

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



تأثیر دما بر تابش تراهر تز از محیط های ابررسانا لادن شیخ حسین پور، مهدی حسینی\*، مهدی بهادران دانشکده فیزیک دانشگاه صنعتی شیراز، بلوار مدرس، شیراز hosseini@sutech.ac.ir : نویسنده مسئول:

چکیده – در این مقاله تاثیر دما بر تابش تراهرتز از محیط های ابررسانا مورد بررسی قرار گرفته است. معـادلات الکترومغناطیسـی گردشارها به صورت تحلیلی حل شده و توان تابشی بر حسب پارامترهای ابررسانایی محاسبه شده است. نتایج نشان میدهند توان تابشی در دماهای دور از دمای بحرانی وابستگی اندکی به دما دارد، اما با نزدیک شدن دما به دمای بحرانی تاثیر دما قابل توجه است. بررسی قلهی توان تابشی بر حسب دما نشان میدهد که قبل از دمای بحرانی ابتدا بیشینه شده و سپس به شدت کاهش می عادی

كليد واژه-تابش تراهرتز، دما، عمق نفوذ، طول همدوسي

# The Effect of THz Radiation in Superconductor Media

#### Ladan SheikhHosseinPour, Mehdi Hosseini, Mehdi Bahadoran

#### Department of Physics, Shiraz University of Technology, Modares Blvd., Shiraz

In this paper, the effect of temperature on THz radiation in superconductors media is investigated. Electromagnetic equations for vortices have been solved and the radiated power versus superconductors parameters is calculated. Results show that radiated power is slightly dependent on temperature for those much lower than critical temperature ( $T_c$ ), but an effect of temperature is significant near  $T_c$ . The results also reveal that the peak of radiated power gets its maximum just before  $T_c$  and then decreases sharply.

Keywords: coherence length, penetration depth, temperature, THz radiation

#### مقدمه

در سال ۱۹۱۱ اونز و همکارانش در آزمایشگاه به خاصیت ابررسانایی جیوه در دمای پایین پیبردند[۱]. پس از آن به دنبال تحقیقات دانشمندان آلیاژهایی از کوپراتها یافت شد که در دماهای بالا تا ۱۰۸ کلوین خاصیت ابررسانایی خود را حفظ کنند[۱-۳]. نخستین بار فیوری مشاهده کرد زمانی که ابررساناهای دما بالا تحت جریان و میدان خارجي قرار مي گيرند از خود امواج الكترومغناطيسي تابش میکنند که فرکانس آنها در محدودهی تراهرتز است[۴]. تابش تراهرتز کاربردهای بسیاری در زمینه های مختلف از جمله پزشکی، سیستم های امنیتی و ... دارد. برای تولید تابش تراهرتز منابع مختلفی وجود دارد[۵]. یکی این منابع اتصالات ذاتی جوزفسون است[۶و۷]. لایههایی که در این دستگاه استفاده می شود شامل بلور BSCCO و YBCO است. توان تابشي اتصالات جوزفسون در حدود چند میکرووات بوده است که در سالهای اخیر به چند میلی وات افزایش یافته است[۸]. دما می تواند پارامترهای ابررسانایی را تغییر دهد. در این مقاله تاثیر دما بر تابش تراهرتز در محیطهای ابررسانا مطالعه می شود.

#### جزييات محاسبه

میدان مغناطیسی میتواند به صورت گردشار به درون ابررسانا نفوذ کنند. این میدان از روابط زیر تبعیت میکنند [۱<sub>و</sub>۹]:

$$\vec{\nabla} \times \vec{\nabla} \times \vec{B} + \frac{1}{\lambda^2} \vec{B} = \frac{\Phi_0 \mathbf{e}_z}{\lambda^2} \sum_n \int dz \, \delta \left[ \vec{r} - \vec{r}_n \left( t, z \right) \right] \\ \times \Theta \left[ -x_n \left( t \right) \right] \Theta \left[ L_x + x_n \left( t \right) \right], \ c \left[ \vec{\nabla} \times \vec{E} \right] = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t}$$
(1)

