

پایداری سامانه اندازه‌گیری طول عمر پوزیترون و بررسی نوع و غلظت عیب ناشی از تابش الکترون‌های ۱۰ مگا الکترون ولتی بر نمونه‌های سیلیکونی نوع n و p

اسماعیل طیب‌فرد^۱، علی‌اکبر مهمان دوست خواجه‌داد^۱، مرتضی خاقانی^۱، مرتضی جمع‌فرزاده خطیبانی^۱
و علی محمد پورصالح^۲

۱. گروه فیزیک، دانشگاه سیستان و بلوچستان، زاهدان
۲. سازمان انرژی اتمی ایران، مجتمع پژوهشی کاربرد پرتوها، یزد

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

(دریافت مقاله: ۱۳۹۳/۲/۱۰؛ دریافت نسخه نهایی: ۱۳۹۳/۸/۲۵)

چکیده

طیف‌سنجی طول عمر نابودی پوزیترون در ماده، یکی از روش‌های با ارزش و غیر مخرب در زمینه مطالعه مواد است که می‌تواند اطلاعاتی در مورد چگالی الکترونی، غلظت عیب، نوع عیب و اتم‌های اطراف عیب ارائه دهد. در این تحقیق، پایداری زمان‌سنجی دستگاه بررسی و اثبات شده است. قدرت تفکیک زمانی دستگاه با چشمه کبالت، ۳۶۵ پیکوثانیه به دست آمده است. نمونه‌های سیلیکونی نوع n و p تحت تابش باریکه الکترون با مقادیر دز تابشی متفاوت ۳، ۱۲ و ۳۰ کیلوگری با انرژی ۱۰ MeV و حداقل جریان باریکه ۰.۲ mA قرار گرفته است. آمار جمع‌آوری شده برای هر نمونه، حداقل یک میلیون و دویست هزار شمارش است که معمولاً طی یک شبانه روز ثبت می‌شود. طیف‌های ثبت شده، با برنامه رایانه‌ای PASCAL به سه مؤلفه طول عمر برازش، تجزیه و تحلیل شده است. اولین مؤلفه طول عمر، مربوط به نابودی پوزیترون در چشمه و حدود ۱۸۶ ps، دومین مؤلفه طول عمر مربوط به نابودی پوزیترون در حجم نمونه و حدود ۲۱۸ ps و سومین مؤلفه طول عمر، مربوط به نابودی پوزیترون در عیوب است که برای نمونه‌های مختلف، کوچک و متفاوت می‌باشد.

واژه‌های کلیدی: طیف‌سنجی طول عمر نابودی پوزیترون، تابش الکترون، قدرت تفکیک زمانی دستگاه، عیوب بلوری

۱. مقدمه

کار می‌گیرد. نابودی پوزیترون به علت جرم کم و جریان کم، روش غیر مخربی است. علاوه بر این، پوزیترون‌ها حساسیت خاصی به جای خالی مثل عیب در جامدات به علت نبود بار مثبت (حذف یون) دارند. این عیوب به شکل پتانسیل منفی پوزیترون را جذب می‌کنند. پوزیترون قبل از جذب بوسیله

تعیین طول عمر نابودی پوزیترون در مواد، یکی از روش‌های طیف‌سنجی نابودی پوزیترون است که می‌تواند اطلاعاتی از ساختار ماده در اختیار پژوهشگر قرار دهد و پژوهشگر با شناسایی کامل از خواص ماده، آن را برای کاربردی خاص به

