

بخش اول

بررسی و مقایسه آشکارسازهای سامانه‌های تفکیک انرژی و تفکیک طول موج در میکروسکوپ الکترونی روبشی

نویسندگان

مریم خانی‌نور^۱بهناز کاوه^۲، رفیه ذبیحی^۳

M_khaninoor@yahoo.com

چکیده

با استفاده از انرژی و یا طول موج پرتو ایکس اطلاعاتی به دست می‌آید، بر این اساس دو نوع دستگاه آشکارسازی پرتو ایکس ایجاد می‌شود: دستگاه طیف‌سنج تفکیک انرژی^۵ و دیگری دستگاه طیف‌سنج تفکیک طول موج^۶ است. در دستگاه EDS اغلب از انواع مختلف آشکارسازهای نیمه‌رسانا مانند $^3\text{Si(Li)}$ ، ^8SDD و $^7\text{HPGe}$ استفاده می‌شود و از طرف دیگر در دستگاه WDS به‌طور معمول آشکارسازهای گازی از نوع شمارنده‌های تناسبی و یا آشکارسازهای سوسوزن مورد استفاده قرار می‌گیرند. هر چند عملکرد آشکارسازها و چگونگی آشکارسازی پرتوهای ایکس کاملاً با یکدیگر متفاوت است اما هدف نهایی در هر دو نوع طیف‌سنجی، آشکارسازی انرژی یا طول موج پرتو ایکس مشخصه ساطع شده و آنالیز عنصری نمونه مورد نظر قرار گرفته در میکروسکوپ الکترونی روبشی^{۱۰} است.

واژه‌های کلیدی

میکروسکوپ الکترونی روبشی، طیف‌سنج تفکیک انرژی، طیف‌سنج تفکیک طول موج، آشکارساز نیمه‌رسانا، آشکارساز گازی، آشکارساز سوسوزن.

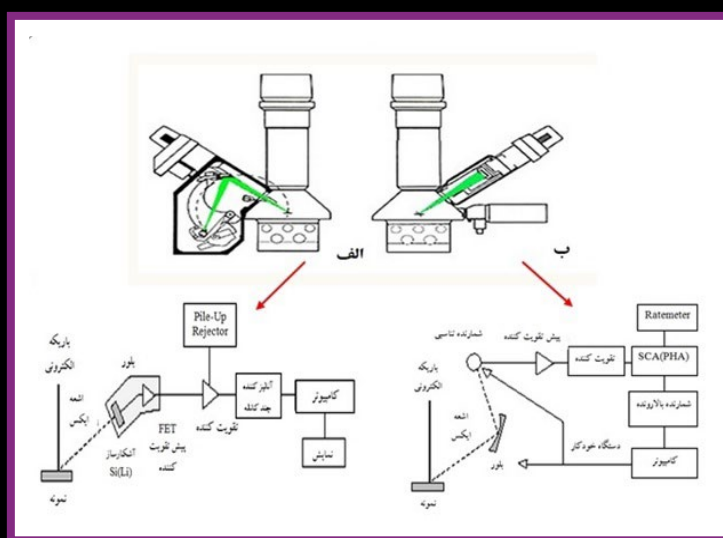
مقدمه

در میکروسکوپ الکترونی روبشی پس از برخورد باریکه الکترونی به سطح نمونه و در حجم برهم‌کنش، با توجه به نوع برهم‌کنش، خروجی‌های مختلفی مانند الکترون‌های ثانویه^{۱۱} و الکترون‌های برگشتی^{۱۲} به‌منظور تصویربرداری از سطح نمونه، الکترون‌های اوژه^{۱۳} به‌منظور عنصرسنجی و تعیین ترکیب سطح ماده، پرتوهای ایکس برای آنالیز عنصری و غیره ایجاد می‌شوند [۱]. برای آشکارسازی هر یک از این خروجی‌ها به یک آشکارساز خاص نیاز است. به عبارتی، به تعداد خروجی‌های مورد نظر، آشکارسازهای متفاوتی روی دستگاه نصب خواهد شد. برای آنالیز عنصری نمونه که شامل آنالیز کیفی و نیمه کمی است، به نوعی از آشکارساز که قادر به آشکارسازی پرتوهای ایکس باشد، نیاز داریم.

به‌طور کلی، در دستگاه طیف‌سنج تفکیک انرژی (EDX^{۱۴} یا EDAX^{۱۵}) خروجی مورد نظر انرژی پرتوهای ایکس مشخصه‌ای است که از نمونه ساطع شده و به‌صورت مستقیم به آشکارساز رسیده‌اند. طیف حاصل، عناصر موجود در نمونه را به کمک انرژی تعیین می‌کند. از طرف دیگر، دستگاه طیف‌سنج تفکیک طول موج (WDX^{۱۶} یا WDAX^{۱۷}) با استفاده از پراش براگ که ما بین نمونه و آشکارساز اتفاق می‌افتد و با توجه به زاویه مناسب برای پرتو ایکس، نمونه را شناسایی می‌کند. بدین منظور آشکارساز، نمونه و بلور روی محیط یک دایره قرار می‌گیرند که با

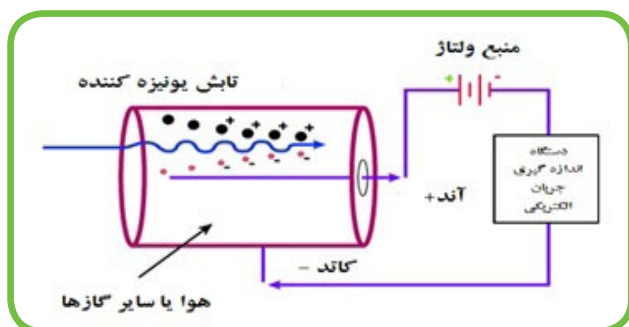


چرخش آشکارساز ابتدا زوایای مورد نظر و به دنبال آن بر طبق رابطه براگ یعنی $n\lambda = 2d\sin\theta$ طول موج‌های پرتو ایکس مشخص می‌شوند. طیف حاصل، عناصر موجود در نمونه را به کمک طول موج‌ها تعیین می‌کند [۲۱]. روی برخی از دستگاه‌های میکروسکوپ الکترونی تنها یکی از طیف‌سنج‌های EDS و WDS به دلخواه نصب می‌شوند در حالی که در گروه دیگری از میکروسکوپ‌ها که به دنبال آنالیز با دقت بیشتری هستند هم‌زمان هر دوی این طیف‌سنج‌ها نصب خواهند شد [۲۲].



