

تحلیل تجربی بازدهی جمع‌آوری بار در آشکارسازهای نیمه‌هادی با روش بار القایی یون‌های با انرژی MeV

زینب‌سادات ایمانی^۱، امیدرضا کاکویی^{۲*}، و امیرعباس صبوری‌دودران^۱

۱. گروه فیزیک، دانشگاه پیام نور، تهران، ایران

۲. پژوهشکده فیزیک و شتابگرها، پژوهشگاه علوم و فنون هسته‌ای، تهران، ایران

پست الکترونیکی: okakuee@aeoi.org.ir

(دریافت مقاله: ۱۴۰۳/۰۹/۲۴؛ دریافت نسخه نهایی: ۱۴۰۴/۰۵/۲۱)

چکیده:

روش تحلیل بار القایی باریکه یونی (IBIC) یکی از راهکارهای مؤثر برای بررسی بازدهی جمع‌آوری بار CCE در مواد نیمه‌هادی است. این روش همچنین کاربرد گسترده‌ای در تحلیل اثرات تابش یونیزان بر عملکرد دستگاه‌های الکترونیکی و ارزیابی پاسخ آشکارسازهای ذرات باردار در شرایط پرتودهی دارد. در این کار پژوهشی، از چشمه آلفای ^{241}Am و آشکارساز ذرات باردار سیلیسیومی کاشت شده با یون در محفظه خلاء استفاده شده است. با تغییر ولتاژ تغذیه آشکارساز و در واقع عمق لایه تهی آن و اندازه‌گیری طیف آلفا، بازدهی جمع‌آوری بار تعیین شد. همچنین شبیه‌سازی‌هایی برای تخمین CCE انجام شد. نتایج شبیه‌سازی‌ها تطابق خوبی با داده‌های تجربی نشان دادند و روند تغییرات CCE نسبت به ولتاژ تغذیه با دقت قابل قبولی بازسازی شد. این پژوهش با ارائه تحلیل تجربی و شبیه‌سازی‌شده عملکرد آشکارسازهای ذرات باردار از طریق روش IBIC، می‌تواند به درک بهتر رفتار این آشکارسازها در شرایط پرتودهی و کاربردهای مختلف علمی و فناوری کمک کند.

واژه‌های کلیدی: بار القایی باریکه یونی (IBIC)، بازدهی جمع‌آوری بار (CCE)، آشکارسازهای نیمه‌هادی، باریکه یونی MeV.

۱. مقدمه

قرار گرفته است [۲]. در تحقیقات اخیر، از روش IBIC برای

مطالعه آشکارسازهای نوآورانه مبتنی بر سیلیکون کاربید (SiC)

که برای شرایط سخت دما و تابش در راکتورهای هم‌جوشی طراحی شده‌اند، استفاده شده است. همچنین، این روش در بررسی آشکارسازهای بهمنی با بهره پایین (LGAD) در برخورد دهنده بزرگ هادرونی (CERN) به کار رفته است [۳]. تأسیسات شتاب‌دهنده مؤسسه راجر باشکوویچ (RBI-AF) با استفاده از راهکارهای IBIC و TRIBIC (بار القایی باریکه یونی با تفکیک زمانی) قادر به تصویربرداری و اندازه‌گیری بازدهی جمع‌آوری بار با دقت زیر میکرومتر است. طی دهه گذشته، این

توسعه قطعات الکترونیکی مقاوم در برابر تابش، آشکارسازها و حسگرها برای کاربردهای پرمخاطره مانند اکتشافات فضایی، فیزیک هسته‌ای، تشخیص پزشکی و فناوری‌های دفاعی بسیار مهم است. در چنین محیط‌هایی، درک برهم‌کنش پرتوهای یونیزان با قطعات الکترونیکی برای افزایش دوام و قابلیت اطمینان آنها ضروری است. یکی از روش‌های مؤثر برای مطالعه اثرات پرتو بر نیمه‌هادی‌ها، بار القایی باریکه یونی^۱ (IBIC) است [۱]. روش IBIC (بار القایی باریکه یونی) از دهه ۱۹۹۰ مورد استفاده

۱. Ion Beam Induced Charge

مرکز برای آزمایش ساختارهای نوین مبتنی بر سیلیسیوم، الماس و سایر فناوری‌ها - که به ویژه در فیزیک انرژی بالا کاربرد دارند - مورد استفاده قرار گرفته است [۴ و ۵]. به طور خاص، راموس و همکاران، IBIC را ابزاری مؤثر برای بررسی تأثیر پلاریزاسیون بر عملکرد آشکارساز الماس معرفی کرده‌اند [۶]. همچنین، جاکشیک و همکاران با تغییر انرژی یون یا زاویه تابش، از روش IBIC برای تحلیل نمایه عمقی پاسخ آشکارسازها استفاده کرده‌اند [۷].

با روش IBIC امکان تعیین دقیق ویژگی‌های انتقال بار مواد نیمه‌هادی در سطح میکروسکوپی ممکن می‌شود. با به‌کارگیری ذرات آلفا به عنوان چشمه یون‌ساز، امکان شبیه‌سازی تابش‌های پرانرژی محیط‌های هسته‌ای فراهم می‌شود. یکی از ویژگی‌های کلیدی روش IBIC، برخورداری از مبانی نظری توسعه یافته است. این مبانی امکان استخراج اطلاعات دقیق الکترونیکی برای ارزیابی عملکرد مواد و دستگاه‌های الکترونیکی در محیط‌های تابشی را فراهم می‌کند [۲، ۸، ۹]. ده‌ها آزمایشگاه در سراسر جهان که به ریزباریکه‌های هسته‌ای مجهز هستند، از روش IBIC برای تعیین مشخصات دستگاه‌های الکترونیکی مختلف از جمله دیودهای شانتکی، اتصالات pn، LED، ترانزیستورهای MOS، حسگرها، دزیتمرها و آشکارسازهای تابش استفاده می‌کنند [۳]. روش IBIC با فراهم کردن امکان تحلیل دقیق رفتار انتقال بار و نقص‌های موجود، به ارزیابی عملکرد کلی دستگاه‌ها کمک می‌کند. این روش همچنین ابزاری کارآمد برای توسعه و بهبود فناوری‌های مقاوم در برابر تابش به شمار می‌آید.

از نظر مفهومی، روش IBIC را می‌توان تا حدی به عنوان آزمایش وارون طیف سنجی در نظر گرفت. در عمل، در این روش معمولاً از یون‌های سبک با انرژی MeV و جریان 10^{-10} - 10^{-11} A (تقریباً ۱ تا ۱۰ هزار یون بر ثانیه) استفاده می‌شود. برای تحلیل از باریکه‌ای با جریان پایین استفاده می‌شود، زیرا هر یون ورودی به تنهایی جفت‌های الکترون-حفره کافی در ماده ایجاد می‌کند. این جفت‌ها تپ باری تولید می‌کنند که از سطح نوفه بیشتر بوده و توسط دستگاه قابل اندازه‌گیری است. هر یون سبک پرانرژی در

