

## بررسی خواص الکتریکی غیرخطی در الکتروسرامیک‌های ساخته شده بر پایه اکسید روی با آلایش پنتواکسید وانادیم

مهدی میرزایی

استادیار، دانشکده علوم پایه، واحد میانه، دانشگاه آزاد اسلامی، میانه، ایران



**چکیده:** سرامیک‌های الکترونیکی بر پایه اکسید روی (به عنوان ماده اصلی سازنده) و پنتواکسید وانادیم به عنوان آلایش، تهیه و به مدت ۲ ساعت در دمای ۱۰۰۰ درجه سانتی‌گراد تفت‌جوشی شد. مطالعه خواص ساختاری آن توسط میکروسکوپ الکترونی و پراش اشعه X انجام شد که در آن، دانه‌های رشد یافته اکسید روی به عنوان فاز اصلی مشاهده شدند. با افزایش میزان پنتواکسید وانادیم در ترکیبات، چگالی نمونه‌ها افزایش یافت. همه نمونه‌های ساخته شده در محدوده‌ای از میدان اعمال شده، رفتار غیر خطی جریان-ولتاژ از خود نشان دادند. ضریب غیرخطی در این ترکیبات شدیداً به درصد مولی آلایش وابسته بود و ولتاژ آستانه شکست با افزایش میزان آلایش کاهش یافت. رفتار غیرایزوتروپی مشاهده شده با تشکیل سد پتانسیل در مرز بین دانه‌ها توضیح داده شد.

**کلمات کلیدی:** اکسید روی، وریستور، رفتار جریان-ولتاژ غیرخطی، الکتروسرامیک، سد پتانسیلی.

نویسنده اول و مسئول:

دکتر مهدی میرزایی

دانشگاه آزاد واحد میانه

نوع مقاله: پژوهشی

صفحه‌های: ۷۵ تا ۸۳

شاپا چاپی: ۱۷۳۵-۳۳۵۱

شاپا الکترونیکی: ۲۷۸۳-۳۰۹۷

زبان نشریه: فارسی

دسترس‌پذیر در نشانی:

www.JICERS.ir

تاریخ دریافت:

۱۴۰۲/۱۱/۰۱

تاریخ پذیرش:

۱۴۰۲/۱۲/۱۲

DOR: 20.1001.1.17353351.1402.0.0.7.3

### ۱- مقدمه

مواد نیمه‌رسانای سرامیکی با مشخصه جریان-ولتاژ غیرخطی به وریستور یا مقاومت متغییر مشهور می‌باشند که ویژگی الکتریکی آن‌ها به دانه‌های سازنده این مواد وابسته است. این ادوات سرامیکی مدرن در مدارات مینیاتوری الکترونیکی، کنترل و قدرت کاربرد دارند. وظیفه این عنصر الکترونیکی مهار ولتاژهای بالا و ناگهانی است. اگر این ولتاژ ناگهانی مهار شود، بسیاری از تجهیزات گران قیمت، با عمر بالا ساخته خواهند شد. این مواد سرامیکی در ناحیه قبل از نقطه شکست دارای مقاومت بسیار بالا و در ناحیه پس از آن دارای مقاومت بسیار پایین می‌باشند که در ناحیه‌ای به نام نقطه شکست از هم جدا می‌شوند. وریستورها به طور موازی با مدار بسته می‌شوند تا آن‌ها را از عبور جریان بالا حفاظت کنند. هنگامی که ولتاژ پایین‌تر از ولتاژ شکست اعمال گردد، جریان بسیار ضعیفی از خود عبور می‌دهند (چون دارای مقاومت بالا هستند). اما هنگامی که در معرض ولتاژ بسیار بالا قرار گیرند، رسانایی بالایی از خود نشان داده و همه جریان را از خود عبور می‌دهند. هنگامی که ولتاژ به حالت عادی بر می‌گردد، واریستور نیز به حالت عادی مقاومت بالای خود برمی‌گردد و جریان جزئی از خود عبور می‌دهد. پس با انتخاب ترکیب مناسب ماده و پژوهش بر ولتاژ شکست این مواد، می‌توان نیاز مدارات مختلف که می‌بایست از ولتاژهای متفاوت حفاظت گردند، برطرف می‌شود [۱ و ۲ و ۳].



اکسید روی یک نیمه‌رسانای نوع n با گاف انرژی ۳,۳۷ الکترون ولت می‌باشد که ویژگی‌های منحصر به فرد و جالبی را از خود نشان می‌دهد. این ماده به دلیل گاف الکتریکی بزرگ، ولتاژ شکست بالایی دارد که آن را جهت مصارف ولتاژ بالا و اعمال میدان بزرگ در طیف دمایی بالا مناسب می‌سازد. گاف انرژی بزرگ و نوع n بودن آن به خاطر وجود حفره‌های اکسیژنی در ساختار آن است که اندازه گاف را می‌توان با مواد افزودنی و آلیاژ تغییر داد. اکسید روی در ترکیب با مواد افزودنی، خاصیت غیرخطی در نمودار جریان-ولتاژ از خود نشان می‌دهد. از دیدگاه فیزیکی، نمودار جریان-ولتاژ غیرخطی در این مواد به خاطر وجود بارهای ما بین دانه‌هاست که ارتفاع سد پتانسیل و جریان عبوری از آن اتصال را کنترل می‌کند. افزودن آلیاژهایی از اکسید فلزات انتقالی یا بیسموت باعث بهبود ویژگی غیرخطی نمودار جریان-ولتاژ سرامیک خواهد شد. ضریب غیرخطی جریان-ولتاژ در این مواد با رابطه  $\alpha = \frac{\log \Delta I}{\log \Delta V}$  تعریف می‌گردد [۷].

