

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 6 月 5 日現在

機関番号：12601

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2014～2016

課題番号：26400311

研究課題名(和文) デザインされた量子ホール系の伝導率と熱起電力の精密測定

研究課題名(英文) Precise Measurement of the Conductivity and Thermoelectric Power of the Quantum Hall Systems with Artificially Designed Modulation

研究代表者

遠藤 彰 (Endo, Akira)

東京大学・物性研究所・助教

研究者番号：20260515

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,700,000円

研究成果の概要(和文)：コプレーナ型導波路を用いた量子ホール系の高周波伝導率および、高周波加熱による熱起電力の精密測定を行った。負バイアス印加で意図的に試料端を導入する実験により、量子ホール領域で観測されていた共鳴ピークはエッジマグネトプラズモン励起に因るものであることを明らかにし、共鳴周波数のバイアス依存性を定量的に説明することに成功した。

また、エピタクシャルグラフェンの低温磁気抵抗の詳細な解析から、SiC基板表面にあるステップの影響や、単層・2層グラフェンが混在する場合の両領域の面積比を導出することができることを明らかにした。

研究成果の概要(英文)：rf conductivity and thermoelectric power of the quantum Hall systems have been measured employing coplanar waveguides. By intentionally introducing edges to the sample with a negative gate bias, the resonant peaks we had previously discovered in the quantum Hall regime have been found to be unambiguously attributable to the edge-magnetoplasmon excitation. The gate-bias dependence of the resonant frequency has been explained by capacitive coupling between the edge state and the gate.

We have also measured low-temperature magnetoresistance of the epitaxial graphene. By detailed analysis of the magnetoresistance traces, we deduced the effect of the steps in the SiC substrate, and also the ratio of the areas of the single- to bi-layer graphene for samples simultaneously containing the two types of areas.

研究分野：低次元電子系物性実験

キーワード：量子ホール効果 高周波伝導率 熱起電力 2次元電子系 エッジマグネトプラズモン 電子固体相 エピタクシャルグラフェン

1. 研究開始当初の背景

(1) 2次元電子系に強磁場を印加した量子ホール系では、ランダウ量子化・電子間相互作用・波動関数の空間的広がり、の微妙な競合により、整数・分数量子ホール状態の他、ウィグナー結晶・バブル相・ストライプ相等の電子固体相など、多彩な状態を取り得る。電子固体相が理論的に予言されて久しいが、その存在の決定的証拠となる実験はまだ無い。特に、電荷密度の実空間分布に関する情報を含む実験結果は皆無であった。

筆者は、2次元電子系に周期的ポテンシャル変調を摂動的に加え、電子固体相の誘起を試みる独自の手法で電子固体相を探索してきた。加えた外部変調の周期・格子型が電子固体本来のものとは合致したときのみ誘起されると考えられるので、電子固体の実空間分布を特定出来る。1次元周期的変調を加え、ストライプ相を誘起したと解釈できる抵抗異方性を報告したが、これも間接的証拠の域を出ない。そこで本研究ではより直接的な証拠として、外部変調により誘起された電子固体相の、加えた変調ポテンシャル極小でのピンングモードの観測を目指した。

(2) 予備的な実験で、1次元あるいは2次元六方格子の変調を加えた試料にて、電子固体相が期待される領域とは異なる整数量子ホールのプラトー領域に共鳴ピークを見出していた(図1)。このピークの起源は不明で、本研究ではその解明も目指すことにした。

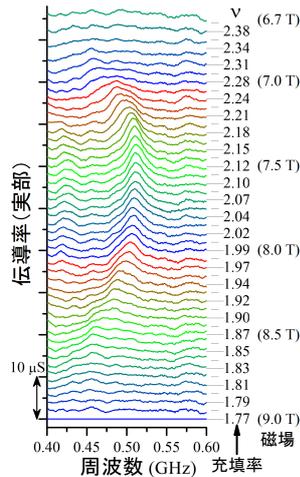


図1. 整数量子ホール領域で観測された共鳴ピーク

(3) 熱起電力には(i)拡散と(ii)フォノンドラッグの2つの機構からの寄与がある。前者は電子系の性質に敏感なプローブであり、系のエントロピーに相当する量であることが知られている。然るに、通常の熱起電力測定法を用いると後者が支配的となるため、量子ホール系の体系的・定量的な拡散熱起電力の測定はまだ行われていなかった。筆者らは電子系のみを加熱し(i)の寄与のみを測定する手法を開発してきており、本研究では多くの量子ホール系試料を対象に体系的な拡散熱起電力の精密測定を行うことを目指した。

