

## تأثیر آرایش $Pb$ و $Sb$ بر چگالی جریان بحرانی و ریزساختار ابررسانای فاز $Bi-2223$

سیدابراهیم موسوی قهفرخی\*، مرتضی زرگروشتری؛  
دانشگاه شهیدچمران اهواز، دانشکده علوم، گروه فیزیک

دریافت ۹۳/۱۲/۳ پذیرش ۹۵/۲/۱

### چکیده

در این مقاله تأثیر آرایش سرب ( $Pb$ ) و آنتیموان ( $Sb$ ) بر روی چگالی جریان بحرانی، انرژی فعال‌سازی و ریزساختار ابررسانای  $Bi_{1.6}Pb_xSb_ySr_2Ca_2Cu_3O_y$  گزارش شده است. ابررسانای  $Bi_{1.6}Pb_xSb_ySr_2Ca_2Cu_3O_y$  به روش واکنش حالت جامد تهیه شد. چگالی جریان بحرانی و انرژی فعال‌سازی به روش چهار میله‌ای اندازه‌گیری شد. ریزساختار و ریخت‌شناسی نمونه‌ها توسط  $EDX$  و  $SEM$  بررسی شده است. نتایج حاصل از الگوهای پراش نشان می‌دهند که درصد فاز  $Bi-2223$  در نمونه‌های ابررسانای  $Bi_{1.6}Pb_xSb_ySr_2Ca_2Cu_3O_y$  با افزایش  $Sb$  تا  $x = 0.05$  و  $Pb$  تا  $x = 0.35$  افزایش می‌یابد. در مجموع رابطه بین جریان و ولتاژ در ناحیه مخلوط برای تمام نمونه‌ها از رابطه  $V \propto \alpha I^{\beta}$  پیروی می‌کند.

واژه‌گان کلیدی: ابررسانای فاز  $Bi-2223$ ، آرایش  $Pb$  و  $Sb$ ، چگالی جریان بحرانی، ریزساختار، انرژی فعال‌سازی

### مقدمه

ابررسانای پایه  $Bi$  با فرمول عمومی  $Bi_2Sr_2Ca_{n-1}Cu_nO_{2n+4+\delta}$  دارای سه فاز اصلی به ازاء  $n=1$ ،  $(Bi-2201)$ ،  $(Bi_2Sr_2CuO_{6+\delta})$  با  $T_c \cong 20 K$ ،  $n=2$ ،  $(Bi-2212)$ ،  $(Bi_2Sr_2CaCu_2O_{8+\delta})$ ،  $T_c \cong 80 K$  و  $n=3$ ،  $(Bi-2223)$ ،  $(Bi_2Sr_2Ca_2Cu_3O_{10+\delta})$  با  $T_c \cong 110 K$  است. از بین این سه فاز، فاز  $Bi-2223$  به خاطر دمای گذار بحرانی ( $T_c$ ) بالا بیش‌تر مورد توجه است. شبکه بلوری هر سه فاز ابررسانای پایه بیسموت به شکل اورتورومبیک است. آن چه این فازها را از هم متمایز می‌کند، اندازه پارامتر  $c$  در شبکه اورتورومبیک است که به ترتیب افزایش  $T_c$  دارای طول‌های  $2460$ ،  $3070$  و  $3810$  آنگسترم است. افزایش پارامتر  $c$  مربوط به تفاوت تعداد لایه‌های  $Ca$  و  $CuO_2$  است که با افزایش دمای گذار همراه است. ساخت اکسیدهای پایه بیسموت به خصوص فاز  $Bi-2223$  به صورت تک فاز بسیار مشکل است و معمولاً چندین فاز، هم‌زمان تشکیل می‌شوند [۱-۳]. روش‌هایی برای افزایش مقدار فاز  $Bi-2223$  با

توجه به کاربردهای وسیع و دمای گذار بالای آن نسبت به دیگر فازها صورت گرفته است. از جمله این روش‌ها، عملیات حرارتی زمان طولانی [۴]، دمای کلوخه‌سازی [۵]، نوع و مقدار آلیش [۶] گزارش شده است. در این مقاله، با آلیش اکسیدآنتیموان و سرب در ابررسانای  $\text{Bi}_{1.6}\text{Pb}_x\text{Sb}_y\text{Sr}_2\text{Ca}_2\text{Cu}_3\text{O}_y$  نمونه‌هایی از آن ساخته شد. با روش استاندارد چهارمیله‌ای، چگالی جریان بحرانی، انرژی فعال‌سازی و هم‌چنین ریزساختار به‌وسیله دستگاه XRD با دیفراکتومتر PW1840 ساخت شرکت فیلیپس با آند مسی و هم‌چنین تصاویر SEM و EDX توسط میکروسکوپ الکترونی روبشی مدل 1455VP ساخت شرکت LEO بررسی شد.

