性結果を示す。本構造における PND の予想耐圧は 1500 V であるが、p 層に 20 nm と極薄の p^+-GaN のみを用いたため、n 層側から伸びた空乏層によってパンチスルーを引き起こしたのでないかと考えられる[14]。JBSD の耐圧は 600 V であり、この値は PND には及ばないものの SBD に比べ 200V 以上高耐圧であった。また、リーク電流値も 10 A/cm² と低いことから p-n 領域からの空乏層が横方向に伸び、ピンチオフによって耐圧が向上したと考えられる。

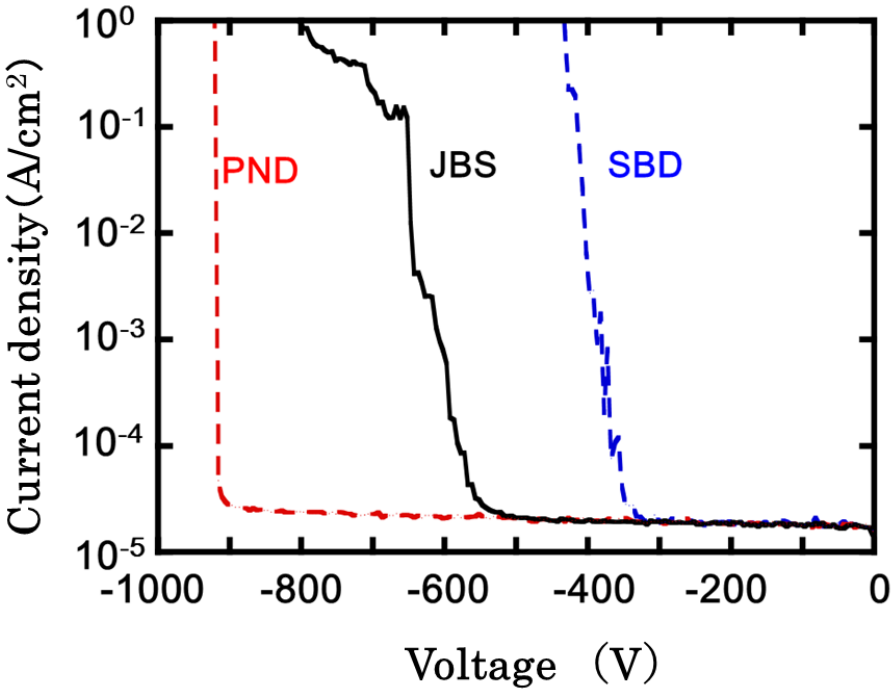


図 8 逆方向電流－電圧特性

3.6 結論

低電圧動作が可能な Junction-Barrier Schottky（JBS）ダイオードを作製し評価を行った。従来構造である p^+-GaN / p-GaN / n-GaN 縦型 PND の p-GaN 層を省略し、n-GaN 層上に薄膜の高濃度 Mg ドープ p^+-GaN 層を直接成長した PND 構造を用いることにより、オン抵抗値が 0.18 mΩ·cm²（5 V 印加時）とこれまでに報告されている JBS ダイオードの中で最も低い値を示した。また、JBS ダイオードの耐圧向上には短トレンチ幅によるピンチオフ現象が必要であるが、ピンチオフ現象が生じていると予想される 2.5 μm の短トレンチ幅 JBS ダイオードを作製することにより、ショットキーダイオードより 200 V 以上高耐圧なデバイスの作製に成功した。

第３章　参考文献

[1] B. J. Baliga et al., IEEE Electron Device Lett. **5**, 6, 194-196 (1984).

[2] C.M. Zetterling et al., Solid-State Electronics **42**, 9, 1757-1759 (1998).

[3] J. Richmond et al., 2009 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition

[4] R. Kajitani et al., Abstract 2015 Int. Conf. Solid State Devices and Materials, 1056 (2015).

[5] T. Oka, Semiconductors and Semimetals **102**, 219-242 (2019).

[6] K. Nomoto et al., Phys. Stat. Sol. A 208, p. 1535, (2011).

[7] Y. Hatakeyama et al., Jpn. J. Appl. Phys **52**, 028007-1 (2013).

[8] I. C. Kizilyalli et al., IEEE Electron Devices Lett. **36**, 1073 (2015).

[9] H. Ohta, et al., IEEE Electron Device Lett. **36**, 1180(2015).

[10] K. Mochizuki et al., IEEE Trans. Electron Devices **59**, 4 (2012).

[11] Shaowen Han et al., IEEE Trans. Power Electronics. **34**, 6 (2019).

[12] Yue Sun et al., Nanomaterials **10**, 657 (2020).

[13] K. Takatani et al., Electron. Lett. **44**, 320 (2020).

[14] Y. Saitoh et al., Appl. Phys. Express **3**, 081001 (2010).

[15] T. Hayashida et al., Jpn. J. Appl. Phys. **57**, 040302 (2018).

[16] H. Tsuge. 2016 年度法政大学修士論文 (2016).

[17] Kentaro Hayashi et al., 2017 IEEE Future of Electron Devices, Kansai, DOI: 10.1109/IMFEDK.2017, 7998037 (2017). (電子ジャーナル)

第 4 章　凹面鏡を有する青色窒化物面発光レーザの放射角狭小化

4.1 背景

4.1.1 VCSEL

VCSEL (Vertical-Cavity Surface-Emitting Laser)とは、1977 年に Iga らによって考えられた半導体レーザの一種である[1]。これは、基板に平行な向きに形成された平面ミラーで活性層を上下に挟み、半導体基板と垂直に光が取り出せるようにキャビティを形成することに特徴がある。VCSEL には優れている点が多くある。例えば、端面出射型レーザに比べ活性層の体積が小さくできるため、低電流で駆動することができ低消費電力である。ひいては、低パワーでの動作が可能である。他にも、以下のメリットがある。半導体基板と垂直に光を取り出すことができるため、基板の上に多くのレーザを並べた 2 次元アレイレーザができる。VCSEL アレイは 1W 超級の光出力の連続発振が可能で、高い変換効率を持つことができる。狭出射円形ビーム光を取り出せるため光ファイバーへの結合に優れている。プロセスがほとんどモノリシックな一貫製法なため大量に生産が可能である。ボンディングやパッケージがしやすくモジュールとパッケージの価格を安くできることが挙げられる。これらのメリットのうち、特に低消費電力、網膜に対して安全な出力(μW 級)での駆動を必要とする網膜直描ディスプレイがアプリケーションとして期待されているほか、近年は高出力アレイを車載ヘッドライトに用いるアイディアも報告されている[2]。

4.1.2 VCSEL 構造と DBR

これまでに報告されている典型的な VCSEL の構造と鏡である DBR の反射スペクトルについて述べる[4-8]。現在、量産化されている GaAs 基板を用いた VCSEL の典型的な構造は反転分布状態となる媒質を二つの平行な鏡で挟み込んだ平面ミラー型である。GaAs 基板を用いた VCSEL は All epitaxial DBR 構造であり、GaAs と AlAs からなる 2 種類の半導体層をエピタキシャル成長により交互に積層した DBR である。図 1 に GaAs と AlAs からなる epitaxial DBR の反射スペクトルを示す。反射スペクトルはシミュレーションソフト Macleod を用いて中心波長 1000 nm における GaAs(n=3.5) / AlAs(n=2.96)の 55 ペアとして算出しており、反射率が 100 %と高い反射率を得ている。また、GaAs と AlAs の DBR 構造では AlAs 層を水蒸気中で加熱し酸化アルミニウム層にすることで電気を絶縁する酸化狭窄方法が可能である。

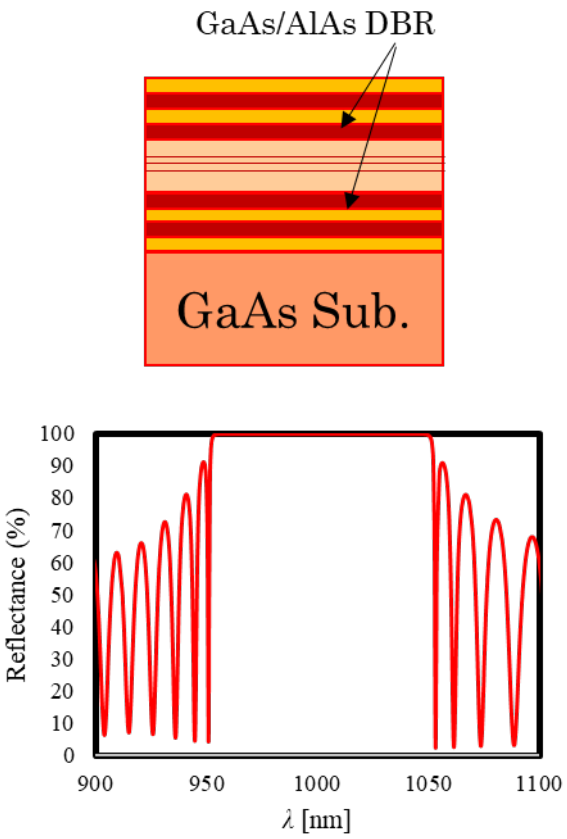


図 1 典型的な GaAs-VCSEL 構造と DBR の反射スペクトル。反射スペクトルはシミュレーションソフト Macleod にて算出

同様のアイディアを、GaN 基板を用いた VCSEL に適用する研究が行われている。しかし、GaN 系 VCSEL については GaN 基板と格子整合する材料が困難であるため、誘電体 DBR と半導体 DBR を用いたハイブリッド型 DBR と誘電体 DBR のみを用いた全誘電体型 DBR が報告されている。GaN 系の半導体 DBR は一般に AlGaN 系材料を用いて検討されているが、AlN と GaN の格子定数差が大きいためにクラックや表面に荒れが生じてしまう。そんな中で GaN と AlInN による報告がされている。これらは格子整合が一致しているため積層ペア数を増やしてもクラックが発生せず、図 2 のような高い反射率を得ることができる。なお、反射スペクトルはシミュレーションソフト Macleod を用いて中心波長 450 nm における GaN(n=2.48) / AlN(n=2.08)の 26 ペアとして算出した。しかし、屈折率差が小さいために高い反射率を得るためには多くの層数が必要になる。また、膜厚の面内分布によってストップバンド波長を利得ピークに合わせることが困難である。さらに、AlInN 層は相分離という材料に起因する問題がるため、電流狭窄には適さないといった課題がある。

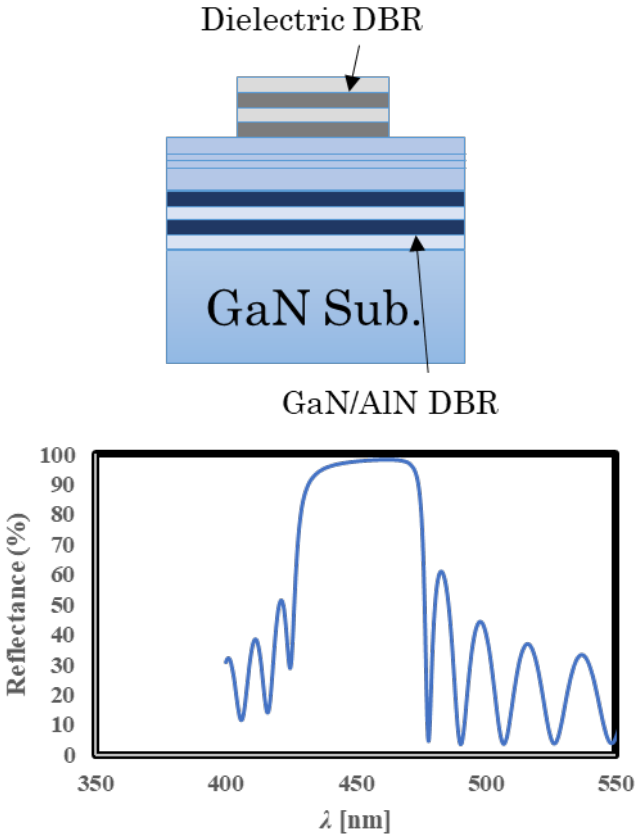


図 2 典型的な GaN-VCSEL のハイブリッド DBR 構造と反射スペクトル。
反射スペクトルはシミュレーションソフト Macleod にて算出

一方、全誘電体型 DBR はスパッタリング法を用いて種々の材料を選ぶことができる。そのためエピ DBR のような格子整合系に限られることなく屈折率差の大きな材料を用いることができるので図 3 のようなストップバンド幅が広くて高い反射率の DBR を得ることができる。なお、反射スペクトルはシミュレーションソフト Macleod を用いて中心波長 450 nm における Ta_2O_5(n=2.15) / SiO_2(n=1.46)の 14 ペアとして算出した。