سرامیک‌های پلی کریستال اولیه در سال ۱۹۳۰ ساخته شدند و از سال ۱۹۶۰ به بعد، ورستورهای توان بالا بر پایه اکسید روی معرفی شدند. تحقیقات گسترده‌ای در مورد این قطعات الکترونیکی از نظر مکانیسم رسانشی در آن و کاربردهای صنعتی انجام گرفته است. مهم‌ترین این تحقیقات روی ورستورهای ساخته شده از اکسید روی با آلیاژ عنصر بیسموت انجام گرفت. بیسموت بهترین آلیاژ جهت بهبود ضریب غیرخطی جریان-ولتاژ این ماده بود. اگر از اکسید کبالت به جای بیسموت استفاده شود، شاهد تغییرات زیادی در ساختار و خواص الکتروسرامیک خواهیم بود. دمای پخت جهت تفت‌جوشی برای ترکیبات حاوی بیسموت و کبالت و ... بالاتر از ۱۳۰۰ درجه سانتی‌گراد است و یکی از مزایای مهم پنتو اکسید وانادیم جهت آلیاژ اکسید روی در این است که با افزودن مقدار کمی از آن، دمای تفت‌جوشی تا حد قابل توجهی پایین می‌آید [۴ و ۵ و ۶].

الکتروسرامیک‌های ساخته شده از اکسید روی، ورستورهای اکسید فلزی نیز نامیده می‌شوند که در ژاپن توسعه یافتند و نسل اول آن‌ها توسط ماتسوکو ساخته و آزموده شدند. در اکثر موارد، این سرامیک‌ها برای کار در ولتاژهای بالا ساخته شدند. وی موفق شد ورستور را با افزودن مقادیر جزئی از اکسید آنتیموان (یک مول درصد) به همراه اکسید کبالت و اکسید کروم و اکسید منگنز (هر کدام ۰,۵ مول درصد) بسازد. امروزه ورستورهای تجاری ممکن است حاوی هشت عنصر افزودنی باشد. افزودن این عناصر به مقدار جزئی به دلیل بیش‌تر کردن کارایی این ادوات و کنترل ویژگی‌های این نوع سرامیک‌های الکتریکی است. این ویژگی‌ها شامل ضریب غیرخطی نمودار جریان-ولتاژ، میزان جریان عبوری و ولتاژ شکست است که با آلیاژ مناسب و تغییر دمای تفت جوشی می‌توان ورستور مورد نظر را بر حسب نیاز تولید کرد. این عناصر را می‌توان به صورت زیر طبقه‌بندی نمود:

الف: عنصر اصلی سازنده ورستور: بیسموت-اکسید روی

ب: عنصر ایجاد کننده مشخصه غیرخطی جریان-ولتاژ: کبالت- کروم- منگنز- آنتیموان

ج: عنصر کاهنده میزان رشد دانه‌ها: سیلیسیم- آنتیموان

د: عنصر بهبود دهنده رشد دانه‌ها: آلومینیم- باریم- تیتانیم

ه: بهبود دهنده پایداری: باریم- بور- کروم- نقره- لیتیم- پتاسیم

و: بهبود دهنده جریان عبوری: ایندیم- گالیم- آلومینیم

لازم به ذکر است که در مورد لیست فوق باید خیلی با احتیاط رفتار کرد. چون ممکن است یک عنصر بیش از یک اثر داشته باشد. مثلا مقادیر جزئی لیتیم می‌تواند پایداری را افزایش دهد. اما مقادیر بالای آن ضریب غیرخطی را کاهش می‌دهد. پس می‌توان نتیجه گرفت که با تحقیق روی آلیاژ مناسب و دما و زمان تفت‌جوشی می‌توان ترکیب مناسب برای کاربردهای حفاظتی مدارات در ولتاژهای مختلف را به دست آورد [۸]. در این زمینه تحقیقات گسترده‌ای انجام گرفته است و با توجه به نیاز صنعت، ورستورهای ولتاژ بالا با پایداری خوب تولید شده است. یکی از موارد جالب که می‌توان بر روی آن تحقیق کرده و توسعه بخشید، ساخت ورستورهای ولتاژ پایین است. پنتواکسید وانادیم بدلیل نقطه ذوب پایینی که دارد به راحتی درون دانه‌های اکسید روی نفوذ کرده و این دانه‌ها را به هم چسبانده و باعث بروز ویژگی‌های غیرخطی در نمودار جریان-ولتاژ می‌گردد. ولتاژ شکست این ورستورها پایین است که آن را مناسب استفاده در مدارات الکترونیکی و میکروالکترونیکی می‌سازد. همچنین می‌توان این ترکیب را در دماهای تفت‌جوشی پایین تهیه کرد که مزیت خوبی برای تولید قطعات چند لایه است. در این مقاله ویژگی‌های الکتریکی ورستورهای

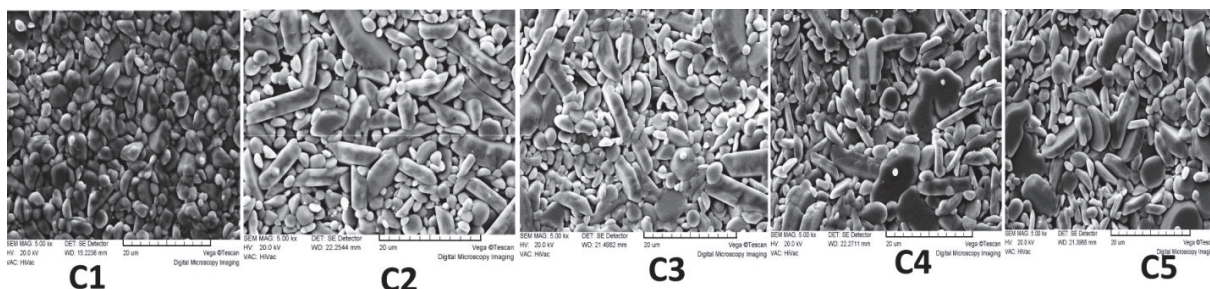
اکسید روی با آلایش پنتو اکسید وانادیم (در بازه ۱ تا ۵ مول درصد) بررسی شده است. همچنین ساختار نمونه‌های ساخته شده با میکروسکپ الکترونی و پراش اشعه X و اندازه‌گیری چگالی مورد مطالعه قرار گرفته است.