شکل ۱: الف) دستگاه طیف‌سنج تفکیک طول موج ب) دستگاه طیف‌سنج تفکیک انرژی [۵۴]

مناسب می‌توان بار تولید شده از تابش را تبدیل به یک پالس کرده در این صورت، تک تک ذرات قابل شمارش هستند. به‌طور کلی، براساس رابطه‌ای بین ولتاژ الکتریکی دو سر الکترودها و بار جمع‌آوری شده، پنج ناحیه برای آشکارسازهای گازی در نظر گرفته می‌شود و آشکارسازهایی نظیر اتاقک‌های یونش^{۲۱}، شمارنده‌های تناسبی^{۲۲} و گایگر-مولر^{۲۳} با توجه به ناحیه ولتاژی که در آن کار می‌کنند از جمله این آشکارسازها هستند [۶].



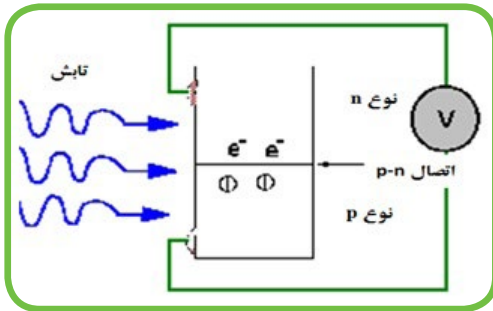
شکل ۲: نمایی از آشکارساز گازی [۷]

● انواع آشکارسازها

- به‌طور کلی براساس چگونگی ساخت و عملکرد، آشکارسازها به سه نوع کلی تقسیم می‌شوند:
- آشکارسازهای گازی^{۱۸}
- آشکارسازهای سوسوزن^{۱۹} (جرقه‌زن)
- آشکارسازهای نیمه‌رسانا^{۲۰}

● **آشکارسازهای گازی:** با استفاده از یونش تولید شده از تابش، وقتی که از یک گاز عبور می‌کند، کار می‌کنند. معمولاً چنین شمارنده‌ای دارای دو الکترودها است که بین آن‌ها یک پتانسیل الکتریکی برقرار می‌شود. فضای بین الکترودها را با استفاده از گاز پر می‌کنند. تابش یوننده با عبور از فضای بین الکترودها، تمام یا بخشی از انرژی خود را با تولید زوج‌های الکترون-یون از دست می‌دهد. هم الکترون‌ها و هم یون‌ها حامل‌های باری هستند که تحت تاثیر میدان الکتریکی حرکت می‌کنند. حرکت آن‌ها جریانی در الکترودها القاء می‌کند که می‌توان آن را اندازه گرفت و یا با استفاده از الکترونیک

کننده‌ای را در کار آشکارسازهای نیمه‌رسانا دارند. به دلیل استفاده از ماده‌های مختلف یا روش‌های متفاوت آماده‌سازی ماده در آشکارساز، انواع مختلفی از آشکارسازهای نیمه‌رسانا وجود دارند مانند آشکارسازهای سدسطحی^{۲۵}، $^{26}\text{Si}(\text{Li})$ ، ^{26}Ge و غیره. کارسازترین آشکارسازهای نیمه‌رسانا از سیلیسیوم و ژرمانیوم ساخته می‌شوند. مهم‌ترین برتری آشکارسازهای نیمه‌رسانا در مقایسه با دیگر آشکارسازها، قدرت تفکیک انرژی بسیار بالا، یعنی توانایی آن‌ها در تفکیک انرژی ذرات از میان یک طیف چند انرژی است [۶].



شکل ۴: نمایی از آشکارساز نیمه‌رسانا [۸]

● آشکارساز طیف‌سنج تفکیک انرژی

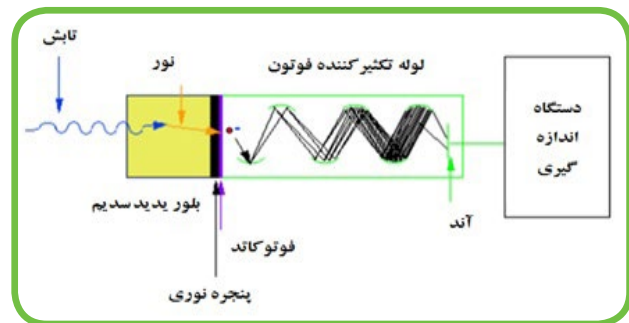
به‌طور معمول به دلیل اینکه آشکارسازهای نیمه‌رسانا دارای قابلیت بسیار بالای تفکیک‌پذیری انرژی هستند از آن‌ها برای دستگاه طیف‌سنج تفکیک انرژی استفاده می‌شود. آشکارسازهای پرتو ایکس می‌توانند از مواد مختلفی با کاربردهای متفاوت ساخته شوند که برای کار با میکروسکوپ الکترونی روبشی تقریباً همیشه مواد انتخاب شده سیلیسیوم یا ژرمانیوم هستند. سه نوع مختلف آشکارسازهای نیمه‌رسانا یعنی $^{26}\text{Si}(\text{Li})$ ، ^{26}Ge و SDD که در دستگاه EDX استفاده می‌شود در این قسمت بررسی خواهند شد. سیلیسیوم اغلب بعد از خالص‌سازی، یک الکترون پذیرنده اضافی دارد بنابراین، به‌طور عمده لیتیوم با یک الکترون دهنده به‌منظور جبران پذیرنده اضافی روی آن سوق داده شده‌است تا به مواد ذاتی خواص مقاومتی بالا را بدهد. این فرآیند منجر به ساخت آشکارساز سیلیسیوم-لیتیوم $^{26}\text{Si}(\text{Li})$ می‌شود. از طرف دیگر، ژرمانیوم می‌تواند به اندازه کافی خالص ساخته شود تا به‌عنوان آشکارساز ژرمانیومی فوق خالص به کار گرفته شود. در نهایت نسل جدیدی از آشکارسازهای رانشی سیلیسیوم براساس سیلیسیوم خالص کار می‌کنند [۹ و ۱۰].