2. 研究の目的

(1) 量子ホール系、および量子ホール系に周期的ポテンシャル変調・有効磁場変調等の人工的デザインを加えた試料を作製し、高周波伝導率の周波数依存性を測定することにより、電子固体相が存在する確実な実験的証拠となるピンングモードを観測し、電子固体相の実空間分布に関する情報を得ること、および、以前に見出した量子ホール領域でのマイクロ波共鳴ピークの起源を明らかにすること

(2) 同様の試料について、拡散熱起電力の定量的精密測定を行い、伝導率から得られる情報と比較すること、整数・分数量子ホール状態や電子固体相のエントロピー・準粒子統計性に関する知見を得ること

(3) 上記(1)、(2)は通常の半導体2次元電子系を用いて始めるが、線形分散関係や掌性を持つため半導体系とは異なる振る舞いが期待されるグラフェンでも同様の測定を試みることを

を当初の研究目的として研究を開始した。

3. 研究の方法

(1) 高周波伝導率測定には半導体2次元電子系試料(GaAs/AlGaAsヘテロ接合)基板表面上に微細加工技術で作製したコプレーナ型導波路(図2)を用いる。

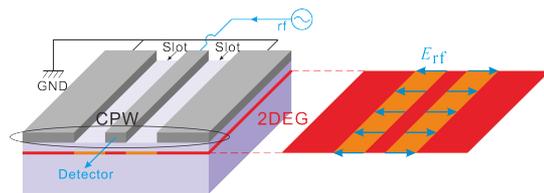


図2. 2次元電子系(2DEG)基板上的コプレーナ型導波路(CPW)

導波路を伝播するマイクロ波は、スロット直下にある2次元電子系の伝導率が高いほど良く吸収されるので、透過率の測定から高周波伝導率を知ることができる。外部変調を導入する場合には、測定されるスロット部分の基板表面にネガ型の電子ビームレジストの格子を配し、冷却時の歪みに因るピエゾ効果を利用するという独自の手法でポテンシャル変調を導入する。

従来は、マイクロ波発生と検出をともにネットワーク・アナライザ単体で行ってきたが、本研究で新しい信号発生器と高周波検出素子を導入し、マイクロ波強度変調によるロックイン測定を行い、従来と比較してマイクロ波強度を1桁落としても十分な信号/雑音比が得られる高感度な測定ができるようになった。検出にスペクトラムアナライザを用い、透過マイクロ波のエネルギー分散を測定することも試みた。

希釈冷凍機/超伝導マグネットを持つ測定系で、10 mKまでの低温、10 Tまでの磁場

中での高周波伝導率の測定を行った。

(2) 拡散熱起電力の測定には、格子系を加熱せず、電子系の温度のみに勾配を導入する電流加熱法、高周波加熱法の2つの手法を利用した。電流加熱法は通常のホールバー試料に加熱用のアームを付け加え、直接2次元電子系に大きめの電流を流し電子系を加熱する方法である。高周波加熱法は、(1)で述べたコプレーナ型導波路で、スロット直下の2次元電子系のマイクロ波吸収を電子系の加熱に利用する独自の手法である。この手法でも、ロックイン測定の導入により、従来と比較して2桁小さいマイクロ波強度で十分な信号/強度比での測定が可能となった。(1)と同じ希釈冷凍機/超伝導マグネットの測定系で、低温・強磁場下の熱起電力の測定を行った。

(3) エピタクシャルグラフェンは九州大学大学院工学府および名古屋大学未来材料研究所にて作製されたものを使用した。ウェハースケールではほぼ均一な試料が得られるため、数ミリ角のマクロな試料に銀ペーストで電極付けをし、(1)と同じ希釈冷凍機/超伝導マグネットの測定系で低温・強磁場下の磁気抵抗測定を行った。

#### 4. 研究成果

##### (1) 量子ホール領域共鳴ピーク起源の解明

1次元または2次元六方格子周期的変調を加えた系で整数量子ホールプラトー領域にて観測されていた、図1に示したような共鳴ピークは、その後、測定感度の向上に伴い、変調を加えていない系でも、弱い強度ではあるが、観測されることを見出した。また、この吸収ピークは、2次元電子系加熱のピークでもあるため、オーミックコンタクト(図3青丸)間に発生する熱起電力でも、マイクロ波透過率測定の場合よりもむしろ明瞭に、観測できることを明らかにした。ピーク位置の磁場依存性は、エッジ・マグネトプラズモンと酷似しているが、主として測定にかかる図2のスロット領域には試料端が存在しないこと、導入した周期的変調の役割が不明瞭であること、などから解釈が困難であった。

