

## خواص تراپردی و شبه گاف در ابررسانای $\text{NdBa}_{1-x}\text{La}_x\text{Cu}_2\text{O}_{7-\delta}$

شعبان رضا قربانی

گروه فیزیک، دانشگاه تربیت معلم سبزوار

(دریافت مقاله: ۸۵/۱/۱۵؛ دریافت نسخه نهایی: ۸۵/۶/۱۵)

### چکیده

ترکیب بس بلور  $\text{NdBa}_{1-x}\text{La}_x\text{Cu}_2\text{O}_{7-\delta}$  با  $x=0, 0.05, 0.10, 0.15, 0.20, 0.30$  به روش استاندارد واکنش حالت جامد ساخته شدند. خواص تراپردی و ابررسانایی آن با اندازه‌گیری مقاومت ویژه الکتریکی به صورت تابعی از دما و تراکم آلاینش مطالعه شده است. به منظور اندازه‌گیری تراکم حاملها در صفحات  $\text{CuO}_2$ ، توان گرماالکتريسته در دمای اتاق به صورت تابعی از تراکم آلاینش  $\text{La}$  اندازه‌گیری شده است. با افزایش تراکم آلاینش مقاومت الکتریکی و توان گرماالکتريسته در دمای اتاق افزایش و دمای بحرانی به صورت سهموی کاهش می‌یابد. دمای شبه گاف (یا انرژی شبه گاف) به صورت تابعی از تراکم آلاینش از روی انحراف به سمت پایین وابستگی خطی مقاومت الکتریکی به دما اندازه‌گیری شده است. تغییرات دمای بحرانی، دمای شبه گاف، مقاومت ویژه الکتریکی و توان گرماالکتريسته در دمای اتاق،  $S(290\text{ K})$ ، جمله‌گی حاکی از آن هستند که علت اصلی از بین رفتن ابررسانایی در این آلیاژ پرشدن حفره‌ها به وسیله الکترونهاى اضافه شده توسط آلاینش است.

واژه‌های کلیدی: ابررسانایی، آلاینش، شبه گاف

### ۱. مقدمه

مستقیم جهت مشاهده باز شدن شبه گاف در چگالی حالتها  $(DOS)^1$  الکترونی حول تراز فرمی اندازه‌گیری خواص تراپردی در صفحات  $\text{CuO}_2$  است. بنابراین مطالعه خواص تراپردی ابزاری مؤثر و مستقیم برای مطالعه شبه گاف است. مقاومت ویژه الکتریکی در حالت عادی دارای وابستگی خطی به دما است. انحراف به سمت پایین از این وابستگی خطی در دمای معین  $T_g$ ، که کاملاً بالاتر از دمای گذار است، ناشی از باز شدن شبه گاف است. در حالت شبه گاف ناهنجاریهای مختلفی در هر دو حالت عادی و ابررسانایی مشاهده شده است که می‌توان آنها را براساس کاهش چگالی حالتها تک ذره‌ای مؤثر در نزدیکی انرژی فرمی شرح داد [۲،۵].

مطالعات نظری وسیعی برای شرح دادن منشأ شبه گاف انجام

خواص تراپردی حالت عادی و ابررسانایی اکسیدهای کوپرات با دمای بحرانی بالا شدیداً حساس به افزایش یا کاهش تعداد حاملها (حفره‌ها) در صفحات  $\text{CuO}_2$  هستند. یکی از پدیده‌هایی که در سالهای اخیر به طور وسیعی در فیزیک ابررساناهای با دمای بحرانی بالا مورد مطالعه قرار گرفته است حالت شبه گاف است [۱،۲]. شبه گاف اولین بار از روی مطالعه سیستماتیک انتقال نیت تشدید مغناطیسی هسته ایتريم ۸۹ ( $^{89}\text{Y NMR}$ ) [۳] و آهنگ واهلش اسپین- شبکه برای هسته مس در صفحات  $\text{CuO}_2$  ( $^{63}\text{T}_1$ ) [۴] کشف شد. شبه گاف در گستره وسیعی از سطح آلاینش، از ناحیه آلاینده شده کمتر از حد بهینه (underdoped) UD تا اندکی داخل ناحیه آلاینده شده بیشتر از حد بهینه OD (overdoped)، مشاهده شده است. یکی از شواهد

