

## 論文の内容の要旨

論文題目 量子構造によるスピン偏極生成と検出

(Creation and detection of  
spin polarization in quantum structures)

氏名 金 善宇

本研究はスピン軌道相互作用のある量子構造によってスピン偏極を生成し、それを実験的に検出したものである。

半導体スピントロニクスにおいては、磁性半導体接合や量子ポイントコンタクト (QPC) など、様々な方法によるスピン偏極の創出が重要な技術である。スピン軌道 (SO) 相互作用の強い、InGaAs 系などの 2 次元電子系 (2DEG) を用いた QPC やその他の量子構造において零磁場で外部電流によってスピン偏極を持ったスピン流が生じることが理論的に予測されている。

一方、このような系でスピンフィルター効果を示唆する実験結果が報告されている。これは Cincinnati 大学グループの研究で、InAs の 2DEG を加工した QPC において、通常の QPC で観測される伝導度量子化の単位  $G_q = 2e^2/h$  の半分  $0.5 \times 2e^2/h = e^2/h$  を単位とする伝導度の量子化 (0.5 プラトー) が得られた、というものである。彼らは理論計算も行い、 $e^2/h$  の伝導度プラトーでは、SO 相互作用と電子間クーロン相互作用のため、伝導電子はほとんど 1 つのスピンに偏極するとしている。これは大変重要な報告であり、我々は、まずこの実験結果を確認することを目標に、InGaAs 系 2DEG を金属ショットキーゲートによる QPC に加工して電気伝導を調べた。その結果、やはり  $e^2/h$  を単位とする伝導度量子化が得られた。更に垂直磁場を印加した際 Zeeman 分裂による 0.5 伝導度プラトーと零磁場における 0.5 伝導度プラトーが一致することを確認した。上述のような QPC では零磁場でスピン偏極が生じている、という議論が、非平衡グリーン関数を用いた計算に基づいて行われている。最近ではラシュバスピ軌道相互作用の伝導方向変調によるスピンフィルターリング効果も計算され、InGaAs 2DEG をウェットエッチで加工して形成された QPC におけるショットノイズ測定によってスピン偏極があるとの報告が発表された。我々はこの報告に加え、より明確なスピン偏極検出を行うため QPC の近傍に量子構造によるスピン検出計を考案し、測定を行った。

そこで InGaAs 系 2DEG に金属ゲートによる 2 つの QPC を直列に置く方法で量子ドット (QD) を形成した。近藤効果を示す状態に隣接する単一スピン状態を通した電気伝導を

調べた結果、有限のソースドレイン電圧がに対してクーロンピークが消滅する現象が見られた。これはスピントラップ効果を持つトンネル障壁によって、直列2重量子ドット系で観測されたスピントラップと類似の機構によってスピントラップが生じたものである。この「スピントラップ」現象は特徴的な発現の仕方をするため、スピントラップトンネル現象が生じていることが明らかである。このことは、近藤効果領域で、ゼロバイアスピークが一見頂点付近で分離した形となることにも現れている。また、スピントラップは敏感で明瞭な方法であることを示し、スピントラップ効果測定に現実的な実験手法を与えた。

一方、直列につながった QPC を使ったスピントラップ検出では生成されたスピントラップに対する擾乱が大きく、スピントラップをすぐに閉じ込めてしまう。この QPC スピントラップをスピントラップに 응용するにしても QPC の両端を開放した状態のスピントラップを調べる必要がある。そこで我々はスピントラップ流の流れに対して垂直に1つのトンネル結合でつながった量子ドットをスピントラッププローブとして検出を行った。検出のターゲットとなる系と量子ドットの間には正味電流は流れなく非常に擾乱の少ないスピントラップ測定が可能になる。量子ドットに矩形波を加え電子の出入りを起こし、検出用量子細線との同期信号を調べることで電子のトンネル状態がわかる。電子のトンネルが発生し量子ドットの電子数が変化する場合、電荷検出信号が現れる。スピントラップが生成されていると思われる量子構造に対してスピントラップ測定を行った結果、検出器 QD の電子数  $N$  が 0 から 2 の間を変動できる ( $0 \leftrightarrow 2$ ) 大きさの矩形波振幅に対する電荷検出信号ディップの深さが、スピントラップがない場合に比べて小さくなる現象が見られた。これはスピントラップした電子が量子ドットにトンネルする際、パウリ原理によって2つの同じ向きを持つ電子スピントラップが1つの軌道準位に同時に入れないためであり、QPC スピントラップ生成の新たな証拠となる。ここでブロックされた電子は、すでに入った電子がスピントラップ緩和を起すまでトンネルできず、矩形波の周期を変えその応答を調べることでスピントラップ率とスピントラップ緩和の定量的評価が可能となった。

この手法を、量子ポイントコンタクトスピントラップの性質を究明するため、実験的アプローチに 응용し、得られた結果を元に、SOI の強い系の QPC におけるスピントラップメカニズムの同定に向けて議論を行った。その結果、(i) 1.0 伝導度プラトーでもかなり大きな ( $P = 0.6$ ) スピントラップが生じている (ii) スピントラップは伝導度が 0 に近い所、あるいは 1.0 をかなり超えたところでは 0 になってしまう (iii) 量子細線部分のポテンシャル構造には余り敏感ではない (iv) バイアス電圧は、0.5 プラトーのスピントラップを減少させ、1.0 プラトーのスピントラップを増大させる (v) 近藤効果により、スピントラップは減少するということがわかった。

これら実験結果を踏まえた議論により、0.5 プラトーではスピントラップ依存ポテンシャルが働いていること、1.0 プラトーでは江藤機構が働いていることがほぼ明らかになった。