

Oral presentation | 11 Superconductivity : 11.4 Analog applications and their related technologies

📅 Wed. Sep 18, 2024 1:00 PM - 5:15 PM JST | Wed. Sep 18, 2024 4:00 AM - 8:15 AM UTC 🏢 B5
(Exhibition Hall B)

[18p-B5-1~15] 11.4 Analog applications and their related technologies

Kenji Sakai(Doshisha Univ.), Masato Naruse(Saitama Univ.), Keita Sakuma(Yamanashi Univ.)

1:00 PM - 1:15 PM JST | 4:00 AM - 4:15 AM UTC

[18p-B5-1]

[The 56th Young Scientist Presentation Award Speech] High Efficiency Electric Resonance Coupling Wireless Power Transfer System Using High Quality Factor Superconducting Resonators

○Shunichi Takahashi¹, Keita Sakuma¹, Naoto Sekiya¹ (1.Yamanashi Univ.)

◆ Presentation by Applicant for JSAP Young Scientists Presentation Award

1:15 PM - 1:30 PM JST | 4:15 AM - 4:30 AM UTC

[18p-B5-2]

Gain evaluation of a superconducting parametric amplifier using the transmission characteristics of YBCO thin film coplanar waveguides

○Ibuki Takahashi¹, Shimakage Hisashi¹ (1.Ibaraki Univ.)

1:30 PM - 1:45 PM JST | 4:30 AM - 4:45 AM UTC

[18p-B5-3]

Study on film evaluation by a superconducting resonator with separated hollow structure

○Yuto Nakajo^{1,2}, Chiko Otani^{2,3}, Yuto Kamei², Ryota Ito^{2,3}, Satoru Mima⁴, Tohru Taino^{1,2}
(1.Saitama Univ., 2.RAP RIKEN, 3.Tohoku Univ., 4.NICT)

◆ Presentation by Applicant for JSAP Young Scientists Presentation Award

1:45 PM - 2:00 PM JST | 4:45 AM - 5:00 AM UTC

[18p-B5-4]

Investigation of Improved Power Handling Capability of Bandwidth Enhancement of Superconducting Antennas

○(M2)Kotaro Takeda¹, Keita Sakuma¹, Naoto Sekiya¹ (1.Yamanashi Univ.)

◆ Presentation by Applicant for JSAP Young Scientists Presentation Award

2:00 PM - 2:15 PM JST | 5:00 AM - 5:15 AM UTC

[18p-B5-5]

Simulation of pulse-current responses of a superconducting-nanowire three-terminal device

○Naoki Yasukawa¹, Yuki Yamanashi², Nobuyuki Yoshikawa², Taichiro Nishio¹, Yasunori Mawatari³ (1.Tokyo Univ. of Sci., 2.Yokohama National Univ., 3.AIST)

2:30 PM - 2:45 PM JST | 5:30 AM - 5:45 AM UTC

[18p-B5-6]

Novel way of a current supply for quantum Josephson voltage standard

○Hirotake Yamamori¹, Daiki Matsumaru¹, Michitaka Maruyama¹, Chiharu Urano¹, Nobu-hisa Kaneko¹ (1.AIST)

2:45 PM - 3:00 PM JST | 5:45 AM - 6:00 AM UTC

[18p-B5-7]

Room Temperature Bonding with In/Nb Bumps

○(M1)Shoei Ishiyama^{1,2}, Masahisa Fujino², Hiroshi Nakagawa², Yuuki Araga², Katsuya Kikuchi², Tohru Taino¹ (1.Saitama Univ., 2.AIST)

3:00 PM - 3:15 PM JST | 6:00 AM - 6:15 AM UTC

[18p-B5-8]

Uniformity of Bonding Load by Modifying Nb Bump Arrangement for 3D Mounted Superconductor Devices

○Mizuki Homma¹, Masahisa Fujino², Hiroshi Nakagawa², Yuuki Araga², Katsuya Kikuchi², Tohru Taino¹ (1.Saitama Univ., 2.AIST)

3:15 PM - 3:30 PM JST | 6:15 AM - 6:30 AM UTC

[18p-B5-9]

Study on Buffer Layer of STJ Detector for Substrate Noise Reduction

○(M2)Yu Nakamura^{1,2}, Tsuyoshi Noguchi^{1,2}, Go Fujii¹, Shigetomo Shiki¹, Tohru Taino² (1.AIST, 2.Saitama Univ.)

