

科学研究費助成事業（特別推進研究）公表用資料  
〔研究進捗評価用〕

平成21年度採択分

平成24年 5月24日現在

研究課題名（和文）半導体量子構造による電子波束のダイナミクス  
研究課題名（英文） Dynamics of electron wavepackets in semiconductor quantum structures

研究代表者

藤澤 利正 (FUJISAWA TOSHIMASA)  
東京工業大学・大学院理工学研究科・教授



研究の概要：本研究は、半導体量子ドット・量子ホール効果・スピントロニクスの研究と量子光学の知識を融合し、「半導体量子構造による電子波束のダイナミクス」の研究を推進するものである。電子波束の干渉性やスピン依存現象を探求し、多体電子状態の物性測定に応用するとともに、高速波束エレクトロニクスや量子情報技術への可能性を追求する。具体的には、GaAs系やグラフェンの量子構造において時間領域・周波数領域での非定常伝導測定や、トポロジカル材料での理論研究を進める。

研究分野：数物系科学

科研費の分科・細目：物理学・物性I

キーワード：メゾスコピック系 半導体物理

### 1. 研究開始当初の背景

半導体超格子構造の提案以来、半導体量子構造を用いた電子波の制御技術は著しく発展してきた。高電子移動度のヘテロ接合により、ノーベル賞受賞テーマにもなった整数・分数量子ホール効果の研究が進み、標準抵抗への応用や、分数電荷をもつ準粒子の重要性が認識されている。また、人工的なナノ構造の設計・作製により、量子ドットなどの電子状態の理解が進み、量子コヒーレンスを応用した量子コンピュータへの発展が見込まれる。さらに、電子スピンの制御方法やその応用も期待されている。本研究はこれらの発展形態を目指すもので、さまざまな非定常状態の波束のダイナミクスに注目する。

### 2. 研究の目的

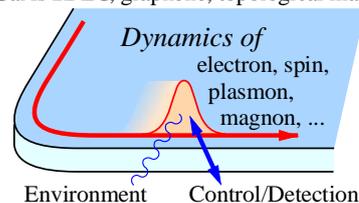
様々な材料（半導体・グラフェン・トポロジカル材料など）のナノ構造や試料端に形成されるチャンネルに注目し、その一方向性で無散逸な伝導を積極的に利用することで、「電子波光学」の研究分野を創造し、電子波束の干渉性やスピン依存現象を探求する。光パルスによって量子光学や量子通信などの発展が見られたように、電子の波束を空間的かつ時間的に制御することによって、量子電子光学や電子波工学への発展が期待される。ボゾンである光子の実験によって培われた量子光学を、フェルミオンである電子によって半導体デバイス中で再現することにより、統計性の差異を明らかにできる。高品質な半導体

二次元電子系では、高品質なエッジチャンネルが形成され、電子（スピン）・プラズモン・エニオン（分数電荷）・非アーベリアン準粒子などの様々なモードの波束を実現できると期待される。グラフェンでは、ディラック電子やプラズモンの波束伝搬によって試料端の電子状態との関連を探ることができる。また、トポロジカル絶縁体ではスピンに依存した方向性が、人工的につくられるマグノニック結晶ではマグノン波束の動力学を探求できると期待している。これらの系での実験・理論を進めることにより、多体励起状態やその波束に関する物性研究をすすめて、高速波束エレクトロニクスの研究を創造し、スピントロニクスや量子情報技術への発展に寄与することが本研究の目的である。

### 3. 研究の方法

実験研究においては、定常状態における物性がよく知られている GaAs 系量子構造から非定常ダイナミクスの研究を始め、近年注目されているグラフェンの量子構造にも材料系を広げている。試料に高周波電圧を印加し、

GaAs 2DEG, graphene, topological materials, ...



