

論文審査の結果の要旨

論文提出者氏名 河野 行雄

序

本論文は5章からなり、第1章では研究の背景、目的が、第2章では実験方法が説明されている。第3章では、前半で実験結果が示され、後半でそこから得られた知見をもとに第1章で提起された問題が詳しく議論されている。第4章は、実験装置の一部である遠赤外光検出器の開発研究について詳述されている。第5章では、結論が述べられた後、今後さらに展開可能な研究が提案されている。

内容

本論文では、強磁場中の二次元電子系が示す（整数）量子ホール効果が一貫した研究の舞台になっている。

第1章では、ホールパー型の量子ホール効果伝導体において、電流端子とランダウ量子化された二次元電子系との間の接続が、実は、電子の伝導や抵抗の量子化に微妙な問題をもたらしている可能性があることを指摘している。具体的には、電流端子における電子の注入・抽出の過程に変更を与え、さらに、電流端子近傍で抵抗量子化のブレークダウンを引き起こすことを予想している。これらの問題は、電子系内を無散逸の電流が流れるとされる量子ホール効果の根幹に関わる問題であるにもかかわらず、過去の量子ホール効果の伝導現象に関する研究ではほとんど見過ごされており、十分な理解が得られていないままである、と問題提起している。論文提出者は、この現状が、従来の研究における実験手段が電気抵抗測定のみにはほぼ限られてきたためであると指摘している。そこで、本研究では、その打開策として、量子ホール効果伝導体から生じるサイクロトロン発光の空間分解測定により、発光に関与する非平衡電子の空間分布を観察するという新奇な方法を開発している。この方法は、電子の空間分布と伝導体の各位置での抵抗の発現とを厳密に照らし合わせながら議論することができるという点で、従来の測定にはない利点を有している。なお、この測定において、発光の波長は遠赤外光領域に属するが、この波長領域での技術は一般的に未開拓に止まっているため、遠赤外光のイメージング技術を立ち上げるということが本実験の技術的背景になっている。

第2章では、実験の一連の過程、実験装置（試料の特性/作製方法、冷却・励磁系、使用した電子機器、イメージング測定の方法など）が記述されている。この中で、特にイメージング測定の光学系については、GaAs結晶の裏面に直接Si製の半球レンズをのせ、GaAs結晶の高い誘電率の分だけ光の波長を減少させることにより、高分解能な顕微を可能にしているという点で、工夫が見られる。

第3章では、まず、サイクロトロン発光イメージング測定の結果と試料両端に沿った電圧分布の結果を比較させて示し、お互いの相関を明らかにしている。得られた結果から、次の事実が見出されている：

- (i) 電子注入位置、電子抽出位置の2箇所において、非平衡電子分布が生成するものの、伝導体の全領域において有限の縦抵抗や接触抵抗は生じず、2端子抵抗

は量子化値に一致したままである。

- (ii) (i)とは独立に、電流増大とともにソース端子において伸びていく非平衡電子が、電子注入位置と反対側のコーナーに達したときに、はじめて有限の縦抵抗が生じる（量子ホール効果ブレイクダウン）。このとき、試料内部、ドレイン端子側では、量子ホール効果が保たれたままになっている。

以上の知見から、電流端子と二次元電子系との間の電子注入・抽出のメカニズム、またそれが抵抗量子化/ブレイクダウンに与える影響について、エッジ状態との関係をもとに、その描像を提示している。これは、第1章で提起された問題に対する明確な解答にもなっている。論文提出者は、さらに、量子ホール効果ブレイクダウンに関係する非平衡電子の密度分布が、局所的な電場分布には単純に従っていないことも見出しており、このことが、ブレイクダウンの微視的な機構そのものに端を発したものであることを考察している。第3章の最後には、今回の研究で開発されたサイクロトロン発光イメージング測定が、従来の熱分布測定と比べ、どのような点で優れているかを具体的に検証している。

第3章で記述されているサイクロトロン発光の強度は極めて微弱であるが、高感度で狭帯域検出可能な遠赤外光検出器が世の中一般に存在しないという事情から、本研究では、その検出器の開発研究も同時に行っている。第4章は、この遠赤外光検出器の研究に関する内容について記されている。この研究では、量子ホール効果素子のサイクロトロン吸収に着目し、光応答が様々な実験パラメーターにどう依存するかを系統的に調べている。そこから、光応答の背景にある微視的な機構の理解を得るとともに、検出器としての最適な条件（ホール素子の形状、動作条件など）の抽出も行っている。時定数測定によるフォトキャリアの再結合過程の研究や電子加熱の仮定に基づいた簡単な計算結果との比較などから、光応答の発現はサイクロトロン吸収によるゆっくりとした電子温度の上昇として理解できることを示している。また、検出器としては、低雑音高感度（雑音等価パワー $\sim 10^{-14}$ W/Hz $^{1/2}$ ）・狭帯域（ $\Delta\nu/\nu\sim 2\%$ ）・分光可能（100 \sim 150 μ mのダイナミックレンジ）という性能を達成している。これらの特性は、総合的に見て、従来の光伝導型検出器よりもはるかに優れている。第3章に記されたサイクロトロン発光測定の遂行は、この検出器の開発の成功が下地になっている。第4章後半では、さらに、試料端で生じる特異な光応答について調べた結果も記述しており、上記の検出器とは別に、高感度アレイ型検出器として新たな機能を発揮する可能性があることを指摘している。

最終章である第5章では、前半において、本研究により得られたことを、技術面・物理面の両面にわたりまとめている。後半では、今回開発した測定方法に、さらに波長分解性、時間分解性を取り入れることで展開可能となる新たな研究について、具体的に提案している。

結び

なお、本論文中の第3章の一部は、久永幸博氏、小宮山進氏、第4章の一部は、竹ノ内弘和氏、久永幸博氏、小宮山進氏との共同研究であるが、論文の提出者が主体となって試料作製、測定、解析を行ったもので、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る。