## ۲- مواد و روش‌های تجربی

نمونه‌های مورد آزمایش با مخلوط کردن پودر مواد اولیه با نسبت مناسب و پرس کردن آن‌ها در فشار بالا و تفت‌جوشی در دمای ۱۰۰۰ درجه سانتی‌گراد تهیه شدند. ابتدا پودر اکسید روی و پنتواکسید وانادیم با نسبت مولی مناسب (آلایش از ۱ تا ۵ مول درصد) با فرمول عمومی  $ZnO(100-x \text{ mol}\%)-V_2O_5(x \text{ mol}\%)$  با هم مخلوط شده و در محفظه آسیاب گلوله‌ای به همراه اتانول ریخته شد. اکسید روی و پنتواکسید وانادیم استفاده شده ساخت شرکت مرک آلمان بود. مواد اولیه به مدت ۶ ساعت در آسیاب گلوله‌ای کاملاً با هم مخلوط شدند تا مواد اولیه کاملاً یکنواخت حاصل گردد. پس از آن مقداری از پودر، تحت فشار بسیار بالا (حدود ۲۰ تن) به مدت ۵ دقیقه قرار گرفت تا قرص به ضخامت یک میلی‌متر و به قطر یک سانتی‌متر به دست آید. قرص‌های به دست آمده در کوره الکتریکی به مدت ۲ ساعت در دمای ۱۰۰۰ درجه سانتی‌گراد قرار گرفتند و سپس به آرامی تا دمای اتاق سرد شدند. انتخاب دمای ۱۰۰۰ درجه سانتی‌گراد برای تفت‌جوشی به این دلیل بود که پنتواکسید وانادیم نقطه ذوب پایینی دارد و در ترکیب با اکسید روی تمایل به ساخت فاز غیر کریستالی دارد، طوری که در درصدهای مولی بالا از این ماده فاز آمورف مشاهده می‌شود. یکی از محاسن پنتواکسید وانادیم در ترکیب با اکسید روی، پایین بودن دمای تفت‌جوشی می‌باشد. پس از تهیه قرص‌ها دو طرف آن‌ها با چسب نقره جهت آزمایش رسانندگی الکتروگذارای شدند. جریان عبوری با آمپر متر دقیق اندازه‌گیری شد. میکرو ساختار نمونه‌ها با میکروسکپ الکترونی SEM; Cam Scan MV2300 مطالعه شد. پراش اشعه X از نمونه‌ها با دستگاه XRD; PW1710, Philips با دقت ۲ درجه به دست آمد و چگالی قرص‌های ساخته شده به روش ارشمیدس و با غوطه‌ورسازی در مایع بی‌اثر بوتانول (اتیل متیل کتون) اندازه‌گیری و گزارش شد. مشخصات و میزان آلایش نمونه‌ها در جدول ۱ گزارش شده است. ترکیب با ۱ مول درصد آلایش با نام C1، با ۲ مول درصد با نام C2، با ۳ مول درصد با نام C3، با ۴ مول درصد با نام C4 و با ۵ مول درصد آلایش با نام C5 نامگذاری شده است.

## ۳- نتایج و بحث

شکل ۱ تصویر میکروسکوپ الکترونی نمونه‌های ساخته را نشان می‌دهد. تصویر نشانگر دانه‌های بزرگ دوکی شکل است که در میان دانه‌های ریز به طور نسبتاً همگن پخش شده است. مشاهده می‌شود که افزایش میزان پنتواکسید وانادیم در ترکیب باعث تمایل به رشد این دانه‌ها می‌گردد. این امر به خاطر دمای ذوب پایین پنتواکسید وانادیم است. در حین تفت‌جوشی در دمای بالا دانه‌هایی که نزدیک ذرات پنتواکسید وانادیم هستند ذوب شده و به هم می‌چسبند و دانه‌های بزرگ را تشکیل می‌دهند. به این ترتیب دانه‌های اکسید روی با مرور زمان در فرآیند تفت‌جوشی، بزرگ و بزرگ‌تر می‌گردند. طبیعتاً با افزایش میزان پنتواکسید وانادیم این عمل بهتر انجام می‌گیرد و دانه‌های بزرگ‌تر به دست می‌آید. پس می‌توان با کنترل میزان آلایش پنتواکسید وانادیم، اندازه دانه‌ها را کنترل نمود. همچنین انتظار می‌رود که زمان پخت نیز در اندازه آن‌ها تاثیرگذار باشد.

