

主論文の要約

論文題目 **UV-C 波長帯深紫外レーザーダイオードの実現
(Realization of deep-ultraviolet laser diodes in the UV-C wavelengths)**

氏名 **張 梓懿**

論文内容の要約

本研究は、未踏の波長帯である波長 280 nm 以下の UV-C 波長域のレーザーダイオード(LD)の実現を目指して行われたものである。

LDはその歴史が始まって以来、光通信や高輝度光源として産業・社会に広く普及し、人類の歴史を変革するほどの重要なデバイスとして発展し続けてきた。今日、社会実装されている LD の波長帯は赤外域から可視光域までに及ぶが、研究報告ベースで実証された最短発振波長は 336 nmにとどまり、また 360 nm より短波長な紫外域の実用的な LD は未だ実現されていない。AlN と GaN の混晶である AlGaIn を用いた薄膜材料は、UV-C 領域のバンドギャップを有する直接遷移型半導体であり、高い光学利得を期待されることから UV-C LD のデバイスに適している。一方で LD の短波長化が実現されてこなかった根本的な原因は、高品質な AlGaIn 薄膜成長が難しかった点と、従来の不純物添加の手法では p 型導電性制御が困難であった点にある。本研究の特徴的なアプローチは、単結晶 AlN 基板を用いて高品質な AlGaIn 薄膜成長を実現させ、また結晶の内部分極電荷を用いた p 型導電性制御を行う点である。さらに、デバイスの作製・評価を通して明らかになった、レーザー発振を阻害するさまざまな問題の解決に取り組み、270 nm 帯 LD の室温連続発振を実証する。本研究で達成された室温連続発振は、あらゆる波長帯の LD 開発において重要なマイルストーンであり、実用的な UV-C 波長帯 LD の社会実装へ大きく進展させるものである。

第 1 章では、デバイスとしての LD の特徴について述べ、その発展の歴史を俯瞰しながら UV-C 波長域の LD を実現する意義を明らかにする。UV-C 波長帯 LD の応用領域として特

にインパクトの大きい殺菌，および素材加工領域について述べる．また，UV-C LD を実現する上における根本的な課題を整理し，本研究の特徴的なアプローチについて説明する．

第 2 章では，デバイス作製の基礎となる光閉じ込め構造の設計を行う．設計に必要な AlGaIn 薄膜の光学屈折率を評価し，シンプルなスラブ導波路構造モデルを用いて，高い光閉じ込めと低い伝搬損失を両立する導波設計を目指す．特に p 電極とデバイス構造とのオーミック接触を得るために必要な p コンタクト層による光吸収が発生する点に着目し，光モードとこれらの光吸収層との重なりを低減させる．また，光励起法による評価によって設計の妥当性を検証し，低い伝搬損失が達成されることを示す．

第 3 章ではクラッド層の n 型および p 型導電性制御についてそれぞれ述べる．

不純物添加による導電性制御に関しては，n 型，p 型ともに Al 組成が高くなるに従って困難となるが，特に p 型導電性制御の課題は深刻である．そこで，AlGaIn 混晶の分極による内部電界を利用したドーピング手法として，短周期超格子構造(p-SPSL)，および分散分極ドーピング(p-DPD)による p 型導電性制御について，実際に LD デバイスを用いて IV 特性および EL 特性を評価・比較した．p-SPSL の場合については，電子のクラッド層側へのオーバーフローが本質的な課題として顕在化したことに対し，p-DPD の場合はクラッド層そのものが電子ブロック(EBL)層としてよく機能するため，コア層にあらたに EBL 層を導入することなく良好なキャリア注入を達成できることを示す．さらに，p-DPD を用いたクラッド層は Mg 不純物の添加が必要なく，不純物起因の光吸収による伝搬損失の増加がない点において，UV-C LD のクラッド層として優位性があることを指摘する．また，CV 測定によって固定電荷の定量評価を行い，実測された固定電荷密度の分布が設計構造から期待される理論値よく一致し，不純物添加がなくとも固定電荷のみによる p 型化制御がよく実現されていることを示す．

第 4 章では，UV-C LD の作製について詳しく述べ，p-DPD クラッド層を用いたデバイス構造にて室温パルス発振の実証を行う．閾値電流密度を低減するために，高反射率 DBR の設計を行い，劈開によって形成したミラー端面に実装してミラー損失を低減させる．作製したデバイスについて室温パルス駆動による TE モードのレーザー発振を実証する．また，エッチングによるミラー作製手法についても検証を行い，ドライエッチングとアルカリ溶液による自己停止機構を備えた本手法を用いて，良好なミラー端面が形成できることを示す．作製工程数低減の観点から，エッチング法は劈開ミラー法に対して飛躍的な生産性向上を可能にし，また高い再現性を実現する．さらに，エッチングによるミラー作製を行った UV-C LD についても室温パルス発振の実証を行う．

第 5 章では，より実用的なデバイスを目指して閾値電流の低減に取り組む．まず，作製工程

に関連して顕在化した問題として、エピ薄膜成長後に現れる六角形状のヒロックと、デバイス作製後メサストライプの側面近傍に現れる非発光領域について調べる。これらのアーティファクトはいずれもその発生箇所の発光層を劣化させることで、閾値電流密度を向上させる。特にメサストライプに現れる非発光領域は、電極作製工程に伴う高温アニール後に発生することを示す。転位解析や応力解析を通して、この非発光領域が基底面すべりを伴ってメサストライプに導入された転位と関連から、考えられる非発光領域の発生メカニズムについて述べる。また、ここでは非発光領域を避けるような p 電極配置とすることで、大幅な閾値電流密度を低減が可能であることを示す。次に、薄膜構造に着目し、閾値モード利得を低減する観点において閉じ込め係数の向上を行う。さらに、コア層とクラッド層の薄膜界面の詳細な観察から、意図しない Al 組成傾斜層(CPE 層)が形成されていることを指摘し、キャリア注入の妨げとなっている可能性について言及する。原子拡散と薄膜成長中に起こる偏析現象の観点から CPE 層の形成メカニズムについて考察し、CPE 層を抑制することによってキャリア注入効率の大幅な改善を行う。一連の閾値電流密度低減への取り組みは、パルス発振の閾値電流密度を初期実証水準の 1/5 以下まで低減させることを示す。

第 6 章では、室温連続発振の実証を行う。連続駆動下では、デバイスの自己ジュール発熱が閾値電流密度の上昇に寄与するため、パルス駆動時に比べて閾値電流密度が駆動電流に従って上昇することが連続発振のボトルネックとなる。まず、自己ジュール発熱による発振阻害の定量的な評価のために、パッケージしたデバイスの熱抵抗を評価し、また、IV 特性の温度依存性や、閾値電流密度の特性温度を評価することによって、室温連続発振のために必要なデバイス特性の条件を明らかにする。次に、駆動電力の低減による自己ジュール発熱の抑制へ向けて、デバイスの直列抵抗の成分分解を行うことで n-クラッド層における電流経路に伴う抵抗が直列抵抗に最も寄与することを示す。特に第 5 章で述べた非発光領域の存在は、電極配置に制限を設けていることから n-クラッド層中の抵抗を増大させている。メサ形状を工夫することによって剪断応力の集中を低減し、非発光領域の形成を抑制することによって大幅な直列抵抗の低減を行う。これらの取り組みによって、閾値電流および直列抵抗が室温連続発振のために必要な条件を満たし、実際に作製した改善後のデバイスについて、室温直流駆動条件下において連続発振することを実証する。

最後に第 7 章では、本論文で得られた知見の総括と、今後の UV-CLD 研究の焦点となる論点について述べる。