 $\Theta(x)$ ، در این معادله،  $\mathbf{e}_z$  بردار واحد در راستای محور  $\mathbf{e}_z$   $\mathbf{e}_z$  در این معادله،  $\lambda$  عمق نفوذ،  $\varphi_0$  کوانتوم شار،  $r_n(t,z)$  مکان مرکز

- Onnes )
- Fiory <sup>\*</sup>

nامین گردشار در شبکهی گردشارها،  $x_n$  مکان nامین گردشار روی محور  $x_x$  لطول ابررسانا در راستای محور xو  $\lambda >> \frac{A_0}{B_0} = a$ فاصله بین خطوط شار است[۹]. در صورتی که طول همدوسی بزرگ شود ( $\infty \leftarrow \xi$ ) از تابع توزیع گاوسی به جای دلتای دیراک استفاده می کنیم. معادلات حرکت خطوط شار در محیط ابررسانا به صورت زیر است[۹]:

$$x_{n} = an + vt, \quad y_{p}(z) = ap + \delta_{p}(z)$$
(7)

که در اینجا n و p اعداد صحیح و  $\delta_{p}(z)$  ناجابجایی مکان در جهت محور y است.

برای پیدا کردن میدان مغناطیسی ناشی از حضور گردشارها در محیط ابررسانا معادلهی (۲) را در معادلهی اول (۱) جایگذاری کرده و تبدیل فوریه روی آن اعمال میشود:

$$B_{zv}(\omega,K) = \left(K^{2} + \frac{1}{\lambda^{2}}\right)^{-1} \frac{\phi_{0}}{\lambda^{2}} \sum \int dz \int e^{-i\omega t} dt$$
$$\times \int e^{-ik \cdot r} e^{-\frac{R^{2}}{\zeta^{2}}} d^{3}r \ \Theta\left(-\frac{an}{v} - t\right) \tag{(7)}$$

با تبدیل فوریهی معکوس گرفتن از معادلهی (۳) در فضای  $k_x$  میدان مغناطیسی در مرز ابررسانا (x=0) را پیدا کرده و با استفاده از حساب ماندهها رابطهی میدان در مرز قطعهی ابررسانا به صورت زیر خواهد بود:

$$B_{zv}\left(\omega, x = 0, k_{y,z}\right) = \frac{\phi_0}{b\lambda} \sum_{n=1}^{N} e^{-y_p^2/\zeta^2 \left(2y_p/\zeta^{-2} i k_y\right)^2 \zeta^{-/4}}$$
$$e^{b/\lambda \left(an+4/\zeta^2\right)} \int dz e^{ik_z z} \frac{e^{-i\left(\omega-bv/\lambda\right)\left(an/v\right)}}{-i\,\omega+i\,bv\,/\lambda-\varepsilon} \tag{(f)}$$

$$b = \left[1 + (k_{y}y)^{2} + (k_{z}z)^{2}\right]^{0.5}$$
 است.  
که در رابطه یفوق  
میدان مغناطیسی کل برابر است با:  
$$B_{z}(t,r) = B_{zv}(t,r) + B_{z0}(t,r) \qquad (\Delta)$$
  
که  $B_{z0}(t,r)$  جواب معادله یاول (۱) است زمانی که  
طرف دوم آن صفر باشد.

