



## 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 ヘ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 に直接電氣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 $\sim 20$  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  $\nu_0 = 4$  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  $\Delta T$  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  $\Delta T$  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  $f_0$ 、および高調波  $if_0(i=2,3,\dots)$  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。伝播速度は主として 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  $V_g$  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  $f_0$  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  $\nu_0 = 2$  から 18 までの他の整数量子ホール効果でも観測され、 $f_0$  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  $< V_g$  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  $V_g$  による  $f_0$  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  $\Delta T$  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。

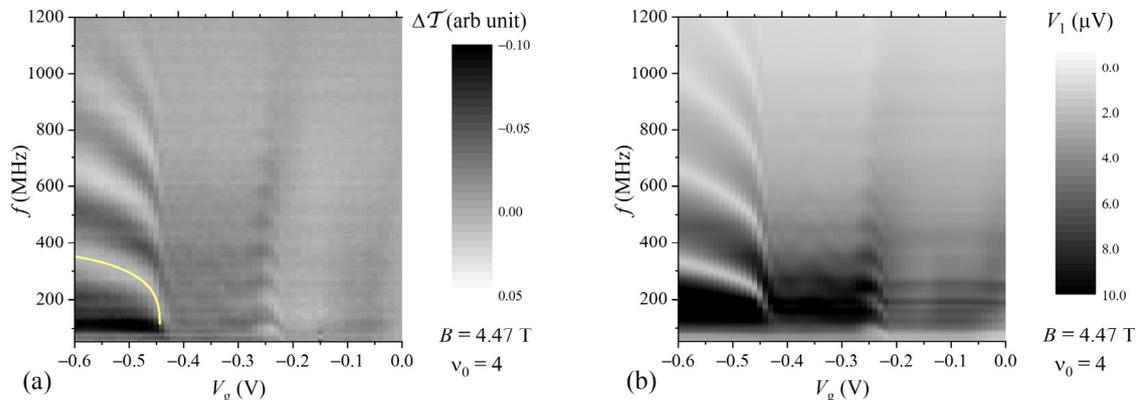


図 2. ランダウ準位充填率  $\nu_0 = 4$  整数量子ホール効果でのバイアス  $V_g$  - 周波数  $f$  依存性の測定結果。(a) マイクロ波透過率  $\Delta T$ 。黄色い太線は計算から求めたプラズモン励起周波数の  $V_g$  依存性。(b) 熱起電力  $V_1$ 。

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ウンドが小さく、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

- [1] 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).