

【助成 40-20】

鋭利なガラス管先端を利用した超電導ナノセンシング技術の開発

電気通信大学情報理工学研究科 准教授 小久保伸人

〔研究の概要〕

針状の石英ガラス細管の先端を利用した超伝導量子干渉計(SQUID)は、ナノスケールの空間分解能と高い磁気分解能とを両立した磁気探針として注目を集めている。これまで探針はガラス管の両側面と先端に超伝導膜を真空蒸着することで作製されてきたが、扱える材料に起因した劣化が課題となっていた。本研究は、化学的に安定な窒化膜を成膜できる反応性スパッタに着目し、これを用いた成膜装置の開発を行った。有効径～56 nmをもつ窒化ニオブチタン薄膜の先端型ナノSQUIDを作製することに成功し、報告例がない高い温度域まで動作することが分かった。この探針の磁束感度は単位帯域幅あたり磁束量子の100万分の1程度に達し、スピン感度は単位帯域幅あたりボーア磁子の10倍程度となった。

〔研究経過および成果〕

先端型ナノSQUIDは針状のガラス管先端の超伝導ナノループとガラス管側面の電極で構成される(図a)。蒸着源の真上に針状ガラス管を配置し、これを回転させることで、両側面と先端への3方向に超伝導膜を成膜する。点状の蒸着源とみなせるボートやバスケットからの真空蒸着法が用いられてきたが、扱える材料が大気中で劣化しやすい鉛やインジウム、スズなどの単元素超伝導体に限られ、探針の寿命が課題となっていた。

スパッタリングはイオン化した不活性ガスをターゲット表面に衝突させることで、ターゲットを構成する原子を弾き出し、基板表面に成膜材料を堆積させる手法である。合金や化学的に安定な窒化物など真空蒸着では扱えなかった幅広い材料の成膜が可能となる一方、様々な角度から成膜材料が堆積されるため、蒸着フラックスの指向性が求められる成膜には不向きとされてきた。本研究では、蒸着フラックスの方向を絞るコリメータを導入し、これまで例がない反応性スパッタ

による3方向成膜装置の開発を進めた。

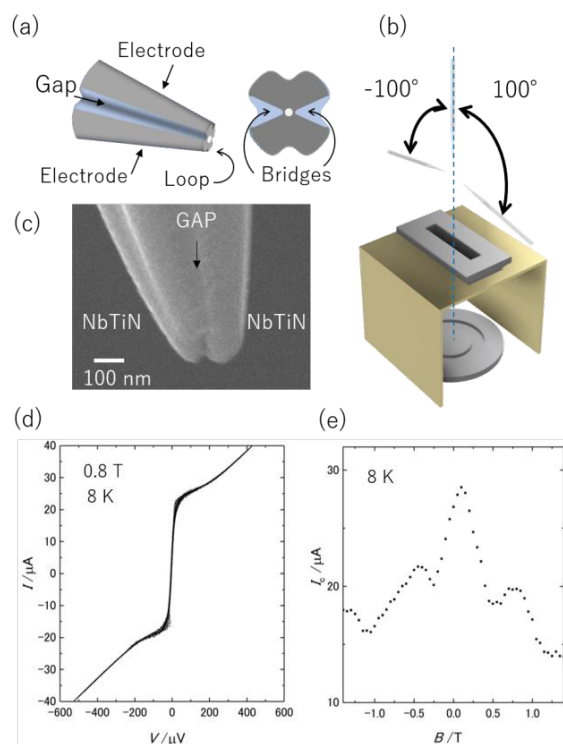


図 先端型ナノSQUIDの模式図(a)、成膜方法の概略図(b)、電子顕微鏡像(c)、輸送特性(8 Kにおける電流電圧特性(d)と臨界電流の量子干渉パターン(e))

成膜装置の概略を図 b に示す。溝付の石英ガラス管から引張加工で作製した針状ガラス管をチャンバー内の回転可能なホルダーにセットし、ターゲットからの蒸着フラックスを絞る貫通穴の真上に配置した。ターゲットからの軸に対して $\pm 100^\circ$ に倒したガラス管の両側面を成膜し、その後、正面から成膜した。今回 NbTi の合金をターゲットとし、グロー放電を持続させる不活性 Ar ガスと堆積膜を窒化させる N_2 ガスをチャンバー内に導入した。得られた窒化ニオブチタン (NbTiN) の先端型ナノ SQUID の電子顕微鏡像を図 c に示す。両側面の電極膜が溝によって作られたギャップによって隔たれている。先端部の凹凸は引っ張り加工した溝つき石英管の肉厚の差に起因し、その谷の部分に堆積した 2 本の細線 (ブリッジ) と超伝導電極で先端にナノループが形成させている。

先端径が最も細い針状ガラス管で得られた探針の輸送特性を図 d と図 e にまとめた。可逆で非線形な電流電圧特性が 8 K から超伝導転移温度の 13 K 近くまで得られた。臨界電流の量子干渉パターンは包絡線の影響を大きく受けたが、フーリエ解析から振動の磁場周期は 0.81 T となった。この磁場周期と先端の超伝導ナノループの面積との積が磁束量子に相当することを利用して、先端の超伝導ループの有効直径を 56 nm と見積もった。

探針の磁束感度を調べるため、臨界電流をわずかに超える直流電流をバイアスし、探針に流れる電流ノイズを測定した。白色ノイズスペクトル密度から探針の磁気感度を評価したところ、磁束感度は単位帯域幅あたり磁束量子 Φ_0 の百万分の 1 ($\sim 1 \mu\Phi_0/\sqrt{\text{Hz}}$) に達し、スピン感度はボーア磁子 μ_B の 10 倍程度 ($\sim 10 \mu_B/\sqrt{\text{Hz}}$) となった。単一スピン感度を達成した鉛の先端型ナノ SQUID には及ばないが Nb を用いた

探針の報告例と同程度であった。

以上、絞りを付けた反応性スパッタによる 3 方向成膜装置を開発し、NbTiN 膜の先端型ナノ SQUID の作製に成功した。図 e で示した臨界電流の量子干渉パターンを 2 K から過去最高 10 K まで観測し、これまで報告されてきた単元素超伝導体の先端型ナノ SQUID の動作温度を大きく超えた。一方、磁場範囲については、 ± 1 T 程度までが限界であった。高磁場では量子干渉パターンに重畳する非単調な包絡線状の寄与だけでなく、振動振幅の減少が顕著であった。バイアスの極性によって干渉パターンの最大値と最小値が現れる磁場の値が異なることから、ナノループを構成する 2 つの弱接合 (ブリッジ) の特性が等価ではない可能性が高い。このような非対称を含めて、高磁場での量子干渉パターンを歪ませる要因を除くことが今後の開発のポイントとなっていくであろう。

[発表論文]

1. 小久保伸人、針状ガラス管先端を利用した超伝導センサの開発：超伝導熱・磁気顕微鏡を目指して、電気通信大学ナノトライボロジー研究センター第 4 回 シンポジウム (2023 年 3 月 8 日)
2. 小久保伸人、窒化ニオブチタン膜を用いた先端型ナノ SQUID の輸送特性、日本物理学会第 78 回年次大会、18a-PS23
3. 磯部陽州、上原諒、小久保伸人、島田宏、ガラス針先端のナノ SQUID を探針とした走査型熱・磁気顕微鏡の開発、第 70 回応用物理学会春季学術講演会、16p-PA10-5