

平成 30 年 5 月 9 日現在

機関番号：11301

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2014～2017

課題番号：26287059

研究課題名(和文) InSb量子構造のゲート制御伝導特性の研究

研究課題名(英文) Gate-controlled transport characteristics of InSb quantum structures

研究代表者

平山 祥郎 (Hirayama, Yoshiro)

東北大学・理学研究科・教授

研究者番号：20393754

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 12,600,000円

研究成果の概要(和文)：InSbトレンチ型イン・プレーン・ゲート量子ポイントコンタクト(QPC)を作製し、量子化伝導特性を得るとともに、一次元サブバンドの平行磁場による交差を確認した。さらに、ゲートに非対称バイアスを加えた実験から並列チャンネルが形成される可能性を示唆した。GaAs系QPCにおいては、トリプルゲート構造を使うと低移動度ウェハでも量子化特性が見える可能性があること、QPCの周辺と内部の充填率を適当に選択することで、核スピン偏極、さらには抵抗検出NMRが可能になることを確認した。InSb二次元系の量子ホール強磁性状態での抵抗検出NMRの基礎研究にも取り組み、カイラルエッジチャンネルの影響を明確にした。

研究成果の概要(英文)：An InSb quantum point contact (QPC) has been successfully fabricated in a two-dimensional InSb heterostructure by using a trench-type in-plane gate. The magneto-transport characteristics show crossings of the 1D subbands under an in-plane magnetic field. The QPC device shows the typical characteristics of parallel channels under asymmetric gate bias, suggesting electron accumulation along the side walls of the trench. We demonstrated that a triple-gated GaAs QPC produces the well-defined quantized conductance even using a relatively low mobility wafer. By using this QPC structure, we have successfully observed dynamic nuclear polarization in QPC and resistively-detected NMR. We also access a fundamental feature of InSb two-dimensional system, especially the simplest quantum Hall ferromagnet realized under tilted magnetic field. A newly observed reciprocity of the NMR response suggests an important role of the chiral edge channel for the dynamic nuclear polarization.

研究分野：量子伝導物性

キーワード：メソスコピック系 量子細線 スピンエレクトロニクス 半導体物性 先端機能デバイス

1. 研究開始当初の背景

(1) InSb は小さな有効質量、大きな  $g$  因子、強いスピン軌道相互作用という特徴を有し、次世代デバイスへの応用が期待されているが、狭ギャップ半導体の欠点としてショットキーゲートのゲートリークが大きく、InSb 量子構造の電子密度の制御は難しく、一番基本的なナノ構造である量子ポイントコンタクト (QPC) の研究もほとんど行われて来なかった。

(2) QPC の研究全般に焦点を当てると、QPC は一番単純なナノ構造であるにもかかわらずいまだに解明できていない特性がある。特に有名なものとして 0.7 構造があり、GaAs 系の QPC を中心に 15 年以上にわたり活発に研究されてきたが、その起源はまだ決着がついていない。

2. 研究の目的

(1) 小さい有効質量、大きな  $g$  因子、強いスピン軌道相互作用を有する InSb 半導体において、正確にゲート制御された量子構造を実現し、ナノ構造、特に QPC の未解明な問題に新しい光をあてる。

(2) InSb 二次元系にユニークな伝導特性を明らかにして、QPC などの伝導特性を理解するための基礎を確立する。

3. 研究の方法

(1) InSb で安定に動作する量子ポイントコンタクト (QPC) を作製することで、InSb のユニークな特性と QPC の伝導特性を明らかにする。

(2) QPC の基本特性を把握するために、高品質の QPC が実現できるトリプルゲート GaAs QPC で、QPC の基礎特性について理解を深める。

(3)  $g$  因子が大きく並行磁場で簡単に大きなスピン分離が生じる InSb の特徴を利用した二次元系の物性測定を推進し、QPC の物性測定につなげる。

4. 研究成果

(1) 狭ギャップ半導体で通常のショットキーゲートが困難な InSb 二次元系について、原子層堆積で作製した  $Al_2O_3$  絶縁膜を挟んだスプリット・ゲート型の QPC を試作した。すでに報告していたように電子密度の変調などは順調に行われたが、空乏化すると不安定性が生じ、GaAs 系のように空乏領域を負のゲート電圧で広げて一次元チャンネルを狭窄することは難しいことが判明した。これは、界面準位の影響に加えて、正孔が界面に蓄積することが効いている可能性がある

(2) 上記の結果を受けて、トレンチ型イン・

プレーン・ゲート QPC の作製を試みた。トレンチ形成による不安定性を除去するために溶液によるエッチングを用いることで、図 1 に示したように、安定で比較的良好な特性を示す QPC の作製に成功した。QPC では量子化伝導特性が得られるとともに、一次元チャンネルの平行磁場による交差が明瞭に確認された。磁場依存性から求めた  $g$  因子には磁場方向による異方向性が確認され、成果は APL 論文へ掲載されることが確定している。

