

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 4 月 21 日現在

機関番号：17102

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2014～2015

課題番号：26790041

研究課題名(和文)高スピン偏極ナノピラーによる交差アンドレーエフ反射の観測と量子ビットへの応用

研究課題名(英文)Observation of crossed Andreev reflection by using high polarized nano-pillar and application for quantum bits

研究代表者

大西 紘平(OHNISHI, Kohei)

九州大学・理学(系)研究科(研究院)・助教

研究者番号：30722293

交付決定額(研究期間全体):(直接経費) 3,200,000円

研究成果の概要(和文):発熱を最小限として高効率なスピン偏極電流が生成可能な試料構造により、超伝導体/非磁性常伝導体二層膜中において、交差アンドレーエフ反射と呼ばれる現象を誘起・制御することを試みた。その結果、超伝導体/非磁性常伝導体界面(S/N界面)において、スピン偏極電流の偏極成分のみ透過できないことがわかった。また、非磁性常伝導体層中において、超伝導状態とスピン偏極状態が共存できることが示された。さらに、スピン偏極電流を用いることで、S/N界面で超伝導ギャップの形成過程の観測に成功した。これらは、交差アンドレーエフ反射測定に代表される超伝導体複合ナノ構造での測定において新しい検出方法を提案可能とするものである。

研究成果の概要(英文):The purpose of the project is the observation of the crossed Andreev reflection in the novel structure in which the spin polarized current is injected efficiently into the superconductor/normal metal (S/N) bilayer with the very low Joule heating. As a result, the spin polarized component in the charge current could not be injected through the S/N interface. And also, it was experimentally shown that spin polarized electrons and Cooper pairs can co-exist in the normal metal layer. Moreover, by using the spin polarized current, it was realized that forming the superconducting gap at the S/N interface is observed. These results indicates that the S/N bilayer system have some advantage in the measurement in the superconductor-based hybrid nano-structure such as that for the crossed Andreev reflection measurement.

研究分野：超伝導スピントロニクス

キーワード：スピントロニクス 超伝導体 ナノピラー構造 交差アンドレーエフ反射

1. 研究開始当初の背景

電流を担う電子は、電荷とスピンという2つの情報を有している。従来、エレクトロニクスにおいては電荷が専ら用いられてきたが、現在、スピンの情報も積極的に利用して省エネルギーなエレクトロニクスデバイスの実現を目指すスピントロニクスが、精力的に研究されている。そのような中、超伝導中でのスピン依存伝導現象の重要性が理論的に指摘され、超伝導スピントロニクスという名のもとに、注目を集めつつある。

そのような超伝導状態特有のスピン依存伝導現象の1つに、交差アンドレーエフ反射 (crossed Andreev reflection: CAR)がある。図1はCARを模式的に示したものである。CARでは、2つの常伝導体に挟まれた超伝導体において常伝導体が十分近いとき、一方の常伝導体から超伝導体に注入された電子が、もう一方の常伝導体から逆向きのスピンの電子を得ることでクーパー対をなす。また逆に、クーパー対は2つの常伝導体に分かれて注入される。

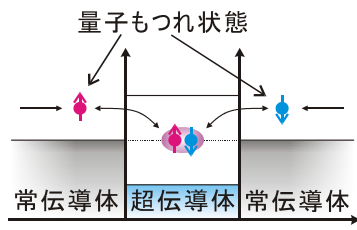


図1: 交差アンドレーエフ反射。

以上のプロセスは、スピン重項状態にある電子が2つの物質中に分かれることを示しており、量子情報処理分野における量子ビットに必須となる量子もつれ状態を、固体素子で実現できることから、応用面でも期待が高まっている。しかしながら、CARに関する研究では、先行の理論研究と比較し得る実験的報告は少なかった。これはおもに、電気的にCARを測定する際に発生する熱による信号が、本来のCARの信号に比べ圧倒的に大きいうえに、複数の物理現象を併せて解析する必要があったためであった。

2. 研究の目的

上述の問題点を踏まえ本研究では、発熱を最小限に抑えたうえで効率的にスピン偏極電流が生成可能とすることで、CARの明瞭な信号を測定することを目的とする。さらにスピン偏極電流によるCAR誘起を可能とすることによる初期量子もつれ状態を制御した量子ビットの実現(図2)を目指した。

