

فرمولاسیون، ساخت و بررسی خواص برقی‌های سرامیکی

زیارتعلی نعمتی (استادیار)

دانشکده‌ی مهندسی و علم مواد، دانشگاه صنعتی شریف

برقگیرهای سرامیکی بر پایه‌ی اکسید روی (ZnO)، قطعات سرامیکی دارای مقاومت الکتریکی متغیرند که در خطوط انتقال نیرو و یا مکانی که احتمال برخورد آبی و شدید جریان الکتریکی وجود دارد به کار می‌رود. رفتار و خواص قطعات سرامیکی فوق برخاسته از ویژگی منحنی جریان-ولتاژ در آنهاست. این قطعات با استفاده از فرایند عمومی ساخت سرامیک‌ها از مواد پودری ساخته می‌شوند که علاوه بر اکسید روی، اکسیدهای بیسموت، کبالت، منگنز و مواد جزئی دیگر در آن به کار برده می‌شود. هر یک از این مواد نقش خاصی را در تحمیل خاصیت مورد نظر بر عهده دارند.

پس از تهیه‌ی مواد اولیه و اختلاط کامل آنها (به صورت خیس یا خشک)، نمونه را شکل داده و با عملیات حرارتی دما پائین رطوبت را خارج و مواد تجزیه‌شونده‌ی موجود را تجزیه و آماده‌ی تفجوشی می‌کنیم (به صورت قرص) عملیات حرارتی و تفجوشی در دمای 1150°C الی 1400°C انجام شده است. پس از اندازه‌گیری برخی از ویژگی‌های الکتریکی آنها، سعی شده است این خواص به ریزساختار نمونه‌ها ارتباط داده شود، چرا که ارتباط تنگاتنگی بین ریزساختار و خواص الکتریکی سرامیک‌ها وجود دارد که درک این موضوع در کنترل خواص بسیار حائز اهمیت می‌باشد.

مطالعات به عمل آمده نشان می‌دهد که ریزساختار این نوع برقگیرها شامل دانه‌های اکسید روی است که فازهای ثانویه آنرا احاطه کرده‌اند. ماهیت فازهای ثانویه بسیار پیچیده است اما شامل فاز غنی از اکسید بیسموت و فاز حاصل از ترکیب افزودنی‌ها با ZnO است. با اندازه‌گیری جریان ولتاژ می‌توان به صورت تقریبی به اندازه‌گیری α (ضریب غیر خطی برقگیر) پرداخت که این اندازه‌گیری بر دو سری از نمونه‌ها صورت گرفت. نتایج حاصل از اندازه‌گیری‌های الکتریکی با توجه به نوع، مقدار و تعداد مواد افزودنی، با نتایج موجود در مقالات علمی مطابقت خوبی دارد. جهت بهبود خواص الکتریکی و خصوصاً افزایش α علاوه بر کنترل هموزنیتته بودن و یکنواختی چگالی، عملیات حرارتی خاصی نیز صورت گرفت که به بهبود ضریب α انجامید.

مقدمه

محافظةت بسیار مناسبی انجام دهند و با محیطی که این پدیده (Surge) در آن رخ می‌دهد سازگار بوده و در عین حال از قیمت مناسبی نیز برخوردار باشند.

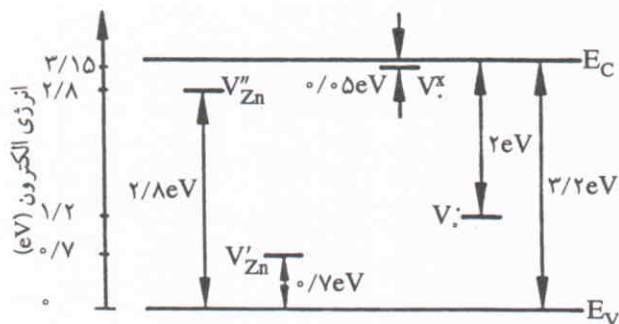
برقگیر سرامیکی از جنس اکسید روی از جمله محافظ‌های الکتریکی است که به‌طور گسترده و به‌منظور محدود ساختن ولتاژهای گذرا و ناپایدار به کار برده می‌شود. قابلیت تحمل ولتاژ آنها شامل محدوده‌ی ولتاژی پایین تا ولتاژهای بالا می‌شود. کار برقگیر این است که ولتاژهای اعمال شده را از هر منبع و ریشه که باشد بدون اینکه خودش تخریب شود مکرراً دفع، و سیستم مورد نظر را محافظت کند. این برقگیرها قادرند هم با جریان متناوب (AC) و هم با جریان مستقیم (DC) کار کنند و قابلیت جذب انرژی بالایی دارند. برقگیر را حتی الامکان نزدیک منبع ایجاد جریان‌های ناپایدار نصب می‌کنند تا نقش محافظتی را به‌خوبی انجام دهد.

