

پهن‌شدگی دوپلری گاماهاى نابودی پوزیترون در ورقه‌های سیلیکونی نوع ان و پی تابش دیده توسط گاما، نوترون و الکترون

معصومه اربابی بلوچستان و علی اکبر مهماندوست خواجه‌داد*

گروه فیزیک، دانشگاه سیستان و بلوچستان، زاهدان، سیستان و بلوچستان، ایران.

*سیستان و بلوچستان، زاهدان، دانشگاه سیستان و بلوچستان، گروه فیزیک، کدپستی: ۹۸۱۶۷-۴۵۸۴۵.

پست الکترونیکی: mehmandoost@phys.usb.ac.ir

چکیده

پهن‌شدگی دوپلری گاماهاى ناشی از نابودی پوزیترون در ورقه‌های سیلیکونی نوع ان و پی که استفاده‌ی فراوانی در صنعت الکترونیک دارند، اندازه‌گیری شد. ورقه‌ها تحت تابش الکترون‌های ۱۰ مگاالکترون‌ولتی (۳۰ کیلوگری)، گاماهاى چشمه کبالت ۶۰ (۱۷۵ کیلوگری) و شار نوترون حرارتی راکتور (۰/۰۳۸ گری) قرار گرفته‌اند. در این تحقیق از یک سامانه‌ی متداول همزمانی طیف‌سنجی نابودی پوزیترون، شامل یک آشکارساز فوق‌خالص ژرمانیوم، یک آشکارساز سوسوزن و چشمه‌ی پوزیترون‌دهنده سدیم ۲۲، استفاده شده است. فعالیت نمک پرتوزا، ۷ میکروکوری است که بین دو لایه‌ی نازک پلیمری، هر کدام به ضخامت ۷ میکرومتر، ساندویچ شده است. نتایج این تحقیق حاکی از ایجاد نقص قابل مشاهده در نمونه‌های سیلیکونی تابش دیده با الکترون است.

کلیدواژگان: طیف‌سنجی نابودی پوزیترون، پهن‌شدگی دوپلری گاماهاى نابودی، سیلیکون نوع ان، سیلیکون نوع پی، سیلیکون تابش دیده.

۱. مقدمه

سیلیکون، یکی از کامل‌ترین و پرکاربردترین بلورها در نیمه-رساناهای موجود است. قطعات سیلیکونی در سلول‌های خورشیدی، آشکارسازی تابش، تراشه‌های به‌کار رفته در فناوری‌های درگیر با تشعشعات فضایی، کاربرد وسیعی دارند. درجه خلوص بلور سیلیکون برای استفاده در فناوری بسیار مهم است از این‌رو، تجمع عیوب در بلور، پدیده‌ای است که به‌طور گسترده مورد مطالعه قرار گرفته است [۱-۳]. ابزار الکترونیک مورد استفاده در ایستگاه فضایی، ماهواره‌ها و سایر مراکز مرتبط با پرتو، معمولاً به‌صورت مستقیم و یا غیرمستقیم در معرض تابش گاما، الکترون، نوترون و یون‌های پرانرژی قرار می‌گیرند. تابش باعث ایجاد عیب در ساختار بلوری نمونه و اختلال در عملکرد ابزار الکترونیک می‌گردد. یکی از روش‌های بررسی نوع و غلظت عیب در ساختار بلوری یک ماده، استفاده از روش‌های طیف‌سنجی نابودی پوزیترون در محیط است [۴ و ۵]. مطالعات نظری و تجربی فراوانی در رابطه با پهن‌شدگی دوپلری گاماهاى نابودی پوزیترون در بلور سیلیکون انجام شده است [۶-۹]. هنگامی که پوزیترون‌های پرانرژی وارد ماده می‌شوند، عمدتاً انرژی خود را از طریق یونیزاسیون اتم‌های محیط از دست

