فصلنامه تخصصی دانش آزمایشگاهی ایران سال پنجم ■ شماره ۱ ■ بهار ۱۳۹۶ ■ شماره پیاپی ۱۷

نویسندگان
غلامرضا دهقانی[۱و۴*]
مریم خسروی[۲و۴]، سولماز امیرشکاری[۳و۴]
*Dehghanisanij_1350@yahoo.com

معرفی آشکارسازهای الکترون‌های ثانویه، الکترون‌های ثانویه درون لنزی و کاتودولومینسانس در میکروسکپ‌های الکترونی روبشی

چکیده

اساس کار میکروسکپ‌های الکترونی روبشی، همان‌طور که از نامش پیداست، مبتنی بر روبش (جاروب کردن) سطح نمونه با پرتو الکترونی است. ناحیه‌ای از نمونه که الکترون‌های اولیه به آن نفوذ می‌کنند حجم واکنش نامیده می‌شود. به علت تنوع و تعدد برخوردهایی که ممکن است به وقوع بپیوندد، در راه شناخت چگونگی «حجم برهم کنش» پرتو الکترونی ورودی و ماده، پیچیدگی‌های زیادی وجود دارد. لذا امکان آشکارسازی پرتوهای ساطع شده از سوی ماده در اثر برهم کنش آن با پرتو الکترونی ورودی به‌منظور بررسی ویژگی‌ها و مشخصات ماده به‌صورت تصویر و آنالیز عنصری و ترکیب شیمیایی آن بسیار حائز اهمیت است. امروزه با توجه به توسعه و پیشرفت میکروسکپ‌های الکترونی، انواع آشکارسازهای مختلف نیز به‌منظور دستیابی و شناسایی ویژگی‌های مختلف ماده طراحی و ساخته شده‌اند. در این مقاله به بررسی سه نوع آشکارساز بسیار مهم در میکروسکپ‌های الکترونی پرداخته شده‌است. این آشکارسازها شامل آشکارساز الکترون‌های ثانویه[۵]، آشکارساز الکترون‌های ثانویه درون لنزی[۶] و آشکارساز کاتودولومینسانس[۷] هستند.

با استفاده از این آشکارسازها می‌توان اطلاعات مختلفی از ماده از جمله مورفولوژی ذرات و توپوگرافی سطح نمونه، شکست نگاری، تهیه تصویر با وضوح بالا از آلیاژهای سبک مثل منیزیم و نانوتیوب کربنی، بررسی نانومواد لومینسانس دهنده نظیر نقاط کوانتومی نیمه‌هادی، کامپوزیت ها و هیبریدهای آلی - معدنی و غیره را فراهم نمود.

واژه‌های کلیدی

میکروسکپ الکترونی روبشی، آشکارساز درون لنزی، الکترون‌های ثانویه، الکترون‌های برگشتی، کاتودولومینسانس.

فصلنامه تخصصی دانش آزمایشگاهی ایران
سال پنجم ■ شماره ۱ ■ بهار ۱۳۹۶ ■ شماره پیاپی ۱۷

آشکارساز الکترون‌های ثانویه

تئوری ایجاد الکترون‌های ثانویه

هنگامی که پرتو الکترون ورودی با الکترون‌های لایه خارجی ماده برخورد کند انرژی پرتو به آن منتقل شده و در نتیجه باعث برانگیخته شدن الکترون آن اتم می‌شود؛ سپس آن الکترون از لایه الکترونی خود خارج شده که طبق تعریف انرژی، الکترون خارج شده از اتم را الکترون ثانویه می‌نامند [۱و۲و۳].

الکترون‌های ثانویه از برخورد پرتو الکترونی اولیه با اتم‌های سطح نمونه ایجاد و به سه دسته تقسیم‌بندی می‌شوند. اولین نوع الکترون ثانویه که در شکل (۱) دیده می‌شود، الکترون‌های ثانویه (۱) نامیده شده که از ورود پرتو الکترونی اولیه به سطح نمونه حاصل می‌شود و قادر است تصاویری با قدرت تفکیک بالا ایجاد کند، الکترون ثانویه (۱) از اتم‌های نزدیک سطح بوجود می‌آید و به شدت به ولتاژ شتاب‌دهنده بستگی دارد [۱و۲و۳].

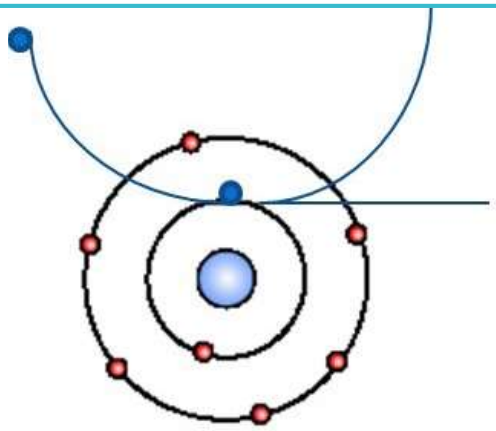
دسته دوم الکترون‌های ثانویه (۲) که در شکل (۲) نشان داده شده‌است، توسط الکترون‌های برگشتی ایجاد می‌شوند که پس از چند بار برخورد غیرالاستیک به سطح برمی‌گردند. به‌دلیل این که این دسته از الکترون‌ها از عمق بیشتری نسبت به الکترون‌های ثانویه (۱) به شناساگر می‌رسند، از قدرت تفکیک پایین‌تری برخوردارند [۱و۲و۳].