● آشکارساز سیلیسیوم-لیتیوم $^{26}\text{Si}(\text{Li})$

دستگاه EDS از یک بلور سیلیسیوم که مقدار جزئی ناخالصی از عنصر لیتیوم روی آن سوق داده شده، تشکیل شده‌است که در اصطلاح به آن سیلی گفته می‌شود. این بلور در انتهای یک میله مسی نصب شده و انتهای دیگر این میله داخل نیتروژن مایع با دمای ۱۹۷- درجه سانتی‌گراد قرار گرفته‌است. تمام مجموعه، داخل یک محفظه خلاء قرار می‌گیرد (شکل ۵). پرتو ایکس گسیل شده از سطح نمونه، از طریق یک پنجره برلیومی وارد طیف‌سنج می‌شود [۱۱]. در هنگام برخورد پرتو ایکس به بلور آشکارساز،

● **آشکارسازهای سوسوزن (جرقه‌زن یا تهییجی):** مواد هستند جامد، مایع، گاز که وقتی تابش یوننده از آن‌ها می‌گذرد تولید جرقه یا نور می‌کنند. مقدار نوری که در جرقه‌زن تولید می‌شود بسیار اندک است، پیش از اینکه بتوان آن را به‌صورت یک پالس یا هر روش دیگری نگاشت باید تقویت شود. تقویت یا تکثیر نور جرقه‌زن با وسیله‌ای به نام تکثیر کننده فوتون صورت می‌گیرد. کار یک شمارنده سوسوزن را می‌توان به دو مرحله مهم تقسیم کرد: ۱. جذب انرژی تابش فرودی به‌وسیله جرقه‌زن و تولید فوتون‌هایی در بخش مرئی طیف الکترومغناطیس.

۲. تقویت نور با تکثیرکننده فوتون و تولید پالس خروجی. آشکارسازهای سوسوزن براساس نوع ماده به کار رفته در آن‌ها به سه گروه سوسوزن‌های غیرآلی (بلوری)، آلی و گازی تقسیم می‌شوند [۶].

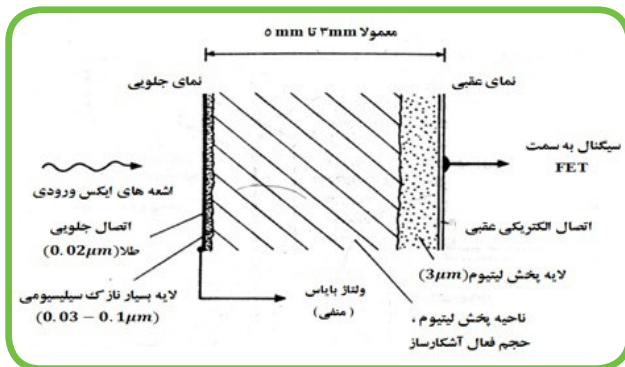


شکل ۳: نمایی از آشکارساز سوسوزن [۱۷]

● **آشکارسازهای نیمه‌رسانا:** آشکارسازهایی هستند که تقریباً مانند اتاقک‌های یونش (نوعی آشکارساز گازی) کار می‌کنند. حامل‌های بار در نیمه‌رساناها برخلاف شمارنده‌های گازی، الکترون و یون نیستند بلکه در نتیجه انتقال تعدادی از الکترون‌ها از باند ظرفیت به باند هدایت و ایجاد حفره^{۲۴} در باند ظرفیت، از الکترون و حفره تشکیل می‌شوند. تعداد جفت‌های الکترون-حفره متناسب با مقدار انرژی انتقالی از تابش به نیمه‌هادی است. تحت تاثیر یک میدان الکتریکی، الکترون‌ها و حفره‌ها به سمت الکترودها حرکت کرده و حرکت آن‌ها جریانی در الکترودها القاء می‌کند که می‌توان آن را اندازه گرفت. حفره‌ها جای خالی الکترون‌ها بوده و در خلاف جهت الکترون‌ها حرکت می‌کنند. از آنجایی که مقدار انرژی لازم برای ایجاد یک جفت الکترون-حفره مشخص بوده و به انرژی تابش برخوردی وابسته نیست، می‌توان با اندازه‌گیری تعداد جفت الکترون-حفره‌ها، شدت تابش برخوردی را تعیین نمود. در آشکارسازهای نیمه‌رسانا، انرژی لازم به‌منظور تولید جفت الکترون-حفره در مقایسه با آشکارسازهای گازی بسیار کم است. در آشکارسازهای نیمه‌رسانا تنوع آماری ارتفاع سیگنال کوچکتر بوده و در نتیجه قدرت تفکیک انرژی بسیار بالا است. امتیازهای دیگر این آشکارساز عبارتند از: پاسخ خطی در گستره وسیعی از انرژی، بازده بالاتر به ازای یک اندازه معین به علت چگالی بالای ماده جامد که در ساختمان آن‌ها به کار می‌رود، امکان ساختن آن‌ها به شکل‌های هندسی خاص، زمان خیزش سریع پالس، توانایی کار در خلاء و در نهایت، حساس نبودن به میدان‌های مغناطیسی. نوع، اندازه، شکل و چگونگی آماده‌سازی بلور نقش تعیین

