

$Nd_{1-x} Pr_x Ba_2 Cu_3 O_{7-\delta}$

sh.ghorbani@um.ac.ir :

(دریافت مقاله: ۱۳۹۰/۲/۲۱؛ دریافت نسخه نهایی: ۱۳۹۱/۶/۱۵)

($0 \leq x \leq 1$)

$Nd_{1-x} Pr_x Ba_2 Cu_3 O_{7-\delta}$

CuO

CuO

Pr

ابرساناهای کوپرات باشد. یکی از روش‌های مناسب برای بررسی رفتار ابرساناهای دمای بالا اندازه‌گیری خواص تراپردی آنهاست. توان گرماالکتریسیته و مقاومت الکتریکی از خواص بسیار مهم برای بررسی رفتار غیر متعارف ابرساناهای دمای بالا هستند. از طرفی توان گرماالکتریسیته S ابزار ساده و مناسبی جهت تعیین چگالی حامل‌ها در صفحات CuO_2 و تشخیص سهم زنجیره‌های CuO_x و صفحات CuO_2 در خواص تراپردی ابرساناهای دمای بالا در حالت عادی است. چون سهم زنجیره‌های CuO_x در توان گرماالکتریسیته دارای شیب مثبت و سهم صفحات CuO_2 معمولاً دارای شیب منفی است [۳]. مدل‌های مختلفی مانند مدل دو نوار به اضافه یک جمله

پس از کشف ابرسانایی در ترکیب Y-۱۲۳، که منجر به یک جهش بزرگ در دمای گذار شد، مطالعات وسیعی به منظور بررسی اثر جایگزینی عناصر دیگر در مکان Y آغاز شد [۱]. تحقیقات نشان می‌دهد که جانشانی عناصر نادر خاکی به جای Y تأثیر چندانی بر دمای گذار، ساختار و خواص تراپردی حالت عادی نمی‌گذارد. از میان عناصر نادر خاکی، Pr تنها عنصری است که ساختار راست‌گوشه ۱۲۳ پایدار را تشکیل می‌دهد اما ابرسانا نمی‌شود [۲]. بنابراین به نظر می‌رسد که تفاوت‌های اساسی بین Pr و سایر لانتانیدها وجود دارد و درک درست این تفاوت‌ها می‌تواند گام مهمی در تبیین علت ابرسانایی در

برای کوپرات‌ها ارائه دادند [۱۱]. این مدل اساس نحوه تشکیل زوج‌های کوپر را رد می‌کند به گونه‌ای که نوع حامل‌های حالت عادی و ابررسانایی در ابررسانش جریان تغییر نمی‌کنند [۱۲]. این مدل پراکندگی‌های مؤثر بوزون-بوزون و بوزون-فونون نوری را در نظر می‌گیرد. بر اساس این مدل مقاومت ویژه‌الکتریکی در صفحات CuO_2 به صورت زیر است [۱۰]:

$$\rho = \rho_0 \frac{(T/T_L)^{\gamma} + \exp(-\omega/T)}{\left[1 + A(T/T_C)^{\gamma} \exp(-T^*/T)\right]}, \quad (2)$$

که در آن

$$\rho_0 = \frac{bm_b}{2e^{\gamma}(x - n_L)},$$

$$T_L = (b/a)^{1/\gamma},$$

$$A = (m_b/m_p)^{\delta/\gamma},$$

$$\tau^{-1} = aT^{\gamma} + b \exp(-\omega/T),$$

$$y = 1 - \exp(-T_0/T),$$

$$T_0 = \pi(x - n_L) / m_b \approx T_C,$$

m_p و m_b به ترتیب جرم جفت‌پلارون و پلارون، T^* دمای شبه‌گاف، ω انرژی فونون نوری هستند. a و b به ترتیب ضرایب پراکندگی حامل‌ها توسط بوزون‌ها و فونون‌های نوری و n_L تراکم حامل‌های جایگزیده شده توسط بی‌نظمی در سلول واحد هستند.

مقاومت ویژه‌الکتریکی در حالت عادی دارای وابستگی خطی نسبت به دما است. انحراف به سمت پایین از این وابستگی خطی در دمای معین T^* که کاملاً بالاتر از دمای گذار است، ناشی از باز شدن شبه‌گاف می‌باشد. در حالت شبه‌گاف ناهنجاری‌های مختلفی در هر دو حالت عادی و ابررسانایی مشاهده شده است که می‌توان آنها را بر اساس کاهش چگالی حالت‌های تک ذره‌ای مؤثر در نزدیکی انرژی فرمی شرح داد [۱۳-۱۴].

