

11 超伝導 | 一般セッション(ポスター講演): 11 超伝導 (ポスター)

**[17p-P03-1~18] 11 超伝導 (ポスター)**

[17p-P03-1]

液体窒素温度における高周波電磁波照射ジョセフソン接合に生じる  
カオス現象の応用

○木村 壮汰<sup>1</sup>、及川 大<sup>1</sup>、都築 啓太<sup>1</sup>、杉浦 藤虎<sup>1</sup>、安藤 浩哉<sup>1</sup>、塚本 武彦<sup>1</sup>、小松 弘和<sup>1</sup> (1.豊田高専)

[17p-P03-2]

固有ジョセフソン接合を用いたTHz発振器における同期現象の数値解析

○高橋 晃叶<sup>1</sup>、及川 大<sup>1</sup>、都築 啓太<sup>1</sup>、杉浦 藤虎<sup>1</sup>、安藤 浩哉<sup>1</sup>、塚本 武彦<sup>1</sup> (1.豊田高専)

[17p-P03-3]

Pr系銅酸化物における単結晶育成の温度過程と生成相に関する研究

○村岡 智幸<sup>1</sup>、佐藤 涼介<sup>1</sup>、武田 祐汰<sup>1</sup>、大村 彩子<sup>1</sup>、石川 文洋<sup>1</sup> (1.新潟大)

[17p-P03-4]

$\text{Pr}_2\text{Ba}_4\text{Cu}_7\text{O}_{15.8}$ の超伝導性に対するPr欠損の効果

○武田 祐汰<sup>1</sup>、佐藤 涼介<sup>1</sup>、村岡 智幸<sup>1</sup>、大村 彩子<sup>1</sup>、石川 文洋<sup>1</sup> (1.新潟大)

[17p-P03-5]

アルミニウム鑄包み法による $\text{CaKFe}_4\text{As}_4$ 超伝導バルクの金属被覆処理と静水圧下熱処理

○川島 健司<sup>1</sup>、神谷 良久<sup>1</sup>、石田 茂之<sup>2</sup>、荻野 拓<sup>2</sup>、鬼頭 聖<sup>2</sup>、伊豫 彰<sup>2</sup>、永崎 洋<sup>2</sup>、吉田 良行<sup>2</sup> (1.イムラ・ジャパン株式会社、2.産総研)

[17p-P03-6]

磁性ジョセフソン接合障壁層のための窒化ニッケル薄膜の作製

○赤池 宏之<sup>1</sup>、梶田 一真<sup>1</sup>、野村 伊吹<sup>1</sup> (1.大同大工)

[17p-P03-7]

超伝導量子ビット応用に向けた立方晶系Al/AlN/Al/TiNのヘテロエピタキシャル成長

○山口 淳一<sup>1</sup>、林 賢二郎<sup>1</sup>、近藤 大雄<sup>1</sup>、土肥 義康<sup>1</sup>、佐藤 信太郎<sup>1</sup> (1.富士通)

[17p-P03-8]

REBCO-CCの中間層に向けたKOHフラックス( $\text{Pr}_{1-y}\text{RE}_y$ )<sub>1-x</sub>Ca<sub>x</sub>CoO<sub>3</sub>膜の金属-絶縁体転移特性

○船木 修平<sup>1</sup>、山本 樹輝<sup>1</sup>、山田 容士<sup>1</sup>、田橋 正浩<sup>2</sup>、吉田 隆<sup>3</sup>、一野 祐亮<sup>4</sup> (1.島根大、2.中部大、3.名古屋大、4.愛工大)

[17p-P03-9]

PLD法を用いたLaNiO<sub>3</sub>導電性膜上へのYBCO超伝導エピタキシャル薄膜の作製と評価

○坂本 龍哉<sup>1</sup>、田岡 紀之<sup>1</sup>、清家 善之<sup>1</sup>、森 竜雄<sup>1</sup>、一野 祐亮<sup>1</sup> (1.愛知工大院)

[17p-P03-10]

フッ素フリーMOD法を用いたGdBCO薄膜作製におけるMOD溶液の状態依存性

○山本 涼介<sup>1</sup>、喜多 隆介<sup>2</sup>、武田 正典<sup>1</sup> (1.静大院総合、2.静大イノベ)

[17p-P03-11]

銅酸化物超伝導体GdBa<sub>2</sub>Cu<sub>3</sub>O<sub>7.8</sub>薄膜の電気抵抗の異方性

○(M1C)守永 昂世<sup>1</sup>、畑野 敬史<sup>2</sup>、生田 博志<sup>2,3</sup>、飯田 和昌<sup>1</sup> (1.日大、2.名大院工、3.名大RCCME)

---

[17p-P03-12]

Bi系酸化物高温超伝導体 $\text{Bi}_{1.75}\text{Pb}_{0.35}\text{Sr}_{1.9}\text{Ca}_x\text{Cu}_{x+1}\text{O}_y$  ( $x \geq 2$ )の合成に関する研究

○大森 竣介<sup>1</sup>、Mendoza Marina<sup>1</sup>、鄭 雨萌<sup>2,1</sup>、堺 健司<sup>1</sup>、佐藤 祐喜<sup>1</sup>、吉門 進三<sup>1</sup>、松本 凌<sup>3</sup>、高野 義彦<sup>3</sup> (1.同志社大、2.東京理科大、3.物材研)

---

[17p-P03-13]

PLD法におけるアブレーションルームのモニタリングシステムの構築

○松田 遼太郎<sup>1</sup>、佐々 文彌<sup>1</sup>、藤田 竜也<sup>1</sup>、田岡 紀之<sup>1</sup>、清家 善之<sup>1</sup>、森 竜雄<sup>1</sup>、一野 祐亮<sup>1,5</sup>、堀尾 恵一<sup>3,5</sup>、一瀬 中<sup>4,5</sup>、堀出 朋哉<sup>2,5</sup>、松本 要<sup>2,5</sup>、吉田 隆<sup>2,5</sup> (1.愛工大、2.名大、3.九工大、4.電中研、5.JST-CREST)

---

[17p-P03-14]

R面サファイア基板上のNb薄膜の作製と特性評価

○(D)平間 友博<sup>1</sup>、石黒 康志<sup>1</sup>、立木 隆<sup>1</sup> (1.防衛大)

---

[17p-P03-15]

YBCO薄膜の初期結晶成長島の密度に着目した結晶成長シミュレーションのパラメータ最適化

○奥村 英二郎<sup>1</sup>、内田 陽人<sup>1</sup>、篁 拓己<sup>1</sup>、田岡 紀之<sup>1</sup>、清家 善之<sup>1</sup>、森 竜雄<sup>1</sup>、一野 祐亮<sup>1,5</sup>、堀尾 恵一<sup>3,5</sup>、一瀬 中<sup>4,5</sup>、堀出 朋哉<sup>2,5</sup>、松本 要<sup>2,5</sup>、吉田 隆<sup>2,5</sup> (1.愛工大、2.名大、3.九工大、4.電中研、5.JST-CREST)

---

[17p-P03-16]

無線電力伝送用高温超伝導バルク共振器アンテナへの導波器装荷による伝送効率評価

○秋元 大輝<sup>1</sup>、池津 優紀<sup>1</sup>、眞藤 行登<sup>1</sup>、柴田 將史<sup>2</sup>、鈴木 俊哉<sup>1</sup>、成田 克<sup>1</sup>、大音 隆男<sup>1</sup>、齊藤 敦<sup>1</sup> (1.山形大工、2.富士電機)

---

[17p-P03-17]

Spiral-MKIDs アレイによる 2 次元 THz 波イメージングに関する研究

○鈴木 俊哉<sup>1</sup>、須賀 祐哉<sup>1</sup>、秋元 大輝<sup>1</sup>、中島 健介<sup>1</sup>、成田 克<sup>1</sup>、大音 隆男<sup>1</sup>、齊藤 敦<sup>1</sup> (1.山形大工)

---

[17p-P03-18]

マイクロ波回路シミュレータを用いた力学インダクタンス進行波型パラメトリック増幅器の利得解析

○石田 壮汰<sup>1</sup>、武田 正典<sup>1</sup> (1.静大院総合)

---





## 数値解析を用いた高周波照射ジョセフソン接合に 生じるカオス現象と乱数発生器

Numerical analysis of chaotic behaviors in Josephson junction  
under irradiated with RF wave and random numbers generations

○木村壮汰<sup>1</sup>, 及川大<sup>1</sup>, 小松弘和<sup>1</sup>, 都築啓太<sup>1</sup>,  
安藤浩哉<sup>1</sup>, 杉浦藤虎<sup>1</sup>, 塚本武彦<sup>1</sup> (1.豊田高専)

○Sota Kimura<sup>1</sup>, Dai Oikawa<sup>1</sup>, Kazuhiro Komatsu<sup>1</sup>, Keita Tsuzuki<sup>1</sup>,  
Hiroya Ando<sup>1</sup>, Toko Sugiura<sup>1</sup>, Takehiko Tsukamoto<sup>1</sup> (1.NIT Toyota College)

近年の急速な IT 業界の発展により高セキュリティシステムの需要が高まっている。その高セキュリティ暗号システムの構築には良質な乱数(無作為, 予測不可能, 再現不可能)が必要不可欠である。そこで, 物理的現象の中でも高周波電磁波照射されたジョセフソン接合内に生じるカオス現象を乱数発生器に応用した場合, 小型, 省電力及び高速応答の発振器が期待される。また応用を考え, 高温超伝導体を用い, 安価な液体窒素(77 K)環境下で数値解析を行なった。高周波照射されたジョセフソン接合を RSCJ モデルにより等価回路化し, カオスが発生する条件を数値解析的に求めた。比較的簡単に作製可能な Bi-2212 固有ジョセフソン接合を想定したパラメータを用いた。カオスの判定はリアプノフ指数を用いて定量的に行う。リアプノフ指数とは初期値のことなる 2 つの軌道の発散具合を定量化した量である。本研究ではリアプノフ指数が正を示すときカオスが発生していると定義した。

Fig.1(a)は77K 環境下の照射電磁波の周波数及び振幅に対するリアプノフ指数が正值を示した領域をマッピングした図である。オレンジ領域内でカオスが発生していることを示している。電磁波照射したジョセフソン接合に生じるシャピロステップ領域ではカオスは生じなかった。また Fig.1(b)にカオス領域における接合の位相差 $\gamma$ とその時間微分値を用いたアトラクタを示す。カオス現象特有のいわゆるストレンジアトラクタを示しておりリアプノフ指数が正であることと矛盾しない。さらに計算されたカオスからバイナリの乱数を生成し, その乱数の品質の統計学的評価を講演では発表する予定である。

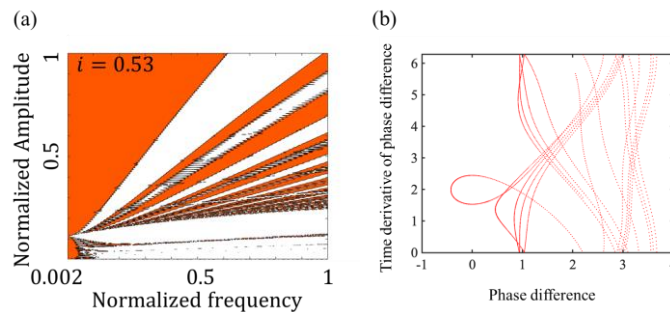


Fig.1 (a) RF parameter dependence of chaos region mapping, i.e. Lyapunov exponent were positive in the orange region. (b) A typical attractor in our study.

# 固有ジョセフソン接合を用いた THz 発振器における 同期現象の数値解析



## Numerical simulation of synchronization properties in intrinsic Josephson junction THz emitters

高橋晃叶<sup>1</sup>, 及川大<sup>1</sup>, 都築啓太<sup>1</sup>, 杉浦藤虎<sup>1</sup>, 安藤浩哉<sup>1</sup>, 塚本武彦<sup>1</sup> (1.豊田高専)

Akito Takahashi<sup>1</sup>, Dai Oikawa<sup>1</sup>, Keita Tsuzuki<sup>1</sup>, Toko Sugiura<sup>1</sup>,

Hiroya Andoh<sup>1</sup>, Takehiko Tsukamoto<sup>1</sup> (1.NIT Toyota College)

E-mail:d2304@toyota.kosen-ac.jp

テラヘルツ電磁波(THz 波)は様々な応用が期待されており, THz 発振器の開発が望まれている. Bi-2212 固有ジョセフソン接合を用いた THz 発振器は高出力化のため複数のジョセフソン接合を同期動作させる必要がある. 一方, その同期度を定量的評価された例はない. そこで, 本研究では数値解析的に各接合のジョセフソン電流を求め, その時空間的な同期度を定量的に評価した. また, ジョセフソン発振器は自己発熱効果が大きく, 素子内部で著しい温度分布が生じ, 同期度及び出力の抑制の懸念がある. 本研究では, 発熱効果をジュール熱による発熱項を考慮した非線形拡散方程式, 及び発振器内部の電磁場を接合同士の相互作用を考慮した結合 Sine-Gordon 方程式を用いた. これらを矛盾なく解くことによってジョセフソン発振器の  $I$ - $V$  特性を数値解析的に求めた. さらに, 相互相関係数を拡張する形で, 同相モードが 1, 及び逆相モードが 0 と定義される同期度  $C_{\text{sync}}$  を考案し, 各接合のジョセフソン電流の同期度を定量的に評価した. つまり  $C_{\text{sync}}$  が 1 に近いほど強い発振が期待できる. 今回は  $300 \times 50 \mu\text{m}^2$  のメサ形発振素子を仮定し, 接合数は計算負荷の関係から 5 接合としたが, パラメータは 700 接合と等価となるように調節しており, 一般性は失われたいと考える. Fig.1(a)に環境温度 20K での  $I$ - $V$  特性を示す. 高バイアス領域において, 自己発熱が大きい場合特有の負性抵抗を含む特性が得られた. また, 拡散方程式のみの解析では得ることのできない, リターン電流がゼロでない実験的に矛盾ない特性が得られた. また Fig.1(b)に電流-同期度特性を示した.  $C_{\text{sync}}$  が 1 に近い同相モードは得ることができなかったが, バイアス電流に依存して同期度が大きく変化していることがわかる. 講演では特に, 同期度が大きくなる条件を議論する予定である.

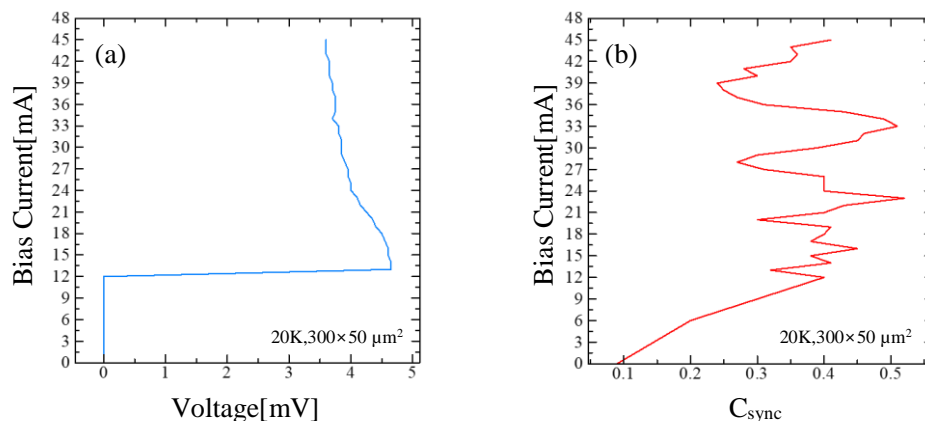


Fig.1 (a) Calculated current-voltage ( $I$ - $V$ ) characteristic of the Josephson oscillator at 20K.(b) Current dependence of time averaged synchronization factor  $C_{\text{sync}}$ .

## Pr 系銅酸化物における単結晶育成の温度過程と生成相に関する研究

Single crystal growth of Pr-cuprate under several conditions

新潟大<sup>○</sup>村岡智幸, 佐藤涼介, 武田祐汰, 大村彩子, 石川文洋

Niigata Univ. Tomoyuki Muraoka, Ryosuke Sato, Yuta Takeda, Ayako Ohmura, Fumihiro Ishikawa

E-mail: f23a057g@mail.cc.niigata-u.ac.jp

【はじめに】  $\text{Pr}_2\text{Ba}_4\text{Cu}_7\text{O}_{15.8}$  (Pr247) は、酸素欠損を生じると  $T_c = 15 \text{ K}$  での超伝導転移が起こる [1]。一方、 $\text{PrBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7.8}$  (Pr123) では  $\text{CuO}_2$  面付近における Pr-4f 軌道と O-2p 軌道の混成によるホール局在のため超伝導が抑制される [2]。このことから Pr247 における超伝導性は CuO 二重鎖で発現し、CuO 一重鎖での酸素欠損による電子キャリアドープが還元処理により生じると考えられ、Pr247 の超伝導機構は二重鎖の一次元伝導性と強く相関していると考えられる。本研究では二重鎖構造を持つ Pr247 及び  $\text{PrBa}_2\text{Cu}_4\text{O}_8$  (Pr124) の物性測定可能なサイズの単結晶育成を目的とする。

【実験方法】 単結晶育成にはマグネシアるつぼを用いた。原料として  $\text{Pr}_6\text{O}_{11}$ 、 $\text{BaCO}_3$ 、CuO を Pr:Ba:Cu = 1:2:3 のモル比で混合したものを用いた。まず原料を大気圧下  $800^\circ\text{C}$ 、24 時間の仮焼を行ったのちに、高圧酸素中で  $1000^\circ\text{C}$  に昇温し、徐冷開始温度まで急冷、その後、 $20^\circ\text{C}$  から  $30^\circ\text{C}$  の幅で  $-0.5^\circ\text{C/h}$  の割合で徐冷し、単結晶育成をした。るつぼ内から結晶の採取を行い、これらを含んだ生成物の一部を粉末化し、X 線回折を用いた相同定を行った。

【結果と考察】 図に生成物を粉末化したものを試料とした X 線回折の結果を示す。試料名には徐冷温度範囲を示した。試料 A、B とともに  $\text{PrBaO}_3$  や Pr123 の割合が多く、十分な大きさの Pr124、Pr247 単結晶を得られなかった。試料 C、D については、Pr247、Pr124 の割合が多く、特に Pr124 の  $0.5\sim 1.0 \text{ mm}$  程度の単結晶を得られた。これらの結果は、 $945^\circ\text{C}$  以下の領域で Pr124 が生成され、 $965^\circ\text{C}$  以上の領域では不純物相の生成が多く占めることを示している。Pr247 単結晶のみを育成するためには、徐冷温度範囲を狭め、かつ、徐冷時間を長くする必要がある。

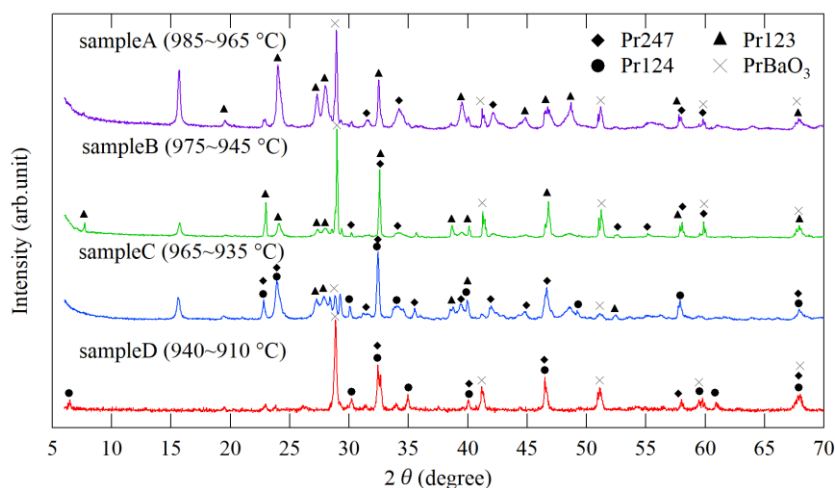


Fig. X-ray diffraction patterns of ground samples after crystal growth under several conditions. Temperature ranges with a slow cooling rate of  $-0.5^\circ\text{C/h}$  are indicated with the sample names.

[1]Yuh Yamada *et al.*, *Physica C* **426-431**(2005)213.

[2]R. Fehrenbacher and T. M. Rice, *Phys. Rev. Lett.* **70** (1993) 3471.

## Pr<sub>2</sub>Ba<sub>4</sub>Cu<sub>7</sub>O<sub>15-δ</sub> の超伝導性に対する Pr 欠損の効果

### Effect of Pr Deficiency on the Superconductivity of Pr<sub>2</sub>Ba<sub>4</sub>Cu<sub>7</sub>O<sub>15-δ</sub>

新潟大学 ○武田 祐汰, 佐藤 涼介, 村岡 智幸, 大村 彩子, 石川 文洋

Niigata Univ. ○Yuta Takeda, Ryosuke Sato, Tomoyuki Muraoka,

Ayako Ohmura, Fumihiko Ishikawa

E-mail: f23a009g@mail.cc.niigata-u.ac.jp

【背景と目的】 Pr<sub>2</sub>Ba<sub>4</sub>Cu<sub>7</sub>O<sub>15-δ</sub> (Pr247) は、CuO<sub>2</sub> 面での超伝導を示す他の銅系酸化物超伝導体と異なり、キャリアが局在化し超伝導性を示さない。しかし、酸素還元処理を施すことで、CuO 二重鎖において金属的伝導が生じ、さらに超伝導が発現する[1]。Pr247 は合成条件によっては、未還元であっても金属的な抵抗の振る舞いを示す場合があり、一方でそれらの試料は超伝導転移を示さなかった。このことから超伝導性発現には酸素欠損だけでなく、わずかな組成の違いが影響していると考えられる。実際、構造解析の報告によれば、as-sintered 試料では Ba サイトに Pr が置換することで格子欠陥が起こる[1]。本研究では、Ba サイトの置換効果を考慮し、Pr サイトを欠損させた Pr<sub>1.95</sub>Ba<sub>4</sub>Cu<sub>7</sub>O<sub>15-δ</sub> (Pr-2.5%) を合成し、Pr247 (Pr±0%) 試料と比較して、Pr 欠損の効果調べた。

【実験方法】 合成方法はアルカリ金属熔融塩法を用いた。原料には Pr<sub>6</sub>O<sub>11</sub>, BaCO<sub>3</sub>, CuO を使い、組成が Pr<sub>2</sub>Ba<sub>4</sub>Cu<sub>7</sub>O<sub>15-δ</sub> と Pr<sub>1.95</sub>Ba<sub>4</sub>Cu<sub>7</sub>O<sub>15-δ</sub> になるように秤量した。原料に KOH を入れ大気中で 230 °C で加熱し、混合した。水に溶かして KOH を除去し、乾燥させた後、大気中で 600 °C ~880 °C で仮焼した。その後、酸素圧 0.54 MPa の条件下で 950 °C で焼成した。得られた試料は、X 線回折により相の同定を行い、電気抵抗率を測定した。

【結果と考察】 Fig. 1 に二つの試料の X 線回折の結果を示す。いずれの試料も主相は Pr247 であった。Pr-2.5% の *c* 軸は 50.355 Å であり、Pr±0% の 50.692 Å と比べて短い。*c* 軸長は、酸素組成に強く依存することが知られており、δ が大きいほど長くなる。このことから、Pr-2.5% の方が酸素欠損量は小さいと考えら

れる。

Fig. 2 に電気抵抗率の温度依存性を示す。Pr±0% は全温度領域で単調に減少した。一方、Pr-2.5% では 140 K 付近で極大を示し、その後単調に減少した。これらは、過去の報告[1]の酸素欠損試料と as-sintered 試料の振る舞いとそれぞれ一致している。二つの試料の電気抵抗率の振る舞いは *c* 軸長から予測される酸素欠損と定性的に一致することがわかった。このように、Pr 組成によって同じ合成条件で異なる酸素組成を導くことが示唆される。

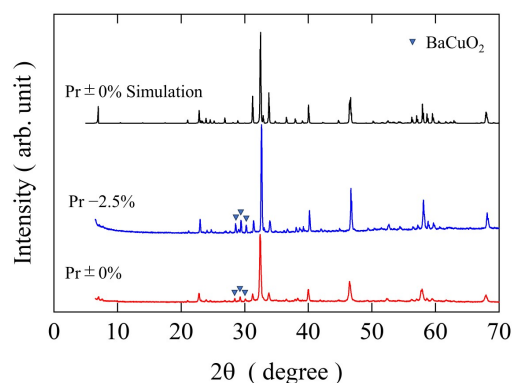


Fig. 1. X-ray diffraction patterns of Pr±0% and Pr-2.5% .

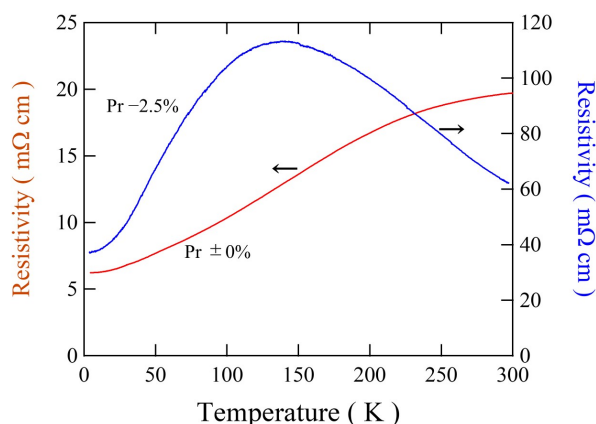


Fig. 2. Temperature dependence of the electrical resistivity of the Pr±0% and Pr-2.5% .

[1]Yuh Yamada, A Matsushita, Physica C 426-431 (2005) 213-219.



# アルミニウム鑄包み法による $\text{CaKFe}_4\text{As}_4$ 超電導バルクの 金属被覆処理と静水圧下熱処理

Hydrostatic pressure treatment of  $\text{CaKFe}_4\text{As}_4$  bulk  
fabricated using insert casting method

イムラ・ジャパン<sup>1</sup>, 産総研<sup>2</sup>

○川島健司<sup>1</sup>, 神谷良久<sup>1</sup>, 石田茂之<sup>2</sup>, 荻野拓<sup>2</sup>, 鬼頭聖<sup>2</sup>, 伊豫彰<sup>2</sup>, 永崎洋<sup>2</sup>, 吉田良行<sup>2</sup>

IMRA JAPAN Co., Ltd.<sup>1</sup>, AIST<sup>2</sup>,

○Kenji Kawashima<sup>1</sup>, Yoshihisa Kamiya<sup>1</sup>, Shigeyuki Ishida<sup>2</sup>, Hiraku Ogino<sup>2</sup>, Hijiri Kito<sup>2</sup>, Akira Iyo<sup>2</sup>,  
Hiroshi Eisaki<sup>2</sup>, Yoshiyuki Yoshida<sup>2</sup>

E-mail: kenji.kawashima@imra-japan.com

鉄系超電導体:  $\text{CaKFe}_4\text{As}_4$  ( $\text{CaK1144}$ ) は、構造中の積層欠陥が磁束ピン止めに寄与することがわかっている [1]。上記特性が超電導バルク磁石に有利であると推測し、 $\text{CaK1144}$  多結晶バルク ( $\text{CaK1144}$  超電導バルク) 開発を進めてきた。放電プラズマ焼結 (Spark Plasma Sintering, SPS) や熱間加工手法で作製した  $\text{CaK1144}$  超電導バルクの特性を報告してきたが [2-5]、作製バルク内部組織はマイクロクラックが多数存在し、臨界電流密度等の超電導特性を抑制していると推測された。今回、 $\text{CaK1144}$  超電導バルクの特性向上につなげるべく、組織緻密化について検討を行った。

先行研究で、SUS パイプ等に封止後に熱間等方加圧 (Hot Isostatic Pressing (HIP)) 処理が超電導バルク特性向上に有効と報告されている [6]。熱膨張効果の違いでバルク組織緻密化が增強されたと推測されるが、同手法は SUS パイプ封止に高い技術が必要となる。今回、上記封止処理と同等の効果をより簡易に行うため、SPS 焼結時によるアルミニウム (Al) 鑄包み手法の導入を試み、Al 鑄包み後のバルクに対し HIP 処理を行うことで  $\text{CaK1144}$  超電導バルクの内部組織緻密化について検証を進めた。検証の結果、Al 鑄包み後バルク処理の有無により HIP 処理後試料の内部組織が異なること、また、捕捉磁場等の超電導特性にも影響があることがわかった。当日は、上記内容の詳細について報告する。



Fig. 1 Al 鑄包み手法による金属被覆処理バルク (SPS 黒鉛型付)

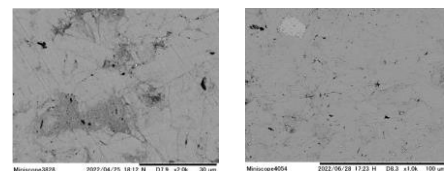


Fig.2 HIP 処理後試料の内部組織観察図(左図: 金属被覆なし, 右図: 金属被覆あり)

[1] S. Ishida, *et al.* npj Quantum Mater. 4, (2019) 27,

[2] S. Ishida, *et al.* Supercond. Sci. Technol. 33, (2020) 094005

[3] S. Ishida, *et al.* J. Alloys Compd. 916 (2023) 171093

[4] 川島健司, 第 84 回応用物理学会秋季学術講演会, 20a-P03-17

[5] 石田茂之, 第 84 回応用物理学会秋季学術講演会, 20a-P03-18

[6] A. Yamamoto *et al.*, J. Cryo. Super. Soc. Jpn. 52(6) (2017) 2-8

# 磁性ジョセフソン接合障壁層のための窒化ニッケル薄膜の作製

## Preparation of $\text{NiN}_x$ thin films for barriers in magnetic Josephson junctions

大同大工 °赤池 宏之, 梶田 一真, 野村 伊吹

Daido Univ., °Hiroyuki Akaike, Kazuma Kajita, Ibuki Nomura

E-mail: h-akaike@daido-it.ac.jp

### 1. はじめに

磁性ジョセフソン $\pi$ 接合は、Nb/ $\text{AlO}_x$ /Nb 接合などの0接合と違い基底状態で位相シフト機能を有することを特長とし、各種応用が提案されている[1,2]。この $\pi$ 接合の作製では、磁性障壁層として、PdNi [3]やNi[4]が検討されている。我々は、これまでに組成比制御が不要なNi薄膜を磁性障壁層として用いることを想定し、Ni薄膜特性について報告してきた[5,6]。抵抗率が大きいものほど異方性磁界が小さくなる傾向が見られたものの、室温では磁化が残っており、キュリー点が室温より高いことを示していた。今回、磁気的特性をさらに弱めるべく、窒化ニッケル( $\text{NiN}_x$ )を作製したので報告する。

### 2. 実験及び考察

$\text{NiN}_x$ 薄膜の作製には、反応性RFマグネトロンスパッタ法を用いた。到達真空度は、 $2 \times 10^{-4}$  Pa以下である。Niターゲットを用い、Ar流量10 sccm、全圧3.0 Paの条件で、 $\text{N}_2$ 流量を0-0.6 sccmまで変化させて、ガラス基板上に室温成膜した。膜厚30 nmの薄膜を成膜後、試料によっては保護膜として50 nm厚の $\text{SiO}_2$ を堆積させた。線幅100  $\mu\text{m}$ 、長さ1000  $\mu\text{m}$ のホール素子を作製し、抵抗率および異常ホール効果によるホール電圧-外部印加磁場依存性を評価した。

図1に抵抗率の $\text{N}_2$ 流量依存性を示す。 $\text{N}_2$ 流量の増加とともに、抵抗率は上昇し、200  $\mu\Omega\text{cm}$ 程度に達した。図2に保護膜有の試料に対する異常ホール効果の測定結果を示す。横軸は印加磁場、縦軸はホール抵抗率である。印加磁場0の時に有限のホール抵抗率を示しているが、これは素子の電圧測定用電極の非対称性による。 $\text{N}_2$ ガスのわずかの添加により、磁化の効果がほとんど見えなくなることが分かった。また、 $\text{N}_2$ 流量0.4 sccm以上では、抵抗率が磁場にわずかに依存するものの、ほとんど同じ特性を示した。

**謝辞** 本研究は、JSPS 科研費 22K04226 の助成を受けたものである。

**参考文献** [1]. T. Kamiya et al: IEICE Trans. Electron., Vol. E-101-C (2018) 385. [2]. Y. Yamanashi et al: Supercond. Sci. Technol. Vol. 31 (2018) 105003. [3]. H. Ito et al.: Appl. Phys. Express 10, 033101 (2017). [4]. S. Tolpygo et al.: IEEE Trans. Appl. Supercond., Vol. 29 (2019) 1101208. [5]. 赤池 他, 2023 春応物 16a-PB03-10. [6]. 赤池 他, 2024 春応物 22a-P01-15.

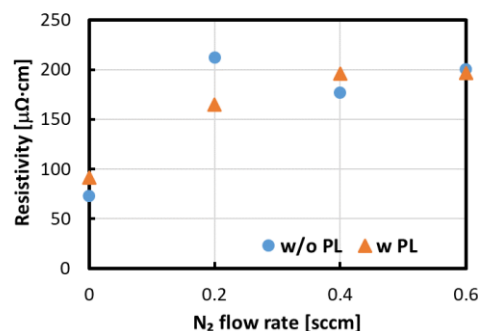


Fig.1. Resistivity dependence on  $\text{N}_2$  flow rate for  $\text{NiN}_x$  films.

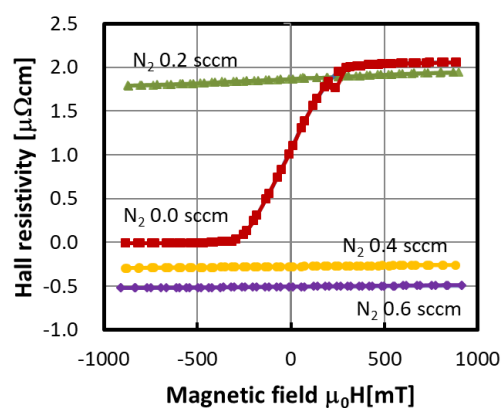


Fig.2. Anomalous Hall effect on 30 nm  $\text{NiN}_x$  films.

## 超伝導量子ビット応用に向けた 立方晶系 Al/AlN/Al/TiN のヘテロエピタキシャル成長

### Hetero-epitaxial Growth of Cubic Al/AlN/Al/TiN for Superconducting Qubits

富士通<sup>1</sup>, ○山口 淳一<sup>1</sup>, 林 賢二郎<sup>1</sup>, 近藤 大雄<sup>1</sup>, 土肥 義康<sup>1</sup>, 佐藤 信太郎<sup>1</sup>

Fujitsu Limited<sup>1</sup>, °J. Yamaguchi<sup>1</sup>, K. Hayashi<sup>1</sup>, D. Kondo<sup>1</sup>, Y. Doi<sup>1</sup>, and S. Sato<sup>1</sup>

E-mail: yamaguchi.j@fujitsu.com

巨視的量子系の超伝導回路からなる超伝導量子ビットは、高い拡張性と制御性を備えており、実用的な大規模量子計算を可能にする有力な候補素子の一つである。超伝導量子ビットのジョセフソン接合 (JJ) には多結晶 Al で非晶質 AlO<sub>x</sub> を挟んだ三層膜が広く利用されているが、それらの結晶性の乱れに起因する二準位系欠陥が量子ビットのコヒーレンス時間の短縮やゲート忠実度の低下を招くと懸念されている[1]。そこで本研究では、二準位系欠陥を抑制して量子ビットの特性向上を図ることを目的に、その構成積層膜のヘテロエピタキシャル成長を試みた。図(a)に積層膜の構成を示す。*in situ* PLD/MBE により、Si(100)基板上に全て立方晶系の TiN (50–100 nm)、次いで Al(50 nm)/AlN(1.5 nm)/Al(50 nm)の三層膜を順次成膜した (窒化膜は PLD、Al は MEB により成膜)。図(b)は各層成膜後の *in situ* RHEED 像である。Al/AlN/Al/TiN は、各表面の正方格子に由来するストリークが観測されており、エピタキシャル成長しているのが分かる。また、図(c)の Al/AlN/Al 断面部の TEM 像では正方格子が整然と配列しており、良好な JJ 界面が形成されているのが確認できる。Al を Si(100)基板上に直接エピタキシャル成長することは両者の格子定数の差が大きく困難だが、TiN が Al–Si 格子不整合緩和のバッファ層の役割を担い[2]、Al/AlN/Al のエピタキシャル成長を実現している。発表では、成膜条件や物性評価の詳細に加え、JJ 素子作製プロセス (Al の自然酸化を防止する保護膜形成や TiN の超伝導線路への適用) についても議論する。

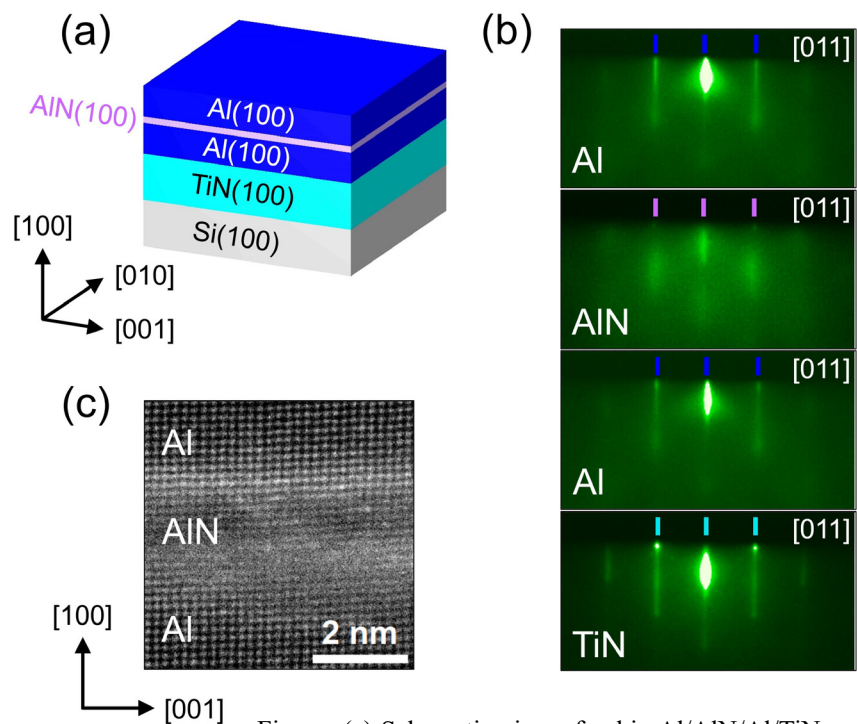


Figure: (a) Schematic view of cubic Al/AlN/Al/TiN on the Si(100) substrate. (b) *in situ* RHEED images of respective layers taken along the Si[011] azimuth. (c) Cross-sectional TEM image of the Al/AlN/Al junction.

[1] J. Lisenfeld *et al.*, npj Quantum Inf. **5**, 105 (2019).

[2] S. Kim *et al.*, Commun Mater. **2**, 98 (2021).

# REBCO-CC の中間層に向けた KOH フラックス $(\text{Pr}_{1-y}\text{RE}_y)_{1-x}\text{Ca}_x\text{CoO}_3$ 膜の金属-絶縁体転移特性 Metal-Insulator Transition Property of KOH flux- $(\text{Pr}_{1-y}\text{RE}_y)_{1-x}\text{Ca}_x\text{CoO}_3$ Films for Buffer Layer of REBCO-CC

島根大<sup>1</sup>, 中部大<sup>2</sup>, 名古屋大<sup>3</sup>, 愛工大<sup>4</sup>

○船木 修平<sup>1</sup>, 山本 樹輝<sup>1</sup>, 山田 容士<sup>1</sup>, 田橋 正浩<sup>2</sup>, 吉田 隆<sup>3</sup>, 一野 祐亮<sup>4</sup>

Shimane Univ.<sup>1</sup>, Chubu Univ.<sup>2</sup>, Nagoya Univ.<sup>3</sup>, Aichi Inst. of Technol.<sup>4</sup>, ○Shuhei Funaki<sup>1</sup>,

Itsuki Yamamoto<sup>1</sup>, Yasuji Yamada<sup>1</sup>, Masahiro Tahashi<sup>2</sup>, Yutaka Yoshida<sup>3</sup>, Yusuke Ichino<sup>4</sup>

E-mail: s-funaki@riko.shimane-u.ac.jp

【背景】近年, BSCCO を用いた 1G HTS コイルのターン間に  $\text{V}_2\text{O}_3$  を用いることで, 金属-絶縁体(M-I)転移現象によるクエンチ保護と励磁遅延解消が実証された[1]. 一方, REBCO-CC は絶縁性の中間層があるため REBCO 層側からしか転流が生じず, この手法によるクエンチ保護は容易ではない. また,  $\text{V}_2\text{O}_3$  は M-I 転移温度が 150 K 程度であり, REBCO の  $T_c$  に比べ高いこともクエンチ保護を困難としている.

これまで我々は, REBCO-CC のクエンチ時に金属基材に転流させるための中間層として, p 型導電性  $\text{LaNiO}_3$  をスパッタリング法や低温液相成長(KOH フラックス)法で成膜してきた[2, 3]. また, 金属組成で M-I 転移温度を制御可能な $(\text{Pr}_{1-y}\text{RE}_y)_{1-x}\text{Ca}_x\text{CoO}_3$  材料に着目し, 固相成長や気相成長法による作製も試みてきた[4]. 本研究では, M-I 転移材料を REBCO-CC の中間層へ応用することを目的として,  $(\text{Pr}_{1-y}\text{RE}_y)_{1-x}\text{Ca}_x\text{CoO}_3$  膜を KOH フラックス法により作製し, その作製条件と結晶相, 組成, 電気特性の関係を検討した.

【実験方法】出発原料に  $\text{Pr}_6\text{O}_{11}$ ,  $\text{Sm}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ,  $\text{Co}_3\text{O}_4$  を用いて, 金属モル比が  $\text{Pr} : \text{Sm} : \text{Ca} : \text{Co} = 0.4(1-y) : 0.4y : 1.2 : 1$  ( $y = 0 \sim 0.5$ )となるように秤量, 混合した. 原料混合粉と  $\text{LaAlO}_3$

(100)基板, KOH 顆粒をアルミナ製坩堝に入れ, 大気中で  $700^\circ\text{C} \cdot 12 \text{ h}$  の熱処理を行うことで成膜した.

【結果および考察】図に, 異なる原料 Sm 比で  $\text{LaAlO}_3$  基板上に作製した膜の電気抵抗率の温度依存性を示す.  $y = 0.3$  以上の膜では,  $y = 0 \sim 0.2$  と比較して 100 ~ 200 K において降温に対する電気抵抗率の上昇が急激になっており, M-I 転移が観測された. さらに,  $y = 0.3$  から 0.5 にかけて M-I 転移温度が高くなった. このことから, KOH フラックス法を用いることで M-I 転移特性を有する $(\text{Pr}_{1-y}\text{RE}_y)_{1-x}\text{Ca}_x\text{CoO}_3$  膜の作製に成功したと言える.

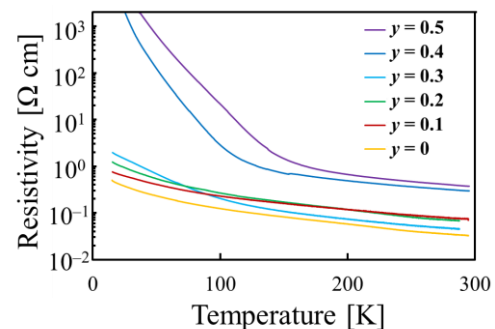


Fig. R-T curves of films synthesized on  $\text{LaAlO}_3$  prepared with stating material ratios of  $\text{Pr} : \text{Sm} : \text{Ca} : \text{Co} = 0.4(1-y) : 0.4y : 1.2 : 1$  ( $y = 0 \sim 0.5$ )

## 【参考文献】

- [1] H.-W Kim et al., IEEE Trans. Appl. Supercond. 28(3) (2018) 4600205
- [2] 船木 他, 第 68 回応用物理学会春季学術講演会 講演予稿集 (2021) 17a-Z21-1
- [3] 豊嶋 他, 第 70 回応用物理学会春季学術講演会 講演予稿集 (2023) 16a-PB03-7
- [4] M. Tahashi et al., Jpn. J. Appl. Phys. 61(1) (2021) 018003



# PLD 法を用いた $\text{LaNiO}_3$ 導電性膜上への YBCO 超伝導エピタキシャル薄膜の作製と評価

## Fabrication and Characterization of Epitaxial YBCO superconducting thin films grown on $\text{LaNiO}_3$ conductive buffer layer by pulsed laser deposition method

愛知工大院, ° (M2)坂本龍哉、田岡紀之、清家 善之、森 竜雄、一野 祐亮

Aichi Inst. of Technol. , °R. Sakamoto, N. Taoka, Y. Seike , T. Mori , Y. Ichino

E-mail: [y23708vv@aitech.ac.jp](mailto:y23708vv@aitech.ac.jp)

### 1. はじめに

超伝導線材は非常に高価なためコストの低減が必要である。この問題点を改善する手段として、導電性酸化物を配向  $\text{Ni}$  基板上にエピタキシャル成長 (エピ成長) させ、その上に YBCO をエピ成長させることで安定化層を省き超伝導線材の構造を単純化できる。そのため、低コスト化につながると考えられる。これまでに我々は、 $\text{GdNiO}_3$  と  $\text{LaNiO}_3$  を混合した  $\text{RENiO}_3$  を中間層とし積層膜を作製、評価してきた。しかし、中間層が超伝導層の  $T_c$  を下げることが示唆された。そこで本研究では、中間層として先行研究において報告されている  $\text{LaNiO}_3$  (LNO) に着目し、パルスレーザー蒸着 (PLD) 法を用いて成膜し、LNO がエピ成長する条件を探索した[1,2]。その後、LNO エピ膜上に YBCO を成膜しエピ成長する条件を探索した。

### 2. 実験方法

本研究では、LNO、YBCO ターゲットを用意し、PLD 法を用いて、成膜時間 15 分~60 分、ヒーター温度を  $600^\circ\text{C}$ ~ $900^\circ\text{C}$ 、酸素圧力 50 Pa とし  $\text{SrTiO}_3(100)$  単結晶基板上に LNO 中間層を成膜した。また、作製した LNO 中間層上に成膜時間 60 分、ヒーター温度を  $850^\circ\text{C}$ ~ $950^\circ\text{C}$ 、酸素圧力 23 Pa で YBCO を成膜した。作製した薄膜の評価は、X 線回折 (XRD)、抵抗率の温度依存性 (R-T) 測定にて行った。

### 3. 実験結果

LNO 中間層成膜時のヒーター温度を  $900^\circ\text{C}$ 、酸素圧力を 50 Pa と固定し成膜時間を 15~60 分と変化させ、さらにその上にヒーター温度  $900^\circ\text{C}$ 、酸素圧力 23 Pa、成膜時間 60 分の条件で YBCO を成膜し積層膜を作製した。Fig. 1 より中間層の成膜時間を短くしていくほど、XRD における YBCO 103 ピークの相対強度が低くなる傾向がわかった。これは、LNO の成膜時間が長いほど中間層の膜厚が厚くなり、中間層上に成膜される YBCO 膜への熱エネルギーが伝わりにくくなることで、YBCO のエピ成長が阻害され多結晶膜が成長している

か、LNO 表面の粗さが影響していることを示唆している。また、Fig. 2 の R-T 測定結果より LNO 成膜時間 15 分の条件では 82 K で超伝導転移することも分かった。

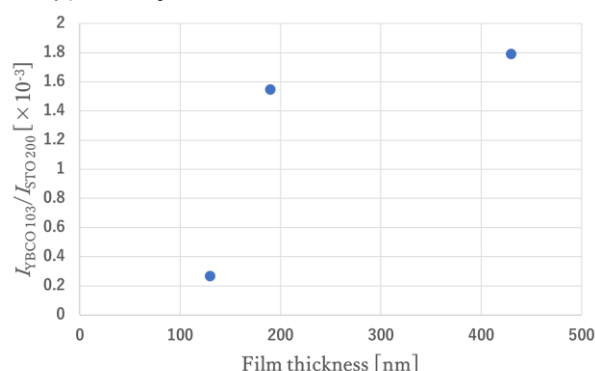


Fig. 1. Relative intensity of YBCO 103 peak to STO 200 vs. film thickness of a LNO layer.

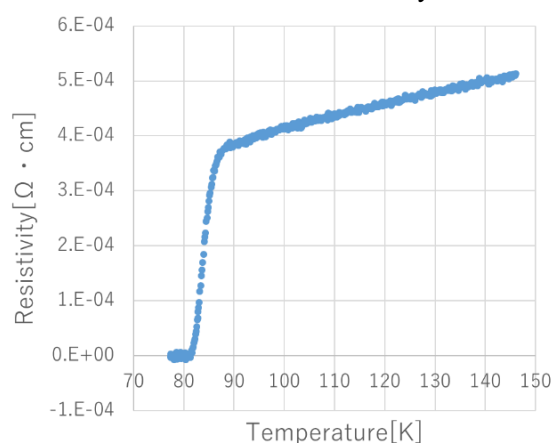


Fig. 2. Resistivity of YBCO layer depending on measurement temperature.

### 4. 謝辞

本研究の一部は JSPS 科研費 20H02682 の助成を受けて実施した。試料の X 線回折測定には名古屋大学吉田隆研究室の装置を利用したので、感謝します。

### 参考文献

- [1] M. Satyalakshmi *et al.*, *Appl. Phys. Lett.* **62** (1993) 1233.
- [2] M. S. Hegde *et al.*, *J. Mater. Res.* **9** (1994) 898.

# フッ素フリーMOD法を用いた GdBCO 薄膜作製における MOD 溶液の状態依存性

## State dependence of MOD solution in GdBCO-thin-film fabrication using FF-MOD method

静大院総合<sup>1</sup>, 静大イノベーション社会連携機構<sup>2</sup>

○(M1)山本 涼介<sup>1</sup>, 喜多 隆介<sup>2</sup>, 武田 正典<sup>1</sup>

Shizuoka Univ.<sup>1</sup>, Shizuoka Univ. Organization for Innovation and Social Collaboration.<sup>2</sup>

○Ryosuke Yamamoto<sup>1</sup>, Ryusuke Kita<sup>2</sup>, Masanori Takeda<sup>1</sup>

E-mail: yamamoto.ryosuke.19@shizuoka.ac.jp

有機金属塗布法 (Metal Organic Deposition:MOD 法)は、ナノ構造制御や磁場中特性では PLD 法より劣るが、非真空プロセスで設備コストが安いこと、大面積基板上に原料を塗布・熱処理する比較的簡易な方法であるため、量産化に適したプロセスとして期待されている。本研究で使用しているフッ素フリーMOD法(FF-MOD 法)は、主に使用されている TFA-MOD 法と比べてフッ素を使用していないため、低コスト、環境負荷が少ない、成膜時にフッ素を除去する必要がなくプロセスが簡単であるという利点がある。しかし、FF-MOD 法で使用する前駆体溶液は時間の経過とともに硬化するという問題点があり、これに関する報告がない。そこで我々は FF-MOD 法の溶液の経時変化に関する研究を行った。

前駆体溶液を混合してからの経過時間と結晶成長の関係を調べる実験を行った。まず始めに、混合した溶液を 9600 $\mu$ l 用意し、1200 $\mu$ l ずつ 8 当分してその中の 1 本を使用して薄膜を作製する。その後、1 週間経過する度に 1 本の溶液を使用して薄膜を作製した。この時、焼成は 810 $^{\circ}$ C, 830 $^{\circ}$ C, 850 $^{\circ}$ C, 870 $^{\circ}$ C の 4 パターンで行った。

図 1 に 830 $^{\circ}$ C で焼成を行なった薄膜の SEM 画像を示す。図 1 内の数字は溶液を作製してからの経過週間を表しており、例えば⑩は溶

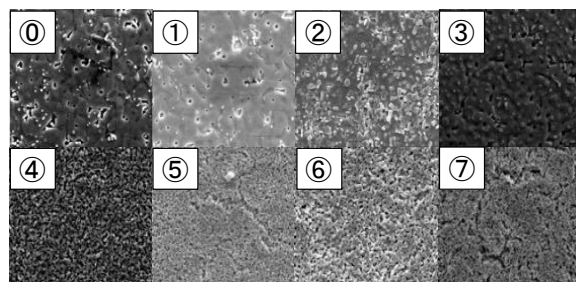


Fig.1 Surface microstructure of thin films

液作製直後に作製した薄膜、①は溶液作製から 1 週間後に作製した薄膜を意味する。図 1 より、①と⑩は十分な結晶成長が見られ空隙が少ない、②と③は結晶が成長しているが空隙が多い、④~⑦は空隙や亀裂が多く結晶成長が不十分であることがわかる。つまり、溶液を置いておく時間が長いほど結晶成長が不十分になっていくことを示している。図 2 に、図 1 の薄膜を  $\theta$ -2 $\theta$  測定した結果を示す。図 2 の縦軸は対数目盛になっている。図 2 内の GdBCO(006)のピークの高さを比較すると、①~③は LAO(002)とほぼ同じ高さになっているが、④~⑦にかけてピークが低くなっていることがわかる。また、他のピークについても同様のことが言える。以上のことより溶液の経時変化が薄膜の結晶成長度に影響を与えていることがわかる。詳細は当日報告する。

【謝辞】本研究の一部は、科研費 23K03955 の助成により実施した。

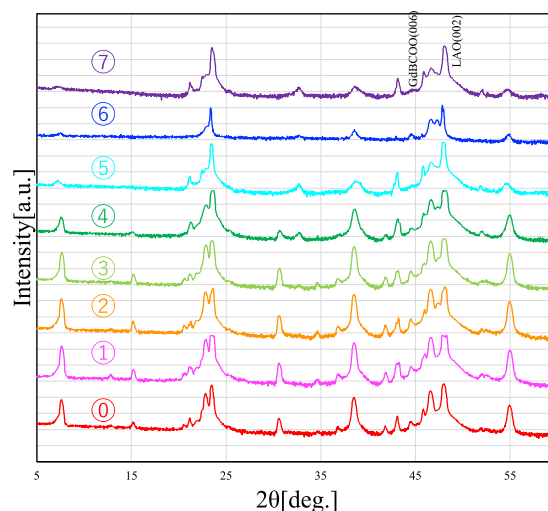


Fig.2  $\theta$ -2 $\theta$  measurement results for each thin film

銅酸化物超伝導体  $\text{GdBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$  薄膜の電気抵抗の異方性

## Anisotropy of electrical resistance in copper oxide superconducting

 $\text{GdBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$  thin films日大<sup>1</sup>, 名大院工<sup>2</sup>, 名大 RCCME<sup>3</sup>, <sup>○</sup>(M1C)守永 昂世<sup>1</sup>, 畑野 敬史<sup>2</sup>,生田 博志<sup>2,3</sup>, 飯田 和昌<sup>1</sup>Nihon Univ.<sup>1</sup>, Dept. Mater. Phys., Nagoya Univ.<sup>2</sup>, RCCME Nagoya Univ.<sup>3</sup>, <sup>○</sup>(M1C) K. Morinaga<sup>1</sup>,T. Hatano<sup>2</sup>, H. Ikuta<sup>2,3</sup>, K. Iida<sup>1</sup>

E-mail: ciko24014@g.nihon-u.ac.jp

銅酸化物超伝導体  $\text{GdBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$  (以下、GdBCO とする) は、異方的な結晶構造のため、電気輸送特性に強い異方性があらわれる。薄膜の電気抵抗の異方性は[001]が[100]方向に傾斜したオフ基板の上に薄膜を成長させ、調べられている[1]。しかし、基板のオフ角  $\alpha$  を系統的に変化させ、異方性を調べた報告は少ない。そこで、本研究ではGdBCO 薄膜をオフ角  $\alpha$  ( $0^\circ$ ,  $1.5^\circ$ ,  $3^\circ$ ,  $6^\circ$ ,  $10^\circ$ ) を有する  $\text{SrTiO}_3$  (001) 基板の上に成長させ、電気抵抗の異方性を調べたので報告する。

GdBCO 薄膜は KrF エキシマレーザーを用いたパルスレーザー堆積(PLD)法により成膜した。成膜温度、雰囲気は、 $750 \sim 790^\circ\text{C}$ 、 $p\text{O}_2 = 40 \text{ Pa}$  とした。成膜後、薄膜をチャンバーから取り出し、管状炉にて  $p\text{O}_2 = 1 \text{ atm}$  下で  $400^\circ\text{C}$ 、3 時間、酸素アニールを行った。その後、レーザーカッターを用いて  $ab$  面内に平行な方向と、それに垂直な方向に細線を加工した。薄膜の構造解析には X 線回折(XRD)を用いた。

Fig. 1 に GdBCO 薄膜の XRD パターンを示す。また図中に、005 反射の  $\omega$ -scan から決定した GdBCO 薄膜のオフ角を示す。いずれの薄膜も基板のオフ角と同程度であり、また  $c$  軸配向しているのがわかる。Fig. 2 に  $\alpha = 0^\circ$ ,  $1.5^\circ$ ,  $10^\circ$  の薄膜の  $ab$  面内に平行な方向と、それに垂直な方向の抵抗 (それぞれ、 $R_{ab}$ ,  $R_T$  とする) から求めた  $c$  軸方向の抵抗 ( $R_c$ ) の温度依存性を示す。なお、 $c$  軸方向の抵抗は  $R_c = (R_T - R_{ab}\cos^2\alpha)/\sin^2\alpha$  を使って求めた。いずれの薄膜も、ゼロ抵抗は  $90 \sim 93 \text{ K}$  で観測された。常伝導及び超伝導状態における異方性の詳細な議論については当日、報告する。

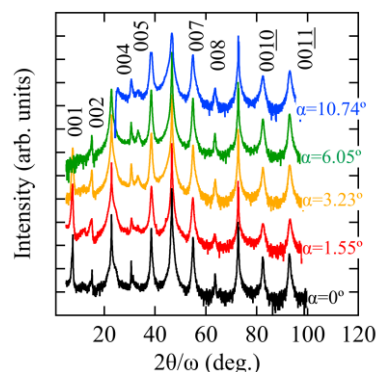


Fig. 1 X-ray diffraction spectrum of  $\text{GdBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$  grown on vicinal  $\text{SrTiO}_3$  substrates.

