

一般セッション(口頭講演) | 11 超伝導: 11.1 基礎物性

2024年9月16日(月) 9:00 ~ 12:00 会場 A35 (朱鷺メッセ3F)

[16a-A35-1~11] 11.1 基礎物性

長尾 雅則(山梨大)、及川 大(豊田高専)

9:00 ~ 9:15

[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¹、山内 悠希¹、前島 健太郎¹、葛見 佳彦¹、小林 未来¹、大坪 健人¹、南 英俊¹、柏木 隆成^{1,2} (1.筑波大学数理物質、2.阪公大IQMC)

9:15 ~ 9:30

[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¹、大坪 健人¹、榎本 裕樹¹、山内 悠希¹、前島 健太郎¹、小林 未来¹、前田 敦彦²、倉島 優一²、高木 秀樹²、南 英俊¹、柏木 隆成^{1,3} (1.筑波大数理物質、2.産総研、3.阪公大IQMC)

9:30 ~ 9:45

[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¹、○小林 未来¹、榎本 裕樹¹、山内 悠希¹、葛見 佳彦¹、前島 健太郎¹、大坪 健人¹、南 英俊¹、柏木 隆成^{1,2} (1.筑波大数理物質、2.阪公大IQMC)

9:45 ~ 10:00

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

10:00 ~ 10:15

[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¹、小林 亮太¹、辻本 学²、掛谷 一弘¹ (1.京大院工、2.産総研)

◆ 奨励賞エントリー

10:15 ~ 10:30

[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¹、掛谷 一弘¹ (1.京大院工)

10:45 ~ 11:00

[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¹、小林 未来¹、榎本 裕樹¹、山内 悠希¹、葛見 佳彦¹、大坪 健斗¹、石田 茂之²、永崎 洋²、中尾 裕則³、南 英俊¹、柏木 隆成^{1,4} (1.筑波大数理物質、2.産総研、3.KEK 物構研 PF、4.阪公大IQMC)

11:00 ~ 11:15

[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^{1,2}、中尾 裕則³、前島 健太郎¹、小林 未来¹、榎本 裕樹¹、山内 悠希¹、葛見 佳彦¹、大坪 健人¹、石田 茂之⁴、永崎 洋⁴、茂筑 高士⁵、南 英俊¹ (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)

11:15 ~ 11:30

[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¹、富岡 隼也¹、鷲谷 伊吹¹、宮本 洸希¹、青木 大知¹、畑野 敬史¹、生田 博志^{1,2} (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)

11:30 ~ 11:45

[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¹、日比野 絢斗¹、宮本 洸希¹、富岡 隼也¹、吉川 淳朗¹、生田 博志¹ (1.名大工)

11:45 ~ 12:00

[16a-A35-11]

[第56回講演奨励賞受賞記念講演] 極薄膜FeSe/SrTiO₃におけるネルンスト効果

○小林 友輝¹、小川 亮¹、岡田 達典²、前田 京剛¹ (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¹, 阪公大 IQMC²

○榎本 裕樹¹, 山内 悠希¹, 前島 健太郎¹, 葛見 佳彦¹, 小林 未来¹

大坪 健人¹, 南 英俊¹, 柏木 隆成^{1,2}

Univ. of Tsukuba¹, Osaka Metropolitan Univ.²

○Y. Enomoto¹, Y. Yamauchi¹, K. Maeshima¹, Y. Kuzumi¹,

M. Kobayashi¹, T. Otsubo¹, H. Minami¹, T. Kashiwagi^{1,2}

E-mail: 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、 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。

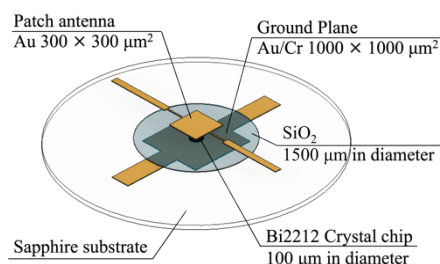


Fig. 1 A schematic illustration showing a patch antenna structure

[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¹, 産総研², 阪公大 IQMC³

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

Univ. of Tsukuba¹, AIST², Osaka Metropolitan Univ.³

○Y. Kuzumi¹, T. Otsubo¹, Y. Enomoto¹, Y. Yamauchi¹, K. Maeshima¹, M. Kobayashi¹,
A. Maeda², Y. Kurashima², H. Takagi², H. Minami¹, T. Kashiwagi^{1,3}

