

تأثیر فرایند سیتتر بر خواص الکتریکی و ریزساختاری تارگت کندوپاش و لایه‌ی نازک باریوم استرانسیوم تیتانات

محمد رضا درخشنده^۱، محمد جواد اشراقی^{۲*}

^۱ پژوهشگاه مواد و انرژی، پژوهشکده سرامیک، کرج، ایران.

^۲ پژوهشگاه مواد و انرژی، پژوهشکده نیمه‌هادیها، کرج، ایران.

تاریخ ثبت اولیه: ۱۳۹۶/۲/۶، تاریخ دریافت نسخه اصلاح شده: ۱۳۹۶/۴/۲۸، تاریخ پذیرش قطعی: ۱۳۹۶/۵/۱۰

چکیده در این پژوهش، اثر دمای سیتتر بر ریزساختار بدنه‌های $Ba_{0.5}Sr_{0.5}TiO_3$ و خواص الکتریکی لایه‌های نازک ایجاد شده به روش کندوپاش مورد بررسی قرار گرفت. ترکیب سرامیکی $Ba_{0.5}Sr_{0.5}TiO_3$ تک‌فاز و بدون ناخالصی با استفاده از روش حالت جامد سنتز شد. به منظور بهینه‌یابی دمای پخت، این ترکیب در محدوده دمای $1200^{\circ}C$ تا $1400^{\circ}C$ سیتتر شد. نتایج نشان داد که نمونه‌ی سیتتر شده در دمای $1250^{\circ}C$ از ۹۵٪ چگالی نسبی و میانگین اندازه دانه‌های $8 \mu m$ برخوردار می‌باشد که به منظور استفاده برای تارگت کندوپاش مناسب می‌باشد. گاف انرژی لایه‌ی نازک اعمال شده از تارگت ساخته شده تحت شرایط بهینه ۳٫۴ eV و ثابت دی الکتریک آن در فرکانس ۱۰ kHz برابر با ۴۴۰۰ به دست آمد که نشان‌دهنده‌ی خواص مطلوب لایه‌های نازک این ترکیب از تارگت ساخته شده‌ی آن برای کاربردهای خازنی می‌باشد. به منظور بررسی‌های ریزساختاری، فازی و خواص الکتریکی از آزمون‌های XRD، میکروسکوپی نوری، اندازه‌گیری چگالی، UV-Vis و اندازه‌گیری ثابت دی الکتریک استفاده شد.

کلمات کلیدی: باریوم استرانسیوم تیتانات، تارگت کندوپاش، سیتتر، سنتز حالت جامد.

The Effect of Sintering Process on Electrical and Microstructural Properties of Barium-Strontium-Titanate Sputtering Target and its Thin Film

Mohammad Reza Derakhshandeh¹, Mohammad Javad Eshraghi^{2*}

¹Materials and Energy Research Center, Department of Ceramic, Tehran, Iran.

²Materials and Energy Research Center, Department of Semiconductors, Tehran, Iran.

Abstract In this study the effect of sintering parameters on the microstructure and electrical properties of the barium strontium titanate sputtering target is investigated. For optimizing the sintering temperature, BST compacts sintered at various temperatures ranging from 1200 to 1400 °C for 2 hours. The sintered Barium Strontium Titanate sputtering target comprising with a high density, purity and a fine-grained microstructure has been also fabricated. Optimized calcining and sintering condition was obtained by controlling sintering temperature and time to fabricate single phase, high relative density sintered body. A relative density of up to 95% and mean grain size of 8 μm were reached at the sintering temperature of 1250°C. The relative permittivity of thin films at 10 KHz was around 4400. Also the thin film bandgap was around 3.2 eV. The densities of the sintered samples were measured using the Archimedes method. Characteristics of the body were analyzed by X-ray diffraction (XRD), optical microscopy. Dielectric permittivity (ϵ_r) were measured with an HP 4192A impedance analyzer and thin film bandgap was analyzed by UV-Vis method.

Keywords: Barium Strontium Titanate, Sputtering target, sintering, Solidstate synthesis.