در این مقاله برای بررسی تأثیر جاننشانی آلایش Pr در جایگاه Nd در ترکیبات $\text{Nd}_{1-x}\text{Pr}_x$ در بازه آلایش ($0 \leq x \leq 0.3$) توان گرماالکتریسته و مقاومت الکتریکی بس بلور $\text{Nd}_{1-x}\text{Pr}_x\text{Ba}_1\text{Cu}_2\text{O}_{7-\delta}$ به صورت تابعی از دما و میزان

خطی نسبت به دما [۴-۵]، مدل نوار باریک هابارد [۶]، مدل بوزن-فرمی ناگوسا-لی (Nagaosa-Lee) [۷]، مدل پدیده شناسی نوار باریک [۸] و مدل جفت پلارونی [۹] جهت توصیف خواص ترابردی استفاده شده‌اند. چون مدل‌های پدیده شناسی نوار باریک و جفت پلارونی با استفاده از پارامترهای یکسانی، خواص ترابردی مانند مقاومت الکتریکی، ضریب هال و توان گرماالکتریسته ابررساناهای دمایی بالای کوپرات را توصیف می‌کنند، لذا می‌توانند مدل‌های مناسب‌تری برای تحلیل داده‌های تجربی خواص ترابردی باشند. در مدل پدیده شناسی نوار باریک، قله باریکی در چگالی حالت‌های الکترونی نزدیک به سطح فرمی در نظر گرفته می‌شود [۸]. مطالعه پدیده نابودی پوزیترون و تراکسیل طیف سنجی وجود این قله را تأیید نموده‌اند [۱۰]. بر اساس این مدل توان گرماالکتریسته به صورت:

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

است که در آن

$$W_{\sigma}^* = \frac{W_{\sigma}}{k_B T},$$

$$W_D^* = \frac{W_D}{k_B T},$$

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

μ پتانسیل شیمیایی، k_B ثابت بولتزمن، W_D عرض نوار مؤثر در چگالی حالت‌ها $D(\epsilon)$ ، W_{σ} عرض نوار مؤثر در چگالی هدایت الکتریکی $\sigma(\epsilon)$ و F میزان پرشدگی نوار الکترونی (نسبت تعداد الکترون‌ها n به تعداد کل حالت‌ها N) می‌باشد.

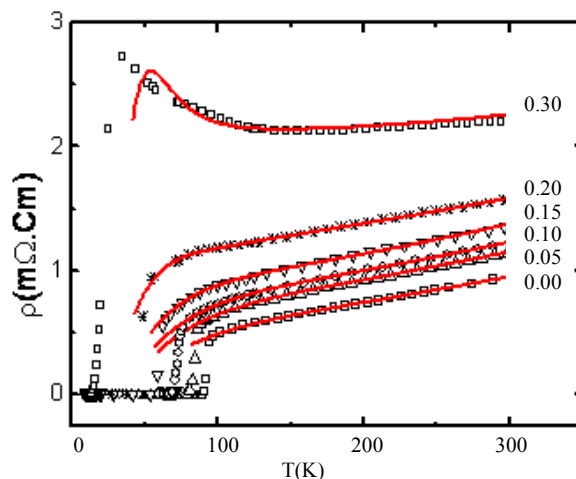
مدل جفت پلارون در طی چند سال اخیر نتایج تجربی را به خوبی توصیف نموده است [۹]. این مدل توجه ویژه‌ای به برهم کنش قوی الکترون-فونون در ابررساناهای دمایی بالا دارد. مات و الکساندروف بر اساس جفت پلارون‌ها مدل ساده‌ای را

مقدار اکسیژن، نمونه‌ها در حضور اکسیژن به مدت سه روز در دمای 460°C باز پخت شده و سپس تا دمای اتاق با آهنگ 12°C/hr سرد شدند.