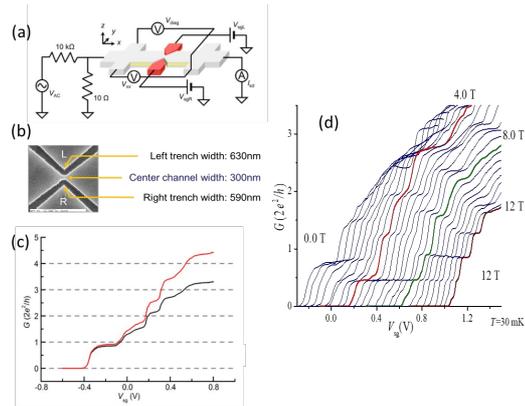


図 1 InSb トレンチ型イン・プレーン・ゲート QPC の (a) 概略図、(b) デバイス中央部の SEM 写真、(c) ゼロ磁場中で測定された量子化伝導特性 ( $G$  が小さい方が実測データ、大きい方は実測をもとにシリーズ抵抗の影響を補正したもの)、(d) 平行磁場中での伝導特性。測定時の希釈冷凍機の温度は 30 mK である。

(3) 作製に成功したトレンチ型イン・プレーン・ゲート QPC について、両方のイン・プレーン・ゲートに非対称バイアスを加えた実験を行った結果、InSb 系の特徴として、ゲートに正のバイアスを加えたときにトレンチの側面に電子が蓄積され、並列チャンネルが形成されている可能性を示した。

(4) InSb 系 QPC の参考として作製した GaAs 系 QPC において、トリプルゲート構造を使うと通常のスプリット・ゲート QPC では移動度が低く量子化が見えないウェハについても明瞭な量子化が見えることを確認した。さらに、センターゲートに正のバイアスを印加した状況では、一次元チャンネルの両端での電子波の反射によるファブリー・ペロー共鳴が明確に観測されることも明らかにした。

(5) これまでに述べた結果にヒントを得て、トレンチ型イン・プレーン・ゲート QPC に良好な絶縁膜を載せて、チャンネル中央部分に細い金属センターゲートを入れた新しい QPC 構造を提案した。この構造では、金属ゲートに正の電圧を加えて電子密度を増やすことで、QPC の特性が大幅に改善できる可能性がある。中央に入れるゲートのアラインメントが難しいが、この技術は本研究期間中に確立することができた。伝導特性測定はこれからであるが、最初の構造の試作に成功した。

(6) 低次元電子系の物性、特にスピンの振る舞いを計測するのに大変有用な抵抗検出

NMR の基礎研究を GaAs 系 QPC で進め、QPC の周辺の電子系を偶数充填率、QPC の内部を奇数充填率にすることでエッジチャンネル間の電子散乱による核スピン偏極、さらには抵抗検出 NMR が可能になることを確認した。得られた NMR スペクトルは核スピンの偏極する場所などに依存し複雑に振る舞うが、そのナイトシフトから QPC 内部の情報が RDNMR で調査できることがわかった。

(7) InSbQPC で抵抗検出 NMR 実験を行う前段階として二次元系における抵抗検出 NMR の基礎研究に取り組んだ。すでに我々が報告しているように大きな  $g$  因子を反映して傾斜磁場化でランダウ準位の交差が生じ、充填率 2 の交差点でドメイン構造を伴う量子ホール強磁性が実現され、そこで抵抗検出 NMR が実現された。この特性をエッジのあるホールバー構造とエッジのないコルビノ構造で比較した結果、図 2 に示したようにホールバー構造ではエッジの存在を反映して電流を流す方向に依存した NMR 特性が現れることがわかった。さらに、コルビノ構造では 2K 程度で抵抗検出 NMR 信号が消えるのに対して、ホールバー構造では 6K まで信号が確認された。

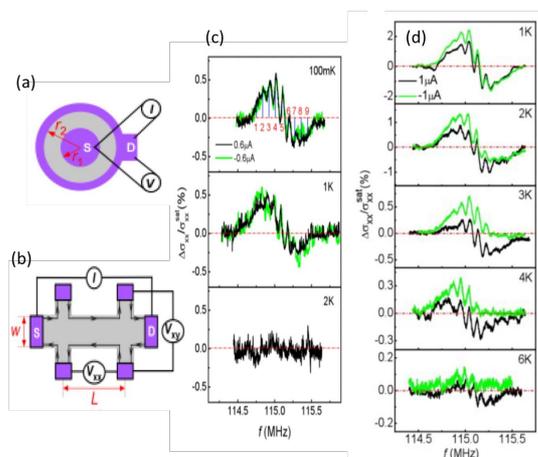


図2 InSb量子ホール強磁性における抵抗検出NMR。(a)コルビノ構造概略図、(b)ホールバー構造概略図、(c)コルビノ構造で測定された抵抗検出NMR信号。電流の向きに関係なく特性は同じで、信号は2Kで消失する。(d)ホールバー構造で測定された抵抗検出NMR信号。電流の向きにより信号が異なり、さらに信号は6Kまで観測されている。

