

Ga-FIB照射による高温超伝導SQUID作製法に関する研究

林 幹二、大谷 涼、鳥取 優樹、有吉 誠一郎、田中 三郎*

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

EIIRISプロジェクト
研究成果報告会
March 01 2022



緒言

私たちは、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、高温超伝導体に特有の磁束ノイズについて低減法の検討を行っている。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、ノイズが大きく、高価な特殊基板が必要で、接合が直線の結晶粒界上にしか作製できないなど課題がある。そこで、EIIRIS設置のGa-FIB (Hitachi High-tech corp., NB5000) による微細加工技術を使用し、磁束ノイズが低いと予想されるナノブリッジ型J.J.およびナノブリッジ型SQUIDの作製法を検討した。

高温超伝導薄膜にGa-FIBを照射すると、結晶中に点欠陥が導入され、超伝導性が破壊される。そこで、高温超伝導薄膜をナノメートルサイズのブリッジ部を残して常伝導化することで、高温超伝導ナノブリッジ型ジョセフソン接合およびナノブリッジ型SQUIDの作製を試みた。また、バイクリスタル型SQUIDに対してGa-FIBを点状に照射し、人工のピンニングセンタとなる非超伝導性の穴 (アンチドット) の配列を形成して磁束ノイズの低減効果を検討した。

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。

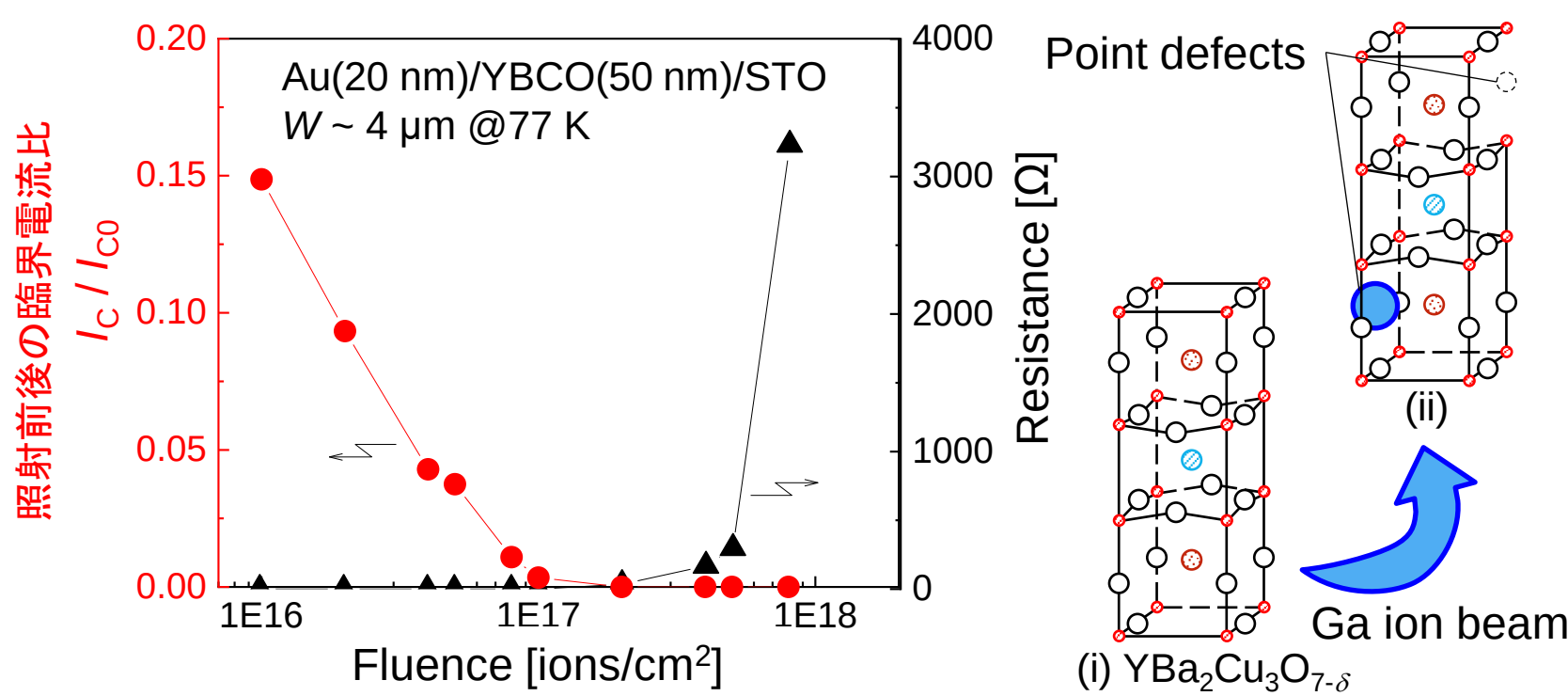
- ・薄膜中にトラップされた磁束によってノイズが増加する。
- ・J.J.の配置や個数が粒界位置に制限され、設計自由度が低い。
- ・高価なバイクリスタル基板が必要である。

