

## 論文の内容の要旨

論文題目 半導体超格子における磁場中輸送現象の研究

氏名 藏口 雅彦

EsakiとTsuにより、ドーピングもしくは構成原子の組成比を変調することによって、超格子ポテンシャルを人工的に導入することができる、という提案がなされた。このとき、伝導電子はこの周期性に対応し、ミニバンドと呼ばれるバンドを形成する。フェルミエネルギーが第一ミニバンドと第二ミニバンドの間にあるとき、三次元的なバンド構造は、

$$E = \frac{\hbar^2}{2m^*} (k_x^2 + k_y^2) - 2t_c \cos ck_z \quad (1)$$

と表すことができる。このような電子系は、擬二次元電子系と呼ばれ、有機導体や層状酸化物など多くの天然物質が存在し、多くの研究が成されている。そこで、半導体超格子の自在に設計できるという利点を生かし、擬二次元電子系の磁場中での輸送現象を総合的に明らかにすることを本論文の目的とする。

本研究で用いた試料は、全て学内共同利用施設の東京大学先端科学研究センター・プロセスセンター内の分子線エピタキシー装置を使って自ら作製した。作製した超格子試料をフォトリソグラフィーを用いて、ポスト型のデバイスに加工した。測定装置は、13Tまで印加可能な超伝導磁石と<sup>3</sup>He冷凍機と角度回転機構を組み合わせて、電気伝導測定を行なった。

本論文において、以下のことを明かにした。

### 1. 層間コヒーレンスと角度依存磁気抵抗効果

擬二次元電子系において、磁気抵抗の角度効果として、磁気抵抗が磁場の角度に対して振動する角度依存磁気抵抗振動 (AMRO) と磁場が伝導面に平行のとき現れる抵抗ピークが知られている。これらの磁気抵抗の角度効果は、三次元的フェルミ面の幾何学的形状と関連付けて説明されてきた。このため、特に有機導体の新物質等のフェルミ面形状の決定手法として広く用いられるようになってきた。ところが、最近、層間トンネル時間が面内散乱時間より長いようなフェルミ面の三次元性が失われた試料においても、AMROは現われるという理論的指摘がなされた。そこで、本研究では、半導体超格子において、様々

な層間結合をもつ試料の磁気抵抗の角度依存性を調べた。

図1の(a)に、結合強度が最も強い試料の磁気抵抗の磁場方位依存性を示す。このように、層間結合が強い試料では、磁場と伝導面が平行(90度)でピーク効果が現れ、また、超格子の設計から求まるAMROのピークの位置(図中点線)に合うようにAMROが現れる。図1において、(b), (c), (d)と層間結合が弱くなるにつれ、ピーク効果は消滅する。しかし、最も層間結合が非コヒーレントな試料においても、AMROは依然として残ることが見て取れる。これにより、角度依存磁気抵抗振動(AMRO)はフェルミ面形状効果ではないことを実験的に実証した。

また、全体的なバックグラウンドは、通常、電流と磁場が垂直でローレンツ力を最も強く受ける90度で磁気抵抗が最大となる、と期待される。しかし、図1から分かるように、層間結合が弱くなるにつれ、強磁場領域で90°で磁気抵抗が最小になり、バックグラウンドが反転することが分かった。また、サイクロトロン運動が超格子周期に一致するところで大きく抵抗が減少することも見出した。

