بیست و پنجمین کنفرانس اپتیک و
فوتونیک ایران و یازدهمین کنفرانس
مهندسی و فناوری فوتونیک ایران،
دانشگاه شیراز،
شیراز، ایران.
۹-۱۱ بهمن ۱۳۹۷

فراماده تراهرتز کوک‌پذیر بر مبنای ابررسانای دما بالای $Bi_2Sr_2CaCu_2O_{8+\delta}$

سمانه کلهر[۱]، کاوه دلفان‌آذری[۲و۳] و مجید قناعت شعار[۱]

۱آزمایشگاه نانو مغناطیس و نیم رساناهای مغناطیسی، پژوهشکده لیزر و پلاسما، دانشگاه شهید بهشتی، تهران

۲ گروه مهندسی برق، دانشکده مهندسی، دانشگاه کمبریج، کمبریج، انگلستان

۳ آزمایشگاه کاوندیش، دانشکده فیزیک، دانشگاه کمبریج، کمبریج، انگلستان

samane.kalhor@gmail.com، kd398@cam.ac.uk، m-ghanaat@sbu.ac.ir

چکیده – در این مقاله ما پاسخ رزونانسی تراهرتز یک فراماده بر مبنای ابررسانای دما بالای $Bi_2Sr_2CaCu_2O_{8+\delta}$ (بیسکو) را بررسی کردیم. ما ضریب گذردهی صفحه *a-b* و امپدانس سطحی لایه نازک بیسکوِ زیرآلاییده را به منظور مطالعه پاسخ رزوناتورهای حلقه شکافته (SRR) بیسکو محاسبه کردیم. رزونانس در منحنی ضریب عبور ماده به شدت به دما وابسته است و قویترین رزونانس در پایینترین دما مشاهده شد. با افزایش دما رزونانس به فرکانس‌های پایینتر شیفت و همزمان قدرت رزونانس کاهش پیدا می‌کند. با افزایش بیشتر دما، فرکانس رزونانس به سمت فرکانس های بالاتر برمی گردد و همچنان قدرت آن کم می‌شود. سرانجام در بالای دمای گذار رزونانس کاملا از بین می‌رود.

کلید واژه- ابررسانای دما بالا، ادوات تراهرتز، فراماده، فوتونیک ابررسانا، لایه نازک بیسکو

Tunable THz metamaterial based on underdoped high-T_c superconducting $Bi_2Sr_2CaCu_2O_{8+\delta}$

Samane Kalhor[1], Kaveh Delfanazari[2,3], Majid Ghanaatshoar[1]

[1]Laser and Plasma Research Institute, Shahid Beheshti University, Evin, Tehran, Iran

[2]Electrical Engineering Division, Engineering Department, University of Cambridge, Cambridge CB3 0FA, U.K.
[3]Cavendish Laboratory, University of Cambridge, Cambridge CB3 0HE, U.K.
samane.kalhor@gmail.com, kd398@cam.ac.uk, m-ghanaat@sbu.ac.ir

Abstract- In this paper, we report on the terahertz (THz) resonance response of a metamaterial based on high-temperature superconducting $Bi_2Sr_2CaCu_2O_{8+\delta}$ (BSCCO). We calculate the *a-b* plane complex permittivity and surface impedance of an underdoped BSCCO thin film, to study the electromagnetic response of the BSCCO split ring resonators (SRR) as a function of temperature. The dip in transmission resonance is found to be strongly temperature dependent with strongest resonance response at the lowest temperature. As temperature increases the transmission dip shifts towards lower frequencies at the same time with a decrease in resonance strength. The resonance frequency moves back to higher frequencies at temperatures close to the superconducting transition temperature (T_c) but the resonance strength continues to decrease. The dip in transmission resonance fades up completely above T_c.

