



malekishahraki@gmail.com

مهندس محمد مالکی شهرکی
نویسنده مسئول این مقاله،
دانشجوی دکتری مهندسی
مواد- سرامیک پژوهشگاه مواد
و انرژی می‌باشند.

ارزیابی پارامترهای مدل سد شاتکی دوگانه در ورستور اکسید قلع دوپ شده با کربنات کلسیم

محمد مالکی شهرکی، سیامک نورایی، محمدرضا حسن‌زاده، طاهر دین محمدپور

پژوهشگاه مواد و انرژی

چکیده: در این تحقیق، به بررسی تاثیر کربنات کلسیم بر ریزساختار و خواص الکتریکی سیستم کاربردی ورستور بر پایه اکسید قلع پرداخته شد. افزودن کربنات کلسیم تا ۰/۲۵ درصد مولی، سبب رشد دانه تا ۴/۵ میکرومتر و افزودن بیشتر از آن سبب کاهش رشد دانه شده است. هر چند ضریب غیرخطی ورستور با افزودن کربنات کلسیم کاهش یافته است اما ضریب غیرخطی اصلاح شده از مقدار ۱۰/۳ در نمونه بدون کربنات کلسیم تا مقدار ماکزیمم ۱۴ در نمونه حاوی ۰/۲۵ درصد مولی کربنات کلسیم افزایش یافته است. محاسبات پارامترهای مدل سد شاتکی در مرز دانه نشان داد که نمونه حاوی ۰/۲۵ درصد مولی کربنات کلسیم حاوی کوچک‌ترین ناحیه تخلیه ۴۰ نانومتر و بیشترین ارتفاع سد شاتکی ۲/۲ الکترون ولت است که سبب ایجاد بالاترین ضریب غیرخطی اصلاح شده می‌شوند.

کلمات کلیدی: ورستور، اکسید قلع، کربنات کلسیم، سد شاتکی دوگانه.

۱- مقدمه

ورستورها یا مواد غیراھمی سرامیکی بعنوان محافظ در کنترل جریان ناگهانی گذرا در ولتاژهای پایین در مدارات الکترونیک و در ولتاژهای بالا در مدارات توزیع و پست انتقال قدرت کاربرد دارند. یک ورستور برای کاربرد صنعتی با پارامترهای ولتاژ شکست، جریان نشستی، ضریب غیرخطی، میزان جذب انرژی، مقاومت در برابر تست ضربه الکتریکی و ولتاژ باقی‌مانده مشخصه‌بندی می‌شود [۱]. مبنای فیزیکی رفتار یک ورستور، تشکیل سدهای شاتکی دوگانه در مرز دانه ورستور است که به دلیل اختلاف در سطح فرمی دانه و مرز دانه، الکترون‌های مجاور مرز دانه از دو طرف مرز دانه به مرز دانه مهاجرت می‌کنند و یک دیواره الکترونی یا همان سد شاتکی به همراه دو ناحیه تخلیه را ایجاد می‌کنند [۲]. محاسبه پارامترهای مدل فیزیکی سد شاتکی می‌تواند به شناخت دقیق‌تر پارامترهای تجربی نظیر ولتاژ شکست و ضریب غیرخطی کمک نماید. ورستورهای اکسید روی از سال ۱۹۷۶ میلادی به صورت تجاری در آمده‌اند و هم اکنون نیز تحقیقات بر روی بهبود خواص آنها ادامه دارد [۳].

ورستورهای نسل جدید بر پایه اکسید قلع از سال ۱۹۹۵ میلادی علی‌رغم دمای زینترینگ بالاتر، ضریب غیرخطی پایین‌تر بدلیل ریزساختار ساده، هدایت حرارتی بالاتر و ولتاژ شکست بالاتر و مقاوم بودن به اضمحلال خواص الکتریکی در کاربردهای ولتاژ بالا مورد توجه قرار گرفته‌اند [۴]. معروف‌ترین سیستم ورستور اکسید قلع، سیستم دوپ شده با اکسیدهای کبالت، کروم و نیوبوم یا به صورت مخفف (SCNCR) است که ضریب غیرخطی و ولتاژ شکست آن به ترتیب در حدود ۵۰ و ۳kV/cm است که دارای بیشترین ضریب غیرخطی در میان ورستورهای بر پایه اکسید قلع است [۵] و تنها سیستم ورستور بر پایه اکسید قلع است که قابلیت تجاری شدن را دارا می‌باشد [۶].

