



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_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 江藤 亘平

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)

近年、データ通信量の急激な増大とクラウドコンピューティングの普及により、データセンターの消費電力が増加している。そこで、省エネルギーに情報を記憶・伝送できる光電スピン融合技術が注目されている。光電スピン融合は、電力消費なしに情報を保持する磁気スピンメモリと熱損失なしに情報を高速伝送する光配線、そして電子のスピン偏極情報を光のスピン状態である円偏光へ光電変換するスピン偏極発光ダイオード (スピン LED) によって構成される。しかし、このうち実用上重要な室温で安定動作が実証されているのは磁気スピンメモリと光配線である。これは、高速動作に必須の高電圧下ではスピン LED の発光円偏光度が低下するためであるが、スピン偏極の緩和が支配的に生じる半導体層は明らかにされていない。そこで、本研究ではスピン LED 動作時の電子スピン輸送層と活性層でのスピン緩和を定量的に分離評価する方法を見出した。また、電界印加下での超格子を用いた電子スピン保持輸送と希薄窒化 GaNAs によるスピン輸送後のスピン増幅発光を実現した。

学位論文は以下の 6 章から成る。第 1 章から第 4 章では研究背景や研究方法について述べ、第 5 章では研究結果について述べる。第 5 章の第 1 節では、量子ドットを活性層に用いたスピン LED 動作時のスピン偏極消失過程について論じる。同章第 2 節では、室温で電子のスピン偏極を増幅できる希薄窒化 GaNAs 量子井戸層を量子ドット活性層に隣接させたスピン LED の電流注入円偏光発光特性について論じる。同章第 3 節では、原理的に電子スピン状態を保持できる GaAs/AlGaAs 超格子をバリア層へ導入し、室温かつ電界印加下での超格子バリアの電子スピン輸送特性について論じる。第 6 章は本研究のまとめである。

本研究の目的は、スピン LED の電子スピン輸送と発光再結合過程で生じるスピン緩和の定量評価手法の確立と、室温かつ高電圧下で高性能動作を実現するスピン LED の開発である。スピン LED の動作においては、強磁性体電極から半導体層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、活性層での発光再結合が順番に生じる。しかし、電子スピン輸送時に散逸するスピン偏極の程度を定量評価する方法はない。そこで、本研究ではスピン LED 動作時のスピン輸送効率を評価する方法を見出し、その結果として明らかになった低いスピン輸送効率に対する解決策として、超格子バリアを用いた電子スピン保持輸送と希薄窒化 GaNAs を利用したスピン増幅発光について提案する。

研究方法について述べる。測定試料は全て p-GaAs(100) 基板上に pin 半導体層と Fe 系強磁性層を持つ量子ドット LED である。半導体層はプラズマ支援分子線エピタキシー法により作製し、強磁性層は電子線蒸着法により作製した。試料の円偏光発光特性は、電流注入発光 (EL) とフォトルミネッセンス (PL) により評価した。なお、EL 評価時は強磁性体 Fe の磁化を垂直配向させるために最大 5 T の面直磁場を印加した。右回り・左回り円偏光発光は $\lambda/4$ 波長板と直線偏光子により区

別して測定した。

研究結果について述べる。第 5 章の第 1 節は、量子ドットスピン LED 動作時のスピン偏極消失過程に関する研究である。EL 円偏光度の温度依存性と電流依存性を測定し、注入電流によって EL 円偏光度の温度依存性が大きく異なることが分かった。この結果を定量的に理解するために、EL 円偏光度は強磁性体電極のスピン偏極率、半導体バリア層でのスピン輸送効率、活性層でのスピン光変換効率の積で近似できるとするモデルを構築した。上記のモデルから算出したスピン輸送効率は 200 K で最大となり、さらに温度が上昇すると急激に低下することが分かった。特に、室温かつ高電圧下ではスピン輸送効率は 10 % にまで低下した。室温でのスピン光変換効率は時間分解円偏光 PL により 69 % であることが分かり、EL 円偏光度を増加させるためにはスピン輸送効率の改善が必須であることを明らかにした。そこで、次節以降では低いスピン輸送効率を補償または解決するために、GaNA s によるスピン増幅発光と超格子バリアによる電子スピン保持輸送に着目した。

第 2 節は、希薄窒化 GaNA s 量子井戸を量子ドット活性層にトンネル結合させたスピン LED に関する研究である。GaNA s は、電子スピンのバンドギャップ中の局在準位へ選択的に捕獲されることで伝導電子のスピン偏極を高めることができ、スピン LED では輸送後にスピン偏極を増幅する効果が期待できる。試料は GaNA s がいない試料とある試料を作製した。室温で印加電圧を増加させると、GaNA s がいない試料の EL 円偏光度は減少した一方で、GaNA s がある試料の EL 円偏光度は維持され 2 倍程度高い EL 円偏光度が得られた。この結果が GaNA s のスピン増幅効果に由来することを確認するために、室温かつ高電界下で励起スピン密度を変えた円偏光 PL 測定を行った。励起スピン密度が増加すると GaNA s がいない試料では PL 円偏光度が低下した一方で、GaNA s がある試料では PL 円偏光度が顕著に増加した。これは GaNA s に特有の伝導電子密度に依存するスピン増幅効果を反映している。したがって、スピン輸送効率が低下する室温かつ高電圧下では、GaNA s のスピン増幅効果が EL 円偏光度を向上させるのに有効であることを明らかにした。

第 3 節は、GaAs/AlGaAs 超格子バリアを量子ドットスピン LED のスピン輸送層に用いた研究である。超格子ではバリア障壁を介して隣接する量子井戸へ波動関数が連続的に結合しており、スピン LED では活性層への電子輸送中のスピン緩和を抑制する効果が期待できる。本研究では、室温かつ電界印加下での超格子バリアの電子スピン輸送特性を評価した。試料は上記のスピン LED と同様の pin 量子ドット LED 構造であるが、5 周期の GaAs 5 nm/ n -Al_{0.3}Ga_{0.7}As 5 nm を持つ超格子バリアと、それに隣接した励起スピン生成層として働く Al_{0.2}Ga_{0.8}As 20 nm を持つ。まず、Al_{0.2}Ga_{0.8}As を励起する条件下で PL 発光強度の電圧依存性を測定した。印加電圧の増加に伴って量子ドットの PL 発光強度は増加したが、超格子の PL 発光強度は減少した。これは、超格子バリアから量子ドットへの電子輸送が活性化されたためである。次に、量子ドットと超格子の PL 円偏光度を測定したところ、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た。この結果は、超格子バリアを用いた活性層への電子スピン保持輸送が室温かつ電界印加下で実現できることを示している。

最後に、本研究ではスピン LED の室温性能が半導体バリア層での電子スピン輸送時のスピン緩和により低下することを定量的に示したとともに、その対策として希薄窒化 GaNA s を量子ドット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輸送層に用いることが性能向上に有効であることを明らかにした。本研究による成果は、室温での量子ドットスピン LED の高効率・高速動作の実現に向けて重要な指針と知見を与えるものである。