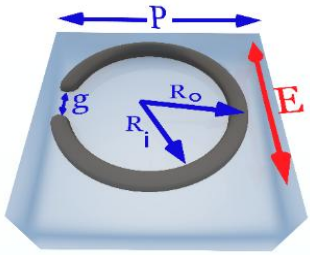
Keywords: BSCCO thin film, high-T_c superconductors, metamaterials, superconducting photonics, terahertz devices

این مقاله در صورتی دارای اعتبار است که در سایت www.opsi.ir قابل دسترسی باشد.

[Downloaded from opsi.ir on 2026-02-05]

مقدمه

بازه فرکانسی بین ۱۰۰ گیگاهرتز تا ۱۰ تراهرتز را به دلیل کمبود ادوات کاربردی در این بازه، گاف تراهرتزی می‌نامند. تراهرتز کاربردهای گسترده‌ای در حوزه‌های گوناگونی همچون تصویربرداری زیستی، تست‌های غیرمخرب و ارتباطات دارد [۱]. کاربردهای بدیع فراماده راهی برای بستن این گاف را پیشنهاد می‌دهد [۲-۳].



شکل ۱: طرحواره سلول واحد فراماده بیسکو با شعاع داخلی μm ۳۵= R_i ، شعاع خارجی μm ۴۰= R_o اندازه گاف μm ۱= g و تناوب μm ۹۰= P بر روی زیرلایه سفایر. قطبش نور تابیده شده موازی جهت گاف انتخاب شده است.

در فرامادههای مبتنی بر فلزات، کوک‌پذیری رزونانسی بوسیله مجتمع سازی با مواد دیگر انجام می‌شود اما فرامادههای ابررسانا به صورت ذاتی کوک‌پذیر هستند و رزونانس آنها بوسیله دما، میدان مغناطیسی، جریان، نور و غیره می‌تواند تغییر یابد [۴-۵]. تمام کارهای پیشین در فرامادههای مبتنی بر ابررسانا دما بالا بر روی ایتریوم باریوم مس‌اکسید (YBCO) به عنوان ماده ای با بی‌نظمی ضعیف تمرکز داشته‌اند [۵-۶] . در این مقاله، ما به بررسی پاسخ تراهرتزی فراماده مبتنی بر رزوناتورهای حلقه شکافته (SRR) ابررسانای دما بالای $Bi_2Sr_2CaCu_2O_{8+\delta}$ (بیسکو) پرداختیم. بیسکو یکی از مهمترین ابررساناهای برپایه مس اکسید است و ساختار بلوری پروسکایت با رسانش بزرگتر در صفحه *a-b* را دارد. هر سلول واحد به عنوان یک پیوند جوزفسون ذاتی (IJJ) عمل می‌کند. بیسکو پایه اساسی فرستنده‌های ابررسانای تراهرتز کوانتومی پیوسته و همدوست است [۳]،[۷-۱۴]. در اینجا ما به بحث درباره کوک‌پذیری دمایی رزونانس ضریب عبور فراماده بیسکوِ زیرآلاییده با دمای گذار ۷۱ کلوین می‌پردازیم. این مطالعه در امتداد کار پیشین ما بر روی فراماده ابررسانای بیسکوِ اندکی زیرآلاییده با دمای گذار ۸۵ کلوین [۱۵] است. ما ضریب گذردهی و امپدانس سطحی مختلط لایه نازک بیسکو زیرآلاییده به عنوان ماده فراماده را مورد بررسی قرار دادیم. نتایج این مقاله به همراه کار پیشین ما [۱۵] می‌تواند در فهم بهتر اثر دما و آلایش بر روی ویژگی های اپتیکی و الکترودینامیک فرا-ادوات های تراهرتز ابررسانا بیسکو مفید واقع شود.