در میان دوپانت‌های اضافه شده به ورستور اکسید قلع (SCNCR) دیده می‌شود که اکثر دوپانت‌هایی که به این سیستم اضافه می‌شوند سبب افزایش ولتاژ شکست و کاهش ضریب غیرخطی می‌شوند [۷]. در اثر افزودن اکسید لانتانیم به این سیستم ضریب غیرخطی تا ۱۵۰ نیز افزایش یافته است در عین حال ولتاژ شکست تا ۱۱ Kv/cm افزایش یافته است [۸]. گلات و

همکارانش ضریب غیرخطی اصلاح شده را معرفی کردند که برابر با نسبت ضریب غیرخطی به ولتاژ شکست است و بر اساس ضریب غیرخطی اصلاح شده، کارایی یک وریستور بهتر است در صورتی که ضریب غیرخطی اصلاح شده بالاتر باشد. با توجه به این معیار، ضریب غیرخطی اصلاح شده در وریستور اکسید قلع SCNCr برابر است با ۵۰ (ضریب غیرخطی) تقسیم بر ۳ (ولتاژ شکست) است در حالی که در سیستم SCNCr دوپ شده با لاتانیوم برابر با ۱۵۰ تقسیم بر ۱۱ است کارایی وریستور SCNCr بدلیل ضریب غیرخطی اصلاح شده بالاتر علی رغم ضریب غیرخطی کمتر و ولتاژ شکست کمتر بهتر از وریستور دوپ شده با اکسید لاتانیوم است [۹].

گزارش شده است که افزودن کربنات کلسیم به وریستور اکسید قلع دوپ شده با اکسید کبالت و اکسید آنتی‌موان سبب رشد دانه و کاهش ولتاژ شکست از 200 V/cm به 20 V/cm شده است در حالی که ضریب غیرخطی تغییر چندانی نداشته است و در حدود مقدار ۵ است این کاهش ولتاژ بمعنای این است که وریستور از حالت کاربرد در مصارف ولتاژ بالا به وریستوری برای مصارف در ولتاژ پایین تبدیل شده است اما ضریب غیرخطی بسیار پایین و بعنوان محدودیت است [۱۰].

هدف از این تحقیق، بررسی تاثیر افزودن کربنات کلسیم بر ریزساختار و خواص الکتریکی معروفترین و کاربردی ترین سیستم وریستور اکسید قلع SCNCr است. همچنین بمنظور ارزیابی دقیق خواص الکتریکی، تاثیر کربنات کلسیم بر پارامترهای مدل سد شاتکی بررسی می‌شود.

۲- فعالیت‌های تجربی

ترکیب اولیه وریستور بر پایه اکسید قلع به صورت درصد مولی شامل $X = 99/24$ اکسید قلع (SnO_2)، $0/66$ اکسید کبالت (Co_3O_4)، $0/05$ اکسید کروم (Cr_2O_3)، $0/05$ اکسید نئوبوم (Nb_2O_5) و مقدار کربنات کلسیم (CaCO_3) $0/5$ ، $0/25$ ، $0/1$ ، $X = 0/05$ است که ترکیبات مختلف بصورت مخفف با نماد SCNCrCaX نمایش داده شده است. مخلوط مواد اولیه در آسیاب پرانرژی به مدت ۲ ساعت در محیط آبی آسیاب شدند. پس از خشک کردن، محلول ۲ درصد پلی وینیل الکل به مخلوط اضافه شده و بمنظور گرانول کردن از الک با مش ۴۰ عبور داده می‌شود. برای شکل دهی قرص خام از فشار ۲۰۰ مگاپاسکال استفاده شد. قرص‌های خام به مدت ۲ ساعت در دمای 1300°C درجه سانتی‌گراد با سرعت گرمایش و سرمایش 2°C/min درجه بر دقیقه حرارت‌دهی شدند. از روش ارشمیدس برای اندازه‌گیری دانسیته استفاده شد. آنالیز فازی توسط آنالیز پراش اشعه ایکس (XRD) توسط دستگاه (Philips-Pw3710) انجام شد. بررسی‌های ریزساختاری با میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) مدل LEO - Germany انجام شد. بمنظور الکتروذغاری، خمیر نقره بر سطح پولیش شده قرص‌ها اعمال شد و در دمای 600°C درجه سانتی‌گراد حرارت‌دهی شد. منحنی شدت جریان بر حسب میدان الکتریکی با استفاده از مولتی متر Keithley2410 رسم شد. ولتاژ اعمالی در 1 mA بر سانتی متر مربع بعنوان ولتاژ شکست اندازه‌گیری شد و ضریب غیرخطی (α) از لگاریتم نسبت ولتاژ در جریان 1 mA بر سانتی متر مربع به ولتاژ در 10 mA بر سانتی متر مربع رابطه (۱) محاسبه شد. همچنین ضریب خطی اصلاح شده (β) از نسبت ضریب غیرخطی به ولتاژ شکست طبق رابطه (۲) محاسبه می‌شود.

