



HOKKAIDO UNIVERSITY

Title	局所的に空間反転対称性が破れた系において電流および熱流が誘起する反平行スピンの偏極とスピンの流の理論的研究 [論文内容及び審査の要旨]
Author(s)	鈴木, 雄太
Degree Grantor	北海道大学
Degree Name	博士(工学)
Dissertation Number	甲第15835号
Issue Date	2024-03-25
Doc URL	https://hdl.handle.net/2115/92139
Rights(URL)	https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/
Type	doctoral thesis
File Information	Yuta_Suzuki_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 鈴木 雄太

学位論文題名

局所的に空間反転対称性が破れた系において電流および熱流が誘起する反平行スピン偏極とスピン流の理論的研究

(Theoretical Study on Spin Current and Antiparallel Spin Polarization Induced by Electric and Thermal Current in a System with Locally-Broken Inversion Symmetry)

エレクトロニクスで活用されている電子の電荷に加えてスピンの自由度を活用するスピントロニクスでは、新しい物理現象が発見されているだけでなく、工学的応用が期待されている。そのスピントロニクスにおいて重要な役割を担っている物理量の一つが電子スピンの流れであるスピン流である。スピン流は強磁性体の磁化反転に用いられ、低消費電力で高集積度の磁気ランダムアクセスメモリを実現できるとして期待されている。

スピン流を非磁性体において生成できる手法の一つが電流誘起スピン偏極の拡散である。空間反転対称性が破れた系ではスピン軌道相互作用によってエネルギー固有値がスピンに依存し、電流により時間反転対称性を破ることでスピン偏極が生じる。これが電流誘起スピン偏極であり、空間反転対称性の破れが必須である。

最近の実験で、空間反転対称性が系全体では保たれているが局所的には破れている反強磁性体において、電流により副格子磁化を反転できることが実証された。一般に対称な副格子構造は副格子を交換する空間反転操作に対して不変であるが、各副格子の格子点を中心とする空間反転操作に対しては不変ではない。同様の対称性が2層構造でも存在する。各層では空間反転対称性が破れているため電流誘起スピン偏極が生じるが、2層のスピン偏極が反平行であるため系全体のスピン偏極はゼロである。この反平行電流誘起スピン偏極による副格子磁化の反転を実証したというのが前述の実験である。この実証により反強磁性メモリ実用化への期待が高まっている。

この局所的空間反転対称性の破れをさらに活用する一つの方向は、反平行電流誘起スピン偏極からスピン流を生成することである。電流誘起スピン偏極からのスピン流生成はこれまで空間反転対称性が破れた系に限られていたが、局所的に空間反転対称性が破れた系からもスピン流が生成できれば物質や構造の選択肢が増大する。このスピン流生成で局所的な破れを活用するには、局所的な破れでも系全体の破れと同程度のスピン流を取り出せることが必要である。

そこで本研究では、まず局所的に空間反転対称性が破れた系における反平行電流誘起スピン偏極からスピン流を取り出す方法を提案し、そのスピン流の大きさを量子井戸2層の系すなわち二重量子井戸において見積もり、系全体で空間反転対称性が破れた単一量子井戸と比較した。

まず局所的に空間反転対称性が破れた系からスピン流を取り出す方法として、反平行電流誘起スピン偏極をもつ副格子の一つあるいは2層系の片方の層の近くに電極を結合してその副格子あるいは層のスピン偏極を選択的に抽出することを提案した。この選択的抽出が可能な系として、まず原子層で2つの副格子が互いに面直方向にずれたシリセンやゲルマネンが挙げられる。反平行電流誘起スピン偏極をもつ原子層に別の原子層を電極として積層することで、電極に近い片方の副格子から選択的にスピン偏極を取り出すことができる。

次に、局所的に空間反転対称性が破れた系の中で最も簡単な系として二重量子井戸に着目し、二重量子井戸における反平行電流誘起スピン偏極からのスピン流が単一量子井戸からのスピン流と同程度の大きさをもつことを示した。この二重量子井戸は系全体で空間反転対称性をもつが、各層では局所的に空間反転対称性が破れており反平行ラシュバ有効磁場を持つため、反平行電流誘起スピン偏極が生じる。この反平行電流誘起スピン偏極が生じている二重量子井戸の上に電極を置くことで、片方の層のスピン偏極が選択的に電極に拡散しスピン流を生成できる。