3:30 PM - 3:45 PM JST | 6:30 AM - 6:45 AM UTC

[18p-B5-10]

Development of Microwave Kinetic Inductance Detector with Lithium Niobate substrate

○(D)Ryota Ito^{1,2}, Tohru Taino³, Satoru Mima⁴, Yuto Kamei^{2,5}, Chiko Otani^{1,2} (1.Tohoku Univ., 2.RAP, RIKEN, 3.Saitama Univ., 4.NICT, 5.RCNS, Tohoku Univ.)

◆ Presentation by Applicant for JSAP Young Scientists Presentation Award

4:00 PM - 4:15 PM JST | 7:00 AM - 7:15 AM UTC

[18p-B5-11]

Process and measurement of Optical Transition-Edge Sensors with Apertures

○(D)Nao Kominato^{1,2}, Hattori Kaori^{1,3,4}, Takahiro Kikuchi¹, Tetsuya Tsuruta¹, Takeshi Jodoi^{1,5}, Daiji Fukuda^{1,4} (1.AIST, 2.Rikkyo Univ., 3.KEK QUP, 4.OPERAND-OIL, 5.UToyko)

◆ English Presentation

4:15 PM - 4:30 PM JST | 7:15 AM - 7:30 AM UTC

[18p-B5-12]

Two-level System Loss of SiO₂ Measured at 4 K with Millimeter Superconducting Thin-film Resonators

○Wenlei Shan¹, Shohei Ezaki¹ (1.NAOJ)

4:30 PM - 4:45 PM JST | 7:30 AM - 7:45 AM UTC

[18p-B5-13]

150 GHz Josephson array oscillator for SIS-mixer-based amplifier

○Akira Kawakami¹, Yosuke Murayama², Yoshinori Uzawa^{2,3}, Kazumasa Makise^{2,3,4}, Sho Masui², Takafumi Kojima^{2,3}, Akihira Miyachi², Wenlei Shan², Shohei Ezaki² (1.NICT, 2.NAOJ, 3.SOKENDAI, 4.AIST)

4:45 PM - 5:00 PM JST | 7:45 AM - 8:00 AM UTC

[18p-B5-14]

Evaluation of a 150 GHz Josephson Array Oscillator Using Balanced SIS Mixers

○Yosuke Murayama¹, Akira Kawakami², Yoshinori Uzawa^{1,3}, Wenlei Shan^{1,3}, Kazumasa Makise^{1,3,4}, Sho Masui¹, Takafumi Kojima^{1,3}, Akihira Miyachi¹, Ezaki Shohei¹ (1.NAOJ, 2.NICT, 3.SOKENDAI, 4.AIST)

5:00 PM - 5:15 PM JST | 8:00 AM - 8:15 AM UTC

[18p-B5-15]

Evaluation of the superconducting wide strip photon detector for 2 μm wavelength band

○Masahiro Yabuno¹, Fumihiro China¹, Hirotaka Terai¹, Shigehito Miki¹ (1.NICT)

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¹ ○(M2) 高橋 俊一¹, 作間 啓太¹, 關谷 尚人¹

Yamanashi Univ.¹, ○Shunichi Takahashi¹, Keita Sakuma¹, Naoto Sekiya¹

E-mail: 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)

