

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 6 月 12 日現在

機関番号：14401

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2015～2016

課題番号：15K13274

研究課題名(和文) InSb量子井戸を用いた高品質1次元細線の実現とマヨラナ粒子の探索

研究課題名(英文) Realization of high quality one-dimensional wire using InSb quantum wells and exploration of Majorana fermions

研究代表者

大岩 顕 (Oiwa, Akira)

大阪大学・産業科学研究所・教授

研究者番号：10321902

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,000,000円

研究成果の概要(和文)：マヨラナ粒子は、非可換統計性や、量子計算への応用など、固体物理の魅力的な課題となっている。本研究では、分子線エピタキシーによりスピン軌道相互作用が強い高品質InSb量子井戸を成長し、1次元細線に加工するという方法でマヨラナ粒子の探索を行った。GaAs基板上にAlSb/AlInSbの厚膜バッファ層を成長することで、表面付近の貫通転位密度を大幅に低減し、移動度は低い低温磁場下で2次元電子的な振舞いを観測した。またサイドゲート型量子ポイントコンタクト作製法を確立した。移動度を向上する方針は立っており、マヨラナ粒子探索を推進するために高品質InSb1次元細線を実現するための重要な技術を確立した。

研究成果の概要(英文)：Majorana fermions have become one of the fascinating subjects in solid state physics because of their non-Abelian statistics and application to quantum computation. In this project, we aim at exploring the Majorana fermions by fabricating a one-dimensional wire using a high-quality InSb quantum well, which has a strong spin-orbit interaction, grown by molecular beam epitaxy. By growing a thick buffer layer of AlSb/AlInSb on a GaAs substrate, the density of threading dislocations near the surface can be significantly reduced. We could observe a two-dimensional electron-like behavior at low temperature under applied magnetic fields though the mobility was low. We have also almost established the fabrication process of a quantum point contact with side-gates. The strategy for improving the mobility has been clarified. We have established the crucial technologies to realize the high quality InSb one-dimensional wire for searching Majorana fermions.

研究分野：半導体低次元物性

キーワード：InSb量子井戸 分子線エピタキシー マヨラナ粒子 量子ポイントコンタクト

1. 研究開始当初の背景

2010年にスピン軌道相互作用の強い1次元量子細線にs波超伝導体を接合させた複合構造において、その両端にマヨラナ束縛状態が出現することが理論的に予測され、2012年にInSb ナノワイヤーを使ってマヨラナ束縛状態の存在を示す実験が報告された。この実験ではゼロエネルギー束縛状態であるマヨラナ束縛状態をナノワイヤー端でのゼロバイアス伝導度ピークとして観測したというものであった。これが契機となり、同じようにInSbやInAsなどのナノワイヤーを使った実験が数報発表された。しかし同時期に、1次元細線中の欠陥や近藤効果などを起源とするゼロバイアス伝導度ピークの存在も指摘され、マヨラナ束縛状態の信頼性の高い実証が強く求められ、材料の高品質化や高度な結晶成長、新しい測定法を導入するなど様々な取り組みが、世界の主要グループで続いている。

2. 研究の目的

トポロジカル絶縁体では、散逸のない表面金属状態に超伝導近接効果を導入するとマヨラナ粒子が出現すると提案されている。このマヨラナ粒子は非可換統計性を持ち、量子計算への応用も提案されており、固体物理の魅力的な課題となっている。本研究では、分子線エピタキシーによりスピン軌道相互作用が強い高品質なInSb量子井戸を成長し、そこから1次元細線に加工するという独自の方法でマヨラナ粒子の実証に挑戦する。まず高品質な1次元細線の実現を目指し、先行研究では示されていない1次元伝導とスピン軌道相互作用によるヘリカル状態というマヨラナ粒子出現の2つの条件を実証したうえで、マヨラナ細線に直列接続した量子ポイントコンタクトの半整数量子化伝導度や4周期性など複数の実験からマヨラナ粒子の信頼性の高い実証を目指す。

