

メゾスコピック系における バリステック伝導効果



研究ノート

高原 淳一*, 蒲生 健次**

Ballistic Transport Effects in Mesoscopic Systems

Key Words : Mesoscopic System, Quantum Point Contact,
Conductance Quantization, Bend Resistance

1. はじめに

1980年にSi-MOS-FETの表面反転層に形成された二次元電子系において整数量子ホール効果(Integer Quantum Hall Effect: IQHE)が発見された。IQHEにおいては低温、強磁場のもとでのホール抵抗が試料によらず h/e^2 (e は電子の電荷, h はプランク定数)を単位として量子化される。1980年代後半になり結晶成長技術の進歩によって移動度の高い二次元電子系が容易にできるようになると、電子が不純物や格子振動による散乱をほとんど受けることなく運動するバリステック伝導の研究が進んだ。1988年にバリステック伝導領域の量子ポイントコンタクト(Quantum Point Contact: QPC)において、磁場の無い状態でコンダクタンスが $2e^2/h$ を単位として量子化されることが発見された¹⁾。IQHEにおいては、電子の局在が大きな役割をはたしているが、QPCにお

けるコンダクタンスの量子化は、二次元電子の横方向閉じ込めによる一次元サブバンドの形成によっている²⁾。この意味でQPCはマイクロ波の導波路のようないわば電子導波路であるといえる。QPCは電子導波路として、方向性結合器をはじめ電子波のインジェクターやディテクターといったメゾスコピックデバイスの基本的構成要素となる。本稿ではQPCの電気伝導について紹介し、最近の実験的研究について述べる。

2. 量子ポイントコンタクトの 作製プロセスと試料

初めにQPCとはどのようなものか紹介する。試料作製に用いる基板は、MBE(分子線エピタキシー)法により成長したGaAs/AlGaAs変調ドープ構造である。基板の構造と作製した試料の概略を図1に示す。図1(a)に示すようにGaAsとAlGaAsのヘテロ接合界面に二次元電子系が形成されている。1.4Kにおける光照射後の基板の移動度は $140\text{m}^2/\text{Vs}$ 、電子密度は $3.4 \times 10^{15}\text{m}^{-2}$ であり、平均自由行程は $14\mu\text{m}$ である。

試料作製プロセスを図2に示す。はじめに幅 $100\mu\text{m}$ 程度の大きなホールバーパターンを残して他の部分を化学エッチングする。エッチング領域の電子はなくなり、ホールバーパターン部分のみに二次元電子が残る。そこに測定端子用オーミック電極を形成する。次に電子ビーム露光によって図1(b)のようなパターンを描く。その後ゲート電極用Auを蒸着し、レジスト



*Junichi TAKAHARA

1967年8月25日生

平成4年大阪大学大学院基礎工学
研究科物理系専攻前期課程修了
現在、大阪大学大学院基礎工学研
究科物理系専攻後期課程在学中、
基礎工学部電気工学科、蒲生研究
室、半導体物性
TEL 06-844-1151(内線4572)