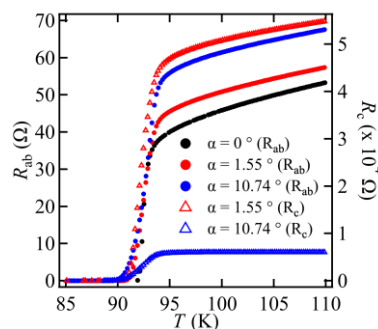


Fig. 2 The temperature dependence of the  $ab$ -plane and  $c$ -axis resistance for  $\text{GdBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$  grown on vicinal  $\text{SrTiO}_3$  substrates with  $\alpha = 0^\circ$ ,  $1.5^\circ$  and  $10^\circ$ . The open and solid symbols represent  $R_c$  and  $R_{ab}$ , respectively.

[1] G. Heine, W. Lang, R. Rössler, J. D. Pedarnig, *Nanomaterials* **11**, 675 (2021).

# Bi 系酸化物高温超伝導体 $\text{Bi}_{1.75}\text{Pb}_{0.35}\text{Sr}_{1.9}\text{Ca}_x\text{Cu}_{x+1}\text{O}_y$ ( $x \geq 2$ ) の合成に関する研究

## Study on Synthesis of Bi-based Oxide High- $T_c$ Superconductors $\text{Bi}_{1.75}\text{Pb}_{0.35}\text{Sr}_{1.9}\text{Ca}_x\text{Cu}_{x+1}\text{O}_y$ ( $x \geq 2$ )

1.同志社大, 2.東京理科大, 3.物材研

○大森峻介<sup>1</sup>, Marina Mendoza<sup>1</sup>, 鄭雨萌<sup>1,2</sup>, 堺健司<sup>1</sup>, 佐藤祐喜<sup>1</sup>, 吉門進三<sup>1</sup>, 松本凌<sup>3</sup>, 高野義彦<sup>3</sup>

1. Doshisha Univ., 2. Tokyo University of Science, 3. NIMS

○S. Omori<sup>1</sup>, M. Mendoza<sup>1</sup>, Y. Zheng<sup>1,2</sup>, K. Sakai<sup>1</sup>, Y. Sato<sup>1</sup>, S. Yoshikado<sup>1</sup>, R. Matsumoto<sup>3</sup>, Y. Takano<sup>3</sup>

E-mail: ctwk0333@mail4.doshisha.ac.jp

【はじめに】Bi 系酸化物超伝導体  $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{Ca}_2\text{Cu}_3\text{O}_y$  (Bi-2223) は 110K という高い超伝導転移温度( $T_c$ )を示し、液体窒素(沸点 77K)冷却により超伝導を発現可能である。さらに、臨界磁場が高く、電磁石や送電用線材への応用が期待されている。現在、焼結法で Bi-2223 を作製するためには Bi サイトに対する Pb 置換が有効な方法でよく用いられている。しかし Pb は環境負荷が大きいため、Pb の組成を現状より減じたり、また使用せずに良好な超伝導特性を有する Bi-2223 を作製することは困難である。本研究では、Pb の使用量を減らす方法として、まず乱れの少ない  $\text{Cu}_2\text{O}$  層の形成に最適な Bi, Pb, Sr によるテンプレートを形成し、その間に乱れの少ない  $\text{Cu}_2\text{O}$  層を Bi-2223 における 3 層からさらに層数を増やすことにより、Pb の使用量を相対的に減らすことを試みた。今回は、従来良好な超伝導特性が得られている Bi, Pb, Sr の組成を一定にして Ca と Cu の組成を  $\text{Bi}_{1.75}\text{Pb}_{0.35}\text{Sr}_{1.9}\text{Ca}_x\text{Cu}_{x+1}$  ( $x \geq 2$ ) に従って変化させた試料を作製し、結晶構造、超伝導特性を評価したので報告する。

【実験方法】焼成時の組成の均一性を得るために出発原料として炭酸塩を使用せずに、すべて酸化物とした。Bi<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, PbO, SrO, CaO, CuO を組成比  $\text{Bi}_{1.75}\text{Pb}_{0.35}\text{Sr}_{1.9}\text{Ca}_x\text{Cu}_{x+1}$  とした。試料名を Bi-22x(x+1) とする。例えば、 $x=4$  であれば Bi-2245 となる。混合後、一軸圧縮成型してペレット作製し、Pt 板上、空気中にて 840°C で 24h の仮焼成した。粉碎後再び一軸圧縮成型し、種々の温度・時間で本焼成を行い、一旦冷却後、種々の温度でポストアニリングを行った。X 線回折 (XRD) による結晶構造解析、抵抗-温度( $R-T$ )特性、磁化率-温度( $M-T$ )特性の測定および走査型電子顕微鏡・エネルギー分散型分光(SEM・EDS)による観察・分析を行った。

【実験結果・考察】Fig. 1 に、最適な焼成条件により得られた Bi-2223 および Bi-2245 の XRD パターンを示す。Bi-2245 についても、Bi-2223 と同様の良好な層状構造物質が得られることが分かった。Fig. 2 に、Fig. 1 で示された試料の  $R-T$  特性を示す。ほぼ同じ約 107K の超伝導転移温度とを示すことが分かった。これより、Bi, Pb, Sr の組成を一定にして、 $x \geq 3$  層以上の乱れの少ない  $\text{Cu}_2\text{O}$  層の形成が可能であること、さらには Pb の組成を相対的に小さくすることが可能であることが示唆された。現時点において、 $x=8$  までの試料において、同様な傾向を示すことが確認されている。なお、 $x \geq 5$  以上の試料についての結晶構造解析、 $R-T$  特性の結果については、発表当日に報告する予定である。

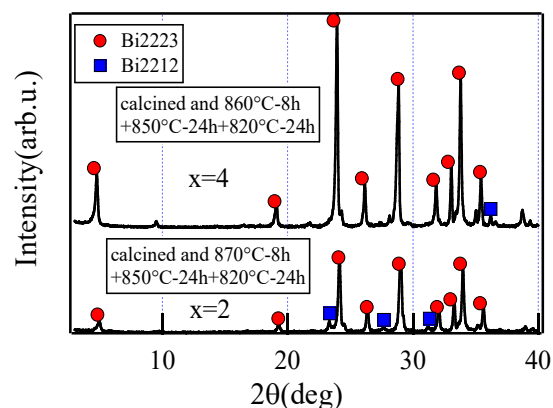


Fig. 1 XRD patterns for Bi-2223 and Bi-2245 annealed under optimum thermal condition.

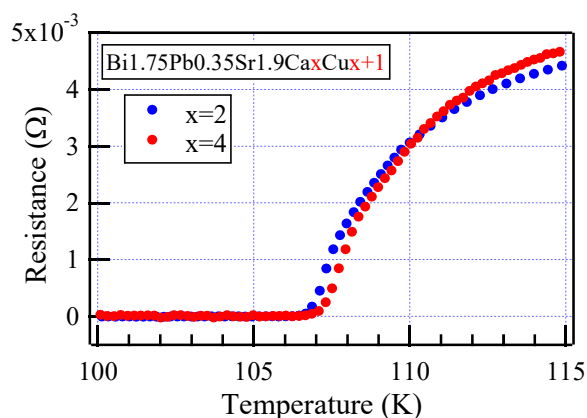


Fig. 2  $R-T$  characteristics for Bi-2223 and Bi-2245 annealed under optimum thermal condition.



## PLD 法におけるアブレーションプルームの モニタリングシステムの構築

### Construction of a monitoring system for ablation plume in the PLD method

愛工大<sup>1</sup>, 名大<sup>2</sup>, 九工大<sup>3</sup>, 電中研<sup>4</sup>, JST-CREST<sup>5</sup>, <sup>○</sup>松田 遼太郎<sup>1</sup>, 佐々 文彌<sup>1</sup>, 藤田 竜也<sup>1</sup>,  
田岡 紀之<sup>1</sup>, 清家 善之<sup>1</sup>, 森 竜雄<sup>1</sup>, 一野 祐亮<sup>1,5</sup>, 堀尾 恵一<sup>3,5</sup>, 一瀬 中<sup>4,5</sup>, 堀出 朋哉<sup>2,5</sup>,  
松本 要<sup>2,5</sup>, 吉田 隆<sup>2,5</sup>

Aichi Inst. of Technol.<sup>1</sup>, Nagoya Univ.<sup>2</sup>, Kyushu Inst. of Technol.<sup>3</sup>, CRIEPI<sup>4</sup>, JST-CREST<sup>5</sup>,  
R. Matsuda<sup>1</sup>, F. Sassa<sup>1</sup>, T. Fujita<sup>1</sup>, N. Taoka<sup>1</sup>, Y. Seike<sup>1</sup>, T. Mori<sup>1</sup>, Y. Ichino<sup>1,5</sup>, K. Horio<sup>3,5</sup>, A. Ichinose<sup>4,5</sup>,  
T. Horide<sup>2,5</sup>, K. Matsumoto<sup>2,5</sup>, Y. Yoshida<sup>2,5</sup>

E-mail: v24728vv@aitech.ac.jp

#### 1. はじめに

YBCO エピタキシャル薄膜の作製において Pulsed Laser Deposition(PLD) 法は有効な成膜手法の一つである。PLD 法では、ターゲット上にプルームと呼ばれる柱状のアブレーションプラズマ発光が観測される。アブレーション過程は光化学反応や熱励起過程が複雑に関与しており、レーザー光の波長やパワー密度により蒸発過程が異なる[1]。これにより同一の成膜条件においても安定した特性が得られにくいという課題がある。そこで再現性良く YBCO 薄膜の成膜が行えるようにすることを目標として、本研究ではデプスカメラによってプルームの色情報やサイズ情報をリアルタイムで収集する観察システム構築を行った。

#### 2. 実験方法

PLD 法を用いて YBCO 薄膜を作製し、成膜過程でのプルームをデプスカメラ(Intel 社, Realsense Depth Camera D405)により撮影した。その際にプルーム周囲の色情報とプルームサイズを逐次記録するよう python を用いたコードの開発を行った。基板温度を 900 °C、Nd:YAG レーザー(波長 266 nm、繰り返し周波数 10 Hz)のエネルギーを 20 mJ に固定し、酸素圧力を 10 分ごとに 100 mTorr、200 mTorr、400 mTorr と変化させて成膜した。プルームのサイズ計測は、デプスカメラから取得した三次元座標の情報をもとに、プルームの高さ、幅それぞれ最大値、最小値の点を認識し、その間の距離を求めることで行った。

#### 3. 結果と考察

Fig. 1 にそれぞれの酸素圧力で成膜した際のプルームの画像を示している。デプスカメラでプルームの形状を認識し、外接矩形が描かれていることが確認できる。その外接矩形は 200 mTorr と 400 mTorr のプルームは白色光に沿って描かれているが、100 mTorr のプルームは赤色光も捉えている。外接矩形は、カラー画像をグレースケール画像に変換した後、

二値化処理した情報によって描かれるためと考えられる。Fig. 2 にそれぞれの酸素圧力におけるプルームの形状の平均を示している。この結果から、酸素圧力の増加に伴いプルームの高さも幅も減少している様子をデプスカメラで記録されていることが確認できる。当日はレーザーエネルギーなど他の条件を変えた際のプルームのモニタリング結果や、このプログラムを用いたプルームの形状をフィードバック制御するシステムについても報告する予定である。



Fig. 1 Images of YBCO ablation plumes at different O<sub>2</sub> pressures.

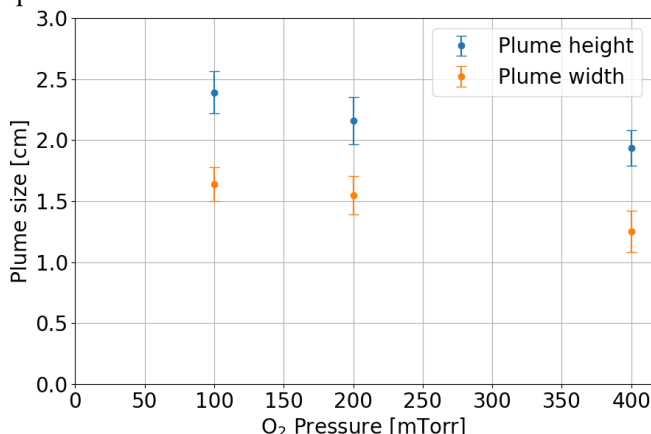


Fig. 2 YBCO ablation plume size at different O<sub>2</sub> pressures

謝辞  
本研究は JST、CREST、JPMJCR2336 の支援を受けたものである。また、観測システムの構築に関しては、名古屋大学電気工学専攻吉田研究室 山崎 春太郎氏から多くのご協力をいただいた。

#### 参考文献

[1] Laser Society (ed.) Laser Handbook (2nd edition)

Published April 25, 2005

## R 面サファイア基板上の Nb 薄膜の作製と特性評価

### Fabrication and evaluation of niobium thin films on R-plane sapphire substrates

防衛大 電気電子 ○(D)平間 友博, 石黒 康志, 立木 隆

National Defense Academy, °Tomohiro Hirama, Yasushi Ishiguro, Takashi Tachiki

E-mail: ed24007@nda.ac.jp

#### 【はじめに】

テラヘルツ帯で動作する高出力磁束フロー発振器 (FFO) を実現するために、FFO や高周波回路を構成する Nb 薄膜の特性向上を目指している。これまで FFO に用いられてきた Si 基板上に室温で成膜された Nb 薄膜は、多結晶で残留抵抗比 (RRR) が 3 前後と低い値を示していたが、800 °C に基板加熱された R 面サファイア基板上の Nb 薄膜では RRR は一桁高く、良好なマイクロ波伝送特性が得られることが報告されている[1]。これらの理由の一つとして、基板加熱により生じたサファイア基板表面上の原子ステップを起点に Nb 薄膜が面内配向して成長したことが挙げられるが[2]、詳細は未だ解っていない。本研究では、800 °C に加熱した R 面サファイア基板上の Nb 薄膜の結晶成長の詳細を探るために同薄膜を作製し、結晶性および電気特性を評価した。

#### 【実験および結果】

SiC ヒーターにより R 面サファイア基板を 800 °C に加熱しながら DC マグネトロンスパッタにより膜厚 100 nm の Nb 薄膜を成膜した。同薄膜の X 線回折の  $2\theta$ - $\theta$  特性は、Nb(200)ピークが支配的であったため一軸配向が確認された。また、基板の面内回転である  $\phi$ -scan において Nb(110)ピークがほぼ 4 回対称性を示すことから面内配向も確認された。次に、同条件で成膜した Nb 薄膜をフォトリソグラフィとウェットエッチングにより幅 20  $\mu\text{m}$ 、長さ 96  $\mu\text{m}$  のブリッジに加工した素子の抵抗率-温度 ( $\rho$ - $T$ ) 特性を Fig. 1 に示す。同図より臨界温度が 9.1 K、RRR ( $=\rho(300\text{ K})/\rho(10\text{ K})$ ) が約 34 であることが示された。これは、基板加熱により面内配向した Nb 薄膜の成長過程で不純物の取り込みが低減されたため高い RRR を示したものと考えられる。

本方法で得られた Nb 薄膜を用いて FFO を製作することによりその高出力化が期待される。

#### 【参考文献】

- [1] 野口卓他, 電子情報通信学会技術報告 SCE2018-22 (2018) pp. 31-36.
- [2] C. Delacour *et al.* Phys. Rev. B **83** (2011) 144504.

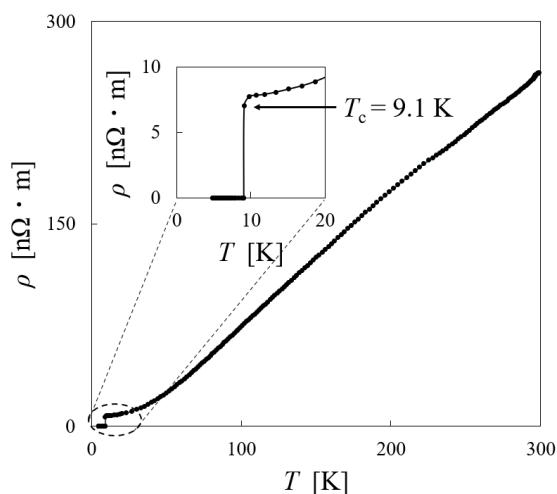


Fig. 1:  $\rho$ - $T$  characteristic of niobium thin film deposited on R-plane sapphire substrate at 800 °C

# YBCO 薄膜の初期結晶成長島の密度に着目した 結晶成長シミュレーションのパラメータ最適化

## Parameter optimization of crystal growth simulation

focusing on density of initial crystal growth islands in YBCO thin films.

愛工大<sup>1</sup>, 名大<sup>2</sup>, 九工大<sup>3</sup>, 電中研<sup>4</sup>, JST-CREST<sup>5</sup>, ° 奥村英二郎<sup>1</sup>, 内田陽人<sup>1</sup>, 簗拓己<sup>1</sup>,  
田岡紀之<sup>1</sup>, 清家善之<sup>1</sup>, 森竜雄<sup>1</sup>, 一野祐亮<sup>1,5</sup>, 堀尾恵一<sup>3,5</sup>, 一瀬中<sup>4,5</sup>, 堀出朋哉<sup>2,5</sup>,  
松本要<sup>2,5</sup>, 吉田隆<sup>2,5</sup>

Aichi Inst. of Technol.<sup>1</sup>, Nagoya Univ.<sup>2</sup>, Kyushu Inst. of Technol.<sup>3</sup>, CRIEPI<sup>4</sup>, JST-CREST<sup>5</sup>

°E. Okumura<sup>1</sup>, H. Uchida<sup>1</sup>, T. Takamura<sup>1</sup>, N. Taoka<sup>1</sup>, Y. Seike<sup>1</sup>, T. Mori<sup>1</sup>, Y. Ichino<sup>1,5</sup>, K. Horio<sup>3,5</sup>,

A. Ichinose<sup>4,5</sup>, T. Horde<sup>2,5</sup>, K. Matsumoto<sup>2,5</sup>, Y. Yoshida<sup>2,5</sup>

E-mail: v24714vv@aitech.ac.jp

### 1. はじめに

本研究では、YBCO 結晶成長シミュレーションの精度を高めるためにベイズ最適化を用い、実験結果とシミュレーション結果を比較し、実験結果を再現可能なシミュレーションのパラメータを探索することを目的としている。

### 2. シミュレーション方法

本研究のシミュレーションは、Monte Carlo 法を用いた結晶成長シミュレーションであり、参考文献[1]で用いられたシミュレーションを基本としている。島の数や島の大きさは YBCO 分子同士の結合エネルギー ( $E_{AA}$ ) や YBCO と基板の結合エネルギー ( $E_{AS}$ )、基板からの蒸発エネルギー ( $E_{des}$ ) により変化する。そのため、本研究では、 $E_{des}$  を 10000 K で固定し、ベイズ最適化を用いて 0~10000 K の範囲で  $E_{AA}$  と  $E_{AS}$  の最適化を行った。

### 3. 結果及び考察

図 1 に  $E_{AA}$  及び  $E_{AS}$  を 0~10000 K の範囲で変化した際のベイズ最適化の結果を示す。なお今回は

目的関数として次の評価関数  $f = -10(\frac{N_{sim}}{48^2} - \frac{N_{ex}}{(1.5 \times 10^3)^2})^2$  を用いた。ここで、 $N_{sim}$  はシミュレーションで得られた島の数、 $N_{ex}$  は実験で得られた島の数[2]である。この目的変数が最大となるパラメータを探索した。図より、現状で目的変数が最大のパラメータは  $E_{AA} = 1000$  K,  $E_{AS} = 7000$  K 付近であることが分かる。また、図 2 に横軸をベイズ最適化の繰り返し回数、縦軸を目的変数としたグラフを示す。このグラフから 19 回繰り返したが、目的変数が最大化される傾向にないことが分かった。この結果から、 $E_{AA}$  と  $E_{AS}$  のみを変動させても島の密度は大きく変わらない、あるいは、今回

用いた評価関数では目的変数が最大化されにくい可能性が考えられる。

当日は  $E_{AA}$  と  $E_{AS}$  と  $E_{des}$  の 3 変数でパラメータを変化させたベイズ最適化結果についても報告する。また別の評価関数の影響についても報告する予定である。

謝辞

本研究は JST、CREST、JPMJCR2336 の支援を受けたものである。また、AFM は名古屋大学吉田隆研究室の装置をお借りし、同研究室の奥村慎氏より使い方をご教授頂いた。

参考文献

- [1] Y. Ichino ら, JJAP 56 (2017) 015601, IEEE TAS 27 (2017) 7500304, IEEE TAS 31 (2021) 7500204.
- [2] J.H. Rector, J.M. Huijbregtse, R. Griessen, Physica C 305 (1998) 1–10.

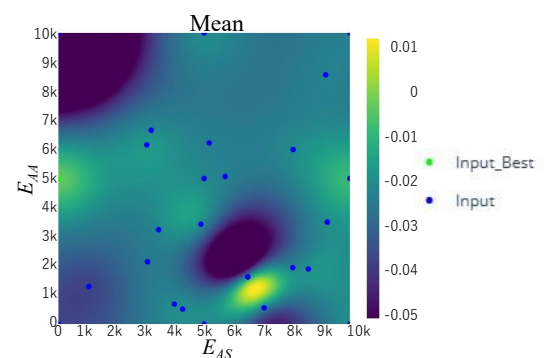


Fig. 1. Average of 19 iterations of Bayesian

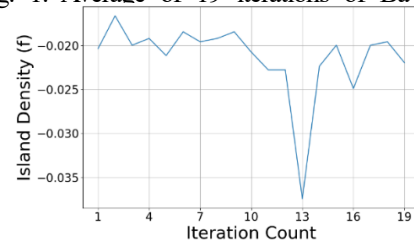


Fig. 2. Iteration count vs. Island density(f)

# 無線電力伝送用高温超伝導バルク共振器アンテナへの 導波器装荷による伝送効率評価

## Evaluation of transmission efficiency of HTS bulk resonator antenna with director for wireless power transfer

山形大学<sup>1</sup>, 富士電機株式会社<sup>2</sup> ○(M2)秋元 大輝<sup>1,†</sup>, (M1)池津 優紀<sup>1</sup>, (B)眞藤 行登<sup>1</sup>,  
柴田 将史<sup>2</sup>, (M2)鈴木 俊哉<sup>1</sup>, 成田 克<sup>1</sup>, 大音 隆男<sup>1</sup>, 齊藤 敦<sup>1,‡</sup>  
Yamagata Univ.<sup>1</sup>, Fuji Electric Co., Ltd.<sup>2</sup>, °Hiroki Akimoto<sup>1</sup>, Yuki Ikezu<sup>1</sup>, Ikuto Shindou<sup>1</sup>,  
Masafumi Shibata<sup>2</sup>, Shunya Suzuki<sup>1</sup>, Yuzuru Narita<sup>1</sup>, Takao Oto<sup>1</sup>, Atsushi Saito<sup>1</sup>  
E-mail: t232944m@st.yamagata-u.ac.jp<sup>†</sup>; atsu@yz.yamagata-u.ac.jp<sup>‡</sup>

無線電力伝送は非放射型と放射型に分類され、非放射型は比較的近距离な伝送方式で伝送効率は 90 % 以上と高効率である。対して放射型は比較的長距離への送電が見込め、近年の先行研究では 5.8 GHz の電波を用いて伝送距離が 28 cm で伝送効率が約 60 % と報告されている[1]。一方で、放射型アンテナの伝送効率を向上させるためには共振器材料損失の低減が考えられ、我々は高温超伝導バルク共振器アンテナを用いて研究を行ってきた [2][3]。しかし、上記に示した先行研究のような伝送効率には至っていない。本研究では電磁界解析ソフト CST Microwave Studio を用いて、導波器[4]を装荷した高温超伝導バルク共振器アンテナ（1 素子）を設計し、実測によって導波器装荷の有無及び反射器の面積拡大による伝送効率特性を調査した。Fig. 1 に導波器を装荷した高温超伝導バルク共振器アンテナの解析モデルを示す。サファイア基板に梱包された高温超伝導バルク共振器アンテナを Cu cavity にセットし、テフロンスペーサーを用いて導波器を装荷した。反射器には Cu cavity の下部（コールドヘッドと同径）を利用し、反射器面積を拡大する際には切削した Cu 材を Cu cavity の下面に設置した。サンプルの冷却は小型パルスチューブ冷凍機を用いた。Fig. 2 に Vector Network Analyzer (VNA) を用いて測定した 5.1 ~ 5.2 GHz, 約 48 K における伝送効率を示す。伝送距離 0 cm の時、高温超伝導バルク共振器アンテナのみで伝送効率 22.8 % に対し、導波器を装荷した状態で反射器を拡大させた場合には 36.8 % の伝送効率を得た。反射器を拡大させた状態で導波器を装荷することが伝送効率の向上に有効であることが示唆された。詳細については発表の際に述べる。

### 参考文献

- [1] T. Tomura et al., IEEE Open Journal of Antennas and Propagation, Vol. 2, pp. 170-180, 2021.
- [2] K. Ehara et al., Electronics and Communications in Japan, Vol. 82, pp. 55-69, 1999.
- [3] A. Saito et al., The Japan Society of Applied Physics, Vol 8, pp. 1-3, 2015.
- [4] 荒生誠治 他, エレクトロニクス実装学術講演大会講演論文集, Vol. 20, pp. 139-141, 2006.

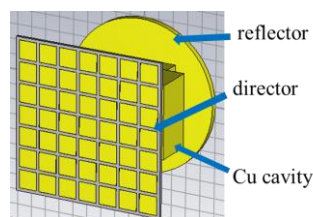


Fig. 1 Model of HTS bulk resonator antenna with director and reflector.

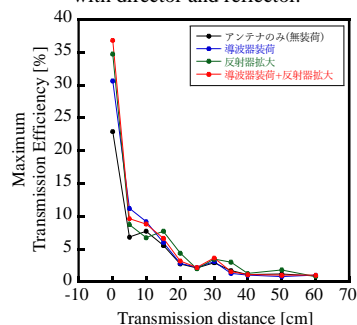


Fig. 2 Comparison of transmission efficiency with and without director and reflector.



# Spiral-MKIDs アレイによる 2 次元 THz 波イメージングに関する研究

## Study on two-dimensional imaging of terahertz waves with spiral-MKIDs array

山形大学<sup>1</sup> ○(M2) 鈴木 俊哉<sup>1,†</sup>, (M1) 須賀 祐哉<sup>1</sup>, (M2) 秋元 大輝<sup>1</sup>,

中島 健介<sup>1</sup>, 成田 克<sup>1</sup>, 大音 隆男<sup>1</sup>, 齊藤 敦<sup>1,‡</sup>

Yamagata Univ.<sup>1</sup> ○Shunya Suzuki<sup>1,†</sup>, Yuya Suga<sup>1</sup>, Hiroki Akimoto<sup>1</sup>,

Kensuke Nakajima<sup>1</sup>, Yuzuru Narita<sup>1</sup>, Takao Oto<sup>1</sup>, Atsushi Saito<sup>1,‡</sup>

E-mail: t232948m@st.yamagata-u.ac.jp<sup>†</sup>; ats@yz.yamagata-u.ac.jp<sup>‡</sup>

Microwave Kinetic Inductance Detectors (MKIDs)[1]は、超伝導の特性を利用したテラヘルツ(THz)波検出器である。我々は、同一のパターンでアンテナとマイクロ波共振器の機能を併せ持つ spiral-MKIDs を考案している[2]。これまでに、81 素子のアレイ化を実現しているが、明瞭な 2 次元イメージングは達成されていない[3]。この原因は、光エネルギーの吸収及び熱エネルギーへの変換による熱的要因と誘電体-空気の境界で発生する反射が考えられる。そこで、熱伝達防止及び誘電体-空気の反射防止の役割を果たすスリット層を追加した構造を提案した。

Fig. 1 にスリット層を追加した spiral-MKIDs の構造を示す。スリット層及び spiral-MKIDs 素子は、サファイア m 面基板上に NbN を成膜し、フォトリソグラフィと反応性イオンエッチング装置を用いて作製した。その後、これらを基板同士で重ね合わせ、スリット層有りの 2 アレイ spiral-MKIDs を作製した。NbN 薄膜の膜厚は、スリット層が約 500 nm、spiral-MKIDs 素子が約 20 nm で作製した。また、スリットの幅は共振器のみに照射されるように設計されている。その後、GM 冷凍機で素子を冷却し、Vector Network Analyzer (VNA)を用いて通過特性を測定した。Fig. 2(a) は観測している共振器のみに赤外光を照射した場合の通過特性であり、明瞭な応答を確認した。Fig. 2(b) は観測している共振器とは別の共振器のみに照射した場合の結果であり、明瞭な応答は観測できなかった。以上の結果から、スリット層の追加は THz 波照射特性に有効であることが示唆された。実験結果の詳細は講演の際に詳述する。

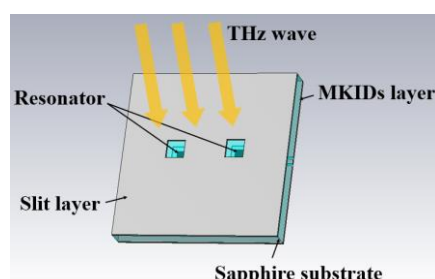


Fig. 1 Structure of spiral-MKIDs with slit layer.

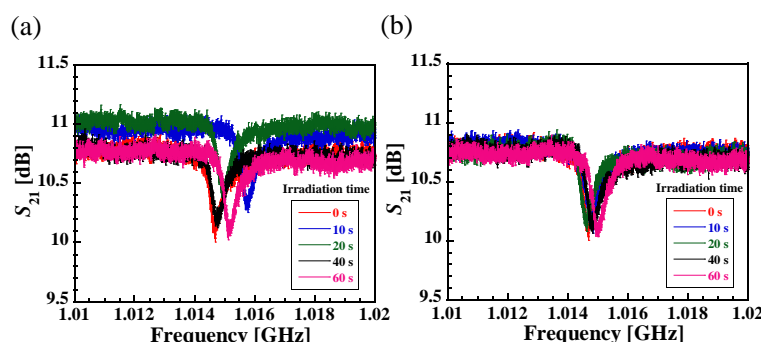


Fig. 2  $S_{21}$  characteristics of spiral-MKIDs with slit layer irradiated only left resonator (a) and irradiated only right resonator (b).

[1] P. K. Day, et al., NATURE, vol. 425, pp. 817-821 (2003).

[2] S. Ariyoshi, et al., Applied Physics Express, Vol. 6, pp. 064103 (2013).

[3] Y. Kato, et al., 第 74 回応用物理学会東北支部学術講演会, 3aB11 (2019).

# マイクロ波回路シミュレータを用いた 力学インダクタンス進行波型パラメトリック増幅器の利得解析

## Gain analysis of kinetic-inductance traveling-wave parametric amplifier

### using microwave circuit simulator

静大院総合<sup>○</sup>(M2)石田 壮汰<sup>1</sup>, 武田 正典<sup>1</sup>

Shizuoka Univ.<sup>1</sup> Sota Ishida<sup>1</sup>, Masanori Takeda<sup>1</sup>

E-mail: ishida.sota.19@shizuoka.ac.jp

力学インダクタンス進行波型パラメトリック増幅器(KITWPA)は力学インダクタンスの電流非線形性を利用したパラメトリック増幅器である。これはマイクロ波帯において極低雑音、広帯域幅などの優れた増幅性能が実証されており、電波天文観測分野における半導体系増幅器の代替として期待されている。

KITWPA の利得解析方法として頻繁に用いられる方法の一つに、解析対象の線路構造に対して結合モード方程式を数値解析的に解く方法がある。しかし、実際に KITWPA を動作させる際には、外部回路と伝送線路間のインピーダンス不整合によって入出力端で電気信号の反射が起き、利得の減衰や利得リップルの発生が想定される。今回、商用のマイクロ波回路シミュレータ”MicroWave Office (MWO)”を用いて Fig.1 のように伝送線路の等価回路モデルを設計し、解析を行うことでそのような外部回路との接続の影響を考慮した KITWPA の利得解析を行った。線路の等価回路モデルを設計する際、Fig.1 に示す細線部を 8 分割して  $L, C$  の値を設定している。

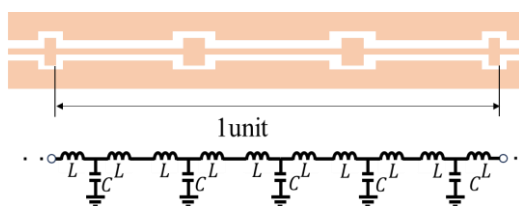


Fig. 1 Periodic structure of KITWPA (top) and its equivalent circuit (bottom). The values of  $L$  and  $C$  are set according to the line width and gap width.

解析において仮定した超伝導伝送線路は NbTiN 薄膜コプレーナ線路(CPW)で、膜厚 35nm である。また、解析において線路の損失は無視できるものとしている。設計した線路の特性インピーダンスは  $Z_{\text{line}} \cong 216 \Omega$  であり、入出力端のポートの特性インピーダンス  $Z_{\text{port}}$  の変化による利得の変化を確認する。

総線路長を 0.3m, 増幅のエネルギー源となるポンプ波の周波数を  $f_p = 11.56\text{GHz}$ , 増幅する信号波電力  $P_s = -70\text{dBm}$ , 線路に入力するポンプ波電力は  $-10\text{dBm}$  に設定した。

解析の結果を Fig.2 に示す。線路の特性インピーダンスとの差が大きいほど利得は減衰し、大きな利得リップルが発生することが分かり、 $50\Omega$ 系の外部回路を想定する場合、さらに大きな影響が現れると予想されるが、その点については当日詳細を述べる予定である。

【謝辞】本研究の一部は、科研費 23K03955 の助成により実施した。

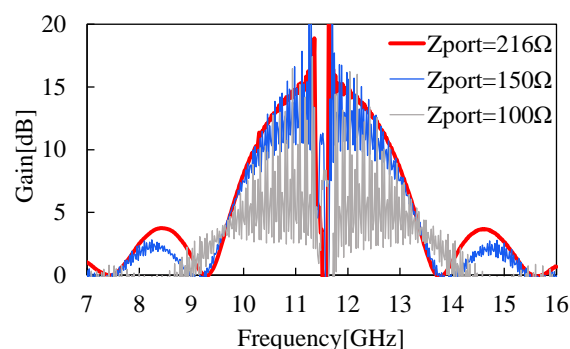


Fig.2 Results of gain analysis by MWO. The larger the difference in characteristic impedance between line and port, the more pronounced the gain attenuation and gain ripple.

11 超伝導 | 一般セッション(口頭講演): 11.1 基礎物性

**[16a-A35-1~11] 11.1 基礎物性**

[16a-A35-1]

パッチアンテナ構造を用いたBi2212-THz波発振器の開発

○榎本 裕樹<sup>1</sup>、山内 悠希<sup>1</sup>、前島 健太郎<sup>1</sup>、葛見 佳彦<sup>1</sup>、小林 未来<sup>1</sup>、大坪 健人<sup>1</sup>、南 英俊<sup>1</sup>、柏木 隆成<sup>1,2</sup> (1.筑波大学数理物質、2.阪公大IQMC)

[16a-A35-2]

高温超伝導体Bi2212単結晶を用いたテラヘルツ波発振素子のアレイ化に向けた素子構造に関する研究

○葛見 佳彦<sup>1</sup>、大坪 健人<sup>1</sup>、榎本 裕樹<sup>1</sup>、山内 悠希<sup>1</sup>、前島 健太郎<sup>1</sup>、小林 未来<sup>1</sup>、前田 敦彦<sup>2</sup>、倉島 優一<sup>2</sup>、高木 秀樹<sup>2</sup>、南 英俊<sup>1</sup>、柏木 隆成<sup>1,3</sup> (1.筑波大数理物質、2.産総研、3.阪公大IQMC)

[16a-A35-3]

THz 波発振器用超伝導結晶チップ作製技術の改良に関する研究

三上 千春<sup>1</sup>、○小林 未来<sup>1</sup>、榎本 裕樹<sup>1</sup>、山内 悠希<sup>1</sup>、葛見 佳彦<sup>1</sup>、前島 健太郎<sup>1</sup>、大坪 健人<sup>1</sup>、南 英俊<sup>1</sup>、柏木 隆成<sup>1,2</sup> (1.筑波大数理物質、2.阪公大IQMC)

[16a-A35-4]

小型冷凍機を用いた高温超伝導体テラヘルツ波発振器によるイメージングシステムの開発 II

○山内 悠希<sup>1</sup>、榎本 裕樹<sup>1</sup>、前島 健太郎<sup>1</sup>、葛見 佳彦<sup>1</sup>、大坪 健人<sup>1</sup>、小林 未来<sup>1</sup>、柴田 将史<sup>2</sup>、豊崎 次郎<sup>2</sup>、竹内 孝行<sup>2</sup>、南 英俊<sup>1</sup>、柏木 隆成<sup>1,3</sup> (1.筑波大学数理物質、2.富士電機株式会社、3.阪公大IQMC)

[16a-A35-5]

高速・広帯域周波数変調を目指したジョセフソンプラズマエミッタの開発

○(M2)宮本 将志<sup>1</sup>、小林 亮太<sup>1</sup>、辻本 学<sup>2</sup>、掛谷 一弘<sup>1</sup> (1.京大院工、2.産総研)

[16a-A35-6]

異方的誘電体モデルにもとづくジョセフソンプラズマエミッタの構造最適化およびその実装

○(DC)小林 亮太<sup>1</sup>、掛谷 一弘<sup>1</sup> (1.京大院工)

[16a-A35-7]

過剰酸素量がBi2212-THz波発振素子のデバイス特性に及ぼす影響に関する研究 II

○前島 健太郎<sup>1</sup>、小林 未来<sup>1</sup>、榎本 裕樹<sup>1</sup>、山内 悠希<sup>1</sup>、葛見 佳彦<sup>1</sup>、大坪 健斗<sup>1</sup>、石田 茂之<sup>2</sup>、永崎 洋<sup>2</sup>、中尾 裕則<sup>3</sup>、南 英俊<sup>1</sup>、柏木 隆成<sup>1,4</sup> (1.筑波大数理物質、2.産総研、3.KEK 物構研 PF、4.阪公大IQMC)

[16a-A35-8]

Bi2212 単結晶を用いた THz 波発振素子の材料評価に関する研究

○柏木 隆成<sup>1,2</sup>、中尾 裕則<sup>3</sup>、前島 健太郎<sup>1</sup>、小林 未来<sup>1</sup>、榎本 裕樹<sup>1</sup>、山内 悠希<sup>1</sup>、葛見 佳彦<sup>1</sup>、大坪 健人<sup>1</sup>、石田 茂之<sup>4</sup>、永崎 洋<sup>4</sup>、茂筑 高士<sup>5</sup>、南 英俊<sup>1</sup> (1.筑波大学数理物質、2.阪公大IQMC、3.KEK 物構研 PF、4.産総研、5.NIMS)

[16a-A35-9]

NdFeAsO系超伝導薄膜のナノストリップ加工と超伝導特性評価

○吉川 淳朗<sup>1</sup>、富岡 隼也<sup>1</sup>、鷲谷 伊吹<sup>1</sup>、宮本 洸希<sup>1</sup>、青木 大知<sup>1</sup>、畑野 敬史<sup>1</sup>、生田 博志<sup>1,2</sup> (1.名大工、2.名大クリスタルエンジニアリング研究センター)

[16a-A35-10]

鉄系超伝導体NdFeAs(O,H)の異方性の水素置換量依存性II

○畑野 敬史<sup>1</sup>、日比野 絢斗<sup>1</sup>、宮本 洸希<sup>1</sup>、富岡 隼也<sup>1</sup>、吉川 淳朗<sup>1</sup>、生田 博志<sup>1</sup> (1.名大工)

---

[16a-A35-11]

[第56回講演奨励賞受賞記念講演] 極薄膜FeSe/SrTiO<sub>3</sub>におけるネルンスト効果

○小林 友輝<sup>1</sup>、小川 亮<sup>1</sup>、岡田 達典<sup>2</sup>、前田 京剛<sup>1</sup> (1.東大院総合、2.東北大金研)

---

# パッチアンテナ構造を用いた Bi2212-THz 波発振器の開発

## Development of Bi2212-THz Oscillators Using a Patch Antenna Structure

筑波大学数理物質<sup>1</sup>, 阪公大 IQMC<sup>2</sup>

○榎本 裕樹<sup>1</sup>, 山内 悠希<sup>1</sup>, 前島 健太郎<sup>1</sup>, 葛見 佳彦<sup>1</sup>, 小林 未来<sup>1</sup>

大坪 健人<sup>1</sup>, 南 英俊<sup>1</sup>, 柏木 隆成<sup>1,2</sup>

Univ. of Tsukuba<sup>1</sup>, Osaka Metropolitan Univ.<sup>2</sup>

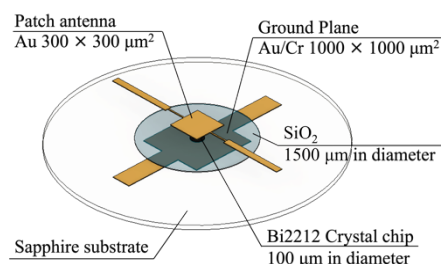
○Y. Enomoto<sup>1</sup>, Y. Yamauchi<sup>1</sup>, K. Maeshima<sup>1</sup>, Y. Kuzumi<sup>1</sup>,

M. Kobayashi<sup>1</sup>, T. Otsubo<sup>1</sup>, H. Minami<sup>1</sup>, T. Kashiwagi<sup>1,2</sup>

E-mail: [s2320326@u.tsukuba.ac.jp](mailto:s2320326@u.tsukuba.ac.jp)

我々は、高温超伝導体  $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_{8+\delta}$  (Bi2212) 単結晶を用いたテラヘルツ帯の発振器を開発している[1]。この発振器は、Bi2212 単結晶に内包される固有ジョセフソン接合による交流ジョセフソン効果と、ジョセフソン接合のメサ構造による空洞共振効果を利用している。現在、1 素子で  $10\ \mu\text{W}$  レベル、3 素子アレイで  $0.6\ \text{mW}$  レベルの出力が観測されているが[2]、幅広いテラヘルツ波の応用には  $1\ \text{mW}$  レベルの出力が望まれている。我々は、 $11\ \text{mW} (@0.45\ \text{THz})$  の出力が報告されている共鳴トンネルダイオード(RTD)アレイ構造[3]を参考にして、高出力化に現在取り組んでいる。これまで、チップ状に加工した Bi2212 単結晶をパッチ上に手作業で直接載せる方法を用いていた。しかし、結晶チップは  $100 \times 100\ \mu\text{m}^2$  程度と非常に小さく、高い位置精度でパッチに設置することが難しかった。交流源の結晶チップとパッチの位置関係は、インピーダンス整合の点で重要であり、現在結晶チップとパッチの位置関係を制御した素子作製方法の開発を行っている。

**Fig. 1** には現在開発中の素子構造の完成概略図を示した。この素子の作製プロセスは次の通りである。まず、サファイア基板と Bi2212 結晶表面に約  $20\ \text{nm}$  の金スパッタ膜を成膜し、この金薄膜を介して基板と結晶を接合する[5]。次にフォトリソグラフィプロセスにて、サファイア基板上にグラウンド用電極を作製し、さらに接合した結晶を直径  $100\ \mu\text{m}$  の円形に微細加工する。その後、 $\text{SiO}_2$  スパッタ膜を約  $200\ \text{nm}$  成膜する。最後に、結晶チップの位置を考慮して、一辺  $300\ \mu\text{m}$  の正方形金属パッチをフォトリソグラフィ及びスパッタにて作製する。これらのプロセスを適宜用いることで、パッチアンテナに対する結晶チップの位置を高精度に決定することができる。



**Fig. 1 A schematic illustration showing a patch antenna structure**

[1] L. Ozyuzer, *et al.*, Science **318**, 1291 (2007).

[2] T.M. Benseman, *et al.*, Appl. Phys. Lett. **103**, 022602 (2013).

[3] Y. Koyama, *et al.*, IEEE Trans.Terahertz Sci. Technol. **12.5**, 510(2022).

[4] Y. Ono, *et al.*, Phys. Rev. Applied **12**, 064026 (2020).

[5] 柏木ら, 第 68 回 応用物理学会 春季学術講演会 [17a-Z20-3] (2021).

# 高温超伝導体 Bi2212 単結晶を用いたテラヘルツ波発振素子の アレイ化に向けた素子構造に関する研究

Study on device structure for arraying terahertz wave oscillators using high-temperature superconductor Bi2212 single crystals.

筑波大数理物質<sup>1</sup>, 産総研<sup>2</sup>, 阪公大 IQMC<sup>3</sup>

○葛見 佳彦<sup>1</sup>, 大坪 健人<sup>1</sup>, 榎本 裕樹<sup>1</sup>, 山内 悠希<sup>1</sup>, 前島 健太郎<sup>1</sup>, 小林 未来<sup>1</sup>,  
前田 敦彦<sup>2</sup>, 倉島 優一<sup>2</sup>, 高木 秀樹<sup>2</sup>, 南 英俊<sup>1</sup>, 柏木 隆成<sup>1,3</sup>

Univ. of Tsukuba<sup>1</sup>, AIST<sup>2</sup>, Osaka Metropolitan Univ.<sup>3</sup>

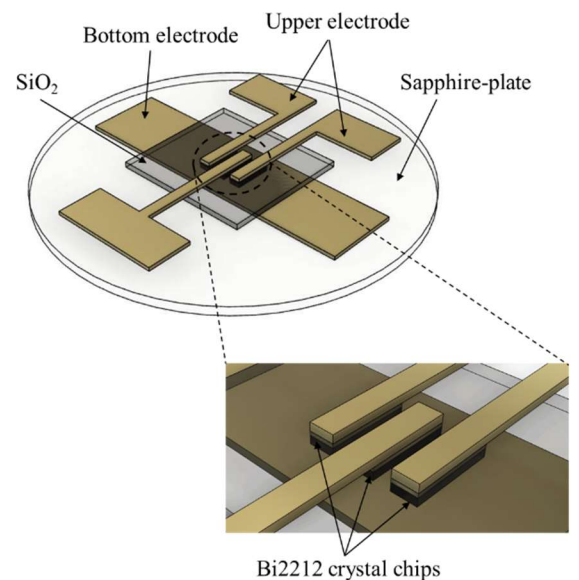
○Y. Kuzumi<sup>1</sup>, T. Otsubo<sup>1</sup>, Y. Enomoto<sup>1</sup>, Y. Yamauchi<sup>1</sup>, K. Maeshima<sup>1</sup>, M. Kobayashi<sup>1</sup>,  
A. Maeda<sup>2</sup>, Y. Kurashima<sup>2</sup>, H. Takagi<sup>2</sup>, H. Minami<sup>1</sup>, T. Kashiwagi<sup>1,3</sup>

E-mail: s2320338@u.tsukuba.ac.jp

我々の研究グループは、銅酸化物高温超伝導体  $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_{8+\delta}$  (Bi2212) 単結晶を用いたテラヘルツ波発振器[1]の高出力化に向けた研究を行っている。具体的には、Bi2212 単結晶を微細加工した結晶チップのアレイ化による高出力化を試みている。

このアレイ素子による発振出力の向上には、素子間の同期現象が欠かせない。そのために例えば、素子動作時に発生する高周波電流や電磁界を介して、素子同士に相互作用が発生すれば、同期現象を促進できるのではないかと考えている。このような効果を調べるためには、素子間隔が重要なパラメータになる。そこで、本研究では素子間隔を制御したアレイ素子作製プロセスの検討を行なったので、その結果を報告する。

**Fig.1** に作製した素子の模式図を示す。この構造の作製にあたり、まず、 $\sim 1\text{ mm}$  角の Bi2212 単結晶を、直径  $7\text{ mm}$  のサファイア基板に Cr, Au のスパッタ薄膜を介して接合した[2]。接合した結晶の表面を劈開し、表面に金属膜を蒸着した。続いて、結晶の上に  $80 \times 400\text{ }\mu\text{m}^2$  のレジストマスクを、 $10\text{ }\mu\text{m}$  間隔で 3 つ並べた。その後、ドライ及びウエットエッチング[3]を用いて、**Fig.1** に示すように、サファイア基板上のスパッタ膜を下部電極に、固定した単結晶をチップ状に加工した。次に、固定した結晶チップの上部からのみ電流が流れるように、チップ周辺と下部電極の一部に  $\text{SiO}_2$  絶縁膜( $2 \times 2\text{ mm}^2$ , 厚さ  $200\text{ nm}$ )を成膜した。最後に、上部電極として Cr, Au を成膜した。



**Fig.1** Schematic drawing of a developed structure

[1] L. Ozyuzer *et al.* Science **318**, 1291 (2007).

[2] 柏木ら, 第 68 回 応用物理学会 春季学術講演会 [17a-Z20-3] (2021)

[3] T. Imai *et al.* Jpn. Appl. Phys. **60**, 126501 (2021).



# THz 波発振器用超伝導結晶チップ作製技術の改良に関する研究

## Research on improvement in the fabrication technology of superconductor crystal chips for THz wave oscillators

筑波大数理物質<sup>1</sup>, 阪公大 IQMC<sup>2</sup>

三上千春<sup>1</sup>, <sup>○</sup>小林未来<sup>1</sup>, 榎本裕樹<sup>1</sup>, 山内悠希<sup>1</sup>, 葛見佳彦<sup>1</sup>, 前島健太郎<sup>1</sup>, 大坪健人<sup>1</sup>,  
南英俊<sup>1</sup>, 柏木隆成<sup>1,2</sup>

Univ. of Tsukuba<sup>1</sup>, Osaka Metropolitan Univ.<sup>2</sup>

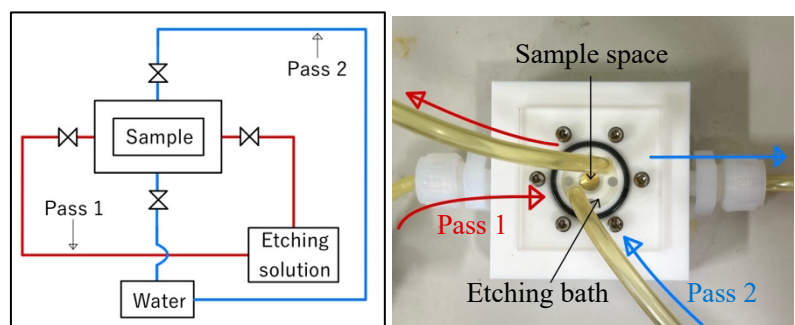
C. Mikami, <sup>○</sup>M. Kobayashi, Y. Enomoto, Y. Yamauchi, Y. Kuzumi,

K. Maeshima, T. Otsubo, H. Minami, T. Kashiwagi

E-mail: s2110380@u.tsukuba.ac.jp

我々は、高温超伝導体  $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_{8+\delta}$  (Bi2212)の単結晶を用いて、テラヘルツ帯の小型発振器 [1]の開発を行なっている[2]。この発振器の原理は、結晶内の固有ジョセフソン接合における交流ジョセフソン効果である。具体的には、Bi2212 単結晶を  $80 \times 400 \mu\text{m}^2$  程度の結晶チップに成形し、このチップ内の固有ジョセフソン接合の積層方向に電圧を印加することで、自由空間に電磁波を取り出すことができる。その際、結晶チップのサイズや形状が放射出力や周波数特性に大きな影響を与えるため [1,2], 形状・サイズが発振出力に及ぼす影響の詳細な理解及び加工技術の開発は、高出力発振器の開発に欠かせない。そこで現在、精度の高い結晶チップの加工方法を開発しており、本発表ではその開発状況を報告する。

結晶チップをウェットエッチング法[3]によって加工する際、従来の手法では単純な目視による確認であったためオーバーエッチングとなる問題があった。この課題を解決するために、エッチング過程を顕微観察することで、最適なタイミングでエッチングを終了できる手法の開発を試みた。Fig. 1 に開発中のエッチング装置の概念図及び実際の画像を示す。エッチング溶液を循環する流路(Pass 1)と洗浄水を循環する流路(Pass 2)の2つの流路から構成される。サンプルの状態を顕微観察しながら、この2つの流路を適宜切り替えることでエッチングを最適化することを試みている。本発表では、この装置の現状と、これを用いて加工した結晶チップの状態について議論する。



**Fig. 1 A schemafic illustration showing a developed etching system and an optical photo of the system**

[1] L. Ozyuzer *et al.*, Science **318**, 1291 (2007).

[2] T. Kashiwagi *et al.*, IEIEC Trans. on Electronics **E106.C**, 281 (2023).

[3] T. Imai *et al.*, JJAP **60**, 126501 (2021).

# 小型冷凍機を用いた高温超伝導体テラヘルツ波発振器による イメージングシステムの開発 II

## Development of an imaging system using a high-temperature superconducting THz oscillator cooling by a compact cryocooler II

筑波大学数理物質<sup>1</sup>, 富士電機株式会社<sup>2</sup>, 阪公大 IQMC<sup>3</sup>

○山内悠希<sup>1</sup>, 榎本裕樹<sup>1</sup>, 前島健太郎<sup>1</sup>, 葛見佳彦<sup>1</sup>, 大坪健人<sup>1</sup>, 小林未来<sup>1</sup>,  
柴田將史<sup>2</sup>, 豊崎次郎<sup>2</sup>, 竹内孝行<sup>2</sup>, 南英俊<sup>1</sup>, 柏木隆成<sup>1,3</sup>

Univ. of Tsukuba<sup>1</sup>, Fuji Electronic Co., Ltd<sup>2</sup>, Osaka Metropolitan Univ.<sup>3</sup>

○Y. Yamauchi<sup>1</sup>, Y. Enomoto<sup>1</sup>, K. Maeshima<sup>1</sup>, Y. Kuzumi<sup>1</sup>, T. Otsubo<sup>1</sup>, M. Kobayashi<sup>1</sup>,  
M. Shibata<sup>2</sup>, J. Toyosaki<sup>2</sup>, T. Takeuchi<sup>2</sup>, H. Minami<sup>1</sup>, T. Kashiwagi<sup>1,3</sup>

E-mail: [s2320381@u.tsukuba.ac.jp](mailto:s2320381@u.tsukuba.ac.jp)

高温超伝導体 $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_{8+\delta}$ (Bi2212)の単結晶をメサ状構造に加工し、結晶内部のジョセフソン接合の積層方向に電圧を印加することで、交流ジョセフソン効果により単色のテラヘルツ波が得られる[1]。我々はこの発振素子の開発と共に応用に関する研究にも取り組んでいる。過去には、発振素子の性能確認としてイメージングシステムの構築を行った[2][3]。現在は、本発振器の社会実装を目指したシステムの開発を行っている。その1つの方向として、小型冷凍機を用いたイメージングシステムの開発を行っており、市販の小型冷凍機を用いたシステムなどの開発を近年行ってきた[4]。特に最近では小型冷凍機について富士電機株式会社の支援を得ながら、より実用的なテラヘルツイメージングシステムの構築を目指している。

本研究では、2023年秋季の学会講演[5]で報告したシステムの改良について報告する。本システムに利用しているBi2212発振素子にパルスバイアスを印加することにより電圧のみで発振周波数を変化できることが分かっており、現状では1.1 THzから0.4 THzの範囲を1 KHzの繰り返し周波数で掃引が可能である[6]。現在、この特性をシステムに組み込み、パルス駆動でのイメージング像撮影システムの開発を行っている。PXIシステムを用いて、コンピュータ制御により素子にパルス電圧を印加し、同時に送られたトリガーにより発振器でテラヘルツ波を検出する。システム詳細および撮影結果は当日報告する。

- [1] L. Ozyuzer, *et al.*: Science **318** 1291 (2007).
- [2] M. Tsujimoto *et al.*, Appl. Phys.**111**, 123111(2012).
- [3] T.Kashiwagi *et al.*, Appl. Phys. Lett. **104**, 022601(2014).
- [4] Y. Saiwai *et al.*, Jpn. J. Appl. Phys. **59**, 105004-1-5 (2020).
- [5] 山内他：応用物理学会 2023 年秋季大会 21p-B202-12.
- [6] 南他：応用物理学会 2023 年秋季大会 21p-B202-4.

