

大阪大学大学院 理学研究科 物理学専攻 学際物理学講座



研究室紹介

鷹岡 貞夫*

Interdisciplinary Physics, Department of Physics,
Graduate School of Science, Osaka University

Key Words : 量子ホール効果, メゾスコピック物理, エッジ電流, 電子フォーカス効果

1. はじめに

近年、半導体工業の世界では、LSI、CPUなどで代表されるような微細加工技術をもちいて作製されたデバイスが重要な位置を占めている。また携帯電話や衛星放送に使われるHEMT(高移動度トランジスタ)から作製された高周波デバイスも注目を浴びている。これらのデバイスはそれぞれSi-MOS, GaAs/AlGaAsヘテロ構造という2次元電子系をもつ半導体基板から作製されている。一方、半導体物理という理学(純粋科学)の方面でも、それらの2次元電子系の物理およびそれらを基にして微細加工技術をもちいて作製された量子細線、量子点(ドット)などの性質を研究するメゾスコピック物理が大変盛況で、これらの研究が最近の半導体物理の最も主要なテーマになっている。特に、2次元電子系で発見された整数量子ホール効果、分数量子ホール効果は2次元系特有の物理現象として基礎物理学方面からも注目を浴びており、それぞれ1985年、1998年のノーベル物理学賞を受けている。我々の研究室では2次元電子系の量子ホール効果およびそれを微細加工したメゾスコピック素子の研究を行っているので、それらの研究の概要を以下に紹介する。

2. 研究の概要

(a) 量子ホール効果とエッジ電流



*Sadao TAKAOKA
1950年6月8日生
1978年大阪大学大学院・理学研究科・物理学専攻博士課程修了
現在、大阪大学大学院・理学研究科・物理学専攻・学際物理学講座、助教授、理学博士、固体物理
TEL 06-6850-5374
FAX 06-6850-5376
E-Mail takaoka@phys.sci.osaka-u.ac.jp

極低温、強磁場下で2次元電子系のホール抵抗(ホール電圧/電流)を測定するとその値が図1のように h/e^2 (h :プランク定数, e :電子の素電荷)の整数分の一又は分数分の1に極めて正確に量子化される。これらの現象はそれぞれ整数および分数量子ホール効果と呼ばれている。量子ホール効果の説明としては様々あるが、特に試料の端に沿って流れ、ほとんどエネルギー緩和しない“エッジ電流”という概念を使った説明は、直感的で解りやすく、また試料の大きさに比例しない抵抗などの一見奇妙な現象を説明できるので多くの実験家に用いられてきた。我々は本来なら観測されない電流測定端子と電圧測定端子が空間的に離れた“非局所抵抗”や測定に関

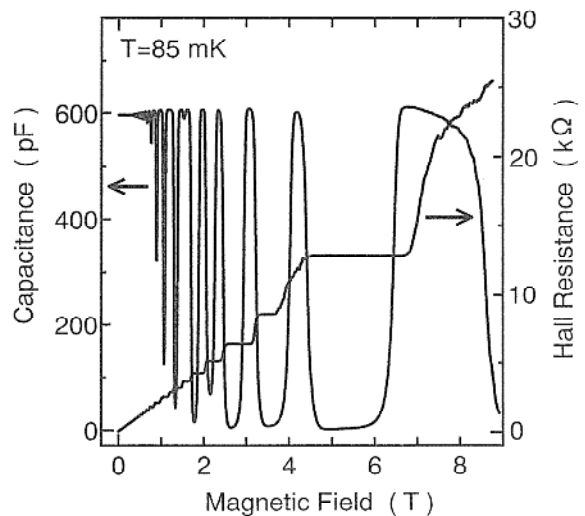
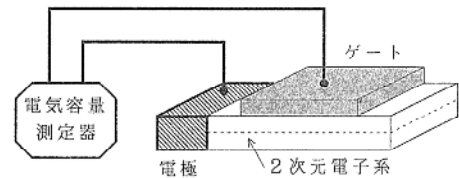


図1 量子ホール効果状態でのホール抵抗と磁気電気容量

係しない端子による抵抗への影響を整数量子ホール効果状態で観測し、これらをエッジ電流を使ったモデルで説明した。さらに図1のように2次元電子系とその上に付けたゲート電極間の(交流)電気容量を整数および分数量子ホール効果状態で試料の端の長さを変えた試料で測定した。その結果、両効果状態でのエッジ電流の存在を明確に証明し、その幅を精度良く決定する事に成功した。