پراش به روش پودر اشعه X (XRD) و نوترون (NRD) برای نمونه‌ها انجام گرفت [۱۵]. نتایج XRD و (NRD) نشان دادند که تمام نمونه‌ها تک فاز و دارای ساختار 123 راست گوشه هستند. اندازه‌گیری مقاومت الکتریکی با استفاده از ترکیب بند چهار پایه استاندارد انجام شد. برای اتصالات الکتریکی از چسب نقره به صورت نوار باریک روی نمونه استفاده شد. به منظور بهبود مقاومت الکتریکی اتصال، نمونه در اتمسفر اکسیژن به مدت نیم ساعت در دمای 300°C باز پخت و سپس سریعاً تا دمای اتاق سرد شد. این عمل منجر به مقاومت الکتریکی از مرتبه $2-1\ \Omega$ برای اتصالات شد، که مقدار مناسبی جهت مقاومت اتصال است.

توان گرماالکتریسته با استفاده از یک نگهدارنده نمونه که توانایی اندازه‌گیری همزمان دو نمونه را داشت در انیستیتو تکنولوژی رویال استکهلم کشور سوئد صورت گرفت. از قرص‌های پخت شده، نمونه‌های میله‌ای شکل به ابعاد $11 \times 4 \times 2 \times 0.5\ \text{mm}^3$ 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 گرماالکتریسته در طی هر پرپود اختلاف ولتاژ ΔV به ازای گرادیان‌های ΔT متفاوت اندازه‌گیری می‌شود. شیب خط راست برازش شده به داده‌های $\Delta V-\Delta T$ در هر پرپود برابر توان گرماالکتریسته ناشی از نمونه و سیم‌های مسی متصل به آن است. با تصحیح سهم سیم‌های مسی توان گرماالکتریسته نمونه‌ها به دست می‌آید. برای اندازه‌گیری از یک گرادیان دمایی برگشت پذیر کوچک تا $1.5\ \text{K}$ استفاده شد.

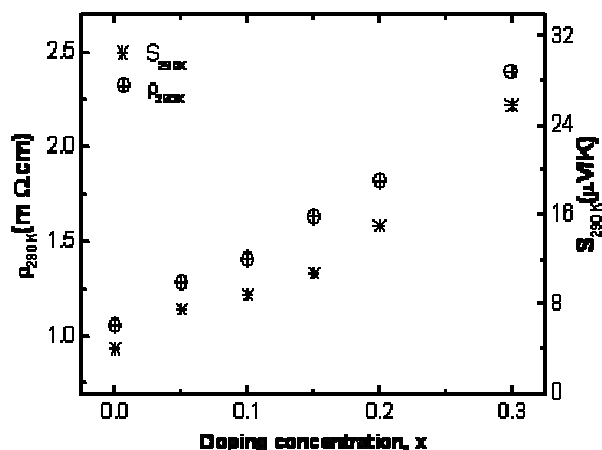
در شکل ۱ وابستگی مقاومت الکتریکی به صورت تابعی از دما و غلظت آلیش برای ابررساناهای $Nd_{1-x}Pr_xBa_4Cu_3O_{7-8}$ در بازه آلیش $(0 \leq x \leq 0.3)$ نشان داده شده است. با کاهش دما، مقاومت الکتریکی نمونه‌ها از دمای اتاق تا دمای معین T^*



شکل ۱. وابستگی مقاومت ویژه الکتریکی به صورت تابعی از دما و تراکم آلیش برای نمونه $Nd_{1-x}Pr_xBa_4Cu_3O_{7-8}$. خطوط منقطع وابستگی خطی مقاومت ویژه به دما را نشان می‌دهد. انحراف از حالت خطی به سمت پایین مقاومت ویژه در دمای T^* نشان داده شده است. خطوط توپیر منحنی برازش داده‌های تجربی به مدل جفت پلارونی را نشان می‌دهد.

آلیش اندازه‌گیری شد. داده‌های تجربی بر اساس مدل نوار باریک و مدل جفت پلارونی تجزیه و تحلیل شده‌اند. نتایج نشان می‌دهند که هر دو مدل به خوبی داده‌های تجربی را توصیف می‌کنند. همچنین دمای شبه گاف به صورت تابعی از چگالی آلیش از روی انحراف به سمت پایین وابستگی خطی مقاومت الکتریکی به دما اندازه‌گیری شده است. توان گرماالکتریسته در دمای اتاق اندازه‌گیری و جهت تعیین دیاگرام فاز چگالی حفره‌ها از روی رابطه تجربی بین $S_{290\text{K}}$ و p به دست می‌آید [۳].

