

## مقاومت الکتریکی حالت عادی ابررساناهای $Y(Nd)-123$ با آلایشهای $CaTh$ و $La$ بر اساس مدل جفت پلارونی

شعبان رضا قربانی و ابراهیم رستم‌آبادی

گروه فیزیک، دانشگاه تربیت معلم سبزوار، سبزوار

(دریافت مقاله: ۸۶/۵/۲ ؛ دریافت نسخه نهایی: ۸۶/۸/۲۳)

### چکیده

ترکیبات بس‌بلور ابررسانای  $Y_{1-x}Ca_xTh_xBaCu_3O_{7-\delta}$  و  $NdBa_{2-x}La_xCu_3O_{7-\delta}$  به روش استاندارد حالت جامد ساخته شده‌اند. خواص ترابردی و ابررسانایی آنها با اندازه‌گیری مقاومت الکتریکی به صورت تابعی از دما و غلظت آلایش  $CaTh$  در بازه  $0.75 \leq x \leq 1.0$  و غلظت آلایش  $La$  در بازه  $0.30 \leq x \leq 1.0$  مطالعه شده است. برای تحلیل داده‌های تجربی از مدل پدیده شناختی جفت پلارونی استفاده شد. مدل جفت پلارونی داده‌های تجربی مقاومت الکتریکی را تا نزدیکی دمای بحرانی به خوبی توصیف می‌کند. نتایج به دست آمده پیشنهاد می‌کند جایگزینی حاملها علت اصلی در از بین رفتن ابررسانایی در ابررساناهای کوپرات آلاییده با آلایش خنثی از لحاظ الکتریکی و یکی از عوامل اصلی در ابررسانای آلاییده شده پایه  $Nd$  با  $La$ ، علاوه بر پرکردن حفره‌ها، است.

واژه‌های کلیدی: ابررسانایی، آلایش، مدل جفت پلارونی

### ۱. مقدمه

علی‌رغم فعالیتهای زیادی که در طی سالهای اخیر در زمینه ابررساناهای دمای بالا صورت گرفته است، اما هنوز نظریه کاملی برای توصیف سازوکار ابررسانایی در ابررساناهای دمای بالا وجود ندارد و همچنان به عنوان یک چالش در فیزیک ماده چگال باقیمانده است. مقاومت الکتریکی عموماً آسان‌ترین و سر راست‌ترین روش برای به دست آوردن اطلاعات مفیدی درباره کیفیت نمونه، خواص حالت عادی، دمای شبه‌گاف،  $T^*$  (دمایی که در آن یک گاف در چگالی حالت‌های الکترونی باز می‌شود)، و دمای بحرانی حالت ابررسانایی است.

کاهش چگالی حاملهای بار (حفره‌ها) توسط جایگزیده شدن یکی از دلایل کاهش خاصیت ابررسانایی در بس بلورهای  $RE-123$  (عناصر خاکی نادر  $RE$ ) آلاییده شده خنثی از لحاظ

الکتریکی است [۱]. اما چون مقاومت الکتریکی این ابررساناها از دمای اتاق تا دمای افت و خیزهای ابررسانایی (اندکی بالاتر از دمای بحرانی ابررسانایی) به صورت خطی با دما تغییر می‌کند اثری از شبه گاف مشاهده نمی‌شود. از طرف دیگر علت کاهش خاصیت ابررسانایی در ابررساناهای  $YBa_{2-x}La_xCu_3O_{7-\delta}$  پرشدن حفره‌ها توسط الکترون اضافه شده به وسیله آلایش  $La$  عنوان شده است [۲ و ۳]. لذا افزایش آلایش  $La$  باعث کاهش بیشتر چگالی حاملهای بار و رفتن به ناحیه کمتر آلاییده شده از حد بهینه (underdoped) و باز شدن شبه گاف می‌گردد. سؤال این است که آیا تنها پرشدن حفره‌ها توسط الکترون‌ها عامل از بین رفتن ابررسانایی در بس بلور  $YBa_{2-x}La_xCu_3O_{7-\delta}$  است؟

مدلهای زیادی تا به حال برای توضیح حالت ابررسانایی

## ۲. آزمایش

نمونه‌های  $Y_{1-2x}Ca_xTh_xBa_2Cu_3O_{7-\delta}$  و  $NdBa_{2-x}La_xCu_3O_{7-\delta}$  به ترتیب با آلایشهایی در بازه  $0.75 \leq x \leq 0.70$  و  $0.30 \leq x \leq 0.00$  به روش پودر حالت جامد ساخته شده‌اند. جهت ساخت نمونه‌ها پودر مواد اولیه  $CuO$ ،  $La_2O_3$ ،  $CaCO_3$ ،  $Th_2O_3$ ،  $BaCO_3$ ،  $Nd_2O_3$  با درجه خلوص بیش از ۹۹/۰۰٪ ابتدا با ترازوی دیجیتالی (با دقت ۱/۱۰۰۰۰ گرم) وزن و سپس با دقت با هم مخلوط شدند. نمونه‌ها به صورت قرص سه بار به ترتیب در دماهای ۹۰۰، ۹۲۰، 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 با آهنگ ۱۲ °C/hr تا دمای اتاق سرد شدند.