می دهند. با کم شدن انرژی پوزیترون، معمولاً برانگیختگی های الکترون-حفره ای صورت می گیرد. وقتی انرژی پوزیترون به کسری از الکترون ولت کاهش پیدا کند، پراکندگی فونونی پدیده ی غالب می شود و بالاخره پوزیترون به تعادل حرارتی با محیط می رسد. در حین حرارتی شدن، انرژی جنبشی پوزیترون به کم تر از یک دهم الکترون ولت می رسد. زمان حرارتی شدن پوزیترون پراثری، معمولاً از مرتبه ی چند پیکوثانیه است و پوزیترون طی این مدت تا عمق میکرومتری ماده نفوذ می کند. پوزیترون حرارتی شده، به عنوان موجی کوانتومی در ماده حرکت می کند و در محدوده ای تا صد نانومتر می تواند تا چند نانو ثانیه زنده بماند. طول عمر پوزیترون در ماده به مراتب بیش تر از زمان لازم برای حرارتی شدن آن است و بنابراین پوزیترون فرصت کافی برای واکاوی ساختار الکترونی و بررسی عیب و نقص احتمالی موجود در ماده را دارد.

به دلیل دافعه ی کولنی هسته های مثبت، پوزیترون در فضای بین اتمی با حالتی غیر جایگزیده قرار می گیرد. در عیوب حجم باز نظیر تک جای خالی، دو جای خالی، خوشه های جای خالی، دررفتگی ها، مرزخانه ها و نظایر آن، پوزیترون دافعه ی کولنی و پتانسیل کمتری حس می کند. در نتیجه، حالت جایگزیده ی پوزیترون درون عیب، انرژی کمتری نسبت به حالت غیر جایگزیده ی پیش گفته دارد. گذار از حالت غیر جایگزیده به حالت جایگزیده، به دام انداختن یا گیراندازی پوزیترون نامیده می شود. انرژی بستگی پوزیترون به دام افتاده در عیب، معمولاً از مرتبه چند الکترون ولت است. تله زدایی حرارتی از چنین تله های عمیقی غیرممکن است و پوزیترون تا زمان نابودی، در دام می ماند. چگالی حضور الکترون در مکان عیب در مقایسه با نواحی بدون عیب ماده، کم تر است. بنابراین پوزیترون به دام افتاده در عیب، عمر بیشتری می کند. هرچه غلظت یک نوع عیب خاص در ماده بیش تر باشد، نرخ گیراندازی پوزیترون در آن نوع عیب بیش تر می شود. به همین دلیل تعداد پوزیترون هایی

که عمری متناسب و مرتبط با آن نوع عیب خاص دارند، افزایش خواهد یافت. معمولاً رسم بر آن است که هر نوع حالت پوزیترون در ماده را به صورت یک حالت واپاشنده با ثابت واپاشی مختص به آن در نظر می گیرند که به صورت تابعی نمایی و امی باشد. از این جهت، طیف طول عمر پوزیترون در یک ماده، تلفیقی از چند تابع نمایی با ثابت-های واپاشی متفاوت است. روش های متنوع طیفسنجی نابودی پوزیترون نظیر؛ اندازه-گیری طول عمر پوزیترون، همبستگی زاویه ای دو بعدی تابش نابودی، میزان تشکیل پوزیترونیم و پهن شدگی دوپلری گاماها ی نابودی، برای مطالعه عیوب مختلف حجم باز در بلور سیلیکون حاوی جای خالی پر شده با انواع آلاینده ی نیز استفاده می شود. این قبیل عیوب، نقش مهمی در خواص الکتریکی مواد نیمه رسانا ایفا می کنند و تلاش قابل توجهی برای تشخیص آنها صورت گرفته است. در محدوده ی غلظت 10^{15} عیب بر سانتی-متر مکعب، طیفسنجی نابودی پوزیترون یکی از معدود روش-های تشخیص عیب است و این، به دلیل میل زیاد پوزیترون در به دام افتادن در عیوب حجم باز است.

سطح مقطع نابودی پوزیترون پراثری با الکترون محیط، در مقایسه با سطح مقطع نابودی پوزیترون حرارتی، بسیار پایین تر است، به همین دلیل از نابودی پوزیترون قبل از حرارتی شدنش صرف نظر می کنند. به علاوه، در چارچوب مختصات آزمایشگاه، پوزیترون حرارتی را ساکن تلقی می کنند. از این رو، زوج الکترون-پوزیترون قبل از نابودی، دارای تکانه ی خطی ای برابر تکانه ی خطی الکترونی است که با آن نابود شده است. بقای تکانه ی خطی در خلال نابودی زوج ایجاب می کند که دو گامای حاصل از نابودی، دقیقاً در یک راستا ساطع نشوند. به علاوه، بقای جرم و انرژی ایجاب می کند که انرژی گاماها ی حاصل از نابودی، دقیقاً ۵۱۱ کیلو الکترون ولت نباشد. روش پهن شدگی دوپلری گاماها ی نابودی، به مطالعه میزان اختلاف انرژی گاماها ی نابودی از ۵۱۱ کیلو الکترون ولت می پردازد. اگر