هدایت الکتریکی سیستم‌های سرامیکی بستگی به نوع ناقل‌های الکتریکی و تحرک‌پذیری آنها دارد. ناخالصی موجود و موقعیت قرار گرفتن آن در شبکه‌ی اتمی تعیین‌کننده‌ی نوع ناقل است. قرار گرفتن

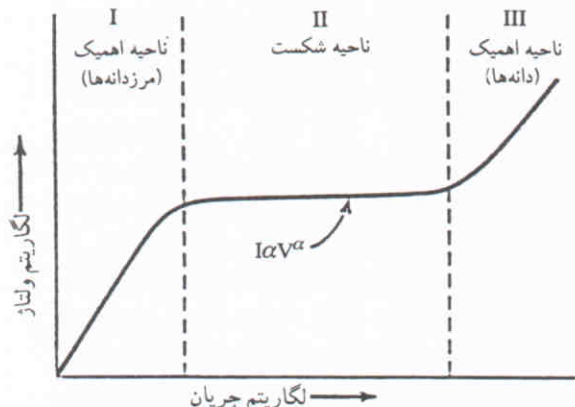
وسایل محافظت از جریانات سریع و غیر عادی برق ایزاری هستند که در سیستم‌های قدرت یا سیستم‌های داده‌پردازی برای محافظت از سخت‌افزار به کار می‌روند. همچنین می‌توان از آنها به‌عنوان ایزاری برای جلوگیری از آسیب یا مزاحمت‌های ناشی از تغییر حالات ناگهانی جریان زیاد و یا ولتاژ بسیار بالای اعمالی به سیستم استفاده کرد. وقوع جریان سریع و غیر عادی برق (Surge) بستگی به عوامل متعددی دارد که می‌توانند همراه با زمان در معرض قرار گرفتن، تشدید شوند که برخی از این پدیده‌ها عبارت‌اند از:

۱. اثرات رعد و برق (صاعقه) که به فصل، موقعیت جغرافیایی و شرایط محلی بستگی دارد.
۲. جریان‌های بسیار بالا و سریع در سیستم‌های قدرت که بستگی به نوع عملکرد بارهای مجاور دارد.

هیچ کدام از این دو عامل قابل پیش‌بینی نیستند؛ به‌گونه‌ی که یکی از اقدامات جدی و مهم مهندسیین برای مبارزه با این پدیده و محافظت سیستم‌ها، طراحی و ساخت وسایلی است که بتوانند



شکل ۱. ساختار نواری اکسید روی. [۱]



شکل ۲. منحنی I-V در یک برقی‌سرامیکی.

این ناقل در داخل دانه‌ها یا در نواحی مرز دانه‌ها، تفاوت زیادی در سیستم ایجاد خواهد کرد. به همین دلیل ارتباط منطقی و تنگاتنگی بین ریزساختار و خواص الکتریکی وجود دارد. علاوه بر کنترل خلوص مواد اولیه مصرفی، از طریق فرایند تفجوشی^۱ نیز می‌توان آن‌را تحت تأثیر قرار داد.

اکسید روی خالص یک عایق الکتریکی است که پهنای منطقی ممنوعه در ساختار الکترونی آن حدود ۳-۳/۲ eV است. لذا به منظور به‌کارگیری این ماده در ساخت برقی‌های سرامیکی، مقداری ناخالصی به‌عنوان مواد افزودنی جزئی یا دوپ‌کننده (Dopant) به آن اضافه می‌شود تا آن‌را به یک نیمه‌هادی میدل‌سازد (اکسیدهایی مثل اکسید کبالت، آنتیموان و آهن از این‌گونه هستند). دیگر ناخالصی‌ها باعث به‌وجود آمدن و تشکیل فازهای نیمه‌هادی در نواحی مرز دانه‌ها می‌شوند. اکسید بیسموت در این مورد عمده‌ترین نقش را عهده‌دار است و علاوه بر مسائل فوق، عمل تفجوشی را نیز تسریع می‌کند. [۱] در شکل ۱ ساختار الکترونی اکسید روی نشان داده شده است.

قرارگیری برخی از ناخالصی‌ها و مواد افزودنی در نواحی مرز دانه‌ها، ویژگی‌های خاصی در این مواد به‌وجود می‌آورد که در حقیقت عامل اصلی ایجاد منحنی جریان-ولتاژ برخاسته از همین پدیده است. [۳-۷]

مطالعات به‌عمل آمده نشان می‌دهد که ریزساختار حاصل پس از پخت معمولاً شامل دانه‌های اکسید روی (ZnO) یا ترکیباتی از روی و دیگر اکسیدها است که توسط فازهای بین‌دانه‌یی که در مرز دانه‌ها قرار گرفته‌اند احاطه می‌شود. ماهیت فازهای ثانویه از پیچیدگی زیادی برخوردار است، اما شامل فاز غنی از اکسید بیسموت و فاز حاصل از ترکیب افزودنی‌ها با ZnO است. جدایش فازی برخی از عناصر افزودنی نقش عمده‌یی در بهبود کیفیت قطعات نهایی دارد. از این رو، مطالعه‌ی فازهای بین‌دانه‌یی، ترکیب، خواص و رفتار الکتریکی آنها در تحمیل خواص نهایی بسیار حائز اهمیت است. در این راستا از میکروسکوپ الکترونی استفاده شده است تا ویژگی‌های ریزساختاری به‌طور جزئی‌تر مشخص شود. [۸-۱۰]

