

بررسی خواص ابرسانایی و مغناطیسی ابرسانای سرامیکی $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{Ca}_2\text{Cu}_3\text{O}_{10+\delta}$ با افزودن نانوذرات کاربید سیلیسیم

حسام فلاح آرنی^{۱*}، نسترن ریاحی نوری^۱، سعید باغشاهی^۲، آرمان صدقی^۲ و فاطمه شهباز طهرانی^۱

۱- گروه پژوهشی مواد غیرفلزی، پژوهشگاه نیرو، تهران، ایران

۲- گروه مهندسی و علم مواد، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه بین‌المللی امام خمینی (ره)، قزوین، ایران

(دریافت مقاله: ۱۴۰۰/۷/۸ - دریافت نسخه نهایی: ۱۴۰۰/۱۱/۲۳)

چکیده- در این تحقیق، اثر افزودن نانوذرات کاربید سیلیسیم بر فاز ابرسانای دما بالای (Bi-۲۲۲۳) $\text{Bi}_{1.6}\text{Pb}_{0.4}\text{Sr}_2\text{Ca}_2\text{Cu}_3\text{O}_{10+\delta}$ به منظور بهبود خواص ساختاری، ابرسانایی، مغناطیسی و میخکوبی شار مغناطیسی بررسی شده است. ابرسانای سرامیکی Bi-۲۲۲۳ به روش سل-ژل سنتز شد و در ادامه، فرآیند عامل‌دار کردن سطح ذرات کاربید سیلیسیم به کمک ترکیب آلی از بیس ایزو بوتیرو نیتریل (AIBN) انجام شد. اندازه‌گیری‌های پراش اشعه X، تصویربرداری میکروسکوپی گسیل میدانی، پذیرفتاری مغناطیسی و منحنی هیستریزیس به منظور بررسی خواص ترکیبات سنتز شده صورت گرفت. با هدف تحلیل ساختاری، الگوی پراش اشعه ایکس نمونه‌ها با استفاده از نرم‌افزار MAUD، برازش شد. بر این اساس، با افزایش مقادیر نانوذرات کاربید سیلیسیم، فاز مطلوب Bi-۲۲۲۳ کاهش یافته اما ثابت‌های شبکه تغییری نکرده است. این مسئله نشان می‌دهد که نانوذرات، به ساختار شبکه Bi-۲۲۲۳ وارد نشده‌اند. بر طبق اندازه‌گیری‌های مغناطیسی، دمای گذار ابرسانایی با افزایش درصد نانوذرات کاهش می‌یابد. همچنین، بیشترین مقدار مغناطش‌پذیری، پهنای حلقه هیستریزیس، چگالی جریان بحرانی و نیروی میخکوبی شار مغناطیسی به نمونه با ۰/۴ درصد وزنی کاربید سیلیسیم، تعلق دارد.

واژه‌های کلیدی: ابرسانای Bi-۲۲۲۳، کاربید سیلیسیم، پذیرفتاری مغناطیسی، میخکوبی شار.

۱- مقدمه

کاهش وزن سیستم‌ها و کاهش انرژی تلف شده است که با کمک مواد ابرساناهای دما بالا (HTS^۱) می‌توان ابعاد و وزن سیستم را کاهش و انرژی تلف شده به ویژه تلفات اهمی سیستم را کاهش داد. سنتز و بررسی خواص ابرساناهای سرامیکی دما بالا به‌عنوان گروه مهمی از مواد نوین و پیشرفته مهندسی، در دهه اخیر بسیار مورد توجه قرار گرفته است.

در دهه‌های اخیر با توجه به افزایش جمعیت کره زمین و صنعتی شدن جوامع، افزایش انتشار گازهای گلخانه‌ای، کاهش ذخایر سوخت‌های فسیلی و گسترش مصرف سوخت‌های فسیلی، حوزه انرژی و ارتباط آن با مواد پیشرفته مورد توجه قرار گرفته است. دو استراتژی عمده مطرح در این راستا، شامل

* مسئول مکاتبات، پست الکترونیکی: hfallah@nri.ac.ir

ابرسانای BSCCO است که ناشی از طبیعت متنوع واکنش پذیری مؤلفه‌های اکسیدی سیستم BSCCO است [۷] و [۸]. بهبود و افزایش چگالی جریان بحرانی به واسطه برطرف کردن اتصالات ضعیف بین دانه‌های و بهبود خواص مکانیکی و ویژگی‌های میخکوبی از جمله موضوعاتی است که در زمینه مواد ابرسانا بسیار مورد توجه محققین است تا با شکل‌گیری ساختار دانه‌ای بهتر، چگالی جریان بحرانی افزایش یابد [۹-۱۱].

سنتز کامپوزیت‌های ابرسانا شامل مواد نانو ساختار به‌عنوان مراکز میخکوبی، که می‌توانند خواص ابرسانایی را بهبود داده و جنبه‌های کاربردی ابرساناها را با بهبود چگالی جریان بحرانی و افزایش میدان مغناطیسی بحرانی توسعه دهند، از جمله موضوعات جالب و بحث برانگیز در زمینه مواد ابرسانای سرامیکی است [۱۲-۱۵]. به‌طور کلی، طبیعت برهم کنش بین زمینه و مراکز میخکوبی و همچنین مورفولوژی مراکز میخکوبی، در پدیده میخکوبی گردشاره‌ها^۳ از اهمیت بسیاری برخوردار است [۱۶-۱۸]. اگر چه تا امروز تحقیقات زیادی در مورد نقش مواد افزودنی نانومتری بر شکل‌گیری و خواص ابرسانایی فازهای سیستم BSCCO انجام شده است، ولی در این تحقیقات فقدان اطلاعات کافی در مورد تأثیر افزودنی‌های نانوذرات در مقایسه با افزودنی‌های دیگر مشهود است [۲۳-۱۹]. همچنین اطلاعات کمی درباره تأثیر تغییرات مورفولوژی بر فرآیندهای میخکوبی گردشاره‌های سیستم BSCCO گزارش شده است [۱۲، ۲۰ و ۲۴]. در پژوهش قبلی، تأثیر افزودن نانویسکر کاربید سیلیسیم به‌عنوان مراکز میخکوبی یک بعدی را بر خواص ابرسانای Bi-۲۲۲۳ بررسی شده است [۲۴]. در این پژوهش هدف اصلی افزودن نانوذرات کاربید سیلیسیم به‌عنوان مراکز میخکوبی جدید سه‌بعدی به ابرسانای دامبالای پایه بیسموت BSCCO بوده و در ادامه به بررسی خواص کاربردی این کامپوزیت‌ها در اثر افزودن نانوذرات کاربید سیلیسیم و همچنین مقایسه نتایج به‌دست آمده با نتایج پژوهش قبلی خود [۲۴] درباره افزودن نانویسکر کاربید سیلیسیم به ابرسانای سرامیکی Bi-۲۲۲۳ پرداخته شده است.

ابرسانای پایه بیسموت (BSCCO) با فرمول عمومی $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{Ca}_{n-1}\text{Cu}_n\text{O}_{2n+4+x}$ از مهم‌ترین طبقه‌بندی‌های ابرساناهای دما بالا است که حاوی عناصر کمیاب خاکی نیست. این نوع ابرسانا دارای ساختارهای لایه‌ای بوده که ویژگی‌های ابرسانایی آن، بسته به تعداد صفحات اکسید مس متفاوت است. این ابرسانا در مقایسه با ابرسانای بر پایه اکسید مس ایبکو (YBCO) دارای دمای بحرانی بالاتری بوده و در رفتار ابرسانایی ثبات بیشتری دارد [۱ و ۲]. در این ترکیبات، اثر جوزفسون^۲ ذاتی و رفتار ناهمسانگرد، هر دو وجود دارند. ساختارهای بلوری کوپرات‌های پایه بیسموت به‌خاطر عدم تناسب عنصری اکسیژن، بی‌نظمی کاتیون‌ها و عیوب چینی لایه‌های بسیار پیچیده است. ترکیبات BSCCO از این خانواده دارای سه ساختار گوناگونی به شرح زیر است: فاز $\text{Bi}-2201$ ($n = 1$) با دمای بحرانی ۲۰ کلوین، فاز $\text{Bi}-2212$ ($n = 2$) با دمای گذار ۸۵ کلوین و فاز $\text{Bi}-2223$ ($n = 3$) با دمای بحرانی ۱۱۰ کلوین. در ساختار بلوری $\text{Bi}-2212$ لایه‌های دوتایی CuO_2 با یون‌های کلسیم جاسازی شده بین آنها در بین بلوک‌های $\text{SrO}/\text{BiO}_2/\text{SrO}$ احاطه شده‌اند. با اضافه شدن یک واحد Ca/CuO_2 اضافی به ساختار $\text{Bi}-2212$ ، ساختار بلوری فاز $\text{Bi}-2223$ تشکیل می‌شود.

