

論文の内容の要旨

論文の題目 量子ホール効果素子における非平衡電子のイメージング

氏名 河野 行雄

1. はじめに

縦抵抗 R_{xx} が消失し、ホール抵抗 R_H が量子化値 h/e^2 の整数分の 1 に一致する量子ホール系における電気伝導には、バルク状態の電子局在やエッジ状態に絡んだ非局所的な伝導など、多彩でかつ重要な物理が盛り込まれていることが知られている反面、基本的な部分で未だに理解の進んでいない問題も依然として残っている。その 1 つに、熱平衡状態にある電流端子とランダウ量子化された二次元電子系との接続という問題がある。ホールバー型伝導体の場合、電流端子近傍に非常に大きな電場が集中しているため、これが、端子からの電子注入や端子への電子抽出の過程に影響を与えたり、また抵抗量子化の局所的な崩壊を起こしたりすることが予想される。これらは、一般に無散逸の電流が流れるとされる量子ホール系の電気伝導に本質的に関わってくる問題であるが、にもかかわらず、これまで未解決のまま放置され続けた。その背景には、従来の測定対象が電気抵抗という物理量にほぼ限られてきたという事情がある。これだけでは、伝導体内部の電子状態を探るには限界がある。そこで、本研究は、電流端子の役割を解き明かすために、(i) 電子系内部における熱平衡状態からずれた非平衡な電子の空間分布を観察する実験方法を確立し、(ii) そこから得られた結果をもとに、それが R_{xx} や R_H とどう相関し合っているかを明らかにする、という段階を踏んで実行された。

