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

محمد مالکی شهرکی، سیامک نورایی، محمدرضا حسن‌زاده، طاهر دین‌محمدپور

پژوهشگاه مواد و انرژی



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

malekishahraki@gmail.com

چکیده: در این تحقیق، به بررسی تاثیر کربنات کلسیم بر ریزساختار و خواص الکتریکی سیستم کاربردی وریستور 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 وریستور 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 درنمونه حاوی ۰/۲۵ درصد مولی کربنات کلسیم افزایش یافته است. محاسبات پارامترهای مدل سد شاتکی در مرزدانه 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: وریستور، اکسید قلع، کربنات کلسیم، سد شاتکی دوگانه.

۱- مقدمه

وریستورها یا مواد غیراهمی 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 وریستور برای کاربرد صنعتی با پارامترهای ولتاژ شکست، جریان نشتی، ضریب غیرخطی، میزان جذب انرژی، مقاومت در برابر تست ضربه الکتریکی و ولتاژ باقی‌مانده مشخصه‌بندی می‌شود[۱]. مبنای فیزیکی رفتار یک وریستور، تشکیل سدهای شاتکی دوگانه در مرزدانه وریستور است که به دلیل اختلاف در سطح فرمی دانه و مرزدانه، الکترون‌های مجاور مرزدانه از دو طرف مرزدانه به مرزدانه 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. وریستورهای اکسید روی از سال ۱۹۷۶ میلادی به صورت تجاری در آمده‌اند و هم اکنون نیز تحقیقات بر روی بهبود خواص آنها ادامه دارد[۳].

وریستورهای نسل جدید بر پایه اکسید قلع از سال ۱۹۹۵ میلادی علی رغم دمای زینترینگ بالاتر، ضریب غیرخطی پایین‌تر بدلیل ریزساختار ساده، هدایت حرارتی بالاتر ولتاژ شکست بالاتر و مقاوم بودن به اضمحلال خواص الکتریکی در کاربردهای ولتاژ بالا مورد توجه قرار گرفته‌اند[۴]. معروف‌ترین سیستم وریستور اکسید قلع، سیستم دوپ شده با اکسیدهای کبالت، کروم و نئوبیوم 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 وریستورهای بر پایه اکسید قلع است [۵] و تنها سیستم وریستور بر پایه اکسید قلع است که قابلیت تجاری شدن را دارا می‌باشد[۶].

در میان دوپانت‌های اضافه شده به وریستور 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

[Downloaded from jicers.ir on 2026-11-01]

[DOR: 20.1001.1.17353351.1393.10.2.2.6]

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 لانتانیوم 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 لانتانیوم است[۹].

گزارش شده است که افزودن کربنات کلسیم به وریستور اکسید قلع دوپ شده با اکسید کبالت واکسید آنتی‌موان سبب رشد دانه و کاهش ولتاژ شکست از ۲۰۰۰v/cm به ۲۰۰ v/cm شده است در حالی که ضریب غیرخطیتغییر 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 استاما ضریب غیرخط بسیار پایین و بعنوان محدودیت است[۱۰].

هدف از این تحقیق، بررسی تاثیر افزودن کربنات کلسیم بر ریزساختار و خواص الکتریکیبر معروفترین و کاربردی ترین سیستم وریستور اکسید قلعSCNCr است. همچنین بمنظور ارزیابی دقیق خواص الکتریکی، تاثیر کربنات کلسیم بر پارامترهایمدل سد شاتکی بررسی‌می‌شود.

۲- فعالیت‌های تجربی

ترکیب اولیه وریستور بر پایه اکسید قلع به صورت درصد مولی شامل ۹۹/۲۴-X اکسید قلع (SnO_2)، ۰/۶۶٪ اکسید کبالت (Co_3O_4)، ۰/۰۵ اکسید کروم (Cr_2O_3)، ۰/۰۵ اکسید نئوبیوم (Nb_2O_5) و مقدار کربنات کلسیم ($CaCO_3$) ۰/۵، ۰/۲۵، ۰/۱، X=۰/۰۵ استکه ترکیبات مختلف بصورت مخخف 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 ونیل الکل به مخلوط اضافه شده و بمنظور گرانول کردن از الک با مش ۴۰ عبور داده می شود. برای شکل دهی قرص خام از فشار ۲۰۰ مگاپاسکال استفاده شد. قرص‌های خام به مدت ۲ ساعت در دمای ۱۳۰۰ درجه سانتی‌گراد با سرعت گرمایش و سرمایش ۲ 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 الکترود گذاری، خمیر نقره بر سطح پولیش شده قرص‌ها اعمال شد و در دمای ۶۰۰ درجه سانتی‌گراد حرارت‌دهی شد. منحنی شدت جریان بر حسب میدان الکتریکی با استفاده از مولتی متر Keithley2410 رسم شد. ولتاژ اعمالی در ۱میلی آمپر بر سانتی متر مربع بعنوان ولتاژ شکست اندازه‌گیری شد و ضریب غیرخطی (α) از لگاریم نسبت ولتاژ در جریان ۱ میلی‌آمپر به ولتاژ در ۱۰ میلی‌آمپر طبق رابطه (۱) محاسبه شد. همچنین ضریب خطی اصلاح شده (β) از نسبت ضریب غیرخطی به ولتاژ شکست طبق رابطه (۲) محاسبه می‌شود.