با توجه به کاربردهای گسترده ابرساناها در ژنراتورها، ترانسفورماتورها، موتورها، محدودکننده‌های جریان خطای ابرسانایی و ذخیره‌سازهای انرژی، شناخت، مشخصه‌یابی و بهبود پارامترهای بحرانی مواد ابرسانا برای تجاری‌سازی و توسعه کاربردها از اهمیت بسیاری برخوردار است [۳-۶]. اغلب از ترکیبات سرامیکی پایه بیسموت $\text{Bi}-2212$ و $\text{Bi}-2223$ در کاربردهای بیان شده (معمولاً به شکل سیم) استفاده می‌شود. ابرسانای $\text{Bi}-2223$ از جمله مواد ابرسانای دمای بالا است که دمای بحرانی بالاتر از ۱۰۰ درجه کلوین داشته و قابلیت حفظ خواص ابرسانایی تا میدان مغناطیسی حدود ۱۰۰ تسلا را دارد. البته مشکلات فراوانی در سنتز $\text{Bi}-2223$ وجود دارد که علت آن تشکیل فازهای اکسیدی ناخواسته و همچنین فازهای ثانویه $\text{Bi}-2201$ و $\text{Bi}-2212$ در حین سنتز ترکیبات

۲- مواد و روش‌ها

به منظور سنتز کامپوزیت‌های $(\text{Bi}_{1.66}\text{Pb}_{0.34}) + x\text{SiC}$ که در آن x درصد وزنی نانوذرات کاربید سیلیسیم (۰/۰، ۰/۲، ۰/۴، ۰/۸ درصد) است، ابتدا ابررسانای سرامیکی $\text{Bi}-2223$ را به روش سل-ژل سنتز شده است. جزئیات روش سنتز ابررسانای سرامیکی $\text{Bi}-2223$ در پژوهش‌های قبلی ما آورده شده است [۱۴ و ۲۴]، بنابراین از ذکر دوباره آن صرف نظر شده است.

عامل دار کردن افزودنی‌ها به کمک سیلان از آگلومره شدن نانو افزودنی‌ها جلوگیری کرده و کامپوزیت ابررسانایی همگن تری را ایجاد می‌کند. بنابراین، قدم بعدی در سنتز کامپوزیت‌های مورد نظر، عامل دار کردن سطح ذرات کاربید سیلیسیم به کمک ترکیب آلی ازو بیس ایزو بوتیرو نیتریل (AIBN) است که واکنش آن در شکل (۱) نشان داده شده است. در ابتدا باید اشاره کرد که، اندازه نانوذرات کاربید سیلیسیم در محدوده ۶۵-۴۵ نانومتر است که ساخت شرکت Us Research Nanomaterials و با خلوص ۹۹ درصد (فاز بتا) است. در ابتدا تجزیه ترکیب AIBN موجب آزاد شدن گاز نیتروژن و شکل‌گیری دو رادیکال سیانو ۲ پروپیل می‌شود. این رادیکال‌ها با هیدروکربن‌های غیر اشباع روی سطح کاربید سیلیسیم واکنش می‌دهند و گروه‌های سیانو را مطابق شکل در سطح SiC ایجاد می‌کنند. در ادامه با هیدرولیز محلول آبی شامل سدیم هیدروکسید، گروه‌های سیانو به گروه‌های کربوکسیل تبدیل شده و به راحتی در مایع پخش می‌شود. بنابراین چگالی گروه‌های کربوکسیل در سطح SiC که با ترکیب AIBN عامل دار شده افزایش می‌یابد [۲۵].

پس از عامل دار کردن نانوذرات SiC، درصد‌های گوناگون (۰/۰، ۰/۲، ۰/۴ و ۰/۸ درصد) از این نانوذرات، به پودر ابررسانا اضافه شد و به منظور همگن شدن به مدت ۲ ساعت در اتانول آسیاکاری شدند. در انتها، برای دستیابی به کامپوزیت‌های نهایی مورد نظر، پودرهای حاصل از آسیاکاری، به شکل قرص درآمده و برای انجام فرآیند تف‌جوشی به مدت ۱۰۰ ساعت در دمای ۸۵۰ درجه سانتی‌گراد درون کوره قرار گرفتند.

از دستگاه پراش پرتو ایکس (XRD^4) مدل PW ۳۰۵۰/۶۰

متعلق به شرکت PANalytical[®] با تابش Cu-K α ، به منظور مشخصه‌یابی ساختاری نمونه‌های سنتز شده از جمله ثابت‌های شبکه، اندیس‌های میلر و فازهای غالب و ناخواسته، استفاده شد. برازش داده‌های حاصل از اندازه‌گیری پراش پرتو ایکس توسط نرم افزار (MAUD⁵) انجام گرفت. به منظور مطالعه ریزساختاری ترکیبات از میکروسکوپ الکترونی رومیزی گسیل میدانی (FESEM⁶) استفاده شد. پذیرفتاری مغناطیسی AC نمونه‌ها توسط دستگاه پذیرفتاری سنج AC مدل ۷۰۰۰ شرکت Lake Shore و نتایج مربوط به حلقه‌های هیستریز مغناطیسی به کمک SQUID^۴ مدل SV۰۰X اندازه‌گیری شد.

۳- نتایج و بحث

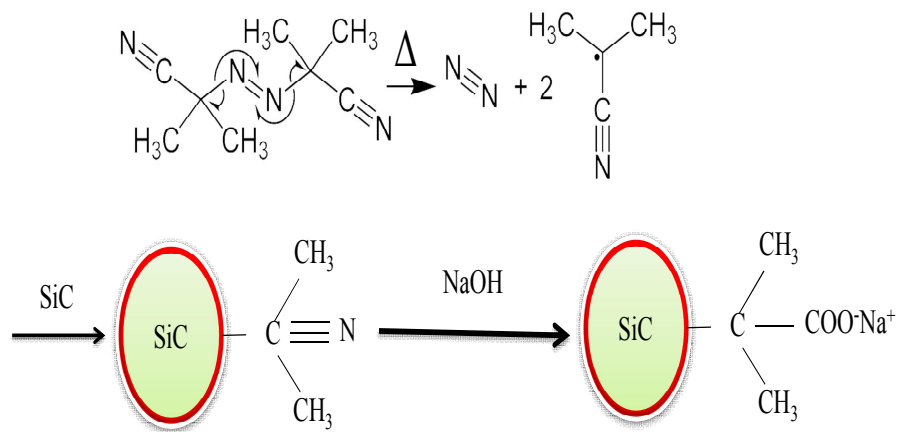
۳-۱- مطالعه ساختاری

الگوهای پراش پرتو ایکس کامپوزیت‌های $\text{Bi}-2223$ با مقادیر گوناگون نانوذرات کاربید سیلیسیم در شکل (۲) نشان داده شده است. با توجه به نتایج به دست آمده از نرم افزار MAUD، فازهای ابررسانایی دما بالای $\text{Bi}-2223$ به عنوان فاز غالب و فازهای $\text{Bi}-2212$ و $\text{Bi}-2201$ به عنوان فازهای جزئی در تمامی نمونه‌ها مشاهده شده است. فایل‌های JCPDS برای فاز اصلی $\text{Bi}-2223$ و فازهای ثانویه $\text{Bi}-2212$ و $\text{Bi}-2201$ به ترتیب عبارتند از ۱۵۴۰۷۷۰، ۲۱۰۱۴۳۷ و ۱۰۰۱۶۹۱. همچنین درصد شکل‌گیری فازهای مذکور و ثابت‌های شبکه کامپوزیت‌های سنتز شده به‌طور مجزا در جدول (۱) آورده شده است. به علاوه، براساس تحلیل MAUD و با استفاده از شدت پیک‌های الگوی پراش پرتو ایکس مربوط به هر فاز، می‌توان درصد حجمی شکل‌گیری هر یک از فازهای اصلی و ثانویه براساس معادلات زیر محاسبه کرد [۱۵]:

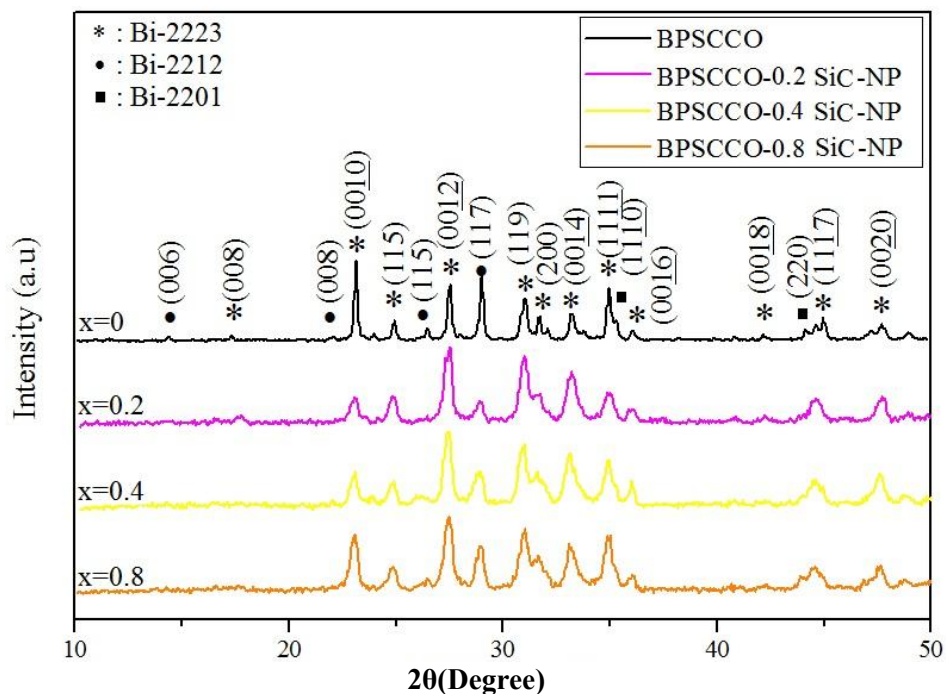
$$f(2223) = \frac{\sum I_{2223}(hkl)}{\sum I_{2223}(hkl) + \sum I_{2212}(hkl) + \sum I_{\text{others}}} \quad (1)$$

$$f(2212) = \frac{\sum I_{2212}(hkl)}{\sum I_{2223}(hkl) + \sum I_{2212}(hkl) + \sum I_{\text{others}}} \quad (2)$$

$$f(2201) = \frac{\sum I_{2201}(hkl)}{\sum I_{2223}(hkl) + \sum I_{2202}(hkl) + \sum I_{\text{others}}} \quad (3)$$



شکل ۱- واکنش اصلاح سطح کاربید سیلیسیم در حضور ازو بیس ایزو بوتیرو نیتریل



شکل ۲- الگوی پراش پرتو ایکس ترکیبات سنتز شده با مقادیر مختلف نانوذرات کاربید سیلیسیم

جدول ۱- درصد حجمی و پارامترهای شبکه کامپوزیت‌های سنتز شده

c(Å)	a≈b(Å)	$f_{(220)}$	$f_{(222)}$	$f_{(224)}$	x(wt%) SiC-NP
۳۷,۰۷۴(۴)	۳,۸۲۳(۱)	~۲	~۹	~۸۹	۰,۰
۳۷,۰۷۴(۳)	۳,۸۲۳(۱)	~۷	~۱۰	~۸۳	۰,۲
۳۷,۰۷۴(۲)	۳,۸۲۳(۲)	~۶	~۱۳	~۸۱	۰,۴
۳۷,۰۷۴(۱)	۳,۸۲۳(۱)	~۱۰	~۱۴	~۷۶	۰,۸

با اندازه بزرگ‌تر و اتصال بین ذره‌ای بهتر با جهت‌گیری منظم‌تر، در مقایسه با کامپوزیت‌های دیگر قابل مشاهده است. به علاوه، با افزایش نانوذرات، تراکم و نظم در چینش ذره‌ها کاهش یافته است، بنابراین، اتصال بین ذره‌ها که از فاکتورهای اساسی در تعیین چگالی جریان ابررساناهای دما بالا است، کاهش می‌یابد [۲۷].

۳-۳- اندازه‌گیری دمای بحرانی

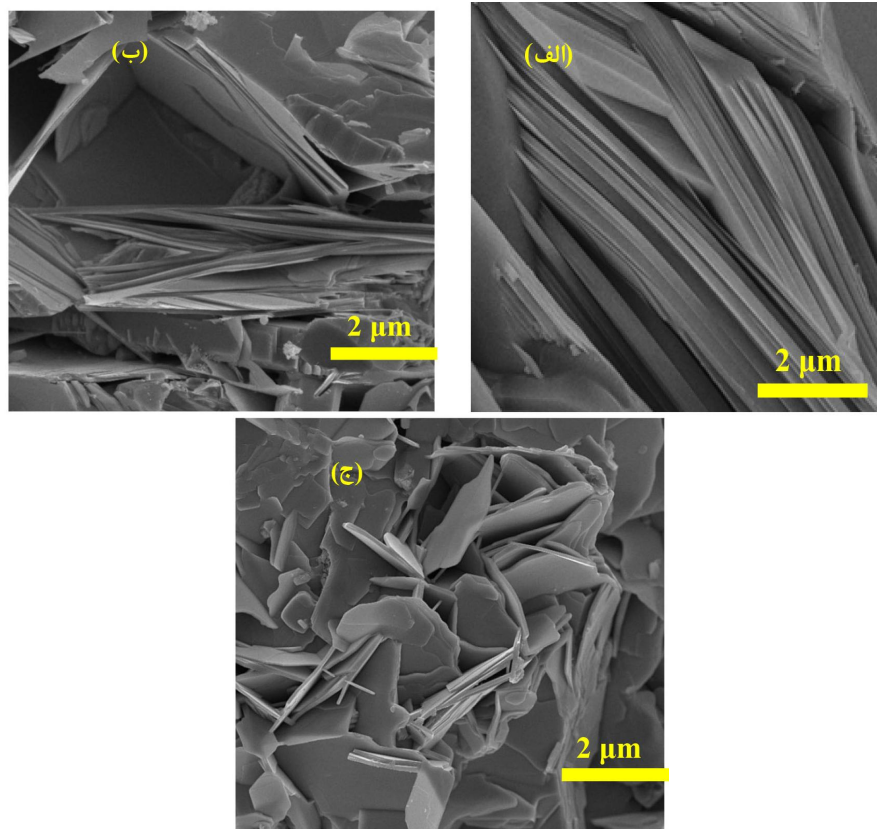
منحنی پذیرفتاری مغناطیسی کامپوزیت‌های سنتز شده با مقادیر مختلف نانوذرات کاربید سیلیسیم بر حسب دما، برای حالت سرد شدن در حضور میدان مغناطیسی ۰/۰۰۱ تسلا (FC) در شکل (۴) نمایش داده شده است. اولین کاهش و تغییر شیب را می‌توان ناشی از وجود گذار درون دانه‌ای (Tc) دانست و دومین پیک در Tc_z (دمای گذار بین دانه‌ای) ناشی از حضور مربوط فازهای ابررسانایی ثانویه نظیر Bi-۲۲۱۲ است. همان‌گونه که در شکل قابل مشاهده است، در تمامی کامپوزیت‌های شامل نانوذره، مقدار Tc با افزایش درصد کاربید سیلیسیم کاهش یافته است که می‌توان آن را ناشی از کرنش ایجاد شده در فصل مشترک افزودنی و زمینه ابررسانا دانست. به علاوه، خاصیت ابررسانایی می‌تواند به علت اعوجاج نواحی اطراف فصل مشترک با تغییر چگالی حامل‌های بار، از بین رود. همه ترکیبات سنتز شده به جز نمونه فاقد نانوذرات، دارای یک گذار ثانویه در Tc_z حوالی ۹۰ درجه کلوین هستند که نشان می‌دهد نانو افزودنی‌ها شرایط را برای تغییر فاز ابررسانایی از فاز Bi-۲۲۲۳ به فاز Bi-۲۲۱۲ به صورت جزئی فراهم می‌کنند و بدین شکل، تشکیل فاز Bi-۲۲۱۲ در کامپوزیت‌ها با افزایش نانوذرات کاربید سیلیسیم، افزایش می‌یابد. همچنین، وجود فازهای اضافی و ناخواسته همچون فاز Bi-۲۲۱۲ باعث اتصالات ضعیف بین دانه‌ای می‌شود [۲۷].

