

تأثیر آلایندۀ خنثای Ca-La بر روی خواص تراپردی و ابرسانایی ترکیب Nd-۱۲۳

شعبان رضا قربانی و مریم همایی

گروه فیزیک، دانشگاه تربیت معلم سبزواری

(دریافت مقاله: ۸۶/۱۲/۱۲؛ دریافت نسخه نهایی: ۸۷/۷/۲۰)

چکیده

ترکیبات بس بلور $Nd_{1-x}Ca_xBa_{1-x}La_xCu_2O_{7-\delta}$ (در بازه $0 \leq x \leq 0.15$) به روش استاندارد حالت جامد ساخته شده‌اند. تأثیر آلایندۀ خنثای Ca-La بر روی خواص تراپردی نظیر مقاومت الکتریکی و توان گرما الکتریسیته S این ترکیبات به صورت تابعی از دما و تراکم آرایش بررسی شده است. مقاومت الکتریکی این ترکیبات با افزایش غلظت آرایش افزایش می‌یابد و توان گرما الکتریسیته در دمای بالا ثابت ولی در دماهای پایین اندکی تغییر می‌کند. در حالی که دمای بحرانی ابرسانایی به صورت خطی کاهش می‌یابد. از روی توان گرما الکتریسیته چگالی حالت‌های الکترونی $g(\epsilon_F)$ در نزدیکی تراز فرمی تعیین و نتایج نشان داد که $g(\epsilon_F)$ با افزایش غلظت آرایش کاهش می‌یابد. برای تحلیل داده‌های توان گرما الکتریسیته از مدل نوار باریک استفاده شد. نتایج حاصل از برازش داده‌ها به این مدل توافق بسیار خوبی با کاهش چگالی حالت‌های الکترونی $g(\epsilon_F)$ دارد. چون این ترکیبات از لحاظ الکتریکی خنثی هستند لذا تغییرات مقاومت الکتریکی $\rho(x, T)$ توان گرما الکتریسیته $S(x, T)$ ، دمای بحرانی $T_c(x)$ و $g(\epsilon_F)$ در مجاورت تراز فرمی همگی پیشنهاد می‌کنند که جایگزینی حامل‌های بار عامل اصلی از بین رفتن ابرسانایی توسط آلایندۀ خنثی از لحاظ الکتریکی هستند.

واژه‌های کلیدی: ابرسانایی، مقاومت الکتریکی، توان گرما الکتریسیته، چگالی حالت‌های الکترونی، جایگزینی

۱. مقدمه

دمای بالا (RE-۱۲۳) $REBa_2Cu_3O_{7-\delta}$ می‌باشد، که در آن RE نشان دهنده عناصر خاکی نادر است. به طوری که سهم زنجیره‌های CuO در توان گرما الکتریسیته دارای شیب مثبت و سهم صفحات CuO_2 دارای شیب منفی است [۱-۴]. فواصل بین اتمی ساختار بلوری و چگالی حامل‌های بار در صفحات CuO_2 دو تا از پارامترهای کلیدی تغییر خواص حالت عادی و ابرسانایی کوپراتهای ابرسانا هستند. جهت درک اثر هر کدام از این دو پارامتر بایستی به نحوی آنها را بتوان از یکدیگر جدا نمود. یکی از روشهای مناسب جهت تعیین سهم هر کدام از پارامترهای فوق، استفاده از آلایندۀ خنثی است. چون در این صورت می‌توان چگالی حامل‌های بار را ثابت نگه داشت. ولی نتایج حاصل از مطالعه اثر آلایندۀ خنثی Ca-Pr [۵] و Ca-Th [۶] نشان داده است که با افزایش غلظت آرایش

پس از کشف ابرسانایی توسط کامرلینگ اونس در سال ۱۹۱۱، مباحث علمی و کاربردی این مواد مورد توجه خاص دانشمندان و محققان قرار گرفت. از آن زمان تاکنون نظریه‌های زیادی برای توضیح حالت عادی و خواص ابرسانایی ارائه شده‌اند اما تاکنون دلایل رفتار غیرمتعارف این مواد در حالت عادی درک نشده است. مطالعه خواص تراپردی این مواد نظیر مقاومت الکتریکی و توان گرما الکتریسیته، روشهای مناسب برای بررسی این رفتار غیر متعارف می‌باشند. زیرا اطلاعات مفیدی در مورد ماهیت حاملها، ساختار نواری الکترونیکی و ساز و کار تراپردی ابرساناهای دمای بالا در اختیار ما قرار می‌دهند. همچنین گرما الکتریسیته S ابزاری ساده برای تشخیص سهم زنجیره‌های CuO و صفحات CuO_2 در خواص تراپردی حالت عادی ابرساناهای