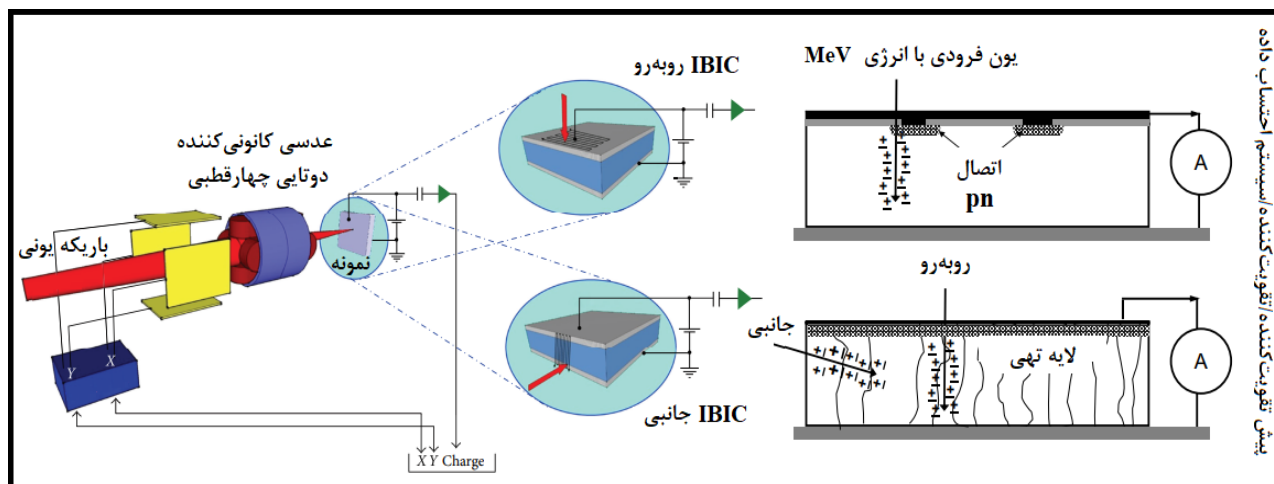
حد MeV می‌تواند در عمق ده‌ها میکرومتر جفت‌های الکترون-حفره تولید کند. این موضوع وضوح مکانی زیادی در لایه‌های ضخیم ایجاد می‌کند، زیرا پرتوی یونی در عمق نیز متمرکز باقی می‌ماند [۲]. در نتیجه، IBIC از مزایایی همچون عمق تحلیلی زیاد و پراکندگی کمتر در لایه‌های سطحی برخوردار است. همچنین، این روش امکان تفکیک فضایی دقیق‌تری در لایه‌های زیرین فراهم می‌کند و می‌توان آن را نسبت به اطلاعات ریخت‌نگاری حساس یا غیرحساس طراحی کرد [۱۰]. این روش برای بررسی انواع مواد همگن و چندبلوری مناسب است و در تحلیل قطعات نیمه‌هادی شامل فصل مشترک‌های فلز-نیمه‌هادی، پیوندهای p-n، ساختارهای ناهمگون (heterojunction) و اتصالات فلز-اکسید به کار می‌رود [۱۰]. روش IBIC می‌تواند به دو صورت جانبی^۱ و روبه‌رو^۲ طراحی شود (شکل ۱) که در مراجع [۱۰-۱۲] شرح داده شده است.

با توجه به پیشرفت صنایع نیمه‌هادی و افزایش نیاز به استفاده از فناوری هسته‌ای در حوزه‌های پزشکی و تولید انرژی، آشکارسازهایی با سطح کوچک به صنعت معرفی شده‌اند. در برخی مطالعات مانند [۱۳]، از چشمه آلفا برای تحلیل نواحی با میدان بالا در نیمه‌هادی‌های قدرت استفاده شده، اما هدف آن‌ها ارزیابی مستقیم عملکرد آشکارساز نبوده است. همچنین در حوزه CCE، کاربردهای چشمه آلفا بیشتر محدود به سامانه‌های نوری مانند IPED بوده‌اند [۱۴]، که از نظر نوع آشکارساز و نحوه تحلیل با این پژوهش متفاوت‌اند.

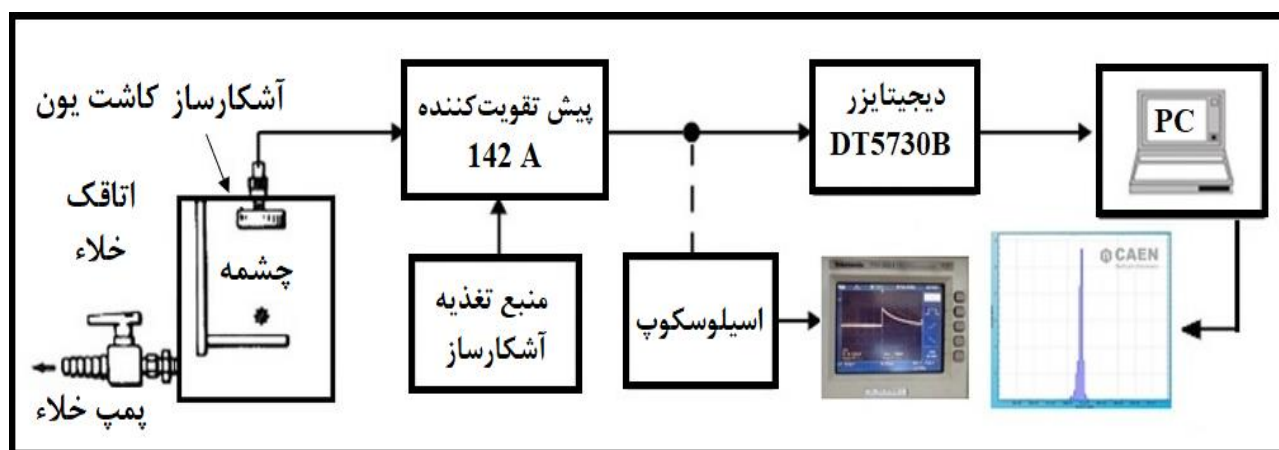
در این پژوهش، از یک آشکارساز سیلیکونی ذره‌باردار تجاری نوع کاشت-یون استفاده شده و بازدهی جمع‌آوری بار (CCE) به صورت تجربی و با تحلیل همزمان طیف انرژی و پاسخ به ولتاژ مورد بررسی قرار گرفته است. این نوع بررسی نظام‌مند با استفاده از چشمه آلفا و بدون نیاز به باریکه یونی تاکنون گزارش نشده است. مزیت این رویکرد، کاهش پیچیدگی تجربی و هزینه، و فراهم شدن امکان ارزیابی عملی آشکارساز در شرایط ساده‌تر و در دسترس‌تر نسبت به روش‌های مبتنی بر شتاب‌دهنده است. در همین راستا، در این پژوهش پیکربندی ساده و

۱. Lateral

۲. Frontal



شکل ۱. طرح کلی روش IBIC با دو هندسه روبه‌رو و جانبی برای قطعات با اتصال pn و تراشه‌های نیمه‌هادی مسطح [۲، ۱۰].



شکل ۲. طرح‌واره‌ای از زنجیره الکترونیکی مورد نیاز برای تحلیل به روش IBIC.

تابش نیز استفاده کرد [۳]. در سال‌های اخیر، تمرکز بر استفاده از شتاب‌دهنده‌های یونی و الگوسازی نقص‌های تابشی در نیمه‌هادی‌ها و عایق‌ها، موجب گسترش تلاش‌ها برای تدوین یک روش استاندارد شده است. هدف این روش، مطالعه کمی واکنش‌های مختلف قطعات نیمه‌هادی در برابر تابش است [۱۵]. بر این اساس، در این کار پژوهشی با ارائه ابزارآرایی قابل دسترس در آزمایشگاه‌های فیزیک هسته‌ای، راه اندازی روش تحلیل بار القایی باریکه یونی به صورت تجربی ارائه شده است. داده حاصل از آزمایش‌ها نیز با استفاده از نرم افزارهای مناسب تحلیل شده است.