۱. Density of states

ویژه الکتریکی اندازه‌گیری می‌شود. دمای شبه گاف از روی انحراف به سمت پایین وابستگی خطی مقاومت ویژه الکتریکی به دما در حالت عادی به دست می‌آید. توان گرماالکتریسته در دمای اتاق اندازه‌گیری و جهت تعیین دیاگرام فاز تراکم حفره‌ها از روی رابطه تجربی بین (۲۹۰K) S به دست می‌آید.

## ۲. ساخت و تست نمونه

نمونه‌های بس بلور  $\text{NdBa}_{1-x}\text{La}_x\text{Cu}_2\text{O}_{7-\delta}$  با  $0/15, 0/20, 0/30$ ،  $0/10, 0/05, 0/0$  به روش پودر حالت جامد ساخته شدند. جهت ساخت از مواد اولیه  $\text{Nd}_2\text{O}_3, \text{BaCO}_3, \text{La}_2\text{O}_3, \text{CuO}$  با درجه خلوص بالا استفاده شد. پودر مواد اولیه ابتدا به دقت وزن و سپس با هم مخلوط شدند. نمونه‌ها به صورت قرص سه بار به ترتیب در دماهای ۹۰۰، ۹۲۰ و ۹۲۰ °C پخت شدند. در بین مراحل پخت قرصها آسیاب می‌شدند. برای بهینه کردن مقدار اکسیژن، نمونه‌ها در حضور اکسیژن به مدت ۳ روز در دمای ۴۶۰ °C باز پخت شده و سپس تا دمای اتاق با آهنگ ۱۲ °C/hr سرد شدند.

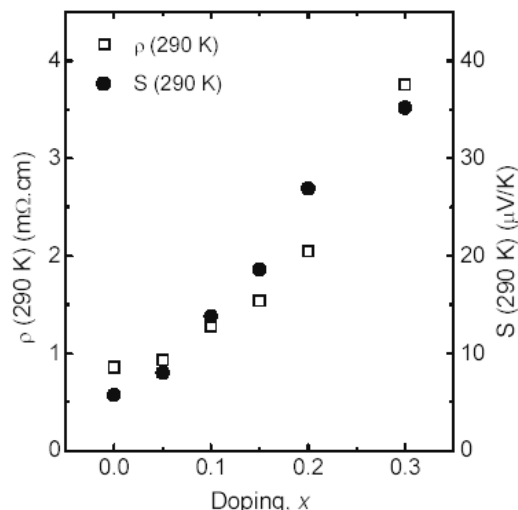
پراش به روش پودر اشعه-X (XRD) برای نمونه‌ها انجام گرفت. نتایج XRD نشان داد که تمام نمونه‌ها تک فاز و دارای ساختار ۱۲۳ راست گوشه هستند. جهت اندازه‌گیری مقاومت ویژه الکتریکی سیمهای مسی توسط چسب نقره به نمونه‌ها متصل شدند. برای دست‌یابی به یک اتصال الکتریکی خوب، قبل از اتصال سیمهای مسی، چسب نقره به صورت نوارهای کوچکی بر روی نمونه‌ها الگو شده و در دمای ۳۰۰ °C و در حضور شارش اکسیژن به مدت نیم ساعت رفتار حرارتی شدند. این عمل منجر به مقاومت الکتریکی از مرتبه ۱-۲ Ω برای اتصالها شد. نتایج اندازه‌گیری تغییرات مقاومت الکتریکی برحسب دما برای نمونه‌ها دارای گذار تیزی از حالت عادی به حالت ابررسانایی است. توان گرماالکتریسته در دمای اتاق برای نمونه‌های میله‌ای شکل بریده شده از قرصهای پخت شده به ابعاد  $11 \times 2/4 \times 0/5 \text{ mm}^3$  اندازه‌گیری شد. برای اندازه‌گیری از یک گرادین دمای برگشت پذیر کوچک تا ۱/۵K استفاده گردید.

