

究極のナノスクイッドの開発とデバイス展開

Development of an ultimate SQUID and
its device application

高柳 英明 (TAKAYANAGI HIDEAKI)

東京理科大学・総合研究機構・教授



研究の概要

磁場に対して超高感度な検出器であるスクイッド(SQUID)の特性を極限まで高めて、1ないし少数スピンの検出を試みる。またスピン系と超伝導系との間の量子的結合の基礎を解明する。さらに、SQUID技術を駆使して、超伝導材料などの新しい物性探索をおこなう。

研究分野：複合新領域

科研費の分科・細目：ナノ・マイクロ科学・マイクロ・ナノデバイス

キーワード：単量子デバイス、SQUID、量子ビット

1. 研究開始当初の背景

超伝導磁束量子干渉計(SQUID)は、医学応用から帯磁率測定まで、多くの分野で活躍する最も高感度の磁場検出器であり、定常的な1スピンの検出や、少数スピン系の時間変化計測という潜在能力も持っている。だが、まだその性能は極限まで開発されているとは言えず、この観点からの研究・開発が必須であった。

一方、将来の量子情報ネットワークでは、光と固体量子ビット間の、さらには異なる量子ビット間の量子インターフェースが必要になるが、超伝導やスピン量子ビットを用いたこの種の研究はまだほとんど行われていなかった。従って、この二つの量子ビット間の、(光子を介した)量子力学的結合状態を実現し、その特性を解明することは、今後の極めて重要な課題である。

2. 研究の目的

スクイッド(超伝導磁束量子干渉計:SQUID)は、現存する最も高感度の磁場検出器である。このスクイッドを究極まで追及し、古典デバイス展開と量子デバイス展開の3点を目標とする。即ち、

- ① μm 以下のサイズのナノスクイッドを開発し、単一の電子スピンの検出と少数スピン系の時間緩和過程の解明を行う。
- ② スクイッドとスピン系がそれぞれ量子ビットとして振舞う系を開発し、両量子ビット間の量子力学的結合を解

明する。

- ③ スクイッドの特性を利用した、新しい物性測定への展開。

3. 研究の方法

- ① ナノスクイッドの作製プロセス確立
- ② 単一スピンの検出技術と少数スピンの時間緩和測定技術の確立
- ③ 量子ドットで結合したスクイッドを作製し、スクイッド量子ビットとスピン量子ビット間の量子力学的結合技術の確立
- ④ スクイッド特性を利用したp波超伝導の探索

4. これまでの成果

- (1) InAs量子ドットで結合したSQUID

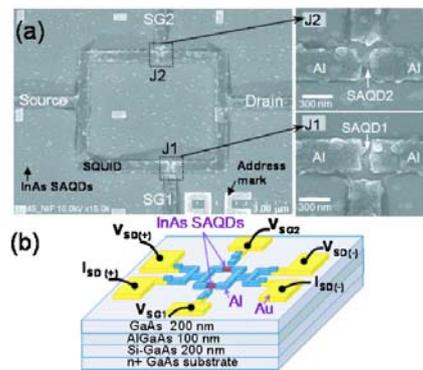


図. SQUIDの電顕写真と模式図

スピン量子系と超伝導量子系の結合には、スピンを誘起する量子ドットと SQUID の結合が必要である。我々は 10nm 以下の位置合わせ技術を開発し、InAs 量子ドット 2 個に結合した SQUID を作製することに成功した。図は、その電子顕微鏡写真で、2 つの InAs 量子ドットを介した超伝導ループのできていることがわかる。

このスクイッドで明瞭な超伝導電流 I_c を観測した。 I_c の磁場依存性は、きれいな振動現象を示し、しかも、その周期も計算ときちんとした一致を示した。接合 1 に近接したゲート 1 に加えるゲート電圧を負に増加させて超伝導電極とドットとの結合度を弱くし、その状態で、バックゲート電圧を変化させたときの I_c の磁場依存性は、 I_c と外部磁場との関係が π だけずれていることを示した。こうして、この SQUID できちんと π 接合転移のおこることが実証された。