۲. مواد و روش‌ها

این پژوهش با استفاده از تجهیزات آزمایشگاه واندوگراف پژوهشگاه علوم و فنون هسته‌ای انجام شده است.

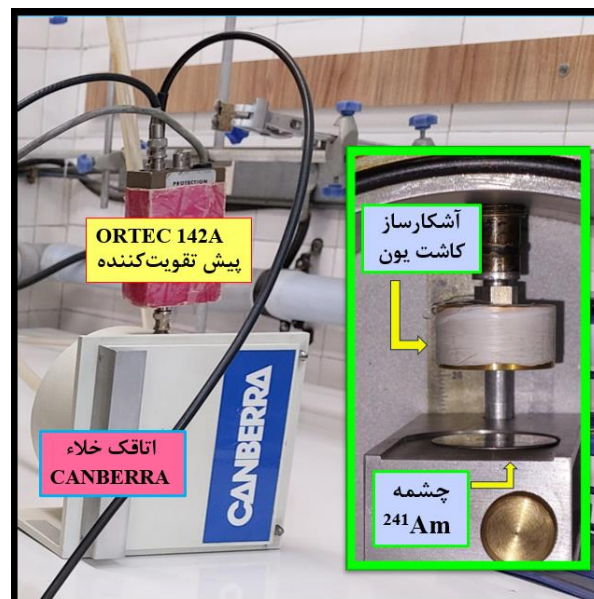
مقرون به صرفه‌ای با استفاده از چشمه آلفا برای بررسی عملکرد آشکارسازهای کوچک ارائه شده است. اگرچه فناوری‌هایی جدید مانند آشکارسازهای LGAD یا آشکارسازهای سه بعدی در برخی پروژه‌ها مانند HL-LHC در حال توسعه هستند، اما همچنان مطالعات پایه‌ای روی آشکارسازهای ساده‌تر ضروری است. این ساختارها به دلیل دسترسی آسان‌تر، هزینه کمتر و فهم عمیق‌تر سازوکارهای جمع‌آوری بار، می‌توانند گام ابتدایی مهمی برای توسعه و اعتبارسنجی فناوری‌های پیشرفته‌تر باشند. انجام آزمایش‌های دقیق روی این ساختارها هنوز جایگاه ویژه‌ای در فرآیند توسعه فناوری دارد.

علاوه بر توانایی روش IBIC در تحلیل و توصیف دستگاه‌های الکترونیکی، از این روش می‌توان برای بررسی تابش‌پذیری قطعات یا تحلیل نقص‌های ناشی از دریافت دوز مشخصی از

برای تحلیل داده‌های حاصل از آشکارسازهای هسته‌ای از نرم افزار CAEN MC۲ Analyzer با امکان پشتیبانی از سامانه‌های چندکاناله استفاده شد. این نرم افزار با رابط کاربری آسان داده‌های دریافتی از آشکارسازهای تابش مانند گاما و ذرات باردار را به صورت دقیق تحلیل کرده و نمایش می‌دهد و انتخابی مناسب برای آزمایش‌ها و پروژه‌های فیزیک هسته‌ای است. از کاربردهای اصلی آن می‌توان به طیف‌سنجی، تحلیل قله، و اندازه‌گیری انرژی تابش‌ها اشاره کرد [۱۸].

نمونه مورد بررسی در این مطالعه یک آشکارساز ذرات باردار سیلیسیومی کاشت شده با یون با شماره (BU-۰۱۴۰-۱۰۰-۳۰۰) ULTRA از کمپانی ORTEC است، ضخامت آن $300\text{ }\mu\text{m}$ ، سطح فعال آن 100 mm^2 با پارامتر آلفا و بتای 14 keV و 8 است. این آشکارساز دارای بستر سیلیسیوم نوع n است که اتم‌های بورون تا ضخامت 500 A° در آن کاشت شده‌اند. علاوه‌براین، از چشمه رادیواکتیو ^{241}Am با اکتیویته $5/55\text{ kBq}$ استفاده شده است که در محفظه تحت خلاء اولیه، مورد استفاده قرار گرفته است (شکل ۳). برای کالیبراسیون انرژی آشکارساز، از چشمه سه تایی (^{239}Pu ، ^{241}Am ، ^{244}Cm) استفاده شده است. همچنین کار شبیه‌سازی ساختار آشکارساز با استفاده از نرم افزار Silvaco [۱۹] انجام شد. این نرم افزار یکی از نرم افزارهای حوزه شبیه‌سازی نیمه‌هادی است که توانایی شبیه‌سازی فرایند ساخت آنها (اکسیداسیون، نفوذ، کاشت یونی، زدایش، لایه نشانی و لیتوگرافی) و هم چنین شبیه‌سازی ادوات نیمه‌هادی شامل ترانزیستور اثر میدانی (ماسفت)، سلول خورشیدی، ادوات اپتوالکترونیک، نمایشگرهای ارگانیک، کوانتومی، و لیزرهای نیمه‌هادی را دارا است. لازم به ذکر است که این نرم افزار شامل چندین شبیه‌ساز است که مهم ترین آنها عبارتند از ATHENA ، ATLAS و Victory cell که هرکدام از این شبیه‌سازها برای اهداف خاصی طراحی شده‌اند. در طراحی آشکارساز مورد استفاده در این پژوهش از شبیه‌ساز ATLAS استفاده شده است [۲۰].

نمایه‌های مربوط به تهی جاها و یونیزاسیون حاصل از برخورد ذرات آلفا با آشکارساز ذره باردار سیلیسیومی، با استفاده از نرم افزار SRIM بدست آمده است [۲۱].



شکل ۳. تصویری از محفظه برهم‌کنش تحت خلاء، قرارگیری آشکارساز ذره باردار و چشمه آلفا.

ابزارآرایی این روش شامل مجموعه‌ای از تجهیزات الکترونیک هسته‌ای، شامل منبع تغذیه مناسب برای آشکارساز ذره باردار، پیش تقویت کننده (ORTEC ۱۴۲A)، اتاقک تحت خلاء طیف‌سنجی آلفا (CANBERRA)، آشکارساز ذره باردار، دیجیتایزر CAEN DT۵۷۳۰B برای جمع‌آوری داده‌ها و یک کامپیوتر برای ثبت داده‌ها است (شکل ۲).

برای ابزارآرایی این آزمایش از پیش تقویت کننده مدل ORTEC ۱۴۲A، پیش تقویت کننده‌ای حساس به بار با نوفه کم و سرعت زیاد که دارای ظرفیت خازنی تا 100 pF برای عملکرد بهینه برای آشکارسازهای ذرات باردار یا یون سنگین است، استفاده شده است. به همین علت یک انتخاب مناسب برای محدوده وسیعی از آشکارسازهای متنوع ذرات باردار برای کاربردهای طیف سنجی با قدرت تفکیک انرژی زیاد است. دیجیتایزرهای سری CAEN x۷۳۰ دستگاه‌های قدرتمند جمع‌آوری داده برای بسیاری از کاربردهای فیزیک هسته‌ای هستند [۱۶]. دیجیتایزر CAEN DT۵۷۳۰B قادر به ثبت شکل موج همراه با اجرای الگوریتم‌های پیشرفته برای پردازش تپ دیجیتال آنالین است که با استفاده از آن می‌توان پارامترهایی همچون بار جمع شده، شکل تپ با وضوح زمانی مناسب و تحلیل ارتفاع تپ را انجام داد [۱۷].