$$\alpha = 1 / \log \left(\frac{E_{10 \text{ mA} / \text{cm}^2}}{E_{1 \text{ mA} / \text{cm}^2}} \right) \quad (1)$$

$$\beta = \frac{\alpha}{E_{1 \text{ mA} / \text{cm}^2}} \quad (2)$$

ضریب دی‌الکتریک نسبی و امپدانس قرص‌های زینتر شده در فرکانس 10 Hz با استفاده از دستگاه Agilent HP 4291 اندازه‌گیری شد. برای محاسبه تاثیر کربنات کلسیم بر پارامترهای مدل سد شاتکی دوگانه یک ولتاژ مستقیم در محدوده $0-35 \text{ V}$ ولت که با یک ولتاژ متناوب به دامنه 1 V ولت و فرکانس 1 kHz بر آن همراه است را بر قرص‌های وریستور اعمال نموده و تغییرات ظرفیت خازنی ثبت شد و سپس با استفاده از رابطه ۳ و رسم منحنی $\left(\frac{1}{C} - \frac{1}{2C_0} \right)^2$ بر حسب ولتاژ، پارامترهای مدل سد شاتکی دوگانه از قبیل ارتفاع سد شاتکی، دانسیته اهداکننده‌ها و عرض ناحیه تخلیه محاسبه شد [۱۱].

$$\left(\frac{1}{C} - \frac{1}{2C_0}\right)^2 = \frac{2p^2}{A^2 e \epsilon_0 \epsilon_r N_d} \left(\phi_b + \frac{V}{p}\right) \quad (3)$$

که C ظرفیت خازنی در ولتاژهای مستقیم، C_0 ظرفیت خازنی در ولتاژ مستقیم صفر، p تعداد دانه، A مساحت الکتروود؛ N_d دانسیته اهداکننده‌ها، ϕ_b ارتفاع سدشاکتی، V ولتاژ مستقیم اعمالی، ϵ_r ضریب دی الکتریک نسبی اکسید قلع است. همچنین از رابطه (۳) و (۴) برای محاسبه دانسیته حالات در مرزدانه N_{IS} و عرض ناحیه تخلیه w استفاده شد.

$$N_{IS} = \left(\frac{2\epsilon_r \epsilon N_d \phi_b}{e}\right)^{0.5} \quad (4)$$

$$W = \frac{N_{IS}}{N_d} \quad (5)$$

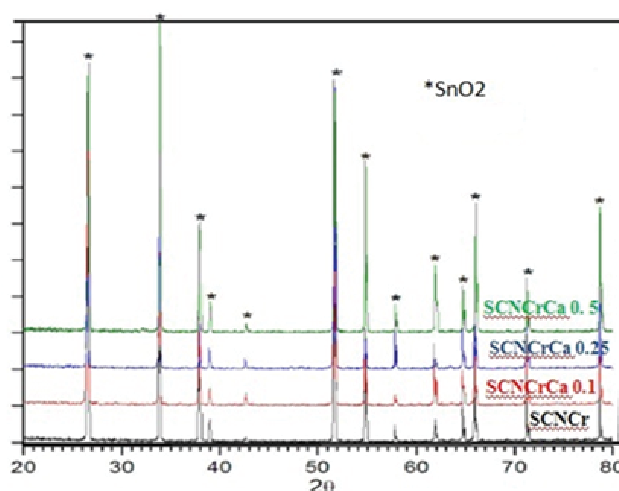
۳- نتایج و بحث

در جدول ۱، تاثیر افزودن کربنات کلسیم بر دانسیته قرص‌های وریستور اکسید قلع ارائه شده است. همانطور که دیده می‌شود با افزایش میزان کربنات کلسیم، دانسیته نسبی نمونه‌ها کاهش می‌یابد بطوریکه در نمونه بدون کربنات کلسیم SCNCr، دانسیته نسبی از ۹۹ درصد به ۹۷/۵ درصد در نمونه SCNCrCa0.5 کاهش یافته است.