نتایج و بحث

طرحواره SRR بیسکو با ضخامت μm ۰/۲، شعاع داخلی μm ۳۵= R_i، شعاع خارجی μm ۴۰= R_o اندازه گاف μm ۱= g و تناوب μm ۹۰= P بر روی زیرلایه سفایر در شکل ۱ نشان داده شده است. این مقادیر برای فراماده بیسکو اندکی زیرآلاییده در دمای ۱۰ کلوین بهینه شده‌اند تا بیشترین ضریب کیفیت رزونانس ممکن بدست بیاید [۱۵]. ضریب گذردهی مختلط وابسته به دمای بیسکو مسئول کوک‌پذیری دمایی این فراماده است. ما رسانش مختلط صفحه *a-b* ($\sigma=\sigma_1+i\sigma_2$) بیسکو زیرآلاییده را از اندازه‌گیری طیف سنج زمانی تراهرتز استخراج کردیم [۱۶] و ضریب گذردهی مختلط در فرکانس ۰/۱ تا ۰/۸ تراهرتز و بازه دمایی ۱۰ تا ۲۰۰ کلوین را بوسیله معادله زیر محاسبه کردیم.

$$\varepsilon=\varepsilon_1+i\varepsilon_2=\left(\varepsilon_\infty-\frac{\sigma_2}{\omega\varepsilon_0}\right)+i\left(\frac{\sigma_1}{\omega\varepsilon_0}\right) \qquad (۱)$$

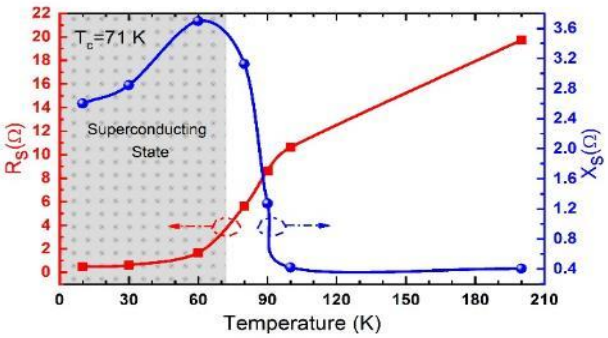
که در آن ω و ε_0 به ترتیب فرکانس زاویه ای و ثابت دی الکتریک خلاء هستند. ε_∞ ضریب گذردهی باقیمانده را نشان می‌دهد و اثری در زیر ۳۰ تراهرتز ندارد [۱۵].

امپدانس سطحی لایه نازک بیسکو همچنین در کوک‌پذیری دمایی رزونانس نقش دارد. بنابراین، ما مقاومت سطحی (خط قرمز) و رآکتانس سطحی (خط آبی)

این مقاله در صورتی دارای اعتبار است که در سایت www.opsi.ir قابل دسترسی باشد.

[Downloaded from opsi.ir on 2026-02-05]

را برای لایه نازک بیسکو زیرآلاییده با ضخامت ۰/۲ میکرومتر در شکل ۲ برای فرکانس ۰/۵ تراهرتز نشان دادیم.

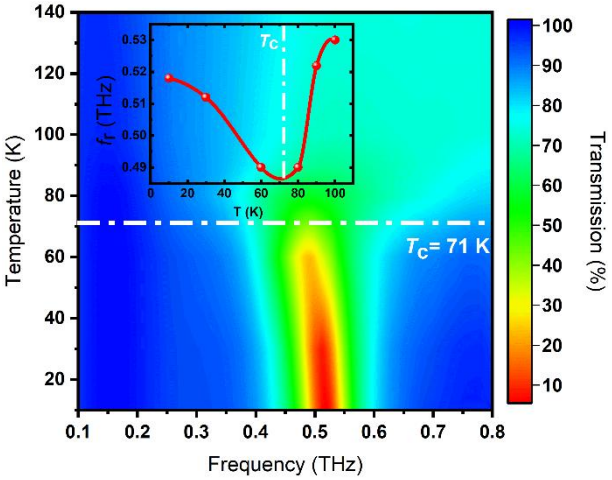


شکل ۲: وابستگی دمایی مقاومت سطحی (خط قرمز) و رآکتانس سطحی (خط آبی) لایه نازک بیسکو زیرآلاییده در f=۰/۵ THz.