از طیف انرژی است که در کران انتگرال‌های فوق مشخص شده است. به دلیل تأثیرپذیری قسمت کم انرژی قله تمام انرژی از رویدادهای کامپتون و اصلاح کم آن در سامانه‌های هم‌زمانی، معمولاً پارامتر W را فقط از قسمت پر انرژی طیف محاسبه می‌کنند [۱]. تجزیه و تحلیل پدیده‌هایی با احتمال کم که از نابودی با الکترون‌های مغز اتفاق می‌افتد، لزوم کاهش پس‌زمینه در طیف انرژی و استفاده از سامانه‌های با دو آشکارساز HPGe را خاطر نشان می‌سازد، لکن فراهم‌سازی دو آشکارساز HPGe در اغلب آزمایشگاه‌های داخل کشور امکان‌پذیر نیست. سزپالا و همکارانش، از سامانه‌ای متشکل از یک آشکارساز HPGe و یک آشکارساز BGO بهره‌جسته و مطالعات خوبی روی نمونه‌های سیلیکونی تابش دیده داشته‌اند [۱۱].

۳. تهیه نمونه

همه نمونه‌های مورد استفاده در این تحقیق، از دو ورقه سیلیکونی بزرگ (هر ورقه به قطر ۲۰ سانتی‌متر و ضخامت یک میلی‌متر) یکی از نوع ان و دیگری از نوع پی، به شکل مربع و با ابعاد یک سانتی‌متر در یک سانتی‌متر بریده شده‌اند. ورقه‌ها به روش چکرالسکی رشد یافته و از خارج کشور تهیه شده‌اند. جرم نمونه‌ها متفاوت، ولی در حدود ۰/۰۲ گرم است. برای پاک کردن لایه نازک اکسید سطح نمونه‌ها، از محلول رقیق اسید هیدروفلوئوریک و سپس شستشو با آب فراوان، استفاده کردیم. به‌علاوه سطح نمونه‌ها را با الکل نیز تمیز می‌کنیم. در این تحقیق، نمونه‌های مرجع تابش نخورده‌اند، اما سایر نمونه‌ها تابش دیده‌اند. دسته اول از نمونه‌های نوع ان و پی تحت تابش گاما‌های ناشی از چشمه ^{60}Co گاماسل پژوهشگاه علوم و فنون هسته‌ای کشور قرار گرفته‌اند و مطابق گزارش دریافتی، ۱۷۵ کیلوگری دز دریافت کرده‌اند. دسته دوم، در راکتور پژوهشگاه، توسط نوترون‌های حرارتی با شار حدود $10^{12} \text{ n/cm}^2\cdot\text{s}$ به مدت ۱۰۰۰

پوزیترون با یک الکترون مغز که تکانه‌ی بیش‌تری دارد، نابود شود، اختلاف انرژی گامای نابودی تا ۵۱۱ کیلوالکترون‌ولت، بیش‌تر از زمانی است که پوزیترون با یک الکترون ظرفیت نابود شود. این مسأله وقتی اهمیت پیدا می‌کند و کاربردی می‌شود که بدانیم میزان در دسترس‌پذیری الکترون‌های مغز و یا ظرفیت برای پوزیترون، شدیداً وابسته به ساختار الکترونی ماده و جایگزیده و غیرجایگزیده بودن حالت پوزیترون است. سهم نابودی پوزیترون با هر کدام از الکترون‌های مغز منحصر به فرد است و به‌عنوان اثر انگشتی جهت شناسایی تغییرات شیمیایی در محل عیب عمل می‌کند. ممکن است توزیع تکانه‌ی الکترون‌های یک اتم ناخالص از اتم‌های میزبان متمایز باشد و این تفاوت می‌تواند برای شناسایی پر شدن مکان‌های خالی با اتم‌های خارجی استفاده شود [۱۰، ۱].