اندازه‌گیری مقاومت الکتریکی با استفاده از ترکیب ۴ سوزنی استاندارد انجام گردید. برای اتصال الکتریکی از چسب نقره به صورت نوار باریک روی نمونه‌ها استفاده شد. به منظور بهبود مقاومت الکتریکی اتصال، نمونه‌ها در اتمسفر اکسیژن به مدت نیم ساعت در دمای ۳۰۰ °C باز پخت و سپس سریعاً تا دمای اتاق سرد گردید. در نهایت توسط چسب نقره سیم نازک مسی به نقطه اتصال وصل شد. با این روش مقاومت الکتریکی  $1-2 \Omega$  در محل اتصال به دست آمد که مقدار مناسبی جهت اندازه‌گیری مقاومت الکتریکی است.

نتایج پراش به روش پودر اشعه X برای سری  $NdBa_{2-x}La_xCu_3O_{7-\delta}$  [۱۶] و پراش به روش پودر نوترون [۱۷] نشان داد که تمام نمونه‌ها، به جز نمونه  $x=0.75$  (حد حلالیت آلایش CaTh در کوپراتها) در آلایش CaTh که در آن چند پیک ناخالصی مشاهده شده، تک فاز و دارای ساختار ۱۲۳ راست گوشه هستند.

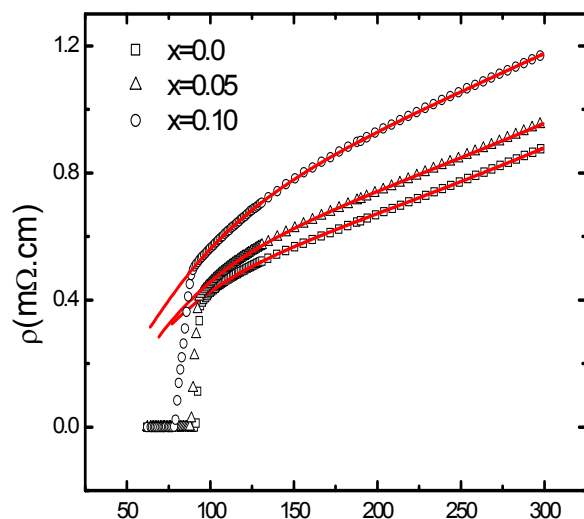
## ۳. نتایج و تحلیل داده‌ها

### ۳.۱. ترکیب $Y_{1-2x}Ca_xTh_xBa_2Cu_3O_{7-\delta}$ :

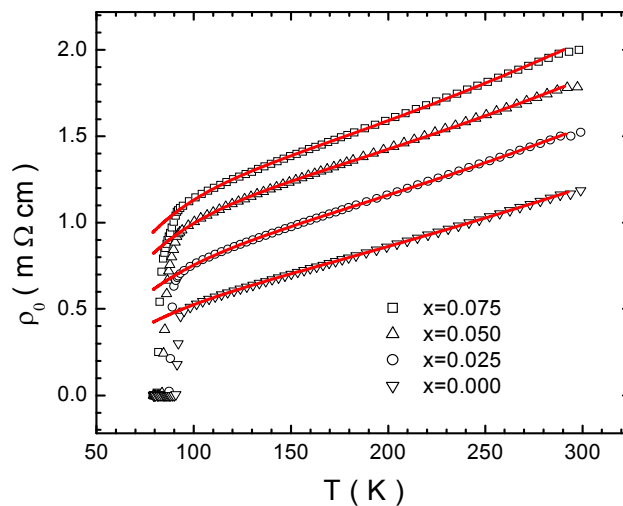
نتایج اندازه‌گیری مقاومت الکتریکی بس‌بلور  $Y_{1-2x}Ca_xTh_xBa_2Cu_3O_{7-\delta}$  به صورت تابعی از دما و غلظت