جمع‌آوری آشکارساز مورد نظر با آشکارساز سد سطحی بدست آورد [۱۱]. همچنین می‌توان CCE را از مقایسه بار القایی در آشکارساز بعد از تابش با حالت آشکارساز تابش ندیده اندازه‌گیری کرد [۲۷ و ۲۸]. در این پژوهش بازدهی جمع‌آوری بار حاصل از داده‌های تجربی از طریق رابطه زیر محاسبه شد.

$$CCE(\%) = \frac{N(V)}{N_f} \times 100 \quad (1)$$

در این رابطه $N(V)$ تعداد حامل‌های جمع‌آوری در هر ولتاژ تغذیه آشکارساز و N_f تعداد حامل‌های جمع‌آوری شده در ولتاژ نهایی است.

ابزار شبیه‌سازی IST [۲۴] نرم‌افزاری با رابط کاربری گرافیکی برای شبیه‌سازی آزمایش IBIC یک بعدی است. اساس کار این نرم‌افزار حل معادله پیوستگی برای حامل‌های بار اضافی با روش مونت کارلو است. این نرم‌افزار با استفاده از الگوهای الکترواستاتیک خارجی و نمایه‌های یونیزاسیون و چگالی تهی‌جاها می‌تواند به‌صورت بلادرنگ تپ‌های بازدهی جمع‌آوری بار (CCE) را به‌صورت کلی و زمان‌بندی‌شده تولید کند [۲۹].

۳. نتایج و بحث

در این پژوهش بارالقایی آشکارساز با آلفای حاصل از چشمه رادیواکتیو ^{241}Am در ولتاژهای مختلف اندازه‌گیری شده است. علاوه بر این، با معرفی ساختار آشکارساز در نرم‌افزار سیلواکو، ساختار میدان بدست آمده است. در نهایت، با معرفی داده‌های حامل بار و نیز اطلاعات بالا، بازدهی بار تجمعی در آشکارساز به‌دست آمده است و این نتایج تحلیل شده است.

۳.۱. اندازه‌گیری و تحلیل داده بارالقایی

با توجه به ابزارآرایی آزمایش معرفی شده در شکل ۳، بار القایی حاصل از چشمه آلفای ^{241}Am ، برای ولتاژ تغذیه آشکارسازی از $V = 60$ تا صفر به صورت پلکانی اندازه‌گیری شده است. حداکثر ولتاژ معکوس مجاز برای این آشکارساز $V = 100$ است، با این حال با توجه به برد محدود ذرات آلفا ($28 \mu\text{m}$) برای آلفا

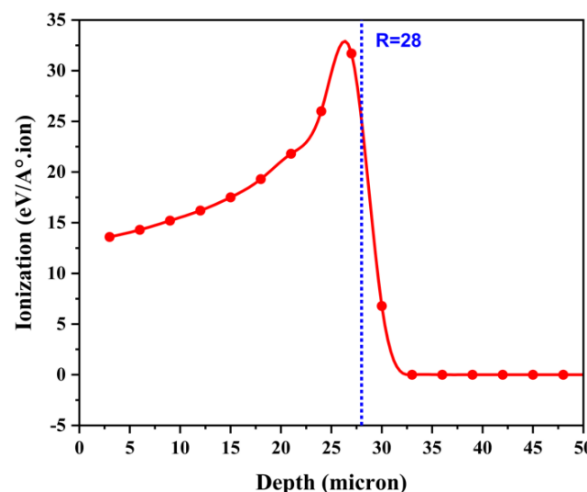
بدست آوردن بار یا جریان القایی بر اساس قوانین اساسی الکترواستاتیک و به ویژه قضیه متقابل گرین حاصل می‌شود که به وسیله آن شاکلی و رامو به‌طور مستقل، یک رابطه یکپارچه بسیار مفید برای جریان‌های القایی نهایی توسط حرکت بار در هندسه‌های دلخواه بدست آورده‌اند [۲]. با توجه به تعداد بالای جفت الکترون حفره‌های ایجاد شده، می‌توان از برخورد هر یون، یک تپ بار قابل اندازه‌گیری استخراج و توسط یک مدار خارجی پردازش کرد، که بدین ترتیب طیف ارتفاع تپ تشکیل می‌شود. در صورت تابش تک انرژی، شمارش‌ها در حدود یک ارتفاع تپ متوسط توزیع می‌شود که قله ایجاد می‌کند. موقعیت این قله متناسب با بار اندازه‌گیری شده در الکترو است. نسبت این بار ایجاد شده و بار حاصل از یونیزاسیون، بازدهی جمع‌آوری بار (CCE) است که مهمترین پارامتر مورد استفاده برای توصیف دستگاه‌های الکترونیکی، به ویژه آشکارسازهای نیمه‌هادی است [۱۰]. روابط نهایی برای بدست آوردن CCE با استفاده از نظریه شاکلی-رامو-گان انجام شده است [۲۴-۲۲ و ۱۱]. این روابط مبنای محاسبات در نرم‌افزار IST¹ برای دستیابی داده‌های شبیه‌سازی است.

بر طبق نظریه شاکلی-رامو-گان حرکت حامل‌های بار تحت تاثیر میدان الکتریکی موجود در ناحیه تهی موجب القای بار در الکتروادهای آشکارساز می‌شوند و جریان القایی ایجاد می‌کنند [۲۳] [۲۵]. حرکت حامل‌های بار در ناحیه خنثی و در غیاب میدان الکتریکی موجب جریان القایی نمی‌شود؛ در حالی که حامل‌هایی که به دلیل ناهمگنی در غلظت حامل‌ها در مرز بین ناحیه خنثی و تهی، از ناحیه خنثی به ناحیه تهی تزریق می‌شوند، جریانی را در الکتروده حسگر القا می‌کنند که جریان انتشار نامیده می‌شود [۲]. شواهد تجربی مستقیم از سهم انتشار در سیگنال IBIC توسط ویتونه و همکاران در مرجع [۲۶] بیان شده است. همچنین بار جمع‌آوری شده، بار حاصل از تمام حامل‌های الکترون و حفره در محل الکتروده است که به طور کامل جمع‌آوری شده‌اند. این بار معمولاً در شرایط آرمانی در ولتاژهای تغذیه بزرگ که موجب ایجاد ناحیه تهی کامل می‌شود برابر با بار القایی است [۲۳ و ۲۵]. برای محاسبه CCE تجربی از روش‌های مختلفی استفاده می‌شود. می‌توان آن را از مقایسه بار

اختلاف پتانسیلی که در پیوندگاه یک قطعه نیمه هادی، مانند دیود، در شرایط تعادل گرمایی و بدون ولتاژ تغذیه خارجی، به دلیل میدان الکتریکی ناشی از تفاوت در غلظت آلایش بین نوع p و n حاصل می شود، پتانسیل داخلی (V_{bi}) نامیده می شود [۳۰]. در محاسبات این کار پژوهشی ولتاژ داخلی $V = 0.6$ در نظر گرفته شده است. ولتاژ داخلی در محاسبات برای ولتاژهای تغذیه زیاد تاثیر چندانی در طیف سنجی نخواهد داشت اما در ولتاژهای تغذیه کم آشکارسازی، برای مثال $V = 0.5$ ولت، اثر ولتاژ داخلی قابل توجه است. همان طور که از رابطه ۳ مشخص است در واقع پتانسیل داخلی با ولتاژ تغذیه معکوس جمع می شود و به همین علت است که در ولتاژهای تغذیه خیلی کم هم سیگنال خروجی قابل اندازه گیری است.