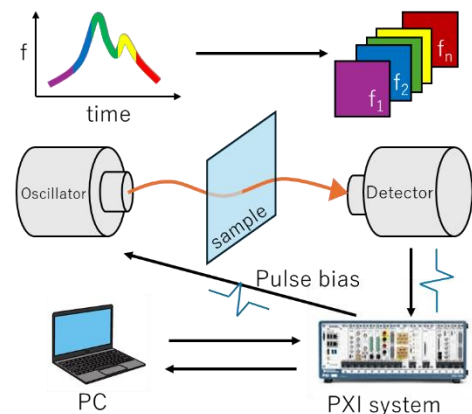


Fig.1 system simple diagram



## 高速・広帯域周波数変調を目指したジョセフソンプラズマエミッタの開発 Development of the Josephson plasma emitter for high and wideband frequency modulation

京大院工<sup>1</sup>, 産総研<sup>2</sup>

○(M2) 宮本 将志<sup>1</sup>, 小林 亮太<sup>1</sup>, 辻本 学<sup>2</sup>, 掛谷 一弘<sup>1</sup>

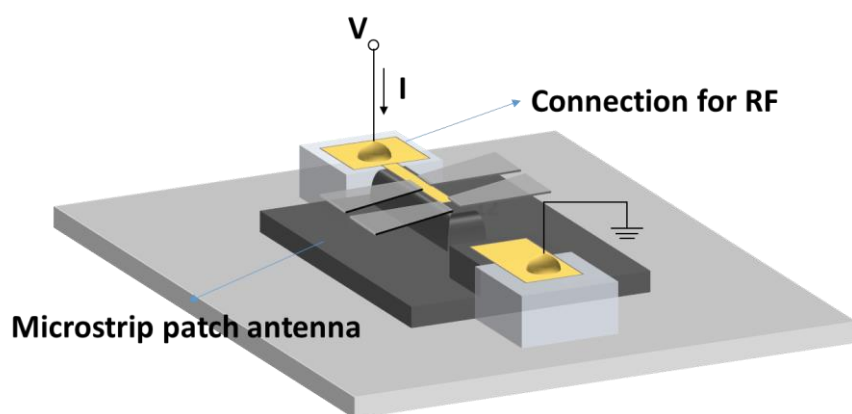
Kyoto Univ.<sup>1</sup>, AIST<sup>2</sup>

°Masashi Miyamoto<sup>1</sup>, Ryota Kobayashi<sup>1</sup>, Manabu Tsujimoto<sup>2</sup>, Itsuhiro Kakeya<sup>1</sup>

E-mail: miyamoto.masashi.24a@st.kyoto-u.ac.jp

ジョセフソンプラズマエミッタ (JPE) は銅酸化物高温超伝導体  $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_{8+\delta}$  (Bi2212) を用いたテラヘルツ光源であり、ジョセフソン関係式に従い、印加電圧と放射テラヘルツ波の周波数が比例する特徴がある。本研究グループは、JPE に印加するバイアス電圧として、直流電圧に加えて周波数 3 GHz の正弦波を重畳することで、中心周波数 850 GHz、最大変調周波数幅 40 GHz の周波数変調テラヘルツ波の放射に成功した<sup>1</sup>。この成果はテラヘルツ通信への応用として重要であり、テラヘルツ波に期待される超高速・大容量通信のために、変調周波数を増加させることは不可欠である。

これまでは、変調周波数 3 GHz までの成果を中心に発表した。今回は、高速・広帯域の周波数変調を目指し、新たなデバイスの作成と評価を報告する。前述の成果では、マイクロ波を加えるバイアス回路とデバイスの接続方法が変調周波数の上限を決めていたと考えられ、10 GHz 以上の変調周波数を得るために、外部回路と基板間の高周波損失を減らした。変調周波数幅については、無変調バイアス時の発振周波数・偏光との対応に注目し、デバイス形状、特にマイクロストリップパッチアンテナについて検討し<sup>2</sup>、デバイスに実装した。講演では、考案した新規 JPE の作成プロセスを紹介し、実際に作ったデバイスの特性について報告する。



**Fig. 1:** Schematic diagram on the new JPE. The connection between the external circuit and the board was designed to apply RF voltage. Microstrip patch antennas are attached on top of the JPE to control the radiation characteristics of the device.

### References

- [1] Miyamoto, M *et al*, *Nature. Photonics* **18**, 267-275 (2024)
- [2] Tsujimoto, M *et al*, *Optica* **29**, 16980-16990 (2021)

# 異方的誘電体モデルにもとづくジョセフソンプラズマエミッタの 構造最適化およびその実装

## Structural Optimization of Josephson Plasma Emitter based on the Anisotropic Dielectric Model and its Implementation

京大院工<sup>1</sup>, ○(D)小林 亮太<sup>1</sup>, 掛谷 一弘<sup>1</sup>

Graduate School of Engineering, Kyoto Univ.<sup>1</sup>

E-mail: [kobayashi.ryota.86a@st.kyoto-u.ac.jp](mailto:kobayashi.ryota.86a@st.kyoto-u.ac.jp)

ジョセフソンプラズマエミッタ (JPE) は銅酸化物高温超伝導体 $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_{8+\delta}$  (Bi2212) における固有ジョセフソン接合を利用したテラヘルツ連続光源であり、印加電圧によって放射波の周波数を制御できるという利点をもつ[1]。一方で、JPE の最高放射強度は 2013 年に $610\ \mu\text{W}$ を記録して以来更新されておらず[2]、数値計算に基づく体系的な設計手法の欠如が JPE の放射強度向上の妨げになっている。JPE の異方的誘電体モデル[3]は Bi2212 に微小な高周波電界が印加された場合の線形応答を記述するモデルであり、Bi2212 を誘電体として扱うことで汎用的な電磁界シミュレータ上での JPE のモデル化を可能にする。本モデルを用いて既存の実験系をシミュレータ上にモデル化することで (Fig. 1)、JPE の共振特性はおおよそ再現できることが確認されているが、このモデルを用いた構造最適化の有効性は未だ確認されていない。

本発表では、数値計算を用いた JPE の最適構造探索結果と、その最適構造に基づくデバイスの実装結果を紹介する。まず、数値計算により、デバイスの体積を一定に保ちつつ高さと奥行きを変化させることで、放射強度が最大となる構造を探索した (Fig. 2)。次に、数値計算で得られた最適形状を実装し、作製した JPE の電流電圧放射強度特性を測定した。最後に、計算結果と測定結果の比較を通じてシミュレーションやデバイス設計手法の評価を行った。本手法は、数値計算に基づく体系的な設計手法を提供し、1 mW 以上の放射強度をもつ JPE の実現に向けた重要な一歩である。

### 参考文献

- [1] M. Miyamoto, *et al.*, *Nat. Photonics*, 1–9 (2024).
- [2] T. M. Benseman, *et al.*, *Appl. Phys. Lett.* **103**, 022602 (2013)
- [3] R. Kobayashi and I. Kakeya, *IEICE Tech. Rep.* **123**, SCE-353 (2024).

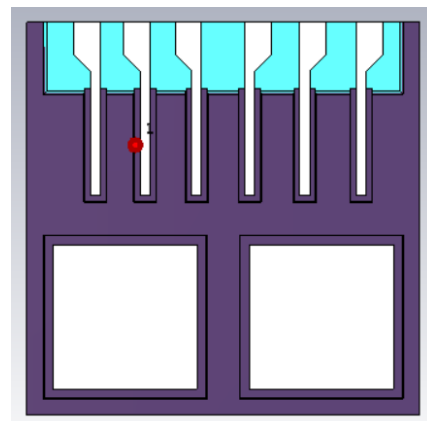


Fig. 1: A JPE modeled on an electromagnetic field simulator.

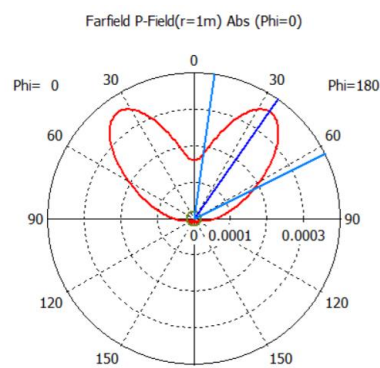


Fig. 2: A cross-sectional view of the radiation pattern expected from the structurally optimized device, operating at a frequency of 495 GHz. The cross-section is taken perpendicular to the longitudinal direction of the mesa.

## 過剰酸素量が Bi2212-THz 波発振素子のデバイス特性に 及ぼす影響に関する研究 II

### Study of the effect of excess oxygen on Bi2212-THz emitters II

筑波大数理物質<sup>1</sup>, 産総研<sup>2</sup>, KEEK 物構研 PF<sup>3</sup>, 阪公大 IQMC<sup>4</sup>

○前島健太郎<sup>1</sup>, 小林未来<sup>1</sup>, 榎本裕樹<sup>1</sup>, 山内悠希<sup>1</sup>, 葛見佳彦<sup>1</sup>, 大坪健人<sup>1</sup>,

石田茂之<sup>2</sup>, 永崎洋<sup>2</sup>, 中尾裕則<sup>3</sup>, 南英俊<sup>1</sup>, 柏木隆成<sup>1,4</sup>

Univ. of Tsukuba<sup>1</sup>, AIST<sup>2</sup>, PF IMSS KEEK<sup>3</sup>, Osaka Metropolitan Univ.<sup>4</sup>

○ K. Maeshima<sup>1</sup>, M. Kobayashi<sup>1</sup>, Y. Enomoto<sup>1</sup>, Y. Yamauchi<sup>1</sup>, Y. Kuzumi<sup>1</sup>, T. Otsubo<sup>1</sup>

S. Ishida<sup>2</sup>, H. Eisaki<sup>2</sup>, H. Nakao<sup>3</sup>, H. Minami<sup>1</sup>, T. Kashiwagi<sup>1,4</sup>

E-mail: s2320374@u.tsukuba.ac.jp

高温超伝導体  $\text{Bi}_{2-x}\text{Sr}_x\text{CaCu}_2\text{O}_{8+\delta}$  (Bi2212) 単結晶における不定比組成  $x$  や過剰酸素量  $\delta$  は、キャリア数の変化として臨界電流密度( $J_c$ )や超伝導転移温度( $T_c$ )などの諸物性に影響を与える[1]。我々は、 $x$  や  $\delta$  が Bi2212 単結晶を用いたテラヘルツ波発振素子の特性に与える影響について研究しており[2,3]、現在は最適ドーピング量(OP)近傍の素子特性を中心に調査している。前回の発表では仕込み値で  $x = 0.15$  の結晶を、3つの熱処理条件で OP 近傍の異なる酸素量に調整し、それらを用いて作製した素子の特性を報告した[4]。具体的には、結晶は酸素濃度 1000 ppm の雰囲気下で3つの異なる温度条件 (500, 600, 700°C) で熱処理した。そして、これらの結晶を用いて  $80 \times 400 \times 5\text{--}10\text{ }\mu\text{m}^3$  程度のチップ状素子を作製し、発振特性を評価した。今回は仕込み値  $x = 0.05$  とした結晶を、前回と同様の熱処理を施し、素子特性の評価を行ったのでその結果を報告する。

Fig.1 には、測定結果の一例を示した。600°Cで熱処理した  $x = 0.05$  及び 0.15 の結晶で作製した素子の 20 K における電流-電圧特性(a)と検出器応答電圧の素子印加電圧依存性(b)の結果になる。電流-電圧特性から、 $x = 0.05$  の素子では、 $x = 0.15$  のものに比べ、臨界電流値が増加するものの最大印加電圧が減少していることが分かる。この結果は、 $x$  の減少に伴いキャリア数が増加していることを示唆している。また、図に示した 20 K における発振出力はどちらも同程度であるが、環境温度の変化に対する出力の変化は2つの試料で異なった。ただし、得られた最大出力はどちらも同程度で数十 nW 程度であった。当日は、他の熱処理条件の結果との比較などを行う。

[1] H. Eisaki *et al.* Phys. Rev. B **69**, 064512 (2004).

[2] S. Nakagawa *et al.*, J. Appl. Phys. **133**, 163904 (2023).

[3] M. Nakayama *et al.*, J. Appl. Phys. **135**, 073902 (2024).

[4] 前島ら, 第84回応物秋季, 21p-B202-1 (2023).

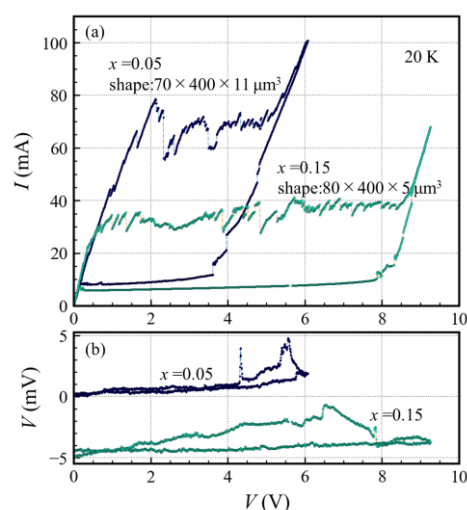


Fig.1 (a) Current-voltage characteristics and (b) detector response voltage plotted as a function of applied bias voltages for  $x=0.05$  and 0.15

# Bi2212 単結晶を用いた THz 波発振素子の材料評価に関する研究

## Study of material evaluation for THz wave emitters made of Bi2212 single crystals

筑波大数理物質<sup>1</sup>, 阪公大 IQMC<sup>2</sup>, KEK 物構研 PF<sup>3</sup>, 産総研<sup>4</sup>, NIMS<sup>5</sup>

○ 柏木隆成<sup>1,2</sup>, 中尾裕則<sup>3</sup>, 前島健太郎<sup>1</sup>, 小林未来<sup>1</sup>, 榎本裕樹<sup>1</sup>, 山内悠希<sup>1</sup>,

葛見佳彦<sup>1</sup>, 大坪健人<sup>1</sup>, 石田茂之<sup>4</sup>, 永崎洋<sup>4</sup>, 茂筑高士<sup>5</sup>, 南英俊<sup>1</sup>

Univ. of Tsukuba<sup>1</sup>, Osaka Metropolitan Univ.<sup>2</sup>, PF IMSS KEK<sup>3</sup>, AIST<sup>4</sup>, NIMS<sup>5</sup>

○ T. Kashiwagi<sup>1,2</sup>, H. Nakao<sup>3</sup>, K. Maeshima<sup>1</sup>, M. Kobayashi<sup>1</sup>, Y. Enomoto<sup>1</sup>, Y. Yamauchi<sup>1</sup>,

Y. Kuzumi<sup>1</sup>, T. Otsubo<sup>1</sup>, S. Ishida<sup>4</sup>, H. Eisaki<sup>4</sup>, T. Mochiku<sup>5</sup>, H. Minami<sup>1</sup>

E-mail: kashiwagi@ims.tsukuba.ac.jp

我々は、高温超伝導体  $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_{8+\delta}$  (Bi2212) の単結晶を用いた小型テラヘルツ波発振素子[1]の開発を行なっている[2]。素子の発振原理は、Bi2212 結晶内の固有ジョセフソン接合における交流ジョセフソン効果である。Bi2212 結晶を  $80 \times 400 \times 5 \text{ } \mu\text{m}^3$  程度のチップ状に成形し、超伝導転移温度  $T_c$  以下で、結晶チップ内の固有ジョセフソン接合に電圧を印加することで、電磁波の発生が可能である。現在は、素子の性能向上を目指し、Bi/Sr の組成比  $x$  や酸素量  $\delta$  を調整した結晶を準備し、 $T_c$ , 格子定数, 素子の臨界電流や発振特性といったパラメータの相関を調べている[3,4]。その際、結晶の配向性や格子定数の均一性といった結晶性の評価において、放射光施設(PF KEK)の X 線を用いている。本発表では、結晶チップの結晶性の評価における最近の試みを報告するとともに、評価結果の活用法等を議論する。

図 1 には、評価に用いた結晶チップの光学写真(a)と、そのチップを異なる条件で熱処理した後に得た 0026 付近の回折強度の 2 次元マッピングを示した。図には、同一のチップを何度か減圧下で熱処理した後(b)と、その後に何度か大気中で熱処理後(c)の状態を示した。図において、回折スポットの縦・横方向の広がり、それぞれ 4 軸回折計の  $\chi$  及び  $2\theta$  方向の広がりに対応する。X 線は、 $\sim 80 \times 400 \times 5 \text{ } \mu\text{m}^3$  程度の結晶チップ全体に照射されているため、得られた回折強度はチップ全体の状態を反映している。図より、 $255^\circ\text{C}$  程度の比較的低温の熱処理でもチップ全体の  $\chi$  方向の広がりを抑制する効果があることが確認できる。このような情報は、加工後の結晶チップの熱処理条件の最適化に活用できるのではないかと考えている。

- [1] L. Ozyuzer *et al.*, Science **318**, 1291 (2007).
- [2] T. Kashiwagi *et al.*, IEIEC Trans. on Electronics **E106.C**, 281 (2023).
- [3] S. Nakagawa *et al.*, J. Appl. Phys. **133**, 163904 (2023).
- [4] M. Nakayama *et al.*, J. Appl. Phys. **135**, 073902 (2024).

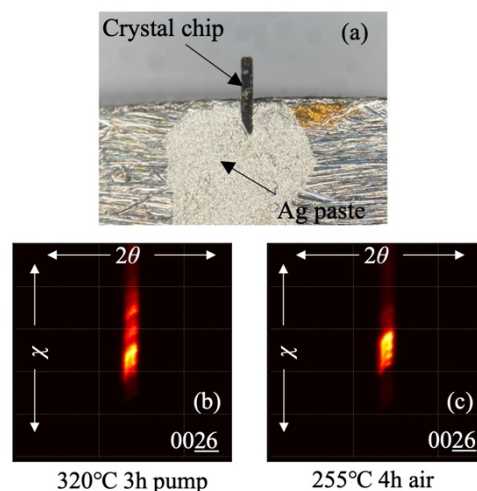


Fig.1 (a) Optical phot of a crystal chip. (b),(c) Diffraction intensities around 0026 for different annealing conditions.



# NdFeAsO 系超伝導薄膜のナノストリップ加工と超伝導特性評価

## Fabrication of nanostrips using NdFeAsO-based superconducting thin films and evaluation of the superconducting properties

名大工<sup>1</sup>, 名古屋大学クリスタルエンジニアリング研究センター<sup>2</sup>

○吉川 淳朗<sup>1</sup>, 富岡 隼也<sup>1</sup>, 鷲谷 伊吹<sup>1</sup>, 宮本 洸希<sup>1</sup>, 青木 大知<sup>1</sup>, 畑野 敬史<sup>1</sup>, 生田 博志<sup>1,2</sup>

Department of Materials Physics, Nagoya Univ.<sup>1</sup>, Research Center for Crystalline Materials Engineering, Nagoya Univ.<sup>2</sup>

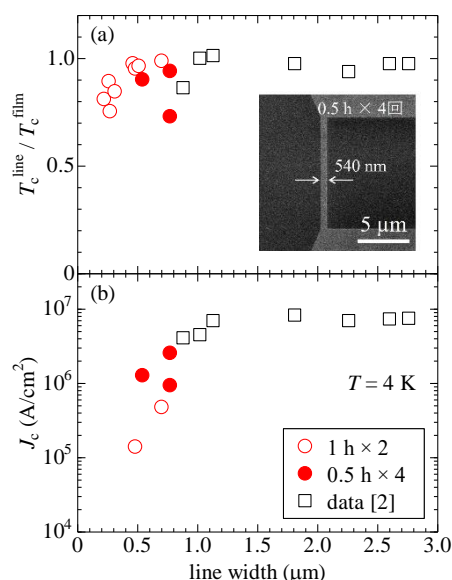
○Atsuro Yoshikawa<sup>1</sup>, Shunya Tomioka<sup>1</sup>, Ibuki Washitani<sup>1</sup>, Koki Miyamoto<sup>1</sup>, Daichi Aoki<sup>1</sup>, Takafumi Hatano<sup>1</sup>, Hiroshi Ikuta<sup>1,2</sup>

E-mail: yoshikawa.atsuro.t0@s.mail.nagoya-u.ac.jp

【はじめに】超伝導単一光子検出器(Superconducting Single Photon Detector; SSPD)は、薄膜を線幅 100 nm 程度の極細線に加工することで作製され、検出効率・動作速度・ノイズ特性のいずれも半導体を用いた検出器を大きく凌駕することが報告されている[1]。そのため、量子情報通信や医療など幅広い分野への適用が期待されている。しかし、転移温度  $T_c$  の低い超伝導体(NbN, WSi など)を用いた既存の SSPD は極低温でしか動作せず、大型かつ高コストな冷凍機での運用が必須となっている。そこで、我々は 40 K 以上の高い  $T_c$  を有する鉄系超伝導体 NdFeAs(O,H)薄膜に着目した。本系は高い  $T_c$  や臨界電流密度  $J_c$  を維持したまま線幅 1  $\mu\text{m}$  程度まで細線加工することが可能である[2]。今回は、NdFeAs(O,H)薄膜の更なる微細化に向けてエッチング条件を調整し、ナノストリップを作製して超伝導特性を評価したので、その結果を報告する。

【手法】分子線エピタキシー法により作製した母相 NdFeAsO 薄膜を  $\text{CaH}_2$  粉末と共に石英管へ真空封入し、加熱処理することで H 置換を行った。その後、得られた薄膜を電子線リソグラフィと Ar イオンドライエッチングにより微細加工した。

【結果】Fig. 1 に作製した NdFeAs(O,H)ナノストリップの SEM 像と、 $T_c$  及び  $J_c$  の線幅依存性を示す。なお、細線の  $T_c$  ( $T_c^{\text{line}}$ )は加工前の値( $T_c^{\text{film}}$ )で規格化した。合計 2 h のエッチングを 1 h ずつ 2 回に分けて行った場合、線幅 200 nm 程度においても加工前の約 80%という高い  $T_c$  を維持できた一方、 $J_c$  は線幅が細くなると急激に低下してしまった(図中○)。そこで、エッチング工程を 0.5 h ずつ 4 回とさらに細分化することで、試料への熱的ダメージの軽減を試みた(図中●)。その結果、 $J_c$  の低下が改善され、線幅 540 nm においても 1  $\text{MA}/\text{cm}^2$  以上の高い  $J_c$  を維持することが分かった。



**Fig. 1** The line width dependences of (a) normalized  $T_c$  and (b)  $J_c$ . The inset shows a SEM image.

[1] C. M. Natarajan *et al.*, *Supercond. Sci. Technol.* **25**, 063001 (2012).

[2] 吉川淳朗 他 第 70 回応用物理学会春季学術講演会 17a-D209-4 (2023).

## 鉄系超伝導体 NdFeAs(O,H)の異方性の水素置換量依存性 II

## Hydrogen content dependence of the anisotropy of iron-based superconductor

## NdFeAs(O,H) II

名大工 畑野 敬史, 日比野 絢斗, 宮本 洸希, 富岡 隼也, 吉川 淳朗, 生田 博志

Dept. Materials Physics, Nagoya Univ., Takafumi Hatano, Hiroto Hibino, Koki Miyamoto,

Shunya Tomioka, Atsuro Yoshikawa, Hiroshi Ikuta

E-mail: hatano@mp.pse.nagoya-u.ac.jp

【はじめに】鉄系超伝導体は積層構造を有するため、各種物性に異方性が現れる。異方性がどの程度であるかを把握することは、本系の基礎物性の理解のみならず、線材応用の可能性を議論するうえでも重要である。しかしながら、鉄系で最高の超伝導転移温度  $T_c$  を示す  $LnFeAsO$  ( $Ln = Nd, Sm, \dots$ ) 系材料においては、単結晶作製が困難であることを理由に詳細な異方性の報告は限られている。我々は NdFeAs(O,H) (以下 Nd1111:H) の良質な薄膜作製技術を確立し、これまで常伝導抵抗率の異方性  $\gamma_p$  および、上部臨界磁場  $H_{c2}$  の異方性  $\gamma_{Hc2}$  の H 置換量依存性を調べてきた。その結果、 $\gamma_p$  は H 置換量に依存して大きく変化する一方[1]、 $\gamma_{Hc2}$  は H 置換量の多い領域においては概ね 4 程度であり、置換量に対する変化が小さいことが分かった[2]。しかし H 置換量の少ない領域における  $\gamma_{Hc2}$  の振舞いは明らかではない。そこで本研究では、低置換領域を中心に新たに試料を作製し、 $\gamma_{Hc2}$  を追加評価したので報告する。

【手法】まず母相の NdFeAsO 薄膜を MBE 法によって作製し、その後  $CaH_2$  粉末を用いた topotactic 反応による H 置換を行い Nd1111:H 薄膜を得た。置換量は処理温度及び処理時間により調整した。Nd1111:H は H 置換が増すにつれて  $c$  軸長が系統的に減少するため、 $c$  軸長を指標として様々な置換量の薄膜を準備した。各試料の電気抵抗の温度/磁場角度依存性を測定し、超伝導薄膜に対するスケーリング則に基づく解析により  $\gamma_{Hc2}$  を求めた。

【結果】Figure に NdFeAs(O,H) 薄膜の  $T_c$  および  $0.95T_c$  にて測定した  $\gamma_{Hc2}$  の  $c$  軸長依存性を示す。 $\gamma_{Hc2}$  は  $c$  軸長が 8.5 Å 程度を境に急峻に変化し、8.5 Å 以上の置換領域では  $\gamma_{Hc2}$  は 8-9 程度となり、他の鉄系超伝導体と比較しても大きい値をとることが分かった。このような低/高置換領域での  $\gamma_{Hc2}$  の明瞭な違いは、LaFeAs(O,H) など一部の  $LnFeAsO$  系で報告されている 2 つの超伝導相の存在と対応している可能性が考えられる[3]。

[1]M. Chen *et al.*, *Phys. Rev. Mater.* **6**, 054802 (2022).

[2]日比野ら, 第 70 回春季学術講演会 17a-D209-3 (2023)

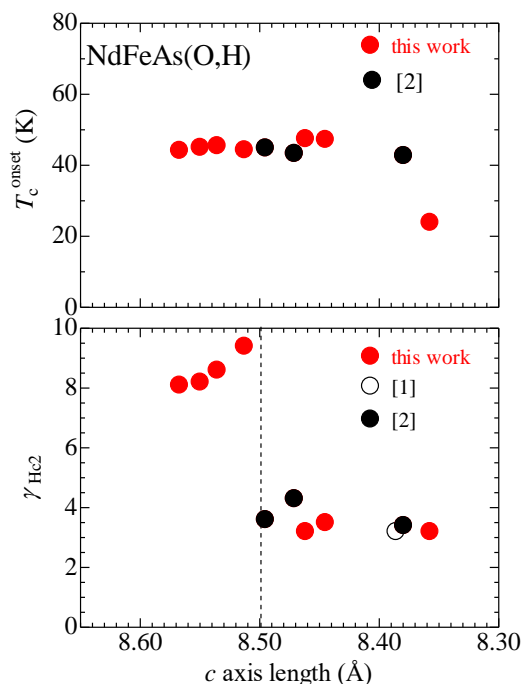
[3]S. Iimura *et al.*, *Nature Commun.* **3**, 943 (2012).

Fig. The  $c$  axis dependence of the onset  $T_c$  and the anisotropy of the upper critical field at  $0.95T_c$  of each sample.

# 極薄膜 FeSe/SrTiO<sub>3</sub> におけるネルンスト効果



## Nernst effect in ultrathin FeSe/SrTiO<sub>3</sub>

東大院総合<sup>1</sup>, 東北大金研<sup>2</sup> ○(DC)小林 友輝<sup>1</sup>, 小川 亮<sup>1</sup>, 岡田 達典<sup>2</sup>, 前田 京剛<sup>1</sup>

The Univ. of Tokyo<sup>1</sup>, IMR, Tohoku Univ.<sup>2</sup>, °(DC)Tomoki Kobayashi<sup>1</sup>, Ryo Ogawa<sup>1</sup>,

Tatsunori Okada<sup>2</sup>, and Atsutaka Maeda<sup>1</sup>

E-mail: kobayashi-tomoki375@g.ecc.u-tokyo.ac.jp

鉄カルコゲナイド超伝導体 FeSe は, SrTiO<sub>3</sub> 基板上で単層膜にすると界面効果によって超伝導転移温度  $T_c$  が 65 K まで上昇する可能性が注目されている[1]. しかしこの値は角度分解光電子分光測定の研究でしか報告されておらず, 電気抵抗測定では 45 K 以下でしか超伝導の兆候は見られずゼロ抵抗は  $T_c^{\text{zero}} = 29$  K 以下でしか観測されていない. そのため,  $T_c^{\text{zero}}$  以上の高温では超伝導揺らぎが支配的である可能性がある. これまで分子線エピタキシー(MBE)法が試料作製に用いられてきたが, 我々はパルスレーザー堆積(PLD)法を用いた界面効果による超伝導増強の実現に初めて成功した[2]. 前回の発表では磁場中で低温になると二次元から三次元的にクロスオーバーしていく磁気抵抗のふるまいを報告した[3]. さらに, 膜厚を薄くしても定性的な振る舞いに変化は見られなかった. これは PLD 法で作製した試料でも MBE の試料と同様に, 超伝導が FeSe/STO 界面で起きていることを示唆している.

そこで本研究では, 超伝導揺らぎを調べるため, ネルンスト効果測定を行った. 試料の端点を銅ブロックで固定し, 直流の熱流を加え磁場, 温度一定の条件で測定を行った. 図 1 は厚み 2 nm の FeSe 極薄膜の(a)シート抵抗と(b)ネルンスト効果測定の結果から求めた横ペルチェ係数  $\alpha_{xy}$  の温度依存性である.  $T_c^{\text{onset}} = 29$  K 以下で  $R_{sq}$  が減少するとともに, すべての磁場で  $\alpha_{xy}$  がピークを示す振る舞いを観測した. これは超伝導に起因したネルンスト効果だと考えられる.  $\alpha_{xy}$  は 32 K 以下で上昇しており, これは超伝導揺らぎに対応していると考えられる. 当日は, 磁化測定の結果を加えその比較も行う.

[1] Q. Y. Wang *et al.*, CPL **29**, 037402 (2012).

[2] T. Kobayashi *et al.*, SuST **35**, 07LT01 (2022).

[3] 小林 友輝他, 第 71 回応用物理学会春季学術講演会 24a-12-P4.

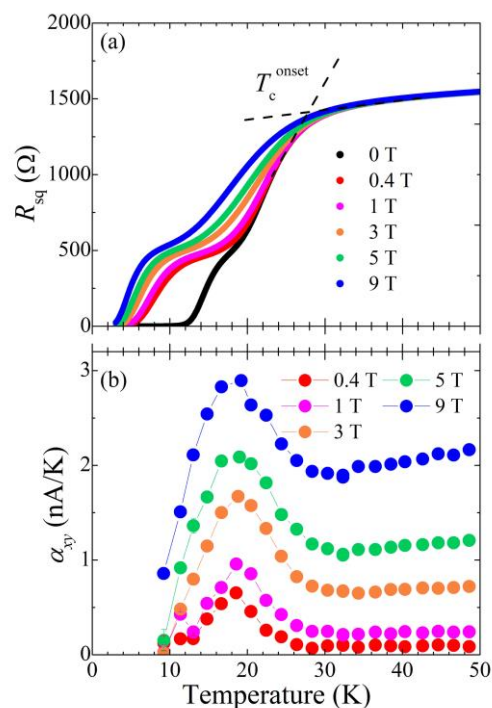


図 1. 0.4, 1, 3, 5, 9 T の磁場下の(a)シート抵抗の温度依存性と(b)横ペルチェ係数の温度依存性

11 超伝導 | 一般セッション(口頭講演): 11.1 基礎物性

**[17a-C31-1~11] 11.1 基礎物性**

[17a-C31-1]

2 段階放電プラズマ焼結を用いたK ドープBaFe<sub>2</sub>As<sub>2</sub> 多結晶バルクの臨界電流特性○石渡 翔大<sup>1</sup>、霜山 郁弥<sup>1</sup>、Ayukaryana Nur Rahmawati<sup>1</sup>、山本 明保<sup>1</sup> (1.農工大)

[17a-C31-2]

鉄系超伝導体(Ba,K)Fe<sub>2</sub>As<sub>2</sub>単一人工粒界の作製○(D)秦 東益<sup>1</sup>、郭 子萌<sup>2</sup>、Tarantini Chiara<sup>3</sup>、波多 聰<sup>2</sup>、内藤 方夫<sup>1</sup>、山本 明保<sup>1</sup> (1.農工大工、2.九大、3.米国国立強磁場研)

[17a-C31-3]

MBE法による電子ドープニッケル酸化物の作製

○香田 匡貴<sup>1</sup>、納 謙吾<sup>1</sup>、迫田 将仁<sup>1</sup>、下田 周平<sup>2</sup>、市村 晃一<sup>1</sup> (1.北大工、2.北大触研)

[17a-C31-4]

Nd:YAGレーザーを用いたPLD 法によるニッケル酸化物薄膜の作製とトポケミカル還元効果

○(M1)森田 航太<sup>1</sup>、山下 琉斗<sup>1</sup>、土橋 礼奈<sup>1</sup>、岡部 博幸<sup>2,3</sup>、中村 惇平<sup>3</sup>、桑原 英樹<sup>1</sup>、門野 良典<sup>3</sup>、足立 匡<sup>1</sup> (1.上智大理工、2.東北大金研、3.KEK 物構研)

[17a-C31-5]

超伝導候補新規物質Sr<sub>3</sub>Ni<sub>2</sub>O<sub>5</sub>Cl<sub>2</sub>の高圧合成と物性評価○(D)山根 和樹<sup>1,2</sup>、足立 伸太郎<sup>3</sup>、松本 凌<sup>1</sup>、寺嶋 健成<sup>1</sup>、櫻井 裕也<sup>1</sup>、高野 義彦<sup>1,2</sup> (1.物材機構、2.筑波大、3.KUAS)

[17a-C31-6]

高圧合成・構造解析・物性測定機能付きDACを用いたT<sub>c</sub> = 20 K級新規超伝導体の発見○松本 凌<sup>1</sup>、山根 和樹<sup>1,2</sup>、寺嶋 健成<sup>1</sup>、新名 亨<sup>3</sup>、入船 徹男<sup>3</sup>、櫻井 裕也<sup>1</sup>、高野 義彦<sup>1,2</sup> (1.NIMS、2.筑波大、3.愛媛大)

[17a-C31-7]

Development of automatic synthesis system for superconducting alloys

○(D)WeiSheng Wang<sup>1,2</sup>、Kensei Terashima<sup>1</sup>、Yoshihiko Takano<sup>1,2</sup> (1.NIMS, 2.Univ. of Tsukuba)

[17a-C31-8]

(Y<sub>1-x</sub>Dy<sub>x</sub>)Ba<sub>2</sub>Cu<sub>3</sub>O<sub>y</sub>の二軸磁場配向挙動の樹脂硬化時間依存性○(M1C)福山 風人<sup>1</sup>、アリ ワリド<sup>1</sup>、足立 伸太郎<sup>1</sup>、木村 史子<sup>1</sup>、堀井 滋<sup>1</sup> (1.京都先端科学大工)

[17a-C31-9]

Relationship between tri-axial orientation degrees and magnetic field strength of MRF on (Y<sub>1-x</sub>Dy<sub>x</sub>)124 with various tri-axial magnetic anisotropies.○(M1)Pamoda Piyumali Kahagalla<sup>1</sup>、Shintaro Adachi<sup>1</sup>、Fumiko Kimura<sup>1</sup>、Ataru Ichinose<sup>2</sup>、Shigeru Horii<sup>1</sup> (1.KUAS, 2.CRIEPI)

[17a-C31-10]

試料搬送型の変調回転磁場印加によるREBa<sub>2</sub>Cu<sub>3</sub>O<sub>y</sub>磁場配向の検討○足立 伸太郎<sup>1</sup>、木村 史子<sup>1</sup>、堀井 滋<sup>1</sup> (1.京都先端科学大・工)



[17a-C31-11]

首振り回転磁場下におけるREBa<sub>2</sub>Cu<sub>3</sub>O<sub>7</sub>粉末(RE=Y, Er)の配向度と首振り角度の関係

○堀井 滋<sup>1</sup>、野津 乃祐<sup>2</sup>、土井 俊哉<sup>2</sup> (1.京都先端科学大・工、2.京大院エネ科)

---

## 2 段階放電プラズマ焼結を用いた K ドープ BaFe<sub>2</sub>As<sub>2</sub> 多結晶バルクの臨界電流特性

### Critical current characteristics of K-doped BaFe<sub>2</sub>As<sub>2</sub> polycrystalline bulks using two-step spark plasma sintering

東京農工大学<sup>1</sup> °石渡 翔大<sup>1</sup>, 霜山 郁弥<sup>1</sup>, Nur Rahmawati Ayukaryana<sup>1</sup>, 山本 明保<sup>1</sup>

Tokyo Univ. of Agri. and Tech.<sup>1</sup> °Shota Ishiwata<sup>1</sup>, Fumiya Shimoyama<sup>1</sup>,

Nur Rahmawati Ayukaryana<sup>1</sup>, Akiyasu Yamamoto<sup>1</sup>

E-mail: s230587z@st.go.tuat.ac.jp

鉄系高温超伝導体[1]の1種であるBaFe<sub>2</sub>As<sub>2</sub>(Ba122)は元素置換により超伝導が発現する。Baサイトの一部をKで置換したKドープBa122は高い臨界温度( $T_c=38$  K[2])と上部臨界磁場( $H_{c2}>50$  T[3])を持ち、強力磁石等への応用が期待されている。最近、我々は放電プラズマ焼結(SPS)法を用いたKドープBa122バルクにおいて、 $1\times 10^5$  A/cm<sup>2</sup>を超えるランダム方位の多結晶では高い臨界電流密度( $J_c$ )を達成した[4~5]。一方で、薄膜では $1\times 10^6$  A/cm<sup>2</sup>以上の高い $J_c$ [6]が報告されている。本研究では、2段階SPS[7~9]を用いて熱処理条件による配向度と $J_c$ への影響を評価した。Ar雰囲気グローブボックス内で仕込組成Ba<sub>0.6</sub>K<sub>0.4</sub>Fe<sub>2</sub>As<sub>2</sub>となるように単体金属を秤量し、高エネルギー混合[4]することでKドープBa122前駆体を作製した。その後、SPS法によりΦ10 mmのバルクを作製した(1<sup>st</sup> step SPS)後、Φ15 mmの型に1<sup>st</sup> step SPSバルクを充填し再度SPS法によりバルクを得た(2<sup>nd</sup> step SPS)。Fig. 1に700°Cと800°Cで作製した2<sup>nd</sup> step SPSバルク小片の磁化測定による磁化ヒステリシスループを、挿入図に $J_c$ の外部磁場依存性を示す。700°C試料ではバ

ルクXRDにより明らかな配向を確認でき、 $J_c$ は $1.4\times 10^5$  A/cm<sup>2</sup> (SF, 5 K)と高い値を示した。一方で、800°C試料では700°C試料よりも強い配向を示したにもかかわらず $J_c$ は低下した。Fig. 1より800°C試料では磁化ヒステリシスループの0 T付近に2つのピークが存在し、Hecherらのモデル[10]によると粒間電流と粒内電流が混在する中粒径の磁化挙動を示している。800°C試料では比較的大きい粒径の影響で磁化が制限された可能性があり、700°C試料では粒径を抑えて配向したことで高 $J_c$ が得られたことが考えられる。

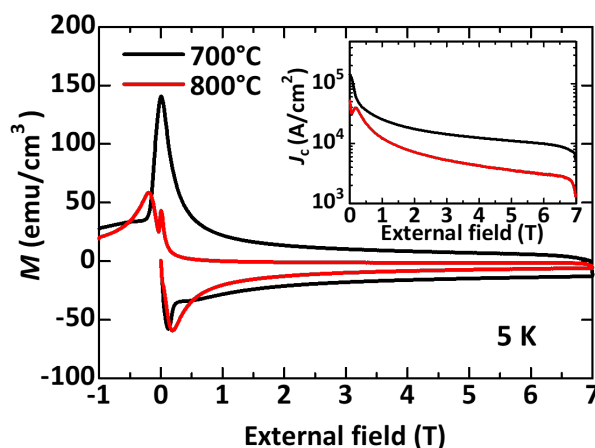


Fig. 1 Magnetic hysteresis loops. The inset shows external field dependence of  $J_c$ .

[1] Y. Kamihara *et al.*, *J. Am. Chem. Soc.* **130**, 11 (2008). [2] M. Rotter *et al.*, *Phys. Rev. Lett.* **101**, 107006 (2008). [3] C. Tarantini *et al.*, *Phys. Rev. B* **84**, 184522 (2011). [4] S. Tokuta *et al.*, *iScience* **25**, 103992 (2022). [5] A. Yamamoto *et al.*, *NPG Asia Mater.* **16**, 29 (2024). [6] D. Qin *et al.*, *Supercond. Sci. Technol.* **35**, 09LT01 (2022). [7] S. Ishiwata *et al.*, JSAP Autumn Meeting 20p-B202-11 (2023). [8] J. G. Noudem *et al.*, *Scr. Mater.* **66**, 258 (2012). [9] S. Ishida *et al.*, *J. Alloys Compd.* **961**, 171093 (2023). [10] J. Hecher *et al.*, *Supercond. Sci. Technol.* **29**, 025004 (2016).

## 鉄系超伝導体(Ba,K)Fe<sub>2</sub>As<sub>2</sub> 単一人工粒界の作製

### Artificial grain boundary of the Fe-based superconductor (Ba,K)Fe<sub>2</sub>As<sub>2</sub>

農工大<sup>1</sup>, 九大<sup>2</sup>, 米国国立強磁場研<sup>3</sup> ○(D3) 秦 東益<sup>1</sup>, 郭 子萌<sup>2</sup>, Chiara Tarantini<sup>3</sup>, 波多 聰<sup>2</sup>,  
内藤 方夫<sup>1</sup>, 山本 明保<sup>1</sup>

Tokyo Univ. Agricul. and Technol.<sup>1</sup>, Kyushu Univ.<sup>2</sup>, NHMFL<sup>3</sup>, ○Dongyi Qin<sup>1</sup>, Zimeng Guo<sup>2</sup>,  
Chiara Tarantini<sup>3</sup>, Satoshi Hata<sup>2</sup>, Michio Naito<sup>1</sup>, Akiyasu Yamamoto<sup>1</sup>

E-mail: s210351w@st.go.tuat.ac.jp

鉄系超伝導体<sup>[1]</sup>は銅酸化物系超伝導体に次ぐ高い臨界温度を有しており、電磁的異方性が小さいことや結晶粒界の方位差が臨界電流密度 ( $J_c$ ) に及ぼす影響が小さい<sup>[2]</sup>ことから、配向化を必要としない多結晶体としての応用が期待されている。鉄系超伝導体のなかで、(Ba,K)Fe<sub>2</sub>As<sub>2</sub>は 38 K の比較的高い臨界温度と 50 T を超える上部臨界磁場を有していることから、強磁場への応用に向けた研究が盛んに進められている。

本研究では鉄系超伝導体の結晶粒界特性の解明に向けて、(Ba,K)Fe<sub>2</sub>As<sub>2</sub> エピタキシャル薄膜を [001]チルト粒界 SrTiO<sub>3</sub> バイクリスタル基板上に成膜することを目的とした。薄膜作製は分子線エピタキシー法を用いて行った<sup>[3]</sup>。基板には、表面エッチングを施していない SrTiO<sub>3</sub>(001)基板を用いた。まず、これまでに報告の無い SrTiO<sub>3</sub> 基板上に(Ba,K)Fe<sub>2</sub>As<sub>2</sub>を成膜するため、単結晶基板上に 20 nm 程度の BaFe<sub>2</sub>As<sub>2</sub>をバッファ層として導入した。作製した(Ba,K)Fe<sub>2</sub>As<sub>2</sub> 薄膜は、X 線回折パターンにおいて鋭い  $c$  軸配向性と面内四回対称性がみられたことから、エピタキシャル薄膜であると判断した。(008)面のロッキングカーブ半値幅と(103)面の $\phi$ スキンの半値幅はそれぞれ 1.05°と 1.4°であり、試料の結晶性が高いことが示唆された。試料は 38.4 K で鋭い超伝導転移を示し、10 MA/cm<sup>2</sup>を上回る非常に高い  $J_c$ が得られた。同様の方法で、接合角が 24°, 30°, 36.8°の SrTiO<sub>3</sub> バイクリスタル基板上に薄膜を作製し、その結晶構造を調べた。30°以上の高角粒界含め、いずれの接合角のバイクリスタル基板上にも基板の粒界角を反映しながら、エピタキシャル成長していることが確認された (図 1)。また、バイクリスタル基板上に成膜した(Ba,K)Fe<sub>2</sub>As<sub>2</sub> の(103)面の $\phi$ スキンの半値幅は 1°未満であり、Ba(Fe,Co)<sub>2</sub>As<sub>2</sub><sup>[4]</sup>と同等の結晶性の単一人工粒界を得ることに成功した。

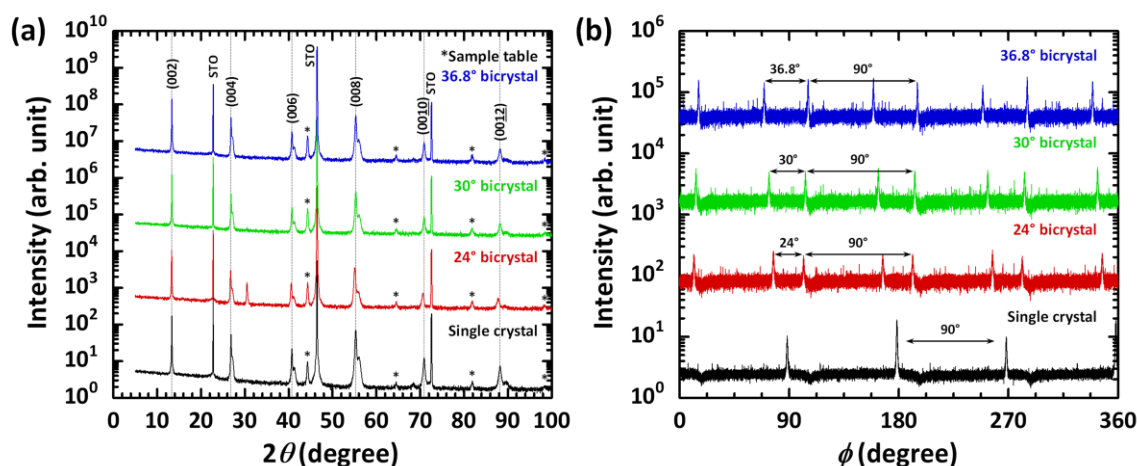


Figure 1. (a)  $2\theta/\omega$ -scan and (b) (103)  $\phi$ -scan of the (Ba,K)Fe<sub>2</sub>As<sub>2</sub> epitaxial thin films on BaFe<sub>2</sub>As<sub>2</sub>-buffered SrTiO<sub>3</sub>(001) single crystal substrate, [001]-tilt-type bicrystalline substrates with a misorientation angle of 24°, 30°, and 36.8°.

#### References

- [1] Y. Kamihara *et al.*, *J. Am. Chem. Soc.* **130**, 3296 (2008). [3] D. Qin *et al.*, *Supercond. Sci. Technol.* **35**, 09LT01 (2022).  
[2] K. Katase *et al.*, *Nat. Commun.* **2**, 409 (2011). [4] K. Iida *et al.*, *Phys. Procedia* **45**, 189 (2013).

## MBE 法による電子ドーピングニッケル酸化物の作製

### Synthesis of electron doped nickel oxide by MBE method

北大工、北大触研<sup>A</sup> ○(M2) 香田 匡貴、(B) 納 謙吾、迫田 将仁、下田 周平<sup>A</sup>、市村 晃一

*Dept. of Appl. Phys. Hokkaido Univ., Lab. of Cat. Hokkaido Univ.*

○Masaki Koda, Kengo Osame, Masahito Sakoda, Shuhei Shimoda, Koichi Ichimura

E-mail: kohda.masaki.e5@elms.hokudai.ac.jp

近年発見された常圧ニッケル酸化物超伝導体[1]は、ペロブスカイト構造をトポケミカル還元して得られる無限層構造である。2次元的な電子構造など銅酸化物超伝導体との共通点もあるが、超伝導相は正孔ドーピング方向に限られており、電子ドーピング方向の相は興味の対象である。

私たちは、ニッケル酸化物内の3価希土類元素Laを4価希土類元素Ceで置換することによって、電子ドーピング方向の相探索を行った(Ceはペロブスカイト構造 $\text{CeNiO}_3$ にて4価となることをX線光電子分光法で確認)。分子線エピタキシー(MBE)法による成膜と $\text{CaH}_2$ 粉末を用いた還元により、様々なドーピング量の無限層構造 $\text{La}_{1-x}\text{Ce}_x\text{NiO}_2$ を作製した。元素比率の評価として、成膜時の水晶振動子(X-tal)での分子線レート制御とエネルギー分散X線分光法(EDS)の測定結果を照らし合わせた (Fig.1)。各試料のデータからX-talで制御したCeレートに対する作製した膜のドーピング量が比例していることがわかり、狙い通りのCeドーピングに成功した。

当日は、作製した $\text{La}_{1-x}\text{Ce}_x\text{NiO}_2$ の物性について報告する予定である。

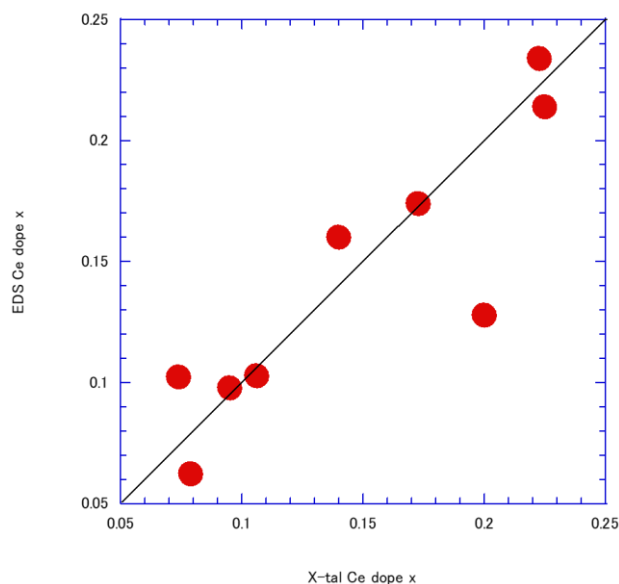


Fig1.Ce dope x by X-tal and EDS

#### Reference

[1] D. Li et al, “Superconductivity in an infinite-layer nickelate.”: *Nature***572**, 624–627 (2019).

# Nd:YAG レーザーを用いた PLD 法によるニッケル酸化物薄膜の作製と トポケミカル還元効果

## Preparation of Nickelate Thin films by PLD Utilizing a Nd:YAG Laser and Topochemical Reduction Effects

上智大学理工<sup>1</sup>, 東北大金研<sup>2</sup>, KEEK 物構研<sup>3</sup>

○(M1)森田 航太<sup>1</sup>, 山下 琉斗<sup>1</sup>, 土橋 礼奈<sup>1</sup>, 岡部 博幸<sup>2,3</sup>, 中村 惇平<sup>3</sup>, 桑原 英樹<sup>1</sup>,  
門野 良典<sup>3</sup>, 足立 匡<sup>1</sup>

Sci. and Technol., Sophia Univ.<sup>1</sup>, IMR, Tohoku Univ.<sup>2</sup>, KEEK-IMSS<sup>3</sup>

°Kota Morita<sup>1</sup>, Ryuto Yamashita<sup>1</sup>, Reina Tsuchihashi<sup>1</sup>, Hiroataka Okabe<sup>2,3</sup>, Jumpei Nakamura<sup>3</sup>,  
Hideki Kuwahara<sup>1</sup>, Ryosuke Kadono<sup>3</sup>, Tadashi Adachi<sup>1</sup>

E-mail: k-morita-1s7@eagle.sophia.ac.jp

【緒言】以前、無限層構造を有するニッケル酸化物  $RE_{1-x}(\text{Ca}, \text{Sr})_x\text{NiO}_2$  ( $RE =$  希土類)の薄膜で超伝導が観測された[1]。Ni は+1 価で  $3d^9$  の電子配置を取るなど、銅酸化物高温超伝導体との共通点がある。そこで、低エネルギーミュオンを用いてニッケル酸化物のスピン揺らぎが調べられたが、母物質とホールドーピングされて超伝導が現れる試料で磁性に変化がないなど、不明な点がある[2]。そこで本研究では、J-PARC で稼働し始めた超低速ミュオンを用いてスピン揺らぎの知見を得るため、前駆体のペロブスカイト構造  $\text{La}_{1-x}\text{Sr}_x\text{NiO}_3$  ( $x = 0, 0.2$ )の薄膜を作製し、トポケミカル還元によって無限層  $\text{La}_{1-x}\text{Sr}_x\text{NiO}_2$  ( $x = 0, 0.2$ )の合成を試みた。

【実験】 $\text{La}_{1-x}\text{Sr}_x\text{NiO}_3$  ( $x = 0, 0.2$ )の薄膜は、通常のエキシマレーザーよりも簡便な Nd:YAG レーザーの第3高調波を用いたパルスレーザー堆積(PLD)法で  $\text{SrTiO}_3$  基板上に作製した。続いて薄膜と還元剤  $\text{CaH}_2$  をパイレックス管へ真空封入したのち、電気炉で加熱して還元を行った。

【結果・考察】 Fig. 1 に、基板温度  $630^\circ\text{C}$ 、酸素分圧 20 Pa、レーザー繰返し周波数 5 Hz、レーザーエネルギー密度  $3.9 \text{ J/cm}^2$  で作製した母物質の As-grown と、 $300^\circ\text{C}$  で 80 分間還元した試料における X 線回折ピークプロファイルを示す。As-grown では単相の  $\text{LaNiO}_3$  が得られ、ラウエフリッジも見られたことから高品質の薄膜が得られた。還元試料では  $\text{LaNiO}_3$  のピークは消失し、 $\text{LaNiO}_2$  のピークが出現した。電気抵抗率測定の結果、As-grown 試料は金属的な振る舞いを示したが、還元試料は低温で半導体的となった。先行研究では金属的[1]、半導体的[3]な振る舞いがともに観測されているので、より品質を向上させた薄膜を調べる必要がある。

[1] D. Li *et al.*, Nature **572**, 624 (2019).

[2] J. Fowlie *et al.*, Nat. Phys. **18**, 1043 (2022).

[3] S. Zeng *et al.*, Sci. Adv. **8**, eabl9927 (2022).

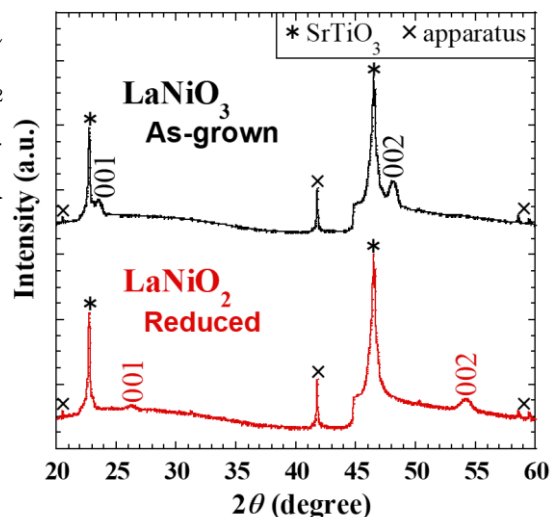


Fig. 1. X-ray diffraction pattern of  $\text{LaNiO}_3$  and  $\text{LaNiO}_2$ .



