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_abstract.pdf, 論文内容の要旨

Hokkaido University Collection of Scholarly and Academic Papers : HUSCAP

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　飯島　智徳

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)

電子の電荷だけでなくスピンの自由度も利用するスピントロニクスが情報処理の省エネルギー化を実現する方法として注目され、数多くの研究がなされている。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むにはスピン偏極を生成することが必要で、その情報を輸送するにはスピン偏極を維持することが要求される。非磁性体におけるスピン偏極はスピン軌道相互作用に起因するスピンホール効果や Edelstein 効果によって生成することができるが、このスピン軌道相互作用はスピン偏極を壊すスピン緩和の原因にもなる。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た。

スピン緩和を制御することは、スピン自由度を活用する情報処理において必須である。情報の輸送においてはスピン緩和を抑制する必要があるが、スピン緩和率を大きく変化させることが要求されることもある。例えば、スピン緩和 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ので、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。

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た。十分低温では、基底サブバンドにおける有効磁場によりスピン緩和率が決まるため、有効磁場を抑制した量子井戸と有効磁場を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従来の方法より数桁大きいスピン緩和率 on/off 比が得られた。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 比は何桁も減少した。そこで、室温でのスピン緩和率 on/off 比を改善するために、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、探索した。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た。

本論文を構成する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る。

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する。第 2 章では、密度行列と量子 Liouville 方程式による輸送現象の記述について解説し、ボルツマン方程

式の衝突項を不純物散乱に対して導出する。第 3 章では、閃亜鉛鉱構造をもつ半導体のバルクにおける伝導帯の電子状態を良く記述できる Kane モデルについて解説する。第 4 章では、閃亜鉛鉱構造をもつ半導体のバルクおよび量子井戸構造における伝導帯の電子に働く Dresselhaus スピン軌道相互作用と Rashba 型スピン軌道相互作用について解説する。第 5 章では、電子スピンの歳差運動と Dyakonov-Perel スピン緩和機構について解説する。

第 6 章と第 7 章において本論文の理論モデルと計算方法および計算結果について述べる。

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する。6.1 節において研究背景と研究目的を、6.2 節において 3 重量子井戸構造のモデルとハミルトニアンについて述べた後、6.3 節において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し、6.4 節においてその拡張した表式を用いて求めたスピン緩和率の計算結果を示す。本研究ではまず、スピン緩和を抑制した量子井戸を中央に置きスピン緩和を強化した量子井戸をその左右に置いた 3 重量子井戸構造について、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ための方針として、スピン緩和を抑制した量子井戸の井戸幅を広くしスピン緩和を強化した量子井戸の井戸幅を狭くするというガイドラインを立てた。外側の障壁層の半導体として InAlAs を用いガイドラインに基づき設計した (110)3 重量子井戸構造において、絶対零度でのスピン緩和率 on/off 比は従来の単一量子井戸を用いた制御方法に比べて数桁向上したが、室温では励起サブバンドを占める電子がスピン緩和率の off での値を引き上げるため、スピン緩和率の on/off 比は絶対零度での on/off 比より数桁減少した。そこで、スピン緩和 off のときの励起サブバンドの影響を低減するために、外側の障壁層の半導体として伝導帯のバンドオフセット (バンド端のエネルギー差) が大きい AlAsSb を用いて障壁を高くすることによって左右の井戸をさらに狭くできるようにし、ガイドラインに基づき 3 重量子井戸構造を設計した。その結果スピン緩和 off の電場領域において励起サブバンドの影響を低減することができ、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た。6.5 節においてこの研究の結論を述べる。

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する。面方位が (111) である量子井戸では Rashba 有効磁場と Dresselhaus 有効磁場が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半導体 AlGaAsSb 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 の割合を調節した。このように調節した量子井戸をスピン緩和を強化した量子井戸と組み合わせた 2 重量子井戸構造をガイドラインに基づき設計することにより、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 比を絶対零度と同程度にすることに成功した。この章では、7.1 節において研究背景と研究目的を、7.2 節において 2 重量子井戸構造のモデルとハミルトニアンについて述べた後、7.3 節において計算結果、7.4 節においてこの研究の結論を述べる。

最後に第 8 章においてこの学位論文の研究を総括する。