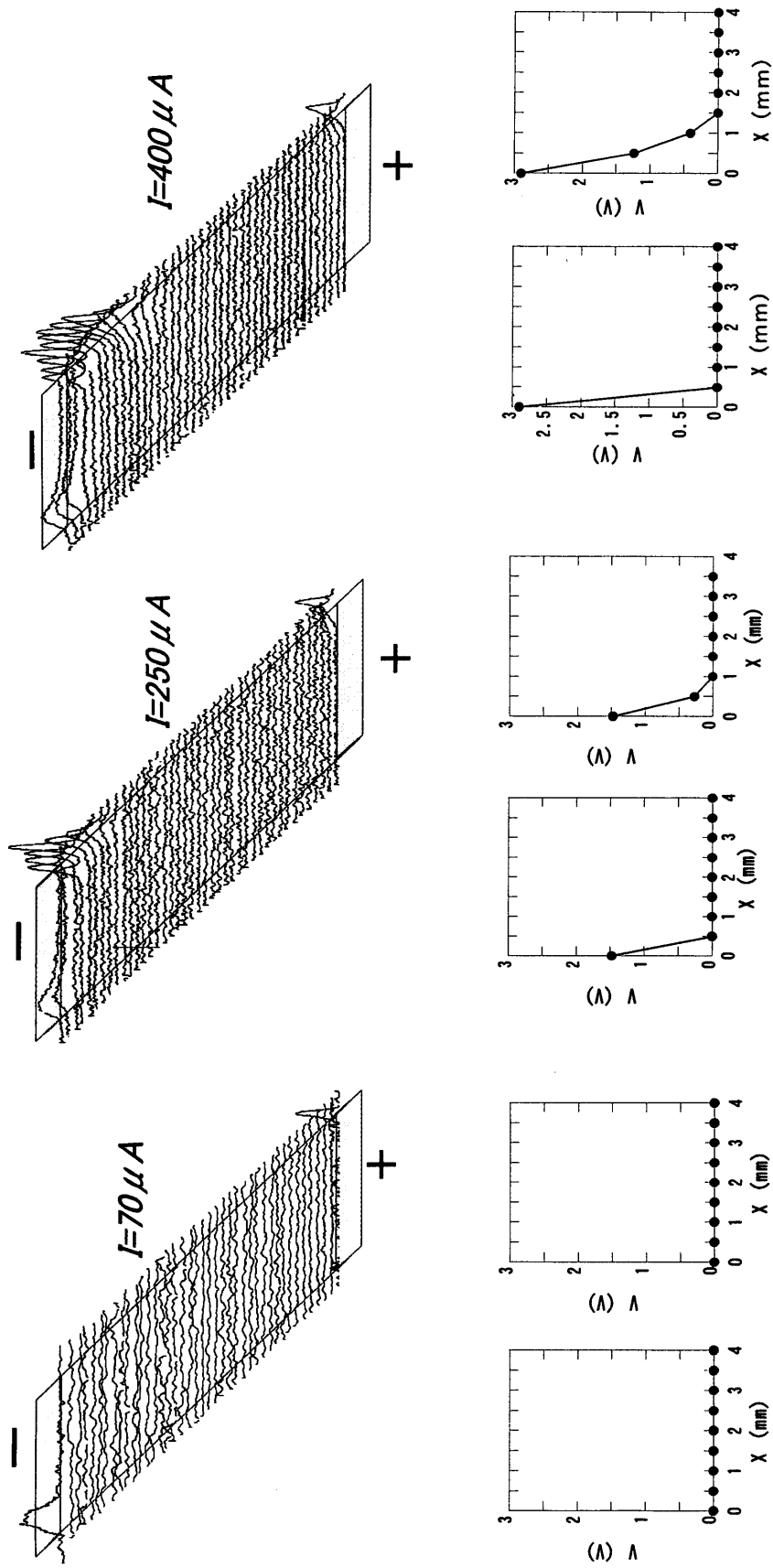


図2 上段：異なる3つの電流値におけるサイクロトロン発光の空間分布。磁場は、紙面の裏から表の方向に印加されている。
 下段：試料両端における電圧分布。すべて、量子化ホール電圧分は差し引かれている。左図が試料左端、右図が試料右端における分布に対応している。

2. 実験方法

非平衡電子分布をイメージングする方法としては、非平衡電子がランダウ準位間でエネルギー緩和するのに伴って生じるサイクロトロン発光（遠赤外光）の空間分解測定を用いるという新しい手法を採用した。サイクロトロン発光測定は、ランダウ量子化された二次元電子系から生じるものだけを観測することになるため、端子中の散逸も含んでしまう熱散逸測定とは質的に異なっており、二次元電子系内の非平衡電子の振る舞いを直接的にプローブするための強力な手段となる。実際の測定では、伝導体の各位置から生じる光は極めて微弱であるため、高感度な遠赤外光検出器が必要となる。ところが、遠赤外光検出器には、高性能なものが世の中一般に存在せず、必然的に確立されたイメージング技術がない。そこで、本研究では、検出器の開発研究、高分解能測定のための光学系の構築にまず着手した。

検出器は、同じく量子ホール効果素子のサイクロトロン共鳴光吸収を利用したものを開発した。この検出器は、市販のものよりも高感度で、さらに光応答スペクトルが狭帯域（波長選択性が高い）という特徴を有するため、余計な散逸を含まないサイクロトロン発光だけを検出し、量子ホール電子系内の純粋な非平衡電子分布のみを抽出することが可能となった。一方、イメージング測定のための方法としては、図1に示したようなソリッドイメージンレンズによる顕微計測法を用いた。これは、基板の裏側にSi製の半球レンズをのせ、GaAs、Si結晶の高い誘電率を利用してその分だけ波長の大きさを減少させ、高分解能な画像化を可能にしようとする方法である。実際の空間分解測定は、試料が貼り付けてあるX-Y可動ステージを二次元方向にスキャンすることにより行った。今回得られた分解能は、約 $50\text{ }\mu\text{m}$ である。