# 超伝導候補新規物質 $\text{Sr}_3\text{Ni}_2\text{O}_5\text{Cl}_2$ の高圧合成と物性評価

High-pressure synthesis and characterization of  
new compound  $\text{Sr}_3\text{Ni}_2\text{O}_5\text{Cl}_2$  that is candidate for superconductor

物材機構<sup>1</sup>, 筑波大<sup>2</sup>, KUAS<sup>3</sup>, <sup>○</sup>(D1)山根 和樹<sup>1, 2</sup>, 足立 伸太郎<sup>3</sup>, 松本 凌<sup>1</sup>, 寺嶋 健成<sup>1</sup>  
櫻井 裕也<sup>1</sup>, 高野 義彦<sup>1, 2</sup>

NIMS<sup>1</sup>, Univ. of Tsukuba<sup>2</sup>, KUAS<sup>3</sup>, <sup>○</sup>Kazuki Yamane<sup>1, 2</sup>, Shintaro Adachi<sup>3</sup>, Ryo Matsumoto<sup>1</sup>,  
Kensei Terashima<sup>1</sup>, Hiroya Sakurai<sup>1</sup>, Yoshihiko Takano<sup>1, 2</sup>

E-mail: YAMANE.Kazuki@nims.go.jp

昨年、高圧力下の Ni 酸化物  $\text{La}_3\text{Ni}_2\text{O}_{7+\delta}$  が転移温度  $T_c = 80$  K の高温超伝導体であると報告され、大きな注目を集めている[1]。常圧力下の  $\text{La}_3\text{Ni}_2\text{O}_7$  は斜方晶構造で超伝導を示さないが、20 GPa 程度の圧力で正方晶系へと構造相転移して超伝導を示すと報告された[2]。本研究では、 $\text{La}_3\text{Ni}_2\text{O}_7$  と類似の電子状態を持ち、常圧で正方晶構造となることが理論予測されている  $\text{Sr}_3\text{Ni}_2\text{O}_5\text{Cl}_2$  に着目し、その合成と物性評価を行った。

川井式マルチアンビル装置による高圧合成により、 $\text{Sr}_3\text{Ni}_2\text{O}_5\text{Cl}_2$  の多結晶試料を得た。合成した試料について、X 線回折 (XRD) パターンを測定した。また、ホウ素ドープダイヤモンドを電極としたダイヤモンドアンビル高圧セルを用いて高圧力下の電気抵抗を測定した[3]。

Fig.1 に 10 GPa, 1380 °C で得た試料の XRD パターンを示す。ほとんどの回折線が正方晶構造で指数付けされ、新規物質で目的相の  $\text{Sr}_3\text{Ni}_2\text{O}_5\text{Cl}_2$  を合成できた。Fig.2 に  $\text{Sr}_3\text{Ni}_2\text{O}_5\text{Cl}_2$  の主な圧力下における電気抵抗の温度依存性を示す。0.4 GPa から 48 GP までの圧力印加と共に抵抗が一桁ほど減少し、その後上昇に転じた。また、100 GPa を超える高圧領域まで絶縁体で超伝導を示さないことが分かった。今後は  $\text{Sr}_3\text{Ni}_2\text{O}_5\text{Cl}_2$  の結晶構造の詳細とキャリアドーピングの可能性について探る。

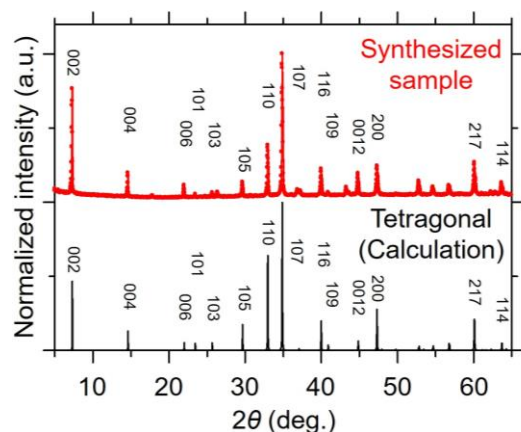


Fig.1 XRD pattern of synthesized sample.

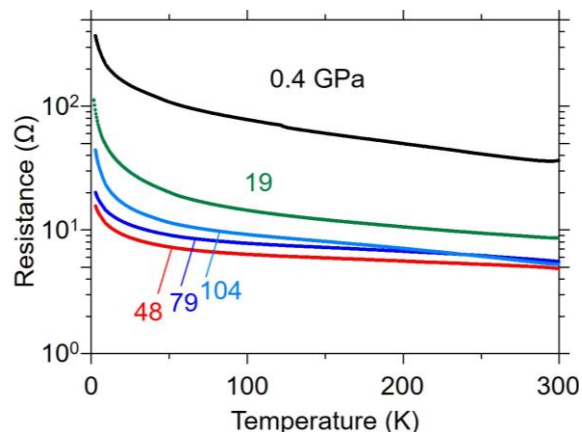


Fig.2  $R$ - $T$  of the sample at each pressure.

[1] H. Sun et al., Nature **621**, 493 (2023). [2] L. Wang et al., J. Am. Chem. Soc. **146**, 7506 (2024).

[3] R. Matsumoto et al., J. Appl. Phys. **56**, 05FC01 (2017).

## 高圧合成・構造解析・物性測定機能付き DAC を用いた $T_c = 20$ K 級新規超伝導体の発見

Discovery of novel superconductor with  $T_c = 20$  K using DAC with the functions of  
high-pressure synthesis, structural analysis, and physical property measurement

○松本 凌<sup>1</sup>, 山根 和樹<sup>1, 2</sup>, 寺嶋 健成<sup>1</sup>, 新名 亨<sup>3</sup>, 入船 徹男<sup>3</sup>, 櫻井 裕也<sup>1</sup>, 高野 義彦<sup>1, 2</sup>

(1. NIMS, 2. 筑波大, 3. 愛媛大)

○Ryo Matsumoto<sup>1</sup>, Kazuki Yamane<sup>1,2</sup>, Kensei Terashima<sup>1</sup>, Toru Shinmei<sup>3</sup>, Tetsuo Irifune<sup>3</sup>,

Hiroya Sakurai<sup>1</sup>, Yoshihiko Takano<sup>1,2</sup> (1. NIMS, 2. Univ. of Tsukuba, 3. Ehime Univ.)

E-mail: MATSUMOTO.Ryo@nims.go.jp

高圧合成法は、未探索の準安定領域における新規物質合成を行ううえで有効な手法であり、特に超伝導体の探索では顕著な成果を挙げている。一方で高圧準安定相の超伝導探索においては、高圧合成を行ったのち構造解析や物性測定をその場で行う必要があり、実験難易度が跳ね上がることがボトルネックとなっている。我々はこれまでに、高圧力印加装置であるダイヤモンドアンビルセル (DAC) の試料空間に、X 線を透過する導電性ダイヤモンド薄膜から成る合成用ヒーターや温度計、物性測定用電極をパターンニングすることで、高圧合成と X 線構造解析、電気抵抗測定を同一試料にて行うことができる仕組みを開発してきた[1]。この手法を用いて、第一原理計算により超伝導の候補物質と予測されていた立方晶の  $\text{Sn}_3\text{S}_4$  を初めて合成し、10 K を超える比較的高い  $T_c$  を示すことを見出した[2]。現在は同型構造におけるアニオン・カチオンサイトの置換により、類縁物質での超伝導探索と基礎物性の理解を目的に研究を進めている。

本講演では、 $\text{Sn}_3\text{S}_4$  と同型構造の  $\text{In}_{3-x}\text{S}_4$  に着目する。本物質は金属サイトの占有率に自由度があり、In が 3 価となる  $\text{In}_{2.67}\text{S}_4$  (= 整数比で  $\text{In}_2\text{S}_3$ ) の組成比で電荷中性となる。実際に過去の合成例を見ると、常圧安定相の正方晶  $\text{In}_2\text{S}_3$  を高温高圧処理することにより、立方晶の  $\text{In}_{2.67}\text{S}_4$  が得られている[3]。我々は  $\text{In}_{2.67}\text{S}_4$  の物性測定を初めて行い、 $T_c = 16$  K 前後の超伝導を示すことを前回の応物で報告した[4]。その後の検討で、試料のバッチによっては電気抵抗が 17 K 以上からわずかに減少し始めることに注目し、合成条件の最適化による  $T_c$  の向上を目指している。その結果、合成温度の上昇とともに  $T_c$  が向上し、図 1 に示すようにオンセット  $T_c$  が 20 K に到達することを発見した。構造解析の結果、焼結を行うごとに In の占有率が 1 に近づく、すなわち組成比が  $\text{In}_3\text{S}_4$  へと変化していることが示唆された。今後は高い  $T_c$  の要因解明と類縁物質におけるさらなる探索を目指す。

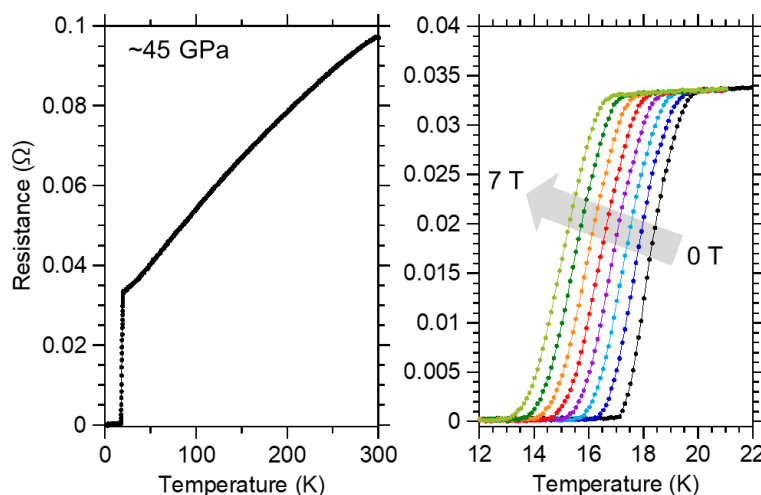


Fig. 1 Temperature dependence of resistance at around 45 GPa in  $\text{In}_{3-x}\text{S}_4$ . (a) 300-0 K, (b) 22-12 K under various magnetic fields.

- [1] R. Matsumoto et al., APL. 119, 053502 (2021). [2] R. Matsumoto et al., Inorg. Chem. 61, 4476 (2022).  
[3] S. G. Parra et al., Phys. Chem. Chem. Phys. 23, 23625 (2021). [4] 山根 他, 第 71 回応物, 24a-12P-6.

# Development of automatic synthesis system for superconducting alloys

Wei-Sheng Wang<sup>1,2</sup>, Kensei Terashima<sup>1</sup>, Yoshihiko Takano<sup>1,2</sup>

NIMS<sup>1</sup>, Univ. of Tsukuba<sup>2</sup>

Email: WANG.Wei-Sheng@nims.go.jp

The rise of materials informatics and its ability to predict material properties through computational modeling has spurred a demand for robust experimental validation. Automation using robots has emerged as a promising approach to expedite this validation process. Recent advancements in robotic systems for material synthesis have been documented in diverse areas, including liquid-phase materials[1], thin-film[2], and solid-state synthesis[3]. While robots excel at repeatable movement, achieving consistent final products remains paramount for both process optimization and obtaining materials with desired properties through Bayesian optimization techniques.

This work reports the development of an automated arc-melting system (Figure 1) for the synthesis of alloys and demonstrates its successful application in the production of several superconducting samples. The system is built upon the Robot Operating System (so-called ROS2), a flexible and scalable framework for developing robust and reliable robotic applications. ROS2 provides a structured communication architecture between various system components, including the robotic arm, vacuum chamber, arc-melting furnace, and sensors. This modular design facilitates the integration of additional components and the adaptation of the system for diverse experimental setups.

The system's basic construction is nearing completion, with successful testing of key hardware components (cooling water flow, air/Ar pressure, and electric arc control). The process begins by initiating the arc on Zr stored as an oxygen trap (Figure 2), followed by its migration towards the raw material mixture. After cooling, the material is flipped and re-melted for ensuring the reaction and the homogeneity of the product.

Despite the apparent simplicity of the process, numerous parameters can be optimized, including discharge power and distance, approach speed, arc radius, and the number of melting cycles. Leveraging the system, we have successfully synthesized several samples (Figure 3), demonstrating its potential for high-throughput and reproducible production of superconducting alloys. The developed system can be quite useful for seeking new superconducting materials with enhanced properties and broader applications.



Figure 1: Automated arc-melting system.



Figure 2: Arc-melting in automatic motion.

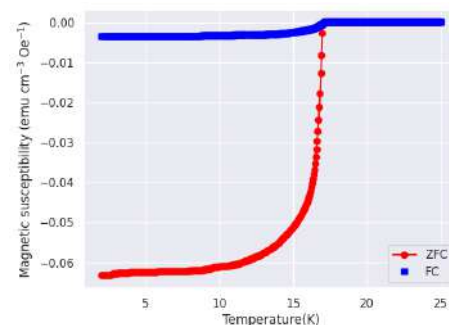


Figure 3: Magnetization data under 10 Oe, for  $Nb_3Al$  sample synthesized by the automated arc-melting system.

## References:

- [1] Benjamin Burger et al. In: *Nature* 583, 237 (2020).
- [2] Ryota Shimizu et al. In: *APL Materials* 8, 11 (2020).
- [3] Nathan J Szymanski et al. In: *Nature* 624, 86 (2023).

# (Y<sub>1-x</sub>Dy<sub>x</sub>)Ba<sub>2</sub>Cu<sub>3</sub>O<sub>y</sub> の二軸磁場配向挙動の樹脂硬化時間依存性

Resin-curing time dependence of biaxial magnetic alignment behavior for (Y<sub>1-x</sub>Dy<sub>x</sub>)Ba<sub>2</sub>Cu<sub>3</sub>O<sub>y</sub>

京都先端科学大・工: 福山風人, アリワリドビン, 足立伸太郎, 木村史子, 堀井滋

Kyoto Univ. Adv. Sci.: F. Fukuyama, W. B. Ali, S. Adachi, F. Kimura, and S. Horii

E-mail: 2024mm18@kuas.ac.jp

## 1. Introduction

To achieve the high critical current density of REBa<sub>2</sub>Cu<sub>3</sub>O<sub>y</sub> (RE123) superconductors (SCs) for practical use, bi- or tri-axial grain alignment is essential. Our group is focusing on the magnetic alignment technique to improve critical current by fabricating the thick RE123 film (> 10 μm). Biaxial alignment of RE123 grains with twinned microstructure has been achieved under the modulated rotating magnetic field of solenoidal SC magnet (SC-MRF) in an epoxy resin [1, 2]. Currently, we developed the linear drive type MRF equipment (LDT-MRF) [3]. One of the issues is development of the biaxial aligned RE123 ceramics based on the colloidal process. The time required for bi-axial magnetic alignment,  $\tau$  [s], is expressed as follows when the viscosity of the dispersed media is  $\eta$  [Pa·s],  $\Delta\chi_{ca}$  is magnetic anisotropy, and  $B$  [T] is magnetic field strength [4]:  $\tau = 6\eta\mu_0/\Delta\chi_{ca}B^2$ . Previously, we reported viscosity dependence of biaxial orientation degrees in (Y<sub>1-x</sub>Dy<sub>x</sub>)123 [5]. In principle,  $\tau$  needs to be shorter than the curing time of epoxy resins or the casting time of colloidal solution. In this study, we clarified the degrees of orientation of (Y<sub>1-x</sub>Dy<sub>x</sub>)Ba<sub>2</sub>Cu<sub>3</sub>O<sub>y</sub> [(Y<sub>1-x</sub>Dy<sub>x</sub>)123] particles under the SC-MRF and the LDT-MRF in epoxy resin with different curing times.

## 2. Experimental

(Y<sub>1-x</sub>Dy<sub>x</sub>)123 [ $x = 0, 0.02, 0.05, \text{ and } 0.1, y \sim 7$ ] polycrystals were (synthesized by the standard solid-state reaction and oxygen annealing; particle size  $\sim 10$  μm) prepared. Before the magnetic alignment, epoxy resins were pre-cured to reach the target viscosity as the initial viscosity state. (Y<sub>1-x</sub>Dy<sub>x</sub>)123 powders were mixed with pre-cured epoxy resins at weight ratio of 1:10 and aligned under SC-MRF of 0.8 T and LDT-MRF. We used three different types of epoxy resins. Resin A shows a higher initial viscosity (specification,  $\eta_{\text{init}} \sim 40$  Pa·s) and 2.7 h for curing. Resins B and C show lower initial viscosities (specification,  $\eta_{\text{init}} \sim 0.5$  Pa·s) and different curing times (17 h for B, 37 h for C). The degrees of orientation of the magnetically aligned powder samples of (Y<sub>1-x</sub>Dy<sub>x</sub>)123 were determined from (103) pole figure measurements.

## 3. Results and Discussion

Figs. 1(a) and 1(b) show (103) pole figures of the (Y<sub>0.98</sub>Dy<sub>0.02</sub>)123 ( $x = 0.02$ ) powder samples aligned under LDT-MRF, in Resin A and the pre-cured Resin

B, respectively. The pre-curing time of the pre-cured Resin B was 3 h, and its estimated viscosity is 40 Pa·s. Note that the measurement plane for the (103) pole figure is perpendicular to the direction of the static magnetic field component. For magnetically aligned (Y<sub>0.98</sub>Dy<sub>0.02</sub>)123 in Resin A, ring shape pattern was obtained, indicating that (Y<sub>0.98</sub>Dy<sub>0.02</sub>)123 in Resin A achieved high  $c$ -axis aligned and low in-plane orientation degrees. Clearly, 4-fold symmetric spots were obtained for magnetically aligned (Y<sub>0.98</sub>Dy<sub>0.02</sub>)123 in the pre-cured Resin B, indicating that (Y<sub>0.98</sub>Dy<sub>0.02</sub>)123 powders in the pre-cured Resin B was biaxial aligned. FWHM values in the rotational direction were determined using these spots. The average of FWHM values,  $\Delta\phi$ , was used as an index of the degrees of in-plane orientation. We could not determine  $\Delta\phi$  value in Fig. 1(a) because of peak broadness, while the  $\Delta\phi$  value was approximately 20 deg in Fig. 1(b). These clear differences in experimental results between Resin A and the pre-cured Resin B were obtained, suggesting that in-plane orientation degrees strongly depend on the time dependence of viscosity. In this study, we will report the change in the in-plane orientation degrees on the magnetically aligned (Y<sub>1-x</sub>Dy<sub>x</sub>)123 powder samples as functions of viscosity, curing time, and magnetic anisotropy (or  $x$ ).

## References

- [1] S. Horii *et al.*, SuST **29** (2016) 125007.
- [2] W. B. Ali *et al.*, J. Appl. Phys. **134** (2023) 163901.
- [3] S. Horii *et al.*, J. Ceram. Soc. Jpn. **126** (2018) 885.
- [4] F. Kimura and T. Kimura, Cryst. Eng. Comm. **20** (2018) 861.
- [5] F. Fukuyama *et al.*, JSAP2024, Spring Meeting, 24p-12P-7

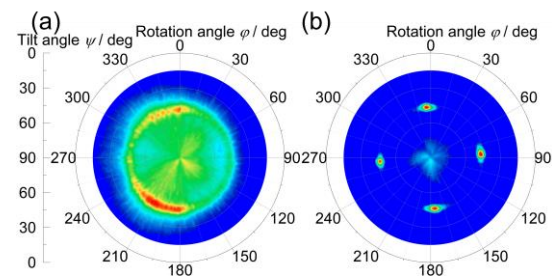


Fig. 1 (103) pole figures at  $\alpha$ -plane of the magnetically aligned powder samples of (Y<sub>0.98</sub>Dy<sub>0.02</sub>)123 under LDT-MRF in (a) Resin A ( $\eta_{\text{init}} \sim 40$  Pa·s) and (b) the pre-cured Resin B ( $\eta_{\text{init}} \sim 40$  Pa·s), respectively.



# 三軸磁気異方性を制御した $(Y_{1-x}Dy_x)124$ における三軸磁場配向度と回転変調磁場強度の関係

## Relationship between tri-axial orientation degrees and magnetic field strength of MRF on $(Y_{1-x}Dy_x)124$ with various tri-axial magnetic anisotropies

Kyoto Univ. Adv. Sci.<sup>1</sup>, CRIEPI<sup>2</sup>

◦ K.G.P.P Kahagalla<sup>1</sup>, S. Adachi<sup>1</sup>, F. Kimura<sup>1</sup>, A. Ichinose<sup>2</sup>, and S. Horii<sup>1</sup>

E-mail: 2023mm10@kuas.ac.jp

### 1. Introduction

Layered functional materials, such as thermoelectric, optical, and superconductive materials, exhibit direction-dependent of physical and mechanical properties due to their anisotropic crystal structures. However, achieving optimal performance in practical applications requires precise control over the materials microstructure and alignment. Especially in high- $T_c$  cuprate superconductors, misorientation between grains significantly reduces intergrain critical current density, necessitating tri-axial grain alignment along the  $a$ ,  $b$ , and  $c$ -axes to optimize the transport properties.

Our group has previously demonstrated a magnetic grain-orientation technique using a modulated rotating magnetic field (MRF) without relying on epitaxial growth method [1]. This method is effective for materials exhibiting tri-axial magnetic anisotropy. Advancing the magneto-scientific technique to a practical production process for RE-based cuprate superconductors requires a thorough understanding of the factors determining their magnetization axes and magnetic anisotropies. This study focused on the relationship between tri-axial orientation degrees and magnetic field strength of MRF on twin-free  $(Y_{1-x}Dy_x)Ba_2Cu_4O_8$  [ $(Y_{1-x}Dy_x)124$ ] with various tri-axial magnetic anisotropies.

### 2. Experimental Details

Single crystals of  $(Y_{1-x}Dy_x)124$  with varying nominal Dy concentration levels,  $x=0, 0.1, 0.25, 0.50, 0.75$ , and 1, were grown using the flux method [2] in ambient pressure, employing KOH as the flux medium.  $Y_2O_3$ ,  $Dy_2O_3$ ,  $BaCO_3$ , and  $CuO$  were used as starting materials in a solid-state reaction at 900 °C in air, followed by an intermediate grinding step. The resultant powder was mixed with KOH in a weight ratio of 5:6 (powder:KOH) and subjected to heat treatment at 700 °C in an  $Al_2O_3$  crucible. The crystal growth process was maintained at this temperature for 2 h, followed by a gradual cooling process at a rate of 1 °C/h. Finally, the grown crystals were thoroughly washed with distilled water several times to remove any residual flux. Scanning electron microscope images clarified the particle size and transmission electron microscopy (TEM-EDX) was used to analyze the chemical composition of synthesized samples. Pulverized  $(Y_{1-x}Dy_x)124$  microcrystals were mixed with Araldite Standard ( $\eta_{init} \sim 40$  Pas) epoxy resin in a weight ratio of 1:10 and aligned under MRFs of 1-10 T. The magnetization axes, degrees of orientation of the magnetically aligned (MA) powder samples of  $(Y_{1-x}Dy_x)124$  were determined from

XRD and (017) pole figure measurements.

### 3. Results and discussion

The XRD patterns of the MA- $(Y_{1-x}Dy_x)124$  showed the clear enhancement of (00 $l$ ), ( $h00$ ), and ( $0k0$ ) peaks at the  $\alpha$ ,  $\beta$ , and  $\gamma$  planes respectively under the MRF of 1-10 T. For  $(Y_{1-x}Dy_x)124$  ( $x=0$ ), the relationship of the magnetization axes was  $\chi_c > \chi_a > \chi_b$ , and remained unchanged with change in  $x$ .

As shown in Fig. 1(a), a ring-shaped diffraction pattern was obtained for Y124 under MRF of 1 T in (017) pole figure measurements. The results indicate that only the  $c$ -axis was aligned in above case, suggesting that the static magnetic field component alone was sufficient. In contrast, the rotating field component was not adequate. This might be due to either insufficient magnetic orientation energy or a need for a longer magnetic alignment time. The two-fold symmetric spots were observed at MRF of 10 T as shown in Fig. 1(b). High degrees of in-plane orientation with FWHM < 4° were accomplished for MA-Y124. Furthermore, even at MRF of 5 T, MA-Y124 shows high degrees of in-plane orientation with FWHM < 5°. This suggested the MRF of 5 T applied field is sufficient to achieve the desired magnetic orientation energy even at Y124. The in-plane orientation degrees were gradually increased with the increasing in  $x$ . Considering the influence of the grain size, change in the degrees of in-plane orientation on the MA- $(Y_{1-x}Dy_x)124$  will be discussed in the presentation.

### Reference

- [1] Horii, S. *et al.*, SuST, **28**, 105003 (2015).
- [2] Yamaki, M. *et al.*, Jpn. J. Appl. Phys., **51**, 0101007 (2012).

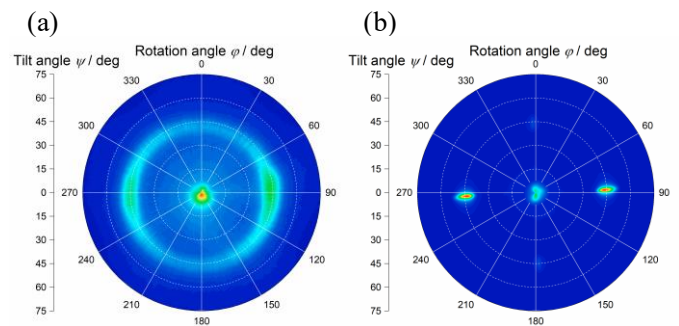


Figure 1. (017) pole figures of MA- $(Y_{1-x}Dy_x)124$  ( $x=0$ ) with (a) MRF of 1 T and (b) MRF of 10 T.  $\Psi$  and  $\phi$  indicate tilt and rotation angles, respectively.



# 試料搬送型の変調回転磁場印加による REBa<sub>2</sub>Cu<sub>3</sub>O<sub>y</sub> 磁場配向の検討

## Study of magnetic alignment in REBa<sub>2</sub>Cu<sub>3</sub>O<sub>y</sub> through sample-transport-based modulated rotating magnetic field application

京都先端科学大・工：〇足立 伸太郎, 木村 史子, 堀井 滋

Kyoto Univ. Adv. Sci (KUAS): 〇Shintaro Adachi, Fumiko Kimura, and Shigeru Horii

E-mail: adachi.shintaro@kuas.ac.jp

### Introduction

To achieve high critical current densities in both self-field and in-field conditions for high- $T_c$  cuprate superconductors like REBa<sub>2</sub>Cu<sub>3</sub>O<sub>y</sub> (RE123), it is crucial to achieve densification and orientation of a substantial number of grains. We are currently investigating magnetic alignment techniques to achieve biaxial orientation of RE123 grains, aiming to advance the practical utilization of RE123 as a superconducting wire. The advantages of magnetic alignment is not requiring highly oriented template materials and it is also a room temperature process. These characteristics of magnetic alignment create new opportunities for fabricating thicker films of RE123, a goal that is challenging to achieve using epitaxial technology.

In the magnetic alignment method, the expectation is that the easy and hard axes align perpendicular to the static magnetic field and the modulated rotating magnetic field, respectively. When the grain shape is approximately spherical, the following formula can be used to estimate the required magnetic alignment time  $\tau$  [1]:  $\tau^{-1} = \chi_a B^2 / 6\eta\mu_0$ , where  $\chi_a$  is the dimensionless difference between the magnetic susceptibility along the easy axis and that perpendicular to the easy axis,  $B$  is the magnetic flux density,  $\eta$  is the medium viscosity, and  $\mu_0$  is the vacuum permeability. Previously, achieving biaxial magnetic alignment of several RE123s required the superconducting magnet [2]. Recently, our group developed an original device that can generate a linear drive type of modulated rotating magnetic fields (LDT-MRF) using the permanent magnet arrays [3]. This magnetic alignment device is compact and has low (capital investment and operational) costs. Also, this LDT-MRF equipment had achieved a static magnetic field of 0.9 T and a rotating magnetic field of 0.8 T. Furthermore, recently, by expanding the width of magnet arrays perpendicular to the LDT direction, we have succeeded in suppressing the tilt of the sample grains in the direction of the hard magnetization axis, thereby achieving the high degrees of orientation of each grain [4-5]. To date, such research has been carried out using batch processes, but the application of this magnetic alignment technology requires a continuous process. In this study, we added a sample transport system to the LDT-MRF equipment and tested a continuous magnetic alignment process.

### Experimental method

Polycrystalline DyBa<sub>2</sub>Cu<sub>3</sub>O<sub>y</sub> (Dy123,  $y \sim 7$ ) powders (ave. particle size  $\sim 2-4 \mu\text{m}$ ) were used

as the test of magnetic alignments by using the LDT-MRF system, showing its relatively large magnetic anisotropy among the RE123 compounds [2-5]. "Araldite Standard" was used as the dispersion medium for Dy123 grains. The initial viscosity (catalog spec) of this epoxy resin is  $\eta_{\text{int}} \sim 40 \text{ Pa}\cdot\text{s}$ , and less than  $5\eta_{\text{int}}$  even after 1 h of mixing. The time when the sample entered/escaped the magnetic field region of the LDT-MRF was defined as  $t_{\text{sta}}/t_{\text{end}}$ , respectively. The orientation state of the Dy123 grains after magnetic alignment was investigated by using the (1 0 3) pole figures.

### Results and discussion

Figures 1a and 1b show the (1 0 3) pole figure results for Sample A and Sample B, respectively. The 4-fold rotationally symmetric spots indicate the biaxial orientation of Dy123 grains with twin microstructures. In both the results for samples A and B, 4 spots and their centers of gravity were shifted in parallel downward on this paper. Such a parallel shift indicates that the grain orientation state is tilted. Specifically, the ends of the Dy123 grains closest to the magnet side were lifted and tilted as the sample escaped from the magnetic field region. The inclination of Sample B ( $\sim 10^\circ$ ) was smaller than that of Sample A ( $\sim 20^\circ$ ). Higher viscosity of the sample when it's escaped from the magnetic field, the grain tilt may be suppressed. By adjusting the magnetic anisotropy and medium viscosity of the sample to the state of the magnetic field lines created by the magnet arrays, it may be possible to obtain a continuously magnetically aligned samples. In this presentation, we will report details of the methods and results.

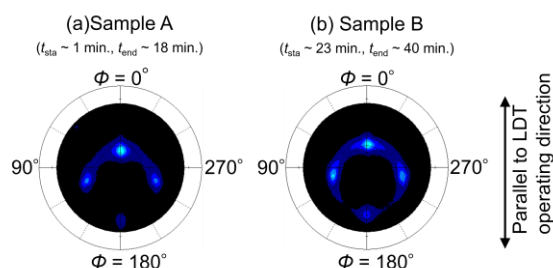


Fig. 1. Results of (1 0 3) pole figure measurements for (a) Sample A ( $t_{\text{sta}} \sim 1 \text{ min.}$ ,  $t_{\text{end}} \sim 18 \text{ min.}$ ) and (b) Sample B ( $t_{\text{sta}} \sim 23 \text{ min.}$ ,  $t_{\text{end}} = 40 \text{ min.}$ ).

### References

- [1] Kimura, *Polym. J.* **35**, 823 (2003). [2] Horii *et al.*, *SuST* **29**, 125007 (2016). [3] Horii *et al.*, *J. Cer. Soc. Jpn.* **126**, 885 (2018). [4] Ali *et al.*, *JAP* **134**, 163901 (2023). [5] Adachi *et al.*, JSAP spring MTG 2024.

## 首振り回転磁場下における REBa<sub>2</sub>Cu<sub>3</sub>O<sub>7</sub> 粉末(RE=Y, Er)の 配向度と首振り角度の関係

Relationship between bi-axial orientation degrees and oscillation angle for REBa<sub>2</sub>Cu<sub>3</sub>O<sub>7</sub> (RE=Y, Er) powder samples aligned under oscillation type of modulated rotating magnetic fields

<sup>1</sup>京都先端科学大学・工, <sup>2</sup>京大院エネ科: °堀井滋<sup>1</sup>, 野津乃祐<sup>2</sup>, 土井俊哉<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Kyoto Univ. Adv. Sci., <sup>2</sup>Kyoto Univ.: °S. Horii<sup>1</sup>, D. Notsu<sup>2</sup> and T. Doi<sup>2</sup>

E-mail: horii.shigeru@kuas.ac.jp

### 1. Introduction

REBa<sub>2</sub>Cu<sub>3</sub>O<sub>7</sub> (RE123, RE: rare-earth elements) shows critical temperature around 90 K and relatively higher critical current densities under magnetic field at 77 K. Due to the weak link at grain boundary in RE123, biaxial/triaxial grain orientation is necessary for practical use. Our group focuses on biaxial/triaxial magnetic alignment by modulated rotating magnetic field (MRF). In principle, the intermittent type MRF[1], which is typically used in our group, includes different processes of the static (SF) and rotating (RF) fields. In the present study, our group uses another type of MRF, an oscillation (OS) type MRF[2]. Fig. 1 shows a schematic of the OS type MRF and its advantages are that the OS process includes both the SF and RF components and the two components are determined by the oscillation angle ( $\theta$ ) systematically. We investigate the biaxial orientation degrees of twinned Y123 and Er123 powder samples aligned under the OS type MRF with controlling  $\theta$  and magnetic field ( $B_a$ ) systematically.

### 2. Experimental

Oxygen-postannealed Y123 ( $\chi_c > \chi_a > \chi_b$ ) and Er123 ( $\chi_b > \chi_a > \chi_c$ ) polycrystals were pulverized in a agate mortar. The powders were mixed with epoxy resin (Araldite Standard,  $\eta_{mi}=40$  Pas) in a weight ratio with powder : resin = 1:10, and were cured in the OS type MRF. As shown in Fig. 1,  $\theta$  is the maximum OS angle created by the normal direction to the  $\alpha$  plane and the horizontal  $B_a$  direction of the superconducting solinoidal electromagnet. In this study, rotation speed ( $\Omega$ ) is 5 rpm and  $\theta$  is 1.8°~90°. (103) pole figure measurement is examined to determine the biaxial orientation degree ( $F$ ) of the magnetically aligned powder samples of Y123 and Er123.

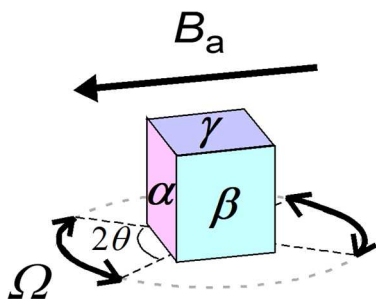


Fig. 1 Experimental configuration in oscillated rotation magnetic fields.

### 3. Results and discussion

In principle, within  $\theta < 90^\circ$ , the first easy, second easy and hard axes are aligned normal to the  $\alpha$ ,  $\beta$  and  $\gamma$  planes of Fig. 1, respectively. Fig. 2 shows relationship between  $F$  and  $\theta$  for the magnetically aligned Y123 powder samples with  $B_a = 1, 5$  and 10 T. Incidentally, the  $\gamma$  plane was used as the measurement plane for the (103) pole figure measurement in the Y123 powder samples.

The  $F$  values show ~10% for 1 T, suggesting that the biaxial alignment is not achieved in a whole region of  $\theta$ . For 5 and 10 T,  $F \sim 10\%$  emerges only in a lower  $\theta$  region, while  $F$  increases with the increase in  $\theta$ . The increase in  $\theta$  means the increase in the RF component. It is strongly suggested from Fig. 2 that sufficient RF component for achieving magnetic separation of the  $a$ -axis and  $b$ -axis is obtained by using wider oscillation angles even in 5 and 10 T.

In this presentation, the results in Er123 are also shown, and their relationships between  $F$  and  $\theta$  will be discussed from the theoretical viewpoints.

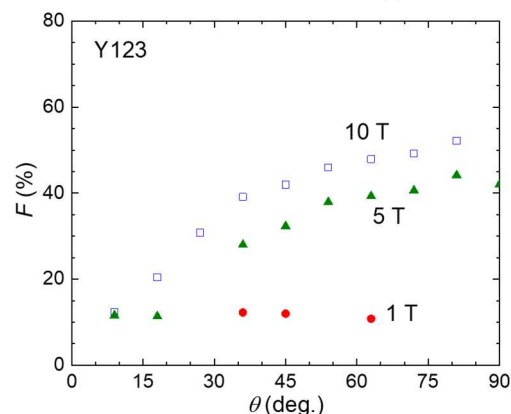


Fig. 2 Relationship between  $F$  and  $\theta$  for the magnetically aligned Y123 powder samples.

### Acknowledgments

This work was partly supported by JST-ASTEP (Stage I) and KAKENHI (17H03235).

### References

- [1] Horii *et al.*, SuST 29 (2016) 125007.
- [2] Yamaki, Horii *et al.*, Phys. Procedia 58 (2014) 62.

11 超伝導 | 一般セッション(口頭講演): 11.1 基礎物性

**[19a-C31-1~6] 11.1 基礎物性**

[19a-C31-1]

ゾルゲル法による無線電力送電用 $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_x$ (Bi-2212)超伝導線材  
作製に関する研究

○(M2)夜久 敬大<sup>1</sup>、長尾 雅則<sup>1</sup>、丸山 祐樹<sup>1</sup>、綿打 敏司<sup>1</sup> (1.山梨大)

[19a-C31-2]

$\text{YBa}_{2-x}\text{La}_x\text{Cu}_3\text{O}_y$  ( $x \leq 0.1$ ) における酸素欠損減少による $T_c$ 向上

○藤原 晶<sup>1</sup>、加藤 雅恒<sup>1</sup>、山下 太郎<sup>1</sup> (1.東北大院工)

[19a-C31-3]

Y247の物性に対するPrおよびZn置換の本質的な効果

○新津 遥都<sup>1</sup>、松下 哲哉<sup>1</sup>、元木 貴則<sup>1</sup>、下山 淳一<sup>1</sup> (1.青学大理工)

[19a-C31-4]

RE247(RE = Nd, Gd)の相安定領域と超伝導特性

○松下 哲哉<sup>1</sup>、新津 遥都<sup>1</sup>、元木 貴則<sup>1</sup>、下山 淳一<sup>1</sup> (1.青学大理工)

[19a-C31-5]

c軸配向RE124超伝導体の作製と物性

○田口 寛人<sup>1</sup>、新津 遥都<sup>1</sup>、松下 哲哉<sup>1</sup>、高木 佑大<sup>1</sup>、元木 貴則<sup>1</sup>、下山 淳一<sup>1</sup> (1.青学大理工)

[19a-C31-6]

SDMG法小型REBCOバルク磁石の中低温捕捉磁場特性

○元木 貴則<sup>1</sup>、國本 慧太<sup>1</sup>、浅古 諒<sup>1</sup>、下山 淳一<sup>1</sup> (1.青山学院大学)

## ゾルゲル法による無線電力送電用 $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_x$ (Bi-2212) 超伝導線材 作製に関する研究

Investigation of  $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_x$  (Bi-2212) superconducting wire for wireless power transmission  
using sol-gel method

山梨大<sup>1</sup> ○(M2) 夜久 敬大<sup>1</sup>, 長尾 雅則<sup>1</sup>, 丸山 祐樹<sup>1</sup>, 綿打 敏司<sup>1</sup>

Univ. Yamanashi<sup>1</sup>, ○Takahiro Yaku<sup>1</sup>, Masanori Nagao<sup>1</sup>, Yuki Maruyama<sup>1</sup>, Satoshi Watauchi<sup>1</sup>

E-mail: g23tz021@yamanashi.ac.jp

【緒論】無線電力送電は携帯電話の非接触充電のような小電力領域ではすでに実用化されており、その用途は広がりを見せている。しかし、大電力・長距離の送電を行う際、無線電力送電に用いる導体表面の電気抵抗に由来する送電効率の低下が問題となっている。これに対し導体表面を超伝導体で被覆することで送電効率が大きく改善されたという報告がある[1]。このことから、表面を超伝導体で被覆した線材を安価で大量に作製することができれば、無線電力送電がより大電力・長距離へと用途が広がるものと期待できる。そこで、超伝導体の中でも線材の表面に配置し大気中に暴露された状態でも比較的安定な  $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_x$  (Bi-2212) に着目し、安価で量産が可能なゾルゲル法を用いて、表面が Bi-2212 相で被覆された線材の作製を試みた。本研究では、原料に酢酸塩[2]とプロピオン酸塩[3]を用いたゲルを使用し、表面を Bi-2212 相で被覆した線材の作製を試みた。

【実験方法】酢酸塩ゲルの作製では、 $\text{BiO}(\text{CH}_3\text{COO})$ ,  $\text{Sr}(\text{CH}_3\text{COO})_2 \cdot 0.5\text{H}_2\text{O}$ ,  $\text{Ca}(\text{CH}_3\text{COO})_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$ ,  $\text{Cu}(\text{CH}_3\text{COO})_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$  をカチオンの仕込み組成で  $\text{Bi} : \text{Sr} : \text{Ca} : \text{Cu} = 2 : 2 : 1 : 2$  のモル比で秤量し、プロピオン酸に溶解し、30 wt% アンモニア水で pH 5.0-6.0 の間に調整した。作製した溶液をホットプレートで  $150^\circ\text{C}$  に加熱し、ゲル化した。

プロピオン酸塩ゲルの作製では、出発原料として  $\text{Bi}_2\text{O}_3$ ,  $\text{SrCO}_3$ ,  $\text{CaCO}_3$ ,  $\text{CuO}$  を仕込み組成  $\text{Bi} : \text{Sr} : \text{Ca} : \text{Cu} = 2 : 2 : 1 : 2$  のモル比で秤量し、 $850^\circ\text{C}$ , 50 h 熱処理することで Bi-2212 原料を合成した。この合成粉末に対して質量比 10 倍のプロピオン酸を加え乾燥することでプロピオン酸塩を作製した。これを水、メタノール、ブタノールの混合溶液に溶かし  $120^\circ\text{C}$  で加熱し、ゲル化した。

それぞれ作製したゲルをモネル線(モネル 400, 原子比 Ni65-Cu32-Mn1)に塗布し、 $500^\circ\text{C}$ , 15 min の仮焼を複数回行った後、 $820\text{--}860^\circ\text{C}$ , 90 min 焼成した。得られた線材試料を走査電子顕微鏡(SEM)による観察とエネルギー分散型 X 線分光法(EDS)による組成分析および電気抵抗の温度依存性によって評価した。

【実験結果】Fig. 1 に酢酸塩ゲルを用いて、仮焼回数 3 回、 $860^\circ\text{C}$  で 90 min 焼成した試料の電気抵抗率の温度依存性( $\rho$ - $T$  特性)と試料表面の SEM 像を示す。79 K において超伝導転移を確認し、20 K においてゼロ抵抗が観測された。また、60 K 付近において二段転移が観測され、これは線材の下地金属に用いたモネル線に含まれる Mn が Bi-2212 相の Cu を一部置換したことによるものと考えられる[4]。また、SEM 像から線材表面に Bi-2212 相が広範囲に生成しているが一部 Sr-Ca-Cu-O 系の異相があるなど線材表面を Bi-2212 単相で被覆するには至っていない。Fig. 2 にプロピオン酸塩ゲルを用いて、仮焼回数 3 回、 $840^\circ\text{C}$  で 90 min 焼成した試料の  $\rho$ - $T$  特性と試料表面の SEM 像を示す。SEM 像からプロピオン酸塩ゲルを用いてモネル線表面に Bi-2212 相を生成することに成功した。しかし、モネル線由来と思われる  $\text{CuO}$  相が多く観察され線材表面を完全に Bi-2212 相で覆うことができず、高い電気抵抗率を示した(超伝導転移の観測に至らなかった)。原因としてゲルによって形成される前駆体膜が薄く下地金属であるモネルと反応し、線全体を Bi-2212 相で被覆できなかったものと考えられる。今後は、作製した試料のアニール処理や線材作製時の焼成条件およびゲルの塗布方法を検討し、超伝導転移温度(ゼロ抵抗)や臨界電流密度を向上させたいと考えている。

【謝辞】プロピオン酸塩ゲルの前駆体作製において青山学院大学の下山惇一教授にご指導いただきました。

[1] N. Sekiya and Y. Monjugawa, *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, Vol. 27, (2017), 6602005

[2] 高島進義, 坪田崇, 石川敏章, 大橋憲太郎: 粉体および粉末冶金, 41(1994)1520-1523.

[3] 下山 淳一, 相楽 和豊, 堀口 佳吾, 大崎 瑛介, 元木 貴則, 第 71 回応用物理学会春季学術講演会 (2024) 23p-12N-13

[4] S. Uthayakumar et al, *Physica C* 383 (2002) 122-126.

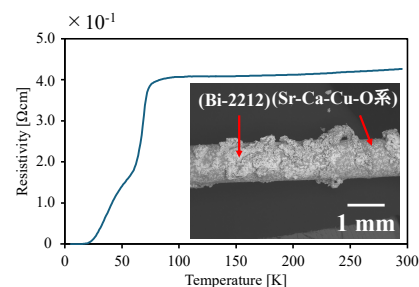


Fig.1  $\rho$ - $T$  characteristics of Bi-2212 wire using acetate gel. The inset is an SEM image of the wire.

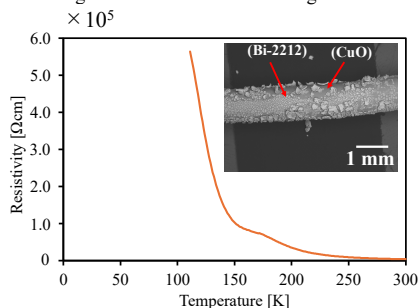


Fig.2  $\rho$ - $T$  characteristics of Bi-2212 wire using propionate gel. The inset is an SEM image of the wire.



# YBa<sub>2-x</sub>La<sub>x</sub>Cu<sub>3</sub>O<sub>y</sub> ( $x \leq 0.1$ ) における酸素欠損減少による $T_c$ 向上 Enhancement of $T_c$ due to reduction of oxygen deficiency for YBa<sub>2-x</sub>La<sub>x</sub>Cu<sub>3</sub>O<sub>y</sub> ( $x \leq 0.1$ )

東北大院工<sup>1</sup> °藤原 晶<sup>1</sup>, 加藤 雅恒<sup>1</sup>, 山下 太郎<sup>1</sup>

Tohoku Univ.<sup>1</sup>, °Akira Fujiwara<sup>1</sup>, Masatsune Kato<sup>1</sup>, Taro Yamashita<sup>1</sup>

E-mail: fujiwara.akira.s5@dc.tohoku.ac.jp

REBa<sub>2</sub>Cu<sub>3</sub>O<sub>y</sub> (RE-123, RE: 希土類金属)は, RE のイオン半径が大きくなるほど最適ホール濃度となる酸素量  $y$  が 7.0 に近づき, 高い  $T_c$  を示すことが報告されている [1]. 我々は, O 鎖の欠損による結晶構造の乱れが超伝導性を抑制していると考え,  $y = 7.0$  において最適ホール濃度をとる物質創製による  $T_c$  の向上を目的として研究している. 前回我々は, 少量の Ba/Nd 置換を行った Nd<sub>1+x</sub>Ba<sub>2-x</sub>Cu<sub>3</sub>O<sub>y</sub> ( $x \leq 0.05$ )において,  $x$  (Nd)の増加と共に酸素量は増加するため, 伝導面のホール濃度がほぼ一定のまま,  $T_c$ を 1.5 K 程度向上させることに成功した [2]. この  $T_c$ 向上は O 鎖欠損の減少に起因すると考えている. 一方, Y-123 においても少量の Ba/RE 置換による  $T_c$ 向上が報告されているが [3], 著者らは伝導面のホール濃度減少により最適ホール濃度に近づいたことに起因すると考察している. そこで今回我々は Y-123 に関し, Nd-123 と同様な O 鎖欠損の減少による  $T_c$  向上の可能性について系統的に調べた.

今回我々は, YBa<sub>2-x</sub>La<sub>x</sub>Cu<sub>3</sub>O<sub>y</sub> ( $x \leq 0.1$ ) の多結晶試料を, 大気中での 880°C, 24 時間の仮焼, 920°C, 24 時間の本焼成, 酸素気流中での 300°C, 48 時間のアニールにより作製した. その後, 粉末 X 線回折による相の同定, ヨウ素滴定による酸素量  $y$  の決定, 磁化率測定による  $T_c$  の決定, 室温でのゼーベック係数測定による伝導面のホール濃度  $p$  の評価を行った.

図 1 に示すように,  $T_c$  は固溶限界である  $x$  (La) = 0.06 において最大の 94 K を示し, 無置換の  $x$  (La) = 0 における 92.4 K から 1.6 K 向上した. これは先行研究 [3]の結果と一致する. 一方で, 図 2 に示すように,  $x$  (La) の増加とともに酸素量  $y$  は増加するものの, 伝導面のホール濃度  $p$  はほぼ一定であることがわかった. よって, RE-123 系における少量の Ba/RE 置換による  $T_c$  向上は, ホール濃度の変化に起因するものではなく, O 鎖欠損の減少に起因して  $T_c$  が向上することが明らかになった.

【謝辞】本研究の一部は, JST 次世代研究者挑戦的研究プログラム(JPMJSP2114) の支援を受けて行われた.

[1] B. W. Veal *et al.*, Physica C **162**, 97 (1989).

[2] 藤原晶ほか, 第71回応用物理学会春季学術講演会 24p-12p-4 (2024). [3] J. J. Neumeier *et al.*, Appl. Supercond. **1**, 1279 (1993).

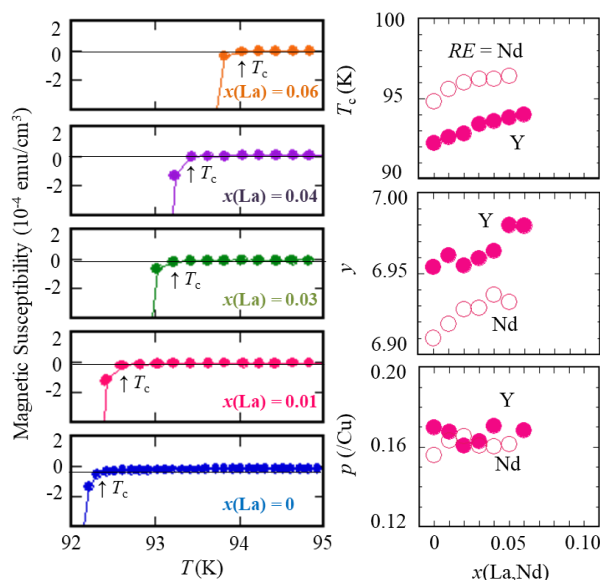


Fig. 1 Temperature dependence of magnetic susceptibility around  $T_c$  for YBa<sub>2-x</sub>La<sub>x</sub>Cu<sub>3</sub>O<sub>y</sub>.

Fig. 2  $x$  (La, Nd)-dependence of  $T_c$ , oxygen content  $y$  and hole concentration in the CuO<sub>2</sub> plane  $p$  in YBa<sub>2-x</sub>La<sub>x</sub>Cu<sub>3</sub>O<sub>y</sub> (●) and Nd<sub>1+x</sub>Ba<sub>2-x</sub>Cu<sub>3</sub>O<sub>y</sub> (○).



# Y247 の物性に対する Pr および Zn 置換の本質的な効果

## Intrinsic effects of Pr and Zn doping on physical properties of Y247.

青学大理工 °新津 遥都, 松下 哲哉, 元木 貴則, 下山 淳一

Aoyama Gakuin Univ., °Haruto Niitsu, Tetsuya Matsushita, Takanori Motoki, Jun-ichi Shimoyama

E-mail: c5623068@aoyama.jp

### 1. はじめに

RE247 ( $\text{RE}_2\text{Ba}_4\text{Cu}_7\text{O}_{15-\delta}$ , RE=希土類元素)は、RE123( $\text{REBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$ )と RE124( $\text{REBa}_2\text{Cu}_4\text{O}_8$ )が  $c$  軸方向に交互に積層した結晶構造を有する超伝導体で、Y247 では酸素量  $\delta=0$  において、Y123 の  $T_c=92\text{ K}$  より高い  $T_c=95\text{ K}$  を示すことが報告されている[1]。一方、単独では超伝導を示さない Pr123 と Pr124 のハイブリッド構造を持つ Pr247 では、適当な条件下で還元アニールを行い酸素量を調節することによりバルクの超伝導が発現する。さらに、 $^{63}\text{Cu}$  の NMR 測定より低温で  $\text{CuO}$  面が絶縁状態であることが確認できており、Pr247 では  $\text{CuO}$  二重鎖が超伝導を駆動することが強く示唆された[2]。また、前回、 $(\text{Y}_{0.3}\text{Pr}_{0.7})_{247}$  焼結体も還元アニールにより Pr247 同様の  $20\text{ K}$  級のバルクの超伝導を示すことを報告した[3]。以上の背景のもと、本研究では、Pr 置換量を変えた Y247 焼結体について様々な条件下でのポストアニールを行い、酸素量の減少とともに  $\text{CuO}_2$  面の超伝導、非超伝導、 $\text{CuO}$  二重鎖の超伝導と変化する実例を示すことを目指した。また、Zn ドープ Y247 についても熱処理条件と低温物性の関係について系統的に調べ、Zn ドープ Y123 の物性と比較した。

### 2. 実験方法

$(\text{Y,Pr})_{247}$  は Y と Pr の仕込組成比、Zn ドープ Y247 は Zn ドープ量を変えて秤量した原料粉末を仮焼成、ペレット成型後、酸素アニールを行い、 $\delta\sim 0.05$  の RE123 と  $\text{CuO}$  の混合物である前駆体を得た。この前駆体を白金箔に包み、石英管内に封入して  $960^\circ\text{C}$  で  $12\text{ h}$  焼成した。この方法では前駆体から高温で脱離する酸素によって上昇する石英管内部の酸素分圧が RE247 の生成条件となるように、封入する前駆体の量と石英管内のガス体積を調節している。得られた試料に対して、酸素アニール、還元ポストアニールを行い各段階で物性評価を行った。

### 3. 結果と考察

粉末 XRD 測定より以下の試料がほぼ RE247 単相であることを確認した。Fig. 1 に酸素アニール後の  $(\text{Y}_{0.6}\text{Pr}_{0.4})_{247}$  焼結体の磁化率の温度依存性を示す。 $(\text{Y}_{0.6}\text{Pr}_{0.4})_{123}$  では約  $40\text{ K}$  まで  $T_c$  が低下する[4]のに対し、 $(\text{Y}_{0.6}\text{Pr}_{0.4})_{247}$  では  $T_c=55\text{ K}$  と高く、 $(\text{Y,Pr})_{247}$  では  $T_c$  に対する Pr ドープ効果が抑制されていることが示唆された。Fig. 2 に酸素アニール後の  $\text{Y}_2\text{Ba}_4\text{Cu}_{5.95}\text{Zn}_{1.05}\text{O}_y$  焼結体の磁化率の温度依存性を示す。Cu サイトの  $15\%$  を Zn ドープした Y123 では超伝導が消失する[5]が、Y247 では比較的大きな反磁性が観測された。この結果も Y247 における Zn ドープ効果が Y123 の場合と異なることを示唆している。講演では Pr 組成、Zn ドープ量および酸素量を系統的に変えた Y247 の低温物性を示し、Y247 における  $\text{CuO}$  二重鎖の役割を議論する。

### 参考文献

- [1] J.Y. Genoud *et al.*, *Physica C* **235** (1994) 443-444. [2] S. Nishioka *et al.*, *Appl. Phys. Express* **15** (2022) 023001 [3] 下山ほか, 第 84 回応用物理学会秋季学術講演会(2023) 20p-B202-3 [4] Y. Xu and W. Guan., *Phys. Rev. B*. **45** (1991) 3176-3179. [5] G. Xiao *et al.*, *Phys. Rev. Lett.* **60** (1988) 1446-1449.

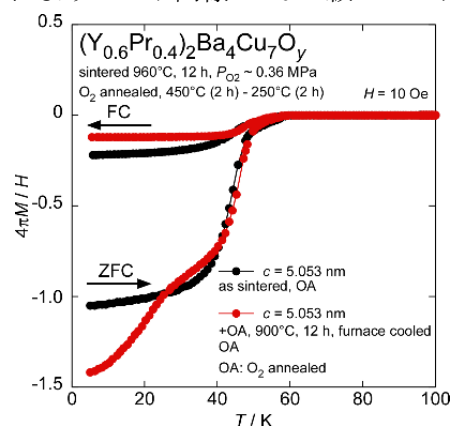


Fig. 1  $(\text{Y}_{0.6}\text{Pr}_{0.4})_{247}$  焼結体の磁化率の温度依存性

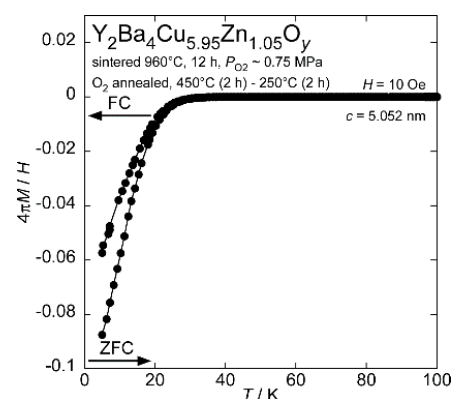


Fig. 2  $\text{Y}_2\text{Ba}_4\text{Cu}_{5.95}\text{Zn}_{1.05}\text{O}_y$  焼結体の磁化率の温度依存性

# RE247(RE = Nd, Gd)の相安定領域と超伝導特性

## Phase stable region and superconducting properties of RE247(RE = Nd, Gd)

青学大理工 ○松下 哲哉, 新津 遥都, 元木 貴則, 下山 淳一

Aoyama Gakuin Univ., °Tetsuya Matsushita, Haruto Niitsu, Takanori Motoki, Jun-ichi Shimoyama

E-mail: c5623073@aoyama.jp

### 1. はじめに

RE247 ( $\text{RE}_2\text{Ba}_4\text{Cu}_7\text{O}_{15-\delta}$ , RE: 希土類元素)は、RE123( $\text{REBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$ )と RE124( $\text{REBa}_2\text{Cu}_4\text{O}_8$ )が  $c$  軸方向に交互に積層した結晶構造を有する超伝導体である。Y247 では  $\delta = 0$  において、Y123 の  $T_c = 92$  K より高い  $T_c = 95$  K が報告されている<sup>[1]</sup>が、高酸素分圧下での合成が必要でかつ CuO 鎖面を構造内に持つ RE247 では特にイオン半径の大きい中軽希土類元素を用いた場合には自発的な RE/Ba 固溶が進行しやすく、 $T_c$ は RE123 の場合とは逆に  $\text{RE}^{3+}$ のイオン半径が大きくなるとともに単調に低下する<sup>[2]</sup>。RE123 においては還元雰囲気下での熱処理が RE/Ba 固溶の抑制に有効であることが知られており、これは CuO 鎖面の酸素量の減少による  $\text{Ba}^{2+}$ サイトの配位数の低下によって局所的な電気的中性のため高価数である RE の占有が不利になるためである。RE247 でも同様に酸素量を減らす高温ポストアニールにより RE/Ba 固溶の抑制が期待できるが、RE247 が分解しない条件でアニールする必要がある。そこで本研究では、相生成時の酸素分圧よりも低い様々な酸素分圧下で RE247(RE = Nd, Gd)焼結体のポストアニールを行うことで相安定領域の解明および超伝導特性の変化を系統的に調べた。また、Y247 の超伝導特性改善には前駆体の高温還元雰囲気下焼結による結晶性向上も重要であることがわかっており<sup>[3]</sup>、本研究でもこれを採用した。

### 2. 実験方法

仕込金属組成が RE247(RE = Nd, Gd)となるように原料粉末を混合し、仮焼、焼結、酸素アニールを行うことで反応前駆体(RE123 + CuO)を得た。この前駆体を石英管封管内で  $960^\circ\text{C}$ , 24 h で焼成することにより RE247 を作製した。粉末 XRD 測定により焼成後および様々な条件でポストアニールし最後に酸素アニールした試料の構成相を調べた。また、一連の試料の超伝導特性は SQUID 磁束計を用いた磁化測定、交流 4 端子法による抵抗率測定により評価した。

### 3. 結果と考察

Fig. 1 に酸素気流中でポストアニールした Gd247 焼結体の粉末 XRD パターン、Fig. 2 に Gd247 の相安定領域を示す。酸素気流中では  $910^\circ\text{C}$  まで Gd247 相が安定あることがわかり、72 h の後熱処理を行った試料では 90 K 級の超伝導を示した。Gd/Ba 固溶の抑制のためのポストアニール条件の最適化によりさらなる  $T_c$  の向上が期待できる。また、Fig. 2 より、Gd247 は前回報告した Y247 と同様に相生成領域より広い相安定領域を持つことが明らかになった。講演では作製した Gd247 の超伝導特性および Nd247 の相安定領域と超伝導特性についても報告する。

[1] J.Y. Genoud *et al.*, *Physica C* **177** (1991) 315.