そこで低ノイズSQUID作製法として、Ga-FIBによる微細加工を応用したナノブリッジJ.J.およびSQUIDの作製法とノイズ低減法を検討した。**ナノブリッジ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、ナノブリッジ型J.J.およびSQUIDの作製した。また、SQUIDパターンにナノメートルサイズの人エピンニングセンタ (アンチドット) を導入することで、ノイズの低減効果を検討した。

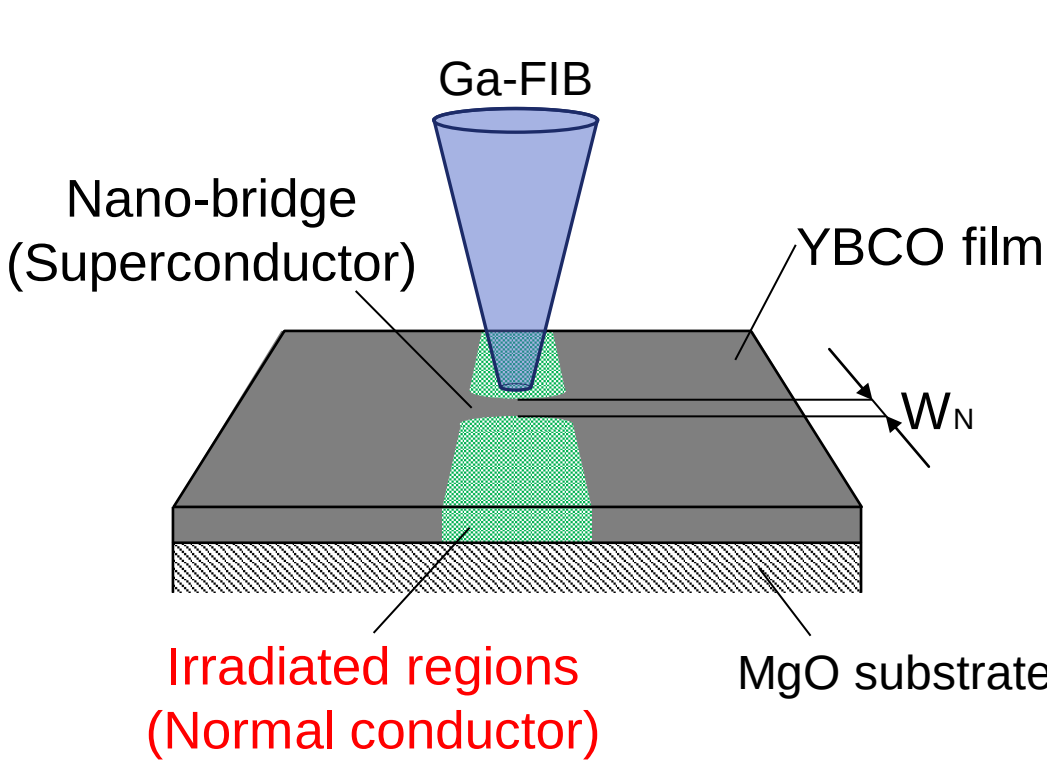
2. Ga-FIBによるナノブリッジ型ジョセフソン接合の作製

2.1 Ga-FIBによる高温超伝導薄膜の常伝導化



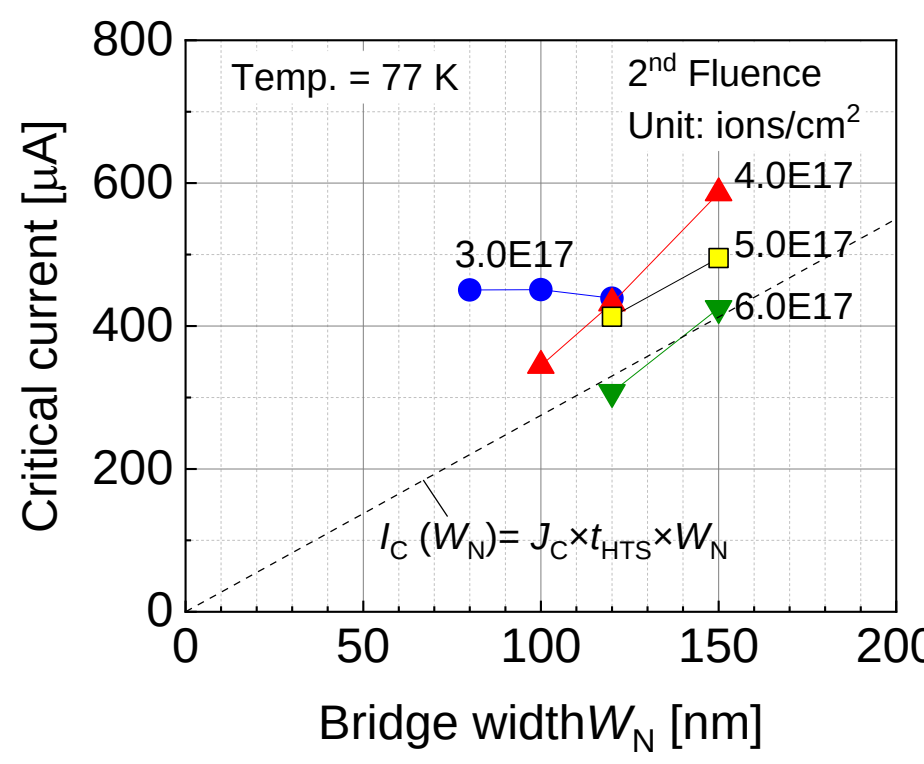