۱- مقدمه

بخار نیز روشی مناسب برای رسوب لایه‌ی نازک یکنواخت بر روی قطعات با ابعاد بزرگ می‌باشد که این امکان را برای تولید خازن‌ها با صفحات بزرگ، به‌منظور افزایش ظرفیت خازن‌ها فراهم می‌سازد. اما پیش‌ماده‌های این روش اغلب گران‌قیمت، قابل اشتعال و یا سمی می‌باشند [۱۳-۱۶]. اگر منبع جامدی از ماده‌ی مورد نظر برای لایه‌نشانی در دسترس باشد، روش لایه‌نشانی کندوپاش با امواج رادیویی به‌عنوان یک روش مقرون به‌صرفه، تمیز و صنعتی می‌تواند جایگزین سایر روش‌های لایه‌نشانی به‌منظور لایه‌نشانی دی‌الکتریک خازن‌ها باشد [۱۷-۱۹]. اگرچه کندوپاش هم‌زمان از دو تارگت BaTiO_3 و SrTiO_3 قابلیت لایه‌نشانی لایه‌های BST با ترکیب استوکیومتری گسترده را دارد، اما استفاده از یک تارگت کندوپاش BST با نسبت Ba به Sr برابر می‌تواند لایه‌های نازک BST با یکنواختی در سرتاسر لایه با خواص مطلوب را فراهم آورد.

امروزه، در لایه‌نشانی کندوپاش به‌منظور افزایش سرعت لایه‌نشانی لایه‌ها، رویکرد محققین و صنایع در جهت به‌کارگیری توان‌های الکتریکی بالاتر در فرایند لایه‌نشانی می‌باشد [۱۷ و ۱۸]. اما مشکلات متعددی با این افزایش توان‌های الکتریکی پیش‌رو می‌باشد. ترد بودن مواد دی‌الکتریک و توانایی پایین این ماده‌ها در برابر توان‌های الکتریکی بالا منجر به ترک خوردن و شکستن آن‌ها در حین فرایند لایه‌نشانی می‌گردد. بنابراین، نیاز به تولید مواد دی‌الکتریک با بیشترین مقاومت در برابر توان‌های الکتریکی زیاد به‌منظور دستیابی به سرعت‌های بالای لایه‌نشانی احساس می‌گردد. با تولید تارگت‌های کندوپاش با چگالی نسبی بالا و اندازه‌های ریز می‌توان، مشکل شکستن این مواد را تا حدودی مرتفع نمود. از طرفی، ریز بودن اندازه‌ها، خلوص و یکنواخت بودن ترکیب در خواص الکتریکی لایه‌های نازک این مواد تأثیر بسزایی دارد [۱۹ و ۲۰].

بنابراین، ترکیب BST گزینه‌ی مناسبی برای ساخت تارگت کندوپاش به‌منظور استفاده‌ی لایه‌ی نازک آن در خازن‌ها می‌باشد که تاکنون اثر پارامترهای پخت از جمله دمای سیتتر به‌منظور دستیابی به تارگت کندوپاش با چگالی نسبی بالا و اندازه‌های ریز مورد بررسی قرار نگرفته است. لذا در این پژوهش پودر BST برای استفاده به‌عنوان تارگت کندوپاش با

خازن‌های لایه نازک، به‌دلیل پایداری بالا، اندوکتانس پایین و کم‌هزینه بودن، در صنایع مرتبط با امواج رادیویی و مایکروویو و ارتباطات سیار کاربردهای فراوانی دارند [۱ و ۲]. ترکیب باریوم استرانسیوم تیتانات (BST) به‌عنوان یکی از مواد دی‌الکتریک، به‌دلیل خواص مطلوب خود از قبیل ثابت دی‌الکتریک بالا، جریان ناشی پایین، مقاومت در برابر شکست دی‌الکتریک بالا، غیرسمی بودن (بدون سرب) و قابلیت تنظیم‌پذیری با تغییر استوکیومتری آن توجه زیادی را به‌منظور استفاده در خازن‌های لایه نازک جلب کرده است [۳-۶]. ترکیب BST یک محلول جامد از دو ترکیب باریوم تیتانات (BaTiO_3) و استرانسیوم تیتانات (SrTiO_3) می‌باشد. دمای کوری ترکیب $\text{Ba}_x\text{Sr}_{1-x}\text{TiO}_3$ به نسبت Ba به Sr در ترکیب وابسته است. دمای کوری ترکیب BaTiO_3 برابر با 120°C می‌باشد، درحالی‌که ترکیب SrTiO_3 پارالکتریک بوده و تبدیل فازی فروالکتریک به پارالکتریک ندارد. بنابراین، افزایش نسبت Sr به Ba در BST موجب کاهش دمای کوری ترکیب می‌گردد. بنابراین، می‌توان با تغییر نسبت Sr به Ba برای اصلاح دمای تبدیل از فروالکتریک به پارالکتریک در ترکیب BST استفاده کرد. هنگامی‌که کسر مولی Ba در ترکیب بین ۰٫۷-۱ باشد، ترکیب BST در دمای محیط فروالکتریک بوده و اگر کسر مولی آن کمتر از ۰٫۷ باشد، ترکیب BST در دمای محیط، پارالکتریک می‌باشد [۷ و ۸].

