

بررسی پذیرفتاری مغناطیسی AC در ابررساناهای حجمی (Bi-Pb) ۲۲۲۳

هادی سلامتی و پرویز کاملی

آزمایشگاه ابررسانایی، دانشکده فیزیک، دانشگاه صنعتی اصفهان

(دریافت مقاله: ۸۲/۳/۲۸ ؛ دریافت نسخه نهایی: ۸۲/۱۰/۱۸)

چکیده

در این مقاله وابستگی دمایی پذیرفتاری مغناطیسی AC در نمونه‌های چندبلوری $(Bi_{1-x}Pb_x)Sr_2Ca_2Cu_3O_y$ که به روش واکنش حالت جامد ساخته شده‌اند، در میدانها و فرکانسهای مختلف اندازه‌گیری شده است. پهنای گذار در قسمت حقیقی و موهومی بستگی شدید به اندازه میدان مغناطیسی دارد. با استفاده از تغییرات دمای قله T_p بر حسب دامنه میدان، H_{ac} وابستگی دمایی چگالی جریان بحرانی به صورت $J_c \sim \left(1 - \frac{T}{T_c}\right)^2$ به دست می‌آید، که نشان‌دهنده پیوندگاههای ضعیف از نوع (SIS) است. تغییرات پذیرفتاری مغناطیسی AC با فرکانس نیز اندازه‌گیری شده است. با افزایش فرکانس جابه‌جایی کوچکی در دمای قله، T_p به سمت دماهای بالا صورت می‌گیرد. این اثر با پدیده خزش شار قابل توضیح است.

واژه‌های کلیدی: ابررساناهای دمای بالا، پذیرفتاری مغناطیسی متناوب، انرژی فعالسازی

۱. مقدمه

همان‌طور که در اولین مقاله مربوط به ابررساناهای دمای بالا توسط بدنورز و مولر اشاره شده است، مرزهای دانه‌ای در چگالی جریان بحرانی نمونه‌های چندبلوری ابررساناهای دمای بالا محدودیت ایجاد می‌کنند [۱]. خواص فیزیکی مرزهای دانه‌ای در ابررساناهای دمای بالا تفاوت بنیادی با ابررساناهای فلزی متعارف دارند. به‌طور مثال مرزهای دانه‌ای در ابررساناهای فلزی به‌عنوان مراکز میخکوبی شار عمل می‌کنند. در حالی که در ابررساناهای دمای بالا باعث ایجاد ارتباطات ضعیف^۳ می‌شوند. ابررساناهای چندبلوری به صورت آرایه‌ای از دانه‌های ابررسانا می‌باشند که به شکل پیوندگاههای ضعیف جوزفسون قابل توصیف هستند. این ارتباطات ضعیف باعث کاهش جریان بحرانی در ابررساناهای دمای بالا می‌شوند [۲]. از دلایل ممکن

پس از شور و شوقی که به دنبال کشف ابررساناهای دمای بالا به وجود آمد پژوهشگران متوجه شدند که این مواد از نظر کاربردی دارای مشکلاتی هستند. دلایل این مشکلات ریشه در خواص بنیادی فیزیکی ابررساناهای دمای بالا، که به‌طور مستقیم خواص فصل مشترکها^۱ در این ترکیبات را تعیین می‌کند، نهفته است. به نظر می‌رسد که طول هم‌دوسی خیلی کوتاه (چند آنگستروم) مانع تحقق و شکل‌گیری پیوندگاههای جوزفسون با کیفیت بالا می‌شود و همچنین چگالی جریان بحرانی (J_c) پایین در نمونه‌های چندبلوری^۲، چند صد آمپر بر سانتی‌متر مربع در دمای هلیوم مایع، مانع ساخت سیمهای ابررسانای قابل استفاده و مفید می‌شود.

