

科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和 2 年 6 月 1 日現在

機関番号：12601

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2017～2019

課題番号：17K05491

研究課題名(和文) 微細導波路を用いた低次元電子系の異方的伝導率・局所熱起電力マッピング法の開拓

研究課題名(英文) Development of the method for mapping the anisotropic conductivity and the local thermo-voltage of low-dimensional electron systems using a microscale waveguide

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) 3,500,000円

研究成果の概要(和文)：小型のコプレーナ型導波路(CPW)を微細加工技術を用いて作製し、ピエゾ素子に装着し半導体試料に接近させた上で面内の相対位置を変化させ、マイクロ波透過率を測定することにより、試料の伝導率の空間分布の測定を行った。ゲートにより2次元電子系試料端とCPWの相対位置を変化させる測定も行い、量子ホール領域でのエッジ・マグネトプラスモンの励起周波数および伝搬速度の試料端位置・閉じ込めポテンシャル形状依存性を明らかにした。熱起電力のランダウ量子化による量子振動、および1次元周期性を人工的に導入した平面超格子での整合性磁気振動の測定・解析から、磁場中2次元電子系の電子温度の空間分布を実験的に導出した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

半導体試料、特に磁場中2次元電子系試料の伝導率や電子温度の空間分布を実験的に探る手法を開拓した。磁場、ランダウ量子化、量子ホールエッジ状態等、この系に固有の効果、および不純物、人工的に導入した周期的変調や閉じ込めポテンシャル等の外因性効果で決まる伝導率・電子温度の空間分布を知ることは、これらの効果、試料自体の性質、さらには試料で起こる様々な物理現象の基礎的理解にとって重要である。また、将来的には半導体デバイスの動作・不具合の解析にも役立つことが期待される。

研究成果の概要(英文)：Micro-scale coplanar waveguide (CPW) was fabricated employing lithography techniques. With a piezo-driven stage, the conductivity of semiconductor samples was mapped by measuring the position dependence of the microwave transmission through the CPW. An alternative technique, using a gate bias to shift the sample edge with respect to the CPW, was employed to observe the dependence of the resonant frequency of the edge magnetoplasmons on the edge location of a two-dimensional electron system (2DES) in the quantum Hall regime. Spatial distribution of the electron temperature in a 2DES subjected to a magnetic field was deduced from the measurement of the thermoelectric voltages, by analyzing the amplitudes of the quantum oscillations due to the Landau quantization and the commensurability oscillations when an artificial one-dimensional modulation was introduced.

研究分野：物性物理学

キーワード：量子ホール効果 コプレーナ型導波路 マイクロ波 エッジ・マグネトプラスモン 2次元電子系 熱起電力 1次元平面超格子 量子振動

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属されます。

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

通常行われているホールバー素子やコルビノ円盤を用いた抵抗率・伝導率・熱起電力等輸送係数の測定では、巨視的な試料全体を平均した値が測定される。マイクロ波吸収率が伝導率により増加することを利用し、試料に密着させたコプレーナ型導波路(Coplanar Waveguide: CPW)のマイクロ波透過率を用いて伝導率を測定する手法も知られていたが、良好な信号/ノイズ比を確保するために全長数 mm の CPW が用いられており、やはり巨視的な測定であった。本研究の予備的な実験で CPW を全長 1 mm 程度にしても十分な信号が得られることを確認していた。また、CPW による加熱を利用し熱起電力を測定する独自の手法を開発していた。そこで、CPW をさらに小型化することにより局所的な伝導率・熱起電力の測定が可能となると考え、本研究計画を立案した。

2. 研究の目的

低次元電子系試料の表面上を走査することが可能となるような小型 CPW を微細加工技術を用いて作製し、(a)マイクロ波透過率の計測による伝導率の測定、(b)マイクロ波加熱での電子温度勾配導入による、熱起電力の測定、(c)エッジ・マグネトプラズモン、電子固体相のピンニングモード等の集団的モードの励起、を局所的に行い、これらの試料内での空間分布をマッピングする手法を開拓すること、さらに、量子ホール系やトポロジカル絶縁体で重要な試料端、試料中の不均一性、微細加工で人工的に導入した周期性・異方性等の、伝導率・熱起電力・集団励起への影響に関する知見を得ること、を本研究申請時に目的とした。

