

論文審査の結果の要旨

氏名 新見 康洋

本論文は、超低温・強磁場下で動作する走査トンネル顕微鏡・分光法 (Scanning Tunneling microscopy・spectroscopy, S T M・S) を用い、グラファイトおよび InAs 薄膜中に形成される 2 次元電子系の振る舞いを実空間において原子分解能で直接観察し、今まで理論的に予想されながら実際に観測されることがなかった現象を初めて観測することに成功した実験研究である。つまり、強磁場中の 2 次元電子系に現れる量子ホール効果状態での電子波動関数の局在および非局在状態の様子、さらにはグラフェンシートの特定期間だけに現れるグラファイト・エッジ状態を直接観測した。これらの研究成果は、理論的な予想を実験的に示したという重要性だけでなく、強磁場下での波動関数の振る舞いを原子尺度の空間分解能で詳細に明らかにしており、理論的考察と合わせて新たな知見を与える貴重な研究となっている。

本論文は 6 つの章から構成されている。第 1 章では本研究の背景を概観し、問題意識および本研究の目的が述べられている。第 2 章では、本研究の実験手法である S T M・S について解説されている。第 3 章では、グラファイトでの結果が詳述されている。2 次元電子系の強磁場下で見られる現象の理論および過去の研究例を紹介したあと本研究の結果を述べ、理論計算と比較して考察を行っている。第 4 章では、グラファイト結晶のエッジ状態について、過去の研究例を紹介したあと本実験結果を詳述し、さらに理論計算との比較によって実験結果を解析している。第 5 章では、InAs 薄膜の表面近傍に形成された 2 次元電子系の観測結果を述べている。第 6 章において本論文で明らかにされた結果と意義をまとめている。

2 次元電子系では 3 次元系にはないエキゾチックな物理現象が起こり研究対象となっている。その中でも 2 つのノーベル賞の対象となった量子ホール効果はいまだに多数の研究がなされ、未解決の問題も多い。2 次元電子系に垂直に強磁場を印加すると電子状態はランダウ準位に量子化される。ランダウ準位にある電子状態は広がった波動関数を持ち、隣り合うランダウ準位の間エネルギー準位にある電子状態

は欠陥や試料のエッジに局在した波動関数を持つことが理論的に示されているが、それを実空間で直接観察した例はない。なぜなら、2次元電子系は半導体ヘテロ接合に形成されるため、結晶表面から数百 nm も深いところにあり、直接観察する手法が無いからである。そこで、本研究では、擬2次元電子系を形成するグラファイトを試料とし、STM・Sによってその表面を観察した。STM・S法は、個々の原子配列を直接観察するだけでなく、その微分コンダクタンスが状態密度に比例するため、局所状態密度の分布、つまり電子波動関数の分布を直接可視化することができる。本研究の成果は大きく分けて三つある。

(1) グラファイトでの量子ホール効果状態の実空間観測 : highly oriented pyrolytic graphite (HOPG) 表面上に形成された点欠陥近傍を 100 mK 以下の超低温および数 T の強磁場中で STM・S 観測した。微分コンダクタンスのバイアス電圧依存性は明瞭にランダウ準位の形成を示した。微分コンダクタンス像では、ランダウ準位に対応するバイアス電圧で明るさの一樣な像を示し、広がった電子状態になっていた。しかし、2つのランダウ準位間のエネルギー準位では波動関数が点欠陥に局在している像を示した。このように、電子状態がエネルギー準位に依存して局在および非局在状態になることを実空間で示した。また、局在状態を異なる磁場中で観察すると特徴的なリングパターンとなることを見出し、理論的考察により点欠陥が作るクーロンポテンシャルに強磁場下で束縛された電子状態で説明した。

(2) グラファイト・エッジ状態の直接観測 : グラファイト結晶の端には、原子の並び方が異なるジグザグ型とアームチェア型エッジがあるが、ジグザグ型エッジだけに局在した電子状態（エッジ状態）が存在することが理論的に予想されていた。本研究では、グラファイト結晶表面上のステップ端の原子配列を STM で確認し、その近傍での電子状態を STS で観測した。その結果、ジグザグ型エッジ近傍だけでフェルミ準位以下数十 meV に局在した電子状態を見出した。系統的な測定により、これが理論予想されていたエッジ状態であると結論した。

(3) InAs 表面電子蓄積層でのランダウ準位の観測 : GaAs 基板結晶上にエピタキシャル成長させた InAs 薄膜の表面電子蓄積層も2次元電子系を形成する。そこで、これを超低温・強磁場下で STM・S 観測す

ることにより、ランダウ準位の形成を示すトンネルスペクトルを得ることに成功した。また、InAs 層と GaAs 基板との界面に形成されるショットキー障壁に起因する微分コンダクタンスの振動現象も見出した。

以上のように、強磁場下で原子尺度の分解能での波動関数の直接観察を可能にした本研究は、従来の伝導物性や空間平均した分光的手法では得られない重要な情報をもたらすもので、その独創性が認められたため、博士（理学）の学位論文として十分の内容をもつものと認定し、審査員全員で合格と判定した。なお、本論文は、共同研究者らとの共同研究であるが、論文提出者が主体となって実験の遂行や結果の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。