دسته سوم الکترون‌های ثانویه (۳) در واقع الکترون‌های ثانویه‌ای هستند که از برخورد الکترون‌های ثانویه (۲) با سطح لنز بوجود می‌آیند بنابراین، سبب کاهش قدرت تفکیک تصاویر می‌شوند که نمایی از آن‌ها در شکل (۳) نشان داده شده‌است [۳].

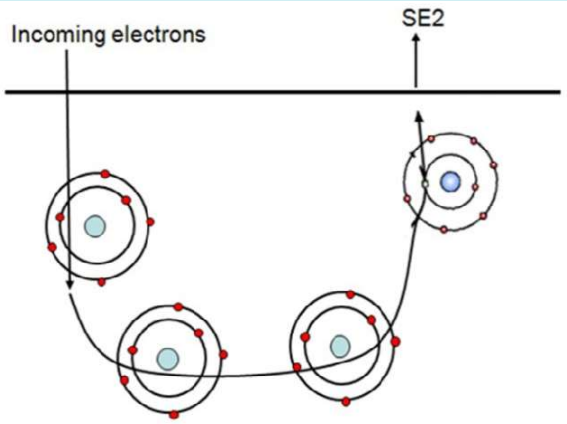
اساس کار آشکارساز الکترون ثانویه

آشکارساز الکترون‌های ثانویه از مهمترین و پرکاربردترین آشکارسازهای میکروسکپ الکترونی محسوب می‌شود. این آشکارساز برای بررسی مورفولوژی ذرات و توپوگرافی سطح نمونه، شکست نگاری و غیره به کار می‌رود. برای دریافت و جمع‌آوری پرتو خروجی ناشی از برهم‌کنش پرتو الکترونی و نمونه، آشکارسازهایی طراحی و ساخته شده‌اند که مهمترین آن اورهارت تورنلی[۸] است. طراحی اولیه این آشکارساز ابتدا توسط دانشمندانی چون زوریکین و هیلیر و اشنایدر ارائه شد که بعدها توسط اورهارت تورنلی تکمیل و به نام او ثبت گردید و به همین علت به نام E-T نیز شناخته می‌شود. نمایی از آشکارساز E-T در شکل (۴) نشان داده شده‌است. اساس کار آن به شرح زیر است:

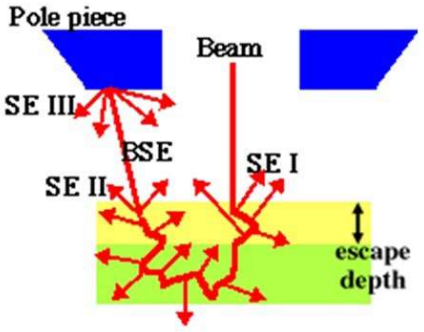
محفظه فاراده، یک شبکه فلزی است که در ولتاژ ۵۰- تا ۲۵۰+ ولت نگه داشته می‌شود که ولتاژ جمع کننده نام دارد.



شکل ۱: الکترون ثانویه (۱) [۳].



شکل ۲: الکترون ثانویه (۲) [۳].



شکل ۳: الکترون ثانویه (۳) [۳].

وجود این شبکه با قابلیت تغییر ولتاژ می‌تواند باعث جذب انتخابی الکترون‌های ثانویه و یا برگشتی شود. قسمت اصلی آشکارساز درون این محفظه قرار گرفته است و به‌صورت یک جرقه‌زن عمل می‌کند به‌طوری که در اثر برخورد الکترون به آن، نور (فوتون) ایجاد می‌شود و نور ایجاد شده از یک هدایتگر[۹] عبور کرده و وارد قسمت تقویت کننده نور[۱۰] می‌شود.

به دلیل اینکه پرتوهای الکترون‌های ثانویه کم انرژی هستند به این آشکارساز یک ولتاژ ۱۲ کیلوولت اعمال می‌شود، در اثر این ولتاژ الکترون‌ها قبل از برخورد به جرقه‌زن شتاب می‌گیرند و با انرژی کافی به آن برخورد نموده و نور تولید می‌کنند.

فوتون‌های تقویت شده به ضربان‌های الکتریکی[11] تبدیل می‌شوند و این ضربان‌ها یا پالس‌های الکتریکی (یا علایم جریان نوری) لوله پرتو کاتدی[12] را درخشان نموده و تصویر را ایجاد می‌کند [۳].

امروزه پیشرفت‌های زیادی در قسمت سخت‌افزار، جنس مواد سینتلاتور، لوله‌های نوری و ضرایب تصحیح، حاصل شده‌است. جنس ماده سینتلاتور باید به‌گونه‌ای باشد که قابلیت ماشین‌کاری داشته و بتواند به فرم مطلوب میکروسکپ از لحاظ ابعادی و شکل ظاهری ساخته شود و لایه‌های سطحی آن که در اثر برخورد الکترون‌ها صدمه می‌بینند، قابلیت پولیش مجدد داشته و از مقاومت حرارتی مناسب نیز برخوردار باشند [۳].

در ذیل، تصاویری از الکترون ثانویه که با میکروسکپ الکترونی روبشی گرفته شده در شکل‌های (۵) و (۶) آمده است:

در آشکارساز E-T مقداری از الکترون‌های برگشتی نیز جمع‌آوری می‌شوند اما بازده این کار بسیار کم است لذا آشکارساز مخصوص الکترون برگشتی نیز ساخته شده‌است.

