



HOKKAIDO UNIVERSITY

Title	Electron spin dynamics of dilute nitride GaNAs quantum well - InAs quantum dots tunnel-coupled nanostructures [an abstract of dissertation and a summary of dissertation review]
Author(s)	佐藤, 紫乃
Degree Grantor	北海道大学
Degree Name	博士(工学)
Dissertation Number	甲第16005号
Issue Date	2024-03-25
Doc URL	https://hdl.handle.net/2115/92041
Rights(URL)	https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/
Type	doctoral thesis
File Information	Shino_Sato_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 佐藤 紫乃

学 位 論 文 題 名

Electron spin dynamics of dilute nitride GaNAs quantum well – InAs quantum dots tunnel-coupled nanostructures

(希薄窒化 GaNAs 量子井戸–InAs 量子ドットトンネル結合ナノ構造の電子スピンドYNAMICS)

近年、人工知能やクラウドコンピューティング等の利用拡大を受け、生成・処理される情報量が爆発的に増加しており、情報処理に係る消費電力を削減することは喫緊の課題である。そこで、低消費電力な情報技術として、金属強磁性体中の電子のスピンの情報を光のスピンの状態である円偏光に転写し光伝送する、光電スピン情報変換が注目されている。しかし、金属では原理的に光デバイスが作製できず、光電変換に必須の半導体では電子のスピンの情報が急速に失われてしまう。この問題を解決できる材料が、実用光デバイス材料として知られる半導体量子ドット (Quantum Dot; QD) である。QD では、電子と正孔が同一空間に閉じ込められるため発光再結合効率が高いことに加えて、三次元方向の量子閉じ込め効果により電子のスピンの偏極状態が長時間保持される。しかし、実用上重要な室温では QD から周囲のバリアへの電子の熱脱離、およびバリアでスピンの緩和した電子の再注入により発光の円偏光度が低下するという課題がある。そこで、本研究では室温で 90% もの世界最高の円偏光度を最近実現した希薄窒化ガリウムヒ素 (GaNAs) 量子井戸 (Quantum Well; QW) と InAs QD のトンネル結合ナノ構造に着目し、膜厚構成や配置を変えたトンネル結合ナノ構造の円偏光発光特性とその電子スピンドYNAMICSを研究した。

学位論文は以下の 8 章から成る。第 1 章では研究の背景を説明する。第 2 章では筆者が修士課程在籍中に実施した InGaAs QD に関する研究をもとに、温度上昇により円偏光度が低下するメカニズムについて詳述する。第 3 章では実験試料の作製方法と測定方法について説明する。また、GaNAs QW と InAs QD 間の電子スピン移動を考慮したレート方程式についても説明する。第 4 章では GaNAs QW–InAs QD トンネル結合ナノ構造に関する先行研究を取り上げ、その特徴について述べる。続く第 5 章、第 6 章そして第 7 章では、筆者が実際に作製した GaNAs QW – InAs QD トンネル結合ナノ構造の円偏光発光特性について説明する。第 5 章では GaNAs QW と InAs QD を隔てる GaAs トンネルバリアの膜厚、第 6 章では GaNAs QW の膜厚、そして第 7 章では InAs QD に対する GaNAs QW の配置を変え、GaNAs QW が InAs QD の円偏光発光特性に与える影響を網羅的に調べた。第 8 章は全体のまとめである。

本研究では、室温で高い発光円偏光度が報告されている GaNAs を利用し、QD の高輝度発光と高円偏光発光の両立を目指している。GaNAs では、室温で高効率に働く深い局在準位のスピンフィルタリング効果により伝導電子のスピンの偏極が増幅されるため、電子のスピンの偏極度を反映する発光の円偏光度も高くなる。しかしながら、多くのキャリアが局在準位に捕獲されて発光強度が低下するため、量子構造の最適化が必要である。したがって、本研究では GaNAs QW の膜厚や配置、そして GaAs トンネルバリアの膜厚を変えた試料を作製し、量子構造の設計指針を得ることを目的として研究を行った。