$$\alpha = 1/\log\left(\frac{E_{10mA/cm^2}}{E_{1mA/cm^2}}\right) \quad (۱$$

$$\beta = \frac{\alpha}{E_{1mA/cm^2}} \quad (۲$$

ضریب دی‌الکتریک نسبی و امپدانس قرص‌های زینتر شده در فرکانس ۱۰ 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 ۳۵-۰ ولت که با یک ولتاژ متناوب به دامنه ۱ ولت و فرکانس kHz بر ان 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].

[Downloaded from jicers.ir on 2026-11-01]

[DOR: 20.1001.1.17353351.1393.10.2.2.6]

$$\left(\frac{1}{C}-\frac{1}{2C_0}\right)^2=\frac{2p^2}{A^2e\varepsilon_0\varepsilon_r N_d}\left(\varphi_b+\frac{V}{p}\right) \quad (۳$$

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

$$N_{IS}=\left(\frac{2\varepsilon_r\varepsilon N_d\varphi_b}{e}\right)^{0.5} \quad (۴$$

$$W=\frac{N_{IS}}{N_d} \quad (۵$$

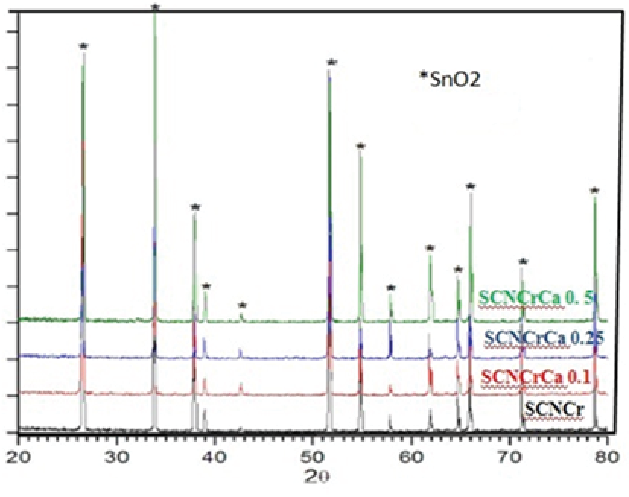
۳- نتایج و بحث

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

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 هیچ‌گونه فاز ثانویه‌ای ایجاد نمی‌شود و در تمام الگوها فقط فاز اکسید قلع در محدوده دقت XRD قابل شناسایی است.



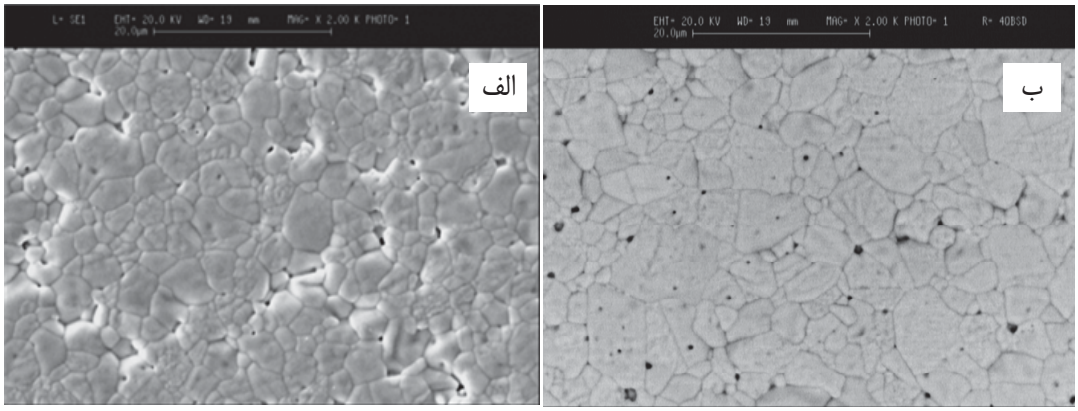
شکل ۱- الگوی XRD از نمونه‌های مختلف دوپ شده با کربنات کلسیم زینتر شده در دمای ۱۳۰۰ درجه سانتی‌گراد