گرفته است. به طور کلی نظریه‌های موجود را می‌توان به دو دسته تقسیم کرد. اولین نظریه بر اساس تشکیل زوجهای کوپر در دماهای کاملاً بالای دمای بحرانی همراه با هم‌دوسی فاز بلند برد، که فقط در  $T \leq T_c$  ظاهر می‌شود، است [۶-۸]. در دومین نظریه فرض می‌شود که ظهور شبه گاف ناشی از افت و خیزهای پادفرومغناطیسی کوتاه برد، امواج چگالی بار، گذار فاز ساختاری یا جداسازی فاز الکترونی در مقیاس میکروسکوپی (نوارهای بار) است [۹-۱۱]. چون در اثر کاهش تدریجی حالت‌های نزدیک تراز فرمی شبه گاف ظاهر می‌شود بنابراین یک نتیجه اساسی که بایستی از تمام مدل‌های نظری به دست آید پایسته نبودن چگالی حالت‌های تک ذره ای در حالت شبه گاف است [۱۲].

دیاگرام فاز T-p، که در آن دما، T، بر حسب تراکم حفره‌های، p، موجود در صفحات  $\text{CuO}_2$  بازای هر یون Cu رسم می‌شود، اطلاعات ارزشمندی درباره‌ی خواص حالت عادی و ابررسانایی در نواحی متقاطع مختلف ارائه می‌دهد. یکی از روشهای بنا کردن دیاگرام فاز ابررساناهای با دمای بحرانی بالا اندازه‌گیری مقاومت ویژه الکتریکی به صورت تابعی از دما و تراکم حفره‌ها است.

تعیین دقیق تراکم حفره‌ها جهت بناکردن دیاگرام فاز T-p بسیار مهم است. اندازه‌گیری توان گرماالکتریسته در دمای اتاق (۲۹۰K) S یکی از روشهای متداول برای اندازه‌گیری تراکم حفره‌ها است. چون پیدا شده است که توان گرماالکتریسته در دمای اتاق برای ابررساناهای با دمای بحرانی بالا درگستره وسیعی از سطح آرایش، از نواحی کاملاً UD تا نواحی شدیداً OP، دارای تغییرات سیستماتیکی با تراکم حفره‌ها در داخل صفحات  $\text{CuO}_2$  است [۱۳]. بنابراین (۲۹۰K) S روش بسیار مناسبی برای اندازه‌گیری تراکم حفره‌ها در صفحات  $\text{CuO}_2$  است.

در این مقاله مطالعه سیستماتیکی از خواص تراپردی ابررسانای  $\text{NdBa}_{1-x}\text{La}_x\text{Cu}_2\text{O}_{7-\delta}$  در ناحیه آلییده شده کمتر از حد بهینه UD، که در ابررساناهای با دمای بحرانی بالا توسط حضور شبه گاف تمیز داده می‌شود، ارائه می‌گردد. مقاومت ویژه الکتریکی به صورت تابعی از دما و چگالی آرایش La در مکان Ba اندازه‌گیری می‌شود. دمای بحرانی از روی افت ۵۰٪ مقاومت



شکل ۲. وابستگی مقاومت ویژه الکتریکی (محور سمت چپ) و توان گرماالکتریسته (محور سمت راست) در دمای اتاق برحسب تراکم آلایش La برای نمونه‌های  $\text{NdBa}_{2-x}\text{La}_x\text{Cu}_2\text{O}_{7-\delta}$ .