براساس نتایج شکل (۴)، بیشترین مقدار پذیرفتاری مغناطیسی مربوط به کامپوزیت Bi-۲۲۲۳ شامل ۰/۴ درصد وزنی کاربید سیلیسیم (Bi-۲۲۲۳-۰/۴SiC)، است. با توجه به

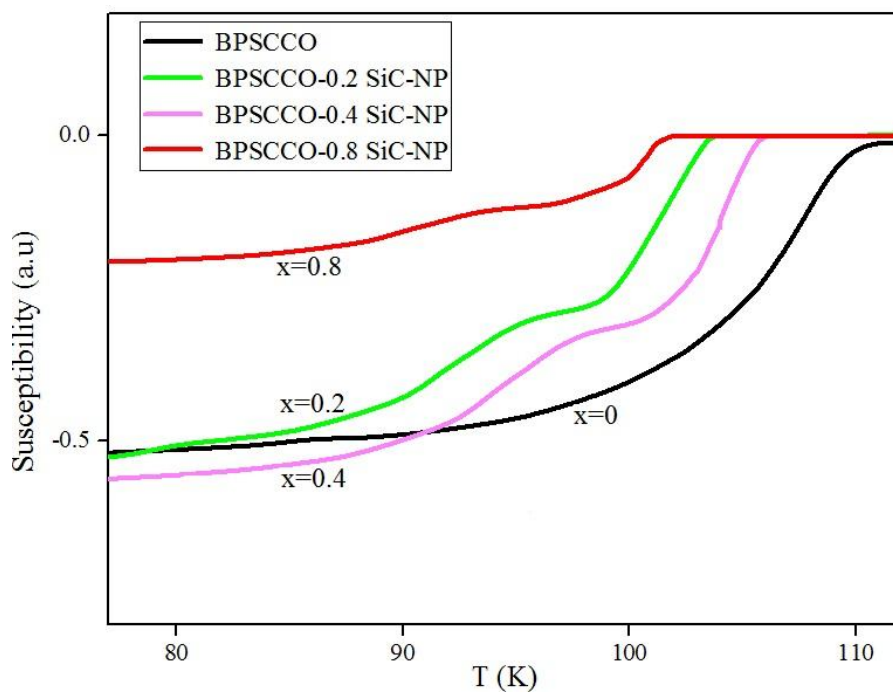
که I₂₂₀₁ (hkl) و I₂₂₁₂ (hkl) و I₂₂₂₃ (hkl) به ترتیب شدت پیک‌های مربوط به فاز اصلی Bi-۲۲۲۳ و فازهای ثانویه Bi-۲۲۱۲ و Bi-۲۲۰۱ هستند. عدم وجود پیک اضافی در الگوی پراش پرتو ایکس کامپوزیت‌ها، دلالت بر عدم وقوع واکنش یا استحاله میان Si و عناصر اولیه تشکیل‌دهنده ترکیب ابررسانایی Bi-۲۲۲۳ است. به علاوه، براساس نتایج جدول (۱)، افزودن نانوذرات کاربید سیلیسیم، باعث کاهش فاز اصلی و مطلوب ابررسانایی Bi-۲۲۲۳ شده و فازهای ناخواسته ابررسانایی مذکور دیگر را افزایش می‌دهد. می‌توان به این نکته اشاره کرد که وجود سرب در مراحل سنتز Bi-۲۲۲۳ باعث شکل‌گیری ترکیب Ca₂PbO₄ شده و حضور مقادیر بالاتر نانوذرات در مذاب تشکیل شده در دمای واکنش، بر گرانی مذاب و همگنی مذاب تأثیر گذار بوده (و باعث اختلال در عملکرد Ca₂PbO₄ شده) و بنابراین باعث کاهش نرخ شکل‌گیری فاز مطلوب Bi-۲۲۲۳ می‌شود [۲۶]. از این‌رو، درصد‌های بالاتر نانوذرات شرایط تشکیل فازهای ناخواسته Bi-۲۲۱۲ و Bi-۲۲۰۱ را فراهم می‌کند و در کامپوزیت‌های شامل نانوذرات، نمونه Bi-۲۲۲۳ با خلوص بالا حاصل نخواهد شد. همچنین به علت عدم تغییر پارامترهای شبکه کامپوزیت‌ها با افزایش مقدار نانوذرات، می‌توان چنین استدلال کرد که نانو ذرات کاربید سیلیسیم به ساختار شبکه Bi-۲۲۲۳ وارد نشده‌اند.

۳-۲- مطالعات ریزساختاری

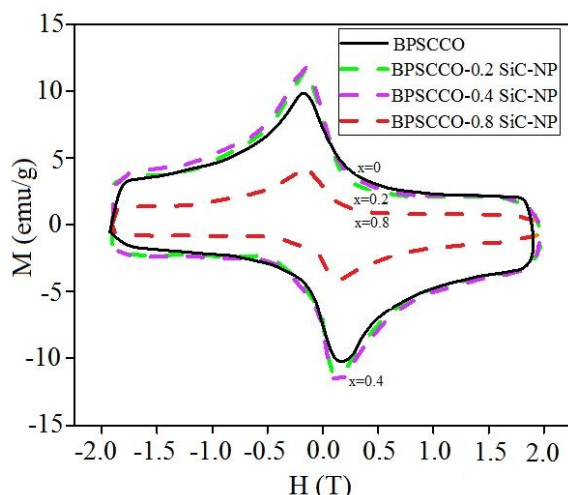
تصاویر میکروسکوپی الکترونی رویشی گسیل میدانی ابررسانای Bi-۲۲۲۳ (الف) و کامپوزیت‌های شامل نانوذرات کاربید سیلیسیم با درصد‌های وزنی مختلف (ب و ج) در شکل (۳) نشان داده شده است. تصاویر، ساختار دانه‌ای و لایه لایه‌ای ابررساناها را به خوبی نشان می‌دهد. ساختار دانه‌ای که ذره‌های پولکی شکل در جهت‌های مختلف به صورت نامنظم رشد کرده‌اند، برای تمامی نمونه‌های سنتز شده قابل مشاهده می‌شود. در حالت کلی، نانوذرات از رشد ذره‌ها جلوگیری می‌کنند. در ریزساختار کامپوزیت با ۰/۴ درصد وزنی کاربید سیلیسیم، ذره‌ها



شکل ۳- تصاویر میکروسکوپی الکترونی رویشی گسیل میدانی: الف) ترکیب Bi-2223، ب) کامپوزیت با ۰٫۴ درصد وزنی کاربید سیلیسیم و ج) با ۰٫۸ درصد وزنی کاربید سیلیسیم



شکل ۴- منحنی پذیرفتاری مغناطیسی کامپوزیت‌های Bi-2223 شامل نانوافزودنی کاربید سیلیسیم



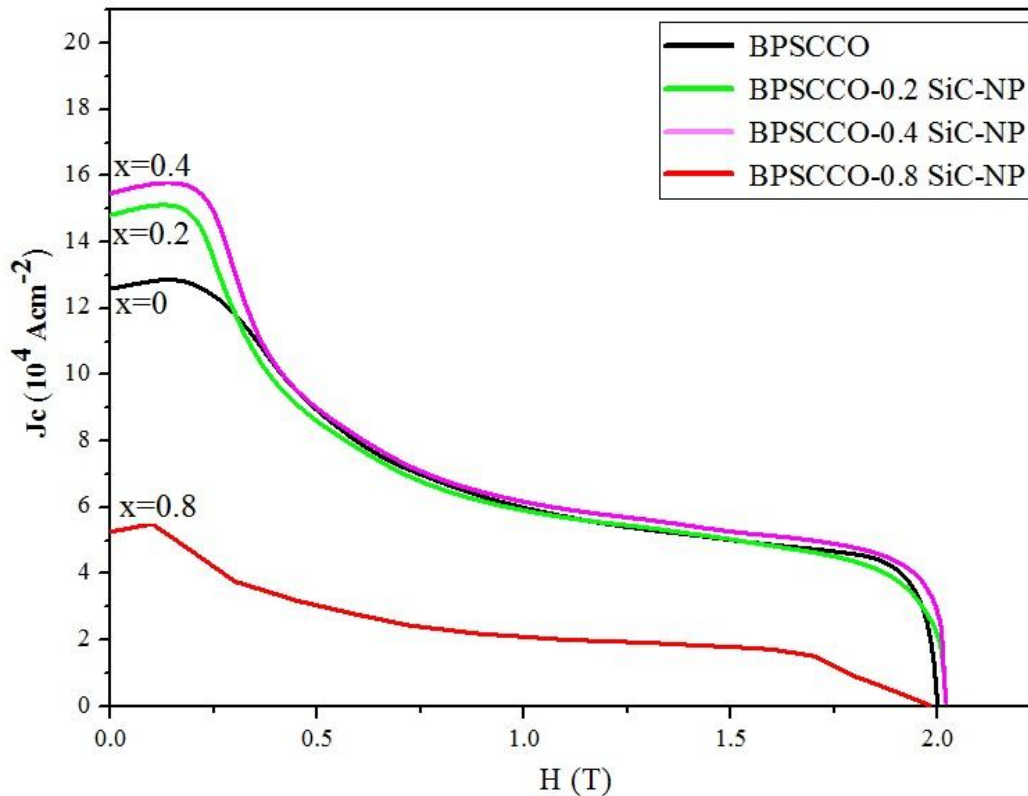
شکل ۵- منحنی هیستریزس کامپوزیت‌های Bi-2223 با مقادیر مختلف نانوذرات کاربید سیلیسیم