۲- اندازه‌گیری

در ابتدا نمونه‌های $Nd_{1-x}Ca_xBa_{2-x}La_xCu_3O_{7-\delta}$ در بازه $0 \leq x \leq 0.15$ به روش فرایند پودر حالت جامد تهیه شدند. برای ساخت این نمونه‌ها از مواد اولیه CuO (۹۹/۰٪)، Nd_2O_3 (۹۹/۹٪)، La_2O_3 (۹۹/۵٪) و $CaCO_3$ (۹۹/۵٪) استفاده شده است. پودر مواد اولیه ابتدا با ترازوی دیجیتالی (با دقت $1/10000$) توزین و سپس با دقت با هم مخلوط شدند. نمونه‌ها به صورت قرص سه بار به ترتیب در دماهای $920^\circ C$ و $900^\circ C$ در هوا پخت شدند و جهت بهینه کردن مقدار اکسیژن، نمونه‌ها در دمای $460^\circ C$ به مدت ۷۲ ساعت در داخل اتمسفر اکسیژن باز پخت شده و سپس با آهنگ $12^\circ C/hr$ تا دمای اتاق سرد شدند.

پراش به روش پودر اشعه X برای نمونه‌ها انجام گرفت. نتایج XRD نشان داد که تمام نمونه‌ها تک فاز و دارای ساختار راست گوشه هستند [۱۴]. مقاومت الکتریکی با استفاده از ترکیب ۴ میله‌ای استاندارد اندازه‌گیری شده است. برای اتصالات الکتریکی از چسب نقره به صورت نواری باریک روی نمونه استفاده شده است. به منظور بهبود مقاومت الکتریکی اتصال، نمونه‌ها در اتمسفر اکسیژن به مدت نیم ساعت در دمای $300^\circ C$ باز پخت و سپس سریعاً تا دمای اتاق سرد شده است. در نهایت سیم نازک مسی توسط چسب نقره به نقطه اتصال وصل شده است. با این روش مقاومت الکتریکی $1-2 \Omega$ در محل اتصال به دست آمده که مقدار مناسبی برای اندازه‌گیری مقاومت الکتریکی است.

توان گرما الکتریسته با استفاده از یک نگهدارنده نمونه‌ها که توانایی اندازه‌گیری همزمان دو نمونه را داشت، صورت گرفت. از قرصهای پخت شده نمونه‌های میله‌ای شکل به ابعاد تقریبی $11 \times 2/4 \times 0/5 mm$ جدا و توسط چسب نقره مستقیماً به دو بلوک مسی با دماهای متفاوت متصل شدند. توسط دو گرم کننده یک گرادیان دمایی تناوبی در طول نمونه ایجاد می‌شود. برای تعیین توان گرما الکتریسته در طی هر پریود اختلاف ولتاژ ΔV به ازای گرادیانهای $1/5 \leq \Delta T \leq 1$ اندازه‌گیری می‌شود. شیب خط راست برآزش شده به داده‌ها $\Delta T - \Delta V$ در هر

چگالی حامل‌های بار در صفحات CuO_2 ثابت نمی‌ماند. همچنین علیرغم تغییر ناچیز فواصل بین اتمی، دمای بحرانی ابررسانایی آلیاژهای RE-۱۲۳ آلاینده شده به صورت خنثی به صورت خطی و با شیب نسبتاً زیادی ($200 \approx dT_c/dx$) کاهش می‌یابد [۵، ۶]. از طرف دیگر تعدادی از محققین بر این باورند که کسری از عنصر Pr آلاینده خنثی Ca-Pr وارد جایگاه Ba می‌شود [۷] که سبب به هم خوردن خنثایی بار می‌گردد. همچنین حد حلالیت Ca-Th در این آلیاژها اندک و در حدود ۷/۵ درصد است و در صورت افزایش بیشتر از حد فوق تغییر ساختار بلوری رخ می‌دهد [۸]. لذا جهت بررسی اثر آلاینده‌های خنثی مخصوصاً در غلظتهای بالا نیاز به آلاینده‌هایی است که کاملاً در جایگاههای اتمی مورد نظر قرار گیرند.