3. 研究の方法

試料は図3のような構造が考えられる。本構造において、2つのナノピラー型強磁性体の磁化が平行状態であった場合、強磁性体から流れ込むスピン偏極電流はCARを起こしにくく、超伝導状態中をおもに準粒子として

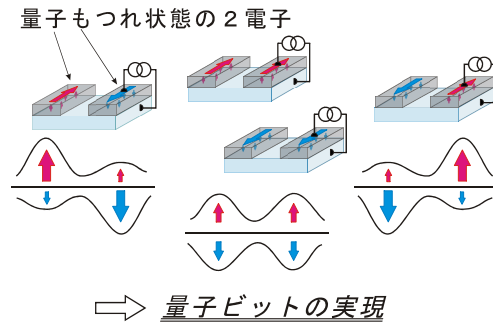


図2: 非局所電流による量子もつれ状態の生成と量子ビットの実現

流れる。一方、反平行状態であった場合、CARによるクーパー対生成の確率は高く、おもに超伝導電流として流れる。したがって、2つのナノピラーの磁化状態に応じた超伝導体の抵抗の差を測定することにより、交差アンドレーエフ反射率の差を測定可能である。

ここで、超伝導状態に関する外部パラメータ(電流、温度、磁場)の相互依存性を測定するためには、発生する熱を極力抑え、かつ、広い温度領域で測定できることが求められる。おもな発熱は抵抗の大きい強磁性体に流れる電流によるものであるため、本研究では励起電流を大きな非磁性体からナノピラー面直方向に流すことで、電流が強磁性体内を流れる距離を短くするとともに、熱の溜まらない構造とした。さらに、広い温度領域で測定を可能とするために、単一金属としては最も超伝導転移温度の高いニオブを超伝導体として用いた。

図3に示す試料においてCARの測定は、上述したように、一方の強磁性体端子からもう一方の強磁性体端子に超伝導体を介して励起電流を流し、2つの強磁性体の磁化の平行状態と反平行状態における超伝導体の抵抗差から求められる。

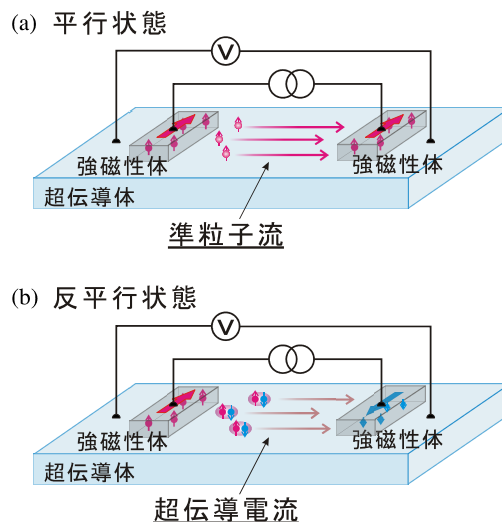


図3: 試料構造と交差アンドレーエフ反射測定のための端子配置。2つの強磁性体の磁化が(a)平行の場合と(b)反平行の場合。

4. 研究成果

(1) まず最初に、CAR 信号の測定に必要な試料構造の作製プロセスを確立した。具体的には、研究代表者が有する超伝導スピンドバイスの作製および測定に関するノウハウと、所属する研究グループが有するナノピラー型非局所スピナルブ素子の作製技術を融合し、高品質超伝導ニオブ薄膜とスピン注入源としてニッケル-鉄合金のナノピラーを用いたデバイスの素子構造作製技術と測定技術を確立した。

CAR 観測には、散乱の少ない強磁性体 / 超伝導体界面を介して高いスピン偏極率の電流を注入する必要がある。そこで、大気曝露することなく超伝導体と強磁性体を連続堆積させることで、清浄界面を有する超伝導体 / 強磁性体二層膜を作製した。それを微細加工することでナノピラー構造とした。