[2] V. Manojlovic *et al.*, *IEEE Trans. Appl. Supercond.* **7** (1997) 1793.

[3] 松下哲哉ほか、2023 年第 71 回応用物理学会春季学術講演会 24p-P12-5

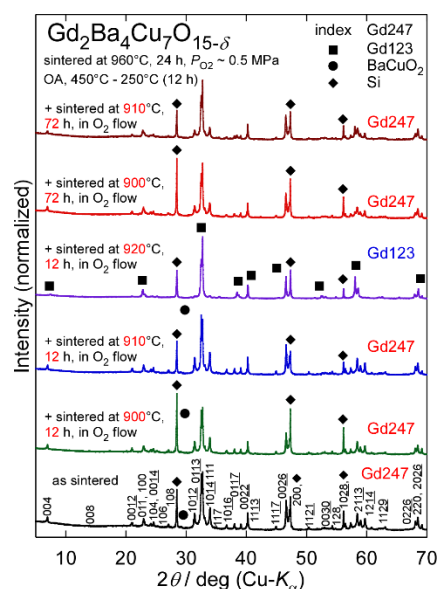


Fig. 1 酸素気流中で後熱処理を行った Gd247 の粉末 XRD パターン

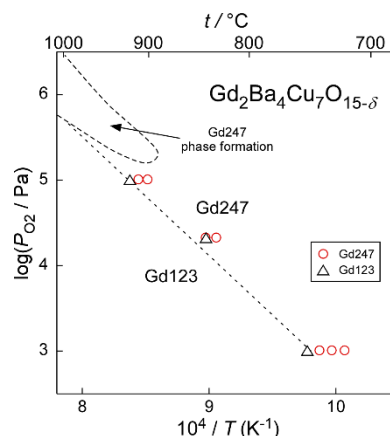


Fig. 2 Gd247 相の安定領域

## $c$ 軸配向 RE124 超伝導体の作製と物性

### Synthesis of $c$ -axis oriented RE124 materials and their physical properties

青学大理工 <sup>○</sup>田口 寛人, 新津 遥都, 松下 哲哉, 高木 佑大, 元木 貴則, 下山 淳一

Aoyama Gakuin Univ., <sup>○</sup>Hiroto Taguchi, Haruto Niitsu, Tetsuya Matsushita, Yuto Takagi

Takanori Motoki, Jun-ichi Shimoyama

E-mail: c5624053@aoyama.jp

#### 1. はじめに

RE124( $\text{REBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_8$ )はブロック層に酸素不定比性を持たない  $\text{CuO}$  二重鎖のみ有するため、酸素量による超伝導特性の変化が起こらず、常に直方晶である。Y124 では  $T_c = 80 \text{ K}$  を示し、Caドーピングによって  $T_c = 90 \text{ K}$  まで向上する。しかし、RE124 多結晶材料の開発や応用への取り組みはほとんどない。それは銅酸化物超伝導体共通の課題である短いコヒーレンス長、大きな異方性、超伝導の  $d$  波対称性による結晶粒間の弱結合のため、RE124 多結晶材料においても緻密な結晶配向組織の形成が臨界電流特性向上には不可欠であるが、それに有効な方法が確立できていないためである。一方、超伝導磁石による  $10 \text{ T}$  の回転変調磁場中での、エポキシ樹脂に混練した Y124 粉末の磁場配向により、三軸配向体の作製が報告されている<sup>[1]</sup>ように、RE124 では磁場を利用した結晶配向が可能である。以上の背景のもと、本研究では、RE124 の異方的な物性が評価できる試料の作製を目的として、RE124 のエピタキシャル薄膜および  $c$  軸配向焼結体の作製を試みた。

#### 2. 実験方法

Y124 焼結体から作製したフッ素フリーMOD 法溶液をスピコート法により  $\text{SrTiO}_3(100)$  単結晶基板上に塗布した後、有機物を熱分解するために仮焼した。この塗布と仮焼を 3 回繰り返した後、 $P_{\text{O}_2} = 10 \text{ Pa}$  ( $\text{O}_2 / \text{Ar}$ ),  $760^\circ\text{C}$ ,  $1 \text{ h}$  の条件で本焼成を行い、最後に  $450^\circ\text{C}$ ,  $12 \text{ h}$  で酸素アニールし膜厚約  $450 \text{ nm}$  の Y123 を主相とする 2 軸配向薄膜を作製した。この薄膜に対し、HIP 装置を用いて高压酸素雰囲気下でアニールすることにより Y124 薄膜を作製した。 $c$  軸配向 Dy124 焼結体は、Dy124 粉末とエタノールを混合したスラリーを、永久磁石上に置き、沈殿、乾燥して得られた粉末配向体を焼成することにより作製した。得られた試料について、構成相の同定や配向度の評価は表面 XRD、磁化特性は SQUID 磁束計により評価した。

#### 3. 結果と考察

Fig.1 に本焼成後の Y123+CuO 薄膜およびこれに対して  $P_{\text{O}_2} = 3 \text{ MPa}$ ,  $880^\circ\text{C}$ ,  $12 \text{ h}$  のアニールを繰り返した薄膜の表面 XRD パターンを示す。高压酸素アニールの繰り返しによって徐々に  $00\ell$  ピークが低角側にシフトし、 $24 \text{ h}$  以上のアニールにより強く  $c$  軸配向した Y124 薄膜が得られた。この Y124 薄膜が 2 軸配向していることは X 線  $\phi$  スキャンにより確認できており、また、 $T_c$  は  $80 \text{ K}$  であった。一方、永久磁石上での磁場配向法により強く  $c$  軸配向した Dy124 粉末堆積物が再現性良く得られており、プレス、焼結条件の最適化を進めている。講演では Y124 薄膜および  $c$  軸配向 Dy124 焼結体の物性についても Caドーピング効果を含めて報告する。

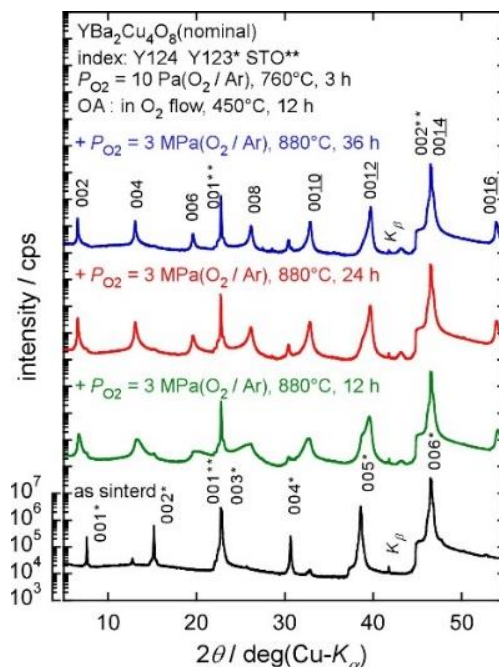


Fig. 1 Y124 薄膜(仕込組成)の表面 XRD パターンの高压酸素アニールによる変化

#### 参考文献

[1] T. Fukushima *et al.*, *Appl. Phys. Express* **1** (2008) 111701



# SDMG 法小型 REBCO バルク磁石の中低温捕捉磁場特性

Field-trapping properties under middle to low temperatures for small REBCO bulk magnets

prepared by the SDMG method

青学大理工<sup>1</sup> ○元木 貴則<sup>1</sup>, 國本 慧太<sup>1</sup>, 浅古 諒<sup>1</sup>, 下山 淳一<sup>1</sup>

Aoyama Gakuin Univ.<sup>1</sup> ○Takanori Motoki<sup>1</sup>, Keita Kunimoto<sup>1</sup>, Ryo Asako<sup>1</sup>, Jun-ichi Shimoyama<sup>1</sup>

E-mail: motoki@phys.aoyama.ac.jp

## 1. はじめに

REBCO 溶融凝固バルクは、小型でも強磁場を捕捉できるため強力超伝導磁石としての応用が期待されている。従来の溶融凝固バルクは、Top-Seeded Melt Growth (TSMG) 法などに代表されるバルク上面に設置した小型の種結晶を起点とする溶融凝固法で育成されている。一方、これまでに我々は全体が単一結晶成長領域からなる溶融凝固バルクの作製が可能なる Single-Direction Melt Growth (SDMG) 法を開発し報告してきた<sup>[1][2]</sup>。SDMG 法を用いることで、全体が *c*-growth 領域のみからなるバルクを再現性良く育成可能である。REBCO バルクの応用として、液体窒素浸漬(77 K)での磁気浮上などに加え、NMR 等に向けた 60 K 以下の中低温での強磁場応用が想定される。これまで液体窒素浸漬での着磁特性を主に報告してきたが、今回、中低温での SDMG 法バルク磁石の捕捉磁場特性を評価したので報告する。

## 2. 実験方法

日本製鉄社製 EuBCO バルク(Eu-QMG<sup>®</sup>)を板状に切り出して seed plate とし、SDMG 法を用いてその上に REBCO 溶融凝固バルクを直接育成した。得られたバルクの直径は 20–30 mm である。原料は TEP 社製混合粉末(RE123:RE211 = 7:3)に包晶温度を低下させるため 10 wt%の Ag<sub>2</sub>O を、RE211 の微細化のため 0.5 wt%の CeO<sub>2</sub> をそれぞれ混合したものをを用いている。得られたバルクについて、後熱処理により酸素量を制御した後、温度可変インサート内で最大 7 T の外部磁場を印加して磁場中着磁を行い、中低温捕捉磁場特性およびクリープ挙動を評価した。捕捉磁場はバルクの seed plate 側表面中心に Hall 素子を接触させた状態で測定している。

## 3. 結果と考察

RE として Y を選択し、40 K、4–6 T で着磁した SDMG 法 YBCO バルクの捕捉磁場の温度依存性を Fig. 1 に示す。直径~30 mm、厚さ~5 mm という小型のバルクながら 40 K で表面磁場が 4 T 以上と強磁場を捕捉する能力を有していることが分かる。Fig. 2 に、40 K、6 T 着磁後の昇温時に所定の温度で保持して評価した各温度での捕捉磁場の時間変化を示す。時間の初期値を変数として磁場の減衰が時間の対数に対して直線的に変化するように初期値を推定してプロットしている。クリープ測定の結果から、40 K では傾きが緩やかでありフル着磁になっておらず、実際にはより強磁場の捕捉が可能であることが示唆される。また、着磁後に約 10 K 冷却することで、およそ 1 年程度はクリープの影響が無視でき、捕捉磁場が一定となることが示唆された。

[1] T. Motoki et al., *Appl. Phys. Express* **13** (2020) 093002. [2] T. Motoki et al., *Supercond. Sci. Technol.* **35** (2022) 094003.

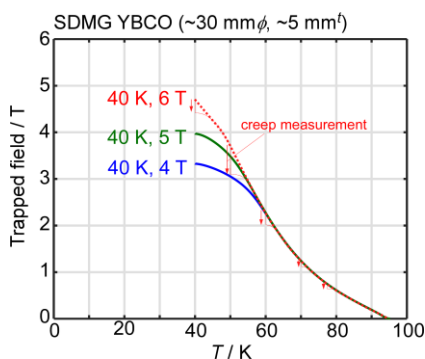


Fig. 1. 40 K、4–6 T 磁場中冷却後の YBCO バルク (~30 mmφ, ~5 mmh) の捕捉磁場の温度依存性

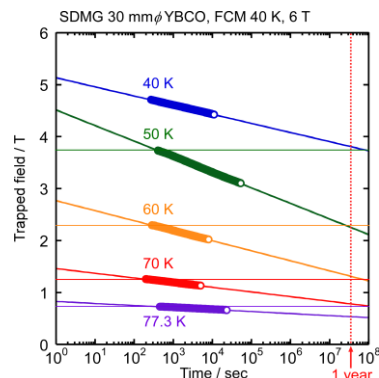


Fig. 2. 40 K、6 T 着磁後の 40–77 K の各温度における捕捉磁場の時間変化

この成果は、NEDO 未踏チャレンジ 2050 (22M1C01Y) の委託業務の結果得られたものです。

11 超伝導 | 一般セッション(口頭講演): 11.2 薄膜, 厚膜, テープ作製プロセスおよび結晶成長

**[19p-C31-1~10] 11.2 薄膜, 厚膜, テープ作製プロセスおよび結晶成長**

[19p-C31-1]

暗黒物質探索用KIDの作製に関する研究

○(M1)大前 太河<sup>1,2</sup>、田井野 徹<sup>1,2</sup>、石徹白 晃治<sup>3</sup>、亀井 雄斗<sup>2,3</sup>、伊藤 凌太<sup>2,3</sup>、大谷 知行<sup>2,3</sup>、美馬 寛<sup>4</sup>  
(1.埼玉大、2.理研RAP、3.東北大、4.NICT)

[19p-C31-2]

10keVプロトン照射が $\text{FeSe}_{0.5}\text{Te}_{0.5}$ 薄膜の超伝導特性に与える影響○吉田 智之<sup>1</sup>、小池 裕大<sup>1</sup>、石神 龍哉<sup>2</sup>、宇田 欽治<sup>2</sup>、尾崎 壽紀<sup>1</sup> (1.関学大工、2.若狭湾エネ研)

[19p-C31-3]

低エネルギーArイオン照射が $\text{GdBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_y$ 線材の超伝導特性に与える影響○尾崎 壽紀<sup>1</sup>、森川 陽向<sup>1</sup>、岡崎 宏之<sup>2</sup>、越川 博<sup>2</sup>、山本 春也<sup>2</sup>、八巻 徹也<sup>2</sup>、佐伯 盛久<sup>2</sup>、末吉 哲郎<sup>3</sup>、坂根 仁<sup>4</sup> (1.関学大工、2.量研機構、3.九産大、4.住重アテックス(株))

[19p-C31-4]

ブルーム画像からの薄膜生成プロセス条件推定におけるブルーム動画像の移動平均に関する考察

○(M1)八谷 達磨<sup>1</sup>、堀尾 恵一<sup>1,5</sup>、山崎 春太郎<sup>2</sup>、一野 裕亮<sup>3,5</sup>、一瀬 中<sup>4,5</sup>、堀出 朋哉<sup>2,5</sup>、松本 要<sup>2,5</sup>、吉田 隆<sup>2,5</sup> (1.九工大、2.名大、3.愛工大、4.電中研、5.JST-CREST)

[19p-C31-5]

直接拡散接合法によるREBCO線材の低抵抗接続法の検討 (4)

○筑本 知子<sup>1</sup>、平野 直樹<sup>2</sup>、小野寺 優太<sup>2</sup> (1.大阪大レーザー研、2.核融合研)

[19p-C31-6]

中間熱処理がTFA-MOD法 $\text{REBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_y + \text{BaHfO}_3$ 線材の  
磁場中 $J_c$ 特性に及ぼす影響○(D)大木元 勇貴<sup>1</sup>、川浪 隼也<sup>1</sup>、清水 一輝<sup>1</sup>、鈴木 匠<sup>1</sup>、和泉 輝郎<sup>2</sup>、三浦 正志<sup>1,3</sup> (1.成蹊大、2.AIST、3.JST-FOREST)

[19p-C31-7]

ホール濃度制御( $\text{Y}_{0.77}\text{Gd}_{0.23}$ ) $\text{Ba}_2\text{Cu}_3\text{O}_y$ 薄膜の超伝導特性○藤本 竜那<sup>1</sup>、大木元 勇貴<sup>1</sup>、鈴木 匠<sup>1</sup>、三浦 正志<sup>1,2</sup> (1.成蹊大、2.JST-FOREST)

[19p-C31-8]

TFA-MOD法( $\text{Y}_{0.77}\text{Gd}_{0.23}$ ) $\text{Ba}_2\text{Cu}_3\text{O}_y$ 線材における $J_c$ の曲げひずみ依存性○鈴木 匠<sup>1</sup>、青砥 慶典<sup>1</sup>、大木元 勇貴<sup>1</sup>、三浦 正志<sup>1,2</sup> (1.成蹊大学、2.JST-FOREST)

[19p-C31-9]

自己配向 $\text{LaNiO}_3$ を利用したSi基板上へのc軸配向 $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$ 薄膜堆積○中村 匡佑<sup>1</sup>、三田 祐<sup>1</sup>、島村 一利<sup>1</sup>、河原 正美<sup>2</sup>、川江 健<sup>1</sup> (1.金沢大理工、2.(株)高純度化学研究所)

[19p-C31-10]

銅酸化物超伝導体を原料としたFF-MOD法原料溶液の汎用性



○下山 淳一<sup>1</sup>、堀口 佳吾<sup>1</sup>、相楽 和豊<sup>1</sup>、加藤 志織<sup>1</sup>、田口 寛人<sup>1</sup>、畠 直輝<sup>1</sup>、元木 貴則<sup>1</sup> (1.青学大理工)

---

## 暗黒物質探索用 KID の作製に関する研究

### Research on fabrication of KID for dark matter search

埼玉大学<sup>1</sup>, 理研 RAP<sup>2</sup>, 東北大学<sup>3</sup>, NICT<sup>4</sup> ○(M1)大前 太河<sup>1,2</sup>,  
石徹白 晃治<sup>3</sup>, 亀井 雄斗<sup>2,3</sup>, (D)伊藤 凌太<sup>2,3</sup>, 大谷 知行<sup>2,3</sup>, 美馬 寛<sup>4</sup>, 田井野 徹<sup>1,2</sup>  
Saitama Univ.<sup>1</sup>, RAPRIKEN<sup>2</sup>, Tohoku Univ.<sup>3</sup>, NICT<sup>4</sup> ○Taiga Omae<sup>1,2</sup>, Koji Ishidoshiro<sup>3</sup>, Yuto  
Kamei<sup>2,3</sup>, Ryota Ito<sup>2,3</sup>, Chiko Otani<sup>2,3</sup>, Satoru Mima<sup>4</sup>, Tohru Taino<sup>1,2</sup>  
E-mail: t.omaе.735@ms.saitama-u.ac.jp

素粒子論的暗黒物質(Dark Matter: DM)として有力な候補である WIMPs(Weakly Interacting Massive Particles) [1]の探索では、DM が原子核と相互作用する際に生じる反跳エネルギーを検出する直接探索手法が主に使われている。特にスピンに依存する相互作用を用いた探索において、 $^{19}\text{F}$  は優れたターゲット原子核とされている[2]。DM 探索は、非常に稀でかつ微弱な反応なため、宇宙線や環境放射線などのバックグラウンドとの分離識別が必要である。さらに、我々は理論的に注目の集まっている軽い DM に焦点を当てる。

スピンに依存する相互作用を用いて軽い DM 探索する検出器として、我々は力学インダクタンス検出器 (Kinetic Inductance Detector : KID) を採用し、低エネルギー閾値と低バックグラウンドを実現するフォノン検出器の開発を進めている。特に、KID の中でも有感面積の拡大が見込める集中定数回路型 KID(Lumped Element KID : LEKID)を採用した。

暗黒物質探索に向けて、 $^{19}\text{F}$  を含む  $\text{CaF}_2$  基板を採用し、超伝導体に Al を用いた。バックグラウンドの低減を図る構造として、基板の両面に KID を配置する両面構造(Fig.1)が挙げられる。これまでの両面構造での作製において、両面の LEKID で特性に違いが生じていること、歩留まりが悪いことが課題となっていた[3]。今回新しい作製プロセスで作製を行ったところ、歩留まりが両面で 100%であり、両面の LEKID で同等の特性を得ることができ、両面構造の作製プロセスを確立することができた。具体的な両面構造の作製プロセスとその結果については当日報告する。また、有感体積の向上のために大きな結晶に基板を接合するという構造があり、今後行う接合構造についても当日報告する。

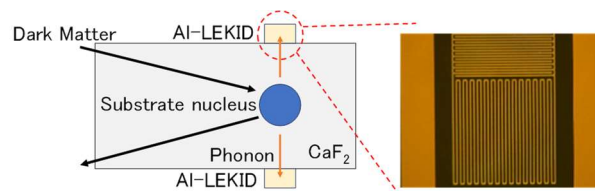


Fig.1 Structure of LEKID on both sides of  $\text{CaF}_2$

### 参考文献

- [1] L. Roszkowski *et al.*, Rep. Prog. Phys.,81(6), 066201, 2018.
- [2] C. Amole *et al.*, Phys. Rev. D, 100, 022001, 2019.
- [3] 小林達哉他、 $\text{CaF}_2$  基板両面に配置した AL-LEKID の開発、応用物理学会、2023  
謝辞：本研究の一部は科研費(22K18991, 21K18150, 20H01937, 19H05809)の支援を受けた。

# 10 keV プロトン照射が $\text{FeSe}_{0.5}\text{Te}_{0.5}$ 薄膜の超伝導特性に与える影響

## Effect of 10 keV Proton Irradiation on Superconducting Properties

### in $\text{FeSe}_{0.5}\text{Te}_{0.5}$ Thin Films

関学大工<sup>1</sup>, 若狭湾エネ研<sup>2</sup>

○吉田 智之<sup>1</sup>, 小池 裕大<sup>1</sup>, 石神 龍哉<sup>2</sup>, 宇田 欽治<sup>2</sup>, 尾崎 壽紀<sup>1</sup>

Kwansei Gakuin Univ.<sup>1</sup>, The Wakasa Wan Energy Research Center<sup>2</sup>,

○Tomoyuki Yoshida<sup>1</sup>, Yudai Koike<sup>1</sup>, Ryoya Ishigami<sup>2</sup>, Kinji Uda<sup>2</sup>, Toshinori Ozaki<sup>1</sup>

E-mail: hem05334@kwansei.ac.jp

1. はじめに：鉄系超伝導体は電気的異方性( $\gamma$ )が小さく、上部臨界磁場( $H_{c2}$ )が高いため、高磁場中での応用が期待されている。磁場中の臨界電流密度( $J_c$ )を向上させるためには、超伝導体内部に侵入する磁束の運動を抑制するピン止め点が必要である。我々は磁束ピン止め点導入の手法の一つとして、イオン照射に着目している。これまで、 $\text{FeSe}_{0.5}\text{Te}_{0.5}$ (FST)薄膜に  $1.5\mu\text{m}$  厚の Al 箔を介して 190keV でプロトン照射 (照射量:  $1.0\times 10^{15}$  ions/cm<sup>2</sup>) を行うことで、超伝導転移温度( $T_c$ )が 0.5 K 上昇し、磁場中における  $J_c$  も向上することが報告されている[1,2]。そこで本研究では、FST 薄膜に Al 箔を介さず、さらに低エネルギーである 10keV のプロトンを照射し、さまざまな照射量における照射前後での超伝導特性を調べた。

2. 実験方法：Nd: YAG レーザーによるパルスレーザー蒸着法を用いて  $\text{SrTiO}_3$  (100) 単結晶基板上に FST ( $\sim 100$  nm) /  $\text{CeO}_2$  ( $\sim 100$  nm) 薄膜を成膜した。10 keV のプロトン照射は、若狭湾エネルギー研究センターのマイクロ波イオン源イオン注入装置を用いて行った。照射量は  $5.0\times 10^{12} \sim 2.0\times 10^{16}$  ions/cm<sup>2</sup> とした。また、超伝導特性は直流四端子法を用いた通電測定により評価し、薄膜は照射前後で同一試料を使用した。

3. 実験結果：Fig. 1 に 8 つの FST 薄膜における、プロトン照射前後の  $T_c^{\text{zero}}$  の照射量依存性を示す。 $3.0\times 10^{13}$  ions/cm<sup>2</sup> 照射した場合、 $T_c^{\text{zero}}$  は照射前後でほとんど変化しなかった。一方、 $5.0\times 10^{13}$ 、 $1.0\times 10^{14}$ 、 $3.0\times 10^{14}$ 、 $7.0\times 10^{14}$  ions/cm<sup>2</sup> 照射した場合、 $T_c^{\text{zero}}$  は照射前よりも上昇した。 $3.0\times 10^{15}$  ions/cm<sup>2</sup> 照射した場合、 $T_c^{\text{zero}}$  は照射前よりも低下し、照射量をさらに増加させた場合、 $T_c^{\text{zero}}$  の低下が大きくなることが確認された。次に、Fig. 2 にプロトン照射 (照射量:  $1.0\times 10^{14}$  ions/cm<sup>2</sup>) 前後の 4.2 K および 10 K における FST 薄膜の  $J_c$  の磁場依存性を示す。4.2 K では、0 ~ 12 T のいずれの磁場においても照射後に  $J_c$  が向上した。同様に 10 K において

も各磁場で照射後に  $J_c$  の向上が確認され、8 T で  $J_c$  が約 3 倍向上した。これは、プロトン照射によって形成された結晶欠陥がピン止め点として機能したためと考えられる。これらの結果より、10 keV のプロトン照射は  $T_c^{\text{zero}}$  と  $J_c$  を同時に向上させる有効な手法であることがわかった。当日は異なる照射量での照射前後の FST 薄膜の臨界電流特性について報告する。

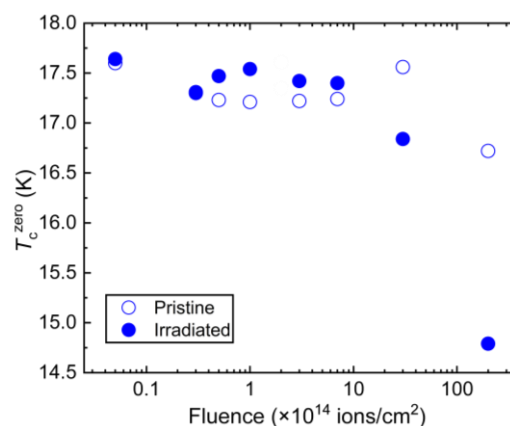


Fig. 1  $T_c$  as a function of fluence for FST films before and after 10 keV proton irradiation.

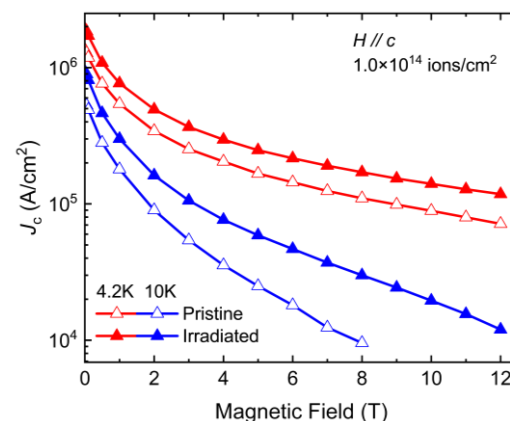


Fig. 2  $J_c$  versus magnetic field for FST film before and after 10 keV proton irradiation at 4.2 and 10 K.

参考文献: [1] T. Ozaki et al., Nat. Commun. 7, 13036 (2016)., [2] 尾崎壽紀ら、2016 年第 77 回 応用物理学会 秋季学術講演会 14p-D63-6.

# 低エネルギーAr イオン照射が $\text{GdBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_y$ 線材の超伝導特性に与える影響

## Effect of low-energy Ar-ion irradiation on $\text{GdBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_y$ coated conductors

関学大工<sup>1</sup>, 量研機構<sup>2</sup>, 九産大<sup>3</sup>, 住重アテックス(株)<sup>4</sup> ○尾崎 壽紀<sup>1</sup>, 森川 陽向<sup>1</sup>,

岡崎 宏之<sup>2</sup>, 越川 博<sup>2</sup>, 山本 春也<sup>2</sup>, 八巻 徹也<sup>2</sup>, 佐伯 盛久<sup>2</sup>, 末吉 哲郎<sup>3</sup>, 坂根 仁<sup>4</sup>

Kwansei Gakuin Univ.<sup>1</sup>, QST<sup>2</sup>, Kyushu Sangyo Univ.<sup>3</sup>, SHI-ATEX Co., Ltd.<sup>4</sup>

○Toshinori Ozaki<sup>1</sup>, Hinata Morikawa<sup>1</sup>, Hiroyuki Okazaki<sup>2</sup>, Hiroshi Koshikawa<sup>2</sup>, Shunya Yamamoto<sup>2</sup>,

Tetsuya Yamaki<sup>2</sup>, Morihisa Saeki<sup>2</sup>, Tetsuro Sueyoshi<sup>3</sup>, Hitoshi Sakane<sup>4</sup>

E-mail: tozaki@kwansei.ac.jp

1. はじめに 超伝導膜に人工ピン止め点を導入する手法として、数 MeV 以下の低エネルギーイオン照射が注目されている<sup>[1,2]</sup>。これまで我々は、 $\text{GdBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_y$ (GdBCO)線材(超伝導層の膜厚~400nm)への Au イオン照射において、Au イオンが超伝導層付近で止まる 2 MeV のエネルギーで照射し、超伝導特性の変化を系統的に調べた<sup>[3]</sup>。その結果、照射量増加に伴い、超伝導転移温度  $T_c$  は低下したが、照射量を調整することで 30 K における磁場中  $J_c$  が、約 60%向上することがわかった。本研究では、Au イオンよりも軽い Ar イオンを、GdBCO 超伝導層で止まる 350 keV のエネルギーで照射し、照射前後の  $T_c$  及び臨界電流密度  $J_c$  の変化を調べた。また、酸素アニールがイオン照射した GdBCO 線材の超伝導特性に及ぼす影響を調べた。

2. 実験方法 本実験では、パルスレーザー堆積法を用いて作製した住友電気工業株式会社製の GdBCO 超伝導線材を使用した。イオン照射実験は、QST 高崎の 400 kV イオン注入装置を用いて行った。照射エネルギーは 350 keV とし、照射量は  $5.0 \times 10^{11} - 7.0 \times 10^{13}$  ions/cm<sup>2</sup> とした。また、酸素アニールは 350 – 800 °C で 1.5 時間行った。

3. 実験結果 Fig.1 に 350 keV Ar イオンを照射した GdBCO 線材の照射量に対する  $T_c$  及び照射 (照射量:  $5.5 \times 10^{12}$  ions/cm<sup>2</sup>) 後に酸素アニール(350 – 800 °C で 1.5 時間)を施した GdBCO 線材の  $T_c$  の変化を示す。照射量  $1 \times 10^{13}$  ions/cm<sup>2</sup> までは、照射量増加に伴い、 $T_c$  が徐々に減少し、 $1 \times 10^{13}$  ions/cm<sup>2</sup> 以上では、 $T_c$  が大きく低下した。また、350°C 以外の酸素アニール温度において、酸素アニール後の  $T_c$  は酸素アニール前より向上し、450°C 及び 600 °C において最も高い  $T_c$  =

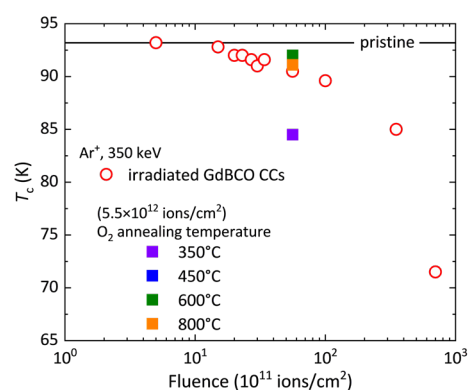


Fig. 1.  $T_c$  as a function of fluence for irradiated GdBCO CCs and irradiated GdBCO CCs with oxygen annealing.

92.0 K を示した。当日は、Ar イオン照射した GdBCO 線材の磁場中  $J_c$  特性について議論すると共に、酸素アニールが超伝導特性に及ぼす影響についても報告する。

[謝辞] $\text{GdBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_y$  超伝導線材をご提供いただいた住友電気工業株式会社に深く感謝いたします。また、本研究は、JSPS 科研費(17H04980, 22H02020)の助成を受けて実施したものである。

[参考文献][1] H.Matsui et al. Appl. Phys. Lett. 101, 232601 (2012)., [2] T. Ozaki et al., Supercond. Sci. Technol. 33, 094008 (2020)., [3] 尾崎壽紀ら、2020 年第 81 回 応用物理学会 秋季学術講演会 9a-Z27-1.

## プルーム画像からの薄膜生成プロセス条件推定における プルーム動画像の移動平均に関する考察

### Moving Average of Plume Movie in Thin Film Deposition Process Conditions Based on Plume Images

九工大<sup>1</sup>, 名大<sup>2</sup>, 愛工大<sup>3</sup>, 電中研<sup>4</sup>, JST-CREST<sup>5</sup> ○(M1)八谷達磨<sup>1</sup>, 堀尾 恵一<sup>1,5</sup>,  
(M2)山崎 春太郎<sup>2</sup>, 一野 祐亮<sup>3,5</sup>, 一瀬 中<sup>4,5</sup>, 堀出 朋哉<sup>2,5</sup>, 松本 要<sup>2,5</sup>, 吉田 隆<sup>2,5</sup>  
Kyushu Inst. of Technol.<sup>1</sup>, Nagoya Univ.<sup>2</sup>, Aichi Inst. of Technol.<sup>3</sup>, CRIEPI<sup>4</sup>, JST-CREST<sup>5</sup>,  
○T. Hachiya<sup>1</sup>, K. Horio<sup>1,5</sup>, S. Yamazaki<sup>2</sup>, Y. Ichino<sup>3,5</sup>, A. Ichinose<sup>4,5</sup>, T. Horide<sup>2,5</sup>,  
K. Matsumoto<sup>2,5</sup>, Y. Yoshida<sup>2,5</sup>  
E-mail: hachiya.tatsuma306@mail.kyutech.jp

#### 1. はじめに

我々は、薄膜生成の再現性向上およびプロセス安定化のために、プルーム画像からプロセスパラメータを推定することを目指している。レーザー強度と酸素分圧の2つのパラメータを変化させ、各条件でチャンバー内を10分間撮影しプルーム動画を得た。Fig. 1にチャンバー内の画像と抽出したプルーム画像の例を示す。プルーム画像を入力とする畳み込みニューラルネットワーク(CNN)を用いてパラメータを推定する実験を行ってきた。

#### 2. プルーム動画像の移動平均処理

これまでの実験を通じて、プルームの揺らぎを確認しており、これが同じ条件下でもプルームのばらつきを起し、精度の低下を招く要因であると考えた。本稿では、プルーム動画像に対し移動平均を施すことで、

揺らぎの影響を軽減することとした。Fig. 2に移動平均の演算過程を示す。時刻  $t$  の処理後のプルーム画像  $I'_t$  は、時刻  $t$  から過去  $n$  フレームのプルーム画像の平均画像とした。

#### 3. 結果および考察

原画像を入力とするCNNと移動平均画像入力とするCNNに関して精度を比較した。移動平均のフレーム数  $n$  は10とした。原画像の場合、レーザー強度と酸素分圧の推定誤差は20.9%と22.6%であった。移動平均画像の場合は、それぞれ7.3%と7.1%であり、揺らぎの影響が軽減できたことが分かる。

#### 謝辞

本研究は、JST, CREST, JPMJCR2336の支援を受けたものである。

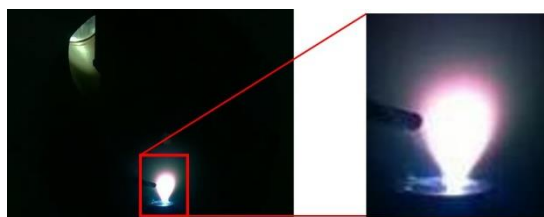


Fig. 1 Image of inside of chamber and extracted image of plume.

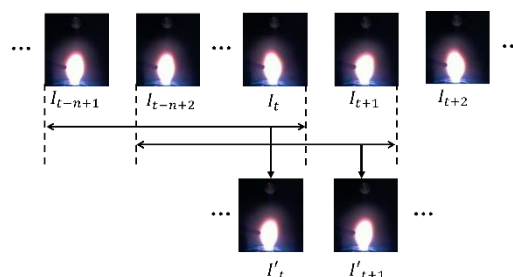


Fig. 2 Moving average for Plume movie.



## 直接拡散接合法による REBCO 線材の低抵抗接続法の検討 (4)

### Optimization of low resistance joint method for REBCO tapes by direct diffusion bonding method (4)

大阪大レーザー研<sup>1</sup>、核融合科学研究所<sup>2</sup> <sup>○</sup>筑本 知子<sup>1</sup>、平野 直樹<sup>2</sup>、小野寺 優太<sup>2</sup>

ILE, Osaka Univ.<sup>1</sup>, NIFS<sup>2</sup>, <sup>○</sup>Noriko Chikumoto<sup>1</sup>, Naoki Hirano<sup>2</sup>, Yuta Onodera<sup>2</sup>

E-mail: chikumoto.noriko.ile@osaka-u.ac.jp

高温超伝導(HTS)パワー応用には、安全で再現性が高く、かつ簡便な接合法の開発が欠かせない。我々のグループでは、REBCO 線材の低抵抗接続法として、銅安定化層を直接固相拡散する手法の検討を行なっており、これまでに接合抵抗  $60 \times 10^{-9} \Omega \text{cm}^2$  程度の接合が再現性よく得られることを報告した[1,2]。今回、これらの試料について、接合界面抵抗の長さ依存性の評価及び  $I_c$  特性の評価を行ったので、その結果について報告する。

本研究で用いた接合方法は Step 1:接合界面の研磨、Step 2 : 酸洗浄と Step 3:加圧・加熱による接合形成の3ステップから成る。具体的には、REBCO 線材 (Faraday Factory Japan 社製) を所定の長さに切り出し、Step 1 にて接合部表面をアルミナ研磨剤 ( $0.1 \mu\text{m}$ ) でバフ研磨を行った後に、10%クエン酸に浸漬して表面洗浄 ( $50^\circ\text{C}$ 、5 分) して酸化膜を除去したものを (Step 2)、重ね合わせて Fig.1 のように金属ジグに取り付けて固定用ボルトで締め付けて加圧した状態で、管状炉にて  $200^\circ\text{C}$  の加熱により接合を形成した (Step 3)。前回 10 分の加熱で最も低い接合抵抗値となることを報告したが、今回 5 分での接合を行ったところ、さらに接合抵抗が低くなることがわかった。Fig.2 に  $200^\circ\text{C}$ -5 分の加熱条件で接合長を変化させた結果を示す。最長 10cm までの接合に成功した。また  $I_c$  測定を接合部・非接合部で行なったところ、 $I_c$  の差はなく接合による劣化がないことが確認された。



Fig.1 Photograph of REBCO tapes fixed by metal fittings.

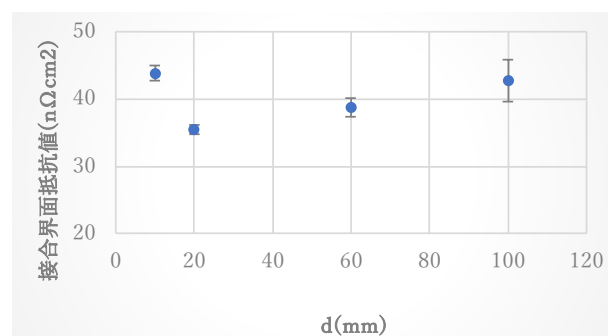


Fig.2 The dependency of joint resistance on overlapped length.

[1] S. Kato and N. Chikumoto, *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, 33, 6602305 (2023).

[2] N. Chikumoto and S. Kato, *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, 34, 9001105 (2024).

# 中間熱処理が TFA-MOD 法 $\text{REBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_y + \text{BaHfO}_3$ 線材の 磁場中 $J_c$ 特性に及ぼす影響

The influence of IHT on in-field  $J_c$  for TFA-MOD  $\text{REBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_y + \text{BaHfO}_3$  CCs

成蹊大<sup>1</sup>, AIST<sup>2</sup>, JST-FOREST<sup>3</sup>

○大木元 勇貴<sup>1</sup>, 川浪 隼也<sup>1</sup>, 清水 一輝<sup>1</sup>, 鈴木 匠<sup>1</sup>, 和泉 輝郎<sup>2</sup>, 三浦 正志<sup>1,3</sup>

Seikei Univ.<sup>1</sup>, AIST<sup>2</sup>, JST-FOREST<sup>3</sup>

○Yuki Ogimoto<sup>1</sup>, Junya Kawanami<sup>1</sup>, Kazuki Shimizu<sup>1</sup>, Takumi Suzuki<sup>1</sup>, Teruo Izumi<sup>2</sup> and Masashi Miura<sup>1,3</sup>

E-mail: [dd246301@cc.seikei.ac.jp](mailto:dd246301@cc.seikei.ac.jp)

## 1. はじめに

銅酸化物超伝導体  $\text{REBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_y$  (REBCO: RE は希土類元素) は高い臨界温度 ( $T_c$ ) 及び臨界電流密度 ( $J_c$ ) を有することから超伝導マグネット等への応用が期待されている。しかし、磁場中  $J_c$  特性は、超伝導体内に侵入する量子化磁束の運動の影響を受け磁場の増加に伴い急激に低下する。この課題を解決するためには、ナノサイズかつ高密度な磁束ピン止め点を導入することが重要である。これまでに我々は、磁束ピン止め点として  $\text{BaMO}_3$  (M = Nb, Sn, Zr, Hf) ナノ粒子を導入した Trifluoroacetates Metal Organic Deposition (TFA-MOD) 法  $(\text{Y}_{0.77}\text{Gd}_{0.23})\text{Ba}_2\text{Cu}_3\text{O}_y$  ((Y,Gd)BCO) 線材を作製してきた。特に、 $\text{BaHfO}_3$  (BHO) ナノ粒子は、他の BMO に比べて量子化磁束の運動を抑制するのに適したサイズで高密度に導入することに成功し、高い磁場中  $J_c$  特性を得ることに成功してきた[1-2]。また、更なるナノ粒子のサイズ制御に有効な方法として仮焼成と本焼成の間に、中間熱処理 (Intermediate Heating Treatment: IHT) を導入することが報告されている[3]。

そこで本研究では、BHO 導入(Y,Gd)BCO 線材における中間熱処理条件を最適化し、BHO ナノ粒子の高密度化による磁場中  $J_c$  特性の向上を目指した。

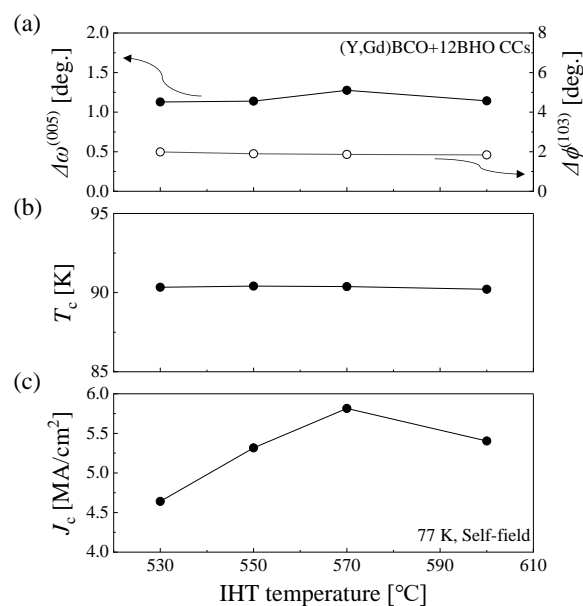
## 2. 実験方法

TFA-MOD 法を用いて、金属基板上に中間熱処理温度を 530 ~ 600 °C の範囲で変化させた (Y,Gd)BCO+12vol.%BHO 線材を作製した。作製した線材の結晶性は X 線回折法、超伝導特性は四端子法、微細構造は透過型電子顕微鏡及びエネルギー分散型 X 線分光法を用いて評価した。

## 3. 実験結果

**Fig. 1** に (a)  $c$  軸配向性 ( $\Delta\omega$ ) 及び面内配向性 ( $\Delta\phi$ )、(b)  $T_c$  及び (c) 自己磁場  $J_c$  (77 K) の中間熱処理温度依存性を示す。

**Fig. 1** (a) 及び (b) より、本研究で実施した中間熱処理温度範囲では、結晶性や  $T_{c0}$  に大きな影響を及ぼさないことが分かる。一方、**Fig. 1** (c) より、自己磁場  $J_c$  は中間熱処理温度の影響を受け、中間熱処理温度が 570 °C の際に最も高い値 ( $J_c$  (77 K) = 5.8 MA/cm<sup>2</sup>) を示した。これらのことから、中間熱処理温度が (Y,Gd)BCO+12vol.%BHO 線材内におけ



**Fig. 1** IHT temperature dependence of (a)  $\Delta\omega$  and  $\Delta\phi$ , (b)  $T_c$  and (c)  $J_c$  (77 K, Self-field) for (Y,Gd)BCO+BHO coated conductors.

る BHO ナノ粒子の密度やサイズに影響を及ぼしたことが考えられる。当日は、微細構造観察結果をもとに中間熱処理温度の違いが磁場中超伝導特性に及ぼす影響についても詳細に報告する。

## 謝辞

本研究は、JST 創発的研究支援事業 (FOREST) JPMJFR202G の支援を受けたものである。また、本研究の一部は JSPS 科研費 (23H01453 及び 23KK0073) の助成を受け実施したものである。

## 参考文献

- [1] M. Miura *et al.*, *NPG Asia Materials* **9** (2017) e447.
- [2] M. Miura *et al.*, *NPG Asia Materials* **14** (2022) 85.
- [3] K. Nakaoka *et al.*, *IEEE Trans. Appl. Supercond.* **26** (2016) 800304.

# ホール濃度制御( $\text{Y}_{0.77}\text{Gd}_{0.23}\text{Ba}_2\text{Cu}_3\text{O}_y$ ) 薄膜の超伝導特性 Superconducting properties of hole concentration controlled ( $\text{Y}_{0.77}\text{Gd}_{0.23}\text{Ba}_2\text{Cu}_3\text{O}_y$ ) films

成蹊大<sup>1</sup>, JST-FOREST<sup>2</sup>

藤本 竜那<sup>1</sup>, 大木元 勇貴<sup>1</sup>, 鈴木 匠<sup>1</sup>, 三浦 正志<sup>1,2</sup>

Seikei Univ.<sup>1</sup>, JST-FOREST<sup>2</sup>

°Ryona Fujimoto<sup>1</sup>, Yuki Ogimoto<sup>1</sup>, Takumi Suzuki<sup>1</sup> and Masashi Miura<sup>1,2</sup>

E-mail: dm236315@cc.seikei.ac.jp

## 1. はじめに

REBa<sub>2</sub>Cu<sub>3</sub>O<sub>y</sub>(REBCO)線材は高い臨界温度( $T_c$ )と臨界電流密度( $J_c$ )を有することから、マグネット応用などに期待されている。しかし、応用に向けては更なる磁場中  $J_c$  特性の向上が必要とされる。 $J_c$  向上には①磁束ピンニング力向上と②熱的臨界磁場( $H_c$ )向上の融合が重要である。我々は、①に関しては、導入する磁束ピン止め点材料や成長環境を制御することで BaHfO<sub>3</sub> ナノ粒子の高密度化に成功した[1]。一方、②に関しては、酸素アニール条件を制御することでホール濃度( $p$ )を変化させ、 $H_c$  ( $=1/\lambda_{ab}\xi_{ab}$ )を向上させることに成功した[2]。ここで、 $\lambda_{ab}$  及び  $\xi_{ab}$  はそれぞれ磁場侵入長とコヒーレンス長である。更に、近年我々は、『 $J_c$  の理論上の限界である対破壊電流密度( $J_d$ )が高いほど  $J_c$  を高くできる可能性が高い』ことを明らかにしてきた[2]。 $J_d$  は、 $J_d \propto 1/(\lambda_{ab}^2 \xi_{ab}) = H_c / \lambda_{ab}$  と表され、REBCO 材料においては  $H_c$  同様にホール濃度を調整することで制御可能である。

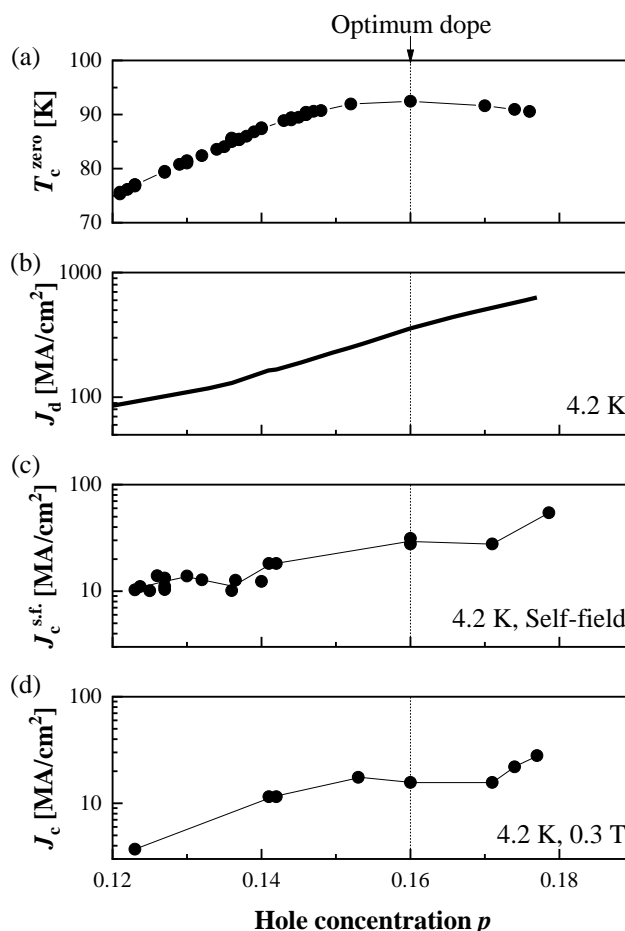
そこで本研究では、幅広いホール濃度を有する(Y,Gd)BCO 薄膜を作製し、異なるホール濃度が(Y,Gd)BCO 薄膜の  $J_d$ 、自己磁場  $J_c(J_c^{s.f.})$  や磁場中  $J_c$  特性に及ぼす影響について検討する。

## 2. 実験方法

本研究では、Trifluoroacetates Metal Organic Deposition (TFA-MOD)法を用いて、SrTiO<sub>3</sub> 単結晶基板上に(Y,Gd)BCO 薄膜を作製した。高ホール濃度試料は、酸素雰囲気下でのアニール温度等を変化させて作製した。一方、低ホール濃度試料は、アルゴン雰囲気下でのアニール時間等を変化させて作製した。(Y,Gd)BCO 薄膜の結晶性は X 線回折法、超伝導特性は四端子法を用いて測定した。

## 3. 実験結果

**Fig. 1(a)**より、 $T_c^{\text{zero}}$  は、アンダードーブから最適ドーブに向かい向上し、 $p = 0.16$  にて最大値を示し、オーバードープ領域で低下していることが分かる。一方、**Fig. 1(b)**に示すように、 $J_d(4.2 \text{ K})$  はアンダードーブからオーバードープに向けて高い値を示すことが分かる。**Fig. 1(c)**及び**(d)**より自己磁場  $J_c(4.2 \text{ K})$  及び磁場中  $J_c(4.2 \text{ K})$  とともにホール濃度の増加に伴い向上し、 $J_d(4.2 \text{ K})$  が高いほど高い値を示す事が分かる。当日は、ホール濃度が異なる(Y,Gd)BCO 薄膜における詳細な磁場中超伝導特性について報告する。



**Fig.1** (a)  $T_c^{\text{zero}}$ , (b)  $J_d(4.2 \text{ K})$ , (c)  $J_c^{s.f.}(4.2 \text{ K})$  and (d)  $J_c(4.2 \text{ K and } 0.3 \text{ T})$  for various hole concentration doped (Y,Gd)BCO films.

## 謝辞

本研究は、JST 創発的研究支援事業 (FOREST) JPMJFR202G の支援を受けたものである。また、本研究の一部は JSPS 科研費(23H01453 及び 23KK0073)の助成を受け実施したものである。

## 参考文献

- [1] M. Miura et. al., *NPG Asia Materials* **9** (2017) e447.
- [2] M. Miura et. al., *NPG Asia Materials* **14** (2022) 85.

# TFA-MOD 法( $\text{Y}_{0.77}\text{Gd}_{0.23}$ ) $\text{Ba}_2\text{Cu}_3\text{O}_y$ 線材における $J_c$ の曲げひずみ依存性

## Bending strain dependence of critical current density for

## TFA-MOD ( $\text{Y}_{0.77}\text{Gd}_{0.23}$ ) $\text{Ba}_2\text{Cu}_3\text{O}_y$ coated conductors

成蹊大<sup>1</sup>, JST-FOREST<sup>2</sup> °鈴木 匠<sup>1</sup>, 青砥 慶典<sup>1</sup>, 大木元 勇貴<sup>1</sup>, 三浦 正志<sup>1,2</sup>

Seikei Univ.<sup>1</sup>, JST-FOREST.<sup>2</sup>, °Takumi Suzuki<sup>1</sup>, Keisuke Aoto<sup>2</sup>, Yuki Ogimoto<sup>1</sup> and Masashi Miura<sup>1,2</sup>

E-mail: t-suzuki@st.seikei.ac.jp

### 1. はじめに

希土類系銅酸化物高温超伝導体  $\text{REBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_y$  (REBCO: RE は希土類元素)線材は優れた磁場中臨界電流密度特性( $J_c$ )と高強度の金属基板を用いることによる優れた機械特性を持つことから強磁場マグネット等への応用が期待されている。マグネット应用ではコイル形状にすることによる曲げひずみとフープ応力により大きなひずみが印加される。また、マグネットにおいては線材に対し様々な方向に磁場が印加されるため、 $J_c$  の磁場印加角度依存性への理解も重要となる。これまで超伝導特性のひずみ依存性に関する様々な研究が行われているが[1-2]、ひずみ下の磁場中特性については十分に明らかとなっていない。

本研究では、機械的ひずみが Trifluoroacetates Metal Organic Deposition (TFA-MOD) 法で作製した ( $\text{Y}_{0.77}\text{Gd}_{0.23}$ ) $\text{Ba}_2\text{Cu}_3\text{O}_y$ ( $\text{Y,Gd}$ )BCO 線材の超伝導特性に及ぼす影響について検討した。

### 2. 実験方法

本研究では、Hastelloy 金属基板上に TFA-MOD 法を用いて( $\text{Y,Gd}$ )BCO 線材を作製した。酸素アニール処理は、本焼成後無ひずみ下で行った。線材はレーザーによりマイクロブリッジ状に加工した。作製した( $\text{Y,Gd}$ )BCO 線材の結晶性は X 線回折法、超伝導特性は四端子法を用いて評価した。これらの特性は、曲率の異なるかまぼこ型の治具に固定することにより曲げひずみ( $\epsilon$ )を印加した状態で測定した。

### 3. 実験結果

Fig. 1 に作製した( $\text{Y,Gd}$ )BCO 線材の(a) $c$ 軸長、(b) $T_c$ 特性、(c)77 Kにおける自己磁場下での  $J_c$ 特性、(d)77 K( $\mathbf{H}||c$ )の 1 T における  $J_c$  のひずみ依存性を示す。 $c$ 軸長は曲率増加と共に短くなっており、線材長手方向の  $ab$  面の伸長に伴い機械的に  $c$  軸圧縮されていることが分かる。また、 $\epsilon$ が増加すると共に  $T_c$ 特性及び自己磁場  $J_c$ 特性は低下した。一方、1 T における  $J_c$ 特性は自己磁場  $J_c$ 特性とは異なり、 $\epsilon=0.33\%$ で最も高い特性を示した。これらの磁場中  $J_c$ 向上は、粒界における転位や双晶界面など引張りひずみにより影響を受け

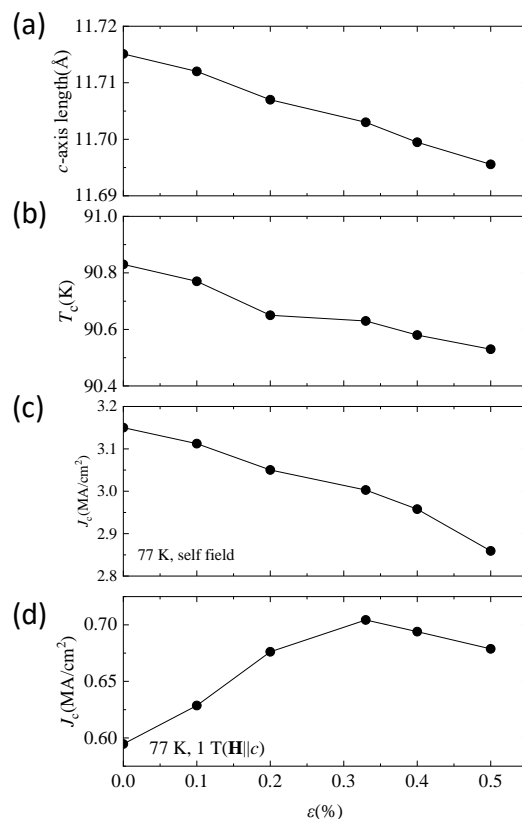


Fig.1 Bending strain dependence of (a) $c$ -axis length, (b) $T_c$ , (c) $J_c$  at self-field and (d) $J_c$  at 77 K, 1 T for ( $\text{Y,Gd}$ )BCO coated conductors.