چون مطالعات انجام گرفته بر روی آلاینده‌های Ca و La نشان داده است که در این بازه آلیشی (کمتر از ۲۰٪ Ca) کاملاً در جایگاه RE و La در جایگاه Ba قرار می‌گیرد [۹-۱۱] لذا هدف از انجام کار فوق پاسخ به این سوال است که چرا با وجود ثابت ماندن چگالی حامل‌های بار در صفحات CuO_2 ابررساناهای RE-۱۲۳ خواص ابررسانایی آنها با افزایش چگالی آلیش کاهش می‌یابد. برای این منظور توان گرما الکتریسته و مقاومت الکتریکی در ترکیبات ابررسانای $Nd_{1-x}Ca_xBa_{2-x}La_xCu_3O_{7-\delta}$ به صورت تابعی از دما و غلظت آلیش Ca-La مطالعه شده است.

مدلهای مختلفی جهت توصیف خواص تراپردی الکتریکی، مانند مقاومت الکتریکی و توان گرما الکتریسته حالت عادی ترکیبات RE-۱۲۳ ارائه شده‌اند ولی ما از دو مدل مایع فرمی و مدل پدیده شناختی نوار نازک [۱۲] برای تحلیل داده‌های توان گرما الکتریسته استفاده کرده‌ایم. توان گرما الکتریسته با هدایت الکتریکی نسبت عکس و با جرم مؤثر نسبت مستقیم دارد و از طرفی این دو کمیت به ساختار نوار الکترونیکی مربوط می‌شوند. بنابراین توان گرما الکتریسته اطلاعات مفیدی را درباره ساختار نوار الکترونیکی به ما می‌دهد [۱۳].

برای بررسی خواص تراپردی ابرسانای دمای بالا است. یکی از روشهای تعیین چگالی حفره‌ها در صفحات CuO_2 استفاده از توان گرما الکتریسته در دمای اتاق S_{290K} است. اوبرتلی و همکارانش منحنی تجربی را بین S_{290K} و چگالی حفره‌ها در صفحات CuO_2 به دست آوردند [۱]. تلن و همکارانش [۱۵] منحنی فوق را به صورت روابط ساده‌ای زیر بیان کردند:

$$S_{290K} = 372 \exp(-32/4 p) \quad 0/0 < p < 0/05$$

$$S_{290K} = 992 \exp(-38/1 p) \quad 0/05 < p < 0/155 \quad (1)$$

$$S_{290K} = -139 p + 24/2 \quad p > 0/155$$

این رابطه غالباً جهت تعیین چگالی حفره‌ها در صفحات CuO_2 استفاده می‌شود.

با توجه به منحنی تجربی اوبرتلی و تغییرات توان گرما الکتریسته در دمای اتاق می‌توان از معادله (۱) در بازه $0/05 < p < 0/155$ جهت تعیین چگالی حفره‌ها در صفحات CuO_2 ترکیبات بس‌بلور $\text{Nd}_{1-x}\text{Ca}_x\text{Ba}_{2-x}\text{La}_x\text{Cu}_2\text{O}_{7-8}$ استفاده کرد. شکل ۴ تغییرات چگالی حفره‌ها را بر حسب غلظت آلایش نشان می‌دهد. چنانچه در شکل مشاهده می‌شود تراکم حفره‌ها با افزایش آلایش تقریباً ثابت است.

دمای بحرانی با استفاده از معیار کاهش 50% مقاومت الکتریکی نسبت به حالت عادی در نزدیک دمای بحرانی تعیین گردید و نتایج به دست آمده به شکل ۴ افزوده شده است. با توجه به شکل ملاحظه می‌شود که تغییرات سهموی دمای بحرانی T_c با تمرکز آلایش خنثی فرو نشانده شده است و T_c به طور تقریباً خطی با افزایش تمرکز حفره با شیب $-62 \approx dT/dx$ کاهش می‌یابد که در مقایسه با آهنگ کاهش دمای بحرانی آلایندة‌های Ca-Pr و Ca-Th ، که برابر $-200 \approx dT/dx$ می‌باشد، کمتر است [۵، ۶]. حال با توجه به شکل ۴، سوال این است که چرا با اینکه چگالی حامل‌های بار در صفحات CuO_2 ثابت است دمای بحرانی کاهش می‌یابد؟ در ادامه مقاله سعی می‌شود تا به سوال فوق جواب داده شود.

۳-۱- مدل مایع فرمی

توان گرما الکتریسته معمولاً شامل دو قسمت است که عبارتند از:

پریود برابر توان گرما الکتریسته ناشی از نمونه و سیم‌های مسی است. با کم کردن سهم توان گرما الکتریسته مربوط به سیم‌های مسی، توان گرما الکتریسته نمونه‌های فوق تعیین گردید.