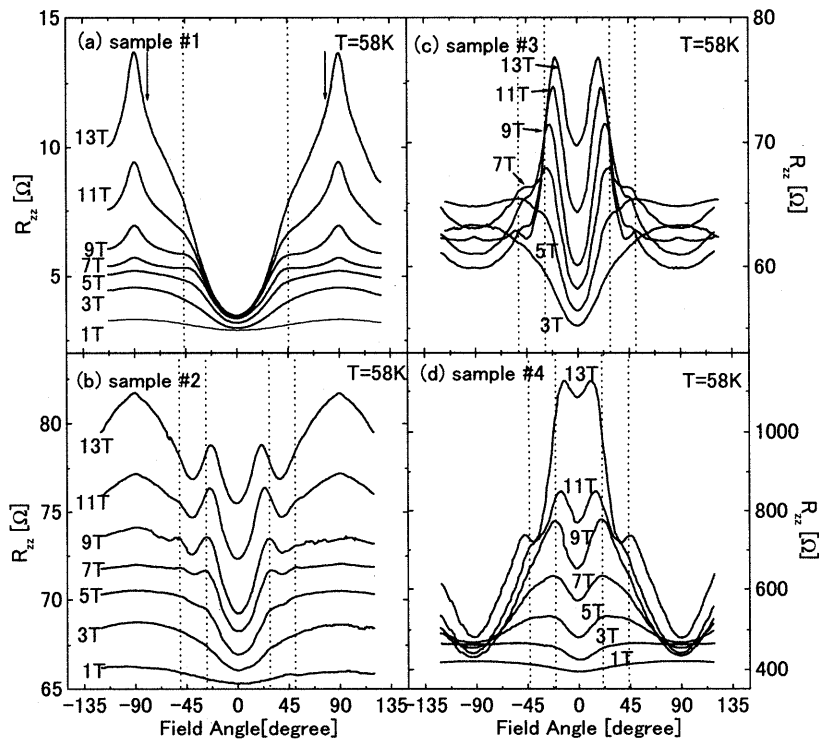


図1 磁気抵抗の角度依存性

## 2. 電場下における角度依存磁気抵抗効果

### 2.1. 均一電場下

擬二次元電子系に層間方向に電場と磁場を印加すると、ブロッホ運動に起因したシュタルク・ラダー準位とサイクロトロン運動に対応したランダウ準位が形成される。このランダウ準位間隔とシュタルク・ラダー準位間隔が整合することにより、シュタルク・サイクロトロン共鳴と呼ばれる共鳴が起こり、伝導測定において、電流ピークとして観測される。

本研究において、このシュタルク・サイクロトロン共鳴を起こしている条件の下、さらに、横磁場を印加すると、シュタルク・サイクロトロン共鳴が横磁場の関数として振動的振る舞いを取ることを見出した。そこで、ボルツマン方程式を用いて半古典計算を行ない、解析を行なった。図2に横軸を磁場の方位、縦軸をブロッホ振動数とサイクロトロン振動数の比として、電流を計算した結果を示す。この図で、緑の線で描かれるようにシュタルク・サイクロトロン共鳴の電流の大きな領域が磁場の垂直成分がシュタルク・サイクロトロン共鳴の条件を満たしながら現われることが分かった。また、赤い線で描かれるように電流のディップが現われることが分かった。これは、零電場極限で、従来のAMROを再現しているが、電圧が大きくなると、電流ディップの位置が高角側にシフトしていくことが分かった。このシフトの量を定量的に見積もるため、電子の平均速度を計算すると、シュタルク・サイクロトロン共鳴条

件下でのみ有限で、 $\tau\langle v_z \rangle \propto J_{\delta n}(ck_F \tan\theta)$ と求まる。これは、共鳴の共鳴強度を与えるが、ベッセル関数で磁場の方位の関数として振動することが分かった。零電場では従来のAMROに対応する。つまり、電場下で一般に、シュタルク・サイクロトロン共鳴の共鳴強度の振動がAMROであることが新たな知見として明らかになった。様々な条件下で測定した結果、擬二次元電子系における電場・任意磁場での磁気抵抗効果が図2で統一的に理解できることが分かった。

また、磁場方位が $90^\circ$ の時、 $F_z/B_{\parallel} = v_F$ の条件を満たす点において、AMROの集積点として電流ピーク構造が現れることが図2から予想できる。図3がこの磁場配置の元で行なった電流の磁場依存性であるが、矢印で示されるように新たな電流ピーク構造を見出した。この効果は、擬一次元電子系との対応関係を考えると、擬一次元電子系における第三角度効果に対応することが分かった。