همکارانش در سال ۱۹۷۸ طول عمر پوزیترون را در یک نمونه سیلیکونی تابش دیده توسط الکترون‌هایی با انرژی ۱ MeV در دمای ۲۰ K برابر با 10 ± 266 ps گزارش کرده‌اند [۴]. طول عمر پوزیترون در یک نمونه سیلیکونی آلیش نشده که به روش FZ رشد یافته و تحت تابش الکترون‌هایی با انرژی ۱٫۵ MeV در دمای ۹۰ K قرار گرفته، توسط ورشام^۳ و همکارانش در سال ۱۹۸۹ اندازه‌گیری و حدود ۲۷۲ ps به دست آمده است [۴]. در سال ۱۹۹۰ ماکین و همکارانش طول عمر پوزیترون را در نمونه سیلیکونی که تحت تابش پروتون‌هایی با انرژی ۱۲ MeV در دمای ۱۵ K قرار گرفته، اندازه‌گیری و حدود 5 ± 275 ps گزارش کرده‌اند [۴]. همه طول عمرهای گزارش شده فوق‌الذکر، مربوط به یک جای خالی اتم سیلیکون در شبکه است. در سال ۲۰۰۳ وانگ^۴ و همکارانش طول عمر پوزیترون در یک نمونه سیلیکونی نوع n رشد یافته به روش FZ، را که در دماهای مختلف دچار تغییر شکل گردیده، اندازه‌گیری کرده‌اند. ایشان دو مؤلفه طول عمر یکی مربوط به جاهای خالی حدود ۳۰۰-۲۶۰ پیکوثانیه و دیگری مربوط به خوشه‌های جای خالی حدود ۵۰۰-۴۰۰ پیکوثانیه گزارش کرده‌اند [۶]. در سال ۱۹۹۸ پولتی^۵ و همکارانش از اندازه‌گیری طول عمر نابودی پوزیترون در نمونه‌های سیلیکونی که به روش‌های FZ و Cz رشد یافته و تحت تابش الکترون‌هایی با انرژی ۲ MeV در دمای ۴ K قرار گرفته، نشان دادند که تفاوت بین روش‌های رشد بلور سیلیکون و همچنین طول عمرها، در تعداد اتم‌های اکسیژن است، که در دماهای پایین به عنوان تله‌های کم عمق به عنوان مراکز گیراندازی پوزیترون عمل می‌کنند [۷]. اولین فرایند در تابش الکترونی سیلیکون، شکل‌گیری جفت عیب فرنکل مثل یک جای خالی و یک بین نشینی در اثر تابش بالای ذرات است. جاهای خالی در سیلیکون در محدوده دمایی ۱۷۰-۷۰ K بسته به حالت باری خود

عیوب حجم باز و نابودی، انتشار می‌یابد [۱]. در بسیاری از مواد، فرآیند نابودی پوزیترون با الکترون‌ها در تمام حالت‌های نوار الکترونی، با الکترون‌های اتم‌ها، مولکول‌ها، و عیوب متفاوت رخ می‌دهد. عیب ذاتی در تمام مواد نیمه هادی وجود دارد. شناسایی و اندازه‌گیری آنها، نیازمند استفاده از ابزارهای خاص مانند طیف‌سنجی نابودی پوزیترون است [۲]. از روش ترکیبی طول عمر پوزیترون و توزیع تکانه الکترون‌ها، می‌توان به ترتیب برای تعیین حجم باز عیب و غلظت عیب و همچنین شناسایی نوع اتم‌های اطراف عیب استفاده کرد. علاوه بر این بر اثر تابش، می‌توان ترکیب‌های جای خالی با یک تک ناخالصی را مشخص کرد. بر اثر آلیش ناخالصی آرسنیک به سیلیکون عیوب از نوع جای خالی در سیلیکون شکل می‌گیرد [۳]. وجود جاهای خالی منفرد، ترکیب آنها با ناخالصی و تشکیل خوشه‌های جای خالی در سیلیکون، بعد از تابش الکترونی با انرژی و دزهای متفاوت، اغلب در دماهای پایین به طور گسترده‌ای مورد مطالعه قرار گرفته است [۴]. تابش الکترونی در بلور سیلیکونی نوع n عیوب شبکه‌ای بزرگی تولید می‌کند [۵]. مطالعه جاهای خالی منفرد در سیلیکون به علت تغییرات دمایی نمونه طی تابش‌دهی و طی اندازه‌گیری، مشکل است. از طرفی جاهای خالی در اثر تابش الکترونی با انرژی بالا در دماهای پایین تولید می‌شود. بنابراین نمونه‌ها باید در دماهای پایین حدود ۷۷ K نگهداری شوند تا مطالعات آزمایشگاهی بر روی تک جاهای خالی منفرد انجام گیرد [۴]. برای جلوگیری از شکل‌گیری باز ترکیب جاهای خالی سیلیکون با ناخالصی‌هایی نظیر اکسیژن و فسفر، باید غلظت اتم‌های اکسیژن در سیلیکون کم و آلیش نشده باشد. تجزیه طیف طول عمر پوزیترون در آزمایشگاه به خوبی توسط ماکین^۱ و همکارانش مطالعه و مؤلفه طول عمر مربوط به عیب را حدود 3 ± 273 ps گزارش کردند [۴]. دیگر پژوهشگران همین طول عمر را در محدوده 270 ± 27 ps گزارش کرده‌اند. فاس^۲ و

