



HOKKAIDO UNIVERSITY

Title	Temperature Dependence of Electric Field Control of Electron Spin Polarization in Semiconductor Quantum Well-Dot Coupled Nanostructures [an abstract of dissertation and a summary of dissertation review]
Author(s)	朴, 昭暎
Degree Grantor	北海道大学
Degree Name	博士(工学)
Dissertation Number	甲第15543号
Issue Date	2023-03-23
Doc URL	https://hdl.handle.net/2115/89813
Rights(URL)	https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/
Type	doctoral thesis
File Information	Soyoung_Park_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 朴 昭 暎

学 位 論 文 題 名

Temperature Dependence of Electric Field Control of Electron Spin Polarization in Semiconductor Quantum Well-Dot Coupled Nanostructures

（半導体量子井戸-ドット結合ナノ構造における電子スピン偏極の電界制御の温度依存性）

低消費電力の情報処理や光通信を目指して、情報の処理や保存に用いる電子情報と伝送に用いる光通信の間で、シームレスに情報を変換する光電情報変換が注目されている。そして、光電変換デバイスの光学活性層の材料として、高い光学利得と低消費電力特性を持つ半導体量子ドット (Quantum dot, QD) を利用する研究が盛んである。この QD では、強い量子閉じ込め効果により、電子スピンの緩和メカニズムが抑制されるため、長い電子スピン寿命が期待される。しかし、この電子スピン機能を生かしたデバイスの実現には、電子スピン偏極の外場制御が必要になる。これまで、磁石の性質を持つ電子スピンは磁場で制御されてきた。そこで、スピン操作の手段としてエレクトロニクスの基本技術である電界を利用した電界効果光電変換デバイスができれば、様々な応用が期待できる。実際に QD を用いた半導体量子構造において、発光時の電子スピン偏極を電界により制御することが可能になってきている。しかしながら、その動作は極低温に限られているため、実用上重要な、電界による電子スピン偏極の制御を可能にする光電変換デバイスの室温動作を目指すことにした。

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 7 章からなる。第 1 章では研究の背景を説明する。第 2 章では先行研究を紹介し、今後解決すべき課題と、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 章では実験試料のデバイス作製方法と測定方法を説明する。測定により得られた研究データと解析などの研究成果は、第 4 章、第 5 章そして第 6 章に分けて詳述する。第 4 章では、スピン注入源である InGaAs 量子井戸 (QW) と InGaAs QD のトンネル結合構造における、室温での電子スピンドायナミクスの電界効果について述べる。第 5 章はバリアとのエネルギー差が室温の熱エネルギーより大きい InAs QD と InGaAs QW の結合構造における、デバイスの発光特性の電界及び温度依存性を調べた。第 6 章では、室温で優れたスピン偏極特性を可能にする GaNAs QW と InAs QD の結合構造における室温での電子スピンドायナミクスの電界効果について述べる。第 7 章は全体のまとめである。

本研究では、電界によるスピン操作を可能にする光電変換デバイスの室温動作を実現するため、QW-QD 結合構造を用いたスピン機能光デバイスに対して、以下の 2 つの課題を設定し研究を進めている。第 1 に、光電変換デバイス室温動作を実現するためには、室温でのスピン偏極特性とその偏極特性を反映したデバイス発光特性を明らかにする必要がある。実用上重要な室温では、スピン偏極電子が QD からバリアへ熱脱離しスピンの緩和が促進される。その後 QD に再注入されるため、QD のスピン偏極特性が低下してしまう。この問題を解決するためには、電子スピンの熱脱離を抑制する方法を工夫しなければならない。第 2 に、室温においては上述した熱脱離に加えて、本質的なスピン緩和が生じる。そこで、バリアとエネルギー差が室温の熱エネルギーより大きい InAs QD と、室温でスピン偏極を増幅することが可能な GaNAs QW を導入した光デバイスを作製し、その発光

特性と電子スピンドायナミクスの電界および温度依存性を明らかにした。

実験は以下に行った。分子線エピタキシー法により電気伝導性の p 型 GaAs 基板上に、QW と QD の結合構造を含む半導体積層構造を作製した。そして、半導体構造の表面に光学窓を設けた金属電極層を作成し、積層方向に電場を印加した。そして、GaAs バリアのバンドギャップエネルギーに相当する波長を持つフェムト秒パルスレーザで光励起した。バリアに生成された電子スピンは QW に集められ、電界に応じてトンネル効果により QD へ注入される。QD に注入された電子スピンの偏極状態は、QD からの発光の円偏光特性を測定することにより定量的に検出できる。そこで、QD からの発光スペクトルとその円偏光特性、さらにはその時間特性を測定した。

第 4 章では、InGaAs QW-QD 結合構造における室温での電子スピンドायナミクスの電界依存性とその時間特性を明らかにした。その結果、電界により円偏光の偏り度合い (円偏光度) を 10 % 以上変えることに成功した。この場合、室温でも電界からのポテンシャル勾配により、QD へ注入される電子と正孔の数の割合を制御できる。そして、電子スピンの注入が促進される電圧範囲では、スピン緩和時間が減少した。電子スピンの反転時間を含めるレート方程式を利用して発光の時間特性を解析した結果、室温においてもスピン反転散乱が有効に生じていることがわかった。QD への電子スピン注入が加速されるバイアス条件では、QD の基底状態に存在する残留電子により、スピンの極性が反転して発光するスピン反転散乱が起きるため、負の値を持つ円偏光度が観察される。一方、温度の増加につれて基底状態の残留電子は熱励起されてスピン反転散乱が抑制されるため、負の円偏光度はある温度で喪失する。しかし、室温でも電界による有効なスピン反転散乱が生じており、その結果、円偏光度が電界で制御できることがわかった。

第 5 章では、電子スピンの熱脱離を抑制するために、InGaAs QW と InAs QD の結合構造を導入し、電子スピン特性の電界操作に対する温度依存性を調べた。低温では、縦型光学 (LO) フォノンの放出を含めた QW-QD 間共鳴トンネリングにより発光強度が電界に依存して振動する。QW と QD 間のエネルギー差が LO フォノンのエネルギーに相当すると、QW から QD へ電子トンネルする際、高速で LO フォノンを放出しエネルギー緩和するため、QD へのスピン注入効率が増加する。また、電子スピンの熱脱離によりスピン反転散乱が抑制される温度が InGaAs QD より高温側にシフトすることが分かった。しかし、室温では、スピン緩和時間より長い発光寿命により円偏光度は低下する。

第 6 章では、室温でのスピン偏極特性を高めるために、GaNAs QW と InAs QD の結合構造を用いた光電変換デバイスを作製し、室温での電子スピンドायナミクスの電界依存性を調べた。この構造では、GaNAs のバンドギャップ内に存在する深い局在準位によるスピントラップ効果を通じて注入電子のスピン偏極度を増幅させることが可能になり、QD の円偏光度が増加する。これは、局在準位が効率的に少数個スピンを捕獲するフィルタとして作用するため、QD への多数個スピン注入が促進されることにより説明される。このスピントラップ効果により、QD の励起状態で電界に依存して最大 30 % に達する高い円偏光度が得られた。また、円偏光発光の時間特性から、スピントラップ効果によるスピン増幅率は電圧に強く依存していることを明らかにした。

最後に、本研究では、異なる材料の QW-QD 結合構造を用いた電界印加型光電変換デバイスにおいて、室温でも電界による電子スピン偏極の制御が可能であることを明らかにした。特に、室温でも電界に依存するスピン反転散乱を観測し、スピン情報の電界操作を用いた光電変換デバイスへの応用可能性を示した。