

Ga-FIB照射による高温超伝導ジョセフソン接合作製法に関する研究

林 幹二、上田 哲平、大谷 涼、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) の作製と、微小異物検査機器などへの応用を研究している。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。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、Ga-FIBによる微細加工技術を利用したナノブリッジ型J.J.の作製法を検討した。高温超伝導薄膜にGaイオンビームを照射すると、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の作製を試みた。しかし、照射位置の調整時に観察視野がGaで汚染される課題が生じた。そこで、膜厚20 nmのAu保護層を高温超伝導薄膜層上に積層し、低加速電圧で照射位置を調整し、高加速電圧で常伝導化加工を行う手法を考案し、高温超伝導ナノブリッジの作製と特性評価を行った。作製した幅50 ~ 100 nmのナノブリッジでは、マイクロ波の照射によりシャピロステップの出現を確認し、ジョセフソン接合ライクの特性を示していることを確認した。

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。

- ・ノイズが比較的大きい。
- ・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である。

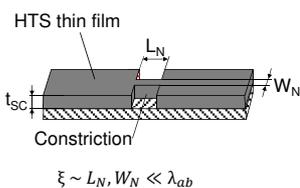
そこで低ノイズSQUID作製法として、Ga-FIB照射による欠陥生成を応用したナノブリッジ型J.J.の作製法を検討している。

- ・特殊な基板が不要であり、任意の配置でJ.J.作製が可能
- ・Ga-FIB照射条件を調整することで、J.J.の超伝導特性の制御が可能

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.の作製および評価を行った。

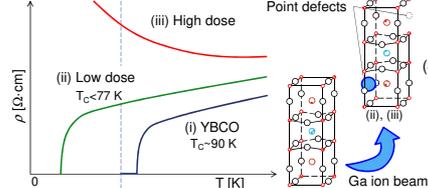
2. Ga-FIBによるナノブリッジ作製の原理

ナノブリッジ接合について



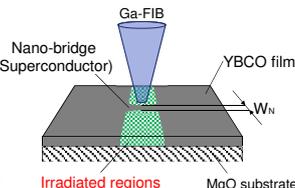
高温超伝導ナノブリッジJ.J.は、高温超伝導薄膜に形成された狭窄部であり、幅 W_N および長さ L_N が超伝導体材料(YBCO)の磁場侵入長 λ_{ab} ($\sim 1 \mu\text{m}$)より小さく、コヒーレンス長 ξ ($\sim 1 \text{nm}$)に近い必要がある。

Ga-FIBによる高温超伝導薄膜の常伝導化



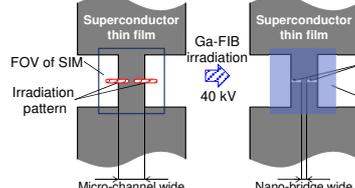
(i) $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$ (YBCO) 薄膜は90 K程度の超伝導転移温度 T_c を示す。(ii) Gaイオンビームを照射された結晶には、点欠陥が導入されて T_c が低下する。(iii) さらに照射量を増加すると、半導体や絶縁体特性に変化する。

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。

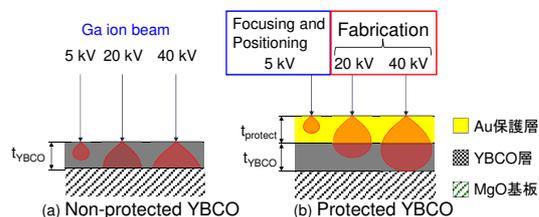
Ga-FIB照射によるパターンニングの課題



フォーカスや位置合わせ時に必要となる走査イオン顕微鏡 (SIM) 観察の間に視野 (FOV) 全体のYBCO薄膜が損傷し、常伝導化する課題が生じた。

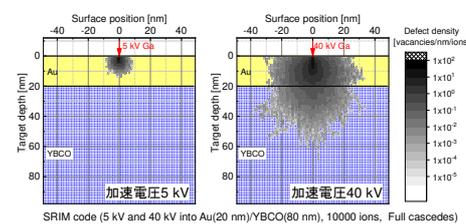
3. Au保護層による欠陥量の制御

Au保護層による欠陥生成の抑制



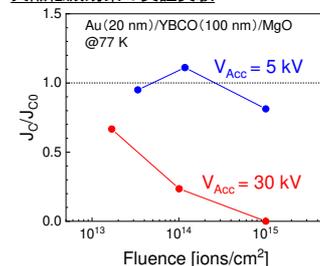
(a) YBCO薄膜に対してGaイオンを照射すると、加速電圧が高いほどより薄膜の深い領域まで点欠陥が生成する。(b) そこで、YBCO層上に薄いAu保護層を積層し、低加速電圧 (5 kV) で照射位置を調整し、高加速電圧 (30 ~ 40 kV) でYBCO層の常伝導化による加工を行うことで、SIM視野への過剰な点欠陥生成を抑制する手法を考案した。