نمونه‌های بس بلور $Nd_{1-x}Pr_xBa_4Cu_3O_{7-8}$ با آلیش $(0 \leq x \leq 0.3)$ به روش پودر حالت جامد ساخته شدند. جهت ساخت از مواد اولیه Nd_2O_3 ، $BaCO_3$ ، Pr_6O_{11} ، CuO با درجه خلوص بالا استفاده شد. پودر مواد اولیه ابتدا با ترازوی دیجیتالی (با دقت $1/10000$ گرم) وزن و سپس با دقت با هم مخلوط شدند. نمونه‌ها به صورت قرص سه بار به ترتیب در دماهای 920°C و 900°C پخت شدند. برای بهینه کردن



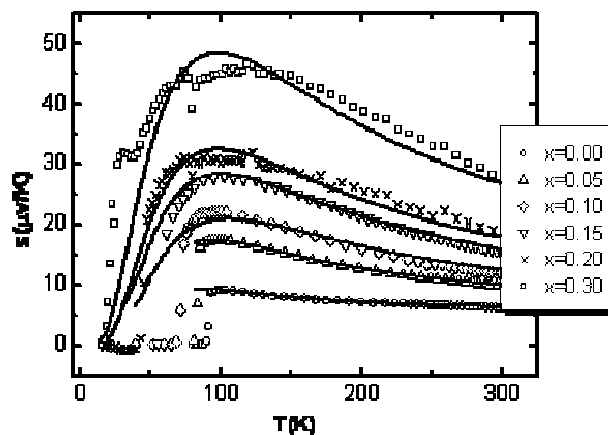
شکل ۳. وابستگی توان گرماالکتریسیته و مقاومت ویژه الکتریکی در دمای اتاق به چگالی آلیش برای نمونه $\text{Nd}_{1-x}\text{Pr}_x\text{Ba}_2\text{Cu}_2\text{O}_{7-\delta}$.

دمای بحرانی تادمای 300K مثبت است. در دمای اندکی بالاتر از دمای بحرانی، مقدار S به صورت نسبتاً شدیدی افزایش می‌یابد، تا به یک مقدار بیشینه S_{max} در دمای T_{max} می‌رسد و بعد از آن تا دمای اتاق تقریباً به طور خطی کاهش می‌یابد.

با افزایش غلظت آلیش، $S_{290\text{K}}$ افزایش می‌یابد (شکل ۴). با استفاده از رابطه تجربی پیشنهاد شده بین $S_{290\text{K}}$ و چگالی حفره‌ها در داخل صفحات CuO_2 به دست می‌آید [۳]. این نتایج نشان می‌دهند که با افزایش غلظت آلیش، چگالی حفره‌ها در داخل صفحات CuO_2 کاهش می‌یابد. همچنین شکل ۲ نشان می‌دهد که صفحات CuO_2 سهم غالب را در خواص تراپردی نمونه‌ها دارند، چون شیب همه منحنی‌ها منفی است [۳].

وابستگی $\rho_{290\text{K}}$ و $S_{290\text{K}}$ بر حسب غلظت آلیش در شکل ۳ نشان داده شده است. شکل فوق نشان می‌دهد که با افزایش غلظت آلیش $\rho_{290\text{K}}$ و $S_{290\text{K}}$ افزایش می‌یابند، لذا بر اساس وابستگی ρ به تراکم حفره‌ها می‌توان نتیجه گرفت که اضافه نمودن Pr منجر به کاهش تراکم حامل‌های بار و در نتیجه کاهش خاصیت فلزی می‌شود، که در توافق با محاسبات نظریه BVS است [۱۵].

با استفاده از دمای بحرانی به دست آمده از داده‌های مقاومت الکتریکی و چگالی حفره‌های به دست آمده از روی توان گرماالکتریسیته در دمای اتاق بر اساس رابطه تلن [۳]،



شکل ۴. وابستگی توان گرماالکتریسیته به صورت تابعی از دما و تراکم آلیش برای نمونه $\text{Nd}_{1-x}\text{Pr}_x\text{Ba}_2\text{Cu}_2\text{O}_{7-\delta}$. خطوط توپر منحنی برازش داده‌های تجربی به مدل نوار باریک را نشان می‌دهد.

که کاملاً بالاتر از دمای گذار است به صورت خطی کاهش می‌یابد. با افزایش آلیش در دمای کمتر از T^* انحراف رو به پایین مقاومت برای همه نمونه‌ها به جز $x=0/3$ افزایش می‌یابد. مقاومت الکتریکی در دمای گذار T_c کاهش ناگهانی دارد.