این نکته که مقدار پذیرفتاری نزدیک‌تر به -1 ($\chi_{ZFC} = -1$)، شیب تند با پهنای کم حین سرمایش در پذیرفتاری مغناطیسی، نشان‌دهنده کیفیت بالای نمونه در ایجاد خاصیت دیامغناطیس کامل است، از این‌رو این مسئله نشان می‌دهد که کامپوزیت کامل $(\text{Bi}-2223-0.4\text{SiC})$ دارای عملکرد بهتری در نزدیک شدن به خاصیت دیامغناطیس کامل، نسبت به نمونه خالص بوده است. افزون بر این، اگرچه دمای بحرانی نمونه‌ها با افزایش حضور نانوذرات کاربید سیلیسیم کاهش یافته، اما خواص مغناطیسی (طرد شار و دیامغناطیس کامل) در کامپوزیت‌های شامل نانوافزودنی در مقادیر کم، بهبود یافته و حضور و توزیع دیگر فازهای ابررسانایی، شرایط را برای بهبود خواص مغناطیسی در آنها فراهم کرده است. بنابراین می‌توان اینگونه نتیجه‌گیری کرد که کامپوزیت $\text{Bi}-2223-0.4\text{SiC}$ قابلیت‌های کاربردی مطلوب‌تری را در مقایسه با دیگر کامپوزیت‌های سنتز شده داراست.

کامپوزیت‌های ابررسانایی $\text{Bi}-2223$ شامل کاربید سیلیسیم نانوذره در شکل (۵)، مقدار مغناطش‌پذیری ($|M|$) و پهنای حلقه هیستریزس در مقادیر 0.2 و 0.4 درصد وزنی نسبت به نمونه خالص افزایش یافته و سپس با افزایش بیشتر مقدار نانو ذرات تا 0.8 درصد وزنی کاهش می‌یابد. در کامپوزیت $\text{Bi}-2223-0.8\text{SiC}$ مقدار مغناطش‌پذیری و پهنای حلقه هیستریزس به‌طور چشمگیری کاهش می‌یابد زیرا فازهای ثانویه بیشتری با افزایش درصد نانو ذرات تشکیل می‌شوند. با توجه به اینکه پهنای حلقه‌های هیستریزس به پارامترهای زیادی نظیر قدرت میخکوبی شار، مقدار فازهای ثانویه و مقدار فازهای ابررسانایی دما بالا و دما پایین، طول همدوسی و کیفیت ریزساختار بستگی دارد. می‌توان نتیجه گرفت در کامپوزیت‌های ابررسانایی $\text{Bi}-2223-0.2\text{SiC}$ و $\text{Bi}-2223-0.4\text{SiC}$ برای آید نتایج پارامترهای ذکر شده به طرز مطلوبی سطح حلقه هیستریزس این دو کامپوزیت را افزایش داده است. نتایج گستردگی سطح حلقه با بررسی‌های فازی و ریزساختاری اشاره شده در بخش‌های قبل قابل بررسی است. ذکر این مسئله قابل توجه است که مقدار میدان بحرانی اول ($B_{C1} \approx 0.2 \text{ T}$) که محدوده اثر مایسنر بوده و قبل از آن خاصیت دیامغناطیس کامل وجود دارد، در کامپوزیت $\text{Bi}-2223-0.2\text{SiC}$ و $\text{Bi}-2223-0.4\text{SiC}$ افزایش یافته است.

۳-۴- مطالعات مغناطیسی

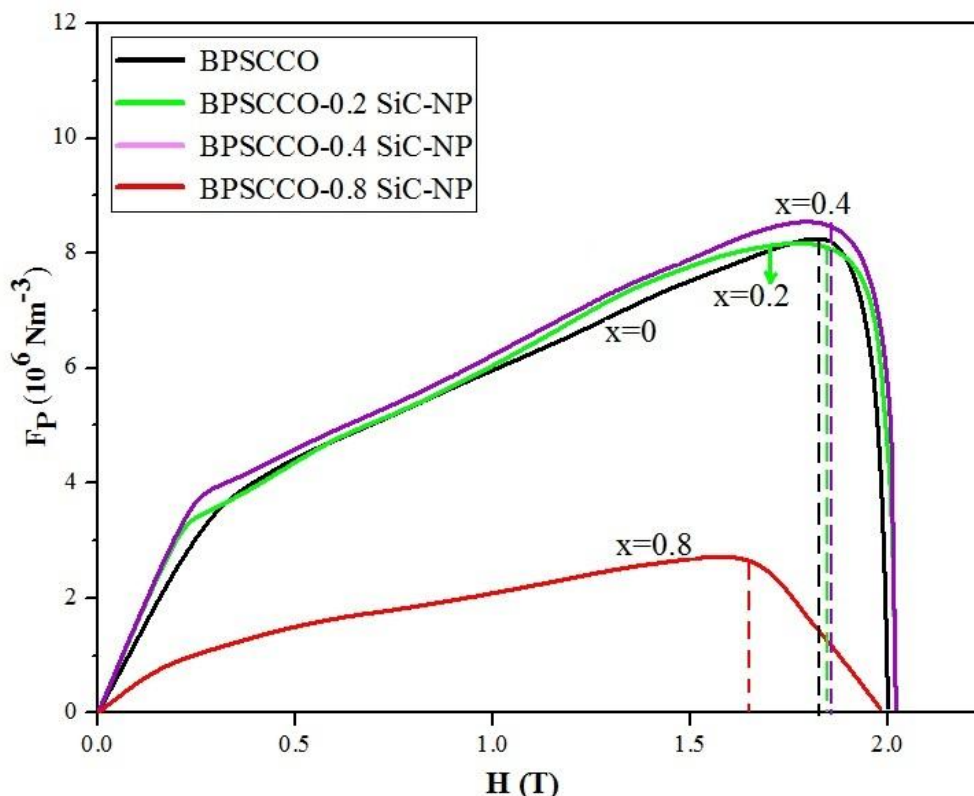
شکل (۵) حلقه هیستریزس مغناطیسی کامپوزیت‌های ابررسانایی $\text{Bi}-2223$ متشکل از مقادیر گوناگون نانوذرات کاربید سیلیسیم را در دمای 10 درجه کلوین برای میدان مغناطیسی اعمالی در بازه ± 2 تسلا نشان می‌دهد. در مورد



شکل ۶- چگالی جریان بر حسب دما برای کامپوزیت‌های سنتز شده

فازهای ثانویه و نامطلوب افزایش یافته که سبب کاهش کیفیت نمونه‌ها شده و باعث می‌شود که خاصیت دیامغناطیس کامل در محدوده کوچک‌تری حفظ شود. به علاوه، مقادیر J_{Cm} به مقدار نانو افزودنی وابسته بوده و کمترین مقدار J_{Cm} برای مقادیر بالای آرایش نانو افزودنی (۰٫۸ درصد وزنی) مشاهده شده است. چگالی جریان با افزایش میدان مغناطیسی نیز در تمامی کامپوزیت‌ها کاهش می‌یابد که این ویژگی، مشخصه تمامی ابررساناهای دمابالای سیستم BSCCO است. افزایش J_{Cm} کامپوزیت $Bi-2223-0.2SiC$ در مقایسه با نمونه خالص را می‌توان به بهبود مراکز مؤثر میخکوبی در این کامپوزیت‌ها نسبت داد. نتایج چگالی جریان کامپوزیت‌های شامل نانو افزودنی نشان می‌دهد، که کاربرد سیلیسیم با درصد وزنی ۰٫۴، مؤثرترین مرکز میخکوبی محسوب می‌شود که می‌تواند گردشاره‌های بیشتری را میخکوب کرده و ممانعت مؤثرتری در برابر حرکت آنها ایجاد کند.

