

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 6 月 11 日現在

機関番号：12601

研究種目：研究活動スタート支援

研究期間：2012～2013

課題番号：24840014

研究課題名(和文)量子デバイスによる超伝導電流のスピン偏極の検出

研究課題名(英文)Detection of spin polarization in supercurrent using quantum devices

研究代表者

中村 壮智(Nakamura, Taketomo)

東京大学・物性研究所・助教

研究者番号：50636503

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,300,000円、(間接経費) 690,000円

研究成果の概要(和文)：狭ギャップ半導体であるインジウム砒素の二次元電子系に超伝導体ニオブを低抵抗に接合する方法を開発し、低温で生じるアンドレーエフ反射や超伝導電流を観測した。さらに超伝導接合特性を電流およびスピン流で制御すべくニオブを含む十字構造を形成し超伝導電流に直交するように電流やスピン流を流すことで、超伝導電流やアンドレーエフ束縛状態のコントロールに成功した。また、近接効果によって染み出す超伝導電子対の対称性を変えるため、量子ポイントコンタクトと超伝導接合のハイブリッド構造の作成や強磁性半導体インジウム鉄砒素の分子線エピタキシー成長も行った。

研究成果の概要(英文)：Superconducting junctions with InAs two-dimensional electron gas were fabricated using new techniques in order to obtain low barrier interface. We could observe Andreev reflection and supercurrent on several junctions at low temperature. In order to control the transport properties of the superconducting junctions, superconducting electrodes are attached to the InAs wire configuring cross structures. In such structures, we succeeded in controlling the Andreev reflection, Andreev bound states, and supercurrent by applying charge currents and spin currents to the intersection. Furthermore, we made a hybrid structure of superconducting junction and quantum point contact and grow dilute magnetic semiconductor InFeAs were grown up by molecular beam epitaxy, in order to change the pairing symmetry of the spins of proximity-induced Cooper pairs.

研究分野：数物系科学

科研費の分科・細目：物性

キーワード：超伝導接合 近接効果 アンドレーエフ反射 スピン軌道相互作用 スピンホール効果 スピン流 スピントロニクス 希薄磁性半導体

1. 研究開始当初の背景

2つの超伝導体を接合した系では量子干渉によって超伝導位相差をパラメータとする超伝導電流が流れるジョセフソン効果が表れる。特に超伝導体で常伝導体を挟んだ接合(SNS接合)では、準粒子に起因するもの(アンドレーエフ電流と呼ぶ)とクーパー対そのものが伝播することによるもの(クーパー電流と呼ぶ)が超伝導電流を担っている。アンドレーエフ電流とクーパー電流は伝導度の測定では完全に区別することは難しいが、それぞれに特徴的な性質を持っている。

アンドレーエフ電流は、超伝導/常伝導界(SN界面)において電子が超伝導体に侵入する時に生じるアンドレーエフ反射に起因するもので、SNS構造の両界面で生じたアンドレーエフ反射が常伝導体中に束縛状態(アンドレーエフ束縛状態)を形成することによって生じる。束縛状態1つあたりに運べる超伝導電流は決まっているため臨界電流は量子化しており、接合の幅を狭くしていくことでこれが観測される。

クーパー電流は超伝導を担うクーパー対自体が近接効果やトンネル効果によって反対側の超伝導体まで伝播することによるものである。特に近接効果ではクーパー対は常伝導体中に染み出すため、常伝導体中でも超伝導ギャップが観測されることがある。この染み出したクーパー対の対称性はSN界面の境界条件と常伝導体の性質で決まっており、元のクーパー対とは異なる対称性を持つ可能性がある。