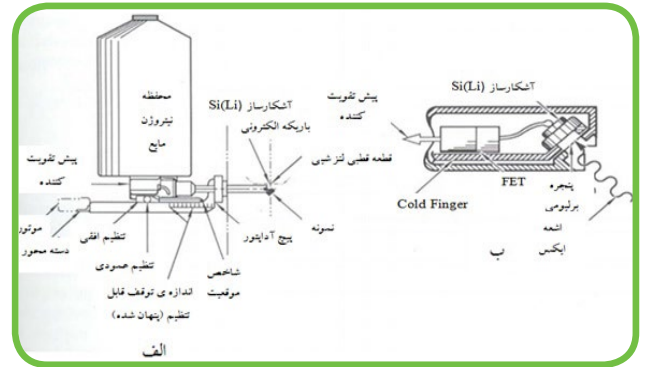
مقدار بسیار کمی ناخالصی از جنس بور (گروه سوم)، به نیمه‌رسانای غیرذاتی از نوع P تبدیل شده و قابلیت رسانایی الکتریکی پیدا می‌کند. اتم‌های بور اضافه شده الکترون کافی برای جفت شدن به‌طور کامل با چهار اتم سیلیسیوم مجاورشان را ندارند؛ بنابراین، تراز پذیرنده‌ای^{۳۴} را بین نوار ظرفیت و نوار رسانش^{۳۵} سیلیسیوم ایجاد می‌کنند به طوری که الکترون‌های نوار ظرفیت می‌توانند به راحتی برانگیخته شده و به تراز پذیرنده بروند و حفره‌هایی را در نوار ظرفیت بر جای بگذارند. سپس با اعمال ولتاژ بالای بایاس^{۳۶} به دلیل حرکت این حفره‌ها، بلور رسانا می‌شود. در ادامه ابتدا اتم‌های لیتیوم در قسمت عقبی بلور پخش می‌شوند (لایه پخش لیتیوم در شکل (۶)). سپس در دماهای بالا (۱۰۰ درجه سانتیگراد) و تحت ولتاژ بایاس اعمال شده کسری از این اتم‌ها درون بلور سیلیسیوم پخش می‌شوند. اتم‌های لیتیوم که هر یک حامل الکترونی اضافی هستند با بخشی از حفره‌های موجود در سیلیسیوم ترکیب شده و آن‌ها را خنثی می‌کنند که نتیجه آن، ناحیه‌ای با عنوان ناحیه تهی است. در واقع، پیوند p-n با پخش لیتیوم در سیلیسیوم تشکیل شده و در نهایت بلور Si(Li) از ۳ ناحیه تشکیل می‌شود:

۱. لایه پخش لیتیوم که به‌صورت رسوبی است (احتمالاً با ضخامت ۳۰۰ میکرون) و اتصال الکتریکی را در عقب بلور برقرار می‌کند.
 ۲. ناحیه تهی^{۳۷} (عمق تهی) بسیار وسیع که در آن تعداد حفره‌ها به دلیل خنثی‌سازی اتم‌های ناخالص نوع p با استفاده از فرآیند پخش لیتیوم، به شدت کاهش یافته است. این قسمت، حجم فعال (اندازه واقعی) آشکارساز است که برخورد پرتو ایکس در آن تشخیص داده می‌شود.
 ۳. لایه بسیار نازک سیلیسیومی (احتمالاً بین ۰/۳ تا ۰/۱ میکرون) در قسمت جلوی آشکارساز است. در این لایه اثر مخرب اتم‌های ناخالص بور، به‌طور کامل تحت فرآیند سوق لیتیوم قرار نگرفته است و شامل یک جذب کننده اضافی ناخواسته میان منبع پرتو ایکس و حجم فعال بلور است.
- یک اتصال الکتریکی ثانویه در قسمت جلویی بلور آشکارساز (علاوه بر لایه لیتیوم که در بالا به آن اشاره شد) مورد نیاز است. این لایه با پوشش‌دهی یک لایه بسیار نازک طلا (۰/۰۲ میکرون) روی سطوح جلویی ایجاد می‌شود. اتصال الکتریکی جلو به یک ولتاژ بایاس منفی بین ۵۰۰ تا ۱۰۰۰ ولت متصل است. اتصال عقب (لایه لیتیوم) به ورودی یک پیش تقویت کننده سیگنال (ترانزیستور اثر میدانی) وصل شده است [۱۱].



شکل ۶: سه لایه تشکیل شده در بلور آشکارساز Si(Li) [۱۱]

جفت الکترون-حفره‌ها ایجاد می‌شوند که جمع‌آوری شده و به‌صورت سیگنال شناسایی می‌شوند. این سیگنال در FET تقویت اولیه شده و به یک سیگنال ولتاژ تبدیل می‌شود و در حین عبور از آشکارساز به سمت پردازشگر سیگنال^{۳۷} تقویت بیشتری می‌شود. این سیگنال آنالوگ توسط یک تبدیل کننده آنالوگ به دیجیتال^{۳۸} به سیگنالی دیجیتال تبدیل شده و در نهایت، به داخل آنالیز کننده چند کاناله^{۳۹} وارد می‌شود. این محتوای MCA است که به‌عنوان طیف نهایی روی صفحه نمایش کامپیوتر نشان داده می‌شود.



