

فرآیندهای نوین در مهندسی مواد

ma.iaumajlesi.ac.ir

تحلیل و بررسی اثر افزودنی‌های مولیبدن و کبالت روی خواص ساختاری و الکتریکی ماده پیزوسرامیک PZT5

محمدهادی همتی^۱، حسین لکزین^{۲*}، محمدحسین قزل‌ایاغ^۳

۱- دانشجوی دکتری مهندسی مکانیک، مجتمع مواد و فناوری‌های ساخت، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، تهران، ایران.

۲- استادیار مهندسی مکانیک، مجتمع مواد و فناوری‌های ساخت، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، تهران، ایران.

۳- دانشیار مهندسی برق، مجتمع مهندسی برق و کامپیوتر، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، تهران، ایران.

lexian@mut.ac.ir*

مقاله پژوهشی

چکیده

هدف از این تحقیق تحلیل و بررسی اثر افزودنی‌های مولیبدن و کبالت روی خواص دی‌الکتریک، فروالکتریک و پیزوالکتریک ماده پیزوسرامیک $Pb(Zr_{0.52}Ti_{0.48})O_3$ با افزودن مولیبدن و کبالت در محل زیرکونات و تیتانات در محدوده (۲-۰) در صد می‌باشد. بدین منظور ابتدا پودرها با روش شیمیایی تر آماده شدند. سپس برای ۲ ساعت در دمای ۸۵۰ درجه سانتی‌گراد کلسینه شدند. خواص ساختاری ترکیبات با استفاده از روش پراش اشعه ایکس (XRD) برای تأیید تشکیل ترکیبات تک فاز (با ساختار پروسکایت) در دمای اتاق مورد بررسی قرار گرفت. تجزیه و تحلیل ریزساختاری سطح دیسک‌های پخته شده با میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) نشان می‌دهد که تغییر قابل توجهی در اندازه دانه با افزایش مولیبدن و کبالت وجود دارد. مطالعات دقیق از خواص دی‌الکتریک PZT تغییر قابل توجه در ضریب شارژ پیزوالکتریک D33 (تا ۸۴٪ کاهش)، ضریب ارتباط الکترومکانیکی Keff (تا ۷۸٪ کاهش)، فرکانس رزونانس Fr (تا ۲۵٪ افزایش) و کیفیت مکانیکی Qm (تا ۱۱۰٪ افزایش) را در نمونه‌های ساخته شده و مورد آزمون قرار گرفته نشان می‌دهد.

اطلاعات مقاله

دریافت: ۱۴۰۱/۱۰/۰۴

پذیرش: ۱۴۰۲/۰۲/۱۵

کلید واژگان:

سرب زیرکونات تیتانات
میکروسکوپ الکترونی روبشی
روش شیمیایی تر
پیزوالکتریک
مولیبدن
کبالت

Analysis of the Effect of Molybdenum and Cobalt Additives on the Structural and Electrical Properties of PZT5 Piezoceramic Material

Mohammad Hadi Hemati¹, Hosein Lexian^{2*}, Mohammad Hosein Ghezel Ayagh²

1- PH.D. Student, Mech. Eng., Complex of Materials & Manufacturing Processes, Malek-Ashtar University of Technology, Tehran, Iran.

2- Assic. Prof., Mech. Eng., Complex of Materials & Manufacturing Processes, Malek-Ashtar University of Technology, Tehran, Iran.

3- Asoci. Prof., Elect. Eng., Complex of Electrical and Computer Engineering, Malek-Ashtar University of Technology, Tehran, Iran.

* lexian@mut.ac.ir

Article Information

Original Research Paper

Doi:

Keywords:

Lead Titanium Zirconate

Scanning Electron Microscope

Wet Chemical Method

Piezoelectric

Molybdenum

Cobalt

Abstract

The purpose of this paper is to analyze the effect of molybdenum and cobalt additives on the dielectric, ferroelectric and piezoelectric properties of PZT5 piezoceramic material. By adding molybdenum and cobalt in the location of zirconate and titanate, in the range of (0-2) percent. For this purpose, the powders were first prepared with a wet chemical method. Then they were calcined for 2 hours at 850 °C. The structural properties of the compounds were investigated using the X-ray diffraction (XRD) method to confirm the formation of single-phase compounds (with perovskite structure) at room temperature. The microstructural analysis of the surface of the sintered discs by scanning electron microscopy (SEM) shows that there is a significant change in grain size with increasing molybdenum and cobalt. Detailed studies of the dielectric properties of PZT in the samples made and tested show measurable change in the piezoelectric charge coefficient D33 (up to 84 % reduction), electromechanical coupling coefficient Keff (up to 78 % reduction), resonant frequency Fr (up to 25 % increase) and mechanical quality factor Qm (up to 110 % increase).

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

Please cite this article using:

Mohammad Hadi Hemati, Hosein Lexian, Mohammad Hosein Ghezel Ayagh, Analysis of the Effect of Molybdenum and Cobalt Additives on the Structural and Electrical Properties of PZT5 Piezoceramic Material, New Process in Material Engineering, 2024, 17(4), 43-50.