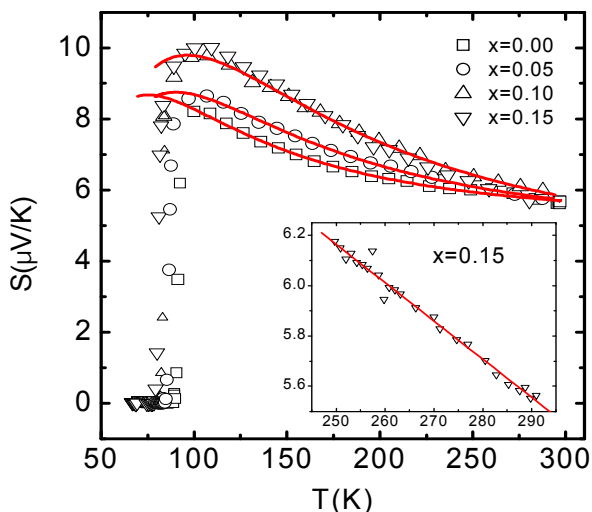
۳- نتایج و تحلیل داده‌ها

شکل ۱ مقاومت الکتریکی ترکیبات بس‌بلور $\text{Nd}_{1-x}\text{Ca}_x\text{Ba}_{2-x}\text{La}_x\text{Cu}_2\text{O}_{7-8}$ را به صورت تابعی از دما و تراکم آلایش نشان می‌دهد. چنانچه در شکل مشاهده می‌شود، با کاهش دما مقاومت الکتریکی به صورت خطی تا دماهای نزدیک به دمای بحرانی کاهش می‌یابد که در توافق با نتایج به دست آمده برای سایر ترکیبات RE-۱۲۳ است. همچنین با افزایش غلظت آلایش مقاومت الکتریکی نمونه‌ها افزایش می‌یابد که نشان دهنده کاهش خاصیت فلزی است.

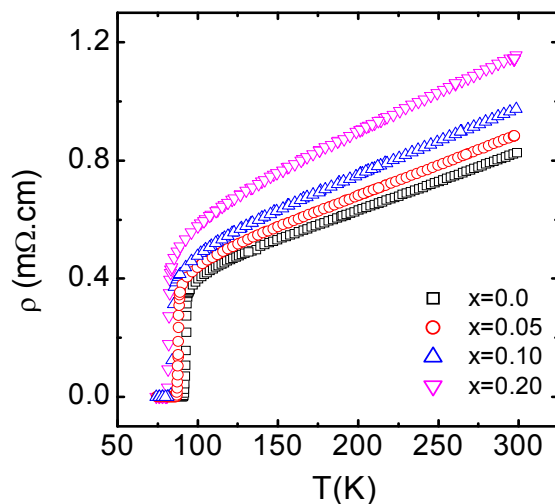
اندازه‌گیری توان گرما الکتریسته به صورت تابعی از دما و تراکم آلایش برای نمونه‌های $\text{Nd}_{1-x}\text{Ca}_x\text{Ba}_{2-x}\text{La}_x\text{Cu}_2\text{O}_{7-8}$ با $0/15 \leq x \leq 0/05$ در شکل ۲ نشان داده شده است. همان‌طور که در شکل مشاهده می‌شود منحنیهای $S(T)$ حالت عادی برای تمام آلایشها مثبت است. با افزایش دما، توان گرما الکتریسته در دماهای نزدیک دمای بحرانی شدیداً افزایش یافته تا به بیشینه پهنی رسیده و بعد از آن تا دمای اتاق تقریباً به طور خطی کاهش می‌یابد. توان گرما الکتریسته در دماهای بالا تقریباً مستقل از غلظت آلایش است در حالی که در دماهای پایین اندکی افزایش می‌یابد. شیب تمام منحنیها به ازای تمام غلظتهای آلایش منفی است بنابراین صفحات CuO_2 سهم غالب را در خواص تراپردی این ابرساناها دارند.

شکل ۳ مقاومت ویژه الکتریکی و توان گرما الکتریسته در دمای اتاق را نشان می‌دهد. مشاهده می‌شود که مقاومت الکتریکی در دمای اتاق شدیداً با افزایش غلظت آلایش افزایش می‌یابد در حالی که توان گرما الکتریسته تقریباً ثابت است.

