プラズモン励起で測る量子ホール効果のエッジ状態

1. はじめに

半導体ヘテロ接合界面やグラフェン中にできる2次元電 子系に磁場を印加することにより現れる現象の中で、最も よく知られているものは量子ホール効果であろう。整数量 子ホール効果は、ある磁場範囲にわたり(あるいは、磁場 を固定して電子濃度を掃引する場合には、ある電子濃度範 囲にわたり)、対角抵抗がゼロとなり ($R_{xx} = 0$)、ホール抵 抗が高い精度で基礎物理定数のみで決まる値となる(Rxv = $R_{\rm K}$ / p, p = 1,2,3,..., $R_{\rm K}$ = h/e² = 25812.807 Ω はフォン・ クリッツィング定数で、電荷素量 e とプランク定数 h のみ で決まっている)現象である。このホール抵抗値は抵抗標 準として利用されているほか、微細構造定数の導出にも用 いられている。この現象には、試料内部(バルク)が局在状 態(絶縁体)となり、試料端にのみ、一方向にのみ電子が移 動できる(すなわちカイラリティーを持つ)1 次元的な無散 逸伝導チャンネル(エッジ状態)が形成されることが重要な 役割を果たしている。エッジ状態は、後方散乱無く電荷や スピンを伝播させ得るチャンネルとしても注目され、応用 を視野に入れた研究もなされている。バルクとエッジの関 係が示唆する通り、整数量子ホール効果は、近年爆発的に

ナノスケール物性研究部門 遠藤 彰、勝本 信吾

研究されているトポロジカル絶縁体の、最も歴史の古い一 形態とみなすことも出来る。

磁場中2次元電子系の高周波での実験的研究法の一つと して、コプレーナ型導波路を用いる手法がある。コプレー ナ型導波路とは同軸ケーブルを平面に切り開いたようなも ので、半導体2次元電子系の基板表面に設置された導波路 を伝播するマイクロ波と基板に埋もれた2次元電子系との 相互作用を通して2次元電子系の情報を得る。2次元電子 系は伝導率が高いほどマイクロ波を良く吸収するので、マ イクロ波透過率は2次元電子系の高周波伝導率の周波数依 存性の測定に用いられている[1]。マイクロ波吸収により2 次元電子系が局所的に加熱されることに着目し、熱起電力 の測定にも利用された[2]。また、マイクロ波照射により 多体状態が励起されることから、ウィグナー結晶・バブル 相・ストライプ相といった、磁場下2次元電子系バルク中 に形成される、強い電子間相互作用に起因する種々の電子 固体相の振動モード(ピニングモード)の研究にも用いられ てきた[3]。本研究はこの手法を、量子ホールエッジ状態 の研究に応用したものである[4]。



図1. (a) 試料と測定法の概略。2DEG:2次元電子系、CPW: コプレーナ型導波路、CE: 中央電極、SE: 側電極。CE に負バ イアスを印加しスロット部にエッジを導入する。マイクロ波透過率および(図示されていない)オーミック電極間に発生する 熱起電力を測定する。(b) エッジ付近の拡大図。平面図(上図)と電子濃度 n(x)の位置 x 依存性(下図)。a: 空乏長。w: エッジ 状態幅。エッジ状態は交互に並ぶ圧縮性(青)・非圧縮性(黄色)の帯からなり、w は全体の幅。

2. 試料と実験方法

図 1(a)に試料と測定法の概略を示す。GaAs/AlGaAs へ テロ接合界面直下に 2 次元電子系(2DEG)を含む半導体基 板を用い、その表面上に電子ビームリソグラフィーを用い た微細加工技術でコプレーナ型導波路(CPW)を設置する。 マイクロ波は主として CPW の中央電極(CE)と両側の接地 電極(SE)との間隙部分(slot)直下の 2DEG に吸収されるの で、測定はこの部分の 2DEG への感度が高い。本研究で は、バイアス・ティー(Bias Tee)を経由して CE に負バイ アスを印加し、すなわち CE をゲート電極としても利用し、 CE 直下の電子を排除することにより静電的にエッジ状態 を、高感度で測定される slot 部へ導入する。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、エッジ状態で の励起が観測できる。また、図示されていないが、2DEG に直接電気的に接触しているオーミック電極が取り付けら れており、マイクロ波吸収により発生する熱起電力の測定 も可能となっている。後述するように、熱起電力からも透 過率と同様の情報を、より高い感度で得ることができる。 測定は、超電導マグネットを備えた希釈冷凍機中(ベース 温度~20 mK)で行った。