آشکارساز الکترون‌های ثانویه درون لنزی

بررسی برخی از ویژگی‌ها و قابلیت‌های آشکارساز الکترون ثانویه درون لنزی

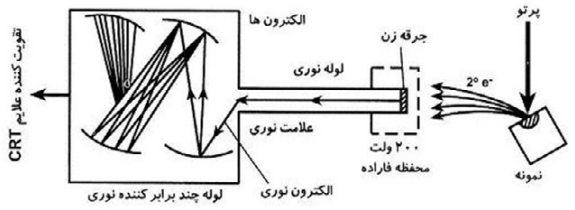
به دلیل محدودیت‌های آشکارساز الکترون‌های ثانویه از قبیل کاهش وضوح تصویر در بزرگنمایی خیلی بالا و عدم مشاهده جزئیات سطحی نمونه، آشکارساز درون لنزی ساخته شده‌است که در میکروسکپ‌های الکترونی گسیل میدانی[13] به کار می‌رود. این آشکارساز در داخل ستون تعبیه شده‌است. به همین دلیل راندمان جذب پرتو الکترونی با استفاده از این آشکارساز بسیار بالا است. آشکارساز درون لنزی با عناوین TTL یا In Beam یا In Lens معرفی شده‌اند [۶].

به دلیل قرارگیری آشکارساز داخل ستون، می‌توان فاصله کاری[14] را تا ۱ میلیمتر کاهش داد، با این شرایط میزان جذب الکترون به‌وسیله آشکارساز افزایش یافته و می‌توان تصاویر با بزرگنمایی خیلی بالا تا حدود یک میلیون برابر با وضوح مناسب تهیه کرد.

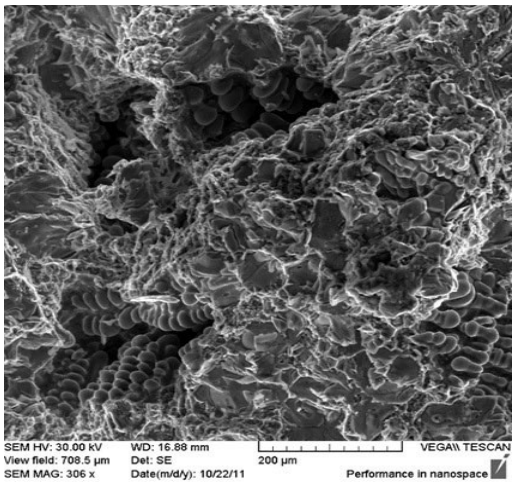
در بسیاری از نمونه‌ها تصویر تهیه شده با آشکارساز الکترون ثانویه درون لنزی نسبت به تصویر آشکارساز الکترون ثانویه معمولی از وضوح و کنتراست بهتری برخوردار بوده و جزئیات سطحی نمونه بهتر دیده می‌شود.

می‌توان با این آشکارساز با ولتاژ کم تا یک کیلوولت تصویر تا بزرگنمایی نسبتا بالا با وضوح مناسب تهیه کرد به خصوص در نمونه‌های پلیمری که در اثر اعمال ولتاژ بالا منجر به سوختن نمونه خواهد شد، کاربرد دارد.

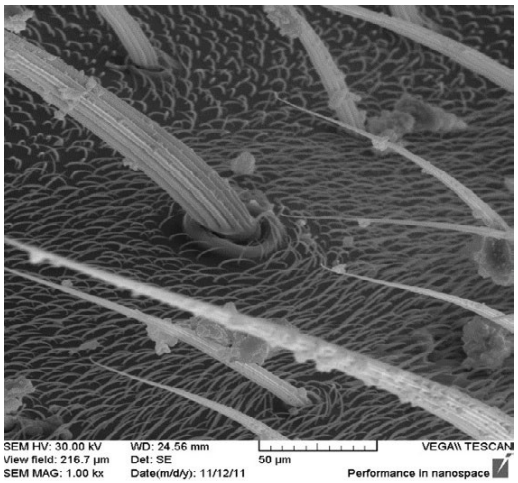
تهیه تصویر با وضوح بالا با ولتاژ کاری کم برای آلیاژهای



شکل ۴: نمایی از دریافت کننده و آشکارساز اورهارت تورنلی [۳].



شکل ۵: سطح شکست، عیوب انقباضی و دندریت‌ها در قطعه آلومینیومی [۴].



شکل ۶: پرزهای بدن یک حشره با تصویر الکترون‌های ثانویه [۵].

سبک مثل منیزیم، نانوتیوب کربنی و غیره طبیعی است که با کاهش ولتاژ، میزان نفوذ الکترون در سطح نمونه کمتر شده و می‌توان جزئیات سطحی نمونه را بهتر مشاهده نمود. در مورد نانوتیوب‌های کربنی به دلیل سبک بودن این ماده به لحاظ عدد اتمی می‌توان با اعمال ولتاژ کم و بدون پوشش‌دهی طلا تصویر با کیفیت و وضوح مناسبی از این ماده تهیه کرد [۶و۷].

اساس کار آشکارساز الکترون ای ثانویه درون لنزی

آشکارسازهای درون لنزی که نمای ساده‌ای از آن در شکل (۷) آورده شده‌است بیشتر در میکروسکپ‌های روبشی مجهز به تفنگ‌های الکترونی پر قدرت نشر میدانی[۱۵] به کار می‌رود. در این میکروسکپ‌ها لنز نهایی دارای میدان مغناطیسی بسیار قوی است. روش عملکرد این آشکارساز به این صورت است که بخش عمده‌ای از پرتوهای الکترون ثانویه ساطع شده از سوی نمونه تحت تاثیر میدان مغناطیسی بسیار قوی لنز نهایی قرار می‌گیرد و به‌صورت مارپیچی به سمت بالای ستون حرکت می‌کند و به یک آشکارساز از نوع جرقه‌زن - هدایتگر نوری و تقویت کننده نوری که داخل لنز کار گذاشته شده‌است، برخورد می‌کنند. این سیستم بازده بسیار بالایی در جمع‌آوری پرتوهای ثانویه دارد [۶و۷].