(i) $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7.5}$ (YBCO) 薄膜は超伝導転移温度 (~ 90 K) 以下でゼロ抵抗を示す。(ii) Gaイオンビームを照射された結晶には、点欠陥が導入されて臨界電流が低下する。さらに照射量を増加すると、半導体や絶縁体特性に変化する。

2.2 Ga-FIBによるナノブリッジ作製



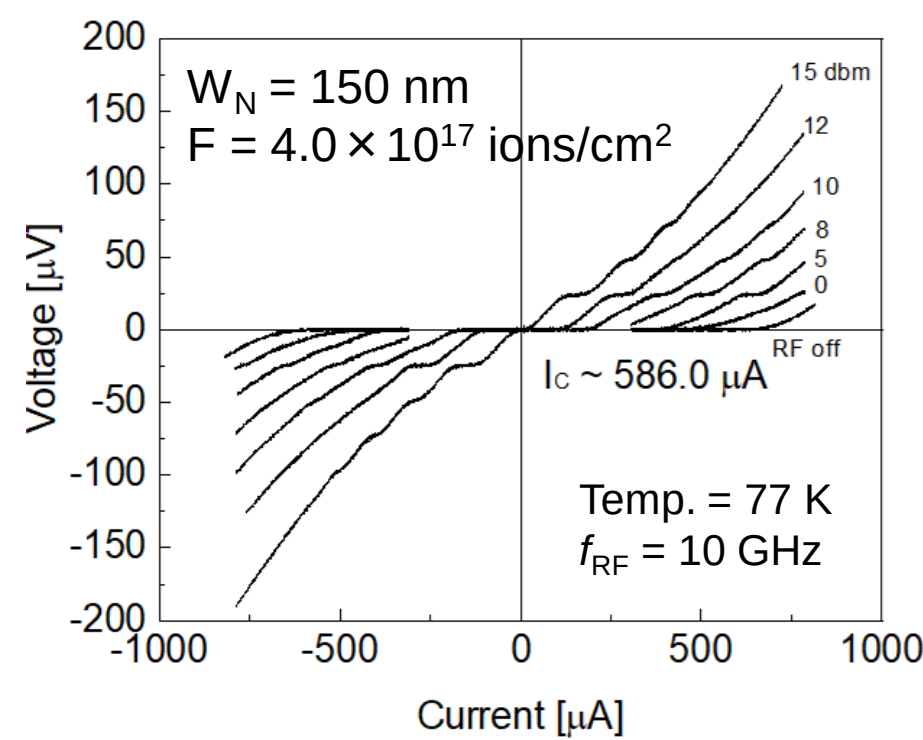
高温超伝導薄膜に対してGa-FIBを走査し、回路に不要な領域を常伝導・絶縁化あるいは除去することで超伝導回路を形成する。ナノメートルレベルの狭窄部を残して常伝導化することで、超伝導ナノブリッジの作製する。