بیان گردیده‌اند. مدل جفت پلارونی یکی از این مدلها است. مات پیشنهاد کرد در صورتی که حاملها به صورت جفت پلارونهای اسپینی در یک شبکه دو بعدی در نظر گرفته شوند [۴]، وابستگی خطی مقاومت الکتریکی ابررساناهای کوپرات آلاییده شده به طور بهینه (optimally doped) بر حسب دما در گستره دمایی اندکی بالاتر از دمای بحرانی تا دماهایی از مرتبه ۱۰۰۰ K خواهد بود [۵]. این مدل با در نظر گرفتن جایگزیدگی حاملها توسط بی‌نظمیها مقاومت الکتریکی ترکیبات RE-۱۲۳ را توصیف می‌کند [۶]. یکی از ویژگیهای برجسته مدل جفت پلارونی توصیف وابستگی غیر خطی مقاومت الکتریکی صفحات  $CuO_2$  ابررساناهای آلاییده شده با آلایش کمتر از حد بهینه در دماهای پایین‌تر از دمای شبه‌گاف و تعیین چگالی حاملهای بار جایگزیده شده از روی پارامترهای برازشی است. در طی چند سال اخیر نتایج تجربی زیادی در چارچوب مدل جفت پلارونی توضیح داده شده است؛ بعضی از نتایج عبارتند از: مقاومت الکتریکی [۷-۹]، اثر رامان [۱۰]، طیف‌سنجی تونل‌زنی [۱۱]، اثر ایزوتوپی [۱۲]، میدان بحرانی بالایی و گرمای ویژه غیر عادی [۱۳].

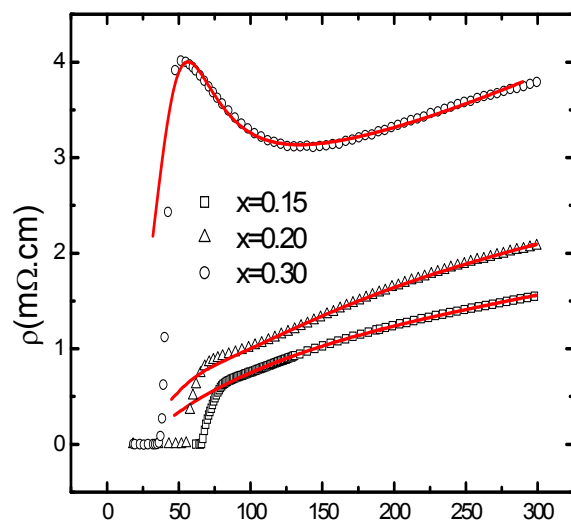
نکته شروع این مقاله این سؤال است که آیا این مدل می‌تواند در درک نحوه کاهش چگالی حاملهای بار ابررساناهای آلاییده شده توسط آلاینده‌های خنثی از لحاظ الکتریکی مفید باشد و انحراف از وابستگی خطی مقاومت الکتریکی در دمای شبه‌گاف و در نتیجه از بین رفتن ابررسانایی را توضیح دهد. لذا در این مقاله مقاومت الکتریکی حالت عادی بس‌بلورهای  $Y_{1-2x}Ca_xTh_xBa_2Cu_3O_{7-\delta}$  و  $NdBa_{2-x}La_xCu_3O_{7-\delta}$  به صورت تابعی از دما و آلایش اندازه‌گیری و از مدل جفت پلارونی [۱۴ و ۱۵] برای تحلیل داده‌ها استفاده شده و از روی پارامترهای برازشی به دست آمده چگالی حاملهای جایگزیده شده محاسبه می‌شود. این مدل داده‌های تجربی مقاومت الکتریکی در حالت عادی را در یک گستره بزرگ دمایی از دماهای نزدیک به دمای بحرانی تا دماهای خیلی بزرگتر از دمای اتاق (حدود ۱۰۰۰ K) به خوبی توصیف می‌کند.



T(K)



T (K)



T(K)

شکل ۱. داده‌های اندازه‌گیری شده مقاومت الکتریکی  $Y_{1-x}Ca_xTh_xBaCu_2O_{7-δ}$  به صورت تابعی از دما و غلظت آلیش. خطوط توپر برازش داده‌ها بر اساس مدل جفت پلارونی (رابطه ۱) است.

آلیش در شکل ۱ نشان داده شده است. داده‌های تجربی نشان می‌دهند که با افزایش غلظت آلیش مقاومت ویژه الکتریکی بس‌بلور افزایش می‌یابد که نشان دهنده کاهش خاصیت فلزی نمونه‌ها با افزایش غلظت  $CaTh$  است. مقاومت الکتریکی نمونه‌ها در بازه دمایی  $T_C$  تا  $300\text{K}$  وابستگی خطی نسبت به دما دارند، به جز در غلظت  $x=0.075$  که به علت فاز ناخالصی یک گذار دو پله‌ای در نزدیکی دمای بحرانی مشاهده می‌شود که با نتایج حاصل از پراش نوترون [۱۷] در توافق است.

