

論文の内容の要旨

論文題目：微細構造中のスピン軌道相互作用に起因する 非断熱的伝導現象の研究

(Study of non-adiabatic transport originates from
spin-orbit interaction in nanostructures)

氏 名 岩崎 優

1. 研究の目的

ナノスケール量子系、特に量子ドット(QD)や量子細線等の微細構造の輸送現象においては、非断熱的な変化が伝導に大きく寄与する事がある。スピン軌道相互作用(SOI)のある系における電子波の伝播では、伝播自身は軌道運動の帰結である一方で、SOIを通してスピンの回転が生じる。SOIの大きさに対する不確定時間よりも軌道状態の寿命が長い場合、この回転は一般に非断熱的である。本研究はこのような非断熱変化が電気伝導にどのような効果をもたらすか調べることを目的とする。具体的には、Rashba 型 SOI の存在する系において、a) スピン偏極電子の伝導に、Zitterbewegung (ZB) と呼ばれるスピン回転の軌道への反作用効果が現れるか； b) QD 内における SOI の効果で、QD を通してスピン回転が生じるか、という 2 つの問題について実験を通して解答することを目的とした。

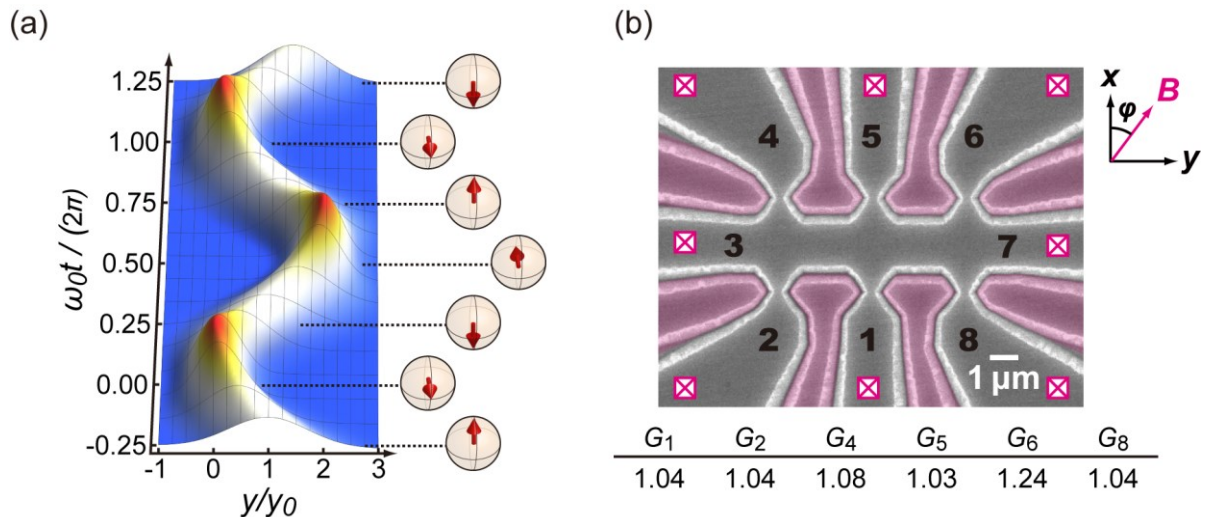


図 1 (a) Rashba SOI 系における波束の時間発展。右に Bloch 球で描いたスピン状態を示す。
(b) 試料の SEM 像。端子番号を付した。赤色部分は GND に落とした。

2. Zitterbewegung による伝導度揺らぎ

Zitterbewegung (ZB) はディラック方程式から導出される、自由粒子に現れる普遍的な現象であるが、その観測は事実上不可能であり、冷却原子気体を用いた二準位系における原子振動などとして模擬的に実験が行われてきた。固体中電子でも観測が期待され、Rashba 型 SOI を持つ二次元電子系では、ZB はスピンの歳差運動に同期した軌道の蛇行として現れる (図 1(a))。この蛇行運動は初期状態でのスピンの向きに依存するため、スピン偏極がない電子の伝導には平均化により現れない。SOI の強い系においてスピン偏極電子を注入する方法として、量子ポイントコンタクト (QPC) を通過させるという方法がある。本研究では、強い Rashba 型 SOI を持つ InAs 二次元電子系の基板に複数の QPC をドライエッチングにより作製し、これらの QPC から中央のストリップにスピン偏極電子を注入して伝導を調べた (図 1(b))。ここで、各 QPC の伝導度は最も大きなスピン偏極度が得られるよう、 $1.0 G_q$ ($G_q = 2e^2/h$) に調整した。

外部磁場 B を掃引した結果、極低温において再現性のある伝導度揺らぎを観測した (図 2(a))。揺らぎのパターンは外部磁場の角度に依存するが、振幅や周波数スペクトルは外部磁場の天頂角 θ を回転させても大きく変化しなかった。また、同じストリップの伝導でも QPC を通さない場合には揺らぎが現れなかった。これは従来知られている Aharonov-Bohm 位相に起因する普遍的伝導度揺らぎでは説明できない。一方、外部磁場の方位角 φ を変えると揺らぎの周波数上限値が変化し、その依存性は ZB と不純物散乱を考慮するモデルで説明できる (図 2(b))。端子の位置関係を変えた測定の結果もこのモデルと整合した。

