وریستورهای اکسید فلزی
از ساختار میکروسکوپی تا مشخّصه‌های ماکروسکوپی

نوشته‌ی:
جین‌لیانگ هه

مترجمان:
دکتر مرجان رجبی
دکتر اکبر امینی
مهندس فاطمه نوروزیان
مهندس فهیمه‌سادات عابدسعیدی

سازمان پژوهش‌های علمی و صنعتی ایران
واحد تحقیق و توسعه شرکت برق‌گیر توس
بهار ۱۴۰۴

سرشناسه	: هی، جین‌لیانگ He, Jinliang
عنوان و نام پدیدآور	: وریستورهای اکسید فلزی از ساختار میکروسکوپی تا مشخّصه‌های ماکروسکوپی/نوشته جینلیانگ هه ؛ مترجمان مرجان رجبی...[و دیگران]. [به سفارش] سازمان پژوهشهای علمی و صنعتی ایران.واحد تحقیق و توسعه شرکت برق گیرتوس.
مشخصات نشر	: تهران: سازمان پژوهشهای علمی و صنعتی ایران ،۱٤۰۳.
مشخصات ظاهری	: XXXVII،٦۹۰ص.: مصور،جدول،نمودار
شابک	: 978-622-4925-01-5
وضعیت فهرست نویسی	: فیپا
یادداشت	: عنوان اصلی:-Metal Oxide Varistors: From Microstructure to Macro-Characteristics,2019.
یادداشت	: مترجمان مرجان رجبی،اکبر امینی، فاطمه نوروزیان، فهیمه‌سادات عابدسعیدی.
یادداشت	: واژه‌نامه.
یادداشت	: کتابنامه.
موضوع	: نیمه هادی‌های اکسید فلزی Metal oxide semiconductors وریستورها Varistors
شناسه افزوده	: رجبی، مرجان، ۱۳۵۹–، مترجم
شناسه افزوده	: شرکت برقگیر توس. واحد تحقیق و توسعه
رده بندی کنگره	: TK۷۸۷۱/۹۹
رده بندی دیویی	: ۳۸۱۵/٦۲۱
شماره کتابشناسی ملی	: ۹۹۸۸۳۲۰
اطلاعات رکورد کتابشناسی	: فیپا

سازمان پژوهش‌های علمی و صنعتی ایران

وریستورهای اکسید فلزی از ساختار میکروسکوپی تا مشخّصه‌های ماکروسکوپی

نویسنده: جین‌لیانگ هه

مترجمین: مرجان رجبی - اکبر امینی - فاطمه نوروزیان- فهیمه‌سادات عابدسعیدی

ویراستار: فاطمه اوجاقلو

ناشر: سازمان پژوهش‌های علمی و صنعتی ایران

نوبت چاپ: اول

تاریخ چاپ: بهار ۱۴۰۴

شمارگان: ۵۰۰ جلد

شابک: ۹۷۸-۶۲۲-۴۹۲۵-۰۱-۵

صفحه‌آرایی: موسسه نورا منادی فرهنگ

ناظر چاپ و صحافی: شرکت پیشرو فناوری قائد

قیمت:

نشانی: احمدآباد مستوفی، بعد از میدان پارسا، خیابان انقلاب، خیابان شهید احسانی‌راد، صندوق پستی: ۱۱۵- ۳۷۵۷۵

تمام حقوق مادی این اثر اعم از چاپ، تکثیر، نسخه‌برداری، ترجمه و مانند این‌ها برای سازمان پژوهش‌های علمی و صنعتی ایران محفوظ است.

پیش‌گفتار مترجمان

وریستورهای اکسید فلزی، سرامیک‌های الکتریکی نیمه‌هادی و نوعی مقاومت غیرخطی قابل کنترل با ولتاژ محسوب می‌شوند. با توجه به رفتار غیرخطی عالی مشخّصه جریان- ولتاژ، این نوع نیمه‌هادی‌ها جهت حفاظت (عایق‌بندی) از تجهیزات شبکه الکتریکی در مقابل خطرات موج ضربه‌ای (ناشی از صاعقه یا کلیدزنی) به‌طور گسترده‌ای استفاده می‌شوند. وریستورها (عنصر کلیدی برق‌گیر) در گذشته، با وجودِ رعایت کلیه دستورالعمل‌های استاندارد و انجام آزمایش‌های دقیق، با درصدی بروز عیب و صدمات چشمگیری مواجه بودند. طی دهه‌های اخیر، ساختار برق‌گیرهای فشار قوی، با دگرگونی و تحوّلاتی روبه‌رو بوده است. کارخانه‌های سازنده به‌تدریج با نوسازی خط تولید خود، کیفیت وریستورهای تولیدی و برق‌گیر را ارتقا دادند. هدف این نوشتار، بیشتر آگاهی‌سازی از عوامل بروز عیب و صدمه در وریستورها و همچنین آشنایی با عوامل بروز اختلال در آنهاست تا درصد شکست برق‌گیرها در شبکه‌ی توزیع برق کاهش یابد.

