



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_review.pdf, 審査の要旨



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 佐藤 紫乃

審査担当者 主 査 准教授 樋浦 諭志

副 査 教 授 本久 順一

副 査 教 授 末岡 和久

副 査 教 授 村山 明宏

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)

高度情報社会の創出に向けて様々な情報エレクトロニクスの研究が進められているが、情報処理に関わる消費電力を削減することは極めて重要な課題である。低消費電力の情報処理を目指す技術として、電子のスピンの情報をエレクトロニクスに活用するスピントロニクスが注目されている。金属強磁性体中の電子スピンの偏極状態は室温で安定であり、スピン偏極を不揮発性のスピン情報として扱い保存することができる。このスピントロニクスにおいては、電子のスピンの情報を光のスピンの偏極状態である円偏光に転写し光情報として伝送する光電スピン情報変換が重要になってきている。しかしながら、光電変換に必須のデバイス材料である半導体では、特に実用に不可欠な室温動作時に電子のスピンの情報が急速に失われてしまう。このような室温での光電スピン変換の課題を解決できる材料として、実用光デバイス材料である III-V 族化合物半導体の量子ドットが注目されている。

この量子ドットでは、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の効率が高いことに加えて、3次元方向からの強い量子閉じ込め効果により電子のスピンの偏極が発光再結合中も高く保持される。しかしながら、実用を目指した量子ドット光電スピン情報変換の実現に向けては、室温動作時におけるデバイス層構造中の電子スピンの偏極の緩和によるスピンの情報の損失を補償するような光電変換デバイスの考案なり機能開拓が必要である。

そこで本論文では、このような研究課題に対して、室温において効率的に電子のスピンの偏極度を高めることができる希薄窒化ガリウムヒ素 (GaNAs) の量子井戸を用いて、量子ドットに注入する電子に加えて、注入後に熱的に脱離し再注入される電子のスピンの偏極度も高めることで、量子ドットを光学活性層とする光電スピン変換の室温での特性を高める研究を行っている。具体的には、InAs 量子ドットと GaNAs 量子井戸のトンネル結合ナノ構造に着目し、トンネルバリアや井戸の膜厚、結合配置などを変えた試料を作製し、スピン偏極電子の光電変換時に得られる発光のスピンの偏極である円偏光特性により光電スピン変換特性と関連する一連の電子スピンドYNAMICSを研究している。その結果、InAs 量子ドットと GaNAs 量子井戸のトンネル結合ナノ構造において、電子スピンの注入とスピン保存再結合のDYNAMICSに加えて、GaNAs 中の局在準位によるスピン捕獲DYNAMICSの影響を明らかにしている。その結果、GaNAs 井戸の膜厚による円偏光発光強度とその円偏光度の定量的な関係を明らかにし、光電スピン変換に向けた発光デバイスの高周波動

作において必要となる高速スピン増幅の実現に向けた量子構造の設計指針を得ている。

第1章は研究の背景を説明し、第2章は本研究の端緒となった量子ドットにおける電子スピンドイナミクスに関する著者の研究をもとに、本研究の目的を述べている。第3章は実験試料の作製方法と測定方法、解析手法について説明している。半導体試料の作製は、RF窒素プラズマ支援分子線エピタキシー法により行い、光電スピン変換性能や高速応答性を明らかにするために、時間分解円偏光発光測定を行っている。第4章からは実験結果であり、まずInAs量子ドットとGaNAAs量子井戸に関するトンネルナノ構造の基本特性について述べている。第5章はGaAsトンネルバリアの膜厚を変えた試料について研究している。第6章はGaNAAs量子井戸の膜厚がInAsドットの円偏光発光特性に与える影響を詳しく調べ、光電変換時のスピン偏極度を示す円偏光度の時間変化がその膜厚によって異なることを明らかにしている。そして、その電子スピンドイナミクスについて、井戸ドット間の電子スピン移動およびGaNAAs局在準位のスピン捕獲を考慮したレート方程式により解析している。井戸膜厚が5 nmの試料では、GaNAAs局在準位のスピン捕獲時間がスピン偏極方向によって大きく異なり、GaNAAsにより増幅された発光円偏光度が長時間保持される。井戸膜厚が10 nmの場合、井戸ドット間の電子スピン移動が促進され、最大となる円偏光度が最も高くなった。20 nmの試料では、GaNAAsでのスピン偏極の増幅およびドットへのスピン注入速度が速くなり、円偏光度の高速な増幅現象が観測されている。第7章は、デバイス層構造中のGaNAAs井戸の配置がドットの円偏光発光特性に与える影響を調べている。第8章は本論文の結論を述べている。

これは要するに、著者は、希薄窒化ガリウムヒ素 (GaNAAs) 量子井戸と InAs 量子ドットのトンネル結合ナノ構造において、トンネルバリアや井戸の膜厚、層構造を変えることで、実用上重要な室温における電子スピン情報の光電変換時のスピン損失を補償しうる機能を制御できることを明らかにし、スピン情報の光電変換を可能にするデバイスの設計指針を得ており半導体工学に貢献するところ大なるものである。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。