۱- مقدمه

تیتانات زیرکونات سرب (PZT) به‌عنوان یکی از مواد پیزوالکتریک که بسیار مورد مطالعه قرار گرفته، برای کاربردهای مختلف در نظر گرفته می‌شود. در حال حاضر، این مواد دارای بیشترین کاربرد در کنترل ارتعاشات در صنعت هوافضا، کنترل دقیق جریان به‌عنوان جایگزینی برای کنترل‌کننده‌های جریان مبتنی بر سلونوئید، سیستم تریق سوخت در صنعت خودرو، برداشت انرژی از منابع مختلف ارتعاش و ... می‌باشد [۱-۳]. این کاربردهای مواد PZT نیاز به توسعه مواد با خواص بسیار عالی را ایجاد می‌کند. سرب زیرکونات تیتانات $Pb(Zr, Ti)O_3$ محلول جامد از فرو الکتریک $T_c = 490^\circ C$ ($PbTiO_3$) و ضد فرو الکتریک $T_c = 330^\circ C$ ($PbZrO_3$) می‌باشد [۴]، دارای ساختار پروسکایت با شکل کلی ABO_3 است. (A یون‌های تک یا دو ظرفیتی؛ B یون‌های سه - شش ظرفیتی). به دلیل ثابت دی‌الکتریک، ضرایب پیزوالکتریک و پیروالکتریک بالا، قطبش خود به خود و دمای کوری بسیار بالاتر از دمای اتاق، با نسبت‌های Zr/Ti متفاوت به‌طور گسترده‌ای برای انواع مختلف دستگاه‌های پیزوالکتریک، پیرو الکتریک و فرو الکتریک استفاده شده است. در PZT، ویژگی‌ها با افزودن افزودنی‌های مختلف در محل A یا B زیاد یا منحصربه‌فرد می‌شوند. این افزودنی‌ها اساساً دو نوع هستند: افزودنی‌های اهداکننده، مانند La^{3+} ، Nb^{5+} ، Ce^{3+} و Ta^{5+} که PZT نرم تولید می‌کنند [۵] و افزودنی‌های پذیرنده، مانند Na^+ ، K^+ ، Sc^{3+} و Fe^{3+} که PZT سخت تولید می‌کنند [۶]. افزودنی‌های نرم حرکت دیواره حوزه‌ها را تسهیل می‌کنند؛ بنابراین، خواص الکترونیکی در مقایسه با PZT بدون افزودنی بسیار بهتر می‌شود. همتی و همکاران استفاده از این مواد به‌عنوان عنصر حسگر در سنسورهای فشار دینامیکی را بررسی کردند [۷]. برای دستیابی به مواد مناسب برای کاربردهای مختلف تلاش‌های زیادی برای اصلاح PZT با جایگزینی عناصر مناسب در مکان‌های A/B یا ساخت کامپوزیت‌ها با آن صورت گرفته است [۸-۱۰]. کارهای زیادی روی انواع مختلف اصلاحات PZT در هر دو شکل لایه‌های نازک و

حجیم، از جمله اصلاحات PZT با جایگزینی منگنز در مکان‌های A/B انجام شده است [۱۱-۱۲]. بیشتر کیفی‌ها و همکاران [۱۲] مکانیزم‌های رسانایی ترکیب شده دوگانه را در $PZT (Pb_{0.89}(Ba, Sr)_{0.11}(Zr_{0.52}Ti_{0.48})O_3)$ (با Mn یا Nb/F) گزارش کردند. کلیموف و همکاران [۱۳] خواص ساختاری و پیزوالکتریک $Pb_{0.96}Sr_{0.04}(Zr_{0.5275}Ti_{0.4675}Mn_{0.005})O_3$ را مطالعه کردند. هال و چر دیرونکورن [۱۴] اثرات تف جوشی روی فاز و ریزساختار $(Pb(Zr_{0.52}Ti_{0.48})_{1-x}Mn_xO_{3-y}F_y)$ را مطالعه کردند. گارگ و آگراوال [۱۵] به بررسی خواص مکانیکی، پیزوالکتریک و دی‌الکتریک $Pb_{0.98}M_{0.02}O_3$ ($M=Er, Gd, Eu, Nd, La, Bi$) با $(Zr_{0.535}Ti_{0.465})_{0.995}$ پرداختند. لیوفو [۱۶] در پژوهش خود یک سرامیک پیزوالکتریک با فرمول شیمیایی $Pb_{(1-z)}M_z(Mg_{1/3}Nb_{2/3})_xO_3$ (Zr_yTi_{1-y}) $_{1-x}$ معرفی کرد که M می‌تواند Sr یا Ba یا هر دو باشد و x بین ۰/۱ و ۰/۷، y بین ۰/۲ تا ۰/۷ و z بین ۰/۰۲ تا ۰/۱ می‌باشد. مواد افزودنی Ni_2O_3 ، MnO_2 ، MoO_3 ، $CoCO_3$ ، Y_2O_3 و TeO_3 ، Ta_2O_5 ، Nb_2O_5 به سرامیک پیزوالکتریک اضافه شد. ژنگ و همکاران [۱۷] روی ترکیب $Pb((Zn_{1/3}Nb_{2/3})_{0.20}(Zr_{0.50}Ti_{0.50})_{0.80})O_3$ با افزودن $CoCO_3$ تحقیق کردند. چر دیرونکورنا و همکاران [۱۸] در تحقیق خود، سرامیک‌های PZT ترکیب شده با کبالت $Pb(Zr_{0.52}Ti_{0.48})_{1-x}Co_xO_3$ را که در آن x برابر ۰/۰۵، ۰/۱۰، ۰/۱۵ و ۰/۰۲ می‌باشد، مورد مطالعه قرار داد. ژن ژانگ و همکاران [۱۹] بررسی تطبیقی اثرات ناخالصی‌های Mo و W بر خاصیت فرو الکتریک لایه‌های نازک $Pb(Zr_{0.3}Ti_{0.7})$ را انجام دادند. ثمجری و همکاران [۲۰] توسعه تشکیل فاز Nd را در PZT مورد مطالعه قرار دادند. باین‌حال، به‌ندرت مطالعه‌ای در مورد تأثیر ترکیب Mo و یا Co بر خواص PZT انجام شده است. در این مطالعه، تلاش شده است تا تأثیر هر دو ماده افزودنی بر روی خواص ریزساختار، پیزوالکتریک، دی‌الکتریک و فرو الکتریک PZT بررسی شود. تازگی این پژوهش مشخصه‌یابی و مطالعات ساختاری، دی‌الکتریک و الکتریکی جایگزینی مولیبدن و کبالت در مکان B، PZT با نسبت Zr/Ti برابر با ۵۲/۴۸ است. این نسبت $Zr_{0.52}Ti_{0.48}$ بخشی از این پژوهش را

