

氏名	きしもとしゅうや 岸本修也
授与学位	博士(工学)
学位授与年月日	平成12年3月23日
学位授与の根拠法規	学位規則第4条第1項
研究科、専攻の名称	東北大学大学院工学研究科(博士課程)電子工学専攻
学位論文題目	半導体低次元電子系間のトンネル現象に関する研究
指導教官	東北大学教授 大野英男
論文審査委員	主査 東北大学教授 大野英男 東北大学教授 水野皓司 東北大学教授 海老沢丕道

論文内容要旨

本研究は半導体量子構造中のトンネル現象におけるスピン保存性について知見を得るために行った研究である。電子のスピンはトンネル過程の前後でエネルギーや運動量と共に保存されなければならない量子数である。これまで半導体量子構造を用いたトンネル現象の研究で、エネルギーと運動量の保存性については数多くの研究がなされてきた。しかし、スピンの保存性に注目した実験はほとんどなされていない。本研究では、トンネル過程におけるスピン保存性を調べるため、

- 1). GaAs / AlGaAs 二重量子井戸構造を用いた測定素子の作製と評価、
- 2). 測定方法の提案、
- 3). 量子ホール状態にある量子井戸間トンネリングの観測とスピン保存性について検討、

を行った。

製作したデバイスは二重量子井戸の試料の表面と裏面にゲート電極(フロントゲート、バックゲート)を形成した構造である。このデバイス構造を用いると、表裏のゲート電極でそれぞれの量子井戸の電子密度を独立に制御できる。特に量子ホール状態では、それぞれの量子井戸の占有率 ν を制御できる。バックゲートは厚い基板上に形成するため、印加する電圧は数100Vとなる。そこで基板の裏面から研磨をし、 $\sim 80\mu\text{m}$ 程度まで薄くする。更にバックゲートを形成する領域をエッチングすることで、ゲート電極と2次元電子間の距離を短くした。ゲート電圧に対するコンダクタンス変化を測定したところ、ゲート電極と2次元電子の距離を $\sim 30\mu\text{m}$ まで近づけることに成功した。このとき、バックゲートへの印加電圧が100V以下であった。

デバイスの評価は2次元電子間のトンネルコンダクタンスのゲート電圧依存性、温度依存性を測定して行った。それぞれの電子層に独立にオーミック電極を形成し、層間のトンネルコンダクタンスを測定した。ゲート電圧依存性はバックゲート電圧を一定にし、フロントゲート電圧を掃引して測定した。フロントゲート電圧を変化させていくと、コンダクタンスに一つのピークが現れた。更にバックゲート電圧を正から負へ変化させると、ピーク位置は低バイアス側にシフトした。2次元電子間のトンネリングでは、エネルギーと運動量が保存されるとき、層間にトンネル電流がデルタ関数的に流れる。このとき2つの量子井戸の量子化準位が一致し、それぞれの電子層の電子密度が等しくなる。そこで、ピークが現れた電圧から表面側(上側)電子層のキャリア密度を見積り、バックゲート電圧から見積られる裏面側(下側)電子層の電子密度と比較した。その結果、コンダクタンスのピークはそれぞれの電子層の電子密度が等しい時に現れていることが分かった。このことより、2次元電子のトンネル過程において、エネルギーと運動量が保存されることが確か

められた。

次にトンネルコンダクタンスのピーク広がりの原因を調べるために、温度依存性を測定した。ピークの広がりからフェルミエネルギー近傍のエネルギー広がりを見積り、温度に対してプロットした。エネルギーの広がりには温度に依存しない項と、温度に依存する項に分けることができる。温度特性から得られた温度に依存しない項の広がり の妥当性を調べるために、移動度から見積られるエネルギー広がりとの比をとり、同程度の電子密度と移動度をもつ 2 次元電子から得られる結果と比較し、良い一致を示すことが分かった。このことから、温度に依存しない項はイオン化不純物散乱に起因していることが分かった。温度に依存する項は、温度の 2 乗に比例し、その係数は電子密度から見積られる。この係数は、電子密度から見積られる 2 次元電子の電子-電子散乱率の、温度の 2 乗で近似したとき係数と良い一致を示した。つまり、トンネルコンダクタンスのピーク広がり、イオン化不純物散乱と電子-電子散乱に起因することを確かめた。以上から、トンネルに関する現象を観測できるデバイスが作製できていることを確認した。