برای استفاده از این ماده جهت ساخت خازن، به کارگیری روش‌های رسوب لایه نازک که در حال حاضر به خوبی در صنعت نیمه هادیها تثبیت شده است، اجتناب‌ناپذیر است. پژوهش‌های متعددی در مورد اعمال لایه‌های نازک BST به روش‌های مختلف با نسبت‌های مختلف Ba به Sr صورت گرفته است. روش‌های لایه‌نشانی از قبیل سل-ژل، رسوب شیمیایی بخار و رسوب فیزیکی بخار، روش‌های متداول برای لایه‌نشانی لایه‌های نازک می‌باشد. خواص الکتریکی مطلوب این لایه‌های نازک با استفاده از فرایند سل-ژل گزارش شده است. اما سرعت پایین این روش و آزمایشگاهی بودن آن، استفاده از این روش را در صنایع الکترونیک محدود می‌سازد [۹-۱۲]. روش رسوب شیمیایی

در فشار 2×10^{-3} torr و توان 120W انجام شد. برای اطمینان از فاز تشکیل شده، از پودر کلسینه شده و همچنین نمونه‌های سینتر شده آزمون پراش پرتوی ایکس (XRD، مدل Philips X'Pert) با منبع تولید کننده پرتوی ایکس مسی به عمل آمد. اندازه‌گیری بلورک‌های پودر سنتز شده با استفاده از رابطه‌ی ویلیامسون-هال محاسبه گردید. به منظور اندازه‌گیری چگالی نسبی نمونه‌ها از استاندارد ASTM شماره C۳۷۳ و بررسی ریزساختار نمونه‌های سینتر شده از میکروسکوپ نوری استفاده شد. در نهایت، گاف انرژی لایه‌های نازک به دست آمده پس از کندوپاش از تارگت BST، توسط آزمون UV-Vis (مدل Rey Leigh UV-2601) و همچنین ضریب دی‌الکتریک لایه‌های نازک اعمال شده در محدوده فرکانس (10^4 - 10^6 هرتز) با استفاده از آزمون امپدانس آنالایزر (مدل HP 4192A) محاسبه گردید.

جدول ۱. شرایط سینتر نمونه‌های BST.

زمان ماندگاری (h)	نرخ حرارت‌دهی (C/min°)	دمای پخت (C°)
۲	۵	۱۲۰۰
۲	۵	۱۲۵۰
۲	۵	۱۳۰۰
۲	۵	۱۳۵۰
۲	۵	۱۴۰۰

۳- نتایج و بحث

در شکل ۱ الگوی پراش اشعه ایکس پودر $\text{Ba}_{0.5}\text{Sr}_{0.5}\text{TiO}_3$ که در دمای 1100°C به مدت پنج ساعت کلسینه شده، آورده شده است. طبق این الگو تنها فاز BST شناسایی شده و هیچ گونه فاز ناشی از حضور ناخالصی و یا فاز مواد اولیه واکنش داده نشده، مشاهده نمی‌گردد. لازم به ذکر است که فاز شناسایی شده مربوط به ترکیب $\text{Ba}_{0.5}\text{Sr}_{0.5}\text{TiO}_3$ ساختار پروسکایت بوده که با کارت مرجع با شماره‌ی ۱۳۹۵-۰۰۰۳۹ هم‌خوانی دارد. بنابراین، نتیجه حاصل از XRD ترکیب سنتز شده نشان می‌دهد که شرایط کلسیناسیون از جمله دما و زمان ماندگاری به منظور دستیابی به ترکیب تک‌فاز $\text{Ba}_{0.5}\text{Sr}_{0.5}\text{TiO}_3$ مناسب بوده است. اندازه بلورک‌های ترکیب سنتز شده با استفاده از رابطه‌ی ویلیامسون-هال حدود ۸۰

نسبت Ba به Sr برای سنتز و پارامترهای سینتر از جمله دما برای دستیابی به بدنه‌های ریزدانه با چگالی نسبی بالا بررسی خواهد شد. همچنین فرایند لایه‌نشانی به روش کندوپاش با استفاده از تارگت ساخته شده انجام و خواص الکتریکی لایه‌های نازک BST مورد ارزیابی قرار خواهد گرفت.