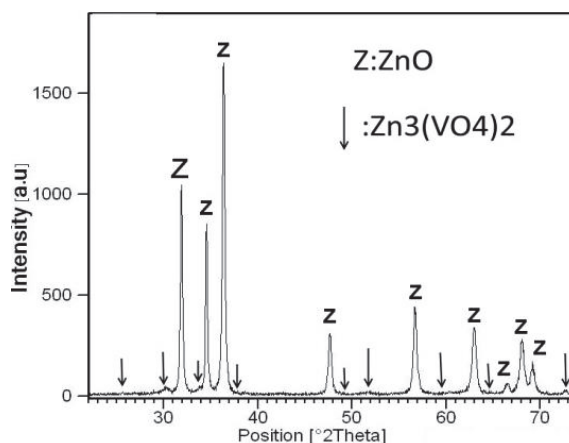


شکل ۱: تصویر میکروسکوپ الکترونی از نمونه‌ها

شکل ۲ نمایشگر پراش اشعه X از نمونه C5 (با ۵ مول درصد آلیش) می‌باشد. پیک‌های تیز و بلند مربوط به ساختار هگزاگونال اکسید روی به عنوان فاز اصلی در این شکل قابل مشاهده است. این پیک‌ها دلالت بر رشد کریستال‌های اکسید روی دارد. سه پیک تیز در  $31,7 - 34,4 - 36,25$  وجود کریستال‌های اکسید روی به عنوان فاز اصلی را تایید می‌کند. پیک‌های مربوطه با علامت Z در شکل ۲ مشخص شده است (اعداد مربوط به  $2\theta$  است) [۱۰]. فاز ثانویه شامل  $Zn_3(VO_4)_2$  و با پیک‌های ضعیف‌تری است که به دلیل درصد مولی پایین آلیش و در اثر واکنش میان دانه‌های اکسید روی و پنتواکسید وانادیم به وجود آمده است. پیک‌های مربوط به این فاز با علامت فلش در شکل نشان داده شده است. واکنش اصلی مربوط به تشکیل این فاز به صورت زیر است:

$$3ZnO + V_2O_5 \rightarrow Zn_3(VO_4)_2$$

انتظار می‌رود حضور این فاز شدیداً به درصد مولی پنتواکسید وانادیم و دمای تفت‌جوشی وابسته باشد [۱۰ و ۱۵ و ۱۶ و ۱۷].

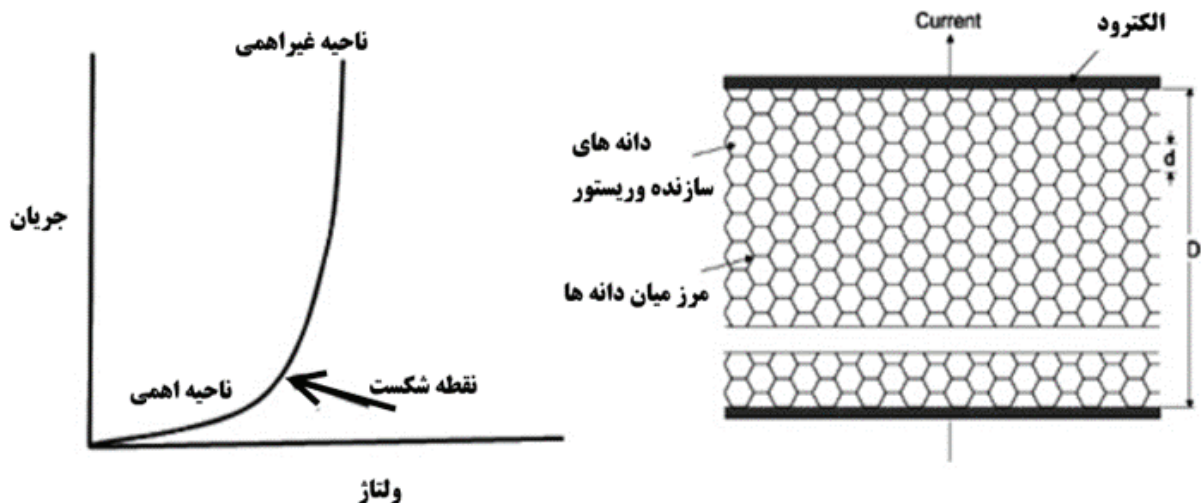


شکل ۲: پراش اشعه X مربوط به نمونه با ۵ مول درصد پنتواکسید وانادیم.

چگالی نمونه‌های ساخته شده در جدول ۱ گزارش شده است. نتایج نشان می‌دهد که چگال‌ترین سرامیک به ازای بالاترین میزان آلیش پنتواکسید وانادیم (۵ مول درصد) به دست می‌آید. به عبارتی هر قدر میزان آلیش افزایش یابد، چگالی زیاد می‌شود.

اکسید روی خالص به عنوان نیمه‌رسانای نوع n شناخته می‌شود و تحقیقات گسترده‌ای جهت انتخاب ماده مناسب جهت آلیش آن انجام گرفته است. بنا به این تحقیقات، افزودن مقدار جزئی از پنتواکسید وانادیم، رفتار الکترونیکی و ساختار آن را شدیداً تحت تاثیر قرار می‌دهد [۱۱]. همان طور که در مقدمه اشاره شد، ورستورها ادوات الکترونیکی با نمودار جریان-ولتاژ غیرخطی می‌باشند که در ناحیه قبل از نقطه شکست دارای مقاومت بسیار بالا و در ناحیه پس از آن دارای مقاومت بسیار پایین می‌باشند. این الکتروسرامیک‌ها از دانه‌های به هم چسبیده به وجود می‌آیند که ویژگی‌های آن‌ها به اندازه این دانه‌ها و حالات الکترونی در مرز میان دانه‌ها بستگی دارد. شکل ۳ نمایشگر نمودار کلی جریان-ولتاژ این نوع الکتروسرامیک‌هاست.