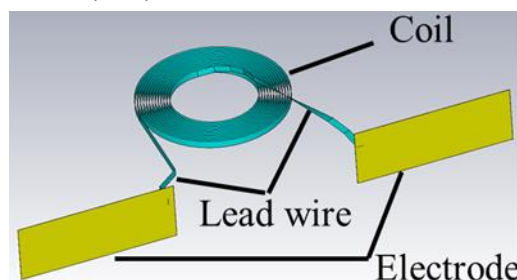


Fig. 1. Resonator structure

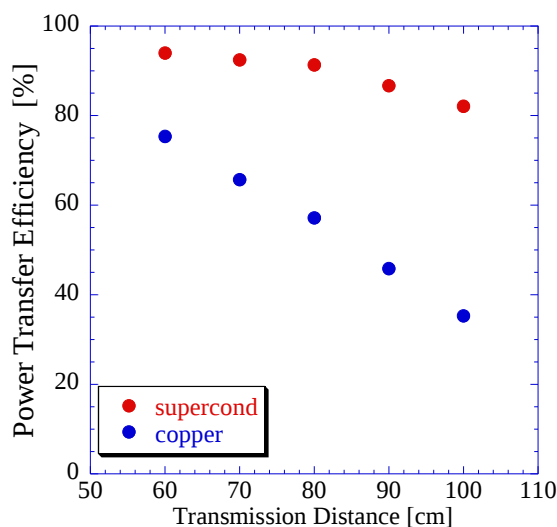


Fig. 2. Measurement result of power transfer efficiency versus transmission distance

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⁽¹⁾。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 μH 、3.47 mA、膜厚 50 nm で 0.144 μH 、62.5 mA、膜厚 200 nm で 0.0585 μH 、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。

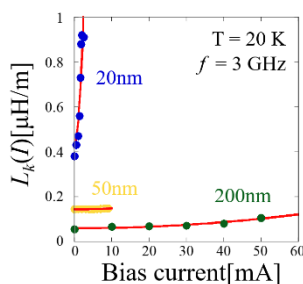


Fig.1 Bias current dependence of kinetic inductance

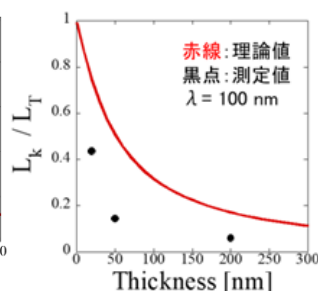


Fig.2 Film thickness dependence of L_k / L_T

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⁽²⁾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 μm 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⁽²⁾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 μm 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¹, 理研 RAP², 東北大理³, NICT⁴ ○(M2) 中城 悠翔^{1,2}, 大谷 知行^{2,3}, 亀井 雄斗²,

(D) 伊藤 凌太^{2,3}, 美馬 覚⁴, 田井野 徹^{1,2}

Saitama Univ.¹, RAP RIKEN², Tohoku Univ.³, NICT⁴ ○Yuto Nakajo^{1,2}, Chiko Otani^{2,3}, Yuto Kamai²,

Ryota Ito^{2,3}, Satoru Mima⁴, Tohru Taino^{1,2}

E-mail: 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。

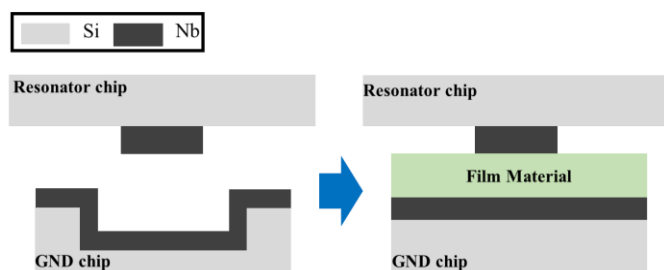


Fig.1 Schematic of the proposed device structure

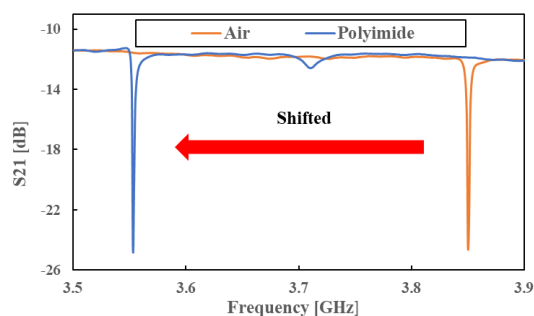


Fig.2 Example of frequency shift of a resonator.

