

ساخت، مشخصه‌یابی و مطالعه ویژگی‌های ساختار بلوری، الکتریکی و مغناطیسی ترکیب

ابررسانایی $Y_2Ba_5Cu_7O_x$

مجتبی مظاهری^{۱*}، شهریار جاماسب^۲

(تاریخ دریافت: ۱۳۹۸/۰۱/۱۱، ش.ص: ۱۷۶-۱۶۳، تاریخ پذیرش: ۱۳۹۸/۰۹/۰۵)

چکیده

ترکیب جدید ابررسانای دمای بالا با فرمول $Y_2Ba_5Cu_7O_x$ (Y257) از خانواده YBCO با استفاده از روش حالت جامد استاندارد ساخته شد. پودر مواد اولیه در حضور هوا کلسینه شد و در مرحله بعد قرص‌های نمونه در حضور گاز اکسیژن تفجوشی شدند. سلول واحد این ترکیب شامل چینش متوالی سلول واحد ترکیب‌های Y123، Y124 و یک لایه اضافی BaO است که در راستای محور C بر روی هم قرار گرفته‌اند. ویژگی‌های ساختار بلوری و گروه فضایی این ترکیب با استفاده از آنالیز پراش پرتو X و روش پالایش ریتولد مطالعه شده است. مقاومت ویژه الکتریکی ترکیب Y257 در دمای گذار ابررسانایی آغازی برابر 98 K به شدت کاهش یافت و در دمای گذار ابررسانایی نهایی برابر 92 K به مقدار صفر رسید. مقاومت ویژه الکتریکی این ترکیب در بازه دمای اتاق تا دمای گذار ابررسانایی آغازی، رفتار فلز گونه دارد. در آزمایش اندازه‌گیری مقاومت الکتریکی نمونه بر حسب دما با اعمال میدان مغناطیسی، مقاومت ویژه الکتریکی با شیب کمتری به مقدار صفر نزدیک شد و دچار پهن شدگی شد. اعمال میدان مغناطیسی، باعث افزایش گستره گذار ابررسانایی و کاهش دمای گذار ابررسانایی نمونه‌ها شد. رفتار مقاومت ویژه الکتریکی در حضور میدان مغناطیسی خارجی از مدل خزش شار فعال شده گرمایی تبعیت می‌کند.

واژه‌های کلیدی: ساختار بلوری، ویژگی الکتریکی، ابررسانایی، خانواده YBCO.

^۱ - استادیار، دانشکده علوم پایه، دانشگاه صنعتی همدان، همدان، ایران

^۲ - استادیار، دانشکده مهندسی پزشکی، دانشگاه صنعتی همدان، همدان، ایران

x- نویسنده مسئول مقاله: mojtaba.mazaheri@hut.ac.ir

پیشگفتار

در سال ۱۹۸۶ ابررسانایی دمای بالا^۱ در ترکیب کوپراتی^۲ بر پایه لانتانم کشف شد [۱] و بعد از آن پژوهش‌های فراوانی برای کشف ابررساناهای جدید با دمای گذار بالاتر آغاز شد. این تلاش‌ها منجر به کشف خانواده‌های مختلف ترکیب‌های ابررسانای دمای بالا شد [۲]. در سال ۱۹۸۷ ترکیب $YBa_2Cu_3O_{7-8}$ اولین ابررسانای دمای بالا در خانواده YBCO با دمای گذار ابررسانایی بالاتر از دمای جوش نیتروژن کشف شد [۳]. بعد از آن ترکیب‌های دیگری از خانواده YBCO کشف شدند که استوکیومتری، ویژگی‌های فیزیکی و دمای گذار ابررسانایی متفاوتی دارند [۴]. آلاینش عناصر کمیاب حاکی در جایگاه ایتريم و تغییر میزان اکسیژن در ترکیب‌های خانواده YBCO، باعث ایجاد تغییراتی در دمای گذار و ویژگی‌های دیگر ابررسانایی می‌شود [۵]. این تغییرها در رفتار ترکیب در حالت نرمال هم تاثیر می‌گذارند و در مواردی، باعث تقویت رفتار فلزی و در موارد دیگر، باعث بروز رفتار عایق گونه می‌شوند. همچنین ایجاد آلاینش بر ترابرد الکتریکی و مغناطیسی ترکیب‌ها تاثیر می‌گذارد.

ترکیب‌های $YBa_2Cu_3O_{7-8}$ (Y123)، $YBa_2Cu_4O_8$ (Y124)، $Y_2Ba_4Cu_7O_{15}$ (Y247) و $Y_3Ba_5Cu_8O_y$ (Y358) عضو خانواده YBCO هستند. در این فازها صفحه‌های CuO_2 مسئول رفتار ابررسانش حامل‌های جفت کوپر^۳ هستند و زنجیره‌های CuO مسئول تقویت تعداد حامل‌های حفره در صفحه‌های ابررساناش CuO_2 هستند. در ابررساناهای خانواده YBCO حامل‌های بار حفره‌ها هستند. تعداد صفحه‌ها، اکسیداسیون مس در صفحه‌ها و زنجیره‌ها، فاصله بین صفحه‌های متوالی و میزان اکسیژن ترکیب بر روی دمای چگالش جفت‌های کوپر و دمای گذار ابررسانایی^۴ (T_c) تاثیر می‌گذارند [۵]. ترکیب Y123 دو صفحه CuO_2 و یک زنجیره CuO و دمای گذار ابررسانایی $T_c=92K$ دارد، ترکیب Y124 دو صفحه CuO_2 و دو زنجیره

CuO دارد و دمای گذار ابررسانایی آن $T_c=80K$ است [۴]. ترکیب Y247 بر اساس میزان اکسیژن و شرایط ساخت نمونه، دمای گذار ابررسانایی متغیر بین 30K تا 95K دارد [۶] و این تغییرات نشان می‌دهد که امکان افزایش دما با تغییر استوکیومتری و دینامیک سیستم وجود دارد. ترکیب Y247 را می‌توان به صورت لایه‌های درهم بافته متوالی Y123 و Y124 توصیف کرد که با وجود نقص اکسیژن دمای گذار ابررسانایی متغیر دارد [۴]. ترکیب Y358 گذار به حالت ابررسانایی را در $T_c=102K$ نشان داد [۷] که این دمای گذار ابررسانایی نسبت به ترکیب‌های دیگر خانواده YBCO بیش‌ترین دمای گذار ابررسانایی است. بلور واحد این ساختار شامل پنج صفحه CuO_2 و سه زنجیره CuO است که در آن سه صفحه CuO_2 به وسیله لایه‌های عایق BaO از دو صفحه دیگر CuO_2 جدا شده‌اند.

تغییر ساختار بلوری ترکیب‌های خانواده YBCO، باعث ایجاد تغییرات بزرگی در رفتارهای الکتریکی و مغناطیسی این ترکیب‌ها می‌شود. تغییر در ساختار بلوری و جانمایی در جایگاه یون‌های مختلف، باعث افزایش گردش‌های مغناطیسی^۵ و حرکت آن‌ها در سیستم می‌شود و در نتیجه ساز و کار ترابرد الکتریکی^۶ و ترابرد مغناطیسی^۷ در حالت نرمال (بین دمای اتاق تا دمای گذار ابررسانایی) و حالت ابررسانایی تغییر می‌کند. حرکت و خزش گردش‌ها و شبکه‌های آن‌ها، منجر به ایجاد اتلاف و گسترده‌تری بیش‌تر فاصله بین دمای گذار ابررسانایی آغازی و دمای گذار ابررسانایی نهایی (بازه گذار مقاومتی) در ابررساناها می‌شود. مطالعه دقیق دینامیک گردش‌ها تاثیر مهمی در توسعه اتصال‌های رسانا-ابررسانا دارد که در تکنولوژی دمای نیتروژن مایع کاربرد دارد [۹]. میخکوبی شار^۸ در ابررساناها می‌تواند به کاهش اتلاف الکتریکی منجر شود و ترابرد جریان‌های الکتریکی بزرگ را تسهیل کند [۱۰]. و میخکوبی خطوط شارهای مغناطیسی گردش‌ها از مدل خزش شار فعال شده گرمایی^۹ تبعیت می‌کند که بر اساس

⁵ -Magnetic vortex

⁶ -Electric transport

⁷ -Magnetic transport

⁸ -Vortex pinning

⁹ -Thermally activated flux creeping

¹ -High temperature superconductivity

² -Cuprate

³ -Cooper pair

⁴ -Superconducting transition temperature

کردند [۱۹]. با بررسی کارهای انجام شده بر روی ترکیب Y257، تاکنون ویژگی‌های ترابرد الکتریکی و مقاومت مغناطیسی این ترکیب در حالت‌های نرمال، گذار مقاومتی و ابرسانایی مورد بررسی قرار نگرفته است. در این مقاله ویژگی‌های بلوری ترکیب Y257 با آنالیز پراش اشعه X بررسی شدند و اندازه بلورک‌ها با استفاده از روابط نظری تعیین شدند. ویژگی‌های ترابرد الکتریکی و مقاومت مغناطیسی ترکیب بررسی و با نظریه‌های موجود در زمینه ابرسانایی مقایسه شدند. ساختار بلوری این ترکیب با استفاده از آنالیز پراش پرتوی X مطالعه شد. در حضور میدان مغناطیسی، مقاومت مغناطیسی نمونه‌های Y257 با مدل خزش شار فعال شده گرمایی مقایسه شد و وابستگی انرژی میخکوبی خزش شار به دما و میدان مغناطیسی بررسی شد.

