



HOKKAIDO UNIVERSITY

Title	Study on effects of electric field on optical electron-spin injection into InGaAs quantum dots [an abstract of dissertation and a summary of dissertation review]
Author(s)	陳, 杭
Degree Grantor	北海道大学
Degree Name	博士(工学)
Dissertation Number	甲第13728号
Issue Date	2019-09-25
Doc URL	https://hdl.handle.net/2115/75947
Rights(URL)	https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/
Type	doctoral thesis
File Information	Hang_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 杭

学位論文題名

Study on effects of electric field on optical electron-spin injection into InGaAs quantum dots
(InGaAs 量子ドットへの光学的電子スピン注入に対する電場の効果に関する研究)

III-V 族化合物半導体量子ドット (Quantum Dot:QD) は、強い量子閉じ込め効果による電子系の状態密度の離散化により、高い光学利得や非常に低い消費電力特性を持つ将来の光電変換デバイスの光学活性層への応用が大いに期待されている。同時にこの QD では、電子スピンの緩和現象が抑制されることも報告されており、電子スピンの持つ機能性を生かした新しい情報エレクトロニクスやそのためのデバイスの材料としても非常に注目されている。このような QD の特性を生かした光デバイスとしては、電子スピンの情報を光のスピン情報である円偏光特性に変換可能な発光ダイオードやレーザなどのスピン情報の光電変換デバイスが考えられる。このスピン機能性光電変換を実現するためには、スピン偏極した電子や電流を QD へと輸送し注入する、QD へのスピン注入技術を確立する必要がある。

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した。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研究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その特性を測定する実験方法について説明した。実際の研究内容と得られた成果については、第 4 章と第 5 章に分けて詳述している。第 4 章では、高いスピン偏極を保ちながら QD へと電子を注入するための手法とその検討結果を述べる。第 5 章では、QD へのスピン注入時にそのスピン偏極の極性を電場により反転制御可能な技術の提案について述べる。第 6 章は全体のまとめである。

本研究では、電子のスピン偏極を保持した QD へのスピン注入技術の研究のため、以下の二つの手法を組合せることを新たに提案する。一つは、様々なデバイス構造に用いられる半導体の層状構造と容易に積層可能な 2 次元電子系である半導体量子井戸 (Quantum Well:QW) と、空間的に孤立した点状の 0 次元電子系である QD 層をトンネルバリアを介して量子力学的に結合したエピタキシャル結晶構造の活用である。この QW/QD 結合構造では、平面状の積層デバイス構造において輸送されるスピン偏極電子をいったん QW で捕獲した後、そのスピン偏極が緩和する前に、原理的にスピンの緩和しないトンネル効果によりスピン偏極電子を QD へと超高速注入することが可能になる。そして、この QW/QD 結合構造からなる光学活性層に対して、外部から電場を印加した。この電場の印加により、QW/QD 結合ポテンシャルを外部から精密に制御することが可能になる。

実験は以下のように行った。まず、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、InGaAs の組成を変えた QW/QD 結合構造を含む半導体積層構造を作製した。この QW/QD 結合構造中に、膜厚を 8-20 nm と変えた GaAs トンネルバリアを挿入した。さらに、この光学活性層の上下には AlGaAs バリアを設けている。そして、これらの半導体積層構造の表面に光学窓を設けた金属電極層を作製し、p 型基板との間に電場を印加した。次に、光学特性と電子スピン注入特性の測定は以下のように行った。QW のバンドギャップエネルギーに合わせた波長を持つ円偏光を試料表面の光学窓から照射する。すると、QW 内にスピン偏極電子正孔対が選択的に光励起され

る。QW 内のスピン偏極電子は、外部電場により変調された QW/QD 結合ポテンシャルに依存して、QD 内へとトンネル効果により注入される (光学的スピン注入)。そこで、QD からの発光スペクトルとその円偏光特性、さらには円偏光発光の時間特性を測定することで、QD 内に注入された電子のスピン偏極特性やその注入ダイナミクスなどの知見を得た。スピン状態への熱擾乱を避けて量子力学的過程を明らかにするため、4 K において光学測定を行った。

まず第 4 章では、スピン偏極を保った QD への電子の注入現象 (スピン注入) とその電場依存性について明らかにした。トンネルバリア厚さが 8-10 nm の場合、特定のバイアス電圧印加条件において、QW 内で生成されたスピン偏極電子がそのスピン状態を高く保ったまま QD へと注入されることを明らかにした。そこで、このような QD への効率的なスピン注入が可能になる機構について研究した。層状に広がる 2 次元電子系の QW と 0 次元のナノ構造である QD の量子力学的な結合状態は未だ十分には理解されていない。電子に対するシュレーディンガー方程式を有限要素法により計算することで、2-0 次元間の電子波動関数の結合状態を明らかにすることができる。その結果、QW の基底状態に近い電子状態が、QD の結晶成長時に同時に成長する数層以下の 2 次元原子層である Wetting Layer を介して、高次の QD 励起状態と共鳴結合した特異なスピントンネルが生じていることを明らかにした。電場を印加することにより、このような共鳴スピントンネル注入を可能にする結合ポテンシャル変調を実現した。

第 5 章では、同様の試料構造を用いて、QD へのスピン注入時にそのスピン偏極の極性を電場の効果により反転制御可能な技術を提案する。この技術は以下の現象に基づいている。QW/QD 結合ポテンシャル勾配を電場で変調すると、QW から QD に注入するスピン偏極電子と正孔の数の比を制御することができる。正孔 1 個に対して電子が 2 個となる負の荷電励起子が QD 励起状態に生成されると、電子と正孔間のスピン散乱により電子スピン極性が反転し、基底状態における正孔との再結合発光の円偏光特性も反転する。すなわち、QW に生成したスピン偏極電子を QD にスピン注入する過程において、そのスピン極性と発光の偏光特性を特定のバイアス印加により反転させる QD へのスピン反転注入を可能にした。第 4 章の結果と合わせると、QW から QD へのスピン注入において、QD でのスピン極性とその結果生じる発光の円偏光特性 (光のスピン極性) を外部からの印加電圧を変えることにより維持あるいは反転させる制御が可能な技術を提案することができた。さらに、QW での光励起スピン密度を変えることにより、このスピン極性の制御特性を最適化し、スピン偏極度にして 30% 以上の極性反転特性を得ることができた。

最後に、本研究では、2 次元電子系から量子ドットへの光学的スピン注入において、量子ドットに注入する電子のスピン極性やスピン偏極度とその結果生じる発光の円偏光特性を維持あるいは反転させる、電場によるスピン注入の制御が可能であることを明らかにした。