از این رو این کامپوزیت‌ها خاصیت دیامغناطیس کامل خود را در محدوده بیشتری نسبت به نمونه خالص حفظ می‌کنند و تشکیل گردشاره‌ها و ناحیه مختلط در میدان مغناطیسی بزرگ‌تری اتفاق می‌افتد. این مسئله قابلیت‌های کاربردی این مواد را افزایش می‌دهد. در شکل (۶)، چگالی جریان بحرانی محاسبه شده با استفاده از حلقه‌های هیستریزس و معادله بین J_c را برای تمامی کامپوزیت‌های سنتز شده در دمای ۱۰ درجه کلوین به تصویر کشیده شده است (اندازه سطح مقطع نمونه‌ها 8×12 میلی‌متر است). همان‌گونه که در شکل قابل مشاهده است، تمامی نمودارها دارای یک پیک بیشینه در حوالی ۰٫۲ تسلا هستند که نشان‌دهنده شروع نفوذ گردشاره‌ها بوده و در توضیحات مربوط به حلقه‌های هیستریزس درباره آن توضیحات کافی داده شد. این پیک ماکزیمم با افزایش مقدار نانوذرات، به سمت میدان‌های کوچک‌تر میل می‌کند. زیرا همان‌گونه که در قبل توضیح داده شد، با افزایش افزودنی‌ها، اتصالات ذره‌ای کاهش یافته و



شکل ۷- نمودار چگالی نیروی میخکوبی بر حسب میدان مغناطیسی برای نمونه‌های سنتز شده

مطلوب‌تری در کامپوزیت‌های Bi-۲۲۲۳ دست یافت. این خواص ابررسانایی مطلوب شامل دمای بحرانی بالاتر، چگالی جریان بحرانی، میدان برگشت ناپذیر و میدان بحرانی اول بالاتر است.

۴- نتیجه‌گیری

در این پژوهش، اثر افزودن نانوذرات کاربید سیلیسیم بر ویژگی‌های ساختاری و مغناطیسی ابررساناهای سرامیکی $\text{Bi}_{1.6}\text{Pb}_{0.4}\text{Sr}_2\text{Ca}_2\text{Cu}_3\text{O}_{10+\delta} + x(\text{SiC})$ با مقدار درصدهای وزنی (۰/۰، ۰/۲، ۰/۴، ۰/۸ و درصد) که به روش سل-ژل سنتز شده‌اند، مورد مطالعه قرار گرفته است. براساس نتایج به‌دست آمده از الگوهای پراش پرتو ایکس و برازش داده‌ها با استفاده از نرم افزار MAUD افزایش نانوذرات کاربید سیلیسیم بر شکل‌گیری فاز مطلوب ابررسانایی Bi-۲۲۲۳ تأثیر مطلوبی نداشته و درصد شکل‌گیری این فاز مطلوب ابررسانایی را

در شکل (۷)، نمودار چگالی نیروهای میخکوبی تمامی نمونه‌های Bi-۲۲۲۳ در دمای ۱۰ درجه کلوین به‌دست آمده از رابطه $F_p = J_c \times B$ مشاهده می‌شود. همان‌گونه که در شکل قابل مشاهده است، در مورد کامپوزیت‌های ابررسانایی Bi-۲۲۲۳ شامل سیلیسیم کاربید نانوذره، بیشترین مقدار چگالی نیروی میخکوبی ($F_{p-\max}$) و بیشترین مقدار میدان مغناطیسی (H_{\max}) به $\text{Bi}-2223-0.4\text{SiC}$ تعلق دارد. در تمامی کامپوزیت‌ها، با افزایش مقدار نانو افزودنی (۸ درصد وزنی) یک کاهش چشمگیر در $F_{p-\max}$ مشاهده می‌شود همچنین مقادیر H_{\max} نیز به مقادیر کوچک‌تر میل می‌کنند. این رفتار به‌خوبی نتایج پذیرفتاری مغناطیسی را تأیید می‌کند.

در مقایسه با پژوهش قبلی درباره افزودن نانویسکر کاربید سیلیسیم به ابررسانای سرامیکی Bi-۲۲۲۳، با تغییر مورفولوژی نانو افزودنی‌های کاربید سیلیسیم از ذره به ویسکر در مقدار بهینه کمتر (۲ درصد وزنی) می‌توان به خواص ابررسانایی

جریان بحرانی $1.6 \times 10^5 \text{ A/cm}^2$ ، میدان برگشت‌ناپذیر 1.79 T تسلا و میدان بحرانی اول 1.56 T قابل دسترسی است.

تشکر و سپاسگزاری

نویسندگان از پژوهشگاه نیرو به دلیل حمایت‌های متعدد صمیمانه تشکر و قدردانی می‌کنند.

کاهش داده و از طرفی باعث افزایش فازهای ابررسانایی ثانویه می‌شود. به علاوه، ثابت‌های شبکه کامپوزیت‌ها نسبت به نمونه خالص Bi-2223 تغییر محسوس نیافته است. بنابراین می‌توان گفت که نانوذرات کاربید سیلیسیم به ساختار شبکه Bi-2223 وارد نشده‌اند. بر طبق نتایج اندازه‌گیری‌های مغناطیسی، با افزودن 0.4% درصد وزنی نانوذرات کاربید سیلیسیم به ابررسانای Bi-2223 خواص ابررسانایی مطلوبی نظیر چگالی

واژه‌نامه

1. high temperature superconductors
2. pinning
3. vortices
4. X-ray diffraction
5. Material Analysis Using Diffraction
6. field emission scanning electron microscope
7. superconducting quantum interface device
8. Bean's equation

مراجع

1. Aytekin, İ.S., Ersin, M., Özkurt, B., "Physical, magnetic and mechanical properties of Bi-2212 superconductors prepared by high pelletization pressure", *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*, Vol. 26, pp. 1799–1805, 2015.
2. Safran, S., Ozturk, H., Bulut, F., Ozturk, O., "The influence of re-pelletization and heat treatment on physical, superconducting, magnetic and micro-mechanical properties of bulk BSCCO samples prepared by ammonium nitrate precipitation method", *Ceramic International*, Vol. 43, pp. 1–7, 2017.
3. Li, D., Zhang, H., Gao, X., Yang, S., Chen, Q., "Effect of the fabrication process on the electrical properties of polycrystalline $\text{Bi}_{1.7}\text{Pb}_{0.3}\text{Sr}_2\text{Ca}_2\text{Cu}_3\text{O}_{10}$ ", *Ceramic International*, Vol. 42, pp. 1728–1732, 2016.
4. Tinkham, M., "Introduction to Superconductivity", First ed., p. 98, Mineola, New York, 1996.
5. Sharma, D., Kumar, R., Awana, V.P.S., "DC and AC susceptibility study of sol-gel synthesized $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_{8+\delta}$ superconductor", *Ceramic International*, Vol. 39, pp. 1143–1152, 2013.
6. Marta, L., Zaharescu, M., "Different sol-gel routes for the bscCo synthesis", *Revue Roumaine de Chimie*, Vol. 47, pp. 1261–1266, 2002.
7. Lu, X., Wang, T., Qi, Y., "Crystalline characteristics and superconducting properties of Bi2212 thin films by Pechini sol-gel method: effect of heating rate on the film growth", *Journal of Sol-Gel Science and Technology*, Vol. 77, pp. 100–108, 2016.
8. Chen, Y.L., Stevens, R., "2223 Phase Formation in Bi(Pb)-Sr-Ca-Cu-O: 111, The Role of Atmosphere", *Journal of American Ceramic Society*, Vol. 75, pp. 1160–1166, 1992.
9. Pakdil, M., Bekiroglu, E., Oz, M., Saritekin, N.K., Yildirim, G., "Role of preparation conditions of Bi-2223 ceramic materials and optimization of Bi-2223 phase in bulk materials with experimental and statistical approaches", *Journal of Alloys and Compounds*, Vol. 673, pp. 205–214, 2016.
10. Darsono, N., Raju, D.Y.K., "Effects of the sintering conditions on the structural phase evolution and T_C of $\text{Bi}_{1.6}\text{Pb}_{0.4}\text{Sr}_2\text{Ca}_2\text{Cu}_3\text{O}_7$ prepared using the citrate sol-gel method", *Journal of Superconductivity and Novel Magnetism*, Vol. , pp. 1491–1497, 2016.
11. Huang, Y.T., Shy, D.S., Chen, L.J., "Effects of powder calcination on the properties of Bi-2223 tape", *Physica. C*, Vol. 254, pp. 159–166, 1995.
12. Yahya, S.Y., Jumali, M.H., Lau, K.T., Abd-Shukor, R., "Transport critical current density of Bi-Sr-Ca-Cu-O/Ag superconductor tapes with addition of magnetic nanopowder $\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$ ", *Science Technology and Advanced Materials*, Vol. 6, pp. 525–528, 2005.
13. Foltyn, M., Civale, S. R., MacManus-Driscoll, L., Jia, J. L., Maiorov, Q. X., Wang, B., Maley, H., "Materials science challenges for high-temperature superconducting wire", *Nature Materials*, Vol. 6, pp. 631–642, 2007.
14. Fallah-Arani, H., Baghshahi, S., Sedghi, A., Stornaiuolo, D., Tafuri, F., Massarotti, D., Riahi-Noori, N., "The influence of heat treatment on the microstructure, flux pinning and magnetic properties of bulk BSCCO samples prepared by sol-gel route", *Ceramic International*, Vol. 39, pp. 1143–1152, 2017.
15. Fallah-Arani, H., Baghshahi, S., Sedghi, A.,