مواد و روش‌ها

نمونه‌های ترکیب Y257 با روش حالت جامد استاندارد در فشار محیط ساخته شدند. شکل ۱ مراحل مختلف ساخت نمونه‌ها به روش حالت جامد استاندارد را نشان می‌دهد. برای تولید ترکیب نهایی، مقدار مناسب از پودرهای مواد اولیه Y_2O_3 ، $BaCO_3$ و CuO با خلوص بالا (۹۹/۹٪) با یکدیگر مخلوط شدند. مخلوط مواد اولیه در مایع استن به مدت ۵ ساعت در هاون آلومینا ساییده شد. پودر تهیه شده بر اساس برنامه حرارتی در دمای $850^\circ C$ و به مدت ۲۴ ساعت کلسینه شد. به منظور افزایش همگنی پودر ترکیب، مرحله کلسینه سه بار تکرار شد. بعد از مرحله کلسینه، مقدار لازم از پودر ماده به وسیله دستگاه پرس هیدرولیکی ساده تک محور و با اعمال فشار ۴ تن بر سانتیمتر مربع ($4t/cm^2$) به قرص با قطر 10mm و ارتفاع 1mm تبدیل شد. قرص‌های به شکل دیسک به وسیله دستگاه برش به ابعاد $8 \times 3 \times 1mm$ بریده شدند. در مرحله نف جوشی، قرص‌های نمونه در دمای $850^\circ C$ و به مدت ۲۴ ساعت تحت عملیات پخت نهایی قرار گرفتند. در مرحله کاهش دما به منظور تشکیل ساختار ابرسانایی، قرص‌ها به ترتیب در هر یک از دماهای $650^\circ C$ ، $600^\circ C$ و $550^\circ C$ به مدت ۱۰ ساعت در حضور گاز اکسیژن قرار گرفتند. دمای بهینه اکسیژن گیری در نمونه‌های خانواده YBCO برای ایجاد ساختار ارتورومبیک با فاز ابرسانایی

آن خزش شار با پرش فعال شده گرمایی گردشارها یا مجموعه‌ای از گردشارها از روی سدهای انرژی میخکوبی اتفاق می‌افتد [۱۱]. در حضور انرژی گرمایی نسبتاً بزرگ در دمای گذار ابرسانایی، $k_B T_c$ [۱۲]، حرکت اتلافی شارهای فعال شده گرمایی، منجر به ایجاد مقاومت در گستره گذار در ابرساناهای دمای بالا می‌شود. بر اساس مدل سرش فاز امبگوار^۱ و هالپرین^۲ [۱۳]، اتلاف ابرسانا ناشی از حرکت شبکه خطوط شارها در حضور میدان مغناطیسی است [۱۴]. این مدل برخلاف مدل خزش شار فعال شده گرمایی در نزدیکی دمای گذار ابرسانایی با داده‌های مقاومت ویژه الکتریکی مطابقت خوبی ندارد.

به منظور ساخت ترکیبی جدید با دمای گذار ابرسانایی بالاتر از دمای گذار ابرسانایی ترکیب Y123، با تغییر ساختار ترکیب Y247 و جبران کمبود اکسیژن در آن می‌توان به ترکیبی با استوکیومتری جدید و دمای گذار بالاتر دست یافت. در این راستا با اضافه کردن لایه BaO در ترکیب Y247، فاز جدیدی از خانواده YBCO با استوکیومتری Y257 با دمای گذار ابرسانایی بالاتر از Y123 ساخته شده است [۱۵]. در سال ۲۰۱۳ مقاله‌ای در خصوص ساخت و مشخصه‌یابی ترکیب Y257 ارائه شد و ویژگی‌های ساختار بلوری ترکیب با استفاده از آنالیز پراش اشعه X و ویژگی الکتریکی و دمای گذار ابرسانایی نمونه گزارش شد [۱۵]. در مقاله دیگری در سال ۲۰۱۴، کراهانگ^۳ [۱۶] ویژگی‌های الکتریکی و ساختار بلوری ترکیب‌های Y123، Y358 و کامپوزیت Y257/Y211 را با یکدیگر مقایسه کرد. در این مقاله دمای گذار ابرسانایی نمونه‌ها و ویژگی‌های ساختار بلوری و پارامترهای سلول واحد با یکدیگر مقایسه شده‌اند. مظاهری و همکاران [۱۷] در سال ۲۰۱۵، ویژگی‌های ساختار بلوری و ویژگی‌های رفتار الکتریکی در حالت‌های نرمال و ابرسانایی را مطالعه کردند. ترکیب Y257 در سال ۲۰۱۶ با روش ذوبی ساخته شد و ویژگی‌های دمایی و ساختار بلوری آن مورد بررسی قرار گرفت [۱۸]. کراهانگ در سال ۲۰۱۸ تاثیر آلاینش عنصر Ti را بر روی ساختار بلوری ترکیب Y257 بررسی

1 – Ambegokar

2 – Halprin

3 – Kruaehong

به دست آمد که با چگالی جرمی نظری $5/9\text{g/cm}^3$ تفاوت دارد [۲۱]. چگالی جرمی نظری بر اساس نسبت جرم بر حجم سلول واحد به دست آمد. این تفاوت نشان داد که چگالی جرمی تجربی نمونه‌ها ۷۸٪ چگالی جرمی به دست آمده از روش نظری است.

در هنگام سرد سازی نمونه‌ها در بازه دمایی 550°C الی 400°C است [۲۰]. این مرحله برای تامین میزان اکسیژن در سلول واحد نمونه‌ها ضروری است. نقص اکسیژن در این مرحله منجر به تولید ساختار تتراگونال می‌شود که ویژگی ابررسانایی ندارد. سرانجام دمای نمونه‌ها در طی ۱۰ ساعت به دمای اتاق کاهش یافته و آماده اندازه‌گیری شدند. چگالی جرمی نمونه‌ها به روش تجربی برابر با $4/6\text{g/cm}^3$

مخلوط کردن مقدار استوکیومتری لازم از مواد اولیه CuO و $BaCO_3, Y_2O_3$	۱
ساییدن مخلوط اولیه در مایع استن به مدت ۵ ساعت در هاون	۲
کلسینه کردن با برنامه حرارتی در دمای 850°C درجه سانتیگراد به مدت ۲۴ ساعت	۳
تبدیل پودر کلسینه شده به قرص به قطر ۱ سانتیمتر و ضخامت ۱ میلیمتر با استفاده از دستگاه پرس هیدرولیکی تک محور و در فشار 4t/cm^2	۴
تف جوشی کردن قرص‌ها با برنامه حرارتی در حضور گاز اکسیژن خالص	۵
برش قرص‌ها در ابعاد $8 \times 3 \times 1\text{mm}$ و آماده سازی برای انجام آزمایش	۶

شکل ۱- مراحل تهیه نمونه‌های ترکیب YBCO به روش حالت جامد استاندارد

اطلاعات استاندارد^۱ ترکیب مورد نظر شبیه‌سازی می‌شود. برای پالایش به روش ریتولد، داده‌های تجربی آنالیز پراش پرتو X و فایل اطلاعات استاندارد مناسب برای ترکیب Y257 وارد نرم افزار مود شدند. در ابتدا طیف پراش تجربی از نتایج آنالیز پرتو X در توسط نرم افزار رسم شد. با اجرای نرم افزار منحنی داده‌های تجربی و منحنی داده‌های نظری رسم می‌شود. با تغییر پارامترهای مختلف مربوط به بلور شناسی یک الگوی شبیه‌سازی شده متناسب با الگوی تجربی ایجاد شد. در صورتی که تفاضل الگوی تجربی و الگوی نظری تولید شده به وسیله نرم افزار