با سرعت ۱۸۰ rpm به مدت ۲ ساعت آسیاب شدند. در جدول ۱ ترکیب نمونه‌های ساخته شده نشان داده شده است.

جدول (۱): ترکیب نمونه‌های ساخته شده

شماره نمونه	ترکیب نمونه
۱	$Pb(Zr_{0.52}Ti_{0.48})O_3$
۲	$Pb(Zr_{0.52}Ti_{0.48})_{0.98}Co_{0.02}O_3$
۳	$Pb(Zr_{0.52}Ti_{0.48})_{0.96}Co_{0.02}Mo_{0.02}O_3$
۴	$Pb(Zr_{0.52}Ti_{0.48})_{0.97}Co_{0.02}Mo_{0.01}O_3$

با روش شیمیایی تر با استفاده از محلول نمک به‌عنوان پیش ماده تهیه شدند. برای جبران از دست دادن PbO در طی کلسیناسیون و تف جوشی، ۳ درصد وزنی محلول سرب اضافی افزوده شد. محلول نمک ترکیبی با افزودن محلول آمونیاک رقیق به یک هیدروکسید مخلوط در محدوده ۸-۸pH تا ۸/۵ تبدیل شد. رسوب فیلتر شد و به‌طور مکرر شسته شد تا عاری از یون نیترات شود. رسوب یک‌شب در دمای ۱۱۰ درجه سانتی‌گراد خشک و به مدت ۲ ساعت در دمای ۸۵۰ درجه سانتی‌گراد کلسینه شد. یک برنامه کاری مرسوم برای تهیه پودر PZT از طریق روش شیمیایی تر در شکل ۱ ارائه شده است.

تشکیل می‌دهد که شامل نسبت‌ها در و اطراف MPB است. اکثریت مطالعات گزارش شده از نسبت Zr/Ti متفاوت با این تحقیق استفاده کرده‌اند و هیچ یک اثر هم‌زمان مولیبدن و کبالت را بررسی نکرده‌اند. همچنین مطالعات گزارش شده در تمامی مقالات فوق، خواص متفاوتی نسبت به رفتار ساختاری-دی‌الکتریک سیستم‌های معرفی شده در این پژوهش گزارش کرده‌اند.