۱. Interfaces

۲. Polycrystalline

۳. Weak-links

مکانی در انرژی گردشاره‌ها می‌شود که نتیجه آن میخکوبی بین دانه‌ای است. اندازه‌گیری پذیرفتاری مغناطیسی ac با استفاده از میدانهای ضعیف، روش بسیار مفیدی برای فهم سازوکارهای میخکوبی شار در مرزهای دانه‌ای می‌شود. مشخص شده است که وابستگی مؤلفه‌های حقیقی، $\chi'(T)$ و موهومی، $\chi''(T)$ ، پذیرفتاری مغناطیسی ac به دامنه میدان، H_{ac} با چگالی نیروی میخکوبی تعیین می‌شود و وابستگی پذیرفتاری مغناطیسی به فرکانس f با اندازه پتانسیل میخکوبی بین دانه‌ای مشخص می‌شود [۸ و ۹]. مطالعات انجام شده نشان می‌دهند که وابستگی پذیرفتاری مغناطیسی ac به فرکانس در مقایسه با میدان ضعیف می‌باشد [۱۰ و ۱۱]. با مطالعه تغییرات $\chi''(T)$ با میدان و فرکانس اعمال شده، می‌توان برخی از خواص غیر ذاتی ابررساناهای چندبلوری، از قبیل چگالی جریان بحرانی، قدرت زوج‌شدگی دانه‌ها، انرژی فعالسازی میخکوبی و بسیاری از ویژگیهای ساختار ریز یک نمونه را بررسی کرد.

ترکیب $(\text{Bi}, \text{Pb})_{2223}$ با دمای گذار حدود 110 K از جمله ترکیبات ابررسانای دمای بالا است که به شدت مورد توجه قرار گرفته است. این ترکیب نامزد خوبی برای ساخت سیمهای ابررسانای دمای بالا به حساب می‌آید و مطالعات متعددی درباره ساخت و بررسی خواص مختلف ساختاری و ابررسانایی آن انجام شده است. در این مقاله پذیرفتاری مغناطیسی ac در نمونه با ترکیب اسمی $\text{Sr}_2\text{Ca}_2\text{Cu}_2\text{O}_y$ $(\text{Bi}_{1/6}\text{Pb}_{1/6})$ مورد بررسی قرار می‌گیرد. نشان داده شده است که ترکیب اسمی فوق یکی از حالت‌های بهینه برای تشکیل فاز Bi_{2223} در ترکیب ابررسانای BSCCO می‌باشد [۱۲].

۲. ساخت و آزمایشات

برای ساخت نمونه‌های مورد نیاز از روش معمول واکنش حالت جامد استفاده شده است. مواد اولیه CaCO_3 ، PbO ، Bi_2O_3 ، CuO و SrCO_3 با درصد خلوص بهتر از ۹۹۹۹ درصد و استوکیومتری مناسب با یکدیگر مخلوط و برای مدت یک ساعت آسیاب شدند. محصول به دست آمده در کروزه‌های آلومینا ریخته شده و در کوره‌های مکعبی برای مدت ۲۴ ساعت در دمای 840°C درجه

برای شکل‌گیری این ارتباطات ضعیف می‌توان به جهت‌گیری نامناسب در مرزهای دانه‌ای و یا تغییرات ترکیبی، ساختاری و کمبود اکسیژن در آنها اشاره نمود [۳ و ۴].

علاوه بر مقاومت الکتریکی، پذیرفتاری مغناطیسی ac ، $\chi = \chi' - i\chi''$ نیز به میزان قابل توجهی برای مطالعه خواص ابررساناهای دمای بالا مورد استفاده قرار گرفته است. [۵-۷]. به ویژه از روش اندازه‌گیری پذیرفتاری مغناطیسی ac به عنوان یک روش غیر مخرب برای پیدا کردن مشخصات مؤلفه‌های جفتی که اغلب تحت عنوان ارتباطات ضعیف، پیوندگاههای جوزفسون، مرز دانه‌ها یا مؤلفه بین دانه‌ای نام برده می‌شوند، استفاده می‌شود. در ابررساناهای معمولی مؤلفه حقیقی، χ' افت نسبتاً تیزی درست زیر دمای بحرانی T_c نشان می‌دهد و در قسمت موهومی χ'' قله‌ای در ناحیه گذار به ابررسانایی شکل می‌گیرد. اما در مورد ابررساناهای دمای بالای چندبلوری گذار پذیرفتاری مغناطیسی شامل دو مرحله است مرحله اول گذار درون دانه‌ای است که با افت نسبتاً تیز در قسمت حقیقی χ' پذیرفتاری مغناطیسی همراه است و مرحله دوم گذار بین دانه‌ای است که با کاهش بیشتر دما در قسمت حقیقی پذیرفتاری مغناطیسی افت آرامی ملاحظه می‌شود. دلیل آن وجود اختلاف زیاد در میدان بحرانی پایینی بین دانه‌ای و خود دانه‌هاست. میدان بحرانی پایینی بین دانه‌ای خیلی کوچکتر از دانه‌هاست و بنابراین شار مغناطیسی ابتدا به قسمت بین دانه‌ها نفوذ می‌کند، در واقع قسمت حقیقی معرف اثر مایسنر است. در قسمت موهومی نیز قله‌ای مشاهده می‌شود که نشان‌دهنده اتلاف در نمونه است و مطابق مدلهای حالت بحرانی این قله زمانی شکل می‌گیرد که میدان به کل نمونه نفوذ کرده باشد. هنگامی که میدان مغناطیسی بزرگتر از میدان بحرانی پایینی جوزفسون به یک نمونه ابررسانای دمای بالای چندبلوری اعمال می‌شود، میدان به شبکه اتصالات ضعیف بین دانه‌ای نفوذ می‌کند و باعث ایجاد گردشاره‌های جوزفسون در داخل نمونه می‌شود. تغییرات مکانی انرژی جفت‌شدگی جوزفسون و بی‌نظمی در آرایه مرزهای دانه‌ای موجب تغییرات