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照射で作製したナノ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。一方で、照射量の低い 3×10^{17} ions/cm² では、一定の臨界電流が残留した。

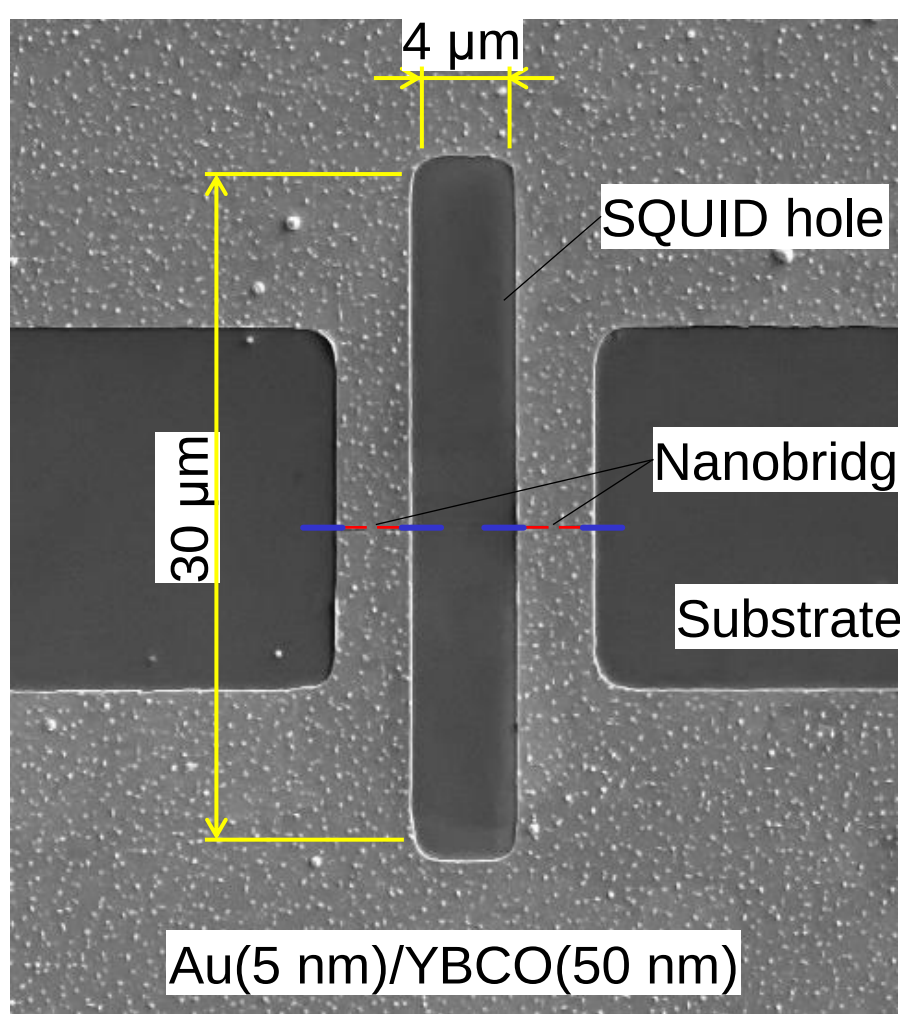
2.4 ACジョセフソン効果の確認



Ga-FIB照射で作製したナノブリッジは、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、**ナノ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**。