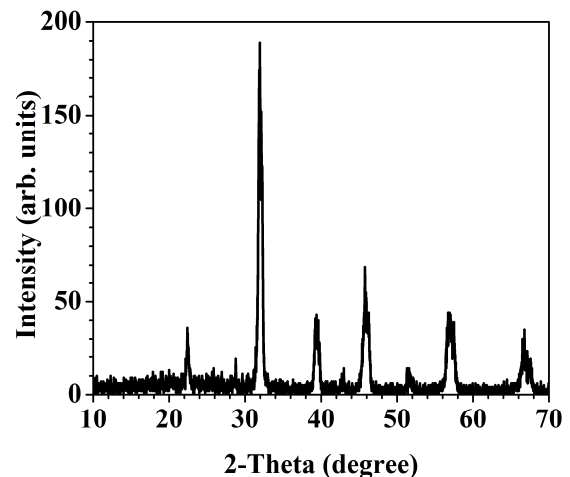
۲- روش تحقیق

برای سنتز پودر BST با ترکیب استوکیومتری $\text{Ba}_{0.5}\text{Sr}_{0.5}\text{TiO}_3$ پودرهای کربنات باریوم، کربنات استرانسیوم و اکسید تیتانیوم (خریداری شده از شرکت Merck با خلوص ۹۹/۹۹٪) با نسبت‌های استوکیومتری مشخص، با نسبت گلوله به پودر پنج به یک در آسیاب سیاره‌ای با کاپ و گلوله‌های زیرکونیایی با دور ۱۵۰ دور بر دقیقه به مدت پنج ساعت در محیط استون مخلوط شدند. مواد مخلوط شده در خشک‌کن به مدت ۲۴ ساعت در دمای 120°C خشک شد. به منظور دستیابی به فاز مورد نظر، پودر خشک‌شده با سرعت گرمایش $10^\circ\text{C}/\text{min}$ به مدت پنج ساعت در دمای 1100°C در کوره کلسینه شد. خریداری پودر BST سنتز شده پس از کلسیناسیون توسط آسیاب با کاپ و گلوله زیرکونیایی با نسبت گلوله به پودر ۱۰ به ۱ با سرعت 200rpm به مدت پنج ساعت صورت گرفت. پس از فرایند خریداری و آسیاب، پودر BST با محلول ۲٪ پلی وینیل الکل (PVA) با درصد ۸٪ وزنی مخلوط و پس از ۲۴ ساعت پی‌رسازی به منظور گرانول کردن پودر از الک مش ۴۵ عبور داده شد. در نهایت، پودر گرانوله‌شده با استفاده از پرس تک‌محوره و قالب با قطر یک سانتی‌متر تحت فشار ۱۸۰ مگاپاسکال پرس و به روش سینتر بدون فشار در دماهای مختلف سینتر شد. شرایط سینتر نمونه‌ها در جدول ۱ آورده شده است. پس از بهینه‌یابی شرایط سینتر قرص‌های BST، تارگت کندوپاش آن با استفاده از قالب با قطر 7.62 سانتی‌متر پرس و در دمای 1250°C سینتر شد. تارگت آماده‌شده در دستگاه آزمایشگاهی کندوپاش مغناطیسی (مدل MSS ۱۶۰ ساخت شرکت جهاد دانشگاهی شریف) مورد استفاده قرار گرفت و لایه‌نشانی BST بر روی لام شیشه‌ای به منظور بررسی خواص الکتریکی آن انجام شد. قبل از فرایند لایه‌نشانی، زیرلایه‌ها در حمام استون شستشو داده شده و پس از آن با آب دیونیزه شسته و خشک شدند. لایه‌نشانی تحت اتمسفر آرگون

نانومتر به دست آمد.

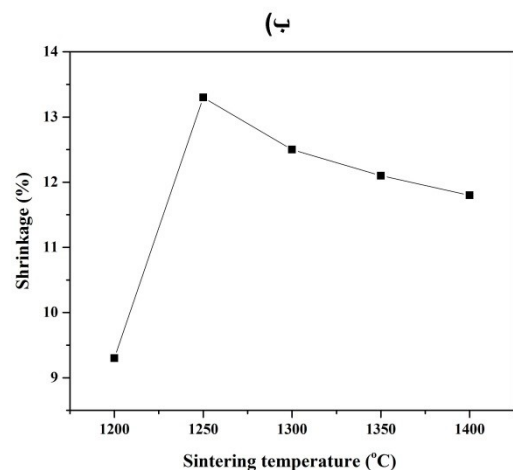
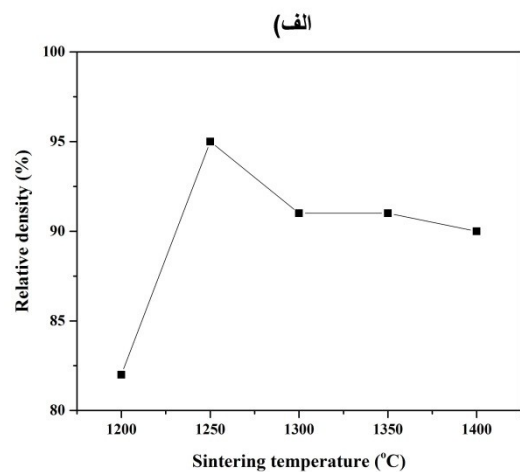
همان‌طور که مشاهده می‌گردد، نمونه‌ی سینتر شده در دمای 1200°C دارای چگالی نسبی ۸۲٪ بوده که نشان‌دهنده‌ی کافی نبودن دمای سینتر به منظور چگالش می‌باشد. با افزایش دمای سینتر به 1250°C چگالی نسبی تا ۹۵٪ افزایش پیدا کرده است. همچنین با افزایش دمای سینتر مشاهده می‌گردد که چگالی نسبی تا ۹۰٪ کاهش پیدا کرده است.