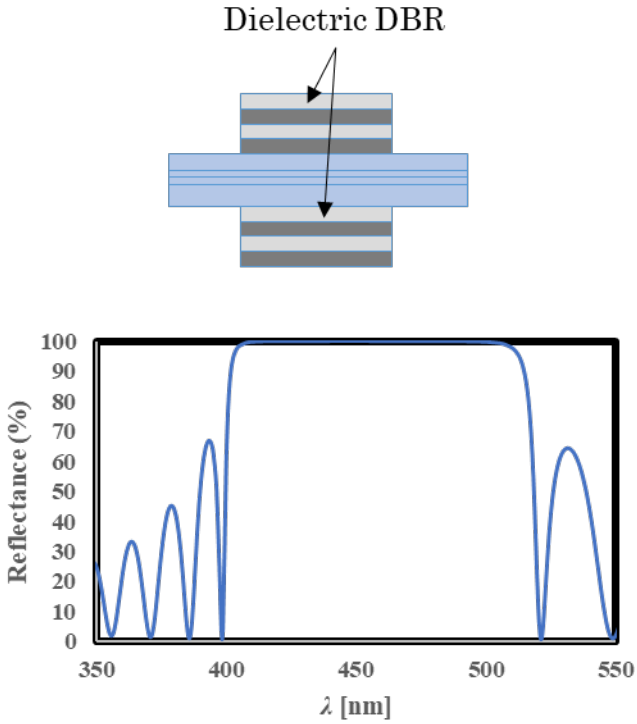


図 3 典型的な GaN-VCSEL の全誘電体型 DBR 構造と反射スペクトル。反射スペクトルはシミュレーションソフト Macleod にて算出

4.1.3 凹面鏡型 VCSEL

4.1.2 において典型的な VCSEL 構造について述べた。これらは鏡となる半導体や誘電体の DBR を基板に対して平行に積層する平面鏡型の構造である。一方、片側の鏡に曲率を有する凹面鏡型の構造が報告されている[9]。本構造は凹面鏡と平面鏡で囲まれたファブリペロー型共振器であり、平面鏡を境に二つの凹面鏡で囲まれた共振器へと拡張することが可能である。このとき、平面鏡上に形成されるビームウェストはガウシアン光学を用いて以下の式で計算することができる[10]。

$$\sigma = \frac{1}{2}\sqrt{\frac{\lambda}{n\pi}\sqrt{LR - L^2}} \ldots (1)$$

(1)式において、σ はガウス分布の標準偏差、n は共振器全体の等価屈折率、L は共振器長、R は凹面鏡の曲率半径である。(1)式より L と R を近づけることによりビームウェストを回折限界程までに絞ることができる。よって、凹面鏡型構造は回折損失や散乱損失を生まない安定共振器となることが報告されている[11]。

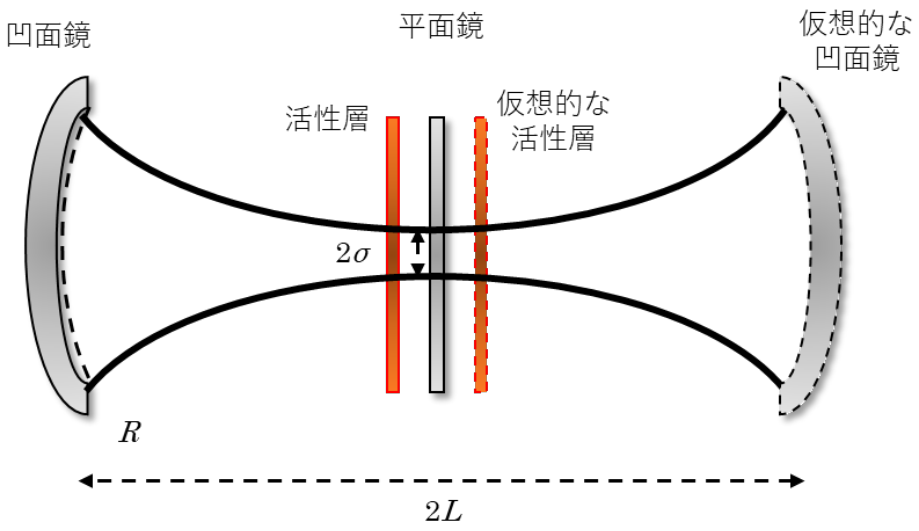


図 4 凹面鏡型ファブリペロー共振器のモデル

また、(1)式によると $R>L$ の関係が成り立てば長い共振器長の構造を可能にすることができる。平面鏡型の典型的な構造の共振器長は 2 μm 程と短いものが多い。これは共振器長を長くすることで回折損失や散乱損失といった光の損失が発生するために短くせざるを得ないためである。しかし、共振器長を短くすると、縦モード間隔が広くなる。共振器長と縦モード間隔は以下の式で表される。

$$\Delta\lambda = -\frac{\lambda^2}{2Ln}\left[1-\frac{\lambda}{n}\frac{dn}{d\lambda}\right]\ldots(2)$$

(2)式において、$\Delta\lambda$ は縦モード間隔、λ は発振波長、n は等価屈折率、L は共振器長である。ここで GaN の n を 2.45、λ を 450nm、$dn/d\lambda$ を-0.001nm^{-1} として計算すると図 5 ようになる[9]。

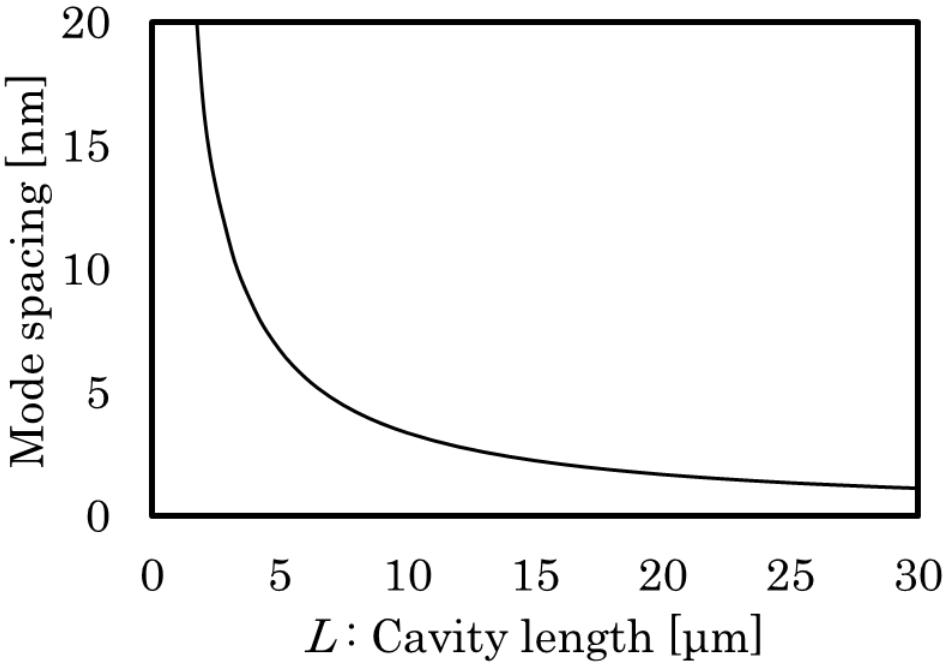


図 5 GaN を用いたファブリペロー共振器の共振器長と縦モード間隔の関係

図 5 より共振器長が 2 μm 程の平面鏡型では縦モード間隔が 15 nm 以上となることが分かる。このように縦モード間隔が広くなると、活性層から得られるゲインスペクトルのピークと、モードが重なりにくくなるため、歩留まりが低下するなどの問題が懸念される。また、平面鏡型の構造の共振器長は基板を CMP によって薄膜することで制御するが、GaN 基板を CMP によって精度よく膜厚制御できた報告はなく、安定して発振する素子を得ることが難しい。そのため、実用化の妨げとなっている。

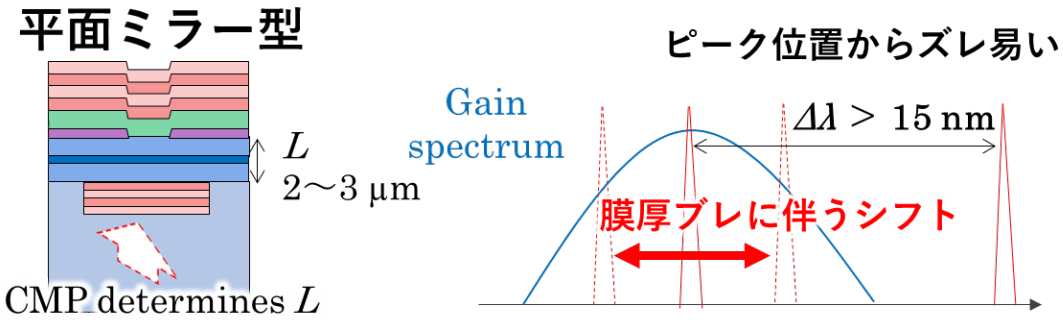


図 6 平面鏡型の縦モードと利得ピークのモデル

一方、凹面鏡型の構造では回折損失を無効化することが出来るので、共振器長

を 20 μm 以上とすることができる。したがって、縦モード間隔を 1～2 nm 程度とすることができるので、縦モードの位置制御を特に意図しなくても、常にゲインスペクトルのピーク近傍に位置させることができる。その結果、高い歩留まりが期待できるというメリットを持っている。

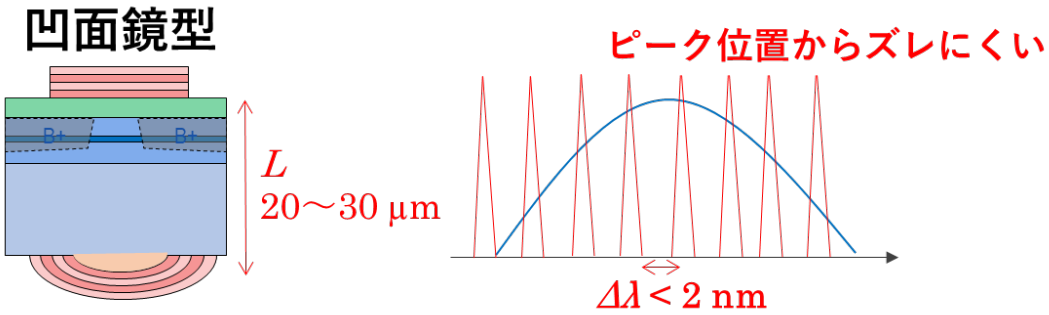


図 7 凹面鏡型の縦モードと利得ピークのモデル

4.1.3 凹面鏡型 VCSEL のレンズおよび凹面鏡の形成

GaN 基板上へ凹面鏡の基部となる凸形状のレンズ形成は、図 10 に示すようなレジストリフロー法とレジストエッチバック法からなる。初めに、GaN 基板上へレジストを円形にパターニングする。次に、レジストリフロー法により、ホットプレートを用いてレジストを溶融させてパターンをドーム化する。これは表面張力による効果であり、式(3)のような Young-Dupré の法則を満たす。

$$\gamma\cos\theta_E = \gamma_{SO} - \gamma_{SL} \ldots (3)$$

(3)式において、γはフォトレジスト/大気の張力、γ_{SO}は GaN/大気の張力、γ_{SL}は GaN/フォトレジストの張力、θ_Eは GaN/フォトレジストの接触角である。フォトレジストに含まれる溶媒、つまり水は水銀に続いて表面張力の高い材料である。そのため大気に対して過剰に反応する。特に、フォトレジスト表面は液相と気相が混ざった蒸気圧状態であるために、内部に比べて分子間の距離が大きくなるためにエネルギーが高くなる。この時、レジスト内ではエネルギーを均一化するために表面積を小さくすることで表面の高いエネルギーを低下させるように作用する。この現象を用いて GaN 基板上に凸形状をしたフォトレジストを形成する。