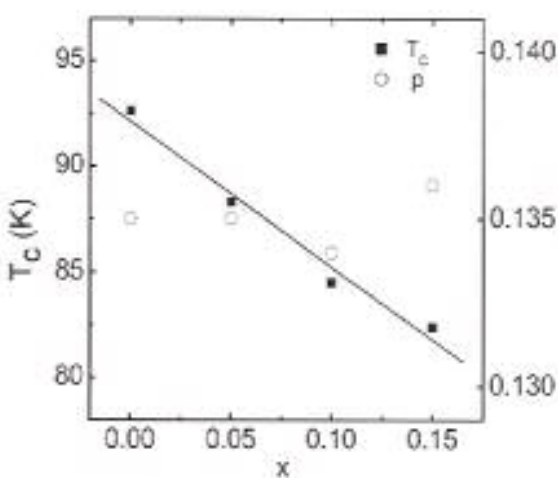
چون رابطه تنگاتنگی بین چگالی حفره‌ها در صفحات CuO_2 و دمای بحرانی ابرسانایی وجود دارد لذا تغییرات چگالی حفره‌ها در صفحات CuO_2 یکی از مشخصه‌های مهم



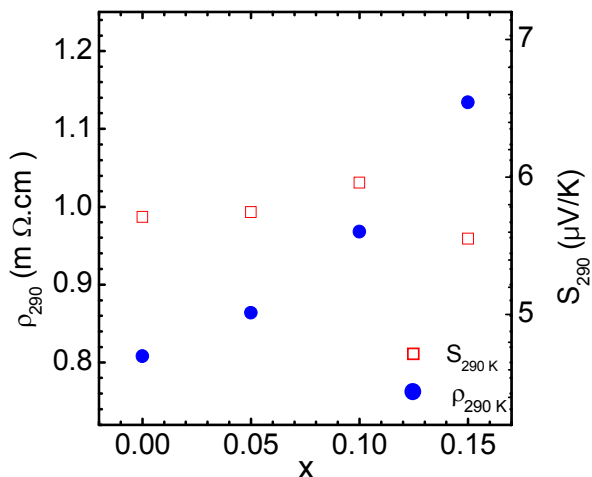
شکل ۲. وابستگی توان گرما الکتریسته به دما و تراکم آلایش برای ترکیبات ابررساناهای $\text{Nd}_{1-x}\text{Ca}_x\text{Ba}_{1-x}\text{La}_x\text{Cu}_y\text{O}_{y-\delta}$. شکل کوچک داخل تغییرات خطی توان گرما الکتریسته را در دمای بالاتر از ۲۵۰ K برای نمونه $x=0.15$ نشان می‌دهد. خط برازش معادله ۲ را به داده‌های تجربی نشان می‌دهد.



شکل ۱. تغییرات مقاومت الکتریکی به صورت تابعی از دما در نمونه $\text{Nd}_{1-x}\text{Ca}_x\text{Ba}_{1-x}\text{La}_x\text{Cu}_y\text{O}_{y-\delta}$



شکل ۴. چگالی حفره‌ها و p (مقیاس سمت راست) و دمای بحرانی ابررسانایی $T_c(k)$ (مقیاس سمت چپ) برحسب غلظت آلایش. خط راهنمایی برای چشم است.



شکل ۳. تغییرات توان گرما الکتریسته و مقاومت الکتریکی در دمای اتاق برحسب غلظت آلایش.

وجود گرادیان دمایی در اثر پخش حاملهای بار از ناحیه گرمتر به ناحیه سردتر ایجاد می‌شود.

با استفاده از مدل مایع فرمی وقتی که زمان واهلش τ وابستگی ضعیفی به انرژی داشته باشد، می‌توان توان گرما الکتریسته ناشی از پخش حاملها S_d را به صورت زیر نوشت:

الف) توان گرما الکتریسته ناشی از اثر کشش فونون S_g^1 ، که در دماهای بالا برای ابررساناهای دمای بالا تقریباً ثابت است [۱۵].

ب) توان گرما الکتریسته ناشی از پخش حاملها S_d ، که به علت

۱. Phonon drag effect

نتیجه چگالی حفره‌ها در صفحات CuO_2 با افزایش غلظت آلاینده کاهش می‌یابد. لذا علت کاهش خواص ابرسانایی، مانند دمای بحرانی، کاهش چگالی حفره‌ها در صفحات CuO_2 در اثر افزایش جایگزیده شدن حاملهای بار است. از طرف دیگر چون مقاومت الکتریکی حساسیت بیشتری نسبت به جایگزیده شدن حفره‌ها دارد لذا با افزایش غلظت آلاینده شدیداً افزایش و خاصیت فلزی این ترکیب کاهش می‌یابد.