### ۲.۳ ترکیب $NdBa_{2-x}La_xCu_2O_{7-δ}$

مقاومت الکتریکی بس‌بلور  $NdBa_{2-x}La_xCu_2O_{7-δ}$  به صورت تابعی از دما و غلظت آلیش در بازه  $0.30 < x < 0.70$  در شکل ۲ نشان داده شده است. با افزایش غلظت آلیش مقاومت الکتریکی افزایش می‌یابد که نشان دهنده کاهش خاصیت فلزی نمونه‌ها است. با کاهش دما رفتار مقاومت الکتریکی نمونه‌ها از دمای  $300\text{K}$  تا دمای  $T^*$  به صورت خطی کاهش می‌یابد. در دمای شبه‌گاف انحرافی از حالت خطی همراه با کاهش مقاومت مشاهده می‌شود. مقاومت الکتریکی نمونه‌های  $x \leq 0.20$  در بازه دمایی  $T^*$  تا  $T_C$  کاهش می‌یابد در حالی که برای نمونه با غلظت  $x=0.3$  مقاومت

شکل ۲. مقاومت الکتریکی بس‌بلور  $NdBa_{2-x}La_xCu_2O_{7-δ}$  به صورت تابعی از دما و آلیش. خطوط توپر برازش داده‌های تجربی مقاومت الکتریکی به مدل جفت پلارونی معادله (۱).

الکتریکی با کاهش دما افزایش یافته و خاصیت نیم‌رسانایی از خود نشان می‌دهد چون  $dp/dT < 0$  است.

### ۴. مدل جفت پلارونی

مدل جفت پلارونی توجه ویژه‌ای به برهم‌کنش قوی الکترون-فونون در ابررساناهای دمای بالا دارد. مات و الکساندروف بر اساس جفت پلارونها مدل ساده‌ای را

درستی از هم تشخیص داد.

پارامتر  $T_I$ ، که نشان دهنده نسبت پراکندگی ناشی از فونونهای نوری به جفت پلارونها است، نیز با افزایش غلظت آلیش تا  $x=0.05$  افزایش یافته اما در  $x=0.075$  کاهش اندکی می‌یابد. کاهش پارامتر  $T_I$ ، به عبارت دیگر تغییر سهم آهنگ پراکندگی ناشی از منابع مختلف، در غلظت آلیش  $x=0.075$  ممکن است ناشی از وجود فاز ناخالصی باشد چون در طیف پراش نوترون مربوط به نمونه فوق چند پیک ناخالصی مشاهده شده است [۱۷] که نشان دهنده حد حلالیت حالت جامد آلایندة  $\text{CaTh}$  است. تغییرات نسبت جرم مؤثر جفت پلارونها به جرم پلارونها،  $A$ ، نیز تفاوت بین آلیش  $x=0.075$  و بقیه آلیشها (به جز  $x=0.0$ ) را نشان می‌دهد که در آن آهنگ افزایش جرم جفت پلارونها نسبت به جرم پلارونها در  $x=0.075$  افزایش یافته است.

ترکیبات  $\text{Y}_{1-2x}\text{Ca}_x\text{Th}_x\text{Ba}_2\text{Cu}_2\text{O}_{7-\delta}$  از لحاظ الکتریکی خنثی هستند. چون اضافه کردن حفره توسط  $\text{Ca}$  با اضافه کردن الکترون توسط  $\text{Th}$  جبران می‌شود. لذا این سؤال مطرح می‌شود که چرا مقاومت الکتریکی افزایش می‌یابد؟ حضور بی‌نظمیهای ناشی از آلیش در داخل یک شبکه دوره‌ای سبب تغییر ارتفاع سد پتانسیل به طور تصادفی می‌شود. این تغییرات باعث ایجاد حالت‌های جایگزیده در انتهای نوار هدایت در زیر لبه‌های تحرک<sup>۱</sup>، که حالت‌های جایگزیده را از حالت‌های گسترده جدا می‌کند، می‌شود [۲۰]. با افزایش چگالی آلیش سطح فرمی به طرف حالت‌های جایگزیده در نوار هدایت جابه‌جا می‌شود که در توافق با افزایش مقاومت الکتریکی است. حتی در صورت افزایش بیشتر آلیش، سرانجام سطح فرمی به داخل قسمت‌های جایگزیده وارد شده و تمام حامل‌های بار جایگزیده می‌گردند لذا هدایت الکتریکی سریعاً کاهش می‌یابد.