با استناد به گزارش شرکت توانیر، تعداد ترانس‌های نصب‌شده در سال ۱۳۹۹، حدود ۲۲۴۰۰ است؛ درنتیجه تعداد برق‌گیرهای نصب‌شده در این سال، ۶۷۲۰۰ و تعداد وریستورها ۴۰۳۲۰۰ است. سالانه حدود ۱٪ از برق‌گیرها نیازمند تعمیرات هستند و فرسوده می‌شوند که به حدود ۲۵۵۰۰ برق‌گیر و ۱۵۳۰۰۰ وریستور می‌رسد. ضمن آن‌که میزان نصب ترانس و درنتیجه برق‌گیر، سالانه حدود ۴٪ افزایش خواهد یافت. با توجه به نیاز روزافزون وریستور در صنعت ایران، شرکت برق‌گیر توس به همراه سازمان پژوهش‌های علمی و صنعتی ایران ضروری دانستند، این نوشتار را که دربرگیرنده‌ی پژوهش‌های ارزنده‌ای در زمینه‌ی وریستورهای اکسید فلزی است، ترجمه کنند.

این کتاب، ترجمه‌ی فارسی کتاب Metal Oxide Varistors, from microstructure to macro-characteristics تألیف پروفسور جین‌لیانگ هه[1]، از مجموعه‌کتب

1. Jinliang He

منتشرشده توسّط دانشگاه سینگوا[1]، در مورد وریستورهای اکسید فلزی است که موضوعات مختلفی را برای افراد مبتدی و پیشرفته مطرح می‌کند. در حال حاضر، پروفسور جین‌لیانگ هه مدیر فناوری ولتاژ بالا و عایق‌بندی، گروه مهندسی برق، این دانشگاه است. تحقیقات وی عمدتاً شامل فناوری پیشرفته انتقال نیرو و محافظت در برابر صاعقه، فناوری نانو و شبکه حس‌گرهای فرکانس گسترده MEMS بوده است. ایشان که از سال ۲۰۱۵، استادمدعو گروه مهندسی برق، دانشگاه استنفورد شده است، بیش از ۴۰۰ مقاله علمی و ۸ کتاب در زمینه‌ی تخصصی، به‌ویژه وریستورها منتشر کرده است. به‌دلیل مشارکت‌های چشمگیر در زمینه‌ی حفاظت از صاعقه و فناوری‌های مرتبط در سیستم انتقال نیرو، ایشان در سال ۲۰۱۰ جایزه‌ی دستاورد فنی انجمن IEEE را دریافت نمود.

در این کتاب، انواع مختلف وریستورهای اکسید فلزی همراه با کاربرد و روش ساخت آنها، در ۱۲ فصل شرح داده شده است. ۶ نوع وریستور اکسید فلزی شامل وریستورهای اکسید روی با افزودنی اکسید بیسموت، وریستورهای اکسید روی با افزودنی‌های پرازئودیمیم/ وانادیم/ باریم، وریستورهای اکسید روی ولتاژ پایین، وریستورهای اکسید تیتانیم، وریستورهای اکسید قلع و وریستورهای اکسید تنگستن بررسی شده‌اند که از این میان، وریستورهای اکسید روی به‌دلیل کاربرد در مدارهای قدرت اهمیت ویژه‌ای دارند؛ لذا به‌دلیل اهمیت این نوع وریستورها، ۷ فصل ابتدایی به بررسی روش ساخت، سازوکار هدایت، تنظیم مشخّصه‌های الکتریکی، مشخّصه‌های ریزساختاری، شبیه‌سازی، قابلیت جذب انرژی و پیرشدگی وریستورهای اکسید روی بر پایه‌ی اکسید بیسموت می‌پردازد.

در ترجمه‌ی فارسی کتاب سعی شده است تا ضمن داشتن متنی سلیس، حداکثر وفاداری به متن اصلی نیز حفظ شود. ماهیّت علمی کتاب، محدودیّت واژگان علمی در زبان فارسی و کلمات متعدّد انگلیسی که در ترجمه‌ی فارسی معادل‌های یکسانی دارند، مشکلات کار را بیشتر می‌کند؛ گرچه ترجمه‌ی حاضر چندین‌بار مرور شده، اما بدون اشکال نیست.

1. Tsinghua

خرسند خواهیم شد، خوانندگان محترم این کتاب، نظر و پیشنهادات سازنده‌ی خود را از طریق رایانامه[1]، اعلام نمایند.