ساختار بلوری نمونه با آنالیز پراش پرتوی X و با استفاده از دستگاه فیلیپس با هدف مس (تابش $K\alpha$ با طول موج $\lambda=1/540\text{\AA}$) در گستره $20^\circ-90^\circ$ مطالعه شد و نتایج آن با روش پالایش ریتولد تحلیل شد. برای بررسی ساختار بلوری، داده‌های تجربی آنالیز پراش پرتوی X با روش پالایش ریتولد مورد بررسی قرار گرفتند. از نرم افزار مود (MAUD) برای پالایش ریتولد داده‌های آنالیز پراش پرتو X استفاده شد. در این روش به جای استفاده از شدت پیک‌ها از شدت همه نقاط طیف آنالیز پراش پرتو X استفاده می‌شود. در نرم افزار مود نقش پراش کلی شامل پیک‌ها و زمینه‌ها با استفاده از توابع ریاضی و فایل

¹ -Crystal information file (cif file)

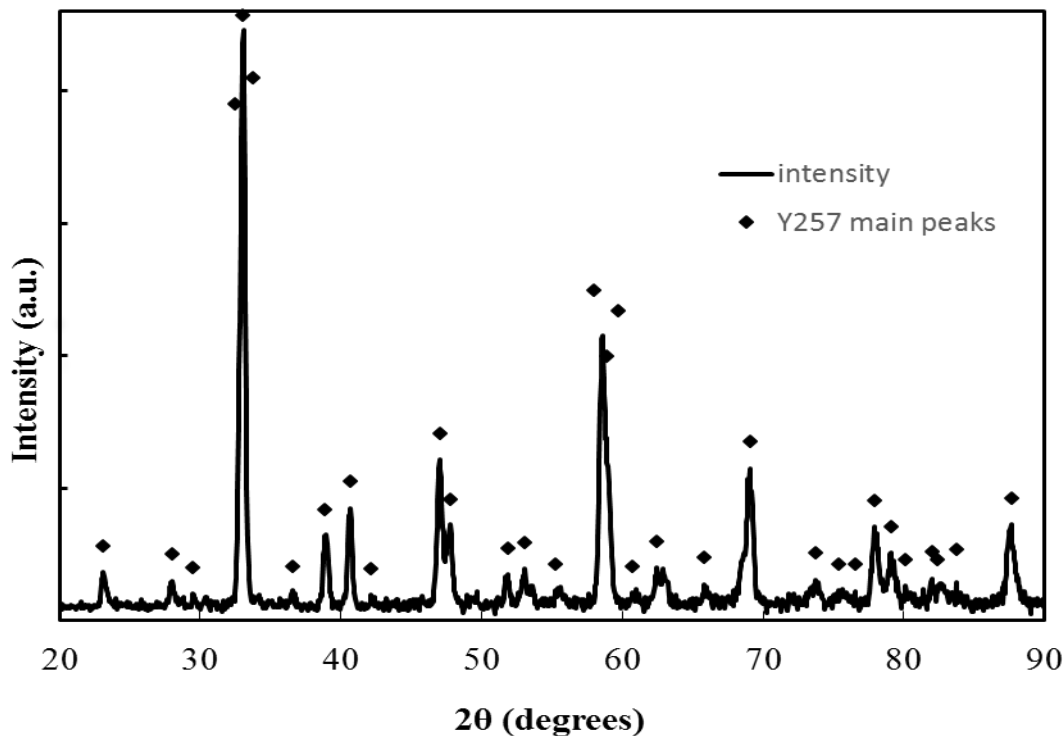
نتایج و بحث ویژگی‌های ساختاری

شکل ۲ داده‌های تجربی آزمایش XRD برای نمونه Y257 را نشان می‌دهد. داده‌های تجربی با استفاده از روش پالایش ریتولد تحلیل شدند. در شکل ۲، منحنی سیاه رنگ داده‌های تجربی را نشان می‌دهند.

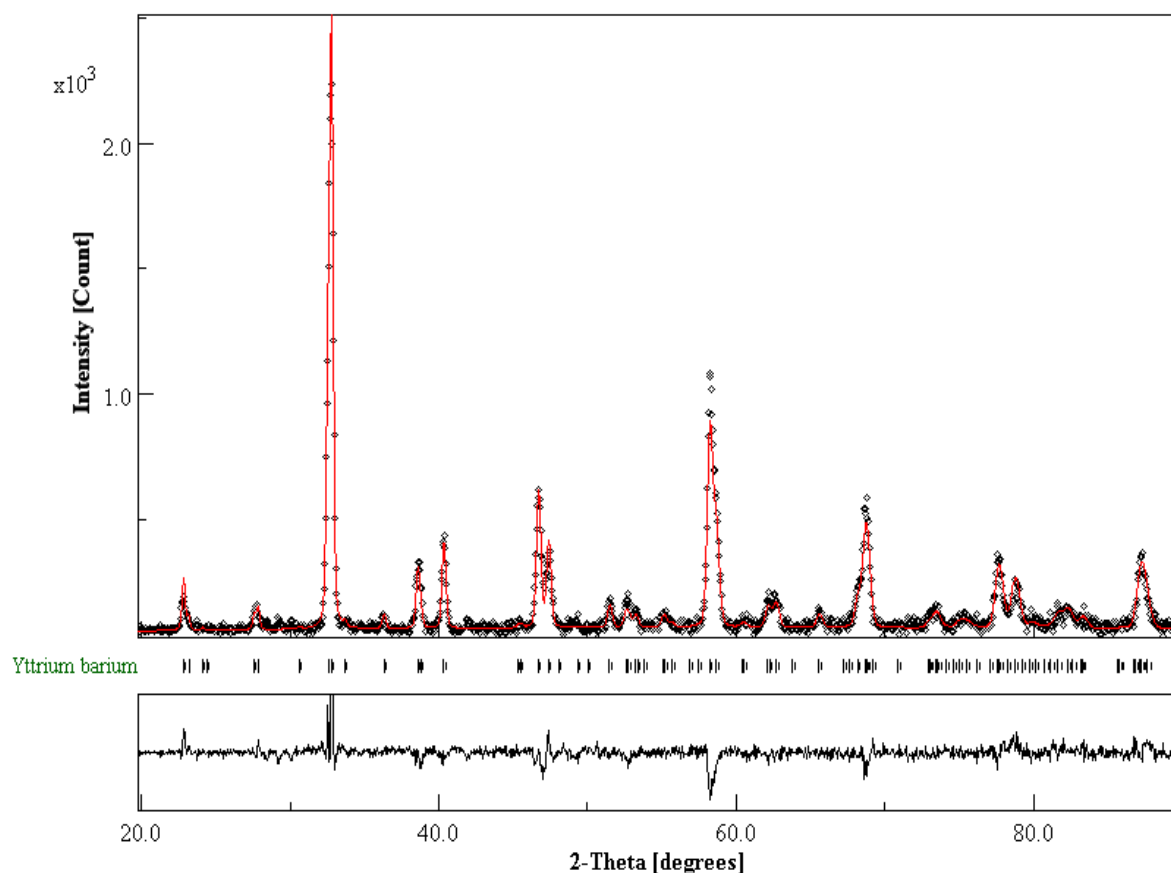
پیک‌های اصلی داده‌های XRD که با شکل‌های الماسی توپر مشخص شده‌اند، پیک‌های مربوط به ترکیب Y257 هستند که به میزان کمی زاویه آن‌ها نسبت به پیک‌های مربوط به ترکیب Y123 تغییر کرده است. پیک اصلی در این طیف در زاویه $2\theta = 32/8^\circ$ است. زاویه پیک‌ها به میزان کم‌تر از 1° به زاویه‌های بزرگ‌تر جابجا شده است. این تغییر مکان زاویه پیک‌ها ناشی از تغییر پارامترهای شبکه به ویژه پارامتر c سلول واحد است. همچنین فاز اقلیت BaCuO_2 به عنوان ناخالصی عایق با گروه فضایی $Im-3m$ در ترکیب ابررسانایی حضور دارد. حضور فاز ناخالصی عایق، BaCuO_3 باعث گستردگی منطقه گذار ابررسانایی (فاصله بین دمای گذار ابررسانایی آغازی T_c^{on} تا دمای گذار ابررسانایی نهایی T_c^{off})، افزایش تعداد گردش‌ها در سیستم ابررسانایی و افزایش انرژی میخکوبی گردش‌های مغناطیسی در حضور میدان مغناطیسی می‌شود [۲۲].

