

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

林 幹二、鳥取 優樹、平林 楓斗、有吉 誠一郎、田中 三郎*

https://chem.tut.ac.jp/squid/ *email: tanakas@tut.jp



緒言 我々は、超高感度な磁気センサである高温超伝導磁束量子干渉計 (HTS-SQUID) の特性改善と、微小異物検査機器などへの応用を研究している。このうち、HTS-SQUIDの特性改善に関連して、高温超伝導体特有の磁束ノイズの低減法を検討した。従来、HTS-SQUIDのジョセフソン接合 (J.J.) には、高温超伝導薄膜の結晶粒界を弱結合として利用するバイクリスタル型が多く用いられている。しかし、バイクリスタル型J.J.は、作製が容易である反面、J.J.部に由来するノイズが大きく、高価な特殊基板が必要で、J.J.が結晶粒界 (直線) 上にしか作製できないなど課題がある。そこで、Ga-FIB装置 (Hitachi High-tech science corp., NB5000) による微細加工技術を活用し、磁束ノイズが低いと予想されるナブリッジ型J.J.、および、ナブリッジ型SQUIDの作製法と低ノイズ化手法について検討した。

高温超伝導薄膜にGa-FIBを照射すると、薄膜結晶中に導入された点欠陥が超伝導性を破壊し、Ga-FIB照射部が常伝導化される。そこで、高温超伝導薄膜の一部に、ナノメートルサイズのブリッジ部を残してGa-FIBを照射し常伝導化することで、高温超伝導ナブリッジ型J.J.、および、ナブリッジ型SQUIDの作製を試みた。また、ナブリッジ型SQUIDのさらなる低ノイズ化に向けた試みとして、バイクリスタル型SQUIDに対してGa-FIBを点状に照射し、人工ピンニングセンターとしての非超伝導性の穴 (アンチドット) の配列を形成することで、磁束ノイズの低減効果を検討した。さらに、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極薄膜SQUIDの試作を進めている。今後は、ナブリッジ型SQUIDとアンチドットの特性を改善し、低ノイズで高感度な極薄膜SQUIDの作製を進める。

1. 背景と目的

HTS-SQUIDでは、結晶粒界を用いたバイクリスタル型J.J.が一般的に用いられている。しかし、バイクリスタル型J.J.の課題として、以下の点が挙げられる。

- ・薄膜中にトラップされた磁束によってノイズが増加する。
- ・J.J.の配置や個数が粒界位置に制限され、設計自由度が低い。
- ・高価なバイクリスタル基板が必要である。

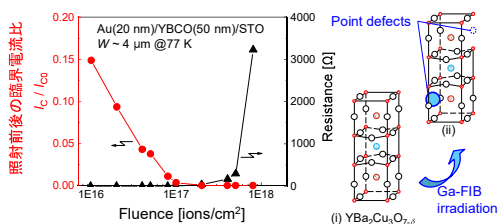
そこで低ノイズSQUID作製法として、Ga-FIBによる微細加工技術を活用したナブリッジ型J.J.およびSQUIDの作製法とノイズ低減法を検討した。ナブリッジ型J.J.は、サイズが小さいため磁束ノイズが低いと予想され、特殊な基板が不要で、設計自由度が高い。

本研究では、高温超伝導薄膜をGa-FIB照射によってナノメートル精度でパターンニングすることで、ナブリッジ型J.J.およびSQUIDを作製した。また、バイクリスタル型SQUIDにGa-FIB照射によってアンチドットを導入することで、ノイズ低減効果を検討した。