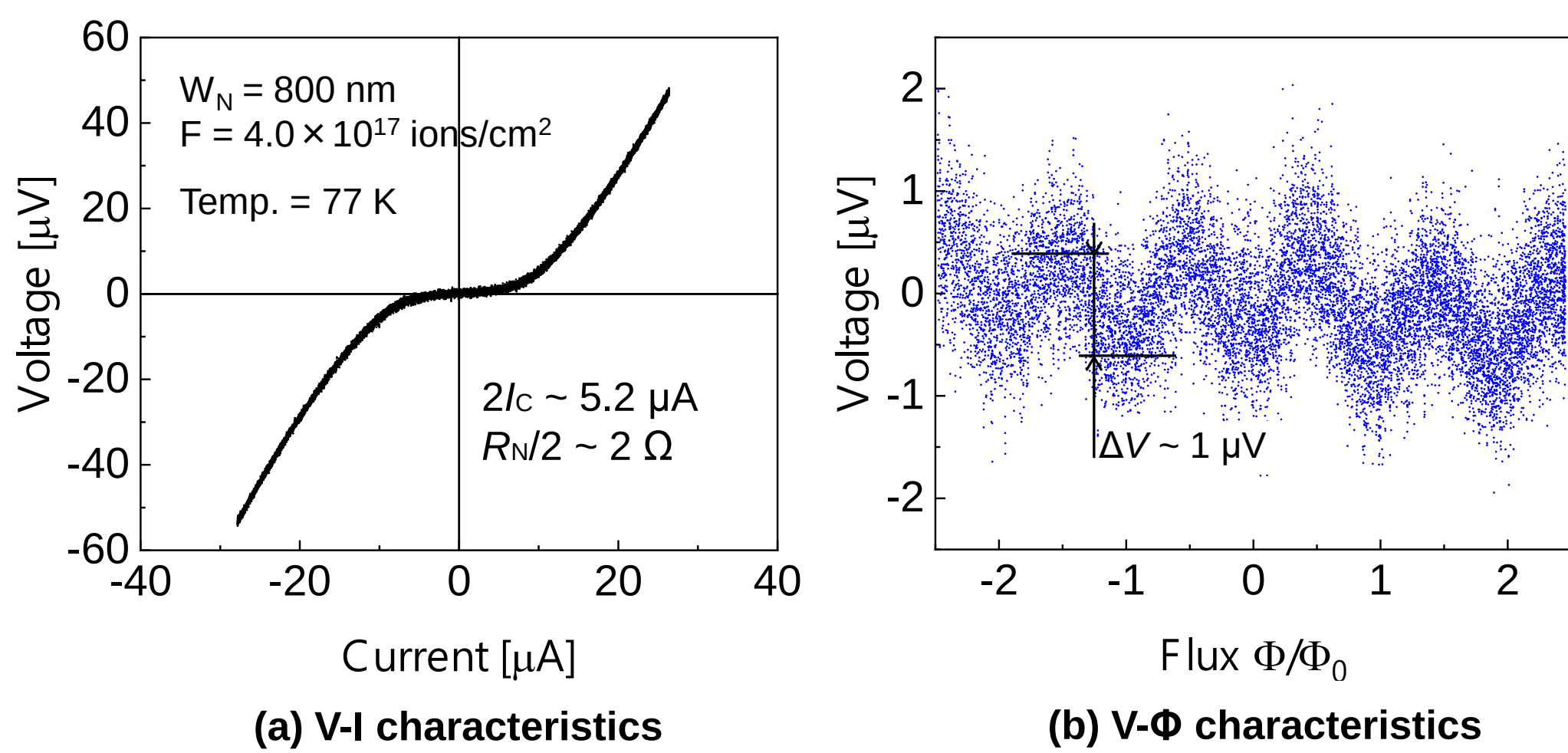
3. Ga-FIBによるナノブリッジ型のSQUID作製

3.1 ナノブリッジ型SQUIDの作製



Au層 (膜厚 5 nm) で保護されたYBCO薄膜 (膜厚 50 nm) 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微細加工し、 $30 \mu\text{m} \times 4 \mu\text{m}$ のSQUIDホールを有するSQUIDパターンを作製した。その後、FIB加工で2つのナノブリッジを形成することで、DC-SQUIDを作製した。