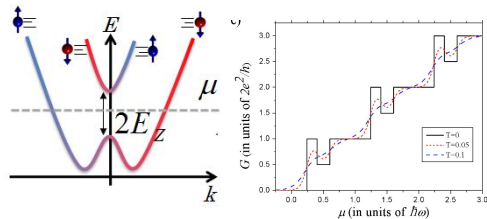


図1:(左)スピン軌道相互作用が強い系のエネルギーバンド図。(右)量子ポイントコンタクトで期待される量子化伝導度

3. 研究の方法

本研究で重要な課題は高品質なInSb量子井戸2次元電子系の成長である。そこで研究開始からInSb量子井戸の成長とその評価に取り組んだ

(1) 高品質InSb量子井戸構造成長と1次元細線の作製

情報通信研究機構(NICT) 赤羽博士と共同

して分子線エピタキシー(MBE)による高品質InSb量子井戸構造の成長を行った。分子線エピタキシーは一般に原子オーダーでの高品質半導体結晶成長が可能で、欠陥や不純物が少ないInSb量子井戸の成長が可能である。InSbは狭ギャップ半導体で格子定数が大きく、基板との格子整合と貫通転位の存在が大きな問題となる。これを回避するため次の2つの構造の成長を行った。GaAs上の高In濃度厚膜InAlSbバッファ上に成長したInSb量子井戸(試料A)と、InSb基板上に成長したInSb量子井戸(試料B)の2種類である。NICTでは成長した基板の表面平坦性の評価を行い、大阪大学では試料Aについて透過電子顕微鏡像を撮影し、貫通転位の有無を調べた。それらの結果を成長に反映させることにより、移動度が50,000cm²/Vs程度の高品質基板の作製を目指した。さらに1次元細線構造に加工する微細加工法やエッチング方法さらにオーミック電極の形成法の確立を目指した。

(2) InSb量子井戸の電気伝導特性の測定

上述の通り成長した試料AとBの、van der Pauw法による低温高磁場の電気伝導測定から、移動度の評価を行った。

4. 研究成果

(1) 高品質InSb量子井戸構造成長と1次元細線の作製

分子線エピタキシーにより2種類の構造を成長した。試料Aは、GaAs上に1.5μmの厚膜InAlSbバッファ層を成長することで量子井戸が存在する表面付近での貫通転位密度を減らすことを目指した。試料BはInSb基板を用いることで格子整合成長を目指した。

図2に試料Aの層構造を示す。1μm-AlSbのバッファ層を成長した後、1.5μm-Al_{0.1}In_{0.9}Sbを成長した。その上に20nmのInSb量子井戸を成長した。図2の右側には試料Aの断面透過顕微鏡写真を示す。GaAs基板とAlSbバッファ層の間には大きな格子不整合のため転位が高密度に存在しているが、表面では転位密度が大幅に減っており、厚膜バッファ層により貫通転位密度の低減に成功したことを示している。ただしAFMや目視により表面平坦性については、基板上で部分的にのみ鏡面が得られるにとどまっており、その条件は限定的で改善が求

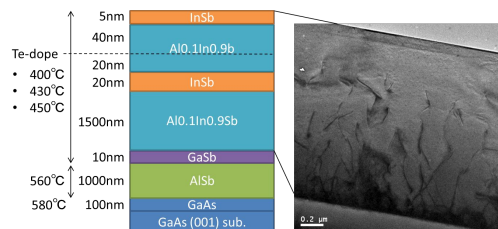


図2: GaAs基板上のInSb量子井戸構造の層構造(左)と断面透過顕微鏡像(右)

められる。

一方、試料 B は、InSb 基板上に 450nm-Al_{0.05}In_{0.95}Sb のバッファ層を成長し、その上に 30nm-InSb 量子井戸を成長した。断面透過顕微鏡測定を行っていないが、基板との格子整合が良いため、転位密度は低いことが期待される。しかし表面の平坦性については、[1-10]方向に伸びた幅 50nm、高さ 50nm 程度の構造が AFM 測定で確認されており、試料 B もさらなる改善が必要である。

一方で、1次元系を実現するため、量子ポイントコンタクトの作製に取り組んだ。InSb のような狭ギャップ半導体ではショットキー界面を形成しにくいいため、エッチングにより狭窄チャンネルとサイドゲートを、InSb 基板を用いて作製法を確立した(図 3)。この際、エッチング面にダメージを与えないよう、ドライエッチングではなくウェットエッチングを採用した。またオーミック電極については、アニール処理により 2次元電子にダメージを与えないよう、アニール処理を用いないオーミック接触の確立を目指した。まず n-InSb 基板に Ti/Au で抵抗の低いオーミック接触を形成できることを確認できた。量子井戸試料については現在、試行中である。