3. 研究の方法

(1) 小型コプレーナ型導波路(CPW)の作製

フォトリソグラフィーまたは電子ビームリソグラフィーを用いて微細なパターンを生成し、絶縁体上への金属蒸着・リフトオフ法、または絶縁体に銅箔膜が張られたプリント基板をエッチングする方法により、小型 CPW を作製する。様々な絶縁体素材を試し、また、サイズ・形状を変えた多数のパターンの CPW を作製する。

(2) マイクロ波透過率による伝導率の測定

作製した CPW をピエゾ素子に装着し、GaAs/AlGaAs 2次元電子系試料や GaAs バルク試料に近づける。ネットワークアナライザを用い CPW のマイクロ波透過率を測定する。CPW と試料間の距離依存性を見ることにより、どのくらい近づければ測定が可能になるかを確かめる。サイズ・形状の異なる CPW に対して測定を行い、十分な信号が得られる CPW の最小サイズを探し、形状を最適化する。CPW と試料の面内の相対位置を変化させることにより伝導率のマッピングを行い、空間分解能を確認する。

(3) ゲートによる 2次元電子系試料端の移動

CPW と試料の実際の位置関係を変化させる代わりに、ゲートにより 2次元電子系の存在領域の端を CPW に対して相対的に移動させる。マイクロ波透過率の周波数依存性を測定することにより、試料端での集団励起(エッジ・マグネトプラズモン)の試料端位置による変化を観測する。

(4) 熱起電力測定

上記(3)の CPW マイクロ波透過率測定時には同時にマイクロ波吸収により電子系が加熱され熱起電力が生じるので、その測定を行う。また、2次元電子系に直接電流を流して加熱する通常の方法でも熱起電力の測定を行い、ホールバー形状の 2次元電子系、1次元周期的変調を導入した 2次元電子系の、試料内での温度に空間分布に関する情報を得る。

4. 研究成果

(1) 小型 CPW の作製

サイズ・形状の設計を変更した多数の CPW を迅速に作製することを可能にするため、簡易なマスクレスのフォトリソグラフィ装置を新たに作製した。銅箔膜プリント基板を利用した方法では、マイクロ波透過率の良好な信号/ノイズ比は得やすいものの、マイクロ波の試料への照射領域の最小単位を与える CPW スロット幅は 100 μm 程度が限界であることが判明した。Si 基板、またはポリイミド・シート上に Ti/Au 膜を蒸着・リフトオフすることにより、上記フォトリソグラフィを用いてスロット幅 15 μm まで CPW を小型化することができた(図 1)。フォトリソグラフィと電子線リソグラフィを併用することにより、さらに小型の CPW も作製したが、残念ながら本研究期間中には十分なマイクロ波透過率信号強度が得られるものは作製出来なかった。

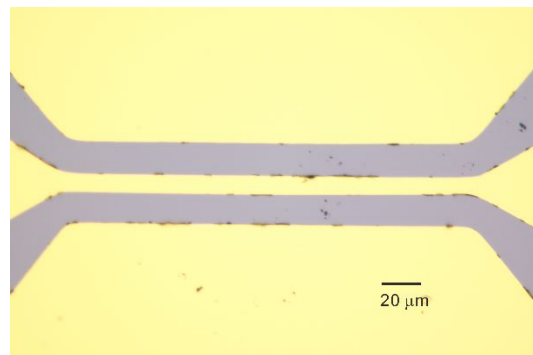


図 1. 小型 CPW

(2) 伝導率マッピング

小型 CPW を、 piezo素子を用いて試料に $50\ \mu\text{m}$ 程度まで近づけると、急激にマイクロ波吸収率が増加し、試料の伝導率測定が可能となる。さらに、piezo素子を試料に対して xy 面内で移動させながらマイクロ波透過率を測定することにより、伝導率のマッピングを行った。良好な信号ノイズ比を得るため、外部電磁波シールドのために装置全体を金属のケースに格納し、除震台上に設置した。図2は室温にて GaAs バルク試料に対して CPW を接近させ、 xy 面内で $1\ \mu\text{m}$ ステップで CPW を移動させながら、試料伝導率の増加により減少するマイクロ波透過率をマッピングしたものである。空間分解能としてはスロット幅で平均化されてしまうが、 $1\ \mu\text{m}$ 移動に対する透過率の変化を検出することが可能であることが判明した。