به خط راست نزدیک شود و یا در داخل کادر مربوطه در قسمت زیر طیف پراش قرار گیرد، مشخص می‌شود که پارامترهای مناسبی برای ترکیب انتخاب شده است. این پارامترها شامل ساختار بلوری، گروه فضایی، پارامترهای شبکه، زوایای سلول واحد و بسیاری پارامترهای بلوری برای ترکیب است. کمیت عددی sig در نرم افزار مود برای تعیین دقت پالایش به کار می‌رود و برای به دست آوردن یک پالایش مناسب این کمیت باید از عدد ۲ کم‌تر باشد.

مقاومت الکتریکی نمونه با استفاده از روش چهار پروب در بازه دمایی 40K تا 300K اندازه گیری شد. سیم‌های رسانا بر روی صفحه بزرگ قرص با چسب نقره متصل شدند. جریان لازم برای اندازه گیری مقاومت الکتریکی در بازه 10mA تا 100mA است. مقاومت ویژه الکتریکی و مقاومت مغناطیسی نمونه‌ها در حضور میدان‌های مغناطیسی با جریان مستقیم DC با اندازه شدت میدان مغناطیسی از صفر تا $H=1/5T$ در جهت عمود بر سطح قرص نمونه اندازه گیری شد. در برازش داده‌های تجربی با مدل‌های نظری از روش کمینه کردن خطا یا کم‌ترین اختلاف بین داده‌های تجربی و داده‌های مدل‌های نظری استفاده شد.



شکل ۲- داده‌های آنالیز پراش پرتو X برای ترکیب Y257 در بازه $20^\circ-90^\circ$ ، منحنی سیاه رنگ داده‌های تجربی را نشان می‌دهند. لوزی‌های تو پر پیک‌های مربوط به ترکیب Y257 را نشان می‌دهند.



شکل ۳- طیف آنالیز پراش پرتو X در بازه $20^\circ-90^\circ$ برای ترکیب Y257، در قسمت بالای شکل نقطه‌های سیاه داده‌های تجربی آنالیز پراش پرتو X و خط قرمز طیف محاسبه شده به روش پالایش ریتولد را نشان می‌دهند. در قسمت پایین تفاضل طیف تجربی و طیف محاسبه شده دیده می‌شود. خط‌های کوچک عمودی زیر طیف پراش مکان‌های براگ را نشان می‌دهند.

تشکیل شده و ساختار شبکه ارتورومبیک با گروه فضایی $Pmmm$ دارد و پارامترهای شبکه به ترتیب $a=3/832\text{\AA}$ ، $b=3/851\text{\AA}$ و $c=28/68\text{\AA}$ هستند. پارامترهای به دست آمده از پالایش ریتولد در جدول ۱ دیده می‌شوند. رابطه تجربی زیر برای تخمین پارامتر c شبکه بلوری در ترکیب‌های ابررسانایی خانواده YBCO ارائه شده است [۱۷]:

$$c=3/88 \times (N_{Cu}) + 0/0513 \quad (1)$$

که پارامتر N_{Cu} تعداد اتم‌های مس موجود در سلول واحد ترکیب است که در نمونه Y257 برابر با ۷ است. با استفاده از این رابطه، پارامتر $c=27/211\text{\AA}$ برای سلول واحد ترکیب

شکل ۳ نتیجه پالایش ریتولد را برای نمونه‌های Y257 نشان می‌دهد. در قسمت بالای شکل ۳، داده‌های تجربی با نقطه‌های سیاه رنگ و طیف محاسبه شده نظری به روش پالایش ریتولد با خط قرمز مشاهده می‌شود. در قسمت پایین شکل ۳، تفاضل داده‌های تجربی و شبیه سازی شده دیده می‌شود که در داخل کادر قرار دارد. کمیت عددی sig در نرم افزار مود برای تعیین دقت پالایش به کار می‌رود و برای به دست آوردن یک پالایش مناسب این کمیت باید از عدد ۲ کم‌تر باشد که مقدار عددی $sig=1/8858651$ برای پالایش ترکیب Y257 به دست آمد. معیار sig مشابه معیار برازش (goodness of fit) در نرم افزارهای دیگر است. نتیجه برازش داده‌های تجربی با روش پالایش ریتولد نشان می‌دهد، ترکیب Y257

Y257 به دست می‌آید که به میزان ۵٪ با نتیجه به دست آمده از روش پالایش ریتولد تفاوت دارد.

جدول ۱- اطلاعات به دست آمده از نتیجه پالایش ریتولد داده‌های تجربی آنالیز پراش پرتو X با نرم افزار مود برای نمونه Y257

پارامترهای شبکه سلول واحد	حجم سلول واحد	ساختار شبکه	گروه فضایی	معیار برازش در نرم افزار مود (sig<2)
$a=3/832\text{\AA}$ $b=3/851\text{\AA}$ $c=28/68\text{\AA}$	$V=423/2\text{\AA}^3$	ارتورومبیک	Pmmm	sig= ۱,۸۸۵۸۶۵۱ Rwp (%) = ۱۷,۳۹۷۰۰۹ Rb (%) = ۱۳,۳۵۰۷۰۷ Rexp (%) = ۹,۲۲۴۹۴۸

$$L=K\lambda/\beta\cos\theta \quad (2)$$

که در این رابطه L اندازه متوسط بلورک‌های نمونه، K عدد ثابت معادله شرر برابر با 0.9 ، λ طول موج تابشی اشعه X، β پهناي پیک در نصف ارتفاع آن^۲ و θ زاویه براگ پیک است. با استفاده از رابطه شرر، اندازه بلورک‌ها برای نمونه Y257 برابر $20/7\text{nm}$ به دست آمد. با استفاده از رابطه شرر مشخص می‌شود که هر اندازه پهناي پیک در نصف ارتفاع بزرگ‌تر باشد اندازه ذرات ماده کوچک‌تر هستند.

سرد شدن ترکیب و تغییر شکل آن، منجر به تغییر پهناي پراش اشعه X می‌شود که بخشی از آن مربوط به اندازه بلورک‌ها و بخشی مربوط به افزایش کرنش شبکه می‌باشد. در روش شرر پهن شدگی پیک‌ها تنها به اندازه بلورک‌ها مربوط می‌شود در حالی که به کرنش شبکه‌ای هم ارتباط دارد [۲۶]. رابطه ویلیامسون-هال^۳ و الگوی پراش اشعه X ارتباط بین پهن شدگی پیک‌ها با اندازه بلورک‌ها و کرنش شبکه‌ای را به دست می‌دهد. همچنین برای تخمین دقیق‌تر اندازه بلورک‌ها و به دست آوردن کرنش شبکه‌ای می‌توان از رابطه ویلیامسون-هال استفاده کرد. رابطه ویلیامسون-هال به صورت زیر نوشته می‌شود:

$$\beta\cos\theta=K\lambda/L+\eta\sin\theta \quad (3)$$

ساختار بلوری Y247 شامل لایه‌های متوالی از ترکیب Y123 (با میزان متغیر اکسیژن بین ۶ تا ۷) و ترکیب Y124 در راستای محور c است [۵]. نامشخص بودن میزان اکسیژن در ترکیب Y247، منجر به تغییر دمای گذار از ۳۰K تا ۹۵ K می‌شود [۶]. برای کاهش نقص اکسیژن و افزایش میزان حفره‌ها و تثبیت دمای گذار ابررسانایی، لایه عایق BaO به ترکیب Y247 در راستای محور c در سلول واحد اضافه شده تا ترکیب جدید Y257 تشکیل شود. ترکیب Y257 را می‌توان ترکیبی از سلول‌های واحد Y123 و Y124 در راستای پارامتر c با یک لایه عایق اضافی BaO در نظر گرفت. چینش این لایه‌ها و حضور لایه اضافی BaO باعث افزایش فشار شیمیایی در صفحه‌های ابررسانش CuO_2 می‌شود. این اثر ممکن است ناشی از الکترون‌گاتیویته بزرگ یون‌های اکسیژن در لایه‌های BaO باشد که الکترون‌ها را از صفحه‌های ابررسانش CuO_2 به سمت خود می‌کشند و باعث افزایش تعداد حامل‌های حفره در این صفحه‌ها می‌شوند. حامل‌های حفره وظیفه ابررسانش را بر عهده دارند و افزایش آن‌ها، باعث افزایش دمای گذار ابررسانایی T_c می‌شود [۱۷].