شکل ۳ تصاویر میکروسکوپی نمونه‌های سینتر شده در دماهای مختلف را نشان می‌دهد. مطابق با شکل ۳ (الف) مشاهده می‌گردد که فرایند سینتر در دمای 1200°C کامل نشده است و همچنین مطابق با شکل ۳ (ج) - (ه) مشاهده می‌گردد که افزایش دمای پخت منجر به رشد دانه در نمونه‌ها شده است. طبق این تصاویر مشاهده می‌گردد که بیشترین اندازه دانه مربوط به نمونه‌ی سینتر شده در دمای 1400°C و بهینه‌ی اندازه دانه‌ها مربوط به نمونه‌ی سینتر شده در دمای 1250°C می‌باشد. بنابراین، می‌توان کاهش چگالی با افزایش دما بالاتر از 1250°C را به رشد افراطی دانه‌ها که منجر به افزایش تخلخل در نمونه‌ها می‌گردد نسبت داد. به منظور دستیابی به یک تارگت کندوپاش با خواص مناسب، میانگین اندازه دانه‌های کمتر مناسب می‌باشد. زیرا بدنه‌های سینتر شده با اندازه دانه‌های درشت‌تر از استحکام شکست پایین‌تری برخوردار می‌باشند و احتمال شکستن تارگت در حین فرایند کندوپاش در توان‌های بالا وجود دارد. همچنین چگالی نسبی بالا یک پارامتر ضروری دیگر برای استفاده به عنوان تارگت کندوپاش می‌باشد. در پژوهش‌های انجام شده گزارش شده است که از مواد سرامیکی با چگالی نسبی بالاتر از ۹۰٪ می‌توان به عنوان تارگت کندوپاش استفاده نمود چرا که چگالی بالا موجب کاهش تخلخل و افزایش شوک‌پذیری حرارتی قطعه در حین فرایند کندوپاش می‌گردد. همچنین، کاهش اندازه دانه طبق رابطه‌ی هال-پچ می‌تواند گفت که با کاهش اندازه دانه استحکام قطعه افزایش می‌یابد [۲۱]. بنابراین، به منظور ساخت تارگت کندو-پاش با بیشترین چگالی و کمترین اندازه‌ی دانه، دمای پخت 1250°C به عنوان دمای بهینه انتخاب گردید. نتایج مربوط به چگالی، درصد انقباض حجمی و میانگین اندازه دانه‌های نمونه‌ها در جدول ۲ آورده شده است.

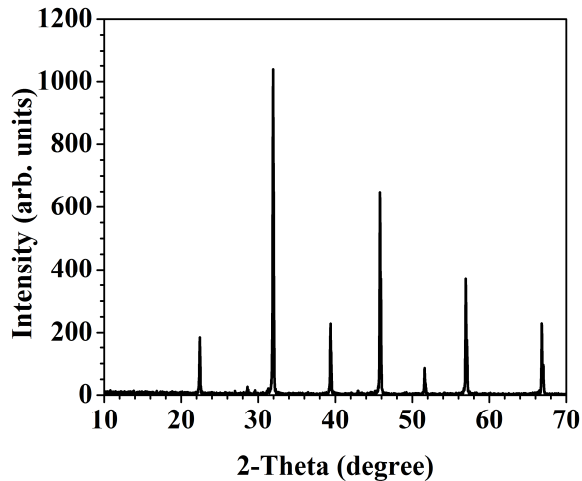


شکل ۱. الگوی XRD ترکیب BST کلسینه شده در دمای 1100°C به مدت پنج ساعت.

شکل ۲ (الف) و (ب) نمودار تأثیر دمای پخت بدنه‌های سرامیکی BST بر چگالی و درصد انقباض حجمی نمونه‌ها را نشان می‌دهد.



شکل ۲. (الف) چگالی نسبی (ب) درصد انقباض حجمی نمونه‌های سینتر شده در دماهای مختلف.



شکل ۴. الگوی XRD نمونه‌ی BST سینتر شده در دمای 1250°C به مدت دو ساعت.