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¹ ○(M2)武田 航太郎¹, 作間 啓太¹, 關谷 尚人¹

Yamanashi Univ.¹, ○Kotaro Takeda¹, Keita Sakuma¹, Sekiya Naoto¹

E-mail: 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て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か検討した。

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 3×10^{11} S/mとし、基板は50 mm角のr-Al₂O₃（比誘電率9.9、誘電正接 1×10^{-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

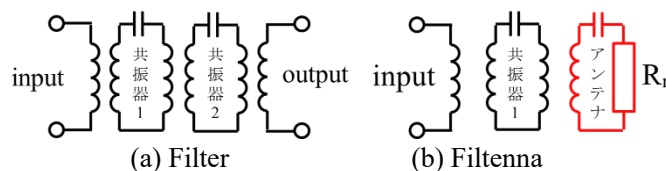


Fig.1 Equivalent circuit of filter and filtenna

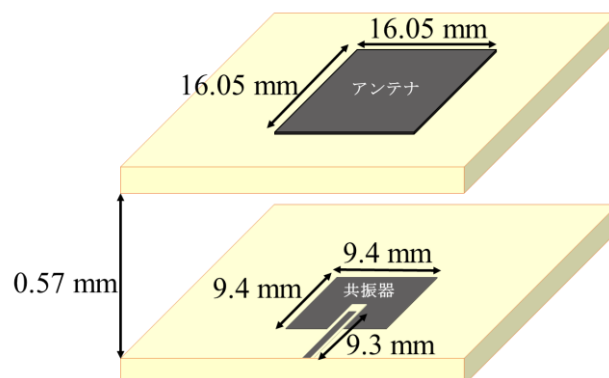


Fig.2 Image of filtenna

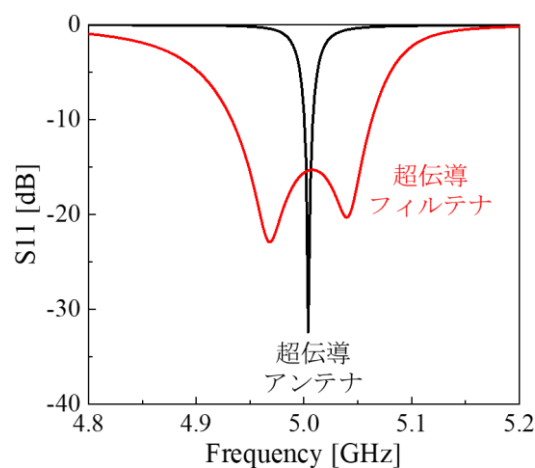


Fig.3 Frequency response of superconducting antenna and superconducting filtenna

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¹, 横国大², 産総研³ °安川 直輝¹, 山梨裕希², 吉川信行², 西尾 太一郎¹, 馬渡 康徳³

Tokyo Univ. of Science¹, Yokohama National Univ.², AIST³,

°Naoki Yasukawa¹, Yuki Yamanashi², Nobuyuki Yoshikawa², Taichiro Nishio¹, and Yasunori Mawatari³

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、 $I_{\text{bias}} = 75 \mu\text{A}$ 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 $t = 0 \text{ ps}$ でパルスが入力されたのち、チャネル電圧が発生し、 $t = 18 \text{ ps}$ 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 36th International Symposium on Superconductivity (ISS 2023) ED-3-4.