2. 研究の目的

本研究の目的はSNS接合中のクーパー対の対称性を量子デバイスを用いてコントロールし解明することにある。そのためにインジウム砒素(InAs)を用いた量子ポイントコンタクトでスピンの向きをコントロールすることや、ハーフメタルであることが予想される希薄磁性半導体InFeAsによってスピンをフィルタリングすることによって、スピン三重項のクーパー対を創り出し、それを量子構造を用いて検出することを目的としている。一方でクーパー電流を得るには界面状態のコントロールが極めて重要であり、思うような結果が得られない場合も考えられる。このような場合にはクーパー電流ではなくアンドレーエフ電流に注目し、InAsのような強いスピン軌道相互作用を持つ系においてアンドレーエフ電流がどのような性質を持つかを調べることにする。

3. 研究の方法

第一段階として、清浄なInAs2次元電子系とNbの界面を得る方法を確立する。その方法としては蒸着チャンバー内でのドライエッチングとその場蒸着、窒素雰囲気中でのウェットエッチングから大気にさらさずに蒸着チャンバーへ移動しての蒸着といった、蒸

着前処理の工夫や、NbとInAsの間に適当なバリア層を挿入したり、蒸着後に熱やパルス電圧を加えるといった蒸着後処理などを行って界面バリアのコントロールを行った。

第二段階として、Nb/InAs/Nb接合の導電性を低温で評価し、外部磁場や電流による導電性の変化を調べた。

第三段階として、InAsに量子ポイントコンタクトを作成し、それでクーパー対のスピンの回転ができるかを調べた。

第四段階として、スピンフィルターとしての希薄磁性半導体InFeAsを成長し、その物性評価を行った。また、磁性体を用いてスピン注入することで、同様のことができないかについても調べた。

4. 研究成果

(1) 低抵抗試料の作成

従来の二次元電子系と超伝導の接合作成ではドライエッチングをした後その場蒸着を行うのが通例であった。しかしながらこの方法は歩留まりが極めて悪いことや、ドライエッチングは削りだした界面の原子の乱れが大きいことから、それに代わる方法としてウェットエッチングが良いと考えこれを用いた接合作成を行った。ウェットエッチングで表面を削った後、空気中に曝すと表面が酸化してしまうため、グローブボックスと専用の密閉治具を用意し、窒素雰囲気中でエッチングし真空保持可能な治具に収めて蒸着装置まで運ぶことで、ウェットエッチングから空気にさらすことなく蒸着までを行った。その結果、試料の抵抗は下がり、試料間のばらつきは減ったが、近接効果の見られるほど界面の低い試料は得られなかった。

そこで、NbとInAsの間にGeの薄層を導入し、熱処理することで界面の酸化膜等をドーブして金属に変えられるかを試みた。その結果、金属的な温度依存性を示す試料は得られたものの、全体の構造は複雑化してしまい、全体の抵抗も上昇してしまった。

そこで作成した試料に後からパルス電圧を加えることで絶縁破壊ができないかを試みた。その結果、試料によってはパルス電圧印加で数Ω~数十Ω程度まで抵抗を下げることに成功した(図2)。これは試料の抵抗が悪い場合に後処理で界面バリアを変化させることができることを示している。

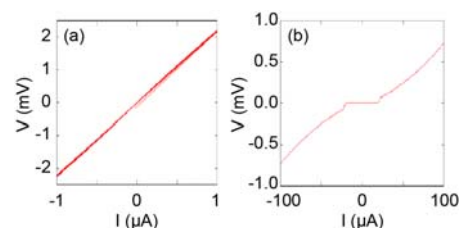


図1: Nb/InAs 二次元電子系/Nb 接合の伝導度。(a) パルス印加前。(b) パルス印加後。

(2) 作成した Nb/InAs 二次元電子系/Nb 試料の導電特性

十字構造を持つ Nb/InAs 二次元電子系/Nb 接合を作成しその導電特性を調べた。図 2 に接合伝導度の 2 端子測定及び 4 端子測定の結果を示す。超伝導電流に起因するとみられるゼロバイアス伝導度ピークや超伝導ギャップ以下の電圧での伝導度の上昇が観察された。さらにこれらの試料について磁場や接合垂直方向に電流を加えることで伝導度の変化を調べた。図 2 左に示すようにゼロバイアス伝導度およびその周辺の構造は磁場によって消失する。一方で、図 2 右に示すように電流注入によってはゼロバイアス伝導度のみが抑制され、他の構造は変化しない。