پارامتر ک که نسبت میدان مغناطیسی به میدان الکتریکی است را [۹و ۱۰] به صورت زیر تعریف می کنیم:  $\zeta(\omega,k_{\perp}) = \frac{|k_{\omega}|\Theta(k_{\omega}^{2}-k_{\perp}^{2})}{\sqrt{k_{\omega}^{2}-k_{\perp}^{2}}} - \frac{ik_{\omega}\Theta(k_{\perp}^{2}-k_{\omega}^{2})}{\sqrt{k_{\perp}^{2}-k_{\omega}^{2}}}$ (۶)

بنابراین توان تابشی ابررسانا در فرکانس ۵ را به شکل زیر قابل محاسبه است[۹]:

$$P_{rad}(\omega) = \frac{c}{8\pi} \int \frac{dk_{\perp}}{(2\pi)^2} \operatorname{Re}\left[\zeta^{-1}(\omega, k_{\perp})\right] \left|B_{z}(\omega, 0, k_{\perp})\right|^2$$
  
$$= \frac{ck_{\omega}}{8\pi} \int \frac{dk_{\perp}}{(2\pi)^2} \frac{1}{\sqrt{k_{\omega}^2 - k_{\perp}^2}} \lambda^2 k_{\omega}^2 \left|B_{zv}(\omega, 0, k_{\perp})\right|^2$$
(Y)

و نهایتاً توان تابشی از جایگذاری معادلهی (۴) در عبارت (۷) به صورت زیر بدست میآید:

$$P_{rad}\left(\omega\right) = L_{y}L_{z}\frac{k_{\omega}\phi_{0}^{2}}{32\pi c}\int\frac{dk_{\perp}}{\pi^{2}}\frac{1}{\sqrt{k_{\omega}^{2}-k_{\perp}^{2}}}S\left(k_{\perp}\right)$$

$$\times\frac{1}{b\lambda}e^{-b/\lambda\left(\alpha n+\zeta^{2}b/(4\lambda)\right)}\times\frac{e^{-i\,\alpha\alpha n/v}\,e^{-ib\alpha n/\lambda}}{-i\,\omega+ibv\,/\lambda-\varepsilon}$$
(A)

تابع ساختار شبکه گردشارها است که برابر است  $S(k_{\perp})$ با:

$$S(k_{\perp}) = \sum_{p} \int \frac{dz}{a} e^{ik_{z}z + y_{p}^{2}/\zeta^{2}(ik_{y}y_{p}) - y_{p}^{4}/\zeta^{4} + k_{y}^{2}y_{p}^{2}/4}$$
(9)

توان تابشی در اینجا برای تقریب بینظمی قوی  $k_{\omega}al_{y,z} < < k_{\omega}L_{y,z} <<1)$  محاسبه شده است. با این تقریب میتوان نشان داد |a| = 1/a میتوان نشان داد  $bdk/(2\pi)S(k) = 1/a$ 

$$P_{nul}(\omega) = \frac{L_y L_z l_y l_z}{32\pi c} \left(\frac{Ba^2 \omega^2}{c}\right)^2 \left|\Xi(\omega)\right|^2$$
$$\Xi(\omega) = \frac{1}{b\lambda} e^{-b/\lambda(an+\zeta^2 b/(4\lambda))} \frac{e^{-i\omega an/\nu} e^{-iban/\lambda}}{-i\omega + ib\nu/\lambda - \varepsilon}$$
(1.)

به دلیل اینکه (1></ k<sub>⊥</sub> است بنابراین میتوان1≈b در نظر گرفت. رابطهی عمق نفوذ و طول همدوسی با دما به صورت زیر است[۱۱و۱۱]:

$$\lambda = \lambda_0 \left( 1 - t^2 \right)^{-1/2}, \quad \xi = \xi_0 \left( 1 - t \right)^{-1/2}, \quad t = T / T_c$$
 (11)

### نتايج وبحث

در شکل ۱ توان تابشی بهنجار شده بر حسب فرکانس برای دمای بهنجار شدهی t=1/۵ نشان داده شده است. در این شکل تنها ده قلهی اول آورده شده است زیرا برای فرکانسهای نزدیک به شکاف انرژی و یا بالاتر از آن تابش مختل شده و یا به کلی از بین میرود. همانطور که دیده میشود با افزایش فرکانس شدت تابش بیشتر میشود.