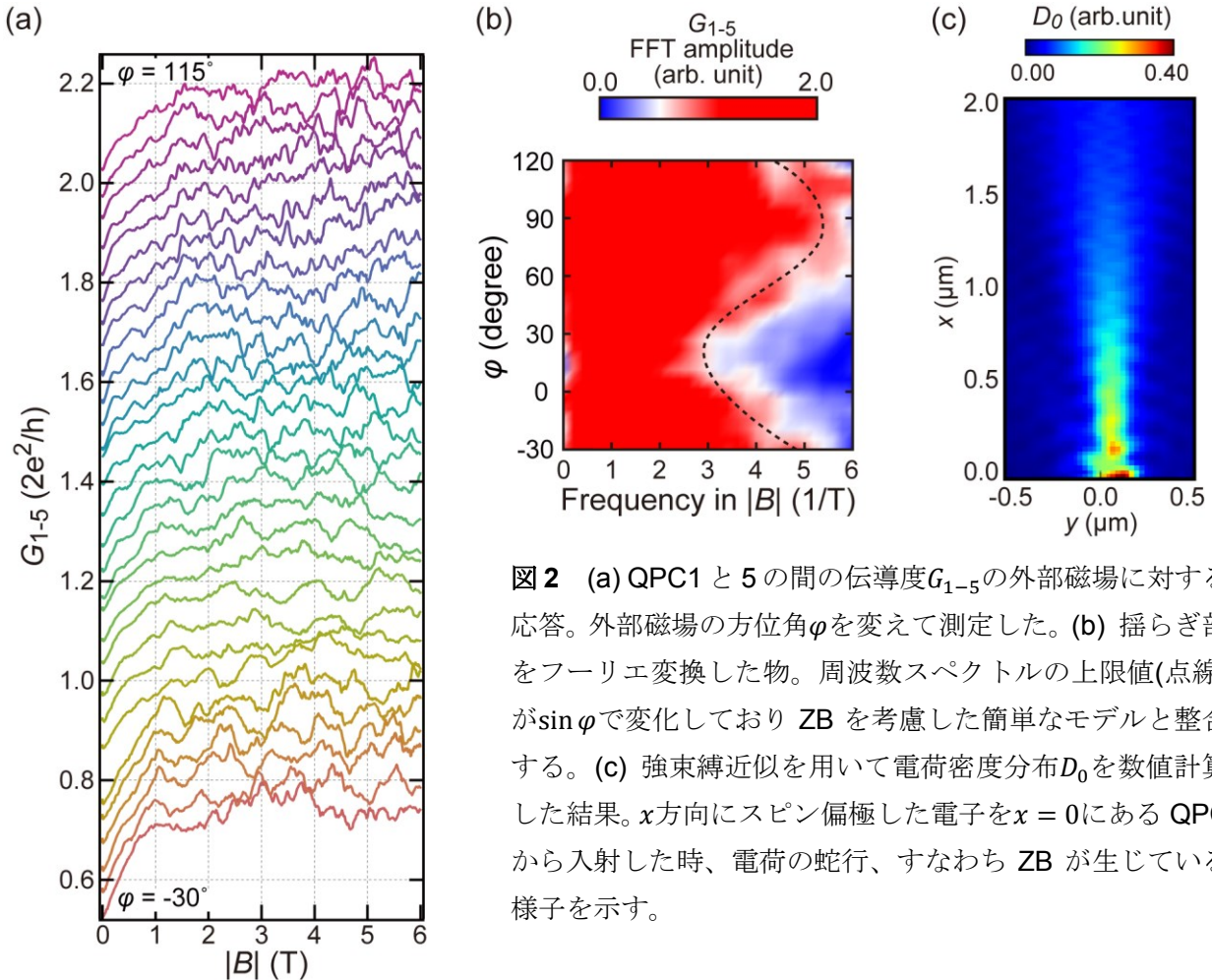


図 2 (a) QPC1 と 5 の間の伝導度 G_{1-5} の外部磁場に対する応答。外部磁場の方位角 φ を変えて測定した。(b) 揺らぎ部をフーリエ変換した物。周波数スペクトルの上限値(点線)が $\sin \varphi$ で変化しており ZB を考慮した簡単なモデルと整合する。(c) 強束縛近似を用いて電荷密度分布 D_0 を数値計算した結果。 x 方向にスピン偏極した電子を $x = 0$ にある QPC から入射した時、電荷の蛇行、すなわち ZB が生じている様子を示す。

実験を模した数値計算では ZB が電荷の蛇行として現れ (図 2(c))、伝導度揺らぎの傾向も再現できた。以上により、Rashba 型 SOI のある二次元電子系でスピン偏極電子の伝導において、ZB が新しいタイプの伝導度揺らぎとして現れることを実験的に示すことが出来た。