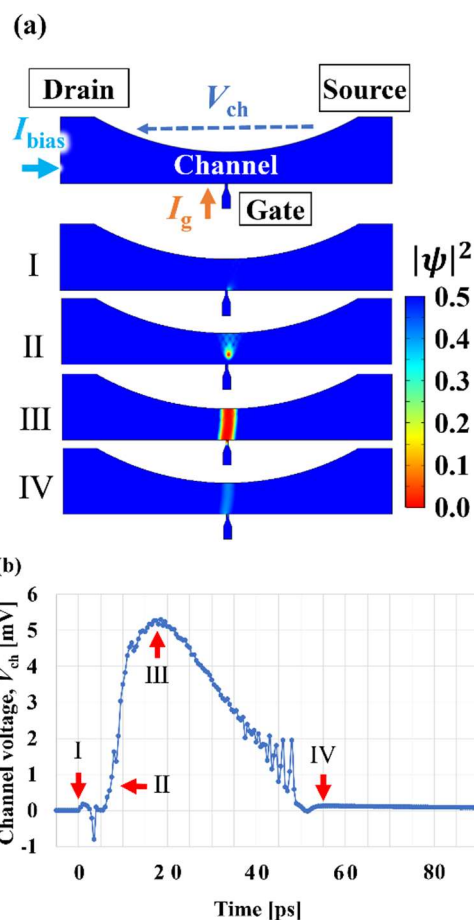


Fig. 1. (a) Evolution of the superconducting region (blue) and the normal region (red) in the nTron. (b) Channel voltage characteristics of the nTron.

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）

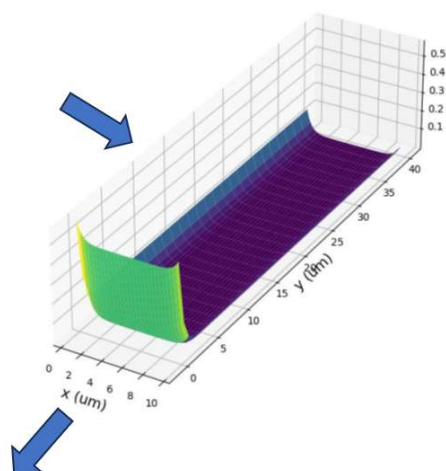


図1、長いジョセフソン接合の電流分布の計算結果、サイズ $10 \mu\text{m} \times 40 \mu\text{m}$

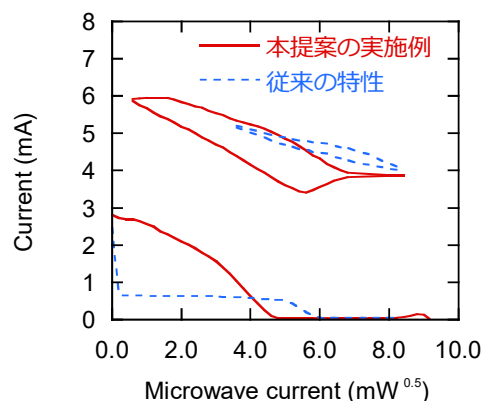


図2 本手法の実験結果
1024 接合アレーのシャピロステップ

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¹, 産総研² ○(M1) 石山 照瑛^{1,2}, 藤野 真久², 仲川 博², 荒賀 佑樹²,

菊地 克弥², 田井野 徹²,

Saitama Univ.¹, AIST.², °S. Ishiyama^{1,2}, M. Fujino², H. Nakagawa², Y. Araga²,

K. Kikuchi², and T. Taino¹

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 μm 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 μm 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

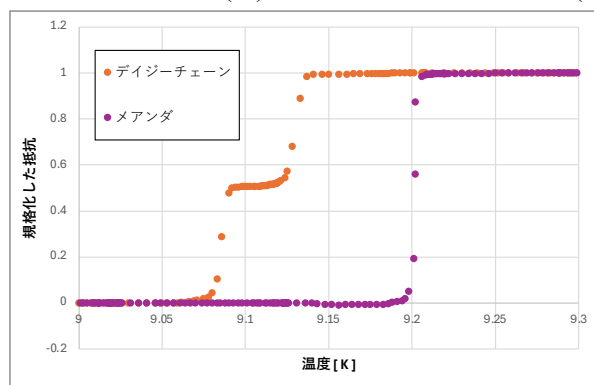


図 1 超伝導転移温度付近の立ち上がりの比較

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

[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

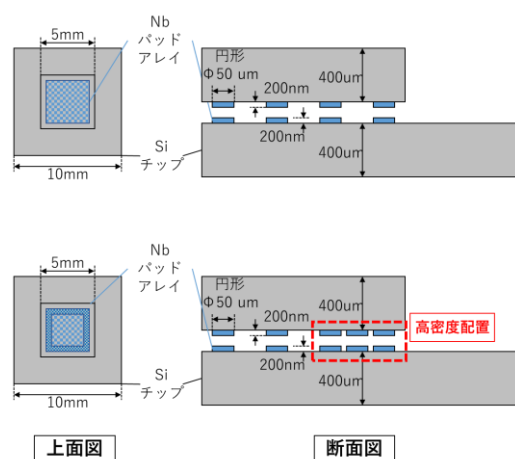
埼玉大院¹, 産総研² °本間 瑞己¹, 藤野 真久², 仲川 博², 荒賀 佑樹²,
菊地 克弥², 田井野 徹¹