ترکیب فازهای موجود باعث می‌شود که منحنی I-V از حالت خطی خارج و به‌صورت غیر خطی ظاهر شود. ناحیه غیرخطی به‌صورت کلی با فرمول $I=KV^\alpha$ نشان داده می‌شود که در آن، α «ضریب غیرخطی برقی» نام دارد و هر چه بالاتر باشد نشان‌دهنده‌ی کیفیت برتر آن خواهد بود. به‌طور کلی، منحنی I-V دارای سه ناحیه‌ی مجزاست که عبارت‌اند از: ناحیه‌ی پیش از شکست، ناحیه‌ی غیرخطی و ناحیه‌ی صعود. کنترل هر یک از این

نواحی در برقی‌حائز اهمیت است. در حقیقت افزودن برخی از ناخالصی‌ها در راستای کنترل هر چه بهتر و بیشتر این نواحی است، خصوصاً ناحیه‌ی غیرخطی. این نواحی به‌طور شماتیک در شکل ۲ به نمایش در آمده است.

روش تحقیق و پژوهش

فرایند کلی ساخت و بررسی خواص نمونه‌ها در شکل ۳ نشان داده شده است.

اکسیدروی جزء اصلی تشکیل‌دهنده‌ی برقی‌هاست که از لحاظ مقداری می‌تواند بین ۹۷-۸۵ درصد مولی باشد. مابقی مواد، اکسیدهای سرامیکی دیگری چون اکسید بیسموت، اکسید کبالت، اکسید منگنز و چند اکسید دیگر است.

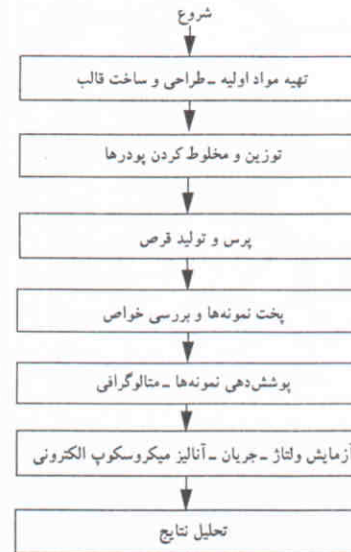
اکسید روی هم از منابع داخلی و هم از نوع خارجی تهیه شده است. در کارهای تجربی اولیه از نوع خارجی که از خلوص بالاتری برخوردار است استفاده می‌شود. در مراحل بعد مقداری از آن با نوع داخلی جایگزین خواهد شد.

فرمولاسیون کلی برقی‌های سرامیکی به‌صورت زیر است که در آن $X+Y+Z+\dots=1$ است (X, Y, Z, ... درصدهای مولی‌اند).

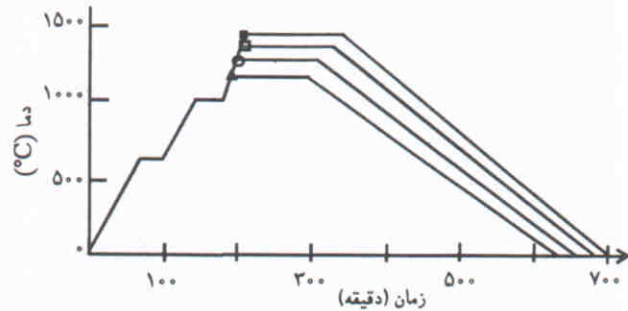


جدول ۱. مشخصات نمونه‌های تهیه‌شده در تحقیق.

دمای تف‌جوشی (°C)	ترکیب (درصد وزنی)				کد نمونه‌ها
	CoO	MnO _۲	Bi _۲ O _۳	ZnO	
۱۱۵۰	--	--	۲/۸	۹۷/۲	سری الف-۱
۱۲۰۰	--	--	۲/۸	۹۷/۲	سری الف-۲
۱۲۵۰	--	--	۲/۸	۹۷/۲	سری الف-۳
۱۳۰۰	--	--	۲/۸	۹۷/۲	سری الف-۴
۱۳۵۰	--	--	۲/۸	۹۷/۲	سری الف-۵
۱۴۰۰	--	--	۲/۸	۹۷/۲	سری الف-۶
۱۱۵۰	--	۰/۵۳	۲/۸	۹۶/۶۷	سری ب-۱
۱۲۰۰	--	۰/۵۳	۲/۸	۹۶/۶۷	سری ب-۲
۱۲۵۰	--	۰/۵۳	۲/۸	۹۶/۶۷	سری ب-۳
۱۳۰۰	--	۰/۵۳	۲/۸	۹۶/۶۷	سری ب-۴
۱۳۵۰	--	۰/۵۳	۲/۸	۹۶/۶۷	سری ب-۵
۱۴۰۰	--	۰/۵۳	۲/۸	۹۶/۶۷	سری ب-۶
۱۱۵۰	۰/۹۹	۰/۵۳	۲/۸	۹۵/۶۸	سری ج-۱
۱۲۰۰	۰/۹۹	۰/۵۳	۲/۸	۹۵/۶۸	سری ج-۲
۱۲۵۰	۰/۹۹	۰/۵۳	۲/۸	۹۵/۶۸	سری ج-۳
۱۳۰۰	۰/۹۹	۰/۵۳	۲/۸	۹۵/۶۸	سری ج-۴
۱۳۵۰	۰/۹۹	۰/۵۳	۲/۸	۹۵/۶۸	سری ج-۵
۱۴۰۰	۰/۹۹	۰/۵۳	۲/۸	۹۵/۶۸	سری ج-۶



شکل ۳. فرایند کلی ساخت و بررسی خواص نمونه‌ها.



