

博士論文(要約)

Spin-dependent electron transport in a quantum dot
coupled to quantum Hall edge states

(量子ホールエッジ状態と結合した量子ドットに
おけるスピン依存電子輸送)

木山 治樹

近年、二次元電子中の横型量子ドットと1次元チャネルの複合系における研究が『量子電子光学』と呼ばれる新しい分野として注目されている。この系は基礎科学における量子電子物性探索の舞台であると同時に、量子ドットを静止量子ビット、1次元チャネルを飛行量子ビットとして用いた将来の複合量子情報システムとしても大変興味深い。これまでの量子ドット-1次元チャネル複合系における研究では主に電荷について着目されてきた。今後、これがスピン自由度へ拡張されると、基礎科学および応用において大きな発展が予想される。このとき、量子ドットと1次元チャネルの間のスピン注入検出およびスピンドYNAMIKSの理解や制御が極めて重要となる。本論文では1次元チャネルとして量子ホールエッジ状態に着目した。このエッジ状態はスピン緩和長が1 mm程度と長く、また近年ではエッジ状態のスピン操作技術の進展が報告されている。このような利点から、量子ドットとエッジ状態の結合系はスピントロニクスや量子情報への応用に適していると期待される。この系におけるスピン依存電気伝導はすでに報告がある。エッジ状態は面直磁場下において量子ドット近傍に形成されるが、ゼーマン分裂とドットのポテンシャル障壁により、空間的にスピン分離する。その結果、量子ドットとエッジ状態の間にスピン依存トンネル結合が生じる（エッジ状態スピンフィルター効果）。しかし、これまで報告されているエッジ状態スピンフィルターの効率は低く、その制限要因の解明もなされていないことなど、量子ドットへの高効率スピン注入やスピン検出への応用は困難と予想される。以上のような背景から、本論文では次の5つの研究に取り組んだ。

1. エッジ状態スピンフィルター効果の電氣的制御
2. エッジ状態スピンフィルター効果を用いた高ビジビリティ単発電子スピン検出
3. 多電子高スピン状態の単発検出とスピン緩和測定
4. 非平衡スピン偏極エッジ状態と結合した量子ドットへの選択的スピン注入
5. コヒーレントな任意スピン状態注入を用いたスピン状態トモグラフィ手法の提案

本論文では最初に、エッジ状態スピンフィルター効率の改善に取り組んだ。従来の横型量子ドットに用いられるゲート電極に加え、ドット近傍に新たにゲート電極を設置した。このゲート電極を用いて、トンネル障壁の勾配をより緩やかに変調させることにより、エッジ状態の空間的スピン分離の増大を図った。その結果、エッジ状態スピンフィルター効率に相当するドット電流スピン偏極率を0.1から0.6まで電氣的に制御することに成功した。さらにゲート電極配置を改良した試料において、トンネル障壁の勾配をさらに大きく変調し、過去の報告例の中で最大のスピン偏極率0.91を達成した。この成果により、エッジ状態スピンフィルター効果のスピン注入やスピン検出への応用が容易となった。

次に、高効率化したエッジ状態スピンフィルター効果を用いて量子ドット電子スピン状態の単発読み出しをはじめて行った。読み出しの対象は2電子スピン励起状態である $S=0$ （一重項状態 S または三重項状態 $T0$ ）と、基底状態 $S=1$ （三重項状態 $T+$ ）である。これらの2電子状態は3電子状態に遷移する際に、スピンフィルター効果により異なるトンネルレートを示す。それをドット近傍の量子ポイントコンタクトにより実時間検出し、2電子スピン状態を判別した。その結果、単発読み出しビジビリティ94%が得られた。この値はGaAs横型量子ドットにおいて報告されている他の手法よりも高いビジビリティである。また、異なる電子数において $S=0$ から $S=1$ へのスピン緩和レートを測定した。電子数が増えるにつれ、スピン緩和レートの増大が観測された。これは電子数増加に伴って電子状態密度が大きくなり、その結果スピン軌道相互作用によるスピン状態間の混成が強くなるためであると推察される。