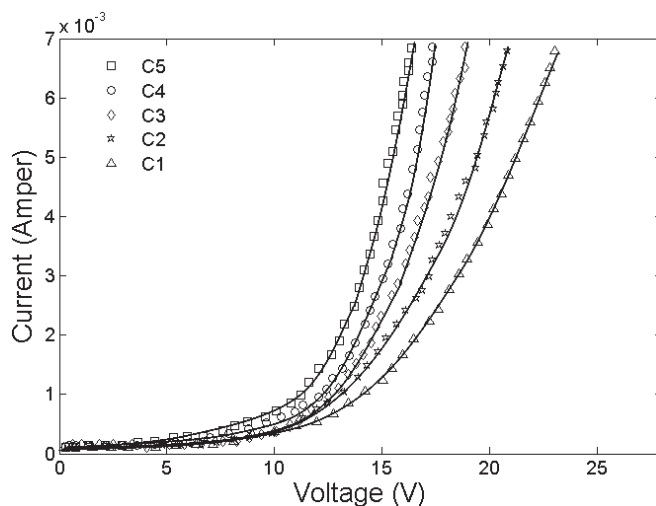
شکل ۴ نمایشگر نمودار جریان-ولتاژ نمونه‌های ساخته شده با مقادیر مختلف پنتواکسید وانادیم است. در تمام این ترکیبات رفتار غیراھمی مشهود است و ولتاژ آستانه شکست با افزایش میزان آلیش کاهش می‌یابد. بعد از ناحیه شکست شاهد عبور جریان بالا هستیم. در ناحیه قبل از شکست نیز رفتار اهمی و خطی در نمودار جریان-ولتاژ کاملاً مشهود است. ضریب غیرخطی جریان-ولتاژ با محاسبه شیب نمودار  $\log I$  بر حسب  $\log V$  به دست آمده است. گاف الکتریکی این نمونه‌ها نیز با تحلیل نمودار جریان-ولتاژ در ناحیه اهمی و در بازه دمایی ۲۰ تا ۱۸۰ درجه سانتی‌گراد محاسبه شده است. گاف الکتریکی نیز شدیداً به میزان آلیش پنتواکسید وانادیم وابسته است که با افزایش میزان آلیش، گاف الکتریکی نیز کاهش می‌یابد. عبور جریان در این ناحیه به علت تحریک گرمایی و جهش الکترون‌ها بین حالات تشکیل شده به وجود می‌آید. مقادیر مربوط به گاف الکتریکی و ضریب غیرخطی در جدول ۱ گزارش شده است. همچنین اطلاعات مربوط به ویژگی‌های الکتریکی نمونه‌های ساخته شده و وابستگی آن‌ها به درصد مولی آلیش به کار رفته در شکل ۵ نمایش داده شده است.



شکل ۳: نمودار جریان-ولتاژ در وریستور و دانه‌های سازنده آن

جدول ۱: مشخصات فیزیکی نمونه‌های ساخته شده

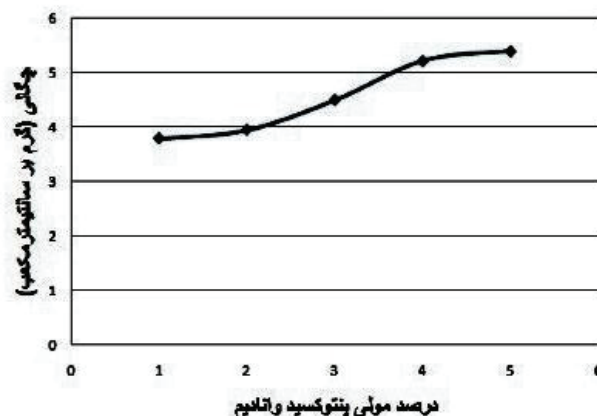
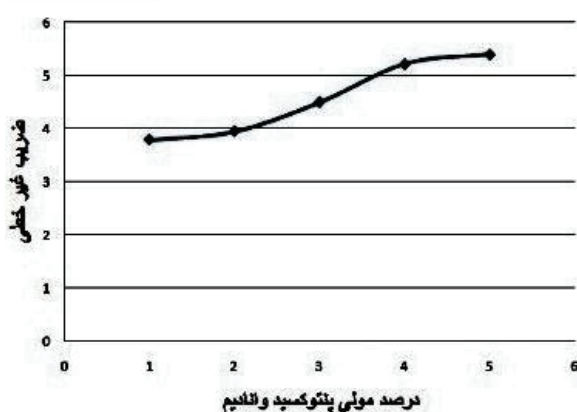
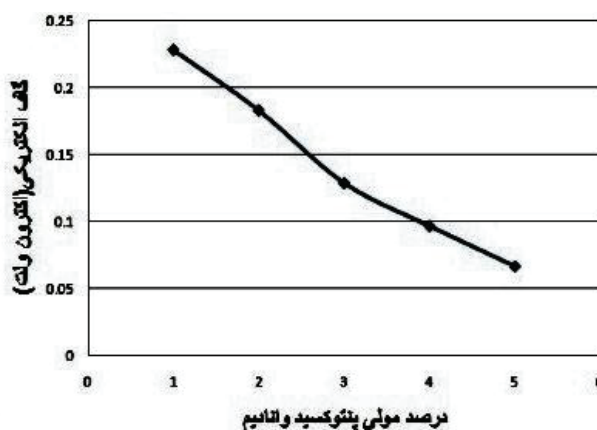
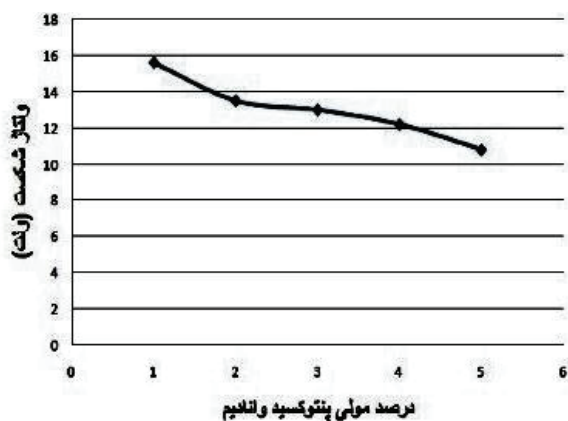
نام نمونه	ZnO (mol%)	V <sub>2</sub> O <sub>5</sub> (mol %)	چگالی (gr/cm <sup>3</sup> )	ضریب غیرخطی (α)	گاف الکتربیکی (eV)	ولتاژ نقطه شکست (V)
C1	۹۹	۱	۵/۲	۳/۷۹	۰/۲۲۸	۱۵/۶
C2	۹۸	۲	۵/۳۹	۳/۹۵	۰/۱۸۳	۱۳/۵
C3	۹۷	۳	۵/۸	۴/۵	۰/۱۲۹	۱۳
C4	۹۶	۴	۶/۰۵	۵/۲۲	۰/۰۹۷	۱۲/۲
C5	۹۵	۵	۶/۳	۵/۴	۰/۰۶۷	۱۰/۸