3. 実験結果

図 2 に典型的な測定結果を示す。ランダウ準位充填率 $v_0 = 4$ の整数量子ホール効果での測定結果である。図 2(a) はマイクロ波透過率 ΔT を CE に印加した負バイアス V_g と マイクロ波周波数 fに対してプロットしたものである。 V_g 印加とともに CE 直下の電子は減少し、閾値を超えると ($V_g < -0.44$ V)電子はいなくなり slot 部にエッジ状態が導入 される。それと同時に ΔT に明瞭なピークが観測され、更 に大きな負バイアスを加えていくとピークは高周波数側に

シフトしていく。これらのピークはエッジ状態へのプラズ マ振動励起である「エッジ・マグネトプラズモン」励起に よるものと解釈される。一番低い周波数の基本モード fo、 および高調波 ifo(i=2,3,...)が観測されている。負バイアス 増加による高周波側へのシフトはプラズモンの伝播速度の 増加に因るものである。伝搬速度は主として CE とエッジ 状態間の静電結合の強さにより決まる。速度増加は、より 負の Vgによりエッジ状態が CE から遠ざけられた (空乏長 a が増加した)ことの帰結である。静電的な理論[5][6]によ り、本実験に用いた2次元電子系基板の試料パラメータを 用い空乏長 aやエッジ状態幅 wを計算し、それらを用いさ らに基本モードの周波数foを導出したものを図2(a)に黄色 い太線でプロットしてある。実験のピークを非常に良く再 現していることがわかる。同等のエッジ・マグネトプラズ モンはvo = 2 から 18 までの他の整数量子ホール効果でも 観測され、foは同様の計算ですべて良く再現出来た。充填 率が大きくなると(すなわち低磁場になると)エッジ状態幅 が急激に増加することが計算から予測されるが、これが実 験的に裏付けられたことになる。図 2(a)をよく見ると -0.44 V < Vgの領域にもピークは継続しているのが見える。 CE 下の電子が完全に無くならなくても、電子濃度が異な る slot 部との境界にエッジ状態は出来、エッジ・マグネト プラズモンは励起され得る。このような状況でのエッジ・ マグネトプラズモンが観測されたのは、筆者らの知る限り 本研究が初めてである。この領域での Vg による fo の微妙 な増減は、CE下が量子ホール状態(局在状態)にあるか非局 在状態にあるかの違いによるスクリーニングの変化で定性 的に説明できる。図 2(b)に示す熱起電力からも、基本的に 図 2(a)のΔT と同等の情報が得られる。マイクロ波吸収の増 減が直接温度勾配の増減に反映されるため、と考えられる。



図 2. ランダウ準位充填率 $v_0 = 4$ 整数量子ホール効果でのバイアス V_g – 周波数 f 依存性の測定結果。(a) マイクロ波透過率 ΔT 。 黄色い太線は計算から求めたプラズモン励起周波数の V_g 依存性。(b) 熱起電力 V_1 。

熱起電力の測定では試料と無関係な配線等の影響を軽減で きるため、ノイズやバックグランドが小さく、ピークがよ り明瞭に観察される場合が多い。

4. まとめ

コプレーナ型導波路の間隙部に静電的に試料端を導入し、 マイクロ波透過率、または熱起電力を測定することにより、 量子ホールエッジ状態でのエッジ・マグネトプラズモンを 観測できることを明らかにした。励起周波数は空乏長、 エッジ状態幅に依存するため、本測定は、通常の抵抗測定 では得ることのできない試料端付近のこれら特徴的長さの 実験的探索を可能とし、量子ホールエッジ状態に関する基 礎的な知見をもたらす手法である。プラズモンをデバイス 応用するために制御する際の指針を与えることも期待され る。

参考文献

- L. W. Engel, D. Shahar, Ç. Kurdak, and D. C. Tsui, Phys. Rev. Lett. **71**, 2638 (1993).
- [2] S. Kobayakawa, A. Endo, and Y. Iye, J. Phys. Soc. Jpn. 82, 053702 (2013).
- [3] 例えば H. Zhu, G. Sambandamurthy, L. W. Engel,
 D. C. Tsui, L. N. Pfeiffer, and K. W. West, Phys. Rev.
 Lett. 102, 136804 (2009).
- [4] A. Endo, K. Koike, S. Katsumoto, and Y. Iye, J. Phys. Soc. Jpn. 87, 064709 (2018).
- [5] D. B. Chklovskii, B. I. Shklovskii, and L. I. Glazman, Phys. Rev. B 46,4026 (1992).
- [6] I. A. Larkin and J. H. Davies, Phys. Rev. B 52, R5535(R) (1995).