

機関番号：12608

研究種目：研究活動スタート支援

研究期間：2009～2010

課題番号：21810006

研究課題名（和文） 半導体量子構造における量子干渉の精密制御

研究課題名（英文） Control of quantum interference in semiconductor quantum systems

研究代表者

橋坂 昌幸 (HASHISAKA MASAYUKI)

東京工業大学・大学院理工学研究科・助教

研究者番号：80550649

研究成果の概要（和文）：本研究では半導体量子構造中の電子の高周波応答を精密に制御し、電子の高速ダイナミクスに関する新しい量子輸送現象研究を展開することを目的とした。本研究では特に量子ホール端状態を伝搬する電荷密度波（エッジマグネトプラズモン：EMP）に着目し、EMPに対する量子ポイントコンタクト（QPC）の透過特性の評価、さらにQPCを組み合わせて作製したEMP共振器の特性評価を行った。EMPの干渉の観測・制御手法が確立され、量子ホール端における電子ダイナミクスに関する研究が進展した。

研究成果の概要（英文）：The purpose of this research is to observe and control the high-frequency response of semiconductor quantum systems. We focused on transport characteristics of edge-magnetoplasmons (EMPs) in quantum Hall systems, which are charge-density waves traveling along the edge channels. We investigated transmission characteristics of EMPs through quantum point contacts and EMP-cavities and developed some techniques to observe and control the interference of EMPs.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2009年度	1,160,000	348,000	1,508,000
2010年度	980,000	294,000	1,274,000
年度			
年度			
年度			
総計	2,140,000	642,000	2,782,000

研究分野：数物系科学

科研費の分科・細目：ナノ・マイクロ科学・ナノ構造科学

キーワード：メゾスコピック系、量子エレクトロニクス、量子細線、マイクロ・ナノデバイス、物性実験

## 1. 研究開始当初の背景

(1) 半導体2次元電子系における量子ホール効果や、量子ドットなどの量子デバイスにおける輸送現象の研究が盛んに行われている。一方、最近の高速エレクトロニクスの進歩により、GHz帯域での高周波輸送現象測定技術が一般化し、固体電子系のダイナミクスの測定にも用いられるようになってきた。このことにより、世界中で人工量子系における電子の高周波応答の研究がスタートを切ってい

た。

(2) エッジマグネトプラズモン (EMP) は量子ホール端状態 (エッジ状態) に沿って伝搬する電荷密度波である。EMPの伝搬特性は1980年代より、量子ホール系の電子状態を調べる目的で活発に研究されてきた。特にその群速度はエッジ状態の幅などの量子ホール効果の研究における重要な量を反映するため、よく調べられていた。最近、エッジ状態にコヒ

一レントな単一電子を注入する技術が開発され、この単一電子源を用いることで電子系における“量子光学”と呼ぶべき研究分野が展開できるという報告がなされるようになった。この単一電子はエッジ状態を EMP として伝搬するため、EMP はこの電子波量子光学という側面から新しい注目を集めるようになってきた。一方で、この単一電子源の研究とは独立に、最近マッハゼンダー干渉計を用いたエッジチャンネルのコヒーレンスの評価もなされるようになり、エッジ状態を用いた電子波量子光学の展開の機運が高まっていた。

## 2. 研究の目的

(1) 本研究ではこのような EMP に対する関心の高まりを踏まえ、EMP の伝搬を観測・制御する新しい手法の開発に取り組むことを目的とした。具体的には、高周波信号に対する量子ポイントコンタクト (QPC) などの基本的な量子デバイスの透過特性を調べ、QPC を EMP に対するビームスプリッタと見立ててその性能を評価すること、ゲート電極の EMP に対するディレイラインとしての動作を評価することなどを目指した。また、これらの素子を用いて電子版 Fabry-Pérot (FP) 共振器を作製し、そこでの共鳴現象を観測することでエッジ状態における電子ダイナミクスを検出・制御することを目指した。

(2) また、本研究では量子ホール系の電流ゆらぎにも着目し、電子版 FP 共振器におけるゆらぎの評価を目指した。特に、本提案では新しい電流ゆらぎ測定技術の開発に取り組み、これまでにない広帯域・高感度の測定系の開発を目指した。

