

論文の内容の要旨

論文題目 THz分光・イメージングによる量子ホール系非平衡電子ダイナミクスの研究

氏名 佐久間寿人

1.はじめに

量子ホール効果における縦抵抗の消失は、ランダウ量子化と低次元系における局在の結果、全ての伝導電子がフェルミ準位 E_F 以下の低エネルギー状態にあり、しかも E_F 近傍には伝導に寄与する状態がないため、散乱が抑制された結果である。これは逆に、非平衡電子つまりフェルミレベル以上の高次ランダウ準位に伝導電子が存在すると縦抵抗が生成し、同時に量子ホール効果も成立しなくなる事を意味している。このように非平衡電子は量子ホール効果の成立の有無に関わってくる極めて重要な要素である一方、実験的にはそれを直接検出する事は難しく、その分布やダイナミクスは未だ明らかではない点も多い。そこで本研究では非平衡電子が再結合時に発するサイクロトロン発光に着目し、その発光の検出が可能なテラヘルツ分光顕微鏡の開発を行った。それをを用いてサイクロトロン発光の空間分布及び発光スペクトルの測定を行い、主に以下の現象に関して非平衡電子のダイナミクスを明らかにする研究を行った。

1. トンネルによってホットスポットから注入された電子のエネルギー分布、及びそれらの電子が量子ホール効果の成立しうる低温に緩和する過程を明らかにする。
2. 量子ホール効果崩壊現象の空間分布を明らかにし、それに起因する非平衡電子のダイナミクスを明らかにする。特に、量子ホール効果崩壊現象は電極近傍の強い分極電場やホットスポットの存在が影響を与えるのか？また起因しないとすれば、その場合どのような空間分布をとるのか？という点について明らかにする。

各々の詳細は本要旨の 3-1,3-2 に記した。またこれ以外にも、バルクのみでの伝導であるランダウ準位の占有数 2 以下の遷移状態とエッジ/バルクが共に電流を運ぶ占有数 2 以上の遷移状態とでその非平衡電子分布の電流依存性を比較し、エッジ・バルクそれぞれでの電子のダイナミクスの違いを明らかにする研究も行った。そして本論分の最後には今後の展望として分解能の飛躍的向上が実現可能な近接場顕微鏡開発について現在の進捗を記した。

2.実験方法

これまでに開発してきたテラヘルツ分光顕微鏡の更なる改良を行い、fW オーダーの極めて微弱な発光をパッシブに分光する技術を開発した。本研究でテラヘルツ顕微鏡の検出器として使用したのは、我々の研究室で研究・開発されてきた量子ホール検出器と呼ばれる検出器である。これは高移動度量子ホール電子系のサイクロトロン共鳴を利用した高感度かつ狭い共鳴線幅を持つ検出器であり、磁場によって共鳴周波数を変化させる事が可能という特徴を持つ。だが、本研究に先行して Kawano らの研究において顕微鏡用の高感度テラヘルツ検出器として使用されていたにも関わらず、分光に使われた事は無い。それは(電子濃度が一定の試料において)感度が磁場依存で著しく変化の上、十分な感度を有するランダウ準位の占有率の範囲が極めて狭い、つまり磁場を走査して検出波長を変化させる事が出来る帯域が極めて狭いという問題があった為である。本研究ではそれぞれの問題を以下のように克服し、サイクロトロン発光の分光技術を実現した。

- ・ バックゲートを導入する事で量子ホール検出器の電子濃度を変化させ、磁場を変化させる度に十分な感度を有するように占有率を調整し、広い波長帯域に渡ってフォトレスポンスを得られるようにした。
- ・ 磁場・電子濃度依存で変化する感度の校正を行う方法を開発し、それによって得られたフォトレスポンスを発光強度に校正する事が可能になった。

なお、全ての実験は 4.2K で行われた。

3.実験結果及び議論

3-1 ホットスポットにおける非平衡電子分布について

二次元系への電子の注入/抽出は高次ランダウ準位への電子のトンネルが鍵となる。本研究ではホットスポットにおける局所的な高電場によってホットスポットで注入・抽出される電子のエネルギー分布を明らかにした。

