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_review.pdf, 審査の要旨

Hokkaido University Collection of Scholarly and Academic Papers : HUSCAP

学位論文審査の要旨

博士の専攻分野の名称　博士 (工学)　　氏名　陳 亜鳳

審査担当者　主　査　教　授　末岡　和久
副　査　教　授　本久 順一
副　査　教　授　富田 章久
副　査　教　授　村山 明宏

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）

III-V 族化合物半導体の量子ドット (Quantum Dot: QD) では、強い量子閉じ込め効果によりキャリア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デバイス光学活性層への応用が期待され研究が進んでいる。また、これらの QD では電子スピン偏極状態の緩和が抑制され、電子のスピン状態を利用する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、これらの優れた光学機能性を開拓する上で、QD の作製方法は十分に確立されているとは言い難い。一般に用いられる自己組織化法では QD の形状やサイズを設計することが難しく、また不均一性も生じやすい。QD における電子スピン状態は発光の円偏光特性に反映されるが、高効率光デバイスの作製に必要な光共振器への応用が可能なナノ構造における電子スピンや円偏光発光に関する特性は十分には理解されていない。

本論文は、これらの研究課題に対して、設計可能なナノ構造作製技術を検討し、将来の光デバイス材料として期待されている数 nm オーダーのサイズを持つ高密度 InGaN QD の作製や、自己組織化 InGaAs QD 層を包含する数十～数百 nm 領域のサイズを持つナノピラー構造を作製している。そして、作製した QD 試料に対して時間分解発光分光を行い、光励起キャリアのダイナミクスや電子スピン状態などの知見を含む光学特性を明らかにしている。

本論文では、上記第 1 の課題として、緑色光源材料として期待されている InGaN QD に関して、数 nm オーダーのサイズ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により高 In 濃度かつ高密度のナノディスク状 QD を作製し、発光再結合確率などのキャリアダイナミクスと発光特性を明らかにしている。次に、第 2 の課題として、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イオンエッチングを行い、数十～数百 nm のサイズを持つナノピラー構造に包含された 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ている。

まず、緑色光源として実用化が進められている InGaN 量子井戸 (Quantum Well:QW) では、発光波長の調整に必要な高 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し、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、格子歪みを緩和しまた波動関数に強い閉じ込め効果を作用させることが可能な、数 nm サイズの QD の作製が有効である。そこで、直径 7 nm のバイオナノテ

ンプレートと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 から高い光学利得が期待できる高密度 QD を作製した。平均直径は 5 nm、厚さは QW 膜厚である 2 および 3 nm である。時間分解発光測定において発光減衰時定数の分布関数を導入した解析を行い、QD 作製前の QW と比較して発光再結合確率が顕著に増加し、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、正孔が熱励起により QD からバリアに脱離する際、QW に存在する In 組成の不均一分布により正孔脱離エネルギーに分布があることで発光減衰時定数の分布が説明される。

次に、自己組織化法により成長させた InGaAs QD 層に対して、光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、直径 70〜300 nm の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。電子のスピン偏極状態は円偏光レーザ励起により生成し、発光測定時にも円偏光特性を弁別することで電子スピン状態に関する知見を得ている。その結果、QD 中のスピン偏極を反映する発光円偏光度が、通常の QD 試料に対して、ナノピラーに包含された QD 試料では室温にいたる高温領域において顕著に増加する。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、通常の QD で生じるバリアに熱励起されスピンが緩和した電子の QD への再注入が抑制されていることを明らかにした。

これは要するに, 著者は, 設計可能なナノ加工プロセスを用いて、InGaN や InGaAs の新規なナノ構造を作製し、緑色光源材料としての有用性や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ものであり, 半導体工学に対してナノ構造を用いた光学機能性の開拓として貢献するところ大なるものがある。よって著者は, 北海道大学博士 (工学) の学位を授与される資格あるものと認める。