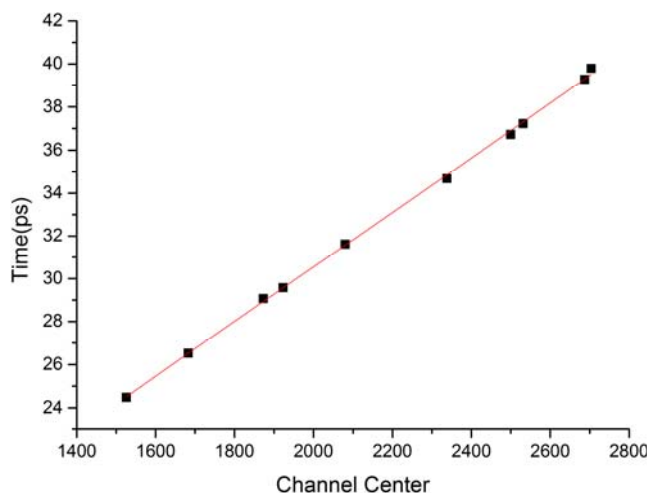
۳. Wurschum

۴. Wang

۵. Polity

۱. Makinen

۲. Fuhs



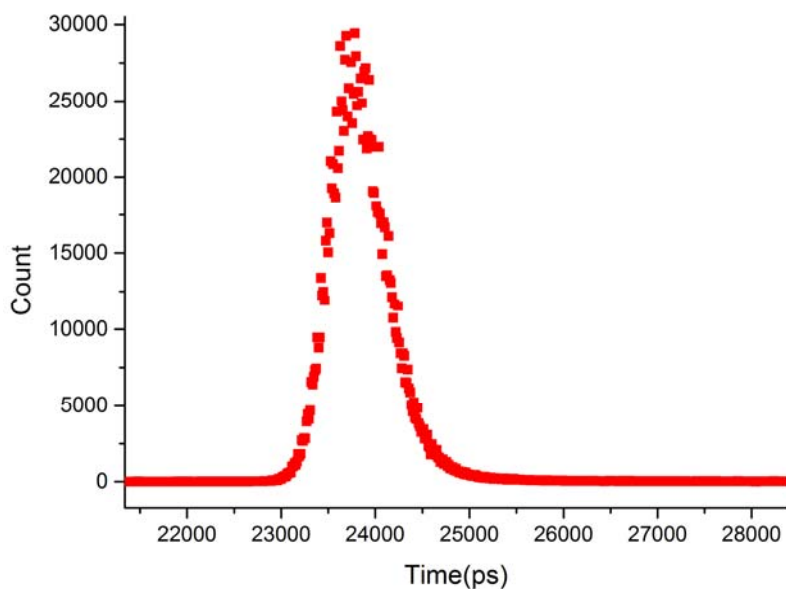
شکل ۱. مدرج کردن مبدل زمان به دامنه بر حسب شماره کانال. پهنای هر کانال ۱۲٫۸ پیکوثانیه به دست آمده است.

مرتبه نانو ثانیه است. الکترونیک بکار گرفته شده، در این تحقیق، متشکل از دو قسمت زمان‌سنجی و انرژی‌سنجی است. ابتدا در بخش زمان‌سنجی، با مشاهده تپ سریع آشکارساز از روی اسیلوسکوپ، تپ دو آشکارساز را به کمک تغییر ولتاژ بالای آشکارسازها، هم ارتفاع کردیم [۹]. با استفاده از تبعیض گر کسر ثابت و تغییرات اثر واک، قدرت تفکیک زمانی برای این دستگاه (تمام پهنای در نصف بیشینه) برای گام‌های همزمان چشمه کبالت-۶۰، حدود ۳۶۵ps به دست آمد. مبدل زمان به دامنه با استفاده از طول کابل‌های متفاوت که هر متر کابل، ۵٫۱ نانوثانیه تأخیر زمانی دارد، برحسب زمان مدرج شد و پهنای هر کانال، معادل ۱۲٫۸ پیکوثانیه به دست آمد. این طیف در شکل ۱ آمده است. شکل طیف خروجی مبدل زمان به دامنه از نمونه سیلیکونی، در شکل ۲ آورده شده است. در قسمت انرژی‌سنجی، شرط انرژی از روی لبه‌های کامپتون به کمک تحلیل گر تک کاناله زمانی برای گامای ۰٫۵۱۱ MeV و ۱٫۲۷۴ MeV گذاشته شد. هدف این تحقیق، بررسی پایداری سامانه و تعیین طول عمر نابودی پوزیترون در نمونه‌های سیلیکونی نوع n و p تابش دیده با دزهای الکترونی متفاوت است. نمونه‌ها در دمای اطاق، توسط سیکلوترون الکترونی واقع در مرکز پرتو فرایند یزد وابسته به سازمان انرژی اتمی ایران، تحت تابش دزهای الکترونی ۳، ۱۲ و ۳۰ کیلوگری با انرژی ۱۰ MeV و حداقل

حرکت کرده، و با عیوب دیگر مثل یک جای خالی، دو جای خالی و ناخالصی‌ها برخورد می‌کنند.