۲. مشاهده پذیرها

پهن‌شدگی دوپلری گاما‌های نابودی را می‌توان با سامانه‌ی طیف‌سنج استاندارد پرتو گاما، مجهز به دست‌کم یک آشکارساز HPGe با تمام پهنا در نصف بیشینه حدود یک کیلوالکترون‌ولت (در محدوده‌ی انرژی ۵۱۱ کیلوالکترون‌ولت) اندازه‌گیری کرد. طیف انرژی در محدوده‌ی انرژی ۵۱۱ کیلو الکترون‌ولت، گاوسی شکل است. پارامترهای شکل^۱ (S) و دنباله^۲ (W) که به‌صورت زیر تعریف می‌شوند، معیاری از میزان مشارکت الکترون‌های کم‌تکانه (الکترون‌های ظرفیت) و پرتکانه (الکترون‌های مغز) در نابودی با پوزیترون به حساب می‌آیند.

$$S = \frac{A_s}{A} = \frac{\int_{(511-0.18)keV}^{(511+0.18)keV} N_D dE}{A} \quad (1)$$

$$W = \frac{A_w}{A} = \frac{\int_{(511+2.76)keV}^{(511+4)keV} N_D dE}{A} \quad (2)$$

در روابط فوق، A شمارش کل طیف انرژی در محدوده‌ی قله‌ی ۵۱۱ کیلوالکترون‌ولت و A_s و A_w شمارش در محدوده معینی

²Wing

¹Shape

MCNP ثانیه بمباران شده‌اند. شبیه‌سازی توسط کد مونته‌کارلوی نشان می‌دهد که دز دریافتی توسط این نمونه‌ها حدود $0.38/0$ گری است. برای این منظور، ابتدا با استفاده از تالی‌های $F2$ و $F4$ ، مقدار میانگین شار روی سطح و حجم نمونه محاسبه و سپس با اعمال ضرایب تبدیل شار به دز موجود در استاندارد 2020 ANSI/ANS- از طریق کارت‌های DE و DF ، دز دریافتی توسط کل نمونه حساب شد. دسته سوم، در رودترون یزد با الکترون-هایی با انرژی بیشینه 10 MeV و متوسط جریان 0.2 میلی آمپر، در دمای 300 K بمباران شده و مطابق گزارش دریافتی، 30 کیلوگری دز دریافت کرده‌اند. برای اختصار در نوشتار، نمونه‌های به‌کار رفته در این تحقیق را مطابق جدول ۱، نام‌گذاری کرده‌ایم.

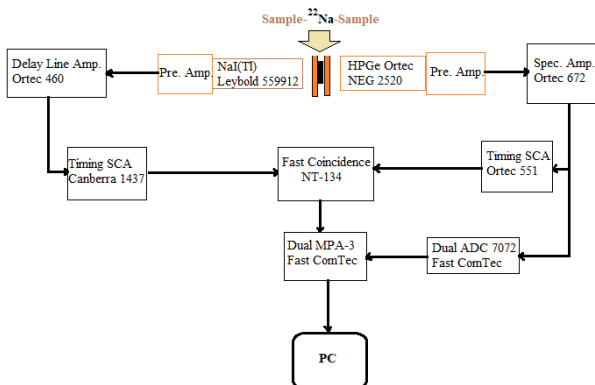
جدول (۱): نام‌گذاری نمونه‌ها.

نوع سیلیکون	نوع تابش	علامت اختصاری
ان	بدون تابش (مرجع)	SiN
ان	نوترون	SiNn
ان	گاما	SiNg
ان	الکترون	SiNe
پی	بدون تابش (مرجع)	SiP
پی	نوترون	SiPn
پی	گاما	SiPg
پی	الکترون	SiPe

۴. مشخصات فنی سامانه طیف‌سنجی

در این تحقیق از یک سامانه بومی طیف‌سنجی اندازه‌گیری پهن‌شدگی دوپلری گاماها ناشی از نابودی پوزیترون در مواد استفاده کرده‌ایم که در دانشگاه سیستان و بلوچستان راه‌اندازی شده است. آشکارساز اصلی به‌کار رفته در این سامانه، آشکار ساز HPGe مدل 2520 NEG Ortec با تمام پهنای در نصف بیشینه $1/1$ کیلوالکترون ولت در انرژی 662 کیلو الکترون ولت است. آشکارساز فرعی مورد استفاده، یک آشکار ساز سوسوزن