たことが関係していると考えられる。当日は、詳細な実験結果を報告する。

### 謝辞

本研究は、JSPS 科研費(23K03929)の助成を受け実施したものである。また、本研究の一部は、JST 創発的研究支援事業(FOREST) JPMJFR202G の助成を受け実施したものである。

### 参考文献

- [1] T. Okada *et al.*, Supercond. Sci. Technol. **33** (2020) 094014
- [2] D. C. van der laan *et al.*, IEEE TAS **22** (2012) 8400707

自己配向  $\text{LaNiO}_3$  を利用した Si 基板上への  $c$  軸配向  $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$  薄膜堆積Deposition of  $c$ -axis oriented  $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$  thin films on self-oriented  $\text{LaNiO}_3$   
coated Si substrate金沢大理工<sup>1</sup>、(株)高純度化学研究所<sup>2</sup>、○(M1)中村匡佑<sup>1</sup>、(B)三田 祐<sup>1</sup>、島村一利<sup>1</sup>、河原正美<sup>2</sup>、川江 健<sup>1</sup>College of Sci. & Eng. Kanazawa Univ.<sup>1</sup>, Kojundo Chemical Lab. Co., Ltd.<sup>2</sup>,○K. Nakamura<sup>1</sup>, T. Mita<sup>1</sup>, K. Shimamura<sup>1</sup>, M. Kawahara<sup>2</sup>, and T. Kawae<sup>1</sup>

E-mail : kyo20010203@stu.kanazawa-u.ac.jp

## 【はじめに】

高温超伝導体  $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$  (YBCO, ortho,  $a$ :3.84Å,  $b$ :3.93Å,  $c$ :11.82Å)は超伝導磁気エネルギー貯蔵 (SMES) の小型化など、電力分野に対する期待が高まっている<sup>[1]</sup>。一方、YBCO の幅広い電力分野での応用を念頭に置くと、YBCO 薄膜が電気伝導に対して強い異方性を示すことから、多様な基板上での  $c$  軸配向 YBCO 薄膜の成長が求められる。そこで、様々な基板上で自己配向性を示す  $\text{LaNiO}_3$  (LNO, cubic,  $a$ :3.86Å) 薄膜<sup>[2]</sup>をテンプレート層として用いて、結晶性の異なる Si 基板上での  $c$  軸配向 YBCO 薄膜の作製を検討した。

## 【実験方法】

Si 基板上に LNO 原料溶液を回転塗布した後、オーブンの乾燥(140°C, 3min)、RTA を用いた仮焼(380°C, 3min)と本焼(700°C, 20min)を行った。

次に、PLD 法(基板温度:690°C,  $\text{O}_2$ :1Torr)を用いて自己配向 LNO 薄膜上に YBCO 薄膜を堆積した。作製した試料に対し、粉末 XRD による結晶性評価を行った。

## 【結果と考察】

YBCO 成膜時における自己配向 LNO 薄膜の変質の検証を念頭に、自己配向 LNO 薄膜に対する熱処理(690~750°C,  $\text{O}_2$ :1Torr)を行った。Fig.1 に熱処理を行った試料の XRD パターンを示す。高温・減圧雰囲気での熱処理に対して、LNO の ( $h00$ )自己配向が維持される事を確認した。一方、LNO の熱分解に由来すると考えられる(00 $l$ )配向  $\text{La}_2\text{NiO}_4$ (La214, tetra,  $a$ :3.92Å,  $b$ :3.92Å,  $c$ :12.52Å)が生じる事が確認された。

Fig.2 に、自己配向 LNO 上に YBCO 薄膜を成膜した試料に対する XRD パターンを示す。YBCO(00 $l$ )の回折線が観測され、Si 基板上で YBCO 薄膜が  $c$  軸配向成長している事が分かる。LNO、La214、YBCO のそれぞれの  $a$ 、 $b$  軸間の格子不整合率はいずれも 2%を大きく下回る事から、この結果は、La214 の存在は YBCO 薄膜の  $c$  軸配向成長の弊害にはなり得ないものと判断できる。

## 【参考文献】

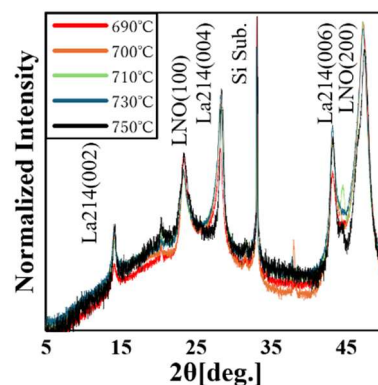
[1] Y. Ichiki *et al.*, 2018, J. Phys. Conf. Ser. **1054** 012065[2] R. Ashihara *et al.*, J. Ceram. Soc. Jpn., (*in press*)

Fig.1 XRD patterns of self-oriented LNO thin films with post annealing treatment ( $\text{O}_2$ :1Torr).

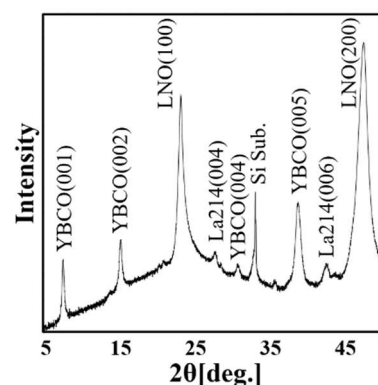


Fig.2 XRD pattern of YBCO thin film deposited on the self-oriented LNO coated Si substrate.



# 銅酸化物超伝導体を原料とした FF-MOD 法原料溶液の汎用性

## Versatility of starting solutions for FF-MOD method made from cuprate superconductors

青学大理工<sup>1</sup>

○下山 淳一<sup>1</sup>, 堀口 佳吾<sup>1</sup>, 相楽 和豊<sup>1</sup>, 加藤 志織<sup>1</sup>, 田口 寛人<sup>1</sup>, 畠 直輝<sup>1</sup>, 元木 貴則<sup>1</sup>

Aoyama Gakuin Univ.<sup>1</sup>

○Jun-ichi Shimoyama<sup>1</sup>, Keigo Horiguchi<sup>1</sup>, Kazutoyo Sagara<sup>1</sup>, Shiori Kato<sup>1</sup>, Hiroto Taguchi<sup>1</sup>,

Naoki Hata<sup>1</sup>, Takanori Motoki<sup>1</sup>

E-mail: shimo@phys.aoyama.ac.jp

【緒言】 フッ素を含まない原料溶液を用いる有機酸塩塗布熱分解法(FF-MOD 法)は、常圧プロセスでかつ  $\text{REBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_y$ (RE123)結晶の成長が極めて速やかである。さらに、薄膜表面が比較的平坦で、焼成を繰り返すことにより厚膜化できることも FF-MOD 法の特徴である。すなわち、低コスト、量産性の点で最も有利な RE123 エピタキシャル薄膜の製法であるが、RE123 の結晶性が高く他の製法による RE123 薄膜より有効なピンニングセンターとなる欠陥が少なく高磁場中での臨界電流特性に劣ることから、実用材料開発研究に遅れていた。ところが、最近、長尺かつ微細な  $\text{BaMO}_3$ ( $M = \text{Zr, Hf}$ )粒子を含む高臨界電流特性の Gd123 テープ線材が開発された[1]ことから、実用化に向けて新しい段階に入ったといえる。

FF-MOD 法 RE123 薄膜の原料溶液の製法は様々であるが、有機金属原料には酢酸塩やアセチルアセトナート(acac)錯体が用いられることが多く、これらのほとんどは水和物である。構成元素ごとの原料を仕込組成に合わせて秤量しプロピオン酸を含む有機溶媒に溶かし、減圧蒸留などにより乾燥させた固化物をメタノール、ブタノール、水などの混合溶媒に溶解させたものが FF-MOD 法の原料溶液となる。しかし、原料は比較的高価で、多様な金属元素の試薬を入手することは容易でなく、量産化まで考えると、新しい簡便な原料溶液調製法の開発が必要となる。以上の背景のもと、我々は新しい FF-MOD 法原料溶液の調製法の開発を試み、既製の銅酸化物超伝導体の焼結体または粉末をプロピオン酸に溶解させ、乾燥によりプロピオン酸塩粉末を得る方法が有望であることを前回報告した。この方法の特長は金属組成比が精密に制御された多様な FF-MOD 原料が大量にかつ短期間で調製できることである。今回はさらに様々な RE 系超伝導薄膜の作製を進め、この原料溶液の汎用性が高いことがわかってきたので、いくつかの実例を報告する。

【実験】 RE123(RE=Y, La, Nd, Sm, Eu, Gd, Dy)の焼結体や粉末を三角フラスコに入れ、プロピオン酸を加え溶解させた。粉末の場合は室温、焼結体の場合には 50~120°C において速やかに溶解する。最終的に重量比 6~12 倍程度のプロピオン酸を加えると固相は全て溶解し濃青色の溶液となる。ホットプレート上で加熱により余分なプロピオン酸を気化させ乾固物とした後、乳鉢で粉砕し淡青色のプロピオン酸塩粉末を得た。最後に適量のメタノール、ブタノール、水の混合溶媒に溶解させ、さらに塩酸を所定量添加し RE123 薄膜用の原料溶液とした。Yb123 については  $\text{Yb}_2\text{Cu}_2\text{O}_5$  と  $\text{BaCuO}_2$  を出発酸化物原料とした。調製した RE123 原料溶液を  $\text{SrTiO}_3$  単結晶基板上、または表面に  $\text{CeO}_2$  層を持つ IBAD 基板上にスピコート法により塗布し、乾燥後、仮焼した。塗布と仮焼を複数回繰り返したあと、様々な条件で本焼成を行った。

【結果と考察】 Fig. 1 に IBAD 基板上に作製した Eu123 薄膜の表面 X 線回折パターンを示す。新しい原料溶液を用いた場合には従来の原料溶液を用いた場合と比べて、より広い焼成条件、特に低い温度での焼成でも不純物が少ない比較的平坦な表面を有する薄膜が得られることが特徴で、Yb123 では 720°C まで焼成温度を下げて 2 軸配向薄膜が得られた。この特長は基板のバッファ層材料との反応による劣化が抑制でき、さらに繰り返し焼成による厚膜化や超伝導接合作製に有利であることを意味するものである。

[1] T. Yoshihara et al., *IEEE Trans. Appl. Supercond.* **33** (2023) 6600205

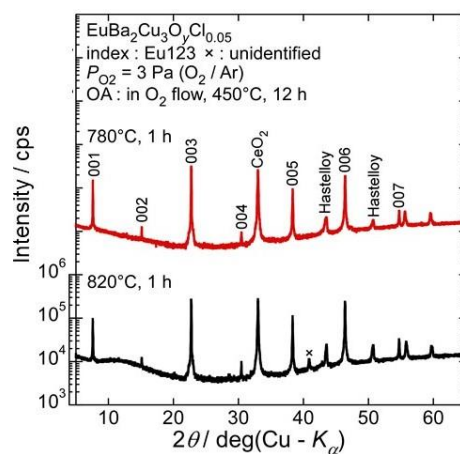


Fig. 1 Surface XRD patterns of Eu123 thin films grown on IBAD substrates.

11 超伝導 | 一般セッション(口頭講演): 11.3 臨界電流, 超伝導パワー応用

**[19a-C31-7~11] 11.3 臨界電流, 超伝導パワー応用**

[19a-C31-7]

ナノコンポジットバッファ層を用いた $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_y$ -pure薄膜への欠陥ピンイングセンターの導入○奥村 慎<sup>1</sup>、伊藤 駿汰<sup>1</sup>、堀出 朋哉<sup>1</sup>、一瀬 中<sup>2</sup>、吉田 隆<sup>1</sup> (1.名大工、2.電中研)

[19a-C31-8]

重イオン照射した人工ピン入り高温超伝導線材の磁束クリープ特性

○末吉 哲郎<sup>1</sup>、尾崎 壽紀<sup>2</sup>、千星 聡<sup>3</sup>、坂根 仁<sup>4</sup>、西寄 照和<sup>1</sup>、石川 法人<sup>5</sup> (1.九産大、2.関学大、3.島根大、4.住重アテックス、5.原子力機構)

[19a-C31-9]

REBCO iGS接合における臨界電流の磁場印加角度依存性

○武田 泰明<sup>1</sup>、西島 元<sup>1</sup>、元木 貴則<sup>2</sup>、下山 淳一<sup>2</sup>、北口 仁<sup>1</sup> (1.NIMS、2.青学大)

[19a-C31-10]

曲げひずみ印加によるREBCOコート線材の面内ドメイン制御とその超伝導特性への影響

○岡田 達典<sup>1</sup>、島村 雄飛<sup>1</sup>、淡路 智<sup>1</sup> (1.東北大金研)

[19a-C31-11]

高速磁気顕微鏡観察によるREBCO線材内の局所不均一性の機械学習自動検出における解像度、試料線幅、プロセス依存の影響に関する検討

○呉 澤宇<sup>1</sup>、今村 和孝<sup>1</sup>、東川 甲平<sup>1</sup>、木須 隆暢<sup>1</sup> (1.九大院シス情)

ナノコンポジットバッファ層を用いた  
YBa<sub>2</sub>Cu<sub>3</sub>O<sub>y</sub>-pure 薄膜への欠陥ピンニングセンターの導入  
Inducing pinning center of crystal defects to YBa<sub>2</sub>Cu<sub>3</sub>O<sub>y</sub>- pure thin film  
by using nanocomposite buffer layer

名大工<sup>1</sup>, 電中研<sup>2</sup>, 奥村 慎<sup>1</sup>, 伊藤 駿汰<sup>1</sup>, 堀出 朋哉<sup>1</sup>, 一瀬 中<sup>2</sup>, 吉田 隆<sup>1</sup>

Nagoya Univ.<sup>1</sup>, CRIEPI<sup>2</sup>, Shin Okumura<sup>1</sup>, Shunta Ito<sup>1</sup>, Tomoya Horide<sup>1</sup>, Ataru Ichinose<sup>2</sup>, Yutaka Yoshida<sup>1</sup>

E-mail: okumura.shin.x4@s.mail.nagoya-u.ac.jp

# 1. はじめに

REBa<sub>2</sub>Cu<sub>3</sub>O<sub>y</sub> (RE: Rare Earth) 薄膜において、磁場中臨界電流の向上のために、APC (人工ピンニングセンター) が導入されてきた。APC が REBCO 内に侵入した量子化磁束をトラップし、磁場中での臨界電流密度 ( $J_c$ ) の低減が抑制される。APC として二次相を添加した REBCO 膜の  $J_c$  特性向上は高温・低磁場で顕著である。しかし低温では結晶欠陥であるナノ歪み、結晶粒界、積層欠陥等が PC として強く働くと考えられている。

REBCO 薄膜中の結晶欠陥による PC について“基板誘起ピン”として表面のナノ突出物から、貫通転位を導入する方法[1]や格子不整合性を利用し転位点を増大させる方法[2]など様々な試みが行われてきた。どの手法も成長界面が REBCO 薄膜内に結晶欠陥を誘発し、磁場中  $J_c$  特性が向上した。

これまでに MgO 単結晶上に STO, CeO<sub>2</sub> が  $c$  軸方向に cube-on-cube の配向で自己組織化すること及びバッファ層上の YBCO における磁場中  $J_c$  特性の変化及び結晶性等の観点から欠陥 PC の導入に最適な STO:CeO<sub>2</sub> の体積比率を報告した[3]。今回は YBCO 層の成長レートの変化及び STO 単相バッファ層との比較を行い、REBCO 薄膜における基板誘起の欠陥ピン導入に当たり、ナノコンポジットバッファ層の効果を検討した。

# 2. 実験方法

本研究では Pulsed Laser Deposition (PLD) 法により MgO (100) 単結晶上にバッファ層及び YBCO 層を作製した。ナノコンポジットバッファ層の作製

には PLD のターゲットに STO+CeO<sub>2</sub> を混合したものを使用した。また、Kr-F エキシマーレーザー ( $\lambda = 248$  nm) の周波数を変化させることで YBCO 層の成長レートを変化させた。その際、同じ推定膜厚となるよう成膜時間を調整した。

# 3. 実験結果

図 1 に異なるバッファ層を用いて成長レートを変化させた YBCO 薄膜の 20 K,  $B//c$  における磁場中ピンニング力 ( $F_p$ ) を示す。STO 単結晶上 YBCO 薄膜については、格子整合性の良さから YBCO 層には欠陥 PC が入らず、9 T における  $F_p$  は最も小さい。YBCO/STO/MgO では STO と MgO の不整合度を若干量 STO 層が引継ぎ、YBCO 層の磁場中特性が向上している[2]。YBCO/STO+CeO<sub>2</sub>/MgO では STO と CeO<sub>2</sub>, MgO の 3 物質間の格子不整合度や結晶配向が転位点等を多量に YBCO 層に誘発し、磁場中で特性が向上した。さらに YBCO 層の成長レートにより  $F_p$ - $B$  特性が異なる。

図 2 に作製した YBCO/STO+CeO<sub>2</sub>/MgO 薄膜の断面 STEM 像を示す。等間隔に YBCO 表面へ突き抜ける貫通転位が生じている。バッファ層と YBCO 界面でミスフィット緩和のために転位が導入されたと考えられる。また薄膜全体で面内方向に配列した Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 析出物も多量に存在し、等方的な PC として寄与していると推察される。

# 4. 謝辞

本研究の一部は JST-CREST (JIPMJC2336) の助成を受けて実施した。

# 5. 参考文献

- [1] B. Maiorov et al 2006 *Supercond. Sci. Technol.* **19** 891-895
- [2] P. Mele et al 2007 *IEEE Trans. Appl. Supercond.* **17** 2, 3713-3716
- [3] 第 71 回応用物理学会春季学術講演会、23a-12N-1、奥村 慎 他

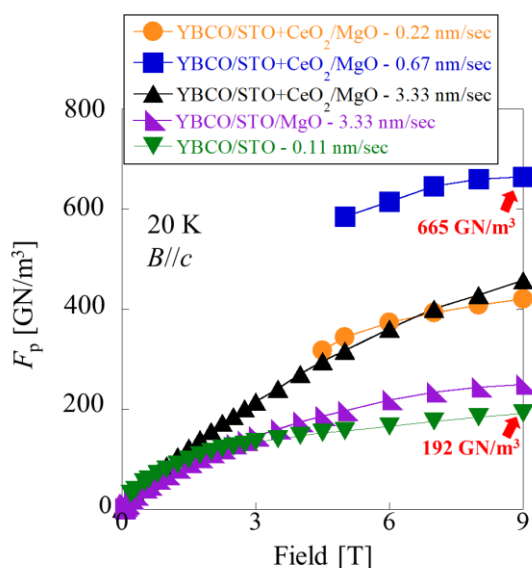


図 1 異なるバッファ層を用いて成長レートを変化させた YBCO 薄膜の 20 K,  $B//c$  における磁場中ピンニング力特性

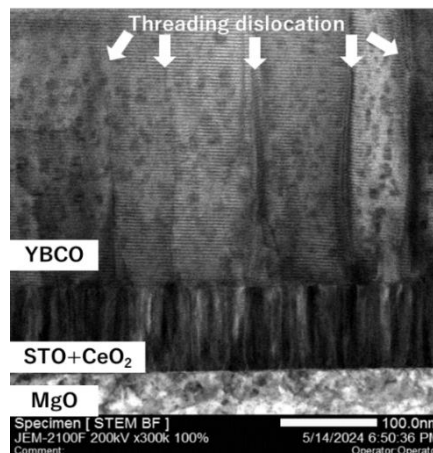


図 2 YBCO/STO+CeO<sub>2</sub>/MgO 薄膜の断面 STEM 像

# 重イオン照射した人工ピン入り高温超伝導線材の 磁束クリープ特性

## Flux Creep Properties in Heavy-ion Irradiated High- $T_c$ Superconducting Tapes with Artificial Pinning Centers

九産大理工<sup>1</sup>, 関学大工<sup>2</sup>, 島根大<sup>3</sup>, 住重アテックス(株)<sup>4</sup>, 原子力機構<sup>5</sup>

○末吉哲郎<sup>1</sup>, 尾崎壽紀<sup>2</sup>, 千星聡<sup>3</sup>, 坂根仁<sup>4</sup>, 西崙照和<sup>1</sup>, 石川法人<sup>5</sup>

Kyushu Sangyo Univ.<sup>1</sup>, Kwansei Gakuin Univ.<sup>2</sup>, Shimane Univ.<sup>3</sup>, SHI-ATEX Co., Ltd.<sup>4</sup>, JAEA<sup>5</sup>

○Tetsuro Sueyoshi<sup>1</sup>, Toshinori Ozaki<sup>2</sup>, Satoshi Semboshi<sup>3</sup>, Hitoshi Sakane<sup>4</sup>, Terukazu Nishizaki<sup>1</sup>,

Norito Ishikawa<sup>5</sup>

E-mail: s.teturo@ip.kyusan-u.ac.jp

### 1. はじめに

高温超伝導体の磁場中の臨界電流密度  $J_c$  を改善する方法の一つに、強いピン止め力をもつ柱状欠陥と補助ピン止め点となる球状欠陥を組み合わせたハイブリッド磁束ピン止めがある。この機能の一つとして、柱状欠陥間に生じる量子化磁束のダブルキंक励起による磁束クリープを球状欠陥が抑制し、より高い  $J_c$  値を得られることが期待されている。これまで、我々は  $Y_2O_3$  ナノ粒子を人工ピンとして含む高温超伝導線材 (Faraday Factory Japan (FFJ)) に対して重イオン照射により柱状欠陥を導入し、磁化緩和率への影響について報告している[1]。

今回の報告では、柱状欠陥を導入した FFJ 製の人工ピン入り/無しの高温超伝導線材の磁化緩和特性から磁束クリープの活性化エネルギー  $U^*$  の電流依存性を評価することで、ハイブリッド磁束ピン止め構造における磁束クリープ機構について系統的に議論を行う。

### 2. 実験および結果

本研究で用いた試料は、FFJ 製のピン無しの GdBCO 高温超伝導線材 (2019 年 5 月購入) と  $Y_2O_3$  がドーピングされた Y 系高温超伝導線材 (2021 年 8 月購入) である。これらの線材から約 2 mm 角に試料を切り出し、照射や測定に用いた。200 MeV Xe 照射は、原子力機構のタンデム加速器で行った。照射方向は、膜面に垂直すなわち試料の  $c$  軸方向に平行である。照射量は、 $5.81 \times 10^{11}$  ions/cm<sup>2</sup> (マッチング磁場  $B_\phi = 12$  T) である。 $U^*$  の電流密度依存性は、磁化緩和特性から評価した。SQUID 磁束計を用いて  $c$  軸方向の磁場での磁化の時間依存性の測定から、各温度  $T$  での磁化緩和率  $S = -d \ln M / d \ln t$  を求めて  $U^* = T/S$  を評価する。また、その温度での電流密度  $J$  は測定開始の磁化から臨界

状態モデルを用いて求めた[2]。

Fig.1 に、1 T における重イオン照射した人工ピン入り/無し超伝導線材の  $U^*$  の電流密度依存性を示す。磁束クリープ機構は、 $U^*$  の電流依存性を表す  $U^* = U_0((J_c/J)^\mu - 1)$  における指数  $\mu$  を評価することで議論することができる ( $U_0$ : 特性活性化エネルギー) [3]。ピン無しの線材においては、ハーフループ励起の磁束クリープ ( $\mu = 0.85$ ) からダブルキंक励起 ( $\mu < 0$ ) への遷移がみられる。一方、ピン入り線材においては  $\mu = 0.85$  から可変領域ホッピング型の磁束クリープ ( $\mu = 0.25$ ) へ遷移しており、 $Y_2O_3$  ナノ粒子がダブルキंक励起を妨げている影響が現れていると考えられる。

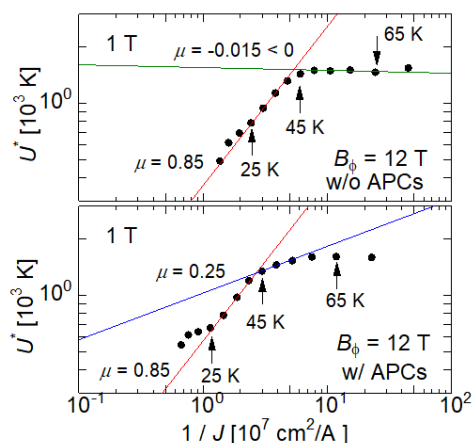


Fig.1 Normalized flux creep activation energy vs  $1/J$  in double-logarithmic scales at 1 T.

### 謝辞

本研究の一部は、原研タンデム加速器施設供用利用制度および科研費 (22K04207) の助成を受けて実施したものである。

### 参考文献

- [1] 末吉ら, R6 春季応用物理学会 23a-12N-3
- [2] Miu, Phys. Rev. B **85** (2012) 104519.
- [3] Blatter, *et al.* Rev. Mod. Phys. **66** (1994) 1125.



# REBCO iGS 接合における臨界電流の磁場印加角度依存性

## Field angular dependence of critical current in REBCO iGS joints

NIMS<sup>1</sup>, 青学大<sup>2</sup> ○武田 泰明<sup>1</sup>, 西島 元<sup>1</sup>, 元木 貴則<sup>2</sup>, 下山 淳一<sup>2</sup>, 北口 仁<sup>1</sup>

NIMS<sup>1</sup>, Aoyama Gakuin Univ.<sup>2</sup>, ○Yasuaki Takeda<sup>1</sup>, Gen Nishijima<sup>1</sup>,

Takanori Motoki<sup>2</sup>, Jun-ichi Shimoyama<sup>2</sup>, Hitoshi Kitaguchi<sup>1</sup>

E-mail: TAKEDA.Yasuaki@nims.go.jp

### 1. はじめに

REBa<sub>2</sub>Cu<sub>3</sub>O<sub>y</sub> (REBCO) 永久電流マグネットにむけた超伝導接合の研究開発が進んでいる[1]。住友電工が開発した intermediate grown superconducting (iGS) 接合[2]は、高い接合臨界電流 ( $I_{cj}$ ) と低い接合抵抗を示し、マグネット応用が期待されている。永久電流マグネットの運転電流は  $I_{cj}$  よりも低くするため、 $I_{cj}$  特性を理解することは重要である。我々は最近、超伝導接合を持つ閉ループの電流減衰から低電圧 ( $10^{-8}$  V) 基準の  $I_{cj}$  を評価しており[3]、iGS 接合の  $I_{cj}$  評価も進めている[4]。本講演では iGS 接合における  $I_{cj}$  の磁場印加角度依存性を報告する。

### 2. 実験方法[3,4]

1本のREBCO線材からなり、iGS接合を持つ1ターンの閉ループ試料 (直径 100 mm, 自己インダクタンス ( $L$ ) 0.47  $\mu$ H) を用いた。我々が開発した接合抵抗評価装置により 50–77 K で電流減衰測定を行った。ループ中心に配置した銅コイルでループ電流 ( $I_{loop}$ ) を試料に誘導し、 $I_{loop}$  の時間依存性 ( $I_{loop}-t$ ) を調べた。得られた  $I_{loop}-t$  から電圧  $V = -L(\Delta I_{loop}/\Delta t)$  を計算し、電圧基準  $V_c = 10^{-8}$  V の  $I_{cj}$  を評価した。スプリットマグネットで水平方向の磁場 ( $B$ , 0.1–2.0 T) を接合部に印加し、試料を回転させることで磁場印加角度 ( $\theta$ ) を制御した。 $\theta = 0$  および  $90^\circ$  はそれぞれ  $B \parallel c$  および  $B \parallel ab$  に相当する。2つの試料 (#A, #B) について、 $I_{cj}$  の磁場印加角度依存性を評価した。

### 3. 結果と考察

#A および #B の 77 K 自己磁場における  $I_{cj}$  はそれぞれ 108 A および 47.5 A であった。Fig. 1 に 0.5 T における両試料の  $I_{cj}$  の磁場印加角度依存性を示す。全ての  $I_{cj}-\theta$  は、 $90^\circ$  でピークを示し、人工ピンが導入されていない REBCO 線材の臨界電流 ( $I_c$ ) の角度依存性[5]と似ていた。また、ピークの鋭さは温度や磁場、試料に依存した。実線は REBCO 線材で使われるモデル[6]によるフィッティング結果であり、実験結果とよく一致した。Fig. 2 にフィッティングパラメータ  $\omega_1$  と  $\omega_2$  の磁場依存性を示す。 $\omega_2$  と比べて、 $\omega_1$  は温度や磁場、試料に大きく依存した。REBCO 線材の  $I_c-\theta$  を説明する物理モデル[7]を適用すると、ピークの鋭さは  $\omega_1$  で表現されることが考えられる。これは今回の結果とも整合する。以上のことから、iGS 接合の  $I_{cj}-\theta$  は、線材の  $I_c-\theta$  と同様に物理的に解釈できることが示唆された。当日はこの点を定量的に議論する。

**謝辞** 本研究は、JST 未来社会創造事業 JPMJMI17A2 および科研費 22K14482 の支援を受けたものです。試料をご提供いただいたジャパンスーパーコンダクタテクノロジー株式会社の濱田様、および住友電気工業株式会社の大木様に感謝申し上げます。

**参考文献** [1] Takeda *et al.*, *SuST* **35** (2022) 043002. [2] Ohki *et al.*, *SuST* **30** (2017) 115017. [3] Takeda *et al.*, *SuST* **36** (2023) 125010. [4] Takeda *et al.*, *Abstracts of CSSJ Conf.* **107** (2024) 12. [5] Tsuchiya *et al.*, *IEEE TAS* **27** (2017) 6600205. [6] Muto *et al.*, *IEEE TAS* **34** (2024) 4603105. [7] Long *et al.*, *SuST* **21** (2008) 025007.

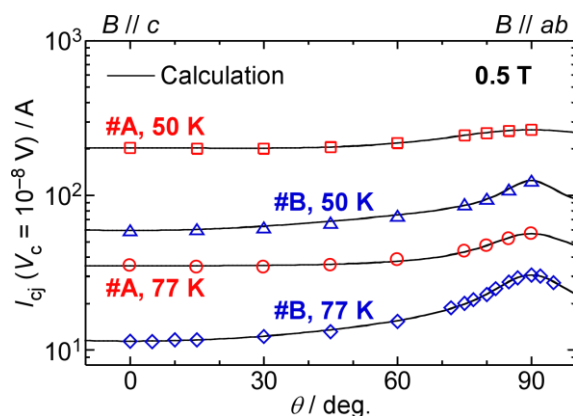


Fig. 1 Field angular dependence of  $I_{cj}$  at 50–77 K and 0.5 T

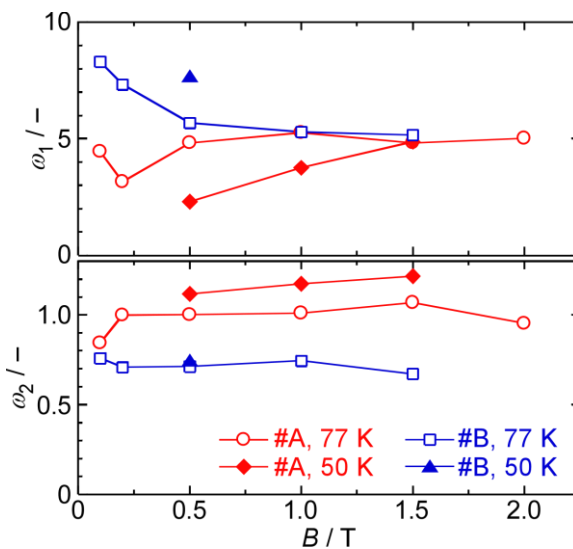


Fig. 2 Field dependence of fitting parameters  $\omega_1$  and  $\omega_2$ .



# 曲げひずみ印加による *REBCO* コート線材の面内ドメイン制御とその超伝導特性への影響

## Domain control of *REBCO* coated conductors by bending strain and its impacts on superconducting properties

東北大金研<sup>1</sup> ○岡田 達典<sup>1</sup>、島村 雄飛<sup>1</sup>、淡路 智<sup>1</sup>

IMR, Tohoku Univ.<sup>1</sup>, ○Tatsunori Okada<sup>1</sup>, Yuhi Shimamura<sup>1</sup>, Satoshi Awaji<sup>1</sup>

E-mail: tatsunori.okada.d8@tohoku.ac.jp

強磁場マグネット応用において、*REBa<sub>2</sub>Cu<sub>3</sub>O<sub>7-δ</sub>* (*REBCO*、*RE* は希土類元素/Y) コート線材は巻線時の曲げひずみや、通電時の電磁力による一軸ひずみに曝される。直方晶の *REBCO* は面内に双晶構造を成し、*a* (*b*) 軸が通電電流方向に揃った A (B) ドメインは印加ひずみに対して異なる応答を示す<sup>[1,2]</sup>。金研強磁場センターではこれまで、曲げひずみ<sup>[3]</sup> や一軸伸長ひずみ<sup>[2,4]</sup> 印加下での熱処理による面内ドメイン制御に取り組んできた。その過程で、*REBCO* コート線材を室温下で曲げたまま静置するだけで面内ドメインが変化することを見出した<sup>[4]</sup>。これは、**コイル巻線後の *REBCO* のドメイン構造は短尺線材での状態から変化しており、コイル化した *REBCO* コート線材の超伝導特性が短尺線材での測定結果とは全く別物である可能性も示唆する。**よって、ドメイン分率変化が *REBCO* 線材の超伝導特性に与える影響の解明は重要である。

そこで本研究では、(i) 伸長/圧縮性の曲げひずみ  $\varepsilon_b$  印加による SuNAM 製 GdBCO 線材の面内ドメイン制御、(ii) ドメイン分率評価のための X 線回折測定、(iii) ドメイン制御した *REBCO* コート線材に対する 15 T までの面内磁場下における直流輸送特性を評価した。但し、曲げひずみによってドメイン制御を施しても、ひずみを徐荷することでドメイン分率が制御前の値に向けて緩和していく<sup>[5]</sup> ため、実験 (ii)・(iii) は実験 (i) と同じ曲げひずみ状態で行なった。

その結果、(200)・(020) 回折ピークの強度比・面積比から求めた A ドメイン分率  $f_A$  が、 $-0.43\% \leq \varepsilon_b \leq +0.43\%$  の伸長 (圧縮) 曲げひずみにより線形に減少 (増加) することを確認した。つまり、**少なくとも  $|\varepsilon_b| \leq +0.43\%$  の曲げひずみ領域において  $f_A$  を制御可能である。** $\varepsilon_b$  に凡そ線形変化する  $f_A$  と対照的に、ゼロ磁場下の電気抵抗率から定めた超伝導転移温度  $T_c$  は  $|\varepsilon_b|$  に伴って減少した。一方で、磁場中電気抵抗率から定めた上部臨界磁場  $B_{c2}^{\parallel ab}$  (0K) (WHH モデル<sup>[6]</sup> を適用) や不可逆磁場  $B_{irr}^{\parallel ab}$  (0K) (線形外挿) は  $|\varepsilon_b|$  に依らず、TAFI 状態<sup>7</sup> のピン止めポテンシャル  $U_0(B\parallel ab, 77.3K)$  や臨界電流密度  $J_c(B\parallel ab, 77.3K)$  は  $|\varepsilon_b|$  に応じて増大する傾向が見られた。すなわち、 **$T_c$  の低下にも関わらず、面内磁場中での通電特性は向上した。**反射 XRD から *c* 軸長が  $|\varepsilon_b|$  とともに増大する傾向が見られ、「キャリア供給層-Cu-O<sub>2</sub> 間距離の伸長によるキャリア数の減少」「Fermi 面の 2 次元化 (=有効質量異方性の増大) に伴う面間コヒーレンス長の縮小」と考えれば、 $|\varepsilon_b|$  に伴う  $T_c$  低下と面内磁場中特性の向上を定性的に説明できそうであるが、より詳細な調査が必要である。

[謝辞] 本研究は、東北大学金属材料研究所における共同研究 (202211-HMKGE-0401、202312-HMKPC-0402) と JSPS 科研費 国際共同研究加速基金 (海外連携研究 23KK0073) の支援の下で実施しました。

1) U. Welp *et al.*, Phys. Rev. Lett., **69** (1992) 2130.

2) S. Awaji *et al.*, Sci. Rep., **5** (2015) 11156.

3) T. Suzuki *et al.*, IEEE TAS, **23** (2013) 8000104.

4) T. Suzuki *et al.*, IEEE TAS, **25** (2015) 8400704.

5) T. Okada *et al.*, IEEE TAS, **31** (2021) 6601006.

6) N.R. Werthamer *et al.*, Phys. Rev., **147** (1966) 295.

7) P.W. Anderson and Y.B. Kim, Rev. Mod. Phys., **36** (1964) 39.

# 高速磁気顕微鏡観察による REBCO 線材内の局所不均一性の機械学習自動検出における解像度、試料線幅、プロセス依存の影響に関する検討

## A Study on the Effects of Resolution, Sample Linewidth and Process-Dependence on Machine-Learning Based Auto-Detection of Local Heterogeneity in REBCO Wires by High-Speed Magnetic Microscopy

九大院シス情<sup>○</sup>呉 澤宇, 今村 和孝, 東川 甲平, 木須 隆暢

Kyushu Univ. <sup>○</sup>Zeyu Wu, Kazutaka Imamura, Kohei Higashikawa, Takanobu Kiss

E-mail: [z.wu@super.ees.kyushu-u.ac.jp](mailto:z.wu@super.ees.kyushu-u.ac.jp)

### 1. はじめに

長尺の希土類系 (REBCO) 高温超伝導材の応用における臨界電流  $I_c$  の空間均一性は最も重要な要求仕様の一つであるが、その支配因子や統計事象を含む特性は未だ十分に明らかとなっていない。我々は、前報において、リール式磁気顕微鏡観察[1]によって得られたテープ面内の 2 次元磁化電流分布に、機械学習による物体検出を適用することで、一般的な 1 次元の  $I_c$  分布の観察では検出が困難な、線材に内包される局所不均一性の自動検出が可能であることを報告した[2]。本研究では、さらに本解析における、検出画像の解像度、試料線幅などの計測条件ならびに線材作製プロセスの影響について検討を行った。

### 2. 実験方法

測定には、5 mm 幅の PLD 法、4 mm 幅の RCE-DR 法と、4 mm 並びに 2 mm 幅の MOCVD 法による REBCO テープ線材の 4 種類を用いた。リール式磁気顕微鏡観察によって面内の磁化電流密度  $J$  の分布図を取得し、 $J$  低下領域の画像を教師データとして物体検出モデルの学習を行った[2]。 $J$  を導出する際に、ローパスフィルタを適用することで空間解像度を調整した。

### 3. 実験結果及び考察

解析に用いる  $J$  マップ画像の解像度の影響について検討した。カットオフ波長 0.6 mm で得られた  $J$  分布と、カットオフ波長を 1.0 mm とし解像度を下げた画像を用意した。高解像度の画像で検出モデルをトレーニングし、低解像度の画像に適用した場合、パフォーマンスを表す F1-score が 64% となり、検出精度が低いことが分かった。Fig. 1 にその一例を示す。低解像度の画像では、 $J$  低下領域を検出できていない。逆に低解像度の画像でトレーニングしたモデルを、高解像度画像に適用した場合も精度が低く、解像度のミスマッチにより検出精度が低下することを確認した。一方、モデルのトレーニングも解析画像も同じ 1.0 mm の解像度画像を用いることにより、Fig. 2 に示すように局所不均一性の領域および種類、線材作製プロセスの差異も含めて正確に検出できた。画像の解像度が下がるにつれて、プロセス依存の詳細情報が失われる傾向が見られるが、1.0 mm 程度の解像度においてプロセスの特徴を未だ捉えており、学習画像と検出画像の解像度を一致させることで、F1-score は 88% となり十分な精度の検出が可能であることが分かった。

線幅の違いによる影響も確認した結果、線幅の異なる学習データを用いたモデルによって、異なる線幅の試料の解析が可能であった。

謝辞: 本研究は、JSPS 科研費 JP24H00320, JP23K13368 の助成を受けて実施したものである。

### 参考文献

- [1] K. Higashikawa et al., *SuST*, vol. 33, no. 6, 2020, Art. No. 064005.  
[2] 呉ら, 2024 応用物理学会春季大会予稿集, 23a-12N-7.

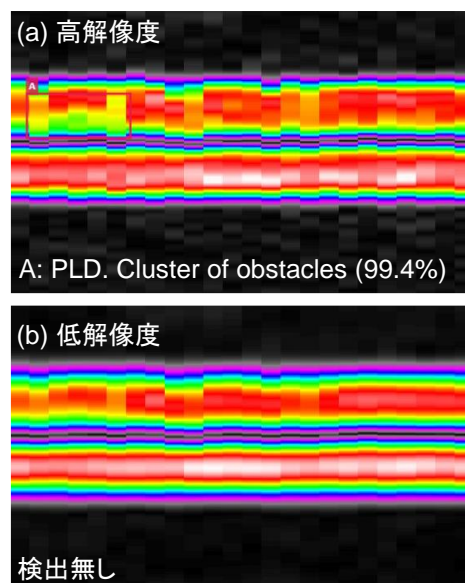


Fig. 1 Comparison of detecting obstacles under the difference of spatial resolution mismatched from the training, in the case of PLD.

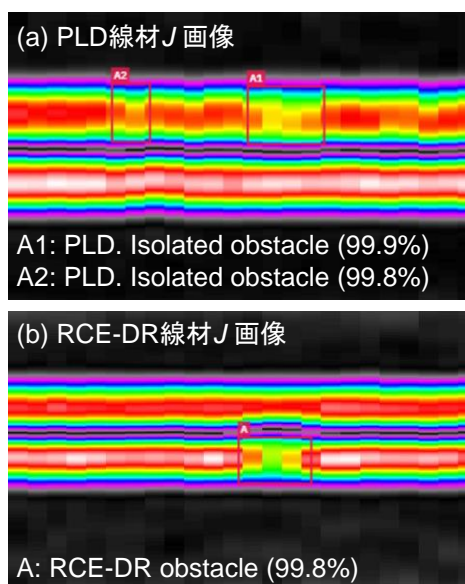


Fig. 2 Examples of successful detection of obstacles by using same image resolution of 1.0 mm for both training and detection. (a) PLD and (b) RCE-DR processed CC tape.

11 超伝導 | 一般セッション(口頭講演): 11.4 アナログ応用および関連技術

**[18p-B5-1~15] 11.4 アナログ応用および関連技術**

[18p-B5-1]

[第56回講演奨励賞受賞記念講演] 高Q値超伝導共振器を用いた高効率電界共振結合方式無線電力伝送

○高橋 俊一<sup>1</sup>、作間 啓太<sup>1</sup>、關谷 尚人<sup>1</sup> (1.山梨大工)

[18p-B5-2]

YBCO 薄膜コプレーナ線路のマイクロ波透過特性を用いた超伝導パラメトリック増幅器の利得評価

○高橋 惟吹<sup>1</sup>、島影 尚<sup>1</sup> (1.茨城大)

[18p-B5-3]

分離型中空構造を用いた超伝導共振器による薄膜評価法に関する研究

○中城 悠翔<sup>1,2</sup>、大谷 知行<sup>2,3</sup>、亀井 雄斗<sup>2</sup>、伊藤 凌太<sup>2,3</sup>、美馬 寛<sup>4</sup>、田井野 徹<sup>1,2</sup> (1.埼玉大院、2.理研RAP、3.東北大理、4.NICT)

[18p-B5-4]

超伝導アンテナの広帯域化による耐電力特性向上の検討

○(M2)武田 航太郎<sup>1</sup>、作間 啓太<sup>1</sup>、關谷 尚人<sup>1</sup> (1.山梨大工)

[18p-B5-5]

超伝導細線三端子素子のパルス電流応答シミュレーション

○安川 直輝<sup>1</sup>、山梨 裕希<sup>2</sup>、吉川 信行<sup>2</sup>、西尾 太一郎<sup>1</sup>、馬渡 康徳<sup>3</sup> (1.東理大、2.横国大、3.産総研)

[18p-B5-6]

量子ジョセフソン電圧標準素子の電流供給方法の提案

○山森 弘毅<sup>1</sup>、松丸 大樹<sup>1</sup>、丸山 道隆<sup>1</sup>、浦野 千春<sup>1</sup>、金子 晋久<sup>1</sup> (1.産総研)

[18p-B5-7]

In/Nbバンプを用いた常温接合に関する研究について

○(M1)石山 照瑛<sup>1,2</sup>、藤野 真久<sup>2</sup>、仲川 博<sup>2</sup>、荒賀 佑樹<sup>2</sup>、菊地 克弥<sup>2</sup>、田井野 徹<sup>1</sup> (1.埼玉大学院、2.産総研)

[18p-B5-8]

3次元実装超伝導デバイスに向けたNbバンプ配置変更による接合荷重均一化

○本間 瑞己<sup>1</sup>、藤野 真久<sup>2</sup>、仲川 博<sup>2</sup>、荒賀 佑樹<sup>2</sup>、菊地 克弥<sup>2</sup>、田井野 徹<sup>1</sup> (1.埼玉大院、2.産総研)

[18p-B5-9]

基板ノイズ低減に向けたSTJ検出器のBuffer層に関する研究

○(M2)中村 雄<sup>1,2</sup>、野口 剛志<sup>1,2</sup>、藤井 剛<sup>1</sup>、志岐 成友<sup>1</sup>、田井野 徹<sup>2</sup> (1.産総研、2.埼玉大)

[18p-B5-10]

ニオブ酸リチウム基板を用いた超伝導検出器MKIDの開発

○(D)伊藤 凌太<sup>1,2</sup>、田井野 徹<sup>3</sup>、美馬 寛<sup>4</sup>、亀井 雄斗<sup>2,5</sup>、大谷 知行<sup>1,2</sup> (1.東北大院理、2.理研RAP、3.埼玉大院理工、4.NICT、5.東北大RCNS)

[18p-B5-11]

アパーチャー付き可視光TESの作成と評価

○(D)小湊 菜央<sup>1,2</sup>、服部 香里<sup>1,3,4</sup>、菊地 貴大<sup>1</sup>、鶴田 哲也<sup>1</sup>、上土井 猛<sup>1,5</sup>、福田 大治<sup>1,4</sup> (1.産総研、2.立教大、3.高エネ研QUP、4.産総研・東大オペランド計測OIL、5.東大工)

---

[18p-B5-12]

Two-level System Loss of SiO<sub>2</sub> Measured at 4 K with Millimeter Superconducting Thin-film Resonators

○Wenlei Shan<sup>1</sup>, Shohei Ezaki<sup>1</sup> (1.NAOJ)

---

[18p-B5-13]

SISミキサ増幅器励起用150 GHz帯ジョセフソンアレイ発振器

○川上 彰<sup>1</sup>、村山 洋佑<sup>2</sup>、鵜澤 佳徳<sup>2,3</sup>、牧瀬 圭正<sup>2,3,4</sup>、増井 翔<sup>2</sup>、小嶋 崇文<sup>2,3</sup>、宮地 晃平<sup>2</sup>、Shan Wenlei<sup>2</sup>、江崎 翔平<sup>2</sup> (1.情通機構、2.国立天文台、3.総研大、4.産総研)

---

[18p-B5-14]

バランスドSISミキサを用いた150 GHz帯ジョセフソンアレイ発振器の特性評価

○村山 洋佑<sup>1</sup>、川上 彰<sup>2</sup>、鵜澤 佳徳<sup>1,3</sup>、Shan Wenlei<sup>1,3</sup>、牧瀬 圭正<sup>1,3,4</sup>、増井 翔<sup>1</sup>、小嶋 崇文<sup>1,3</sup>、宮地 晃平<sup>1</sup>、江崎 翔平<sup>1</sup> (1.国立天文台、2.情通機構、3.総研大、4.産総研)

---

[18p-B5-15]

波長2 μmにおける超伝導ワイドストリップ光子検出器の特性評価

○藪野 正裕<sup>1</sup>、知名 史博<sup>1</sup>、寺井 弘高<sup>1</sup>、三木 茂人<sup>1</sup> (1.情通機構)

---

# 高Q値超伝導共振器を用いた高効率電界共振結合方式無線電力伝送 High Efficiency Electric Resonance Coupling Wireless Power Transfer System Using High Quality Factor Superconducting Resonators

山梨大工<sup>1</sup> ○(M2) 高橋 俊一<sup>1</sup>, 作間 啓太<sup>1</sup>, 關谷 尚人<sup>1</sup>

Yamanashi Univ.<sup>1</sup>, ○Shunichi Takahashi<sup>1</sup>, Keita Sakuma<sup>1</sup>, Naoto Sekiya<sup>1</sup>

E-mail: [g23te015@yamanashi.ac.jp](mailto:g23te015@yamanashi.ac.jp)

## 1. はじめに

電界共振結合方式無線電力伝送(Electric Resonance Coupling Wireless Power Transfer : ERC-WPT)は、電気自動車などへの非接触での給電が注目されているが、伝送距離が短いとされ、伝送効率の改善が課題となっている。ERC-WPTの伝送効率の改善には共振器(コイルと電極板で構成)のQ値向上が必要となる。しかしながら、共振用コイルに銅のコイルを用いた共振器のQ値の向上には限界がある。

これに対して、我々はこれまで困難であった高周波でも低損失を実現できる高周波用超伝導線材を開発し、これを用いたコイルが非常に高Q値(銅コイルの約20倍)となることを明らかにした[1]。そこで、本線材を用いたERC-WPT用高Q値共振器を開発し、これを、ERC-WPTに用いることで伝送効率の大幅な向上を図った。本研究はERC-WPTに超伝導線材を用いた最初の研究である。

## 2. 超伝導コイルを用いた共振器の設計

共振器の設計には3次元電磁界シミュレータ(CST STUDIO)を用いた。図1に設計した共振器の形状を示す。コイルの開放端に電極板を接続しており、コイルのインダクタンスと全体の寄生容量によってLC共振させ、共振器を形成している。

初めに、共振器のQ値に影響する部分として共振用コイル、電極板と共振器を接続するリード線、電極板の3部分に注目し、各部分の材料を超伝導体と銅にそれぞれ変えることで各部分の材料がQ値に与える影響を確認した。その結果、最もQ値に影響するのはコイル部分であり、電極板部分の導電率は共振器のQ値にほぼ影響しないことを明らかにした。そのため共振器は超伝導線材を共振用コイルとリード線に用いて、電極板部分に銅を用いる構成とした。

## 3. 超伝導共振器のQ値とERC-WPTの伝送効率の測定結果

設計をもとに作製した高Q値共振器のQ値の測定値は送電側、受電側それぞれで $Q_1=9253$ ,  $Q_2=11051$ (共振周波数7.2 MHz)となり、これらの相乗平均値は銅の送受電共振器の約13倍であり大幅なQ値の改善を達成した。

また、図2に送受電に銅共振器同士と高Q値超

伝導共振器同士を用いたERC-WPTの伝送距離に対する伝送効率の測定結果を示す。伝送距離100 cmの時の伝送効率は高Q値共振器同士によるものが82%、銅の共振器同士によるものが35%となり、大幅な伝送効率の改善を確認した。

## 4. まとめ

ERC-WPTに用いる高Q値超伝導共振器を開発した。共振器はコイルとリード線部分の損失によるQ値への影響が大きく、この部分に超伝導線材を用いて作製した共振器のQ値は全て銅の共振器の約13倍まで改善した。また、この共振器を用いたERC-WPTの伝送効率は銅共振器を用いた場合に対して大幅に改善し、超伝導線材を用いたERC-WPTの高効率化を実証した。

## 参考文献

- [1] N. Sekiya et al., IEEE Trans. Appl. Supercond., vol. 33, no. 3 (2023)

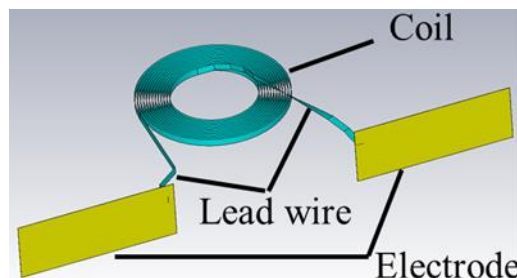


Fig. 1. Resonator structure

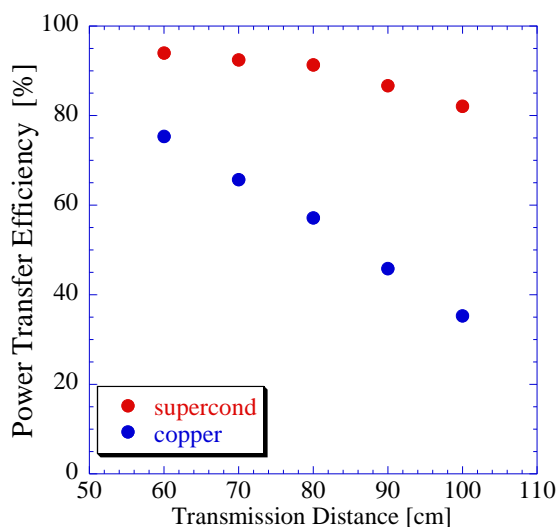


Fig. 2. Measurement result of power transfer efficiency versus transmission distance



# YBCO 薄膜コプレーナ線路のマイクロ波透過特性を用いた 超伝導パラメトリック増幅器の利得評価

## Gain evaluation of a superconducting parametric amplifier using the transmission characteristics of YBCO thin film coplanar waveguides

茨城大学 ○高橋 惟吹, 島影 尚

Ibaraki Univ. ○Ibuki Takahashi, Hisashi Shimakage

E-mail : 23nm648r@vc.ibaraki.ac.jp

### 1. はじめに

金属系超伝導体を用いたパラメトリック増幅器は高い性能を持ち、天文観測や量子コンピュータなどでの利用に向けて精力的に研究が進められているが、動作には極低温環境が必須である。一方、多様な民生機器での利用へ繋げるためには、高温超伝導体の使用が有効であることから、我々は  $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$  (YBCO) を用いたパラメトリック増幅器の研究を行っている。本研究では、YBCO 薄膜で作製したコプレーナ線路 (CPW) の特性評価を通し、期待される YBCO パラメトリック増幅器の利得などの見積もりを報告する。

### 2. $L_k$ の直流電流バイアス依存性

0.5 mm 厚 MgO 基板上に作製した YBCO 製 CPW を用いたマイクロ波伝送特性測定において、直流電流バイアスを流すことによる位相変化からカイネティックインダクタンス ( $L_k$ ) の変化を測定した<sup>(1)</sup>。その結果を Fig.1 に示す。 $L_k$  は(1)式で表されるように電流に対して二次関数的な関係がある。赤線は(1)式を  $L_k(0)$  と  $I_*$  にフィッティングした理論値であり、二次関数的依存性が確認できた。

$$L_k(I) \approx L_k(0) \left[ 1 + \left( \frac{I}{I_*} \right)^2 \right] \quad (1)$$

フィッティング値である  $L_k(0)$  と  $I_*$  は、膜厚 20 nm で 0.425  $\mu\text{H}$ 、3.47 mA、膜厚 50 nm で 0.144  $\mu\text{H}$ 、62.5 mA、膜厚 200 nm で 0.0585  $\mu\text{H}$ 、83.4 mA となった。Fig.2 に、 $L_T$  を磁氣的インダクタンス  $L_m$  と  $L_k$  の和としたときの  $L_k/L_T$  の膜厚依存性と理論値の比較を示す。比較的良い一致が見られた。また、薄膜の臨界電流 ( $I_C$ ) を測定し、その実測値から  $I_*$  と  $I_C$  の関係を評価したところ、 $I_* = 0.67I_C$  となった。

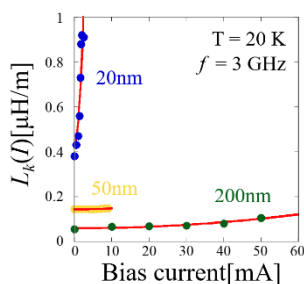


Fig.1 Bias current dependence of kinetic inductance

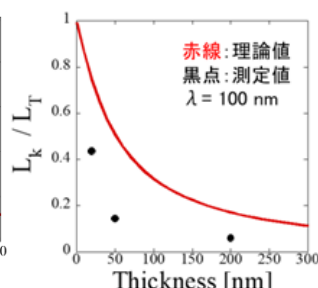


Fig.2 Film thickness dependence of  $L_k/L_T$

### 3. 増幅利得の見積もり

増幅利得  $G_S$  は伝送線路でポンプ波が受ける変調の位相変化量  $\Delta\theta$  に関連しており、以下の式で表すことができる。

$$G_S = 1 + \left( \frac{k_p |I_p|^2 l}{8I_*^2} \right)^2 = 1 + (\Delta\theta)^2 \quad (2)$$

ここで、 $k_p$  はポンプ波の波数、 $I_p$  はポンプ電流、 $l$  は線路長である。膜厚 20 nm の結果から得られた  $I_* = 3.47$  mA を用い、バイアス電流を  $I_p$  に置き換えて、利得の計算を行った。現在の素子形状では 3 mA のバイアス電流をかけた際に、最大で 0.67 dB の利得が得られることが分かった。ただし、20 nm 膜厚 YBCO の臨界電流を計測したところ 3.2 mA であったことに注意すると、現状では、常伝導に転移する直下のバイアス電流がかけられていることに相当し、これは信号波のダイナミックレンジが低いことを意味し、実用的とは言えない。そこで次に、金属系超伝導体で一般的に得られている典型的な増幅度やポンプ電力<sup>(2)</sup>を YBCO を用いて達成するための線路長を見積もった。ここでは、YBCO 線路の線幅は 1  $\mu\text{m}$  と固定した。その結果として、増幅度 20 dB とポンプ電力 -10 dBm<sup>(2)</sup>を達成するためには約 1.4 m の線路長が必要であると見積もることができた。1  $\mu\text{m}$  の線幅の加工が可能であれば、伝送線路は 20 mm 角程度の大きさの基板に収めることは可能と見積もっている。現在、増幅度の線路長に対する依存性を実験的に確認するために、線路長を変化させて実験を進めており、その結果は当日発表する。

### 【謝辞】

本研究の一部は、産業技術総合研究所ナノプロセス施設の支援を受けて実施されました。

### 文献

- (1) 高橋 他、第 71 回応用物理学会春季学術講演会、23p-12N-5(2024 年)
- (2) C. Bockstiegel, et al. Journal of Low Temperature Physics 176 (2014): 476-482.