تک جاهای خالی و یا اغلب دو جای خالی، می‌تواند بوسیله تابش الکترونی با انرژی ۲-۰٫۵ MeV در بلورها تولید شوند. علاوه بر این، تابش می‌تواند یون‌های منفی با حجم غیرباز تولید کند، که این یون‌های منفی می‌تواند به عنوان تله‌های گیراندازی کم عمق در نیمرساناها عمل کنند [۷]. یک راه برای شناسایی عیب از نوع مثبت، منفی و خنثی قضاوت از روی نمودار ضریب گیراندازی بر حسب دما است. زیرا ضریب گیراندازی برای جاهای خالی با حالت باری منفی به صورت $T^{-1/2}$ با دما تغییر می‌کند و برای جاهای خالی با حالت باری خنثی، مستقل از دما و برای جاهای خالی با حالت باری مثبت، وابستگی کمی به دما دارد [۸].

سامانه طیف‌سنجی طول عمر پوزیترون در محیط، از چهار قسمت اساسی، چشمه پرتوزا، آشکارسازهای سریع، الکترونیک مناسب و نمونه مورد مطالعه تشکیل شده است. چشمه پوزیترون دهنده در این آزمایش، ایزوتوپ پوزیترون دهنده ^{22}Na با فعالیت $20 \mu\text{Ci}$ می‌باشد که با دو ورقه از جنس فولاد ضد زنگ به ضخامت $7 \mu\text{m}$ ساندویچ شده است. آشکارسازهای به کار گرفته شده در این تحقیق، آشکارسازهای سوسوزن پلاستیکی سریع مدل NT-۸۵۰ با پاسخ زمانی از



شکل ۲. طیف خروجی مبدل زمان به دامنه برای نمونه سیلیکونی.

جدول ۱. نمونه‌های سیلیکونی به کار رفته در این تحقیق شماره‌گذاری شده‌اند.

شماره نمونه	نوع سیلیکون	دز تابشی (کیلوگری)
۱	p	۰
۲	n	۰
۳	p	۳
۴	n	۳
۵	p	۱۲
۶	n	۱۲
۷	p	۳۰
۸	n	۳۰

دست آوردیم. در نهایت شماره مرکز کانال برحسب زمان را رسم کردیم. همان طور که در شکل‌های ۳ و ۴ ملاحظه می‌شود، سامانه تقریباً پایدار هست به این معنی که جابه‌جایی مرکز قله در مدت ۲۳ ساعت برابر ۱/۳۹ کانال یعنی معادل ۱۷/۷۹ پیکوثانیه و برای پایداری کوتاه مدت حدود ۰/۹۶ کانال معادل ۱۲/۲۸ پیکوثانیه بوده است.

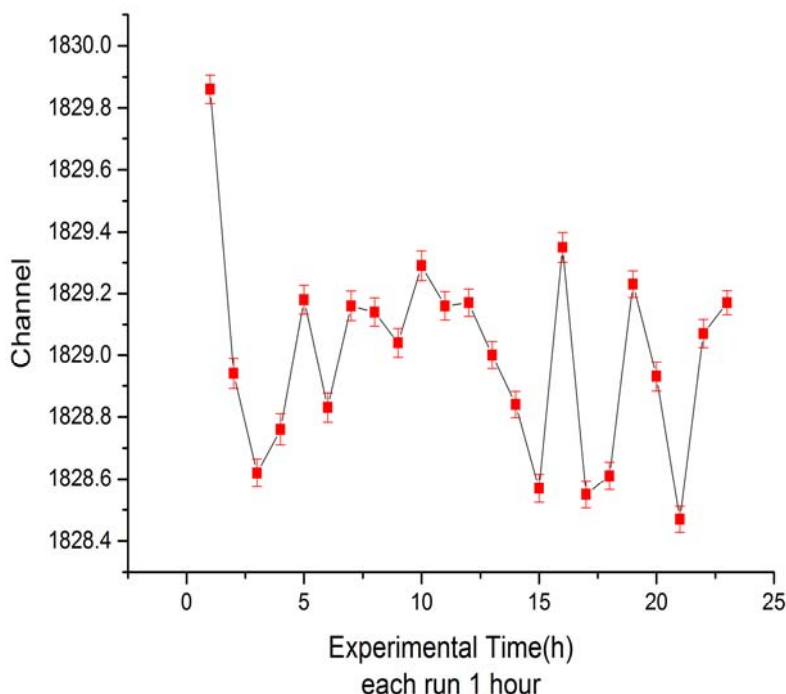
۳. اندازه‌گیری طول عمر پوزیترون

اندازه‌گیری طول عمر نابودی پوزیترون معمولاً با استفاده از یک چشمه ^{22}Na که همزمان با گسیل پوزیترون یک گامای

جریان 0.2mA قرار گرفته‌اند. نمونه‌ها مطابق جدول ۱ شماره‌گذاری شده‌اند.