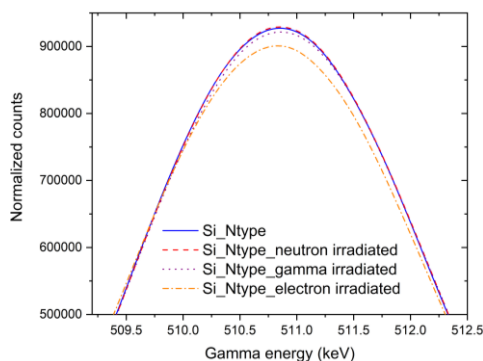
استفاده از تحلیل‌گر چندپارامتری به همراه مبدل آنالوگ به رقم 8000 کاناله جفتی، این امکان را فراهم می‌سازد که طیف انرژی آشکارساز HPGe را هم به‌صورت مجزا و هم در همزمانی با قله 511 کیلوالکترون‌ولتی طیف انرژی آشکارساز $NaI(Tl)$ ، داشته باشیم. طیف مجزا، به‌منظور فراهم‌سازی امکان تبدیل شماره کانال به انرژی (با استفاده از چند چشمه گامای معلوم) مورد نیاز است و طیف همزمان، برای کاهش پس‌زمینه و تجزیه و تحلیل مشاهده پذیرها ضروری است.



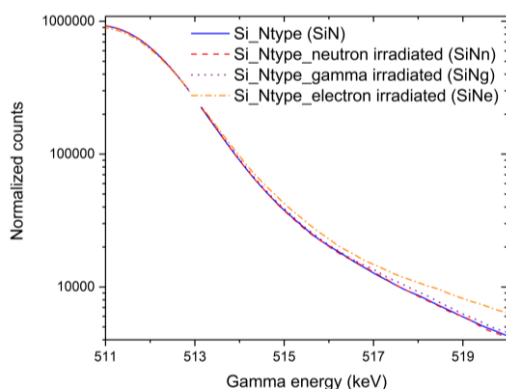
شکل (۱): طرح‌واره سامانه اندازه‌گیری پهن‌شدگی دوپلری گاماها ناشی از نابودی پوزیترون در نمونه‌های سیلیکونی.

۵. بهنجار کردن طیف‌های انرژی

نیمه راست طیف‌های بهنجار شده را در مقیاس لگاریتمی نشان می‌دهد. تنها خطای اندازه‌گیری، خطای آماری در شمارش است که معمولاً به صورت جذر شمارش در هر کانال در نظر گرفته می‌شود که با توجه به کوچک بودن این خطا و به دلیل اجتناب از شلوغ شدن نمودارها، از رسم آن در این شکل‌ها صرف‌نظر شده است. ملاحظه می‌شود که طیف مربوط به نمونه‌ی سیلیکونی تابش دیده توسط الکترون، دارای پارامتر S کم‌تری نسبت به بقیه‌ی طیف‌هاست. به علاوه، پارامتر W مربوط به نمونه‌ی سیلیکونی نوع ان تابش دیده با الکترون، از بقیه‌ی نمونه‌ها بیشتر است. به عبارتی، در نمونه‌های تابش دیده توسط الکترون، در مقایسه با نمونه‌های تابش دیده با گاما و نوترون، الکترون‌های پرتکانه‌ی نمونه (الکترون‌های مغز)، سهم بیش‌تری در نابودی با پوزیترون‌ها ایفا کرده‌اند.



شکل (۲): طیف‌های انرژی بهنجار شده نمونه‌های سیلیکونی نوع ان، در محدوده‌ی قله ۵۱۱ کیلوالکترون‌ولت.



شکل (۳): نیمه راست طیف‌های انرژی بهنجار شده نمونه‌های سیلیکونی نوع ان.