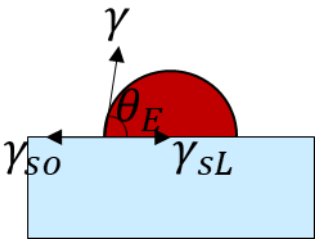


図 8 GaN 基板上リフローされたフォトレジストの模式図と張力の関係

最後に、RIE(Reactive Ion Etching)を用いたレジストエッチバック法により、GaN 基板上へフォトレジストパターンを転写させる。GaN の RIE 過程はエッチングガスの表面付着、反応生成物の形成及びこれらの表面脱離からなる。エッチングガスには塩素(Cl_2)系やフッ素(F)系があるが、GaF_3 の沸点 1000℃に対し $GaCl_2$、$GaCl_3$ が 535, 201℃と低く、揮発性が高いために塩素系がよく使われている。また、GaN は表面が酸化し易いために酸化物の還元剤として BCl_3 や $SiCl_4$ を添加することもある。他にも正イオンの同時照射によってエッチングをアシストする Ar^+イオンビーム照射などといったドライエッチングに関する多くの技術があるが、これらを上手に活用しエッチング後の表面をスムーズにする必要がある。なぜならば、エッチング後の表面ラフネスが散乱損失を引き起こすためである。式(4)はあるラフネスを持った単一界面の散乱損失である。

$$S = A\left\{1 - \exp\left[-\left(\frac{4\pi\delta}{\lambda}\right)^2\right]\right\} \quad (4)$$

(4)式において、δ はレンズトップの RMS（二乗平均平方根粗さ）、λ は動作波長、A は注目している構成材料によって決まる相互相関係数である。ここで λ を 450 nm、A を 1.02 として計算すると図 9 のようになる。

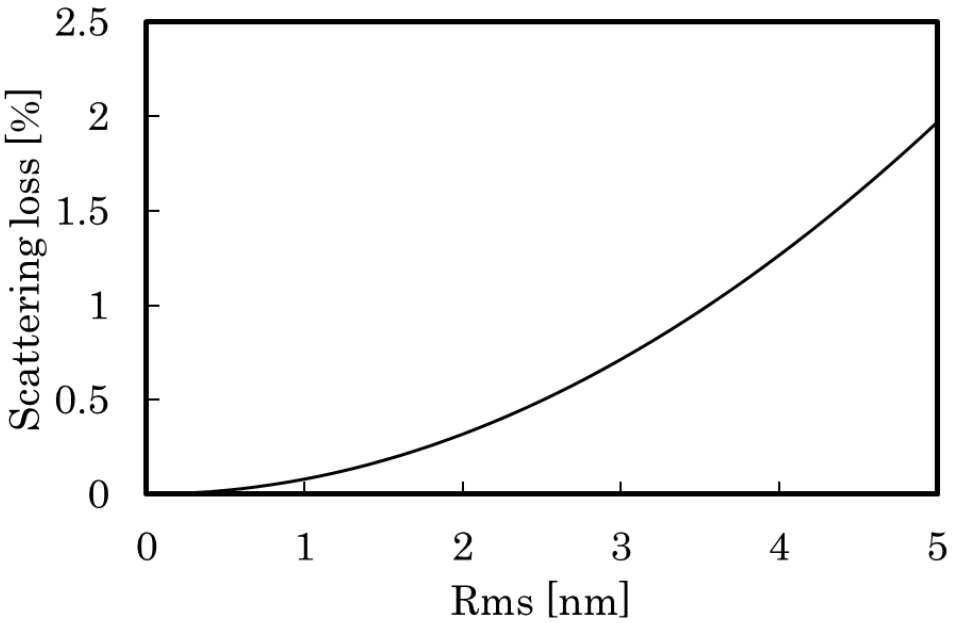


図 9 エッチング後の表面ラフネスと散乱損失の関係

この表面ラフネスと散乱損失に関する報告は 2013 年に厦門大学より報告されており、同グループは、研磨によって露出した GaN 表面の RMS を 5 nm 以上から 0.3 nm に改善することで VCSEL の光励起発振を実現したと報告している[12]。よって本構造においてもエッチング後の表面をいかに平滑にできるかが重要である。

これらの工程によって、GaN 基板上へレンズが形成される。

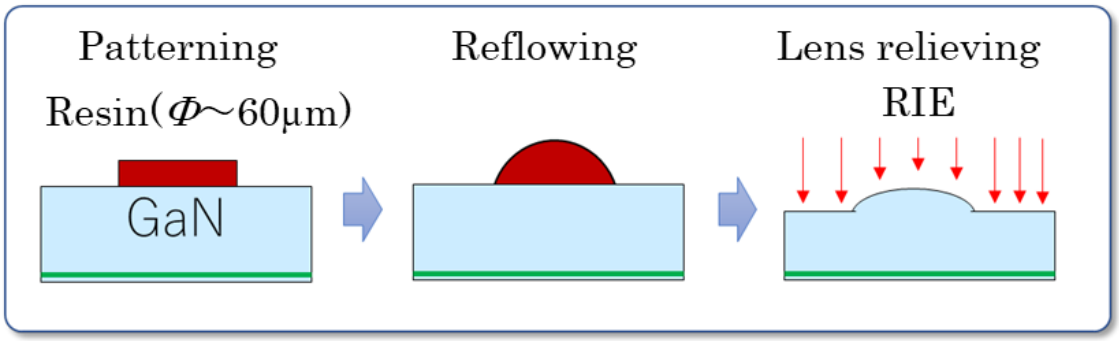


図 10 レンズ形成工程の模式図

その後、同部へ誘電体からなる DBR 構造を真空成膜で形成することで、凹面鏡を形成する。

4.1.4 GaN-VCSEL におけるエテンデュ

レーザは LED と比べて出射される光の指向性が高い。特に VCSEL は狭出射の円形ビーム光を取り出せ、楕円形ビーム光の端面出射型レーザに比べてより拡がり角の小さいビームの出射が可能であり、一般にこのことは外部光学系が簡便になることなどから種々のアプリケーションで好まれる。GaN-VCSEL においても、近年になって拡がり角の小さいビーム光を目指す研究例が報告がされている。2016 年に Yeh らが出射端から離れた場所のビームパターンを示す FFP(Far-field Pattern)において拡がり角(半値全幅)が 5°、2019 年にスタンレーの Kuramoto らより 5.1°の報告がされている[13-14]。しかし、これら平面鏡型の共振器構造では、開口径を大きくすると回折の影響により横モードがマルチモードになるため、ビーム径の拡大が難しく、FFP の半値全幅は滞っていた。

一方、凹面鏡型の共振器構造を備えた VCSEL では回折光を閉じ込めることができるので開口径に制約されず、ビーム径を拡大できるので、FFP の半値全幅を 5°以下に小さくできることが期待される。しかし、凹面鏡による強い閉じ込めによりビーム径が小さく、8.5°と平面鏡と比べて大きかった。[15]。本構造はレンズの曲率半径(Radius of Curvature；ROC)によって光学特性が変わる。Nakajima より、FFP の半値全幅はレンズの ROC に依存し、ROC が大きくなるほど FFP の半値全幅が小さくなることが報告されている[16]。そこで本節ではレンズの ROC を大きくすることで FFP の半値全幅をこれまで 3 つの機関より報告されている最小値である 5°よりも低くすることを目的とする。ここで以下の(5)式と(6)式を用いてレンズの ROC に対する FFP の半値全幅の値を計算する。

$$\omega_0 = \sqrt{\frac{\lambda}{n\pi}\sqrt{LR - L^2}} \ldots (5)$$

(5)式においてω_0は平面鏡と凹面鏡により形成された共振器の平面鏡におけるビームウェスト(強度 $1/e^2$ における半幅)である。R はレンズの ROC を示す。次に、ビームウェストと発散角の関係を示す。

$$\theta_{FWHM} = \sqrt{2ln2}\frac{\lambda}{n\omega_0} \ldots (6)$$

(6)式においてθ_{FWHM}はビームウェストω_0を有する光が空気中を伝搬したときの発散角の半値全幅(ラジアン)である。図 11 に ROC と FFP の半値全幅の関

係を示す。ここで波長 450 nm、共振器長 L は 23 μm とする。図 11 より FFP の半値全幅を 5° 以下にするためにはレンズの ROC を 200μm 以上にする必要があることがわかる。

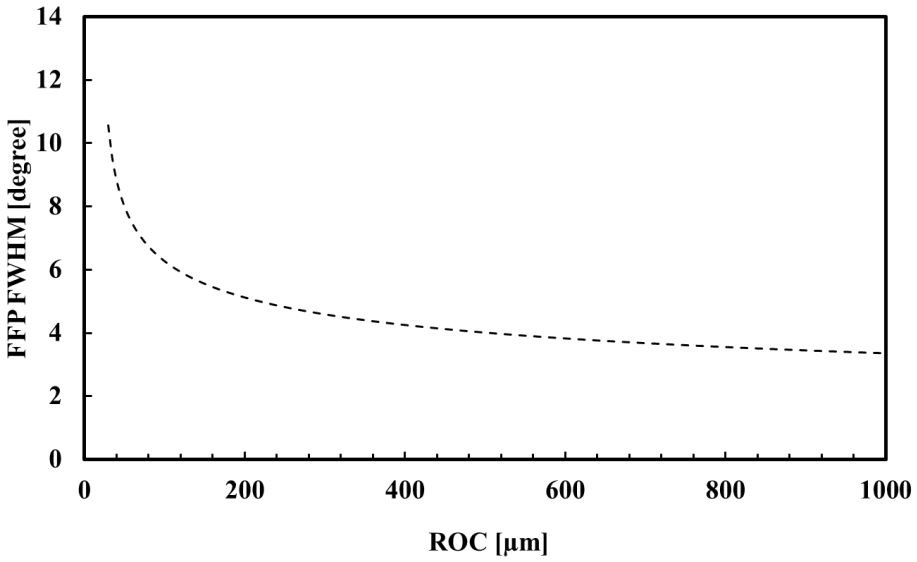


図 11 レンズの ROC に対する FFP の半値全幅（計算値）

4.1.5 レジストリフロー法によるレンズ曲率半径大化の課題

4.1.3 のレンズ形成工程にもあるように、レジストリフロー法は基板上にパターニングしたレジストに熱処理を加えることでレジストを凸形の球面形状に形成する方法である。一般的により狭い放射角を持つデバイスを得るには、より大きなレジストパターンを形成、リフローし、大きな曲率半径を有する凹面鏡を形成することが有効と考えられる。しかしながら、この方法では場合によっては基板表面と流動性材料の張力や重力の影響でひしゃげた形状になる問題がある。例えば、パターニングしたレジストの直径が大きい場合、図 13 に示すように重力の影響によって毛管現象が妨げられ形状が平坦もしくは凹形状になる。また、図 8 に示すような基板表面と流動性材料の張力の影響から得られる接触角度に下限がある。そのためレジスト厚みを薄くした場合、小さい角度を得られず形状が平坦もしくは凹形状になりやすい。さらにリフローによる熱処理によって他の材料の変質等によるデバイス特性劣化の原因ともなりうる。