۲. بررسی پایداری سامانه اندازه‌گیری طول عمر نابودی پوزیترون

برای بررسی پایداری سامانه در حین انجام آزمایش (تحت عنوان اثرات پایداری بلند مدت و کوتاه مدت) با چشمه کبالت به مدت ۲۳ ساعت ۲۳ طیف یک ساعته (بلند مدت) و ۱۵ طیف ۵ دقیقه‌ای به مدت ۷۵ دقیقه (کوتاه مدت) گرفتیم. سپس با برازش منحنی گاوسی به داده‌ها پهنا و مرکز هر قله را به



شکل ۳. پایداری سامانه برحسب زمان در مدت ۲۳ ساعت متوالی. هر آزمایش طی یک ساعت انجام شده است. مرکز قله گاوسی طیف همزمانی چشمه پرتوهای کبالت (با واحد اختیاری) برحسب شماره آزمایش رسم شده است. اختلاف بیشترین و کمترین جابجایی برابر ۱۷/۷۹ پیکونانیه است. خطای وارد به هر داده صرفاً توسط نرم‌افزار برازش داده شده است.

در این رابطه، r_e شعاع کلاسیک الکترون و مقدار آن $2.818 \times 10^{-15} \text{ m}$ است. c سرعت نور، $(\psi^+(r))$ تابع موج پوزیترون، $|n_-(r)|$ چگالی الکترون بوده، و تابع همبستگی $\gamma = \gamma[n_-(r)] = 1 + \frac{\Delta n_-}{n_-}$ چگالی الکترون‌ها به علت جاذبه کولنی بین الکترون و پوزیترون افزایش می‌یابد. هنگامی که پوزیترون در عیوب حجم باز، نظیر جاهای خالی و خوشه‌ها، گیر می‌افتد، طول عمر پوزیترون نسبت به نمونه بدون عیب، به علت کاهش چگالی الکترون در محل عیب، افزایش می‌یابد.

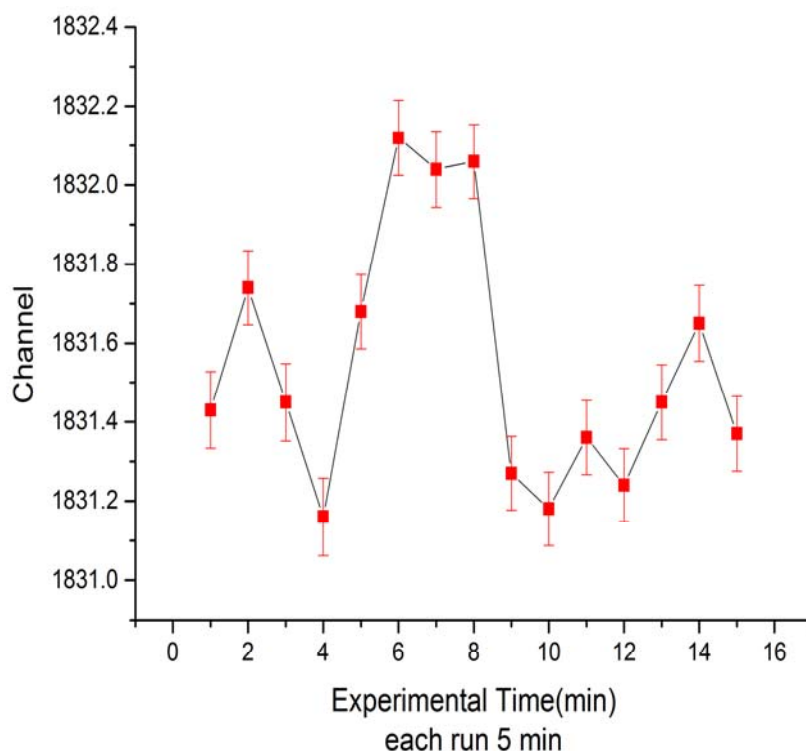
۴. تحلیل داده‌ها با نرم افزار پاسکوال

قبل از تحلیل نمونه‌های سیلیکونی، ابتدا به تعیین کسر نابودی پوزیترون در چشمه می‌پردازیم، همیشه کسر معینی از پوزیترون‌ها در چشمه نابود می‌شود و کسر دیگری از پوزیترون