2 つの接合に流れる超伝導電流を解析することによって、接合 1 が π 転移を起こした時、負の超伝導電流の流れることの確認にも成功した。

(2) 量子ホール端状態

強磁場下の二次元電子系の試料端に圧縮性と非圧縮性液体の縞状構造からなる量子ホール端状態が現れるとされている。量子ホール端状態は、電気伝導測定ではその存在が間接的に確かめられてきたが、実空間で縞状構造を観測した報告例はなかった。希釈冷凍機強磁場中走査近接場顕微鏡 (SNOM) を用いた光子照射手法の確立のために、極低温での量子ホール端状態の観測を試みた。開口径約 100nm の光ファイバプローブを AIST グループと共同で開発した。この光プローブを用いて、量子ホール端状態に光共鳴したレーザ光を二次元電子系試料端に局所光照射を行い、その結果生じる

光起電圧の空間像を得た。B=1.64 Tにおいて縞状の構造が確認された。この構造の磁場依存性、温度依存性等の詳細な検討から、これは量子ホール端状態の縞状構造を初めて観測したものであることを示した。本研究成果は、極低温強磁場中で 100 nm 域への光照射が可能であり、100 nV 代の微小光起電圧を測可能であることを示したもので、光とスピン、超伝導量子ビットとの量子力学的結合の実現へ向けてのマイルストーンとなるものである。

(3) Ru-Nb-Sr₂RuO₄ スクイッド

「非 S 波超伝導体と考えられている Ru-Sr₂RuO₄ 共晶における Sr₂RuO₄」 と 「S 波超伝導体である Nb」 を Nb/Ru/Sr₂RuO₄ 接合によって結び、Ru-Sr₂RuO₄ 共晶基板上に立体的に配置されたハイブリッド SQUID の作成プロセスを完成させた。作製された SQUID においては SQUID ループと接合自身の 2 種類の

磁場変調特性が観測された。これは Ru-Sr₂RuO₄ 共晶を用いた SQUID が環境に強いと考えられる π -SQUID 量子ビットへ発展の可能性を示したことになる。現在は Ru-Sr₂RuO₄ 共晶系の超伝導状態の SQUID による特性評価を現在進めている。

5. 今後の計画

今後、この π 接合転移を含めた SQUID 特性をより詳細に調べると共に、この InAs 量子ドットに円偏光した光を照射して、ドット中にスピンを励起し、 π 接合との関連を追及する。また、Ru-Nb-Sr₂RuO₄ スクイッド特性の解明より、p 波超伝導の足がかりをつかむ。

6. これまでの発表論文等 (受賞等も含む)

S. Kim, R. Ishiguro, M. Kamio, Y. Doda, E. Watanabe, D. Tsuya, K. Shibata, K. Hirakawa, and H. Takayanagi : π junction transition in InAs self-assembled quantum dot coupled with SQUID : Appl. Phys. Lett. **98** 63106-63109 (2011) : [selected Virtual Journal of Applications of Superconductivity **20** (2011)] .

S. Kim, R. Ishiguro, M. Kamio, Y. Doda, E. Watanabe, D. Tsuya, K. Shibata, K. Hirakawa, and H. Takayanagi : Side-gate controlled electrical properties of superconducting quantum interference device coupled with self-assembled InAs quantum dot : AIP Conference Proceedings (ICPS 2010) (accepted to publication).

T. Matsumoto, H. Kashiwaya, H. Shibata, H. Takayanagi, S. Nomura, S. Kashiwaya : Fabrication of Weak-link Nb-based nanoSQUIDs by FIB process : Physica C, accepted for publication.

K. Tsumura, S. Nomura, T. Akazaki, and H. Takayanagi : Position dependent optical effect on the transport properties of S-Sm-S junctions : Physics Procedia **3**, 1177-1181 (2010).

S. Nomura, T. Akazaki and H. Takayanagi : Optical imaging of the transport properties of S-Sm-S junctions : K. Tsumura, J. Phys. Conf. Series. **150**, 052273/1-052273/4 (2009)

ホームページ等

<http://www.rs.kagu.tus.ac.jp/~takalab/S.html>