そこで、図3に示すように、コプレーナ型導波路(CPW)の中心電極にバイアス・ティー経由で負バイアスを印加して電極直下を空乏化し、マイクロ波が吸収されるスロット領域に試料エッジを導入して測定を行った。

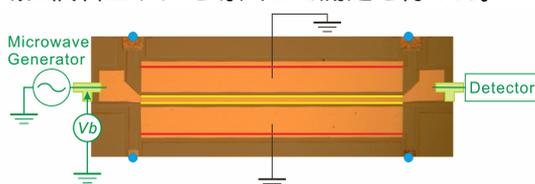


図3. CPW 中心電極への負バイアス印加とスロット領域へのエッジの導入(黄色の線)。赤線は元々の試料端。

その結果、周期的変調を加えていない試料にて、同様の共鳴ピークが非常に大きな強度で観測された。これは、新しく導入されたエッジ状態でのエッジ・マグネトプラズモン励起によるものであると解釈できる。従って、これまでに観測されていた共鳴ピークも、やはりエッジ・マグネトプラズモン励起によるものであると考えられる。CPWの側電極下の2次元電子系を経由しての間接的な励起になるため、強度が小さかったものと考えられる。またスロット下に加えた周期的変調は、マイクロ波による励起の伝播を増進する役割を果たしていたものと推定される。

さらに、共鳴ピークの周波数は、CPW 中心電極への負バイアスの絶対値が大きくなると、高周波側に移動していくことを見出した(図4の  $V_g < -0.45$  V 領域)。

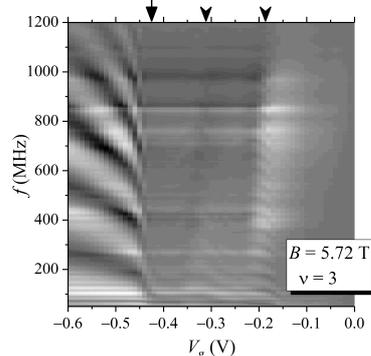


図4. 共鳴周波数のCPW 中心電極バイアス依存性

この依存性は、エッジ状態と電極間の静電結合の変化を考えると定量的に説明できることを明らかにした(投稿論文準備中)。

なお、電子固体相のピニングモードの観測を目指し、ストライプ相(高次ランダウ準位 1/2 充填)、バブル相(高次ランダウ準位 1/4 充填)が期待される磁場領域で精密測定を行ったが、観測には至らなかった。現状で入手できる2次元電子系の移動度が不十分であったためと推測される。今後、高移動度2次元電子系を供給できる研究機関との共同研究で、これらの観測を目指す。

##### (2) ネルンスト電圧のホールバー上空間分布

ホールバー上のネルンスト電圧(磁場下熱起電力の非対角成分)の量子振動振幅は、高温側から低温側に向かうにつれ小さくなることが観測されている(図6)。単純に1次元的な電子温度勾配があると考え、振幅は位置に依存しないはずであり、1次元モデルが正しくないか、電子-フォノン相互作用の影響が大きいことを示唆している。

そこで、実際のホールバー形状(図5a)で、電子-フォノン相互作用を考慮した、磁場下での温度分布を有限要素法にて計算した(図5b)。電圧プローブへの熱流出を抑えるため、アームを細く長く設計しているにも関わらず、磁場下では大きな熱流失が起きてしまい、これが低温側電圧プローブ間の量子振動振