جدول ۱- تاثیر افزودن کربنات کلسیم بر دانسیته نسبی، اندازه دانه، ضریب دی‌الکتریک و امپدانس در فرکانس ۱۰ kHz در قرص‌های وریستور اکسید قلع

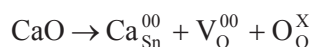
نمونه	امپدانس (Z) kΩ	ضریب دی الکتریک نسبی (ϵ_r)	تعداد فاز	اندازه دانه μm	دانسیته نسبی (%)
SCNCr	۸۸	۸۶۲	تکفاز	۲/۶	۹۹
SCNCrCa0.05	۶۳	۹۰۰	تکفاز	۲/۸	۹۹
SCNCrCa0.1	۵۷	۱۰۰۰	تکفاز	۳/۷	۹۸/۵
SCNCrCa0.25	۴۰	۱۱۰۰	تکفاز	۴/۵	۹۸
SCNCrCa0.5	۱۲۲	۴۳۷	تکفاز	۲/۲	۹۷/۵

شکل ۱ الگوی پراش اشعه ایکس (XRD) را از نمونه‌های وریستور اکسید قلع که با کربنات کلسیم دوپ شده‌اند را نشان می‌دهد. در اثر افزودن کربنات کلسیم هیچ گونه فاز ثانویه‌ای ایجاد نمی‌شود و در تمام الگوها فقط فاز اکسید قلع در محدوده دقت XRD قابل شناسایی است.

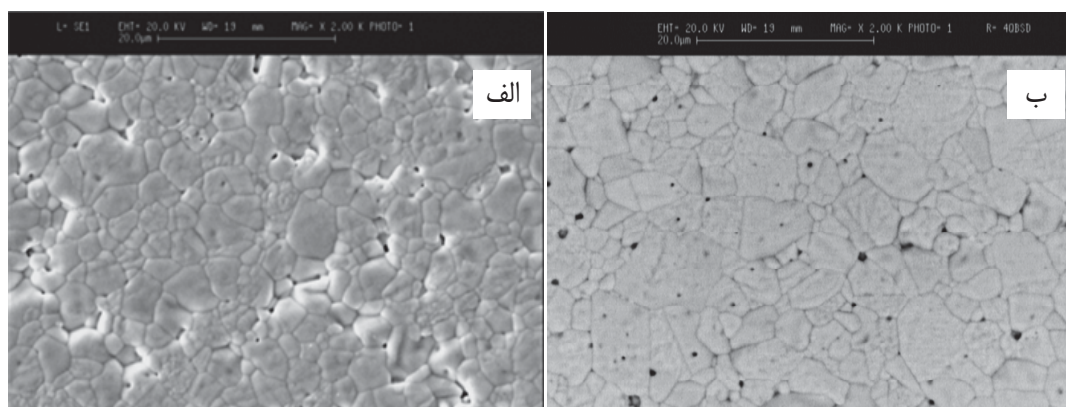


شکل ۱- الگوی XRD از نمونه‌های مختلف دوپ شده با کربنات کلسیم زینتر شده در دمای ۱۳۰۰ درجه سانتی‌گراد

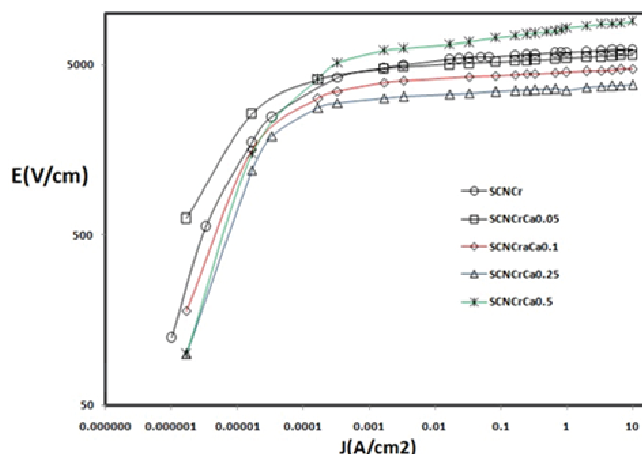
گزارش شده است که کربنات کلسیم در دمای ۵۰۰ درجه سانتی گراد به اکسید کلسیم و گاز دی اکسید کربن تجزیه می‌شود. شعاع یونی کلسیم ۱۱۱ پیکومتر در مقایسه با شعاع یونی قلع ۸۳ پیکومتر اختلاف قابل ملاحظه‌ای دارد و بنظر می‌رسد که حلالیت اکسید کلسیم در اکسید قلع در دمای زینتر ناچیز باشد البته می‌تواند در شبکه اکسید قلع طبق واکنش زیر جایگزین شود [۱۰]:



در اثر این جایگزینی، جای خالی اکسیژنی ایجاد می‌شود که می‌تواند سبب بهبود چگالش اکسید قلع شود اما در اینجا در اثر افزودن کربنات کلسیم دانسیته کاهش می‌یابد بنابراین در یک نمونه اکسید کبالت را حذف نموده و فقط کربنات کلسیم افزوده شد دیده شد که هیچ گونه چگالشی در سیستم اکسید قلع اتفاق نیافتاده است پس بنظر می‌رسد که کربنات کلسیم بر خلاف آنچه گزارش شده است تاثیر چندانی در چگالش ندارد [۱۰]. علت کاهش دانسیته در اثر افزودن کربنات کلسیم را می‌توان در شکل ۲ مشاهده نمود. همانطور که دیده می‌شود در اثر افزودن کربنات کلسیم به سیستم SCNCr، تخلخل‌های بسته میان دانه‌ای در آن افزایش یافته است که این امر می‌تواند ناشی از تجزیه کربنات کلسیم باشد و عدم حذف حفرات ایجاد شده ناشی از این پدیده در حین زینترینگ باشد. در شکل ۲ دیده می‌شود که هیچ گونه فاز ثانویه ای در تصاویر SEM دیده نمی‌شود و در اثر افزودن کربنات کلسیم تا ۰/۲۵ درصد مولی رشد دانه و افزایش تخلخل را سبب شده است. تاثیر کربنات کلسیم بر رشد دانه و ریزستور اکسید قلع در جدول ۱ ارائه شده است. همانطور که دیده می‌شود افزودن کربنات کلسیم تا ۰/۲۵ درصد مولی در نمونه SCNCrCa0.25 سبب رشد دانه از ۲/۶ میکرومتر به ۵/۴ میکرومتر شده است که می‌تواند ناشی از افزایش تشکیل جای خالی اکسیژنی باشد که سبب تسریع فرایندهای نفوذی رشد دانه می‌شود. اما با افزایش کربنات کلسیم تا مقدار ۰/۵ در نمونه SCNCrCa0.5، اندازه دانه به ۲/۲ میکرومتر کاهش یافته است. این پدیده بنظر می‌رسد ناشی از رسوب فاز ثانویه نانومتری CaSnO_3 در مرز دانه‌ها باشد که سبب کاهش رشد دانه می‌شود و گزارش شده است این فاز ثانویه در درصدهای بالاتر از ۱ درصد مولی کربنات کلسیم در الگوی XRD قابل تشخیص است [۱۲].



شکل ۲- تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) از دو نمونه الف (SCNCr) ب (SCNCrCa0.25)



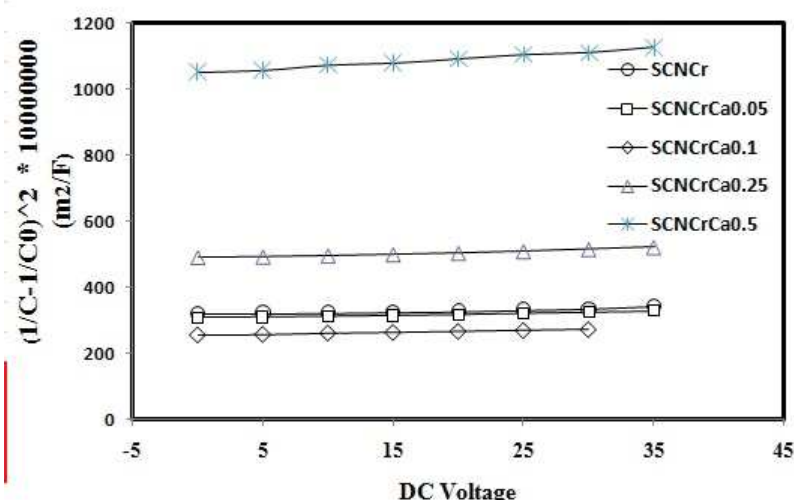
شکل ۳- منحنی شدت جریان الکتریکی بر حسب میدان الکتریکی برای نمونه‌های مختلف دوپ شده با کربنات کلسیم

در شکل ۳، منحنی شدت جریان الکتریکی بر حسب میدان الکتریکی برای قرص‌های مختلف دوپ شده با کربنات کلسیم ارائه شده است. ولتاژ شکست (E_b) و ضریب غیرخطی (α) بدست آمده از این منحنی در جدول ۲ ارائه شده است.