طبق نتایج جدول ۱، پارامتر  $\rho$  با افزایش آلیش افزایش می‌یابد که نشان دهنده افزایش مقاومت ویژه الکتریکی است. از طرفی چون این پارامتر متناسب با عکس تراکم حامل‌های

برای کوپراتها ارائه دادند [۱۸]. در این مدل جفت پلارونها در اثر برهم‌کنش پلارونها (حفره‌ها) با فونونهای اپتیکی تشکیل می‌شوند و نوع حاملها در حالت‌های عادی و ابررسانایی تغییر نمی‌کند. حالت ابررسانایی بر اثر چگالش بوز-انیشتین جفت پلارونهاست باردار، با بار الکتریکی  $2e$ ، رخ می‌دهد [۱۹] و پراکندگیهای مؤثر بوزون-بوزون و بوزون-فونون نوری عامل کاهش رسانایی در حالت عادی هستند. بر اساس این مدل مقاومت ویژه الکتریکی در صفحات  $\text{CuO}_2$  به صورت زیر است [۱۵]:

$$\rho = \rho_0 \frac{(T/T_I)^2 + \exp(-\omega/T)}{[1 + A(T/T_c)y]^{1/2} \exp(-T^*/T)} \quad (1)$$

که در آن

$$\rho_0 = \frac{bm_b}{2e^2(x-n_L)} \quad , \quad T_I = (b/a)^{1/2} \quad ,$$

$$A = (m_b/m_p)^{3/2} \quad , \quad \tau^{-1} = aT^2 + b \exp(-\omega/T) \quad ,$$

$$y = 1 - \exp(-T_0/T) \quad , \quad T_0 = \pi(x-n_L)/m_b \approx T_C \quad ,$$

و  $m_p$  و  $m_b$  به ترتیب جرم جفت پلارون و پلارون،  $T^*$  دمای شبه‌گاف،  $\omega$  انرژی فونون نوری است.  $a$  ضریب پراکندگی غیرکشسان حامل‌های بار توسط حامل‌های جایگزیده شده (بوزونها) و  $b$  ضریب پراکندگی توسط فونونهای نوری است. این پراکندگیها باعث کاهش زمان واهلش و در نتیجه افزایش مقاومت الکتریکی می‌شوند.  $n_L$  تراکم حامل‌های جایگزیده شده توسط بی‌نظمی در سلول واحد هستند.

#### ۴.۱. تحلیل داده‌های تجربی بر اساس مدل جفت پلارونی

##### ترکیب $\text{Y}_{1-2x}\text{Ca}_x\text{Th}_x\text{Ba}_2\text{Cu}_2\text{O}_{7-\delta}$

داده‌های تجربی مقاومت الکتریکی به مدل جفت پلارونی رابطه (۱) برازیده شدند که در شکل ۱ با خطوط توپر نشان داده شده است. همان طور که مشاهده می‌شود مدل به خوبی داده‌های تجربی را تا نزدیکی دمای بحرانی توصیف می‌کند. پارامترهای به دست آمده از برازش در جدول ۱ آورده شده‌اند. در برازش داده‌های مقاومت الکتریکی به مدل جفت پلارونی دمای شبه‌گاف برابر دمای افت و خیزهای ابررسانایی انتخاب انتخاب شده است ( $T^* = 110$ )، چون در دماهای نزدیک به دمای بحرانی نمی‌توان دو دمای فوق را به

۱. Mobility edges

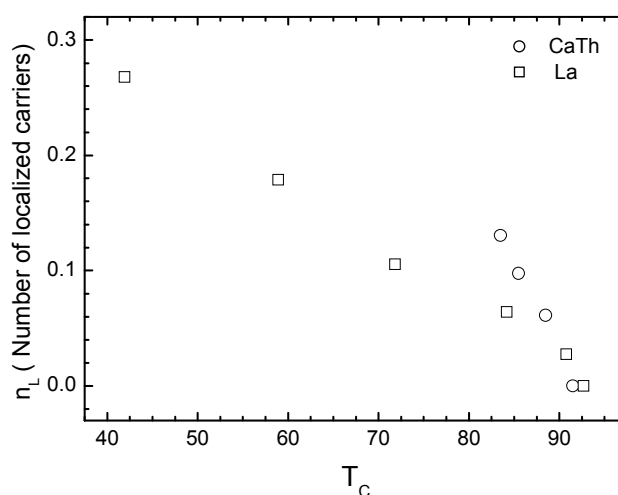
جدول ۱. پارامترهای به دست آمده از برازش داده‌های تجربی به مدل جفت‌پلارونی برای  $Y_{1-2x}Ca_xTh_xBa_2Cu_3O_{7-\delta}$ .

