

Ga-FIB照射による高温超伝導SQUIDの 低ノイズ化に関する研究



プロジェクトメンバー：林 幹二、鳥取 優樹、三山 慧樹、有吉 誠一郎、田中 三郎
(次世代半導体・センサ科学研究所 IRES²)



緒言

高温超伝導薄膜で作製した磁束量子干渉計 (HTS-SQUID) は、最も高感度な磁気センサの一種で、取り扱いが容易な液体窒素冷却で使用できる利点を持つ。しかし、現在一般的に用いられているバイクリスタル型 HTS-SQUID は、ジョセフソン接合として HTS 薄膜の人工結晶粒界を使用することから、設計自由度や拡張性が低く、磁束運動によるノイズ増加などの課題がある。そこで、バイクリスタル基板を使用しないナブリッジ型 SQUID の作製、バイクリスタル型 SQUID と同程度の特性が得られた。また、薄膜 SQUID 中の磁束運動を抑制するアンチドット (非超伝導の穴) の導入や薄膜 SQUID への磁束侵入を抑制する HTS 薄膜シールドを従来型の SQUID へ適用することで、磁場中におけるノイズ増加を抑制できることが確認された。現在は、これらの結果を統合し、実用に応用可能な磁場感度・ノイズ特性を有する SQUID 磁気センサの検討を行っている。

1. 背景と目的

現在一般的に用いられている**バイクリスタル型 HTS-SQUID**は、ジョセフソン接合として HTS 薄膜の人工結晶粒界を使用することから、以下のような課題がある。

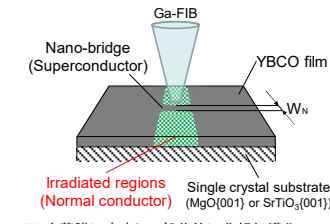
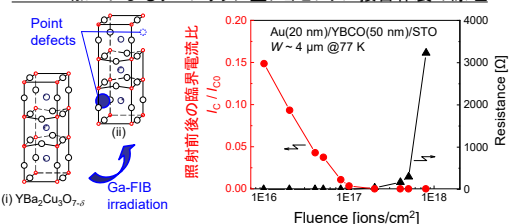
- ✗ 人工結晶粒界の位置によって**SQUIDの設計自由度や拡張性が低下**
- ✗ 粒界周辺の HTS 薄膜を貫通した**磁束の運動によって SQUID のノイズが増加**
- ✗ **高価なバイクリスタル基板が必要**

そこで、これらの課題解決を目的として、以下の検討を行った。

- ✓ バイクリスタル基板を使用しない**ナブリッジ型 SQUID**の作製・評価
- ✓ **アンチドット**による磁束運動の抑制
- ✓ **HTS 薄膜シールド**による薄膜 SQUID への磁束の侵入の抑制

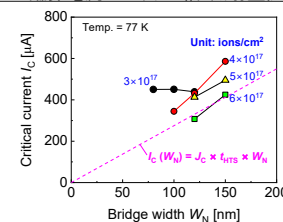
2. Ga-FIBによるナブリッジ型ジョセフソン接合の作製

2.1 FIB加工によるナブリッジ型ジョセフソン接合作製の原理



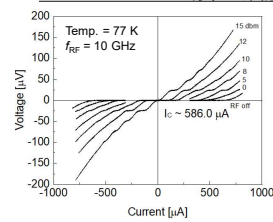
- FIBを薄膜に走査して部分的に非超伝導化
- ナノメートル精度で、高温超伝導ナブリッジを作製

2.2 臨界電流のブリッジ幅・照射量依存性



- FIB照射量とブリッジ幅によって臨界電流を制御
- 臨界電流はブリッジ幅に比例、制御性良好

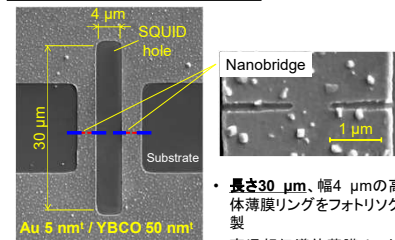
2.3 ACジョセフソン効果の確認



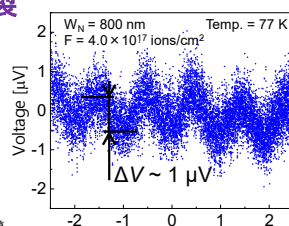
- マイクロ波照射により、液体窒素温度 (77 K) で AC ジョセフソン効果を確認 (ジョセフソン接合の動作確認)

3. ナブリッジ型 HTS-SQUID の作製

3.1 ナブリッジ型 SQUID の作製

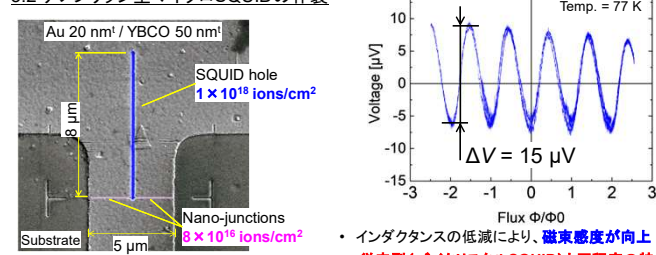


- 長さ 30 μm、幅 4 μm の高温超伝導体薄膜リングをフォトリソグラフィで作製
- 高温超伝導体薄膜リングに、2つのナブリッジを形成



- 液体窒素冷却下で、量子干渉による周期的な磁場電圧特性を確認 (DC-SQUID の動作確認)