**Kenji GAMO

1940年3月30日生

昭和37年大阪大学工学部・電子
工学科卒業
現在、大阪大学基礎工学部、教授、
工学博士、電気工学

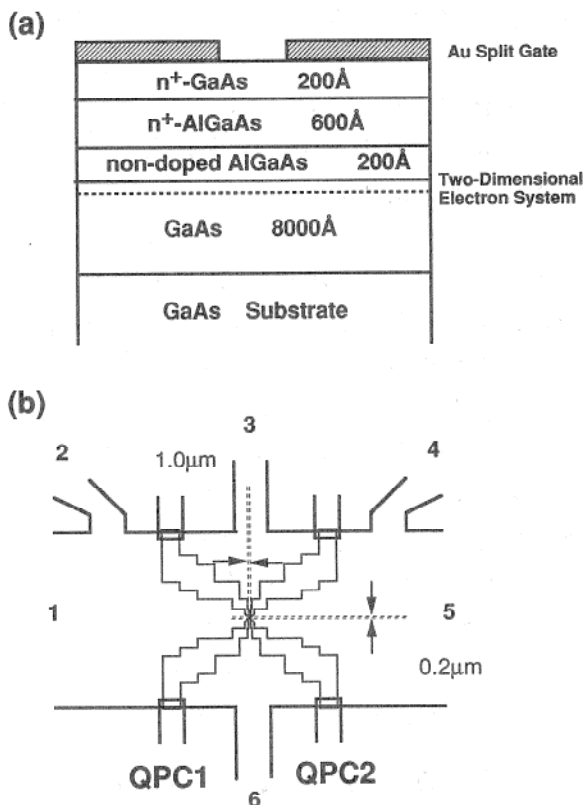


図1 (a) 試料断面, 斜線部分はスプリットゲート
(b) 試料概略, 数字1-6は測定端子を示す.
スプリットゲート先端部の幅 $0.2\mu\text{m}$, 長さ
 $0.2\mu\text{m}$ であり, QPC1とQPC2の間の距離
は $1.0\mu\text{m}$ である.

を溶かす(リフトオフ)と, ゲート電極パターンのみが試料表面に転写される(このような電極構造をスプリットゲートと呼んでいる). 最後にゲート電極からの引き出し部分を蒸着して完成である.

図1(b)に示すように試料は独立に制御できる二つのQPC(ここではそれぞれQPC1, 2と呼ぶ)が直列に並んでいる. スプリットゲートに二次元電子系に対して負の電圧を印加すると, ゲート下には電子のいない空乏層ができ, スプリットゲートの先端部分のみに電子のいるチャネルが形成される. すなわち二つの大きな二次元電子ガスの領域が, 狭くて短いチャネルを通じて結合した系が得られる. チャネル長は平均自由行程に比べて十分短いので, 電子はバリスティックにチャネル中を通過することができる. 特に半導体の系では電子のフェルミ波長はチャネル幅と同程度となるために閉じ込めの効果により横方向の波数は量子化されるのでQPCが

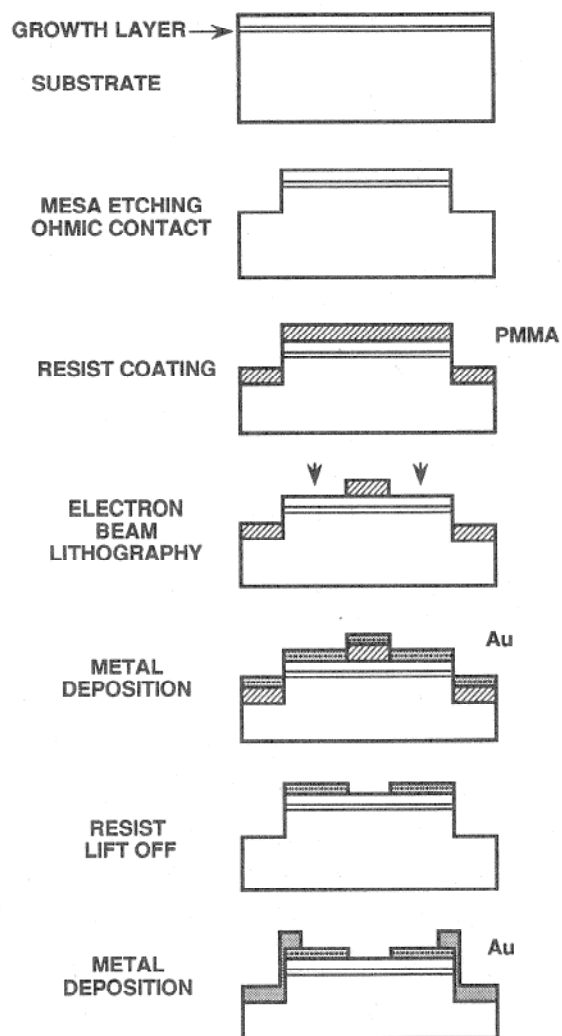


図2 試料作製プロセス

実現される.