برای تعیین بازدهی جمع آوری بار تجربی، مقدار سطح زیر منحنی قله آلفای ناشی از چشمه ^{241}Am با انرژی 5485 keV در ولتاژ تغذیه مختلف، بر مقدار سطح زیر منحنی این قله در ولتاژ تغذیه $V = 60$ تقسیم شده است. شکل ۷، بازدهی جمع آوری بار حاصل از داده های تجربی را نشان می دهد. از مقایسه این شکل با شکل های مربوط به طیف ^{241}Am در می یابیم که در ولتاژهای زیاد که ضخامت ناحیه تهی زیاد است و این ضخامت بیشتر از برد ذره آلفا در Si (شکل ۴) است، بارهای تولید شده ناشی از انباشت انرژی، مقداری ثابت است و با کاهش ولتاژ و قرارگیری در محدوده برد ذره آلفا، این مقدار کاهش می یابد. علاوه بر این، هر چه ولتاژ اعمال شده به آشکارساز کمتر باشد، CCE سریعتر کاهش می یابد. زیرا با کاهش ولتاژ، قدرت میدان الکتریکی در ماده فعال آشکارسازی کاهش می یابد، که به نوبه خود سبب کاهش طول انتشار حامل های بار می شود و به این ترتیب احتمال باز ترکیب حامل های بار افزایش می یابد [۳].

شایان ذکر است که منابع نوفه در این اندازه گیری شامل نوفه الکترونیکی حاصل از پیش تقویت کننده، زمین، سامانه اکتساب داده و نیز اثرات حاصل از دمای محیط است. این عوامل به همراه کیفیت آشکارساز، به طور مستقیم بر قدرت تفکیک آشکارساز تاثیر دارند. قدرت تفکیک انرژی ذاتی آشکارساز نظیر در دمای 20°C و برای آلفای با انرژی 5485 keV چشمه ^{241}Am برابر 14 keV است. علاوه بر این، عوامل دیگری مانند آلودگی سطحی چشمه



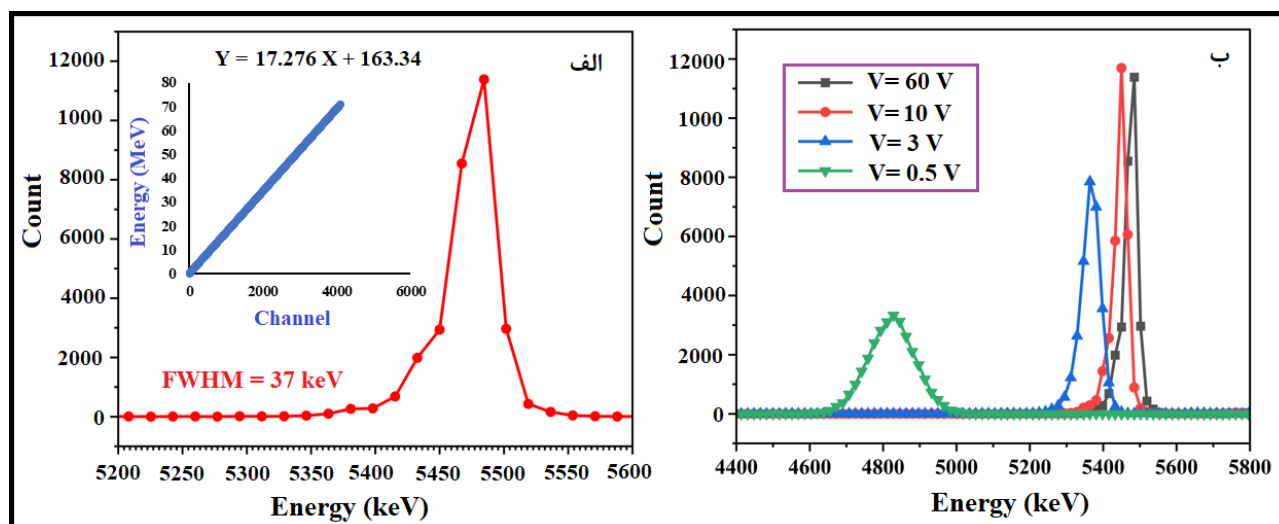
شکل ۴. نمایه یونیزاسیون ذره آلفا با انرژی 5485 keV در سیلیسیوم که از نرم افزار SRIM بدست آمده است.

با انرژی 5485 keV که در شکل ۴ نشان داده شده است، اندازه گیری تا ولتاژ $V = 60$ انجام شده است.

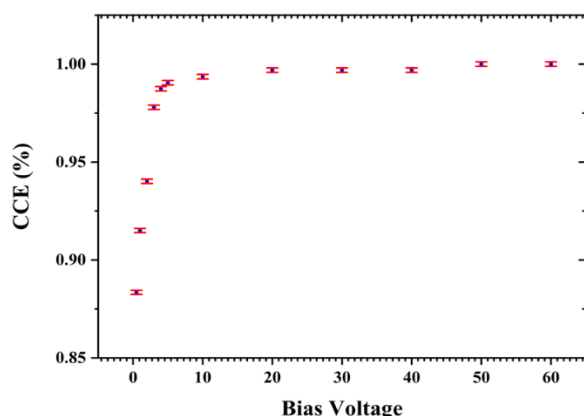
برای تعیین برد و نمایه یونش ذرات آلفا در سیلیسیوم، از نرم افزار SRIM (۲۰۱۳-TRIM) [۲۱] استفاده شد که نمودار آن در شکل ۴ نشان داده شده است.

شبیه سازی، با پرتو تک انرژی آلفا با انرژی اولیه 5485 keV و تابش عمودی بر هدف سیلیسیوم خالص (چگالی 2.32 g/cm^3)، ضخامت $300 \text{ }\mu\text{m}$ انجام شد. تعداد 9999 یون در حالت محاسبه دقیق رهگیری شد. خروجی شامل برد پیش بینی شده، نمایه توزیع انرژی و توزیع یونش بود.

طیف آلفای ناشی از چشمه ^{241}Am با انرژی 5485 keV و ولتاژ تغذیه $V = 60$ در شکل ۵-الف نشان داده شده است. همان طور که مشخص شده، FWHM مربوط به این طیف در ولتاژ $V = 60$ معادل 37 keV است. به همین دلیل، قله آلفای فرعی با انرژی کم تر از قله اصلی قابل مشاهده نیست. در شکل ۵-ب، چند طیف بدست آمده حاصل از ولتاژهای تغذیه مختلف آشکارسازی با یکدیگر مقایسه شده اند. همان طور که مشاهده می شود با کاهش ولتاژ تغذیه، قله 5485 keV به سمت کانال های کم انرژی جابه جا شده است و قله ها پهن تر و قدرت تفکیک انرژی آنها تضعیف شده است، چیزی که در نمودار مربوط به FWHM نسبت به ولتاژ تغذیه (شکل ۶) نیز به وضوح قابل مشاهده است. مقدار عدم قطعیت FWHM ناشی از برازش قله گاوسی و در حدود 0.4% است.



شکل ۵. طیف آلفای ^{241}Am مربوط به ولتاژ ۶۰ V (الف) و مقایسه طیف آلفا در ولتاژهای ۰/۵ V، ۳ V، ۱۰ V و ۶۰ V (ب).