Saitama Univ.¹, AIST², °M. Homma¹, M. Fujino², H. Nakagawa², Y. Araga²,
K. Kikuchi², and T. Taino²

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¹, 埼玉大² ○(M2)中村 雄^{1,2}, 野口 剛志^{1,2}, 藤井 剛¹, 志岐 成友¹, 田井野 徹²

AIST¹, Saitama Univ², °Y.Nakamura^{1,2}, T.Noguchi^{1,2}, G.Fujii¹, S.Shiki¹, T.Taino²

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 α 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.

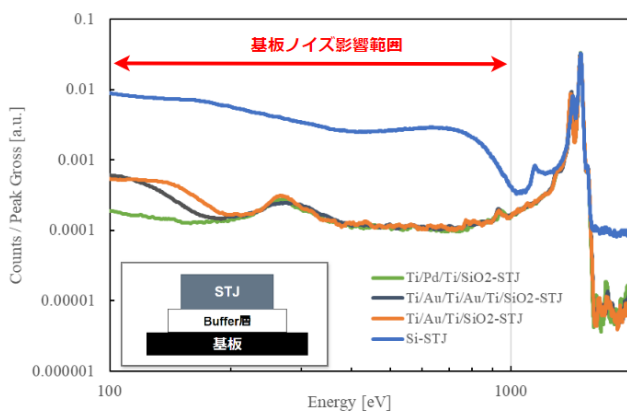


Fig 1. X-ray Spectrum (Al-K α)

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¹, 理研 RAP², 埼玉大院理工³, NICT⁴, 東北大 RCNS⁵

○(D)伊藤 凌太^{1,2}, 田井野 徹³, 美馬 寛⁴, 亀井 雄斗^{2,5}, 大谷 知行^{1,2}

Tohoku Univ.¹, RAP, RIKEN², Saitama Univ.³, NICT⁴, RCNS, Tohoku Univ.⁵

○(D)Ryota Ito^{1,2}, Tohru Taino³, Satoru Mima⁴, Yuto Kamei^{2,5} and Chiko Otani^{1,2}

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(Al_2O_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(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 Al_2O_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

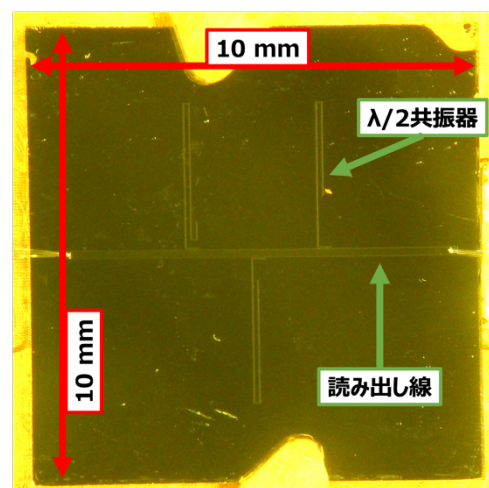


Fig.1 Appearance of the fabricated device on Lithium Niobate substrate.