この結果は、外部磁場はアンドレーエフ反射を抑制するが、垂直電流はアンドレーエフ反射は抑制せず InAs 二次元電子系中のコヒーレンスだけを失わせてアンドレーエフ束縛状態を破壊したと考えると自然に理解できる。

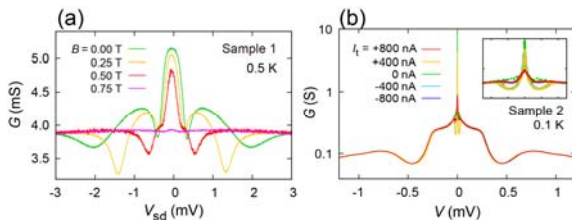


図 2 : Nb/InAs 二次元電子系/Nb 接合の伝導度のバイアス依存性。(a) 二端子構造の試料の磁場依存性。(b) 四端子構造の試料の磁場依存性。

(3) 臨界電流の横電流依存性

図 3 に超伝導臨界電流の注入電流依存性を示す。超伝導臨界電流の 1/7 程度の大きさの横方向電流によって超伝導電流が完全に消失している。これは電流注入によってコヒーレンスの乱れが生じていると考えれば理解できる。この乱れは、InAs の強いスピン軌道相互作用と注入電流によってスピンホール効果が生じ、これが Nb/InAs 界面にスピン定在波をたてたことによると考えられる。

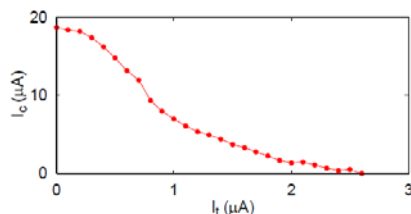


図 3 : Nb/InAs 二次元電子系/Nb 接合の臨界電流の注入電流依存性。

(4) 量子ポイントコンタクトと超伝導接合のハイブリッド構造

図 4 に Nb/InAs 二次元電子系/Nb 接合に量子ポイントコンタクトを組み合わせた試料の顕微鏡写真とその伝導度を示す。比較的低抵抗の試料は得られたものの、伝導度からゼロ抵抗は見られず、またその伝導度もゲート電

圧には全く依存しなかった。これはサイドゲートが量子ポイントコンタクトからかなり遠い場所にあったためゲートが効かなかったのだと考えられる。ゲートを効かせるためにはもっとゲートを近づける必要があり、細かいエッチング溝を掘らなければならないが、現在の構造は我々の技術で作れる最も微細なエッチング技術を用いているため現状ではこれ以上細く深い溝を作るのは難しい。そのため今後は溝を掘るサイドゲート方式ではなく、ALD 等で絶縁膜を試料表面に蒸着し、その上にゲートを載せるトップゲートの方式で量子ポイントコンタクトを形成することを試みる予定である。

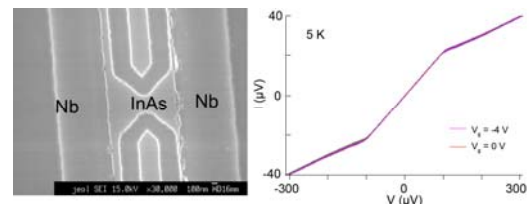


図 4 : Nb/InAs 二次元電子系/Nb 接合に量子ポイントコンタクトを組み合わせたサンプルの電子顕微鏡写真と伝導度。

(5) InFeAs の MBE 成長

n 型の強磁性半導体であることが報告された InFeAs は超伝導接合を作るのに非常に都合が良く本研究の目的には都合が良い。そこで InFeAs の MBE 成長を試みた。図 5 に Fe5% および 8% の試料で最も伝導度の良かった Be 組成の試料の磁化率を示す。これらからわかるように、本研究室で作成した試料では InFeAs に強磁性は確認できなかった。