شکل ۴. منحنی عملیات حرارتی نمونه‌ها.

SEM به کار گرفته شدند. برخی توسط XRD (پودر نمونه‌ها)، و برخی دیگر به منظور اندازه‌گیری الکتریکی الکتروگذاری شدند تا منحنی I-V رسم شود.

برای بهبود خواص الکتریکی و خصوصاً افزایش α علاوه بر کنترل هموزئیتته بودن و یکنواختی دانسیته، عملیات حرارتی خاصی نیز صورت گرفت.

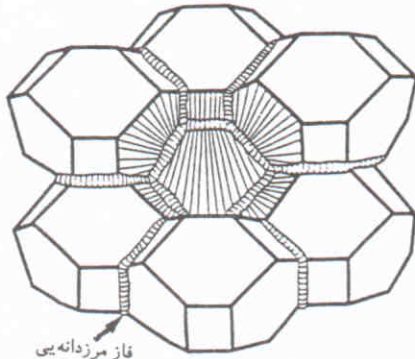
بحث و بررسی نتایج ساز و کار تف‌جوشی

با توجه به نمودار فازی ZnO-Bi_۲O_۳ (شکل ۵) و حضور دیگر ناخالصی‌ها در سیستم، به نظر می‌رسد که سازوکار تف‌جوشی در حضور فاز مذاب^۲ سازوکار غالب باشد. ماهیت فاز مذاب در اینجا بسیار پیچیده است و به نظر می‌رسد که خود در برگیرنده‌ی چند فاز بی‌شکل^۴ و بلوری است - نظیر، فاز غنی از بیسموت و فاز اسپنیل که قبلاً مطالعات SEM و EDAX حضور آن را نشان داده است. همچنین احتمال حضور فازهای بلوری پخش شده در فاز غنی از بیسموت نیز

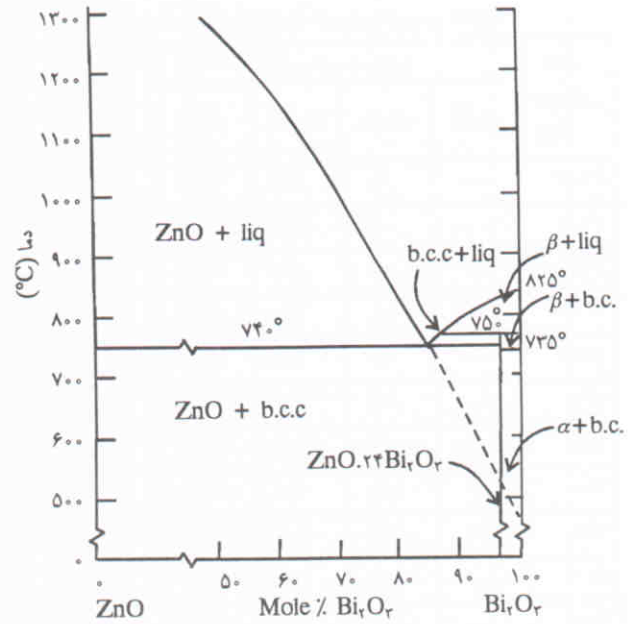
بعد از انجام فرمولاسیون‌های مختلف در شرایط ثابت آزمایشگاهی، برای به‌دست آمدن پودری یکنواخت و مناسب، اختلاط در آسیاب گلوله‌یی به مدت ۲۴ الی ۴۸ ساعت انجام گرفت. لازم به ذکر است که برای مخلوط شدن بهتر پودر مقدار کمی استن استفاده شد. بعد از فراهم آمدن مخلوط پودرها، عملیات تف‌جوشی بر روی آن صورت گرفت.

جدول ۱ نشان‌دهنده‌ی ترکیب درصد فرمولاسیون‌های مطرح در تحقیق حاضر است. در برخی از موارد، خصوصاً اگر مواد کربناتی یا سولفاتی استفاده شوند، نیاز به تکلیس^۲ اولیه خواهیم داشت. پس از آن، توسط پرس و با استفاده از قالب‌های فولادی با لایه‌ی کروم سخت و تحت فشارهای ۲۰۰-۳۰۰ kg/cm^۲ قرص تهیه شد.