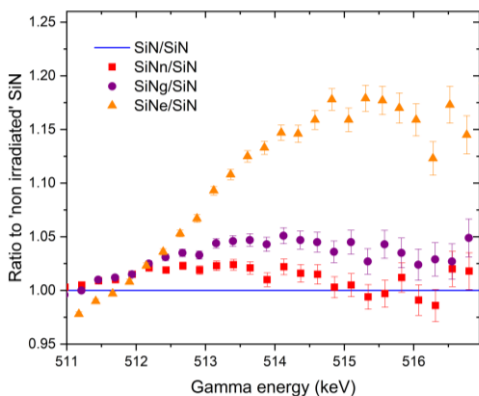
برای این‌که بتوانند طیف‌های انرژی مربوط به نمونه‌های مختلف را در محدوده‌ی قله‌ی ۵۱۱ کیلو الکترون ولت با یکدیگر مقایسه کنند، معمولاً طیف‌ها را نسبت به طیف یک نمونه‌ی مرجع بهنجار می‌کنند [۱۱]. ما در این تحقیق، برای نمونه‌های سیلیکونی نوع ان، نمونه تابش نخورده‌ی نوع ان را به عنوان نمونه‌ی مرجع و برای نمونه‌های سیلیکونی نوع پی، نمونه‌ی تابش نخورده نوع پی را به عنوان نمونه‌ی مرجع انتخاب کرده‌ایم. برای بهنجار کردن طیف‌ها، سطح زیر هر طیف در محدوده‌ی انرژی ۵۰۵/۱۲ تا ۵۱۶/۷۷ کیلوالکترون‌ولت را محاسبه و در عددی ضرب کرده‌ایم تا با سطح زیر طیف نمونه‌ی مرجع در همان محدوده‌ی انرژی، برابر شود. به جهت کمینه کردن دست‌کاری در داده‌ها، سعی می‌شود داده‌گیری به‌گونه‌ای انجام شود که شمارش کل مربوط به کلیه‌ی نمونه‌ها، حدوداً با هم برابر باشند. به علاوه، با توجه به این‌که انجام آزمایش‌ها چند روز طول می‌کشد، احتمال جابجایی جزئی طیف‌های انرژی وجود دارد. به همین دلیل و به منظور انجام قیاس بهتر، طیف‌های انرژی هر نوع از نمونه‌های سیلیکونی را در محدوده‌ی انرژی ۵۱۱ کیلوالکترون‌ولت، هم‌مرکز می‌کنند. برای این منظور، متوسط وزنی انرژی هر طیف در محدوده‌ی انرژی ۵۰۵/۱۲ تا ۵۱۶/۷۷ الکترون‌ولت را مطابق رابطه‌ی (۳) محاسبه می‌کنیم و سپس با جابجایی جزئی طیف‌ها، متوسط وزنی همه‌ی نمونه‌های یک نوع خاص را در یک انرژی قرار می‌دهیم.

$$(3) \quad \text{انرژی هر کانال} \times (\text{شمارش هر کانال}) = \frac{\sum (\text{شمارش هر کانال})}{\sum (\text{شمارش هر کانال})} \times \text{متوسط وزنی انرژی}$$

۶. ارائه نتایج این تحقیق

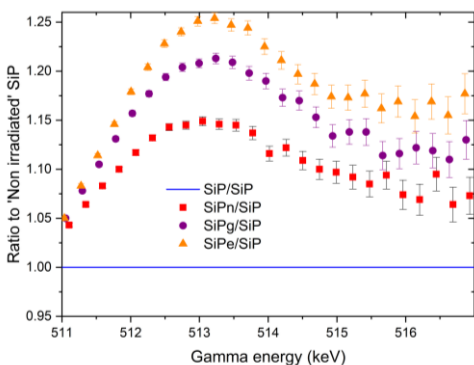
طیف‌های بهنجار شده نمونه‌های سیلیکونی نوع ان در شکل‌های ۲ و ۳ رسم شده است. شکل ۲ طیف‌ها را در محدوده‌ی انرژی ۵۱۱ کیلوالکترون‌ولت و در مقیاس خطی نشان می‌دهد. شکل ۳

تحقیق، طیف نمونه‌های سیلیکونی تابش ندیده به‌عنوان نمونه‌های مرجع انتخاب شده‌اند. منحنی‌های نسبت مربوط به پهن شدگی دوپلری برای نمونه‌های سیلیکونی نوع ان و پی به ترتیب در شکل‌های ۶ و ۷ رسم شده است. ملاحظه می‌شود نمونه‌هایی که تابش گاما و نوترون دریافت کرده‌اند از حیث نابودی پوزیترون با الکترون‌ها، به ویژه سهم نابودی پوزیترون با الکترون‌های کم انرژی شان، یکسان است. اما نمونه‌های سیلیکونی نوع ان تابش دیده با الکترون، هم در تکانه‌های پایین و هم در تکانه‌های بالا، با سایر نمونه‌ها اختلاف قابل ملاحظه‌ای دارد. این اختلاف به معنی ایجاد عیوب ساختاری متنوع و متفاوت در نمونه‌ی تابش دیده توسط الکترون است.



