HOKKAIDO UNIVERSITY

Title	半導体量子井戸構造における井戸間電子移動を用いたスピン緩和スイッチングの理論的研究［論文内容及び審査の要旨］
Author(s)	飯島, 智徳
Degree Grantor	北海道大学
Degree Name	博士(工学)
Dissertation Number	甲第14426号
Issue Date	2021-03-25
Doc URL	https://hdl.handle.net/2115/81178
Rights(URL)	https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/
Type	doctoral thesis
File Information	Tomonori_Iijima_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　飯島　智徳

審査担当者　主　査　教　授　明楽 浩史
副　査　特任教授　西口 規彦
副　査　教　授　足立 智

学位論文題名

半導体量子井戸構造における井戸間電子移動を用いたスピン緩和スイッチングの理論的研究
(Theoretical study on the switching of the spin relaxation using the interwell electron transfer in semiconductor quantum well structures)

スピントロニクスは、電子の電荷だけでなくスピンも利用することにより情報処理の省エネルギー化を実現する技術として注目されている。半導体などの非磁性体においてスピン自由度に情報を書き込み輸送するにはスピン偏極を生成するとともにスピン偏極を維持することが要求されるため、スピン偏極を壊すスピン緩和を抑制することが必須である。一方、スピン緩和を利用する FET ではスピン緩和率を大きく変化させることで電流をスイッチングするため、スピン緩和率の on/off 比を極めて大きくすることが要求される。本学位論文では、スピン軌道相互作用に起因する有効磁場によって生じる Dyakonov-Perel スピン緩和に関する研究を半導体量子井戸構造を対象にして行っている。

半導体量子井戸においてはゲート電圧を変えることによってスピン緩和率を変えるという制御方法が実験的に確立している。ゲート電圧を調節して量子井戸に加わる電場をゼロにすることでスピン緩和は消失し、電場を大きくすることでスピン緩和を強めることができるので、スピン緩和率の on/off 比は原理的には極めて大きくできる。しかし実際の FET において電場をゼロに近づけたり極めて大きくすることは困難である。

そこで本研究では、スピン緩和を抑制した量子井戸とスピン緩和を強化した量子井戸との間で電子を移動させることによってスピン緩和率をスイッチングするという制御方法を提案し、絶対零度においてスピン緩和率を決定する基底サブバンドの有効磁場を抑制した量子井戸と強化した量子井戸との間の電子移動を用いることによって、単一量子井戸を用いた従来の方法より数桁大きいスピン緩和率 on/off 比が達成できることを示している。一方室温においては、有効磁場が大きい励起サブバンドがスピン緩和率の off での値を引き上げるためスピン緩和率 on/off 比は何桁も減少することが明らかになった。そこで本研究では、励起サブバンドの影響を低減できる量子井戸構造を半導体の種類や各層の厚さを変えて探索し、その結果、室温においても絶対零度と同程度のスピン緩和率 on/off 比を達成することに成功している。

本論文の各章の概要は次の通りである。

第 1 章では、スピントロニクスにおいてスピン緩和を制御する必要性、従来のスピン緩和制御方法とその問題点、本論文で提案するスピン緩和制御方法と本論文の目的を述べ、第 2 章から第 5 章において半導体量子井戸構造におけるスピン緩和の基礎理論を概説している。

第 6 章では面方位が (110) である 3 重量子井戸構造における Rashba スピン軌道相互作用による

Dyakonov-Perel スピン緩和の研究を説明している。本研究では、基底サブバンドのみを考慮した従来のスピン緩和率の表式を励起サブバンドも考慮した表式に拡張するとともに、その拡張した表式を用いてスピン緩和率の計算を実行している。励起サブバンドと基底サブバンドの間のエネルギー差を大きくして励起サブバンドの影響を低減することにより、室温でも絶対零度と同程度のスピン緩和率の on/off 比を達成することに成功している。

第 7 章では面方位が (111) である 2 重量子井戸構造における Rashba スピン軌道相互作用および Dresselhaus スピン軌道相互作用による Dyakonov-Perel スピン緩和の研究を説明している。面方位が (110) の量子井戸構造でのスピン緩和の抑制は井戸に垂直なスピン偏極に限定されていたが、面方位が (111) である量子井戸構造では Rashba 有効磁場と Dresselhaus 有効磁場が互いに打ち消し合うように調整することによりあらゆる方向のスピン偏極に対してスピン緩和を抑制することが可能である。本研究では障壁層の Al の割合が左右で異なる非対称量子井戸を導入し、Rashba 有効磁場と Dresselhaus 有効磁場が相殺するように Al の割合を調節している。このようにしてスピン緩和を抑制した量子井戸を強化した量子井戸と組み合わせて 2 重量子井戸構造を構成し、さらに励起サブバンドの影響を低減するように構造を調節することにより、あらゆる方向のスピン偏極に対して、室温でのスピン緩和率の on/off 比を従来の方法より数桁大きくすることに成功している。

第 8 章において本研究の総括が述べられている。

これを要するに本研究は、半導体量子井戸構造において励起サブバンドの影響を取り入れたスピン緩和率の評価方法を確立するとともに、室温におけるスピン緩和率の on/off 比を従来の方法に比べて格段に向上させ、スピントロニクスひいては応用物理学に対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があるものと認める。