1.274 MeV به عنوان گامای شروع، گسیل می‌کند امکان‌پذیر است. فعالیت چشمه باید به اندازه کافی کم باشد تا مطمئن شویم که قبل از نابودی پوزیترون اولیه پوزیترون دیگری وارد آشکار ساز نشود. در غیر این صورت الکترونیک قادر به ثبت آن نخواهد بود. گاماها شروع و توقف از رویدادهای نابودی متفاوتی سرچشمه می‌گیرند. در یک طرح ساندریجی خاص، مجموعه چشمه و نمونه، بین دو آشکارساز قرار داده می‌شوند و گاماها گسیل شده از چشمه به درون نمونه‌ها نفوذ می‌کنند. تابش گاما توسط آشکارسازهای سوسوزن به تپ‌های الکتریکی آنالوگ تبدیل می‌شود. تپ، توسط تبعیض‌گر پردازش می‌شود. طول عمر پوزیترون τ تابعی از چگالی الکترون‌ها در محل نابودی است. آهنگ نابودی λ ، عکس طول عمر پوزیترون، از هم‌پوشانی چگالی الکترون‌ها

$$n_-(r) \text{ و } n_+(r) = |\psi^+(r)|^2 \text{ به دست می‌آید}$$

$$\lambda = \frac{1}{\tau} = \pi r_e^2 c \int |\psi^+(r)|^2 n_-(r) \gamma dr$$



شکل ۴. بررسی پایداری سامانه در بازه زمانی کوتاه مدت. این شکل مشابه شکل ۳ است. در این آزمایش ۱۵ آزمایش متوالی و هر کدام طی پنج دقیقه صورت گرفته است. اختلاف بین بیشترین و کمترین جابه‌جایی مرکز قله برابر ۱۲٫۲۸ پیکوثانیه است. به دلیل آمار پایین شمارش طیف‌ها، خطاها بزرگتر شده‌اند.

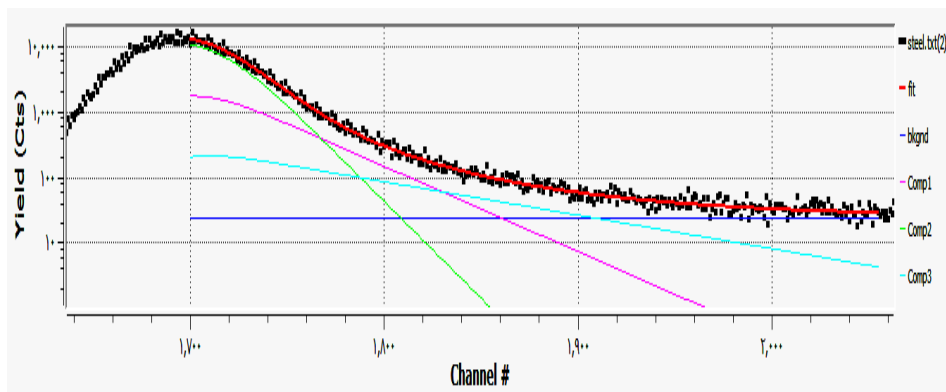
نوعی گزارش شده در مرجع [۱۲]، ثابت و برابر ۱۰ درصد فرض کرده‌ایم.

لازم به یادآوری است که نتیجهٔ برازش، به بازه‌ای که برازش به آن محدود می‌شود، اندکی وابسته است. به منظور تعیین بازه مناسب جهت انجام برازش، برازش به طیف نابودی پوزیترون در نمونه‌های سیلیکونی تابش ندیده را در بازه‌های مختلفی تکرار کردیم و با توجه به اطلاعات به دست آمده و قیاس با نتایج دیگران، [۳، ۷، ۱۳ و ۱۴] بهترین گستره برای انجام برازش را از بازه ۱۸۵۶ تا ۲۴۵۴ کانال معادل ۲۳۷۵۶٫۸ تا ۳۱۴۱۱٫۲ پیکوثانیه اختیار کردیم. این بازه با تنظیم‌های مجدد سامانه و تغییر پارامترهایی نظیر ولتاژ بالای آشکارسازها، تغییر می‌کند. ملاحظه شد که مؤلفه طول عمرجمعی پوزیترون در بازه‌های مختلف، تغییر چندانی ندارد. نتایج برازش به طیف‌های مختلف، در جدول ۲ آمده است. در کلیهٔ برازش‌ها، طول عمر