## شرح آزمایش و اندازه‌گیری‌ها

برای ساخت نمونه‌های ابررسانا، مقادیر معینی از پودرهای اولیه  $\text{SrCO}_3$ ،  $\text{CaCO}_3$ ،  $\text{CuO}$ ،  $\text{PbO}$ ،  $\text{Bi}_2\text{O}_3$  و  $\text{Sb}_2\text{O}_3$  با درجه خلوص ۹۹٫۹۹٪ وزن شدند. پس از آسیاب نمودن پودرهای اولیه به مدت یک ساعت، سیزده نمونه از ابررسانای  $\text{Bi}_{1.6}\text{Pb}_x\text{Sb}_y\text{Sr}_2\text{Ca}_2\text{Cu}_3\text{O}_y$  آلیش شده با اکسیدآنتیموان و سرب  $(y, x) = (0.10, 0.40)$ ،  $(0.20, 0.38)$ ،  $(0.20, 0.36)$ ،  $(0.25, 0.35)$ ،  $(0.30, 0.34)$ ،  $(0.35, 0.33)$ ،  $(0.40, 0.32)$ ،  $(0.45, 0.31)$ ،  $(0.50, 0.30)$ ،  $(0.55, 0.29)$ ،  $(0.60, 0.28)$ ،  $(0.65, 0.27)$ ،  $(0.70, 0.26)$ ،  $(0.75, 0.25)$ ،  $(0.80, 0.24)$ ،  $(0.85, 0.23)$ ،  $(0.90, 0.22)$ ،  $(0.95, 0.21)$  و  $(1.00, 0.20)$  تهیه شد. پودرها درون بوتله‌هایی از جنس آلومینا ریخته و آن‌ها درون کوره الکتریکی قرار گرفتند. به منظور جلوگیری از تشکیل فازهای ناخواسته در طول فرآیند با روش واکنش حالت جامد، عمل تکلیس که شامل یک گرمادهی در دمای  $820^\circ\text{C}$  است، به مدت ۱۵ ساعت انجام گرفت. محصول تکلیس شده به مدت ۳ ساعت آسیاب شد و تحت فشار ۵۴۰ مگاپاسکال، نمونه‌های میله‌ای با طول ۲ cm و سطح مقطع یکسان حدود  $0.12\text{cm}^2$  تهیه و درون کوره قرار گرفتند. مرحله کلوخه‌سازی در دمای  $845^\circ\text{C}$  با زمان‌های پخت ۱۵۰، ۲۱۰ و ۲۷۰ ساعت انجام گرفت. برای اندازه‌گیری انرژی فعال‌سازی و چگالی جریان بحرانی ابتدا به وسیله منبع تغذیه، جریان مستقیم از دو اتصال انتهایی به نمونه اعمال شده و ولتاژ از دو اتصال وسطی اندازه‌گیری شد. با تغییر جریان، منحنی‌های V-I برای هر کدام از نمونه‌ها رسم و با داشتن سطح مقطع آن‌ها، چگالی جریان بحرانی برای هر نمونه به دست آمد [۷]. از نمونه‌های ساخته شده، الگوهای پراش و تصاویر SEM تهیه شدند.

## نتایج و بحث

شکل ۱ الگوهای پراش نمونه‌ها با مقادیر متفاوت اکسید آنتیموان و سرب با زمان پخت ۲۷۰ ساعت را نشان می‌دهد. با مطابقت دادن الگوهای پراش نمونه‌ها با کارت‌های استاندارد به شماره‌های ۰۰۰۴۸۱۰۱۸، ۰۰۰۴۰۰۳۷۸، ۰۰۰۴۶۰۶۳۶، ۰۰۰۲۰۵۸۵، ۰۰۰۴۵۱۰۵۸ و ۰۰۰۵۰۵۶۲ به ترتیب درصد فازهای Bi (2212)، Bi (2223)، Bi (2201)،  $\text{Sb}_2\text{O}_3$ ، Sb و Bi (21.8112) در هر نمونه با رابطه‌های ۱ برآورد شد [۸].

$$\text{Bi} - 2223 (\%) = \frac{\sum I(\text{Bi} - 2223)}{A} \times 100 \quad \text{Sb}_2\text{O}_3 (\%) = \frac{\sum I(\text{Sb}_2\text{O}_3)}{A} \times 100$$

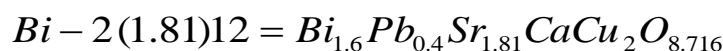
$$Bi - 2212(\%) = \frac{\sum I(Bi - 2212)}{A} \times 100 \quad Sb(\%) = \frac{\sum I(Sb)}{A} \times 100 \quad (1)$$

$$Bi - 2201(\%) = \frac{\sum I(Bi - 2201)}{A} \times 100$$

$$Bi - 2(1.81)12(\%) = \frac{\sum I(Bi - 2(1.81)12)}{A} \times 100$$

با این فرض که

$$A \equiv \sum I(Sb) + \sum I(Bi - 2223) + \sum I(Bi - 2212) + \sum I(Bi - 2201) + \sum I(Sb_2O_3) + \sum I(Bi - 2(1.81)12)$$



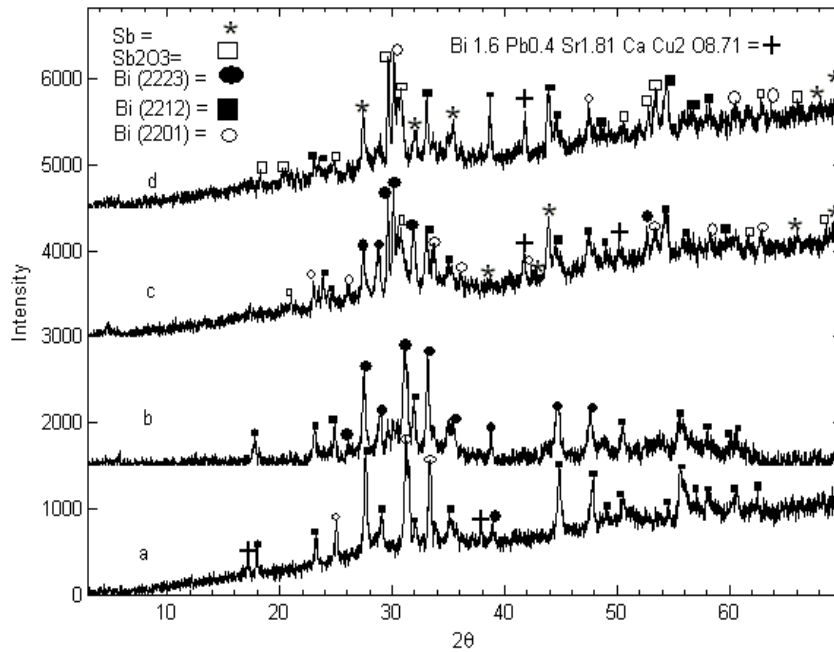
در این جا، I شدت قله‌های فاز موردنظر است. نتایج حاصل از اندازه‌گیری‌های فازهای موجود برای برخی از نمونه‌ها در جدول ۱ نشان داده شده است.

جدول ۱. درصد فازهای نمونه‌ها آلیس داده شده با مقادیر مختلف آنتیموان و سرب.