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 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、ドライ及びウェットエッチング[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 SiO_2 絶縁膜($2 \times 2\text{ mm}^2$, 厚さ 200 nm)を成膜した。最後に、上部電極として Cr, Au を成膜した。

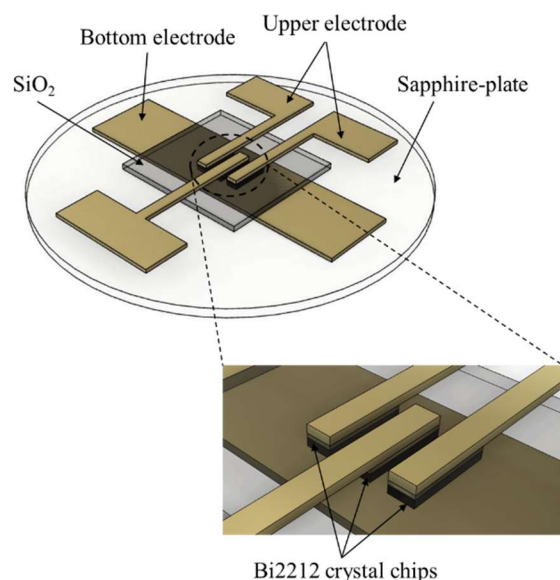


Fig.1 Schematic drawing of a developed structure

[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¹, 阪公大 IQMC²

三上千春¹, [○]小林未来¹, 榎本裕樹¹, 山内悠希¹, 葛見佳彦¹, 前島健太郎¹, 大坪健人¹,
南英俊¹, 柏木隆成^{1,2}

Univ. of Tsukuba¹, Osaka Metropolitan Univ.²

C. Mikami, [○]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。

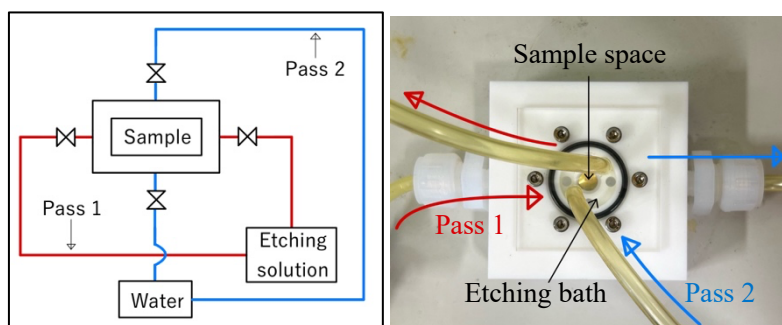


Fig. 1 A schemafic illustration showing a developed etching system and an optical photo of the system

[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¹, 富士電機株式会社², 阪公大 IQMC³

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

Univ. of Tsukuba¹, Fuji Electronic Co., Ltd², Osaka Metropolitan Univ.³

○Y. Yamauchi¹, Y. Enomoto¹, K. Maeshima¹, Y. Kuzumi¹, T. Otsubo¹, M. Kobayashi¹,
M. Shibata², J. Toyosaki², T. Takeuchi², H. Minami¹, T. Kashiwagi^{1,3}

E-mail: 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.