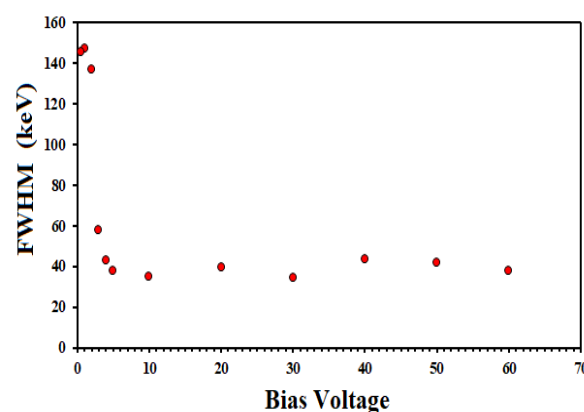
شکل ۷. بازدهی جمع‌آوری بار تجربی در آشکارساز ذرات باردار سیلیسیوم کاشته شده با یون نسبت به ولتاژهای تغذیه مختلف.

ولتاژهای بالا به سمت اشباع پیش می‌روند و داده جدیدی ایجاد نمی‌کند، کار داده‌برداری تا ولتاژ ۶۰ V انجام شد.

اما در شبیه‌سازی‌ها برای بررسی رفتار میدان در عمق نمونه و هماهنگی بین IST و Silvaco، ولتاژ تا مقدار مجاز اسمی ولتاژ تغذیه آشکارساز (۱۰۰ V) در نظر گرفته شد.

میدان‌های بدست آمده، برای شبیه‌سازی مقدار CCE مورد استفاده قرار گرفت. نمایه یونش هم که نشان دهنده عمق انباشت انرژی ذره آلفا است به توزیع میدان در شکل ۸ اضافه شده است.

از آنجایی که آشکارساز مورد مطالعه از نوع ناحیه تهی جزئی^۱ است با وجود اعمال ولتاژ ۱۰۰ V به طور کامل تهی نشده و بخشی از نمونه به صورت غیرتهی باقی مانده است، از این جهت

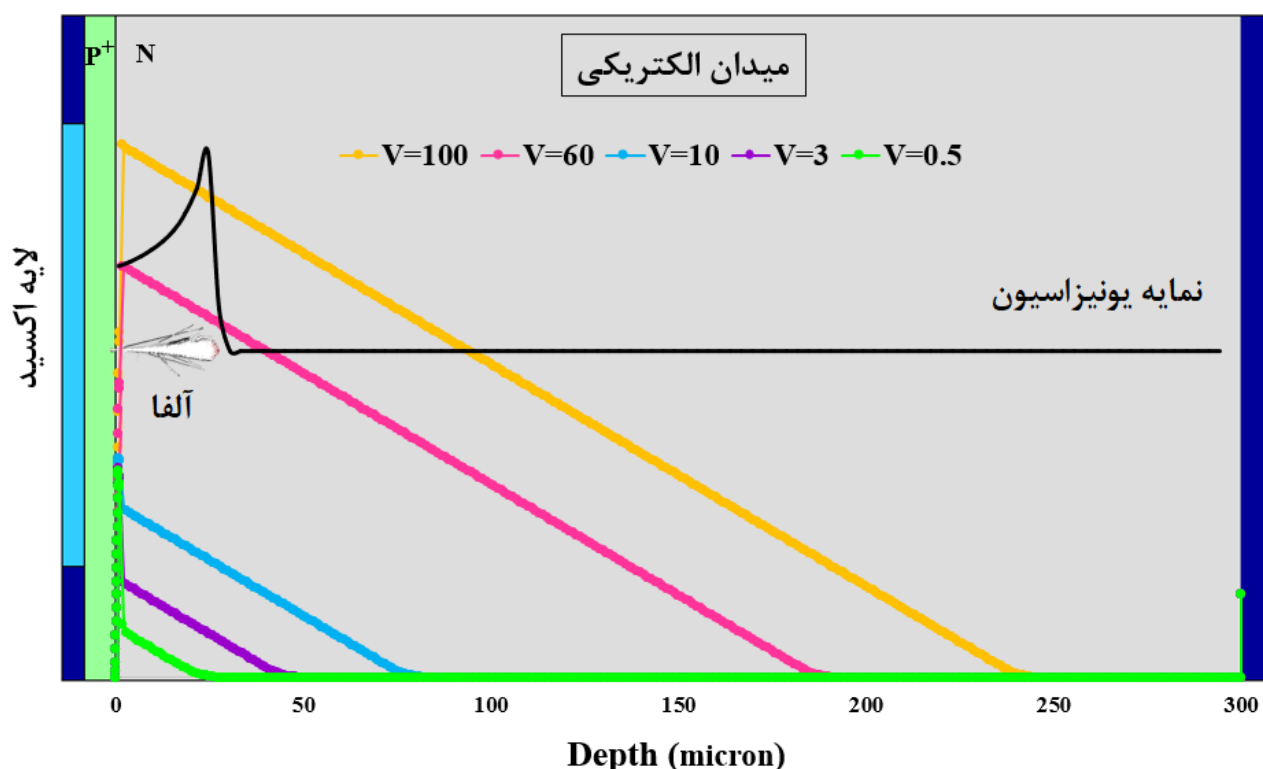


شکل ۶. نمودار FWHM نسبت به ولتاژ تغذیه. عدم قطعیت ولتاژ تغذیه ۰/۵ V و برای FWHM در حدود ۰/۴٪ است.

سه‌تایی آلفا، کالیراسیون مورد استفاده، آلودگی سطحی آشکارساز، لایه مرده آشکارسازی بر موقعیت مکانی قله انرژی تاثیر خواهند داشت. این تاثیر از مرتبه ± 10 keV است.

۳.۲. شبیه‌سازی میدان الکتریکی

برای شبیه‌سازی میدان الکتریکی از نرم‌افزار Silvaco استفاده شد. برای این منظور، ابتدا ساختار مناسبی برای آشکارساز مورد مطالعه طراحی شد. سپس نمایه میدان الکتریکی در طول ضخامت ناحیه تهی، برای ولتاژهای مختلف بدست آمد. این میدان در طراحی طرح‌واره‌ای از ساختار نمونه در شکل ۸ نمایش داده شده است. با توجه به این‌که داده‌های تجربی در



شکل ۸. طرح‌واره‌ای از آشکارساز که نمایه میدان‌های الکتریکی نسبت به عمق برای ولتاژهای مختلف از نرم افزار Silvaco، نمایه یونیزاسیون و پراکندگی ذره آلفا در ناحیه برد ذره با استفاده از نرم افزار SRIM در آن مشاهده می‌شود.

[۳۲] و V_{bias} ولتاژ تغذیه است [۳۳ و ۳۴]. برای مطالعه بهتر بازدهی جمع‌آوری بار و اطمینان از اندازه‌گیری‌های تجربی، شبیه‌سازی CCE انجام شد. به این صورت که میدان الکتریکی از نرم افزار Silvaco و نمایه‌های یونیزاسیون و تهی‌جاها از نرم افزار SRIM بدست آمد و به عنوان ورودی‌های نرم افزار IST مورد استفاده قرار گرفت تا مقادیر CCE در ولتاژهای مختلف شبیه‌سازی شود. پارامتر پتانسیل وزنی نیز که از ورودی‌های این نرم افزار است از رابطه‌ای که در مرجع [۲۴] آمده محاسبه شد و در ورودی‌های نرم افزار IST قرار داده شده است. در شکل ۹، نمونه‌ای از خروجی نرم افزار IST برای ولتاژ $V = 100$ نمایش داده شده است. مقدار CCE_{mean} در این شکل از ولتاژهای مختلف بدست می‌آید. پارامترهای شبیه‌سازی در نرم افزارهای Silvaco/IST در جدول ۱ ارائه شده است. شایان ذکر است که نتایج IST به‌شدت به طول عمر حامل‌ها وابسته است؛ این وابستگی به‌ویژه در جمع‌آوری بار در ولتاژهای پایین بیشتر نمایان می‌شود. در طول عمرهای کوتاه، افت قابل توجهی در CCE مشاهده می‌شود

شکل میدان ثابت که برای عموم میدان‌های الکتریکی در حالت تهی کامل دیده می‌شود در اینجا به شکل میدان مورب بدست آمده است. میدان الکتریکی در عمق با روند ثابتی کاهش می‌یابد و همان‌طور که انتظار می‌رود با کاهش ولتاژ، ضخامت ناحیه تهی و میدانی که عامل سوق حامل‌های بار است نیز کاهش می‌یابد.