3.2 ナノブリッジ型SQUIDの特性



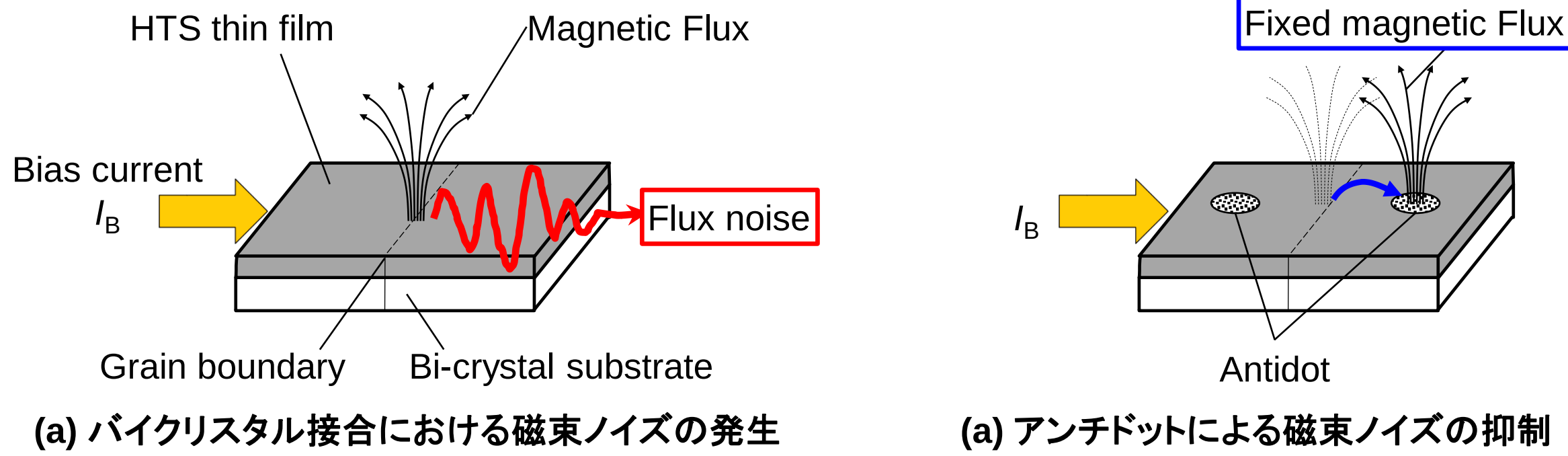
(a) V-I characteristics

(b) V-Φ characteristics

(a) ブリッジ幅 800 nm のナノブリッジ型SQUIDの臨界電流は、設計値より小さい $2I_c = 5.2 \mu\text{A}$ を示した。また、(b) ナノブリッジ型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。これらの結果から、**ナノブリッジ型SQUIDがDC-SQUIDとして動作していることを確認した**。一方で、SQUIDの出力電圧は $1 \mu\text{V}$ と小さいため、臨界電流等のパラメータを微調整して特性を改善する必要がある。

