

主 論 文 の 要 約

論文題目 加工シリコン基板上半極性面窒化物半導
体の発光素子に関する研究

氏 名 久志本 真希

論 文 内 容 の 要 約

現在窒化物半導体は青色発光ダイオード、青色レーザーダイオード(LD)の材料として実用化され、液晶のバックライトなどの白色光源として利用されている。更なる応用先として InGaN を用いた長波長領域の発光デバイスが挙げられる。InGaN の混晶比を変化させることで全可視光領域の発光が実現可能で、高効率な緑色発光素子や、RGB 全てを窒化物半導体で作製することが期待されている。しかし従来用いられる極性面(0001)GaN 上の発光デバイスは、長波長化に伴い発光効率の低下や、閾値電流密度の増大といった問題に直面している。これは発光層に存在する内部電界の影響が大きいと考えられている。

そこで発光効率の向上策として半極性面 GaN 上発光デバイスが注目されている。半極性面を用いると発光層に存在する内部電界が低減し、正孔と電子の分離による発光効率の低下を抑制可能である。実際に緑色 LD は非極性面で初めて動作し、閾値電流密度が低いことが報告された。しかし現状では c 面に比べ成長技術が確立されていないため、未だ半極性面の持つ優位性を発揮し切れていない。またほとんどの非極性面 InGaN 系 LD に関する報告は、高コストな GaN 基板上に作製されており、現状のままではハイエンド向けに限られる。

本研究では Si の微細加工技術および GaN の選択成長技術を用いることで、高品質な半極性(1-101)面 GaN マイクロストライプ結晶上の LD 作製を目指す。加えて、(1-101)面は半極性面の中でも In 取り込み効率が高いことから、緑色より長波長の LD 作製につながる長波長で発光可能な高 In 組成 InGaN の作製を試みる。一般的に In 組成を増加させるために低温成長を行うと、結晶品質が低下しやすい。(1-101)面では他の結晶面と比較して、高温で InGaN を成長できるため、長波長 InGaN の高品質化が期待できる。さらに Si 基板は

安価で大面積基板であることから、コスト問題の解決に最も適した基板である。本研究では従来用いられる Si(111)基板ではなく、LSI などの Si デバイスが作製される Si(001)基板上への結晶成長に注目するため、将来的に光・電子集積回路への応用が期待される。そして半極性面は物性的に解明されていないことが多く、その中でも(1-101)面についての報告は安定な結晶面にも関わらず少ない。LD 作製に重要な偏光特性は結晶面や成長基板、発光層構造で変化すると言われているが、詳細は明らかでない。光共振器構造においても、従来とは異なる成長基板を用いることから、歪や光吸収による影響が示唆され、それらの解明は必須である。

本研究では (1-101)面の偏光特性や、Si 基板上(1-101)GaN ストライプ光共振器構造の作製・高品質化、および長波長化に向けた高速高温成長による(1-101)高 In 組成 InGaN 発光層の作製を行った。本論文は全 6 章で構成されている。以下に各章の概要を示す。

第 1 章では半導体デバイスの社会的重要性を述べ、今回用いた窒化物半導体研究の歴史ならびに特長について述べた。その後化合物半導体 LD の発展と Si 基板上 LD について、また Si 基板上窒化物半導体成長の問題と解決方法について述べた。そして、非極性面窒化物半導体のこれまでと特徴について述べ、半極性面を用いる利点を述べた。半極性面の利点は最初に述べた発光効率向上の可能性だけでなく、格子不整合による歪緩和機構の特異性から結晶品質の向上の可能性が挙げられる。従来の結晶面上に作製した高 In 組成 InGaN では、緩和時に非発光再結合中心となる貫通転位が発生する。一方、非極性面では結晶面が傾くことで緩和できるため、貫通転位が形成しにくい。この緩和機構を応用することで、高 In 組成 InGaN の結晶性向上が期待できる。これら非極性面を用いた LD の報告と問題について述べ、今回作製を目指す LD の特徴を述べた。最後に LD の特性として重要な偏光特性について述べ、本論文の概要を示した。

第 2 章では本研究で用いる(1-101)GaN ストライプ結晶について述べる。はじめに半極性面 GaN 結晶を作製する加工 Si 基板の作製プロセスについて述べる。成長面である Si(111)面を Si(001)基板内にウェットエッチングにより作製した後、成長面を制限するため、基板に対して斜め方向から SiO₂ 蒸着し、結晶成長のマスクとした。次に成長方法として用いた MOVPE 法の概要、および Si 基板上(1-101)GaN ストライプ上に製膜した InGaN/GaN 多重量子井戸構造(MQW)の成長法について説明した。最後に Si 基板上(1-101)GaN ストライプ結晶並びに InGaN/GaN MQW 構造の結晶性について述べた。

第 3 章では(1-101)InGaN/GaN 多重量子井戸構造の偏光特性について検討した。まず様々な発光波長、井戸幅を持つ Si 基板上半極性(1-101)InGaN/GaN MQW ストライプ結晶を作製し、発光層構造の偏光特性への影響を評価した。非極性面では価電子帯のバンド構造によって、異なる偏光方向を持つ発光遷移過程が発生する。この場合偏光方向は電界方向が c 軸に垂直、あるいは成長面内の c 軸射影軸に平行な発光のいずれかが観測される。この偏光方向によって、非極性面では光共振器の作製方向に制限がかかる。今回の結晶成長方法では共振器方向が a 軸方向に制限されることから、c 軸射影軸に対して平行な偏光方向が最適