量子ホール状態にある 2 次元電子間のトンネリングについて調べるために、図 1(a)に示す系で測定を行った。上側電子層を全てのオーミック電極から分離し、下側電子層のみにコンタクトが取れた状態である。下側電子層の電子密度、磁場の大きさ調節し、下側電子層をエッジ状態のみが電気伝導に寄与する量子ホール状態に設定する。ソース・ドレイン間に電圧を印加しないとき($V_{SD}=0$)、2 つの電子層は熱的に平衡状態であるため、電圧プローブの化学ポテンシャル間に差 $\Delta\mu$ は現れない(図 1(b))。ソース・ドレイン間に電圧を印加すると($V_{SD}\neq 0$)、電極につながった下側電子層のエッジ状態は、ソース、ドレイン電圧に応じたエネルギーまで電子で満たされ、2 つの電子層は熱的に非平衡な状態となる。平衡状態に落ち着くために電子層間に電子のトンネルが生じる。トンネルが生じないとき、下側電子層は量子ホール状態に設定してあるため $\Delta\mu=0$ である。しかしトンネルが生じると、 $\Delta\mu$ が有限な値を持ち磁気抵抗 R_{xx} が現れる。 $\Delta\mu$ はトンネル量に依存し、 R_{xx} は $\Delta\mu$ に依存する。このため R_{xx} を測定することでトンネル量を議論することができる。下側電子層を占有率が $\nu_b=1, 2$ の量子ホール状態に設定し、上側電子層の充填率を $0<\nu_t<2$ の範囲で変化させ、そのときの R_{xx} を測定した。測定に用いた試料は、分子線エピタキシー法で成長した GaAs / AlGaAs 二重量子井戸構造で、2 つの 15nm GaAs の量子井戸と、AlGaAs 障壁からなっている。障壁の厚さ W_b を 9nm~15nm まで変化させた 8 つの試料を用意した。図 2 に $W_b=9.5$ nm の試料について測定した結果を示す。下側電子層のみがオーミック電極につながった”floating”において、 R_{xx} の大きさが ν_t に依存して変化していることが分かる。一方、井戸間のトンネル量がほとんど無視できる $W_b=15$ nm の試料については、 R_{xx} はほとんどゼロであった。この 2 つの結果から、層間にトンネリングが存在するとき R_{xx} は現れ、大きさは上側電子層の電子状態に依存して変化することが分かった。これらの結果から、この測定方法により層間のトンネル量の検討が行えることが分かった。ここで、”parallel”は 2 つの電子層にオーミック電極が形成された状態で、測定結果は通常の 2 層 2 次元電子系の量子ホール効果を示している。

エッジ-バルク間のトンネリングのスピンの保存性について述べる。 $\nu_b=1$ に設定したとき、 $\nu_t=0.5$ の場合の磁気抵抗 $R_{xx}(0.5)$ が $\nu_t=1.5$ の場合の $R_{xx}(1.5)$ よりも大きいという結果を得た。 $\nu_b=1$ のとき、下側電子層はアップスピンに偏極したエッジ状態である。したがって、エッジ状態とバルク状態のスピンの偏極方向が平行な $\nu_t=0.5$ の場合のトンネル量が、反平行な $\nu_t=1.5$ の場合より多いことを示している。つまり、スピン反転を伴う $\nu_t=1.5$ の場合のトンネル確率が低くなったことを示している。一方、 $\nu_b=2$ では $R_{xx}(0.5)\sim R_{xx}(1.5)$ という結果を得た。つまり、 $\nu_t=0.5$ と $\nu_t=1.5$ の場合のトンネル量が同程度であることを示している。 $\nu_b=2$ では下側電子層にアップとダウンスピンに偏極したエッジ状態が存在する。このため上側電子層のスピンの偏極方向に関係なく電子はトンネルすることができる。この結果から、半導体中のトンネル過程でスピンが保存されることが分かった。次に障壁の厚さに対するスピンの保存の程度を調べるために、磁気抵抗比 $R_{xx}(0.5)/R_{xx}(1.5)$ の W_b 依存性を調べた(図 3)。その結果、 $\nu_b=2$ では W_b に依存せず、 $R_{xx}(0.5)/R_{xx}(1.5)$ はほぼ 1 を示した。一方、 $\nu_b=1$ では $R_{xx}(0.5)/R_{xx}(1.5)$ が障壁を厚くするに従い、1 に近づくことが分かった。障壁を厚くすると、スピン反転を伴ったトンネリ