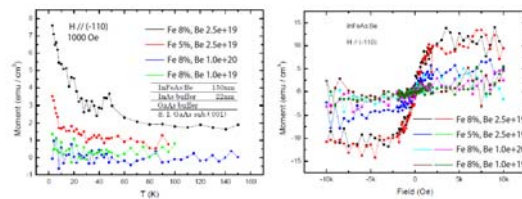


図 5 : さまざまな組成の InFeAs の磁化率の (左) 温度依存性と (右) 磁場依存性。

InFeAs は第一原理計算によれば絶縁体となると予測されており、我々の試料も比較的それに近いのではないかと考えられる。また Be のドーピングではほとんど抵抗率が変化しておらず、むしろ Fe の量を増大させることで抵抗が減少した。このことから我々の試料は論文に報告があった n ドープの強磁性半導体状態とは異なるサイトに Fe が入っている可能性が考えられる。今後 X 線解析によるサイトの同定や、別の基板や温度条件による成長も試みたい。

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 1 件) 査読あり

Taketomo Nakamura, Y. Takahashi, Y. Hashimoto, D. H. Yun, S. W. Kim, Y. Iye, and S. Katsumoto,

“Spin Hall reduction of Josephson effect in InAs two-dimensional electrons”

Phys. Status Solidi C 10 2013 1473-1476

DOI:10.1002/pssc.201300263

[学会発表] (計 8 件)

1. 中村壮智, 他

Nb/InAs/Nb 接合におけるスピン流注入の効果

日本物理学会第 69 回年次大会、27pAW-6、東海大学、2014 年 3 月 27 日

2. Taketomo Nakamura, et. al.

Spin injection into Nb/InAs/Nb Andreev junctions

Physics and Applications of Spin-related Phenomena in Semiconductors (PASPS-18), B-8, Osaka University, Osaka, Japan, December 9th-10th, 2013

3. 中村壮智, 他

Nb/InAs/Nb 接合におけるスピンホール効果と Andreev 束縛状態

日本物理学会 2013 年秋季次大会、26aDD-5、徳島大学、2013 年 9 月 26 日

4. Taketomo Nakamura, et. al.

Andreev Bound State Disturbance due to Spin Hall Effect in InAs Two Dimensional Electron Systems

The 18th International Conference on Electron Dynamics in Semiconductors, Optoelectronics and Nanostructures (EDISON18), Fr1-4, Kunibiki Messe, Matsue, Japan, July 22nd-26th 2013

5. Taketomo Nakamura, et. al.

Josephson current suppression due to the spin Hall effect in InAs two-dimensional electron systems

20th International Conference on Electronic Properties of Two-Dimensional Systems (EP2DS-20), ThP137, Wroclaw University of Technology, Wroclaw, Poland, July 1st-5th 2013

6. Taketomo Nakamura, et. al.

Spin Hall Reduction of Josephson Effect in InAs Two-Dimensional Electrons

International Symposium on Compound Semiconductors (ISCS2013), ThA2-3, Kobe Convention Center, Kobe, Japan, May 19th-23rd 2013

7. 中村壮智, 他

Nb/InAs 二次元電子系接合における Andreev 反射の磁場方向依存性

日本物理学会第 68 回年次大会、29aXL-9、広島大学、2013 年 3 月 29 日

8. 中村壮智, 他

スピンホール効果による Andreev 伝導の抑制
半導体スピン工学の基礎と応用 (PASPS-17)、E-2、九州大学、福岡 2012 年 12 月 19-20 日

[図書] (計 0 件)

[産業財産権]

○出願状況 (計 0 件)

○取得状況 (計 0 件)

[その他]

ホームページ等

6. 研究組織

(1) 研究代表者

中村 壮智 (Nakamura Taketomo)

東京大学・物性研究所・助教

研究者番号：50636503