مقاومتی $PT-100$ و دستگاه کنترل دمای قابل برنامه‌ریزی با دقتی معادل $0.01 K \pm$ انجام شده است.

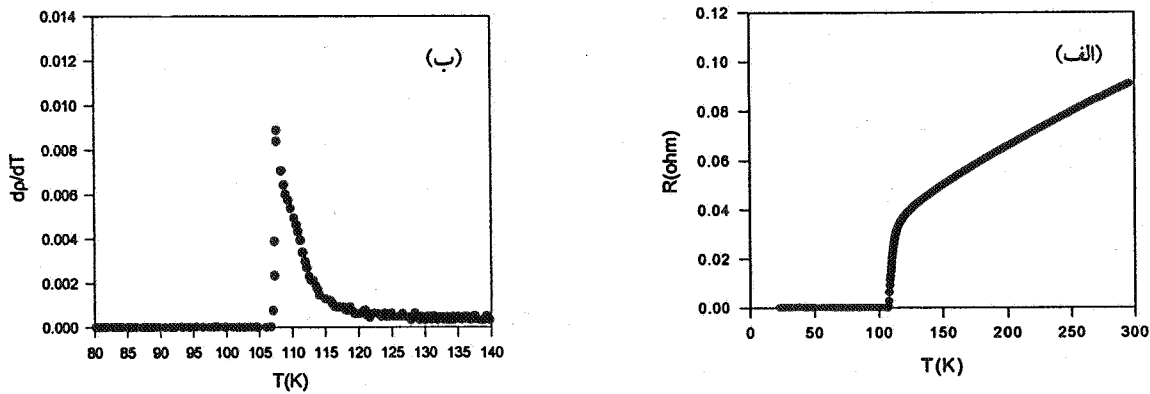
۳. نتایج و بحث

یکی از رفتارهای جالب ابررساناهای دمای بالای چندبلوری تک‌فاز وجود گذار دو مرحله‌ای از حالت بهنجار به حالت ابررسانایی است. منحنی مقاومت ویژه، ρ بر حسب دما، T نیز شامل دو مرحله است [۱۳]. مرحله اول افت نسبتاً تیز در مقاومت در دمای T_c^{onset} است که نشان‌دهنده گذار درون دانه‌ای است و مرحله دوم افت نسبتاً آرام در مقاومت است که با جفت‌شدگی کامل دانه‌ها نهایتاً مقاومت در دمای T_c^{offset} به صفر می‌رسد و کل سیستم در حالت ابررسانایی است. این رفتار در منحنی مشتق مقاومت بر حسب دما $\left(\frac{d\rho}{dT}\right)$ به صورت بهتری مشاهده می‌شود. متناظر با گذار دو مرحله‌ای مقاومت $\rho(T)$ ، منحنی مشتق مقاومت بر حسب دما قله‌ای را در دماهای بالا و دنباله‌ای^۱ را در دماهای پایین نشان می‌دهد [۴]. در واقع قله نشان‌دهنده گذار ابررسانایی در درون دانه‌ها است و دنباله مربوط به زوج‌شدگی بین دانه‌ای است. از این رو از عبارت نواحی ضعیف یا ارتباطات ضعیف برای نواحی ساختاری که مسئول چنین رفتارهایی در نمونه هستند استفاده می‌شود.