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¹, 立教大², 高エネ研 QUP³, 産総研・東大オペランド計測 OIL⁴, 東大工⁵

○(D)小湊 菜央^{1,2}, 服部 香里^{1,3,4}, 菊地貴大¹, 鶴田哲也¹, 上土井猛^{1,5}, 福田 大治^{1,4}

AIST¹, Rikkyo Univ.², KEK QUP³, OPERAND-OIL⁴, UTokyo⁵

○Nao Kominato^{1,2}, Kaori Hattori^{1,3,4}, Takahiro Kikuchi¹, Tetsuya Tsuruta¹,

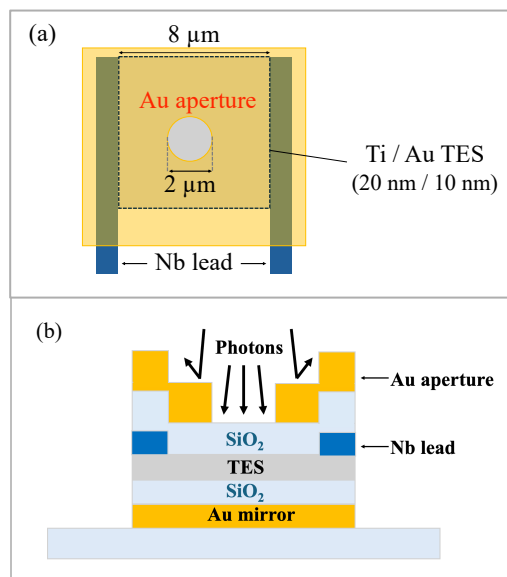
Daiji Fukuda^{1,4}

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移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 SiO₂ の2準位系損失の測定

Two-level System Loss of SiO₂ Measured at 4 K with Millimeter Superconducting Thin-film Resonators

国立天文台¹, ○単 文磊¹, 江崎 翔平¹

NAOJ¹, Wenlei Shan¹, Shohei Ezaki¹

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 SiO₂ 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.

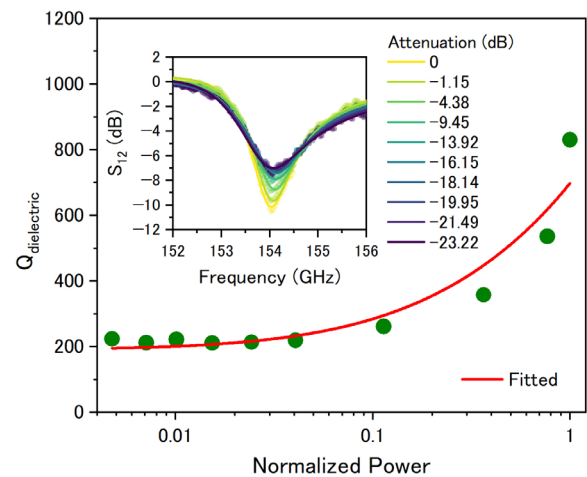


Fig. 1. Dielectric Q of SiO₂ measured as a function of signal power with a microstrip resonator under an ambient temperature of 3.3 K. The SiO₂, as the dielectric layer of microstrip line, was fabricated with PECVD. The signal power is normalized by the maximum output power of the signal source, which is about 3 μW. 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 ω 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¹, 国立天文台², 総研大³, 産総研⁴ ○川上 彰¹, 村山洋佑², 鶴澤佳徳^{2,3,4}, 増井 翔², 小嶋崇文^{2,3}, 宮地晃平², Shan Wenlei², 江崎翔平²

NICT¹, NAOJ², SOKENDAI³, AIST⁴ ○A. Kawakami¹, Y. Murayama², Y. Uzawa^{2,3}, K. Makise^{2,3,4}, S. Masui², T. Kojima^{2,3}, A. Miyachi², W. Shan², S. Ezaki²

E-mail: 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/cm²)、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 1×0.5 mm² 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).

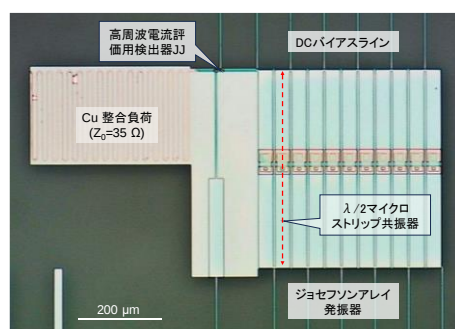
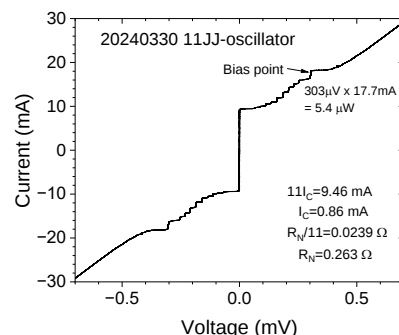
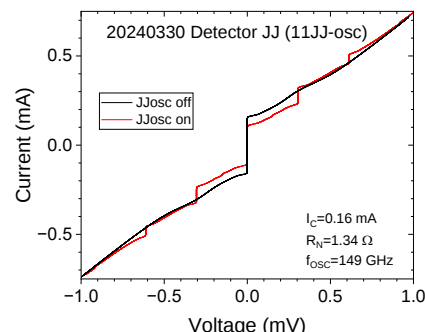