図 12 非球面形状の例

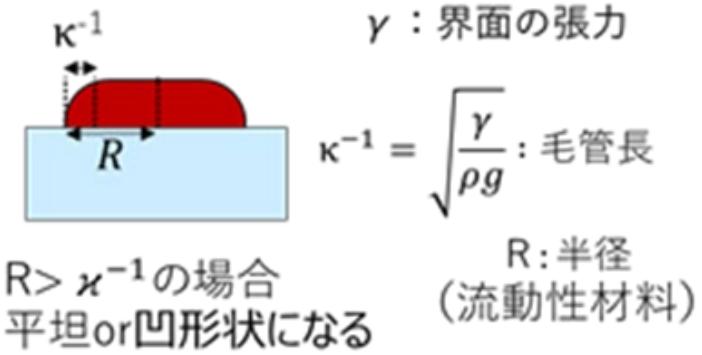


図 13 パターニングしたレジストの直径が大きい場合

4.1.6 放射角狭小化 VCSEL に向けたレンズ曲率半径の大化

レンズの曲率半径を大きくするためには、レンズ径の拡大かレンズ高さを低くする必要がある。レンズ径の拡大については 4.1.5 で述べたように、より大きなレジストパターンでは、レンズ形状が平坦もしくは凹形状になる問題が想定される。また、アレイデバイスを想定した際には小さな領域に多くの素子を密に配列することでより大きな輝度が見込めるため、レジストパターンを大きくする方法は回避すべきである。そのため、レンズ高さを低くする方法が望ましい。例えば、レジストの直径が 28 μm、曲率半径が 200 μm の凸型球面形状を作製することを考える。レジストのリフロー前後体積が等しいと仮定すると(7)式より高さは 500 nm となる。

$$\frac{\pi}{4}D^2t = \pi\int_{R-s}^{R}(R^2-y^2)dy \ = \frac{\pi s}{24}(3D^2+4s^2)\cdots(7)$$

この場合、基板とレジストの接触角度は 2.2°となる。(3)式の張力の関係を表す Young-Dupré の法則より基板、レジスト、空気の関係からなる 3 方向の張力の関係は$\frac{\gamma_{SO}-\gamma_{SL}}{\gamma} = \cos\theta_E \fallingdotseq 0.99$ となる。つまり、曲率半径の大化には基板の張力に

対してフォトレジストの張力をできる限り小さくする必要がある。GaN のような化学的な結合エネルギーが 1 eV 程度の高エネルギー表面の張力は 500-5000 mN/m である。一般的な、フォトレジストの張力は 20 mN/m 程度であるが、粘度を低くすることで張力を小さくし、より大きな曲率半径のレンズの作製が可能である。他に、RIE のエッチングにおいてフォトレジストのエッチング速度を GaN よりも早くする方法も有効である。

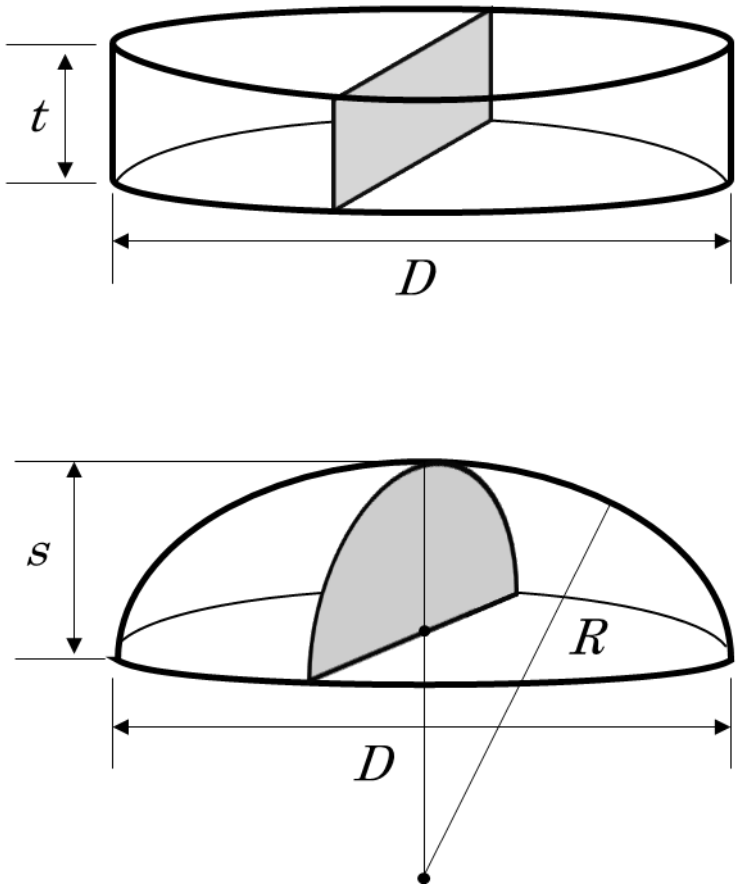


図 14 リフロー前後のレジスト体積計算モデル

4.2 実験方法

作製したデバイスの概構造を図 15 に示す。層構造は c 面の n-GaN 基板上に、MOCVD 法により、p^+-GaN(Mg = ~1 × 10^{20} cm^{-3}) /p-GaN(Mg = ~1 × 10^{19} cm^{-3})と活性層を成長させた。活性層の構造は InGaN/GaN の多重量子井戸構造であり、井戸数は 3 である。電流狭窄はイオン注入であり、直径 8 μm の領域を残して、その周囲にボロン(B^+)を注入することで絶縁化し、円形の電流注入領域を得た。2 章より、開口部端から 10 μm 幅の周囲に電流が集中するという知見から開口径 8 μm でも注入電流の均一化ができると判断し、素子を設計した。その上に、厚さが 40 nm の ITO(Indium Tin Oxide)層と、Ta_2O_5/SiO_2 が 8.5 ペアの p 側 DBR を真空成膜法によって形成した[9]。さらに、ITO 上には DBR を形成していない領域に p 電極（Ti/Pt/Au）を真空蒸着法によって形成した。また、n-GaN 層を露出するために、アパチャーの横へドライエッチングを用いて溝を形成し、露出した n-GaN 層上に n 電極（Ti/Pt/Au）を形成した。ウェハは膜厚が 20 μm 程になるまで n 面側より研磨した。研磨して得られた n-GaN 基板上にフォトレジストを直径が 20～100 μm の大きさで円径状にパターニングし、その後、GaN 基板に 200℃の熱処理を加えることでフォトレジストを凸形の球面形状にした。これをマスクに反応性イオンエッチング（Reactive Ion Etching：RIE）によって犠牲エッチングすることで凸形の球面形状を n-GaN 基板に転写し、レンズ状の突起（以下、レンズと呼ぶ）を形成した。レンズの曲率半径（Radius of Curvature：ROC）は 70～1000 μm であり、ROC が異なる 6 つのレンズを意図して作製した。これらのレンズ上に、14 ペアの Ta_2O_5/SiO_2 からなる DBR を形成し凹面鏡とした。最後に、デバイスをダイシングし、p-up となる形でø5.6TO-CAN パッケージにマウントした。

レンズの評価は形状解析レーザ顕微鏡 VK-X1000(キーエンス製)を用いて形状を測定し、レンズ表面の平均二乗誤差(RMS)を AFM 装置 Dimension Icon(Bruker 製)を用いて測定した。これは DBR 形成前のレンズ上に実施した。電流-光出力(I-L)特性、FFP(Far Field Pattern)の特性はレーザ特性自動評価装置 LD4200(ALPHAX 製)を用いて測定した。

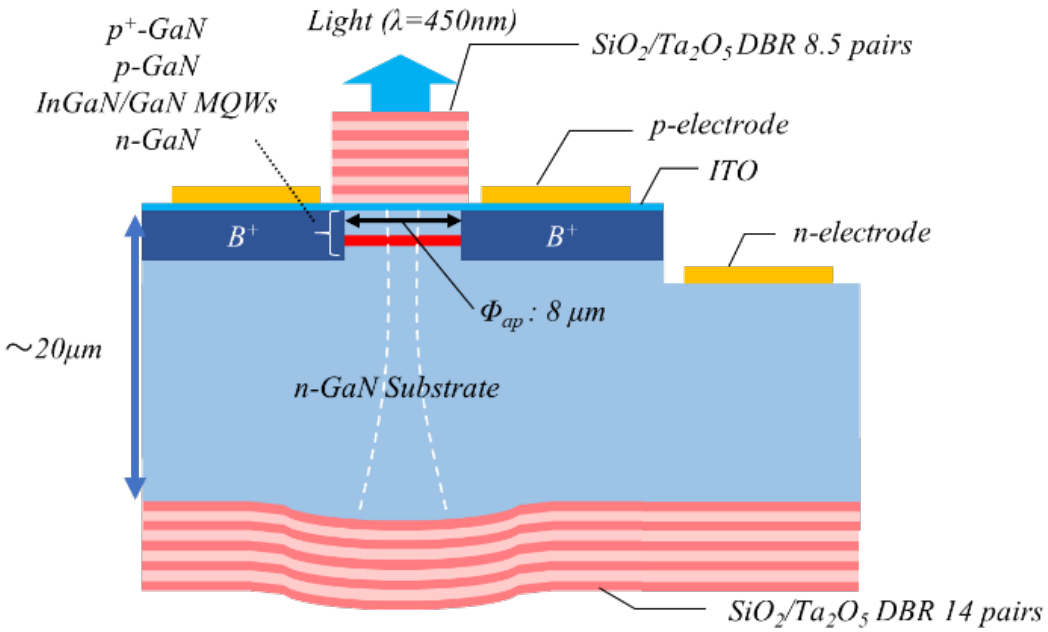


図 15 GaN-VCSEL のデバイス構造[19]

4.3 測定結果

4.3.1 レンズ評価

レーザ顕微鏡を用いて、作製したレンズの形状を評価した。図 16 はレーザ顕微鏡像であり、作製した 6 つのレンズのうちの 1 つを示す。この像から、レンズは曲率を持ち、滑らかな形状であることが分かる。図 17 は断面プロットを示しており、レンズの直径<80 μm、高さ<1 μm、ROC は 795 μm であることが分かる。この ROC は過去に報告した ROC<100 μm よりも遥かに大きなものである[9, 15-17]。他のレンズについても同様に測定し、ROC はそれぞれ 76、170、302、459、988 μm であった。図 18 は、レンズトップの AFM 像であり、RMS は 0.42 nm であった。これは過去に報告した値と同程度である[9]。