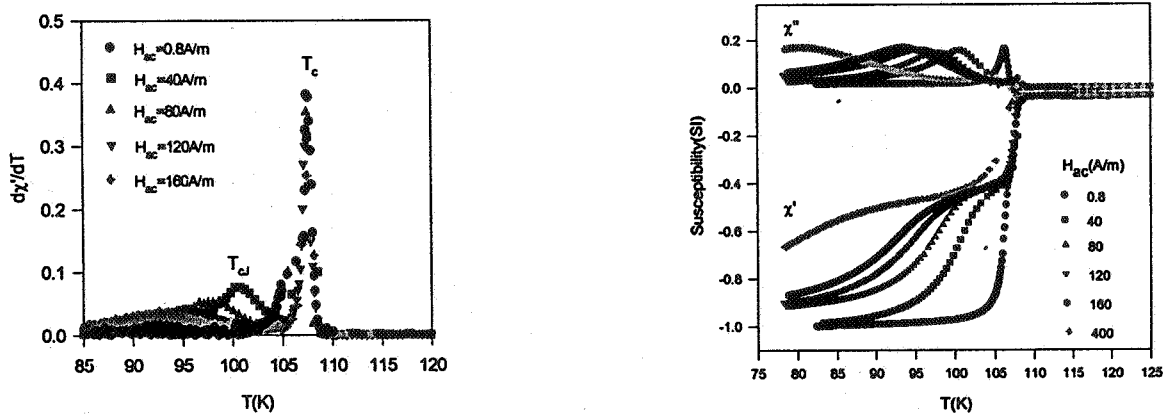
شکل ۱-الف رفتار مقاومت الکتریکی نمونه را نشان می‌دهد. در این شکل مشاهده می‌شود که مقاومت در دماهای بالای دمای گذار T_c ، رفتار کاملاً فلزی دارد. نمونه دارای گذار نسبتاً تیز می‌باشد. دمای گذار نمونه T_c ، که از روی مشتق مقاومت بر حسب دما تعریف می‌شود برابر $0.7/8 K$ (به دست می‌آید) (شکل ۱-ب). در شکل ۲ تغییرات مولفه‌های حقیقی و موهومی پذیرفتاری مغناطیسی ac بر حسب دما در فرکانس $333 Hz$ و میدانهای مختلف نشان داده شده است. همان‌طور که در شکل مشاهده می‌شود منحنی χ' بر حسب T شامل دو مرحله است که منعکس‌کننده گذار درون دانه‌ای و بین دانه‌ای است. این گذار دو مرحله‌ای در منحنی مشتق χ' بر حسب

سانتیگراد تکلیس شدند. عمل آسیاب و تکلیس برای دو بار متوالی تکرار شد. محصول به دست آمده در این مرحله آسیاب شده و در قالبهای مخصوص تحت فشاری معادل 10 تن به صورت قرصهایی به قطر حدود 10 میلی‌متر و ضخامت 2 تا 3 میلی‌متر در آمدند. یکی از مهمترین مراحل ساخت نمونه مرحله کلوخه‌سازی است. این مرحله نیز شامل دو قسمت گرم کردن و خنک کردن است که هر دو قسمت دارای اهمیت ویژه‌ای هستند. برای این مرحله قرصهای تهیه شده در روی قطعه‌ای از آلومینا که توسط ورقه‌ای از طلا پوشیده شده قرار داده شده است و در همان کوره‌ای که عمل تکلیس انجام شد، قرار گرفتند. عملیات حرارتی انجام شده در مرحله کلوخه‌سازی در فشار آزمایشگاه و بدون استفاده از شار اکسیژن انجام شد. زیرا نمونه‌های $BSCCO$ در هنگام تشکیل فاز فقط اکسیژنهای اضافی را از دست می‌دهند و با کمبود اکسیژن روبرو نمی‌شوند. در مرحله اول تا دمای حدود 500 درجه سانتیگراد گرم کردن با سرعت 0.2 درجه بر دقیقه انجام می‌شود و از 700 تا 860 این آهنگ 0.12 درجه بر دقیقه است. نمونه‌ها به مدت یک هفته در دمای 860 درجه سانتیگراد کلوخه‌سازی می‌شوند. نمونه‌ها با آهنگ 0.12 درجه بر دقیقه تا دمای 600 درجه سانتیگراد خنک شده و سپس کوره خاموش می‌شود.