دکتر مرجان رجبی
دکتر اکبر امینی
مهندس فاطمه نوروزیان
مهندس فهیمه سادات عابدسعیدی
واحد تحقیق و توسعه شرکت برق‌گیر توس
سازمان پژوهش‌های علمی و صنعتی ایران
بهار ۱۴۰۳

1. info@barghgirtoos.com

پیش‌گفتار

واریستور اکسید فلزی[1] (MOV) یا واریستور اکسیدروی نوعی سرامیک نیمه‌هادی چندبلوری متشکّل از اکسیدهای فلزی متعدّد است که با فناوری مرسوم سرامیک‌ها تفجوشی می‌شود. واریستورهای اکسیدروی مشخّصه‌های جریان- ولتاژ غیرخطی خوب و ظرفیّت‌های جذب انرژی ضربه‌ای عالی دارند. این مزایا عامل استفاده وسیع از آن‌ها برای حفاظت از اضافه‌ولتاژهای گذرا در سیستم‌های الکتریکی/الکترونی هستند. در حال حاضر، واریستورها به‌طور گسترده به‌عنوان محافظِ مدارها در بازه وسیعی از ولتاژها، از چند ولت در مدارهای نیمه‌هادی تا ۱۰۰۰ kV AC و ۱۱۰۰ kV DC ± در شبکه‌های انتقال و توزیع به کار می‌روند. به‌همین‌ترتیب، این قطعات می‌توانند بازه عظیمی از انرژی‌ها، از چند ژول تا چندین مگاژول، را تحمّل کنند. نکته حائز اهمیت، سرعت بالای واریستورها است که در هنگام اصابت ضربه، در عرض چند نانوثانیه، از حالت مقاومت بالا به حالت رسانایی بالا تغییر کرده و سپس به شرایط عملیاتی با امپدانس بالا بازمی‌گردند. واریستور حجمی قطعه‌ی چندپیوندی پیچیده است و از تعداد زیادی عناصر غیرخطی و اهمی تشکیل شده‌است که در شبکه‌ی تصادفی به یکدیگر متصل می‌شوند. ویژگی‌های واریستور حجمی تحت‌تأثیرِ هندسه و توپولوژی ریزساختار دانه و همچنین خصوصیات و توزیع مشخّصه‌های الکتریکی مرزدانه‌ها قرار دارند. در این کتاب سعی شده است پلی میان مشخّصه‌های ماکرو و ویژگی‌های میکروساختارِ واریستورهای اکسیدروی برای درک برخی از جنبه‌های ریزساختاری واریستورها ایجاد گردد. این جنبه‌ها بر ویژگی‌های واریستورهای حجمی اثر می‌گذارند و دانش و فهم بیشتری از ریزساختار واریستورها و شاخص‌های مؤثر بر بازدهی آنها در طول فرایند ساخت فراهم می‌آورند.

کتاب حاضر شامل ۱۲ فصل است که تمرکز اصلی آن بر روی واریستورهای اکسیدروی است. فصل ۱، بر دانش بنیادی و کاربرد واریستورهای اکسید روی متمرکز است. فصل ۲

1. Metal Oxide Varistor

سازوکار هدایت وریستورهای اکسید روی را معرفی می‌کند. از میان مدل‌های هدایت متعدّد، مدل پیشنهادی توسط پایک[1] و توسعه‌یافته توسّط بلاتر[2] و گروتر[3]، به‌طور گسترده شناخته شده و ممکن است به پدیده‌های تجربی نزدیک‌تر باشد. فصل ۳، به معرفی افزودنی‌های مختلف برای بهبود خصوصیات الکتریکی و شرایط سنترِ بهینه می‌پردازد. مشخّصه‌های الکتریکی هر مرزدانه در تعیین مشخّصه‌های الکتریکی عمومی وریستورهای اکسید روی دخالت دارند؛ لذا فصل ۴ ویژگی‌های الکتریکیِ ریزساختارِ وریستورهای اکسید روی را تعیین می‌کند. شبیه‌سازی برای نمایش ارتباط بین ریزساختار و مشخّصه‌های ماکروسکوپی وریستورهای سرامیکی، مفید است. جزییات نحوه‌ی شبیه‌سازی وریستورهای سرامیکی در فصل ۵ بیان شده است. شکست وریستورهای اکسید روی، پدیده‌ی غالب در زمان به‌کارگیری آنها است و مدل‌های اضمحلال خواص متناسب با قابلیت تحمّل انرژی‌های متفاوت، در فصل ۶ معرفی می‌شوند. وریستورهای اکسید روی، هنگام استفاده می‌توانند از نظر الکتریکی، شیمیایی و گرمایی فرسوده شوند. این امر، منجر به کاهش ارتفاع سدّ پتانسیل و در ادامه افزایش جریان نشتی می‌شود که می‌تواند برای وریستورهای اکسید روی فاجعه‌بار باشد. در فصل ۷، درباره‌ی فرسایش الکتریکی وریستورهای اکسیدروی بحث می‌شود و فصل ۸، انواع دیگر وریستورهای اکسید روی را که برای غلبه بر کاستی‌های ناشی از اکسید بیسموت، در آنها از افزودنی‌های دیگری نظیر پرازئودمیم، باریم و وانادیم به جای بیسموت استفاده می‌شود، معرفی می‌کند. در سامانه‌های الکترونیکی از وریستورهای ولتاژ پایین و کوچک‌سازی‌شده استفاده می‌شود. فرایندهای شیمیایی نظیر سل‌ژل، رسوب‌دهی، روش‌های میکروامولسیون و غیره، آلایش همگن در سطح مولکولی را برای دستیابی به قطعه‌ی کوچک با ولتاژ شکست بالاتر تسهیل می‌کند که در فصل ۹ معرفی خواهند شد. جالب توجه است وریستور ترکیبیِ پلیمر- سرامیک، یک کامپوزیت است که شامل ذرّات وریستور یا ذرات نیمه‌رسانا می‌باشد و خاصیّت وابسته به میدان آن با غلظت پرکننده تغییر می‌یابد. وریستورهای کامپوزیتی با ولتاژ شکست پایین‌تر، می‌توانند جانشین مناسبی برای وریستورهای مبتنی بر اکسیدروی با هدف حفاظت از سیستم‌های ولتاژ پایین باشند که در فصل ۱ معرفی شده‌اند.