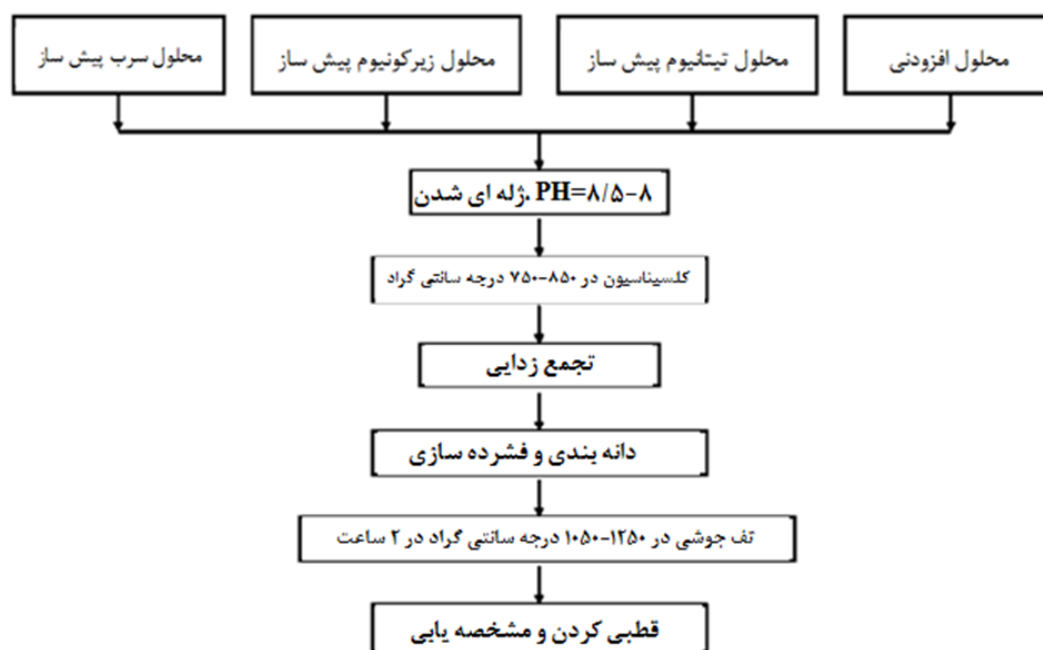
۲- ساخت نمونه‌ها

۲-۱- مواد

نیترات سرب با درجه تحلیلی (۹۹/۵٪)، اکسی کلرید زیرکونیوم (۹۹/۹٪)، تتراکلرید تیتانیوم (۹۹٪)، تری اکسید مولیبدن (۹۹/۹٪) و کربنات کبالت (۹۹/۹٪) تهیه شد. مواد فوق بدون هیچ‌گونه تصفیه بیشتر به‌عنوان مواد اولیه مورد استفاده قرار گرفتند.

۲-۲- تهیه پودر

پودرهای PZT با ترکیبات $Pb(Zr_{0.52}Ti_{0.48})_{1-x}O_3$ یا $Mo_x(Co_x)$ که در آن $x = 0, 0.01, 0.02$ پس از توزین در محیط اتانول توسط آسیاب سیاره‌ای با گلوله‌های زیرکونیایی



شکل (۱): برنامه کاری نوعی آماده‌سازی PZT از طریق روش شیمیایی تر.

الکترومکانیکی، ظرفیت خازنی و کیفیت مکانیکی نیز مورد مطالعه قرار گرفت. ظرفیت با استفاده از پل LCR (Model 4262A, Hewlett Packard) در فرکانس ۱ کیلوهرتز اندازه‌گیری شد. ضریب کیفیت مکانیکی (Qm) و ضریب کوپلینگ (Kp) با روابط استاندارد با استفاده از مقادیر اندازه‌گیری شده ظرفیت، فرکانس رزونانس (fr) و آنتی رزونانس (fa) محاسبه شد [۲۱].

۴- نتایج و بحث

۴-۱- مطالعه پراش اشعه ایکس

الگوهای XRD نمونه‌های PZT5 بدون افزودنی و با افزودن Mo و Co در شکل ۳ نشان داده شده است. الگوهای XRD بسیار تیز و با قله‌های پراش منفرد مشخص هستند که نشان‌دهنده همگنی و تبلور نمونه‌ها است. الگوها به وضوح نشان می‌دهند که هیچ تغییر ساختاری در PZT5 در جایگزینی مقادیر کم کبالت و مولیبدن وجود ندارد. به وضوح می‌توان دید که ساختار دارای فاز پروسکایت بدون هیچ فاز ثانویه است که نشان‌دهنده انتشار کامل افزودنی‌ها به شبکه PZT5 برای تشکیل یک ترکیب تک فاز است. شماره کارت مرجع شناسایی شده 01-070-0742 می‌باشد. مطابق کارت‌های مرجع استاندارد فاز چهارضلعی با غلظت بالا در PZT5 بدون افزودنی و فاز لوزی خالص در غلظت افزودنی بالاتر (۰/۰۴ مول) یافت شد. مخلوطی از فاز چهارضلعی و رومبوهدرال در ترکیبات میانی یافت شد که فاز چهارضلعی با افزایش غلظت افزودنی کاهش می‌یابد؛ و به تغییر پارامترهای شبکه نسبت داده می‌شوند، یعنی پارامتر شبکه "c" کاهش می‌یابد در حالی که "a" با افزایش غلظت افزودنی افزایش می‌یابد؛ بنابراین، چهارضلعی بودن (c/a) سرامیک‌های PZT5 اصلاح شده کاهش می‌یابد.

پس از کلسینه کردن، پودرها جداسازی شدند، دانه‌بندی شدند، به صورت تک محوری درون قالب‌ها فشرده شدند و در دمای ۱۳۴۰-۱۲۸۰ درجه سانتی‌گراد به مدت ۲ ساعت در یک اتمسفر بسته غنی از سرب برای به حداقل رساندن از دست دادن اکسید سرب، پخته شدند. سرمایش نمونه‌ها پس از خاموش کردن کوره با نرخ طبیعی تا دمای محیط ادامه یافت. دیسک‌های زینتر شده تراز شدند، صیقل داده شدند و با خمیر نقره الکتروود دار شدند. سپس نمونه‌ها در یک میدان DC2 کیلوولت بر میلی‌متر در حمام روغن سیلیکون به مدت ۳۰ دقیقه قطب دار شدند و سپس خواص پیزوالکتریک، دی‌الکتریک و فرو الکتريک اندازه‌گیری شد. در شکل زیر نمونه‌های تولید شده با افزودنی‌های مختلف نشان داده شده است.