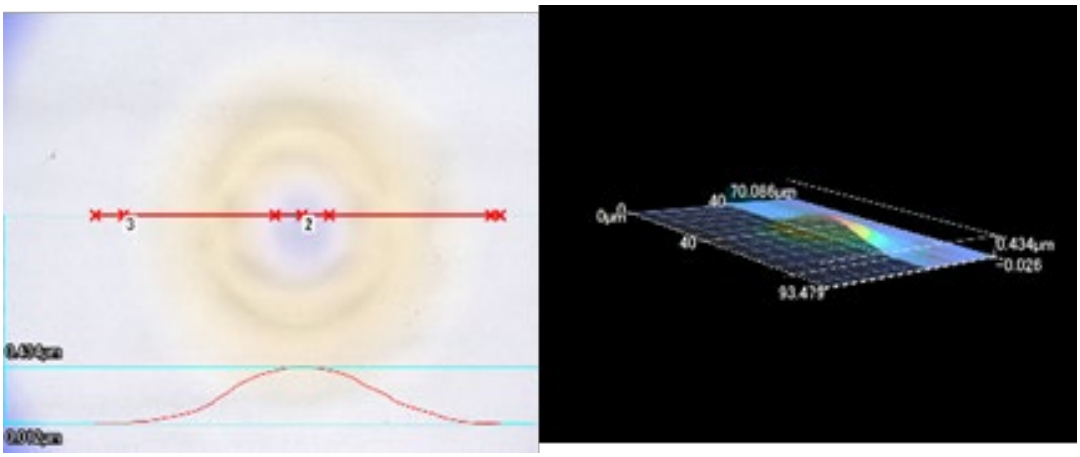


図 16 GaN 基板の{000-1}側に形成されたレンズ形状と断面像[19]

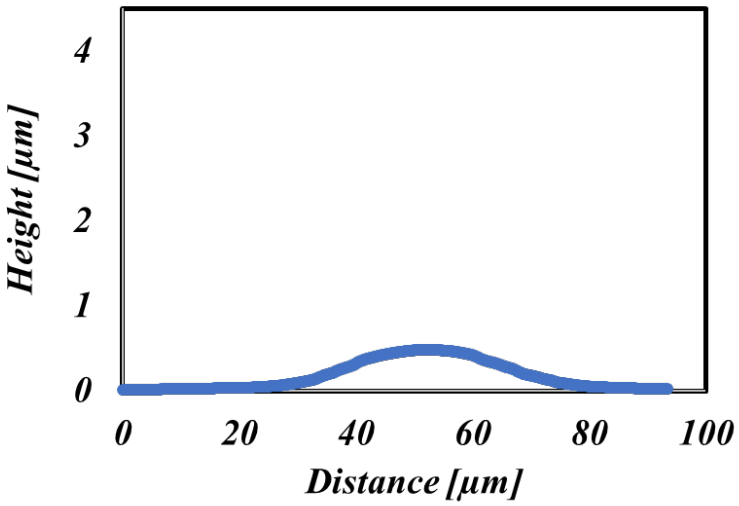


図 17 レンズ表面の断面プロファイル[19]

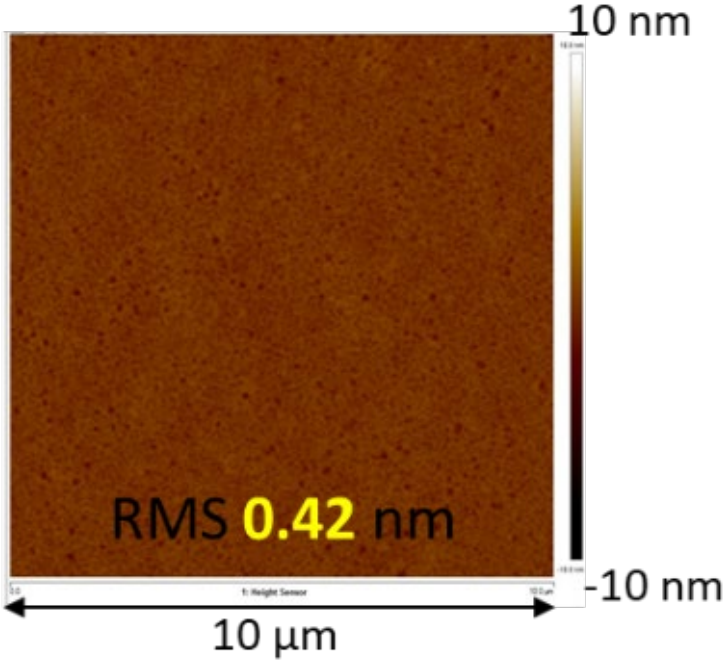


図 18 レンズトップ表面の AFM 像[19]

4.3.2 I-L 測定結果とスペクトル

図 19 に室温、CW 測定条件における I-L 特性を示す。結果、I_{th} (閾値電流)は ROC が 76 µm となる素子において 5.4 mA(閾電流密度: J_{th} 14 kA/cm^2)と最も低い値を示した。レンズの ROC が 170、302、459、795 µm における I_{th} は 6、9.9、11.2、13.5 mA (J_{th} 14、25、28、34 kA/cm^2)であり、最もレンズの ROC が大きな 988 µm では I_{th} は 14.3 mA (J_{th} 36 kA/cm^2)であった。これより、凹面鏡の ROC が大きくなるにつれて I_{th} が増加傾向にあることが分かる。

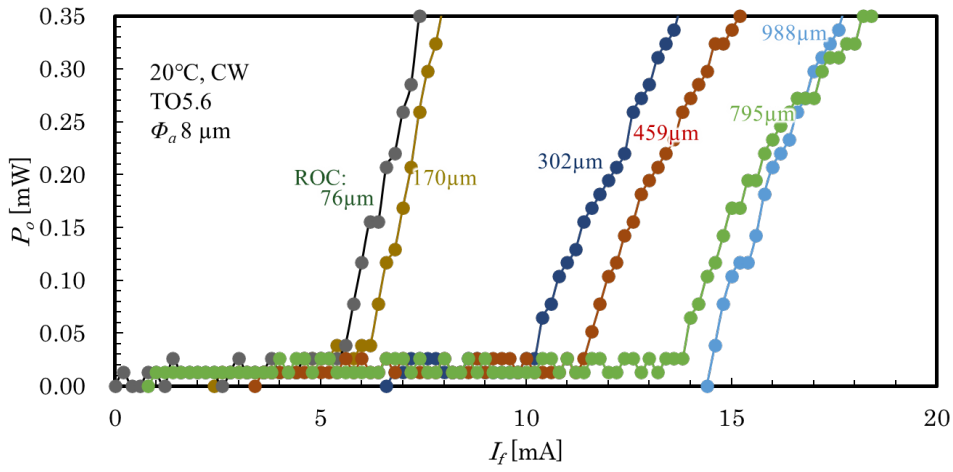


図 19 I-L 特性(室温 CW)[19]

図 20 にレンズの ROC が 795 μm のスペクトルを示す。メインピーク波長は 447.9 nm であり縦モードシングルであった。

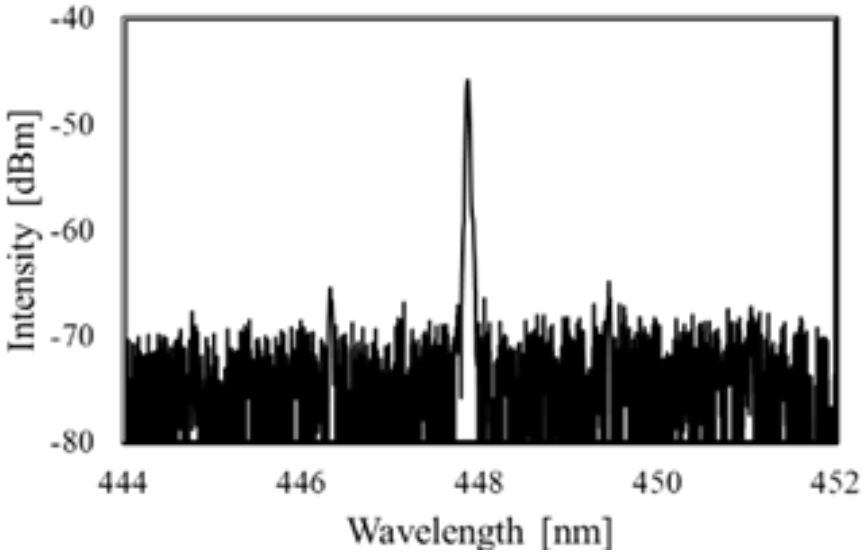


図 20 ROC 795μm のスペクトル

4.3.3. 遠視野像

図 21、22 に、測定時の電流値が 1.2 × I_{th} において得られた遠方界パターン(FFP)を示す。これらのデバイスの ROC は 76、170、302、459、795、988 μm

であり、開口部は全て 8 μm である。ROC が 170 μm 以上のデバイスからは、単一の横モードのみが得られ、良好なガウシアンビームとなっていることがわかる。一方、ROC が 76 μm のデバイスではマルチ横モードとなる挙動が得られている。図 23 は，凹面鏡の ROC と FFP 値の関係を示す。両者の関係は、Nakajima らが報告した共振器長と ROC から計算された値と非常に近いことがわかる[16]。したがって、ROC が大きいほど光閉じ込め効果は弱くなり、放射角はより小さく、光ビームの直進性が高まることが明確に観測された。加えて、最小放射角が 3.9° と極めて狭く、これは従来報告されている 5° よりも顕著に小さくなっていることが確認された。

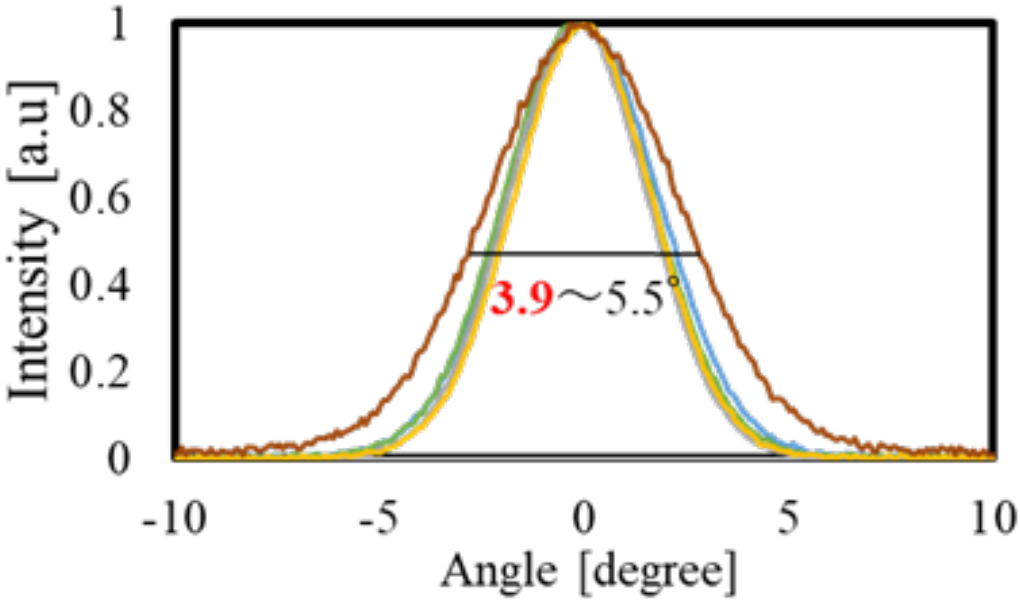


図 21 室温 CW 動作下で 1.2 × I_{th} の電流で記録された FFP プロファイル。デバイスの ROC は 170、302、459、795、988 μm であり、FFP の FWHM はそれぞれ 5.5° 、4.4° 、4.2° 、4.0° 、3.9° [19]