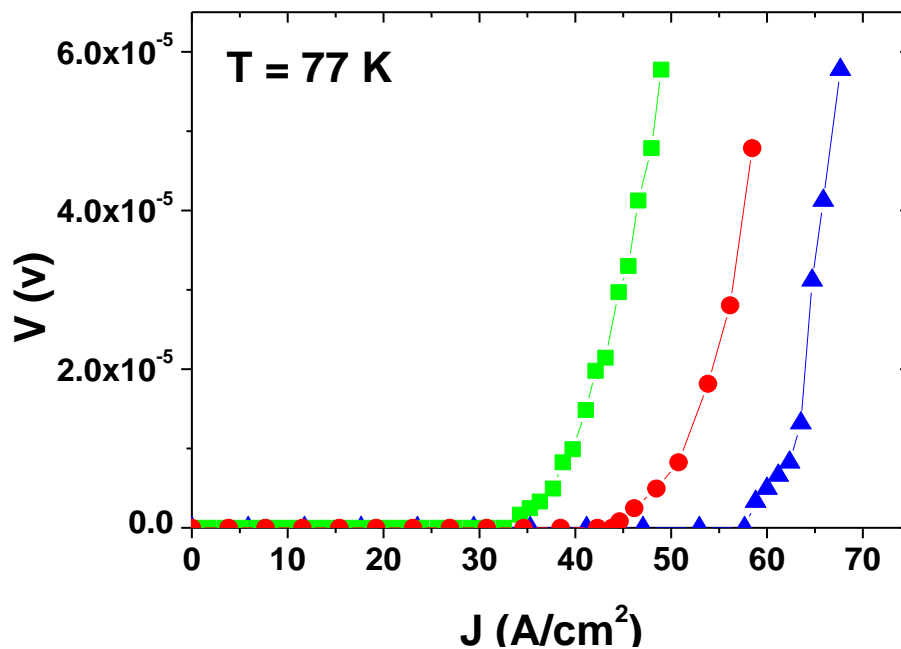
نمونه	a	b	c	c
y	۰٫۰	۰٫۰۵	۰٫۲۰	۰٫۲۵
x	۰٫۴	۰٫۳۵	۰٫۲۰	۰٫۱۵
Bi (2223)(%)	۲٫۲۲	۶۶٫۳۳	۲۸٫۲۴	۰٫۰
Bi (2212)(%)	۷۱٫۹۲	۳۳٫۴۷	۲۵٫۹۱	۲۹٫۵۴
Bi (2201)(%)	۲۲٫۲۷	۰٫۰	۱۶٫۱۳	۱۹٫۲۰
Sb (%)	۰٫۰	۰٫۰	۱۳٫۸۱	۱۹٫۶۸
Sb <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (%)	۰٫۰	۰٫۰	۱۰٫۶۹	۲۸٫۸۴
Bi(21.8112)(%)	۳٫۵۹	۰٫۰	۵٫۲۲	۲٫۷۴

از جدول ۱ به خوبی مشاهده می‌شود که بیش‌ترین درصد فاز Bi-۲۲۲۳ مربوط به نمونه با مقدار آنتیموان  $y=0.05$  و سرب  $x=0.35$  (نمونه b) است. اگر مقدار Sb و Pb به ترتیب بیش از ۰٫۰۵ و ۰٫۳۵ باشد، درصد فاز Bi-۲۲۲۳ از مقدار ۶۶٫۳۳٪ (نمونه b) به ۲۸٫۲۴٪ (نمونه c) می‌رسد. همچنین اگر مقدار آلیس Sb و Pb به ترتیب کم‌تر از ۰٫۰۵ و ۰٫۳۵ باشد درصد فاز Bi- ۲۲۲۳ از مقدار ۶۶٫۳۳٪ (نمونه b) به مقدار ۲٫۲۲٪ (نمونه a) می‌رسد. با

افزایش درصد فاز Bi-۲۲۲۳، فازهای Bi-۲۲۰۱، Bi-۲۲۱۲ و دیگر فازهای ناخواسته کاهش می‌یابد. بنا براین مقدار کم آنتیموان باعث افزایش و پایداری فاز Bi-۲۲۲۳ شده است.

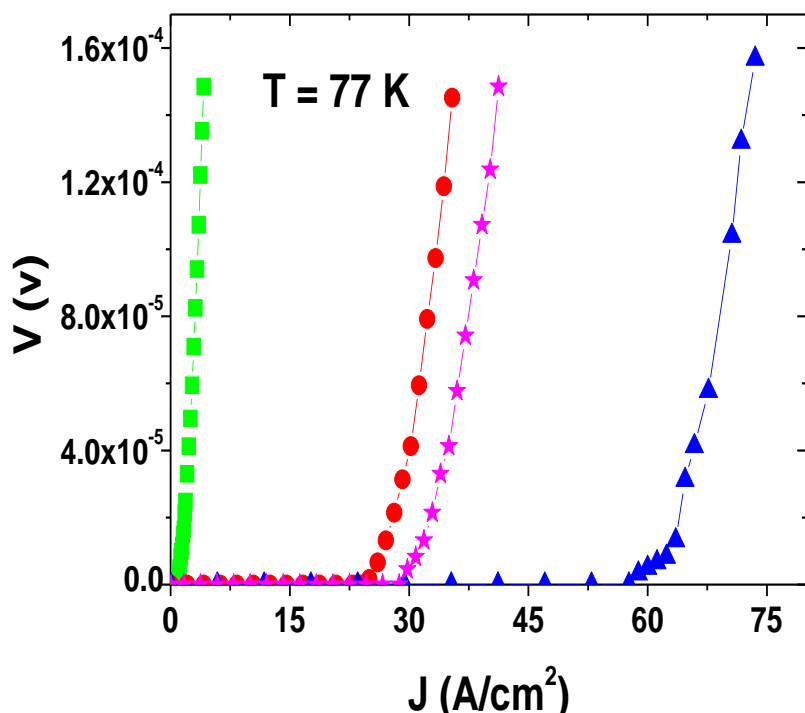


شکل ۱. الگوی پراش برای نمونه‌ها با مقدار Sb و Pb. a (۰٫۴، ۰٫۰) b (۰٫۳۵، ۰٫۰۵) c (۰٫۲۰، ۰٫۲۰) و d (۰٫۱۵، ۰٫۲۵) با زمان پخت ۲۷۰ ساعت