$x$	$\rho_0$	$T_I$	$\omega$	$A$
۰٫۰۰	۵٫۱۴۹۴	۲۰۲٫۹۴۹۴۴	۲۲۳٫۰۳۸۷۷	۹٫۰۷۹۹۹
۰٫۰۲۵	۷٫۷۸۴۵۲	۲۴۱٫۵۹۹۵۳	۱۹۷٫۱۰۶۳۸	۸٫۰۱۹۵۷
۰٫۰۵۰	۱۶٫۲۶۵۰۲	۲۸۵٫۹۴۱۹۶	۲۰۲٫۱۳۳۹۷	۱۱٫۲۲۳۶۳
۰٫۰۷۵	۲۴٫۸۸۱۰۱	۲۸۰٫۱۴۸۳۷	۲۰۸٫۲۸۷۳۸	۱۵٫۸۳۲۲۳

#### ۲.۴. ترکیب $NdBa_{2-x}La_xCu_3O_{7-\delta}$

داده‌های تجربی مقاومت الکتریکی به مدل جفت‌پلارونی رابطه (۱) برازیده شدند که در شکل ۲ با خطوط توپر نشان داده شده است. مدل به خوبی داده‌های تجربی را تا نزدیکی دمای بحرانی توصیف می‌کند. پارامترهای به دست آمده از برازش در جدول ۲ آورده شده‌اند. همان طوری که در جدول ۲ دیده می‌شود با افزایش آلیش پارامتر  $\rho_0$  افزایش می‌یابد که بیانگر افزایش مقاومت الکتریکی است. با افزایش مقاومت الکتریکی، رسانندگی و در نتیجه خاصیت فلزی نمونه‌ها کاهش می‌یابد. پارامتر  $T_I$  و  $\omega$  نیز با افزایش آلیش تا  $x=0.2$  افزایش می‌یابد در حالی که برای  $x=0.3$  کاهش می‌یابد. پارامتر  $T_I$  نشان دهنده نسبت پراکندگیها توسط فونونها و جفت‌پلارونها است. در  $x>0.2$  پراکندگی فونونها نسبت به پراکندگی بوزونها مؤثرتر است بنابراین باعث کاهش  $T_I$  می‌شود. پارامتر  $A$  نسبت جرم جفت‌پلارونها به پلارونها را نشان می‌دهد. تغییرات نسبت جرمها به غلظت آلیش به صورت خطی است به جز در  $x=0.3$  که از حالت خطی منحرف می‌شود.

در ترکیبات  $NdBa_{2-x}La_xCu_3O_{7-\delta}$  با جانشانی آلیش  $La^{3+}$  به جای  $Ba^{2+}$  یک الکترون اضافی به صفحات  $CuO_2$  افزوده می‌گردد که باعث خنثی شدن حفره‌ها خواهد شد. با استفاده از پارامترهای برازشی تراکم حاملهای جایگزیده محاسبه شده است که نتایج حاصل از آن در شکل ۳ نشان داده شده است. همان طور که مشاهده می‌شود با افزایش غلظت آلیش تراکم حاملهای جایگزیده افزایش می‌یابد. اما در

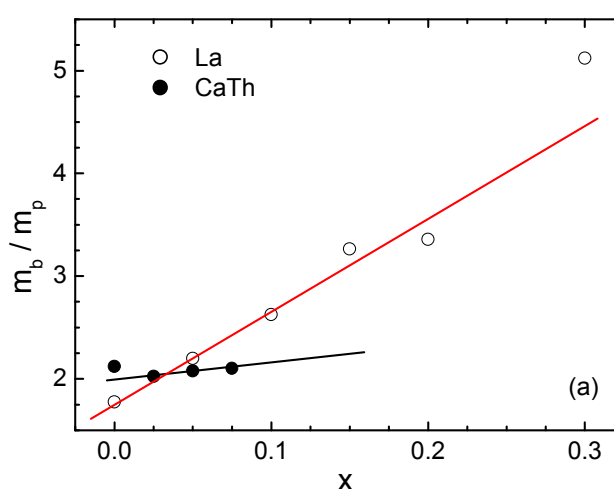
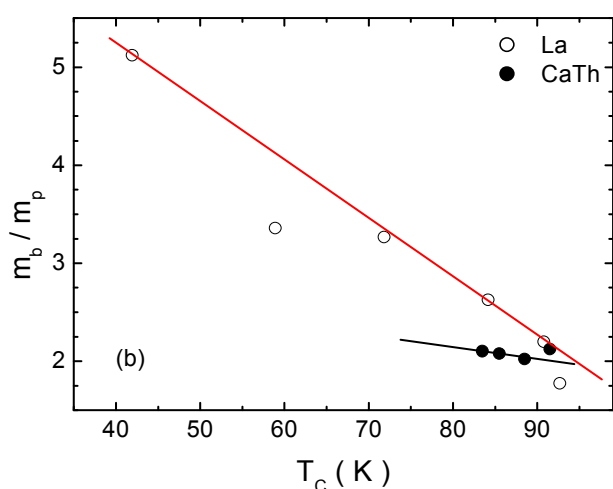


شکل ۳. غلظت حاملهای جایگزیده در سلول واحد در ترکیبات  $NdBa_{2-x}La_xCu_3O_{7-\delta}$  و  $Y_{1-2x}Ca_xTh_xBa_2Cu_3O_{7-\delta}$  بر حسب دمای بحرانی.