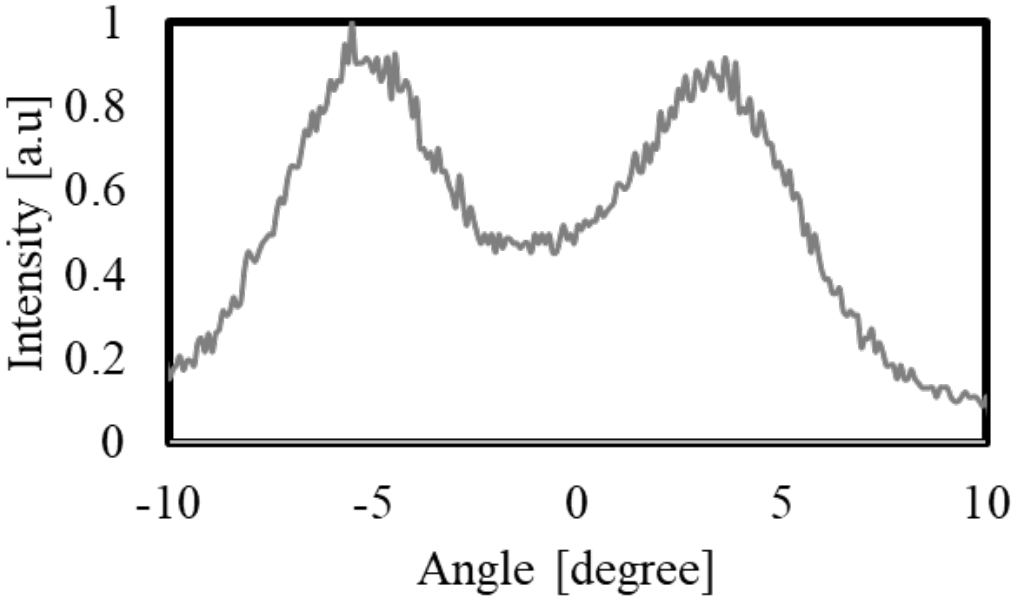


図 22 室温 CW 動作下で 1.2 × I_{th} の電流で記録された FFP プロファイル。ROC 76μm のデバイスであり、マルチモーダルスペクトル[19]

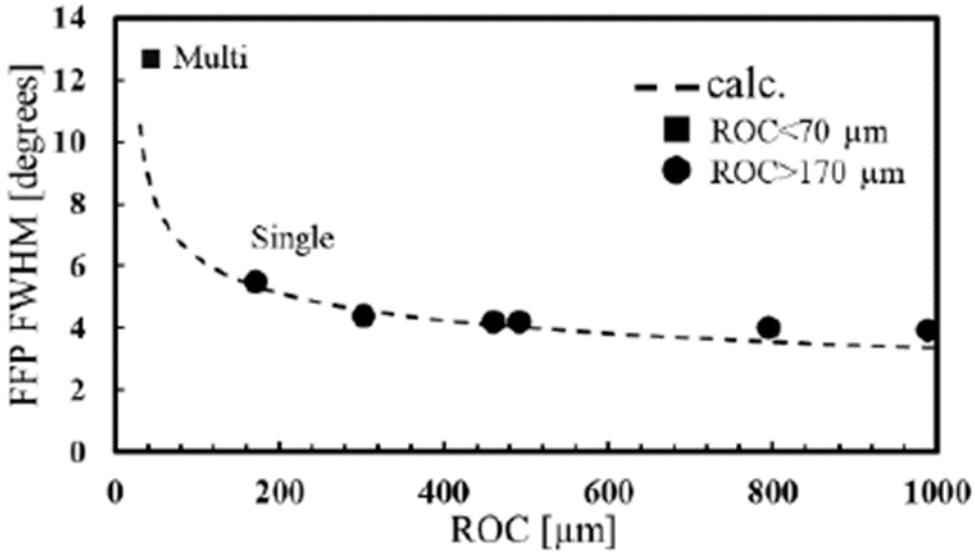


図 23 凹面鏡型 GaN-VCSEL の ROC に対する FFP 半値全幅値の計算値と実測値[19]

4.4 考察

図 19 の I-L 特性において ROC が大きくなるにつれて閾値電流が増加した原因を考える。ROC の増加がビームウェストの増大を招き、電流注入されたアパチャー径の外側に光がしみ出していると考えられる。結果、利得領域に重なる光場の減少と、その外側、すなわち損失領域への光場の増大が起きていると考えた。ここでまず、損失の影響を考える。Hamaguchi らより電流狭窄として用いる B 注入により光吸収が引き起こされることが報告されている[18]。Hamaguchi らによるとアパチャー径 8 μm に対しビームウェスト半径が 3.74 μm の素子であれば注入された B に起因する一往復あたりの光損失は 0.04%程度であるため閾値には実質的な影響はないと報告されている。そこで、本試作の素子においても B 注入による光の損失が閾値に影響がないか考えた。まず初めに、各素子のビームウェストを FFP 測定から得られたデータを逆フーリエ変換することで求めた。図 24 に示すように NFP(Near Field Pattern)の強度分布を得ることが出来る。強度分布が中心対称であるガウシアンビームにおいて、光強度が最大強度の $1/e^2$ になる位置がビームウェストとなる。図 24 より ROC が大きくなるにつれてビームウェストが大きくなることが分かる。ROC が 170 μm の素子に関してはビームウェストが 3.51 μm と Hamaguchi らと同等であるため B 注入による光の損失が電流注入損失に実質的な影響がないと考えられる。しかし、ROC が 302 μm 以上の素子についてはビームウェストが 4.42～4.91 μm と大きいことから B 注入による影響が出ると考えられる。

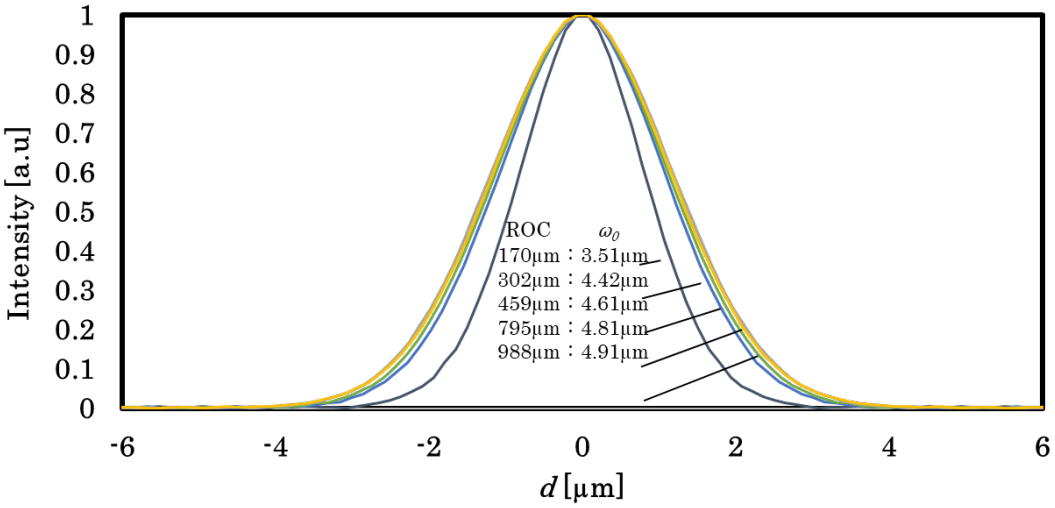


図 24 測定した FFP を逆フーリエ変換した電界分布二乗値

そこで、上記で得たビームウェストを有する光と、B 注入領域との相互作用について考えた。ここで図 25 に示すようにこのアパチャーを通る光のパワーについて考える。位置 z の光軸に垂直な面上の半径 r をもつ円を通過するパワー P は(8)式より求めることが出来る。

$$P(r,z) = P_0\left[1 - e^{-2r^2/\omega^2(z)}\right] \ldots(8)$$

r は光の開口の半径である。ここで z を伝搬方向における光の開口の位置とし $\omega(z)$ をビームウェストとした。Hamaguchi らよりウェハ全面に B 注入された層をラウンドトリップする光は B 注入のため余分に 0.42 %の損失を被ることが報告されている[18]。これらより、B 注入に起因する損失のビーム径依存は図 26 のように表すことが出来る。図 26 よりビームウェスト 2 μm 以上より B よる光損失が顕著に発生し、さらにビームウェストが大きくなるにつれて光損失が増加することが分かる。(5)式よりビームウェスト 2 μm の場合の ROC は 35 μm に相当する。つまり ROC が 70 μm 以上の本試作においては ROC の増加と共に閾値電流が増加した原因は開口外周の B による光損失が一因であると考える。また、図 26 に本試作の閾値電流密度に対する図 24 のビームウェストと(8)式を用いて算出した B の光損失を計算した値を示す。図 26 より閾値電流密度が増加するにつれて B による光損失が増加していることが明瞭に確認できた。閾値電流密度を下げるためにはアパチャー径を広げる必要がある。図 27 よりたとえばビームウェストが 4～5 μm に対しては設計アパチャー径を 11 μm 以上にすることで B による光損失を 0.04%程にできるため電流注入損失に実質的な影響がないと考えられる。

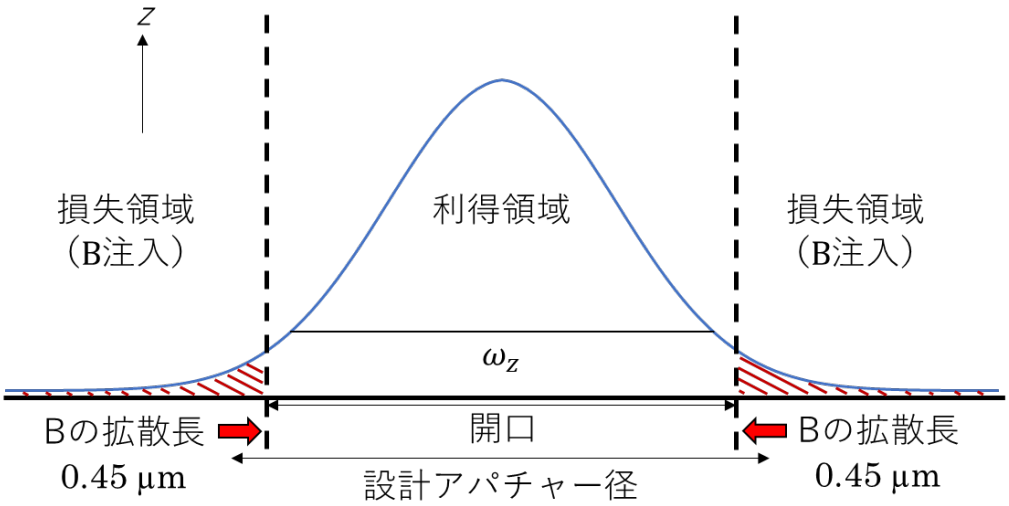


図 25 本デバイスにおけるアパチャー径を通る光場のモデル[19]