امپدانس سطحی مختلط یک لایه نازک رسانا با ضخامت d از فرمول زیر محاسبه می‌شود:

$$Z_s = R_s + iX_s = \sqrt{i\omega\mu_0 / 2\sigma}\,\coth(d\sqrt{i\omega\mu_0\sigma}) \qquad (۲)$$

که R_s، X_s و μ_0 به ترتیب مقامت سطحی، رآکتانس سطحی و تراوایی خلاء هستند. کاهش دما منجر به کاهش مقاومت سطحی می‌شود. کمینه ضریب عبور SRRها در فرکانس رزونانس متناسب با مقاومت سطحی ماده رزوناتور است [۱۵]. بنابراین ما انتظارِ کمینه ضریب عبور کمتر را برای دماهای پایینتر داریم. به علاوه خودالقایی ماده متناسب با رآکتانس آن است و در شیفت رزونانسی همانطور که در معادلات (۵) و (۱۰) مرجع [۱۵] نشان داده شده، مشارکت می‌کند. شکل ۲ نشان می‌دهد که رآکتانس ابتدا با دما در فاز ابررسانا افزایش می‌یابد. سپس شروع به کاهش می‌کند. بنابراین، یک شیفت فرکانسی آبی پس از یک شیفت فرکانسی قرمز مورد انتظار خواهد بود. ما ضریب گذردهی مختلط بیسکو را برای محاسبات پاسخ الکترومغناطیسی فراماده استفاده کردیم و جهت قطبش موج تراهرتز تابیده شده را موازی گاف همانطور که در شکل ۱ با محور قرمز نشان دادیم فرض کردیم. موج تابیده شده عمود بر صفحه *a-b* بیسکو است. ما ضریب عبور فراماده را به ضریب عبور سفایر بدون فراماده نرمال کرده‌ایم تا اثر پاسخ زیرلایه حذف شود.



شکل ۳: منحنی ضریب عبور فراماده بر حسب فرکانس و دما. داخل نمودار منحنی فرکانس رزونانس ماده بر حسب دما را نشان می‌دهد.

در شکل ۳ منحنی ضریب عبور فراماده را بر حسب فرکانس و دما نشان دادیم. رزونانس با ضریب عبور کمتر (رنگ قرمز) قویترین پاسخ را دارد. نتایج نشان می‌دهد که رزونانس در دمای ۱۰ کلوین کمترین کمینه ضریب عبور را دارد و کمینه ضریب عبور با افزایش دما افزایش می‌یابد که با افزایش مقاومت در تطابق است. ضریب عبور در فرکانس رزونانس کمینه است. منحنی داخلی شکل ۳ نشان می‌دهد که فرکانس رزونانس با افزایش دما ابتدا کاهش و سپس افزایش می‌یابد که در تطابق با روند رآکتانس بیسکو است. بیشینه کوک‌پذیری فرکانسی نسبی $(f_{max} - f_{min})/f_{max}$ این فراماده، ۷/۵ درصد است که f_{max} و f_{min} فرکانس رزونانس کمینه و بیشینه است. این مقدار از کوک‌پذیری فرکانسی نسبی فراماده بیسکوِ اندکی زیرآلاییده بیشتر است [۱۵]. این تفاوت ناشی از رسانندگی متفاوت این دو آلایش است.

نتیجه‌گیری

ما به توصیف رفتار فرکانسی شبه ماده بر مبنای ابررسانا دما بالای بیسکو زیرآلاییده پرداختیم و نشان دادیم که

این مقاله در صورتی دارای اعتبار است که در سایت www.opsi.ir قابل دسترسی باشد.