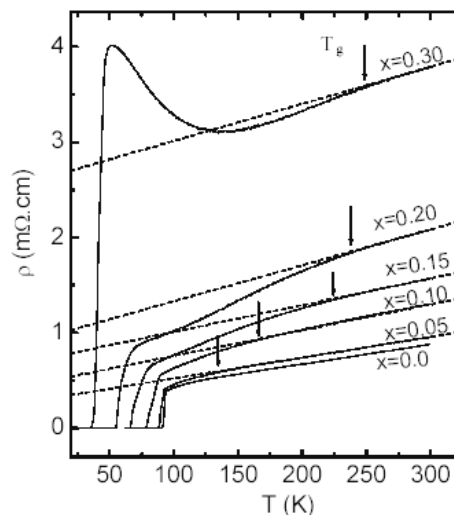
گرفت که اضافه نمودن La منجر به کاهش تراکم حاملهای بار و در نتیجه کاهش خاصیت فلزی می‌شود.

شکل ۳ دمای بحرانی نمونه‌ها را، که از روی مقاومت الکتریکی تعیین شده است، نشان می‌دهد. دیده می‌شود که تغییرات دمای بحرانی  $T_c$  بر حسب تراکم آلایش x به صورت سهموی است.

تراکم حفره‌ها از روی (۲۹۰K) S با استفاده از رابطه تجربی بین گرما الکتریسته در دمای اتاق و تراکم حفره‌ها p در داخل صفحات  $\text{CuO}_2$  [۱۳] برای تمام نمونه‌ها محاسبه شده است. با استفاده از مقادیر به دست آمده دیاگرام فاز T-p در شکل ۴ رسم شده است. وابستگی  $T_c$  به p به صورت سهموی است که در توافق با وابستگی سهموی مشاهده شده توسط پرسلند و همکارانش [۱۴] می‌باشد. بررسی تغییرات دمای بحرانی برحسب چگالی حفره‌ها در صفحات  $\text{CuO}_2$  برای اکثر ابررساناهای کوپرات نشان داد که وابستگی  $T_c$ -p براساس معادله زیر است [۱۵]:

$$T_c = T_{c,\max} [1 - \frac{82}{6} (p - 0.16)^2] \quad (1)$$

که در آن  $T_{c,\max}$  دمای بحرانی بیشینه و p تراکم حفره در داخل صفحات  $\text{CuO}_2$  است. داده‌های تجربی  $T_c$  به دست آمده،

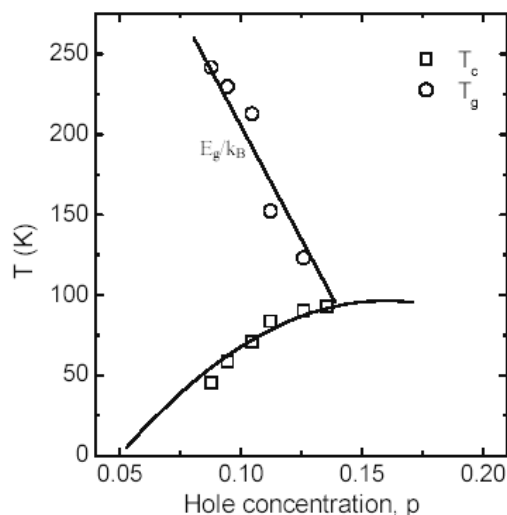


شکل ۱. تغییرات مقاومت ویژه الکتریکی به صورت تابعی از دما و تراکم آلایش برای نمونه‌های  $\text{NdBa}_{2-x}\text{La}_x\text{Cu}_2\text{O}_{7-\delta}$ . خط چینها وابستگی خطی مقاومت ویژه الکتریکی به دما را نشان می‌دهد. انحراف به سمت پایین مقاومت ویژه الکتریکی از وابستگی خطی در دمای معین  $T_g$  توسط پیکانها نشان داده شده است.