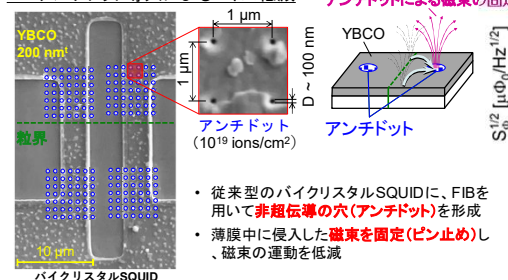
3.2 ナブリッジ型マイクロ SQUID の作製



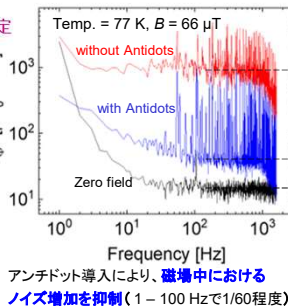
- FIB照射によって、長さ 8 μm のスリット (SQUID リングの穴) とナブリッジを形成
- インダクタンスの低減により、磁束感度が向上
- 従来型 (バイクリスタル型) と同程度の特性

4. HTS-SQUID のノイズ低減

4.1 アンチドット導入によるノイズ低減

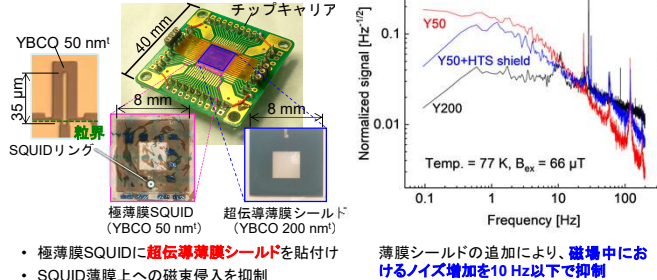


- 従来型のバイクリスタル SQUID に、FIB を用いて非超伝導の穴 (アンチドット) を形成
- 薄膜中に侵入した磁束を固定 (ピン止め) し、磁束の運動を低減



- アンチドット導入により、磁場中におけるノイズ増加を抑制 (1 - 100 Hz で 1/60 程度)

4.2 超伝導薄膜シールドによるノイズ低減



- 極薄膜 SQUID に超伝導薄膜シールドを貼付け
- SQUID 薄膜上への磁束侵入を抑制
- 薄膜シールドの追加により、磁場中におけるノイズ増加を 10 Hz 以下で抑制

5. まとめ

バイクリスタル型 HTS-SQUID の課題解決を目的に、ナブリッジ型 SQUID の作製と、アンチドットと HTS シールド追加による磁束ノイズ低減を検討し、以下の結果を得た。

1. HTS 薄膜を FIB で加工することでナブリッジを作製し、ブリッジ幅と照射量で臨界電流を制御できることを確認した。また、ナブリッジは AC ジョセフソン効果を示し、ジョセフソン接合として動作していることを確認した。
2. フォトリソグラフィで作製した長さ 30 μm の HTS リングに FIB 加工によるナブリッジを形成し、ナブリッジ型 SQUID を作製した。ナブリッジ型 SQUID は、液体窒素冷却下で DC-SQUID として動作することを確認した。また、FIB 加工によって、HTS 薄膜に長さ 8 μm のスリット (SQUID リングの穴) とナブリッジを形成し、ナブリッジ型マイクロ SQUID を作製した。SQUID のインダクタンス低減によって特性が向上し、バイクリスタル型 SQUID と遜色がない特性を示した。
3. バイクリスタル型 SQUID に FIB で非超伝導の穴 (アンチドット) を導入することで、磁場中における SQUID のノイズ増加が 1-100 Hz で 1/60 程度に抑制されることを確認した。また、SQUID 上に HTS 薄膜シールドを貼り付けることで、磁場中でのノイズ増加が 10 Hz 以下で抑制されることを確認した。

現在は、これらの結果を統合した実用的な磁場感度を有する低ノイズ SQUID の作製に向けて、磁束捕獲能力の大きいダイレクトカップルナブリッジ型 SQUID の試作を検討中である。

研究業績

1. K. Hayashi, R. Ohtani, Y. Tottori, S. Ariyoshi, and S. Tanaka, "Study of HTS Nanobridge Josephson Junctions made by FIB", *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, vol. 32, Issue 9 (2022).
2. Kanji Hayashi, Teppei Ueda, Ryo Ohtani, Seichiro Ariyoshi, and Saburo Tanaka, "Fabrication of HTS Low-noise Nanobridge Josephson Junction by Gallium FIB", *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, (2021) 1101604_1-4.
3. Kanji Hayashi, Teppei Ueda, Ryo Ohtani, Seichiro Ariyoshi and Saburo Tanaka, "A Study of the HTS Josephson Junction Formed by a Ga Focused Ion Beam", *J. Phys.: Conf. Ser.* vol. 1590 no.012044 (2020).
4. Kanji Hayashi, Teppei Ueda and Saburo Tanaka, "Study on Change of properties of HTS Josephson Junction by Ion beam Irradiation", *Extended Abstracts of 14th International Symposium on High Temperature Superconductors in High Frequency Fields (HTSHF2018)*, pp. 56-57 (2018).