شکل ۴: نمودار جریان-ولتاژ مربوط به نمونه‌های ساخته شده با مقادیر مختلف پنتواکسید وانادیم

مشخصه جریان-ولتاژ غیراھمی در این مواد از تفاوت در تراز فرمی دانه‌های سازنده ماده و تشکیل سد پتانسیلی و افت ارتفاع آن در اثر اعمال میدان‌های خارجی به وجود می‌آید. در این حالت مرز بین دانه‌ها به عنوان اتصال بین نیمه‌هادی‌ها عمل می‌کند. در نواحی تماس بین دانه‌های مجاور، سدهای پتانسیل وجود دارند. دلیل تشکیل این سدهای پتانسیل به تغییر شکل نوارهای انرژی نیمه‌رسانا در اثر میدانی که توسط ناخالصی‌های باردار و نیز نقص‌هایی که در مرزهای بین بلوری به وجود می‌آیند، مربوط می‌شود. این رفتار با توجه به نظریه سد شاتکی قابل توجیه است.

به زبان ساده‌تر، مرز بین دانه‌ها به عنوان اتصال بین نیمه‌هادی‌ها عمل می‌کند. از آنجا که تراز فرمی دانه‌های تشکیل‌دهنده ماده متفاوت می‌باشند، در اثر نزدیکی آن‌ها به هم در مرز بین دانه‌ها یک اتصال نیمه‌رسانا به وجود می‌آید. پس از تشکیل اتصال و رسیدن به حالت تعادل، تراز فرمی در محل اتصال در امتداد یکسان قرار می‌گیرد و در این حالت انرژی پیوندی که الکترون به دست می‌آورد و حالات تله را اشغال می‌کند، برابر با انرژی الکترواستاتیکی است که الکترون را از حالات درونی دانه‌ها به مرز حرکت دهد.



شکل ۵: نمودار وابستگی ویژگی‌های الکتریکی مربوط به نمونه‌های ساخته شده به مقادیر مختلف پنتواکسید وانادیم

در حالت تعادل، الکترون‌های به دام افتاده در حد فاصل اتصال به عنوان یک ورقه بار منفی در مرز عمل کرده و لایه‌ای از بارهای مثبت در پشت سر خود به جا می‌گذارند و یک میدان الکترواستاتیکی با سد پتانسیل در مرز به وجود می‌آورند. اعمال میدان الکتریکی باعث کاهش سد پتانسیل ایجاد شده و افزایش جریان می‌گردد [۱۲ و ۱۳].

در نظریه هدایت شاتکی از مدل پیانارو استفاده می‌شود که رابطه ۱ را می‌توان برای محاسبه جریان عبوری ارائه داد:

$$J = J_0 \left( -\frac{q\phi_b}{K_B T} \right) \left[ 1 - \exp \left( -\frac{qV}{pK_B T} \right) \right] \quad (1)$$

در رابطه فوق  $J$  بیانگر جریان عبوری و نقل و انتقال الکترون‌ها از میان سد پتانسیل و  $J_0$  مقداری ثابت است.  $\phi_b$  ارتفاع سد پتانسیل به وجود آمده،  $q$  بار الکترون،  $T$  دما،  $p$  تعداد سدهای تشکیل شده در واحد حجم،  $V$  پتانسیل اعمال شده و  $K_B$  ثابت بولتزمن است. در میدان اعمالی پایین می‌توان از تقریب  $\exp(-qV/pK_B T) = (1 - qV/pK_B T)$  استفاده نمود و اگر آن را در رابطه ۱ جاگذاری کنیم خواهیم داشت:

$$J = J_0 \left( -\frac{q\phi_b}{K_B T} \right) \left( \frac{qV}{pK_B T} \right) \quad (2)$$

از رابطه ۲ به وضوح رفتار اهمی در میدان پایین استنتاج می‌گردد. در صورتی که ولتاژ اعمالی زیاد شود، تقریب به کار رفته معتبر نیست و رابطه ۳ را باید بکار برد:

$$dJ/dV = J(V) \left( -\frac{1}{k_B T} \right) \left( \frac{d\phi_b}{dV} \right) \quad (3)$$

در ناحیه غیراھمی نمودار جریان-ولتاژ می توان رابطه کلی زیر را نوشت:

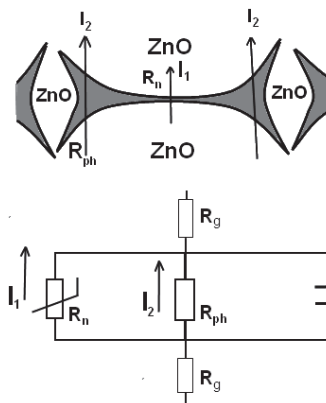
$$J(E) = \sigma_0 E \exp \beta E \quad (4)$$