さらに、エッジ状態スピンフィルター効果によるスピン注入を利用し、多電子高スピン状態の生成とその単発読み出しを行った。多電子高スピン状態の読み出しやそのダイナミクスの理解は、スピン緩和における多体相関の影響など基礎物理的にもまた多値量子ビット等への応用においても重要であるが、まだ報告例は無い。本論文では2電子スピン基底状態 $S = 1$ を初期状態とし、スピンフィルター効果によりアップスピンを注入することにより、3電子高スピン状態 $S = 3/2$ を生成した。この高スピン状態と3電子スピン基底状態である $S = 1/2$ が読み出しの対象である。読み出しの際には、まず3電子スピン状態を2電子スピン状態に変換した。このとき、スピンフィルター効果によりアップスピンが優先的にドットからエッジ状態に抜けるため、3電子スピン状態 $S = 3/2$ と $S = 1/2$ はそれぞれ2電子スピン状態 $S = 1$ と $S = 0$ に変換される。上述の方法で2電子スピン状態を読み出すことにより、3電子スピン状態を判別した。同様の手法により、4電子 $S = 2$ と $S = 1$ の単発読み出しにも成功した。また2電子スピンと同様に、高スピン状態についてもスピン緩和レートを測定した。偶数電子状態の $S = 0$ から $S = 1$ へのスピン緩和レートと比較すると、同じ電子数であっても高スピン状態 $S = 2$ から $S = 1$ へのスピン緩和レートの方が約30倍速いという結果が得られた。この起源については、 $S = 0$ 状態の $S = -1$ 状態との混成による $S = +1$ への遷移確率の減少、量子ドット形状異方性による軌道角運動量選択則の緩和、および $S = 2$ 状態の多数の $S = 1$ 状態との混成による遷移確率の増強が推察される。また本論文の高スピン状態読み出しでは、従来のスピン読み出しの手法とは異なり、測定のバンド幅よりスピン緩和レートより速くても読み出しが可能である。これは多電子高スピン状態から2電子スピン状態へ的高速変換と、2電子スピン状態のバンド幅より遅いスピン緩和レートに起因する。

上述のエッジ状態によるスピンフィルター効果をはじめ、これまで報告されているスピン注入手法の多くでは基底状態であるアップスピンのみが注入可能である。ダウンスピンの注入が可能となれば、ダウンスピン偏極状態の生成や検出に応用でき、さらに近年のエッジ状態スピン操作技術と組み合わせる電子スピン状態トモグラフィ等への発展が期待される。本論文では、非平衡エッジ状態を用いてアップスピンとダウンスピンの選択的注入を行った。まずドットから離れた地点に設置されたゲート電極（ゲートLC）を用いて、その直下を透過するスピン分離エッジ状態数を制御することにより、ドット近傍のエッジ状態にスピン偏極非平衡分布を生成した。ドット近傍でのエッジ状態化学ポテンシャルはゲートLC直下を透過したか反射したかによって、それぞれ異なる2つのオーミック電極の電位で決定される。従って、アップスピンエッジ状態が透過し、ダウンスピンエッジ状態は反射するようにゲートLC直下の伝導度を設定すれば、非平衡エッジ状態のスピン偏極の向きをオーミック電極バイアスによって電氣的に切り替えることが可能である。このような非平衡エッジ状態からのドット電流を測定した結果、ドット電流のスピンに依存したゲートLC電圧依存性を観測した。ゲートLCの負電圧が小さいときはドットと結合したエッジ状態は平衡状態であり、ドット電流スピン偏極率はエッジ状態スピンフィルター効果による値0.1が得られた。それに対し、エッジ状態をアップスピン偏極非平衡状態にすると、スピン偏極率は0.35まで増加し、アップスピン注入効率の向上に成功した。またエッジ状態をダウンスピン偏極非平衡状態にすると、スピン偏極率は-0.3と負の値となり、量子ドットへのダウンスピン注入に成功した。従来のエッジ状態スピンフィルター効果の低い効率は、量子ドットの励起状態の伝導に起因すると推測されてきた。すなわち、ダウンスピンのドット基底状態伝導に加え、アップスピンのドット励起状態伝導も合わせて測定されるため、ドット伝導度のスピン依存性が実際より小さく観測される。本論文では上述の非平衡エッジ状態からのドット電流測定結果において、スピン非依存の成分を励起状態伝導成分として定量的評価を行った。ドット電流から励起状態伝導成分を数値的に除いてエッジ状態スピンフィルター効率を評価した結果、過去の実験においては高磁場において

低い効率が観測されてきたが、実際の効率は高いことが示唆された。

近年のエッジ状態スピン操作技術、あるいは光学的スピン注入技術の進展は、重ね合わせ状態を含めた任意スピン状態の注入への発展が期待される。この任意スピン状態注入の重要な応用の一つに量子ドットの電子スピン状態トモグラフィがある。本論文ではその手法の提案を行った。測定対象である単一電子スピンを有する量子ドットに特定の単一電子スピン重ね合わせ状態を注入して2電子スピン状態を生成する。この二電子スピン状態は一重項状態と三重項状態の重ね合わせ状態であり、一重項状態と三重項状態の比率は測定対象のスピンと注入したスピンのなす角度によって決まる。この比率は一重項状態と三重項状態の軌道の違いを利用したスピン読み出しによって求めることが可能であり、すでに報告がある。注入するスピン状態を変えて一重項状態と三重項状態の比率を測定すると、測定対象スピンと同一のスピン状態を注入したときに三重項状態成分が最大となり、このときの注入スピン状態を測定対象スピンと同定できる。この手法について、スピン注入タイミングの揺らぎや注入するスピン状態の位相反転エラーの影響について考察を行った。