



HOKKAIDO UNIVERSITY

Title	設計可能なナノ加工プロセスを用いて作製した 半導体ナノ構造の光学特性に関する研究 [論文内容及び審査の要旨]
Author(s)	陳, 亜鳳
Degree Grantor	北海道大学
Degree Name	博士(工学)
Dissertation Number	甲第14131号
Issue Date	2020-03-25
Doc URL	https://hdl.handle.net/2115/78513
Rights(URL)	https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/
Type	doctoral thesis
File Information	Yafeng_Chen_abstract.pdf, 論文内容の要旨



学 位 論 文 内 容 の 要 旨

博士の専攻分野の名称 博士（工学） 氏名 陳 亜鳳

学 位 論 文 題 名

設計可能なナノ加工プロセスを用いて作製した 半導体ナノ構造の光学特性に関する研究
(Study on optical properties of semiconductor nanostructures created using designable nanofabrication processes)

InGaN や InGaAs などの III-V 族化合物半導体量子ドット (Quantum Dot:QD) は、その強い量子閉じ込め効果により電子系の状態密度が離散化し、高い光学利得と非常に低い消費電力特性を持つ光電デバイスの光学活性層への応用が期待されている。また、InGaAs や InAs QD では、電子スピンの緩和現象が抑制されることが知られており、電子のスピン状態を利用可能な新しい光デバイス材料としても注目されている。しかしながら、QD の持つこれらの優れた光学機能性を開拓する上では、その作製方法はまだ十分に確立されているとは言えない。例えば、QD を用いる発光ダイオードやレーザ素子の実用に向けて検討が進められてきた自己組織化による作製法では、QD のサイズや形状を設計することが難しく不均一性も生じやすい。また、QD における電子スピン状態を反映する円偏光発光特性に関しても、ナノ領域での振舞いは十分には理解されていない。

本研究はこのような背景を元に行われた。学位論文は以下の 6 章からなる。第 1 章では研究の背景を説明する。第 2 章では研究の課題を明らかにし、その課題を解決するための本研究の目的について述べる。第 3 章は、研究を行う上で必要な実験試料の作製方法と、試料の光学特性に関する測定方法を説明する。実際に得られた研究データと詳しい解析などの研究成果は、第 4 章と第 5 章に分けて詳述する。第 4 章では、緑色領域の光源材料として期待されている InGaN QD に関する研究内容と結果について述べる。数ナノメートルオーダーの大きさが設計可能なバイオナノテンプレートとプラズマダメージを十分に抑制可能な中性粒子ビームエッチングを用いて作製した、高 In 濃度かつ高密度の InGaN ナノディスク (Nanodisk:ND) 形状の QD において、発光再結合確率などのキャリアダイナミクスとその発光特性を明らかにしている。第 5 章では、InGaAs QD に関する研究内容と結果について述べる。自己組織化法により作製した InGaAs QD 層に対して直径が設計可能なポリスチレンビーズを用いたエッチングを行い、数十～数百ナノメートル領域のサイズを持つナノピラーに包含された QD の電子スピンダイナミクスとその結果生じる円偏光発光特性を研究した。第 6 章は全体のまとめである。

本研究では、緑色光源材料である InGaN QD と、電子スピン機能性の研究が進められている InGaAs QD に対して、以下の二つの課題を設定し研究を進めている。第 1 に、実用化が進められている InGaN の量子井戸 (Quantum Well:QW) では、高 In 濃度の QW 界面に生じる格子不整合歪みの影響により、QW 中に強い内部電場が発生し電子と正孔の波動関数が空間的に分離する。その結果、発光再結合確率が著しく低下することが知られている。この問題の解決には、格子歪みを緩和した電子系波動関数に強い閉じ込め効果を作用させる QD 構造の作製が本質的に有効である。そこで、直径 7 nm の非常に強い閉じ込め効果が期待できるバイオナノテンプレートを用いて、さらに極小のナノ構造におけるプラズマダメージを回避可能な中性粒子ビームエッチングにより、InGaN QW から高密度の ND 構造を作製し、その光学特性と関係するキャリアダイナミクスを明

らかにした。第 2 に、自己組織化 InGaAs QD 層に対して、光学的な閉じ込め効果が期待できる数百ナノメートル以下の微細構造を作製するため、ポリスチレンビーズをマスクとしたプラズマエッチングを行い、InGaAs QD に光学的に励起した電子スピン状態を反映する円偏光発光特性を明らかにした。

光学測定は以下のように行った。QD を取り囲むバリア層をフェムト秒パルスレーザで光励起し、QD からの発光スペクトルとその発光の時間特性をストリークカメラで測定することで、キャリアダイナミクスなどの知見を得た。InGaAs QD では、電子のスピン偏極状態を生成するために、円偏光フェムト秒パルスレーザ励起を行った。また、その発光のストリーク計測時にも円偏光特性を弁別し、電子スピン状態のダイナミクスに関する知見を得た。いずれの測定でも、温度を 4 K から室温まで変えた時間分解発光測定を行った。

第 4 章では、平均直径 7 nm、厚さ 2nm および 3 nm の InGaN ND における発光スペクトルとその時間特性を測定した。そして、発光強度の減衰特性を、ND の減衰時定数に分布を持たせた分布関数を導入することにより定量的に解析した。また詳細な温度依存性を測定し、発光再結合時定数と無輻射緩和時定数の温度依存性を明らかにした。その結果、ND 作製前の QW に比較すると、ND では発光再結合確率が 2 桁あまり増加し、格子歪みの緩和と波動関数に対する強い閉じ込め効果が生じていることを明らかにした。また、発光減衰特性における時定数の分布は、ND から正孔が熱励起によりバリア層に脱離する際、QW に本質的に存在する In 組成の不均一分布により、その正孔脱離エネルギーに分布があることで説明される。

第 5 章では、自己組織化 InGaAs QD 層を持つ直径 70 nm から 300 nm の GaAs ナノピラー構造を作製し、円偏光励起により生成した電子スピン状態を反映する円偏光発光スペクトルとその時間特性を測定した。低温では、ナノピラー試料において電子スピンの緩和が進み発光の円偏光度が低下する。これは、円偏光による電子スピン励起時にナノピラーにその励起光が閉じ込められるため、光生成される電子と正孔の波動関数の重なり起因するスピン緩和が促進されることで理解される。一方、室温にいたる高温領域では、逆にナノピラー試料からの円偏光度が顕著に増加する。発光の時間特性から、高温時に QD から熱脱離した電子が、ナノピラーバリア内で効率的に正孔と再結合していることがわかった。これに対し、ナノピラーに加工していない通常の QD 試料では、3 次元バリアに熱励起された電子のスピン状態がバリア中で緩和し QD に再注入するため、QD からの発光の円偏光度が減少する。

最後に、本研究では設計可能なナノ加工プロセスを用いて、高密度 InGaN の ND 形状の QD や、自己組織化 InGaAs QD 層を持つナノピラー構造を作製し、QD からの発光の時間特性とキャリアやそのスピン状態のダイナミクスを明らかにした。InGaN QD では発光再結合確率の著しい増大を観測し、緑色光源材料として有用であることを示した。InGaAs QD ではナノピラー内におけるキャリアとスピンドイナミクスを明らかにし、将来の光スピン機能性デバイスへの応用可能性を示した。