幅の減少を引き起こしていることを明らかにした。また、測定温度 20 mK では、フォノンの影響はほぼ無視できることも判明した(投稿論文準備中)。

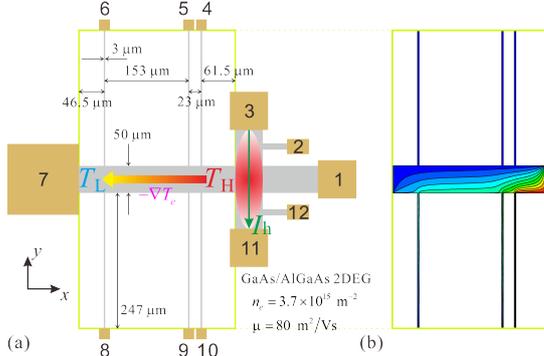


図 5 . (a)ホールバー形状。(b)有限要素法で計算した磁場 0.5 T での温度分布

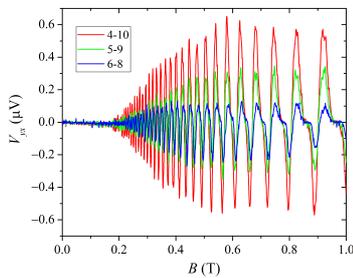


図 6 . 3 組に電極間 (図 5a 参照) のネルスト電圧の量子振動。電流加熱法による測定。

### (3) 微傾斜 SiC 基板上エピタクシャルグラフェンの磁気抵抗

九州大学大学院工学府にて作製された微傾斜 SiC 基板上エピタクシャルグラフェンの低温での磁気抵抗測定を行った。電流が基板ステップと垂直方向である場合には正磁気抵抗が (図 7a)、平行方向である場合には通常の量子ホール効果が観測された (図 7b,c)。

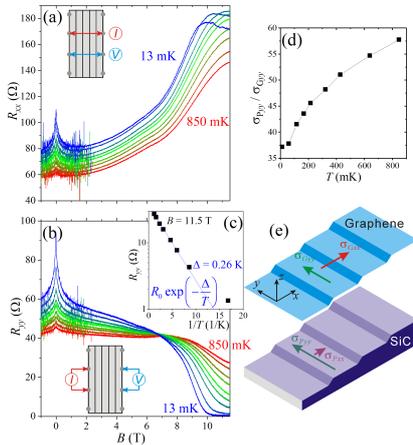


図 7 . ステップに垂直(a)、平行(b)方向の磁気抵抗。(c) 量子ホール状態でのアレニウス・プロット。(d) グラフェン層と基板並行伝導層の伝導率比の温度依存性。(e) 各層伝導率の概要。

これらは、SiC 基板にステップ平行方向には動けるが、ステップを横切るとはほとんどできない並行伝導が存在すると考えるこ

とで説明できる(発表論文)。

また、ほぼ等間隔な基板ステップによりグラフェンの 1 次元平面超格子 (1 次元周期的変調を加えたグラフェン 2 次元電子系、図 8) ができ、平面超格子での「開いた軌道の幾何学共鳴」と解釈できる微細な磁気抵抗振動を極低磁場にて観測した(図 9)(発表論文)。

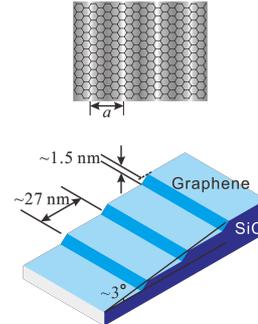


図 8 . グラフェン平面超格子

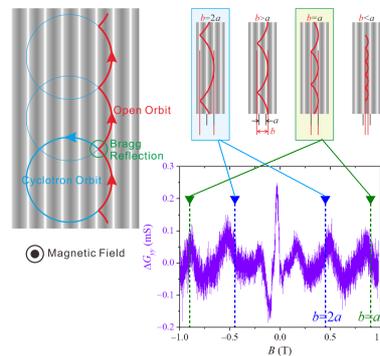


図 9 . 開いた軌道の幾何学共鳴と解釈できる微細な磁気抵抗振動

### (4) 単層・2層領域が共存するエピタクシャルグラフェン磁気抵抗の 2 キャリアモデルによる解析

名古屋大学未来材料研究所にて作製された、単層・2層領域が混在するエピタクシャルグラフェン(図 10a)の磁気抵抗測定を行った。対角抵抗は高磁場で飽和する正磁気抵抗を示し、ホール抵抗は高磁場で傾きが小さくなる S 字型を示す(図 10b 実線)。これらは、半古典的な 2 キャリアモデルで非常に良く記述できることがわかった(図 10b 破線)。

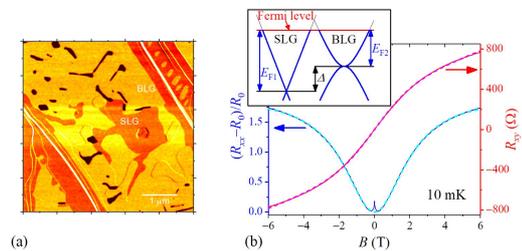


図 10 . (a) 単層(SLG)・2層(BLG)領域が混在する SiC 上エピタクシャルグラフェンの原子間力顕微鏡像。(b) 対角抵抗(左軸)とホール抵抗(右軸)。実線: 実験データ。破線: 2 キャリアモデルによるフィッティング。挿入図: 単層・2層グラフェンのバンド図。

