

2001-5047

微小な系の量子輸送における干渉及び、電子
間相互作用の効果の理論的研究

山形大学 野々山 信二

派遣期間 2001年4月1日~2002年2月19日

研究機関 Department of Physics, Simon
Fraser University

Burnaby, British Columbia, Canada V5A

1S6

14

共同研究者 Prof. George Kirczenow

研究題目: 微小な系の量子輸送における干渉及び、電子間相互作用の効果の理論的研究

派遣期間: 平成13年4月1日～平成14年2月19日

研究機関: Department of Physics, Simon Fraser University

共同研究者: Prof. George Kirczenow

1. 研究目的、内容

近年の微細加工技術の進歩により様々な構造を持った半導体デバイスの作成が可能となっている。半導体微細加工技術を用いて作成した2次元電子系に、非常に薄く長い絶縁体を加工することも可能となった。最近、この非常に薄い障壁(88 Å)が加工された2次元電子系の整数量子ホール状態におけるトンネルスペクトルが話題となっている[1]。このような系では、薄い絶縁体のため端状態が生成し、絶縁体で分離された領域の端状態のエネルギー準位が交差する箇所に微小なギャップが生じることが実験的に確かめられている。この実験事実を解析するため、最近、理論、または数値計算による研究が行われている[2,3]。これらの研究結果は定性的に実験事実を反映しているものの、様々な箇所で実験と矛盾する点が生じている。たとえば、観測されたギャップの大きさは予測されたものよりも非常に大きく、その位置もずれていること、また、完全なスピン分極を仮定しなければ、実験事実を説明できないことなどがあげられる。このような微小なギャップが存在する系では、減衰波の広がり非常に大きく、この効果が彼らの系では反映されていないことも一因であると考えられる。また、不純物効果も正確に取り入れられていない。完全なスピン分極に関しては、実験スペクトルからスピンに関する情報が全く得られないことや、GaAsのスピン分裂が、 $\hbar\omega_c/70$ 程度であることから、考えにくい。本研究では、十分大きな系を用い、不純物効果を考慮して上記実験事実を詳しく調べ、問題となっている点を明らかにすることを目的としている。

2. 研究方法、計算方法

コンダクタンス(透過係数 T)の計算では、再帰的グリーン関数法を用いた。電圧及び磁場印可下の電流分布計算では、Keldyshのグリーン関数を再帰的方法により求めた。自己無撞

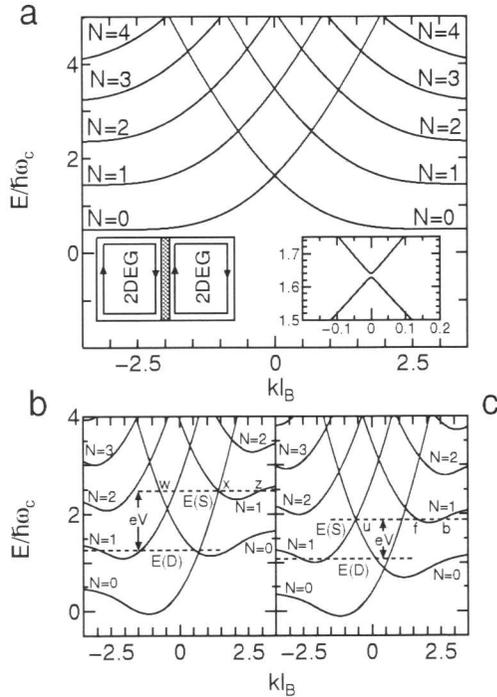


図 1: 薄い障壁近傍のランダウ準位。b,cはHartree計算の結果

着計算では、Hartree近似を用いた。不純物の分布により、磁場印可下で、状態密度がLandau準位を中心に広がっていることを仮定した。

3. 研究成果

(1) 不純物及び、電子間相互作用が存在しない 非常に大きい系のコンダクタンス

障壁の長さを短かくした計算を行った場合、伝導度(透過係数 T)のピーク値は量子化された値とならず、主ピークの近傍に干渉効果による大きな振動が現れた。これは、文献[3]と同様の結果であるが、障壁の長さを増加し、実験パラメータに近づけるに従い、ピーク値は量子化されたものとなり、その近傍に干渉効果が現れた(振動周期は文献[3]より2桁小さい:図2a実線,挿入図)。それ以外の領域では $T=0$ である。ピークの幅、及び、位置はレベル計算から得られたギャップの大きさと正確に一致している。