در رابطه ۴ میتوان ضریب  $\beta$  را بصورت زیر تعریف کرد.  $\sigma_0$  نیز رسانندگی وریستور در میدان پایین است:

$$\beta = \frac{d}{k_B T} \left[ -\frac{d\phi_b}{dV} \right] \quad (5)$$

با توجه به رابطه ۴، اگر میدان اعمالی پایین باشد، در ناحیه اھمی  $\beta E \ll 1$  و رابطه خطی  $J(E) = \sigma_0 E$  حاصل می شود. در میدان بالا و با افزایش  $E$ ، رابطه نمایی بیانگر افزایش شدید جریان است. پس رابطه ۴ بخوبی رفتار وریستور را در میدان پایین و بالا توضیح می دهد. لازم به ذکر است در ناحیه غیرخطی نمودار جریان-ولتاژ، افزایش جریان ناشی از دو پارامتر است. یکی افزایش میدان اعمالی در حالت رسانندگی ثابت و دیگری کاهش ارتفاع سد پتانسیل تشکیل شده بین ذرات [۱۳]. در مورد ولتاژ شکست و افزایش رسانندگی در وریستورها رابطه ساده  $E_B = V_B/D$  را داریم که در آن  $E_B$  میدان اعمال شده و  $D$  ضخامت نمونه و  $V_B$  ولتاژ شکست است. می توان گفت  $V_B = nV_b$  که در آن  $V_b$  ولتاژ شکست در مرز هر دانه و  $n$  تعداد دانه های الکتروسرامیک است. پس از رابطه فوق می توان نتیجه گرفت  $E_B = V_b/d$  که در آن  $d$  ضخامت هر دانه است. با افزایش درصد مولی پنتوکسید وانادیم در ترکیب، در اثر ذوب و آمیخته شدن آن در اکسید روی، دانه ها شروع به رشد می کنند و بخاطر افزایش سایز دانه های سازنده، تعداد مرز میان دانه ها کم می شود. این امر باعث کاهش ولتاژ شکست به ازای هر مرزدانه می شود که در مجموع باعث بروز شکست و جریان بالا می گردد [۱۷ و ۱۸].

جهت توضیح دیگر رفتار غیراھمی می توان از این نکته بهره برد که ویژگی های الکتریکی ماده بر اساس میزان جریان عبوری از دانه های اکسید روی مجاور تعیین می شود. برای هر دو دانه مجاور می توان عبور دو نوع جریان را از هم متمایز نمود که در شکل ۶ نشان داده شده است. در شکل فوق ناحیه بین دو دانه هاشورزده شده است. یک مولفه جریان در حالی که دو دانه بسیار نزدیک به هم هستند، از مرز بین دو دانه مجاور عبور می کند. ضخامت لایه جدا کننده این ناحیه به اندازه ۳-۴ نانو متر است. در این ناحیه سد پتانسیلی که مسئول رفتار غیراھمی است به وجود می آید. مولفه دوم جریانی است که از لایه ضخیم تشکیل شده بین دو دانه مجاور عبور می کند (جریان  $I_2$  در شکل ۶). جریان عبوری در حالت میدان ضعیف از این ناحیه عبور می کند. اگر توصیف فوق را در نظر بگیریم، می توان برای هر دو دانه تشکیل دهنده مجاور، مدار معادلی را در نظر گرفت که در شکل ۶ نشان داده شده است. در این مدار  $R_g$  مقاومت دانه های اکسید روی است.  $R_{ph}$  مقاومت بین دانه ها و  $R_n$  مقاومت غیراھمی محل اتصال هاست که جریان  $I_1$  از آن عبور می کند. در میدان های پایین وریستور مثل یک مقاومت با مقدار  $R_{ph}$  عمل می کند. این مقاومت به علت حضور سد پتانسیل در بین دانه ها بوجود می آید و ارتفاع آن به قدری زیاد است که جریان بسیار کمی از آن عبور می کند. اما با افزایش میدان  $R_n$  نقش اصلی را بازی می کند که مسئول رفتار غیراھمی در ماده است. پس وریستور در میدان پایین جریان بسیار کمی را عبور می دهد و در میدان بالا شدیداً رسانا می شود و جریان بالایی را از خود عبور می دهد [۱۴].



شکل ۶: عبور دو نوع جریان میان دانه های اکسید روی و مدار معادل آن

## ۴- نتیجه گیری

سرامیک‌های الکترونیکی بر پایه اکسید روی با آلایش پنتواکسید وانادیم (از ۱ تا ۵ مول درصد) ساخته شد و مشخصه الکتریکی و ساختاری آن‌ها بررسی شد. با افزایش میزان آلایش، رشد دانه‌ها شدت می‌گیرد و دانه‌های بزرگ‌تری حاصل می‌گردد. همه نمونه‌های ساخته شده رفتار غیراھمی جریان-ولتاژ از خود نشان دادند که با افزایش آلایش، نقطه شکست کاهش و ضریب غیرخطی افزایش یافت. با افزایش درصد مولی پنتواکسید وانادیم در ترکیب، در اثر ذوب و آمیخته شدن آن در اکسید روی، دانه‌ها شروع به رشد می‌کنند. با افزایش اندازه دانه‌های تشکیل دهنده، تعداد مرز میان دانه‌ها کم می‌شود که باعث کاهش ولتاژ شکست به ازای هر مرز دانه می‌شود. این امر در مجموع باعث بروز شکست و جریان بالا می‌گردد. چگالتترین نمونه به ازای بیش‌ترین درصد مولی آلایش به دست آمد. علت بروز این رفتار تشکیل سد پتانسیل در مرز بین دانه‌های سازنده و افت ارتفاع آن در اثر اعمال میدان خارجی است.