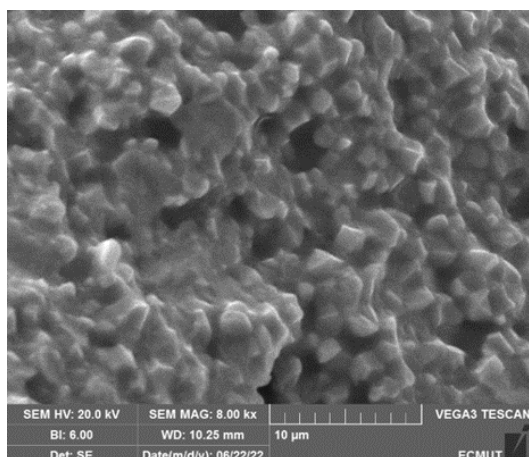


شکل (۲): نمونه‌های PZT5 به همراه افزودنی‌های کبالت و مولیبدن: (الف) بدون افزودنی، (ب) با ۰/۰۲ مول Co، (ج) با ۰/۰۲ مول Co و ۰/۰۲ مول Mo و (د) با ۰/۰۲ مول Co و ۰/۰۱ درصد مول Mo.

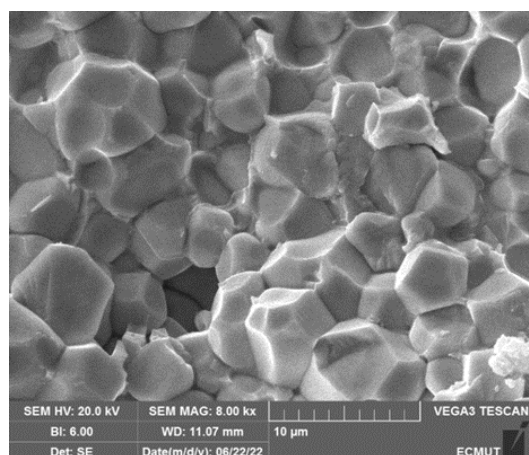
۳- مشخصه یابی

تشکیل فاز PZT5 با روش پراش اشعه ایکس (XRD) تأیید شد (فیلیپس، هلند). مورفولوژی دیسک‌های پخته شده PZT5 با میکروسکوپ الکترونی روبشی (VEGA3TESCAN) مشخص شد. ضریب کرنش پیزوالکتریک خطی (d33) و خواص دی‌الکتریک در دمای اتاق با استفاده از یک پیزومتر (مدل PM-35 شرکت تیک کنترل) اندازه‌گیری شد. فرکانس رزونانس، ضریب ارتباط

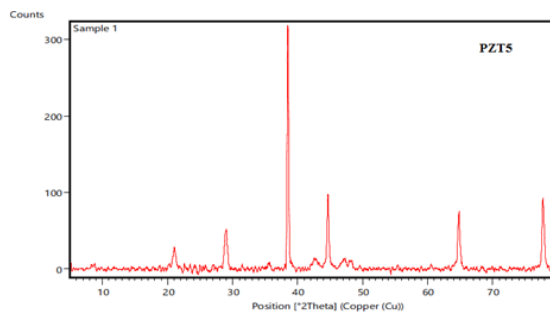
ماهیت کروی بودند. شکل، اندازه و توزیع ذرات ریزساختار همه نمونه‌ها ماهیت پلی کریستالی نمونه‌ها را تأیید کرد. همان‌طور که از میکرو گراف‌های SEM مشهود است کاهش در اندازه ذرات با ترکیب با افزودنی‌ها، کاملاً مشخص است. بزرگ‌نمایی نمونه‌ها ۸۰۰۰ برابر و مقیاس ۱۰ میکرون در زیر نمونه‌ها گذاشته شده است. اندازه‌های متوسط ذرات بدون افزودنی (۱/۲ میکرومتر)، با ۰/۰۲ مول Co (۳/۱ میکرومتر)، با ۰/۰۲ مول Co و ۰/۰۲ مول Mo (۲/۱ میکرومتر) و با ۰/۰۲ مول Co و ۰/۰۱ مول Mo (۲/۶ میکرومتر) با توجه به مقیاس تصاویر و متوسط گیری بیشترین طول بیست ذره اندازه گیری شد. اندازه ذرات با افزایش غلظت مولیبدن در حضور کبالت کاهش می‌یابد.



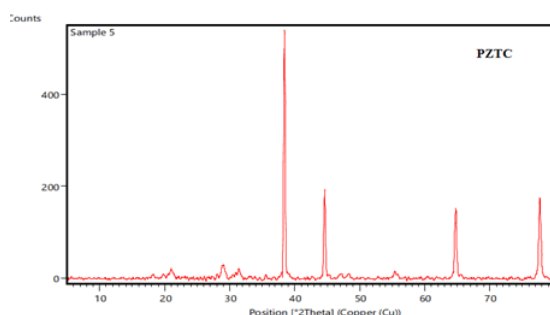
(الف)