بررسی ساختاری نمونه‌های به دست آمده توسط دستگاه پراش پرتوی ایکس (XRD) ساخت کارخانه فیلیپس (مدل $XPRT$) انجام شده است. ریخت شناسی نمونه‌های فوق توسط دستگاه میکروسکوپ الکترونی روبشی ساخت شرکت فیلیپس مدل $XL30$ و بررسی کیفی ساختار شیمیائی آن توسط دستگاه EDX انجام شده است. پذیرفتاری مغناطیسی نمونه‌های به دست آمده توسط دستگاه اندازه‌گیری پذیرفتاری مغناطیسی ساخت شرکت $Lake Shore$ مدل 7000 انجام شد. مقاومت ویژه نمونه‌ها نیز توسط دستگاه اندازه‌گیری ینچال مدار بسته ساخت شرکت $Leybold$ اندازه‌گیری شد. اندازه‌گیری مقاومت و کنترل دمای سیستم به وسیله یک کامپیوتر شخصی مجهز به یک $Interface$ و یک برنامه کامپیوتری و توسط یک سنسور



شکل ۱. (الف) مقاومت الکتریکی نمونه، (ب) مشتق مقاومت بر حسب دما.



شکل ۲. پذیرفتاری مغناطیسی در میدانهای مختلف و فرکانس ۳۳۳ Hz. شکل ۳. تغییرات مشتق مؤلفه حقیقی پذیرفتاری مغناطیسی، χ' بر حسب دما در میدانهای مختلف.

به دست آمده از طریق مقاومت $k \approx 10^7 \text{ V/A}$ نشان می دهد. در دماهای بالا و درست زیر دمای گذار T_c ، ابتدا دانه ها ابررسانا می شوند، با کاهش بیشتر دما ارتباطات بین دانه ای برقرار شده و سیستم تقریباً حالت دیامغناطیس کامل پیدا می کند. همان طور که در شکل ملاحظه می شود، قسمت درون دانه ای مؤلفه حقیقی، χ' (قله) حساسیتی به میدان اعمال شده نشان نمی دهد. دلیل آن

دما با وضوح بیشتری مشاهده می شود. همان طور که در شکل ۳ ملاحظه می شود منحنی $d\chi'/dT$ قله ای را در دماهای بالا و دنباله ای را در دماهای پایین نشان می دهد. در واقع قله نشان دهنده گذار ابررسانایی در درون دانه ها است و دنباله مربوط به زوج شدگی بین دانه ای است. دمای گذار نمونه T_c در این حالت برابر 10^7 V/A به دست می آید که همخوانی خوبی با مقدار

جوزفسون از خود نشان می‌دهند. وابستگی دمایی چگالی جریان بحرانی که می‌تواند از طریق پیوندگاههای جوزفسون جریان داشته باشد، محاسبه شده است [۱۶ و ۱۵]. این وابستگی را می‌توان به صورت رابطه $(1 - T/T_c)^n$ J_c نوشت، که مقدار n برای پیوندگاههای ابررسانا-بهنجار-ابررسانا (SNS) برابر ۲ و برای پیوندگاههای ابررسانا-عایق-ابررسانا (SIS) برابر ۱ می‌باشد. بنابراین، نمونه دارای پیوندگاه ضعیف از نوع (SNS) می‌باشد.

به منظور بررسی خواص دینامیکی خطوط شار و پدیده خزش شار، تغییرات پذیرفتاری مغناطیسی ac با فرکانس اندازه‌گیری شد. در شکل ۵ منحنی تغییرات پذیرفتاری مغناطیسی ac با فرکانس در میدان $160 A/m$ رسم شده است. همان‌طور که در شکل مشاهده می‌شود، با افزایش فرکانس جابه‌جایی کوچکی در دمای قله، T_p به سمت دماهای بالا صورت می‌گیرد. این جابه‌جایی توسط مولر^۱ و افراد دیگری توضیح داده شده است [۱۷]. با افزایش فرکانس، در یک دوره (چرخه تغییر میدان ac)، گردشاره‌ها فرصت کمتری برای نفوذ به داخل نمونه پیدا می‌کنند. لذا برای نفوذ کامل شار به داخل نمونه، چگالی نیروی میخکوبی ضعیفتری نیاز است. به دلیل اینکه نیروی میخکوبی با افزایش دما کاهش می‌یابد، لذا دمای قله، T_p باید با افزایش فرکانس زیاد شود. جابه‌جایی T_p با فرکانس به ما این امکان را می‌دهد که مقادیر انرژی فعالسازی برای خزش شار $U(H_{ac}, T)$ را پیدا کنیم. بیشینه χ در فرکانسی اتفاق می‌افتد که توسط رابطه زیر داده می‌شود [۹]:

$$f = f_c \exp(-U/k_B T) \quad (1)$$

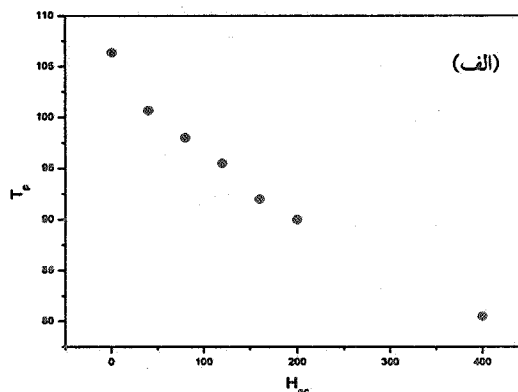
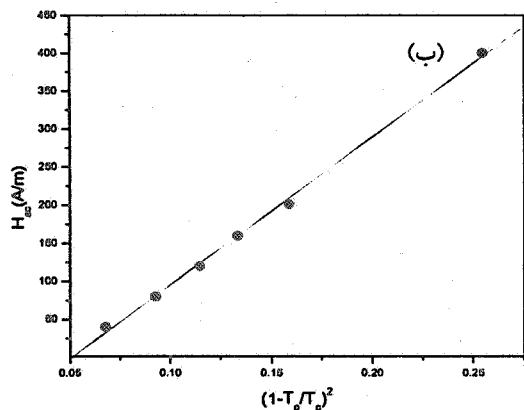
که در آن f_c فرکانس تلاش است.

لذا با رسم منحنی تغییرات فرکانس f بر حسب $1/T_p$ می‌توان انرژی فعالسازی برای خزش شار را به دست آورد. در شکل ۶ منحنی تغییرات فرکانس f بر حسب $1/T_p$ در میدانهای مختلف نشان داده شده است. همان‌طور که در شکل دیده می‌شود رابطه‌ی نمایی بین f و $1/T_p$ وجود دارد.

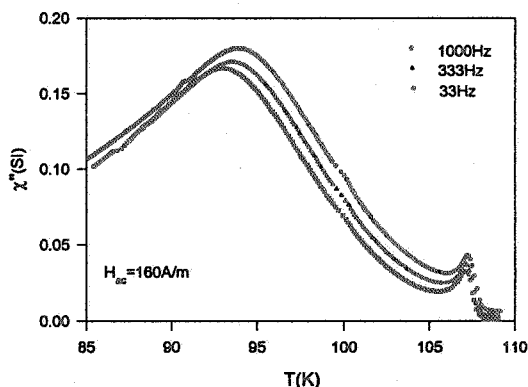
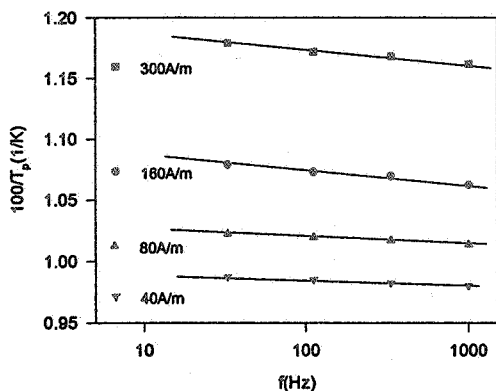
کوچک بودن میدانهای اعمال شده در مقایسه با میدان بحرانی درون‌دانه‌ای است. با این حال میدانهای اعمال شده برای تغییر ارتباطات بین دانه‌ای کافی هستند. بنابراین همان‌طور که ملاحظه می‌شود با افزایش میدان قله‌مربوط به گذار درون‌دانه‌ای در منحنی $d\chi'/dT$ (T_c) به سمت دماهای پایین جابه‌جا می‌شود.

همان‌طور که در شکل ۲ مشاهده می‌شود مؤلفه موهومی χ'' قله‌ای را نشان می‌دهد و همان‌طور که اشاره شد نشان‌دهنده اتلاف در نمونه است. با افزایش میدان قله‌مربوط به χ'' به سمت دماهای پایین‌تر منتقل شده و پهنای گذار افزایش می‌یابد، میزان جابه‌جایی قله بر حسب دامنه میدان متناسب با قدرت نیروی میخکوبی است، هر چه این جابه‌جایی بیشتر باشد نشان‌دهنده ضعیف بودن نیروی میخکوبی و نتیجتاً کوچک بودن چگالی جریان بحرانی خواهد بود.