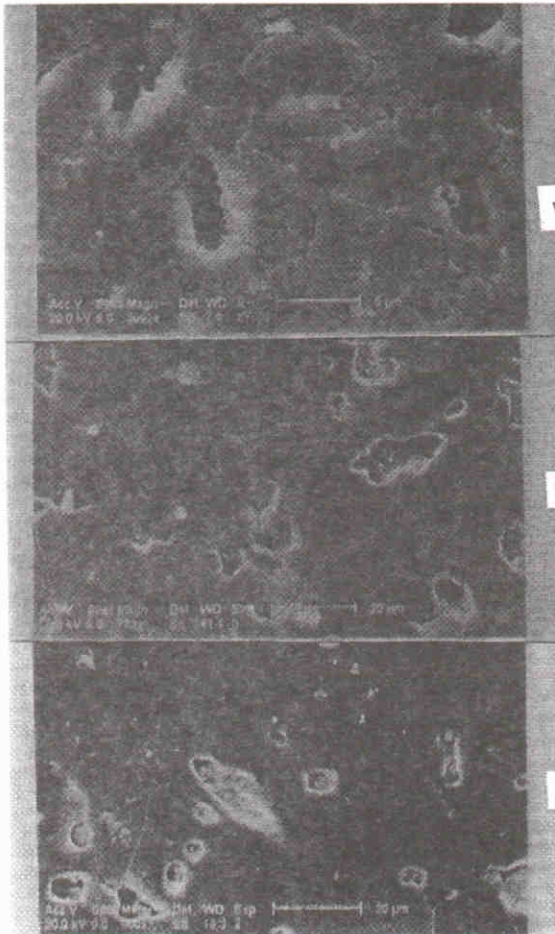
عملیات حرارتی در دمای ۱۱۵۰°C الی ۱۴۰۰°C صورت پذیرفت. شکل ۴ منحنی عملیات حرارتی نمونه‌ها را نشان می‌دهد. پس از پولیش و صیقل کاری دو سطح توسط پودر آلومینا و خمیر الماسه، برخی از نمونه‌ها برای بررسی ریزساختاری و فازی توسط



شکل ۶. ریزساختار شماتیک برقی‌گیر.



شکل ۵. نمودار فازی ZnO-Bi₂O₃ [۱].



شکل ۷. ریزساختار نمونه‌های تف‌جوشی شده.

گزارش شده است که ما نیز به دنبال مشاهده‌ی این فاز و یا فازهای مشابه در نمونه‌ها می‌باشیم.

بررسی ریزساختار و توزیع فازی در برقی‌های سرامیکی با توجه به بررسی‌های به عمل آمده در این تحقیق و مقایسه‌ی آن با مدل‌های پیشنهادی توسط محققین دیگر، به نظر می‌رسد که مدل زیر در ارتباط با ارائه‌ی شماتیک توزیع فازها مناسب باشد که ما نیز به چنین سیستمی اعتقاد داریم. این مدل نشانگر وجود یک فاز مرزدانه‌یی پیوسته است که در درون خودش فاز و یا فازهای بلورین جزئی را قرار داده است و دانه‌های اکسید روی نیز به صورت فاز اصلی و ذرات درشت مشاهده می‌شوند (شکل ۶).

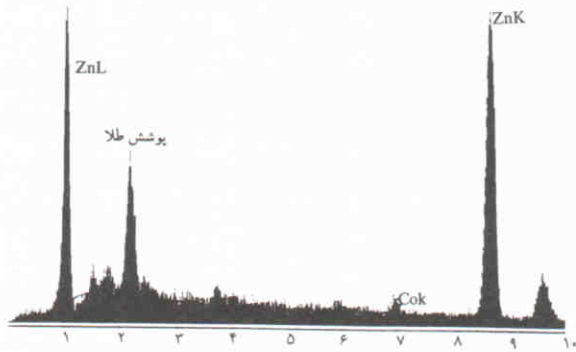
ریزساختار نمونه‌های تف‌جوشی شده در ۱۱۵۰°C، ۱۲۰۰°C، ۱۲۵۰°C در شکل ۷ ارائه شده است. تخلخل‌های بزرگ در نمونه‌ها ناشی از کنده شدن ذرات در حین فرایند پولیش است. لازم به ذکر است که رشد دانه‌ها از ۱۱۵۰°C الی ۱۲۵۰°C در تصاویر فوق کاملاً مشهود است به طوری که ذرات حدود ۱۰ μm در ۱۱۵۰°C تبدیل به ذرات ۲۰-۱۵ μm در ۱۲۵۰°C شده‌اند که با توجه به افزایش دمای تف‌جوشی و افزایش فرایند نفوذ کاملاً توجیح پذیر است. در دمای ۱۲۵۰°C، تشکیل فازهای مرزدانه‌یی کاملاً مشهود است به طوری که با عکس‌برداری توسط SEM می‌توان این فازها را به خوبی نشان داد. ریزساختار نمونه‌ها در ۱۳۰۰°C و ۱۴۰۰°C نیز همانند فوق بوده است.

بررسی توزیع اندازه‌ی ذرات توسط میکروسکوپ الکترونی حاکی از رشد دانه‌ها با افزایش دمای تف‌جوشی است که در اثر ازدیاد سرعت نفوذ اتم‌ها و تسریع سازوکارهای تف‌جوشی، و گاهی سازوکار رشد دانه‌ها می‌شود. جدول ۲ نشان‌دهنده‌ی توزیع اندازه‌ی دانه‌هاست. لازم به تذکر است که اندازه‌گیری اندازه‌ی متوسط دانه‌ها با استفاده از روش خط متقاطع صورت گرفته است.

