

روش‌های طیف‌سنجی نابودی پوزیترون در مواد و جزئیات فنی برخی سیستم‌های اندازه‌گیری

علی اکبر مهمان دوست^{۱*}، مرتضی خاقانی^۲ و مرتضی جعفرزاده خطیبانی^۳

۱، ۲ و ۳- گروه فیزیک، دانشگاه سیستان و بلوچستان

*راه‌انداز، دانشگاه سیستان و بلوچستان

mehmandooost@phys.usb.ac.ir

در این مقاله، ابتدا گزارشی از مشخصات یک سیستم اندازه‌گیری طول عمر نابودی پوزیترون در مواد، که برای اولین بار در ایران با همکاری گروه فیزیک دانشگاه سیستان و بلوچستان و شرکت نوین طیف ساخته شده، ارائه می‌شود. در حال حاضر این سیستم قادر است با قدرت تفکیک زمانی بهتر از ۳۵۰ پیکوثانیه طول عمر نابودی پوزیترون در موادی همچون سرامیک، شیشه و سایر مواد عایق با ضریب دی‌الکتریک متفاوت را اندازه‌گیری کند. در ادامه گزارشی از طراحی و راه‌اندازی اولین و تنها سیستم بومی تولید باریک‌های پوزیترون حرارتی و به‌کارگیری آن در مطالعه عیوب ناشی از تابش‌های پرنرژی در ساختار مواد، ارائه می‌شود. این دستگاه توسط دانشگاه سیستان و بلوچستان و با حمایت مالی طرح‌های نوین وزارت صنعت، معدن و تجارت طراحی و ساخته شده‌است.

واژه‌های کلیدی: سیستم تولید باریک پوزیترون حرارتی، طیف سنجی پوزیترون، طول عمر پوزیترون، پهن‌شدگی دوپلری

علائم و اختصارات

$\gamma[n(r)]$	ضریب افزایشی چگالی الکترون در مکان پوزیترون	c	سرعت نور
λ	نرخ نابودی پوزیترون	CFD	تبعیض گر کسر ثابت
$\rho(p_x, p_y, p_z)$	توزیع تکانه جفت الکترون - پوزیترون	f	کسر نابودی پوزیترون
τ	طول عمر پوزیترون	keV	کیلو الکترون ولت
		m_0	جرم الکترون
		MCA	تحلیل گر چند کاناله
		MeV	مگا الکترون ولت
		$n(r)$	چگالی الکترون
		P_L	مؤلفه طولی ممتوم خطی جفت الکترون - پوزیترون
		r_0	شعاع چرخش کلاسیکی الکترون
		S	پارامتر شکل
		TAC	مبدل زمان به دامنه
		ΔE	پهن‌شدگی دوپلری

مقدمه

بیش از پنجاه سال است که روش طیف‌سنجی پوزیترون با دامنه وسیعی از کاربردها، مورد توجه و استفاده علوم مختلف به ویژه علم مواد قرار گرفته است. این روش می‌تواند اطلاعات سودمندی در مورد ساختار الکترونی مواد و همچنین عیوب موجود در آن از جمله جاهای خالی تک اتمی، چند اتمی و خوشه‌ای را در اختیار آزمایشگر قرار دهد [۱]. از طرفی، تابش‌های فضایی از جمله بادهای خورشیدی، پروتون‌ها و یون‌های کیهانی، معمولاً باعث ایجاد عیب در مواد می‌شود که این عیوب به نوبه خود می‌تواند باعث تغییر خواص الکتریکی و مکانیکی مواد شود که در نهایت ممکن است باعث تغییر در بازدهی قطعه یا حتی از کارافتادن آن شود. سازمان هوافضای آمریکا مطالعات فراوانی در خصوص استفاده از روش طیف‌سنجی نابودی پوزیترون در پلیمرها

۱. استادیار (نویسنده مخاطب)

۲. دانشجوی دکتری

۳. دانشجوی دکتری

از به کارگیری روش‌های طیف‌سنجی نابودی پوزیترون در مطالعه عیوب و نحوه باز ترکیب آن‌ها در نمونه سیلیکونی ارائه شده است.