[Downloaded from jicers.ir on 2026-11-01]
[DOR: 20.1001.1.17353351.1393.10.2.2.6]

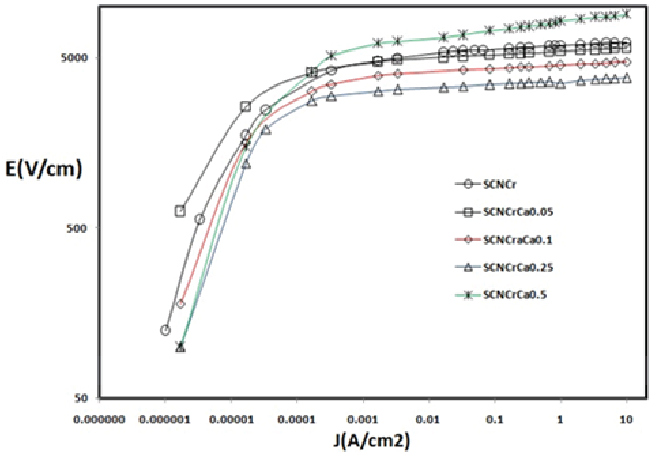
گزارش شده است که کربنات کلسیم در دمای ۵۰۰ درجه سانتی‌گراد به اکسید کلسیم و گاز دی اکسید کربن تجزیه می‌شود. شعاع یونی کلسیم ۱۱۱ پیکومتر در مقایسه با شعاع یونی قلع ۸۳ پیکومتر اختلاف قابل ملاحظه‌ای دارد و بنظر می‌رسد که حلالیت اکسید کلسیم در اکسید قلع در دمای زینتر ناچیز باشد البته می‌تواند در شبکه اکسید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

$$CaO \rightarrow Ca_{Sn}^{00} + V_O^{00} + O_O^X$$

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 وریستور اکسید قلع در جدول ۱ ارائه شده است. همانطور که دیده می‌شود افزودن کربنات کلسم 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 مرزدانه‌ها 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

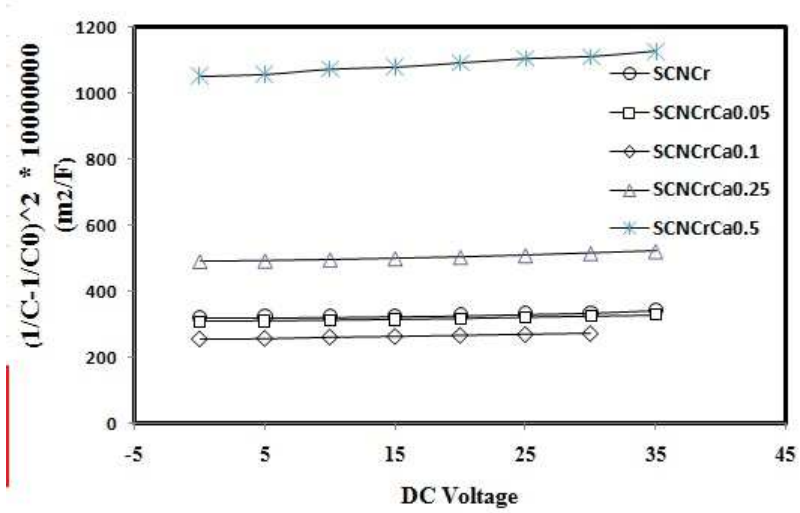
[Downloaded from jicers.ir on 2026-11-01]
[DOR: 20.1001.1.17353351.1393.10.2.2.6]

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	عر ض ناحیه تخلیه (w) nm	دانسیته اهداکننده (N_d) m^{-3}	دانسیته حالات در مرزدانه (N_{is}) m^{-2}
SCNCr	۶	۶۲	۱۰,۳	۱,۸	۷۳	$۵,۳*۱۰^{۲۳}$	$۳,۹*۱۰^{۱۶}$
SCNCrCa0.05	۵,۵	۵۲	۹,۴۵	۱,۷	۶۰	$۳,۹*۱۰^{۲۳}$	$۲,۴*۱۰^{۱۷}$
SCNCrCa0.1	۴,۵	۴۸	۱۰,۶	۱,۹	۶۱	$۴*۱۰^{۲۳}$	$۳*۱۰^{۱۶}$
SCNCrCa0.25	۳,۵	۴۹	۱۴	۲,۲	۴۳	$۲,۳*۱۰^{۲۴}$	$۱۰^{۱۷}$
SCNCrCa0.5	۸,۲	۲۳	۲,۸	۱	۱۰۰	$۱۰^{۲۳}$	$۱۰^{۱۶}$