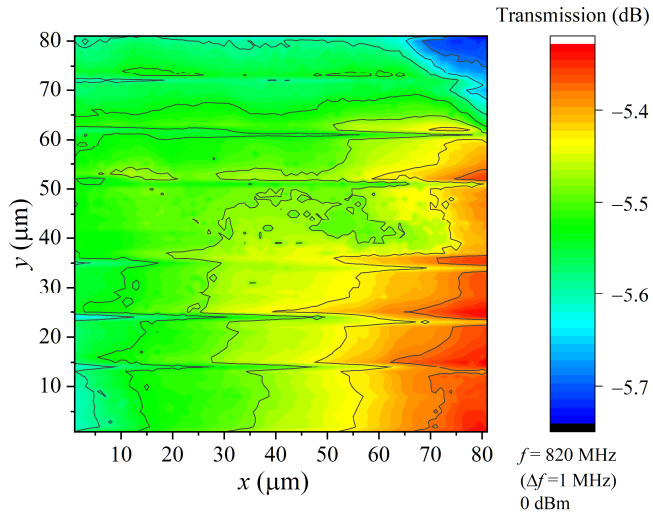


図2. マイクロ波透過率のマッピング

(3) エッジ・マグネトプラズモン共鳴ピーク

CPW と試料の位置関係を実際に動かすのではなく、CPW は固定のまま、ゲートで2次元電子系の存在領域を変化させることにより CPW との相対的位置を変える手法も試みた。研究計画立案時には CPW と別個のゲートを用いることを想定していたが、本研究開始後、バイアス・ティーを経由して負バイアスを印加することにより CPW の中心電極をゲートとしても利用する手法を思いつき、実行した。これにより CPW と試料端をより接近させることに成功した。希釈冷凍機・超伝導マグネットを用いた低温・強磁場下の量子ホール領域にて測定を行い、マイクロ波透過率の周波数依存性に明瞭なピークを観測した。このピークは量子ホールエッジ状態への集団的励起であるエッジ・マグネトプラズモンの励起によるものである。このピークのゲート電圧依存性(図3a)から、試料端位置および閉じ込めポテンシャルの形状のエッジ・マグネトプラズモンの伝搬速度への効果を詳細に知ることが出来た。また、電子濃度が無くなる試料端のみでなく、電子濃度が異なる2領域の境界にもエッジ・マグネトプラズモンが励起されることを、初めて実験的に明らかにすることが出来た。さらに、マイクロ波で電子系が加熱されることにより生じる熱起電力からも、同起源ピークが、より明瞭に観測出来ることが判明した(図3b)。

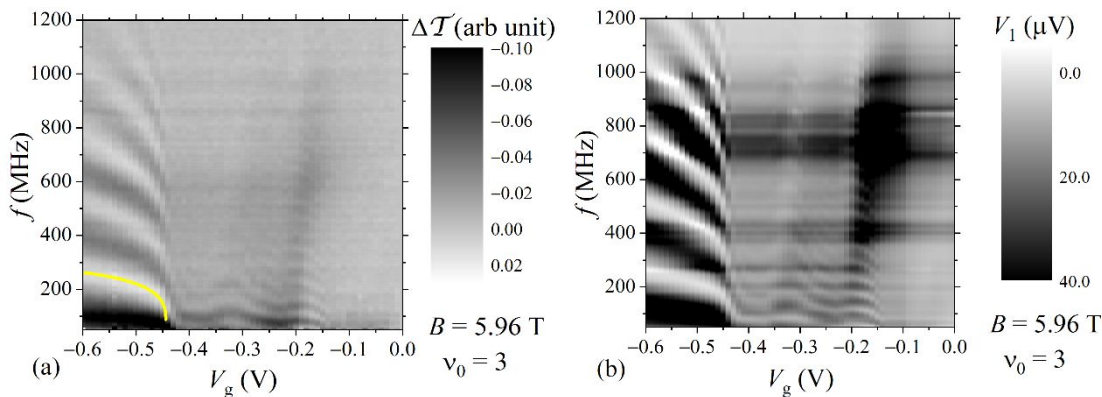


図3. マイクロ波透過率(a)およびマイクロ波加熱による熱起電力(b)の周波数-ゲート電圧依存性

(4) 熱起電力量子振動を利用した磁場中電子温度の空間分布測定

2次元電子系の電子温度の空間分布に関する情報は、多数の電圧端子を持つホールバー形状試料にて、熱起電力の量子振動(ランダウ量子化に因る振動、抵抗におけるシュブニコフ・ドハース振動に相当)振幅の解析からも得られることを明らかにした。磁場中では、ローレンツ力により電子の軌道が曲げられるが、それに伴い電子の運ぶ熱流も曲げられる。ホールバーの長手方向に導入された温度勾配が、磁場印加により横方向に回転するようになるが、このことを量子振動振幅の測定により検出した。また、ゼロ磁場では、ホールバーの電圧プローブのアームのアスペクト比を小さくする(細く長くする)ことにより、アーム経由の熱流出を無視できる程度にまで抑制できるが、磁場中ではアスペクト比の効果は効力を失い、熱流失が非常に大きくなってしまいうこと、それに対し、実験を行った希釈冷凍機温度($100\ \text{mK}$ 程度以下)では、電子-フォノン相互作用により2次元電子系から格子系へ流出する熱流は無視できるほど小さいこと、等を明らかにした。