در شکل ۴-الف تغییرات دمای قله، T_p بر حسب دامنه میدان، H_{ac} رسم شده است. همان‌طور که در شکل ۴-ب دیده می‌شود، تغییرات دامنه میدان بر حسب دمای قله، T_p همخوانی خوبی با رابطه $H_{ac} = H_c \left(1 - \frac{T}{T_c}\right)^2$ دارد. با این که در شکل ۴-ب تغییرات دمای قله، T_p بر حسب دامنه میدان رسم شده است، اما با استفاده از مدل بین می‌توان آن را به تغییرات چگالی جریان بحرانی بر حسب دما مربوط کرد [۱۴]. بر طبق مدل بین چگالی جریان بحرانی در دمای T_p برای یک نمونه با مقطع مستطیلی به صورت $J_c = \frac{H_{ac}}{a} \sim \frac{H_{ac}}{\sqrt{ab}}$ داده می‌شود، که در آن مساحت سطح مقطع برابر $2a \times 2b$ می‌باشد. بنابراین از تغییرات دمایی H_{ac} می‌توان تغییرات چگالی جریان بحرانی بر حسب دما را تعیین نمود. همان‌طور که در شکل ۴-ب دیده می‌شود، داده‌ها مطابقت خوبی با وابستگی دمایی چگالی جریان بحرانی به صورت $J_c \sim \left(1 - \frac{T}{T_c}\right)^2$ دارند. اما همان‌طور که قبلاً اشاره شد، ابررساناهای چندبلوری به صورت آرایه‌ای از ارتباطات ضعیف می‌باشند که رفتاری مشابه پیوندگاههای



شکل ۴. (الف) تغییرات دمای قله، T_p بر حسب دامنه میدان، H_{ac} (ب) منحنی برازش دامنه میدان H_{ac} با رابطه $H_{ac} \sim (1 - T_p / T_c)^2$.

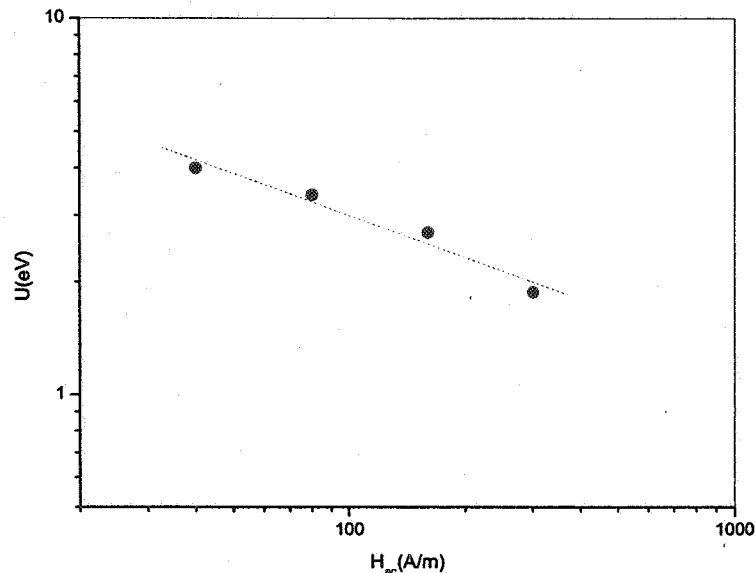


شکل ۶. منحنی $1/T_p$ بر حسب f برای میدانهای مختلف.

شکل ۵. تغییرات پذیرفتاری مغناطیسی ac با فرکانس در میدان $160 A/m$.