1. Pike
2. Blatter
3. Greuter

علاوه‌براین در زمینه‌ی بهبود عملکرد مواد وریستور اکسیدروی، مواد شیمیایی نوینی با هدف بهبود پایداری مورد بحث قرار گرفتند و برای کاربردهای نوین استفاده می‌شوند. وریستورهای سرامیکی دومنظوره خازن- وریستور بر پایه‌ی تیتانیم، وریستورهای سرامیکی نظیر دی‌اکسید تیتانیم، تیتانات استرانسیم، تیتانات مس‌کلسیم (CCTO) و تیتانات باریم منجر به کوچک‌سازی وریستورها می‌شوند و حفاظت ولتاژ گذرا با دامنه و فرکانس بالا را فراهم می‌کنند که در فصل ۱۰ توصیف شده‌اند. متفاوت از ساختار چندفازی وریستورهای بر پایه‌ی اکسید روی، وریستورهای بر پایه‌ی اکسید قلع دارای ریزساختار ساده، پایداری خوب و هدایت حرارتی عالی هستند که وریستورهای بر پایه‌ی اکسید قلع را به یکی از امیدوارکننده‌ترین گزینه‌ها برای رقابت تجاری با وریستورهای بر پایه‌ی اکسید روی تبدیل می‌کنند. وریستورهای بر پایه‌ی اکسید قلع، در فصل ۱۱ معرفی می‌شوند. وریستورهای سرامیکی بر پایه‌ی اکسید تنگستن، نوع دیگری از وریستورهای ولتاژ پایین با میدان الکتریکی آستانه‌ی کم Vmm^{-1} ۵-۱۰ و ثابت دی‌الکتریک بالا هستند که به‌عنوان وریستورهای موازی با خازن عمل می‌کنند و در فصل ۱۲ معرفی می‌شوند.

این کتاب جنبه‌های اصلی وریستورهای اکسید فلزی را شامل می‌شود و نظریه‌های بنیادی، پیشرفته و فناوری مربوط به این قطعات و دستاوردهای تحقیقاتی در این زمینه را معرفی می‌کند. همچنین، پژوهش‌های اخیرِ نویسندگان و دانشجویان و همکارانشان در دانشگاه سینگوا، به‌ویژه پایان‌نامه‌های دکترای دکتر چن شینگن، دکتر هو جون، دکتر لیو جون، دکتر لانگ وانگچنگ، دکتر ژائو هانگفنگ، دکتر جینگچنگ، دکتر چنگ چنلو[1] و پایان‌نامه‌ی ارشد خانم وی کیایون[2] نیز ارائه شده است. نویسندگان سعی کرده‌اند تمامی جنبه‌های وریستورهای اکسید فلزی را لحاظ کنند، اما ممکن است مواردی نیز از قلم افتاده باشند.

پروفسور جین‌لیانگ هه
دانشگاه سینگوا
پکن - چین

1. Dr. Chen Qingheng, Dr. Hu Jun, Dr. Liu Jun, Dr. LongWangcheng, Dr. Zhao Hongfeng, Dr. Xie Jingcheng, Dr. Cheng Chenlu
2. Wei Qiaoyuan