روش‌های طیف‌سنجی پوزیترون

در روش طیف‌سنجی نابودی پوزیترون، پوزیترون‌های تابش شده از یک چشمه بتازا (معمولاً ^{22}Na)، به سمت نمونه تابیده می‌شوند. پوزیترون پرنرژی پس از نفوذ در ماده، طی برخوردهای کشسان با اتم‌های پیرامون خود، به سرعت انرژی خود را از دست می‌دهد و طی مدت چند صد پیکو ثانیه در تعادل گرمایی با نمونه باقی می‌ماند. در مدت زمانی که پوزیترون در حالت تعادل گرمایی با نمونه است، احتمال گیرافتادن پوزیترون در یک حالت جایگزیده (مثلاً جای خالی یکی از اتم‌های شبکه) وجود دارد. بنابراین، نابودی پوزیترون با الکترون می‌تواند از ترازهای مختلف اتفاق بیفتد که مشخصه‌های نابودی متفاوتی دارند. در فرایند نابودی، انرژی و اندازه حرکت پایسته است و در محتمل‌ترین حالت، دو فوتون با انرژی ۵۱۱ کیلو الکترون‌ولت و در جهت مخالف هم، منتشر می‌شوند. این فوتون‌ها که آن‌ها را فوتون‌های نابودی می‌نامند، حاوی اطلاعات سودمندی در اندازه حرکت الکترون‌ها قبل از نابودیشان است. از طرفی، طول عمر پوزیترون، با چگالی الکترون‌هایی که با پوزیترون مواجه می‌شوند، نسبت عکس دارد. این موضوع تقریباً بدیهی به نظر می‌رسد چرا که هرچه چگالی الکترون در پیرامون پوزیترون کمتر باشد، احتمال برخورد کمتر می‌شود و در نتیجه احتمال وقوع فرآیند نابودی کمتر خواهد بود. در نتیجه اصطلاحاً پوزیترون زمان طولانی‌تری زنده می‌ماند. به طور کلی سه روش آزمایشگاهی برای طیف‌سنجی نابودی پوزیترون وجود دارد که در ادامه به معرفی و بیان اجمالی آن‌ها می‌پردازیم.

تعیین طول عمر پوزیترون

در این روش، با ثبت لحظه ورود پوزیترون به درون ماده به عنوان لحظه تولد و ثبت یکی از گام‌های نابودی به عنوان زمان مرگ پوزیترون، طول عمر پوزیترون را اندازه‌گیری می‌کنند. لحظه تولد ممکن است با ثبت گامای تولد، که در بعضی چشمه‌ها همزمان با تولید پوزیترون ساطع می‌شود، یا لحظه فرستادن تپ پوزیترون در باریکه‌های پوزیترون تپی، مشخص شود. در هر حال، نرخ نابودی پوزیترون، λ که معکوس طول عمر پوزیترون است، با همپوشانی چگالی الکترون و پوزیترون متناسب است و از رابطه (۱) پیروی می‌کند.

$$\lambda = \frac{1}{\tau} = \pi r_0^2 c \int dr |\Psi_+(r)|^2 n(r) \gamma[n(r)] \quad (1)$$

در رابطه فوق، τ طول عمر پوزیترون، r_0 شعاع چرخش کلاسیکی الکترون، c سرعت نور، $n(r)$ چگالی الکترون و $\gamma[n(r)]$

[۴-۲]، اثر مخرب تابش بر قطعات نیمه هادی [۵-۶]، طیف‌سنجی الکترون اوژه [۷]، سوسوزنی ترکیبات معطر آلی [۸] و همچنین در خصوص انتقال مغناطیسی باریکه پوزیترون [۹] داشته است.

به‌طور کلی مطالعات مربوط به عیوب تولیدشده توسط تابش‌های کیهانی، در سه زمینه مختلف امکان‌پذیر و حائز اهمیت است:

۱- مطالعه تأثیرات تخریبی تابش‌های فضایی روی خواص مکانیکی سرامیک‌ها و آلیاژها نظیر تردی و شکنندگی آن.

۲- بررسی آثار تخریبی تابش‌ها روی خواص الکتریکی قطعات الکترونیکی و تراشه‌ها که می‌تواند با تغییر در خواص نیمه‌رساناها، باعث از کار افتادن قطعه شود.

۳- تعیین آثار مخرب این تابش‌ها بر روی سلول‌های خورشیدی

در سال‌های اخیر تعدادی از محققان داخلی [۱۱-۱۰] به سمت شناخت، معرفی و استفاده از روش‌های طیف‌سنجی در سطح دانشگاهی روی آورده‌اند. یکی از مراکز علمی پیشگام، گروه فیزیک دانشگاه سیستان و بلوچستان است که از چند سال قبل مطالعه طیف‌سنجی نابودی پوزیترون و موضوعات مرتبط با آن را آغاز کرده است [۱۷-۱۲].