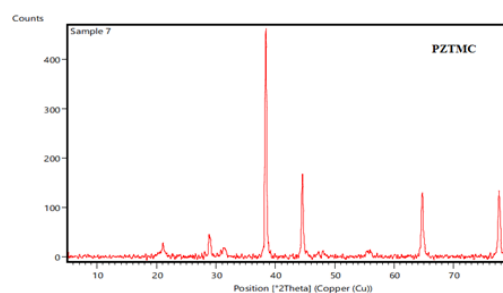
(ب)



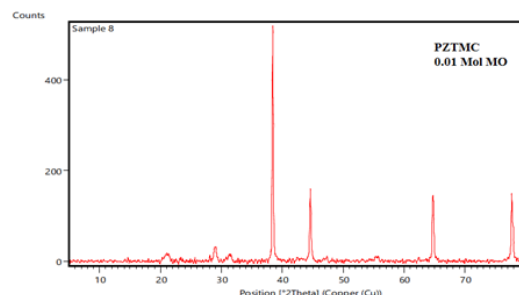
(الف)



(ب)



(ج)



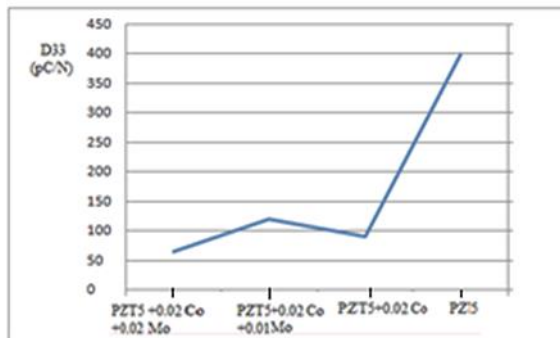
(د)

شکل (۳): الگوی XRD نمونه‌های PZT5 (الف) بدون افزودنی، (ب) با ۰/۰۲ مول Co، (ج) با ۰/۰۲ مول Co و ۰/۰۲ مول Mo و (د) با ۰/۰۲ مول Co و ۰/۰۱ درصد مول Mo

۴-۲- تحلیل ریزساختاری

تصاویر SEM دیسک‌های پخته شده حکاکی شده شیمیایی در شکل ۴ ارائه شده‌اند. همان‌طوری که مشاهده می‌شود ذرات با اندازه‌های مختلف به‌طور یکنواخت و متراکم در کل سطح نمونه‌ها توزیع شده‌اند. اکثر ذرات نمونه‌ها دارای

و همکاران مشاهده شد [۲۳]؛ بنابراین، جهت گیری دیوار حوزه را مختل می‌کند و متعاقباً d33 کاهش می‌یابد.



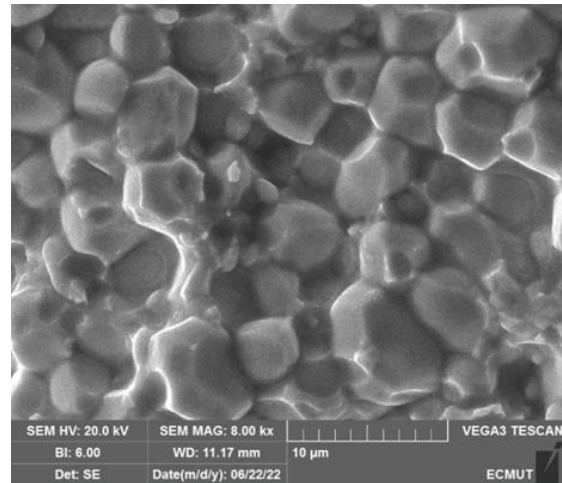
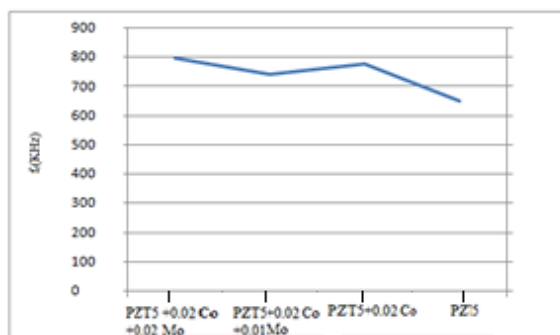
شکل (۵): تغییرات در d33 با افزایش غلظت Mo و Co.

۴-۴- فرکانس رزونانس و ضریب ارتباط الکترومکانیکی

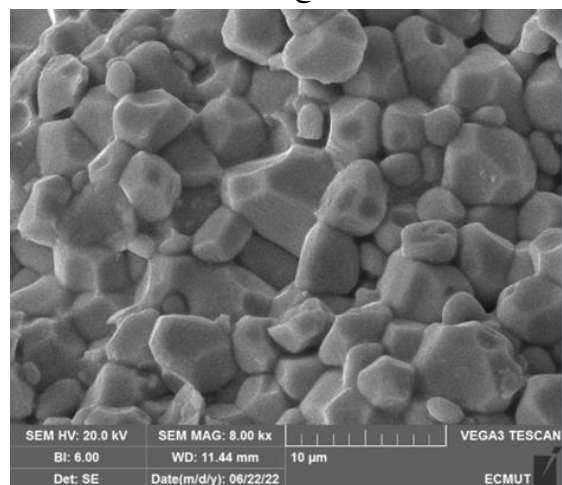
همان‌طور که در شکل ۶ مشاهده می‌شود، فرکانس رزونانس در نمونه PZT5 بدون افزودنی کمترین مقدار را دارد و با افزایش Co و Mo زیاد می‌شود و در نمونه دارای دو افزودنی با غلظت ۰/۰۲ بالاترین مقدار را دارد. با افزایش افزودنی‌ها ضریب ارتباط الکترومکانیکی رفتاری همانند d33 دارد؛ یعنی با افزایش افزودنی مولیبدن در ابتدا افزایش می‌یابد و سپس با افزایش تا ۰/۰۲ درصد مول مولیبدن کاهش می‌یابد؛ زیرا d33 طبق رابطه زیر با ضریب ارتباط الکترومکانیکی ارتباط دارد:

$$d_{33} = K_{33} \sqrt{S_{33}^E} \sqrt{K_{33}^T} \quad (1)$$

که در آن d33 ثابت شارژ پیزوالکتریک، K33 ضریب ارتباط الکترومکانیکی و S_{33}^E ضریب سختی می‌باشند.



(ج)



(د)

شکل (۴): تصاویر SEM حکاکی شده شیمیایی: الف) بدون افزودنی، ب) با ۰/۰۲ مول Co، ج) با ۰/۰۲ مول Co و ۰/۰۲ مول Mo و د) با ۰/۰۲ مول Co و ۰/۰۱ درصد مول Mo.

۴-۳- خواص پیزوالکتریک

خواص پیزوالکتریک نمونه‌ها در شکل ۵ ارائه شده است. d33 نمونه‌های دارای افزودنی کبالت و مولیبدن کمتر از d33 نمونه‌های PZT5 بدون افزودنی است. به‌طور کلی، یون‌های Mo و Co جایگزین یون‌های مکان «B» می‌شوند. همچنین مشاهده شد که d33 با افزایش غلظت Mo تا ۰/۰۲ مول در حضور Co ابتدا افزایش و سپس کاهش می‌یابد. غلظت ناخالصی بالاتر منجر به رسوب ماده افزودنی در مرزهای دانه می‌شود، همان‌طور که در مورد PZT دارای افزودنی سریم اکسید مشاهده شد [۲۲]. با توجه به این، اندازه دانه و همچنین اندازه حوزه کاهش می‌یابد (همچنین توسط هافمن

شکل (۶): تغییرات در F_r با افزایش غلظت Mo و Co.

۶- فهرست علائم

σ : تنش

d33: ثابت شارژ پیزوالکتریک

K33: ضریب ارتباط الکترومکانیکی

S_{33}^E : ضریب سختی

Q_m : کیفیت مکانیکی

f_r : فرکانس رزونانس

۷- مراجع

[1] K. Uchino, "Ceramic actuators: principles and applications", MRS Bulletin, vol. 18, no. 4, pp. 42-4, 1993.

[2] R. Newnham & G. Ruschau, "Smart electroceramics, J. American Ceramic society", vol. 74, no. 3, pp. 463-80, 1996.

[3] P. Panda & et al., "Electromechanical and dynamic characterization of in-house-fabricated amplified piezo actuator", Smart Materials Research, 2012.

[4] H. Rukmini & et al., "Effect of sintering temperature on Na-modified PLZT ceramics", Materials Chemistry and Physics, vol. 64, no. 3, pp. 171-178, 2000.

[5] G. H. Haertling, "Ferroelectric ceramics: history and technology", American Ceramic Society, vol. 82, no. 4, pp. 797-818, 1999.

[6] B. Sahoo & P. Panda, "Fabrication of simple and ring-type piezo actuators and their characterization", Smart Materials Research, 2012.

[7] J. Zamani, M. Hemati & M. Bidkhorji, "Designing and Manufacturing Dynamic Pressure Sensors Using Piezoceramic-Based Thick Films", Journal of Aerospace Mechanics, vol. 11, no. 1, 2015.

[8] E. Boucher & et al., "Effects of Zr/Ti ratio on structural, dielectric and piezoelectric properties of Mn-and (Mn, F)-doped lead zirconate titanate ceramics", Ceramics international, vol. 32, no. 5, pp. 479-485, 2006.

[9] A. P. Barranco & et al., "Effects of MnO2 additive on the properties of PbZrO3-PbTiO3-PbCu1/4Nb3/4O3 ferroelectric ceramic system", European Ceramic Society, vol. 21, no. 4, pp. 523-529, 2001.

۴-۵- ظرفیت خازنی و کیفیت مکانیکی

در جدول ۲ ظرفیت خازنی و کیفیت مکانیکی نمونه‌های ساخته شده نشان داده شده است.

جدول (۲): ظرفیت خازنی و کیفیت مکانیکی نمونه‌های PZT5 ساخته شده.

نمونه‌ها	C(nF)	Q_m
PZT 5	90 ± 10	120 ± 20
PZTC	35 ± 5	250 ± 50
PZTMC ۱ درصد مولیبدن	50 ± 10	220 ± 20
PZTMC	20 ± 5	150 ± 20

* جز در مورد اشاره شده در بقیه موارد افزودنی ۰/۰۲ می‌باشد.