برای اندازه گیری تقریبی اندازه بلورک‌های^۱ نمونه می‌توان از الگوی پراش اشعه X و رابطه شرر [۲۳، ۲۴ و ۲۵] استفاده کرد. رابطه شرر به صورت زیر است:

² - Full width at half maximum, FWHM

³ - Williamson-Hall

¹ - Crystallite

الکتریکی به شدت کاهش یافته و در دمای گذار ابررسانایی نهایی، $T_c^{off}=92K$ ، به صفر رسید. در این دما، گذار فاز از حالت شبه فلز به حالت ابررسانایی رخ داد. فاصله بین دمای گذار ابررسانایی آغازی و دمای گذار ابررسانایی نهایی یا پهنای گذار ابررسانایی $\Delta T_c=6K$ است و متوسط دمای گذار مقاومتی برابر $T_c^{min}=95K$ است. در دمای گذار ابررسانایی آغازی T_c^{on} ، حالت ابررسانایی در درون بلورک‌های ترکیب تشکیل می‌شود و با کاهش دما و افزایش تعداد بلورک‌های با حالت ابررسانا و اتصال آن‌ها به یکدیگر در دمای گذار نهایی، T_c^{off} ، حالت ابررسانایی در داخل حجم بلورک‌ها و بین بلورک‌ها تشکیل می‌شود و مقاومت ویژه الکتریکی نمونه برابر صفر می‌شود. پهنای گذار ابررسانایی نشان دهنده وجود ناهمگنی، ناخالصی و مقاومت بین بلورک‌ها است. دمای گذار آغازی این ترکیب بین دمای گذار ترکیب Y123 و دمای گذار آغازی ترکیب Y358 است و با نتایج ارائه شده در مورد ابررساناهای دیگر در خانواده YBCO توافق دارد [۲۷].

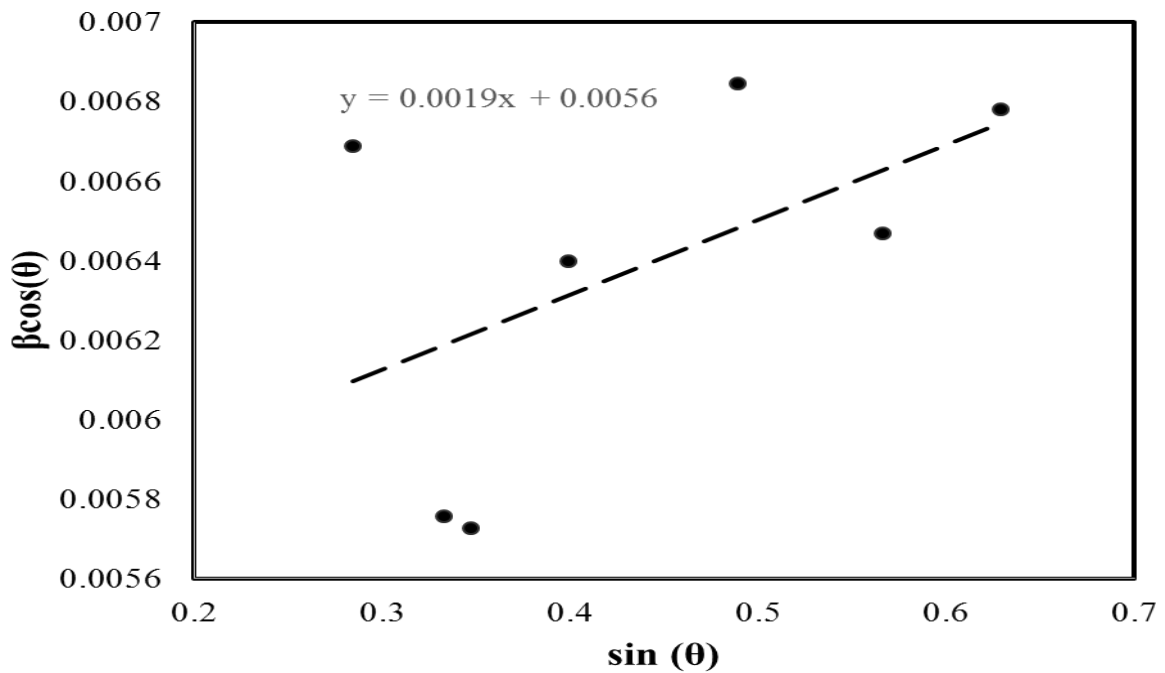
رفتار مقاومت ویژه الکتریکی ترکیب Y257 در حضور میدان مغناطیسی عمود بر جهت حرکت جریان (عمود بر سطح بزرگ نمونه) بررسی شد. در شکل ۵ تأثیر میدان مغناطیسی بر مقاومت ویژه الکتریکی نمونه $Y_2Ba_5Cu_7O_x$ بر حسب دما در حضور میدان‌های مغناطیسی 0، 1/5T، 0/8T، 0/5T در ناحیه گذار ابررسانایی، اعمال میدان مغناطیسی، باعث تغییر کوچکی در مقاومت ویژه الکتریکی در نزدیکی دمای گذار آغازی می‌شود؛ اما در دماهای پایین‌تر تأثیر شدیدی بر دنباله منحنی مقاومت ویژه الکتریکی و دمای گذار نهایی ابررسانایی دارد. افزایش شدت میدان مغناطیسی، باعث افزایش وسعت ناحیه گذار و کاهش دمای گذار ابررسانایی نهایی (T_c^{off}) می‌شود. تغییر دماهای گذار ابررسانایی نهایی بر حسب میدان‌های مغناطیسی مختلف در شکل داخلی شکل ۵ دیده می‌شود. این تأثیرپذیری شدید را می‌توان به حرکت گردش‌های مغناطیسی ناشی از فعالیت گرمایی و اتصالات الکتریکی ضعیف در مرز دانه‌ها نسبت داد. بررسی مقاومت ویژه الکتریکی نمونه و مقایسه آن با سایر ابررساناهای سیستم YBCO تشابه رفتاری ترکیب Y257 با سایر ابررساناهای این خانواده را نشان می‌دهد.

که β پهنای پیک در نصف ارتفاع آن، L اندازه متوسط بلورک‌های نمونه، K عدد ثابت معادله شرر برابر با $\lambda/9$ ، λ طول موج تابشی اشعه X ، η کرنش شبکه‌ای و θ زاویه براگ است. این رابطه در شکل ۴ برای هفت پیک اصلی طیف پراش اشعه X نمونه Y257 رسم شده است. مقادیر $\beta \cos \theta$ بر حسب $\sin \theta$ رسم شدند و یک خط راست به این داده‌های تجربی برازش شد. شیب این خط برازش شده کرنش شبکه‌ای (η) و عرض از مبدا آن عبارت است که اندازه متوسط بلورک‌ها را می‌توان از عرض از مبدا این خط به دست آورد. در شکل ۴ دیده می‌شود که شیب خط برازش شده یا کرنش شبکه‌ای این ترکیب برابر با 0.0019 و عرض از مبدا آن برابر 0.0056 است. با استفاده از اندازه عرض از مبدا، اندازه بلورک‌ها برابر $24/7nm$ به دست آمد. اندازه بلورک‌ها که از روش ویلیامسون-هال به دست آمد از اندازه به دست آمده از روش شرر بزرگ‌تر است.

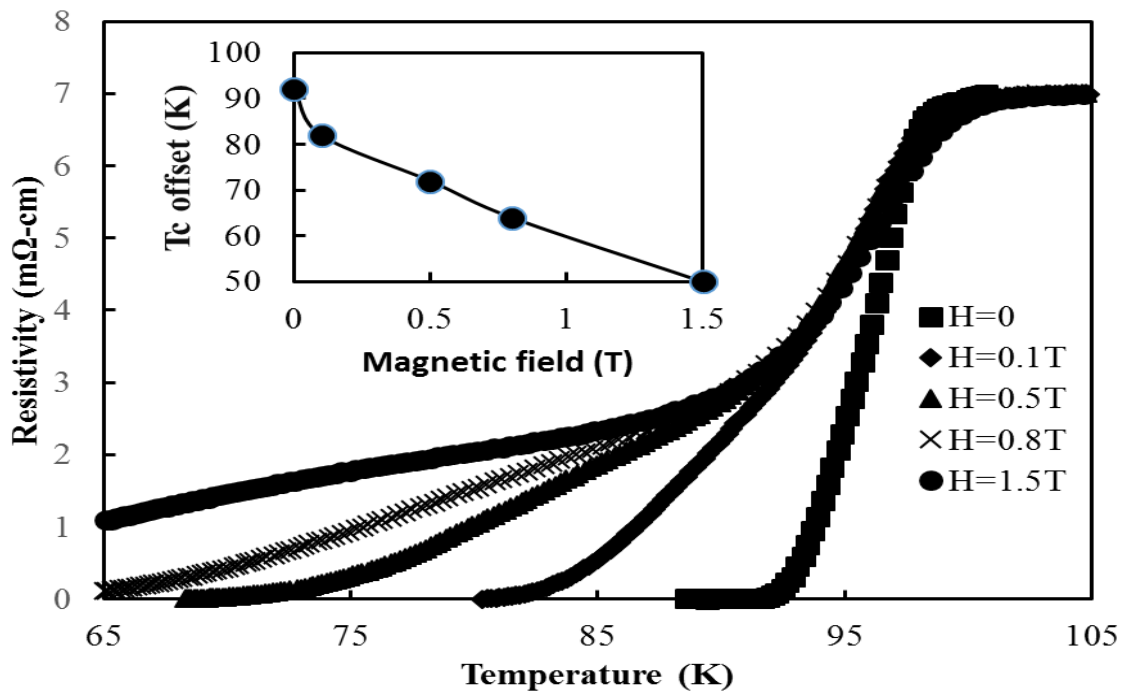
تراورد الکتریکی^۱ در حضور میدان مغناطیسی خارجی