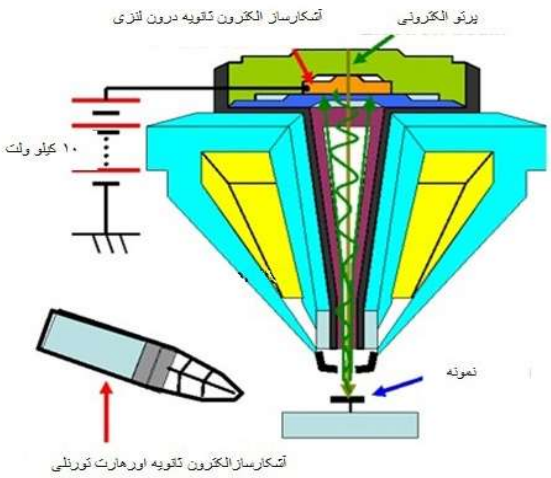
مقایسه وضوح تصویر با آشکارساز الکترون ثانویه و آشکارساز درون لنزی الکترون ثانویه از یک نمونه پودر در بزرگنمایی ۲۰۰ هزار برابر در فاصله کاری ۳ میلیمتر در شکل های (۸) و (۹) مشاهده می‌شود.

تصویری از نانوتیوب کربنی در بزرگنمایی ۲۰۰ هزاربرابر با ولتاژ ۵ کیلوولت در شرایط بدون پوشش‌دهی طلا با آشکارساز درون لنزی الکترون ثانویه با استفاده از میکروسکپ الکترونی گسیل میدانی در شکل (۱۰) دیده می‌شود. ضخامت دیواره نانوتیوب نزدیک به ۵ نانومتر است.

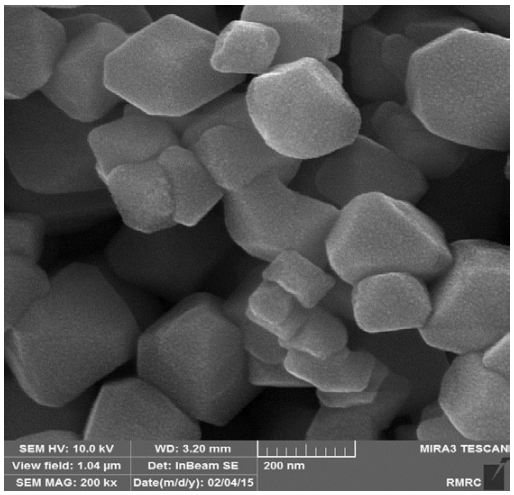
آشکارساز کاتودولومینسانس

تئوری ایجاد کاتودولومینسانس

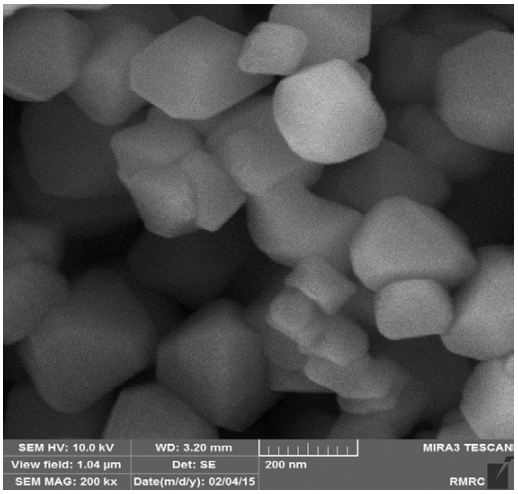
برخی مواد هنگامی که مورد تابش نور، الکترون و گرما قرار می‌گیرند، این نوع انرژی‌ها را جذب و سپس آن را به‌صورت نور از خود تابش می‌کنند. این گونه مواد را «مواد لومینسانس» و این پدیده را «پدیده لومینسانس» می‌نامند، یا به عبارت دیگر، هر گونه تابش پرتو نورانی توسط یک ماده تحت تاثیر عوامل محرکه خارجی لومینسانس نامیده می‌شود. لومینسانس فرایند نشر نور از التهای برانگیخته



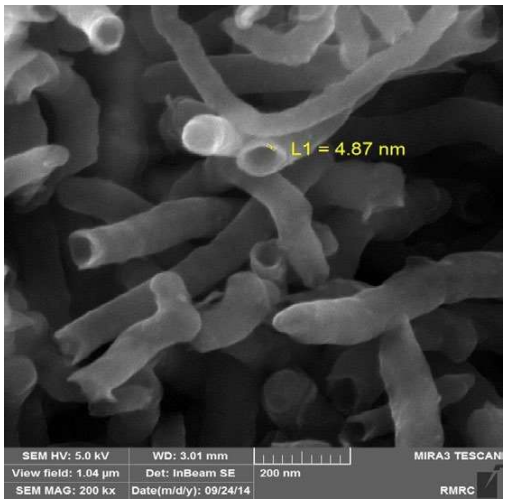
شکل ۷: نمایی از موقعیت قرارگیری آشکارساز درون لنزی [۷].