## 3. 研究の方法

(1) 本研究では半導体 2 次元電子系に微細加工を施すことで人工量子系を作製し、これに対して高速エレクトロニクスによる高周波測定を適用した。2 次元電子系には 2 次元面に垂直に磁場を印加し、整数量子ホール状態を実現した。オーミックコンタクトに対する高周波印加によってエッジ状態に EMP を励起し、様々な磁場、温度環境においてその伝搬特性を GHz 帯域で評価した。

(2) ゲート電極への電圧印加によってエッジ状態の形状やゲート電極とエッジ状態間の距離を静電的に変化させ、EMP 伝搬特性の制御を行った。ゲート電極を用いて QPC ビームスプリッタやディレイラインなど、EMP に対する高周波素子を作製し、そこでの EMP 伝搬の観測・制御を行った。

(3) エッジ状態における電流ゆらぎ測定に適

した電流アンプの検討、開発を行った。特に、市販の高電子移動度トランジスタを用いて極低温で動作する低温アンプを作製し、その特性を評価した。

## 4. 研究成果

(1) エッジ状態に EMP を注入すると共に電磁波を外部から照射し、EMP と電磁波の干渉を利用して EMP 伝搬特性を観測する手法を開発した。また、この電磁波印加を試料近傍のゲート電極を用いて行うことにより、試料中を伝搬する EMP を局所的に検出できることを示した。この手法を用いることで、量子ホール素子内部で局所的な EMP の伝搬速度の測定が可能であることが分かった。

(2) EMP に対する QPC の透過特性を実時間測定によって観測し、QPC のビームスプリッタとしての動作を検証した。測定された QPC 透過特性をシミュレーション結果と比較することで、GHz 帯域における QPC の高周波応答が、直流伝導度だけでなくキャパシタンス成分も考慮することで説明できることを示した。さらに、このキャパシタンスを定量的に評価し、典型的なサイズの量子ホール素子において、エッジチャンネル間の静電結合が数フェムトファラッド程度であることを示した。

(3) QPC の透過特性をアドミッタンスの周波数軸測定によって調べた。これによって、GHz 帯域の EMP に対して QPC がビームスプリッタとして動作することが分かった (図 1)。透過率がゼロとなり静電結合による伝搬が支配的になる領域について精査した。EMP 伝搬の時間遅延による位相発展が無視できる低周波数領域では、古典的な電気回路理論における集中定数回路モデル同様、単一のキャパシタンスによってアドミッタンスが表されることが分かった。一方、十分に周波数が高く量子ホール素子の内部で EMP の位相発展が無視できない場合には、分布定数回路モデルとして系を扱う必要があることが分かった。これにより、EMP のエッジ状態間における静電結合が試料内に分布するキャパシタンス

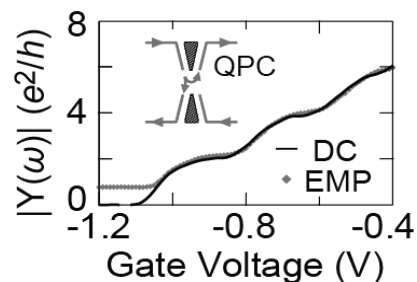


図1 直流電流に対する QPC のコンダクタンス、及び 1.5GHz の EMP に対するアドミッタンスの測定結果

によって評価できることを示し、一次元プラズモンの結合を電気回路モデル化することに成功した。

(4) QPC ビームスプリッタを用いて EMP を環状エッジ状態内に閉じ込め、電子版 FP 共振器を作製した。この共振器において、共振器内に設置されたゲート電極をディレイラインとして用いることで、共鳴周波数を静電的に制御できることが分かった。また、EMP 閉じ込めに用いた QPC ビームスプリッタの透過率を調整し、最もクオリティーファクター (Q 値) の高い共鳴現象は QPC の透過率がゼロの時、すなわち共振器が静電結合によってのみ外界と接続された場合に達成されることが分かった。

(5) さらに QPC を介して複数の共振器を介して直列に接続し、結合共振器系の作製にも成功した。QPC の透過特性を制御することで、その結合強度を制御できることを示した。この場合にも、最も Q 値の高い共鳴現象が容量性結合が実現している場合に達成できることが分かった。これらの実験結果をシミュレーションと比較し、観測された共鳴現象のモデル化を行った。