در هنگام برخورد به نمونه پس پراکنده می‌شود که این کسر پس پراکندگی از رابطهٔ زیر به دست می‌آید [۱۰]:

$$p_+ = 0.1513 Z^{0.4724}$$

تعداد پوزیترونی‌هایی که از سطح پراکنده می‌شوند، ناچیز است. با توجه با این که لایهٔ حفاظتی چشمه از جنس فولاد انتخاب شده، برای تعیین کسر نابودی پوزیترون در فولاد، ابتدا چشمه پرتوزا را بین ورقه‌های فولاد ساندویچ کرده و طیف‌گیری کردیم، سپس سه مؤلفهٔ طیف طول عمر به داده‌های فولاد برازش شد که مؤلفهٔ طول عمر ۱۸۶ ps با شدت بیشتر از ۸۰ درصد به عنوان طول عمر نابودی پوزیترون در چشمه به دست آمد. شکل ۵ برازش سه مؤلفه به طیف نابودی در فولاد را نشان می‌دهد. این مقدار با کارهای دیگران نیز در توافق نسبتاً خوبی است [۱۱]. در خلال برازش طیف‌های مربوط به نمونه‌های سیلیکونی، شدت نابودی پوزیترون در چشمه را مطابق مقدار



شکل ۵. (رنگی در نسخه الکترونیکی) نتایج برازش سه مؤلفه نابودی به طیف طول عمر در نمونه فولادی، برای به دست آوردن کسر نابودی در چشمه.

جدول ۲. نتایج برازش سه مؤلفه نابودی به طیف طول عمر در نمونه‌های سیلیکونی نوع n و p، توسط نرم افزار PASCUAL.

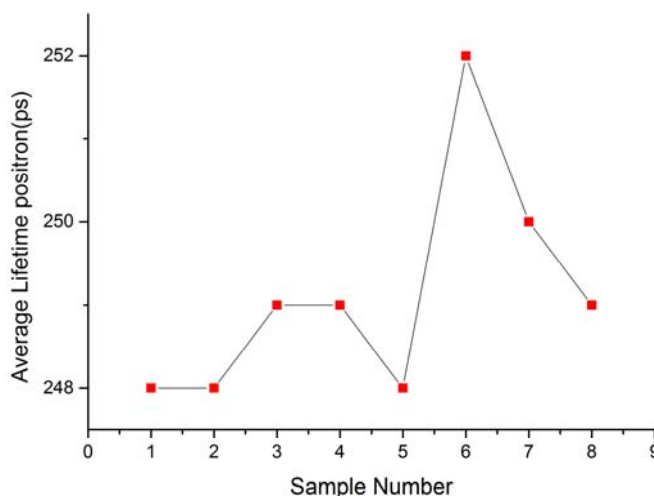
شماره نمونه	دز تابشی kGy	شدت نابودی پوزیترون در حجم	طول عمر نابودی پوزیترون در حجم	شدت نابودی پوزیترون در عیب	طول عمر نابودی پوزیترون در عیب
۱	۰	88 ± 0.5	218 ± 1	2 ± 0.5	1159 ± 37
۲	۰	88.1 ± 0.1	220 ± 1	1.9 ± 0.1	1140 ± 40
۳	۳	87.7 ± 1	219 ± 1	2.3 ± 1	1067 ± 32
۴	۳	87.9 ± 0.1	217 ± 1	2.1 ± 0.1	1128 ± 35
۵	۱۲	88.1 ± 0.1	220 ± 1	1.9 ± 0.1	1166 ± 33
۶	۱۲	87.9 ± 0.1	223 ± 1	2.1 ± 0.1	1172 ± 32
۷	۳۰	87.6 ± 0.4	215 ± 1	2.4 ± 0.4	1000 ± 35
۸	۳۰	87.8 ± 0.1	218 ± 1	2.2 ± 0.1	1081 ± 31

طول عمر میانگین پوزیترون در نمونه‌های تابش دیده نسبت به نمونه‌های تابش ندیده حدود ۴ پیکوثانیه است که به مراتب کمتر از خطای اندازه‌گیری سامانه است.

به دلیل این که نمونه‌ها در دمای اتاق تابش داده شده و در دمای اتاق نیز مورد آزمایش قرار گرفته‌اند، با توجه به توضیحات ذکر شده در مقدمه، قادر به آشکارسازی تک جاهای خالی نیستیم. زیرا لازمه آشکارسازی جاهای خالی منفرد اندازه‌گیری در دمایی زیر دمای اتاق است. البته این بدین معنا نیست که الکترون‌های با انرژی 10 MeV نتوانند در شبکه سیلیکون عیب ایجاد کنند زیرا می‌دانیم که انرژی لازم برای تشکیل یک جای خالی در اتم سیلیکون مستلزم شکستن چهار پیوند کولانسی است و این انرژی حدود 4.4 الکترون ولت می‌باشد که در مقایسه با انرژی الکترون‌های تابشی بسیار ناچیز است

نابودی در چشمه برابر 186 پیکوثانیه و با شدت 10% ثابت فرض شده است.