さらに、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極薄膜SQUIDの試作を進めている。

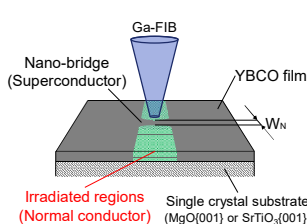
2. Ga-FIBによるナブリッジ型ジョセフソン接合の作製

2.1 Ga-FIBによる高温超伝導薄膜の常伝導化



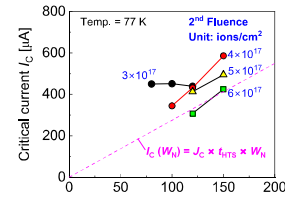
- YBa₂Cu₃O_{7-δ} (YBCO) 薄膜は超伝導転移温度 (~90 K) 以下でゼロ抵抗を示す。
- Ga-FIBを照射されたYBCO結晶には、点欠陥が導入され臨界電流が低下する。
- 照射量を増加すると、半導体や絶縁体特性に変化する。

2.2 Ga-FIBによるナブリッジ作製



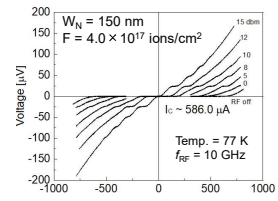
Ga-FIB照射によって高温超伝導薄膜をナノメートルレベルの狭窄部を残して常伝導化することで、超伝導ナブリッジを作製する。

2.3 臨界電流のブリッジ幅・照射量依存性



加速電圧40 kV、照射量 $4 \times 10^{17} - 6 \times 10^{17}$ ions/cm²のGa-FIB照射で作製したナブリッジの臨界電流は、照射量とブリッジ幅に対して直線的な依存性を示した。Ga-FIB照射には、EIIRIS 2F測定室のNB5000 (Hitachi High-tech, NB5000) を使用した。

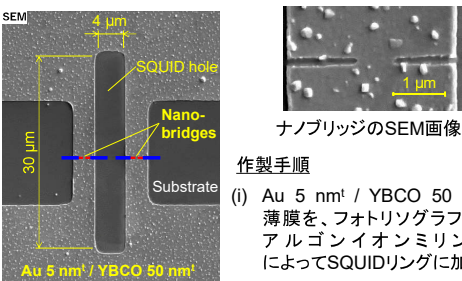
2.4 ACジョセフソン効果の確認



Ga-FIB照射で作製したナブリッジは、マイクロ波照射によりV-I特性に理論値に一致する電圧ステップ (シャピロステップ) を示した。これにより、ナブリッジがジョセフソン接合として動作していることを確認した。

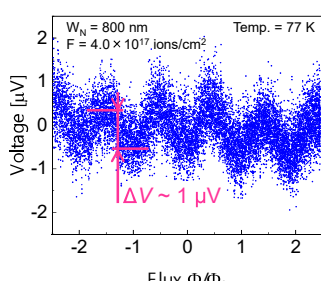
3. ナブリッジ型SQUIDの作製

3.1 ナブリッジ型SQUIDの作製



作製手順
(i) Au 5 nm² / YBCO 50 nm² 薄膜を、フォトリソグラフィとアルゴンイオンミリングによってSQUIDリングに加工
(ii) 2ヶ所のマイクロチャネルにGa-FIBを照射することで、ナブリッジを形成。

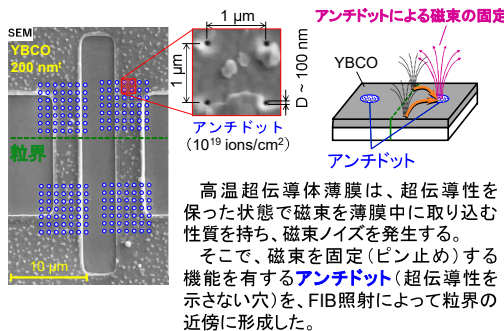
3.2 ナブリッジ型SQUIDの特性



ナブリッジ型SQUIDに対して磁場を印可すると、サイン波状の周期的な電圧波形が得られた。この結果から、ナブリッジ型SQUIDがDC-SQUIDとして動作していることを確認した。