図 1 発振出力評価用 150GHz 帯ジョセフソンアレイ発振器の顕微鏡写真



(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¹, 情通機構², 総研大³, 産総研⁴ ○村山洋佑¹, 川上 彰², 鶴澤佳徳^{1,3}, Shan Wenlei^{1,3},
牧瀬圭正^{1,3,4}, 増井 翔¹, 小嶋崇文^{1,3}, 宮地晃平¹, 江崎翔平¹
NAOJ¹, NICT², SOKENDAI³, AIST⁴ ○Y. Murayama¹, A. Kawakami², Y. Uzawa^{1,3}, W. Shan¹,
K. Makise^{1,3,4}, S. Masui¹, T. Kojima^{1,3}, A. Miyachi¹, S. Ezaki¹

E-mail: 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 ± 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。

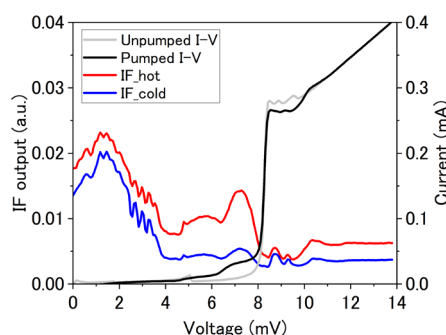


Fig. 1 Balanced SIS mixer I-V curve and IF outputs pumped by the 150-GHz oscillator

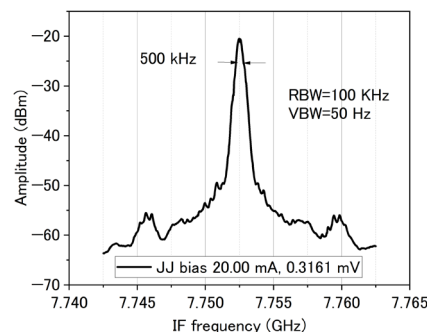


Fig. 2 LO spectrum converted in IF frequencies
($f_{RF} = 139$ GHz)

波長 2 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

Evaluation of the superconducting wide strip photon detector for 2 μm 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, Fumihito China, Hirotaka 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 μm 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 μm 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 μm 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 μm 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 μm 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 μm 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 μm 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 μm 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 μm 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 μm 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 μm 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。

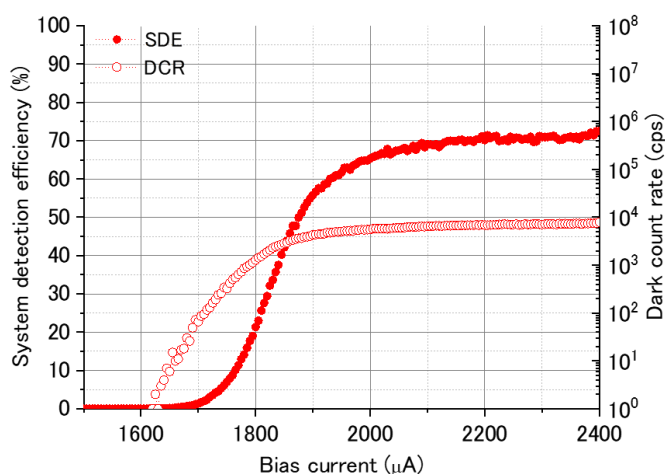


Fig. 1 Bias current dependences of the system detection efficiency and dark count rate at 2 μm wavelength.

(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).