فهرست مطالب

پیش‌گفتار مترجمان V

پیش‌گفتار IX

فصل اول: معرفی سرامیک‌های وریستور

۱-۱- وریستورهای اکسید روی ۳

۱-۲- ساخت وریستورهای اکسید روی ۷

۱-۲-۱- آماده‌سازی مواد اولیه ۸

۱-۲-۲- تفجوشی وریستورهای اکسید روی ۱۰

۱-۳- ریزساختار ۱۲

۱-۴- شاخص‌های معمول وریستورهای اکسید روی ۱۳

۱-۵- تاریخچه‌ی وریستورهای اکسید روی ۱۶

۱-۶- کاربردهای وریستورهای اکسید روی ۲۰

۱-۷- وریستورهای سرامیکی جایگزین ۲۶

۱-۸- وریستورهای کامپوزیت سرامیک- پلیمر ۲۸

منابع ۳۵

فصل دوم: سازوکارهای هدایت وریستورهای اکسید روی

۲-۱- پیش‌گفتار ۴۵

۲-۲- مفاهیم پایه در فیزیک حالت جامد ۴۸

۲-۲-۱- تراز انرژی اتمی و نوار انرژی بلور ۴۸

۲-۲-۲- رسانا، نیم‌رسانا و عایق ۵۱

۲-۲-۳- مشخّصه‌های تابع فرمی- دیراک ۵۳

۲-۲-۴- تراز انرژی نقص و ناخالصی ۵۴

۲-۳- ساختار نوار انرژی وریستور اکسید روی ۵۵
۲-۳-۱- ساختار نوار انرژی دانه‌ی اکسید روی ۵۶
۲-۳-۲- سد دوگانه شاتکی وریستور اکسید روی ۵۷
۲-۳-۳- منشأ میکروسکوپی سد دوگانه شاتکی ۵۹
۲-۳-۴- مشخّصه‌های جریان- ولتاژ نامتقارن سد دوگانه شاتکی ۶۲
۲-۴- سازوکار هدایت وریستور اکسید روی ۶۴
۲-۴-۱- الگوی هدایت بر پایه‌ی فرایند گسیل گرمایونی ۶۶
۲-۴-۲- فرایند تولید حامل اقلیت ۷۰
۲-۴-۳- الگوی اثر گذر فرعی ۷۲
۲-۵- خواص دی‌الکتریک وریستور اکسید روی ۷۲
۲-۵-۱- توصیف ویژگی‌های دی‌الکتریک وریستور اکسید روی ۷۴
۲-۵-۲- تأثیر واهلش بار فصل مشترک بر رفتار هدایت وریستورهای اکسید روی تحت میدان‌های الکتریکی متغیّر با زمان ۷۷
۲-۵-۳- تعیین ارتفاع سد و شاخص‌های مرتبط ۸۱
۲-۵-۴- تعیین تراز دهنده‌ی عمیق در وریستور اکسید روی ۸۳
۲-۵-۵- تعیین رسانش دانه و مرزدانه ۸۴
منابع ۸۷

فصل سوم: تنظیم مشخّصه‌های الکتریکی وریستورهای اکسید روی

۳-۱- پیش‌گفتار ۹۳
۳-۲- ساخت از فاز مذاب ۹۵
۳-۲-۱- ریزساختار وریستور اکسید روی ۹۵
۳-۲-۲- چندشکلی اکسید بیسموت ۹۹
۳-۲-۳- تأثیر غلظت اکسید بیسموت ۱۰۰
۳-۲-۴- تبخیر اکسید بیسموت ۱۰۱
۳-۳- روش‌های آماده‌سازی و تفجوشی ۱۰۳
۳-۳-۱- ساخت ۱۰۳
۳-۳-۲- مراحل ساخت ۱۰۵

۳-۳-۳- اثر حفره‌ها ۱۰۶
۳-۴- نقش اکسیژن در مرزدانه ۱۰۹
۳-۵- آثار ناخالصی ۱۱۲
۳-۵-۱- آثار افزودنی‌ها ۱۱۲
۳-۵-۲- ناخالصی‌های دهنده ۱۱۶
۳-۵-۳- ناخالصی‌های پذیرنده ۱۲۱
۳-۵-۴- ناخالصی‌های دوخصلتی ۱۲۵
۳-۵-۵- آثار اکسیدهای نادر خاکی ۱۳۱
۳-۵-۶- ناخالصی‌ها برای بهبود پایداری ۱۳۴
۳-۵-۷- شاهدی برای هیدروژن به‌عنوان دهنده‌ی کم عمق ۱۳۶
۳-۶- نقش مرزهای وارون ۱۳۷
۳-۷- وریستور اکسید روی با گرادیان ولتاژ بالا ۱۴۲
۳-۸- وریستور اکسید روی با ولتاژ پسماند پایین ۱۴۷
۳-۸-۱- نسبت ولتاژ پسماند ۱۴۷
۳-۸-۲- کاهش ولتاژ پسماند وریستورهای اکسید روی با ناخالصی آلومینیم ۱۴۹
۳-۸-۳- کاهش ولتاژ پسماند وریستورهای اکسید روی با ناخالصی گالیم ۱۵۴
۳-۸-۴- وریستورهای اکسید روی با ولتاژ پسماند پایین و گرادیان ولتاژ بالا ۱۵۷
منابع ۱۶۰

فصل چهارم: مشخّصه‌های الکتریکی ریزساختاری وریستورهای اکسید روی

۴-۱- پیش‌گفتار ۱۷۷
۴-۲- روش‌های تعیین شاخص‌های مرزدانه ۱۷۸
۴-۲-۱- روش غیرمستقیم ۱۷۸
۴-۲-۲- روش‌های ریز اتصال مستقیم ۱۷۹
۴-۳- خواص آماری شاخص‌های مرزدانه ۱۸۳
۴-۳-۱- نایکنواختی ولتاژهای سد ۱۸۳
۴-۳-۲- توزیع ولتاژ سد ۱۸۵
۴-۳-۳- توزیع ضریب غیرخطی ۱۸۷