۳.۳. شبیه‌سازی بازدهی جمع‌آوری بار

جهت اطلاع از روند تغییرات ضخامت ناحیه تهی نسبت به ولتاژ و همچنین برآورد نواحی مربوط به جمع‌آوری بار که با ولتاژ تغذیه مرتبط است، محاسبه ضخامت ناحیه تهی ضروری است. برای تعیین ضخامت ناحیه تهی (W) نسبت به ولتاژ تغذیه از رابطه (۲) استفاده شد که نمودار آن در شکل ۱۰ نشان داده شده است.

$$W (cm) = \frac{1}{5 \times 10^{-4}} (\rho U)^{1/2} \quad (2)$$

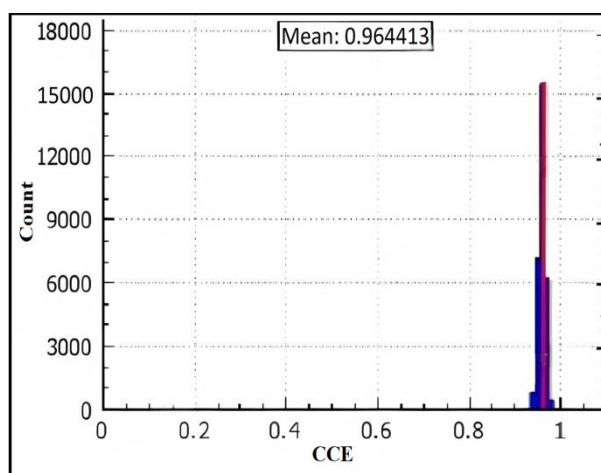
$$U = V_{bi} - V_{bias} \quad (3)$$

در این رابطه، ρ مقاومت ذاتی ($2 \text{ k}\Omega\text{-cm}$) [۳۱] برای سیلیسیوم نوع n، V_{bi} پتانسیل داخلی (0.6 V) برای آشکارساز سیلیسیومی

تجربی و شبیه‌سازی در آن محدوده کاهش می‌یابد. آشکارسازهای ذرات باردار با توجه به تعداد ذرات پرانرژی برخوردی به آن و در پی آن با توجه به میزان آسیب در طول زمان با افت کیفیت و کارایی مواجه می‌شوند. در واقع اگر برای این آشکارساز خاص بیشینه ولتاژ مجاز V_{100} باشد بعد از مدتی با توجه به شدت و مقدار تابش‌های برخوردی به آشکارساز، ولتاژ نهایی مجاز آن کاهش می‌یابد و به تبع آن باعث کاهش ناحیه تهی آشکارساز نیز می‌شود. با این حال، با توجه به بازدهی جمع‌آوری بار تجربی حاصل از این کار پژوهشی، آشکارساز با ولتاژ تغذیه کمتر از مقدار اسمی (اگرچه به دلیل آسیب) در صورت دسترسی به ضخامت ناحیه تهی بیش از برد ذرات یونی، همچنان برای طیف‌سنجی قابل استفاده است. ذرات پروتون با انرژی 5 MeV بردی بیش از $200 \mu\text{m}$ در سیلیسیوم دارند. ضخامت ناحیه تهی ناشی از ولتاژ تغذیه کوچک (برای مثال V_{20} ، معادل با ضخامت ناحیه تهی $100 \mu\text{m}$) برای جمع‌آوری حداکثر بار برجای مانده ناشی از پروتون 5 MeV مناسب نیست. استفاده از روش IBIC با ابزارآرایی در دسترس، ابزاری توانمند برای توسعه فناوری آشکارسازهای پیشرفته ذرات به‌خصوص جهت مشارکت در پروژه‌های همکاری علمی با آزمایشگاه‌های پیشرو را فراهم می‌کند.

۴. نتیجه‌گیری

در این تحقیق با رویکرد بررسی آشکارسازهای با سطح کوچک و استفاده از چشمه به جای باریکه یونی از روش IBIC استفاده شد. طیف‌های آلفای ^{241}Am بررسی و بازدهی جمع‌آوری بار (CCE) در آشکارساز سیلیسیومی اندازه‌گیری شد. در این تحقیق با بررسی داده‌ها اثر ولتاژ بر ضخامت ناحیه تهی و تاثیر محدوده برد ذره پرتابه بر جمع‌آوری بار مشاهده شد. شبیه‌سازی‌های انجام شده با استفاده از نرم‌افزار Silvaco و IST منجر به طراحی ساختار نمونه و تهیه نمودار CCE شد که نتایج دقیقی را برای پیش‌بینی رفتار جمع‌آوری بار در آشکارسازهای سیلیسیومی تحت تابش یونیزان ارائه می‌دهد.



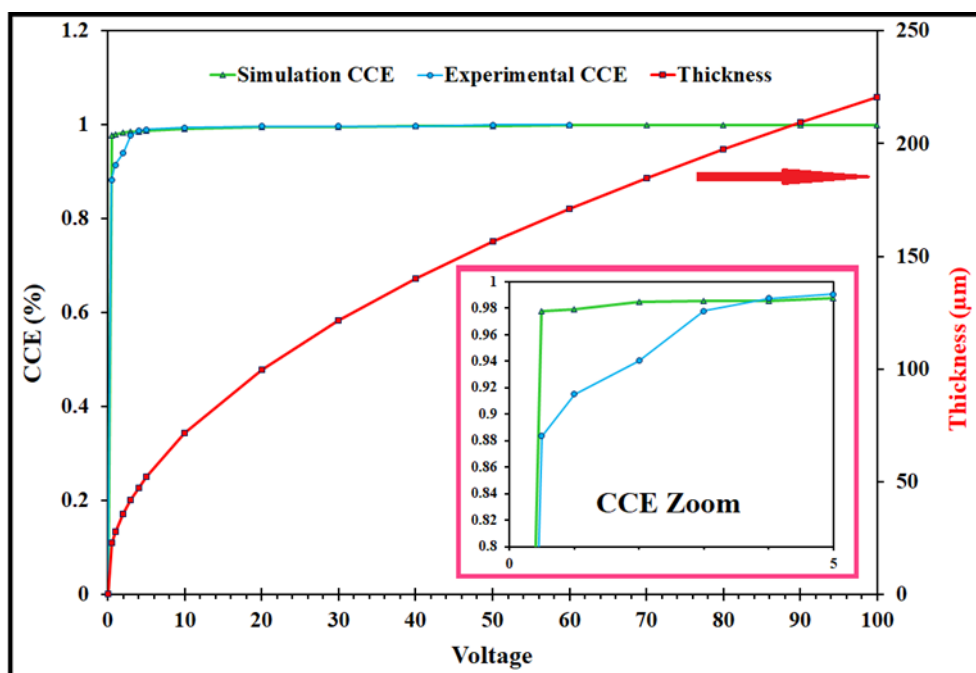
شکل ۹. نمودار خروجی مربوط به نرم افزار IST برای ولتاژ تغذیه V_{100} .

