



HOKKAIDO UNIVERSITY

| | |
|---------------------|---|
| Title | 二重量子井戸における反平行スピホール流のボルツマン方程式に基づく運動論的研究 [論文内容及び審査の要旨] |
| Author(s) | 石川, 俊也 |
| Degree Grantor | 北海道大学 |
| Degree Name | 博士(工学) |
| Dissertation Number | 甲第15171号 |
| Issue Date | 2022-09-26 |
| Doc URL | https://hdl.handle.net/2115/87131 |
| Rights(URL) | https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/ |
| Type | doctoral thesis |
| File Information | Toshiya_Ishikawa_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 | 石川 俊也 |
| 審査担当者 主査教授 | 明楽 浩史 | | |
| 副査教授 | 足立 智 | | |
| 副査准教授 | 土家 琢磨 | | |

学位論文題名

二重量子井戸における反平行スピホール流のボルツマン方程式に基づく運動論的研究
(Kinetic study of antiparallel spin Hall current in a double quantum well based on the Boltzmann equation)

電子の電荷に加えてスピンも利用するスピントロニクスにおいて新奇現象開拓と工学応用に関する数多くの成果が得られている。スピン自由度の効率的な制御方法としてスピン偏極の電氣的生成・操作がある。その代表例がスピホール効果である。スピホール効果は、非磁性体中のスピン軌道相互作用によって、電流と垂直にスピン流が生じる現象であり、電流による磁化反転などに利用されている。

また最近では、擬スピンを利用する擬スピントロニクスの研究も盛んである。擬スピンとはスピンと同様にパウリ行列で表される軌道自由度である。擬スピンをもつ系は多数存在するが、本学位論文が対象とするのは二重量子井戸である。二重量子井戸は量子井戸を2つ積層した構造で、2層それぞれに局在する2状態を擬スピンの上下に対応させて二重量子井戸の擬スピンの定義される。

擬スピンとスピンは制御性に顕著な違いがある。スピンは直接電氣的に制御できないが、擬スピンは電子の軌道自由度であることから直接電氣的制御が可能である。この擬スピンの特長に基づき、本学位論文では、電氣的制御が可能な擬スピンを通してスピンを制御することに着目し、スピン・擬スピン間の結合をもつ二重量子井戸を提案するとともに、その結合を通してスピンの電氣的制御が可能であることを理論的に示している。本論文の主な成果は次の3点である。

第一に、スピン・擬スピン結合系として2つの井戸のスピン流が逆向きになる二重量子井戸を提案している。2つの井戸で逆向きの流れは擬スピンの第3成分の流れであるので、この反平行スピ流はスピンと擬スピンを運ぶ。したがって反平行スピ流において擬スピンの第3成分の大きさを変えるとスピ流の大きさも同時に変化する。この機構を活用してスピ流を擬スピンを通して電氣的に制御することが本学位論文の提案である。さらに本論文では、この反平行スピ流を生成する二重量子井戸として、一方の井戸に斥力ポテンシャルを持つ不純物、もう一方の井戸に引力ポテンシャルを持つ不純物を導入した系を提案している。ここでは、ポテンシャルが弱い不純物での skew 散乱によるスピン

ホール効果において、ポテンシャルの正負によりスピンの向きが逆であることを利用している。

第二に、上記の系のスピン流を制御する電気的操作として、井戸に垂直な電場により2つの井戸の間にポテンシャル差 Δ_V を設けることを提案している。この Δ_V は擬スピンに作用する有効磁場の第3成分であり、擬スピンの第3成分である反平行スピン流を強める。一方、2層間のトンネル結合 Δ_{SAS} は有効磁場の第1成分であり反平行スピン流を弱める。本学位論文では、この Δ_{SAS} による抑制が働いている中で Δ_V を変化させることにより反平行スピン流を制御できることを明らかにしている。また、交流電流が誘起する反平行スピン流は交流振動数によって制御できることを示している。ここでは Δ_{SAS} による擬スピン歳差の振動数に交流振動数が合ったときに生じる共鳴を利用している。

第三に、上記のように擬スピンを介したスピン流の電気的制御可能性を追究する中で、二重量子井戸における擬スピンのダイナミクスを解明している。直流の場合には、スピンホール流の擬スピン成分が Hanle 効果の方程式に従うことを示し、その緩和項に不純物散乱が寄与することを明らかにしている。一方交流の場合には、サイクロトロン共鳴を記述する方程式と同じ形の方程式に従うことを示している。

本学位論文の各章の概要は次の通りである。

第1章では、スピントロニクスと擬スピントロニクスに関する研究背景を概説し、二重量子井戸においてスピン・擬スピン流という概念を導入している。

第2章では、系のハミルトニアンやスピン流の計算方法を記述している。計算に擬スピンのコヒーレンスを取り入れるため分布関数のサブバンド間非対角要素を考慮してボルツマン方程式を導出している。

第3章では、分布関数の擬スピン成分に従うボルツマン方程式を解くことにより、スピン・擬スピン流の伝導率を Δ_{SAS} 、 Δ_V 、緩和時間、交流振動数の関数として解析的に導き、その依存性を明らかにしている。

第4章では、ボルツマン方程式からスピン・擬スピン流の運動方程式を導出し、直流での運動方程式はスピンに対する Hanle 効果と同じ形の方程式であり、交流での運動方程式は古典的なサイクロトロン共鳴の方程式と同じ形をもつことを明らかにしている。

第5章では、直流での反平行スピン流の観測方法として非局所電圧の測定と動的核スピン偏極の測定を提案し、交流では反平行スピン流によるスピン蓄積の磁気光学測定を提案している。

第6章では、本学位論文をまとめ、課題と展望を示している。

これを要するに本論文は、スピンと擬スピンが結合する二重量子井戸を提案するとともに、擬スピンの電気的制御を通してスピンの制御が可能であることを理論的に示しており、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。