۳-۲- مدل پدیده شناختی نوار باریک

مدل پدیده شناختی نوار باریک [۱۲] جهت توصیف رفتار خواص تراپردی الکتریکی حالت عادی ترکیبات ۱۲۳-Y، مانند مقاومت الکتریکی، توان گرما الکتریسیته و ضریب هال ارائه شده است. مبنای این مدل وجود یک قله باریک در چگالی حالت‌های الکترونی در مجاورت سطح فرمی است. براساس این مدل وابستگی توان گرما الکتریسیته به دما را می‌توان به صورت زیر نوشت:

$$S = -\frac{k_B}{e} \left(\frac{W_\sigma^*}{\sinh W_\sigma^*} [e^{-\mu^*} + \cosh W_\sigma^* - \frac{1}{W_\sigma^*} (\cosh \mu^* + \cosh W_\sigma^*) \ln \left(\frac{z+u}{z+u^{-1}} \right)] - \mu^* \right) \quad (4)$$

که در آن μ^* ، به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$\mu^* = \frac{\mu}{k_B T} = \ln \frac{\sinh(FW_D^*)}{\sinh[(1-F)W_D^*]} \quad (5)$$

که در آن $z = \exp(\mu^*)$ ، $W_\sigma^* = W_\sigma / \sqrt{k_B T}$ ، $W_D^* = W_D / \sqrt{k_B T}$ هستند. $u = \exp(W_\sigma^*)$ سه پارامتر اصلی این مدل هستند.

W_D پهنای مؤثر نوار در منحنی چگالی حالتها برحسب انرژی $D(E)$ و W_σ پهنای مؤثر نوار در منحنی هدایت الکتریکی بر حسب انرژی $\sigma(E)$ هستند. F میزان پرشدگی نوار را به وسیله الکترونها نشان می‌دهد، که به صورت نسبت تعداد الکترونها به تعداد کل حالت‌های داخل نوار N تعریف می‌شود. علاوه بر این تمایل به جایگزیدگی حاملها، در اثر بی نظمیهای ایجاد شده توسط آلاینده‌ها، در لبه‌های نوار توسط پارامتر $C = W_D / W_\sigma$ توصیف می‌شود.

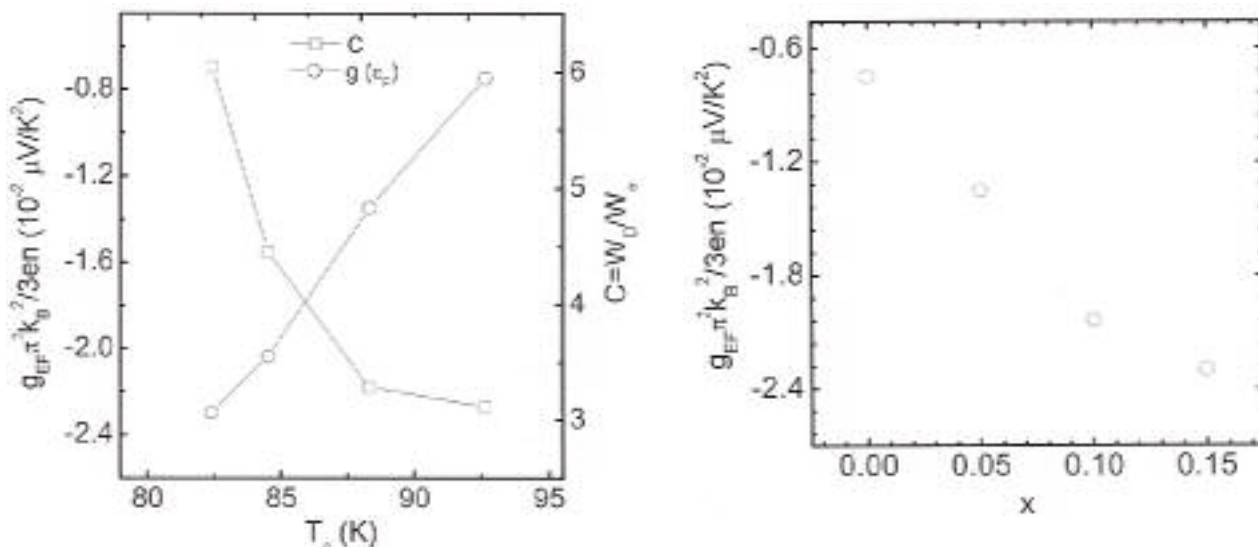
$$S_d = \frac{\pi^2 k_B^2 T}{3|e|n} \frac{g(\epsilon_F)}{n} \quad (2)$$