سیستم اندازه‌گیری طول عمر پوزیترون که با همکاری فنی شرکت نوین طیف ساخته شده، قدرت تفکیک زمانی حدود ۳۵۰ پیکوثانیه دارد و در حال حاضر برای بررسی ساختار الکترونی مواد عایق و پلیمری بسیار مناسب است. از شاخص‌ترین کاربردهای این سیستم می‌توان به بررسی ساختار مواد عایق با ضریب دی‌الکتریک کم اشاره کرد که در حال حاضر تحقیقات وسیعی در مورد آنها به منظور استفاده در مدارهای الکترونی با سرعت بسیار زیاد، صورت می‌پذیرد. همچنین در محیط‌هایی مانند محیط خارج از جو زمین، که در آن‌ها میزان تشعشعات ناشی از یون‌ها و پروتون‌ها با احتساب زمان مؤثر، گاهی به بیش از ده کیلو راد می‌رسد، نقص‌هایی در ساختار بلوری اجزای ماهواره‌ها همچون سلول‌های خورشیدی و غیره روی می‌دهد که با این روش ارزیابی می‌شوند.

سیستم تولید و انتقال باریکه پوزیترون حرارتی به‌منظور تولید باریکه‌های تک انرژی و قابل تنظیم، برای انجام مطالعات مربوط به سطح، زیرسطح یا عمق معینی از مواد، با حمایت مالی طرح‌های نوین وزارت صنایع، معدن و تجارت در حال گذراندن مراحل پایانی بهسازی میدان‌های مغناطیسی و مسیر انتقال باریکه است.

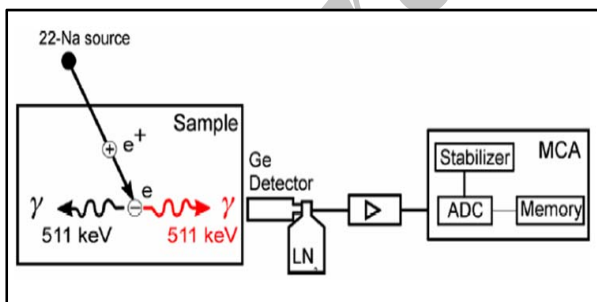
در این مقاله، ابتدا به معرفی روش‌های مختلف طیف‌سنجی نابودی پوزیترون و اصول کلی هر روش پرداخته و سپس مشخصات فنی سیستم اندازه‌گیری طول عمر نابودی پوزیترون و سیستم تولید و انتقال باریکه پوزیترون حرارتی گزارش می‌شود. در انتها مثال‌هایی

پهن‌شدگی دوپلری گاماهاى نابودی

با توجه به قوانین پایستگی انرژی و اندازه حرکت خطی، گاماهاى ناشی از نابودی می‌توانند اطلاعات مربوط به ساختار الکترونی و سطح فرمی مواد گوناگون را در اختیار آزمایشگر قرار دهند. با بررسی این قوانین می‌توان نشان داد که مؤلفه طولی اندازه حرکت خطی جفت الکترون- پوزیترون، p_L ، باعث پهن‌شدگی طیف انرژی در نزدیکی قله فوتوالکتریک ۵۱۱ کیلوالکترون‌ولت، به اندازه ΔE می‌شود. این پهن‌شدگی را پهن‌شدگی دوپلری می‌نامند و مقدار آن برابر است با:

$$\Delta E = \frac{p_L c}{2} \quad (2)$$

از آنجا که پوزیترون‌ها قبل از نابودی حرارتی می‌شوند، می‌توان آن‌ها را ساکن در نظر گرفت و اطلاعات مربوط به اندازه حرکت خطی جفت الکترون- پوزیترون را تماماً به الکترون نابود شده نسبت داد. از طرفی، نابودی پوزیترون از ترازهای متفاوت که ناشی از گیرافتادن احتمالی آن در ناکاملی‌های شبکه است، باعث ایجاد تغییراتی در شکل طیف می‌شود. پهن‌شدگی دوپلری گامای نابودی بسیار ناچیز است (در حدود چند keV) و برای مشاهده آن باید از آشکارسازهایی استفاده کنیم که پهنای انرژی‌شان در قله فوتوالکتریک بسیار کم باشد. برای این منظور از آشکارسازهای $Ge(Li)$ ، $Si(Li)$ و یا HPGe استفاده می‌شود. در ساده‌ترین روش، از چیدمان نشان داده شده در شکل (۲) استفاده می‌شود [۲۰]. گاماهاى نابودی وارد آشکارساز می‌شوند و تپ خروجی پس از تقویت به وسیله تقویت‌کننده، وارد تحلیل‌گر چندکاناله می‌شود. در مقایسه با روش تعیین طول عمر، نمونه باید در فاصله بیشتری از آشکارساز قرار گیرد تا اثرات مربوط به همپوشانی دو تپ، کمینه شود.