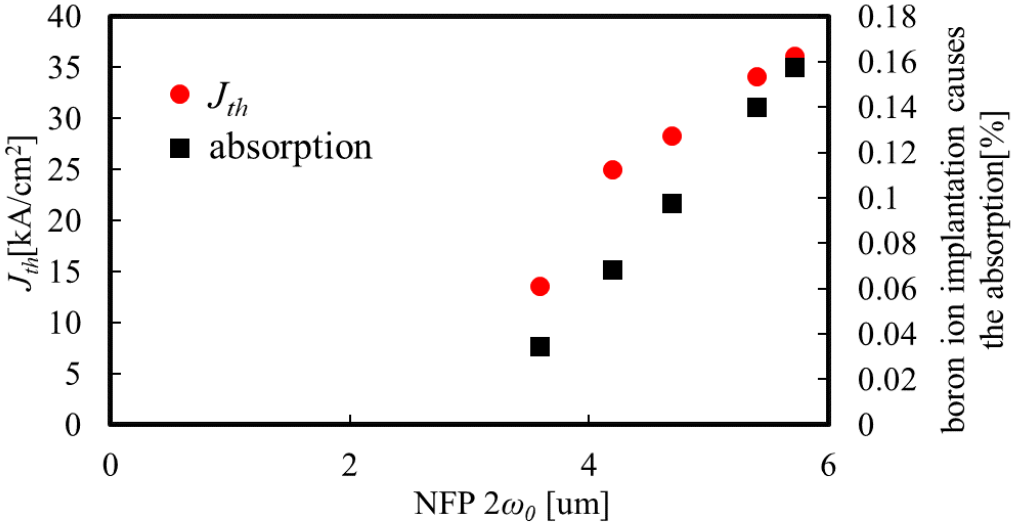


図 26 ω_0 と J_{th}, B 起因の光損失の関係

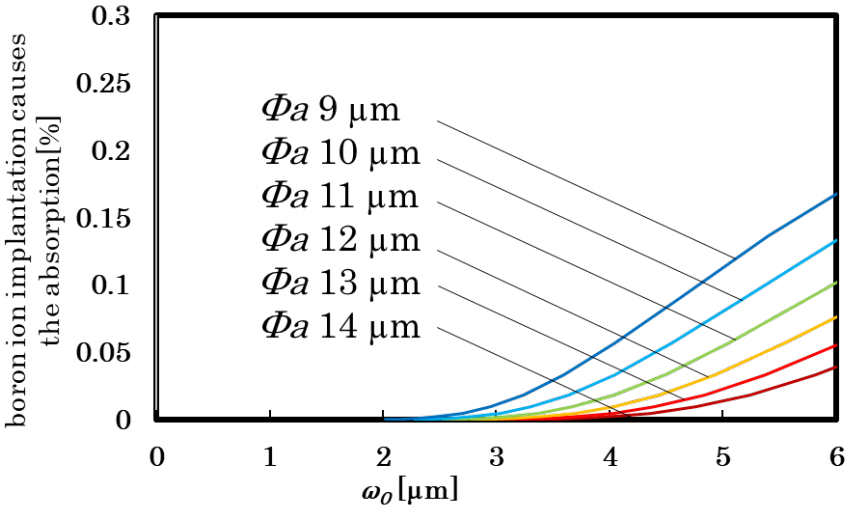


図 27 設計アパチャー径に対する ω_0 と B 起因の光損失の関係

4.5 結論

凹面鏡を備えたVCSELにおいて、放射角の狭小化を実現するために、レンズのROCを拡大する手法を提案した。レンズの高さは1 μm以下であり、ROCは最大で988 μmまで拡大した。レンズのROCが170 μm以上のデバイスからは、単一の横モードのみが観測され、FFPのFWHMは3.9 ～ 5.5 °とGaN-VCSELとしては報告されている中で最も低い値を得た。I-L特性よりROCの増加と共に閾値電流値が増加していることが明らかになった。この現象の原因は、光場が広がり、電流狭窄として用いている光損失を有するB注入領域に光が漏れ出したために、光損失率が増加したと考察した。これを抑制するには、光の広がりを考慮しアパチャー径を拡大する必要がある。しかし、アパチャー径の拡大は電流の不均一化が生じるため横モードがマルチモードになる懸念がある。本節では第2章で得られた知見を活かし、アパチャー径の設計を行ったことで、電流分布による横モードがマルチモードになることはなかったが、今後は、アパチャー径を拡大した際に電流の不均一化による懸念がレンズのROCを拡大することで防げるかは興味深い課題として残される。本節の結果は、GaN-VCSELによる放射角の狭小化の実現とデバイス設計において光の影響を考慮する上で重要な示唆を与えるものである。

第４章　参考文献

[1] K. Iga et al., Jpn. J. Appl. Phys. **47**, 1 (2008).

[2] M. Kuramoto et.al., Appl. Phys. Lett. **115**, 041101 (2019).

[3] J. Boucart et al., IEEE J. Selected Topics. Quantum Electronics **5**, 3 (1999).

[4] H-P D Yang et al., Semicond. Sci. Technol **20,** 834–839 (2005).

[5] J.F Seurin et al., SPIE **8639**, 86390O-9 (2013).

[6] J. Y. Ch et al., SPIE **5624** (2005).

[7] E. Simpanen et al., ISLC 2016

[8] N. Nishiyama et al., IEEE J. Selected Topics. Quantum Electronics **11**, 5 (2005).

[9] T. Hamaguchi et.al., Scientific Reports **8**, 10350 (2018).

[10] R. I. Aldaz et al., Optics Express **12,** 17, 3967–3971 (2004).

[11] H. K. Hogelnik et al., Applied Optics **5**, 10, 1550 (1966).

[12] W. J. Liu et al., IEEE Pohotinics Technology Letters **25**, 20 (2013).

[13] P. S. Yeh et.al., Appl. Phys. Lett. **109**, 241103 (2016).

[14] M. Kuramoto et.al., Appl. Sci. **9**, 416 (2019).

[15] H. Nakajima et.al., paper presented at Photonics West, San Francisco, February 2019.

[16] H. Nakajima et.al., Appl. Phys. Express **12**, 084003 (2019).

[17] T. Hamaguchi et.al., Appl. Phys. Express **12**, 044004 (2019).

[18] T. Hamaguchi et.al., Jpn. J. Appl. Phys **55**, 122101 (2016).

[19] K. Hayashi et al., 電気学会論文誌 C **141**, 1281-1285 (2021).

第 5 章　結言

本研究では省エネ効果が期待されるGaNデバイスにITO(Indium-Tin-Oxide)電極を使うことで、電気特性を光学特性な観点から議論しGaNデバイスが持つ潜在な可能性について述べた。第 1 章では、GaNデバイスの開発史を振り返り、これまでに報告されている電子デバイスと発光デバイスの優れた研究成果とその技術について述べた。その上で、これまでに報告されていない研究途上な領域について指摘した。

第 2 章では、GaN PND の順方向電流分布について述べた。裏面に ITO 電極を形成した独自の直接観察法により、理論的予測を裏付ける発光分布が観測され、電極周辺に電流が 2 倍以上の密度で集中することを述べた。これを利用した大電流密度パワーダイオードの新しい電極構造の提案が期待できる。また、GaN エピタキシーで頻繁にみられる筋状のモフォロジーにはこれに対応した電流密度の不均一が発生することを初めて明らかにし、エピタキシャル層の平坦化に適したオフ角を持つ基板の使用が重要であることも学会・産業界に発信できた。同様な手法により、発光パターンを GaN p-n ダイオードの逆方向リーク電流発生個所の特定に用いた報告が名大天野研究室などからなされた。

第 3 章では、薄膜の高濃度 p^{+}-GaN 層のみを p 層とした JBSD について述べた。薄膜層のドライエッチング条件を把握し、JBSD を試作したことで順方向特性においては SBD の低立ち上がり電圧、3V 以上での PND 特有の大きな電流上昇と逆方向特性では降伏電圧が SBD の約 2 倍近くまで改善し SiC 等で得られている JBS 特性を GaN で初めて実証した。本発表後、国内大手電機メーカや名大などから GaN JBSD の発表が相次いでいる。本エピタキシャル結晶を提供していただいた住友化学と特許を共同出願・成立し、住友化学の製品群に追加された。

第 4 章では、GaN デバイスから出射される光の様態に着目し、凹面鏡型 Vertical Cavity Surface Emitting Laser（VCSEL）の放射角狭出射について述べた。高さが 1μm 以下の凹面鏡を作製することで放射角の狭小化に成功し、凹面鏡構造の持つ潜在的なメリットを引き出した。一方で曲率半径の増加に伴い閾値電流密度が上昇した。この原因は、実測の FFP 像の逆フーリエ解析から、B イオン注入領域に光分布が及ぶことによる損失増加であることを明らかにした。この知見により、今後放射角を小さく維持したまま閾値電流密度を下げる設

計指針を提案した。放射角の狭小化により、円形ビーム形状でのカップリングを必要とするアプリケーションにおいてはレンズレス構造が見込めるので、より低い消費電力での駆動が期待される。また、ディスプレイの光学系の小型化・低価格化が可能となり、多様な市場展開が見込まれる。超小型軽量仮想現実(VR)機器への展開も可能となる。本研究では、GaN デバイスがもたらす電気変換効率の低下に関して、光の様態から評価するという解決策を提案した。実験結果から、PND においては電流分布の存在が明らかになり、レーザダイオードにおいては共振器構造がもたらすレーザ光の放射パターン並びに放射角への影響が明らかになった。今後は、得られた知見を GaN デバイスの作製プロセスや基板作製、エピタキシャル成長技術に応用し GaN デバイス持つ潜在な能力を最大限に引き出すための検討が必要である。また、電子デバイスに関する知見を応用して VCSEL の電極径を設計したが、VCSEL の知見から得られる知識を応用することで、さらなる発展が期待できる。例えば、フォトンリサイクリング効果による正孔の生成を、凹面鏡型の DBR による光の反射と集光を利用することで効果の強化や、電極内部に電流集中領域を形成する方法など、GaN デバイスの発展につながるアプローチが考えられる。このように今後の研究にさらなる示唆を与え、GaN デバイスの発展に貢献できることを期待している。

謝辞

本研究および本論文の作成にあたり、終始多大なご指導を賜った、法政大学イオンビーム工学研究所三島友義教授に深謝致します。また、本論文の作成にあたり、主査として適切なご助言を賜った、法政大学理工学研究科中村俊博教授に深謝致します。同学科笠原崇史准教授には、副査として適切なご助言を賜りました。ここに深謝の意を表します。

また、本研究の実施過程において、そのほかの非常に多くの方にお世話になりました。窒化物系電子デバイスに関する研究においては、法政大学マイクロナノテクノロジーセンター太田博氏、中村徹客員教授、池田清治氏、浅井直美氏に理論、実験両面で多大なご協力をいただきました。また、的確なご指導、ご助言並びに基板の提供をして頂いた株式会社サイオクス 堀切文正氏、成田好伸氏、吉田丈洋氏、藤倉序章氏に多大なご協力をいただきました。窒化物系光デバイスに関する研究においては、ソニーセミコンダクターソリューションズ株式会社風田川統之氏、川西秀和氏、幸田倫太郎氏、仲山英次氏、濱口達史氏、小林紀子氏、大原真穂氏、保科幸男氏、條川達郎氏、長根昭悦氏、牧野智大氏、仲村友希氏、佐藤晃一氏、伊藤まいこ氏、米 Leia 社 Jared Kearns 氏に多大なご協力をいただきました。ここに深謝の意を表します。

最後に、私事にわたることをご容赦願い、研究・仕事に没頭できる環境を支援してくれた家族に深い感謝を申し上げ、本学位論文の謝辞といたします。

研究業績一覧

<学術論文（査読有）>

1. Kentaro Hayashi, Hiroshi Ohta, hirohumi Tsuge, Tohru Nakamura, and Tomoyoshi Mishima, “Junction-Barrier Schottky Diodes Fabricated with Very Thin Highly Mg-Doped p^+-GaN(20 nm)/n-GaN Layers Grown on GaN Substrates”, 2017 IEEE Future of Electron Devices, Kansai, DOI: 10.1109/IMFEDK.2017.7998037 (2017). (電子ジャーナル)
2. Kentarou Hayashi、Hiroshi Ohta、Fumimasa Horikiri、Yoshinobu Narita、Takehiro Yoshida、Tohru Nakamura、Tomoyoshi Mishima, “Direct observation of high current density area by microscopic electroluminescence mappings in vertical GaN p-n junction diodes”, Phys. Status Solidi A **215**, 1700501 (2018).
3. 林 賢太郎, 濱口 達史, 保科 幸男, 條川 達郎, 大原 真穂, 小林 紀子, 長根 昭悦, 佐藤 晃一, 仲村 友希, Jared Kearns, 仲山 英次, 幸田 倫太郎, 川西 秀和, 風田川 統之, “凹面鏡を有する青色窒化物面発光レーザの放射角狭小化” 電気学会論文誌 C **141**, 1281-1285 (2021).
4. Kentaro Hayashi, Tatsushi Hamaguchi, Jared A. Kearns, Noriko Kobayashi, Maho Ohara, Tomohiro Makino, Shoetsu Nagane, Koichi Sato, Yuki Nakamura, Yukio Hoshina, Tatsuro Jyoukawa, Takumi Watanabe, Yuichiro Kikuchi, Maiko Ito, Eiji Nakayama, Rintaro Koda, and Noriyuki Futagawa, “Narrow emission of blue GaN-based vertical-cavity surface-emitting lasers with a curved mirror” IEEE Photonics Journal **14**, 4 (2022)