شکل ۱: نمودار توان تابشی بهنجار شده بر حسب فرکانس برای دمای



## نتيجهگيرى

نتایج نشان می دهد که با افزایش دما برای دماهای خیلی کمتر از دمای بحرانی توان تابشی با شیب اندک افزایش می یابد تا در نزدیکی دمای بحرانی به بیشینه خود می رسد و سپس به سرعت کاهش می یابد به طوری که در دمای بحرانی به صفر می رسد. نقطهی بیشینه می تواند در کاربردهای عملی مهم باشد چرا که با تنظیم دما در این نقطه بیشنهی توان تابشی بدست می آید.

### مراجع

- [1] K. F. and A. Sudbo, *Superconductivity Physics and Applications*. John Wiley & Sons,Ltd, 2004.
- [2] P. W. Anderson, "The resonating valence bond state in  $La_2CuO_4$  and superconductivity," Science, Vol. 235, No. 4793, pp. 1196–1198, 1987.
- [3] J. Nagamatsu, N. Nakagawa, T. Muranaka, Y. Zenitani, and J. Akimitsu, "Superconductivity at 39 K in magnesium diboride," Nature, Vol. 410, No. 6824, pp. 63, 2001.
- [4] A. T. Fiory, "Quantum interference effects of a moving vortex lattice in Al films," Phys. Rev. Lett., Vol. 27, No. 8, pp. 501, 1971.
- [5] D. Mittleman, *Sensing with terahertz radiation*, Vol. 85, Springer, 2013.
- [6] Y. Makhlin, G. Scöhn, and A. Shnirman, "Josephson-junction qubits with controlled couplings," Nature, Vol. 398, No. 6725, pp. 305, 1999.
- [7] F. S. Cataliotti *et al.*, "Josephson junction arrays with Bose-Einstein condensates," Science, Vol. 293, No. 5531, pp. 843–846, 2001.
- [8] T. Kashiwagi *et al.*, "Generation of electromagnetic waves from 0.3 to 1.6 terahertz with a high-T<sub>c</sub> superconducting Bi<sub>2</sub>Sr<sub>2</sub>CaCu<sub>2</sub>O<sub>8</sub> intrinsic Josephson junction emitter," Appl. Phys. Lett., Vol. 106, No. 9, pp. 92601, 2015.
- [9] L. N. Bulaevskii, E. M. Chudnovsky, C. L. College, B. Park, B. West, and N. York, "Electromagnetic Radiation from Vortex Flow in Type-II Superconductors," Phys. Rev. Lett., Vol. 97, No. 197002, pp. 1–4, 2006.
- [10] M. Hosseini, "Optimization of the THz radiation from superconductor at non-laminar regime," Physica C: Superconductivity and its Applications, Vol. 529, pp.36-39, 2016.
- [11] L. N. Bulaevskii and A. A. Sobyanin, "macroscopic theory of superconductors with small coherence length," Physica C: Superconductivity and its Applications, Vol. 152, pp. 378–388, 1988.

نزدیک شدن به دمای بحرانی عمق نفوذ به سمت بی نهایت میل میکند. شکل ۳ نمودار توان تابشی بهنجار شده بر حسب را نشان میدهد. این شکل نشان میدهد که در دماهای دور از دمای بحرانی نرخ تغییر شدت توان ثابت است تا اینکه در دماهای نزدیک به دمای بحرانی شدت ماکزیمم میشود و قبل از دمای بحرانی به شدت افت میکند و در دمای بحرانی به صفر میرسد.



فرکانس برای دماهای مختلف میباشد. همانطور که در شکل مشاهده میشود قلههای توان در دماهای پایین پهن هستند و تفاوت محسوسی با یکدیگر ندارند. اما در نزدیکی دمای بحرانی قلهی تابش کوچک شده و همینطور در دامنههای آن نوساناتی ظاهر می شود.