3. 量子ドット内におけるスピン回転

量子ドット (QD) 内では入射した電子の波が閉じ込めポテンシャルにより複数回反射し、共鳴状態を形成する。SOI を QD に導入すると反射時に大きな非断熱性が生じスピンと軌道が入り混じった共鳴が生じる可能性があり、これは QD を通過する際のスピン回転量に影響すると予想される。先行研究では InGaAs 二次元電子系を使い QD を組み込んだスピン干渉計の伝導測定により、QD のクーロン振動周期と同じ周期で QD 内スピン回転が生じる事が実験的に確かめられている。この実験の QD を本研究では図 3(a)のようにモデル化し、数値計算によってスピン回転を再現する事を試みた。QD の左下に電子波を入力するリード、右上に出力するリードを取り付け、入力スピンに対する出力スピンの回転量 θ を電子のエネルギー E_i についてプロットすると、伝導度ピークの間でスピン回転が生じた (図 3(b))。スピンの回転する E_i 近傍で QD 内の x 方向スピン密度分布 D_x を計算した結果 (図 3(c))、 E_i の値に応じて QD 内部

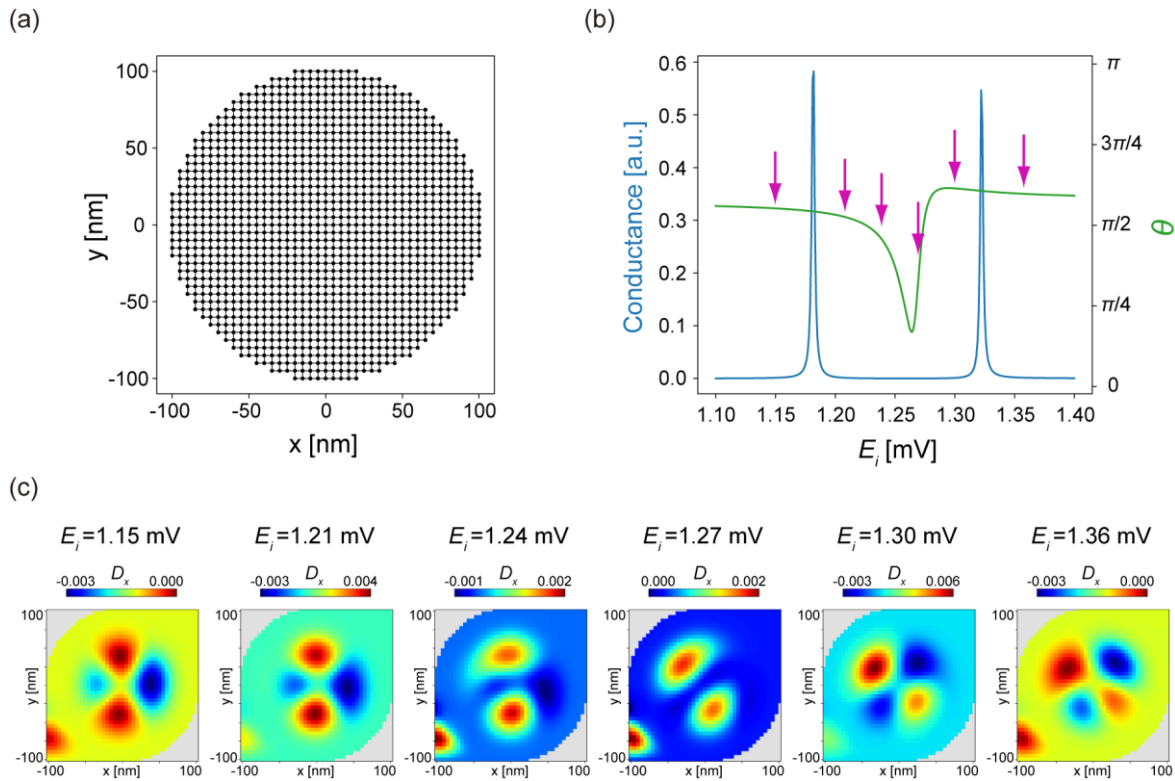


図 3 (a) 計算モデルの概略図。半径 100 nm の QD を 5 nm 間隔の格子に切り、強束縛近似で計算した。(b) 入出力リードを QD の左下と右上に取り付けた時の、伝導度 (青線、左軸) と入力スピンに対する出力スピンの回転量 θ (緑線、右軸)。入力 y 方向にスピン偏極しており、 θ はブロッホ球で見た時の天頂角と定義した。(c) 入力エネルギー E_i を(b)の各矢印に固定した時の、QD 内部の x 方向スピン密度分布 D_x をカラープロットしたもの。

のスピントクスチャーが変化し、出力リードに隣接する場所のスピンの値が変化した。この現象により出力スピンが回転すると考えられる。この時スピン回転の周期は伝導度ピークが現れる周期に一致し、先行研究の結果を定性的に再現出来たと言える。従って本研究は、**QD** 内部に生じる新奇な非断熱スピン依存伝導を確認した可能性がある。