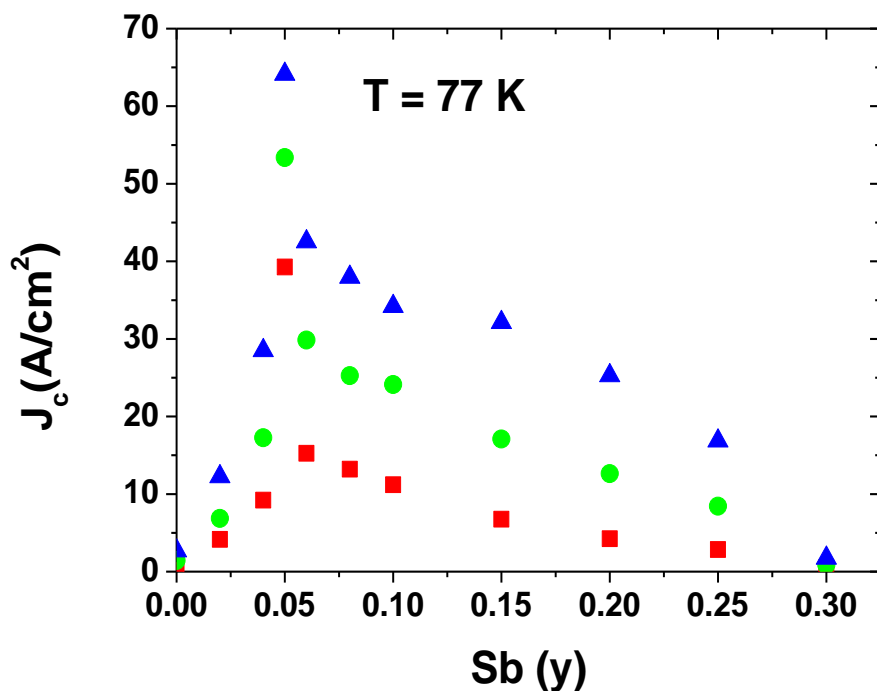
شکل ۲. نمودارهای V-J با زمان‌های پخت ۱۵۰، ۲۱۰ و ۲۷۰ ساعت برای نمونه‌ای با Sb و Pb به مقدار x = ۰٫۳۵ و y = ۰٫۵

متفاوت در شکل ۲ نشان داده شده است. از این منحنی‌ها مشاهده می‌شود که برای یک مقدار ثابت  $Sb$  و  $Pb$  با افزایش زمان پخت مقدار  $J_c$  نمونه‌ها افزایش می‌یابد. نمودارهای  $V$ - $J$  نمونه‌های آرایش داده شده با مقادیر مختلف  $Sb$  و  $Pb$  در زمان پخت ۲۷۰ ساعت در شکل ۳ نشان داده شده است.



شکل ۳. نمودارهای  $V$ - $J$  برای مقادیر متفاوت  $Pb$  و  $Sb$ :  $(\blacktriangle) 0.35$ ،  $(\bullet) 0.36$ ،  $(\blacksquare) 0.4$ ،  $(\star) 0.32$  با زمان پخت ۲۷۰ ساعت و  $0.08$  و  $0.35$ ،  $0.05$ ،  $0.36$ ،  $0.04$ ،  $0.0$ .

این منحنی‌ها نشان می‌دهند که بیش‌ترین مقدار چگالی جریان بحرانی برای نمونه‌ای با ترکیب  $Bi_{1.6}Pb_{0.35}Sb_{0.05}Sr_2Ca_2Cu_3O_y$  است. شکل ۴ مقادیر  $J_c$  برحسب مقدار  $Sb$  و  $Pb$  در زمان‌های پخت مختلف را نشان می‌دهد. از این شکل مشاهده می‌شود که با افزایش مقدار  $Sb$  تا  $y = 0.05$  و  $Pb$  تا  $x = 0.35$  چگالی جریان بحرانی افزایش می‌یابد. به نظر می‌رسد که درصدی از  $Sb$  به جای  $Pb$  در ساختار نمونه قرار می‌گیرد. نتایج کار ما نشان می‌دهد که  $Pb$  و  $Sb$  نقش مهمی در پایداری فاز  $Bi-2223$  دارد و مقدار کمی از  $Sb$  درصد این فاز را افزایش می‌دهد به طوری که مقدار بهینه، نمونه‌ای با آرایش  $Sb$  به مقدار  $y = 0.05$  و  $Pb$  برابر با  $x = 0.35$  است که با کارهای قبلی سازگار است [۹، ۱۰]. وقتی که مقدار  $Sb$  و  $Pb$  بیش‌تر از  $0.05$  و  $0.35$  شود مقدار فازهای ناخواسته از قبیل  $Bi-2201$  و  $Bi-2212$  افزایش می‌یابد. این فازهای ناخواسته نقش پیوندگاه‌های ضعیف را بازی نموده و باعث کاهش چگالی جریان بحرانی می‌شوند.



شکل ۴. چگالی جریان بحرانی نمونه‌های آلیش داده شده بر حسب مقادیر Sb و Pb با زمان‌های پخت ۱۵۰ ساعت (■)، ۲۱۰، (●) و ۲۷۰ (▲) ساعت

بررسی‌ها نشان می‌دهند که اگر فاز Bi-۲۲۰۱ در بین دانه‌های ابررسانا قرار گیرند، از شارش جریان جلوگیری می‌کند. هم‌چنین مشاهده می‌شود که مقدار  $J_c$  با کاهش فازهای ناخواسته در نمونه افزایش می‌یابد [۱۱-۱۳].

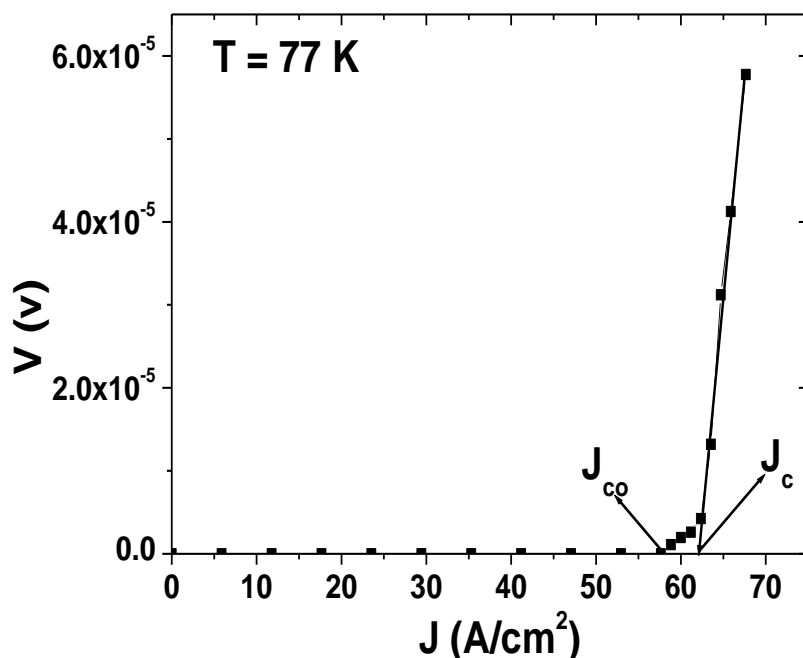
با توجه به تعریف جریان بحرانی داریم [۱۴]:

$$J_c = \frac{F}{\phi_0} \quad (2)$$

که در آن نیروی وارده بر شار فلاکسون ( $\phi_0$ ) است. بررسی منحنی‌های چگالی جریان بحرانی نشان می‌دهد که منحنی‌ها در ناحیه بین  $J_c$  و  $J_{co}$  (شکل ۵) از مدل توانی رابطه ۳ پیروی می‌کنند.