3. QPCにおける電気伝導

図3は温度 1.4K におけるQPCに印加したゲート電圧に対する抵抗とコンダクタンスである. 抵抗は交流四端子法により測定している. ゲートに負の電圧を引加していくと, スプリットゲート先端部の空乏層が広がりチャネル幅が次第に狭くなる. それと共に抵抗は増加し, それにともない量子化ステップが観測される. チャネルは $V_g = -1.27\text{V}$ 付近でピンチオフしている. 抵抗をコンダクタンスに変換する時, もとの抵抗値はQPC部分以外の二次元電子系の抵抗を含んでいるので, $V_g = 0$ での抵抗値を引いてからコンダクタンスに変換している. コンダクタンスに直すと $2e^2/h$ の整数倍に量子化され

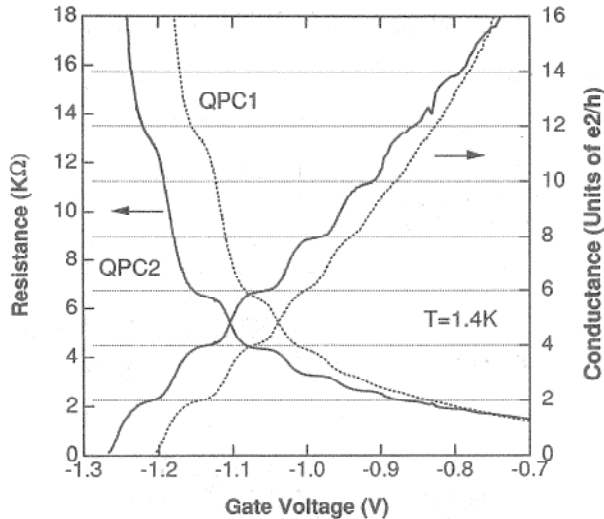


図3 QPC1およびQPC2におけるゲート電圧に対する抵抗とコンダクタンス

ているのがはっきりとわかる。これはいわば電子導波路のモードを反映しているといえる。

QPC2の特性をQPC1と比較すると、QPC1ではステップがそれほどはっきりせずなだらかになっている。これらのQPC構造の設計値は同一であり基板上に同時に形成したものであるがその特性が異なる。これは量子化が閉じ込めポテンシャルに依存していることを考えれば当然のことである。理論研究によればQPCの閉じ込めポテンシャルが広い領域から狭い領域へと十分なめらかに(断熱的に)変化しており、かつチャンネル長がバリスティック長より短くエバネッセントモードの影響が無視できるほど長ければ良い精度で量子化ステップが観測できることがわかっている³⁾。現在の微細加工技術では10nm程度の制御は可能となってきたが、AlGaAs層中にランダムに分布したドーパントにより形成される局所的ポテンシャル分布までは制御できない。この結果QPCチャンネル中の閉じ込めポテンシャルはQPCの形成された場所により異なってしまう。実際、試料を室温に戻して再び1.4Kで測定すると特性が全く変わることがある。これは熱サイクルを加えることにより、ドーパントの再配置が起こり、ポテンシャル分布が変わったためであると考えられる。また移動度のやや低い(80m²/Vs程度)基板を用いて実験すると、その平均自由行程はチャネ

ル長より十分長いにもかかわらず量子化ステップはなだらかになってしまう。以上述べたように現在のところ、QPCにおけるコンダクタンスの量子化は残念ながらIQHEに比べると再現性が悪く精度も良くない。ランダムに分布したドーパントによる現実的ポテンシャルを取り入れたモデルにおける計算によると、QPC中のランダムなポテンシャル分布は伝導特性に大きな影響を及ぼすことが指摘されている⁴⁾。特に電子波の反射や共鳴トンネリングの効果が、温度500mK以下の極低温において重要になってくると考えられ、ステップにディップやピークが観測されることが予測されている。このような効果は温度1.4Kではフェルミ面のぼけのため平均化されてしまい観測は難しいが、平均化されているからこそ量子化ステップが観測できるわけでもある。