شکل ۵: الف) ظاهر فیزیکی آشکارساز و الکترونیک پیش تقویت کننده‌های وابسته ب) جزئیات نصب بلور Si(Li) [۲]

پنجره برلیومی^{۴۰}

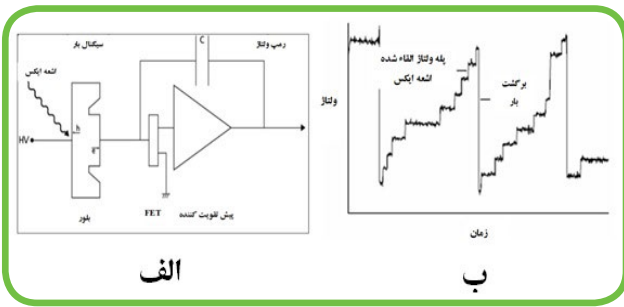
پنجره برلیومی با مقاومت بسیار زیاد به ضخامت $8\mu\text{m}$ در جلوی بلور قرار گرفته، در حالی که در برابر پرتو ایکس شفاف بوده و آن را عبور می‌دهد. وجود این پنجره برای جلوگیری از ورود آلودگی ضروری است، اما به شدت بخش زیادی از پرتوهای ایکس کم انرژی یعنی با انرژی کمتر از ۱ KeV را جذب کرده و آشکارسازی عناصر سبک را مشکل می‌کند، به طوری که تنها آشکارسازی پرتوهای ایکس عناصر بزرگ‌تر از سدیم $Z \geq 11$ امکان‌پذیر است.

بلور آشکارساز Si(Li)

به‌منظور توضیح در خصوص بلور آشکارساز Si(Li) آشنایی بیشتر با نیمه‌رساناها ضروری به نظر می‌رسد. به‌طور کلی نیمه‌رساناها به دو نوع تقسیم می‌شوند:

۱. نیمه‌رسانای ذاتی^{۴۱}: فاقد هرگونه ماده ناخالص بوده و تعداد الکترون و حفره یکسانی دارند.
۲. نیمه‌رسانای غیرذاتی^{۴۲}: مقداری ناخالصی به آن‌ها اضافه شده و در نتیجه تعداد الکترون و حفره غیریکسان می‌شود. نیمه‌رسانای غیرذاتی با آلییدن نیمه‌رسانای چهار ظرفیتی با یک عنصر سه یا پنج ظرفیتی پدید می‌آید. اگر عنصر اضافه شده از گروه سه باشد، تعداد حفره‌ها بیشتر بوده و نیمه‌رسانا از نوع P (Positive) یا پذیرنده الکترون آزاد) و اگر عنصر اضافه شده از گروه پنج باشد تعداد الکترون‌ها بیشتر است و نیمه‌رسانا از نوع N (Negative) یا بخشنده الکترون آزاد) نامیده می‌شود [۶].

آشکارساز Si(Li) شامل یک بلور سیلیسیوم با خلوص بالا است که معمولاً به شکل استوانه‌ای با قطر ۱۰ تا ۱۶ و عمق ۳ میلی‌متر (گاهی اوقات تا ۵ میلی‌متر) ساخته شده است. در حالت عادی سیلیسیوم ماده‌ای نیمه‌رسانا با چهار الکترون در نوار ظرفیت^{۴۳} است که با افزودن



شکل ۷: الف) تصویری از بلور و FET در آشکارساز Si(Li) (ب) نمودار پله‌ای ولتاژ در FET [۱۲]

سیستم خنک کننده آشکارساز

حرارتی که به وسیله جفت الکترون-حفره‌ها و همچنین لیتیوم‌ها در طی پخش‌شدگی در سیلیسیوم ایجاد شده باعث تولید یکسری نویزهای حرارتی می‌شود که تفکیک پذیری را کاهش می‌دهد که باید تا حد امکان کاهش یابد. از طرف دیگر، در دمای اتاق تحرک اتم‌های لیتیوم چنان است که در اثر سوق و رفتن به موقعیت‌هایی که منجر به از دست دادن کارایی آنها می‌شود و در اثر تهنشینی داریم آنها آشکارساز آسیب می‌بیند. در نتیجه، تحرک اتم‌های لیتیوم و پخش‌شدگی آنها باید در یک مرحله منجمد صورت گیرد. به این منظور از نیتروژن مایع با دمای ۱۹۷- درجه سانتی‌گراد استفاده کرده و آشکارساز را در آن نگهداری می‌کنیم. نکته قابل توجه این است که حتی در صورت خاموش بودن دستگاه نیز آشکارساز باید در نیتروژن مایع غوطه‌ور باشد [۶].

آشکارساز رانش سیلیکون (SDD)

در سال‌های اخیر، آشکارسازی تفکیک انرژی اشعه ایکس، از نوع رانش سیلیکونی (SDD) محبوبیت فراوانی را کسب کرده است و استفاده از آشکارسازهای قدیمی و مرسوم سیلیسیوم-لیتیوم تا حدودی کاهش یافته است و SDDها آشکارسازهای برگزیده برای EDS هستند. پیشرفت‌های اخیر در طراحی آخرین نسل‌های آشکارسازهای SDD باعث ایجاد مزیت‌هایی مانند عدم استفاده از نیتروژن مایع، قدرت تفکیک انرژی بسیار بالا در سرعت‌های بالای شمارش گردیده است و همچنین افزایش منطقه فعال آشکارساز باعث جمع‌آوری تعداد داده بیشتر در زمان‌های کوتاه‌تر، ولتاژهای برانگیختگی پایین‌تر، در شرایط نرمال SEM شده‌است.

اجزای تشکیل دهنده آشکارساز رانش سیلیکون (SDD):

موازی‌ساز: درجه‌ای محدودکننده است که اشعه ایکس برای رسیدن به آشکارساز باید از آن عبور کند. موازی‌ساز تضمین می‌کند که پرتو ایکس فقط از ناحیه‌ای که با استفاده از باریکه الکترونی تحریک شده‌است، دریافت می‌شود و اشعه ایکس منحرف شده از دیگر قسمت‌های محفظه میکروسکوپ آشکارسازی نشده و در آنالیز شرکت نمی‌کند [۱۰].