همان‌طور که در شکل دیده می‌شود افزایش غلظت آلیش Pr منجر به افزایش شدیدی در اندازه مقاومت ویژه الکتریکی می‌شود، که این تغییرات نشان دهنده کاهش چگالی حامل‌ها است. همچنین مشاهده می‌شود که با افزایش آلیش Pr، T_c افت می‌کند (مقدار T_c دمایی است که در آن مقاومت ویژه الکتریکی حالت عادی، ۵۰ درصد افت کند).

با افزایش این غلظت Pr، پهن شدگی در ناحیه دمای گذار بیشتر می‌شود. در نمونه‌های با درصد بالایی از غلظت آلیش، شیب حالت هنجار نمونه‌ها کم شده و شانه‌هایی مشاهده می‌شوند که نشان دهنده دور شدن نمونه‌ها از حالت فلزی و نزدیک شدن به حالت نیمه رسانایی است. این وضعیت برای نمونه $x=0/3$ به وضوح در شکل دیده می‌شود، چون شیب وابستگی مقاومت ویژه الکتریکی بر حسب دما مثبت شده است.

شکل ۲ داده‌های تجربی توان گرماالکتریسیته ابررساناهای $\text{Nd}_{1-x}\text{Pr}_x\text{Ba}_2\text{Cu}_2\text{O}_{7-\delta}$ را در بازه $(0/5 \leq x \leq 0/3)$ نسبت به دما نشان می‌دهد. توان گرماالکتریسیته برای همه نمونه‌ها از

جدول ۱. پارامترهای مدل جفت پلارونی در برازش به داده‌های تجربی

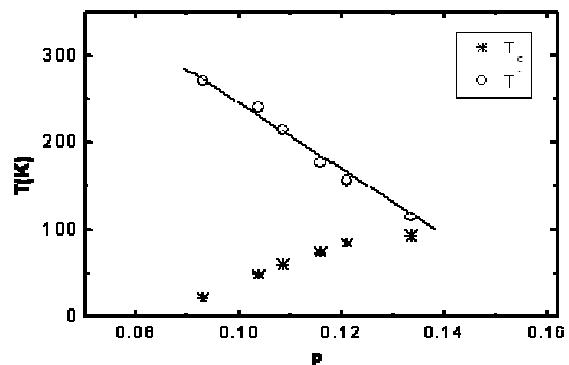
x	ρ_c (m Ω .cm)	T_1 (K)	ω (K)	T_c (K)	T^* (K)
۰/۰۰	۴/۰۸	۳۰۱/۷۱	۱۸۰	۹۳/۲۶	۱۱۵
۰/۰۵	۷/۸۵	۳۰۶/۸۶	۲۲۷	۸۴/۵۳	۱۵۶/۰۷
۰/۱۰	۱۰/۲۸	۳۲۱/۳۹	۲۵۰	۷۳/۵۶	۱۷۶/۲۸
۰/۱۵	۱۶/۱۳	۳۲۳/۱۵	۳۱۳/۰۱	۶۰/۶۶	۲۱۴/۴
۰/۲۰	۷۷/۷۸	۵۰۷/۴۹	۳۷۸/۰۷	۴۸/۷۵	۲۴۰
۰/۳۰	۵۷۴/۴۵	۶۰۳/۵۱	۳۷۱/۰۹	۲۱/۹۲	۲۷۰/۲۸

مدل جفت پلارون (معادله ۲) است. همان‌طور که در شکل ۱ دیده می‌شود برازش مدل جفت پلارونی توافق بسیار خوبی با داده‌های تجربی تا نزدیکی دمای بحرانی دارد. پارامترهای به دست آمده از برازش داده‌ها به مدل جفت پلارون در جدول ۱ آمده است. مشاهده می‌شود که ρ_c ضریب مقاومت ویژه، با افزایش چگالی آلیش زیاد می‌شود. افزایش ρ_c با انتقال نمودار مقاومت الکتریکی به مقادیر بزرگتر همراه است.

در مورد نمونه با آلیش $x=0/30$ یک افزایش ناگهانی در مقدار ρ_c مشاهده می‌شود که در توافق با کاهش شدید چگالی حامل‌های به دست آمده از روی رابطه تجربی پیشنهاد شده بین S_{290K} و ρ است [۳]. این رفتار بیانگر کاهش رسانایی نمونه می‌باشد.