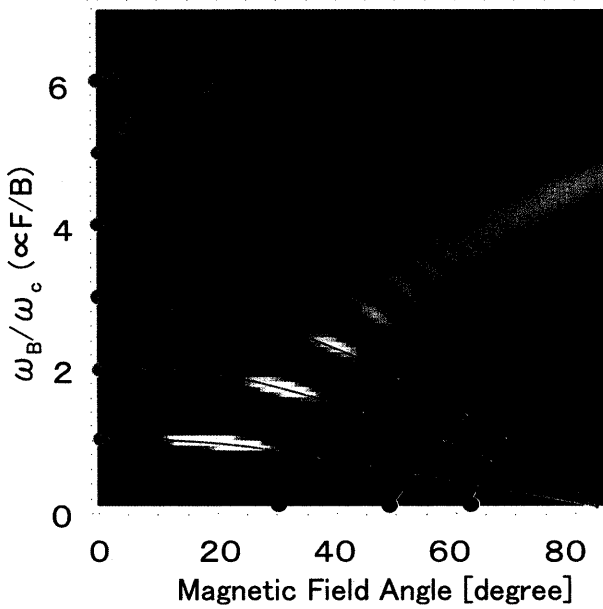


図2 電流の半古典計算結果

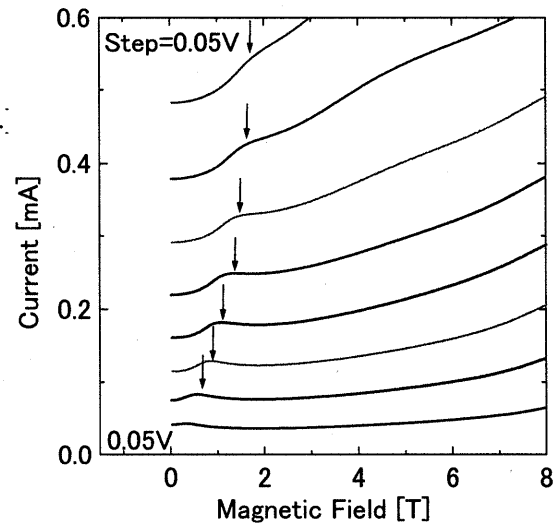


図3 平行磁場下での電流の磁場依存性

## 2.2 不均一電場下

半導体超格子では、必ずしも電場が均一にかからず、電場ドメインと呼ばれる構造が現れ、電場が不均一にかかる場合がある。零磁場でドメインを形成する試料の磁場中での電圧・電流特性の測定結果を図4に示す。零磁場では、ドメイン構造をもつときほぼ一定値を示していた電流が、磁場中では赤い矢印に示されたシュタルク・サイクロトロン共鳴条件を満たすところで、階段状に変化することが分かった。このことから、シュタルク・サイクロトロン共鳴以外では、ランダウ準位に対応した電場ドメインを形成することを明らかにした。これは、従来量子井戸の閉じ込めによる量子準位に対応したドメインに対し、新しいドメイン構造を見出した、といえる。

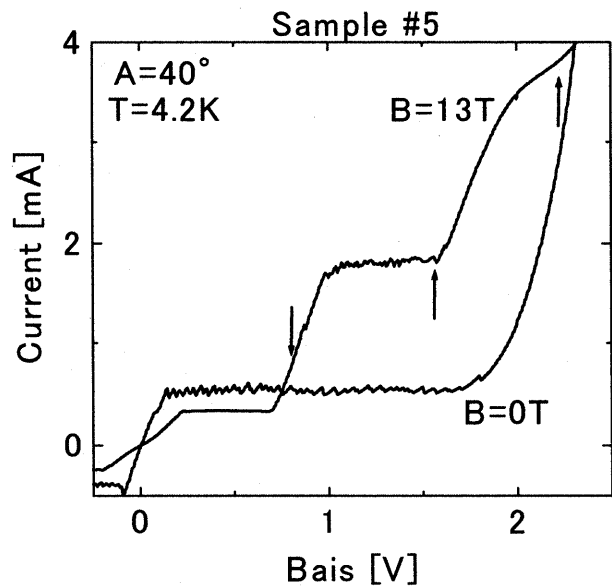


図4 零磁場でドメインを形成する試料の磁場中電圧・電流特性

### 3. 多層量子ホール系における表面伝導

半導体超格子は、低温・強磁場下で各々の電子層が量子ホール効果を示し、層間がトンネル結合した多層量子ホール系をなす。このような試料の端面において、端状態が結合したカイラルな性質をもつ特異な二次元電子系が実現し、温度に対してコンダクタンス一定という性質をもつと理論的に予想されていた。しかし、一般に層間伝導には、表面状態の他に試料内部のバルク状態の寄与も存在するため、表面伝導の電気伝導特性を幅広い温度領域で得ることはできなかった。