以上の高感度狭帯域検出器と光学系とを組み合わせることにより、非平衡電子分布の詳細な観測が可能となった。

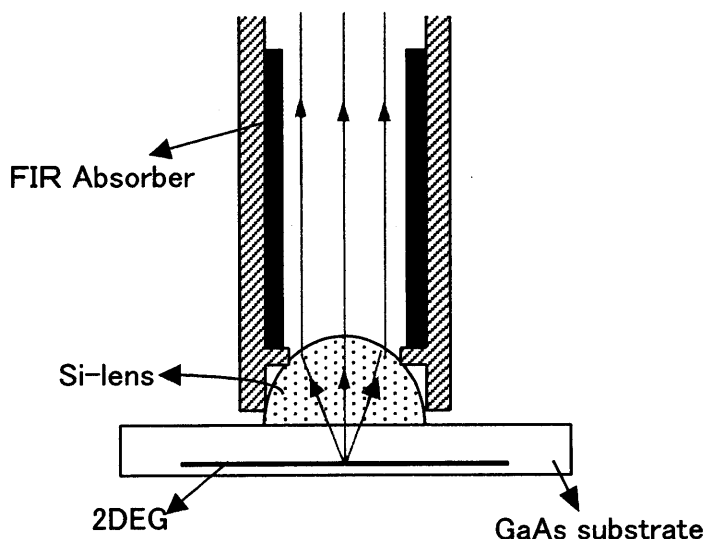


図1 サイクロトロン発光イメージングのための光学系

3. 実験結果

図2に、ランダウ準位の電子による占有数2のときの、ホールバー全体にわたる非平衡電子分布の観測結果と試料両端に沿った電圧分布を示す。3つの異なる電流値 $I=70, 250, 400\text{ }\mu\text{A}$ で測定されている。 $I=70\text{ }\mu\text{A}$ では、電子が注入されるコーナー、電子が抽出されていくコーナーの2箇所

電子分布が生成していることが分かる。電圧分布との対応から、この分布は有限の縦抵抗には全く結びついておらず、試料全体にわたって量子ホール効果状態が正しく保たれている、という驚くべき事実が明らかにされている。この2つの分布の発生には、ソース電極とドレイン電極との電気化学ポテンシャル差 $\Delta\mu_{s,d} = \hbar\omega_c/2$ ($\hbar\omega_c$: サイクロトロンエネルギー) に相当するしきい電流値が存在することが見出された。

$I=70\mu\text{A}$ からさらに電流を増大させていくと ($I=250\mu\text{A}$, $I=400\mu\text{A}$)、新たな別の分布がソース端子側においてのみ広がっていくのが見て取れる。ここでは、有限の縦抵抗が発生しており、この電圧分布は、電流の増大とともに試料内部に向けて広がっている。この縦電圧分布と新たに広がった非平衡電子分布は、さらなる詳細な測定から、量子ホール効果崩壊領域として、お互い正確に相関し合っていることが見いだされた。

4. 議論

今回明らかにされた非平衡電子分布と電圧分布との相関は、電流端子が電子伝導、抵抗量子化に与える影響について明確な解答を与えており、以下のように合理的に理解される。

$\Delta\mu_{s,d}$ が $\hbar\omega_c/2$ を越えた場合は、フェルミ準位よりも1つ高次のランダウ準位の底がソース端子の電気化学ポテンシャルに一致する状況に相当する。この場合、ソース端子からは、本来空であるはずの高次のランダウ準位にトンネルによって非平衡電子が注入される。一方、ドレイン端子側では、電子が端子によって吸収される直前にランダウ準位間で電子遷移により、非平衡電子分布が生成される。ところが、これらの分布が、試料端に形成されるエッジ状態から空間的に離れた場所に位置している限りは、エッジ電流を介して電氣的に結合している端子に、影響を及ぼすことはなく、試料全体にわたり抵抗量子化が保たれる。

電流が増大すると、トンネル注入とは別の効果として、ソース端子側の大きな電場によって加熱された熱い電子の分布が、端子に沿って伸びていく。この電子が、電子注入位置とは反対側の試料端に達したときに、散乱によってエッジ状態の電気化学ポテンシャルを変化させる。その変化分が、有限の縦抵抗として端子間に局所的に現れる。

一般に量子輸送現象では、電子溜と量子化された伝導体との接続が、しばしば問題になるが、以上の議論から、ホールバー型の量子ホール効果伝導体の場合、その抵抗量子化/崩壊は非常に特異な形で起こっており、磁場中の電子伝導に特徴的な現象であるということが言える。

5. 結語

本研究によって、電子の空間分布と抵抗の発現とを精密に照らし合わせながら議論することが初めて可能となった。今後、本研究で開発された遠赤外光イメージングシステムに、さらに波長分解性、時間分解性を付加すれば、よりダイナミカルな電子の挙動を追跡することができるだろう。