図 1(a)に示したのは、ランダウ準位占有率 $\nu = 2.5$ のホールバー試料に $I = 50 \mu\text{A}$ の電流を流したときのサイクロトロン発光イメージングの結果である。ソース・ドレインホットスポット、及び片方の試料端(低ポテンシャル側エッジ)からの発光が確認できる。その各々の発光のスペクトルを、 $I = 50, 300 \mu\text{A}$ それぞれで測定した結果が図 1(b)である。エッジにおける発光スペクトルはローレンチアンでフィットでき、またその形状に電流依存が無いのに対し、ホットスポットは非対称に低周波数側に裾を引いており、電流が大きくなるにつ

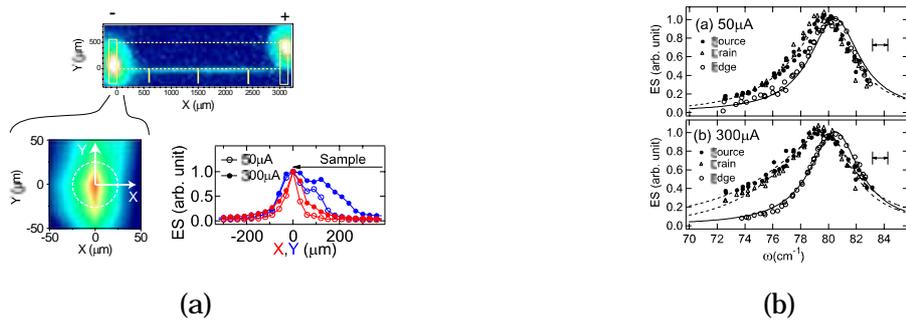


図1 サイクロトロン発光イメージングの結果($I=50 \mu A$)及び各々の発光のスペクトル。磁場は紙面裏→表の方向。

れて裾が大きくなりピークもシフトするという結果を得た。エッジにおける発光は最低ランダウ準位間のみの発光であるのに対し、ホットスポットの裾及びピークのシフトは高次のランダウ準位間遷移に起因するものと考えられる。GaAsの伝導バンドの非放物線性により、発光に寄与するランダウ準位の次数が上がるほどその間隔が狭くなり、発光が低周波数側へシフトすることが知られている。そこで電子が単一の温度で示されるフェルミ分布に従って存在していると仮定した上で、ホットスポットのスペクトルのフィッティングを行った。その結果 $50 \mu A$ では $T_E=25K$ で比較的良くフィットするのに対し、 $300 \mu A$ では電子温度によらず実験結果と大きな乖離がみられた。この結果は顕微鏡の分解能($50 \mu m$)内で電子温度が変化していることを意味している。そこで、ここでは単純に分解能内に $30K$ と $300K$ の領域が面積比 $99:1$ で存在していると仮定したところ、比較的良いフィッティング曲線が得られた。これは、注入直後において高温である電子が急速に冷やされている過程を示した結果であるといえる。

3-2 量子ホール効果崩壊現象の空間分布

我々のこれまでの研究で明らかになった量子ホール効果崩壊現象の空間分布について、その空間パターンの生成メカニズムを明らかにすることを目的とした研究を行った。まず第一段階として、これまでに知られていた我々の観測した結果の一般性を論ずるため、i)複数の試料で量子ホール効果崩壊現象の空間分布を測定する ii)コルビノ型試料を使用する事