(2) 不純物の影響

ドープ層のドナーとの相互作用を考えるため、大きな相関長を持つランダムポテンシャルを障壁近傍に配置した。相関

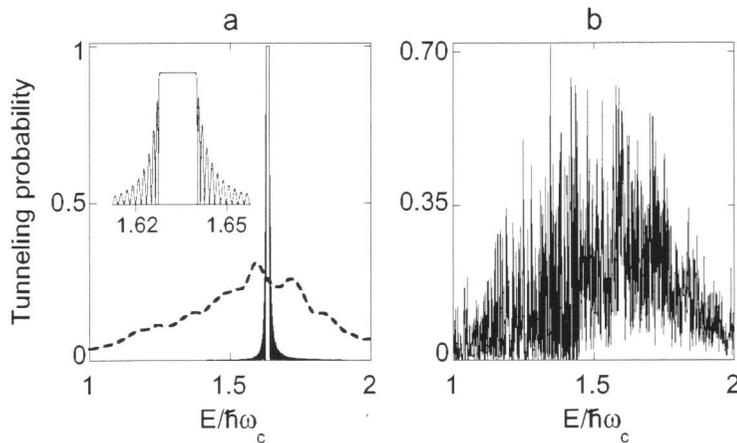


図2: 乱れのある場合(b及びaの点線)とない場合(a)の伝導度

距離が非常に長いにもかかわらず、伝導度は、ランダムポテンシャルが存在しない場合に比べ、劇的に変化した。ピークは無数の非常に幅の狭い鋭いものに変化した(図2b)。電流及び電荷分布を調べると、ピークにおいて障壁の両側に生成した局所状態を介して、共鳴トンネルが起こっていることが解った。さらに、有限温度の効果を加えると、鋭いピークはなめらかなものとなり、実験事実をよく説明するピークの高さ及び幅となった(図2a点線)。しかし、ピークの位置は不純物が存在しない場合とほぼ同様の位置に存在し、これは、実験で予想されるよりも高エネルギー側に生じている。このため、相関長を変化させたり、さらに δ 型の不純物を導入した計算を行った。しかし、どのような種類の乱れを考慮してもピークの位置はほぼ一定で、ピーク位置の変化は別の効果によるものと考えられた。

(3) 電子間相互作用

系の現実的な構造から、高次の相関を考えることは不可能であるため、self-consistent Hartree 近似を行い、gapの位置の変化を調べた。パラメータはすべて、実験値に近いものを用いた。しかし、計算の結果、gapの位置は低エネルギー側に変化するものの実験結果を再現するものではなかった。スピン分極を仮定すると、gapの位置は実験結果を再現するものとなるが、これは、前述したように、非現実的仮定である。次に、障壁中に付加的な正電荷が存在するものと仮定して計算を行った。この場合 $\rho = 11 \times 10^{11} \text{e} \cdot \text{cm}^{-2}$ とすると、実験値を再現し