جایگزیده  $n_L$  است لذا می‌توان با استفاده از پارامترهای برازشی تراکم حاملهای جایگزیده شده را محاسبه کرد. شکل ۳ تراکم حاملهای جایگزیده را بر حسب دمای بحرانی ابررسانایی  $T_C$  نشان می‌دهد. همان طور که در شکل ۳ مشاهده می‌شود با افزایش غلظت آلیش،  $T_C$  کاهش و چگالی حاملهای جایگزیده افزایش می‌یابد که در توافق با مدل جایگزیده شدن حاملهای بار توسط بی‌نظمیها است. بنابراین بر اساس مدل جفت‌پلارونی جایگزیده شدن حاملها علت کاهش خاصیت فلزی و از بین رفتن ابررسانایی در ترکیبات  $Y_{1-2x}Ca_xTh_xBa_2Cu_3O_{7-\delta}$  است که با نتایج حاصل از برازش مدل نوار باریک به داده‌های توان گرما الکتریسیته [۲۱] توافق خوبی دارد.

جدول ۲. پارامترهای به دست آمده از برازش مدل جفت‌پلارونی رابطه ۱ برای  $\text{NdBa}_{1-x}\text{La}_x\text{Cu}_2\text{O}_{7-\delta}$ .

$x$	$\rho_0$	$T_l$	$\omega$	$A$	$T^*$
۰٫۰	۲٫۹۷۰۴۷	۲۸۹٫۷۶۳۷	۱۷۰٫۳۶۲۱۷	۴٫۱۹۴۲	۱۱۰٫۶۲۹
۰٫۰۵	۷٫۰۴۳۶۵	۳۴۱٫۸۶۳۷	۲۳۵٫۹۷۵۶۸	۷٫۱۶۸۰۴	۱۲۳٫۲۲
۰٫۱	۱۹٫۴۸۰۰۱	۴۱۳٫۴۲۵۹۳	۳۰۶٫۹۲۵۴۶	۱۱٫۱۶۲۲۳	۱۵۲٫۲۹۰
۰٫۱۵	۵۷٫۳۸۷۹۶	۶۴۳٫۹۰۹۷	۴۴۱٫۹۴۹۰۸	۱۹٫۲۵۵۱۲	۲۱۲٫۷۸
۰٫۲	۱۱۵٫۱۲۸۵۱	۶۵۶٫۵۳۲۸۷	۵۰۱٫۲۹۰۰۸	۲۰٫۶۴۳۸۳	۲۲۹٫۶۹
۰٫۳	۲۶۰٫۶۴۳۳۷	۲۷۸٫۹۶۶۸۴	۳۸۳٫۱۵۰۳۶	۵۹٫۳۱۶۷۴	۲۴۱٫۴۴



شکل ۴. (a) تغییرات نسبت جرم جفت‌پلارونها به جرم پلارونها بر حسب غلظت آلایش  $x$ . (b) تغییرات نسبت جرم جفت‌پلارونها به جرم پلارونها بر حسب دمای بحرانی.

از روی پارامترهای به دست آمده در جداول ۱ و ۲ نسبت جرم جفت پلارون به پلارون برای غلظتهای آلایش متفاوت در هر دو ترکیب محاسبه شد. نتایج به دست آمده در شکل ۴ نشان داده شده‌اند. مشاهده می‌شود که نسبت جرم جفت‌پلارونها با افزایش غلظت آلایش خنثای CaTh تقریباً ثابت است درحالی که با افزایش غلظت La شدیداً افزایش می‌یابد.

لذا مدل پیشنهاد می‌کند که آلایشهای خنثی، که تأثیر کمتری بر روی چگالی حاملهای صفحات  $\text{CuO}_2$  دارند، تغییرات نسبت جرمهای کمتری هم نسبت به آلایشهای غیر خنثی دارند (شکل ۴). تغییر دمای بحرانی برای ترکیبات با آلایش غیر خنثی نیز نسبت به آلایشهای خنثی با تغییر غلظت آلایش بیشتر است.