(5) エッジ状態における電流ゆらぎを測定するための測定系を検討し、高感度、広帯域の電流アンプ開発に取り組んだ。開発した電流アンプを低温で用いることにより、人工量子系のゆらぎ測定に十分な感度を持つ測定システムが構築できることが分かった。作製された電流アンプは高感度 ( $\sim 100 \text{ fA}/\sqrt{\text{Hz}}$ ) かつ広帯域 ( $> 1 \text{ MHz}@-3 \text{ dB}$ ) という従来にない性能を持っており、今後の研究の発展に大きく寄与する可能性を秘めていることが分かった。またこの電流アンプを複数用いて人工量子系に対する電流の交差相関測定を行うことで、さらなる高感度 ( $< 10 \text{ fA}/\sqrt{\text{Hz}}$ ) の測定も可能になることが分かった。この測定セットアップの極低温クライオスタットへの実装に取り組んだ。

## 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 2 件)

① M. Hashisaka, K. Washio, H. Kamata, K. Muraki, and T. Fujisawa, “Interferometric detection of edge magnetoplasmons in AlGaAs/GaAs heterostructures”, *Physica Status Solidi (C)*, 8 巻、381-383 頁、2011 年、査読有

② K. Washio, M. Hashisaka, H. Kamata, K.

Muraki, and T. Fujisawa, “Admittance Measurement for a Quantum Point Contact in a Multi-terminal Quantum Hall Device”, *Japanese Journal of Applied Physics*, 50 巻、04DJ04-1-4 頁、2011 年、査読有

[学会発表] (計 9 件)

① 鷺尾和久、橋坂昌幸、鎌田大、村木康二、藤澤利正、「量子ホール領域における量子ポイントコンタクトの高周波アドミッタンス測定」、日本物理学会 2011 年春 第 66 回年次大会、2011 年 3 月 25 日、WEB 上で公開

② 橋坂昌幸、熊田倫雄、鷺尾和久、鎌田大、村木康二、藤澤利正、「2 重エッジマグネトプラズモン共振器における共鳴スペクトルの観測」、日本物理学会 2011 年春 第 66 回年次大会、2011 年 3 月 25 日、WEB 上で公開

③ K. Washio, M. Hashisaka, H. Kamata, K. Muraki, and T. Fujisawa, “Admittance of a Quantum Point Contact in the Quantum Hall Regime”, 2011 International Symposium “Nanoscience and Quantum Physics”, 2011 年 1 月 26 日、東京都港区

④ M. Hashisaka, N. Kumada, K. Washio, H. Kamata, K. Muraki, and T. Fujisawa, “Coupled plasmonic cavities in the quantum Hall system”, The International Symposium on Nanoscale Transport and Technology (ISNTT2011), 2011 年 1 月 12 日、東京都厚木市

⑤ K. Washio, M. Hashisaka, H. Kamata, K. Muraki, and T. Fujisawa, “Transmission Characteristics of a Quantum Point Contact for Edge Magnetoplasmons”, 2010 International Conference on Solid State Devices and Materials, 2010 年 9 月 23 日、東京大学

⑥ 橋坂昌幸、藤澤利正、「電流アンプを用いたメゾスコピックデバイスのための量子雑音測定技術」、日本物理学会平成 22 年度秋季大会、2010 年 9 月 23 日、大阪府立大学

⑦ M. Hashisaka, K. Washio, H. Kamata, K. Muraki, and T. Fujisawa, “Interferometric detection of edge magnetoplasmons in AlGaAs/GaAs heterostructures”, The 37<sup>th</sup> International Symposium on Compound Semiconductors, 2010 年 6 月 3 日、香川県高松市

⑧ 橋坂昌幸、鷺尾和久、鎌田大、村木康二、

藤澤利正、「量子ホール端状態におけるエッジマグネトプラズモンのマイクロ波伝搬特性」、日本物理学会 2010 年春 第 65 回年次大会、2010 年 3 月 21 日、岡山大学

⑨ 橋坂昌幸、鷺尾和久、鎌田大、村木康二、藤澤利正、「量子ホール端状態におけるエッジマグネトプラズモンのマイクロ波伝搬特性」、東京工業大学グローバルCOE公開シンポジウム、2009 年 12 月 8 日、東京工業大学

〔その他〕

ホームページ

<http://fujisawa.phys.titech.ac.jp/indexJ.html>

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

橋坂 昌幸 (HASHISAKA MASAYUKI)

東京工業大学・大学院理学研究科・助教

研究者番号：80550649