

## 審査の結果の要旨

論文提出者氏名 齋藤 宏晃

本論文は、一巻きコイル法と電磁濃縮法によるパルス磁場を用いて、赤外磁気光学測定系を構築し、原子スケールの2次元物質であるグラフェンのサイクロトロン共鳴の観測に成功し、単層グラフェン、及び二層グラフェンのランダウ準位構造を超強磁場領域まで明らかにしたことに關してまとめたものである。本論文は6章から成る。

第1章「序論」では、グラフェンの強磁場効果についての近年の研究状況を述べている。筆者は、超強磁場領域における電子間相互作用によって、ランダウ準位が変調を受ける可能性を提起し、疑似磁場の見積もりが成り立つことを実際の磁場を印可しランダウ準位を確かめる必要性を説いている。また、大面積二層グラフェンは応用上の観点から、バンドパラメータの同定が必要だが、角度分解光電子分光 (ARPES) などの測定だけでは無く、磁気光学測定によってより信頼性があるパラメータを得る必要性があると主張する。そこで、超強磁場発生手法である一巻きコイル法、及び電磁濃縮法での赤外磁気吸収測定システムの開発を行い、単層グラフェン、及び二層グラフェンのサイクロトロン共鳴を観測することで、ランダウ準位構造が強磁場領域でどのように振る舞うかを調べ、バンドパラメータを同定するという本論文の目的を述べている。

第2章「背景」では、本論文に關するグラフェンの磁気光学特性や、サイクロトロン共鳴、そして強磁場領域に発現する物性などを示している。サイクロトロン共鳴の解析の際に必要なフィッティング関数の特徴や、グラフェンに電子間相互作用やギャップが存在する場合に、ランダウ準位がどのような影響を受けるかについて述べている。

第3章「実験技術」では、実験に必要な本論文で用いた試料、SiC 上エピタキシャルグラフェンについての特性を記述し、超強磁場の発生手法として一巻きコイル法及び電磁濃縮法について述べ、実際に用いた実験系についてまとめている。SiC 上エピタキシャルグラフェンは、Si 面(0001)で成長した単層、及び二層グラフェンを用いており、移動度は悪いが層数制御性が良い試料であることを主張している。ここでは、電磁濃縮法による磁場発生システムを赤外領域の物性測定応用に向けたことを目的として、大口径破壊型磁場発生コイルにおける光学ファイバーを用いた磁気吸収測定システムの技術開発を行ったこと、そして、その結果、透過光強度の測定に加え、ピックアップコイルによる高精度の磁場測定が行えるようになり、600 T までの赤外磁気吸収測定系を完成させている。

第4章では、一巻きコイル法による、単層グラフェンと二層グラフェンのサイクロトロン共鳴の結果について考察している。一巻きコイル法の測定により、レーザーのエネルギーによって共鳴磁場が変化する、明確なサイクロトロン共鳴吸収の観測に成功した。100 T 強の超強磁場領域でも共鳴エネルギーが  $B^{1/2}$  に比例しており、フィッティングから見積もられたフェルミ速度は、 $0.9 \pm 0.04 \times 10^6$  m/s となり理論値 ( $1 \times 10^6$  m/s) と比べてわずかに小さ

い値であるが、過去の文献値の範囲内であることを示した。また、サイクロトロン共鳴遷移からそれぞれの試料についてフェルミエネルギーを見積もるとファン・デア・ポー法による見積もりと矛盾しないことも示している。一方、二層グラフェンでもサイクロトロン吸収を観測し、これまで 20 T が最高だった共鳴磁場値を更新する 100 T 付近での共鳴を観測している。

第 5 章では電磁濃縮法による、単層グラフェン、及び二層グラフェンの測定結果について考察している。本論文では物性測定用大型コイルに対して磁場較正を行い、ファラデー回転角と磁場の関係から 650 T までの信頼性の高い磁場データを得るまでに至っている。この較正磁場を用いて、単層グラフェンの磁気吸収測定結果を解析することで、明確な吸収ピークは 360 T であると同定している。サイクロトロン共鳴には特異な電子相関の発現はなく、低磁場領域のランダウ準位の振る舞いがそのまま 360 T 程度まで成り立つことを明確にしている。また、同一基板から取り出した別の試料での測定では、単層グラフェンの共鳴信号に加え、10 % ほどの二層グラフェン由来の信号も観測し、単層グラフェン試料内に二層グラフェンが含まれている領域が存在していることを示唆している。原子間顕微鏡やラマン分光によるマッピングの測定によって、単層グラフェンと二層グラフェンの分布の存在が確認され、サイクロトロン共鳴によって見積もられた一層グラフェンと二層グラフェンの割合と同程度であるとしている。

また、二層グラフェンでも、同様の磁気吸収測定を行い、いくつかの吸収構造を捉えている。解析に際し、まず光電子分光測定を行い、これによって得られたバンド構造に対して、バンドパラメータを見積もり、 $\Delta = 45 \text{ meV}$ ,  $v = 1 \times 10^6 \text{ m/s}$ ,  $\gamma_1 = 0.4 \text{ eV}$  と決定している。このパラメータをもとに、電磁濃縮法、及び一巻きコイル法での磁気光学測定によって得られたサイクロトロン共鳴吸収ピークを、ギャップの開いた二層グラフェンのランダウ準位によって最適フィッティングすることにより、更に信頼性のあるバンドパラメータとして、 $\Delta = 33 \pm 20 \text{ meV}$ ,  $v = 0.9 \pm 0.05 \times 10^6 \text{ m/s}$ ,  $\gamma_1 = 440 \pm 40 \text{ meV}$  の値を得ている。

第 6 章「結論」では、本論文の結果をまとめ、今後の展望について述べている。

以上で述べたように、本論文では、電磁濃縮法超強磁場発生装置での赤外光による磁気光学測定の技術開発を行うことにより、精度と信頼性の高い磁気物性計測システムを構築し、600 T という世界最高磁場までの超強磁場下での赤外磁気光物性測定を実現に至らしたものである。本研究は、一層及び二層グラフェンに於いて、低磁場のランダウ準位構造がそのまま 600 T 程度まで維持されることを示し、測定が困難であったグラフェンの超強磁場物性について研究領域の拡大に大きな貢献をしたといえる。また、これらの物性測定技術は、グラフェンだけではなく、他の低移動度の二次元層状物質のサイクロトロン共鳴や赤外物性測定に応用されることが期待され、その極限環境精密測定計技術開発も含めて物理工学としての貢献も大きい。

よって本論文は博士（工学）の学位申請論文として合格と認められる。