پارامتر ω در مدل جفت پلارون انرژی فونون‌هاست. مشاهده می‌شود که با افزایش غلظت آلیش ω زیاد می‌شود. از آنجا که انرژی فونون‌ها متناسب با ارتعاشات یونی در شبکه بس بلور است یعنی با افزایش آلیش ارتعاشات یونی افزایش می‌یابد. به عبارت دیگر با جانشانی اتم Pr در جایگاه Nd، و با توجه به بار الکتریکی بیشتر این آلاینده، نیروی کولنی بیشتری به اتمهای مجاور وارد می‌شود که در توافق با نتایج پراش نوترون می‌باشد [۱۵]. افزایش نیروی کولنی موجب تغییر شکل شبکه و تولید فونون می‌شود. با افزایش نیروهای کولنی ناشی از جانشانی، انرژی فونونی نیز افزایش می‌یابد.

در مدل جفت پلارونی، T_1 به عنوان جذر نسبت دامنه پراکندگی فونون‌ها به دامنه پراکندگی جفت پلارونها است

شکل ۴. دیاگرام فاز برای نمونه $\text{Nd}_{1-x}\text{Pr}_x\text{Ba}_7\text{Cu}_3\text{O}_{v-8}$.

دیاگرام فاز T - p در شکل ۴ رسم شده است. در شکل ۴ وابستگی T_c به p به صورت سهموی است که در توافق با وابستگی مشاهده شده توسط پرسلند و همکارانش می‌باشد [۱۴].

از روی انحراف به سمت پایین وابستگی خطی مقاومت ویژه الکتریکی به دما، دمای شبه گاف تعیین شده است. تغییرات دمای شبه گاف بر حسب چگالی حفره‌ها در شکل ۴ نشان داده شده است. مشاهده می‌شود که با افزایش چگالی، آلیش دمای شبه گاف افزایش می‌یابد، زیرا اضافه نمودن Pr منجر به کاهش چگالی حفره‌های نمونه قرار گرفتن نمونه در ناحیه کم آلییده می‌شود که شبه گاف از خصوصیات ناحیه فوق است. نتایج فوق پیشنهاد می‌کنند که افزایش آلیش Pr باعث تخلیه بیشتر چگالی حالت‌های الکترونی در نزدیکی تراز فرمی می‌گردد، لذا سبب افزایش پهنای شبه گاف می‌شود.

خطوط توپر در شکل ۱ برای برازش داده‌های تجربی به

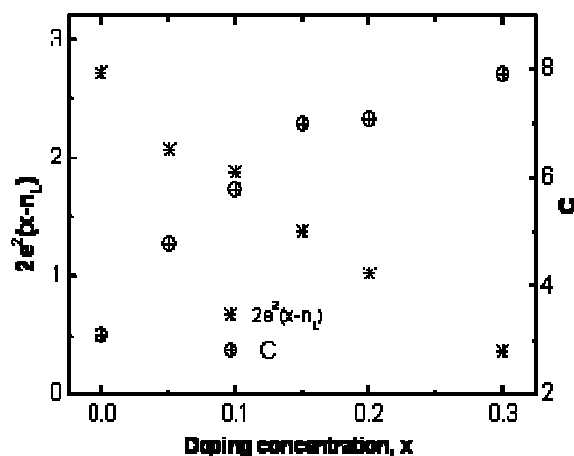
جدول ۲. پارامترهای مدل نوار باریک در برازش به داده‌های توان گرماالکتريسته.

x	W_D (meV)	W_σ (meV)	F
۰/۰۰	۷۸	۲۵	۰/۵۱۵۷
۰/۰۵	۱۴۴	۲۹/۸	۰/۵۱۸۷
۰/۱۰	۱۷۸	۳۰/۸۸	۰/۵۱۹۵
۰/۱۵	۲۲۸	۳۲ / ۶	۰/۵۲۰۷
۰/۲۰	۲۴۰	۳۴ / ۲	۰/۵۲۳
۰/۳۰	۲۹۷	۳۷/۵۴	۰/۵۳۰

افزایش می‌یابد، اما سرعت افزایش W_D از W_σ بیشتر است. این افزایش شدید کاهش چگالی حالت‌ها را پیشنهاد می‌کند. همچنین با افزایش غلظت آلیش پارامتر F زیاد می‌شود. این رفتار بیانگر افزایش پرشدگی نوار به وسیله الکترون و کاهش حفره‌های متحرک است. یعنی آلاینده Pr الکترون اضافی به نمونه وارد می‌کند.

