

氏 名	かね だ あき お男 金 田 昭 男
学位(専攻分野)	博 士 (工 学)
学 位 記 番 号	工 博 第 2269 号
学位授与の日付	平 成 15 年 3 月 24 日
学位授与の要件	学 位 規 則 第 4 条 第 1 項 該 当
研 究 科 ・ 専 攻	工 学 研 究 科 電 子 物 性 工 学 専 攻
学 位 論 文 題 目	顕微分光法を用いた InGaN 系量子井戸構造の光物性に関する研究

論文調査委員 (主 査) 教 授 藤 田 茂 夫 教 授 松 波 弘 之 教 授 野 田 進

論 文 内 容 の 要 旨

InGaN 系半導体は、可視から紫外にわたる広いスペクトル領域で動作する発光デバイス材料として重要な位置を占めている。将来的に動作波長のさらなる拡大、高効率化・高出力化などのデバイス特性の高性能化を図り、ディスプレイ、照明光源をはじめとする広範な応用を可能とするためには、材料のミクロ・ナノ領域の構造と発光機構など光物性との関係を明確にして、その情報をプロセス技術に活かし、デバイス性能向上を図ることが不可欠である。本論文はこのような観点に立ち、InGaN 系量子井戸活性層における発光のナノサイズ微小空間分布から発光機構を中心とする光物性を明らかにするために短波長動作近接場光学顕微システムを構築するとともにその技術の確立に貢献すること、および、InGaN 系の輻射、非輻射中心に対する知見を得てデバイス性能向上のための基礎的指針を提示することを目的として研究した結果を纏めたもので、以下の5章から成っている。

第1章は序論であり、InGaN 系半導体による発光ダイオード(LED)や半導体レーザ(LD)の研究開発における歴史的展開と現状の問題点を述べ、それに対する解決手段の提案を行って、本論文の目的と研究意義および位置付けを明確にしている。

第2章では、蛍光顕微鏡による InGaN 量子井戸構造の発光の温度依存性を、77K から室温まで変化させたとき、発光強度の均一性が次第に悪くなるとともに、全体的に発光強度が弱くなることを観測している。このことから、温度上昇にしたがって非輻射中心の捕獲断面積が増加しキャリア・励起子が非輻射中心に捕獲されやすくなったことで説明できるとしている。さらに、約 $1\mu\text{m}$ の空間分解能をもつ蛍光顕微システムによる時間分解発光ダイナミクスを測定した結果、InGaN 井戸層内の発光強度や発光波長は勿論のこと、発光寿命にも空間的に著しい不均一性をもつことを明らかにし、これらの現象が転位や点欠陥などに起因した非輻射中心密度の面内不均一性によるものとして説明している。

第3章では、活性層面内のより空間的に微細な発光特性の分布を明らかにするため、近接場光学顕微鏡システム構築に関して述べている。従来の光学顕微鏡における回折限界を打破し得る近接場光を利用し、なお、青色から紫外の波長領域で稼動するシステムの構築に対して解決されなければならない問題を抽出して、ナノメータスケールの発光の空間分布解析を可能とする測定系を開発している。すなわち、一つの光ファイバーで試料を励起し、試料を通過・散乱された近接場光を外部の受光系で検出するイリュミネーションモード(I-mode)、および同一の光ファイバースロープで光励起と光検出を行うイリュミネーション・コレクションモード(I-C mode)の測定系を構築し、後者の系を採用することで、測定温度可変で30nmの空間分解能を達成することに成功している。

第4章では、前章で開発した近接場顕微鏡システムを用いて、ナノスケールの微小領域からの発光特性に対する評価について述べている。まず、開口径150nmのファイバースロープによって、 $4\times 4\mu\text{m}^2$ の範囲の発光分布を連続照射近接場顕微測定した結果、発光強度像と発光ピーク波長像に強い相関関係があることを見出すとともに、パルス光励起による時間分解近接場発光測定により、励起されたキャリア・励起子が量子井戸内に分布するナノサイズの低ポテンシャル領域へ拡散して

局在発光する空間的・時間的ダイナミクスを初めて明らかにしている。さらに、開口径 30nm のプローブを用いた連続照射近接場顕微測定から、数 10nm 以下の島構造を観測し、局在発光中心が多数の量子ドットの準位に基づくことを実験的に明らかにしている。また、これらの量子ドットの領域は互いに近接しており、エネルギー的には連続的に繋がっていることを明らかにした。これらのことから、励起された励起子・キャリアは面内を拡散で移動し、局在準位で発光するという、空間・時間スケールに関するより詳細な発光再結合モデルを提案している。

第 5 章は、本研究で得られた結果を纏めるとともに、InGaN 系発光デバイスの高性能化に向けてなお解決すべき課題と展望について論じている。

論文審査の結果の要旨

本論文は、青・緑色から紫外の波長領域で動作する InGaN 系発光デバイスの高性能化・高効率化には、微視的視点に立った詳細な光物性の解明が不可欠であるという観点から、発光デバイスの活性層において、本来ナノ構造に起因しているはずのキャリアの輻射、非輻射中心への局在、キャリアの拡散過程といったダイナミクスを通して発光機構を理解することにより、高性能化・高効率化に対する基本的指針を提示することを目的として研究した結果を纏めたもので、得られた主な成果は以下の通りである。

1. 蛍光顕微鏡による InGaN 量子井戸構造の発光の温度依存性、および、約 $1\mu\text{m}$ の空間分解能をもつ蛍光顕微システムによる発光の時間分解測定を行った結果、InGaN 井戸層内の発光強度、発光波長、発光寿命は空間的に著しい不均一性をもつことを明らかにし、転位や点欠陥などの非輻射中心の面内不均一性を示す結果を得ている。
2. 活性層面内の発光特性のより微細な空間分布を明らかにするための近接場光学顕微鏡システムを、青色から紫外の波長領域で稼動するシステムに再構築するとともに、同一の光ファイバースコープで光励起と光検出を行うイリュミネーションコレクションモードを採用することで、30nm の空間分解能を達成することに成功している。
3. 開口径 150nm のファイバースコープによる $4\times 4\mu\text{m}^2$ の範囲の発光分布を連続照射近接場顕微測定した結果、強度像とピーク波長像に強い相関関係があることを見出し、さらにパルス光励起による時間分解近接場発光測定によりキャリア・励起子が量子井戸内の低ポテンシャルへ拡散して局在発光する空間的・時間的ダイナミクスを初めて明らかにしている。
4. 開口径 30nm のプローブを用いた連続照射近接場顕微測定から、数 10nm 以下の島構造が観測され、局在発光中心が多数の量子ドットの準位に基づくことを実証した。さらに、これら量子ドットは互いに近接してエネルギー的に繋がっていることを明らかにした。このことから、励起子・キャリアは面内を移動し局在準位で発光するという、空間・時間スケールに関するより詳細な発光再結合モデルを提案している。

以上を要するに本論文は、InGaN 系半導体発光デバイス活性層におけるナノサイズの空間的な不均一性に対して極微顕微分光法による評価を行い、微視的な観点から InGaN 系の発光機構を明らかにし、この材料系の発光デバイスの高性能化に対する指針を提示したもので、学術上、実際に寄与するところが少なくない。よって本論文は博士（工学）の学位論文として価値あるものと認める。また平成15年2月21日、論文内容とそれに関連した事項について試問を行った結果、合格と認めた。