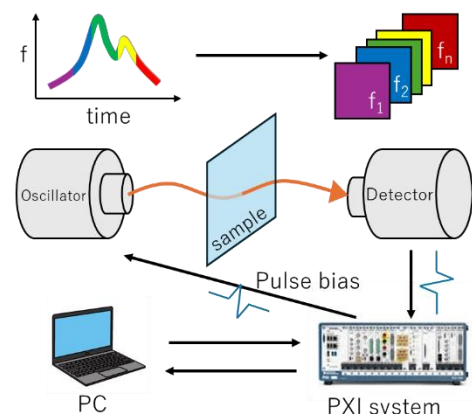


Fig.1 system simple diagram

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¹, 産総研²

○(M2) 宮本 将志¹, 小林 亮太¹, 辻本 学², 掛谷 一弘¹

Kyoto Univ.¹, AIST²

°Masashi Miyamoto¹, Ryota Kobayashi¹, Manabu Tsujimoto², Itsuhiro Kakeya¹

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¹。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²、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。

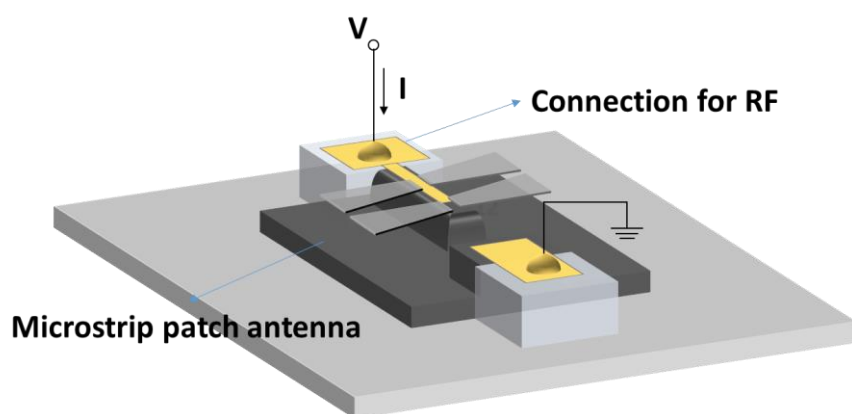


Fig. 1: Schematic diagram on the new JPE. The connection between the external circuit and the board was designed to apply RF voltage. Microstrip patch antennas are attached on top of the JPE to control the radiation characteristics of the device.

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¹, ○(D)小林 亮太¹, 掛谷 一弘¹

Graduate School of Engineering, Kyoto Univ.¹

E-mail: 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).

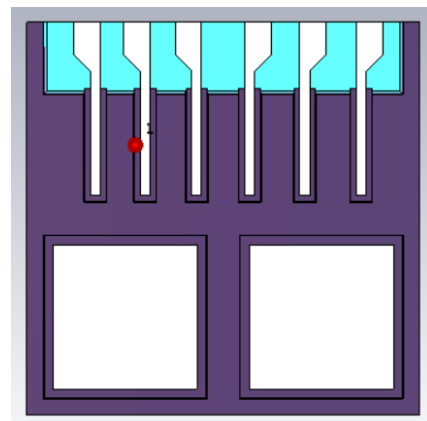


Fig. 1: A JPE modeled on an electromagnetic field simulator.

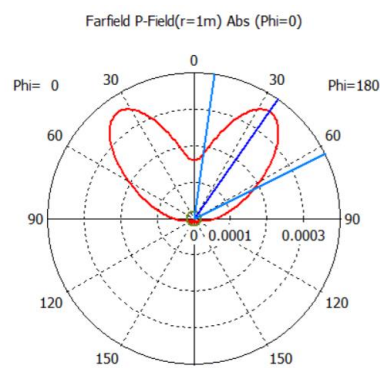


Fig. 2: A cross-sectional view of the radiation pattern expected from the structurally optimized device, operating at a frequency of 495 GHz. The cross-section is taken perpendicular to the longitudinal direction of the mesa.

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¹, 産総研², KEC 物構研 PF³, 阪公大 IQMC⁴

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

石田茂之², 永崎洋², 中尾裕則³, 南英俊¹, 柏木隆成^{1,4}

Univ. of Tsukuba¹, AIST², PF IMSS KEC³, Osaka Metropolitan Univ.⁴

○ K. Maeshima¹, M. Kobayashi¹, Y. Enomoto¹, Y. Yamauchi¹, Y. Kuzumi¹, T. Otsubo¹

S. Ishida², H. Eisaki², H. Nakao³, H. Minami¹, T. Kashiwagi^{1,4}

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 δ 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 δ 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 $80 \times 400 \times 5\text{--}10 \mu\text{m}^3$ 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).