جدول ۲- تاثیر افزودن کربنات کلسیم بر خواص غیرخطی وریستور اکسید قلع و تاثیر آن بر پارامترهای مدل سد شاتکی دوگانه

نمونه	ولتاژ شکست (E_b) Kv/cm	ضریب غیرخطی α	ضریب غیرخطی اصلاح شده β	ارتفاع سد شاتکی (ϕ_B) ev	عرض ناحیه تخلیه (w) nm	دانشیته اهداکننده (N_d) m^{-3}	دانشیته حالات در مرزدانه (N_{IS}) m^{-2}
SCNCr	۶	۶۲	۱۰,۳	۱,۸	۷۳	$۵,۳ \times 10^{23}$	$۳,۹ \times 10^{16}$
SCNCrCa0.05	۵,۵	۵۲	۹,۴۵	۱,۷	۶۰	$۳,۹ \times 10^{23}$	$۲,۴ \times 10^{17}$
SCNCrCa0.1	۴,۵	۴۸	۱۰,۶	۱,۹	۶۱	۴×10^{23}	۳×10^{16}
SCNCrCa0.25	۳,۵	۴۹	۱۴	۲,۲	۴۳	$۲,۳ \times 10^{24}$	۱×10^{17}
SCNCrCa0.5	۸,۲	۲۳	۲,۸	۱	۱۰۰	۱×10^{23}	۱×10^{16}

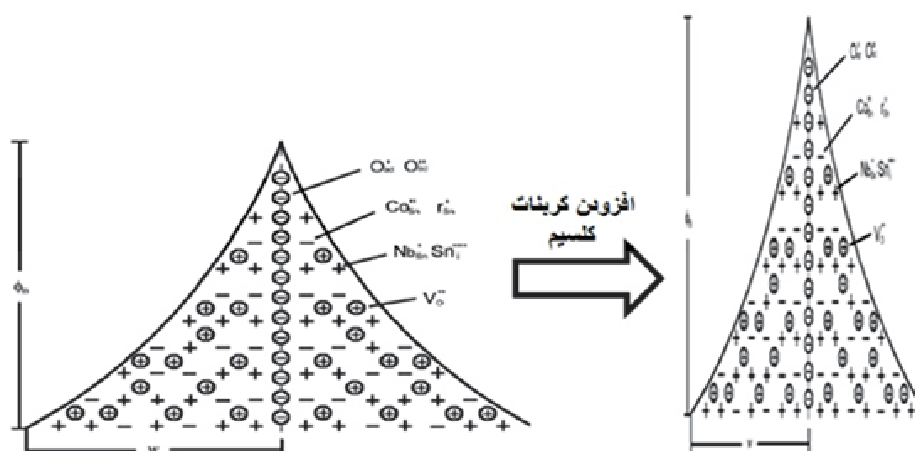
همانطور که دیده می‌شود ولتاژ شکست و ضریب غیرخطی در قرص SCNCr به ترتیب ۶ kv/cm و ۶۲ است که مقدار ضریب غیرخطی مطابقت خوبی با مقادیر گزارش شده دارد [۱۳]. در اثر افزودن کربنات کلسیم، هم ولتاژ شکست و هم ضریب غیرخطی تا نمونه SCNCrCa0.25 کاهش می‌یابد بطوریکه که ولتاژ شکست و ضریب غیرخطی در نمونه SCNCrCa0.25 به ترتیب ۳/۵ kv/cm و ۴۹ می‌باشد و با افزودن بیشتر کربنات کلسیم در نمونه SCNCrCa0.5، ولتاژ شکست افزایش شدیدی تا ۸/۲ kv/cm دارد در عین حال ضریب غیرخطی به مقدار ۲۳ کاهش می‌یابد. همین روند را نیز در مقاومت ظاهری نمونه در جدول ۱ مشاهده می‌شود بطوریکه مقاومت ظاهری از ۸۸ k Ω در نمونه SCNCr به مقدار ۴۰ k Ω در نمونه SCNCrCa0.25 کاهش یافته است در حالیکه مجدداً در نمونه SCNCrCa0.5 تا ۱۲۲ k Ω افزایش یافته است. علی‌رغم پایین‌تر بودن ضریب غیرخطی SCNCrCa0.25 نسبت به سایر نمونه‌ها بجز SCNCrCa0.5، این نمونه دارای بزرگترین مقدار ضریب غیرخطی اصلاح شده (β) با مقدار ۱۴ است و این وریستور از حساسیت بیشتری نسبت به میدان الکتریکی برخوردار است حتی نسبت به نمونه SCNCr که دارای ضریب غیرخطی ۶۰ است زیرا ضریب غیرخطی اصلاح شده در نمونه SCNCr، ۱۰/۳ است بنابراین نمونه SCNCrCa0.25 می‌تواند گزینه مناسب‌تری نسبت به سیستم وریستوری SCNCr باشد.