欠陥生成シミュレーション



Au保護層の最適膜厚を決定するために、二体衝突モデルのシミュレーションを行うSRIMプログラムを使用した。Au保護層の膜厚が20 nmの場合、低加速電圧5 kVのGaイオンはすべてAu保護層内で停止し、高加速電圧40 kVではYBCO層中に50 nm程度侵入した。この結果から、Au保護層の膜厚を20 nmとした。

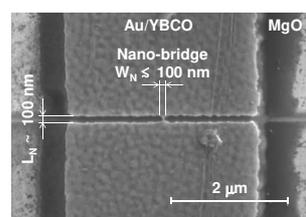
欠陥低減効果の実証実験



膜厚20 nmのAu層で保護された膜厚100 nmのYBCO薄膜に対してGa-FIBを照射し、照射前後の臨界電流比を評価した。5 kVでは 10^{15} ions/cm 2 の照射でも80%以上の臨界電流が維持された。一方で、30 kVの照射では、照射量に依存して臨界電流が減少し、 10^{15} ions/cm 2 で常伝導化した。

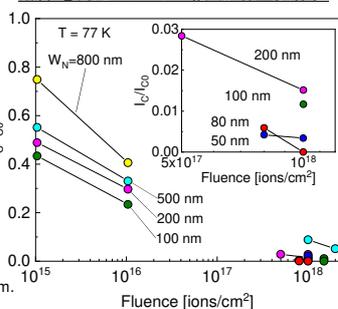
4. ナノブリッジ特性評価

Ga-FIBで作製したナノブリッジ



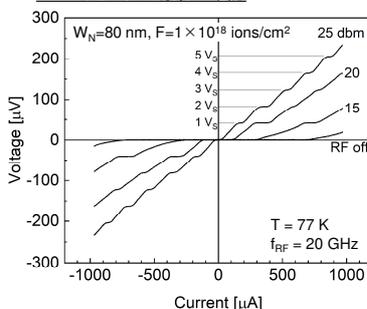
$W_N = 100 \text{ nm}$, Au(20 nm)/YBCO(100 nm)/MgO
 $V_{\text{acc}} = 40 \text{ kV}$, $F = 1.0 \times 10^{18}$ ions/cm 2 , $D_{\text{beam}} \sim 30 \text{ nm}$.

臨界電流比のブリッジ幅・照射量依存性



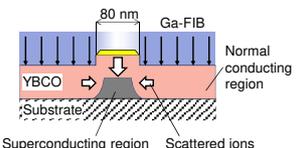
加速電圧40 kV、ビーム径約30 nmのGa-FIBを照射量 $10^{15} \sim 10^{18}$ ions/cm 2 で走査し、幅50 ~ 800 nmの高温超伝導ナノブリッジを作製した。Ga-FIB照射の接合1つあたりの所要時間は数秒から数十秒と短い。照射領域のAu層は $10^{17} \sim 10^{18}$ ions/cm 2 以上の照射で完全に除去され、幅100 nm程度の溝が形成された。照射前後の臨界電流比は、照射量の増加とブリッジ幅の減少に依存して減少し、幅80 nmでは 10^{18} ions/cm 2 で常伝導化した。臨界電流はブリッジ幅から予想される値から大幅に減少し、散乱イオンによる欠陥生成が示唆された。

ACジョセフソン効果の確認



幅50 ~ 100 nm、照射量 $8 \times 10^{17} \sim 1 \times 10^{18}$ ions/cm 2 のナノブリッジについて、20 GHzのマイクロ波を照射して電圧電流特性を評価し、ACジョセフソン効果の確認を試みた。その結果、評価したすべてのナノブリッジでACジョセフソン効果により電流電圧特性が量子化し、理論値に一致する一定電圧のステップ(シャピロステップ)の出現を確認した。特に、幅80 nm、 1×10^{18} ions/cm 2 のナノブリッジでは明瞭なステップを確認し、ジョセフソン接合ライクの動作を確認した。

ナノブリッジの予想断面構造



5. まとめ

1. 低ノイズの高温超伝導ジョセフソン接合作製方法として、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.を作製する手法を検討した。
2. 照射位置の調整時にSIM観察視野がGa汚染される課題に対して、YBCO高温超伝導層上に膜厚20 nmのAu保護層を積層し、低加速電圧で位置調整、高加速電圧で常伝導化を行うことで、過剰な欠陥生成を抑制した。
3. 加速電圧40 kV、照射量 $8 \times 10^{17} \sim 1 \times 10^{18}$ ions/cm 2 のGa-FIBで作製した幅50 ~ 100 nmの高温超伝導ナノブリッジでは、シャピロステップを確認した。このうち、幅80 nm、 1×10^{18} ions/cm 2 のナノブリッジでは明瞭なステップを確認し、ジョセフソン接合ライクの動作を確認した。

研究業績

1. OK 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.
2. OKanji 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 (HTSHF2018)*, Poster 11, p56-57, June 5-8, 2018, Zao, Yamagata, Japan. (Poster)
3. OKanji Hayashi, Tepei Ueda and Saburo Tanaka, "Fabrication of HTS Low-noise Nanobridge Josephson Junction by Gallium FIB," *Applied Superconductivity Conference (2020) Wk1E0rAC-03*. (Accepted)