(b) 電子フォーカス効果

GaAs/AlGaAsヘテロ界面に形成される2次元電子系内の電子の平均自由行程は極低温では数十マイクロンのもなり、微細加工した試料では電子は測定端子間をほとんど散乱されることなく移動できる。図2のように電流端子(I-)から出た電子は垂直磁場により曲げられ電圧端子(V-)に入るごとに抵抗がピークをもつ、これを(磁気)電子フォーカス効果という。我々は従来から電子フォーカス効果をから求めた電子のバリスティック散乱長と平均自由行程との違い、試料端での電子の鏡面反射係数、測定に用いない端子による見かけ上の電子の反射などを研究

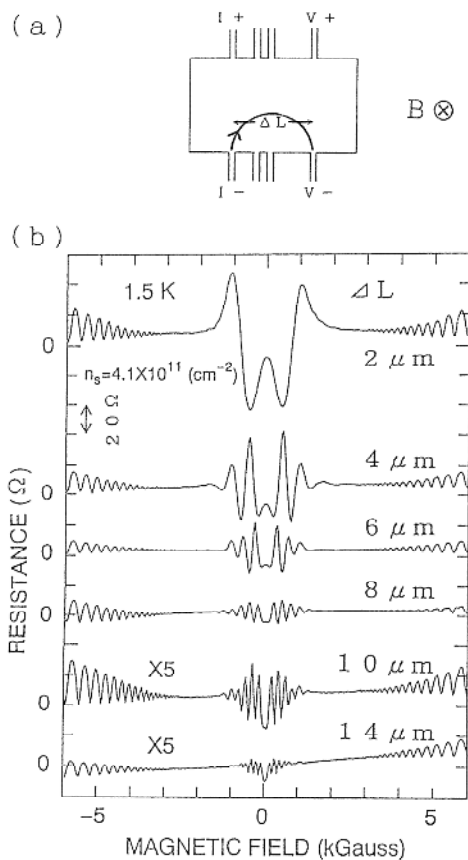


図2 様々な電流-電圧端子の分離距離(ΔL)での磁気電子フォーカス効果

してきた。さらに現在、2次元電子系面内の磁場による電子のフェルミ面の変化やそれに伴うバリスティック散乱長の変化を電子フォーカス効果により探求している。

(c) アンチドット超格子の整合振動

2次元電子系上に電子の存在しない穴(アンチドット)を規則正しく並べた系をアンチドット超格子という。この系に弱い垂直磁場をかけて磁気抵抗を測定すると、電子が整数個のアンチドットを囲む円軌道を形成する磁場ごとにピークを持つ(磁気)整合振動が観測される。我々は様々な周期、形状の超格子で整合振動の測定を行い、整合振動のピーク位置が電流方向に垂直な方向の超格子の周期にのみ依存していることを見出した(図3参照)。これを、整合振動の原因が電流方向に垂直な方向にアンチドット上をスキップしていく電子軌道であるとして説明した。

