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_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　杭

審査担当者　主　査　教　授　植村　哲也
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

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）

近年 III-V 族化合物半導体の量子ドット (Quantum Dot: QD) は, その強い量子閉じ込め効果により高い光学利得や極めて低い消費電力特性が得られるため, レーザ素子などの光電変換デバイスの光学活性層への応用が盛んに研究されている。この QD では, 同時に, 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デバイスの材料として非常に注目されている。なお, 電子のスピン偏極は, 光電変換時の光学遷移の円偏光特性に直接的に情報変換される。しかし, このような QD における電子スピン情報の利用やスピン機能性を生かした低消費電力の光電変換技術を実現するためには, スピン偏極などのスピン情報を極力消失することなく電子を QD へと輸送し注入することが可能な QD へのスピン注入技術の発展が待たれている状況にある。

本論文は, このような現況にある QD への電子スピン注入について,InGaAs 量子井戸 (Quantum Well: QW) と QD のトンネル結合型の積層構造に対して外部から電場を印加することにより,QW に光生成したスピン偏極電子の QD へのスピン注入現象を QD からの円偏光発光特性により研究し,QD へのスピン注入におけるスピン情報の損失を抑制可能なトンネル結合ポテンシャルに関する知見を得る目的で行われた。

本論文では, 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 QW と, 空間的に孤立した点状の 0 次元電子系である QD 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試料を用いている。そして, この QW/QD 結合構造からなる光学活性層に対して電場印加が可能なデバイス構造を作製し,QW/QD 結合ポテンシャルを外部からの電場により精密に制御することを可能にした。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, 原理的にスピンが緩和しないトンネル効果によりスピン偏極電子を QD へと注入することが可能になる。実験では,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照射し QW 内にスピン偏極電子正孔対を選択的に光励起する。そして,QD からの円偏光発光スペクトルとその時間特性を測定することで, 外部電場に依存する QW/QD 結合ポテンシャルの効果により QD へと注入される電子のスピン特性やその注入ダイナミクスなどの知見を得ている。

本論文ではまず, スピン偏極を保持した QD への電子のスピン注入現象とその電場依存性について明らかにしている。すなわち, 特定のバイアス印加条件において,QW のスピン偏極電子がそのス

ピン状態を高く保持したまま QD へと注入されることを実験的に明らかにした。この機構について検討を行い,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,QW の 2 次元電子状態が高次の QD 励起状態と共鳴的に結合することにより, スピン偏極度を高く保持しつつ高い確率で電子が QD へと注入されるスピントンネルが生じていることを明らかにした。このような次元性の異なる量子構造間でのスピン注入の機構を明らかに出来たことは,QD へのスピン注入技術の確立に向けた有用な知見である。

次に, 同様の QW/QD 結合構造を用いて,QW から 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可能な技術を新たに提案している。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。その結果,QW から QD へのスピン注入過程における電子正孔間スピン散乱に起因して, 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 へのスピン注入を可能にしている。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% 以上の極性反転が得られることを示している。このような大きなスピン偏極度を持つ電子のスピン極性を電場のみで反転させる技術は独創的であり, 半導体中のスピン制御技術の確立に向けた知見として有用である。

これは要するに, 著者は, 半導体量子ドットへの光学的電子スピン注入において, 注入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電場により保持あるいは反転させる新知見を得たものであり, 電子スピン特性を活用する半導体工学に対して電場によるスピン注入の制御技術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。