۴-۳-۴- توزیع جریان نشتی عبوری از مرزدانه ۱۸۸
۴-۳-۵- اندازه‌گیری ریز اتصال ۱۸۸
۴-۴- دسته‌بندی مرزدانه‌ها ۱۸۹
۴-۵- سایر روش‌ها برای تشخیص خواص الکتریکی ریزساختاری وریستورهای اکسید روی ۱۹۳
۴-۵-۱- روش‌های بر پایه‌ی میکروسکوپ پروب روبشی ۱۹۳
۴-۵-۲- تعیین گالوانیک نواحی رسانا روی سطح وریستور ۱۹۶
۴-۵-۳- تعیین تفاوت‌ها در ولتاژ شکست در وریستور با روبش خطی ۱۹۸
۴-۵-۴- تصاویر جریان در میکروسکوپ الکترونی روبشی ۱۹۹
۴-۶- آزمودن یک مرزدانه‌ی منفرد ۲۰۰
۴-۶-۱- رویکرد لایه نازک ۲۰۱
۴-۶-۲- رویکرد سطح در نفوذ ۲۰۱
۴-۶-۳- رویکرد دوبلور ۲۰۲
منابع ۲۰۵

فصل پنجم: شبیه‌سازی سرامیک‌های وریستور

۵-۱- پیش‌گفتار ۲۱۱
۵-۲- الگوی مرزدانه ۲۱۳
۵-۱-۲- الگوی مشخّصه‌ی جریان- ولتاژ مرزدانه ۲۱۳
۵-۲-۲- الگوی مرزدانه با توجه سازوکار رسانش ۲۱۹
۵-۳- الگوی شبیه‌سازی مشخّصه‌های جریان- ولتاژ ۲۲۵
۵-۳-۱- الگوی شبیه‌سازی دوبعدی ساده ۲۲۵
۵-۳-۲- الگوهای شبیه‌سازی دوبعدی بر اساس شبکه‌ی ورونویی ۲۲۸
۵-۳-۳- لحاظ‌کردن حفره‌ها و اسپینل‌ها ۲۳۱
۵-۳-۴- الگوریتم حل مدار معادل ۲۳۲
۵-۳-۵ بازبینی الگو ۲۳۷
۵-۴- الگوی شبیه‌سازیِ مشخّصه‌های حرارتی ۲۳۹
۵-۴-۱- تحلیل رسانش حرارتی ۲۴۰

۵-۴-۲- تحلیل شکست ضربه‌ای ۲۴۳
۵-۵- شبیه‌سازی پدیده‌های مختلف ۲۴۴
۵-۵-۱- شبیه‌سازی نایکنواختی ریزساختاری ۲۴۴
۵-۵-۲- شبیه‌سازی پدیده‌ی جریان موضعی ۲۴۶
۵-۵-۳- تأثیر شاخص‌های ریزساختاری بر مشخّصه‌های حجمی ۲۵۱
۵-۵-۴- عوامل مؤثر بر نسبت ولتاژ پسماند ۲۶۰
منابع ۲۶۳

فصل ششم: سازوکار تخریب و توانایی جذب انرژی وریستور اکسید روی

۶-۱- پیش‌گفتار ۲۶۹
۶-۲- حالت‌های تخریب ضربه‌ای وریستورهای اکسید روی ۲۷۱
۶-۳- سازوکار تخریب‌های نقطه‌ای و شکستگی ۲۷۵
۶-۳-۱- سازوکار تخریب نقطه‌ای ۲۷۵
۶-۳-۲- سازوکارتخریب شکستگی ۲۸۰
۶-۴- شبیه‌سازی تخریب‌های نقطه‌ای و شکستگی ۲۸۴
۶-۴-۱- شبیه‌سازی تخریب نقطه‌ای ۲۸۵
۶-۴-۲- شبیه‌سازی تخریب ترک‌خوردگی در ریزساختار ۲۹۰
۶-۵- فرار حرارتی ۲۹۱
۶-۵-۱- اتلاف توان وریستور اکسید روی ۲۹۲
۶-۵-۲- سازوکار فرار حرارتی ۲۹۳
۶-۵-۳- آزمون‌های اطمینان از مشخّصه‌های پایداری حرارتی ۲۹۶
۶-۶- تأثیر عوامل مختلف بر تخریب وریستورهای اکسید روی ۲۹۷
۶-۶-۱- تأثیر نایکنواختی ریزساختاری ۲۹۷
۶-۶-۲- تأثیر نایکنواختی الکتریکی در ریزساختار ۳۰۰
۶-۶-۳- تحلیل شبیه‌سازی حالت‌های شکست ۳۰۱
۶-۷- عوامل مؤثر بر توانایی جذب انرژی ۳۰۳
۶-۷-۱- اثر جریان اعمالی ۳۰۳
۶-۷-۲- تأثیر مساحت مقطع عرضی وریستور ۳۰۶