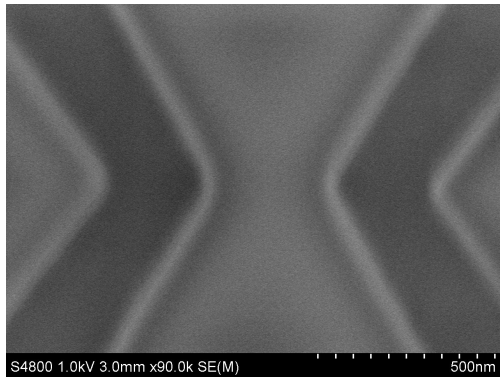


図 3 : InSb 基板上に作製したサイドゲート型量子ポイントコンタクトの電子顕微鏡写真。

(2) InSb 量子井戸の電気伝導特性の測定

1.7K で測定した試料 A の磁気抵抗とホール抵抗を図 4 に示す。明瞭な量子抵抗振動は見られないが、振動様の振りがみられている。低磁場ホール効果からキャリア濃度は $3.3 \times 10^{11} \text{ cm}^{-2}$ と算出された。いわゆる量子ホール効果は明確にみられないが、25k 付近に変曲点が見られ、磁気抵抗も下がっていることから、量子ホール効果の兆候ではないかと考えている。また算出された移動度は $1000 \text{ cm}^2/\text{Vs}$ と低い。つまり移動度が低い 2次元電子系が量子井戸中に形成されているものと考えられる。

図 5 に 1.7K で測定した試料 B の電気伝導の結果を示す。試料 A とは大きく異なり、磁気抵抗は、低磁場で正の磁気抵抗を示し、高磁場ではほとんど変化しない。一方、ホール抵抗は低磁場でピーク状の大きな変化を示したのち、直線的に変化した。高磁場の直線的

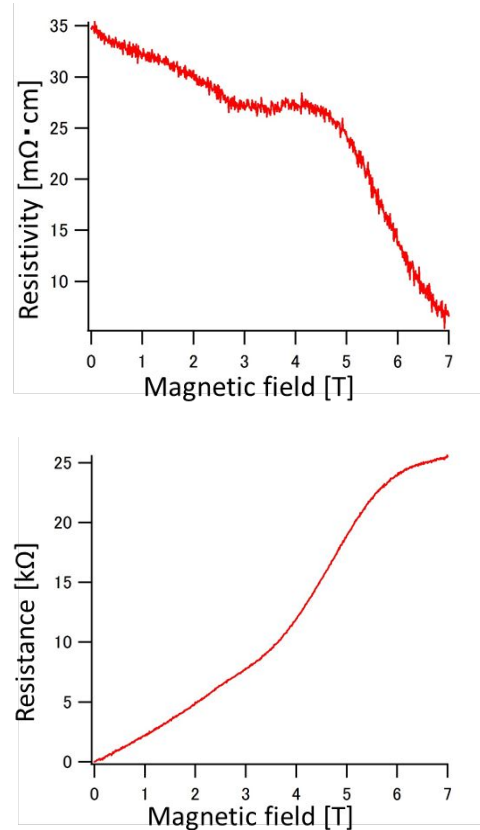


図 4 : GaAs 基板上の InSb 量子井戸 (試料 A) の電気伝導。(上)磁気抵抗、(下)ホール抵抗。

なホール抵抗の依存性からキャリア濃度を算出すると、 $2.7 \times 10^{15} \text{ cm}^{-2}$ となった。これは量子井戸中のキャリア濃度としては大きすぎる。また移動度は $10 \text{ cm}^2/\text{Vs}$ と極端に低い。低磁場の正の磁気抵抗は、強いスピン軌道相互作用による反弱局在を想起させる。実際に 4.2K で測定した磁気抵抗ではこの正の磁気抵抗の大きさは小さくなっており、干渉効果と矛盾はしていないが更なる解析が必要である。しかし InSb 基板上の試料 B は、低磁場のホール効果の振舞いや高いキャリア濃度など量子井戸中の 2次元電子系と解釈するのは難しい。格子不整合がほとんどなく、期待されたが、結果的には試料 A のように GaAs 基板上に厚いバッファ層を積層して貫通転移を抑制することが高品質 InSb 量子井戸を得る適切な方針であることが分かった。今後はこの方針で高移動度 InSb 量子井戸を実現し、本研究期間で達成した方法で再度ゲート型量子ポイントコンタクトを実現して、強いスピン軌道相互作用に起因する量子化伝導度の観測を目指す。このようにサブバンド数が制御された 1次元系が実現できれば、本研究で当初計画していた超伝導体との接合を作製し、ゼロバイアス伝導度ピークやジョセフソン接合におけるシャピロステップの観測などの実験へと展開する。また MBE で成長している利点を生かし、超高真空を保ったままエピタキシャルに超伝導体 (Al) を