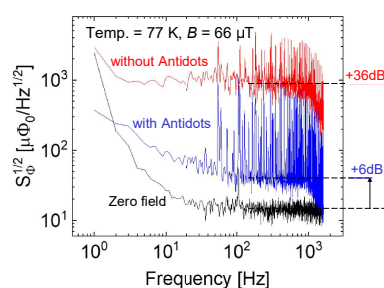
4. アンチドットによるノイズ低減

4.1 SQUIDへのアンチドットの導入



高温超伝導体薄膜は、超伝導性を保った状態で磁束を薄膜中に取り込む性質を持ち、磁束ノイズを発生する。そこで、磁束を固定 (ピン止め) する機能を有するアンチドット (超伝導性を示さない穴) を、FIB照射によって粒界の近傍に形成した。

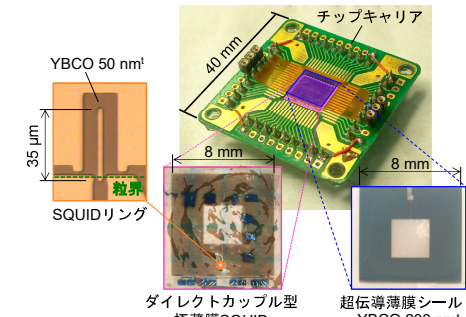
4.2 アンチドットによる磁束ノイズの低減



アンチドットを導入していないSQUIDでは、地磁気程度の磁場66 uTの印可によって、1 - 1000 Hzでノイズが増加した。一方で、アンチドットを導入したSQUIDでは、ノイズが1/60に抑制された。

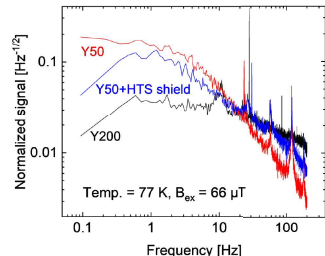
5. 超伝導薄膜シールドによるノイズ低減

5.1 極薄膜SQUIDへの超伝導薄膜シールドの適用



ノイズ増加の原因となる磁束の侵入を防ぐため、極薄膜SQUID (YBCO 50 nm²) に超伝導薄膜シールド (YBCO 200 nm²) を貼り付けた。

5.2 超伝導薄膜シールドによるノイズ特性の改善



YBCO 200 nm²のSQUIDと比較し、極薄膜SQUID (YBCO 50 nm²) ではノイズが増加した。一方で、超伝導薄膜シールドを貼り付けたSQUIDでは、10 Hz以下のノイズが抑制された。

6. まとめ

- HTS-SQUIDの低ノイズ化を目的として、高温超伝導薄膜をGa-FIB照射によってナノメートルオーダーで常伝導化し、ナブリッジ型ジョセフソン接合およびナブリッジ型SQUIDの作製手法を検討した。
- 作製したナブリッジの臨界電流量は、ブリッジ幅およびGa-FIB照射量によって高い精度で制御することができた。また、作製したナブリッジは77 Kで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示唆した。
- フォトリソグラフィとアルゴンイオンミリングで作製したSQUIDリングにGa-FIBでナブリッジを形成することで、ナブリッジ型SQUIDを作製した。ナブリッジ型SQUIDは、77 Kで磁場印可によってサイン波状の周期的な電圧波形を出力し、DC-SQUIDとして動作していることを確認した。
- バイクリスタル型SQUIDの粒界近傍にGa-FIB照射によって非超伝導性の穴 (アンチドット) を導入することで、磁場印可時のバイクリスタル型SQUIDのノイズを抑制できることを確認した。

上記に加え、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極薄膜SQUIDの試作を進めており、今後は、ナブリッジ型SQUIDとアンチドットの特性を改善し、低ノイズで高感度な極薄膜SQUIDの作製を進める。

研究業績

- 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).
- Kanji Hayashi, Tepei 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.
- K Hayashi, T Ueda, R Ohtani, S Ariyoshi and S Tanaka, "A Study of the HTS Josephson Junction Formed by a Ga Focused Ion Beam," J. Phys.: Conf. Ser. vol. 1590 no.012044 (2020).
- Kanji Hayashi, Tepei 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 (HTSHFF2018), pp. 56-57 (2018).