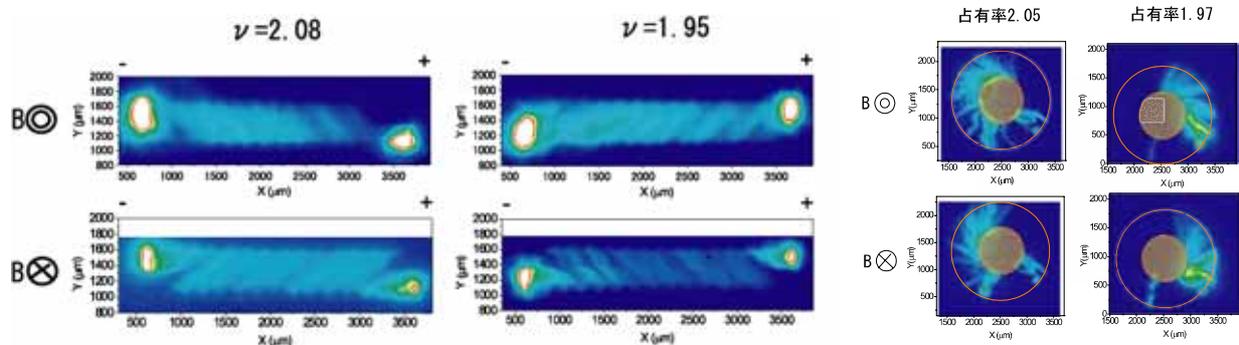


図2 量子ホール効果崩壊現象の空間分布。左はホールバーの場合、右はコルビノの場合で、それぞれの形状で占有率がプラトー内で2以上/2以下の場合、及び磁場の向きを反転させた結果を示している。

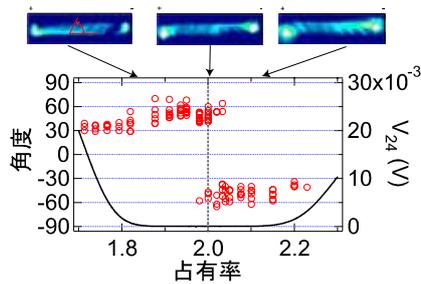


図3 傾きの占有率依存性（赤い丸）及び縦抵抗（黒い実線）。磁場の向きは紙裏→表面の方向である。試料長さ方向に対してどれだけ傾いているかを角度の定義とし、具体例を左上のイメージング(占有率 2 以下)上に赤線で示した。

でホットスポットやその近傍の強電場の影響が排除された量子ホール効果崩壊現象の空間分布を測定する、の2つの実験を行った。その結果、両者共にこれまでの測定で得られた結果と同様に図2に示したような縞状の繰り返し構造を持った非平衡電子分布を確認した。更に、縞の傾きが占有率によって反転するという特徴も測定した全てのウェハー及びコルビノ型試料で再現された。これらの結果は、この縞構造生成が特殊な例ではない事を示しており、またそのメカニズムを考える上で電極の影響を無視して無限に長い試料の中央部を仮定して考えればよい事を示している。また、図3に示した縞の傾きの占有率依存性の測定を行い、傾きの反転は整数占有率を境に不連続に反転するという結果を得た。

これらの結果から、縞の反転のメカニズム及び繰り返し構造の生成についての考察を行った。傾きの反転について、占有率2以上では非平衡電子・2以下では非平衡なホールが熱を運ぶキャリアになると推察され、それらのホール電場に沿ったドリフトの方向の違いが傾きの反転につながると考えた。定量的には、ほぼ占有されたランダウ準位の電子によって運ばれる無散逸電流と、非平衡キャリアによる散逸を伴った電流の2層の電流が素子内を流れているというモデルを立て、測定された縞の傾き及び縦抵抗から数値計算を行った結果、励起キャリア数は電子温度で15K~20Kに対応するという結果を得た。これは量子ホール効果崩壊現象における典型的な電子温度に対応し、このモデルを支持するものである。縞の繰り返し構造の生成については未だ明確な回答は無いが、空間分布を考慮した熱的安定性の式に更なる改良を加える事で繰り返し構造のメカニズムを明らかにすることが可能と考えている。

4.まとめ

我々の開発したテラヘルツ分光顕微鏡により、初めて量子ホール系の発光スペクトル測定を実現させた。その結果、量子ホール状態にある試料であってもホットスポットでは電子温度が局所的には300Kという極めて高い温度であり、それが急速に緩和されていくという過程を明らかにした。また、量子ホール効果崩壊現象の研究では、非平衡電子が占有率依存の傾きを持った縞状の繰り返し構造を持ったパターンを形成するという、従来の抵抗測定では明らかにすることは不可能な結果を得る事ができた。この縞の傾きは整数占有率を境に反転する事を実験によって明らかにし、それらの結果から導かれる縞の傾きの反転のメカニズムを提示した。