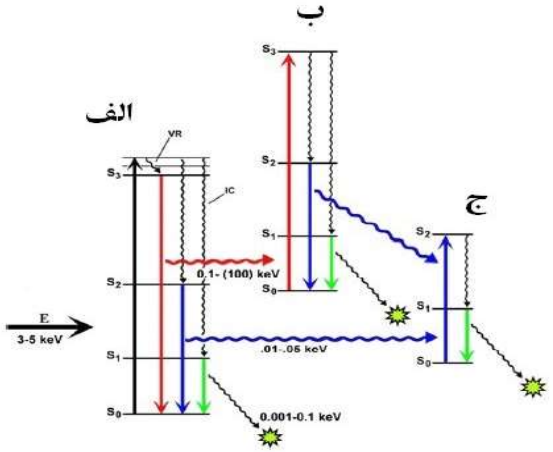
شکل ۸: تصویر نمونه پودر در بزرگنمایی ۲۰۰ هزار برابر با آشکاساز الکترون ثانویه درون لنزی [۸].



شکل ۹: تصویر نمونه پودر در بزرگنمایی ۲۰۰ هزار برابر با آشکاساز الکترون ثانویه [۸].



شکل ۱۰: تصویر نانوتیوب کربنی در بزرگنمایی ۲۰۰ هزار برابر با آشکاساز الکترون ثانویه درون لنزی [۸].



شکل ۱۱: حالت‌های الکترونی مولکول، زیر حالت‌های ارتعاشی و انتقالات بین این حالت‌ها [۱۱].

الکترونی است، در فرایند لومینسانس، الکترون‌های ماده هدف که در شرایط معمول در حالت یا تراز انرژی پایه به سر می‌برند، با گرفتن انرژی از یک منبع مشخص به حالت‌های پر انرژی‌تر برانگیخته می‌رود. در بازگشت الکترون‌های ماده از حالت برانگیخته به حالت پایه، انرژی برانگیختگی به‌صورت نور (انرژی فوتون‌ها) نشر می‌شود (شکل ۱۱) [۹و۱۰].

بسته به اینکه برانگیختگی با چه منبع انرژی صورت گرفته باشد، لومینسانس انواع مختلفی نظیر فوتولومینسانس[۱۶]، شیمی لومینسانس[۱۷]، بیولومینسانس[۱۸]، کاتدولومینسانس[۱۹] و غیره دارد.

در فوتولومینسانس که یکی از پر کاربردترین انواع لومینسانس است، برانگیختگی توسط فوتون نور انجام می‌شود. فلورسانس و فسفرسانس از انواع فوتولومینسانس هستند. در خاصیت کاتودولومینسانس عامل محرکه پرتوهای کاتدیک یا پرتو ایکس هستند.

در نتیجه برخورد پرتو کاتدی (پرتو الکترونی تولید شده با تفنگ الکترونی) به مواد لومینسانس کننده (که در اصطلاح به آن‌ها فسفر گفته می‌شود) پدیده کاتولومینساس صورت می‌گیرد. الکترون‌های پر انرژی در این حالت همانند یک منبع انرژی عمل کرده و موجب تحریک از طریق انتقالات الکترونی و در نتیجه انتشار فوتون می‌شوند. کاتدولومینسانس روشی شناخته شده و مؤثر و ابزاری حساس برای تعیین مشخصات توصیفی به ویژه در محدوده مواد پلیمری، بیولوژیکی، یمه‌رسانا و زمین‌شناسی است [۱۰و۱۲].

همان‌گونه که می‌دانیم، در میکروسکپ الکترونی روبشی از یک منبع الکترونی برای تولید الکترون استفاده می‌شود. لذا سطح نمونه‌های مورد بررسی با این روش در زیر بمبارانی از الکترون‌ها قرار می‌گیرد و در اثر پرتوهای کاتدیکی یا پرتو ایکس، نور از سطح نمونه منتشر می‌کنند و اگر این نور آشکار شود، می‌توان تصویر در حالت کاتودولومینسانس را نمایش داد.