である。そこでマイクロ選択励起フォトルミネッセンス(PL)測定を用いて、様々な井戸幅や発光波長の(1-101) InGaN/GaN MQW の表面偏光特性の評価を行った。その結果、ほとんどの試料において c 軸射影軸に対して平行な偏光であった。詳細を述べると、井戸幅が薄い MQW 構造では発光波長が増加することにより、c 軸に垂直な偏光方向から、c 軸射影軸方向に平行な方向へと偏光がシフトしていた。一方井戸幅が厚い試料においては全て c 軸射影軸方向に平行な偏光特性を示した。短波長領域に着目すると、井戸幅により偏光特性が大きく変化していた。これは量子効果により Si 基板上(1-101) InGaN/GaN MQW の偏光特性が大きく影響を受けていることを示している。量子効果の偏光特性への影響は理論的には予測されているが、顕著に偏光特性が変化することを観測した報告はほとんどない。従来の報告は GaN 基板上やサファイア基板上の結晶であることから、加工 Si 基板特有の a 軸方向の引っ張り歪によって、価電子帯のエネルギー関係が変化している可能性が示唆された。また井戸幅が厚い場合や、発光波長が長波長化すると発生する緩和の影響を見るため、XRD を用いて緩和の評価を行った。その結果、c 軸射影軸方向の緩和が発生した構造では、圧縮歪が減少したことで価電子帯のエネルギー関係の変化か、緩和により発生した欠陥の発光特性への影響が示唆された。

第 4 章ではまず(1-101) InGaN/GaN 光共振器構造の誘導放出特性と偏光特性の評価を行った。それぞれの特性を評価するにあたり、光共振器構造の結晶成長条件や積層構造、ならびに評価に用いた強励起端面出射 PL の光学系について述べた。強励起端面出射 PL で、各光共振器構造の励起強度依存性を測定したところ、積分強度の非線形増大が観測された。これは誘導放出現象を示している。しかし長波長化に伴い同様の非線形増大が発生しなかった。そこで光閉じ込め効率の影響を検討するため、誘導放出時の端面の発光分布の観測を行った。その結果、結晶全体に発光が漏れ出していることや、ストライプ側面に存在するファセット、あるいは結晶成長端部から、表面とは異なる発光が観測された。これは成長時に発生する他の結晶面の成長や、気相拡散により発生した特異成長により結晶内に複数の共振器構造が存在していることを示している。つまり光閉じ込め効率の向上が必要であることがわかり、光共振器構造の検討を行った。まずクラッド層の膜厚を増加させることで光閉じ込め効率の向上を行ったところ、表面近傍光共振器への発光分布の集中が見られた。これにより閾値励起強度が大きく改善し、発光ピーク波長のシフト低減に成功した。次にリッジ構造の作製により横方向の閉じ込め効率を向上した結果、発光分布では横モードの発生を示し、PL スペクトルでは縦モードが観測された。すなわち Si 基板上(1-101)GaN 結晶を用いたレーザー発振に成功し、LD を実現できる可能性があることを光学的観点から証明した。最後に長波長化に向けた光共振器構造の検討を行った。ガイド層に InGaN を導入することでクラッド層とガイド層の屈折率差を大きくし、光閉じ込め効率の向上を狙った。その結果、従来発振が観測されなかった発光波長での発振が可能となり、長波長レーザーの実現に一步進んだといえる。

第 5 章では(1-101)GaN ストライプ結晶上の高 In 組成 InGaN の作製を検討した。まず

In 取り込み効率を上げる手法として一般的な低温成長を行ったが、表面荒れが発生し PL 発光強度の低下が見られた。そこで成長レートを増大させることで In 取り込み効率を向上させ、比較的高い成長温度での高 In 組成 InGaN の成長を試みた。その結果、成長モフォロジが改善し、PL 発光強度の上昇が観測された。さらなる長波長化のため、TMI 供給量を変化させて InGaN 成長を行った結果、TMI 供給量の上昇に伴い若干の長波長化が発生したが、表面モフォロジが悪化し、結晶品質が大きく低下した。CL 観察では表面モフォロジに 관련된 発光分布が得られ、モフォロジが荒れた部分で顕著な非発光領域が観測された。そこで半極性面特有の結晶面が傾くことによる緩和機構を積極的に利用した高 In 組成 InGaN の成長を行った。緩和の導入による長波長化を検討するため、異なる膜厚の InGaN を成長した結果、膜厚の増加に伴い発光波長の長波長化が観測された。これは緩和の進行により格子間隔が広がり、In の引き込み効果が発生したと考えられる。最後に上記で述べた緩和機構を用いた長波長化を行うため、InGaN/GaN MQW 発光層下に異なる膜厚の InGaN 緩和層を導入した結果、未挿入の MQW 構造に比べ発光波長の長波長化が見られ、緩和層の膜厚により発光波長の制御が可能であることを示した。

第 6 章では本論文の総括をし、今後の課題と展望について述べ、本論文をまとめた。