非定常電荷密度波が試料端を伝搬する様子などから励起モードの測定を行う。

理論研究においては、実験技術が確立していない材料、特にトポロジカル絶縁体や人工周期構造を導入したマグノニック結晶におけるエッジ状態・波束動力学の研究を行う。

実験と理論の相乗効果によって双方の研究が発展すると期待している。

#### 4. これまでの成果

(1) エッジマグネトプラズモン (EMP) の伝導制御に関する研究：クーロン相互作用の強い電子系の励起は、電荷密度励起であるプラズモン (ボゾン) としても理解することができる。特に一次元伝導チャンネルにおいては朝永ラッティンジャー (TL) 流体論によって、速度変化・電荷スピン分離・電荷分断化現象などが予測されている。量子ホールエッジチャンネルの一次元・一方向チャンネルにおけるプラズモン伝導から、相互作用に関する基本パラメータを評価する技術を確認した。

**(1A) 遮蔽による伝搬速度制御**：GaAs 量子ホールエッジチャンネルの EMP 速度を系統的に調べ、チャンネル周囲の環境に大きく依存することを示した。(a) エッチングで形成される裸の試料端では、遮蔽がなく、本来のプラズモン速度 (典型的条件で  $1.5 \times 10^6$  m/s) を示すが、(b) 試料表面を金属で覆った場合には、強い遮蔽によって1桁程度小さい速度 ( $1.5 \times 10^5$  m/s) を、(c) ゲート電極 (金属) に適当な電圧を印加した場合は、電圧に依存した速度を示す。これらの結果は、TL 流体論における相互作用と速度の関係に対応しており、相互作用の大きさを空間的にも時間的にも変調できることから、電荷ダイナミクスの制御に有用な手法となる。

**(1B) チャンネル間の分布相キャパシタンス**：TL 流体の特徴的な伝導は、複数チャンネル間に生ずる電荷密度励起などに現れる。しかし、一次元チャンネル間の相互作用は長距離に及び、周囲の環境にも強く依存するため、十分な実験的な知見に至っていない。我々は、量子ポイント接合で隔たれたエッジチャンネル間の相互作用を分布キャパシタ (相互作用パラメータの空間分布) で表現し、プラズモン伝導の散乱パラメータの周波数依存性から、分布キャパシタを評価することに成功した。微小な量子ポイント接合によって隔たれているにもかかわらず、相互作用は試料全体におよぶ長距離性であることを確認し、1次元チャンネルでの相互作用の重要性を示す結果を得た。

**(1C) 量子ポイント接合高周波混合器**：量子ポイント接合の非線形性を利用し、プラズモン伝導の周波数数倍や周波数混合の素子をデモンストレーションした。比較的インピーダンスの高いエッジチャンネルにおいても、

10GHz を超える周波数で動作することを示し、高速波束エレクトロニクスへの可能性を示した。

#### (2) エッジ状態の理論研究

##### (2A) 強磁性絶縁体中のマグノンの熱ホール効果

：強磁性絶縁体中において、マグノンバンドがギャップをもつと、量子ホール系やトポロジカル絶縁体などに類似した新規な物理現象が期待される。我々は、長波長の静磁スピン波についてマグノンバンド構造に起因するベリー曲率を定式化した。輸送現象を半古典論と線型応答理論とで扱い、これが熱ホール効果を生み出すこと、強磁性薄膜に関しては、Forward Volume Wave mode のみがこの効果を生み出すことが分った。

#### 5. 今後の計画

GaAs 系、グラフェンなどのエッジチャンネルの非定常伝導特性を探索することにより、エッジチャンネル波束の励起モードやその量子統計に関する現象を明らかにする。また、量子ホール系やトポロジカル絶縁体などにおいて、スピン・電荷・光・熱など多様な自由度を絡めた波束の生成やその動力学現象について、新規現象を探索する。

#### 6. これまでの発表論文等 (受賞等も含む)

(1) M. Hashisaka, R. Murata, K. Muraki, and T. Fujisawa, “Frequency conversion of rf edge magnetoplasmons using a quantum point contact”, to be published in Appl. Phys. Lett. (2012).

(2) M. Hashisaka, K. Washio, H. Kamata, K. Muraki, and T. Fujisawa, “Distributed electrochemical capacitance evidenced in high-frequency admittance measurements on a quantum Hall device”, Phys. Rev. B 85, 155424-1, -4 (2012).

(3) Ryo Matsumoto and Shuichi Murakami, “Theoretical prediction of rotating magnon wavepacket in ferromagnets”, Phys. Rev. Lett. 106, 197202-1, -4 (2011).

(4) N. Kumada, H. Kamata, and T. Fujisawa, “Edge magnetoplasmon transport in gated and ungated quantum Hall systems”, Phys. Rev. B 84, 045314-1, -4 (2011).

(5) H. Kamata, T. Ota, K. Muraki, and T. Fujisawa, “Voltage-controlled group velocity of edge magnetoplasmon in the quantum Hall regime”, Phys. Rev. B 81, 085329-1, -4 (2010).

ホームページ等

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