مقاومت ویژه الکتریکی ترکیب Y257 بر حسب دما در حضور میدان‌های مغناطیسی مختلف در شکل ۵ نشان داده شده است. مقاومت ویژه الکتریکی در بازه دمایی دمای اتاق تا دمای گذار ابررسانایی به صورت یکنواخت کاهش یافت و اعمال میدان مغناطیسی تأثیری بر رفتار مقاومت الکتریکی نمونه‌ها در این بازه دمایی ندارد؛ زیرا در این بازه دمایی رفتار ماده فلز معمولی است و اعمال میدان مغناطیسی تأثیر خاصی بر الکترون‌های رسانش ندارد؛ اما در فاز ابررسانایی الکترون‌ها با یکدیگر جفت می‌شوند و جفت‌های کوپر را تشکیل می‌دهند. میدان مغناطیسی تأثیر زیادی بر روی رسانش جفت‌های کوپر دارند و در نتیجه در فاز ابررسانایی تغییرات بزرگی در رفتار ماده در حضور میدان مغناطیسی دیده می‌شود. رفتار الکتریکی نمونه از دمای اتاق تا دمای گذار را رفتار فلز گونه می‌گویند. مقاومت ویژه الکتریکی نمونه‌ها در دمای گذار ابررسانایی آغازی $T_c^{on}=98K$ ناگهان کاهش یافت. در این دما رفتار الکتریکی ترکیب از فلز گونه به شبه فلز تغییر کرد. در حالتی که میدان مغناطیسی خارجی وجود ندارد ($H=0$)، در دماهای کم‌تر از دمای گذار ابررسانایی آغازی، مقاومت ویژه

¹ -Electric transport



شکل ۴- منحنی رابطه ویلیامسون-هال برای داده‌های تجربی ترکیب Y257. نقطه‌های سیاه داده‌های تجربی به دست آمده از طیف پراش اشعه X را نشان می‌دهد و خط چین برازش خطی برای داده‌های تجربی است.



شکل ۵- مقاومت ویژه الکتریکی بر حسب دما برای ترکیب Y257 در حضور میدان‌های مغناطیسی خارجی، H . از دمای 65K تا 105K. شکل داخل: دمای گذار ابررسانایی نهایی، T_c^{off} دمایی که مقاومت ویژه الکتریکی نمونه صفر می‌شود، بر حسب میدان‌های مغناطیسی خارجی، H .

برازش داده‌های تجربی با مدل‌های مغناطیسی

پهن شدگی مقاومت ویژه الکتریکی در همسایگی دمای گذار ابررسانایی نهایی، به خوبی توسط مدل خزش شار فعال شده گرمایی^۱ به صورت وابستگی آرنیوس^۲ $\rho = \rho_0 \exp(-U(T,H)/kT)$ می‌شود [۲۸ و ۲۹]. در حالی که تعدادی از پژوهشگران انرژی میخکوبی را برای ابررساناهای دمای بالا به صورت مستقل از دما، $U(H)$ ، گزارش داده‌اند [۱۸-۲۰]، تحلیل داده‌های مقاومت ویژه الکتریکی در حضور میدان‌های مغناطیسی مختلف نشان می‌دهد که انرژی میخکوبی، $U(T,H)$ ، به هر دو پارامتر سیستم شامل میدان مغناطیسی اعمال شده و دما وابسته است. انرژی فعال سازی بر اساس رابطه $U_0(H)(1-T/T_c)^\alpha$ با دما تغییر می‌کند که توان α می‌تواند مقادیر ۱، ۱/۵، ۲ و ۳ را در مواد ابررسانای دمای بالا داشته باشد [۲۱-۳۲]. بهترین برازش داده‌های مقاومت ویژه در بازه دمایی ۹۲K تا ۶۰K با پارامتر $\alpha=2$ توافق دارد که توسط گراس^۳ و همکاران نیز گزارش شده است [۳۳].

در شکل ۶ دیده می‌شود که داده‌های انرژی فعال سازی که برای مقادیر مختلف α به دست آمده به صورت معکوس با میدان مغناطیسی تغییر می‌کنند. وابستگی انرژی میخکوبی به میدان مغناطیسی در ترکیب Y_{257} با مدل ارایه شده توسط یشورون^۴ و مالوزموف^۵ [۳۴] توافق دارد. رفتار مقاومت مغناطیسی ترکیب Y_{257} را می‌توان در بازه نسبتاً وسیعی از دما با مدل خزش شار فعال سازی شده گرمایی توصیف کرد که وابستگی انرژی میخکوبی به دما و میدان مغناطیسی در این برازش به صورت $(1-T/T_c)^2 H^{-1}$ است [۱۰]. بر اساس شکل ۶، مدل خزش شار فعال سازی شده گرمایی رفتار مقاومت مغناطیسی چند بلورهای ترکیب Y_{257} را در همسایگی دمای گذار ابررسانایی توصیف می‌کند. در حالی که در تک بلورهای رشد یافته $YBa_2Cu_3O_{7-\delta}$ بر روی زیر لایه [۱۰]، مدل خزش شار فعال

سازی شده گرمایی در گستره کوچک‌تر ۶K تا ۱۷K معتبر است که در فاصله دورتری از دمای گذار $T_c=92K$ برای ترکیب $YBa_2Cu_3O_{7-\delta}$ قرار دارد. این اختلاف در گستره بازه دمایی در این دو ترکیب به دلیل ساختار بلوری رشد یافته نمونه‌ها برای ترکیب $YBa_2Cu_3O_{7-\delta}$ و ساختار چند بلوری نمونه‌های Y_{257} و همچنین حضور فازهای ناخالصی مانند $BaCuO_2$ [۱۷] است. انرژی میخکوبی موثر $U_0(H)$ که متناسب با عمق چاه انرژی فعال سازی است، اهمیت بنیادی در دینامیک شار حالت مخلوط در ابررساناهای دمای بالا دارد. مقادیر انرژی میخکوبی موثر که از برازش داده‌های مقاومت مغناطیسی ترکیب Y_{257} با مدل خزش شار فعال سازی شده گرمایی به دست آمده در جدول ۲ ارائه شده‌اند. در گستره دمایی ۶۰K تا ۹۲K که مدل خزش شار فعال سازی شده گرمایی توصیف مناسبی از پهن شدگی داده‌های مقاومت ویژه ارایه می‌کند، انرژی‌های میخکوبی در گستره ۰/۰۱۲۵eV تا ۰/۸۱۵۱eV قرار دارند. گستره انرژی‌های میخکوبی با نتایج ارایه شده توسط گمچی^۶ و همکاران [۲۲] توافق دارند. در همسایگی دمای گذار T_c ، نسبت انرژی گرمایی به انرژی میخکوبی $k_B T/U$ از مرتبه ۱- است که تقریباً دو مرتبه بزرگی از نسبت مشابه در ترکیب‌های ابررسانای متعارف دمای پایین بزرگ‌تر است [۳۴]. نسبت بزرگ $k_B T/U$ در ترکیب Y_{257} نشان می‌دهد که دینامیک شارهای مغناطیسی در ترکیب Y_{257} مطابق با رفتار خزش شار است که توسط یشورون و مالوزموف مشاهده شده است [۳۴].