本研究では、緩和時間近似のボルツマン方程式を用いて、二重量子井戸構造で生じる局所的電流誘起スピン偏極とスピン流の解析式を導出し、第一励起サブバンドを電子が占有する場合、層間結合強度とともに局所的電流誘起スピン偏極の大きさが増大し層間結合がない単一量子井戸の値の2倍に達することを明らかにした。層間結合がない単一量子井戸は空間反転対称性が破れた系であるので、この結果は局所的に空間反転対称性が破れた系の局所的電流誘起スピン偏極が空間反転対称性が破れた系の電流誘起スピン偏極を上回ることがあるということを示している。固有状態のもつ局所的スピン偏極の大きさは層間結合により小さくなるので、この増強効果は予想外の結果である。スピン流は、電極への電子のトンネル確率が二重量子井戸のすべての固有状態で等しいと近似すると、電極が結合している片側の井戸で生じる局所的電流誘起スピン偏極に比例するため、局所的電流誘起スピン偏極の層間結合依存性は、スピン流にもそのまま反映される。したがって、空間反転対称性が局所的に破れた系は、スピン流の生成に有用であることが期待できる。

以上で述べた電流誘起スピン偏極は非平衡スピン偏極の一つであり、非平衡スピン偏極としてもう一つ熱流誘起スピン偏極についても理論研究がいくつかある。その中の一つは、ラシュバスピン軌道相互作用をもつ2次元電子系において、熱流誘起スピン偏極が電流誘起スピン偏極に比べて顕著な化学ポテンシャル依存性をもつことを示した。

本研究では、二重量子井戸構造において熱流が誘起する局所的熱流誘起スピン偏極を、緩和時間近似のボルツマン方程式を用いて、面内電流ゼロ・電子密度一定の条件のもとで計算し、ラシュバスピン軌道相互作用が有限で層間結合強度がゼロでないときに局所的熱流誘起スピン偏極が最大値をとることを明らかにした。特にラシュバスピン軌道相互作用の強度が有限で最大となるのは、化学ポテンシャルが第一励起サブバンドの下端近傍にあるときに最大となるためである。同様に、層間結合がない単一量子井戸の熱流誘起スピン偏極も第一励起サブバンド下端近傍の化学ポテンシャルにおいて最大値をとる。この化学ポテンシャル依存性は2次元電子系に対する先行理論研究の結果と異なるが、その理由は先行研究において電流ゼロの条件を課していなかったためである。電流を流さない条件のもとで明らかになった本研究の化学ポテンシャル依存性は多くの物質や構造において現れると考えられ、熱を活用して効率的にスピン偏極とスピン流を生成する指針となると期待される。

以下に、本論文の構成について述べる。

第1章では、スピントロニクスの概要とスピン流について紹介し、スピン流の代表的な生成方法の一つである空間反転対称性が破れた系で生じる電流誘起スピン偏極の拡散を用いる方法について説明する。また、系全体で空間反転対称性があっても、局所的に空間反転対称性が破れた系では、局所的に電流誘起スピン偏極が生じることを紹介し、本研究で提案する反平行電流誘起スピン偏極からスピン流を生成する方法を導入する。

第2章では、二重量子井戸のモデルとハミルトニアン、ボルツマン方程式を用いた反平行電流誘起スピン偏極およびスピン流の計算方法、計算結果について説明する。局所的電流誘起スピン偏極とスピン流の大きさは、空間反転対称性が破れた系に匹敵することを明らかにした。

第3章では、第2章で説明した空間反転対称な二重量子井戸における反平行熱流誘起スピン偏極の計算結果について述べる。ラシュバスピン軌道相互作用をもつ2次元電子系の先行研究では、電流ゼロでない条件下において、波数がゼロでない基底サブバンド下端で、最大の熱流誘起スピン偏極が得られている。本研究では、熱流を用いた一般的な実験条件である電流ゼロの条件を課した結果、基底サブバンド下端のピークは、電気化学ポテンシャルの勾配による異符号の寄与によって抑制されるため、最も高いピークは、第一励起サブバンド下端であることを明らかにした。

第4章では、本研究の結論を示す。