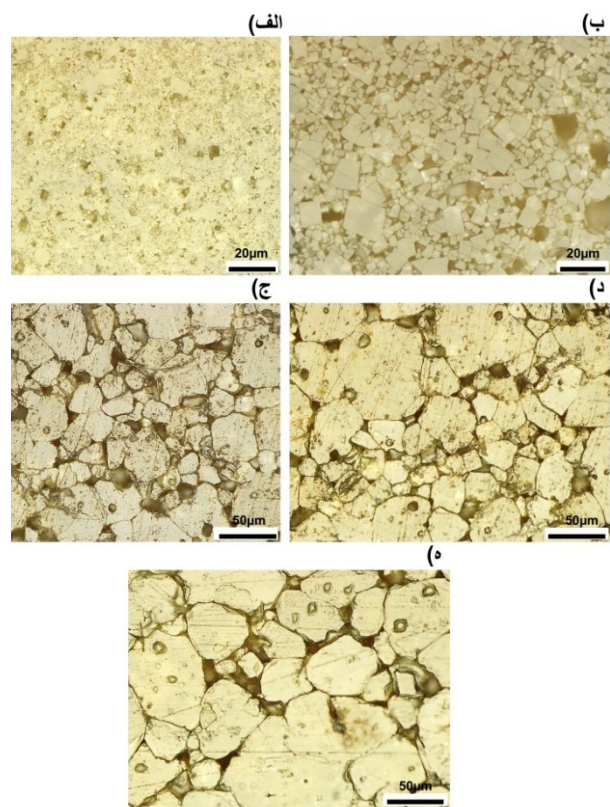


شکل ۵. نمای ظاهری تارگت کندوپاش BST سینتر شده در دمای 1250°C به مدت دو ساعت.

لایه نازک BST با ضخامت 100 nm بر روی لام شیشه‌ای اعمال شد. نرخ لایه‌نشانی با استفاده از دستگاه کنترل کننده‌ی ضخامت 5 nm/min گزارش شد. نمودار T_{auc} حاصل از آزمون UV-Vis لایه نازک BST ایجاد شده بر روی لام شیشه‌ای در شکل ۶ نشان داده شده است. با توجه به این نمودار می‌توان گاف انرژی لایه نازک اعمال شده را محاسبه کرد. روش UV-Vis یکی از رایج‌ترین روش‌ها برای تشخیص گاف انرژی لایه‌های نازک می‌باشد. در نمودار مربوط به این مواد، دو ناحیه قابل تشخیص است. در این محاسبات منطقه‌ی نزدیک به لبه در اندازه‌گیری گاف انرژی مهم می‌باشد که نشان‌دهنده‌ی تهییج الکترون در این منطقه می‌باشد. بدین ترتیب گاف انرژی لایه نازک BST اعمال شده برابر با 3.4 eV به دست آمد. لازم به ذکر است که مقدار به دست آمده در محدوده‌ی گاف انرژی BST می‌باشد [۲۲].

جدول ۲. چگالی، درصد انقباض و میانگین اندازه دانه‌های نمونه‌های سینتر شده.

دمای پخت ($^{\circ}\text{C}$)	چگالی نسبی (%)	انقباض حجمی (%)	میانگین اندازه دانه (μm)
۱۲۰۰	۸۲	۹,۳	-
۱۲۵۰	۹۵	۱۳,۳	2 ± 8
۱۳۰۰	۹۱	۱۲,۵	3 ± 28
۱۳۵۰	۹۱	۱۲,۱	6 ± 32
۱۴۰۰	۹۰	۱۱,۸	6 ± 42



شکل ۳. تصاویر میکروسکوپی ترکیب BST سینتر شده در دماهای (الف) 1200°C ، (ب) 1250°C ، (ج) 1300°C ، (د) 1350°C و (ه) 1400°C .

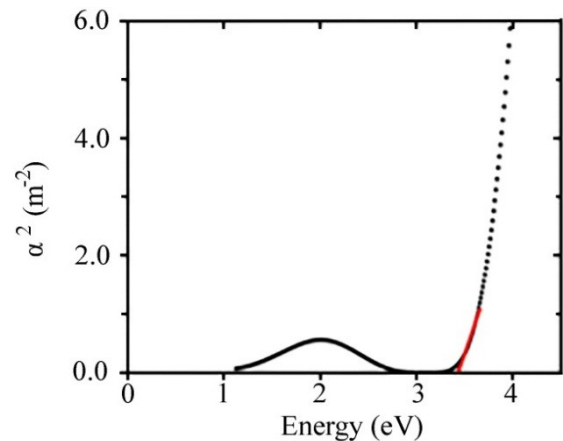
الگوی XRD نمونه‌ی سینتر شده تحت شرایط بهینه (دمای پخت 1250°C) در شکل ۴ نشان داده شده است. با مقایسه‌ی این الگو با الگوی XRD ترکیب سنتز شده می‌توان دریافت که پهنای پیک‌ها در نیمه‌ی ارتفاع (FWHM) پس از فرایند پخت کاهش پیدا کرده است. این اثر به علت افزایش اندازه دانه‌ها ناشی از فرایند پخت می‌باشد که سبب کاهش FWHM پیک‌ها در الگوی XRD آن شده است.