شکل (۶): منحنی‌های نسبت پهن شدگی دوپلری برای نمونه‌های

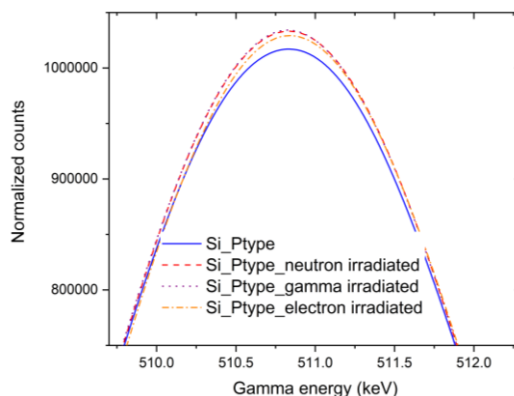
سیلیکونی نوع ان.



شکل (۷): منحنی‌های نسبت پهن شدگی دوپلری برای نمونه‌های

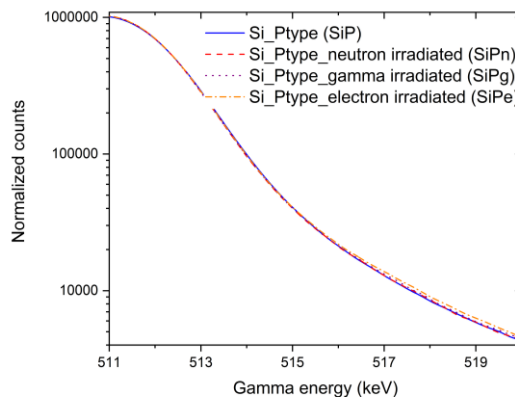
سیلیکونی نوع پی.

به‌طریق مشابه، طیف‌های بهنجار شده نمونه‌های سیلیکونی نوع پی در شکل‌های ۴ و ۵ رسم شده است. شکل ۴ نشان می‌دهد که طیف مربوط به کلیه نمونه‌های سیلیکونی نوع پی تابش دیده، دارای پارامتر S بیش‌تری نسبت به نمونه‌ی تابش ندیده هستند. به‌علاوه شکل ۵ نشان می‌دهد که پارامتر W مربوط به تمام نمونه‌های سیلیکونی نوع پی (با در نظر گرفتن خطای آماری) مشابه یکدیگر است.



شکل (۴): طیف‌های انرژی بهنجار شده نمونه‌های سیلیکونی نوع پی، در

محدوده قله ۵۱۱ کیلو الکترون‌ولت.



شکل (۵): نیمه راست طیف‌های انرژی بهنجار شده نمونه‌های سیلیکونی

نوع پی.

به‌منظور قیاس بهتر طیف‌های متفاوت نسبت به هم و یا بررسی تغییرات پارامترهای S و W، به‌ویژه در قسمت دنباله طیف که آمار شمارش کم‌تری دارد، معمولاً طیف‌های بهنجار شده را به طیف یک نمونه مرجع تقسیم می‌کنند و اصطلاحاً منحنی‌های نسبت مربوط به پهن شدگی دوپلری را رسم می‌کنند. در این

الکترون‌های ۱۰ مگاالکترون‌ولتی را مطالعه کرده و تغییر در پارامتر S را مشاهده نموده و نتیجه گرفته‌اند که میزان تغییرات، حاکی از ایجاد نقصی بزرگتر از دو جای خالی است [۸].

علی‌رغم این‌که دز دریافتی توسط تابش گاما از سایر دزهای تابشی بیش‌تر بوده است، اما به دلیل انتقال تکانه کم، اثرات تخریبی در نمونه‌های تابش دیده توسط گاما کاملاً مشهود نیست. به‌علاوه نتایج این تحقیق نشان می‌دهد دز دریافتی نمونه‌های تابش دیده توسط نوترون، در حدی نبوده که ایجاد نقص‌های قابل مشاهده در نمونه‌ها کند. البته به دلیل دقت پایین اندازه‌گیری‌ها در تکانه‌های بالا (به‌واسطه‌ی شمارش بالای پس-زمینه)، عملاً امکان اظهار نظر قاطع در این خصوص وجود ندارد. نتیجه‌گیری قطعی منوط به مطالعه‌ی سیستماتیک و استفاده از یک سامانه اندازه‌گیری همزمانی با استفاده از دو آشکارساز HPGe است.