実験手順は以下のとおりである。RF 窒素プラズマ支援分子線エピタキシー法により半絶縁性

GaAs(100) 基板上に GaNAs QW-InAs QD トンネル結合ナノ構造を作製した。比較用として、GaNAs QW のない InAs QD 試料も作製した。試料の円偏光発光特性は、時間分解円偏光フォトルミネッセンス (Photoluminescence; PL) により評価した。GaAs バリアのバンドギャップエネルギー相当の波長をもつフェムト秒パルスレーザーを励起光とし、直線偏光子と 1/4 波長板を用いて右回り円偏光とした。GaAs バリアで生成されたスピン偏極キャリアは QW や QD へ注入され、QD からの円偏光発光を測定した。

第 5 章では、GaNAs QW-InAs QD トンネル結合ナノ構造における研究の出発点として、GaAs トンネルバリアの膜厚を変えた試料について研究した。トンネルバリアが薄い試料では QD の発光強度は低下するが発光円偏光度は逆に増加した。トンネルバリアが薄いほど QW と QD の電子波動関数の結合が強くなり、QD の円偏光発光特性に対する GaNAs の寄与が強くなったことに起因する。本研究では 20 nm の GaNAs QW の上部に InAs QD を作製したため、トンネルバリアが薄いと GaNAs 層の歪みの影響を受け、上部に成長する QD 構造が変化する可能性があったが、トンネルバリアの膜厚による QD 構造の違いはなかった。そのため、続く第 6 章と第 7 章では、トンネルバリアの膜厚を最薄の 3 nm に固定した。

第 6 章では、GaNAs QW の膜厚が InAs QD の円偏光発光特性に与える影響を時間分解円偏光 PL により調べた。円偏光度の時間変化が GaNAs QW の膜厚によって異なることがわかった。電子スピンダイナミクスは、GaNAs QW と InAs QD 間の電子スピン移動および GaNAs 局在準位のスピン捕獲を考慮したレート方程式解析により評価した。まず、QW 膜厚が最も薄い試料 (5 nm) では、GaNAs 局在準位のスピン捕獲時間がスピン方向によって大きく異なることがわかった。QD から GaNAs 局在準位に少数個スピンは急速に移動するが多数個スピンは QD 内に留まることで、発光中に増幅された円偏光度が減衰せずに長時間保持された。一方で、QD の発光に寄与できる局在準位の数が少ないため、増幅にかかる時間は長くなった。次に、QW 膜厚が中程度の試料 (10 nm) では、GaNAs QW と InAs QD の準位がエネルギー的に近く QW と QD 間で電子スピンの移動しやすいため、QD の円偏光発光特性に対する GaNAs の寄与が強くなり、最大円偏光度が最も高くなった。最後に、QW 膜厚が最も厚い試料 (20 nm) では、QW でのスピン偏極の増幅および QW から QD へのスピン注入が速くなり、円偏光度の高速増幅現象が観測された。

第 7 章では、これまで QD の下部に存在した GaNAs QW の配置を変えて、上部、下部、上下両方に QW を持つ 3 種類の試料を作製し、GaNAs QW の配置が QD の円偏光発光特性に与える影響を調べた。QW が下部にある試料と上部にある試料の比較から、QW 膜厚が同じであるにもかかわらず、QW を下部に配置する方が QD の円偏光発光特性が向上することがわかった。さらに、上下両方に QW を持つ試料は下部のみに QW を持つ試料よりも GaNAs の影響を強く受けることもわかった。しかし、その結果は下部と上部の QW からの影響の和では説明できず、QD の上下両方に QW を配置することによる複雑な電子波動関数の結合状態が関係する可能性が示唆された。

最後に、本研究では GaNAs QW と InAs QD のトンネル結合ナノ構造において、膜厚構成や配置を変えることで、電子スピンダイナミクスが大きく変容されることがわかった。特に、GaNAs QW の膜厚を変えることで、GaNAs のスピン増幅効果の強さだけでなく QD へのスピン注入時間も制御できることがわかり、高速でスピン偏極を高め、円偏光に高効率に変換するための量子構造の設計指針が得られた。