1 -Thermally activated flux creep model

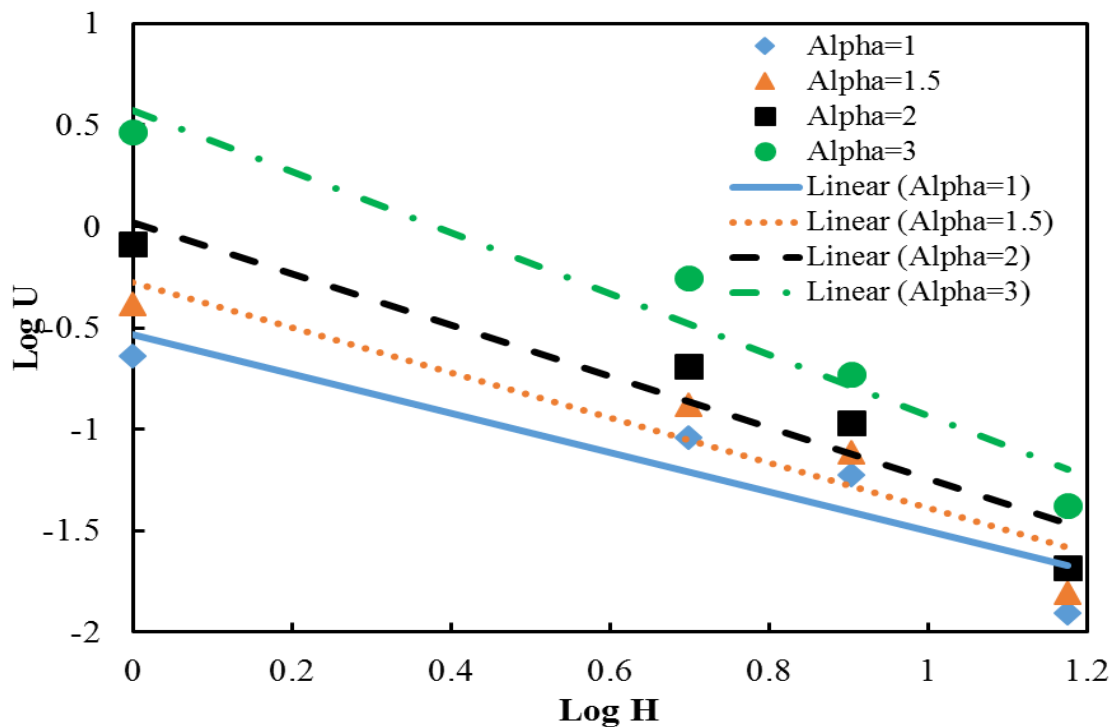
2 -Arrhenius

3 -Gross

4 -Yeshurun

5 -Malozemoff

6 -Gamchi



شکل ۶- وابستگی لگاریتم انرژی میخکوبی بر حسب لگاریتم میدان مغناطیسی به ازای مقادیر مختلف α

یانگ و همکاران [۳۵] نشان دادند که داده‌های انرژی میخکوبی در ترکیب‌های YBCO که با آرایش شده‌اند از قانون توان تبعیت می‌کنند و با مدل یشورون-مالوزموف [۳۴] توافق دارند. آن‌ها پارامتر پاشندگی را به ترتیب برای میخکوبی صفحه‌ای ذاتی و میخکوبی نقطه‌ای غیر ذاتی به صورت $\beta=0/5$ و $\beta=1$ به دست آوردند. یون‌های آرایش شده Er در داخل ترکیب به عنوان دلیل میخکوبی نقطه‌ای غیر ذاتی معرفی شدند [۳۵]. مقادیر گزارش شده برای پارامتر پاشندگی β در گستره بزرگی قرار دارند. در نمونه‌های چند بلور Y123 در حضور میدان مغناطیسی تا $0/1T$ [۲۲]، مقدار پارامتر پاشندگی برابر $0/5$ گزارش شده است و در چند بلورهای GdPr123 آرایش شده با Ca در حضور میدان مغناطیسی تا $1/7T$ ، مقدار پارامتر پاشندگی برابر $0/3$ گزارش شده است [۳۶]. در ترکیب ابررساناهای دمایی بالا چند بلوری، ناخالصی‌ها و مرزهای دانه‌ها در چند بلورها در ایجاد میخکوبی شار نقش دارند. تحلیل XRD نمونه‌های چند بلور Y257 نشان می‌دهند که ناخالصی‌های موجود در سیستم می‌توانند منجر به ایجاد میخکوبی شوند.

انرژی میخکوبی کم که منجر به نسبت بزرگ $k_B T/U$ می‌شود، می‌تواند ناشی از ناهمسانگردی و شدت زوج شدگی^۱ بین لایه‌های ابررسانایی CuO_2 در ترکیب‌های YBCO باشد [۱۲]. انرژی‌های فعال سازی حرکت شار از روی سدهای انرژی میخکوبی به صورت سیستماتیک با افزایش ناهمسانگردی کاهش می‌یابند [۱۲]. در ترکیب Y257، انرژی میخکوبی رفتار توانی به صورت $U_0(H)=AH-\beta$ را نشان می‌دهد که با مدل یشورون-مالوزموف توافق دارد [۳۴]. در شکل ۶، بهترین برازش برای حالت $\alpha=2$ رخ می‌دهد و داده‌های انرژی میخکوبی $\text{Log}(U)$ بر حسب $\text{Log}(H)$ به صورت خطی نشان می‌دهند که ضریب همبستگی خطی این حالت $R^2=0/94$ است. با برازش داده‌های تجربی با مدل قانون توان بین U و H ، پارامترهای این مدل به صورت $\beta=1/2$ و $A=1/04eV/T^{1/2}$ به دست می‌آیند. مقدار به دست آمده از برازش برای پارامتر پاشندگی^۲ β نزدیک به مقدار واحد است که در مدل یشورون-مالوزموف در نظر گرفته شده است [۳۴].

¹ -Coupling

² -Dispersion parameter

جدول ۲- مقادیر انرژی میخکوبی $U_0(H)$ که از برازش داده‌های تجربی مقاومت ویژه الکتریکی ترکیب Y257 در حضور میدان‌های میدان‌های مغناطیسی اعمال شده با مدل خزش شار فعال شده گرمایی برای مقادیر مختلف α به دست آمده است.

	$\alpha=1$	$\alpha=1/5$	$\alpha=2$	$\alpha=3$
H(T)	$U_0(H)(eV)$			
۰/۱	0/2289	0/4129	0/8151	۲/۹۱۸۶
۰/۵	0/0910	0/1314	0/2050	۰/۵۵۶۴
۰/۸	0/0592	0/0773	0/1076	۰/۱۸۶۱
۱/۵	0/0125	0/0156	0/0207	۰/۰۴۱۹

نتیجه‌گیری

ترکیب Y257 برابر 98 K است که 5 K بالاتر از دمای گذار Y123 و 4 K کمتر از دمای گذار ابررسانایی Y358 است و دمای گذار ابررسانایی نهایی آن برابر 92 K است. در بازه گذار فاز از حالت فلزی به حالت ابررسانایی، بین دمای گذار ابررسانایی آغازی و دمای گذار ابررسانایی نهایی، مدل خزش شار فعال شده گرمایی با پارامتر $\alpha=2$ توصیف دقیقی از پهن شدگی داده‌های مقاومت ویژه الکتریکی ارائه می‌کند و انرژی میخکوبی را در گستره 0/0125eV تا 0/8151eV به دست می‌دهد. در بازه دمایی گذار، انرژی میخکوبی به صورت معکوس با شدت میدان مغناطیسی تغییر می‌کند که در توافق با مدل یشورون-مالوزموف است.

ترکیب ابررسانایی جدید $Y_2Ba_5Cu_7O_x$ با روش حالت جامد استاندارد در حضور شار اکسیژن ساخته شد. با استفاده از روش پالایش ریتولد پارامترهای ساختار بلوری و گروه فضایی $Pmmm$ برای این ترکیب مشخص شد. ترکیب Y257 از بلوک‌های متوالی Y123 و Y124 به همراه لایه اضافی BaO تشکیل شده است. لایه BaO، باعث افزایش تعداد حامل‌های حفره در صفحه‌های ابررسانش و در نتیجه افزایش دمای گذار ابررسانایی می‌شود. اندازه بلورک‌ها با استفاده از معادله شرر برابر با 20/7nm و با استفاده از روش ویلیامسون-هال برابر 24/7nm به دست آمد. دمای گذار ابررسانایی آغازی

References:

- [1] J.G. Bednorz, K.A. Müller, "Possible high T_c superconductivity in the BaLaCuO system," *Zeitschrift für Physik B Condensed Matter*, Vol. 64, pp. 189–193, 1986.
- [2] A.L. Patrick, N. Nagaosa, X.G. Wen, "Doping a Mott insulator: Physics of high-temperature superconductivity," *Review of Modern Physics*, Vol. 78, pp. 17-78, 2006.
- [3] M.K. Wu, J.R. Ashburn, C.J. Torng, P.H. Hor, R.L. Meng, L. Gao, Z.J. Huang, Y.Q. Wang, C.W. Chu, "Superconductivity at 93 K in a new mixed-phase Y-Ba-Cu-O compound system at ambient pressure," *Physical Review Letters*, Vol. 58, pp. 908-910, 1987.
- [4] R. Hackl, "Superconductivity in copper-oxygen compounds," *Crystalline Materials*, Vol. 226, pp. 323-342, 2011.
- [5] C. Park, R.L. Snyder, "Structures of High Temperature Cuprate Superconductors," *Journal of the American Ceramic Society*, Vol. 78, pp. 3171-3194, 1995.