$$V = \alpha I^\beta \quad (3)$$

در رابطه ۳،  $\alpha$  و  $\beta$  ضرایبی هستند که به دما بستگی دارند. از رابطه ۳ مشاهده می‌شود که منحنی  $\log V - \log I$  در ناحیه بین  $J_c$  و  $J_{co}$  خطی است.

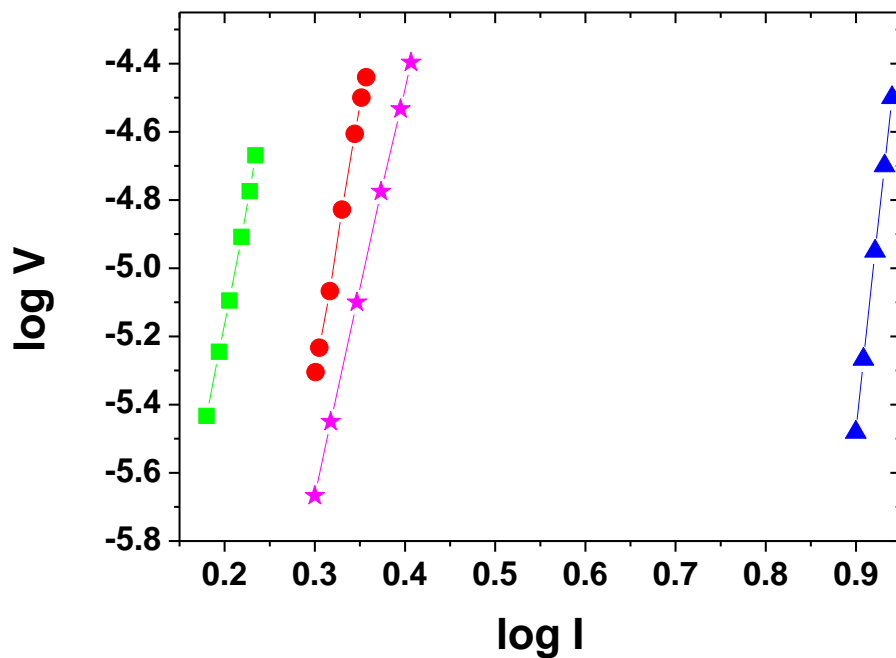


شکل ۵. نمودار  $V-J$  برای نمونه‌ی آلیش داده شده با  $Pb$  و  $Sb$ ،  $x = 0.35$  و  $y = 0.05$  با زمان پخت ۲۷۰ ساعت.

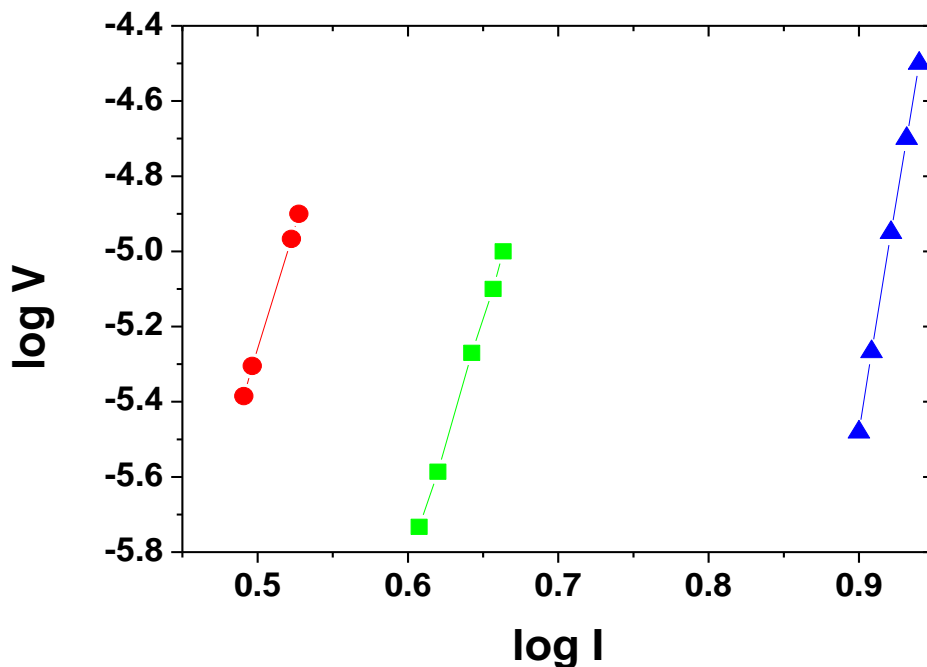
شکل ۶ نمودارهای  $\log V - \log I$  نمونه‌های ساخته شده با مقادیر مختلف  $Pb$  و  $Sb$  در زمان پخت ۲۷۰ ساعت را نشان می‌دهد. همچنین نمودارهای  $\log V - \log I$  نمونه‌های ساخته شده با  $Pb$  و  $Sb$ ،  $x = 0.35$  و  $y = 0.05$  در زمان‌های پخت مختلف در شکل ۷ نشان داده شده است. با محاسبه شیب نمودارهای  $\log V - \log I$  ضریب  $\beta$  که مطابق رابطه ۴ به انرژی فعال‌سازی فلاکسون وابسته است، محاسبه شد [۱۵، ۱۶].

$$\beta = \frac{U}{kT} \quad (4)$$

در رابطه ۴،  $U$  انرژی فعال‌سازی،  $k$  ثابت بولتزمن و  $T$  دمای مطلق است. نتایج حاصل از اندازه‌گیری انرژی فعال‌سازی نمونه‌های آلیش داده شده با آنتیموان و سرب در شکل ۸ نشان داده شده است. با افزایش مقدار آنتیموان و سرب بیش از ۰.۰۵ و ۰.۳۵ درصد حجمی فاز  $Bi-2223$  به سرعت کاهش می‌یابد. با کاهش فاز  $Bi-2223$ ، فازهای ناخواسته از قبیل  $Bi-2212$  و  $Bi-2201$  در نمونه افزایش می‌یابد و این فازها مثل پیوندگاه‌های ضعیف عمل نموده و باعث کاهش انرژی فعال‌سازی می‌شود. بررسی نمونه‌های بدون آلیش و آلیش داده شده با سرب و مقدار کم آنتیموان نشان می‌دهد که آلیش باعث افزایش ناحیه مخلوط شده و در نتیجه چگالی جریان بحرانی و انرژی فعال‌سازی افزایش می‌یابد.