(8) 上記の実験結果からバルク由来の抵抗検出 NMR 信号が消失する 3K でホールバー構造の抵抗検出 NMR 特性を丁寧に測定した。その結果、電流の向きと磁場の向きを入れ替えたときにきれいな相反性を確認した。これは、InSb に係わらず量子ホール強磁性状態での動的核スピン偏極と抵抗検出 NMR へのカイラルエッジチャンネルの寄与の本質的な部分を示したものであり、Nat. Comm. に掲載され、報道発表を行った。今後、得られた知見は InSb 系 QPC の抵抗検出 NMR 測定に応用していく予定である。

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計 14 件)

T. Masuda, K. Sekine, K. Nagase, K. S. Wickramasinghe, T. D. Mishima, M. B. Santos, and Y. Hirayama, Transport Characteristics of InSb Trench-Type In-Plane Gate Quantum Point Contact, Applied Physics Letters (accepted), 査読有

M. H. Fauzi, A. Singha, M. F. Sahdan, M. Takahashi, K. Sato, K. Nagase, B. Muralidharan, and Y. Hirayama, Resistively detected NMR line shapes in a quasi-one-dimensional electron system, Physical Review B (RC), 査読有, B95, 2017, 241404-1-5

DOI: 10.1103/PhysRevB.95.241404

Kaifeng Yang, Katsumi Nagase, Yoshiro Hirayama, Tetsuya D. Mishima, Michael B. Santos, and Hongwu Liu, Role of chiral quantum Hall edge states in nuclear spin polarization, Nature Communications, 査読有, 8, 2017, 15084-1-7

DOI: 10.1038/ncomms15084

S. Maeda, S. Miyamoto, M. H. Fauzi, K. Nagase, K. Sato, and Y. Hirayama, Fabry-Perot interference in a triple-gated quantum point contact, Applied Physics Letters, 査読有, 109, 2016, 143509-1-4

DOI: 10.1063/1.4964404

〔学会発表〕(計 52 件)

Yoshiro Hirayama, Transport Characteristics and Resistively-Detected NMR in InSb and GaAs Quantum Systems (invited), Simons Program: Frontiers in Quantum Hall Physics, Copenhagen, July, 2017

Yoshiro Hirayama, New aspects of compound semiconductor quantum point contact (invited), Collaborative Conference on Materials Research (CCMR), Jeju, June, 2017

Yoshiro Hirayama, Quantum transport and resistively-detected NMR in InSb quantum systems (invited), 2017 Sweden-Japan International workshop on quantum nanophysics and nanoelectronics, Yokohama, March, 2017

T. Masuda, K. Sekine, K. Nagase, K. S. Wickramasinghe, T. D. Mishima, M. B. Santos, and Y. Hirayama, Transport characteristics of InSb trench-type in-plane-gate quantum point contact in parallel magnetic field (oral), 33rd International Conference on the Physics of Semiconductors (ICPS2016), Beijing, August, 2016

Yoshiro Hirayama, Quantum Transport and Nuclear Related Phenomena in GaAs and InSb Systems (invited), Recent Development in 2D Systems (RD2DS), Okinawa, April, 2016

〔図書〕(計1件)

平山祥郎 他、朝倉書店、半導体量子構造の物理、2016、担当ページ 9-14、21-52、88-100、総ページ数 165 ページ

〔産業財産権〕

出願状況(計0件)

取得状況(計0件)

〔その他〕

報道発表：量子ホール系における核スピン偏極の相反性を発見～量子ホール系における核スピン偏極の基本的な特性の解明～  
2017年4月18日(東北大学Web掲載4月21日)  
日刊工業新聞(4月21日)掲載など  
ホームページ：<http://quant-trans.org/>

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

平山 祥郎 (HIRAYAMA, Yoshiro)  
東北大学・大学院理学研究科・教授  
研究者番号：20393754

### (2) 研究分担者

( )

研究者番号：

### (3) 連携研究者

橋本 克之 (HASHIMOTO, Katsushi )  
東北大学・大学院理学研究科・助教  
研究者番号：30451511

Fauzi Mohammad Hamzah  
東北大学・スピントロニクス学術連携研究  
教育センター・助教  
研究者番号：90732892

富松 透 (TOMIMATSU, Toru)  
東北大学・大学院理学研究科・助教  
研究者番号：60712396

長瀬 勝美 (NAGASE, Katsumi)  
東北大学・大学院理学研究科・助手  
研究者番号：80721399

### (4) 研究協力者

佐藤 健 (SATO, Ken)  
東北大学・大学院理学研究科・技術職員  
研究者番号：

関根 和希 (SEKINE, Kazuki)  
東北大学・大学院理学研究科・大学院学生  
研究者番号：  
(平成27年度まで連携研究者として参加)

増田 貴史 (MASUDA, Takafumi)  
東北大学・大学院理学研究科・大学院学生  
研究者番号：  
(平成27年度から連携研究者として参加)

高橋 基 (TAKAHASHI, Motoi)  
東北大学・大学院理学研究科・大学院学生  
研究者番号：  
(平成27年度から連携研究者として参加)

角田 和俊 (KAKUTA, Kazutoshi)  
東北大学・大学院理学研究科・大学院学生  
研究者番号：  
(平成28年度から連携研究者として参加)