شکل ۴- تغییرات ظرفیت خازنی بر حسب ولتاژ مستقیم در نمونه‌های مختلف دوپ شده با کربنات کلسیم

علی‌رغم اینکه در وریستورها ولتاژ شکست با اندازه دانه رابطه مستقیم دارد از مقایسه ولتاژ شکست و ضریب غیرخطی با اندازه دانه در جدول ۱ دیده می‌شود که این تاثیر چندان مشهود نیست به طوریکه در نمونه‌های SCNCr و SCNCrCa0.5 که اندازه

دانه تقریباً مشابه است اما ولتاژ شکست و ضریب غیرخطی کاملاً متفاوت است بنابراین بنظر می‌رسد این تغییرات ناشی از تاثیر کربنات کلسیم بر ریزساختار و شیمی عیوب مرزدانه در مدل سد شاتکی دوگانه باشد. در شکل ۴ تغییرات ظرفیت خازنی بر حسب اعمال ولتاژ مستقیم ارائه شده است و پارامترهای مدل سد شاتکی دوگانه مشتق شده از آن در جدول ۲ ارائه شده است. همانطور که دیده می‌شود که با افزایش کربنات کلسیم، ارتفاع سد شاتکی به صورت منظم تغییر نمی‌کند اما بیشترین ارتفاع سد شاتکی در نمونه SCNCCrCa0.25 مشاهده می‌شود. عرض ناحیه تخلیه با افزایش کربنات کلسیم از ۷۸ نانومتر SCNCCr در نمونه به ۴۰ نانومتر در نمونه SCNCCrCa0.25 کاهش می‌یابد اما در نمونه SCNCCrCa0.5 تا ۱۰۰ نانومتر افزایش می‌یابد. از لحاظ مدل فیزیکی سد شاتکی دوگانه، کارایی بهتر وریستور ناشی از ارتفاع سد شاتکی بزرگتر و عرض ناحیه تخلیه کوچک است [۲] که این مشخصات در نمونه SCNCCrCa0.25 مشاهده می‌شود زیرا دارای بیشترین ارتفاع سد شاتکی و کمترین عرض ناحیه تخلیه است که سبب می‌شود ضریب غیرخطی اصلاح شده ۱۴ باشد که بیشترین مقدار را داراست و در عین حال نمونه SCNCCrCa0.5 دارای کمترین کارایی وریستور از لحاظ مدل فیزیکی سد شاتکی دوگانه است زیرا دارای بزرگترین ناحیه تخلیه و کمترین ارتفاع سد شاتکی است که با ضریب غیرخطی اصلاح شده ۲/۸ در آن که به صورت تجربی محاسبه شده است مطابقت خوبی دارد. دلیل این رفتار نمونه SCNCCrCa0.25 را می‌توان به حضور یون کلسیم در مرزدانه و تغییر شیمی عیوب مرزدانه مرتبط دانست افزایش مقدار یون کلسیم، سبب جدایش فاز ثانویه در مرزدانه و کاهش خواص الکتریکی می‌شود [۱۴]. بصورت شماتیک تاثیر ۰/۲۵ درصد مولی کربنات کلسیم در نمونه SCNCCrCa0.25 بر مدل سد شاتکی دوگانه در سیستم SCNCCr در شکل ۵ رسم شده است. این نتایج با نتایج ضریب دی الکتریک نسبی در جدول ۱ در نمونه‌های مختلف همخوانی خوبی دارد. ضریب دی الکتریک نسبی اکسید قلع خالص در حدود ۱۴ است بدلیل ایجاد سدهای شاتکی در وریستور ضریب دی الکتریک افزایش می‌یابد و ضریب دی الکتریک نسبی در نمونه SCNCCrCa0.25 بیشترین مقدار را دارا می‌باشد که ناشی از تشکیل سدهای شاتکی تیز در این نمونه است [۱۵].



شکل ۵- تاثیر افزودن ۰/۲۵ درصد مولی کربنات کلسیم بر مدل سد شاتکی سیستم وریستوری SCNCCr

۴- نتیجه گیری

- در اثر افزودن کربنات کلسیم به کاربردی‌ترین سیستم وریستور اکسید قلع تا ۰/۲۵ درصد مولی، اندازه دانه افزایش یافت و با افزایش بیشتر تا ۰/۵ درصد مولی اندازه دانه کاهش یافت. در ضمن هیچ گونه فاز ثانویه‌ای در این نمونه‌ها قابل مشاهده نبود.
- علی‌رغم کاهش ولتاژ شکست و ضریب غیرخطی در نمونه دوپ شده با ۰/۲۵ درصد مولی کربنات کلسیم در مقایسه با نمونه بدون کربنات کلسیم، این نمونه دارای بیشترین ضریب غیرخطی اصلاح شده و در حدود ۱۴ بود که سبب کارایی بهتر وریستور از لحاظ تجربی نسبت به نمونه بدون کربنات کلسیم می‌شود و می‌تواند جایگزین آن شود.