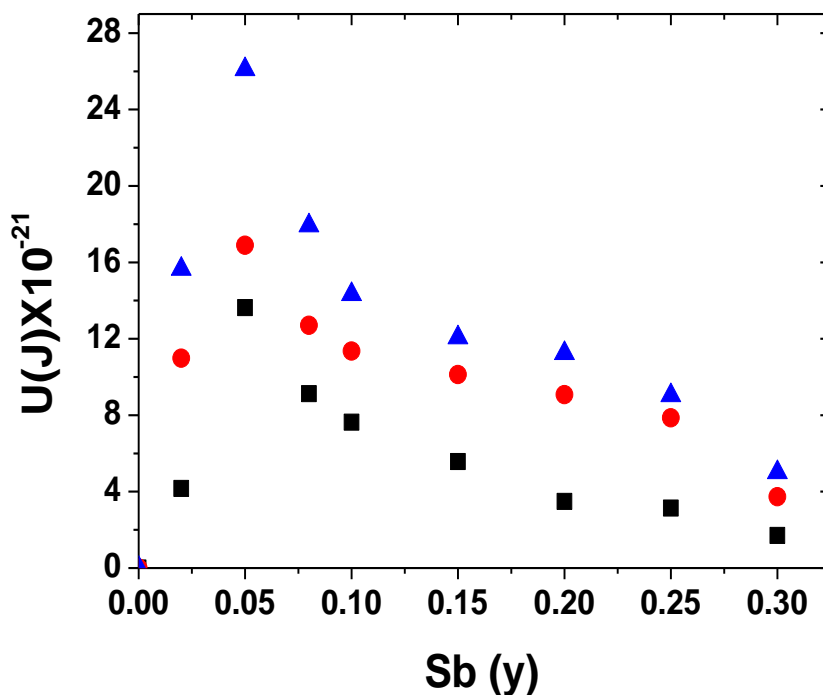


شکل ۶. نمودار  $\log V$ - $\log I$  برای نمونه‌های آلیش داده شده با مقادیر مختلف Pb و Sb:  $\square$  (۰٫۰۲)،  $\bullet$  (۰٫۲۸)،  $\blacktriangle$  (۰٫۰۵)،  $\circ$  (۰٫۳۵)،  $\star$  (۰٫۲۰، ۰٫۳۰) و  $\star$  (۰٫۲۰، ۰٫۳۰) با زمان پخت ۲۷۰ ساعت.



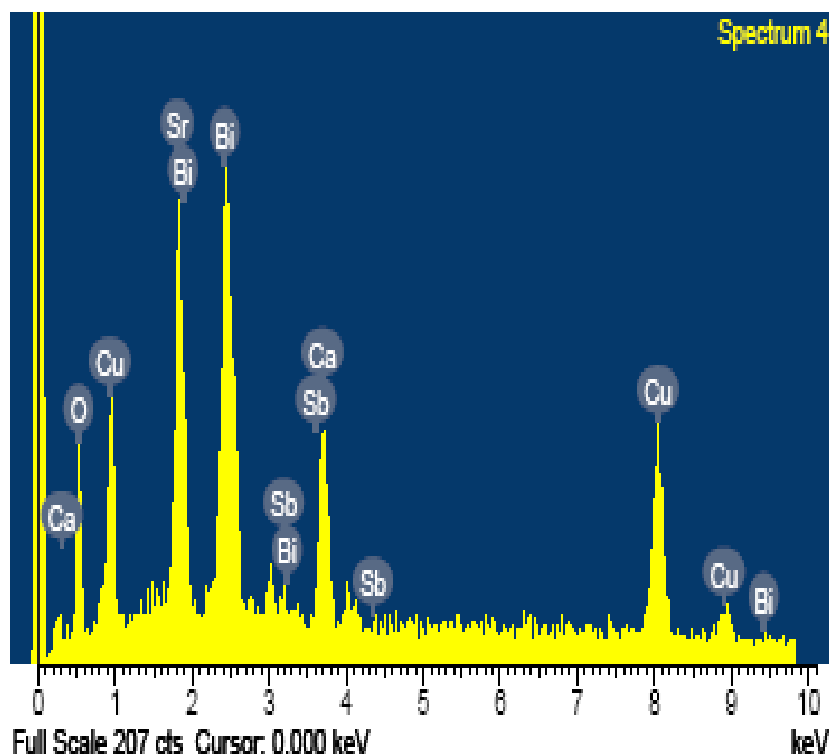
شکل ۷. نمودار  $\log V$ - $\log I$  برای نمونه آلیش داده شده با مقدار Pb و Sb به مقدار  $y = 0.05$  و  $x = 0.25$  با زمان های پخت ۱۵۰، (۰٫۲۷) و ۲۷۰ (۰٫۲۷) ساعت