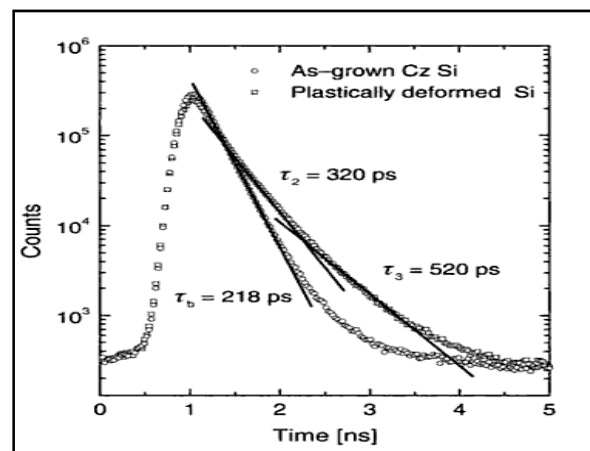
شکل ۲- چیدمان آزمایش تعیین پهن‌شدگی دوپلری با استفاده از یک آشکارساز HPGe

اندازه‌گیری همبستگی زاویه‌ای فوتون‌های نابودی

قوانین پایستگی انرژی و تکانه برای زوج الکترون- پوزیترون نابودشده، به‌واسطه مؤلفه‌ای از اندازه حرکت خطی جفت الکترون- پوزیترون که عمود بر راستای انتشار فوتون‌های نابودی است، ایجاب می‌کند که فوتون‌ها دقیقاً در یک راستا منتشر نشوند. انحراف

ضریب افزایشی چگالی الکترون در مکان پوزیترون است. فرمول‌های تناسبی متعددی برای $\gamma[n(r)]$ وجود دارد که با در نظر گرفتن اثرات چندجسمی و همبستگی الکترون-پوزیترون محاسبه شده‌اند [۱۸]. هنگامی که پوزیترون در حالت‌های متفاوت قرار می‌گیرد، چگالی‌های متفاوت الکترونی در مقابل خود می‌بیند که این مسئله در نهایت منجر به مقادیر متفاوتی برای طول عمر پوزیترون می‌شود. در عیوبی که به‌صورت جای خالی هستند، و در نتیجه پوزیترون در آن جا به دام افتاده، چگالی الکترونی به طور موضعی کاهش پیدا کرده و طول عمر پوزیترون به دام افتاده، بیشتر از پوزیترون آزاد در یک بلور کامل خواهد بود. هر چه ابعاد تهی‌جا بزرگ‌تر باشد، طول عمر پوزیترون به دام افتاده، بیشتر می‌شود.

تغییرات طول عمر پوزیترون در مواد گوناگون، به سبب تغییر در ساختار الکترونی ماده و همچنین تأثیرپذیری این مشخصه از عیوب موجود در ساختار بلوری، سبب شده که روش تعیین طول عمر، به یکی از پرکاربردترین زمینه‌های کاری در طیف‌سنجی پوزیترون تبدیل شود. در این روش، نوع و غلظت عیب به طور همزمان قابل اندازه‌گیری است چرا که این دو کمیت به طور مستقیم بر شدت و ثابت زمانی واپاشی طیف حاصل از نابودی، تأثیر می‌گذارند. بنابراین، تعداد مؤلفه‌ها، نرخ نابودی و شدت‌های نسبی آن‌ها مواردی است که در آزمایش تعیین طول عمر مورد بررسی قرار می‌گیرد. به عنوان مثال، در شکل (۱)، طیف حاصل از اندازه‌گیری طول عمر نابودی پوزیترون در یک نمونه سلیسیومی نمایش داده شده که در آن مقایسه بین دو وضعیت نمونه، یکی درست پس از تولید و دیگری پس از تغییر شکل پلاستیکی نمونه، انجام گرفته است. به وجود آمدن دو نوع عیب پس از انجام عملیات تغییر شکل پلاستیکی، سبب افزایش طول عمر پوزیترون در نمونه شده است [۱۹].