- [6] J.Y. Genoud, T. Graf, G. Triscone, A. Junod, J. Muller, "Variation of the superconducting and structural properties of $Y_2Ba_4Cu_7O_z$ with oxygen content ($14.1 < z < 15.3$, $30K \leq T_c \leq 95K$)," *Physica C: Superconductivity and its Applications*, Vol. 192, pp. 137-146, 1992.
- [7] J. Eck, US61/130,637, U.S. Provisional Patent, 2008.
- [8] A. Aliabadi, Y. Akhavan Farshchi, M. Akhavan, "A new Y-based HTSC with T_c above 100K," *Physica C: Superconductivity and its Applications*, Vol. 469, pp. 2012-2014, 2009.
- [9] V. Rouco, E. Bartolomé, B. Maiorov, A. Palau, L. Civale, X. Obradors, T. Puig, "Vortex creep in TFA YBCO nanocomposite films," *Superconductor Science and Technology*, Vol. 27, pp. 115008-115015, 2014.
- [10] S.K.H. Lam, "Observation of thermally activated flux creep in microbridges," *Superconductor Science and Technology*, Vol. 11, pp. 1177-1180, 1998.
- [11] P.W. Anderson, "Theory of Flux Creep in Hard Superconductors," *Physical Review Letters*, Vol. 9, pp. 309-311, 1962.
- [12] T.T.M. Palstra, B. Batlogg, L.F. Schneemeyer, J.V. Waszczak, "Role of anisotropy in the dissipative behavior of high temperature superconductors," *Physical Review B*, Vol. 43, pp. 3756-3759, 1991.
- [13] V. Ambegaokar and B.I. Halperin, "Voltage Due to Thermal Noise in the dc Josephson Effect," *Phys. Lett.*, Vol. 22, pp. 1364-1366, 1969.
- [14] M. Mazaheri, S. Jamasb, "Electrical transport in the superconducting and normal states in $Y_2Ba_5Cu_7O_x$ high temperature superconductor," *Solid State Communications*, Vol. 234, pp. 21-25, 2016.
- [15] T. Kruaehong, "Preparation and Characterization of the New Y257 Superconductors," *Advanced Materials Research*, Vol 770, pp. 22-25, 2013
- [16] T. Kruaehong, "Electrical properties and crystal structure of Y123, Y358 and Y257/Y211 composite bulk superconductors," *International Journal of Physical Sciences*, Vol. 9, pp. 360-367, 2014.
- [17] M. Mazaheri, S. Ghasemi, A. Heidarpour, "An Approach to Synthesis a New Superconductor Belonging to the YBCO Family: $Y_2Ba_5Cu_7O_x$," *Journal of Superconductivity and Novel Magnetism*, Vol. 28, pp. 2637-2640, 2015.
- [18] T. Kruaehong, S. Sujinnapram, T. Nilkamjon, S. Ratreng and P. Udomsamuthirun, "Fabrication of the new Y257 bulk superconductor by melt process," *Key Engineering Materials*, Vol. 675-676, pp 307-311, 2016.
- [19] T. Kruaehong, S. Sujinnapram, P. Udomsamuthirun, T. Nilkamjon and S. Ratreng, "The Effect of Ti doped on the Structure of Y134 and Y257 Superconductors," *Current Applied Science and Technology*, Vol. 18, pp. 126-132, 2018.
- [20] M.O. Eatough, D.S. Ginley, B. Morosin, and E.L. Venturini, "Orthorhombic tetragonal phase transition in high temperature superconductor $YBa_2Cu_3O_7$," *Applied Physics Letters*, Vol. 51, pp. 367-369, 1987.
- [۲۱] ه. احمدی مقدم، م.ح. پایدار، "بررسی تأثیر اندازه ذرات پودر بر ریزساختار، خواص مکانیکی و هدایت الکتریکی سرامیک های سدیم بتا آلومینا" *مجله مواد نوین*، جلد ۹، شماره ۴، ش.ص. ۱۰۷-۱۱۶، تابستان ۱۳۹۸.
- [22] H.S. Gamchi, G.J. Russel, K. N. R. Tailor, "Resistive transition for $YBa_2Cu_3O_{7-\delta}$ - Y_2BaCuO_5 composites:

- Influence of a magnetic field,” *Physical Review B*, Vol. 50, pp. 12950-12958, 1994.
- [23] P. Scherrer, “Bestimmung der Größe und der inneren Struktur von Kolloidteilchen mittels Röntgenstrahlen,” *Göttinger Nachrichten Gesell.*, Vol. 2, pp. 98, 1918.
- [۲۴] ا. جعفری، “بررسی دو پرایمر نانو ساختار نیکل-فسفر و فسفات-روی بر مقاومت به خوردگی فولاد کم کربن رنگ شده”، *مجله مواد نوین*، جلد ۹، شماره ۴، ش. ص. ۳۳-۵۰، تابستان ۱۳۹۸.
- [۲۵] ص.ع. حسن زاده، ت. اصفهانی، “تاثیر زمان آسیاکاری مکانیکی بر سنتز نانوذرات هیدروکسی آپاتیت به روش مکانوشیمیایی”، *مجله مواد نوین*، جلد ۹، شماره ۳، ش. ص. ۸۹-۱۰۰، بهار ۱۳۹۸.
- [۲۶] ف. پیامی، ه. توکلی، “ساخت، مشخصه‌یابی و بررسی فرآیند حذف رنگ متیلن بلو توسط نانوذرات اکسید پروسکایت $La_0.9Sr_0.1FeO_3$ ”، *مجله مواد نوین*، جلد ۹، شماره ۳، ش. ص. ۱۶۸-۱۴۵، بهار ۱۳۹۸.
- [27] C.P. Poole, H.A. Farach, R.J. Creswick, R. Prozorov, “Superconductivity”, 2nd edition, Academic Press, 2007.
- [28] T.T.M. Palstra, B. Batlogg, L.F. Schneemeyer, J.V. Waszczak, “Thermally Activated Dissipation in $Bi_2.2Sr_2Ca_0.8Cu_2O_{8+\delta}$ ”, *Physical Review Letters*, Vol. 61 pp. 1662-1665, 1988.
- [29] T.T.M. Palstra, B. Batlogg, R.B. vanDover, L.F. Schneemeyer, J.V. Waszczak, “Critical currents and thermally activated flux motion in high-temperature superconductors,” *Applied Physics Letters*, Vol. 54, pp. 763-765, 1989.
- [30] A.P. Malozemoff, T.K. Worthington, E. Zeldov, N.C. Yeh, M.W. Mc Elfresh, F. Holtzberg, “Strong Correlation and Superconductivity”, Springer Series in Solid State Science, Springer-Verlag, 1989.
- [31] T.T.M. Palstra, B. Batlogg, R.B. van Dover, L.F. Schneemeyer, J.V. Waszczak, “Dissipative flux motion in high-temperature superconductors,” *Physical Review B*, Vol. 41, pp. 6621-6632, 1990.
- [32] M. Tinkham, “Resistive Transition of High Temperature Superconductors,” *Physical Review Letters*, Vol. 61, pp. 1658-1661, 1988.
- [33] R. Gross, P. Chaudhari, D. Dimos, A. Gupta, G. Koren, “Thermally activated phase slippage in high- T_c grain-boundary Josephson junctions,” *Physical Review Letters*, Vol. 64, pp. 228-231, 1990.
- [34] Y. Yeshurun, A.P. Malozemoff, “Giant Flux Creep and Irreversibility in an Y-Ba-Cu-O Crystal: An Alternative to the Superconducting-Glass Model,” *Physical Review Letters*, Vol. 60, pp. 2202-2205, 1988.
- [35] T. Yang, Z.H. Wang, H. Zhang, J. Fang, Y. Nie, L. Qiu, S.Y. Ding, “Effective activation energy and phase diagram in the Er doping MTG- $YBa_2Cu_3O_{7-\delta}$ crystal,” *Physica C: Superconductivity and its Applications*, Vol. 384, pp. 130-136, 2003.
- [36] H. Shakeripour, M. Akhavan, “Thermally activated phase-slip in high temperature cuprates,” *Superconductor Science and Technology*, Vol. 14, pp. 234-239, 2001.