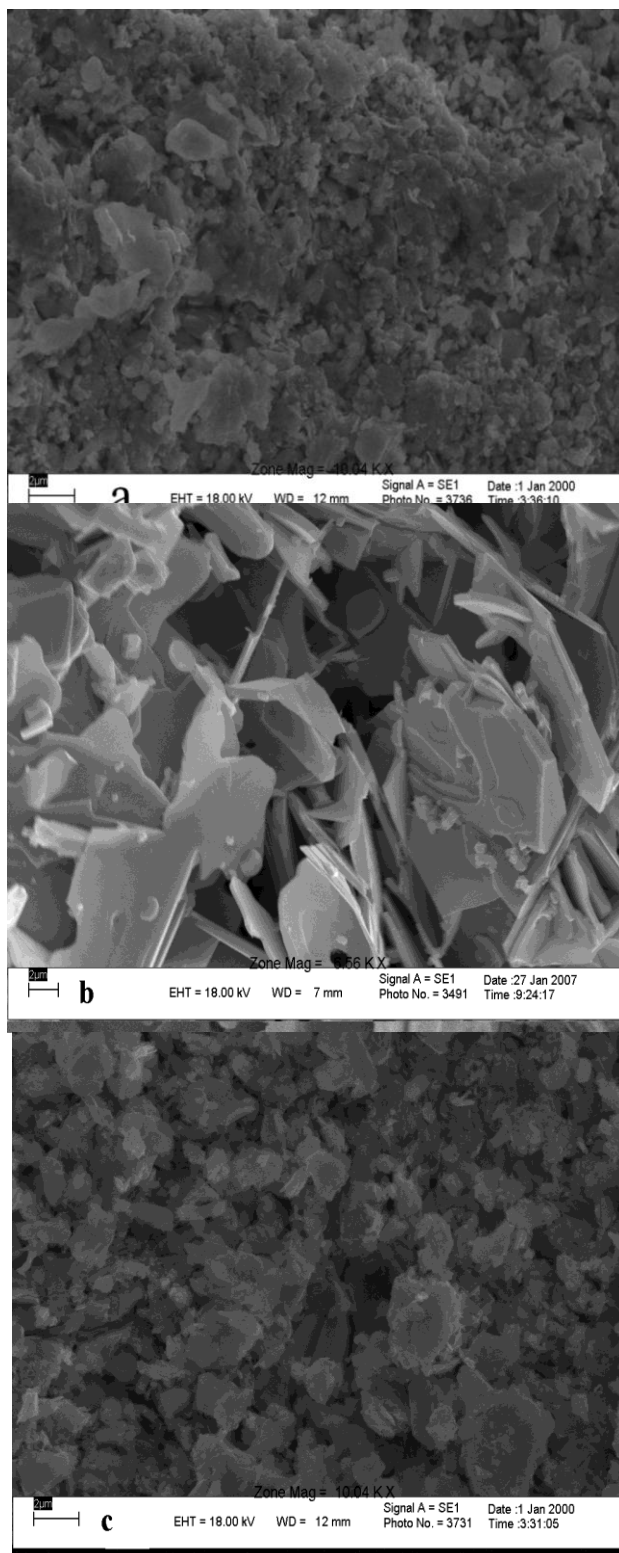
شکل ۸. انرژی فعال‌سازی بر حسب مقادیر مختلف Sb و Pb با زمان‌های پخت ۱۵۰ (■)، ۲۱۰ (●) و ۲۷۰ (▲) ساعت

از نمونه‌های ساخته شده با آلیاژ Sb و Pb به مقدار  $y = 0.105$  و  $x = 0.35$  تصویرها EDX گرفته شد که یک نمونه آن در شکل ۹ نشان داده شده است. از این شکل به خوبی مشاهده می‌شود که عناصر ناخواسته در نمونه وجود ندارند و این بدان معنا است که در فرآیند ساخت نمونه‌ها، آلودگی قابل مشاهده که باعث وجود عناصر ناخواسته در نمونه شود به وجود نیامده است.



شکل ۹. تصویر EDX نمونه‌ای با **Pb** و **Sb** به مقدار  $y = ۰/۰۵$  و  $x = ۰/۳۵$  با زمان پخت ۲۷۰ ساعت.

برای بررسی ریزساختار ترکیبات از جمله ریخت‌شناسی، توزیع، اندازه، میزان و اتصال دانه‌ها و همچنین وجود تخلخل از میکروسکوپ الکترونی روبشی استفاده شد و تصویرهای به دست آمده بررسی شدند. برای مقایسه دقیق‌تر نمونه‌ها و بررسی تأثیر آلاینش آنتیموان و سرب بر آن‌ها، تمام نمونه‌ها با بزرگ‌نمایی یکسان بررسی شدند. شکل ۱۰(a)-(c) تصویرهای SEM تهیه شده از سطح شکسته شده نمونه‌ها با مقدار  $y = ۰/۲۰$ ،  $۰/۰۵$  و  $y = ۰/۱۰$  و  $x = ۰/۳۵$  و  $x = ۰/۴۰$  را نشان می‌دهد. تصویرهای SEM نشان می‌دهند که با افزایش آلاینش **Sb** تا  $y = ۰/۰۵$  و **Pb** تا  $x = ۰/۳۵$  منجر به افزایش تشکیل دانه‌ها و به صورت ورقه‌ای شدن آن‌ها شده است که این امر موجب کاهش خلل و فرج نمونه و افزایش چگالی جریان بحرانی می‌شود. با افزایش **Sb** تا  $y = ۰/۲۰$  و **Pb** تا  $x = ۰/۲۰$  باعث افزایش خلل و فرج در نمونه شده و چون این خلل و فرج‌ها باعث تخریب پیوند بین‌دانه‌ای می‌شوند لذا جریان کاهش می‌یابد.



شکل ۱۰. (a)–(c) تصویرها SEM برای نمونه‌ها با مقدار آنتیموان و سرب ۰٫۴۰، ۰٫۴۰، ۰٫۰۵، ۰٫۳۵ (b) و ۰٫۲۰، ۰٫۲۰ (c) با زمان پخت ۲۷۰ ساعت.