そこで、本研究において、断面積が同じで周長を変えることで、表面伝導の垂直伝導に対する寄与を変化させたの試料を作製し、それぞれの試料間のコンダクタンスの差から、表面伝導の伝導特性を幅広い温度領域で分離して求めることを提案し、測定を行なった。

図5のように、試料が量子ホール状態以外では、磁気抵抗の振舞が一致するが、量子ホール状態以外では異なることから、電気伝導に対する表面状態の寄与が存在することが量子ホール状態だけで存在することが分かった。このような磁気抵抗の差から表面伝導のコンダクタンスの温度・磁場依存性を図6のように求めた。

量子ホール領域の中心では、低温で理論的予測に沿って、一定値に向かう振舞をとることが明らかになった。また、予想に反し、図6のように、表面伝導は量子ホール領域の境界で増大するという振舞いを見出した。この表面伝導の増大は、エッジ状態がバルク状態と混成すると考えることで実効的なエッジ状態の長さが増大していると考えられることで説明できる。このように、エッジ状態とバルク状態が混成する様子を多層量子ホール系の表面伝導により、観測できることを示した。

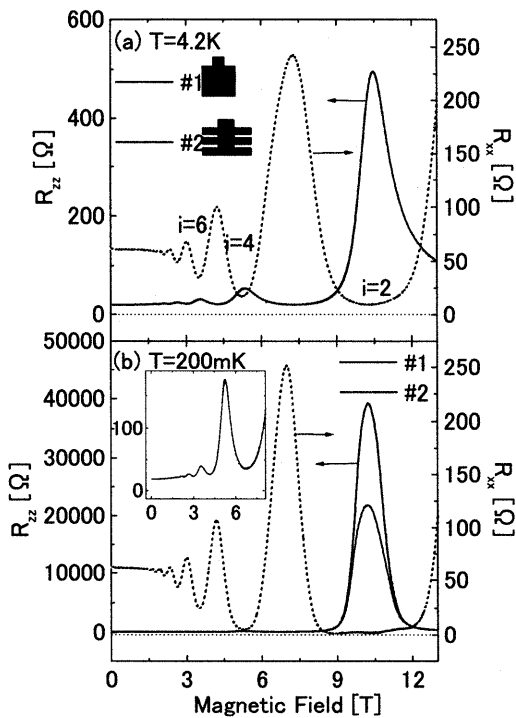


図5 層間磁気抵抗の試料の周長依存性

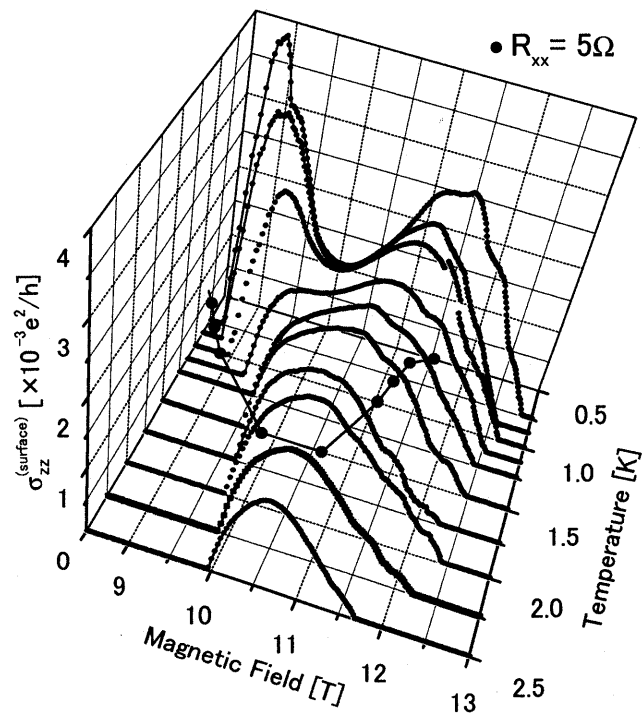


図6 表面伝導の温度・磁場依存性