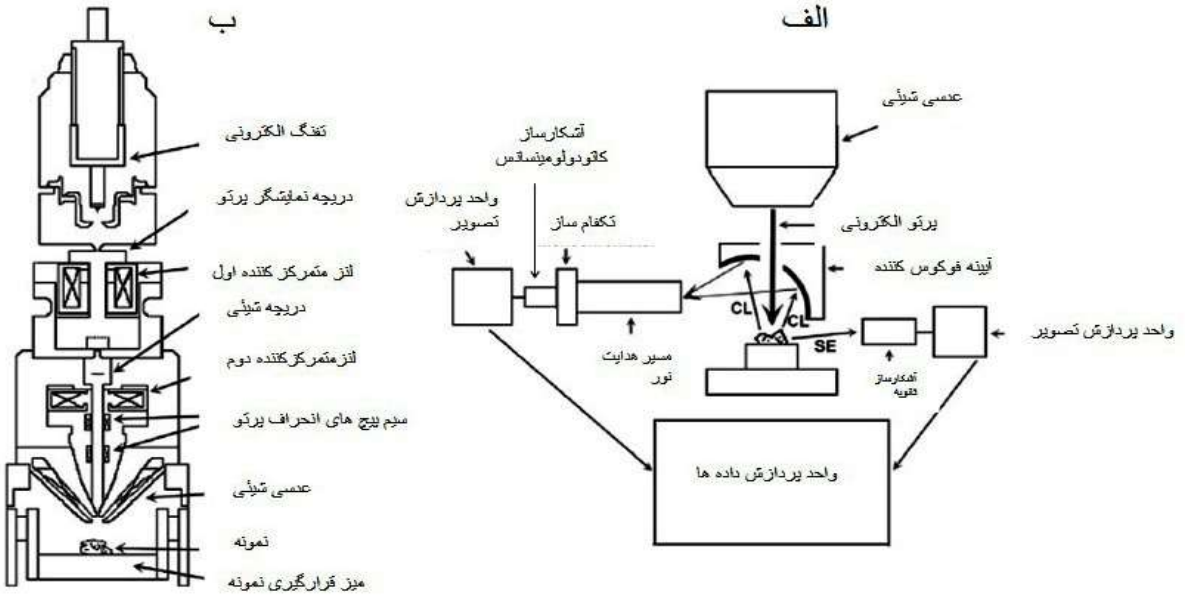
بنابراین، هنگامی که آشکارگر کاتودولومینسانس را به یک میکروسکپ الکترونی روبشی[۲۰]، میکروسکپ انتشار میدانی روبشی[۲۱] و یا میکرو آنالیز با پروب الکترونی[۲۲] وصل کنیم، می‌توانیم در کنار اطلاعاتی نظیر توپوگرافی و مورفولوژی و غیره تصاویری از مواد لومینسانسی نمونه با رزولوشن بالا نیز فراهم کنیم. همچنین می‌توانیم ترکیبات لومینسانس دهنده در مقیاس نانو وابسته به مواد تشکیل دهنده آن‌ها نظیر نقاط کوانتومی نیمه‌هادی، خوشه‌های فلزی در ابعاد نانو، نانومواد مختلط شده با فلزات و کامپوزیت‌ها و هیبریدهای آلی - معدنی را نیز با این آشکارساز بررسی کنیم [۱۰و۱۲].

اساس کار آشکارساز کاتودولومینسانس

به‌طور کلی، به‌منظور اندازه‌گیری پدیده کاتودولومینسانس توسط شناساگر CL به داشتن مجموعه‌ای از بخش‌های اصلی مختلف نیاز داریم. این مجموعه شامل منبع[۲۳]، تکفام‌ساز[۲۴] و آشکارسازهای بسیار حساس مثل لوله فوتوتکثیر کننده[۲۵] و سیستم‌های پردازش داده است (شکل ۱۲) [۱۳].

منبع برانگیختگی[۲۶]

در اغلب شرایط، سیگنال کاتودولومینسانس به‌طور مستقیم با شدت پرتو تابشی به نمونه متناسب است. بنابراین، باید با استفاده از یک منبع برانگیختگی مناسب طول موجی با شدت پایدار و زیاد ایجاد کرد. به‌منظور انتقال بیشترین مقدار نور خروجی از نمونه به آشکارساز، از لنزها یا آینه‌های مناسب در بالای محل قرارگیری نمونه استفاده می‌شود تا بیشترین مقدار نور خارج شده از نمونه را جمع‌آوری و به آشکارساز



شکل ۱۲: شکل (الف): نمایی از آشکارساز کاتودولومینسانس در میکروسکپ الکترونی روبشی. شکل (ب) پیکربندی میکروسکپ الکترونی روبشی [۱۱].

CL منتقل کند. انعکاس دهنده‌های بیضوی شکل[۲۷] بیشترین کارایی را در جمع‌آوری نور منبع دارند. انعکاس دهنده‌ها و منبع می‌توانند به‌صورت واحدهای مستقل از یکدیگر عمل کنند و یا در مجموع، یک واحد جدایی‌ناپذیر را تشکیل دهند [۱۴و۱۵].

لذا در ساختمان میکروسکپ الکترونی همان‌گونه که در شکل (۱۲) نشان داده شده‌است از یک آیینه نیمه بیضی به‌منظور جمع‌آوری بهینه نور استفاده می‌شود تا در نهایت با جمع‌آوری مناسب نور و متمرکز کردن آن روی آشکارساز CL شرایط آنالیز طیفی لازم را فراهم کند.

طول موج گزین‌ها[۲۸]

در آشکارساز کاتودولومینسانس از تکفام‌ساز به‌عنوان انتخابگر طول موج استفاده می‌شود. طول موج مرکزی و پهنای باند[۲۹] طول موج گزین‌های جذبی و نشری به‌گونه‌ای انتخاب می‌شوند که سیگنال فلورسانس را به بیشترین مقدار و سیگنال زمینه را به حداقل برسانند. افزایش پهنای باند برانگیختگی با منابع پیوسته موجب افزایش توان تابشی برخوردی به نمونه می‌شود. به‌طور معمول پهنای باند برانگیختگی از ۰/۱ پهنای باند جذبی در نصف ارتفاع بزرگتر است؛ افزایش پهنای باند نشری با توجه به پهن‌تر بودن آن (۱۰۰-۲۰ نانومتر)، منجر به افزایش سیگنال فلورسانس می‌شود [۱۴و۱۵]. به‌طور معمول در آشکارگر کاتودولومینسانس از تکفام‌سازهای با تفکیک‌پذیری[۳۰] متوسط استفاده می‌شود. تفکیک‌پذیری معادل ۱ نانومتر برای بیشتر کاربردها مناسب است. برای آنالیز کمی، پهنای شکاف بزرگ (۰/۵ تا ۲ میلی‌متر) و پهنای طیفی ۴ تا ۲۰ نانومتر نیاز است.