## مراجع

- [1]. F. Omar, "Optimizing the performance of the ZnO-based varistors using the neural networks technique", *Microelectronics Reliability*, 2023, 148, 115188-115197.
- [2]. A. [Bouhekhla](#), M. [Boulesba](#), "Synthesis and characterization of ZnO based varistor ceramics: effect of sintering temperatures", *Microelectronics International*, 2022, 39, 110-120.
- [3]. M. Shaifudin, W. Ikhmal, M. Ghazali, "Exploring the global publications on varistors using the Scopus database through a bibliometric analysis", *Journal of Asian Ceramic Societies*, 2022, 10, 438-452.
- [4]. Z. Topcagic, T.E. Tsovilis, "Varistor Electrical Properties: Microstructural Effects", *Encyclopedia of Materials: Technical Ceramics and Glasses*, 2021, 3, 254-271.
- [5]. A.B. Glot, A.V. Gaponov, A.P. Sandoval-Garcia, "Electrical conduction in SnO<sub>2</sub> varistors" *Physica B*, 2010, 405, 705-711.
- [6]. B. Hairui, L. Miaomiao, X. [Zhijun](#), [Ruqing Chu](#), H. Jigong, "Influence of SiO<sub>2</sub> on electrical properties of the highly nonlinear ZnO-Bi<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-MnO<sub>2</sub> varistors", *Journal of the European Ceramic Society*, 2017, 37, 3965-3971.
- [7]. L. Jiaqi, Y. Shuaijun, P. Yong, Z. Dachuan, "Effects of pre-calcination and sintering temperature on the microstructure and electrical properties of ZnO-based varistor ceramics" *Materials Science in Semiconductor Processing*, 2021, 123, 105529-105539.
- [8]. K. Hembram, T.N. Rao, R.S. Srinivasa, A.R. Kulkarni, "CaO doped ZnO-Bi<sub>2</sub>O<sub>3</sub> varistors: Grain growth mechanism, structure and electrical properties" *Ceramic International*, 2021, 47, 1229-1237.
- [9]. A. Amini, M. Rajabi, S. Zahraee, "Microstructural and electrical properties of flash sintered ZnO-Bi<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-Sb<sub>2</sub>O<sub>3</sub> based varistors: Effect of current density with a controlled current ramp" *Materials Chemistry and Physics*, 2023, 295, 127094.1.
- [10]. C.W. Nahm, "Microstructure and electrical characteristics of MnTa-doped ZnO-V<sub>2</sub>O<sub>5</sub>-ceramics with sintering" *Journal of Alloys Compound*, 2010, 505, 657-660.
- [11]. S. Karamat, R.S. Rawat, "Structural, compositional and magnetic characterization of bulk V<sub>2</sub>O<sub>5</sub> doped ZnO system" *Applied Surface Science*, 2010, 256, 2309-2314.
- [12]. P. Singh, A. Kumar, A. Kaushal, D. Kaur, A. Pandey, R. Goyal, "In situ high temperature XRD studies of ZnO nanopowder prepared via cost effective ultrasonic mist chemical vapour deposition", *Bulletin of Materials Science*, 2008, 31, 573 - 577.
- [13]. M. Mirzayi, "The effect of TiO<sub>2</sub> concentration on the electrical and microstructural properties of ZnO-base varistor ceramic prepared from nanosize ZnO particles" *Advances in applied ceramics*, 2020, 119, 373-379.
- [14]. H. Bidadi, Sh. M. Hasanli, H. Hekmatshoar, S. Bidadi, "Temperature dependence of electrophysical characteristics of zinc oxide based varistors" *Vacuum*, 2010, 84, 1232-1235.
- [15]. Z. Ming, S. Yu, T. Chang Sheng, "Grain growth of ZnO-V<sub>2</sub>O<sub>5</sub> based varistor ceramics with different antimony dopants" *Journal of the European Ceramic Society*, 2011, 31, 2331-2337.
- [16]. J.K. Tsai, T.B. Wu, "Nonohmic characteristics of ZnO-V<sub>2</sub>O<sub>5</sub> ceramics", *Journal of Applied Physics* 1994, 76, 4817-4822.
- [17]. C.W. Nahm "Sintering effect on varistor properties and degradation behavior of ZVMB varistor ceramics", *Journal of Materials Science: Materials in Electronic*, 2017, 28, 17063-17069.
- [18]. C.W. Nahm "Major Effects on Non-ohmic Properties and Aging Stress Behavior of ZPCCD Semiconducting Varistors with Er<sub>2</sub>O<sub>3</sub> Doping Changes" *Transactions on Electrical and Electronic Materials*, 2018, 19, 330-336.





# Study of Non-Linear Electrical Properties of Zinc Oxide Base Electro-Ceramics Containing Vanadium Pentoxide Dopant

Mehdi Mirzayi

<sup>1</sup> Department of Basic Science, Miyaneh Branch, Islamic Azad University, Miyaneh, Iran

\* m\_mirzayi2003@yahoo.com, mirzayi@m-iau.ac.ir

**Abstract:** Electronic ceramics based on ZnO with small amounts of V<sub>2</sub>O<sub>5</sub> as dopant were prepared by conventional powder processing route and sintered at 1000°C for 2 hour. Microstructure of the samples was investigated by X-Ray and SEM. It was observed that microstructure of the samples consists of ZnO grains as main phase. Further, density of the samples was increased with increase in V<sub>2</sub>O<sub>5</sub> content. All of the prepared ceramics showed characteristic of non-ohmic current – voltage behavior. Non-linear coefficient was increased with increase in V<sub>2</sub>O<sub>5</sub> content. The non-linear electrical behavior was explained considering formation of the potential barriers at grain boundaries.

**Keywords:** Zinc Oxide, Varistor, Non-ohmic current–voltage behavior, Electronic ceramics, potential barrier.