このフィッティングから、両領域の面積比を導出することができる。このようにして、磁気抵抗の解析から得られた面積比は、直接原子間力顕微鏡観察から得られた面積比と非常に良く一致していることがわかった(図11)(発表論文)

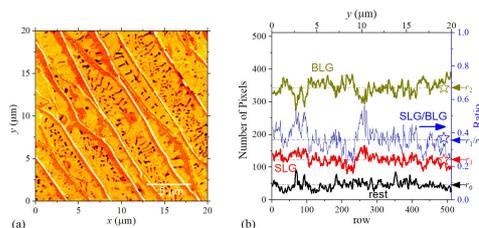


図11. (a) 広領域の原子間力顕微鏡像。(b) 横走査線ごとに集計した各領域の画素数(左軸)。右軸はそれを占有面積比に直したもの。矢印で示した水平線は平均値。星印は磁気抵抗解析から求めた比。

#### <引用文献>

- M. M. Fogler *et al.*, Phys. Rev. B **54**, 1853 (1996).  
 A. Endo and Y. Iye, Phys. Rev. B **66**, 075333 (2002).  
 T. Kajioaka, A. Endo, S. Katsumoto, Y. Iye, AIP Conf. Proc. **1399** pp. 619-620 (2010).

#### 5. 主な発表論文等

[雑誌論文](計3件)

Akira Endo, Jianfeng Bao, Wataru Norimatsu, Michiko Kusunoki, Shingo Katsumoto and Yasuhiro Iye, Two-carrier model on the magnetotransport of epitaxial graphene containing coexisting single-layer and bilayer areas, Philos. Mag. (2017). 査読有  
 DOI: 10.1080/14786435.2017.1311429

Ryuta Yagi and Akira Endo, Electronic Transport of Graphene Subjected to Periodic Structure Modulation, J. Phys. Soc. Jpn. **84**, 121008-(1-9) (2015). 査読有  
 DOI: 10.7566/JPSJ.84.121008

Akira Endo, Fumio Komori, Kouhei Morita, Takashi Kajiwara and Satoru Tanaka, Highly Anisotropic Parallel Conduction in the Stepped Substrate of Epitaxial Graphene Grown on Vicinal SiC, J. Low Temp. Phys. **179**, 237-250 (2015). 査読有  
 DOI: 10.1007/s10909-015-1277-y

[学会発表](計6件)

遠藤 彰、小池 啓太、勝本 信吾、家泰弘、整数充填率近傍に見られる高周波伝導率の共鳴ピーク、日本物理学会 2016 秋季大会、2016 年 9 月 13 日~16 日、金沢大学(石川県金沢市)

遠藤 彰、包 建峰、乗松 航、楠 美智子、単層・2層が共存するエピタクシャルグラフェンの磁気抵抗の2キャリアモデル

による解析、日本物理学会第71回年次大会、2016年3月19日~22日、東北学院大学(宮城県仙台市)

藤田 和博、遠藤 彰、家 泰弘、磁場中2次元電子系ホールバー上でネルンスト電圧の空間分布、日本物理学会 2015 秋季大会、2015 年 9 月 16 日~16 日、関西大学(大阪府吹田市)

K. Fujita, A. Endo, S. Katsumoto, Y. Iye, Spatial Distribution of Nernst Voltages in Quantum Hall Systems, 21th Int. Conf. on Electronic Properties of Two-Dimensional Systems, 2015 年 7 月 26 日~31 日、仙台国際センター(宮城県仙台市)

A. Endo, F. Komori, Y. Iye, K. Morita, T. Kajiwara, S. Tanaka, Anisotropic magnetotransport of epitaxial graphene grown on vicinal SiC substrate, 16th Int. Conf. on Science and Application of Nanotubes, 2015 年 6 月 29 日~7 月 3 日、名古屋大学(愛知県名古屋市)

A. Endo, T. Kajioaka, K. Koike, Y. Iye, Measurement of the rf Magnetoconductivity of Lateral Superlattices by Coplanar Waveguide, 10th Int. Conf. of Comp. Methods in Sciences and Engineering, 2014 年 4 月 4 日~7 日、アテネ(ギリシャ)  
 [図書](計0件)

#### 6. 研究組織

(1)研究代表者

遠藤 彰(ENDO, Akira)  
 東京大学・物性研究所・助教  
 研究者番号: 20260515