### ۳. نتایج و تحلیل داده‌های تجربی

نتایج اندازه‌گیری مقاومت الکتریکی به صورت تابعی از دما و تراکم آلایش برای نمونه‌های  $\text{NdBa}_{2-x}\text{La}_x\text{Cu}_2\text{O}_{7-\delta}$  در شکل ۱ نشان داده است. با کاهش دما مقاومت الکتریکی نمونه‌ها از دمای اتاق تا دمای معین  $T_g$  که کاملاً بالاتر از دمای گذار است، به صورت خطی کاهش یافته و در دمای بحرانی  $T_c$  دارای گذار تیزی از حالت عادی به حالت ابررسانایی است. همان‌طور که در شکل دیده می‌شود افزایش تراکم آلایش La منجر به افزایش شدیدی در اندازه مقاومت ویژه الکتریکی می‌شود. این تغییرات نشان دهنده کاهش تراکم حاملها است.

وابستگی مقاومت ویژه الکتریکی (۲۹۰ K)  $\rho$  و توان گرماالکتریسته (۲۹۰K) S در دمای اتاق بر حسب تراکم آلایش در شکل ۲ نشان داده شده‌اند. شکل فوق نشان می‌دهد که در فاز راست گوشه،  $\rho$  (۲۹۰K) و S (۲۹۰K) با افزایش تراکم آلایش La افزایش می‌یابند. لذا بر اساس وابستگیهای  $\rho$  (۲۹۰K) و S (۲۹۰K) به تراکم حفره‌ها می‌توان نتیجه

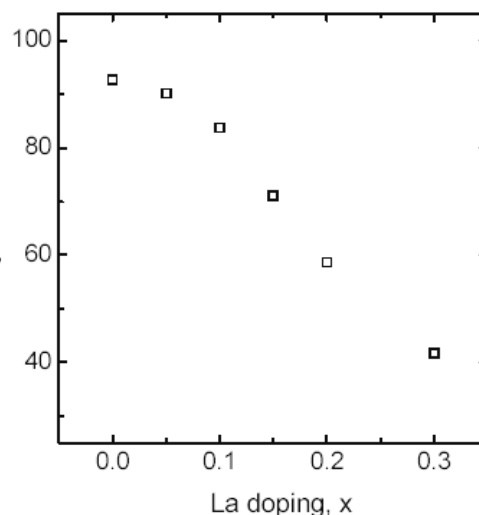


شکل ۴. دیاگرام فاز برای نمونه‌های ابررسانای  $\text{NdBa}_{1-x}\text{La}_x\text{Cu}_2\text{O}_{7-\delta}$ . منحنی سهمی شکل برازش داده‌های تجربی به معادله (۱) است. خط راست جهت دید چشم است.

دلیل اندازه‌گیری دمای شبه گاف برای نمونه‌ی آلیش نشده مشکل است. سپس پهنای انرژی شبه گاف  $E_g$  با استفاده از رابطه  $E_g = k_B T_g$  که در آن  $k_B$  ثابت بولتزمن و  $T_g$  دمای شبه گاف است، تعیین گردید. تغییرات دمای شبه گاف (یا انرژی شبه گاف) بر حسب تراکم حفره‌ها در شکل ۴ نشان داده شده است. دیده می‌شود که با افزایش تراکم آلیش La دمای شبه گاف افزایش می‌یابد. زیرا اضافه کردن La منجر به کاهش تراکم حفره‌های نمونه و با توجه به دیاگرام فاز قرار گرفتن آنها در ناحیه UD شبه گاف از خصوصیات ناحیه فوق است، می‌شود. نتایج فوق پیشنهاد می‌کنند که افزایش تراکم آلیش La باعث تخلیه‌ی بیشتر چگالی حالت‌های الکترونی در نزدیکی تراز فرمی می‌گردد لذا سبب افزایش پهنای شبه گاف می‌شود.

### قدردانی

از پروفیسور اُستن رپ در انیستیتو تکنولوژی رویال استکهلم سوئد جهت اجازه استفاده از تجهیزات آزمایشگاه و همکاری در اندازه‌گیری داده‌های تجربی تشکر و قدردانی می‌شود.



شکل ۳. دمای بحرانی  $T_c$  بر حسب تراکم آلیش La.