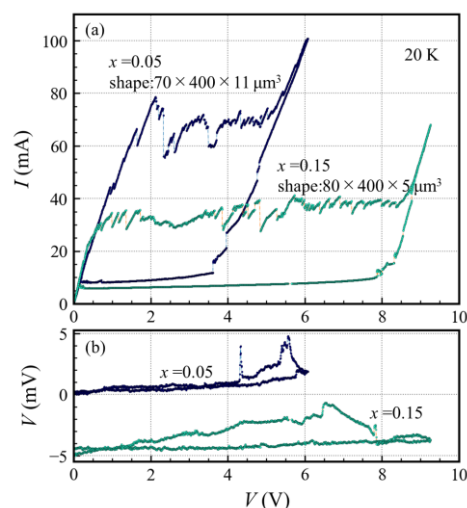


Fig.1 (a) Current-voltage characteristics and (b) detector response voltage plotted as a function of applied bias voltages for $x=0.05$ and 0.15

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¹, 阪公大 IQMC², KEK 物構研 PF³, 産総研⁴, NIMS⁵

○ 柏木隆成^{1,2}, 中尾裕則³, 前島健太郎¹, 小林未来¹, 榎本裕樹¹, 山内悠希¹,

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

Univ. of Tsukuba¹, Osaka Metropolitan Univ.², PF IMSS KEK³, AIST⁴, NIMS⁵

○ T. Kashiwagi^{1,2}, H. Nakao³, K. Maeshima¹, M. Kobayashi¹, Y. Enomoto¹, Y. Yamauchi¹,

Y. Kuzumi¹, T. Otsubo¹, S. Ishida⁴, H. Eisaki⁴, T. Mochiku⁵, H. Minami¹

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 δ 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 χ 及び 2θ 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°C 程度の比較的低温の熱処理でもチップ全体の χ 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).

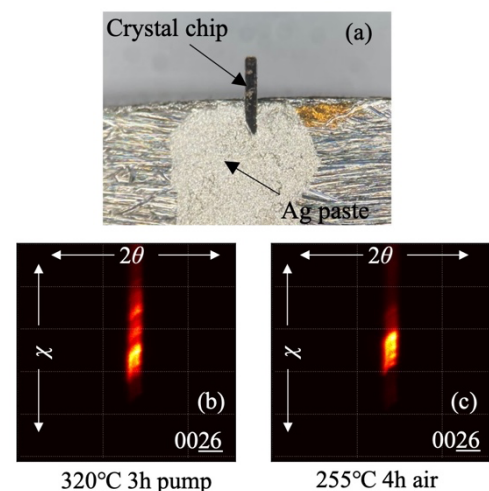


Fig.1 (a) Optical phot of a crystal chip. (b),(c) Diffraction intensities around 0026 for different annealing conditions.

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¹, 名古屋大学クリスタルエンジニアリング研究センター²

○吉川 淳朗¹, 富岡 隼也¹, 鷲谷 伊吹¹, 宮本 洸希¹, 青木 大知¹, 畑野 敬史¹, 生田 博志^{1,2}

Department of Materials Physics, Nagoya Univ.¹, Research Center for Crystalline Materials Engineering, Nagoya Univ.²

○Atsuro Yoshikawa¹, Shunya Tomioka¹, Ibuki Washitani¹, Koki Miyamoto¹, Daichi Aoki¹, Takafumi Hatano¹, Hiroshi Ikuta^{1,2}

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 μm 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 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^{line})は加工前の値(T_c^{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 MA/cm^2 以上の高い J_c を維持することが分かった。

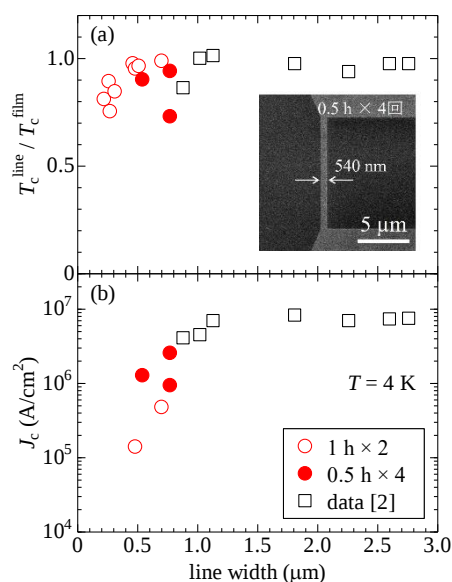


Fig. 1 The line width dependences of (a) normalized T_c and (b) J_c . The inset shows a SEM image.