شکل ۵ نمایی از تارگت ساخته شده در شرایط بهینه را نشان می‌دهد که فاقد هرگونه ترک بوده و از استحکام مطلوبی برخوردار می‌باشد.

نمونه‌ی سیترشده در دمای °C ۱۲۵۰ از ۹۵٪ چگالی نسبی و میانگین اندازه دانه‌های $8 \mu\text{m}$ برخوردار می‌باشد که به‌منظور استفاده برای تارگت کندوپاش مناسب می‌باشد. گاف انرژی لایه‌ی نازک اعمال شده از تارگت ساخته شده تحت شرایط بهینه 3.4 eV و ثابت دی‌الکتریک آن در فرکانس 10 kHz برابر با 4400 به دست آمد.

مراجع

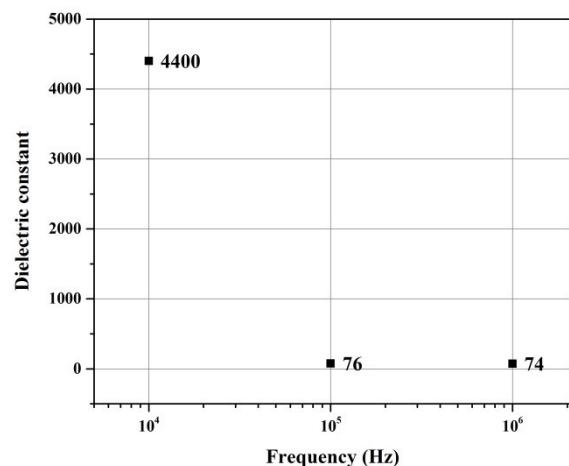
- Graddage, N., Chu, T.-Y., Ding, H., Py, C., Dadvand, A. and Tao, Y., Inkjet printed thin and uniform dielectrics for capacitors and organic thin film transistors enabled by the coffee ring effect, *Organic Electronics*, 29 (2016) 114-119.
- Yang, Y., Li, L., Ruan, G., Fei, H., Xiang, C., Fan, X. and Tour, J.M., Hydrothermally Formed Three-Dimensional Nanoporous $\text{Ni}(\text{OH})_2$ Thin-Film Supercapacitors, *ACS Nano*, 8(9) (2014) 9622-9628.
- Roy, D. and Krupanidhi, S.B., Excimer laser ablated barium strontium titanate thin films for dynamic random access memory applications, *Applied Physics Letters*, 62 (1993) 1056-1058.
- Bao, P., Jackson, T.J., Wang, X. and Lancaster, M.J., Barium strontium titanate thin film varactors for room-temperature microwave device applications, *Journal Of Physics D: Applied Physics*, 41 (2008) 063001.
- Kwon, S.R., Huang, W.B., Zhang, S.J., Yuan, F.G. and Jiang, X.N., Flexoelectric sensing using a multilayered barium strontium titanate structure, *Smart Materials And Structures*, 22 (2013) 115017-115024.
- Bao, D., Wang, Z., Ren, W., Zhang, L. and Yao, X., Crystallization kinetics of $\text{Ba}_{0.8}\text{Sr}_{0.2}\text{TiO}_3$ sols and sol-gel synthesis of $\text{Ba}_{0.8}\text{Sr}_{0.2}\text{TiO}_3$ thin films, *Ceramics International*, 25 (1999) 261-265.
- Mohammadi, M.R. and Fray, D.J., Sol-gel derived nanocrystalline and mesoporous barium strontium titanate prepared at room temperature, *Particuology*, 9 (2011) 235-242.
- Adikary, S.U. and Chan, H.L.W., Ferroelectric and dielectric properties of sol-gel derived $\text{Ba}_x\text{Sr}_{1-x}\text{TiO}_3$ thin films, *Thin Solid Films*, 424 (2003) 70-74.
- Xu, H., MMICs using GaN HEMTs and Thin-Film BST Capacitors, PhD thesis, University of California, Santa Barbara, Santa Barbara. (2005).
- Reynolds, G.J., Kratzer, M., Dubs, M., Felzer, H. and Mamazza, R., Sputtered Modified Barium Titanate for Thin-Film Capacitor Applications, *Materials*, 5 (2012) 575-589.
- Hu, W., Yang, C., Zhang, W. and Liu, G., Characteristics of $\text{Ba}_{0.8}\text{Sr}_{0.2}\text{TiO}_3$ ferroelectric thin films by RF magnetron sputtering, *Ceramics International*, 33 (2007) 1299-1303.
- Kawahara, T., Yamauka, M., Makita, T., Naka, J., Yuuki, A., Mikami, N. and Ono, K., Step coverage and electrical properties of $(\text{Ba}, \text{Sr})\text{TiO}_3$ films prepared by liquid source chemical vapor deposition using $\text{TiO}(\text{DPM})_2$, *Japanese Journal of Applied Physics*, 33 (1994) 5129-5134.
- Feil, W.A., Wessels, B.W., Tonge, L.M. and Marks, T.J., Organometallic chemical vapor deposition of strontium titanate, *Journal of Applied Physics*, 67 (1990) 3858-3861.
- Sakabe, Y., Takeshima, Y., Tanaka, K., Multilayer ceramic capacitors with thin $(\text{Ba}, \text{Sr})\text{TiO}_3$ layers by