## نتیجه‌گیری

نقش  $Pb$  و  $Sb$  بر ابررسانای  $Bi_{1.6}Pb_xSb_ySr_2Ca_2Cu_3O_y$  مطالعه شد. نمونه‌های آرایش داده با استفاده از روش واکنش حالت جامد تهیه و تأثیر  $Pb$  و  $Sb$  بر روی چگالی جریان بحرانی، انرژی فعال‌سازی و ریزساختار ابررسانای  $Bi_{1.6}Pb_xSb_ySr_2Ca_2Cu_3O_y$  بررسی شد. با استفاده از روش چهارمیله‌ای، چگالی جریان بحرانی، انرژی فعال‌سازی نمونه‌های ابررسانای  $Bi_{1.6}Pb_xSb_ySr_2Ca_2Cu_3O_y$  اندازه‌گیری شد. با محاسبه درصد فازهای نمونه‌ها مشخص شد که از مهم‌ترین عوامل محدودکننده چگالی جریان بحرانی و انرژی فعال‌سازی در ابررسانای  $Bi_{1.6}Pb_xSb_ySr_2Ca_2Cu_3O_y$  آلییده به  $Pb$  و  $Sb$  حضور فازهای ناخواسته از قبیل  $Bi-2212$ ،  $Bi-2201$  و فازهای ناخواسته در مرز دانه‌ها است. این فازها نقش پیوندگاه‌های ضعیف را بازی می‌کنند و با افزایش درصد آن‌ها در نمونه، چگالی جریان بحرانی، انرژی فعال‌سازی کاهش می‌یابد. همچنین از مقادیر بهینه آرایش سرب و آنتیموان مشاهده می‌شود مقدار جانشینی به جای بیسموت جمعاً  $0.4$  است که با مقدار سرب به همین میزان که توسط دیگر محققان گزارش شده مطابقت دارد. بررسی تصویرهای SEM نمونه‌ی آرایش داده شده با  $Pb$  و  $Sb$  به مقدار  $y=0.5$  و  $x=0.35$  رشد ورقه‌ای دانه‌ها و افزایش چگالی جریان بحرانی را نشان می‌دهد، حال آن که نمونه‌ای با  $Pb$  و  $Sb$  به مقدار  $y=0.2$  و  $x=0.2$  با ریزتر شدن دانه‌ها و افزایش خلل و فرج در ساختار خود، کاهش محسوس چگالی جریان بحرانی را تجربه کرده است. بررسی‌ها نشان می‌دهند که بیش‌ترین چگالی جریان بحرانی و انرژی فعال‌سازی، مربوط به نمونه با مقدار  $Pb$  و  $Sb$   $y=0.5$  و  $x=0.35$  با زمان پخت  $270$  ساعت است.

## منابع

1. Jasiolek G., Gorecka J., Majewskit G., Yuan S., Jin S and Liang R., "X-ray characterization of Bi-Pb-Sr-Ca-Cu-O ceramic", Supercond. Sci. Technol. 3 (1990) 194.
2. Chu C. W., Bechtold J., Gao L., Hor P. H. and Xue Y. Y., "Superconductivity up to 114K in the Bi-Al-Ca-Sr-Cu-O compound system without rare-earth elements", Phys. Rev. Lett. 60 (1988) 941.
3. Dou S. X., Liu A. J., Bourdillon M., Kviz N. X., and Sorrell C. C., "Stability of superconducting phases in Bi-Sr-Ca-Cu-O and the role of Pb doping", Phys. Rev. B 40 (1989) 5266.

4. Zargar Shoushtari, M., Mousavi Ghahfarokhi S. E., and Farbod, M., "The Effect of Cd Doping on Bi-Based Superconductor". *Journal of Applied Sciences* 8, 14 (2008) 2613.
5. Sarkar B., Reddy Y.S. and Sharma R. G., "Effect of Sb doping on critical current density in Bi (Pb)-Sr-Ca-Cu-O high Tc superconductors" , *Physica C* 219 (1994) 26.
6. Zargar Shoushtari, M., Bahrami A. and Farbod, M., "The effect of silver doping on the critical current density of Bi-Pb-Sr-Ca-Cu-O ceramic superconductor". *Phys. Stat. Sol. (c)*, 3 (2006) 2994.
7. Zargar Shoushtari , M., and Mousavi Ghahfarokhi, S. E., A Study of the Magnetic Properties of  $\text{Bi}_{1.64-x}\text{Pb}_{0.36}\text{Cd}_x\text{Sr}_2\text{Ca}_2\text{Cu}_3\text{O}_y$  superconductor, *J Supercond Nov Magn*, 24 (2011) 1505.
8. Mousavi Ghahfarokhi, S. E. and Zargar Shoushtari, M., " Structural and Physical Properties of Cd-doped  $\text{Bi}_{1.64}\text{Pb}_{0.36}\text{Sr}_2\text{Ca}_{2-x}\text{Cd}_x\text{Cu}_3\text{O}_y$  superconductor" ., *Physica B* 405 (2010) 4643.
9. Mollah, S., "Critical temperatures and critical currents of PbBiSCCO-metal/alloy", *Composites, Materials Letters* 52 (2002) 159.
10. Mousavi Ghahfarokhi, S. E., and Zargar Shoushtari , M., The effect of Sb and Pb doping on the critical temperature of the  $\text{Bi}_{1.6}\text{Pb}_x\text{Sb}_y\text{Sr}_2\text{Ca}_2\text{Cu}_3\text{O}_z$  superconductor *J Supercond Nov Magn*, 27 (2014) 1153.
11. Guo Y. C., Horvat J., Liu H. K., and Dou S. X. Current limiting effect of residual  $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CuO}_6$  in silver sheathed (Bi, Pb) $_2\text{Sr}_2\text{Ca}_2\text{Cu}_3\text{O}_{10}$  superconductors, *Physica C* 300 (1998) 38.
12. Jiang J., Cai X. Y., Chandler J. G., Patnaik S., Polyanskii A. A., Yuan Y., Hellestrom E. E., and Larbalestier D. C. Critical current limiting factors in post annealed (Bi, Pb) $_2\text{Sr}_2\text{Ca}_2\text{Cu}_3\text{O}_x$  tapes. *IEEE Trans. Appl. Supercond.* 13 (2003) 3018.
13. Deng H., Hua P., Wang W., Dong C., Chen H., Wu F., Wang H., Zhou Y., and Yuan G. Influence of low temperature-low oxygen pressure post-annealing on critical current density of Bi(Pb) $2223/\text{Ag}$  superconductors. *Physica C* 339 (2000) 181.

14. Rose-Innes, A. C., Rhoderick, E. H. "Introduction to superconductivity", Pergamon Press, Oxford (1978).
15. Han G. C. *Voltage-current characteristics in C- axis-oriented  $Bi_{1.8}Pb_{0.4}Sr_2Ca_2Cu_3O/Ag$  tapes*. J. Phys. Condens. Matter 7 (1995) 8175.
16. Zargar Shoushtari, M., Kashian M. R. and Yazdani H., "*Study on the Properties of  $Bi_{1.6}Pb_{0.4}Sr_2Ca_2Cu_{2+x}O_y$* ". Physica B 321 (2002) 305