آشکارساز

حساسیت پایین بسیاری از آشکارسازهای تجاری مانع از کاربرد آن‌ها به‌عنوان آشکاساز CL است، چرا که توان تابشی سیگنال نشر شده بسیار کم است. در اندازه‌گیری‌های تک طول موجی به‌طور معمول از فوتولوله تکثیرکننده[۳۱] به‌عنوان آشکارساز استفاده می‌شود. سطح جریان تاریکی[۳۲] و نوفه جریان تاریکی در این آشکارسازها پایین است. برای روبش کامل طیف نشری، از آشکارسازهای چند کانالی[۳۳] همانند آرایه‌های دیودی[۳۴] استفاده می‌شود. این امر به خصوص برای مطالعات سینتیک که در آن‌ها غلظت گونه‌های لومینسانس کننده (و در نتیجه سیگنال لومینسانس) با زمان تغییر می‌کند، مناسب است [۱۶و۱۷].

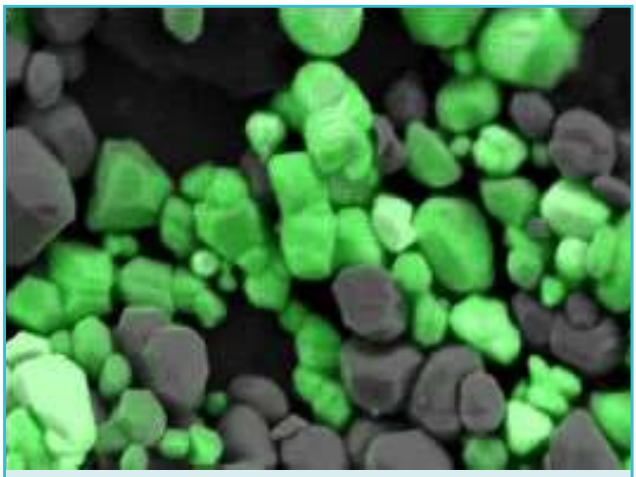
پردازش داده[۳۵]

جریان فوتو آندی حاصل از فوتولوله تکثیر کننده ابتدا به ولتاژ تبدیل می‌شود. ولتاژ حاصل با تقویت کننده‌های عملیاتی[۳۶] تقویت شده و سیگنال خروجی با استفاده از یک ولت‌متر دیجیتالی به نمایش در می‌آید. به‌منظور کاهش سوق[۳۷] و نوفه دستگاه، باید از قطعات الکترونیکی آنالوگ با کیفیت بالا استفاده کرد. برای افزایش نسبت سیگنال به نوفه، مدت زمان جمع‌آوری داده[۳۸] در گستره‌ی ۰/۱ تا ۱۰ ثانیه انتخاب می‌شود. سرد کردن فوتولوله تکثیرکننده منجر به کاهش جریان تاریکی و نوفه شده و در نتیجه نسبت سیگنال به نوفه افزایش می‌یابد. کنترل عواملی مثل سرعت اسکن طول موج، گستره‌ی اسکن طول موج، پهنای شکاف و زمان جمع‌آوری داده با استفاده از صفحه کلید فراهم

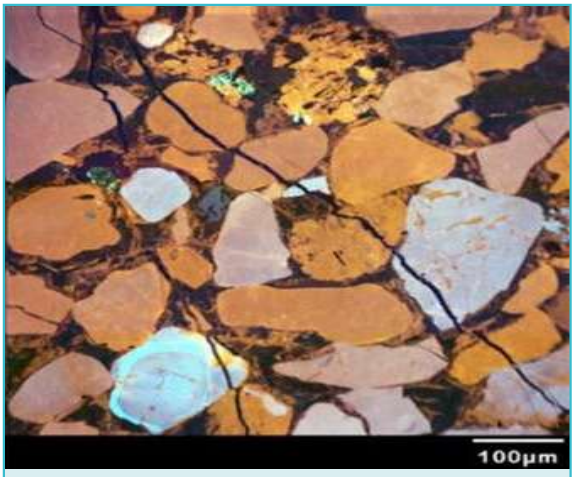
شده‌است. داده‌های حاصل از اندازه‌گیری بعد از ذخیره در کامپیوتر، با گزینه‌هایی که در نرم‌افزار آنالیز دستگاه وجود دارد مورد پردازش بیشتر قرار می‌گیرد [۱۶و۱۷].

برخی از تصاویر تهیه شده با استفاده از آشکارساز کاتودولومینسانس

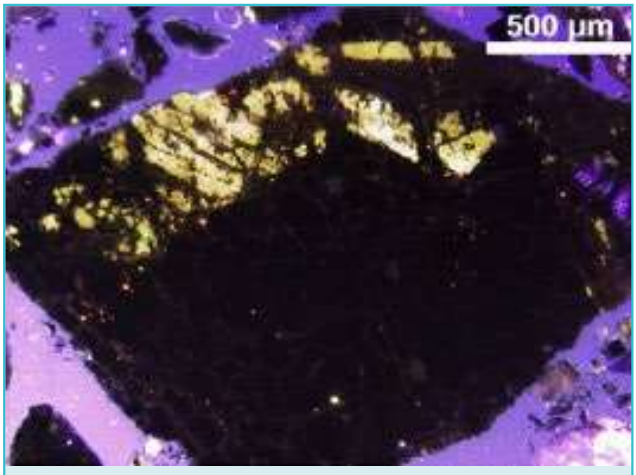
شکل ۱۳: تصویر کاتودولومینسانس از گرانیت، سنگ مرمر [۱۷].



شکل ۱۵: تصویر کاتودولومینسانس از یک پودر لیوفیلیزه از GFP (پروتئین فلورسنت سبز) [۱۶].