دریچه الکترون^{۴۱}: الکترون‌هایی که به آشکارساز نفوذ می‌کنند باعث تابش‌های زمینه و یک سری اندازه‌گیری بیش از حد می‌شوند. دریچه الکترونی یک آهنربای دائم^{۴۲} است که الکترون‌های عبوری را که می‌توانند باعث ایجاد تابش‌های زمینه شوند را به شدت

برهم کنش پرتو ایکس با بلور Si(Li): پرتوهای ایکس ورودی به بلور آشکارساز، انرژی خود را به الکترون‌ها داده و باعث گذار آنها به نوار رسانش و در نتیجه ایجاد الکترون و حفره می‌شوند. به منظور ایجاد یک جفت الکترون-حفره در سیلیسیوم به ۳/۸ eV انرژی نیاز است. در اثر ولتاژ بایاس الکترون‌های نوار رسانش به سرعت به سمت عقب آشکارساز حرکت کرده و حفره‌های مثبت مربوطه به آرامی به سمت اتصال جلو حرکت می‌کنند. با الکترونیک مناسب بار جمع‌آوری شده و سیگنالی را تولید می‌کند که با پیش تقویت‌کننده آشکارسازی می‌شود. این سیگنال به صورت یک تابع پله‌ای است و اندازه هر پله با تعداد الکترون‌های یونیزه شده و تعداد الکترون‌های یونیزه شده با انرژی اشعه ایکس ورودی متناسب است [۱۱].

موازی‌ساز^{۳۸}

تا به امروز ساختارهای متفاوتی از بلور سیلیسیومی ارائه شده که نوع شیاردار و یا استوانه‌ای از جمله این ساختارهاست. قسمت مرکزی بلور (هسته) از نوع سیلیسیوم پخش شده با استفاده از لیتیوم است و فوتون‌های پرتو ایکسی که به ناحیه مرکزی بلور (هسته) برخورد می‌کنند، بارهای الکترونی را ایجاد کرده که به‌طور موثری در قسمت اتصال پشتی جمع خواهند شد. قسمت بیرونی بلور (لبه) از سیلیسیوم نوع P است که اثر مخرب اتم‌های ناخالص بور، به‌طور کامل با استفاده از فرآیند پخش کردن لیتیوم جبران نشده‌است. تمام یا بخشی از الکترون‌هایی که با برخورد اشعه ایکس به این قسمت به وجود آمده‌اند با استفاده از سیلیسیوم نوع P به دام افتاده و جذب حفره‌ها شده و در نتیجه آشکارسازی نمی‌شوند، در حالی که در دسترس داشتن تمام الکترون‌های حاصل از یونیزاسیون به‌منظور آشکارسازی مورد نظر است. این مورد بسیار نامطلوب است چون نسبت پیک به نویز را کاهش می‌دهد که یک ایراد مهم تلقی می‌شود. برای دستیابی به کارایی معقول باید به دام‌اندازی الکترون در قسمت بیرونی آشکارساز به حداقل برسد. ساده‌ترین روش، موازی کردن باریکه اشعه ایکس است، به‌گونه‌ای که برخورد‌های اشعه ایکس تنها در قسمت مرکزی بلور صورت گرفته و آشکار شوند. بنابراین، موازی‌ساز خارجی باید به‌عنوان قسمت اصلی آشکارساز شمرده شود.

ترانزیستور اثر میدان (FET)^{۳۹}

اولین مرحله از فرآیند، تقویت سیگنال است که بار آزاد شده به وسیله پرتو ایکس در بلور را اندازه گرفته و آن را به ولتاژ خروجی تبدیل می‌کند. به‌طور کلی یک ترانزیستور اثر میدان، تغییرات در بار را به تغییرات وسیع‌تری در ولتاژ تبدیل می‌کند (شکل ۷-الف). در طی این فرآیند، بارها در خازن فیدبک (بازخورد) افزایش می‌یابند. پله‌های تیز در ولتاژ در حال افزایش، به دلیل بارهایی است که از برخورد هر پرتو ایکس به وجود آمده‌اند. اندازه پله‌های ولتاژ با انرژی پرتو ایکس ورودی متناسب است. این بار انباشته شده باید به صورت دوره‌ای برگشت داده شده تا از اشباع پیش تقویت‌کننده جلوگیری شود. در مرحله بعد، وجود یک پیش تقویت‌کننده^{۴۰} باعث افزایش یافتن شدت سیگنال‌های ولتاژ خواهد شد [۱۲].

خنک کننده آشکارساز: آشکارسازهای SDD چند ده درجه زیر صفر کار می‌کنند که با استفاده از دستگاه‌های پلیتر (ترموالکتريک) ملزم به خنک کردن حسگر هستند. حرارت از این دستگاه‌ها با استفاده از یک لوله سرمایشی به باله‌های خنک کننده در بدنه آشکارساز منتقل می‌شود که در آنجا از بین می‌رود. در این آشکارساز نیازی به خنک کردن توسط نیتروژن مایع نیست [۱۰].

● آشکارساز ژرمانیومی فوق خالص (HPGe)