[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 γ_p および、上部臨界磁場 H_{c2} の異方性 γ_{Hc2} の H 置換量依存性を調べてきた。その結果、 γ_p は H 置換量に依存して大きく変化する一方[1]、 γ_{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 γ_{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、 γ_{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 γ_{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 γ_{Hc2} の c 軸長依存性を示す。 γ_{Hc2} は c 軸長が $8.5 \text{ \AA}$ 程度を境に急峻に変化し、 $8.5 \text{ \AA}$ 以上の置換領域では γ_{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 γ_{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)

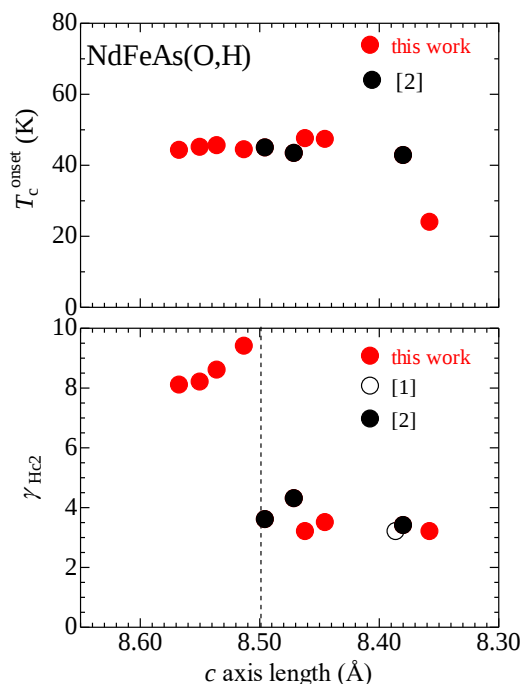
[3]S. Iimura *et al.*, *Nature Commun.* **3**, 943 (2012).

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/SrTiO₃ におけるネルンスト効果



Nernst effect in ultrathin FeSe/SrTiO₃

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

The Univ. of Tokyo¹, IMR, Tohoku Univ.², °(DC)Tomoki Kobayashi¹, Ryo Ogawa¹,

Tatsunori Okada², and Atsutaka Maeda¹

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

鉄カルコゲナイド超伝導体 FeSe は, SrTiO₃ 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^{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 α_{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 α_{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. α_{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.

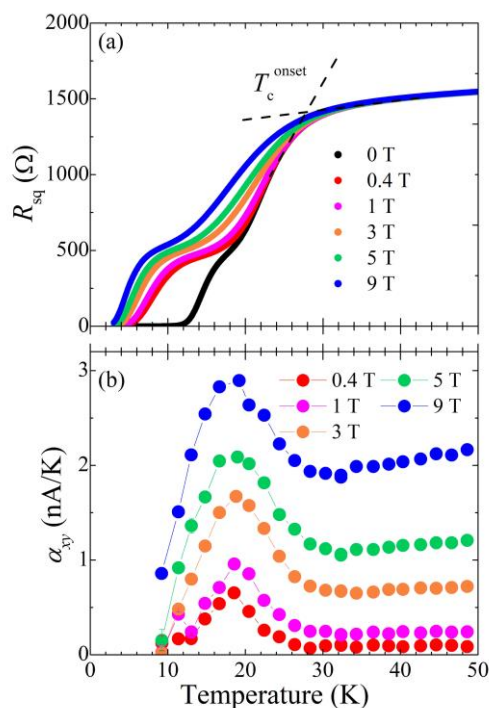


図 1. 0.4, 1, 3, 5, 9 T の磁場下の(a)シート抵抗の温度依存性と(b)横ペルチェ係数の温度依存性