4. 曲がり抵抗における量子輸送

最後に最近の研究について簡単に述べる。QPCは電子波のインジェクター、ディテクターとして用いることができる。図4実線はQPC1を1stモード(コンダクタンス=2e²/h)に固定してインジェクターとし、QPC2をディテクターとして用い、その電圧を変化させたものである。抵抗は図1(b)の端子1から3へ電流を流し、5.6の電位差をとっている。このような抵抗を曲がり抵抗(Bend Resistance: R_B)と呼ぶ。

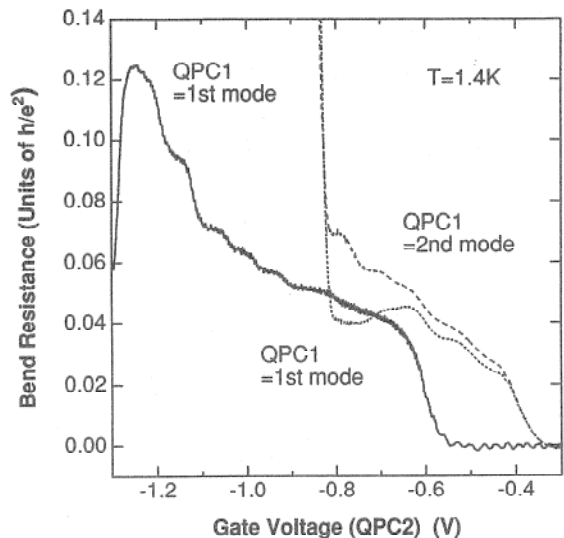


図4 曲がり抵抗のQPC2のゲート電圧依存性

もちろん拡散的な伝導領域では R_B はゼロであるが、バリスティック系では縦方向の運動量が保存されるために、電子は曲がり切れずに直進してしまい向かい側の電圧端子に到達するためにゼロとはならない。ゲートに負の電圧を引加していくと R_B は増加するが、単調にではなくステップが観測される。ステップ位置はQPC2の量子化ステップ(図3参照)と良く対応しており、モードの影響が R_B にも現われているといえる。図4破線、点線は別のサンプル(電子密度 $2.6 \times 10^{15} \text{ m}^{-2}$, 移動度 $40 \text{ m}^2/\text{Vs}$)の結果である。QPC1が2ndモード(コンダクタンス $=4e^2/h$)の時、 R_B はステップを示しながら増加するが、QPC2のコンダクタンスステップははっきりしておらずなだらかである(ここでは示していない)。にもかかわらず R_B にははっきりとしたステップが観測できる。これはインジェクター側のQPC1のモード数が2なので、断熱的輸送のためQPC2に入射する電子分布が通常のフェルミ分布とは異なっているためであると考えている。またQPC1が1stモードのとき電圧を印加していくと R_B は減少している。これはおそらくチャンネル中に偶然存在する不純物の効果であると考えて現在研究を進めている。

5. お わ り に

超微細加工技術と結晶成長技術の進歩は電子

の伝導チャネル(モード)の制御を可能にした。バリスティック伝導になると拡散的伝導の場合と異なり、不純物の配置による伝導特性のゆらぎが少なくなると考えられてきた。しかしQPCの実験が示すことはドーパントの作るランダムなポテンシャルによりコンダクタンス量子化が影響を受けるということである。素子の微細化がさらに進むなら不純物の位置まで制御するアトミックマニピレーション技術を確立するか、少々の特性のばらつきがあっても全体としてうまく動作する素子が必要となるように思われる。本研究は本学理学部邑瀬研究室との共同研究である。

参 考 文 献

1. B. J. van Wees et al., Phys. Rev. Lett. 60, 848 (1988). D. A. Wharam et al., J. Phys. C21, L209 (1988).
2. QPCに関するレビューとして例えば, G. Timp : Semiconductors and Semimetals. ed. M. Reed (Academic Press. San Diego. 1992) Vol. 35, Chap. 3. p113.
3. A. Yacoby et al., Phys. Rev. B41, 5341 (1990).
4. J. A. Nixon et al., Phys. Rev, B43, 12638 (1991).