۶-۷-۳- تحلیل شبیه‌سازی توانایی جذب انرژی ۳۰۷
۶-۸- بحث در مورد توانایی جذب انرژی ۳۱۲
۶-۸-۱- تعیین توانایی جذب انرژی با تخریب شکستگی ۳۱۲
۶-۸-۲- تعیین توانایی جذب انرژی با تخریب نقطه‌ای ۳۱۴
۶-۸-۳- بحث در مورد نایکنواختی توانایی جذب انرژی ۳۱۶
۶-۸-۴- تأثیر افزودنی‌ها بر توانایی جذب انرژی ۳۱۸
۶-۸-۵- سایر معیارها برای بهبود توانایی جذب انرژی ۳۱۹
منابع ۳۲۱

فصل هفتم: اضمحلال خواص الکتریکی وریستورهای اکسید روی

۷-۱- پیش‌گفتار ۳۲۷
۷-۲- پدیده‌های اضمحلال خواص وریستورهای اکسید روی ۳۳۱
۷-۲-۱- پدیده‌های اضمحلال خواص حجم وریستور ۳۳۱
۷-۲-۲- اضمحلال خواص مرزدانه ۳۳۶
۷-۲-۳- مشخّصه‌های اضمحلال خواص ضربه‌ای ۳۴۰
۷-۲-۴- اطلاعات توپوگرافی برای تحلیل اضمحلال خواص ۳۴۳
۷-۳- تأثیر مهاجرت یون‌ها بر اضمحلال خواص وریستورهای اکسید روی ۳۴۵
۷-۳-۱- الگوی نقص مرزدانه ۳۴۶
۷-۳-۲- شواهد تجربی مهاجرت یون ۳۴۸
۷-۳-۳- شناسایی یون‌های متحرّک غالب ۳۵۰
۷-۳-۴- تعمیم سه‌بعدی ۳۵۵
۷-۴- سازوکار اضمحلال خواص وریستورهای اکسید روی ۳۵۷
۷-۴-۱- سازوکار اضمحلال خواص DC ۳۵۸
۷-۴-۲- سازوکار اضمحلال خواص AC ۳۵۹
۷-۴-۳- سازوکار اضمحلال خواص غیریکنواخت ۳۶۱
۷-۴-۴- اضمحلال خواص ضربه‌ای وریستورهای اکسید روی ۳۶۵
۷-۵- نقش ریزترک‌های داخلی در اضمحلال خواص ۳۶۹
۷-۶- معیارهای ضد اضمحلال خواص ۳۷۲

۷-۶-۱- فرایندهای آماده‌سازی ویژه ۳۷۲
۷-۶-۲- بهینه‌سازی ترکیب ۳۷۴
منابع ۳۸۰

فصل هشتم: سامانه‌های وریستور اکسید روی بر پایه‌ی پرازئودیمیم/ وانادیم/ باریم

۸-۱- سامانه پرازئودیمیم ۳۸۹
۸-۱-۱- آثار ناخالص سازی ۳۸۹
۸-۱-۲- تأثیر فرایندهای تفجوشی ۳۹۵
۸-۱-۳- کاربردهای ولتاژ بالا ۳۹۹
۸-۱-۴- کاربردهای ولتاژ پایین ۴۰۱
۸-۲- سامانه وانادیم ۴۰۱
۸-۲-۱- اثر ناخالص‌سازی ۴۰۳
۸-۲-۲- مشخّصه‌های الکتریکی ۴۰۵
۸-۲-۳- مشخّصه‌های ریزساختاری ۴۰۶
۸-۲-۴- آثار اکسید وانادیم بر رشد دانه ۴۰۹
۸-۳- سامانه‌ی باریم ۴۱۰
۸-۳-۱- آماده‌سازی و مشخّصه‌های الکتریکی ۴۱۰
۸-۳-۲- مشخّصه‌های ریزساختاری ۴۱۲
۸-۳-۳- بهبود پایداری در برابر رطوبت ۴۱۵
۸-۴- وریستور اکسید روی– شیشه ۴۱۵
منابع ۴۲۰

فصل نهم: ساخت وریستورهای ولتاژ پایین اکسید روی

۹-۱- پیش‌گفتار ۴۲۷
۹-۲- رشد افراطی دانه با دانه‌های جوانه ۴۲۸
۹-۳- تولید پودرهای نانو بلورین وریستور اکسید روی ۴۳۰
۹-۳-۱- روش‌های فراوری فاز گازی ۴۳۱

۹-۳-۲-تولید احتراقی ۴۳۳
۹-۳-۳- روش‌های سل- ژل ۴۳۴
۹-۳-۴- روش پوشش‌دهی با محلول ۴۳۹
۹-۴- نانو پرکننده‌ها در سرامیک‌های وریستوری اکسید روی ۴۴۴
۹-۵- روش‌های تفجوشی برای کنترل رشد دانه ۴۴۷
۹-۵-۱- روش تفجوشی مرحله‌ای ۴۴۸
۹-۵-۲- روش تفجوشی مایکروویو ۴۴۹
۹-۵-۳- روش تفجوشی پلاسمای جرقه‌ای ۴۵۳
منابع ۴۵۷