[Downloaded from opsi.ir on 2026-02-05]

ضریب عبور و فرکانس رزونانس SRRها می‌تواند توسط دما کنترل شود. از ضریب گذردهی مختلط ماده و امپدانس سطحی مختلط به منظور توصیف رفتار دمایی کوک‌پذیری ماده استفاده کردیم. این شبه ماده می‌تواند در توسعه ادوات فعال و غیرفعال و پر کردن گاف تراهرتزی کمک شایانی کند.

مرجع‌ها

[1] M. Tonouchi, "Cutting-edge terahertz technology," *Nat. Photonics*, vol. 1, no. 2, pp. 97–105, 2007.

[2] K. Delfanazari, H. Asai, M. Tsujimoto, T. Kashiwagi, T. Kitamura, K. Ishida, C. Watanabe, S. Sekimoto, T. Yamamoto, H. Minami, M. Tachiki, R.A. Klemm, T. Hattori, and K. Kadowaki, "Terahertz oscillating devices based upon the intrinsic Josephson junctions in a high temperature superconductor," *J. Infrared, Millimeter, Terahertz Waves*, vol. 35, no. 1, pp. 131–146, 2014.

[3] V. Savinov, K. Delfanazari, V. A. Fedotov, and N. I. Zheludev, "Giant nonlinearity in a superconducting sub-terahertz metamaterial," *Appl. Phys. Lett.*, vol. 108, p. 101107, 2016.

[4] J. Gu, R. Singh, Z. Tian, W. Cao, Q. Xing, M. He, J.W. Zhang, J. Han, H.T. Chen, and W. Zhang, "Terahertz superconductor metamaterial," *Appl. Phys. Lett.*, vol. 97, no. 7, pp. 3–6, 2010.

[5] B. Jin, C. Zhang, S. Engelbrecht, A. Pimenov, J. Wu, Q. Xu, C. Cao, J. Chen, W. Xu, L. Kang, and P. Wu, "Low loss and magnetic field-tunable superconducting terahertz metamaterial," *Opt. Express*, vol. 18, no. 16, pp. 17504–17509, 2010.

[6] T. Chen, H. Yang, R. Singh, J.F. O'Hara, A.K. Azad, S.A. Trugman, Q.X. Jia, and A.J. Taylor, "Tuning the resonance in high-temperature superconducting terahertz metamaterials," *Phys. Rev. Lett.*, vol. 105, no. 24, pp. 1–4, 2010.

[7] U. Welp, K. Kadowaki, and R. Kleiner, "Superconducting emitters of THz radiation," *Nat. Photonics*, vol. 7, no. 9, pp. 702–710, 2013.

[8] K. Delfanazari, H. Asai, M. Tsujimoto, T. Kashiwagi, T. Kitamura, T. Yamamoto, M. Sawamura, K. Ishida, C. Watanabe, S. Sekimoto, H. Minami, M. Tachiki, R.A. Klemm, T. Hattori, and K. Kadowaki, "Tunable terahertz emission from the intrinsic Josephson junctions in acute isosceles triangular $Bi_2Sr_2CaCu_2O_{8+\delta}$ mesas," *Opt. Express*, vol. 21, no. 2, pp. 2171–2184, 2013.

[9] K. Delfanazari, H. Asai, M. Tsujimoto, T. Kashiwagi, T. Kitamura, T. Yamamoto, M. Sawamura, K. Ishida, M. Tachiki, R.A. Klemm, T. Hattori, and K. Kadowaki, "Study of coherent and continuous terahertz wave emission in equilateral triangular mesas of superconducting $Bi_2Sr_2CaCu_2O_{8+\delta}$ intrinsic Josephson junctions," *Phys. C Supercond. its Appl.*, vol. 491, no. August, pp. 16–19, 2013.