که در آن $g(\epsilon_F)$ چگالی حالت‌های الکترونی در انرژی فرمی ϵ_F ، n چگالی الکترونها آزاد، k_B ثابت بولتزمن و e بار الکتریکی است. با فرض تغییر چگالی حالتها و تغییرات ناچیز سرعت v ، زمان واهلش τ داریم:

$$\partial S_d / \partial T \approx \partial S / \partial T \quad (3)$$

در دماهای بالا توان گرما الکتریسته ناشی از اثر کشش فونونی تقریباً ثابت است [۱۵] و تغییرات توان گرما الکتریسته ابرساناهای دمای بالا نیز تقریباً متناسب با دما کاهش می‌یابد (شکل ۲). بنابراین می‌توان در محدوده دمایی که تغییرات k بر حسب T به صورت تقریباً خطی است از معادله (۲) برای تحلیل داده‌های تجربی توان گرما الکتریسته استفاده کرد. همان طور که در شکل کوچکتر داخل شکل ۲ نشان داده شده است توان گرما الکتریسته ترکیب $\text{Nd}_{1-x}\text{Ca}_x\text{Ba}_{2-x}\text{La}_x\text{Cu}_2\text{O}_{7-\delta}$ (که برای یکی از نمونه‌ها نشان داده شده است) در دماهای بالاتر از 250°K به صورت خطی کاهش می‌یابد. لذا در این محدوده دمایی داده‌های تجربی به معادله (۲) برازش و شیب خط تعیین گردید. شکل ۵ تغییرات شیب خط یعنی $\pi^2 k_B^2 g(\epsilon_F) / 3|e|n$ را به صورت تابعی از غلظت آلاینده نشان داده است.

با توجه به اینکه نمونه‌ها از لحاظ الکتریکی خنثی هستند، چون الکترون اضافه شده توسط La با حفره اضافه شده توسط Ca خنثی می‌گردد، و از طرف دیگر نتایج حاصل از مطالعات ساختار بلوری توسط پراش نوترون و اشعه X نشان داده است که مقدار اکسیژن موجود در ساختار بلوری مستقل از مقدار آلاینده (La, Ca) است [۹، ۱۰]، لذا چگالی حفره‌ها تقریباً ثابت است که در توافق با نتایج حاصل از توان گرما الکتریسیته در دمای اتاق می‌باشد. بنابراین در دماهای بالا تغییر شیب منحنیهای خطی توان گرما الکتریسیته بر حسب دما فقط ناشی از تغییر $g(\epsilon_F)$ می‌باشد. همان طور که شکل نشان می‌دهد $g(\epsilon_F)$ با افزایش غلظت آلاینده کاهش می‌یابد. این نتایج پیشنهاد می‌کنند که با افزایش آلاینده جایگزیده شدن حاملها افزایش می‌یابد. در



شکل ۵. تغییرات چگالی حالت‌های الکترونی بر حسب غلظت آلایش. شکل ۶. تغییرات چگالی حالت‌های الکترونی (مقیاس سمت چپ) و پارامتر جایگزیدگی (مقیاس سمت راست) بر حسب دمای بحرانی.

جدول ۱. پارامترهای به دست آمده از برازش مدل نوار باریک به داده‌های توان گرما الکتریسته برای نمونه‌های $Nd_{1-x}Ca_xBa_{1-x}La_xCu_2O_{7-\delta}$.

	W_σ (meV)	W_D (meV)	$F=n/N$	$C=W_D/W_\sigma$
$x=0.0$	۲۴٫۴	۷۵٫۹	۰٫۵۱۴۶	۳٫۱۱۷
$x=0.05$	۲۸٫۵	۹۳٫۶	۰٫۵۱۴۱	۳٫۲۸۵
$x=0.10$	۳۱٫۶	۱۴۰٫۸	۰٫۵۱۱۶	۴٫۴۵۶
$x=0.15$	۳۰٫۶	۱۸۴٫۸	۰٫۵۰۸۸	۶٫۰۴۶

تمایل جایگزیدگی حاملها است. بنابراین این نتایج پیشنهاد می‌کنند که پهن شدگی نوار اساساً در قسمت‌های جایگزیده نوار اتفاق می‌افتد.

پارامتر F تقریباً ثابت است لذا میزان پرشدن حفره‌ها توسط الکترونها تغییر نمی‌کند و نشان دهنده آن است که آلایش از نظر الکتریکی خنثی است. این نتیجه با توجه به ثابت ماندن مقدار اکسیژن داخل شبکه [۹، ۱۰] در توافق با موازنه بار الکتریکی حاصل از افزودن آلایشهای Ca^{2+} به جای Nd^{3+} و La^{3+} به جای Ba^{2+} است. به عبارت دیگر تمام حفره‌های اضافه شده به ساختار توسط آلاینده Ca به وسیله الکترونها اضافه شده توسط La جبران می‌گردد.