# 分離型中空構造を用いた超伝導共振器による薄膜評価法に関する研究

## Study on film evaluation by a superconducting resonator

### with separated hollow structure

埼玉大院<sup>1</sup>, 理研 RAP<sup>2</sup>, 東北大理<sup>3</sup>, NICT<sup>4</sup> ○(M2) 中城 悠翔<sup>1,2</sup>, 大谷 知行<sup>2,3</sup>, 亀井 雄斗<sup>2</sup>,

(D) 伊藤 凌太<sup>2,3</sup>, 美馬 覚<sup>4</sup>, 田井野 徹<sup>1,2</sup>

Saitama Univ.<sup>1</sup>, RAP RIKEN<sup>2</sup>, Tohoku Univ.<sup>3</sup>, NICT<sup>4</sup> ○Yuto Nakajo<sup>1,2</sup>, Chiko Otani<sup>2,3</sup>, Yuto Kamai<sup>2</sup>,

Ryota Ito<sup>2,3</sup>, Satoru Mima<sup>4</sup>, Tohru Taino<sup>1,2</sup>

E-mail: [y.nakajo.610@ms.saitama-u.ac.jp](mailto:y.nakajo.610@ms.saitama-u.ac.jp)

近年、力学インダクタンス検出器(Kinetic Inductance Detector: KID)に代表される超伝導共振器の研究が盛んに行われており、より高い共振 Q 値が求められている。我々は、共振 Q 値が制限される要因として超伝導共振器を構成するマイクロストリップライン(MSL)やコプレーナ導波線路(CPW)の信号導体と接地導体の間に介在する基板によって生じる誘電体損失に着目し、損失低減のために 2 枚の基板(共振器チップ、グラウンド(GND)チップ)を貼り合わせて信号導体と接地導体とを中空で隔てた MSL 構造の誘電体フリー超伝導共振器を研究開発している(Fig.1 左) [1]。本研究ではその応用先の一つとして、極低温下での材料評価に着目した。測定対象となる材料を 2 枚の基板間に挟み込み、何も挟んでいない場合の共振特性と比較することで、極低温下での複素誘電率を測定できる。しかし、GND チップの深掘りによって中空を実現している先行研究の構造(Fig.1 左)では基板上の凹部によって材料をうまく挟み込めない。そこで、材料評価に適した GND チップ側に凹部が存在しない新しい構造(Fig.1 右)を提案した。これにより、所望の材料を変形させることなく極低温下における測定が可能となる。液体ヘリウム温度(4.2K)においてポリイミド薄膜を用いて材料評価手法を検証し、実際に薄膜試料を挟み込む前後で周波数領域における信号の透過特性(共振特性)が変化することが確認できた(Fig.2)。詳細は当日報告する。

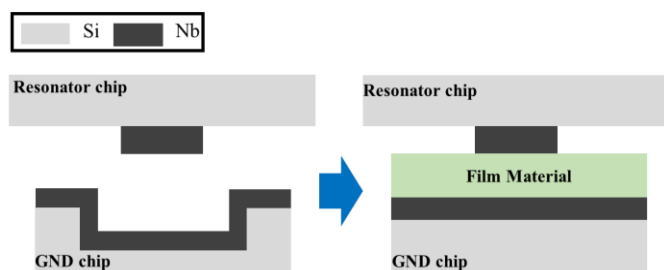


Fig.1 Schematic of the proposed device structure

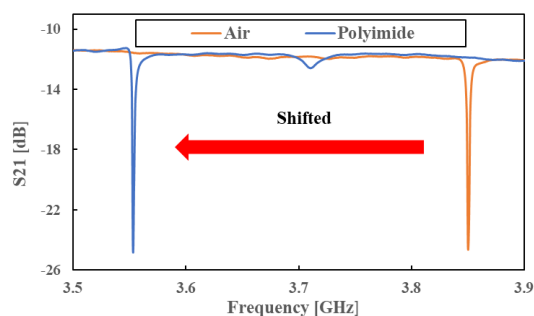


Fig.2 Example of frequency shift of a resonator.

### 参考文献

[1] 村山 亮介ほか, 第 83 回応用物理学会秋季学術講演会 講演予稿集, 21p-A306-7, 2022

謝辞: 本研究の一部は科研費(22K18991, 21K18150, 20H01937, 19H05809)の支援を受けた。

# 超伝導アンテナの広帯域化による耐電力特性向上の検討

## Investigation of Improved Power Handling Capability of Bandwidth Enhancement of Superconducting Antennas

山梨大工<sup>1</sup> ○(M2)武田 航太郎<sup>1</sup>, 作間 啓太<sup>1</sup>, 關谷 尚人<sup>1</sup>

Yamanashi Univ.<sup>1</sup>, ○Kotaro Takeda<sup>1</sup>, Keita Sakuma<sup>1</sup>, Sekiya Naoto<sup>1</sup>

E-mail: [g23te017@yamanashi.ac.jp](mailto:g23te017@yamanashi.ac.jp)

### 1. はじめに

マイクロ波方式ワイヤレス電力伝送では、伝送効率が数%程度と非常に低く、効率の改善が必要である。超伝導パッチアンテナを用いることにより、伝送効率の改善が期待できるが、耐電力特性が非常に低いことから応用が難しい[1]。これは、超伝導アンテナは常伝導アンテナと比べてQ値が高い（狭帯域な）ため、アンテナ端部に電流が強く集中し、その電流が臨界電流密度を超え超伝導状態を保てなくなるためである。電流低減の手法として、超伝導フィルタでは、帯域幅を広げることで共振器に流れる電流の滞在時間が少なくなり電流集中が小さくなることが知られている[2]。アンテナの広帯域化の方法として、アンテナ周辺に共振周波数が近い共振器を配置する方法や、無給電素子を用いる方法などがあるが、今回はフィルタとアンテナを組み合わせることで帯域幅を任意に決め、帯域幅を大きく広げることができるフィルタリングアンテナ（フィルテナ）に着目した。

本研究では、超伝導フィルテナを設計し、超伝導フィルテナに流れる電流値を調べ、電流集中の低減による耐電力特性の向上が可能な検討した。

### 2. 超伝導フィルテナの設計

フィルタの等価回路を図1(a)に、フィルテナの等価回路を図1(b)に示す。フィルテナはフィルタの最終段の共振器と給電線を放射素子に置き換えることで設計できる。超伝導フィルテナは、図2に示すように1層目に共振器部分を、2層目にアンテナ部分を配置した積層構造で設計した。また、耐電力特性を最大にするために共振器とアンテナは正方形形状を用いた。

フィルテナを2段で中心周波数 $f_0$ が5 GHz、帯域幅が100 MHz、帯域内Rippleが0.1 dBの設計条件とし、フィルタ回路合成理論を用いて設計した[3]。超伝導薄膜の導電率は $3 \times 10^{11}$  S/mとし、基板は50 mm角のr-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>（比誘電率9.9、誘電正接 $1 \times 10^{-7}$ 、基板厚0.5 mm）を用いた。設計した超伝導フィルテナを図2に示す。

### 3. 結果

超伝導パッチアンテナと超伝導フィルテナの周波数特性を図3に示す。パッチアンテナの-10 dB帯域幅(8 MHz)よりフィルテナの-10 dB帯域幅(130 MHz)を16倍に広げること成功した。パッチアンテナと、フィルテナ（共振器部分、アンテナ部分）に流れる電流をシミュレーションした結果、フィルテナに流れる電流をパッチアンテナの約1/4に低減できることが明らかとなった。耐電力特性は $P=RI^2$ の関係から2乗倍向上すると考えられ、耐電力特性は13倍に向上すると予想される。

### 4. まとめ

超伝導アンテナの耐電力特性を向上するために帯域幅を広げることのできる超伝導フィルテナの設計を行

った。結果、超伝導アンテナの-10 dB 帯域幅を 16 倍に広げ、超伝導フィルテナに流れる電流が超伝導アンテナに流れる電流の約 1/4 に低減できた。超伝導フィルテナの耐電力が超伝導アンテナの 13 倍と大幅に向上できると予想される。

### 参考文献

- [1] K.Ehata et al., Electronics and Communications in Japan, Part 2, Vol.82, N0.11, pp.59-69, 1999
- [2] 加屋野博幸 et al., 電子情報通信学会論文誌 C, Vol.J90-C, No.3, pp.188-196, 2007
- [3] M.Ohira et al., 2015 International Symposium on Antennas and Propagation (ISAP), pp. 1-4, 2015

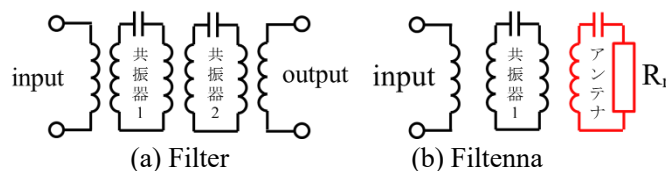


Fig.1 Equivalent circuit of filter and filtenna

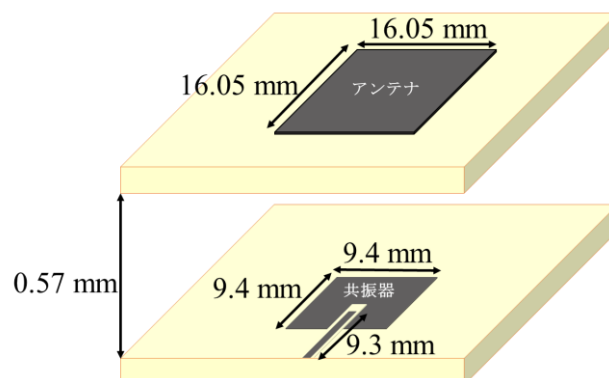


Fig.2 Image of filtenna

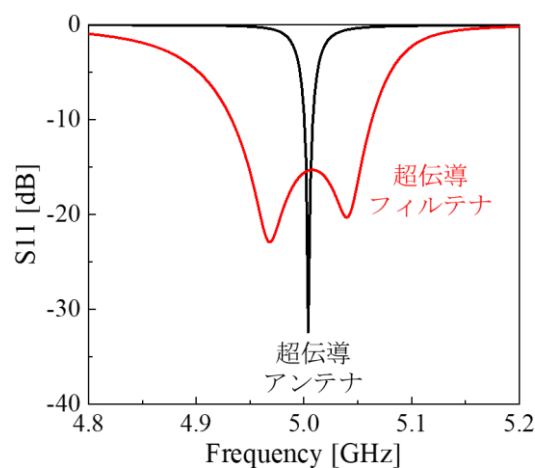


Fig.3 Frequency response of superconducting antenna and superconducting filtenna

# 超伝導細線三端子素子のパルス電流応答シミュレーション

## Simulation of pulse-current responses of a superconducting-nanowire three-terminal device

東理大<sup>1</sup>, 横国大<sup>2</sup>, 産総研<sup>3</sup> °安川 直輝<sup>1</sup>, 山梨裕希<sup>2</sup>, 吉川信行<sup>2</sup>, 西尾 太一郎<sup>1</sup>, 馬渡 康徳<sup>3</sup>

Tokyo Univ. of Science<sup>1</sup>, Yokohama National Univ.<sup>2</sup>, AIST<sup>3</sup>,

°Naoki Yasukawa<sup>1</sup>, Yuki Yamanashi<sup>2</sup>, Nobuyuki Yoshikawa<sup>2</sup>, Taichiro Nishio<sup>1</sup>, and Yasunori Mawatari<sup>3</sup>

E-mail: 1224703@ed.tus.ac.jp

超高速かつ超低損失な超伝導単一磁束量子 (SFQ) 回路と高集積な半導体 (CMOS) 回路を組合せる、超高性能ハイブリッドシステムの実現が待望されている。そこで必要になる2種の回路のインターフェースとして、超伝導細線の超伝導-常伝導転移を利用する三端子素子である nTron[1]が MIT の研究グループにより提案された。我々は、その三端子動作の基礎的な理解を目的として、直流応答シミュレーション[2]やパルス電流をゲートに入力したときのパルス電流三端子動作に関するシミュレーション[3,4]を行い、報告してきた。今回は、SFQ 回路からのパルス波入力を想定し、パルス電流応答のシミュレーションを行ったので報告する。

シミュレーションの基礎となる支配方程式には、時間依存 Ginzburg-Landau (TDGL) 方程式と熱拡散方程式を用いて、有限要素法により数値解析シミュレーションを行った[2]。超伝導状態にある三端子素子にチャネルバイアス電流 ( $I_{bias}$ ) を印加し、ゲート電流 ( $I_g$ ) を入力した時のチャネル電圧 ( $V_{ch}$ ) の応答を調べた。 $I_g$  は一定のゲートバイアス電流に SFQ 回路からのパルス信号を模した矩形波状のパルス波を加えた電流である。

Fig. 1(a) は、 $I_{bias} = 75 \mu A$  としてゲートに量子化磁束ひとつ分程度のパルス波 (波高0.5 mV, 波幅~5 ps) を入力した時の三端子素子の超伝導状態 (青色) 及び常伝導状態 (赤色) の領域の時間変化である。パルス入力によってゲートから磁束が侵入し、チャネルを跨ぐように常伝導領域が生じる。時間の経過とともに一旦は常伝導領域が拡大するが、その後領域は縮小し、50 ps程度で超伝導状態に復帰することを確認した。また Fig. 1(b) は、 $V_{ch}$  の数値計算結果である。時刻  $t = 0$  ps でパルスが入力されたのち、チャネル電圧が発生し、 $t = 18$  psで最大 5.3 mV の電圧が生じた。そこから、30 ps 程度かけてチャネル電圧が減少し、最終的にゼロ電圧状態へ戻る。

本研究は、JSPS 科研費 JP20K05314 の助成及び JST 次世代研究者挑戦的研究プログラム JPMJSP2151 の支援を受けたものです。

[1] A. N. McCaughan and K. K. Berggren, *Nano Lett.* **14**, 5748 (2014).

[2] N. Yasukawa et al., *Supercond. Sci. Technol.* **37**, 065013 (2024).

[3] 安川他、第 84 回応用物理学会秋季学術講演会 21p-B204-8 (2023).

[4] N. Yasukawa et al., The 36<sup>th</sup> International Symposium on Superconductivity (ISS 2023) ED-3-4.

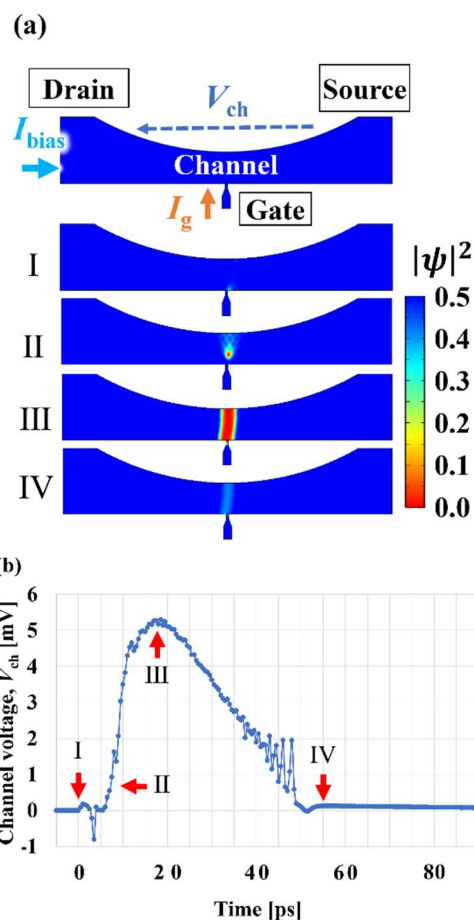


Fig. 1. (a) Evolution of the superconducting region (blue) and the normal region (red) in the nTron. (b) Channel voltage characteristics of the nTron.



## 量子ジョセフソン電圧標準素子の電流供給方法の提案

Novel way of a current supply for Quantum Josephson Voltage Standards.

産総研 ○山森弘毅, 松丸大樹, 丸山道隆, 浦野千春, 金子晋久

AIST ○H.Yamamori, D.Matsumaru, M.Maruyama, C.Urano, N.H.Kaneko

E-mail: h.yamamori@aist.go.jp

電圧標準素子は交流ジョセフソン効果  $V = \frac{h}{2e} f$  により得られるシャピロステップを利用し、2のべき乗個のジョセフソン接合を直列に多数個並べて D/A 変換を実現している。接合アレーはチップ内で**何度も折り曲げて実装**される。超伝導電流はロンドン侵入長の範囲で超伝導体の周辺部を流れるが、曲げた配線の**内周部に電流が集中**する[1]。NbN ジョセフソン接合は、ジョセフソン侵入長が約  $0.5 \mu\text{m}$  と接合の直径  $3.4 \mu\text{m}$  よりも短いため、配線のコーナーの電流の偏りの影響を受けて**見かけの臨界電流が減少**する。これは磁場トラップによる臨界電流の減少と見かけ上区別が付きにくい、磁場トラップと異なり温度上昇によるデトラップでは回復せず、**磁場トラップと同様にシャピロステップの幅を減少**させ D/A 変換のマージンを減少させる。

この電流集中を防ぐために、電流集中部の膜厚を増やす[1]、内周部をギザギザにして外周部と物理的な長さを等しくする[2]などの提案があった。我々は、これらよりも効果が大きく実現が容易な方法を提案する。**バイアス電流よりも大きな臨界電流を有する接合を電流集中部に配置**することで、この接合には配線の電流集中が影響するが、臨界電流が回路を流れる電流よりも十分大きい、ため超伝導配線として機能し、接合アレーには配線の曲がりによる電流集中の影響を防ぐ効果があることを数値シミュレーション（図1）で確認し、動作マージンが大幅に改善することを実験で確認した。（図2）

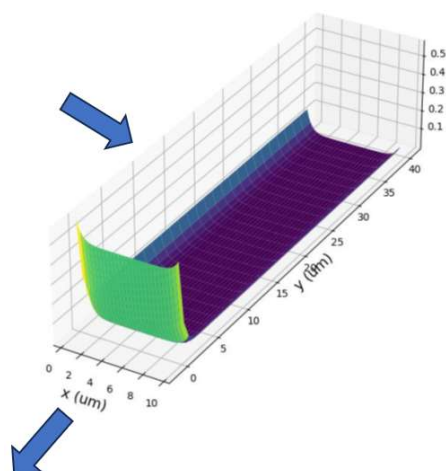


図1、長いジョセフソン接合の電流分布の計算結果、サイズ  $10 \mu\text{m} \times 40 \mu\text{m}$

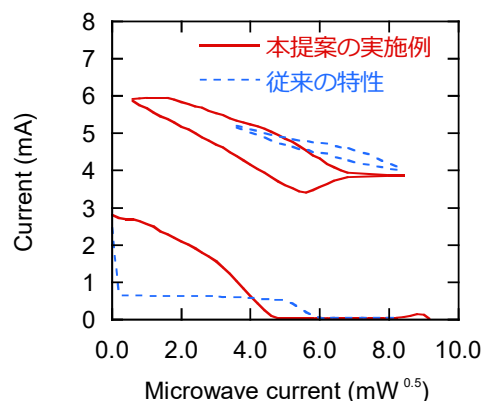


図2 本手法の実験結果  
1024 接合アレーのシャピロステップ

1. J.M. Xiong at al., SuST, **35**, p.055015 (2022).
2. H. Kim at al., IEEE TMTT, **57**, pp.442-448 (2009).

本研究は、国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構（NEDO）の委託事業「JPNP19005」で得られた成果に基づいています。



## In/Nb バンプを用いた常温接合に関する研究について

### Room temperature bonding with In/Nb bumps

埼玉大学<sup>1</sup>, 産総研<sup>2</sup> ○(M1) 石山 照瑛<sup>1,2</sup>, 藤野 真久<sup>2</sup>, 仲川 博<sup>2</sup>, 荒賀 佑樹<sup>2</sup>,

菊地 克弥<sup>2</sup>, 田井野 徹<sup>2</sup>,

Saitama Univ.<sup>1</sup>, AIST.<sup>2</sup>, °S. Ishiyama<sup>1,2</sup>, M. Fujino<sup>2</sup>, H. Nakagawa<sup>2</sup>, Y. Araga<sup>2</sup>,

K. Kikuchi<sup>2</sup>, and T. Taino<sup>1</sup>

E-mail: s.ishiyama.793@ms.saitama-u.ac.jp

**背景:** 近年、高感度センサや量子ビットなどの超伝導デバイスが注目を集めている。これら超伝導デバイスはアレイ化により性能の向上が可能で、そのアレイ化手法として三次元実装構造を有するデバイス技術について精力的に研究が行われている。三次元実装方法の一つ、フリップチップ実装は、超伝導デバイスが集約された基板と、配線が集約された基板を対面させ、電極間をバンプと呼ばれる微小な垂直配線によって直接接触させ接合する方法である。一般的にフリップチップ実装は、熱圧着によって接合されるが、超伝導デバイスは熱に弱い。そこで本研究では、表面活性化接合(Surface Activated Bonding: SAB)[1]を用いた接合に着目した。SAB は常温で接合が可能であり、また同種の物質だけでなく、異種材料同士の直接接合も可能である。これまでに、SAB による 200  $\mu\text{m}$  径の Nb バンプの直接接合に成功している[2]。しかし、チップ内のバンプの高さのばらつきなどが原因で、一部の箇所では接合が不十分であった。そこで本研究では、高さばらつきを解消する手法として In に着目し、Nb と In/Nb バンプの直接接合を目的とした。

**実験:** まず 12 mm 角の下側チップと 10 mm 角の上側チップを用意し、50  $\mu\text{m}$  径のバンプを 2809 個配置した。下側チップのバンプには Nb の単層、上側チップには Nb の単層の上に In が蒸着されている。高真空環境下で Ar ガス 0.14 Pa の条件で 5 分 FAB を照射した後、3000 N の加圧を 5 分行った。接合後の素子は 4K 冷凍機を用いて、超伝導転移温度( $T_c$ )と極低温下での電流電圧( $I$ - $V$ )特性を測定した。

**結果:** 図 1 に SAB による直接接合後の  $R$ - $T$  特性を示す。同図において、全バンプを介したデイジーチェーン (バンプ数 2809 個) の超伝導特性が得られて、 $T_c$  は約 9.05 K であった。また  $I$ - $V$  特性では、サンプル中央のデイジーチェーンにおいて 27 mA 以上の超伝導電流が確認されたが、サンプル左端および右端のデイジーチェーンでは、それぞれ 1 mA、0.5 mA の臨界電流が確認された。これは、左端、右端のチェーンで接合不良があることを示唆している。詳細は発表当日に報告する

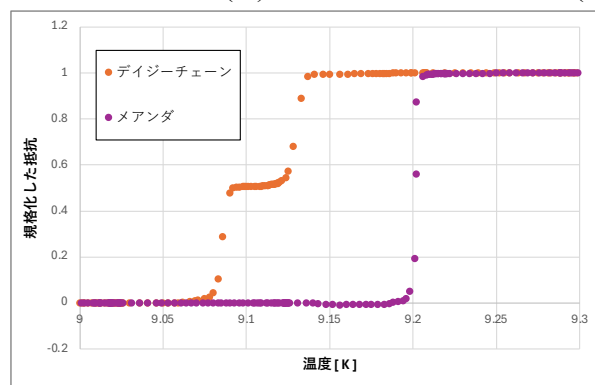


図 1 超伝導転移温度付近の立ち上がりの比較

[1] T. Suga, et. al., Acta metal. Mater., Vol.40, Suppl., pp.S133-S137, 1992.

[2] M. Fujino et. al., J. Appl. Phys., 133, 2023.

### 3次元実装超伝導デバイスに向けた Nb バンプ配置変更による接合荷重均一化

#### Uniformity of Bonding Load by Modifying Nb Bump Arrangement for 3D Mounted Superconductor Devices

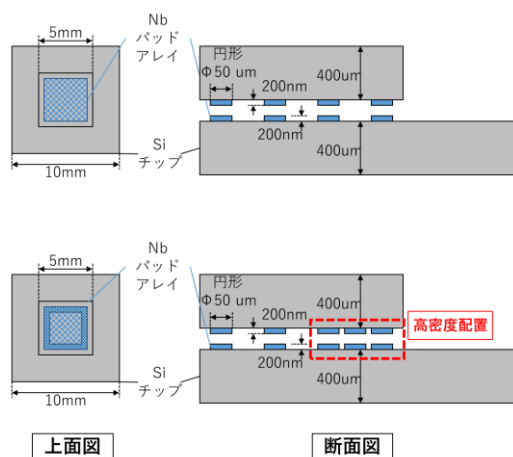
埼玉大院<sup>1</sup>, 産総研<sup>2</sup> °本間 瑞己<sup>1</sup>, 藤野 真久<sup>2</sup>, 仲川 博<sup>2</sup>, 荒賀 佑樹<sup>2</sup>,  
菊地 克弥<sup>2</sup>, 田井野 徹<sup>1</sup>

Saitama Univ.<sup>1</sup>, AIST<sup>2</sup>, °M. Homma<sup>1</sup>, M. Fujino<sup>2</sup>, H. Nakagawa<sup>2</sup>, Y. Araga<sup>2</sup>,  
K. Kikuchi<sup>2</sup>, and T. Taino<sup>2</sup>

E-mail: m.homma.819@ms.saitama-u.ac.jp

近年、超伝導トンネル接合検出器や量子ビットなどの超伝導デバイスが注目を集めている。これらのデバイスはアレイ化による性能向上が可能な反面、アレイ数増加に伴い、高集積率の実現が困難である。その解決方法として、超伝導デバイスと配線を別の基板に作製した3次元実装が挙げられる。3次元実装方法には様々な手法があるが、ここではフリップチップ実装(Flip chip bonding; FCB)に注目する。FCBはバンプと呼ばれる微小な垂直配線によって上下の基板同士を機械的・電氣的に接続する手法である。上基板を反転しバンプ同士を接触させ、熱および圧力を加えることにより接合する。ここで、上基板端部に配置されたバンプは強固に接合されるが、中央部では接合強度が弱くなることが報告されている[1]。この接合不均一性は、加圧接合時に大きい基板にかかる荷重応力の余剰分が小さい基板端部への接合荷重集中が原因である[2]。熱圧着法によるFCBにおいては、チップ周辺部分にバンプを高密度配置し、接合荷重を分散することで接合不均一性を抑えることができると報告した。[3]

本研究では、接合方法を熱圧着法から表面活性化接合 (Surface Activated Bonding; SAB)に変更し、バンプ配置の工夫による接合不均一性の問題解決を図る。均等配置パターンと応力均一化配置パターンの2種類設計した。均等配置パターンは、等間隔でバンプを配置した。応力均一化配置パターンは、中央部では均等配置パターンと同じ間隔でバンプを設置し、周辺部にさらに狭いピッチでバンプを配置した。図2にパターンの概略図を示す。設計したパターンで作製した上下基板をSAB装置で接合し、ダイジェンチェーンによる常温抵抗測定評価、低温超伝導特性評価を行った。本講演では接合荷重ごとのそれぞれのパターンにおける試験の詳細について報告する。



[1] 後藤 他, 第25回エレクトロニクス実装学会春季講演大会講演論文集, 8C-04, p58-60 (2011).

[2] 平 他, 第24回エレクトロニクス実装学会春季講演大会講演論文集, 11C-17, p180-181 (2010).

[3] 本間 他, 第84回応用物理学会秋季学術講演会講演予稿集, 21p-B204-5, (2023).

## 基板ノイズ低減に向けた STJ 検出器の Buffer 層に関する研究

### Study on Buffer Layer of STJ Detector for Substrate Noise Reduction

産総研<sup>1</sup>, 埼玉大<sup>2</sup> ○(M2)中村 雄<sup>1,2</sup>, 野口 剛志<sup>1,2</sup>, 藤井 剛<sup>1</sup>, 志岐 成友<sup>1</sup>, 田井野 徹<sup>2</sup>

AIST<sup>1</sup>, Saitama Univ<sup>2</sup>, °Y.Nakamura<sup>1,2</sup>, T.Noguchi<sup>1,2</sup>, G.Fujii<sup>1</sup>, S.Shiki<sup>1</sup>, T.Taino<sup>2</sup>

E-mail: y.nakamura.311@ms.saitama-u.ac.jp

材料分析の手法の一つである X 線分光分析は、分析対象から発生する特性 X 線のエネルギーを検出器で測定することで、分析対象に含まれる元素を同定する手法である。現在の X 線分光分析には、主として半導体検出器(SDD)が用いられるが、SDD は軽元素の特性 X 線に対する分解能が 48 eV@525 eV[1]程度であり、次世代半導体である SiC や GaN などの開発に必要な微量軽元素の分析には不十分である。一方で、超伝導トンネル接合検出器 (STJ : Superconducting Tunnel Junction Detector)は 10 eV@525eV[2]と高いエネルギー分解能を実現している。しかし、スペクトル上で広帯域に広がるノイズが様々な材料分析で障害となっている。我々は、このノイズ原因の一つである基板から伝播するフォノン由来の基板ノイズに着目した。これまでに、その解決策として STJ と基板の間に酸化膜などの Buffer 層を配置することで、基板ノイズの低減が可能であることが報告されている[3]。しかし、酸化膜 Buffer 層を用いた場合でも、約 400eV 以下の領域では基板ノイズの影響を受けているため、さらなる微量軽元素分析の実現には基板ノイズのより一層の軽減が重要となる。そこで、我々は Buffer 層の最適化を目指し、Buffer 材料と構造の探索を行った。

1 つのチップ上に STJ の動作温度である 0.3K 下で常伝導を示す Au 単層、Pd 単層、Au を多層化した Buffer 層を有する STJ、および Buffer 層を持たない STJ を作製した。Al-K $\alpha$  を用いて、Buffer 材料および構造がもたらす基板ノイズへの影響を評価した。Fig.1 に各 Buffer 層を有する STJ を使用して測定した X 線スペクトルを示す。1000eV 以下の領域において、Pd の Buffer 層が高いノイズ低減効果を示すことが分かった。詳細については当日報告する。

謝辞: 本研究(の一部)は、文部科学省「マテリアル先端リサーチインフラ」事業(課題番号 JMPXP1222AT5008)の支援を受けた。

#### 参考文献:

- [1] D. M. Schlosser et al., Nucl. Inst. Meth. Phys. Res. A624, pp.270-276, 2010.
- [2] G. Fujii et al., X-Ray Spec., 46, pp.325-329, 2017.
- [3] H. Sato et al., IEEE Trans. Appl. Super., Vol. 9, No. 2, pp. 4475-4478, June 1999.

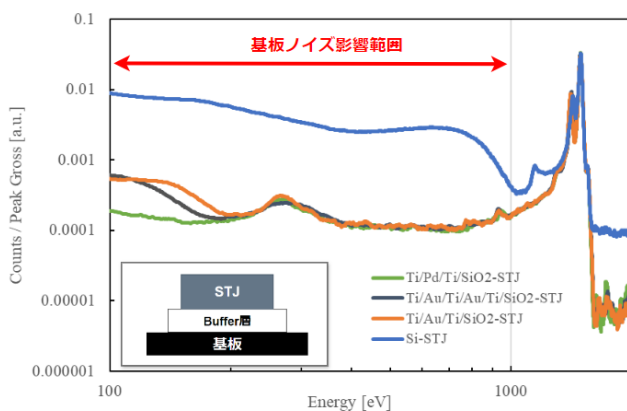


Fig 1. X-ray Spectrum (Al-K $\alpha$ )

## ニオブ酸リチウム基板を用いた超伝導検出器 MKID の開発

### Development of Microwave Kinetic Inductance Detector with Lithium Niobate substrate

東北大院理<sup>1</sup>, 理研 RAP<sup>2</sup>, 埼玉大院理工<sup>3</sup>, NICT<sup>4</sup>, 東北大 RCNS<sup>5</sup>

○(D)伊藤 凌太<sup>1,2</sup>, 田井野 徹<sup>3</sup>, 美馬 寛<sup>4</sup>, 亀井 雄斗<sup>2,5</sup>, 大谷 知行<sup>1,2</sup>

Tohoku Univ.<sup>1</sup>, RAP, RIKEN<sup>2</sup>, Saitama Univ.<sup>3</sup>, NICT<sup>4</sup>, RCNS, Tohoku Univ.<sup>5</sup>

○(D)Ryota Ito<sup>1,2</sup>, Tohru Taino<sup>3</sup>, Satoru Mima<sup>4</sup>, Yuto Kamei<sup>2,5</sup> and Chiko Otani<sup>1,2</sup>

E-mail: ito.ryota.t1@dc.tohoku.ac.jp

**背景**: マイクロ波力学インダクタンス検出器(Microwave Kinetic Inductance Detector:MKID)[1]は, 作製が比較的容易であり, 周波数領域における多重読み取りが可能なことから大規模アレイ化に適した超伝導検出器である. シリコンやサファイア( $\text{Al}_2\text{O}_3$ )といった誘電体基板上に超伝導体材料を堆積させた構造であり, マイクロ波帯の読み出し線と共振器で構成される. 入射したエネルギー量子によるクーパ対の解離を力学インダクタンスの変化, すなわちマイクロ波信号の透過特性の変化として検出する. 暗黒物質探索の素粒子実験等に向けて基板吸収型の超伝導検出器が提案されており, これは基板に入射した粒子線や電磁波によって生成されたフォノンを, 超伝導体で検出してエネルギーを測定する. 先行研究[2]では, 基板部材に Z カットのニオブ酸リチウム( $\text{LiNbO}_3$ :LN)を使用した基板吸収型超伝導トンネル接合素子において, フォノンの電極吸収イベント波高値が従来の  $\text{Al}_2\text{O}_3$  基板と比較して約 2 倍となった. そこで本研究では, フォノン収集効率の向上が見込める LN 基板を MKID へ応用することを目的とした. LN 基板上への MKID 作製技術の研究開発と作製した MKID の特性評価を実施した.

**実験**: 本研究では, (株)オキサイドから購入した Z カットストイキオ LN(Stoichiometric LN:SLN,  $\square 10\text{ mm} \times 500\text{ }\mu\text{mt}$ )基板を使用した. DC マグネトロンスパッタリングによって超伝導体材料 Nb を堆積させ, マスクレス露光装置によるマスクデザインのパターンニングを行った. MKID の伝送線路構造はマイクロストリップ型として, 読み出し線に 3 つの  $\lambda/2$  共振器を容量結合させている(Fig.1). LHe を充填したオープンデュワー(4.2 K)や  $^3\text{He}/^4\text{He}$  希釈冷凍機( $\sim 150\text{ mK}$ )に作製した MKID を搭載して冷却し, ベクトルネットワークアナライザを用いてマイクロ波の透過特性測定を行った. 測定結果から, 超伝導体 Nb の  $\lambda/2$  共振器由来の共振ピークが確認され, LN 基板 MKID の開発に向けた指針が得られた. 作製や特性評価結果の詳細については当日報告する.

**謝辞**: 本研究は理化学研究所の大学院生リサーチ・アソシエイト(JRA)制度の下での成果である.

また, 本研究の一部は科研費(22K18991, 21K18150, 20H01937, 19H05809)の支援を受けた.

**参考文献**: [1]P. K. Day, *et al.*, Nature, 425, 817, 2003 [2]T. Taino, *et al.*, IEEE Trans. Appl. Supercond., 15, 2, 2005

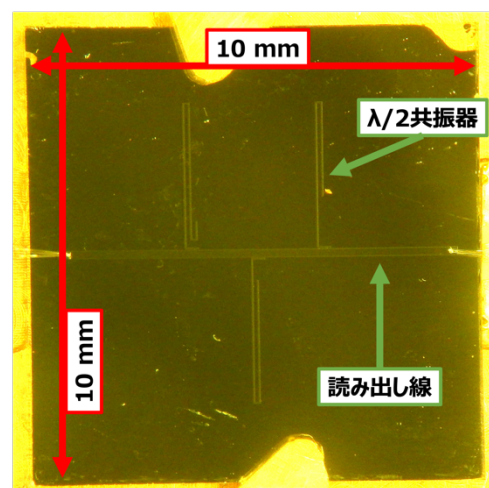


Fig.1 Appearance of the fabricated device on Lithium Niobate substrate.



## アパーチャー付き可視光 TES の作成と評価

### Process and measurement of Optical Transition-Edge Sensors with Apertures

産総研<sup>1</sup>, 立教大<sup>2</sup>, 高エネ研 QUP<sup>3</sup>, 産総研・東大オペランド計測 OIL<sup>4</sup>, 東大工<sup>5</sup>

○(D)小湊 菜央<sup>1,2</sup>, 服部 香里<sup>1,3,4</sup>, 菊地貴大<sup>1</sup>, 鶴田哲也<sup>1</sup>, 上土井猛<sup>1,5</sup>, 福田 大治<sup>1,4</sup>

AIST<sup>1</sup>, Rikkyo Univ.<sup>2</sup>, KEK QUP<sup>3</sup>, OPERAND-OIL<sup>4</sup>, UTokyo<sup>5</sup>

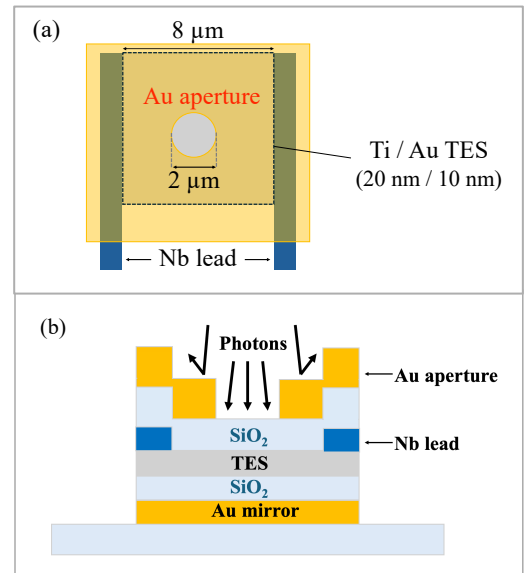
○Nao Kominato<sup>1,2</sup>, Kaori Hattori<sup>1,3,4</sup>, Takahiro Kikuchi<sup>1</sup>, Tetsuya Tsuruta<sup>1</sup>,  
Daiji Fukuda<sup>1,4</sup>

E-mail: kominato.nao@aist.go.jp

超伝導転移端センサー (Transition-Edge Sensor: TES) は、超伝導物質が超伝導状態から常伝導状態に遷移する際の急激な抵抗変化を利用した、優れたエネルギー分解能をもつ温度センサーである。TES を温度計として用いたマイクロカロリメータは幅広い波長の光を精密に分光することができ、その中でも可視光 TES は量子計算、蛍光分析、天体観測などの様々な分野で使用されている。可視光 TES は、高いエネルギー分解能、幅広い観測波長、高い検出効率などが報告される一方で、入射光子のエネルギーに依存した複雑な応答スペクトルが観察されたり、エネルギー散逸による低エネルギー側に広がるスペクトル成分が存在する、などの現象が報告されている[1]。これらの現象は、光子が電極やミラーなどの TES 以外の場所に入射することで生じている可能性が考えられる。そこで、本研究では、TES の上に金のアパーチャーを設置し、TES 中心部以外に光子が当たらないようにすることで、光の入射位置の違いによる性能への影響を調査する。本研究で作成した TES の外観図を図1に示す。

この構造では、直径  $2\ \mu\text{m}$  の穴が空いた金のアパーチャーを TES と配線の上に被せた。アパーチャーの上に入射した光子はほぼ全て反射され、TES 中心部の上にある穴の部分に入射した光子のみが TES で測定される。さらに、配線だけを覆う形のアパーチャーや、配線と TES の外縁部のみを覆う形のアパーチャーも作成し、光子の入射位置を様々に変えて信号の波形を比較する。

また、TES の下の層に設置される金ミラーの有無によっても、信号の波形に変化が現れるか調査する。発表では、アパーチャーや金ミラーが信号の波形に与える影響について詳しく報告する。



[1] K. Hattori et al., "Optical Transition-Edge Sensors: Dependence of System Detection Efficiency on Wavelength," in IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, vol. 68, no. 6, pp. 2253-2259, June 2019.

図1 アパーチャー付き TES の外観図  
(a) TES とアパーチャーを上から見た形  
(b)アパーチャー付き TES を横から見た構造



# 4 Kでのミリ波超伝導薄膜共振器を用いたアモルファス SiO<sub>2</sub> の2準位系損失の測定

## Two-level System Loss of SiO<sub>2</sub> Measured at 4 K with Millimeter Superconducting Thin-film Resonators

国立天文台<sup>1</sup>, ○単 文磊<sup>1</sup>, 江崎 翔平<sup>1</sup>

NAOJ<sup>1</sup>, Wenlei Shan<sup>1</sup>, Shohei Ezaki<sup>1</sup>

E-mail: wenlei.shan@nao.ac.jp

Two-level system (TLS) loss inherited in amorphous dielectric materials have been intensively investigated at millikelvin temperatures for its importance in limiting the performance of superconducting qubit devices and incoherent detectors based on superconducting resonators. In contrast, the experimental evidence of TLS loss in superconducting transmission lines at liquid helium temperatures and its relative significance with respect to other losses are not fully revealed. We investigated the loss of amorphous SiO<sub>2</sub> at liquid helium temperatures in a frequency range of 130-170 GHz by measuring Q factors of niobium microstrip and coplanar waveguide resonators. The measured losses show remarkable power and frequency-dependence, which is consistent with that modeled by TLS with a weak-field loss of about  $3\text{-}7 \times 10^{-3}$  depending on fabrication methods. The TLS loss and the quasiparticle loss exchanges the leading role at about 4 K in the measured frequency range, and this relationship is expected to hold in sub-millimeter wavelengths as well.

This work is partially supported by KAKENHI under Grant Number 23K20871.

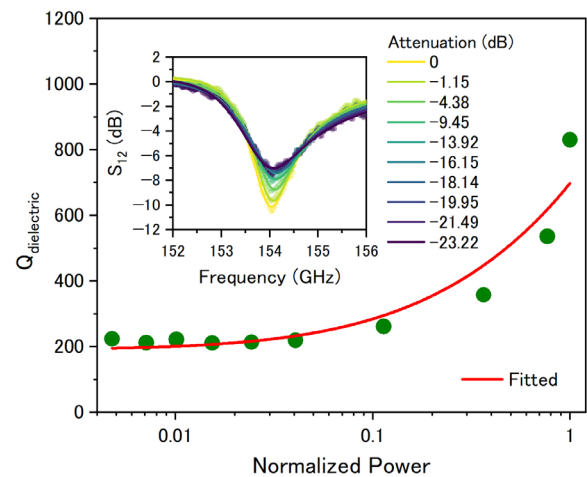


Fig. 1. Dielectric Q of SiO<sub>2</sub> measured as a function of signal power with a microstrip resonator under an ambient temperature of 3.3 K. The SiO<sub>2</sub>, as the dielectric layer of microstrip line, was fabricated with PECVD. The signal power is normalized by the maximum output power of the signal source, which is about 3  $\mu$ W. The fit was carried out by using the TLS model:

$$Q^{-1}(T, \omega, P) = Q_0^{-1}(\omega) \frac{\tanh \frac{\hbar \omega}{2k_B T}}{\sqrt{1 + \frac{P}{P_c}}}$$

$Q_0$  is the low-power quality factor at 0 K.  $P_c$  is TLS saturation power.  $T$  and  $\omega$  are ambient temperature and angular frequency respectively. The inset shows the resonance curves measured at various signal attenuation.

# SIS ミキサ増幅器励起用 150 GHz 帯ジョセフソンアレイ発振器

## 150 GHz Josephson array oscillator for SIS-mixer-based amplifier

情通機構<sup>1</sup>, 国立天文台<sup>2</sup>, 総研大<sup>3</sup>, 産総研<sup>4</sup> ○川上 彰<sup>1</sup>, 村山洋佑<sup>2</sup>, 鶴澤佳徳<sup>2,3,4</sup>, 増井 翔<sup>2</sup>, 小嶋崇文<sup>2,3</sup>, 宮地晃平<sup>2</sup>, Shan Wenlei<sup>2</sup>, 江崎翔平<sup>2</sup>

NICT<sup>1</sup>, NAOJ<sup>2</sup>, SOKENDAI<sup>3</sup>, AIST<sup>4</sup> ○A. Kawakami<sup>1</sup>, Y. Murayama<sup>2</sup>, Y. Uzawa<sup>2,3</sup>, K. Makise<sup>2,3,4</sup>, S. Masui<sup>2</sup>, T. Kojima<sup>2,3</sup>, A. Miyachi<sup>2</sup>, W. Shan<sup>2</sup>, S. Ezaki<sup>2</sup>

E-mail: [kawakami@nict.go.jp](mailto:kawakami@nict.go.jp)

超伝導 SIS ミキサを用いたマイクロ波増幅器は、超伝導量子ビットにおける情報の読出し、サブミリ波帯ヘテロダイン受信機用 IF 増幅器など、小型で低雑音・低消費電力の増幅器として期待されている。同増幅器は二つの SIS ミキサの周波数変換利得を利用した増幅器であるが、ミキサ動作に必要なミリ波帯局部発振源にジョセフソン発振器を導入することで、将来の集積化に有効な優れた低消費電力を実現できる。そこで我々はミリ波帯ジョセフソンアレイ発振器の検討を行っており、今回、同発振器の発振出力・線幅、雑音特性など性能評価を実施する目的で、既に国立天文台にて開発済みの 150 GHz 帯バランスド SIS ミキサの利用を想定した 150 GHz 帯ジョセフソンアレイ発振器を新たに設計・試作、その特性評価を行ったので報告する。

既に報告している 100 GHz 帯ジョセフソンアレイ発振器 [1]と比較して、RLCSJ 接合部での共振周波数を若干高く設定できることから、寄生インダクタンス  $L_S$  の低減が可能となり、これにより発振出力低減の一要因であったパラメトリック発振の抑圧が期待できる。また発振器を構成する Nb/AlOx/Nb-SIS 接合の電流密度を上げることで ( $J_C=1.1 \rightarrow 2.5$  kA/cm<sup>2</sup>)、ジョセフソン接合数 11 個で目標の 1μW 程度の発振出力が期待できることが分かった。接合数の低減は、消費電力及び発振器寸法の低減につながる。

図 1 に、試作した 150 GHz 帯ジョセフソンアレイ発振器の顕微鏡写真を示す。発振器寸法は接合数低減の効果として  $1 \times 0.5$  mm<sup>2</sup> 程度まで小型化出来た。図 2(a)に同発振器の I-V 特性を示す。発振器 I-V 特性上の 305 μV 付近に明確な電流ステップが観測できる。これは AC ジョセフソン効果による振動電流と発振器を構成する  $\lambda/2$  マイクロストリップ共振器との結合により生じており、設計周波数 150 GHz とほぼ一致している。この電流ステップ内に定電流バイアスすることで、ジョセフソンアレイ発振器からの出力を得ることができる。発振出力は、特性インピーダンス 35 Ω の Nb マイクロストリップ線路(MSL)内に配置した高周波電流評価用検出器(以下検出器)を通過、同様の特性インピーダンスを有する銅(Cu)MSL 整合負荷に伝達、消費される。発振器バイアス on/off 時の検出器 I-V 特性を図 2(b)に示す。同特性から 305 μV の整数倍毎に明瞭なシャピロステップを観測できる。この特性を RLCSJ モデルと比較することで、検出器を通過する高周波電流を決定し、整合負荷インピーダンス (35 Ω) から発振出力を導出したところ、149 GHz において発振出力 0.44 μW が得られた。当日、ジョセフソンアレイ発振器の設計手法、特性評価など詳細を報告する。

【謝辞】本研究は JST ムーンショット型研究開発事業 (JPMJMS2067)の支援を受けて実施された。本研究は JSPS 科研費 JP22H04955 の助成を受けている。

【参考文献】 [1]第 70 回応用物理学会春季学術講演会 17a-D221-3 (2023).

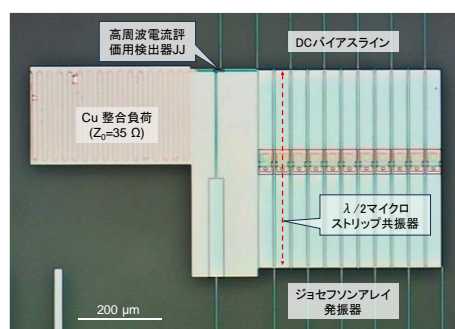
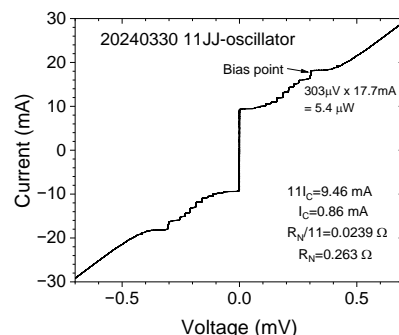
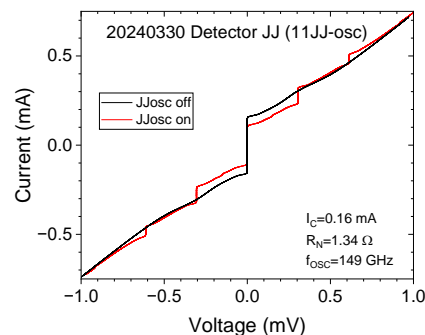


図 1 発振出力評価用 150GHz 帯ジョセフソンアレイ発振器の顕微鏡写真



(a) 発振器の I-V 特性



(b) 検出器で観測されたシャピロステップ

図 2 発振器および検出器の電流-電圧特性

# バランスド SIS ミキサを用いた 150 GHz 帯ジョセフソンアレイ発振器の特性評価

## Evaluation of a 150 GHz Josephson Array Oscillator Using Balanced SIS Mixers

国立天文台<sup>1</sup>, 情通機構<sup>2</sup>, 総研大<sup>3</sup>, 産総研<sup>4</sup> ○村山洋佑<sup>1</sup>, 川上 彰<sup>2</sup>, 鶴澤佳徳<sup>1,3</sup>, Shan Wenlei<sup>1,3</sup>, 牧瀬圭正<sup>1,3,4</sup>, 増井 翔<sup>1</sup>, 小嶋崇文<sup>1,3</sup>, 宮地晃平<sup>1</sup>, 江崎翔平<sup>1</sup>  
NAOJ<sup>1</sup>, NICT<sup>2</sup>, SOKENDAI<sup>3</sup>, AIST<sup>4</sup> ○Y. Murayama<sup>1</sup>, A. Kawakami<sup>2</sup>, Y. Uzawa<sup>1,3</sup>, W. Shan<sup>1</sup>, K. Makise<sup>1,3,4</sup>, S. Masui<sup>1</sup>, T. Kojima<sup>1,3</sup>, A. Miyachi<sup>1</sup>, S. Ezaki<sup>1</sup>

E-mail: [yosuke.murayama@nao.ac.jp](mailto:yosuke.murayama@nao.ac.jp)

我々は SIS ミキサを用いた低雑音・低消費電力のマイクロ波増幅器(SIS ミキサ増幅器)の開発を行っている。SIS ミキサ増幅器は、大規模超伝導量子コンピュータの読み出し増幅器や電波天文学の多画素ヘテロダイン受信機などへの応用が期待される。本増幅器は二つの SIS ミキサと一つの局部発振器(LO)で構成されるが、それらを一チップ上に収めるための前段試験として、各要素の特性評価を進めている。LO 源の候補として設計・試作した 150 GHz 帯ジョセフソンアレイ発振器は、同一チップ上に配置した SIS 検出器での測定により、良好な発振出力を持つことが確認された。今回、同発振器の発振出力、線幅、雑音特性など性能評価のため、国立天文台で開発した 150 GHz 帯バランスド SIS ミキサの LO 源として同発振器を用いた特性評価を行ったので報告する。

本測定では、導波管回路を介してジョセフソンアレイ発振器からのミリ波 LO 信号を SIS ミキサブロックへと導入する。LO 信号はホーンから導入される RF 信号とハイブリッドカップラにより結合され、SIS ミキサにて IF 信号として周波数変換されて出力される。Fig. 1 に発振器のバイアスオン/オフ時の SIS ミキサ I-V 特性を示す。LO 照射に伴う明瞭なフォトンアシストトンネルが観測でき、SIS ミキサを励起させるのに十分な LO パワーが供給されていることを確認した。LO 雑音を見積もるため、LO 周波数 146.7 GHz でホーンより 298 K および 77 K の熱放射を導入して IF 出力を得た(Fig. 1, 赤線および青線)。このとき、バランスドミキサを構成する二つの SIS ミキサに対し、同極性および逆極性にバイアスをかけた場合、それぞれで得られる IF 出力から LO 雑音温度を計算すると  $4.2 \pm 1.9$  K となった。LO 雑音と併せて導出できる LO 雑音抑圧度 LNR > 25 dB より、LO の超過雑音を与える受信機雑音 (数 10 K) への影響は非常に小さいことがわかった。

Fig. 2 は信号発生器から 9 逓倍してホーンより導入した 139 GHz の RF 信号と混合させて得られた IF 信号のスペクトルである。RF 信号は線幅が非常に細いため、このスペクトルの形は LO 信号の線幅とスペクトルアナライザの分解能帯域幅(RBW)により決まる。その半値幅は 500 kHz と得られた。当日は、測定系や雑音導出方法、I-V 特性より見積もられたジョセフソンアレイ発振器の発振出力など詳細を報告する。

Fig. 2 は信号発生器から 9 逓倍してホーンより導入した 139 GHz の RF 信号と混合させて得られた IF 信号のスペクトルである。RF 信号は線幅が非常に細いため、このスペクトルの形は LO 信号の線幅とスペクトルアナライザの分解能帯域幅(RBW)により決まる。その半値幅は 500 kHz と得られた。当日は、測定系や雑音導出方法、I-V 特性より見積もられたジョセフソンアレイ発振器の発振出力など詳細を報告する。

【謝辞】本研究は JST ムーンショット型研究開発事業(JPMJMS2067)の支援を受けて実施された。本研究は JSPS 科研費 JP22H04955 の助成を受けている。

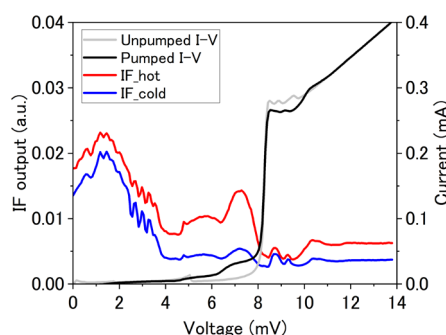


Fig. 1 Balanced SIS mixer I-V curve and IF outputs pumped by the 150-GHz oscillator

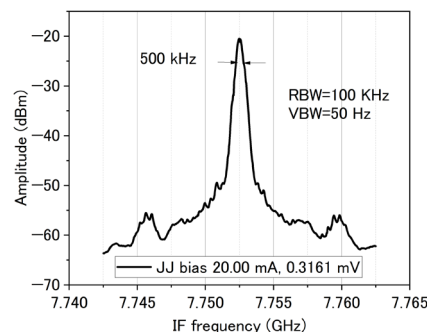


Fig. 2 LO spectrum converted in IF frequencies ( $f_{RF} = 139$  GHz)

## 波長 2 $\mu\text{m}$ における超伝導ワイドストリップ光子検出器の特性評価

### Evaluation of the superconducting wide strip photon detector for 2 $\mu\text{m}$ wavelength band

情通機構 ○藪野 正裕, 知名 史博, 寺井 弘高, 三木 茂人

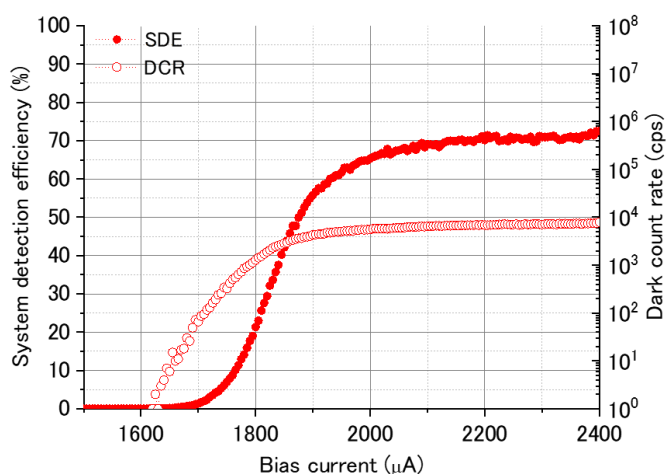
NICT ○Masahiro Yabuno, Fumihiko China, Hiroataka Terai, Shigehito Miki

E-mail: masahiro.yabuno@nict.go.jp

超伝導ナノストリップ光子検出器(SNSPD)は、波長 1.55  $\mu\text{m}$  帯を主対象として研究され、90%を超える検出効率などの優れた性能から量子情報技術に不可欠な技術となった。さらに近年では、より長波長の赤外領域での光子検出への応用が注目されており、波長 2  $\mu\text{m}$  帯は、LIDAR による空間イメージングや大気環境計測、自由空間光通信、光集積回路、赤外線天文観測などの多彩な分野への応用が期待されている領域である。このような、光エネルギーが小さい、より長波長の赤外光子の高効率検出を実現するには、ナノストリップの線幅のさらなる微細化が現在の研究開発の主な方向性の一つであるが[1, 2]、そこでは微細加工技術の高度化が大きな課題となる。

一方で、最近我々は、独自考案の高臨界電流バンク(HCCB)構造の超伝導ストリップを用いた、線幅 20  $\mu\text{m}$  の超伝導ワイドストリップ光子検出器(SWSPD)を開発し、広い線幅の超伝導ストリップでも波長 1.55  $\mu\text{m}$  の光子を高効率・低暗計数で検出可能なことを実証した[3]。さらに、この素子の検出効率のバイアス電流依存性は広い飽和領域を示し、より長波長の光子の検出可能性をも示すものであった。そこで、今回我々は、波長 2  $\mu\text{m}$  用に光キャビティを再設計した HCCB-SWSPD を新たに作製し、波長 2  $\mu\text{m}$  の光子に対する検出特性を評価したので報告する。

厚さ約 6 nm の NbTiN 薄膜を用いて線幅 20  $\mu\text{m}$  の HCCB-SWSPD を作製した。受光部サイズは 18 $\times$ 18  $\mu\text{m}^2$  であり、両側部に幅 1  $\mu\text{m}$  の HCCB 領域を備える。素子は裏面入射型の光キャビティ構造を有し、波長 2  $\mu\text{m}$  での光子吸収率を最大化するように誘電体層の膜厚を設計した。図 1 に温度 0.76 K で測定した波長 2  $\mu\text{m}$  の光子に対する検出効率と暗計数率のバイアス電流依存性を示す。検出効率曲線は飽和に達しており、波長 2  $\mu\text{m}$  においても内部効率が 100%に達することが確認された。システム検出効率は約 70%であり、暗計数率は約 7,000 cps であった。暗計数は主に黒体輻射による外因性のものであり、光学的手法により低減の余地がある。この結果は、汎用的なフォトリソグラフィ技術で作製可能な広い線幅の超伝導ストリップを用いた、より長波長領域における光子検出器開発の可能性を拓くものである。



**Fig. 1** Bias current dependences of the system detection efficiency and dark count rate at 2  $\mu\text{m}$  wavelength.

