

論文審査の結果の要旨

論文提出者氏名 佐久間 寿人

序

半導体中の 2 次元電子系が示す基本的伝導現象として知られる量子ホール効果は、強磁場下の電子系がホール抵抗の量子化を伴いつつ損失なし（縦抵抗の消失）に流れることを特徴とする。従来、この量子ホール効果に関する大多数の研究は抵抗測定を通して行われてきたが、試料内部領域で発生する縦抵抗の分布を測定することができない点で基本的制約があった。本論文は、縦抵抗発生の原因となる非平衡電子の分布を直接計測するために、非平衡電子が発する極微弱なサイクロトロン発光の計測を行うことによって量子ホール効果の研究を行っている。そのために、高感度の THz 顕微鏡を独自に開発し、それを用いて GaAs/AlGaAs 単一ヘテロ構造中 2 次元電子系の量子ホール効果について、非平衡電子の空間分布とエネルギー分布を明らかにしている。顕微鏡の開拓として、光学系の改善により感度増大（10 倍以上）と空間分解能の向上（2 倍程度）を実現し、また、磁場による検出器感度の校正を行うことで今まで不可能だった波長分解測定を可能にしている。量子ホール効果の研究に応用して得られた成果は以下の 3 つからなる。第 1 に、量子ホール素子が外界と電子のやり取りを行う接合点（ホットスポット：電子が注入されるソース側の点と、電子が素子から出てゆくドレイン側の点）におけるサイクロトロン発光の分光測定を初めて行い、損失を伴う電極と損失なしの 2 次元電子系との接合部における電子のダイナミクスを明確にした。第 2 に、従来から知られていた量子ホール効果の電流増大による崩壊現象において、非平衡電子が特徴的空間パターンを伴って生成されることを初めて見出し、崩壊現象のダイナミクスについてより深い理解を可能にした。第 3 に、量子ホール効果状態から外れた磁場領域（遷移領域）における非平衡電子分布の生成が弱磁場側と強磁場側で全く異なることを見出し、それが端状態の有無によることを明らかにした。これらの結果を纏め、本論文は独自に開発したユニークな測定手段を応用することにより、量子ホール効果の電子系に対して他の研究手法では得られない数多くの新たな知見を与えたと認められる。

本論文は 8 章および Appendix 「THz 顕微鏡光学系の改善」からなる。第 1 章は序論で、量子ホール効果の基本と非平衡電子のもつ物理的意味を説明し、また本論文の目的を記述している。第 2 章は試料や電氣的測定系を含めた一般的測定方法を解説し、第 3 章は THz 顕微鏡の開発について、主に Appendix では触れない波長分光の方法について詳述している。第 4 章はホットスポット（量子ホール素子と外界の間で電子のやり取りが行われる接合点）からのサイクロトロン発光の空間分解測定および波長分解測定の結果を示している。ソース側およびドレイン側双方のホットスポットともに、発光スペクトルが長波長側に大きな裾を持つことを見出している。解釈として(i) GaAs の伝導帯が非放物線性（有効質量がエネルギー増大に伴い増大）をもつために上位のランダウ準位ほどエネルギー間隔が狭まる

(10meV から 8meV) こと、(ii)ホットスポットにおいて高エネルギー状態にトンネル注入された電子が狭まった上位のランダウ準位間 ($n=4$ まで) を遷移してサイクロトロン発光を生じているために長波長側の発光の裾を生じていることを提案している。またその際、ソースドレイン電圧差により電子は数百 meV 程度のきわめてエネルギーの高い状態にトンネル注入されるため、電子はまずカスケード的に光学フォノン放出を繰り返して光学フォノンエネルギー (37meV) 以下のエネルギー状態にすばやく緩和し、そのエネルギー領域でサイクロトロン発光に寄与することを論じている。また、単一の電子温度を仮定して実験結果を説明することはできず、観察範囲 (荒っぽく、空間分解能=50 μm の直径領域) 内のトンネル注入の起こる微小な領域のみで 10²K オーダーの非常な高温となっている一方、領域全体の平均は 30K 程度と予測できること、また、それがトンネル注入後の電子のダイナミクスを考慮して自然に解釈できることを論じている。第 5 章は量子ホール崩壊現象の観測結果を論じている。測定した全ての結晶において、ホール素子に沿って流れる電流を横断する方向に非平衡電子が縞状のパターンをなして生成すること、さらに縞の方向が試料の長手 (電流) 方向に垂直はなく、30° から 50° 傾いており、その傾きの極性が、ランダウ準位占有指数が整数よりわずかに大きい小さいかで (正確な整数値を境に) 反転することを見出している。さらに、この縞状の非平衡電子の領域が縦抵抗の発生と同時に生ずることを確かめている。また、ホール素子と異なり電流注入端子を持たないコルビノ型素子でも同様な縞状構造を見出し、この構造がオーミック電極等の外部因子によるものではないことも確かめている。これらの結果をもとに、崩壊状態では、非平衡電子とそれ以外の冷たい電子がそれぞれ異なる方向に走る電流を生じ、非平衡電子 (ランダウ準位占有指数が整数より小さい場合は非平衡正孔) が走る方向に発光の縞が生成するという、いわば 2 流体モデルによる解釈を提案し、それが実験結果を矛盾無く説明することを示している。第 6 章は量子ホール効果遷移領域におけるサイクロトロン発光を論じている。まず、占有数 2 の弱磁場側遷移領域でサイクロトロン発光が試料側端にのみ現れ、一方、強磁場側の遷移領域では発光が試料の内部領域に生ずることを見出し、それらを端状態の有無 (弱磁場側遷移領域で存在、強磁場側遷移領域で不在) で説明している。第 7 章は THz 顕微鏡の更なる開拓として、近接場を用いて幾何光学による回折限界を超えた分解能を実現する試みが記述されている。第 8 章はまとめと結論を述べている。Appendix では顕微鏡開拓における感度と分解能の改善について説明を付加している。

結び

なお、本論文の第 3 章から 6 章は、生嶋氏・平川氏・小宮山との共同研究だが、論文の提出者が主体となって測定法の開発に当たりかつ実験を行ったもので、論文提出者の寄与が十分であると判断する。

よって本論文は博士 (学術) の学位請求論文として合格と認められる。