تولید ژرمانیوم با خلوص بالا، ساختن آشکارسازهای بدون سوق لیتیوم را امکان‌پذیر می‌کند. چگونگی ساخت آشکارساز بدین صورت است که برای تهیه بلور آشکارساز از رشد افقی تک بلورهای ژرمانیوم یا از کشش آن‌ها تهیه می‌شود. وقتی بلور رشد داده شد، آن را با ناخالصی‌های پذیرنده‌ای مانند بور (گروه سه) یا آرسنیک (گروه پنج) می‌آیند و تبدیل به ژرمانیوم نوع n و یا نوع p می‌کنند. تا این مرحله، مشابه روش‌های مربوط به آشکارسازهای Ge(Li) است با این تفاوت که دیگر نیازی به فرآیند سوق لیتیوم در آشکارساز HPGe نیست. مرحله بسیار مهم در ساخت، نصب اتصال‌های اهمی است. اتصال سمت n (روی سطح جلویی) با پخش کردن لیتیوم در درون بلور یا با رسوب دادن طلا یا پالادیوم روی آن تامین می‌شود. در یک دستاورد تازه گزارش شده از سوی تولید کنندگان، اتصال فلزی قسمت جلویی حذف شده‌است. اتصال خوب سمت پشت با استفاده از فلزات یا با کشت برن تامین می‌شود. آشکارسازهای HPGe را به صورت تخت یا هم محور می‌سازند. آشکارسازهای هم محور، قلب مرکزی سوق داده نشده آشکارساز Ge(Li) را ندارند. بنابراین، بخش مرکزی را در راستای محور بلور بر می‌دارند و اتصالی در داخل حفره مرکزی ایجاد می‌کنند. کپه‌هایی از ژرمانیوم با خلوص بالا تا شعاع ۶۰ mm تولید شده‌اند و این امر ساختن آشکارسازهای هم محور با حجمی تا $2 \times 10^5 \text{ mm}^3$ را امکان‌پذیر ساخته‌است. آشکارسازهای تختی با ضخامت تا ۲۰ mm و آشکارسازهای هم محوری با حجم تا $5 \times 10^4 \text{ mm}^3$ ساخته شده‌اند. با به کار بردن یک پیش ولت وارون در دو سر قطعه ژرمانیوم و جمع‌آوری بارهای آزاد و هدایت به FET کار جمع‌آوری تقویت و تبدیل بارها صورت می‌پذیرد.

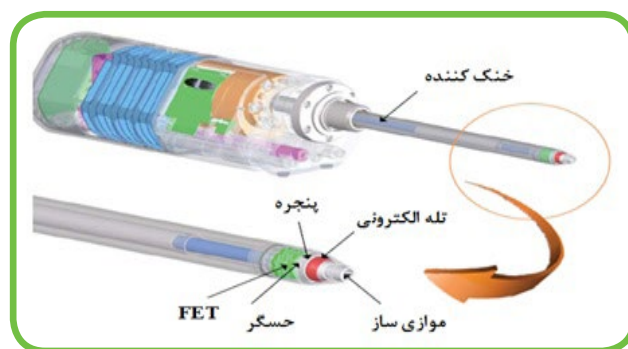
عمق حساس آشکارساز (لایه تهی شده) بستگی به غلظت ناخالصی و ولتاژ به کار برده شده دارد. برتری اصلی آشکارسازهای HPGe این است که می‌توان آن‌ها را در دمای اتاق نگهداری کرد البته تا زمانی که آشکارساز خاموش بوده و کار نمی‌کند؛ زیرا در آن‌ها سوق لیتیوم حضور ندارد. نگهداری در دمای اتاق، به خصوص هنگامی که نیاز به حمل آشکارساز است، کار را آسان می‌کند. از طرف دیگر، به دلیل کوچک بودن گاف انرژی در ژرمانیوم ممکن است در دمای اتاق حامل‌های بار برانگیختگی گرمایی داشته باشند و در نتیجه این برانگیختگی، جریان ناشی بزرگتر و معمولاً نویز الکتریکی بیشتر شود. به محض روشن شدن دستگاه آشکارساز را باید در دمای نیتروژن مایع به کار برد [۶].

منحرف می‌کند. این درجه تنها در آشکارسازهایی با پنجره‌های پلیمری نازک مورد نیاز هستند، پنجره‌های برلیومی ضخیم‌تر، الکترون‌های با انرژی کمتر از ۱ KeV را به طور موثری جذب می‌کند [۱۰].

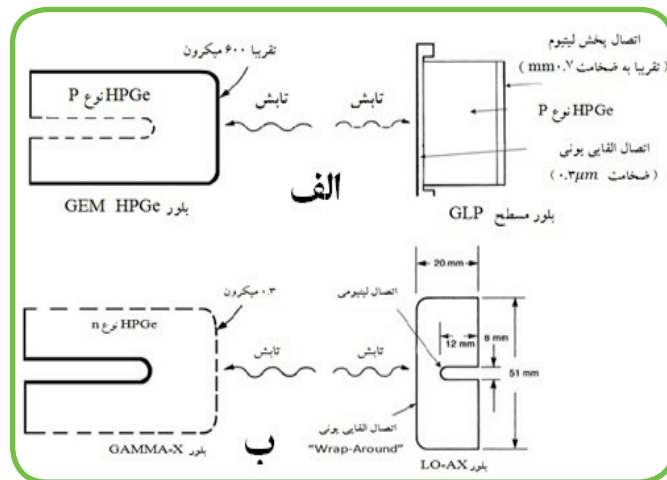
پنجره: یک مانع ایجاد می‌کند تا ضمن عبور پرتوهای ایکس کم انرژی، خلاء آشکارساز حفظ شود. دو نوع ماده در ساخت پنجره به کار می‌رود. ۱- پنجره‌هایی از جنس برلیوم که بسیار مقاوم هستند، اما به شدت پرتوهای ایکس با انرژی کم $E \leq 1 \text{ KeV}$ را جذب می‌کنند، به طوری که تنها عناصر بعد از سدیم $Z \geq 1$ آشکارسازی خواهند شد. ۲- پنجره‌های نازک از جنس پلیمر که بسیار نازک‌تر از پنجره‌های برلیومی بوده و در مقابل پرتوهای اشعه ایکس با انرژی پایین‌تر شفاف هستند. بنابراین، تنها پرتوهای ایکس با انرژی کمتر $E \leq 0.1 \text{ KeV}$ را جذب می‌کنند و تمامی عناصر بعد از برلیوم $Z \geq 4$ آشکارسازی می‌شوند. هر چند پلیمرها مقاومت کمتری نسبت به برلیوم دارند اما با قرار دادن آن‌ها روی یک شبکه، می‌توانند اختلاف فشار بین خلاء آشکارساز و محفظه تخلیه شده میکروسکوپ در فشار هوا را تحمل کنند [۱۰].