شکل ۶: نمودار α^2 لایه نازک BST اعمال شده به روش کندوپاش.

شکل ۷: نمودار ثابت دی‌الکتریک لایه نازک BST اعمال

شده به روش کندوپاش در محدوده‌ی فرکانس بین 10 kHz تا 1 MHz را نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌گردد، ثابت دی‌الکتریک در فرکانس 10000 Hz برابر با 4400 و با افزایش فرکانس ثابت دی‌الکتریک به شدت کاهش یافته است. علت آن را می‌توان به افزایش سرعت تغییر قطب‌ها (فرکانس) نسبت به دوقطبی‌های موجود در ماده نسبت داد.



شکل ۷: ثابت دی‌الکتریک لایه نازک BST برحسب فرکانس.

۴- نتیجه‌گیری

ترکیب سرامیکی $\text{Ba}_{0.5}\text{Sr}_{0.5}\text{TiO}_3$ با استفاده از روش حالت جامد سنتز شد. نتایج حاصل از آزمون XRD پس از مخلوط سازی و کلسیناسیون مواد اولیه در دمای °C ۱۱۰۰ به مدت پنج ساعت نشان داد که ترکیب $\text{Ba}_{0.5}\text{Sr}_{0.5}\text{TiO}_3$ تک‌فاز و بدون ناخالصی سنتز شده است. به‌منظور بهینه‌یابی دمای پخت، این ترکیب در دماهای مختلف سنتز شد. نتایج نشان داد که

- MOCVD, *Journal Electroceramics*, 3 (1999) 115–121.
15. Weiss, F., Lindner, J., Sénateur, J.P., Dubourdieu, C., Galindo, V., Audier, M., Abrutis, A., Rosina, M., Fröhlich, K., Haessler, W., Oswald, S., Figueras, A. and Santiso, J., Injection MOCVD: ferroelectric thin films and functional oxide superlattice, *Surface and Coatings Technology*, 133–134 (2000) 191–197.
 16. Jia, Q.X., Chang, L.H., Anderson, W.A., Low leakage current BaTiO₃ thin film capacitors using a multilayer construction, *Thin Solid Films*, 259 (1995) 264–269.
 17. Aijaz, A., Ji, Y.-X., Montero, J., Niklasson, A. and Granqvist, G., TomášKubart, Low-temperature synthesis of thermochromic vanadium dioxide thin films by reactive high power impulse magnetron sputtering, *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 149 (2016) 137-144.
 18. Wu, T.B., Wu, C.M. and Chen, M.L, Highly insulative barium zirconate-titanate thin films prepared by RF magnetron sputtering for dynamic random access memory applications, *Applied Physics Letters*, 69 (1996) 2659–2661.
 19. Park, H.K., Ryu, J.H., Youn, H.J., Yang, J.-M. and Oh, I.H., Fabrication and Property Evaluation of Mo Compacts for Sputtering Target ,Application by Spark Plasma Sintering Process, *Materials Transactions*, 53 (2012) 1056 -1061.
 20. Kazuo, W. and Akifumi, M., Sputtering target of dielectrics having high strength and a method for manufacturing same, US patent 6,176,986B1
 21. Kanamaru, M., Iwasaki, Y., Matsui, M., Goto, H. and Nambu, A., Oxide sintered body and sputtering target, US patent 9,175,380 B2.
 22. Mulyadi1, Rika, W., Sulidah, Irzaman, Hardhienata, H., Barium Strontium Titanate Thin Film Growth with rotational speed variation as a satellite temperature sensor prototype, *Earth and Environmental Science*, 54 (2017) 012094.