ングが増加し、スピン依存性が弱まることが分かった。

次にエッジ-エッジ間のトンネリングのスピン保存性について述べる。エッジ-エッジ間のトンネル量を上下電子層間のエッジ-エッジ間緩和長で表し、緩和長に対するスピン依存性について議論を行った。 $v_b=v_t=1$ の時の緩和長を見積ると、障壁が厚くなるに従い緩和長が長くなる傾向が得られた。つまり障壁を厚くするに従いトンネル量が減少したことを示している。このことから、トンネル量を議論する際、エッジ-エッジ間の緩和長を用いることは有効であることが分かった。次に緩和長のスピン依存性について調べるために、 $v_b=1, v_t=2$ と $v_b=v_t=2$ のときの緩和長についても調べた。その結果、 $v_b=v_t=1$ の場合に比べて緩和長が長くなるという結果を得た。エッジ状態の空間的な広がりを考えると、 $v=1$ のときの方が $v=2$ に比べて広がっている。したがって上下電子層のエッジ状態の波動関数の重なりは、 $v=1$ の方が $v=2$ の場合に比べ大きく、トンネル量が多くなる。このため、エッジ状態を $v=2$ に設定する事で緩和長が長くなったことが分かる。以上の結果、エッジ-エッジ間のトンネルにおいては、スピン偏極方向に依存せず、エッジ状態の空間的な広がりに依存することが分かった。

本研究により、半導体中のトンネル現象においてもスピンの保存されることが実験的に確かめられ、スピン保存性は始状態と終状態が空間的に離れるに従い弱まることが分かった。このスピン保存性の結果は、半導体中のスピンドायナミクスを解明する上で、一つの重要な結果であると考えられる。

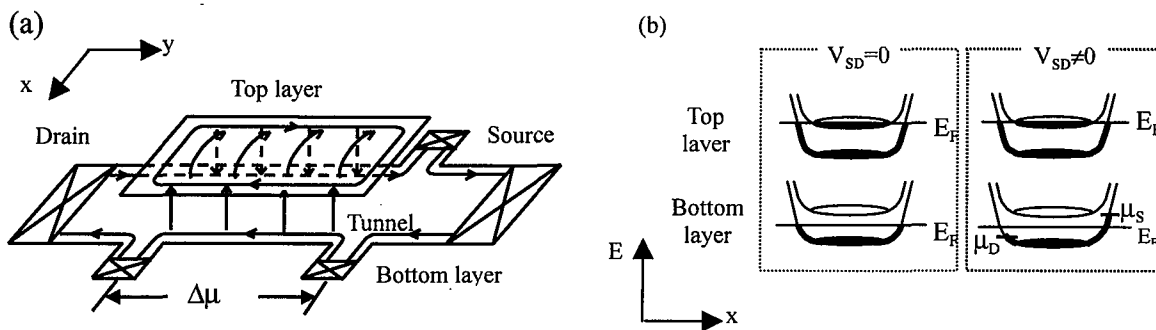


図1 (a) 測定デバイスの模式図(floating)と (b) $V_{SD}=0$ と $V_{SD} \neq 0$ のポテンシャル図

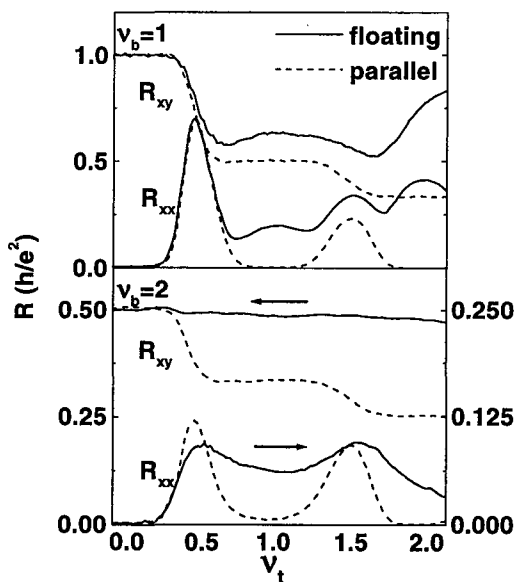


図2 R_{xx} と R_{xy} の v_b, v_t 依存性 ($W_b=9.5\text{nm}$)