شکل ۳، به معادله (۱) برازش شده و در شکل ۴ به صورت منحنی نشان داده شده است.  $T_{c,max}$  به دست آمده از برازش، دمای بحرانی در تراکم حفره بهینه  $p_{opt} = 0.16$ ، برابر  $96/4 \text{ K}$  است که با مقدار تجربی به دست آمده برای ابررسانای  $\text{NdBa}_{1-x}\text{La}_x\text{Cu}_2\text{O}_{7-\delta}$  (یعنی  $\delta=0$ ) [۱۶] کاملاً در توافق است. این نتایج پیشنهاد می‌کنند که اضافه کردن آلیش سبب اضافه کردن الکترون‌ها می‌شود. نتایج مطالعات قبل‌مان نشان داد که La باعث جایگزیده شدن حاملها نمی‌گردد [۱۷]. بنابراین الکترونهای اضافه شده منجر به پرشدن حفره‌ها و کاهش تراکم آنها می‌گردد. لذا عامل اصلی کاهش دمای بحرانی پرشدن حفره‌ها توسط الکترون‌ها است.

از روی انحراف به سمت پایین وابستگی خطی مقاومت ویژه الکتریکی به دما، دمای شبه گاف تعیین شده است. در این روش یک مشکل اساسی در اندازه‌گیری دمای شبه گاف وقتی آشکار می‌شود که  $p \sim p_{opt} = 0.16$  (که در این تراکم بهینه دمای بحرانی بیشینه است) باشد. زیرا در این شرایط دمای شبه گاف نزدیک به دمای افت وخیزها ابررسانایی، دمایی که اندکی بزرگتر از دمای بحرانی بوده ولی هنوز تعدادی زوج کوپر وجود دارند، است که اثر آن به روشنی بر روی تغییرات مقاومت ویژه الکتریکی بر حسب دما مشاهده می‌شود. به این

## مراجع

9. M Langer, J Schmalian, S Grabowski and K H Bennemann, *Phys. Rev. Lett.* **75** (1995) 4508.
10. J J Deisz, D W Hess and J W Serene, *Phys. Rev. Lett.* **76** (1996) 1312.
11. J Schmalian, D Pines and Stojkovic, *Phys. Rev. Lett.* **80** (1998) 3839.
12. J W Loram, K A Mirza, J R Cooper and J L Tallon, *J Phys. Chem. Solids* **59** (1998) 2091.
13. S D Obertelli, J R Cooper and J L Tallon, *Phys. Rev. B* **46** (1992) 14928.
14. M R Presland, J L Tallon, R G Buckley, R S Liu, N.E. Flower, *Physica C* **176** (1991).
15. J L Tallon, C Bernhard, H Shaked, R L Hitterman and J D Jorgensen, *Phys. Rev. B* **51** (1995) 12911.
16. G V M Williams and J L Tallon, *J. Supercond.* **258** (1996) 41.
17. S R Ghorbani, M Andersson and O Rapp, *Physica C* **390** (2003) 160.
1. B Batlogg and C Varma, *Physics World* **13** (2000) 33.
2. T Timusk and B Statt, *Rep. Progr. Phys.* **62** (1999) 61.
3. H Alloul, T Ohno and P Mendels, *Phys. Rev. Lett.* **63** (1989) 1700.
4. H Yasuoka, T Imai and T Shimizu, in *Strong Correlations and Superconductivity* ed. By H Fukuyama, S Maekawa and A P Malozemoff, Springer Series in Solid State Sciences, Vol. **89** (Springer, Berlin, 1989), p.254.
5. J Loram, K A Mirza, J R Cooper, W Y Liang and J M Wade, *J. Supercon.* **7** (1994) 243.
6. V B Geshkenbein, L B Ioffe and A I Larkin, *Phys. Rev. B* **55** (1997) 3173.
7. V Emery, S A Kivelson and O Zachar, *Phys. Rev. B* **56** (1997) 6120.
8. J Maly, B janko and Levin, *Phys. Rev. B* **59** (1999) 1354.