4. アンチドットによるノイズ低減効果の確認

4.1 アンチドットによるノイズ低減の原理

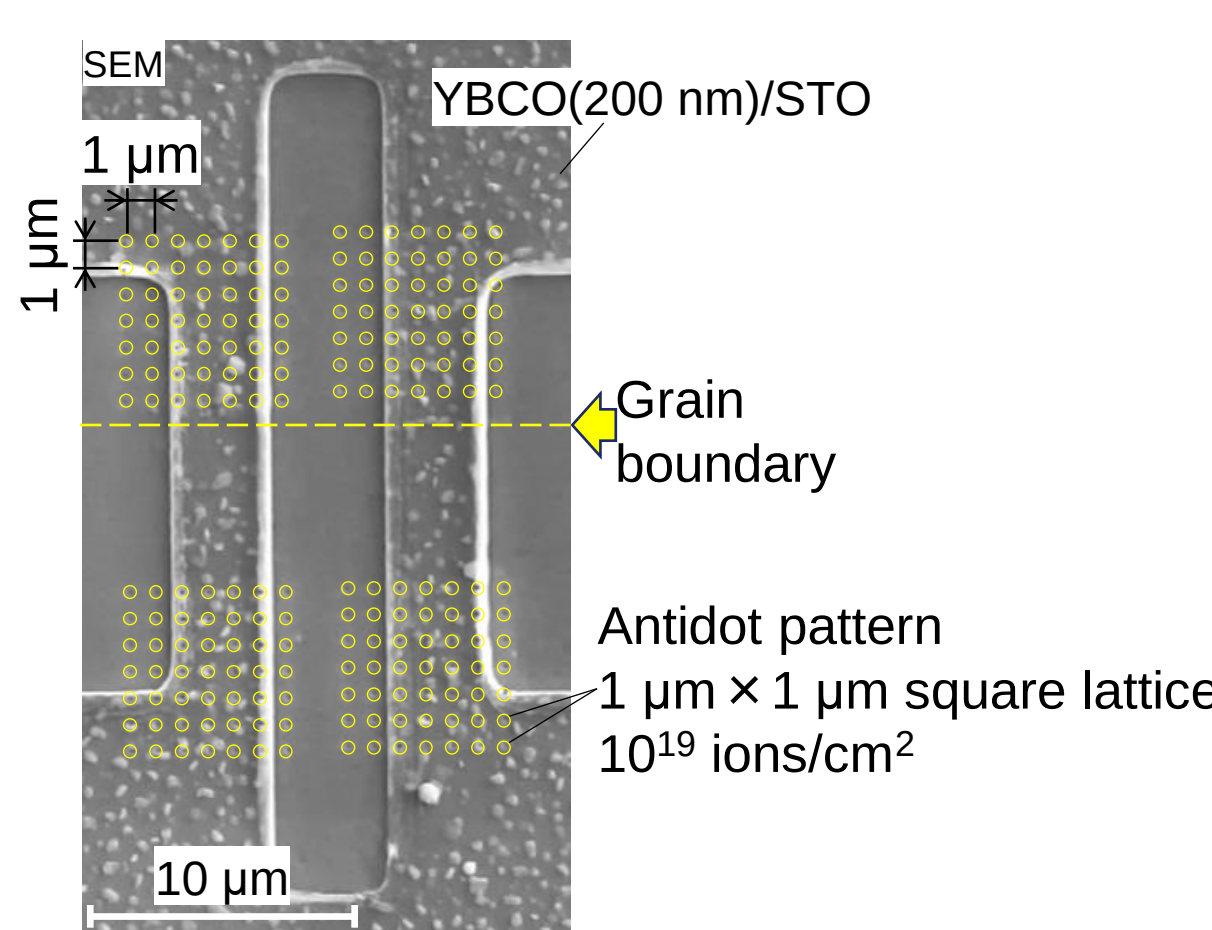


(a) バイクリスタル接合における磁束ノイズの発生

(a) アンチドットによる磁束ノイズの抑制

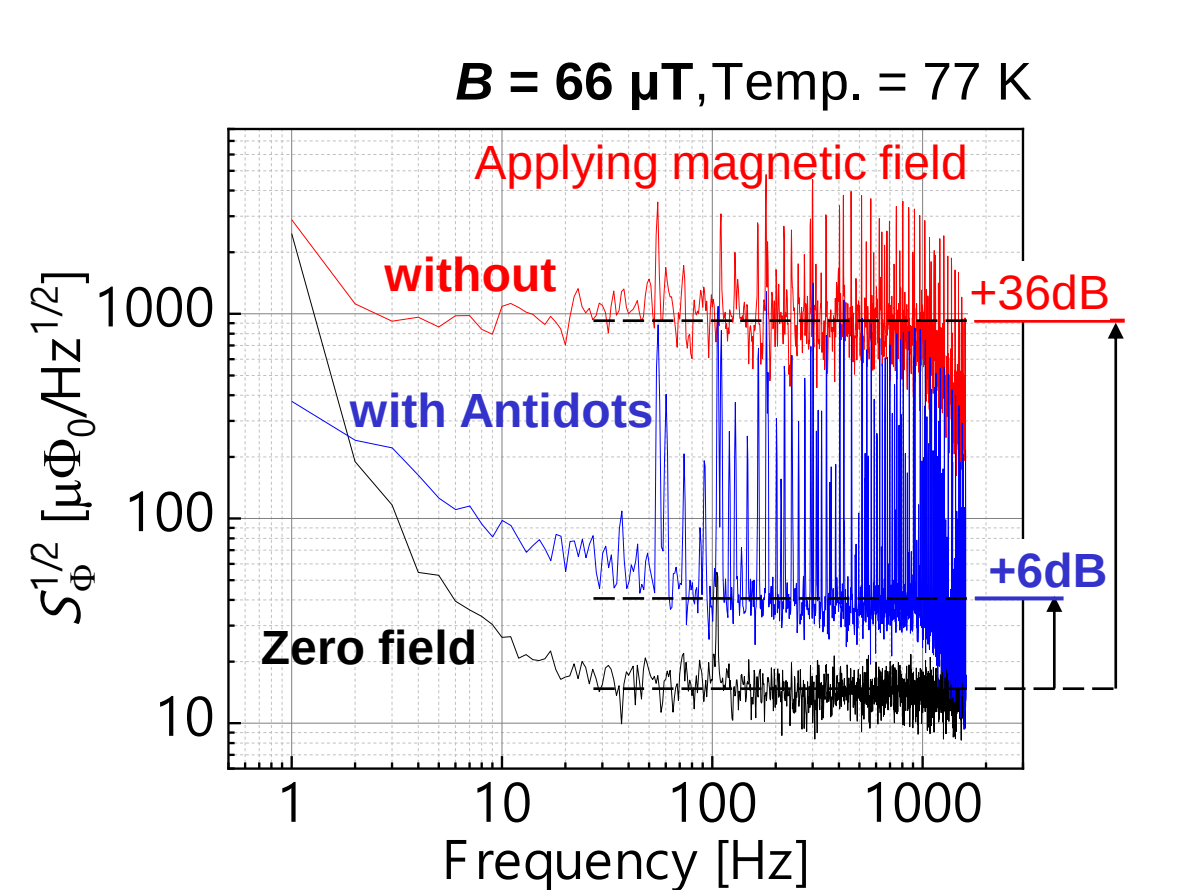
(a) 高温超伝導体薄膜は、超伝導性を保った状態で磁束を薄膜中に取り込む性質を持つ (第二種超伝導体)。特に、バイクリスタル型SQUIDの粒界に取り込まれた磁束は、ローレンツ力や熱エネルギーによって活性化し、磁束ノイズを発生する。そこで、(b) 粒界の近傍にアンチドット (超伝導性を示さない穴) を配置することで、粒界中の磁束が固定 (ピン止め) され、磁束ノイズが低減できると考えられる。

4.2 SQUIDへのアンチドットの導入



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YBCO膜厚 200 nmのバイクリスタル型SQUIDに対してFIBを照射し、粒界周辺の超伝導体薄膜にアンチドットを形成した。

4.3 アンチドット導入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 (Zero field) に対して磁場を印可する (**without**) と、高帯域のノイズが 36 dB 増加した。一方で、アンチドットを導入したSQUIDでは、磁場印可によるノイズ増加が 6 dB 程度に抑制された (**with Antidots**)。これらの結果から、アンチドット導入によりSQUIDの磁束ノイズを低減できる可能性が示唆された。

5. まとめ

1. 低ノイズの高温超伝導ジョセフソン接合の作製方法として、高温超伝導薄膜をGa-FIB照射によって常伝導化し、ナノブリッジ型J.J.およびナノブリッジ型SQUIDを作製する手法を検討した。
 2. Ga-FIBで作製したナノブリッジの臨界電流量は、ブリッジ幅および照射量によって高い精度で制御することができた。また、作製したナノブリッジは 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。
 3. 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でナノブリッジを形成することで、ナノブリッジ型SQUIDを作製した。ナノブリッジ型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。
 4. バイクリスタル型SQUIDの粒界近傍に、Ga-FIB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SQUIDのノイズを抑制できることを確認した。
- 今後はナノブリッジ型SQUIDの特性改善を進めるとともに、ナノブリッジ型SQUIDへのアンチドット導入を検討する。

研究業績

1. Kanji Hayashi, Teppei Ueda, Ryo Ohtani, Seiichiro Ariyoshi, and Saburo Tanaka, "Fabrication of HTS Low-noise Nanobridge Josephson Junction by Gallium FIB", IEEE Transactions on Applied Superconductivity, (2021) 1101604_1-4. (doi:10.1109/TASC.2021.3072009)
2. 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. **1590** (2020) 012044.
3. 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 (HTSHFF2018), Poster 11, p56-57, June 5-8, 2018, Zao, Yamagata, Japan.