



HOKKAIDO UNIVERSITY

Title	スピン偏極発光ダイオードにおける電子スピン保持輸送とスピン増幅発光に関する研究〔論文内容及び審査の要旨〕
Author(s)	江藤, 亘平
Degree Grantor	北海道大学
Degree Name	博士(工学)
Dissertation Number	甲第16506号
Issue Date	2025-03-25
Doc URL	https://hdl.handle.net/2115/95026
Rights(URL)	https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/
Type	doctoral thesis
File Information	Kohei_Etou_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 江藤 亘平

審査担当者 主 査 特任教授 村山 明宏

副 査 教 授 植村 哲也

副 査 教 授 末岡 和久

副 査 准教授 樋浦 諭志

学位論文題名

スピン偏極発光ダイオードにおける電子スピン保持輸送とスピン増幅発光に関する研究
(Study on spin-conserved electron transport and spin-amplified luminescence in spin-polarized light-emitting diodes)

高度情報社会の持続的発展において、情報エレクトロニクス機器の省エネルギー化が必須である。そこで、待機電力なしに情報を保持できる磁気スピンメモリとエネルギーの熱損失なしに情報を高速伝送できる光配線が注目されている。電子スピンを情報キャリアに用いるスピントロニクス技術を基盤とした不揮発性スピンメモリと光配線を同時に活用するためには、電子のスピン偏極状態を光のスピン状態である円偏光に転写し光伝送するための光電スピン変換デバイスの開発が重要である。その代表的な半導体光デバイスがスピン偏極発光ダイオード(スピン LED)であるが、実用上重要な室温かつ高速動作に必須の高電圧下においてスピン LED の発光円偏光度が大きく低下してしまうという課題がある。さらに、その要因となるスピン偏極の損失が支配的に生じる半導体層が明らかにされておらず、性能を向上させるための具体的なデバイス設計指針も明らかでない。

本論文では、このような研究課題に対して、電気的スピン注入による円偏光発光分光と光学的スピン注入による時間分解円偏光発光分光を組み合わせ、半導体バリア層でのスピン輸送効率と光学活性層でのスピン光変換効率を定量的に分離評価している。その結果、室温かつ高電圧下ではスピン輸送効率は 10 パーセントと低く、これがスピン LED の性能を低下させる主要因であることを明らかにしている。この低いスピン輸送効率に対する対策として、室温で電子のスピン偏極を効率的に高めることが可能な希薄窒化ガリウムヒ素(GaNAs)を量子ドット光学活性層にトンネル結合させている。半導体バリア層でのスピン輸送中に失われた電子のスピン偏極を活性層への注入後に高めることで、高電圧下でも高い発光円偏光度を維持できることを示している。また、スピン輸送効率を改善させるための対策として、半導体超格子バリアの量子波を用いた電子スピン輸送に着目している。電界印加下での光学的スピン注入による円偏光発光特性を測定し、超格子バリアの電子スピン輸送特性を研究している。その結果、励起光エネルギーに依存したスピン輸送ダイナミクスに加えて、超格子バリアの優れた電子スピン輸送機能を明らかにしている。

第 1 章は研究の背景を説明し、第 2 章はスピン LED の動作原理について強磁性体から半導体への電子スピン注入、半導体バリア層での電子スピン輸送、光学活性層での発光再結合という各過程に分けて詳述している。第 3 章はスピン LED の課題と課題を解決するための研究目的について述べている。第 4 章では研究方法を説明している。p 型 GaAs(100) 基板上に量子ドット光学活性層を含む pin 半導体層をプラズマ支援分子線エビタキシー法により作製し、Fe/MgO スピン注入層は

電子線蒸着法により作製している。試料の円偏光発光特性は、電氣的スピンの注入と光学的スピンの注入により評価している。第5章の第1節では、p ドープ量子ドットを活性層に用いたスピン LED の発光円偏光度の温度依存性が注入電流によって大きく異なることを明らかにしている。この結果を定量的に解釈するためのモデルを構築し、半導体バリア層のスピンの輸送効率を評価している。第5章の第2節では、量子ドット光学活性層に GaNAs 量子井戸をトンネル結合させ、発光円偏光度の電圧依存性と励起スピン密度依存性を研究している。その結果、活性層への注入後にスピン偏極が高められ、室温かつ高電圧下で高い円偏光度が維持されることを明らかにしている。第5章の第3節では、室温かつ電界印加下での超格子バリアから量子ドット発光層への電子スピンの輸送特性を研究している。その結果、印加電圧の増加とともに超格子バリアから量子ドットへの効率的な電子輸送が実現することを明らかにしている。また、量子ドット層と超格子層で同等の電子スピン偏極率が得られ、超格子バリアから量子ドットへの電子スピン保持輸送が室温かつ電界印加下でも実現できることを明らかにしている。第6章は本論文の結論を述べている。

これは要するに、著者は、半導体量子ドットを光学活性層に用いたスピン偏極発光ダイオードにおいて、希薄窒化ガリウムヒ素を活性層の近傍に導入することや超格子バリアを電子スピンの輸送層に用いることで、実用上重要な室温かつ高電圧下で高性能動作が可能であることを明らかにし、高速動作が可能な光電スピン変換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。