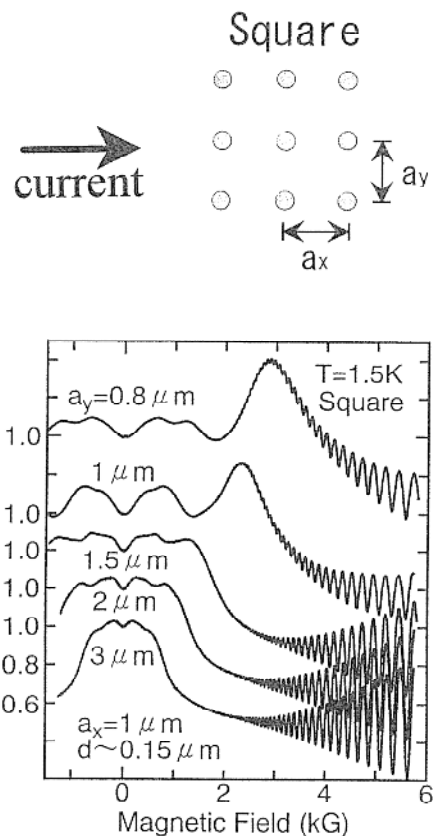


図3 様々な周期(a_y)のアンチドット超格子の電気整合振動

(d) 2層2次元電子系のサイクロトロン共鳴

2つの2次元電子系が近接していて、その間の相互作用が無視できない2層2次元電子系の基底状態は対称、反対称の2つのサブバンドに分れる。それ

に面内磁場をかけると各サブバンドのフェルミ面が大きく変形することが知られている。この変形に伴い、そのサイクロトロン質量も大きく変化すると予想される。我々は試料を回転することにより垂直磁場と面内磁場が自由に設定することが出来るスプリット型超伝導磁場と遠赤外フーリエ分光器を組み合わせた装置で2層2次元電子系のサイクロトロン共鳴の測定をして、様々な垂直磁場でのサイクロトロン質量の面内磁場依存性を系統的に決定した(図4参照)。その結果、サイクロトロン質量の面内磁場による変化は、垂直磁場を摂動として計算された半古典論的な計算結果とはかなり違った複数な振舞をすることが判かり、有限の垂直、面内磁場を考慮した量子論に基づいた計算や異なったサブバンド間の遷移を考慮する必要があることが判明した。

3. おわりに

近代の半導体産業はトランジスターの発明により始まったと言っても過言ではない。トランジスターやエサキダイオードの発明は物理学者によりなされたので、当初は半導体工学と半導体物理は密接な関係があった。その後、半導体産業の驚異的な発展に伴い、半導体工学も大きく成長し、専門細分化したので半導体物理との関係は比較的疎遠になっていった。ところが、最近の半導体工業における微細加工技術や成長技術の飛躍的進展により、逆にそれらを利用した新しい半導体物理(メゾスコピック物理)が起こり盛んになっている。このメゾスコピック物理は半導体のみならず金属や磁性体などにも応用され最近の固体物理の新しい分野を形成している。エサキダイオード、超格子の研究で有名な江崎玲於奈博士はこのメゾスコピック物理の特徴を、“Do It Yourself Quantum Mechanics”と表している。おそらく「試料の構造を量子論が顕著になるサイズまで自由に設計、加工できるので、実験者の創意と工夫により目的とする量子現象に適合した試料で新しい現象を探求する事が出来る」という意味あると思われる。最後に我々の研究室の構成員は現在、物性物理学講座に所属する邑瀬和生教授、音賢一助手、王勇助手と学際物理学講座に所属する私(助教授)の計4名の研究職員と大学院博士課程後期2名、前期7名、学部4年生4名である。特に、私の属する学際物理学講座は異なった学問分野間の交流による新しい物理をめざすもので、従来から行っている半導体工学や電気工学の分野との共同研究のみならず、今後はもっと他の分野との交流が進展することを期待して、この研究室紹介を終えたい。

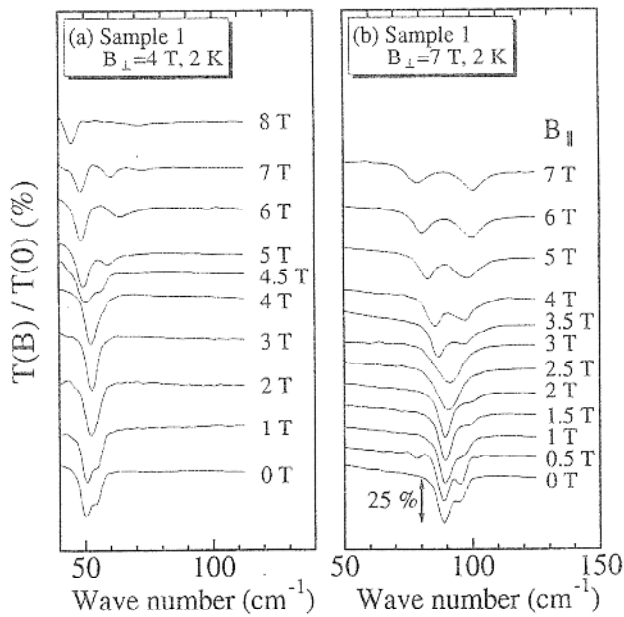


図4 2層2次元電子系のサイクロトロン共鳴の面内磁場(B_{\parallel})依存性