حسگر^۴: از سیلیسیم با خلوص بالا به همراه یک سطح بزرگ اتصال در سمت پرتوهای ایکس ورودی ساخته شده‌است. در قسمت مقابل، یک اتصال آند کوچک مرکزی وجود دارد که با تعدادی الکترون رانشی هم مرکز احاطه شده‌است. هنگامی که بایاس به ورقه آشکارساز SDD اعمال و در معرض پرتوهای ایکس قرار می‌گیرد، آشکارساز هر پرتو ایکس دریافت شده را به ابر الکترونی باردار که متناسب با انرژی آن پرتو ایکس مشخصه است تبدیل می‌کند. این الکترون‌ها به باند رانش سیلیسیم نیمه‌رسانا می‌رسند و حفره‌هایی را برجا می‌گذارند که مانند بارهای مثبت درون حسگر عمل می‌کنند. الکترون‌ها سپس توسط میدان گرادیانی که با استفاده از الکترودهای حلقه‌ای اعمال شده، حرکت کرده و در آند جمع‌آوری می‌شوند [۹].

FET: ترانزیستور اثر میدان، به طور مستقیم به حسگر وصل شده‌است که بار آزاد شده توسط اشعه ایکس در بلور را اندازه گرفته و آن را به یک ولتاژ خروجی تبدیل می‌کند. امروزه آشکارسازهای تجاری SDD تقریباً بر اساس دو نوع طراحی متفاوت ساخته می‌شوند: FET یکپارچه و دیگری FET خارجی گسسته. عملکرد SDDهای ارائه شده توسط این دو فن‌آوری در برخی قسمت‌ها متفاوت است، هر یک مزایا و معایب خاص خود را دارد که با توجه به نیاز مشتری ارائه می‌شود [۱۰].



شکل ۸: نمایی کلی از آشکارساز رانش سیلیکون (SDD) [۱۰]



شکل ۹: الف) آشکارساز HPGe با بلور نیمه‌رسانای نوع p) آشکارساز HPGe با بلور نیمه‌رسانای n [۱۳]

پی‌نوشت

۱. کارشناس ارشد فیزیک، دانشگاه بوعلی سینای همدان، گروه مهندسی مواد
۲. کارشناس فیزیک، دانشگاه شیراز، گروه مهندسی مواد
۳. کارشناس ارشد زمین‌شناسی اقتصادی، مرکز تحقیقات فرآوری مواد معدنی ایران
۴. عضو کارگروه تخصصی SEM شبکه آزمایشگاهی
5. Energy Dispersive Spectroscopy (EDS)
6. Wavelength Dispersive Spectroscopy (WDS)
7. Silicon-lithium
8. Silicon Drift Detectors
9. High Purity Germanium
10. Scanning Electron Microscope (SEM)
11. Secondary Electron
12. Backscattered Electron
13. Auger Electron
14. Energy Dispersive X-ray (EDX)
15. Energy Dispersive Analysis of X-ray (EDAX)
16. Wavelength Dispersive X-ray (WDX)
17. Wavelength Dispersive Analysis of X-ray (WDAX)
18. Gaseous Detector
19. Scintillation Detector
20. Semiconductor Detector
21. Ionization Chamber
22. Proportional Counter
23. Geiger-Muller Counter
۲۴. جای خالی الکترون را حفره می‌نامند.
25. Surface Barrier Detector
26. Germanium-lithium Detector
27. Pulse Processing
28. Analog to Digital Converter (ADC)
29. Multi Channel Analyzer (MCA)
30. Be Window
31. Intrinsic
32. Extrinsic
33. Valence Band
34. Acceptor Band
35. Conduction Band
36. Bias Voltage
37. Depletion Region
38. Collimator
39. FET : Field Effect Transistor
40. Preamplifier
41. Electron Trap
42. Permanent Magnet
43. Sensor

مراجع

[۱] معصومه قلبی آهنگرانی، صدیقه صادق حسینی، مجتبی نسب، «سیستم‌های تفکیک انرژی و تفکیک طول موج در میکروسکوپ الکترونی روبشی» ماهنامه فناوری‌نانو، سال هشتم اسفند ۱۳۸۸.

[2] Zinin P., "Microanalysis in Electron Microscopy (EDS and WDS)" HIGP, University of Hawaii, Honolulu, USA

[3] S.J.B.Reed., "Electron Microprobe Analysis and Scanning Electron Microscopy in Geology" University of Cambridge, (2005), 978-0-511-12414-3

[4] <http://www.forensicevidence.net/iama/sem-edxtheory.html>

[5] <http://nau.edu/cefns/labs/electron-microprobe/glg-510-class-notes/detection-of-signals>

[6] Tsoulfanidis N., Landsbrger SH. "Measurement and Detection of Radiation" University of Michigan, USA, (1983), 9780070653979

[7] <http://www.equipcoservices.com/support/tutorials/introduction-to-radiation-monitors/>

[8] <https://www.uam.es/docencia/quimcursos/Scimedia/chem-ed/optics/detector/pd.htm>

[9] A.J.Garratt-Reed., D.C.Bell., "Energy-Dispersive X-Ray Analysis in the Electron Microscopy" Center for Materials Science and Engineering, Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, Massachusetts, USA, (2003), 0-203-48342-1

[10] "Silicon Drift Detector Explained" Oxford Instrument Explained-oxford instrument-the business of science

[11] P.J.Potts., "Handbook of Silicate Rock Analysis" research fellow in earth sciences, theopen university, Milton Keynes, UK, (1987), 978-94-015-3990-6

[12] Bob Hafner., "Energy Dispersive Spectroscopy on the SEM" Characterization Facility, University of Minnesota—Twin Cities

[13] "The Best Choice of High Purity Germanium (HPGe) Detector", ORTEC, USA