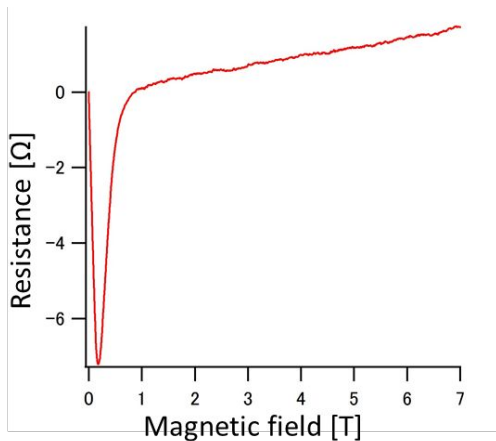
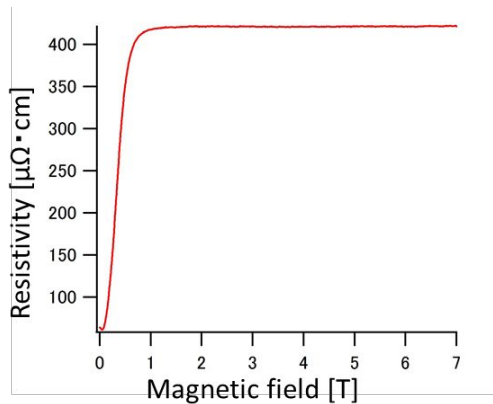


図 5 : InSb 基板上の InSb 量子井戸 (試料 B) の電気伝導。(上)磁気抵抗子、(下)ホール抵抗。

積層できる可能性がある。以上のように本研究の成果は、マヨラナ粒子探索において今後大きな進展をもたらすと期待する。

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 0 件)

[学会発表](計 4 件)

M. Tada, H. Kiyama, K. Akahane, and A. Oiwa, Magnetotransport in narrow gap semiconductor InSb Quantum Wells, 20th SANKEN International Symposium(国際学会)、2016 年 12 月 7 日 ~ 12 月 9 日、グランフロント大阪 (大阪府、大阪市)
 多田誠樹、大岩颯、木山治樹、赤羽浩一、InSb 低次元系における電気伝導、日本物理学会 2016 年秋季大会、2016 年 9 月 13 日 ~ 16 日、金沢大学角間キャンパス (石川県、金沢市)

M. Tada, H. Kiyama, K. Akahane, and A. Oiwa, One-Dimensional Quantum Wires with String Spin-Orbit Interaction Using InSb Quantum Wells, Nano Spin Conversion Science Workshop in Kansai for Young Researchers, 2016 年 4 月 15 日、大阪大学豊中キャンパス (大阪府、

豊中市)

M. Tada, H. Kiyama, K. Akahane, and A. Oiwa, One-Dimensional Quantum Wires with String Spin-Orbit Interaction Using InSb Quantum Wells, 19th SANKEN International Symposium(国際学会)、2015 年 12 月 7 日 ~ 12 月 9 日、大阪大学 (大阪府、吹田市)

[図書](計 0 件)

[産業財産権]

出願状況 (計 0 件)

名称 :
 発明者 :
 権利者 :
 種類 :
 番号 :
 出願年月日 :
 国内外の別 :

取得状況 (計 0 件)

名称 :
 発明者 :
 権利者 :
 種類 :
 番号 :
 取得年月日 :
 国内外の別 :

[その他]
 ホームページ等

www.sanken.osaka-u.ac.jp/labs/qse/

6 . 研究組織

(1)研究代表者

大岩 颯 (OWIA, Akria)
 大阪大学・産業科学研究所・教授
 研究者番号 : 1 0 3 2 1 9 0 2

(2)研究分担者

赤羽 浩一 (AKAHANE, Kouichi)
 情報通信研究機構・光ネットワーク研究所
 光通信基盤研究室・主任研究員
 研究者番号 : 5 0 3 5 9 0 7 1

(3)連携研究者

()

研究者番号 :

(4)研究協力者

()