さらに実際の試料では上述の構造に加え、強磁性体 / 超伝導体接合における逆近接効果によって超伝導状態が抑制される可能性を排除するため、強磁性体と超伝導体の間に非磁性常伝導体の薄い層を挿入した。この際、超伝導体に流れ込むスピン偏極電流の偏極率は減少することが予想されるが、スピン偏極状態が数マイクロメートルにわたって維持される銅を用いることにより、CAR 観測は十分可能と考えた。

以上より、極清浄界面によるニッケル-鉄 / 銅 / ニオブの三層膜からなるナノピラー型スピン注入源を有する試料の作製を可能とした。図 4 に実際に作製した試料の走査電子顕微鏡像と模式図を示す。

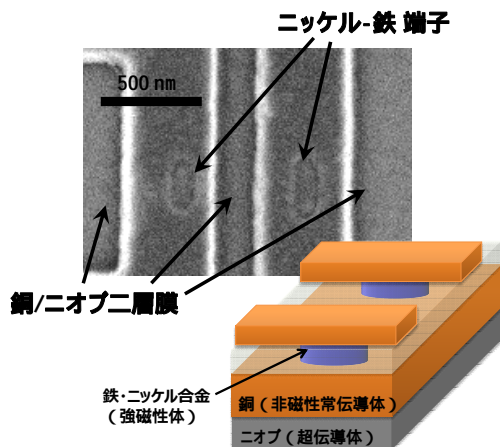


図 4: 作製した試料の走査電子顕微鏡像。

(2) 次に、図 4 に示す試料において、発熱を抑制しながら高効率にスピン偏極電流を注入可能であることを示すため、スピン信号の測定を行った。

本構造において、一方の強磁性体端子から電流を流すことにより、銅のなかにスピン偏極状態を蓄積することが可能である。蓄積したスピン偏極状態はもう一方の強磁性体端子によって、スピン信号として検出される。

図 5 に示す測定結果における抵抗変化がスピン信号であり、抵抗変化が少ないとき、ニオブ / 銅界面においてスピン偏極状態が緩和されていることを示している。測定された抵抗変化はニオブが常伝導状態と超伝導状態に大きく依存し、超伝導状態ではスピン偏極状態はほぼ緩和されなかった。

この結果は、図 6 に示すように、超伝導状態においてニオブ中に形成される超伝導ギャップによるスピン偏極状態の緩和抑制により説明される。そのため本構造では、銅のなかにスピン偏極状態を高効率に生成すると同時に、超伝導状態の抑制を誘引する発熱が最小限に抑えられていることが明らかとなった。さらに、非磁性常伝導体層の電気抵抗測定と組み合わせることにより、常伝導体層において、スピン偏極成分とともに超伝導体の近接効果によるスピン-重項状態が共存していることを示唆する結果が得られ、スピン-重項が分かれることによって実現する CAR の測定に有効であることがわかった。

とくに本結果は、CAR 測定における有効性を示すのみではなく、電流を伴わないスピン偏極のみの流れに対して超伝導状態が絶縁体として振る舞うことを世界に先駆けて示すものである。さらに、常伝導体層におけるスピン偏極状態とスピン-重項状態の共存は、スピン偏極とクーパ対の競合による新奇物性現象の常伝導体層中での観測可能性を示すものであり、近年の超伝導スピントロニクス研究の進展に大きく貢献すると考えられる。