در نهایت همان طور که نشان داده شد می‌توان به خوبی

داده‌های تجربی توان گرما الکتریسته به مدل نوار باریک (رابطه ۴) برازیده شده‌اند. منحنیهای برازیده شده در شکل ۲ به صورت خطوط توپر نشان داده شده است. همان طور که در شکل دیده می‌شود مدل به خوبی داده‌های تجربی را توصیف می‌کند. پارامترهای به دست آمده از برازش داده‌ها در جدول ۱ آمده است.

W_σ و W_D از مرتبه 0.1 eV هستند که در توافق با نتایج به دست آمده برای $Y-123$ آلاییده شده توسط کاهش اکسیژن و عناصر فلزی $3d$ است [۱۲]. با افزایش غلظت آلایش، پارامتر W_D افزایش می‌یابد که کاهش چگالی حالتها را پیشنهاد می‌کند. W_σ نیز افزایش می‌یابد اما افزایش W_D بیشتر از افزایش W_σ است بنابراین پارامتر C افزایش می‌یابد که نشان دهنده افزایش

افزایش می‌یابد درحالی که دمای بحرانی T_c در اثر افزایش غلظت آلایش کاهش می‌یابد. بنابر این هر دو مدل پیشنهاد می‌کنند که افزایش یکسان آلایش Ca در جایگاه Nd و La در جایگاه Ba در ترکیب $Nd_{1-x}Ca_xBa_{1-x}La_xCu_yO_{y-\delta}$ باعث افزایش جایگزیدگی حاملهای بار در صفحات CuO_2 می‌شود. در نتیجه کاهش دمای بحرانی ابرسانی را می‌توان به طور کیفی توسط تصویر جایگزیدگی حاملهای بار متحرک به وسیله بی‌نظمیهای ناشی از افزودن آلایش به خوبی توصیف نمود.

داده‌های توان گرما الکتریسته را توسط دو مدل توصیف نمود. چون دو مدل فوق بر اساس فرضهای کاملاً متفاوتی بنا شده‌اند لذا مقایسه کمی بین آنها مشکل است. اما چگالی حالتها در مدل مایع فرمی $g(\epsilon)$ و پارامتر جایگزیدگی C در مدل نوار باریک دلیل مشابهی را جهت توصیف کاهش خاصیت ابرسانی ترکیب Nd-۱۲۳ آلاینده شده به طور خنثی بیان می‌کنند. شکل ۶ رابطه بین دمای بحرانی ابرسانی و $g(\epsilon)$ را در یک طرف و پارامتر جایگزیدگی را در طرف دیگر نشان می‌دهد. همان طور که در شکل مشاهده می‌شود $g(\epsilon)$ کاهش و C

مراجع

1. S D Obertelli, J R Cooper, and J L Tallon, *Phys. Rev. B* **46** (1992) 14928.
2. J L Tallon et. al., *Phys. Rev. Lett.* **75** (1995) 4114.
3. J W Cochrane, G J Russel, and D N Matthews, *Physica C* **232** (1994) 89.
4. G V M Williams, M Staines, J L Tallon, and R Meinhold, *Physica C* **258** (1991) 2418.
5. P Lundqvist, C Tengroth, O Rapp, R Tellgren, and Z Hegedus, *Physica C* **269** (1996) 231.
6. P Lundqvist, O Rapp, R Tellgren, and I Bryntse, *Phys. Rev. B* **56** (1997) 2824.
7. M R Mohammadizadeh and M Akhavan, *Phys. Rev. B* **68** (2003) 104516.
8. ش. ر. قربانی، مجله پژوهش فیزیک ایران، ۴، ۵، زمستان (۱۳۸۴) ۲۵۰.
9. V E Gasumyants, M V Elizarova and I B Patrina, *Supercond. Sci. Technol.* **13** (2000) 1600.
10. P R Slater and C Greaves. *Supercond. Sci. Technol.* **5** (1992) 205.
11. H Fjellvåg, P Karen, A Kjekshus, and A F Andresen, *Physica C* **162-164** (1989) 49.
12. V E Gasumyants, V I Kaidanov, and E V Veladimiskaya, *Physica C* **248** (1995) 255.
13. N W Ashcroft and N D Mermin, *Solid State Physics*, Saunders College Publishing, Flirida (1976).
۱۴. ش. ر. قربانی، م. همایی، مقاله نامه کنفرانس فیزیک ایران (۱۳۸۶) ۱۲۶۰.
15. J L Tallon et. al., *Phys. Rev. B* **51** (1995) 12911.