[10] M. Tsujimoto, T. Yamamoto, K. Delfanazari, R. Nakayama, T. Kitamura, M. Sawamura, T. Kashiwagi, H. Minami, M. Tachiki, K. Kadowaki, and R.A. Klemm, "Broadly tunable subterahertz emission from Internal Branches of the current-Voltage characteristics of superconducting $Bi_2Sr_2CaCu_2O_{8+\delta}$ single crystals," *Phys. Rev. Lett.*, vol. 108, no. 10, pp. 1–5, 2012.

[11] K. Delfanazari, H. Asai, M. Tsujimoto, T. Kashiwagi, T. Kitamura, T. Yamamoto, W. Wilson, R.A. Klemm, T. Hattori, and K. Kadowaki, "Effect of Bias Electrode Position on Terahertz Radiation from Pentagonal Mesas of Superconducting $Bi_2Sr_2CaCu_2O_{8+\delta}$," *IEEE Trans. terahertz Sci. Technol.*, vol. 5, no. 3, pp. 505–511, 2015.

[12] K. Kadowaki, M. Tsujimoto, K. Delfanazari, T. Kitamura, M. Sawamura, H. Asai, T. Yamamoto, K. Ishida, C. Watanabe, S. Sekimoto, K. Nakade, T. Yasui, K. Asanuma, T. Kashiwagi, H. Minami, M. Tachiki, T. Hattori, and R.A. Klemm, "Quantum terahertz electronics (QTE) using coherent radiation from high temperature superconducting $Bi_2Sr_2CaCu_2O_{8+\delta}$ intrinsic Josephson junctions," *Phys. C Supercond.*, vol. 491, pp. 2–6, Aug. 2013.

[13] T. Kashiwagi, T. Yamamoto, H. Minami, M. Tsujimoto, R. Yoshizaki, K. Delfanazari, T. Kitamura, C. Watanabe, K. Nakade, T. Yasui, K. Asanuma, Y. Saiwai, Y. Shibano, T. Enomoto, H. Kubo, K. Sakamoto, T. Katsuragawa, B. Marković, J. Mirković, R.A. Klemm, and K. Kadowaki, "Efficient Fabrication of Intrinsic-Josephson-Junction Terahertz Oscillators with Greatly Reduced Self-Heating Effects," *Phys. Rev. Appl.*, vol. 4, no. 5, p. 054018, 2015.

[14] T. Kashiwagi, T. Yamamoto, T. Kitamura, K. Asanuma, C. Watanabe, K. Nakade, T. Yasui, Y. Saiwai, Y. Shibano, H. Kubo, K. Sakamoto, T. Katsuragawa, M. Tsujimoto, K. Delfanazari, R. Yoshizaki, H. Minami, R.A. Klemm, and K. Kadowaki, "Generation of electromagnetic waves from 0.3 to 1.6 terahertz with a high-Tc superconducting $Bi_2Sr_2CaCu_2O_{8+\delta}$ intrinsic Josephson junction emitter," *Appl. Phys. Lett.*, vol. 106, no. 9, pp. 0–5, 2015.

[15] S. Kalhor, M. Ghanaatshoar, T. Kashiwagi, K. Kadowaki, M. J. Kelly, and K. Delfanazari, "Thermal Tuning of High-T_c Superconducting $Bi_2Sr_2CaCu_2O_{8+\delta}$ Terahertz Metamaterial," *IEEE Photonics J.*, vol. 9, no. 5, pp. 1–8, 2017.

[16] J. Corson, J. Orenstein, J. N. Eckstein, and I. Bozovic, "Low-temperature AC conductivity of $Bi_2Sr_2CaCu_2O_{8+\delta}$," *Phys. B*, vol. 280, pp. 212–213, 2000.

این مقاله در صورتی دارای اعتبار است که در سایت www.opsi.ir قابل دسترسی باشد.

[Downloaded from opsi.ir on 2026-02-05]

[Downloaded from opsi.ir on 2026-02-05]

این مقاله در صورتی دارای اعتبار است که در سایت www.opsi.ir قابل دسترسی باشد.