پارامترهای $C=W_D / W_\sigma$ و $\gamma e^2(x-n_L)$ در مدل نوار باریک و جفت‌پلارون با تمایل جایگزیدگی حامل‌ها مرتبط می‌باشند. در شکل ۵ وابستگی پارامترهای C و $\gamma e^2(x-n_L)$ به صورت تابعی از x نشان داده شده است. افزایش پارامتر C و کاهش پارامتر $\gamma e^2(x-n_L)$ افزایش تمایل جایگزیدگی حامل‌ها را پیشنهاد می‌کنند. بنابراین هر دو مدل پیشنهاد می‌کنند که با افزایش غلظت آلیش، تمایل جایگزیدگی حامل‌ها افزایش می‌یابد. لذا جایگزیدگی حفره‌ها یکی از عوامل اصلی کاهش چگالی حفره‌ها در صفحات CuO_2 و در نتیجه از بین رفتن ابرسانایی است.

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



شکل ۵. وابستگی پارامترهای $C=W_D/W_\sigma$ و $\gamma e^2(x-n_L)$ برای نمونه $\text{Nd}_{1-x}\text{Pr}_x\text{Ba}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$ به چگالی آلیش.

($T_1 = (b/a)^{1/2}$). مشاهده می‌شود که با افزایش غلظت، آلیش این پارامتر زیاد می‌شود. یعنی با افزایش آلیش آهنگ افزایش پراکندگی فونونی سریعتر از آهنگ افزایش پراکندگی جفت‌پلارونی است.

جهت برازش داده‌های تجربی از مدل نوار باریک استفاده شده است. خطوط توپر در شکل ۲ برازش داده‌های تجربی را به این مدل نشان می‌دهد. همان‌طور که در شکل دیده می‌شود داده‌های تجربی در گستره وسیعی از دما، به وسیله مدل نوار باریک به خوبی توصیف می‌شوند. پارامترهای به دست آمده از برازش داده‌ها به مدل نوار باریک در جدول ۲ نشان داده شده‌اند.

مشاهده می‌شود که با افزایش غلظت، آلیش W_D و W_σ

- 2450.
8. V E Gasumyants, V I Kaidanov, and E V Valadimirskaya, *Physica C* **248** (1995) 225.
 9. M Sato, R Horiba, and K Nagasaka, *Phys. Rev. Lett.* **70** (1993) 1173.
 10. A S Alexandrov, V N Zavaritsky, and S Dzhumanov *Phys. Rev. B* **69** (2004) 052505.
 11. A S Alexandrov, and N F Mott, *J. Supercond.* **7** (1994) 599.
 12. A S Alexandrov, *Phys. Rev. B* **53** (1996) 2863.
 13. J L Tallon, C Bernhard, H Shaked, R L Hitterman, and J D Jorgenson, *Phys. Rev. B* **51** (1995) 12911.
 14. M R Presland, J L Tallon, R G Buckley, R S Liu, and N E Flower, *Physica C* **176** (1991) 95.
 15. S R Ghorbani, M Andersson, and Ö Rapp, *Phys. Rev. B* **69** (2004) 14503.
۱. محمد اخوان و زهرا سادات یمنی، "پیشرفت‌های ابررسانایی دمای بالا"، انتشارات دانشگاه صنعتی شریف، جلد اول (۱۳۸۲).
 ۲. محبوبه میرزاده، پرستو ملک و محمد اخوان، مجله پژوهش فیزیک ایران، ۶ (۱۳۸۵) ۱۵۳.
 3. S D Obertelli, J R Cooper, and J L Tallon, *Phys. Rev. B* **46** (1992) 14928.
 4. L Forro, J Lukatela, and B Keszei, *Solid State Commun*, **73** (1990) 501.
 5. U Gottwick, K Gloos, S Horn, F Steglich, and N Grewe, *J. Magn. Mater.* **47-48** (1985) 536.
 6. P M Chaikin, and Beni, *Phys. Rev. B* **13** (1976) 647; J F Kwak, and G Beni, *Phys. Rev. B* **13** (1976) 652.
 7. N Nagaosa, and P A Lee, *Phys. Rev. Lett.* **64** (1990)