(5) 1次元平面超格子の熱起電力の整合性磁気振動を利用した磁場中電子温度の方位測定
2次元電子系の電子温度の空間分布に関する情報を得る別のアプローチとして、2次元電子系に人工的な周期性である1次元のポテンシャル変調を導入した「1次元平面超格子」の熱起電力の測定、解析を行った。1次元平面超格子はまた、人工的に素性の明らかな異方性を導入した2次元電子系と見ることも出来、この測定は異方的な試料の熱起電力測定の典型例となる。

1次元平面超格子の磁気抵抗に見られる電子のサイクロトロン半径と人工的周期との整合性に起因する振動(整合性磁気抵抗振動)はよく知られているが、同様の振動が熱起電力にも観測される。ただし、抵抗では振動は主として対角成分に見られるのに対し、熱起電力では主に非対角成分に観測される、という大きな違いがあることを示した。振動振幅の解析から、磁場中の電子温度勾配の面内方位を導出することが可能であることを明らかにした。前述(4)の熱起電力の量子振動では、振動はホールバー本体、電圧プローブのアームを含む2次元電子系のすべての領域で生成されるのに対し、整合性振動は、人工的周期的変調を加えた領域からのみ生じる。変調を加える領域の位置・大きさを設計することにより、局所的な温度勾配の情報を得る手法となり得ることを明らかにした。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計4件（うち査読付論文 3件／うち国際共著 0件／うちオープンアクセス 3件）

1. 著者名 A. Endo, K. Fujita, S. Katsumoto and Y. Iye	4. 巻 5
2. 論文標題 Spatial distribution of thermoelectric voltages in a Hall-bar shaped two-dimensional electron system under a magnetic field	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 J. Phys. Commun.	6. 最初と最後の頁 055005-(1-19)
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1088/1361-6528/ab62cf	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -
1. 著者名 A. Endo, K. Koike, S. Katsumoto, Y. Iye	4. 巻 87
2. 論文標題 Frequencies of the Edge-Magnetoplasmon Excitations in Gated Quantum Hall Edges	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 J. Phys. Soc. Jpn.	6. 最初と最後の頁 064709 ~ 064709
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.7566/JPSJ.87.064709	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 A. Endo, S. Katsumoto	4. 巻 28
2. 論文標題 Quantum Hall Edge States Probed by Plasmon Excitations	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 AAPPS Bulletin	6. 最初と最後の頁 28 ~ 30
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -
1. 著者名 A Endo, S Katsumoto, K Matsuda, W Norimatsu and M Kusunoki	4. 巻 969
2. 論文標題 Frequency dependent ac transport of films of close-packed carbon nanotube arrays	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 J. Phys: Conf. Ser.	6. 最初と最後の頁 12129
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1088/1742-6596/969/1/012129	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

〔学会発表〕 計4件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 1件）

1. 発表者名 遠藤 彰, 勝本 信吾, 家 泰弘
2. 発表標題 量子ホール系の熱伝導率測定
3. 学会等名 日本物理学会 第75回年次大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 遠藤 彰, 小池 啓太, 勝本 信吾, 家 泰弘
2. 発表標題 熱起電力に現れる1次元平面超格子整合性振動と磁場中温度分布
3. 学会等名 日本物理学会 2019年 第74回年次大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 A. Endo, K. Koike, S. Katsumoto, and Y. Iye
2. 発表標題 Microwave Absorption at the Edge of the Quantum Hall Systems
3. 学会等名 22-th Int. Conf. Electronic Properties of Two-Dimensional Systems, Penn State University, 2017 (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 遠藤 彰, 小池 啓太, 勝本 信吾, 家 泰弘
2. 発表標題 量子ホール系のエッジでのマイクロ波吸収
3. 学会等名 日本物理学会2017年秋季大会, 岩手大学上田キャンパス
4. 発表年 2017年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
--	---------------------------	-----------------------	----