た。この値を用いて、有限印可電圧下での計算を行った結果を図3に示す。図の実線部分は図1cのようなgapとフェルミ準位の位置関係である場合を示したもので、 $\nu > 1.14$ で実験結果と非常によく対応している。点線は、図1bのような場合を示したものであるが、この場合、トンネルは抑制され、実験では観測できないものと考えられる。抑制の理由は後述する。 $\nu < 1.14$ で実験値は、釣鐘のような形を描いているが、計算結果はそうならない。これは以下のような理由による。仮に、スピン分裂が小さいとすると、量子ホール効果はランダウレベル充填率が1より少し大きい点からそれよりも小さい領域でブレークダウンする。従って、その点より小さい領域ではresistiveであり、絶縁体間の電圧に加えて、さらに、2次元電子ガスのポテンシャル差を考慮しなければならない。これが、実験で観測される釣鐘型の理由である。ここで、もし、完全なスピン分極が起こっているとすると、量子ホール効果のブレークダウンはここでは起こらず、この釣鐘型を全く説明できない。従って、本研究で得られた、スピン分裂が小さいとする結論が唯一実験事実を説明するものである。

(4) quantum railroad (QRR)

A地点からB地点へ向かうチャンネルの数を L 、その逆を M とし、 $L \leq M$ とする。Aから出た電子はすべて多重散乱の後、A地点へ戻り、Bから出射された電子は $M - L$ がAに到達し、残りはB地点へ戻る。これがdirected localization (DL)であり [4]、QRRと呼ばれる乱れた1次元電子導波路の特徴である。アンダーソン局在は $M = L$ 、量子ホール効果は $L = 0$ の特別な場合である。これまで、このQRRの一般的な $M > L > 0$ であるケースは実験的に報告されていない。本研究の結果、Kangらの実験結果 [1] は、一般的なQRRを観測したものであることが解った。図1bと図1cはバイアス電圧が印可された場合の自己無撞着計算の結果である。この場合、ソース側(右領域)のフェルミ準位 $E(S)$ と右領域のエネルギーレベルが交差する箇所は3存在する。この中でb及びzのチャンネルは、他と曲線の傾きの符号が逆であり、従って、速度の符号も逆であるため、backward channelである。他のものはforward channelである。従って、この場合、正方向へ進むチャンネルが2本あり、負方向へ進むチャンネルが1本という $M > L > 0$ が実現されている。DLに従えば、QRRへ正方向に入射された電子の半分は透過し、半分は反射される。この場合、 $N = 1$ のforward channelは速度が小

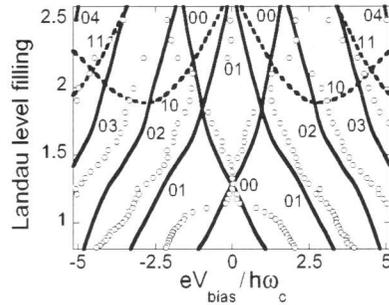


図3: ○は実験値。ijは準位iからjへのトンネルを示す。

さく、同様の速度の backward channel と混じり合い、局在するものと考えられる。従って、QRR の effective forward channel は主に $N=0$ のものである。図1c の場合は、effective forward channel と障壁のトンネルが競合するが、障壁は長いため、QRR を電子が流れている間トンネルが起こる。図1b の場合は、トンネルは起こらない。x 地点でのトンネルは、局在により抑制される。図3 の実線部分は図1c のような場合に当たるものであり、点線部分は図1b の場合を描いたものである。実験では図1b に当たるものは観測されていない。従って、実験結果は DL が予測する QRR を反映するものであることが解った。これまでの理論計算による報告では、トンネルの抑制は示されていない。

4. まとめ

本研究の結果、Kang らによる実験で示され、これまで理解することができなかった事実を全て理論的に説明することができた。また、この実験が、一般的な DL を示す最初の報告であることを明らかにすることができた。

5. 参考文献

- [1] W. Kang *et al.*, *Nature* **403**, 59 (2000).
- [2] Y. Takagaki, K.H. Ploog, *Phys. Rev. B* **62**, 3766 (2000).
- [3] A. Mitra, S.M. Girvin, *Phys. Rev. B* **64**, 041309 (2001).
- [4] C. Barnes, B. L. Johnson and G. Kirczenow, *Phys. Rev. Lett.* **70**, 1159 (1993); *Can. J. Phys.* **72**, 559 (1994).
- [5] S. Nonoyama, G. Kirczenow, preprint