فصل دهم: وریستورهای سرامیکی دومنظوره بر پایه‌ی تیتانیم

۱۰-۱- وریستورهای تیتانات استرانسیم ۴۶۷
۱۰-۱-۱- مقدمه ۴۶۷
۱۰-۱-۲- ریزساختار وریستورهای تیتانات استرانسیم ۴۶۸
۱۰-۱-۳- آماده‌سازی وریستورهای تیتانات استرانسیم.....۴۶۹
۱۰-۱-۴- عملکرد تیتانات استرانسیم ۴۷۲
۱۰-۱-۵- سازوکار رسانش تیتانات استرانسیم ۴۷۳
۱۰-۲- وریستورهای بر پایه‌ی دی‌اکسید تیتانیم ۴۷۶
۱۰-۲-۱- مقدمه ۴۷۶
۱۰-۲-۲- آماده‌سازی وریستورهای پایه‌ی دی‌اکسید تیتانیم ۴۷۷
۱۰-۲-۳- سازوکار سرامیک‌های خازن-وریستور دی اکسید تیتانیم ۴۷۸
۱۰-۲-۴- ناخالص‌سازی وریستورهای پایه‌ی دی‌اکسید تیتانیم.....۴۷۹
۱۰-۲-۵- توسعه‌ی وریستورهای بر پایه‌ی دی‌اکسید تیتانیم ۴۸۷
۱۰-۳- سرامیک‌های تیتانات مس کلسیم ۴۸۸
۱۰-۳-۱- مقدمه ۴۸۸
۱۰-۳-۲- ساختار تیتانات مس کلسیم ۴۸۹
۱۰-۳-۳- عملکرد سرامیک‌های تیتانات مس کلسیم ۴۹۴
۱۰-۳-۴- سازوکار ۵۰۳
۱۰-۳-۵- نقش ناخالصی‌ها ۵۱۵

۱۰-۴- وریستورهای تیتانات باریم با اثر PTCR ۵۲۸
۱۰-۴-۱- مقدمه ۵۲۹
۱۰-۴-۲- اثرات ناخالص‌سازی ۵۳۱
۱۰-۴-۳- آماده‌سازی سرامیک‌های تیتانات باریم ۵۳۴
۱۰-۴-۴- تأثیر PTCR در سرامیک‌های تیتانات باریم ۵۳۸
۱۰-۴-۵- مشخّصه‌های سرامیک‌های وریستوری تیتانات باریم ۵۴۲
منابع ۵۴۶

فصل یازدهم: سرامیک‌های وریستور اکسید قلع با رسانایی حرارتی بالا
۱۱-۱- آماده‌سازی وریستورهای بر پایه‌ی اکسید قلع ۵۶۹
۱۱-۲- عملکرد الکتریکی وریستورهای اکسید قلع ۵۷۴
۱۱-۳- سازوکار وریستورهای بر پایه‌ی اکسید قلع ۵۷۹
۱۱-۳-۱- تشکیل سد پتانسیل مرزدانه ۵۷۹
۱۱-۳-۲- الگوی نقص اتمی ۵۸۱
۱۱-۳-۳- آزمون طیف‌سنجی ادمیتانس ۵۸۵
۱۱-۳-۴- تحلیل ظرفیت- ولتاژ ۵۸۸
۱۱-۳-۵- تأثیر عملیات حرارتی ۵۸۸
۱۱-۴- نقش ناخالصی‌ها در تنظیم وریستورهای بر پایه‌ی اکسید قلع ۵۹۰
۱۱-۴-۱- ناخالصی‌های افزایش دهنده‌ی چگالی وریستورهای اکسید قلع ۵۹۱
۱۱-۴-۲- ناخالصی پذیرنده ۵۹۳
۱۱-۴-۳- ناخالصی دهنده ۵۹۷
۱۱-۵- کارآیی حرارتی ۵۹۹
۱۱-۶- رفتارهای اضمحلال خواص ۶۰۲
۱۱-۷- توسعه‌ی وریستورهای اکسید قلع ۶۰۳
منابع ۶۰۸

فصل دوازدهم: وریستورهای سرامیکی بر پایه‌ی اکسید تنگستن با ولتاژ شکست پایین

۱۲-۱- پیش‌گفتار ۶۱۷
۱۲-۲- اکسید تنگستن ۶۱۹
۱۲-۳- آماده‌سازی وریستورهای بر پایه‌ی اکسید تنگستن..... ۶۲۱
۱۲-۴- عملکردهای الکتریکی..... ۶۲۴
۱۲-۵- بهبود پایداری الکتریکی ۶۲۶
۱۲-۶- الگوی سازوکار وریستورهای بر پایه‌ی اکسید تنگستن ۶۲۸
۱۲-۷- آثار ناخاص‌سازی ۶۳۲
۱۲-۷-۱- افزودن اکسیدهای نادر خاکی..... ۶۳۳
۱۲-۷-۲- افزودن اکسید مس ۶۳۵
۱۲-۷-۳- افزودن اکسید آلومینیم ۶۳۶
۱۲-۷-۴- افزودن دی‌اکسید تیتانیم ۶۳۷
۱۲-۷-۵- افزودن سایر افزودنی‌ها..... ۶۳۸

منابع ۶۳۹

واژه‌نامه ۶۴۵