طبق جدول ۲ نمونه PZT5 بدون افزودنی بالاترین مقدار ظرفیت خازنی را دارد و نمونه PZT5 با افزودنی ۰/۰۲ درصد کبالت بالاترین مقدار کیفیت مکانیکی را دارا می‌باشد.

۵- نتیجه‌گیری‌ها

نمونه‌های PZT5 به همراه افزودنی‌های کبالت به صورت منفرد و کبالت و مولیبدن توأمان با روش شیمیایی تر تهیه شد. بر اساس مطالعه خواص پیزوالکتریک، دی‌الکتریک و فروالکتریک، نتیجه گرفته شد که کیفیت مکانیکی Q_m در نمونه‌های دارای ناخالصی افزایش شدیدی (تا ۱۱۰٪) را نشان می‌دهد. ثابت شارژ پیزوالکتریک (تا ۸۴٪ کاهش)، ظرفیت خازنی (تا ۷۸٪ کاهش) و ضریب ارتباط الکترومکانیکی (تا ۷۸٪ کاهش) نسبت به نمونه خالص کاهش زیادی دارند. فرکانس رزونانس در نمونه‌های دارای هر دو افزودنی و نمونه دارای کبالت منفرد (تا ۲۵٪) بیشتر شده است. در نمونه‌های دارای هر دو افزودنی با افزایش مولیبدن تا ۰/۰۲ درصد مول بهتر می‌شود. در نتیجه برای استفاده در سنسورهای دینامیکی افزودن ۰/۰۲ مول کبالت و ۰/۰۲ مول مولیبدن باعث بهتر شدن زمان پاسخ می‌شود.

- [18] B. Cherdhirunkorna, & et al., "The effect of nitrogen ion implantation on the physical and dielectric properties of cobalt-doped PZT ceramics", Results in Physics, vol. 16, pp.102851, 2020.
- [19] Z. Zhang & et al., "Comparative study of effects of Mo and W dopants on the ferroelectric property of Pb (Zr 0.3 Ti 0.7) thin films", Journal of Physics D: Applied Physics, vol. 41, no. 13, pp. 135402-135408, 2008.
- [20] W. Thamjaree, W. Nhuapeng & T. Tunkasiri, "Structural and physical properties of Nd-doped Pb (Zr 0.52 Ti 0.48)O₃ ceramics", Ferroelectric Letters, vol. 32, no. 1-2, pp. 41-47, 2005.
- [21] R. Zachariasz & et al., "Influence of the Nb and Ba dopants on the properties of the PZT type ceramics," Archives of Metallurgy and Materials, vol. 56, no. 4, pp. 1217-1222, 2011.
- [22] B. Sahoo & P. K. Panda, "Ferroelectric, dielectric and piezoelectric properties of Pb 1-x Ce x (Zr 0.60 Ti 0.40)O₃, 0 ≤ x ≤ 0.08", Journal of materials science, vol. 42, no. 23, pp. 9684-9688, 2007.
- [23] M. J. Hoffmann & et al., "Correlation between microstructure, strain behavior, and acoustic emission of soft PZT ceramics", Acta Materialia, vol. 49, no. 7, pp. 1301-1310, 2001.
- [10] H. Li & et al., "High electrical properties of W-additive Mn-modified PZT-PMS-PZN ceramics for high power piezoelectric transformers", Materials Science and Engineering: B, vol. 130, no. 1-3, pp. 288-294, 2006.
- [11] H. Du & et al., "Effect of addition of MnO₂ on piezoelectric properties of PNW-PMS-PZT ceramics", Materials Science and Engineering: A, vol. 421, no. 1-2, pp. 286-289, 2006.
- [12] B. Guiffard & et al., "Influence of donor co-doping by niobium or fluorine on the conductivity of Mn doped and Mg doped PZT ceramics", European Ceramic Society, vol. 25, no. 12, pp. 2487-2490, 2005.
- [13] V. Klimov, N. Selikova & A. J. I. M. Bronnikov, "Effect of MnO₂, Bi₂O₃, and ZnO additions on the electrical properties of lead zirconate titanate piezoceramics", Inorganic materials, vol. 42, no. 5, pp. 573-577, 2006.
- [14] B. Cherdhirunkorn & D. J. I. F. Hall, "The effect of sintering processes on the properties of Mn-F doped PZT ceramics", Integrated Ferroelectrics, vol. 62, no. 1, pp. 61-67, 2004.
- [15] A. Garg & D. Agrawal, "Effect of rare earth (Er, Gd, Eu, Nd and La) and bismuth additives on the mechanical and piezoelectric properties of lead zirconate titanate ceramics", Materials Science and Engineering: B, vol. 86, no. 2, pp. 134-143, 2001.
- [16] D. Liufu, "Compositions for high power piezoelectric ceramics", U.S. Patent US7494602B2, 2009.
- [17] M. P. Zheng & et al., "Effect of valence state and incorporation site of cobalt dopants on the microstructure and electrical properties of 0.2 PZN-0.8 PZT ceramics", Acta Materialia, vol. 61, no. 5, pp. 1489-1498, 2013.

۸- پی‌نوشت

- [1] Morphotropic Phase Boundary (MPB)
 [2] X-Ray Diffraction (XRD)
 [3] Scanning Electron Microscope (SEM)
 [4] Wet Chemistry