شکل ۱۴: تصویر کاتودولومینسانس ازانواع دانه‌های کوارتز در ماسه سنگ [۱۷].



شکل ۱۶: تصویر کاتودولومینسانس از سطح سنگ آپاتیت بسیار قدیمی (۱۴۰ ساله) [۱۵].

نتیجه گیری

تهیه هر تصویری مستقل از ابزار و هدف تهیه تصویر، وابسته به وجود اختلافی در مشخصات تصویرسازی جزء مورد نظر یا به عبارت دیگر «تفکیک‌پذیری» آن است. بنابراین، ا لی‌ترین مشخصه لازم برای تهیه تصویر با هر ابزاری، وجود کنتراست بین اجزای تشکیل دهنده تصویر است. لذا با آشنایی و استفاده مناسب از آشکارسازها می‌توان با داشتن کنتراست بالاتر، وی های بیشتری از سطح نمونه‌ها را شناسایی و تصویرسازی نمود.

در مقاله فوق سه آشکارساز مورد بررسی قرار گرفت تا بتوانیم با کمک آنها اطلاعات مناسبی از مواد، همراه با کنتراست بالا داشته باشیم.

پی‌نوشت

۱. مرکز پژوهش متالورژی رازی،کارشناس مهندسی مواد متالورژی
۲. پژوهشگاه پلیمر و پتروشیمی ایران،کارشناس مهندسی برق الکترونیک
۳. دانشگاه علم و صنعت ایران، کارشناس ارشد مهندسی مواد متالورژی
۴. عضو کارگروه میکروسکوپ الکترونی روبشی شبکه آزمایشگاهی

5. Secondary electron detector
6. detector In lens - In beam Secondary
7. Cathodoluminescence detector
8. Everhart Thornley (E-T)
9. light pipe
10. photomultiplier
11. Electrical Pulses
12. Cathode Ray Tube (CRT)
13. Feild Emmision
14. Working Distance (WD)
15. Feild Emmision
16. Photoluminescence
17. Chemiluminescence
18. Bioluminescence
19. Cathodoluminescence
20. scanning electron microscope (SEM)
21. Field emission scanning electron microscopy (FESEM)
22. Electron probe microanalysis (EPMA)
23. Source
24. Monochromator
25. Photomultiplier Tube
26. Excitation Source
27. Elliptical Reflector
28. Wavelength Selection Devices
29. Band Pass
30. Resolution
31. Photo Multiplier Tube (PMT)
32. Dark Current
33. Multichannel Detector
34. Diode Array
35. Signal Processing
36. Operational Amplifier
37. Drift
38. Integration Time

مراجع

[۱] دکتر فرهاد گلستانی، دکتر محمدعلی بهرموز، دکتر ا ماعیل صلاحی، «روش‌های شناسایی و آنالیز مواد» دانشگاه علم و صنعت ایران، چاپ پنجم، ۱۳۹۲.

[۲] دکتر یوسف خرازی، مهندس امیر شیخ‌غفور، «ابزار شناسایی ساختار مواد»، دانشگاه علم و صنعت ایران، چاپ اول، ۱۳۸۰.

[3] Everhart, TE and RFM Thornley (1960). "Wide-band detector for micro-microampere low-energy electron currents". Journal of Scientific Instruments 37 (7): 246–248.

[4] http://www.tescan.com/en/other-products/accessories/rainbow-cl-new-color-detector.

[۵] س.امیرشکاری، میکروسکپ الکترونی TESCAN، دانشگاه علم و صنعت، ۱۳۹۵.

[6] David C. Bell, Natasha Erdman, Low Voltage Electron Microscopy: Principles and Applications, January 2013.

[7] L.Reimer, Scanning Electron Microscopy, Physics of Image Formation and Microanalysis, second edition.

[8] مرکز پژوهش متالورژی رازی، 1395، TESCAN غ.دهقانی، میکروسکپ الکترونی گسیل میدانی.

[9] Darrell Henry, Scanning Electron Microscopy - Cathodoluminescence (SEM-CL), Louisiana State University

[10] Phyllis J. Fisher, William S. Wessels, Allan B. Dietz, Franklyn G. Prendergast , Enhanced biological cathodoluminescence

[11] J. Fisher a,*, William S. Wessels a, Allan B. Dietz b, Franklyn G. Prendergast an Enhanced biological cathodoluminescence Phyllis.

[12] Gary.Nichols ,Applications of cathodoluminescence spectroscopy and imaging in the characterisation of pharmaceutical : Pharma Therapeutics Pharmaceutical Sciences, Pfizer Worldwide R&D, Ramsgate Road, Sandwich, Kent CT13 9NJ, UK

[13] Stefanie N. Frelinger, Matthew D. Ledvina, J. Richard Kyle, Donggao Zhao ,Scanning electron microscopy cathodoluminescence of quartz: Principles, techniques and applications in ore geology

[14] Christian Mavris a, , Jens Götze b, Michael Plötze c, Markus Egli , A combined approach using SEM–EDX, cathodoluminescence and Nomarski DIC microscopy

[15] Christian Mavris, Jens Götze b, Michael Plötze, Markus Egli, Weathering and mineralogical evolution in a high Alpine soil chronosequence: A combined approach using SEM–EDX, cathodoluminescence and Nomarski DIC microscopy.

[16] J. Fisher a,*, William S. Wessels a, Allan B. Dietz b, Franklyn G. Prendergast a Enhanced biological cathodo luminescence Phyllis.

[17] http://www.tescan.com/en/other-products/accessories/rainbow-cl-new-color-detector