جدول ۱. پارامترهای شبیه‌سازی در نرم‌افزارهای Silvaco/IST.

متغیر	مقدار
مش‌بندی در راستای X	از صفر تا $13000 \mu\text{m}$ ، گام $500 \mu\text{m}$
مش‌بندی در راستای Y	از صفر تا $950 \mu\text{m}$ ، گام $0.05 \mu\text{m}$ از $1 \mu\text{m}$ تا $301 \mu\text{m}$ ، گام $1 \mu\text{m}$
شرایط مرزی الکتریکی	تماس فلزی در بالا (آند) تماس فلزی در پایین (کاتد)
دوپینگ گاوسی نوع P^+	$1 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$
دوپینگ نوع N	$2 \times 10^{12} \text{ cm}^{-3}$
دوپینگ نوع N^+	$1 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$
طول عمر حامل‌ها	1-5 ms

که ناشی از حذف سریع حامل‌های اقلیت است. از آن‌جا که ضریب پخش به تحرک‌پذیری^۱ وابسته است، کاهش مقدار ورودی تحرک‌پذیری در شبیه‌سازی IST باعث کاهش CCE می‌شود؛ این اثر به‌ویژه در ولتاژهای پایین که میدان الکتریکی ضعیف‌تر است، محسوس‌تر خواهد بود.

در شکل ۱۰، مقایسه بازدهی جمع‌آوری بار حاصل از داده‌های تجربی و شبیه‌سازی را در کنار ضخامت ناحیه تهی حاصل از رابطه (۲) نسبت به ولتاژهای تغذیه مشاهده می‌کنیم که توافق خوبی بین شبیه‌سازی و داده‌های تجربی حاصل شده است. در این شکل برد ذره آلفا ($28 \mu\text{m}$) معادل با ولتاژ کمتر از V_{20} است که CCE



شکل ۱۰. نمودار CCE مربوط به داده تجربی و شبیه سازی و ضخامت ناحیه تهی که از رابطه (۲) بدست آمده است، نسبت به ولتاژ تغذیه.

تشکر و قدردانی

از ریاست محترم آزمایشگاه واندوگراف پژوهشگاه علوم و فنون هسته ای تهران برای مساعدت در انجام این پژوهش و فراهم کردن امکانات آزمایشگاهی بسیار سپاسگزاریم. همچنین از راهنمایی های ارزنده پروفیسور Ettore Vittone صمیمانه سپاسگزاریم.

که می تواند به عنوان مرجعی برای طراحی و بهبود عملکرد آشکارسازهای نیمه هادی در شرایط تابش شدید و کاربردهای هسته ای و فیزیک انرژی زیاد به کار رود. همچنین، این پژوهش شروع مناسبی برای تحلیل عملکرد آشکارسازهای ذره باردار و قطعات نیمه هادی در محیط های تابشی با استفاده از روش تحلیل IBIC است که در گام های بعدی می توان از این روش آزمایش برای مطالعه نمونه های آشکارساز نیمه هادی مختلف، تحت شرایط کاربری متفاوت استفاده کرد.

۵. مراجع

1. E Vittone et al., *Nucl. Instr. Meth. Phys. Res.B* **449** (2019) 6.
2. M B H Breese et al., *Nucl. Instr. Meth. Phys. Res.B* **264** (2007) 345.
3. A G Osuna, "Study and characterisation of semiconductor radiation detectors using the IBIC technique", University of Seville (2022).
4. "https://indico.cern.ch/event/1214410/contributions/5325462/attachments/2616212/4522141/IBIC_for_DRD3_Jaksic.pdf." (accessed Aug. 04, 2025).
5. https://aida2020.web.cern.ch/aida2020/node/275.html (accessed Aug. 04, 2025).
6. M R Ramos et al., *Materials (Basel)* **15** (2022) 388.
7. M Jakšić et al., *Front. Phys.* **10** (2022) 877577.
8. J Forneris et al., *Nucl. Instr. Meth. Phys. Res.B* **306** (2013) 169.
9. E Vittone, *Nucl. Instr. Meth. Phys. Res.B* **219** (2004) 1043.
10. E Vittone, *Int. Sch. Res. Not.*, vol. **2013**, 1, (2013) 637608.
11. E Vittone et al., *Nucl. Instr. Meth. Phys. Res.B* **266** (2008) 1312.

12. E Vittone et al., *Nucl. Instr. Meth. Phys. Res.B* **161** (2000) 446.
13. M Ciappa, et al., *Microelectron. Reliab.* **88** (2018) 476.
14. P Rossi et al., *Nucl. Instr. Meth. Phys. Res.B* **249** (2006) 242.
15. J Gómez-Camacho et al., *Eur. Phys. J. Plus* **136** (2021) 273.
16. T L Tang, *Nucl. Instr. Meth. Phys. Res.A* **1034** (2022) 166623.
17. CAEN, DT5730 – 8 Channel 14-bit 500 MS/s Digitizer, <https://www.caen.it/products/dt5730/> (accessed Aug. 04, 2025).
18. CAEN, MC2 Analyzer – Pulse Processing Software, <https://www.caen.it/products/mc2analyzer/> (accessed Aug. 04, 2025).
19. S Inc., Silvaco – TCAD Software Tools, <https://silvaco.com> (accessed Aug. 04, 2025).
20. آموزش شبیه‌سازی ادوات نیمه‌هادی با سیلواکو, <https://faradars.org/courses/fvee95111-silvaco-for-simulate-semiconductor-device> (accessed Aug. 04, 2025).
21. J F Ziegler, SRIM – The Stopping and Range of Ions in Matter, www.srim.org (accessed Aug. 04, 2025).
22. G Vizkelethy, *Nucl. Instr. Meth. Phys. Res.B* **269** (2011) 2330.
23. <https://indico.ictp.it/event/a11182/session/12/contribution/7/material/0/0.pdf> (accessed Aug. 04, 2025).
24. J Forneris, “Theory and applications of the Ion Beam Induced Charge (IBIC) technique”, University of Turin School (2013).
25. J Garcia Lopez et al., *IAEA Tech. Rep. Ser.* **490** (2023) 1.
26. E Vittone et al., *Nucl. Instr. Meth. Phys. Res.B* **158** (1999) 476.
27. N Barbero et al., *Nucl. Instr. Meth. Phys. Res.B* **348** (2015) 260.
28. M McPherson et al., *Semicond. Sci. Technol.* **12** (1997) 1187.
29. <http://www.solid.unito.it/RICERCA/IBA/IST.html> (accessed Aug. 04, 2025).
30. S M SZE, “*Semiconductor Devices Physics and Technology*” (1985).
31. ORTEC, Introduction to Charged-Particle Detectors, <https://www.ortec-online.com/-/media/ametekortec/other/introduction-charged-particle-detectors.pdf> (accessed Aug. 04, 2025).
32. A V Shchagin et al., *Nucl. Instr. Meth. Phys. Res.B* **387** (2016) 29.
33. J Kemmer, *Nucl. Instr. Meth. Phys. Res.A* **226** (1984) 89.
34. H S Kim et al., *J. Korean Phys. Soc.* **52** (2008) 1754.