<学術論文（共著）>

1. Hiroshi Ohta, Kentaro Hayashi, Tohru Nakamura, Tomoyoshi Mishima, “High Breakdown Voltage Vertical GaN p-n Junction Diodes Using Guard Ring Structures”, IEEE CAT. No.CFO16567-PRT, DOI: 10.1109/IMFEDK.2017.7998039, (2017)
2. Hiroshi Ohta, Kentaro Hayashi, Fumimasa Horikiri, Michitaka Yoshino, Tohru Nakamura, Tomoyoshi Mishima, “5.0 kV Breakdown-Voltage Vertical GaN p-n Junction Diodes”, Jpn. J. Appl. Phys. **57**, 4S,

04FG09 (2018)

3. Hajime Fujikura, Kentaro Hayashi, Fumimasa Horikiri, Yoshinobu Narita, Taichiro Konno, Takehiro Yoshida, Hiroshi Ohta, and Tomoyoshi Mishima, "Elimination of macrostep-induced current flow nonuniformity in vertical GaN PN diode using carbon-free drift layer grown by hydride vapor phase epitaxy", Applied Physics Express **11**, 045502-1-4 (2018)
4. Kazuhiro Mochizuki, Naoki Kaneda, Kentaro Hayashi, Hiroshi Ohta, Fumimasa Horikiri, and Tomoyoshi Mishima, "Analysis of Step-Velocity-Dependent Concentration of Magnesium in GaN Based on Burton–Cabrera–Frank Theory and Step-Edge Segregation Model", Jpn. J. Appl. Phys. **60**, 128003-1-4 (2021)
5. Tatsushi Hamaguchi, Hiroshi Nakajima, Masayuki Tanaka, Masamichi Ito, Maho Ohara, Tatsurou Jyoukawa, Noriko Kobayashi, Tatsuya Matou, Kentaro Hayashi, Hideki Watanabe, Rintaro Koda and Katsunori Yanashima, "Sub-milliampere-threshold continuous wave operation of GaN-based vertical-cavity surface-emitting laser with lateral optical confinement by curved mirror", Appl. Phys. Express **12**, 044004 (2019)
6. Hiroshi Nakajima, Tatsushi Hamaguchi, Masayuki Tanaka, Masamichi Ito, Tatsuro Jyokawa, Tatsuya Matou, Kentaro Hayashi, Maho Ohara, Noriko Kobayashi, Hideki Watanabe, Rintaro Koda and Katsunori Yanashima, "Single transverse mode operation of GaN-based vertical-cavity surface-emitting laser with monolithically incorporated curved mirror", Appl. Phys. Express **12,** 084003 (2019)
7. Tatsushi Hamaguchi, Yukio Hoshina, Kentaro Hayashi, Masayuki Tanaka, Masamichi Ito, Maho Ohara, Tatsurou Jyoukawa, Noriko Kobayashi, Hideki Watanabe, Mikihiro Yokozeki, Rintaro Koda and Katsunori Yanashima, "Room-temperature continuous-wave operation of green vertical-cavity surface-emitting lasers with a curved mirror fabricated on {20−21} semi-polar GaN", Applied Physics Express, **13**, 4 (2020)
8. Tatsushi Hamaguchi, Yukio Hoshina, Tatsuro Jyokawa, Maho Ohara, Kentaro Hayashi, Noriko Kobayashi, Shouetsu Nagane, Koichi Sato, Yuki Nakamura, Jared Kearns, Eiji Nakayama, Rintaro Koda, Hidekazu Kawanishi, Noriyuki Futagawa, "Blue and Green VCSEL

for Full-Color Display", SID **52**, 1, 677-679 (2021)

<国際学会発表>

1. Kentarou Hayashi、Hiroshi Ohta、Fumimasa Horikiri、Yoshinobu Narita、Takehiro Yoshida、Tohru Nakamura、Tomoyoshi Mishima, "Current crowding caused by surface roughness of vertical GaN p-n diodes", ISPlasma 2017 (9th International Symposium on Advanced Plasma Science and its Applications for Nitrides and Nanomaterials), Aichi, Japan
2. Kentaro Hayashi, Hiroshi Ohta, hirohumi Tsuge, Tohru Nakamura, and Tomoyoshi Mishima, "Junction-Barrier Schottky Diodes Fabricated with Very Thin Highly Mg-Doped p+-GaN(20 nm)/n-GaN Layers Grown on GaN Substrates", IEEE The 2017 International Meeting for Future of Electron Devices, Kyoto, Japan
3. Kentarou Hayashi, Tatsushi Hamaguchi, Jared Kearns, Eiji Nakayama, Yukio Hoshina, Tatsuro Jyokawa, Maho Ohara, Noriko Kobayashi, Shouetsu Nagane, Koichi Sato, Yuki Nakamura, Takumi Watanabe, Tomohiro Makino, Maiko Ito, Rintaro Koda, Hidekazu Kawanishi, Noriyuki Futagawa, "Narrow emission of blue GaN-based vertical-cavity surface-emitting lasers with a curved mirror", 27th International Semiconductor Laser Conference, Brandenburg, Germany (2021)

<国際学会でのポスター発表>

1. Kentaro Hayashi, Hiroshi Ohta, Fumimasa Horikiri, Yoshinobu Narita, Takehiro Yoshida, Tohru Nakamura, Tomoyoshi Mishima, "Direct observation of high current density area by microscopic electroluminescence mappings in vertical GaN p-n junction diodes", International Conference of Nitride Semiconductors 12, Strussburg, France (2017)

<国際学会でのポスター発表>

1. Kentaro Hayashi, Hiroshi Ohta, Fumimasa Horikiri, Yoshinobu Narita, Takehiro Yoshida, Tohru Nakamura, Tomoyoshi Mishima, "Direct observation of high current density area by microscopic

electroluminescence mappings in vertical GaN p-n junction diodes", International Conference of Nitride Semiconductors 12, Strussburg, France (2017)

<国際学会での口頭発表(共著)>

1. Hiroshi Ohta, Kentaro Hayashi, Tohru Nakamura, Tomoyoshi Mishima, "High Breakdown Voltage Vertical GaN p-n Junction Diodes Using Guard Ring Structures", IEEE The 2017 International Meeting for Future of Electron Devices, Kyoto, Japan
2. Hiroshi Ohta, Kentaro Hayashi, Fumimasa Horikiri, Tohru Nakamura, and Tomoyoshi Mishima, "5.0 kV Breakdown-Voltage Vertical GaN p-n Junction Diodes", 2017 International Conference on Solid State Devices and Materials, Sendai, Japan
3. Tatsushi Hamaguchi, Hiroshi Nakajima, Masayuki Tanaka, Masamichi Ito, Tatsuro Jyoukawa, Noriko Kobayashi, Tatsuya Matou, Kentaro Hayashi, Maho Ohara, Hideki Watanabe, Kentaro Fujii, Rintaro Koda, Hironobu Narui, "Incorporation of a Curved Mirror into GaN-Based VCSEL", 2018 IEEE International Semiconductor Laser Conference (ISLC), United States
4. Hiroshi Nakajima, Tatsushi Hamaguchi, Masayuki Tanaka, Masamichi Ito, Tatsuro Jyokawa, Tatsuya Mato, Kentaro Hayashi, Maho Ohara, Noriko Kobayashi, Hideki Watanabe, Rintaro Koda, Katsunori Yanashima, "Recent progress in GaN-based vertical-cavity surface-emitting lasers with lateral optical confinement due to an incorporated curved mirror", SPIE OPTO, 2019, San Francisco, California, United States
5. Jared A. Kearns, Tatsushi Hamaguchi, Kentaro Hayashi, Maho Ohara, Tomohiro Makino, Maiko Ito, Noriko Kobayashi, Tatsuro Jyokawa, Eiji Nakayama, Shouetsu Nagane, Koichi Sato, Yuki Nakamura, Yukio Hoshina, Yuya Kanitani, Seiji Kasahara, Susumu Kusanagi, Yoshihiro Kudo, Rintaro Koda, Noriyuki Futagawa, "Mode control in long cavity VCSELs with a curved mirror", SPIE OPTO, 2022, San Francisco, California, United States

<国内学会での口頭発表>

1. 林 賢太郎, 太田 博, 堀切 文正, 成田 好伸, 吉田 丈洋, 中村 徹, 三島 友義, “自立 GaN 基板上 p-n 接合ダイオードにおける順方向電流集中領域の検討”, 第 63 回応用物理学会春季学術講演会, 21a-W541-1, 2016.3.
2. 林 賢太郎, 太田 博, 堀切 文正, 成田 好伸, 吉田 丈洋, 中村 徹, 三島 友義, “自立 GaN 基板上 p-n 接合ダイオードにおける順方向電流集中領域の検討Ⅱ”, 第 77 回応用物理学会秋季学術講演会, 15a-B1-11, 2016.9.
3. 林 賢太郎, 太田 博, 堀切 文正, 成田 好伸, 吉田 丈洋, 中村 徹, 三島 友義, “p+薄層を用いた自立 GaN 基板上 JBS ダイオード”, 第 64 回応用物理学会春季学術講演会, 15a-315-5, 2017.3.
4. 林 賢太郎, 太田 博, 堀切 文正, 成田 好伸, 吉田 丈洋, 藤倉 序章, 塩島 謙次, 中村 徹, 三島 友義, “自立 GaN 基板上 p^+-n ダイオードのエピ層表面モフォロジーによる不均一な電流密度分布”, 第 78 回応用物理学会秋季学術講演会, 5p-C17-16, 2017.9.
5. 林 賢太郎, 中島 博, 伊藤 仁道, 田中 雅之, 長根 昭悦, 條川 達郎, 真藤 達也, 小林 紀子, 大原 真穂, 渡邊 秀輝, 比嘉 康貴,濱口 達史, 幸田 倫太郎, 簗嶋 克典, “凹面鏡を有する青色窒化物面発光レーザの放射角狭小化”, 第 67 回 応用物理学会 春季学術講演会 シンポジウム,(2020)
6. (招待講演)林 賢太郎, 濱口 達史, 保科 幸男, 條川 達郎, 大原 真穂, 小林 紀子, 長根 昭悦, 佐藤 晃一, 仲村 友希, Jared Kearns, 仲山 英次, 幸田 倫太郎, 川西 秀和, 風田川 統之, “凹面鏡を有する青色窒化物面発光レーザの放射角狭小化”, 電気学会・パワー光源システム技術動向調査専門委員会 半導体パワー光源及びその応用についての研究

会,(2020)

< Award >

1. 林 賢太郎, 中島 博, 伊藤 仁道, 田中 雅之, 長根 昭悦, 條川 達郎, 真藤 達也, 小林 紀子, 大原 真穂, 渡邊 秀輝, 比嘉 康貴,濱口 達史, 幸田 倫太郎, 簗嶋 克典, “凹面鏡を有する青色窒化物面発光レーザの放射角狭小化”, 2020 年電子・情報・システム部門 研究会奨励賞
2. 濱口達史、保科幸男、林賢太郎、伊藤仁道、大原真穂、條川達郎、横関弥樹博、幸田倫太郎、簗嶋克典, “Room-temperature continuous-wave operation of green vertical-cavity surface-emitting lasers with a curved mirror fabricated on {20−21} semi-polar GaN”, 第 43 回（2021 年度）応用物理学会応用物理学会優秀論文賞