- ارزیابی‌های پارامترهای مدل سد شاتکی دوگانه در نمونه‌های مختلف نشان داد که ضریب غیرخطی اصلاح شده بالاتر نمونه دوپ شده با ۲۵٪ درصد مولی کربنات کلسیم ناشی از ارتفاع سد شاتکی بیشتر و عرض ناحیه تخلیه کوچکتر در مقایسه با سایر نمونه‌هاست.

مراجع

- [1] T. K. Gupta, "Application of Zinc Oxide Varistors" J. Am. Ceram. Soc. Vol73, pp 1817-1840, 1990.
- [2] D. R. Clarke, "Varistor Ceramics", J. Am. Ceram. Soc, Vol 82, pp 485-502, 1999.
- [3] M. Matsouka, "nonohmics property of zinc varistors", Japan journals of applied physics, Vol10, pp 634-644, 1976.
- [4] Paulo R. Bueno, "SnO₂, ZnO and related polycrystalline compound semiconductors: An overview and review on the voltage-dependent resistance(non-ohmic) feature", J. Euro.Ceram. Soc. Vol 28, pp 505-529, 2008.
- [5] S. A. Pianaro, P. R. Bueno, E. Longo, J. Varela, "Electrical Properties of SnO₂ based Varistor", j. Mater. sci.: Mater in Electronic, Vol 9, pp 159-165, 1998
- [6] M. A. Ramírez, W. Bassi, R. Parra, P. R. Bueno, "E. Longo, Comparative Electrical Behavior at Low and High Current of SnO₂- and ZnO-Based Varistors", J. Am. Ceram. Soc., Vol91, pp 2402-2404, 2008
- [7] M. R. Cássia-Santos, V. C. Sousa, M. M. Oliveira, F. R. Sensato, W. K. Bacelar, "Recent research developments in SnO₂-based varistors", Materials Chemistry and Physics., Vol90, pp 1-9, 2005
- [8] J A Aguilar-Martínez, A B Glot, A V Gaponov, M B Hernández, "Current-voltage characteristics of SnO₂-Co₃O₄-Cr₂O₃-Sb₂O₅ ceramics", J. Phys. D: Appl. Phys. Vol42, pp 205401, 2009
- [9] M. M. Oliveira, P. R. Bueno, E. Longo, J. A. Varela, "Influence of La₂O₃, Pr₂O₃ and CeO₂ on the nonlinear properties of SnO₂ multicomponent varistors", Mater. Chem. and Phys., Vol74, pp 150-153, 2002
- [10] A Aguilar-Martínez, M B Hernández, A B Glot, "Microstructure and electrical properties in SnO₂ ceramics with sequential addition of Co, Sb and Ca", J. Phys. D: Appl. Phys. Vol40, pp 7097-7102, 2007
- [11] P. R. Bueno, M. R. de Cassia-Santos, E. R. Leite, E. Longo, J. Bisquert, "Nature of the Schottky-type barrier of highly dense SnO₂ systems displaying nonohmic behavior", J. Appl. Phys. Vol 88, pp 6545, 2000,
- [12] J. A. Aguilar-Martínez, A. Durán-Régulesc, A. B. Glot, "Effect of CaO on the microstructure and non-ohmic properties of (Co,Sb)-doped SnO₂ varistors", REVISTA MEXICANA DE FÍSICA., Vol54, pp 20-24, 2008
- [13] Qiaoyuan Wei, Jinliang He,† Jun Hu, and Yunchao Wang, "Influence of Cr₂O₃ on the Residual Voltage Ratio of SnO₂-Based Varistor", J. Am. Ceram. Soc., Vol94, pp 1999-2002, 2011
- [14] M. M. Oliveira, P. C. Soares Jr, P. R. Bueno, E. R. Leite, E. Longo, J. A. Varela, "Grain-boundary segregation and precipitates in La₂O₃ and Pr₂O₃ doped SnO₂.CoO-based varistors", J. Euro. Cer. Soc., 23:1875-1880(2003)
- [15] R. Bueno, S. A. Pianaro, E. C. Pereira, L. O. S. Bulhões, E. Longo, "Investigation of the electrical properties of SnO₂ varistor system using impedance spectroscopy", J. Appl. Phys., 8:(1998)