را نشان می‌دهد. نتیجه به دست آمده مشابه رابطه به دست آمده توسط رن^۱ و همکاران، $U(H_{ac}) \propto H_{ac}^{-0.28}$ برای نمونه‌های لایه نازک Tl ۲۲۱۲ است [۲۰] همچنین مقایسه رابطه فوق با رابطه به دست آمده برای لایه‌های نازک $YBCO$ ، $U(H_{ac}) \propto H_{ac}^{-0.18}$ [۱۸] و برای نمونه‌های $Gd-123$ ، $U(H) \propto H^{-0.29}$ [۲۱] نشان

وابستگی انرژی فعالسازی به میدان را می‌توان از روی شیب منحنی $1/T_p$ بر حسب f برای میدانهای مختلف به دست آورد. در شکل ۷ منحنی تغییرات انرژی فعالسازی بر حسب میدان رسم شده است. همان‌طور که ملاحظه می‌شود انرژی فعالسازی برای خزش شار با افزایش میدان کاهش می‌یابد که در توافق با نتایج لایه‌های نازک $Y-123$ [۱۸] $GdPr-123$ [۱۹] و Tl ۲۲۱۲ [۲۰]. شکل ۷ وابستگی توانی $U(H_{ac}) \propto H_{ac}^{-0.26}$



شکل ۷. منحنی تغییرات انرژی فعالسازی بر حسب میدان.

به صورت $J_c \sim \left(1 - \frac{T}{T_c}\right)^2$ به دست می آید، که نشان دهنده پیوندگاههای ضعیف از نوع (SNS) می باشد. تغییرات پذیرفتاری مغناطیسی ac با فرکانس نیز اندازه گیری شده است. با افزایش فرکانس جابه جایی کوچکی در دمای قله، T_p به سمت دماهای بالا صورت می گیرد. این اثر ناشی از پدیده خزش شار است. وابستگی انرژی فعالسازی به میدان به صورت $U(H_{ac}) \propto H_{ac}^{-۰.۳۶}$ به دست می آید.

می دهد که خواص بین دانه ای نمونه های BSCCO تحت اعمال میدان مغناطیسی ضعیفتر از نمونه های YBCO و $Gd-123$ است.

۳. نتیجه گیری

وابستگی دمایی پذیرفتاری مغناطیسی AC در نمونه های چندبلوری $(Bi_{1-x}Pb_x)Sr_2Ca_2Cu_2O_y$ در میدانها و فرکانسهای مختلف اندازه گیری شده است. پهنای گذار در قسمت حقیقی و قسمت موهومی بستگی شدید به اندازه میدان مغناطیسی دارد. با استفاده از تغییرات دمای قله، T_p بر حسب دامنه میدان، H_{ac} وابستگی دمایی چگالی جریان بحرانی

مراجع

1. J G Bednorz, K A Muller, *Z. Phys. B* 64 (1986) 189.
2. J Passai, M Lahtinen, J Thure Eriksson, M Polak, *Physica C* 259 (1996).
3. N D Brownig, P D Nellist, D P Norton, M F Chisholm, S J Pennycook, *Physica C* 294 (1998) 183.
4. H Salamati, P Kameli, *Solid. State Communications* 125 (2003)407.
5. J H P M Emmem, G M Stollman, W J M Dejong, *Physica C* 169 (1990) 418.
6. B J Jönsson, K V Rao, S H Yun, U O Karlsson, *Phys.Rev.B* 58 (1998) 5862.
7. C A Cardoso, O F Delima, *Physica C* 299 (2000) 185.
8. M Wurlitzer, M Lorenz, K Zimmer, P Esquinazi, *Phys. Rev. B* 45 (1992) 11816.

16. V Ambegaokar, A Baratoff, *Phys. Rev. Lett* 10 (1963) 486.
17. K H Müller, *Physica C* 168 (1990) 585.
18. H Salamati, P Kameli, *Physica B* 321 (2002)337.
۱۹. حسین خسروآبادی، وحید دادمهر، محمد اخوان،
مجله پژوهش فیزیک ایران، ۳(۱۳۸۱)۵۳.
20. C Ren et al, *Supercond. Sci. Technol.* 12 (1999)400.
21. M R Mohammadizadeh and M Akhavan, *Supercond. Sci. Technol.* 16 (2003)538.
9. M Nikolo, R B Goldfarb, *Phys. Rev. B* 39 (1989) 6615.
10. R Prozorov, A Shaulov, Y Wolfus, Y Yeshurun, *Phys. Rev. B* 52 (1995) 12541.
11. G C Han, C K Ong, H P Li, *Physica C* 299 (1998) 71.
12. S Kao and K Y Simon, *J Supercond* 4 (1991)179.
13. A R Jurelo, et al., *Physica C* 311 (1999) 133.
14. C B Bean, *Rev. Mod. Phys.* 36 (1964) 31.
15. P G degenne, *Rev. Mod. Phys.* 36 (1964) 225.