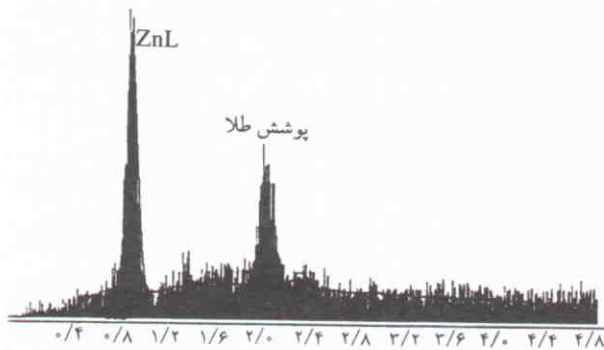
در این نواحی حضور داشته و مطابق با پیش‌بینی اولیه در نواحی مرزدانه‌ها، فازهای مرزدانه‌یی و سرعت دهنده به تف‌جوشی را به‌وجود آورده است. شکل ۱۰ نشان‌دهنده‌ی حضور Bi در ناحیه‌ی مرزدانه‌یی است. با مراجعه به نمودار فازی ZnO-Bi₂O₃ (شکل ۷)، متوجه می‌شویم که تشکیل ترکیب اوتکتیک در حوالی ۷۴۰°C در نواحی مرزدانه‌یی، عامل تشکیل فازهای با نقطه ذوب پائین و کمک زیتر در این نواحی است که حضور هرچه بیشتر Bi از این جهت حائز اهمیت است. بررسی رفتار و خواص الکتریکی نواحی مرزدانه‌یی در ادامه‌ی پروژه انجام خواهد شد که خود پارامتر تعیین‌کننده‌ی در تحمیل رفتار الکتریکی برگیر است.

در همین راستا، آنالیز خطی در نواحی مرزدانه‌ها و دانه‌های همسایه دلیل دیگری بر حضور هر چه بیشتر عنصر به جزء Zn در نواحی مرزدانه‌هاست. در شکل ۱۱ نشان داده شده است که غلظت و توزیع نسبی عنصر ZnO در داخل دانه ثابت است تا در نواحی مرزدانه‌ها. علت این امر افزایش غلظت عناصر دیگر، از جمله بیسموت است.

نتایج حاصل از مطالعات ریزساختاری حاکی از حضور فازهای موجود در نمونه‌های تهیه شده در تحقیق حاضر است. فاز اصلی را



شکل ۹. آنالیز نقطه‌یی از نواحی انتخابی در داخل دانه‌ها.



شکل ۱۰. آنالیز نواحی مرزدانه‌یی در نمونه‌ها.

جدول ۲. توزیع تقریبی اندازه‌ی دانه‌ها.

اندازه‌ی متوسط دانه‌ها (μm)	دمای تف‌جوشی (°C)
۷-۱۰	۱۱۵۰
۸-۱۵	۱۲۰۰
۱۳-۲۰	۱۲۵۰
۱۵-۲۷	۱۳۰۰
۲۰-۳۰	۱۳۵۰
۲۵-۳۵	۱۴۰۰

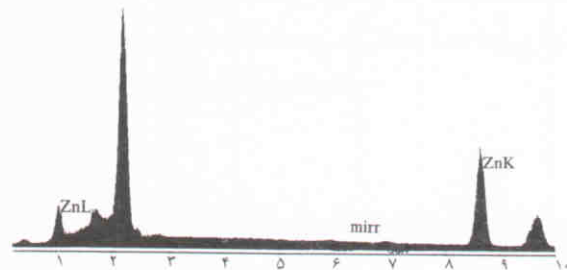
هر یک از ناخالصی‌ها اثر تعیین‌کننده‌ی بر این امر دارند. لذا ضروری است در آینده اثر کاهنده و یا افزایشنده بودن ناخالصی‌ها بر اندازه‌ی دانه‌ها مطالعات بیشتری صورت پذیرد.

در ادامه، مطالعات ریزساختاری و با استفاده از آنالیز EDAX و بزرگ‌نمایی تصاویر نواحی مرزدانه‌ها، آنالیز عناصر مختلف در داخل دانه‌ها و نواحی مرزدانه‌ها انجام گرفت.

آنالیزهای به‌عمل آمده از داخل دانه‌ها در تمامی نمونه‌ها حاکی از حضور غالب ZnO به عنوان جزء اصلی تشکیل دهنده‌ی آنهاست، اگرچه مقادیر جزئی برخی از عناصر (صرفاً به صورت کیفی) در نواحی داخل دانه‌ها در آنالیز قابل مشاهده است. در همین راستا، در نمونه‌های سری ج حضور عناصر کبالت و منگنز در شکل ۸ نشان داده شده است.