- Stornaiuolo, D., Tafuri, F., Riahi-Noori, N., "Enhancement in superconducting properties of $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{Ca}_1\text{Cu}_2\text{O}_{8+\delta}$ (Bi-2212) by means of boron oxide additive", *Physica C: Superconductivity and its Applications*, Vol. 548, pp. 31-39, 2018.
16. Biju, A. Vinod, K., Sarun, P.M., Syamaprasad, U., "Highly enhanced flux pinning in Pb and rare earth codoped Bi-2212", *Applied Physics Letters*, Vol. 90, pp. 2505-2510, 2007.
17. Ghattas, A., Annabi, M., Zouaoui, M., Ben Azzouz, F., Ben Salem, M., "Flux pinning by Al-based nano particles embedded in polycrystalline (Bi,Pb)-2223 superconductors", *Physica C: Superconductivity and its Applications*, Vol. 468, pp. 31-38, 2008.
18. Saritekin, N.K., Pakdil, M., Bekiroglu, E., Yildirim, G., "Examination of effective nucleation centers for flux pinning of vortices and optimum diffusion annealing temperature for Au-diffusion-doped Bi-2212 polycrystalline compound", *Journal of Alloys and Compounds*, Vol. 688, pp. 637-646, 2016.
19. Zouaoui, M., Ghattas, A., Annabi, M., Ben Azzouz, F., Ben Salem, M., "Effect of nano-size ZrO_2 addition on the flux pinning properties of (Bi, Pb)-2223 superconductor", *Superconducting Science and Technology*, Vol. 21, pp. 125005, 2008.
20. Dong, Y., Sun, A., Zhang, H., Zhang, M., Xu, B., "The Effect of Sn Substitution of Pb on microstructure and superconducting properties of Bi-Pb-Sr-Ca-Cu-O superconductor", *Journal of Superconductivity and Novel Magnetism*, Vol. 29, pp. 2-6, 2016.
21. Abdolhosseini, I., Kameli, P., Salamati, H., "The Effect of Precursor Powder Size on the Microstructure and Intergranular Properties of $(\text{Bi,Pb})_2\text{Sr}_2\text{Ca}_2\text{Cu}_3\text{O}_y$ Superconductors", *Japanese Journal of Applied Physics*, Vol. 47, No. 6, pp. 4505-4510, 2008.
22. Zelati, A., Amirabadizadeh, A., Kompany, A., Salamati, H., Sonier, J. E., "Critical Current Density and Intergranular Coupling Study of the Dysprosium Oxide Nanoparticle Added $\text{Bi}_{1.6}\text{Pb}_{0.4}\text{Sr}_2\text{Ca}_2\text{Cu}_3\text{O}_y$ Superconductor", *Journal of Superconductivity and Novel Magnetism*, Vol. 27, pp. 2185-2193, 2014.
23. Ahangari, M., Daadmehr, V., "Investigation of structural effects of Bi nanoparticle addition on HTSC BSCCO-2223 through the sol-gel method", *Journal of Interface, Thin Films and Low Dimensional Systems*, Vol. 2, pp. 51-55, 2018.
24. Fallah-Arani, H., Baghshahi, S., Sedghi, A., "Impact of functionalized SiC nano-whisker on the flux pinning ability and superconductor features of Bi-2223 ceramics", *Ceramic International*, Vol. 47, No.3, pp. 3706-3712, 2021.
25. Bae, M., Kim, M., Lee, S., "Effect of HgI_2 intercalation on $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_y$: Interlayer coupling effect", *Physical Review B*, Vol. 53, pp. 416-421, 2000.
26. Aftabi, A., Mozaffari, M., "Intergranular coupling, critical current density, and phase formation enhancement of polycrystalline nanoparticle addition", *Journal of Superconductivity and Novel Magnetism*, Vol. 28, pp. 2337-2343, 2015.
27. Kvartskhava, I.G., Sarkisyan, A.G., Zhghamadze, V., "Enhancement of phase formation and critical current density in (bi,pb)-2223 superconductor by boron addition and ball milling", *International Journal of Advanced Physics*, Vol. 3, pp. 1-5, 2016.

INVESTIGATION OF SUPERCONDUCTIVITY AND MAGNETIC PROPERTIES OF $\text{Bi}_{1.6}\text{Pb}_{0.4}\text{Sr}_2\text{Ca}_2\text{Cu}_3\text{O}_{10+\theta}$ CERAMIC SUPERCONDUCTOR WITH ADDITION OF SILICON CARBIDE NANOPARTICLES

H. Fallah-Arani^{1*}, N. Riahi-Noori¹, S. Baghshahi², A. Sedghi² and F. Shahbaz Tehrani¹

¹ Non-Metallic Materials Research Group, Niroo Research Institute (NRI), Tehran, Iran

² Department of Materials Engineering, Faculty of Engineering, Imam Khomeini International University, Qazvin, Iran

(Received: 30 September 2021; Accepted: 12 February 2022)

ABSTRACT

In this research, the effect of addition of silicon carbide (SiC) nanoparticles on the improvement of the structural, superconductivity, magnetic, and flux pinning properties of high-temperature superconductor $\text{Bi}_{1.6}\text{Pb}_{0.4}\text{Sr}_2\text{Ca}_2\text{Cu}_3\text{O}_{10+\theta}$ (Bi-2223) was investigated. The Bi-2223 ceramic superconductor was prepared using the sol-gel method, and silicon carbide nanoparticles were modified by Azobisisobutyronitrile (AIBN). The X-ray diffractometry, field emission scanning electron microscopy, magnetic susceptibility, and hysteresis loop measurements were performed to characterize the synthesized compounds. Based on the magnetic measurements, the superconductivity transition temperature dropped with an increase in the content of nanoparticles. Also, the maximum magnetization, hysteresis loop width, critical current density, and magnetic flux pinning force belonged to the sample with 0.4 wt.% SiC nanoparticles.

Keywords: Bi-2223 superconductor, silicon carbide, magnetic susceptibility, flux pinning.

1. INTRODUCTION

Among the high-temperature superconductors (HTS), the Bi-Sr-Ca-Cu-O (BSCCO) system exhibits some benefits for technological applications [1]. The improvement of the critical current density (J_c) is one of the important aims for researchers in the BSCCO superconductors. The J_c can be enhanced by the addition of artificial pinning centers such as dislocations, nanorods, nanoparticles (NPs), because of the flux creep prevention. Various studies were reported by Annabi et al. [1] to investigate the influence of Al_2O_3 -NPs on the superconductivity properties of (Bi, Pb)-2223, Abou-Aly et al. [2] to investigate the effect of SnO_2 -NPs on the physical properties of (Bi, Pb)-2223 phase, and Guo [3] for studying the effect of nano-sized SiC additive on the microstructure and pinning features of the silver-sheathed Bi-2223 superconducting tapes. Although many studies revealed on the effect of NP additions on the BSCCO system, the influence of SiC nanoparticles (SiC-NPs) on the superconductivity properties of BSCCO is extremely rare. So, in this study, the SiC-NPs

additive was selected as a new pinning center and its effect on the structural, microstructural, superconductivity, and pinning properties of the Bi-2223 superconductor was investigated.