همان طور که از جدول ۲ ملاحظه می‌شود، طیف طول عمر در نمونه‌های سیلیکونی دارای دو مؤلفه است، یکی مؤلفه حجمی با شدت غالب، یعنی اکثر پوزیترون‌ها پس از گیراندازی در حجم نابود می‌شوند، که در توافق با نتایج دیگران است [۷ و ۱۴-۱۷]. و دیگری، مؤلفه نابودی پوزیترون در عیب که شدت آن در نمونه‌های موجود در این تحقیق، ناچیز است، و این بدان معنا است که عیب ایجاد شده با دزهای تابشی مورد استفاده در این تحقیق کم است. دلیل دیگر برای کوچک بودن میزان عیب ایجاد شده در شبکه سیلیکون، قضاوت از روی طول عمر میانگین پوزیترون در نمونه‌ها و مشاهده تغییرات آن است که در شکل ۶ نشان داده شده است. مطابق این شکل، تغییرات



شکل ۶. تغییرات طول عمر میانگین پوزیترون در نمونه‌های تابش‌نندیده و تابش‌دیده توسط الکترون با دزهای تابشی متفاوت بر حسب شماره نمونه.

دز تابشی، غلظت عیوب و به دنبال آن بخت آشکارسازی آن را افزایش می‌دهد. داشتن دو مؤلفه طول عمر و افزایش طول عمر میانگین پوزیترون نسبت به نمونه حجمی، به وضوح نشان‌دهنده ایجاد عیب در شبکه به واسطه تابش است. در حالی که میانگین طول عمر پوزیترون در نمونه‌های تابش‌دیده نسبت به نمونه‌های تابش‌نندیده تغییرات واضحی ندارد، می‌توان ادعا کرد که غلظت عیب ایجاد شده ناچیز است. به عبارت دیگر، برای ایجاد عیوب قابل مشاهده با این دستگاه، نیاز به دزهای تابشی بالاتر است.

[۱۸ و ۱۹]. این تحقیق به طور مفصل در قالب یک پایان‌نامه کارشناسی ارشد در دانشگاه سیستان و بلوچستان انجام شده است [۲۰].

۵. نتیجه‌گیری

در پایان باید اشاره کرد که سامانه ساخته شده جهت اندازه‌گیری طول عمر نابودی پوزیترون در محیط، در قیاس با قدرت تفکیک زمانی اش (۳۶۵ پیکو ثانیه)، پایدار است. همچنین با عنایت به این حقیقت که انرژی باریکه الکترونی مسئول ایجاد انواع عیوب در نمونه مورد مطالعه است، میزان

مراجع

- Gu, *Microelectronic Engineering* **66** (2003) 358.
- A Polity, F Börner, S Huth, S Eichler, and R Krause-Rehberg, *Physical Review B* **58** (1998) 10363.
- T E M Staab, E Zschock, and R Krause-Rehberg, *Journal of Materials Science* **35** (2000) 4667.
- “Positron Lifetime System (PLS-SYSTEM) Setup” OrtecManual, October 17, (2006).
- D Giebel, *Physics Procedia* **35** (2011) 122.
- E E Abdel-Hady, *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B* **221** (2004) 225.
- F A Selim, D P Wells, J F and Harmon, *Review of Scientific Instruments* **76** (2005) 033905.
- G P Karwasz, A Zecca, R S Brusa, and D Pliszka, *Journal of Alloys and Compounds* **382** (2004) 244.
- E P Grafutin, *Instruments and Methods of Investigation* **45** (2002) 59.
- K Saarinen et al., *Physical Review Letters* **82** (1998) 4464.
- R Krause-Rehberg and H S Leipner, “Positron Annihilation in Semi-conductors Defect Studies”, Springer (1998).
- K P Arefiev and S A Vorobiev, *Phys. Stat. Sol. (a)*, **47** (1978) K149.
- Z Wang, R Krause-Rehberg, V Bodarenko, and H

16. H S Leipner *et al.*, *Physica B* **340** (2003) 617.
17. M Dorikens, *Applied Physics* **4** (1974) 271.
18. N Suezawa, *Physica B* **308** (2001) 1125.
19. P G Coleman, *Journal of Physics: Conference Series* **265** (2011).
20. E Tayebfard, "Positron Annihilation Lifetime Measurement in Silicon Irradiated by Electron", MSc Thesis, University of Sistan and Baluchestan, Zahedan, (2014).
13. A Karbowski, J F Fidelus, and G P Karwasz, *Materials Science Forum* **666** (2011) 155.
14. K Kuitunen, PhD Thesis, Helsinki University of Technology, "Positron annihilation studies on vacancy defects in group IV semiconductors", PhD Thesis, Helsinki University of Technology (TKK), (2010).
15. Y Itoh, H Murakami, and A Kinoshita, *Journal de Physique IV France* **3** (1993) 193.