**(謝辞)** 本研究の一部は、JSPS 科研費(22H01965)、JST ムーンショット型研究開発事業(JPMJMS2066)、MEXT Q-LEAP(JPMXS0118067634)の助成を受けて実施された。

[1] J. Chang *et al.*, *Photon. Res.* **10**(4), 1063-1070 (2022). [2] F. China *et al.*, *Opt. Express* **31**(12), 20471-20479 (2023). [3] M. Yabuno *et al.*, *Optica Quantum* **1**(1), 26-34 (2023).

11 超伝導 | 一般セッション(口頭講演): 11.5 接合, 回路作製プロセスおよびデジタル応用

**[18a-B5-1~10] 11.5 接合, 回路作製プロセスおよびデジタル応用**

[18a-B5-1]

高臨界電流密度プロセスを用いた単一磁束量子回路に基づく同時計数回路

○宮嶋 茂之<sup>1</sup>、寺井 弘高<sup>1</sup>、藪野 正裕<sup>1</sup>、三木 茂人<sup>1,2</sup> (1.情通機構、2.神戸大)

[18a-B5-2]

インパルス駆動型メモリにおけるセル選択用パルスの光速伝搬実証

○佐藤 太一<sup>1</sup>、李 峰<sup>1</sup>、田中 雅光<sup>1</sup>、藤巻 朗<sup>1</sup> (1.名古屋大学)

[18a-B5-3]

確率的クロスバーアレイを構築するための超伝導シナプスの動作実証

○羅 文輝<sup>1</sup>、竹内 尚輝<sup>2</sup>、陳 オリビア<sup>3</sup>、吉川 信行<sup>1</sup> (1.横浜国大IAS、2.産総研G-QuAT、3.九州大学)

[18a-B5-4]

単一磁束量子多数決論理ゲートを用いたバタフライ演算回路の設計

○瀬川 亮輔<sup>1</sup>、山梨 裕希<sup>1</sup>、吉川 信行<sup>1</sup> (1.横国大院理工)

[18a-B5-5]

単一磁束量子回路の放射線耐性測定に向けたエラー率試験回路の設計

○刑部 一斗<sup>1</sup>、山梨 裕希<sup>1</sup>、吉川 信行<sup>1</sup> (1.横国大院理工)

[18a-B5-6]

分子線エピタキシー法による単結晶Nb薄膜の作製と量子デバイス応用

○辻本 学<sup>1</sup>、浦出 芳郎<sup>1</sup>、藤田 裕一<sup>1</sup>、知名 史博<sup>1</sup>、野崎 友大<sup>1</sup>、野崎 隆行<sup>1</sup>、猪股 邦宏<sup>1</sup>、水林 亘<sup>1</sup> (1.産総研)

[18a-B5-7]

Nbベースジョセフソンパラメトリックオシレーターの特性評価

○沈 泓翔<sup>1</sup>、吉川 信行<sup>1,2</sup> (1.横浜国立大学、2.横国大院理工)

[18a-B5-8]

断熱量子磁束パラメトロンを用いた位相判別回路の低臨界電流密度Josephsonプロセスにおける設計

○永松 義瑛<sup>1</sup>、山梨 裕希<sup>1,2</sup>、吉川 信行<sup>1,2</sup> (1.横国大院理工、2.横国大IAS)

[18a-B5-9]

 $\pi$ 接合を用いた多段接続磁束伝送回路の評価○堀 裕貴<sup>1</sup>、佐藤 太一<sup>1</sup>、李 峰<sup>1</sup>、田中 雅光<sup>1</sup>、藤巻 朗<sup>1</sup> (1.名大院工)

[18a-B5-10]

0-0- $\pi$  SQUIDの周回電流の向きが半磁束量子論理ゲートに及ぼす影響○出口 創万<sup>1</sup>、佐藤 太一<sup>1</sup>、堀 裕貴<sup>1</sup>、西崎 海<sup>1</sup>、李 峰<sup>1</sup>、田中 雅光<sup>1</sup>、藤巻 朗<sup>1</sup> (1.名大院工)



## 高臨界電流密度プロセスを用いた 単一磁束量子回路に基づく同時計数回路

### Coincidence circuit based on single-flux-quantum circuit by using high critical current density fabrication process

情通機構<sup>1</sup>, 神戸大<sup>2</sup> °宮嶋 茂之<sup>1</sup>, 寺井 弘高<sup>1</sup>, 藪野 正裕<sup>1</sup>, 三木 茂人<sup>1,2</sup>

NICT<sup>1</sup>, Kobe Univ.<sup>2</sup>, °Shigeyuki Miyajima<sup>1</sup>, Hirotata Terai<sup>1</sup>, Masahiro Yabuno<sup>1</sup>, Shigehito Miki<sup>1,2</sup>

E-mail: miyajima@nict.go.jp

2光子同時計数測定は、光干渉を用いる光量子技術を構成するための基本要素である。近年、高検出効率・低暗計数率・低ジッタ特性を有する超伝導ナノストリップ光子検出器(SNSPD)を用いた同時計数測定により、高い忠実度を有したホン-オウ-マンデル(HOM)干渉の観測が実現している。一方で、SNSPDを用いた同時計数測定のさらなる時間精度の向上および高速動作の実現には、低ジッタと高速性を兼ね備えた同時計数回路が必要不可欠である。これを実現するために我々は、単一磁束量子(SFQ)回路を用いた2入力同時計数回路について開発を行っている。本稿ではジョセフソン接合の臨界電流密度が  $10 \text{ kA/cm}^2$  のプロセスを採用することで、SFQ回路自身及び入力インターフェース回路である磁気結合型 DC/SFQ converter (MC-DC/SFQ converter)のジッタの低減を図った。入力された2つの信号の同時性を検出する際に Confluence Buffer (CB)を用いた場合だと、2入力の時間差が数 ps の場合に誤動作を生ずる可能性があるため、AND ゲートを用いた[1]。時間窓はジョセフソン伝送路(JTL)を用いて 30 ps, 100 ps, 200 ps の3種類を1つの回路内に搭載しており、実験時には独立に用意されたバイアス供給線を用いて1つの時間窓を選択して動作させる。また、2入力に対する同時計数出力だけでなく、各入力端子からの信号確認用の出力端子を実装した。Fig. 1 に作製された2入力同時計数回路の顕微鏡写真を示す。冷却能力が 0.1 W の Gifford-McMahon (GM)冷凍機に実装して外部から信号を与えて回路動作評価を行った。この回路には、回路内部において信号を2分岐する端子も用意されており、SFQ回路内部のジッタだけで決まる時間窓と、MC-DC/SFQ converter のジッタを含めた時間窓を観測することが可能である。どちらを使用した場合においても、設定された時間窓内において同時計数出力が得られていることを確認した。講演では実験及び結果の詳細を報告する。

[1] 宮嶋茂之 他, 第80回応用物理学会秋季学術講演会、20p-C213-13

**謝辞** 本研究の一部は文部科学省光・量子飛躍フラッグシッププログラム(Q-LEAP) JPMXS0118067634 の助成を受けたものである。また本研究に使用された回路は、国立研究開発法人産業技術総合研究所の超伝導量子回路試作施設 (Qufab) において作製された。

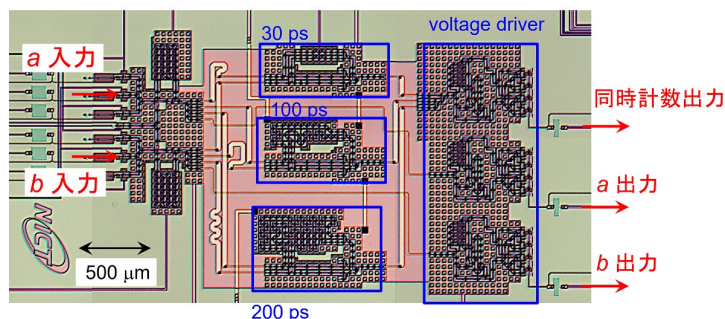


Fig. 1. 臨界電流密度が  $10 \text{ kA/cm}^2$  のプロセスで作製された2入力 SFQ 同時計数回路の顕微鏡写真。

# インパルス駆動型メモリにおけるセル選択用パルスの光速伝搬実証

## Demonstration of light-speed propagation of a pulse used for cell selection in an impulse-driven memory

名古屋大 工 〇佐藤 太一, 李 峰, 田中 雅光, 藤巻 朗

Nagoya Univ., 〇Taichi Sato, Feng Li, Masamitsu Tanaka, and Akira Fujimaki

E-mail: taichi.sato@super.nuee.nagoya-u.ac.jp

**背景** 半導体を含めた従来のマトリクスメモリは、配線の充放電時間によりセル選択が1ns程度に制約される。一方、SFQ マイクロプロセッサは100GHz動作も可能であり、この速度差が計算システム性能を律速する要因となる。インパルス駆動型メモリは、光速で伝搬するインパルス信号を用いてセル選択を行おうとするもので、メモリの高速動作の壁を打開する可能性を持つ。パルスは微小なエネルギーしか持たないが、 $\pi$ -SQUID を用いることで、書き込みの際のエネルギーを  $10^{-21}$  J 程度にまで低減し、パルス駆動を実現した。これまでに単体セルの動作実証や大規模化に向けて取り組んできた[1]が、最大の利点である高速動作性は検証はなされていない。本研究では、セル選択に使うパルスの伝送速度を、実験と JoSIM [2]による数値解析との比較を通し行い、インパルス駆動型メモリの高速動作性を調査した。

**実験** セル選択に使うパルスは受動線路(PTL)を伝搬する。メモリセルとは磁気的に結合するが、その結果、容量やインダクタンス、損失が変化し、位相速度の変化やパルス波形の乱れ、振幅低減が危惧される。本研究では、伝搬の様子を把握するため、8個のメモリセルと結合した1250 $\mu$ mのPTL、ドライバとレシーバを含むリング発振器を構成し、数値計算との比較を通して、研究を進めた。

回路は産業技術総合研究所のNb四層プロセス(HSTP、臨界電流密度10kA/cm<sup>2</sup>)と、名古屋大学の $\pi$ 接合作製プロセスのハイブリッドプロセスにより作製した。Fig.1に作製したリング発振器の顕微鏡写真を示す。また、Fig.2にPTLのレシーババイアス電流とリング発振器の動作周波数の関係を示す。PTLレシーバはパルスの波形の乱れに最も影響を受けやすい回路であることから、パラメータとして選択した。数値解析において、実際の回路パラメータを用いたほか、発振周波数を決めるジョセフソン線路のバイアス電流と実験値とのフィッティングを行ったところ、数値解析結果と実測結果にFig.2のように同じ傾向が見られた。この結果は、JoSIMによる数値解析が妥当であることを示している。

**評価** 妥当性が認められた数値解析に基づく、この実験におけるパルスの信号伝搬速度は106  $\mu$ m/ps、1250  $\mu$ mのPTLを伝搬するの

に11.8 psを要すると見積もられる。本線路のL/R時定数はおよそ55.15 psと概算されることから、パルス駆動を用いることによる高速動作性が示唆される。また、他の実験結果から、波形の乱れがレシーバのマージンに影響するまでには至っていないことが分かった。

**謝辞** 本研究は、JSPS 科研費(JP18H05211, JP23H05447)及びCREST(JPMJCR20C5)の支援を受けて実施した。回路の一部は産総研 Qufab で作製された。

### 参考文献

- [1] Y. Takeshita et al. IEEE Trans. Appl. Supercond. 31, 1100906, 2021.
- [2] J. A. Delport et al. IEEE Trans. Appl. Supercond. 29, 1300905, 2019.

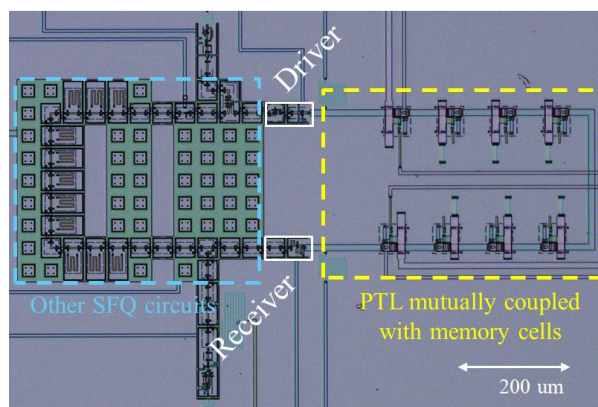


Fig.1 Microphotograph of ring oscillator with memory cells coupled (PTL length = 1250  $\mu$ m)

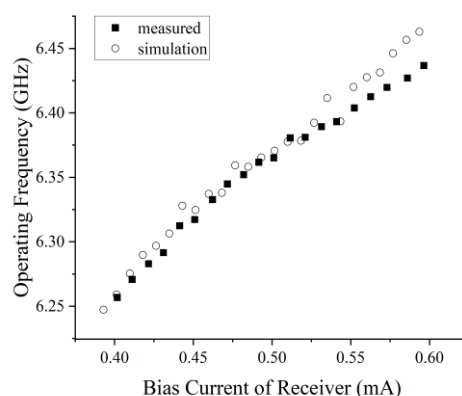


Fig.2 Comparison of measured and simulated operating frequency

# 確率的クロスバーアレイを構築するための超伝導シナプスの動作実証

## Demonstration of a superconducting synapse for a stochastic crossbar array

横国大先端科学高等研究院<sup>1</sup>, 産総研 G-QuAT<sup>2</sup>, 九州大学<sup>3</sup>

○羅文輝<sup>1</sup>, 竹内尚輝<sup>2</sup>, 陳オリビア<sup>3</sup>, 吉川信行<sup>1</sup>

IAS, Yokohama Nat'l Univ.<sup>1</sup>, G-QuAT, AIST<sup>2</sup>, Kyushu Univ.<sup>3</sup>

○Wenhui Luo<sup>1</sup>, Naoki Takeuchi<sup>2</sup>, Olivia Chen<sup>3</sup>, Nobuyuki Yoshikawa<sup>1</sup>

E-mail: luo-wenhui-jm@ynu.ac.jp

クロスバーアレイは、二次元のグリッド構造であり、高密度のデバイス集積と効率的なデータ処理が可能となる[1]。本研究では、確率的演算ベースの超伝導クロスバーアレイ (SC-CBA) を構築するため、クロスポイントのスイッチ素子である確率的超伝導シナプス回路の提案および動作実証を行う。

Fig. 1 に本研究で提案する SC-CBA の概略図を示す。入力データはストカスティック数生成器を用いてストカスティックビット列に変換し、SC-CBA に印加する。超伝導シナプス回路は、SFQ コンパレータであり、制御電流を調整することで、出力ビット列  $S_{out}$  に含まれる 1 の確率と入力ビット列  $S_{in}$  に含まれる 1 の確率の比率を制御できる (この比率が重み  $w$  を表す:  $w = P_{S_{out}=1} / P_{S_{in}=1}$ )。しかし、個々の SFQ コンパレータの制御電流を調整するためには、たくさんの入力ケーブルが必要になり、SC-CBA のスケーラビリティが低下してしまう。そこで、JJ を dc-SQUID に置き換えて、磁束 D/A 変換器 ( $\Phi$ -DAC) [2]により dc-SQUID への印加磁束をオンチップで調整することで、スケーラビリティの高い  $w$  の制御を目指す。

AIST の Nb 10 kA/cm<sup>2</sup> プロセス (HSTP) [3] を使用してシナプス回路を設計および作製し (Fig. 2)、実験的に dc-SQUID に印加された磁束により出力確率と入力確率の比率の制御を行った。さらに、確率の比率と印加磁束の依存

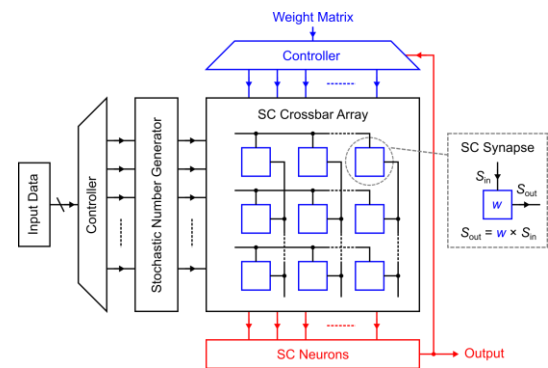


Fig. 1 SC-CBA の概略図

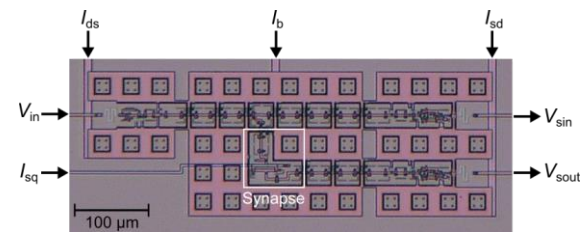


Fig. 2 シナプス回路のチップ写真

性をシミュレーション結果と比較し評価した。

### 謝辞

本研究に使用された回路は、産業技術総合研究所 (AIST) の超伝導量子回路試作施設 (Qufab) において作製された。本研究は JSPS 科研費 (JP22H00220) の助成を受けたものである。

### 参考文献

- [1] D. B. Strukov et al., Nature, vol. 453, no. 7191, pp. 80–83, May 2008.
- [2] N. Takeuchi et al., Physical Review Research, vol. 5, no. 1, p. 013145, Feb. 2023.
- [3] N. Takeuchi et al., Supercond. Sci. Technol., vol. 30, no. 3, p. 035002, Mar. 2017.



# 単一磁束量子多数決論理ゲートを用いたバタフライ演算回路の設計

## Design of a butterfly processing circuit using single flux quantum majority gate

横国大院理工<sup>1</sup> ○瀬川 亮輔<sup>1</sup>, 山梨 裕希<sup>1</sup>, 吉川 信行<sup>1</sup>

Dept. of Electrical and Computer Eng., Yokohama Natl. Univ.<sup>1</sup>

○Ryosuke Segawa<sup>1</sup>, Yuki Yamanashi<sup>1</sup>, Nobuyuki Yoshikawa<sup>1</sup>,

E-mail: segawa-ryosuke-nw@ynu.jp

### 1. はじめに

本研究では、単一磁束量子回路(SFQ 回路)を用いた FFT (高速フーリエ変換)計算機の更なる低消費電力化・小型化を目標に、多数決論理ゲート(Majority ゲート)を使用したバタフライ演算回路(BPU)の設計を行った。

近年、社会の情報化が大きく進み、情報処理量が増大している。そこで、情報処理のさらなる高速化・低消費電力化が求められている。情報処理には半導体集積回路が使われることが主流であるが、微細化の限界や大きな消費電力の観点から、その代替となる技術の研究が必要である。そこで、超伝導回路の一種である SFQ 回路が注目されている。SFQ 回路は、Josephson 接合(JJ)を含んだ超伝導リングを並列に配置し、リング内の磁束の有無を「1」と「0」に対応させて演算を行う回路である。数十 GHz で高速動作し、消費電力も半導体集積回路の 0.1%程度という利点をもつ。

FFT は信号解析や画像解析に応用される。しかし、多量の演算が必要であり、消費電力や発熱量が問題となる。そこで、本研究では SFQ 回路の高速動作性、低消費電力性を利用して FFT 計算機の消費電力低減を目指した。

### 2. 多数決論理ゲートと加算器の設計

FFT 計算機は、バタフライ演算回路(BPU)が主要な部分を占める。BPU を繰り返し利用することで演算を行うため、BPU の低消費電力化・小型化が直接的に FFT 計算機の低消費電力化・小型化に繋がる。BPU は、先行研究においてシミュレーションで最高動作周波数 67 GHz、バイアスマージンは 50 GHz で 80 % - 125 %での動作が示されていた。

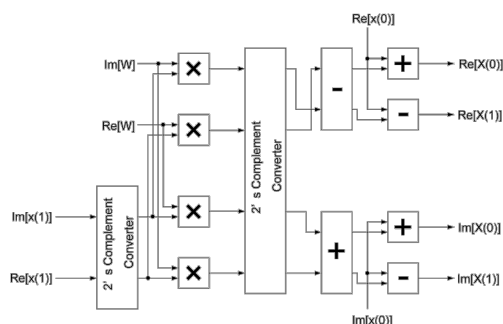


Fig.1 Block Diagram of butterfly processing circuit

Data is input in parallel for the Twiddle factor and in serial for  $x(1)$ .

Fig.1 に BPU のブロック図を示す。BPU は乗算器 4 個、加算器 3 個、減算器 3 個で構成される。

我々は BPU の中でも最も消費電力・占有面積の大きい乗算器に着目し、乗算器の低消費電力化・小型化から BPU 全体の低消費電力化・小型化を目指した。そこで、各乗算器内部の加算器(Bit Serial Adder)の改良を行った。

多数決論理ゲート(Majority ゲート)という新たな論理ゲートを設計することで、Fig.2 のように加算器を構成する論理ゲートの総数を 5 個から 3 個に削減した。多数決論理ゲートは 3 つの入力と 1 つの出力をもち、2 つ以上 SFQ 入力があると SFQ が出力される、入力の多数決を取る論理ゲートである。多数決論理ゲートの利用により、先行研究で使用されていた加算器から消費電力を 30%、面積を 50%程度削減した。

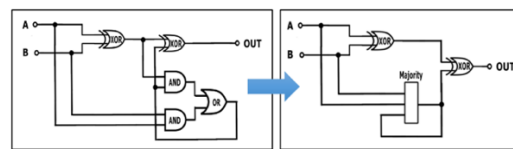


Fig.2 Comparison of bit serial adders

Left : used in previous study, Right : newly proposed

### 3. バタフライ演算回路の設計

最後に、多数決論理ゲートを用いた加算器を組み込んだ BPU を設計した。設計した BPU を Fig.3 に示す。加算器の改良により、先行研究の BPU から消費電力を 10%程度、面積を 30%程度削減することができた。

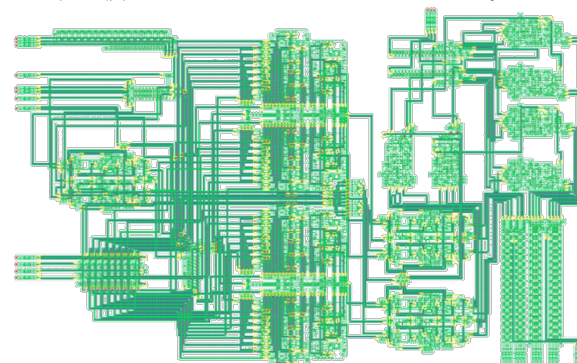


Fig.3 Circuit schematic of new butterfly processing circuit

### 4. 参考文献

- (1) H. Cong, M. Li and M. Pedram, "An 8-b Multiplier Using Single-Stage Full Adder Cell in Single-Flux-Quantum Circuit Technology," *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, vol. 31, 1303110, 2021.
- (2) Y. Sakashita, et al., "50 GHz demonstration of an integer-type butterfly processing circuit for an FFT processor using the 10 kA/cm<sup>2</sup> Nb process," *IEICE Trans. on Electron.*, vol. E98.C, pp. 232–237, 2015.

# 単一磁束量子回路の放射線耐性測定に向けたエラー率試験回路の設計

## Design of an error rate test circuit for measuring radiation-induced malfunctions in superconducting circuits

横浜国立大学, °(M1) 刑部 一斗, 山梨裕希、吉川信行

Yokohama National Univ., °Kazuto Osakabe, Yuki Yamanashi, Nobuyuki Yoshikawa

E-mail: [osakabe-kazuto-sg@ynu.jp](mailto:osakabe-kazuto-sg@ynu.jp)

### 1. 単一磁束量子回路

近年の急速な情報化に伴い、情報処理量は増大し続けており、情報処理の高速化が必要となってきた。一方で情報処理を行うための回路に含まれる半導体集積回路は微細化による性能向上に限界を迎えつつあり、さらに情報処理量の増大に伴って消費電力も増大している。そこで、半導体集積回路に代わる回路方式として、単一磁束量子回路(SFQ 回路)や、量子コンピュータが提案されている。近年、 $\gamma$ 線などの二次宇宙線粒子はこれらの超伝導回路の大規模化を阻害する原因になりうるという指摘がされており、本研究では SFQ 回路の環境放射線による誤動作の頻度の測定を通して超伝導回路の信頼性評価を行うことを目的とする。今回は、SFQ 回路の誤動作を検出するためのエラー検出回路(ERTC: Error Rate Test Circuit)を設計した。

### 2. ERTC の概要

本研究における ERTC の概念図を Fig.1 に示す。

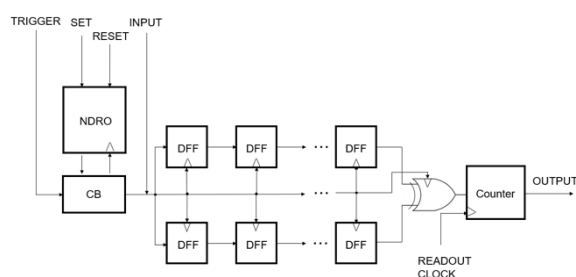


Figure.1 Overview of ERTC

ERTC は疑似乱数生成回路(PRNG: Pseudo Random Number Generator)で生成された疑似ランダムパルス列およびリングオシレータによって生成されたクロックパルスを 2 列のシフトレジスタに入力し、それらの出力を XOR ゲートに入力することで、一方の列でエラーが発生した場合、XOR からパルスが出力される [1]。これをカウンタによって数え上げる。カウンタに蓄積されたエラー回数のデータは別のクロックによって読み出しを行うことができる。測

定の際には、冷凍機内で動作している EDC のシフトレジスタ部分に  $\gamma$  線などの放射線を照射し、回路のエラー率を計測する。回路の設計は AIST ADP プロセスおよび AIST HSTP プロセスにより行った。

### 3. ERTC の評価

NC-Verilog を用いてデジタルシミュレーションを行い、リングオシレータ、擬似乱数生成機、エラー検出回路およびカウンタ回路の動作周波数特性を得た。結果を Fig.2 及び Fig.3 に示す。

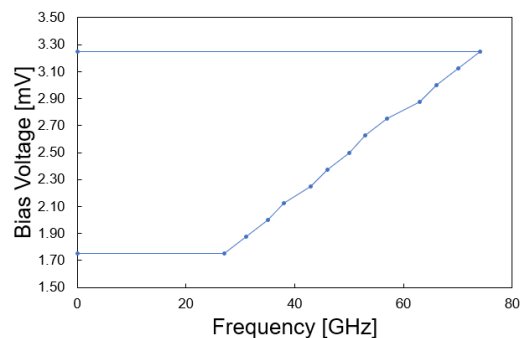


Figure.2 Frequency of a PRNG

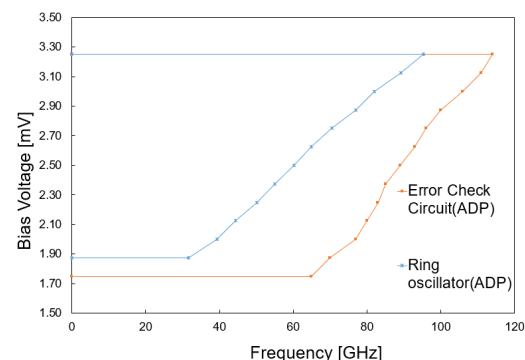


Figure.3 Frequency of an error detection circuit and a ring oscillator

### 参考文献

- [1] Quentin P. Herr, Marc J. Feldman, "Error Rate of RSFQ Circuits: Theory", IEEE Transaction on Applied Superconductivity, Vol.7, No.2, June. 1997



## 分子線エピタキシー法による単結晶 Nb 薄膜の作製と量子デバイス応用

Growth of single-crystal Nb thin films by molecular beam epitaxy and quantum device application

産総研 ○辻本 学, 浦出 芳郎, 藤田 裕一, 知名 史博,  
野崎 友大, 野崎 隆行, 猪股 邦宏, 水林 亘AIST M. Tsujimoto, Y. Urade, Y. Fujita, F. China,  
T. Nozaki, T. Nozaki, K. Inomata, and W. Mizubayashi

E-mail: m.tsujimoto@aist.go.jp

高純度かつ欠陥の少ない超伝導体薄膜の作製は、超伝導デバイスの性能向上を実現する手段の一つである。現在、超伝導量子ビットを代表とする量子デバイスは、AlやNbなどの多結晶薄膜を基盤としているが、不純物、結晶欠陥、粒界における散乱、準粒子など材料由来の要因によりデバイス性能の一部が制限されている。デバイスのさらなる高性能化と潜在能力の発揮には、製造プロセスの高度化に加え、材料の高純度化と均質化が求められる一方、エピタキシャル成長法などを用いた高純度かつ無欠陥の薄膜を用いたデバイス製造に関する研究は少ない。産業化を見据えた量産製造の観点では、ウエハ面内で均質かつ結晶方位の揃ったエピタキシャル成長薄膜や単結晶薄膜を用いることが理想的である。

本研究では、超高真空中の電子ビーム蒸着法を発展させた分子線エピタキシー (MBE) 法により、3 インチウエハ上に Nb 薄膜の作製を試みた。bcc 構造の Nb 薄膜と格子定数の近い R 面サファイア基板  $\text{Al}_2\text{O}_3$  (01 $\bar{1}$ 2) 上にヘテロエピタキシャル成長 [1,2] させた結果、結晶方位の揃った巨大な結晶粒を持つ単結晶 Nb 薄膜の作製に成功した。作製した薄膜の結晶構造解析を X 線回折法、微細構造観察を走査透過電子顕微鏡法、電気的特性を物理特性測定システム、表面形状を原子間力顕微鏡法で評価した。

成膜方法および基板加熱条件を変えて作製した Nb 薄膜の抵抗温度特性を図 1 に示す。MBE 法で基板加熱成膜した Nb 薄膜の超伝導転移温度は  $T_c = 9.4$  K であり、バルク値に匹敵あるいはそれを上回る。また、残留抵抗比は 40 を超え、不純物や欠陥による電子散乱が少ないことを示唆している。講演では、MBE 法の詳細な成膜条件について述べ、 $\text{Al}_2\text{O}_3$ (01 $\bar{1}$ 2) 基板との格子整合の観点からエピタキシャル成長機構について議論する。さらに、量子デバイスへの応用に向けたプロセス開発の現状を報告する。

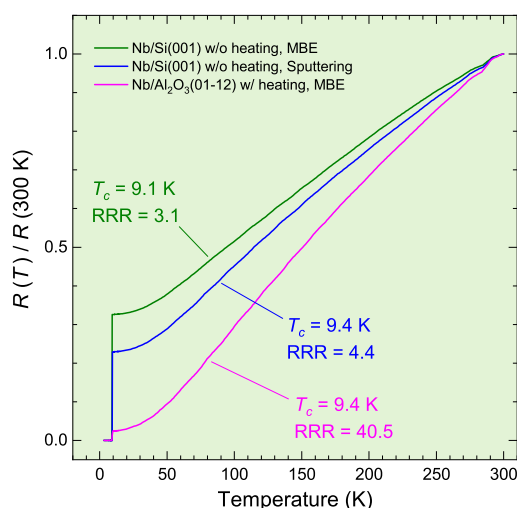


図 1: Temperature dependence of the electrical resistivity for Nb films deposited using DC sputtering and MBE techniques.

## 参考文献

- [1] G. Oya *et al.*, J. Appl. Phys. **60**, 1440 (1986).
- [2] A. R. Wildes *et al.*, Thin Solid Films **401**, 7 (2001).

謝辞 本講演で発表した研究の一部は、国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構 (NEDO) の委託業務 (JPNP16007) の結果得られたものです。

## Nb ベースジョセフソンパラメトリックオシレーターの特性評価

## Characterization of Nb-based Josephson parametric oscillators

○横国大 IAS<sup>1</sup>, 横国大院理工<sup>2</sup>○沈 泓翔<sup>1</sup>, 吉川 信行<sup>1,2</sup>IAS, Yokohama Natl. Univ.<sup>1</sup>, Dept. of Electrical and Computer Eng., Yokohama Natl. Univ.<sup>2</sup>○Hongxiang Shen<sup>1</sup>, Nobuyuki Yoshikawa<sup>1,2</sup>

E-mail: shen-hongxiang-vs@ynu.jp

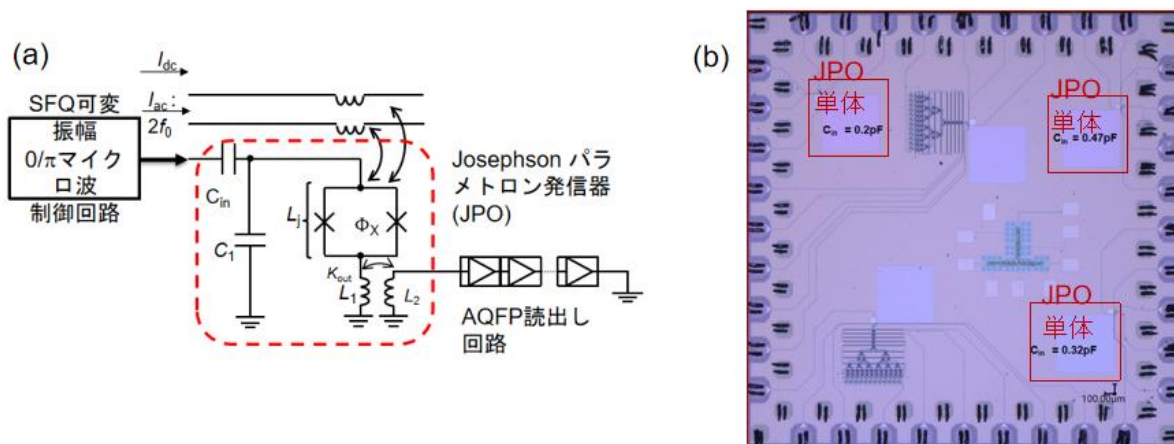
量子コンピュータは、量子ビット（キュービット）の重ね合わせを利用することで、従来のコンピュータでは効率的に解決できない複雑な問題に対処することができる。本技術の一つの実装方法として、量子アニーラーがある。量子アニーラーは、キュービットネットワークにイジングハミルトニアンをエンコードし、そのパラメータを断熱的に調整することでシステムの大局的な最小値を見つける。

このようなデバイスの中で、ジョセフソンパラメトリックオシレーター（JPO）は、双安定振動状態を持ち、量子キャット状態の生成が実証されているため、特に注目されている。これらの特徴により JPO は、組み合わせ最適化問題の解決に適した量子アニーラーの有力な候補と考えられる。

本研究では、臨界電流密度  $1 \text{ kA/cm}^2$  の Nb ジョセフソン集積プロセスを用いて、4.2K で動作する量子アニーラー向けに Nb ベースの JPO を特性評価した。実験により、4.2K における JPO の共振現象を確認した。今後、これらの JPO をさらに低温である 10 mK までテストし、量子アニーリングマシンの実現の可能性を検討する予定である。

## 謝辞

本講演で発表した研究の一部は、国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構（NEDO）の委託業務（JPNP16007）の結果得られたものです。



図の 1 (a)SFQ 振幅可変のマイクロ波制御回路をジョセフソン発振器（JPO）に入力し、2 倍の周波数で JPO を駆動する。共振により得られたマイクロ波の位相を AQFP で読み取る。(b)異なる  $C_{in}(0.2\text{pF}, 0.32\text{pF}, 0.47\text{pF})$  を持つ JPO 回路のレイアウト図。

# 断熱量子磁束パラメトロンを用いた位相判別回路の 低臨界電流密度 Josephson プロセスにおける設計

Design of a phase discrimination circuit using adiabatic quantum flux parametron  
with low current density Josephson process

横国大院理工<sup>1</sup>、横国大 IAS<sup>2</sup> ○永松 義瑛<sup>1</sup>、山梨 裕希<sup>1,2</sup>、吉川 信行<sup>1,2</sup>

Yokohama National Univ.<sup>1</sup>, Yokohama National University IAS.<sup>2</sup>,

Yoshiaki Nagamatsu<sup>1</sup>, Yuki Yamanashi<sup>1,2</sup>, Nobuyuki Yoshikawa<sup>1,2</sup>

## 1. はじめに

近年、社会課題を解決する上で、最適化問題に対処する必要が出てきた。このような問題に対して有効であると考えられているのが量子コンピュータである。中でもアニーリングシステムは組み合わせ最適化問題に代表される、計算量が指数関数的に増加する問題に適している。

しかしこの技術はスケーラビリティの問題を抱えており、多ビットを安定的に扱う技術が必要である。それを妨げる原因の一つとして、量子ビットに対する制御が室温環境から行われていることが挙げられる。この制御回路を極低温環境に置くことで回路の安定化を図ることができる。ここで、断熱量子磁束パラメトロン (AQFP[1][2]) の特性である極低温下動作や低消費電力性を用いることができる。

我々の目標は、制御回路を極低温環境下に置いたシステムの構築である。量子ビットからの出力である微小な電流を論理情報に変換する回路として、AQFP を用いた位相判別回路を以前設計した。さらに本研究では、ジョセフソン接合が発する熱雑音がより少ないプロセスである、 $J_c=1\text{kA/cm}^2$  の低臨界電流密度プロセス(1KP)を用いて設計した。

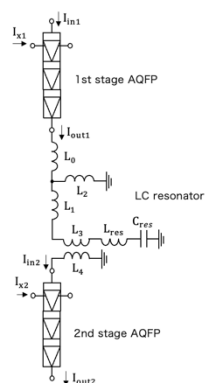


Fig.1. Phase discrimination circuit

## 2. 位相判別回路の構成と評価方法

入力信号の論理状態を判別するために、図1のような位相判別回路を考え、シミュレーションにより回路の論理判別におけるグレーゾーンの評価を行った。入力電流に対する論理"1"の出力確率が曖昧になる領域をグレーゾーンと呼

び、これが小さくなるほど感度が高くなったと評価することができる。

この回路はAQFPバッファ1段目、LC共振器、AQFPバッファ2段目で構成されており、1段目の出力電流を共振器で増幅、安定化させ、2段目での出力が正確に行われることを目的として設計した。

## 3. シミュレーション結果

入力電流を $-4\mu\text{A}\sim 4\mu\text{A}$ の間で変化させ、各入力電流につき1000回の論理確認を行うことで出力確率を計算した。

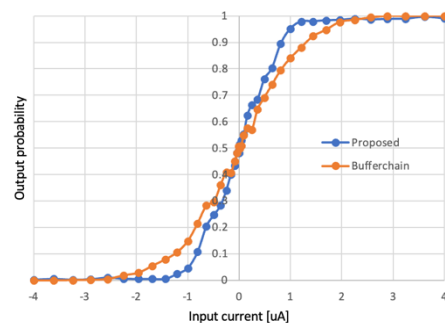


Fig.2. Grayzone of phase discrimination circuit

図2の結果を誤差関数を用いてフィッティングして計算したグレーゾーン幅は $1.68\mu\text{A}$ であった。通常のAQFPバッファの $2.51\mu\text{A}$ と比べると約30%小さくなっている。この結果から入力感度向上が確認できた。

以上により、低臨界電流密度プロセスのAQFPバッファに共振器を挿入し電流を増幅させることで、入力電流に対する応答性を高められることがシミュレーションにより確認された。

## 謝辞

本講演で発表した研究の一部は、国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構(NEDO)の委託業務(JPNP16007)の結果得られたものです。

## 参考文献

- (1) N.Takeuchi, D.Ozawa, Y.Yamanashi, N.Yoshikawa : "An Adiabatic quantum flux parametron as an ultra-low-power logic device", Supercond. Sci. Technol., 26, 035010 (Jan 2013)
- (2) Y.Harada, H.Nakane, N.Miyamoto, U.Kawabe, E.Goto, T.Soma : "Basic Operations of the Quantum Flux Parametron", IEEE TRANSACTIONS ON MAGNETICS, Vol. MAG-23, No.5 (SEPTEMBER 1987)

## $\pi$ 接合を用いた多段接続磁束伝送回路の評価

### Evaluation of cascaded flux transmission circuits using $\pi$ junctions

名大院工 ○堀裕貴、佐藤太一、李峰、田中雅光、藤巻朗

Nagoya Univ, ○Hiroki Hori, Taichi Sato, Feng Li, Masamitsu Tanaka,  
and Akira Fujimaki

E-mail: [hiroki.hori@super.nuee.nagoya-u.ac.jp](mailto:hiroki.hori@super.nuee.nagoya-u.ac.jp)

#### 背景

超伝導ループに  $\pi$  接合を並列に挿入した磁束伝送回路(以下、 $\pi$ -FTC)は、 $\pi$  接合の負性インダクタンス特性により従来の限界を超えた磁束の伝送係数を実現できることが数値解析や実験によって示されている[1]。 $\pi$ -FTCは内部磁束-外部磁束特性においてヒステリシスのない単一接合超伝導量子干渉素子を基としているため、 $\pi$  接合の臨界電流値 $I_{c\pi}$ とループインダクタンスの積 $\beta$ に制約が発生する。その結果、インダクタンスがある閾値を超えると、入力電流の有無に関わらず内部に周回電流が流れ FTC として使用できない。そこで、 $\pi$ -FTC を多段に接続することで、ループインダクタンスの制約を回避しながら大きな磁束伝送係数を実現する手法が提案されている。Fig.1 に  $\pi$ -FTC を2段接続した回路の等価回路図を示す。現在、数値解析により多段  $\pi$ -FTC が  $\pi$  接合の経路のない1つの超伝導ループからなる通常の FTC よりも大きな磁束伝送係数を実現でき、長距離ほど大きな磁束を伝送することさえできる可能性が示されている[2]。本稿では、 $\pi$ -FTC の多段接続による磁束伝送係数向上の実験的な原理実証を目的とし、異なる入力電流に対して出力に誘起される磁束について調査した。

#### 実験

我々は今回、産業技術総合研究所 Qufab の Nb 四層プロセス( $J_c = 10\text{kA/cm}^2$ )上に  $\pi$  接合 (Nb/Pd<sub>89</sub>Ni<sub>11</sub>/Nb) [3]を作製し、複数段の  $\pi$ -FTC を含む回路を作成した。Fig.2 に2段の  $\pi$ -FTC の顕微鏡写真を示す。 $\pi$  接合の臨界電流値を精密に制御することが困難であるため、従来のジョセフソン接合(以下、0 接合)を  $\pi$  接合に直列に挿入し、 $\beta$ の制御を行った。0 接合の臨界電流値は  $I_c=49\mu\text{A}$  であり、 $\pi$  接合の臨界電流値よりも十分小さいため、0 接合と  $\pi$  接合のペアは臨界電流値  $I_{c\pi} = I_c$  を持つ一つの等価的な  $\pi$  接合とみなせる。なお、 $\pi$ -FTC の接続距離は Fig.1 における  $L_{\text{wire}}$  により決定される。本回路の接続距離は  $47\mu\text{m}$  であり、1 段の回路において同一  $I_c$  という条件の下、 $L_{\text{wire}}$  を増加させることで2段と同一距離を実現することは  $\beta$  の制約上できない。実験では、電流源を用いて入力側から入力電流  $I_{\text{in}}$  による磁束を印加し、出力側の十分大きな負荷のインダクタンスに流れる微小な電流  $I'_{\text{out}}$  を FLL を構成した検出用 SQUID を用いて測定した。検出用 SQUID において、 $I'_{\text{out}}$  による磁束とフィードバック電流  $I_{\text{fb}}$  による磁束の和が0になるため、フィードバック電流を測定することで間接的に出力電流を検出することができる。Fig.3 に2段の  $\pi$ -FTC のシミュレーション及び測定結果を示す。シミュレーションでは、同じ入力に対して通常の FTC よりも大きなフィードバック電流が流れており、より大きな出力電流が得られていることがわかる。実験結果について、入力電流

が  $40\mu\text{A}$  以下ではフィードバック電流の変化が小さくなっており、検出用 SQUID の動作点に関して今後議論を進める必要があるが、多段接続した  $\pi$ -FTC による磁束の伝送を確認した。今後通常の FTC と比較することで、 $\pi$ -FTC の多段接続効果に関する議論を行う。

#### 謝辞

本研究は、JSPS 科研費 (23H05447, 18H05211, 22H01548, 23K13376) 及びの支援を受けて実施した。

#### 参考文献

- [1] M. Higashi et al., *Supercond.Sci.Technol.* 37(2024) 4, 045003.
- [2] 東正志ほか, 第71回応用物理学会春季学術講演会, 2024.
- [3] H. Ito et al., *Appl. Phys. Exp.* Vol. 10, 033101, 2017.

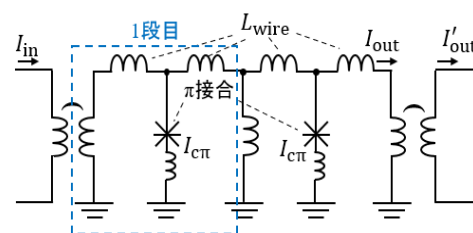


Fig. 1 The equivalent circuit of a 2-stage  $\pi$ -FTC.

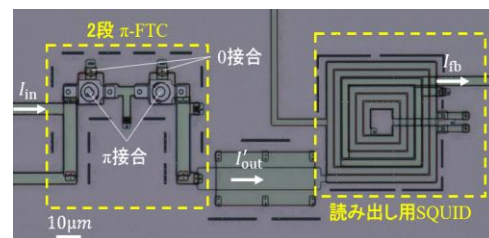


Fig. 2 The photograph of the fabricated

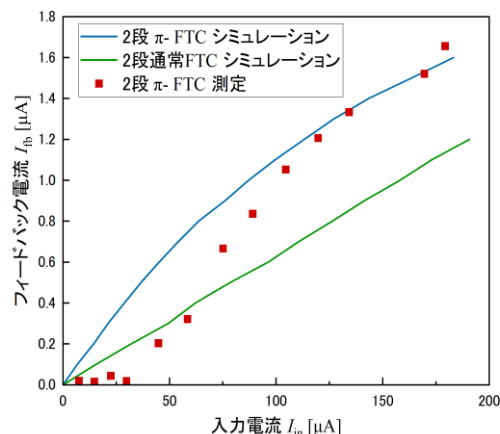


Fig. 3 The feedback current  $I_{\text{fb}}$  as a function



# 0-0- $\pi$ SQUID の周回電流の向きが半磁束量子論理ゲートに及ぼす影響

## Effect of directions of circulating currents in 0-0- $\pi$ SQUIDs on half-flux-quantum logic gates

名大院工 <sup>○</sup>出口創万, 佐藤太一, 堀裕貴, 西崎海, 李峰, 田中雅光, 藤巻朗

Nagoya Univ, <sup>○</sup>Soma Deguchi, Taichi Sato, Hiroki Hori, Kai Nishizaki, Feng Li,

Masamitsu Tanaka, and Akira Fujimaki

E-mail: deguchi@super.nuee.nagoya-u.ac.jp

### 背景

$\pi$  接合を含む SQUID 内部には量子化条件により自発的に周回電流が生じ、見かけの臨界電流値が下がり、小さな駆動力でスイッチさせることができる。このことを利用し、半磁束量子 (HFQ) 回路は、単一磁束量子 (SFQ) 回路よりも 1 桁程度低い消費電力性を実現できる[1]。一方、 $\pi$  接合を含む SQUID が  $\pi/2$  程度の初期位相差を持つため、HFQ 回路の設計では位相調整が格段に難しい。また、SQUID に非対称性があると、隣接している SQUID に流れる周回電流の向きの組合せによっても位相差に違いが生じるため、回路の振る舞いは更に複雑になる。我々はこれまでに、非対称性が信号伝送回路の遅延時間に与える影響を報告している[2]。今回は、より複雑な論理ゲートにおける影響を回路シミュレーションにより調査した。

### シミュレーション

通常の接合 (0 接合) と  $\pi$  接合の臨界電流値を完全に一致させることは困難なため、本研究では大きな臨界電流値を持つ  $\pi$  接合をスイッチさせない位相シフタとして用い、2つの0接合をスイッチ素子とする 0-0- $\pi$  SQUID で HFQ 回路を構成する。HFQ 回路は情報担体に  $\Phi_0/2$  の磁束を用いており、0-0- $\pi$  SQUID がスイッチすると内部の周回電流の向きが切り替わり、位相差が  $\pi$  だけ変化する。 $\pi$  接合が非線形のインダクタンスを持つため、0-0- $\pi$  SQUID は非対称性を持ち[3]、位相変化やスイッチ動作の振る舞いは周回電流の向きに依存する。

この影響を調べるため、Fig. 1 に示した XOR 論理ゲートのシミュレーションを行った。典型的な 0-0- $\pi$  SQUID における 0 接合と  $\pi$  接合の臨界電流値はそれぞれ  $60\mu\text{A}$  と  $2\text{mA}$  で、見かけの臨界電流値は  $20\mu\text{A}$  前後である。バイアス電圧の設計値  $0.5\text{mV}$  に対し、 $0.048\text{mV}$  を印加し、入力 (Input1, Input2) に (1,0), (1,1) の順で入力したときの位相変化を Fig. 2 に示す。クロック信号 Clk を入力したとき、X5 の 0-0- $\pi$  SQUID がスイッチし、位相差  $\pi$  が生じるのが正常な動作である。はじめに (1,0) を入力すると、X5 の位相差が  $\pi$  増加し、出力が得られている。その後の (1,1) を入力した後に Clk を入力すると、出力が得られず、適切な動作をしている。一方で Fig. 3 は入力 (Input1, Input2) に (1,1), (1,0) の順で入力したときの位相変化を示している。はじめに (1,1) を入力したとき、出力が得られないのは正常であるが、その後 (1,0) を入力すると、X5 の位相差が  $\pi/2$  しか増加せず、出力が得られていない。この原因を調べたところ、0-0- $\pi$  SQUID の非対称に起因し、周回電流の向きによって位相差が  $0.06\pi$  程度発生しており、スイッチに必要な電流が不足して動作不良が起きていることが確認できた。

この問題は、バイアス電圧を増加させることで回避できるが、各 0-0- $\pi$  SQUID の周回電流の向きの組合せ、即ち論理ゲートへの入力パターンの履歴によって動作マージンの下限が変わることを示唆している。講演では、今回実施したシミュレーション結果を含め、HFQ 論理ゲートについてより詳細な動作について議論を行う。

### 謝辞

本研究は、JSPS 科研費 (JP18H05211、JP23H05447、22H01548) 及び CREST(JPMJCR20C5) の支援を受けて実施したものである。

### 参考文献

- [1] F. Li et al., Supercond. Sci. Technol., 34, 025013, 2021.
- [2] 中山ほか, 応用物理学会春季学術講演会, 2023 年 3 月.
- [3] Takeshita et al., Supercond. Sci. Technol., 36, 045004, 2023

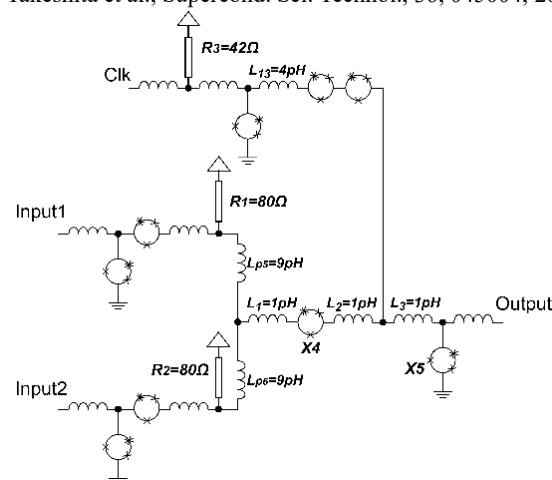


Fig.1 Schematic diagram of HFQ XOR gate

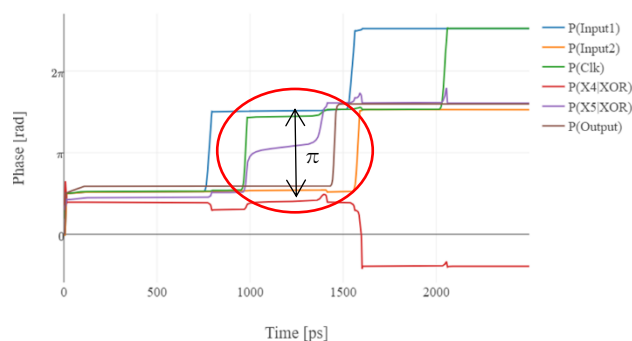


Fig.2 XOR (Input1,Input2) = (1,0) , (1,1)

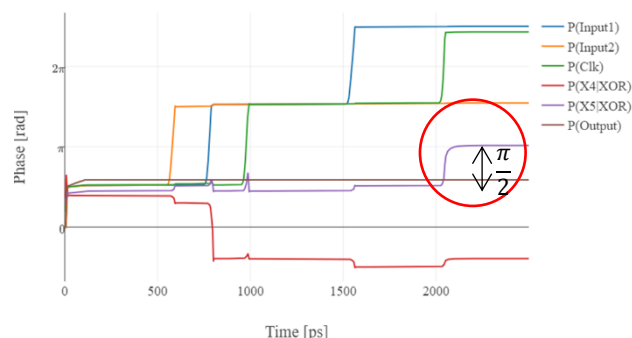


Fig.3 XOR (Input1,Input2) = (1,1) , (1,0)