2. MATERIALS AND METHODS

The surface of SiC-NP was modified by the organic compound of 2,2'-Azobisisobutyronitrile (AIBN). For this purpose, 1 gr of SiC-NP was dispersed using an ultrasonic bath for 10 min and then stirred with the existence of nitrogen gas flow for 30 min. The obtained solution was mixed with AIBN and stirred at 80 °C for 5 h. After that, the modified SiC-NP was washed with toluene and added to the methanol and sodium hydroxide solution. To hydrolyze the cyano groups to carboxyl groups, the solution was stirred at 60 °C for 24 h. For separation of the SiC-NP from the solution, the resulting solution was centrifuged at 10000 rpm for 10 min. Lastly, the modified SiC-NP was washed two times with water and dried at 120 °C for 12 h. The Bi-2223 superconductor was prepared through the sol-gel method as described in our preceding study [4]. The amount of SiC-NP additions was varied from $x=0.0$ to

*: hfallah@nri.ac.ir

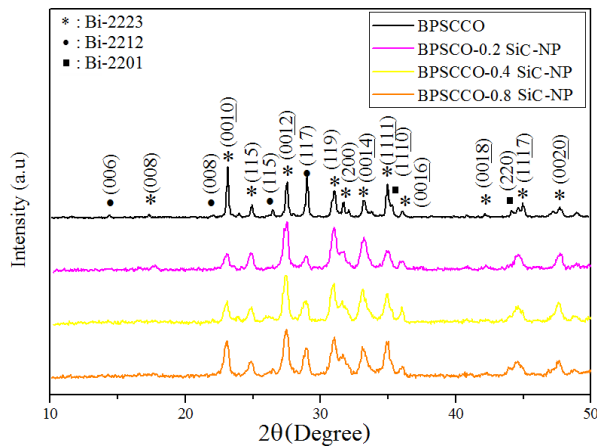


Figure 1. XRD patterns of the composites

$x=0.8$ wt.% of the entire mass of the compounds (with the steps of 0.2). Finally, the synthesized Bi-2223 superconductor was mixed with the modified SiC-NP and milled in an agate mortar for 30 min. The resulting powder was calcined at 820 °C for 24 h and pressed into pellets. The compounds were sintered at 850 °C for 100 h.

X-ray diffraction (XRD) phase analysis was performed with a PANalytical® PW3050/60 X-ray diffractometer with Cu $K\alpha$ radiation. Eventually, magnetization studies were investigated by a SQUID magnetometer.

3. RESULTS AND DISCUSSION

3.1. Structural studies

Figure 1 presents the XRD patterns of Bi-2223 specimens with different amounts of SiC-NP. To investigate the structural analysis, lattice parameter calculations, and the phase composition, the XRD patterns of the ceramics were distinguished using the MAUD software through Rietveld's method (see Table 1). Based on the MAUD analysis, all compounds were composed of the Bi-2223 as the major phase, and its volume fraction was reduced with increasing the SiC-NP content. Also, the Bi-2212 and Bi-2201 phases were existed as the negligible phases in all synthesized samples. Likewise, the addition of SiC-NP decreased and increased the volume fraction of major and minor phases, respectively.

3.2. Magnetic studies

Figure 2 exhibits the $\chi_{dc}(T)$ plots for the various amounts of SiC-NP under an applied magnetic field of $H=10$ Oe. As shown, the χ_{dc} slowly declined by decreasing temperature and a single

Table 1. The parameters for the synthesized composites

Sample x	Volume fraction of phases (%)			Lattice parameters	
	2223	2212	2201	$a \approx b$ (Å)	c (Å)
0.0	~89	~9	~2	3.823(1)	37.074(4)
0.2	~83	~10	~7	3.823(1)	37.074(3)
0.4	~81	~13	~6	3.823(2)	37.074(2)
0.8	~76	~14	~10	3.823(1)	37.074(1)

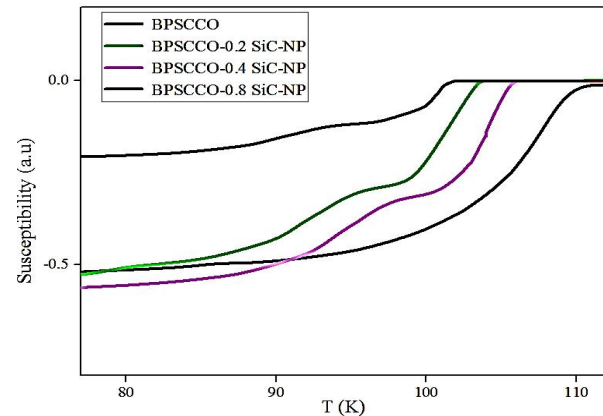


Figure 2. The χ_{dc} versus temperature for various amounts of SiC-NPs under $H=10$ Oe

superconductivity transition (attributed to the intra-granular transition) appeared at $T_c=110.9$ K for the pure sample. The same behavior about the $\chi_{dc}(T)$ was seen for the added samples, while the second superconductivity transition exhibited something else. The second superconductivity transition can be qualified for the inter-granular transition and belongs to the existence of undesirable phases like Bi-2212 and Bi-2201 in the added samples detected by XRD analysis.

The intra-granular transition temperature reduced with an increase in the SiC-NP addition that could be attributed to the strains created at the interface between the additive and superconducting matrix. Also, as displayed in Figure 2, the maximum magnetic susceptibility belonged to the sample with $x=0.4$ wt.% SiC-NP addition. This shows that although the existence of SiC-NP additions has decreased the intra-granular transition temperature, the magnetic properties such as complete diamagnetic and flux exclusion improve in the $x=0.4$ wt.%. The magnetic hysteresis loops of all samples between applied fields of $H=\pm 2$ T at 10 K are measured and presented in Figure 3. As shown, the surface area of hysteresis loops increased with an increase in the SiC-NP addition up to $x=0.4$ wt.% and then decreased with more contents.

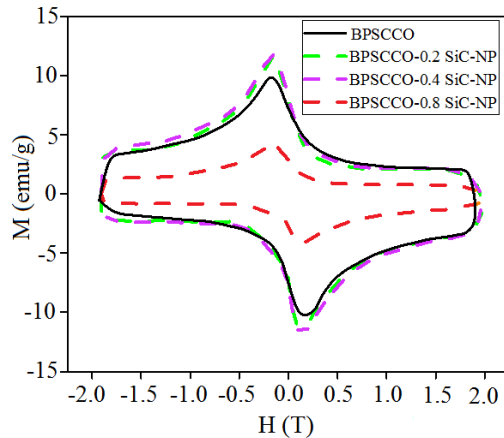


Figure 3. Magnetization hysteresis loops at 10 K

4. CONCLUSION

The influence of SiC-NP additive on the structural and superconductivity properties of Bi-2223 superconductors was investigated. XRD patterns indicated that SiC-NP altered the volume fraction of superconductivity phases, but did not modify the lattice parameters. Based on the magnetic studies, the highest H_{max} and J_C belonged to the $x=0.4$ wt.% SiC-NP sample.

ACKNOWLEDGEMENT

The authors are grateful to Niroo Research Institute for financial supports.

CONFLICT OF INTEREST

The authors declare that this article has been written by themselves with the financial support of Niroo Research Institute and has not been published elsewhere.

REFERENCES

1. Annabi, M., M'chirgui, A., Ben Azzouz, F., Zouaoui, Ben Salem, M., M., "Addition of nanometer Al_2O_3 during the final processing of (Bi,Pb)-2223 superconductors", *Physica C: Superconductivity and its Applications*, Vol. 405, pp. 25-33, 2004.
2. Abou-Aly, A.I., Abdel Gawad, M.M.H., Awad, R., G-Eldeen, I., "Improving the Physical Properties of (Bi, Pb)-2223 Phase by SnO_2 Nano-particles Addition", *Journal of Superconductivity and Novel Magnetism*, Vol. 24, pp. 2077-2084, 2011.
3. Guo, Y., "Addition of nanometer SiC in the silver-sheathed Bi2223 superconducting tapes", *Phys. C*, Vol. 311, pp. 65-74, 1999.
4. Fallah-Arani, H., Baghshahi, S., Sedghi, A., Stornaiuolo, D., Tafuri, F., Massarotti, D., "The influence of heat treatment on the microstructure, flux pinning and magnetic properties of bulk BSCCO samples prepared by sol-gel route", *Ceramic International*, Vol. 39, pp. 1143-1152, 2017.