منحنی‌های نسبت پهن‌شدگی دوپلری در نمونه‌های سیلیکونی نوع پی، با در نظر گرفتن خطای اندازه‌گیری، تقریباً رفتار مشابهی دارند. بزرگتر بودن جزئی پارامتر W برای نمونه سیلیکونی تابش دیده با الکترون، قابل مشاهده است.

۷. نتیجه‌گیری

نتایج طیف‌سنجی پهن‌شدگی دوپلری گاما‌های ناشی از نابودی پوزیترون در نمونه‌های سیلیکونی نوع ان و پی که توسط الکترون، نوترون و گاما با دزهای مختلف تابش دیده بودند، نشان می‌دهد که نمونه‌های تابش دیده با الکترون دچار عیوب ساختاری بیش‌تری در مقایسه با سایر نمونه‌ها شده‌اند. البته این نتیجه دور از انتظار نبود چرا که آوالوس و دنیفایر پهن‌شدگی دوپلری گاما‌های ناشی از نابودی پوزیترون در ورقه‌های سیلیکونی رشدیافته به روش ناحیه‌شناور و تابش‌دیده با

۸. مراجع

1. R. Krause-Rehberg, H. S. Leipner. *Positron Annihilation in Semiconductors: Defect Studies*. Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, New York, 1999.
2. I. Prozheev, F. Mehnke, T. Wernicke, M. Kneissl, F. Tuomisto. Electrical compensation and cation vacancies in Al rich Si-doped AlGaN. *Appl. Phys. Letters* 117 (14) (2020)142103-142105.
3. G. Brauer, W. Anwand, W. Skorupa, A. G. Revesz, J. Kuriplach. Characterization of the SiO₂/Si interface by positron annihilation spectroscopy. *Phys. Rev. B* 66 (19) (2002) 195331.
4. E. Tayebfard, A. A. Mehmandoost-Khajeh-Dad, M. Khaghani, M. Jafarzadeh-Khatibani, A. M. Poorsaleh. Stability of a positron lifetime measurement system, and investigation the types and concentrations of defects induced by 10 MeV electron irradiation on n-and p-types Si. *Iran. J. Phys. Res.* 15 (1) (2015) 34-41.
5. F. A. Selim. Positron annihilation spectroscopy of defects in nuclear and irradiated materials- a review. *Mater. Characterization* 174 (1) (2021) 110952.
6. E. Nascimento, O. Helene, V. R. Vanin, M. Morales. Study of the Doppler Broadening of positron annihilation radiation in silicon. *Brazilian J. Phys.* 35 (3B) (2005) 782-784.
7. M. Hakala, M.J. Puska, R. M. Nieminen. Momentum distributions of electron-positron pairs annihilating at vacancy clusters in Si. *Phys. Rev. B* 57 (13) (1998) 7621-7627.
8. V. Avalos, S. Dannefaer. Positron-annihilation investigation of vacancy agglomeration in electron-irradiated float-zone Silicon. *Phys. Rev. B* 54 (3) (1996) 1724-1728.
9. R. S. Brusa, C. Macchi, S. Mariuzzi, G. P. Karwasz, W. Egger, P. Sperr, G. Kögel. Decoration of buried surfaces in Si detected by positron annihilation spectroscopy. *Appl. Phys. Lett.* 88 (1) (2006) 011920.
10. A. A. Mehmandoost-Khajeh-Dad, *Introduction to Positron Annihilation Spectroscopy*. University of Sistan and Baluchestan Publication, Zahedan, 2018.
11. S. Szpala, P. Asoka-Kumar, B. Nielsen, J. P. Peng, S. Hayakawa, K. G. Lynn, H. J. Gossman. Defect identification using the core-electron contribution in Doppler-broadening spectroscopy of positron-annihilation radiation. *Phys. Rev. B* 54 (7) (1996) 4722-4731.