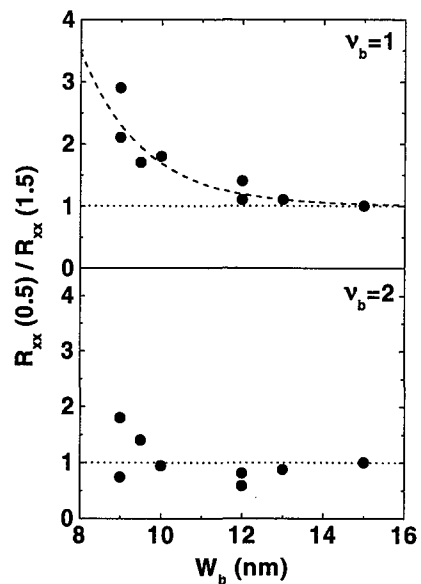


図3 $R_{xx}(0.5)/R_{xx}(1.5)$ の W_b 依存性

審査結果の要旨

半導体構造中の低次元電子系の量子輸送現象を用いた新機能の実現には、その基礎的過程の理解が不可欠である。量子輸送現象の代表的なものにトンネル現象がある。またスピンの保存則は、トンネル過程が無散乱の場合には常に満足される基本的保存則である。しかし、GaAs などの非磁性半導体ではスピンの縮退しているため、低次元電子系間のトンネル現象におけるスピン保存則に関する実験的な知見は得られていなかった。著者は、トンネル過程におけるスピンの保存割合を明らかにするため、その測定方法を考案し、実際にゲート制御された AlGaAs/GaAs 二重量子井戸構造を作製して、スピン偏極が生じる強磁場中でトンネル現象を観測し、スピン保存則が満たされる程度を初めて明らかにした。本論文はこれらの研究成果についてまとめたもので、全編 5 章よりなる。

第 1 章は、序論である。

第 2 章では、本研究の基礎となる磁場中の二次元電子系の電子状態、特に量子ホール効果をもたらすエッジ状態とバルク状態、およびその電気伝導について記述している。

第 3 章では、二重量子井戸構造を有する電界効果トランジスタの製作とその評価について述べている。まず、フロントおよびバックゲートにより 2 つの量子井戸中のキャリア濃度を独立に制御し、かつそれぞれの井戸内の二次元電子系に独立にオーミックコンタクトをとるために必要なデバイス構造とその作製プロセスを提案し、実際にデバイスを作製している。その後、製作したデバイスの電流電圧特性のゲート電圧依存性と温度依存性から、2 つの二次元電子系に独立にコンタクトがとれており、またデバイスも所定の動作をしていることを確認している。

第 4 章では、強磁場中でスピン偏極した低次元電子系間のトンネル現象に関する測定を行い、実験的に得られた知見とその理論的解析について述べている。最初に、二重量子井戸構造における量子ホール状態間のトンネル現象を利用してトンネル過程におけるスピン保存割合を測定する方法を提案している。次に実際に二重量子井戸構造を有する電界効果トランジスタにその方法を適用し、スピン偏極した最低ランダウ準位のエッジ状態とスピン偏極したバルク状態との間のトンネル過程を観測して、スピン保存割合を決定している。これによりトンネル障壁の厚さの増加と共にスピン非保存のトンネル過程が増大することを見出し、AlGaAs/GaAs 系ではトンネル過程の前後でスピン保存則が厳密には成立しておらず、トンネル現象がスピン散乱を伴うものであることを明らかにした。これは重要な基礎的知見である。

第 5 章は結論である。

以上要するに本論文は、二重量子井戸構造を用いて強磁場下における低次元電子系間のトンネル現象を観測し、半導体中のトンネル過程におけるスピン保存・非保存の割合を初めて明らかにした。これは、半導体量子構造中におけるスピン散乱に関する研究の端緒を拓くものであって、半導体電子工学及び電子物性工学の発展に寄与するところが少なくない。

よって、本論文は博士（工学）の学位論文として合格と認める。