در همین منطقه، یعنی در نواحی داخلی دانه‌ها، هیچ‌گونه بیسموتی قابل تشخیص نیست چرا که انتظار داریم این عنصر در نواحی مرزدانه‌ها مستقر شده باشد. در برخی از نواحی، در هنگام آنالیز به مقادیر موضعی نسبتاً بیش از حد عناصر کبالت و منگنز برخورد کردیم که آن‌را به عدم اختلاط مناسب پودرهای اولیه نسبت داده‌ایم. این مسئله در شکل ۹ نشان داده شده است. قله‌های مربوط به عناصر Mn و Co در این شکل کاملاً مشهودند.

آنالیزهای به‌عمل آمده از برخی مرزدانه‌ها به صورت نقطه‌یی و از مناطق ریز در داخل نواحی مرزدانه‌ها، نشان داده است که بیسموت



شکل ۸. آنالیز EDAX از داخل دانه‌ها.

جدول ۳. مقادیر تقریبی α

نمونه	مقاومت غیر خطی V/mm	α
الف ۳	۵-۱۲	۳
الف ۴	۱۰-۱۵	۵
ب ۳	۱۰-۲۰	۱۰
ب ۴	۱۵-۲۵	۱۲
ج ۳ و ۴	۱۰-۲۰	۱۱
اولیه	۲۰-۲۵	۱۴
ج ۳ و ۴ ثانویه	۲۵-۳۰	۲۸-۳۰

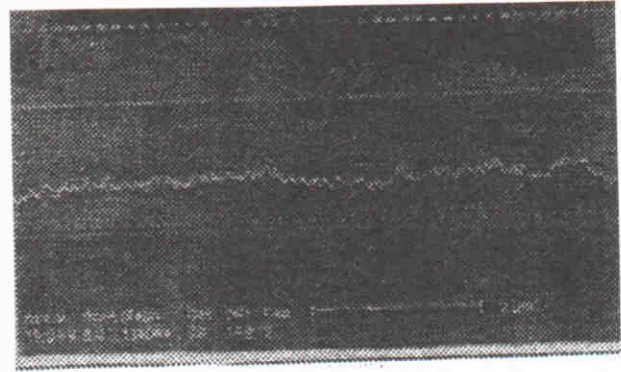
(نمونه‌های سری ۳ و ۴) در جدول ۳ نشان داده شده است. این اندازه‌گیری با استفاده از منبع تغذیه‌ی جریان مستقیم (با ماکزیمم جریان 10 mA) صورت پذیرفت. در طول اندازه‌گیری‌های ضریب غیرخطی، محدوده‌ی جریان از $10^{-7}\frac{\text{mA}}{\text{mm}^2}$ الی $10^{-2}\frac{\text{mA}}{\text{mm}^2}$ گزارش شده است. به منظور بهبود نسبی ضریب α ، ابتدا نمونه‌هایی با هموژنیته‌ی بهتر تهیه شد. که به افزایش ضریب α انجامید، خصوصاً در نمونه‌های سری ج ۳ و ج ۴ مقادیر متوسط α حدود ۲۲-۲۰ شد. این امر با توجه به اثر فازهای مرزدانه‌ی در خواص الکتریکی برقی رخ داده است. در گام بعدی، کنترل چرخه‌ی عملیات حرارتی در راستای بهبود نسبی α صورت گرفت. از آنجا که تشکیل فازهای ثانویه و نفوذ اتم‌ها در درون ذرات ZnO و فازهای مرزدانه‌ی متأثر از درجه حرارت و زمان تف‌جوشی است، زمان‌های طولانی‌تر در محدوده‌ی $T_{\text{Sint}}=1000$ -نگهداری شدند. همچنین مدت زمان نگهداری در بیشینه‌ی دمای تف‌جوشی طولانی‌تر شد. این امر به بهینه‌سازی خواص الکتریکی نسبت به نمونه‌های سری قبل شد که ضریب α تا محدوده‌ی ۲۸-۳۰ افزایش یافت.

نتایج حاصل از اندازه‌گیری‌های الکتریکی با توجه به نوع، مقدار و تعداد مواد افزودنی، با نتایج موجود در مقالات علمی مطابقت خوبی دارد. [۱۰-۱۶]

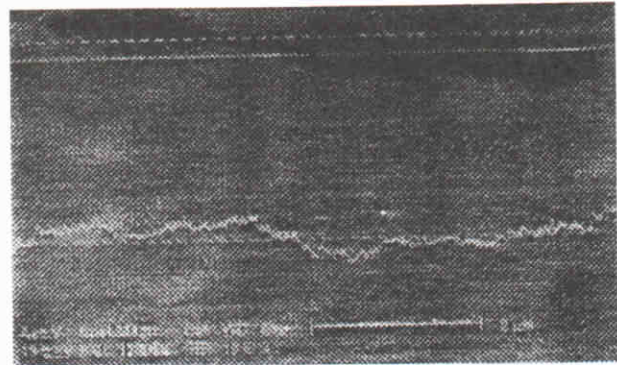
پدیده‌ی افت تدریجی خواص الکتریکی یا اضمحلال (از هم پاشیدگی) α خواص در دست بررسی است که نتایج آن در فرصت‌های مناسب بعدی ارائه خواهد شد.