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 غیر خطی تا نمونه SCNCrCa0.25 کاهش می‌یابد بطوریکه که ولتاژ شکست و ضریب غیرخطی در نمونه SCNCrCa0.25 به ترتیب ۳/۵kV/cm و ۴۹ می‌باشد و با افزودن بیشتر کربنات کلسیم در نمونه SCNCrCa0.5، ولتاژ شکست افزایش شدیدی تا ۸/۲kV/cm دارد در عین حال ضریب غیرخطی به مقدار ۲۳ کاهش می‌یابد. همین روند را نیز در مقاومت ظاهری نمونه در جدول۱ مشاهده می‌شود بطوریکه مقاومت ظاهری از ۸۸ kΩ در نمونه SCNCr به مقدار ۴۰ kΩ در نمونه SCNCrCa0.25 کاهش یافته است در حالیکه مجدداً در نمونه SCNCrCa0.5 تا ۱۲۲ kΩ 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.

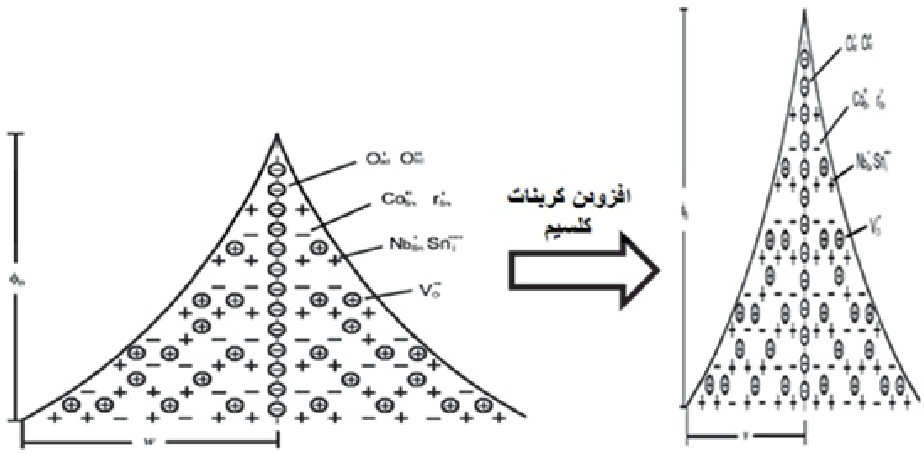


شکل ۴- تغییرات ظرفیت خازنی بر حسب ولتاژ مستقیم در نمونه‌های مختلف دوپ شده با کربنات کلسیم

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

[Downloaded from jicers.ir on 2026-11-01]
[DOR: 20.1001.1.17353351.1393.10.2.2.6]

دانه تقریبا مشابه است اما ولتاژ شکست و ضریب غیرخطی کاملا 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 SCNCrCa0.25 مشاهده می‌شود. عرض ناحیه تخلیه با افزایش کربنات کلسیم از ۷۸ نانومتر SCNCr در نمونه به ۴۰ نانومتر در نمونه SCNCrCa0.25 کاهش می‌یابد اما در نمونه SCNCrCa0.5 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 SCNCrCa0.25 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 SCNCrCa0.5 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 SCNCrCa0.25 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 SCNCrCa0.25 بر مدل سد شاتکی دوگانه در سیستم SCNCr 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 میابد و ضریب دی‌الکتریک نسبی در نمونه SCNCrCa0.25 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 SCNCr

۴- نتیجه‌گیری

- 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.

[Downloaded from jicers.ir on 2026-11-01]
[DOR: 20.1001.1.17353351.1393.10.2.2.6]

- ارزیابی‌های پارامترهای مدل سد شاتکی دوگانه در نمونه‌های مختلف نشان داد که ضریب غیرخطی اصلاح شده بالاتر نمونه دوپ شده با ۰/۲۵ 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.: Maters in Electronic,Vol 9,pp159-165 ,1998
[6] M. A. Ramı´rez, 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-Mart´ınez, A B Glot, A V Gaponov, M B Hern´andez, "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-Mart´ınez, M B Hern´andez, A B Glot, "Microstructure and electrical properties in SnO2 ceramics with sequential addition of Co, Sb and Ca"., J. Phys. D: Appl. Phys. Vol40 , pp7097–7102, 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-Mart´ınez,A. Dur´an-R´egulesc, A. B. Glot, "Effect of CaO on the microstructure and non-ohmic properties of (Co,Sb)-doped SnO2 varistors", REVISTA MEXICANA DE FI´SICA., 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 ,pp1999–2002 ,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)

[Downloaded from jicers.ir on 2026-11-01]
[DOR: 20.1001.1.17353351.1393.10.2.2.6]