۳/۰  $x$  آهنگ افزایش تراکم حاملهای جایگزیده اندکی کاهش می‌یابد، که با تحرک بیشتر جفت‌پلارونها توافق خوبی دارد. از روی شکل ۳ مشاهده می‌شود که با افزایش حاملهای جایگزیده دمای بحرانی نمونه‌ها کاهش می‌یابد. نتایج فوق نشان می‌دهند که آهنگ افزایش جایگزیدگی توسط La کمتر از CaTh است. دلیل آن است که La، علاوه بر جایگزیدگی، تعدادی حفره نیز به شبکه اضافه می‌کند چون ظرفیت آن ۳ + است در حالی که ظرفیت Ba برابر ۲ + است. بنابراین علاوه بر پرکردن حفره‌ها توسط الکترونها اضافه شده به وسیله La جایگزیدگی حاملها نیز عامل دیگری جهت از بین رفتن ابررسانایی در این ترکیبات است.

[۲]. لذا برای برآورد مقدار آلایش بهینه La، با توجه به دمای بحرانی [۲۲] و برازش خطی به نمودار نسبت جرمها بر حسب دمای بحرانی، مقدار بهینه  $1/874$  برای نسبت جرم جفت پلارونها به پلارونها به دست آمد. با قرار دادن مقدار بهینه نسبت جرمها و برازش خطی، غلظت آلایش بهینه تقریباً برابر  $x_{opt} \approx 0.02$  برای آلایش La تعیین شد که توافق بسیار خوبی با نتایج به دست آمده برای  $YBa_{1-x}La_xCu_2O_{7-\delta}$  دارد [۳].

با توجه به نمودار فاز (دما- چگالی حاملهای بار در صفحات  $CuO_2$ ) ابرساناهای  $RE-123$  با  $\delta \approx 0$  اندکی در ناحیه بیشتر آلایده از حد بهینه (overdoped) قرار دارند. بنابراین دمای بحرانی این نمونهها کمتر از دمای بحرانی نمونههای آلایده شده به صورت بهینه (optimally doped)، آلایشی که به ازای آن دمای بحرانی بیشینه است، می باشد [۳]. در حالی که بیشینه دمای بحرانی به دست آمده برای آلایش La برابر  $94/2$  K است

## مراجع

1. B Lundqvist, P Lundqvist and Ö Rapp, *Phys. Rev. B* **57** (1998) 14428.
2. J J Neumeier and H A Zimmernan, *Phys. Rev. B* **47** (1993) 8385.
3. J L Tallon and N E Flower, *Physica C* **204** (1993) 237.
4. N F Mott, *Philos. Mg. Lett.* **52** (1990) 273.
5. A S Alexandrov, *Physica C* **182** (1991) 327.
6. A S Alexandrov and N F Mott, *Supecond. Sci. Technol.* **6** (1993) 215.
7. A S Alexandrov, A M Bratkovsky and N F Mott, *Phys. Rev. Lett.* **72** (1994) 1734.
8. X H Chen et al., *Phys. Rev. B* **58** (1998) 14 219.
9. A S Alexandrov, V V Kabanov and N F Mott, *Phys. Rev. Lett.* **77** (1996) 4796.
10. S Sugi, *Physica C* **76** (1991) 187-189.
11. A S Alexandrov, *Physica C* **305** (1998) 46.
12. A S Alexandrov, *Phys. Rev. B* **46** (1992) 14 932.
13. V N Zavaritsky et al., *Europhys. Lett.* **60** (2002) 127.
14. A S Alexandrov and P E Kornilovitch, *Phys. Lett.* **82** (1999) 807.
15. A S Alexandrov, V N Zavaritsky and S Dzhumanov, *Phys. Rev. B* **69** (2004) 052505.
۱۶. شعبان رضا قربانی، ابراهیم رستم آبادی، هشتمین کنفرانس ماده چگال انجمن فیزیک ایران، مشهد، بهمن (۱۳۸۵).
17. M Andersson, Ö Rapp and R Tellgren, *Solid State Commun* **81** (1992) 425.
18. A S Alexandrov and N F Mott, *J. Supecond.* **7** (1994) 599.
19. A S Alexandrov, *Phys. Rev. B* **53** (1996) 2863.
20. P W Anderson, *Phys. Rev.* **109** (1958) 1492.
۲۱. ش. ر. قربانی، مجله پژوهش فیزیک ایران، ۵، شماره ۴، (۱۳۸۴) ۲۵۰-۲۵۴.
۲۲. ش. ر. قربانی، مجله پژوهش فیزیک ایران، ۶، شماره ۳، (۱۳۸۵) ۱۴۷-۱۵۱.