نتیجه‌گیری

بررسی‌های به عمل آمده نشان می‌دهد که نوع و مقدار ناخالصی‌ها نقش اساسی در برقی‌دارند. ریزساختار علاوه بر ناخالصی‌ها به شرایط تف‌جوشی نیز بستگی دارد. همچنین ضریب مقاومت



(الف)



(ب)

شکل ۱۱. الف) آنالیز خطی نواحی داخلی دانه (ب) و نواحی مرزدانه‌ی.

دانه‌های ZnO تشکیل می‌دهند و فازهای ثانویه از ترکیب فاز ZnO با عناصر دیگر، در نواحی مرزدانه‌ها گسترده شده‌اند. شناخت نوع فازها در نواحی مرزدانه‌ها نیاز به مطالعات دقیق دارد که در جریان است.

اندازه‌گیری الکتریکی

اندازه‌گیری‌های الکتریکی روی برخی از نمونه‌ها صورت گرفته است. همان‌طور که قبلاً مطرح شد، ویژگی‌های غیرخطی بودن به صورت منحنی $I=K(V)^\alpha$ نشان داده می‌شود که می‌توان آن را به صورت زیر خلاصه کرد.

$$\alpha = \frac{dI/I}{dV/V} = \frac{d(\log I)}{d(\log V)} = \frac{\text{Log} I_2 - \text{Log} I_1}{\text{Log} V_2 - \text{Log} V_1}$$

شدت جریان I (Amp)

ولتاژ V (KV)

لذا با اندازه‌گیری I_1, I_2, V_1, V_2 می‌توان به صورت تقریبی به اندازه‌گیری α پرداخت.

نتایج حاصل از اندازه‌گیری سه سری از نمونه‌های الف، ب و ج

(α)، منحنی I-V، مقدار بهینه‌ی وجود خواهد داشت که لازم است با توجه به شرایط تولید و کاربرد تهیه شود.

۴. ریزساختار و توزیع دانه‌بندی نمونه‌ها به شدت تابع شرایط عملیات حرارتی و نوع ناخالصی‌هاست.

۵. نقش اساسی در خواص غیر اهمی یک VDR اکسید روی را لایه‌ی بین دانه‌ی و ضخامت آن به عهده دارد. در این میان تغییر ماهیت اکسید روی از عایق به نیمه‌هادی و ماهیت الکتریکی فازهای بین دانه‌ی بسیار حائز اهمیت است.

غیرخطی برتگریر یعنی α به شدت به عوامل فوق وابسته بوده و کنترل آن از این طریق امکان‌پذیر است. بنابراین، مطابق آزمایش‌ها و نتایج به‌دست آمده مشخص شده است که:

۱. خواص غیر اهمی اکسید روی که یکی از مشخصات ویژه‌ی VDR است با افزودن اکسیدهای مختلف و ترکیبات آنها تغییر می‌کند.
۲. با افزودن تعدادی مواد افزودنی اکسیدی، می‌توان بیشترین مقدار α را در دمای تفجوشی بهینه به‌دست آورد.
۳. همچنین برای میزان مواد افزودنی و تأثیر آن بر توان غیر خطی

پانویس

1. sintering
2. calcination
3. Liquid Phase Sintering
4. amorphous
5. diffusion
6. degradation

منابع

1. L.M., Levinson and H.R. Philipp, *Cer. Bull.*, **65**, p 639 (1986).
2. M., Matsuoka, in *Advances in Ceramics*, **1**, Grain Boundary Phenomena in Electronic Ceramics", edited by M.F. Yan & A.H.
3. M.H. Sukkar and H.L., Tuller, in *Advances in Ceramics*, **7**, "Additives and Interfaces in Electronic Ceramics", Edited by M.F. Yan & A.H. Heuer, Amer. Cer. Soc., p 71 (1984).
4. H.R., Philipp and L.M., Levinson, in *Advances in Ceramics*, **7**, "Additives and Interfaces in Electronic Ceramics", Edited by

- M.F. Yan & A.H. Heuer, *Amer. Cer. Soc.*, p 1 (1884).
5. T.K., Gupta and G., Carlson, in *Advances in Ceramics*, **7**, "Additives and Interfaces in Electronic Ceramics", Edited by M.F. Yan & A.H. Heuer, Amer. Cer. Soc., p 380 (1984).
6. T.R.N, Kutty and S. Ezhilvalavan, "The effect of aluminosilicate on the delayed onset of upturn voltages of ZnO varistor ceramics", *Materials Sci. and Eng.* **47** (B), pp 101-109 (1997).
7. ASM International, *Engineered Materials Handbook*, **4**, Ceramics and Glasses, (1991).
8. E., Olsson, et.al., "The microstructure of ZnO varistor material", *J. of mat. Sci*, **20**, pp 4091-98 (1985).
9. D., Prisching and A.H. Pecina, "Temperature behavior of ZnO varistors before and after post sintering heat Treatment", *Materials Letters*, **43**, p 295 (2000).
10. S., Bermol, S., Macek and B., Ai, "Microstructural and electrical characteristics of Y2O3-doped ZnO-Bi2O3-based varistor ceramics", *J. of the Europ. Ceram. Soc.*, **21** (2001).