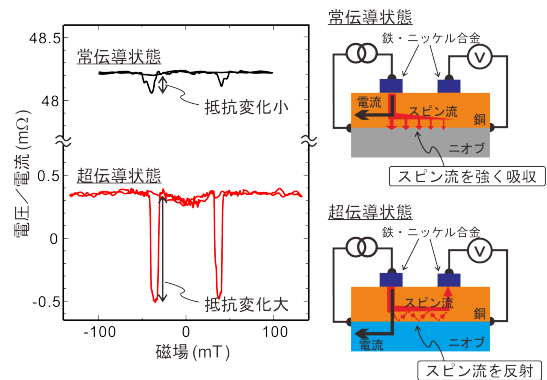


図 5: 測定された非局所抵抗の磁場依存性とそれぞれの電子の流れを模式的に示した図。

(3) CAR 信号の解析のためには、温度や磁場

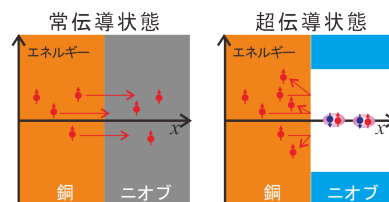


図 6: ニオブが常伝導状態と超伝導状態にあるときの界面におけるスピン偏極状態の様子。

などの外部パラメータによる超伝導状態の変化を実験的に調べ、解析する必要がある。

そこで常伝導体層中のスピン偏極状態から温度および磁場に対する応答を調べるため、上記(2)で述べたスピン信号の温度依存性を測定した(図7)。その結果、銅/ニオブ二層膜の抵抗がゼロとなる温度からスピン信号が増加し始める様子が明確に観測され、ニオブ薄膜が完全に超伝導性を示した直後から銅/ニオブ界面には超伝導ギャップが形成されていることが明らかとなった。さらに、銅の磁場に対する抵抗変化を超伝導転移温度近傍で測定し、上記結果と併せることにより、非磁性常伝導体中に生じる疑似的な超伝導状態、銅/ニオブ界面における超伝導状態、超伝導体中の界面近傍における超伝導状態が、すべて異なる臨界磁場および温度を有し、順に超伝導状態が抑制されることが明らかとなった。

これらの結果は、通常の電流による測定では観測不可能であり、スピン偏極電流を用いた本研究による独自の成果であるといえる。とくに、磁場中であっても十分に低温においては非磁性常伝導体中にスピン偏極電子とスピン-重項のクーパ対が存在できることも示され、CAR測定に対して本構造における非磁性常伝導体層の有用性が示された。

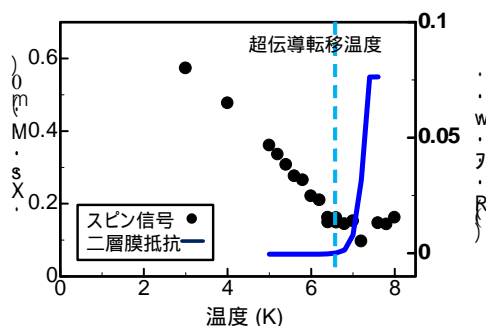


図7: スピン信号と二層膜の抵抗の温度依存性。

5. 主な発表論文等

[雑誌論文](計1件)

K. Ohnishi, Y. Ono, T. Nomura, and T. Kimura, "Significant change of spin transport property in Cu/Nb bilayer due to superconducting transition", 査読有, Sci. Rep. 4, 6260-1~4 (2014).
DOI: 10.1038/srep06260

[学会発表](計12件)

K. Ohnishi, Y. Ono, M. Sakamoto, and T. Kimura, "Spin current transport in a Nb/Cu/NiFe tri-layer structure", 20th International Conference on Magnetism (ICM2015), 2015.7.9, Barcelona (SPAIN).

K. Ohnishi, Y. Ono, M. Sakamoto, and T. Kimura, "Spin current insulation at a superconducting/normal metal interface", International Workshop Nano-Spin Sciences II, 2015.7.14, Fukuoka (JAPAN).

K. Ohnishi, Y. Ono, M. Sakamoto, and T. Kimura, "Spin current transport in a Nb/Cu/NiFe tri-layer structure", New Perspectives in Spintronic and Mesoscopic Physics (NPSMP) 2015, 2015.6.11, Kashiwa (JAPAN).

K. Ohnishi, Y. Ono, M. Sakamoto, and T. Kimura, "Spin Current Manipulation Using Superconductor", BIT's 4th Annual World Congress of Advanced Materials-2015, 2015.5.29, (WCAM-2015), Chongqing (CHINA).

K. Ohnishi, Y. Ono, T. Nomura, and T. Kimura, "Spin current reflection due to a superconducting gap in a Nb/Cu/NiFe tri-layered structure", International Union of Materials Research Society International Conference in Asia (IUMRS-ICA) 2014, 2014.8.26, Fukuoka (JAPAN).

6. 研究組織

(1)研究代表者

大西 紘平 (OHNISHI, Kohei)
九州大学・大学院理学研究院・助教
研究者番号: 30722293