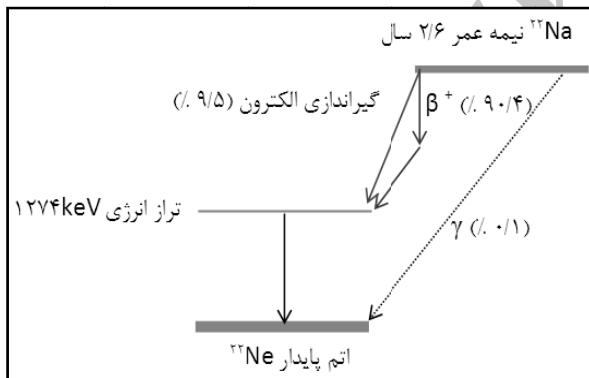


شکل ۱- منحنی به‌دست آمده در آزمایش تعیین طول عمر برای نمونه سلیسیوم بلافاصله پس از تهیه و پس از تغییر شکل پلاستیکی. به دلیل تشکیل عیب پس از عملیات تغییر شکل پلاستیکی، تعداد مؤلفه‌های طول عمر افزایش یافته است [۱۹].

چشم‌پوشی است و در نتیجه منحنی همبستگی زاویه‌ای، بیانگر توزیع p_z الکترون‌های نابود شده است.

دستگاه اندازه‌گیری طول عمر پوزیترون

به منظور اندازه‌گیری طول عمر پوزیترون در ماده، از یک چشمه ^{22}Na به عنوان گسیلنده پوزیترون استفاده می‌شود. در حدود $90/4\%$ درصد اتم‌های این ماده پرتوزا که نیمه عمری در حدود $2/6$ سال دارد، با گسیل یک پوزیترون به تراز برانگیخته ^{22}Ne تبدیل می‌شود و در حدود $9/5\%$ درصد از اتم‌ها نیز با گیراندازی الکترون به همان تراز ^{22}Ne می‌رسند. هسته ^{22}Ne برانگیخته، تقریباً بلافاصله با گسیل پرتوی گاما با انرژی 1274 کیلوالکترون‌ولت به حالت پایدار تبدیل می‌شود (شکل ۴). در واقع می‌توان متصور شد که تولید پوزیترون همزمان با گسیل این پرتوی گاما است. بنابراین با آشکارسازی هر پرتوی گاما با انرژی 1274 کیلوالکترون‌ولت به عنوان زمان تولد و ثبت یکی از پرتوهای نابودی پوزیترون، به عنوان زمان مرگ و اندازه‌گیری اختلاف زمانی این دو رویداد می‌توان طول عمر پوزیترون را ثبت کرد. با توجه به اینکه اختلاف زمانی بین این دو پرتو از مرتبه چند صد پیکو ثانیه است، بنابراین برای ثبت این بازه زمانی، نیاز به آشکارسازها و الکترونیک بسیار سریع داریم.



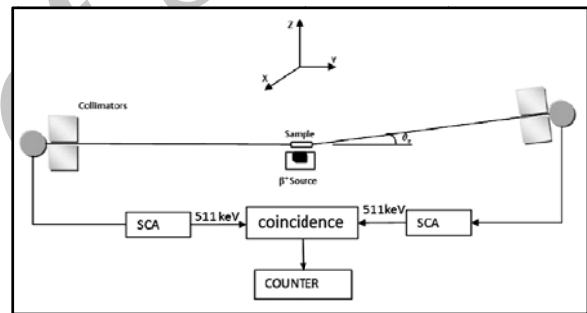
شکل ۴- نمودار شاخه‌ای واپاشی ^{22}Na . تقریباً 90% درصد پوزیترون‌ها، با گامای تولد همراه هستند.

طراحی سیستم و تشریح عملکرد هریک از اجزا

به منظور ثبت اختلاف زمانی بین لحظه تولد و نابودی پوزیترون در نمونه، از مدارهای مطابق شکل (۵) استفاده می‌شود. اولین نکته در مورد این سیستم، تهیه چشمه پوزیترون‌دهنده‌ای است که نابودی پوزیترون در درون آن حداقل باشد. به همین جهت مقدار کمی (در حدود 10 الی 20 میکرو کوری) از نمک پرتوزای $^{22}\text{NaCl}$ بین دو لایه بسیار نازک کپتون (با ضخامت کمتر از 5 میلی‌گرم بر

فوتون‌ها از یک راستا، به سبب تکانه خطی الکترون‌هاست. بنابراین تعیین این انحراف زاویه‌ای، متناظر با تعیین مؤلفه عرضی اندازه حرکت خطی الکترون‌های نمونه است.

در ساده‌ترین حالت، اندازه‌گیری همبستگی زاویه‌ای بین دو پرتو گامای نابودی، به وسیله سیستمی نظیر شکل (۳) انجام می‌شود. چشمه پوزیترون معمولاً ^{64}Cu ، ^{22}Na یا ^{58}Co با پرتوزایی بین ده میلی کوری تا یک کوری است. پوزیترون از چشمه به درون نمونه نفوذ می‌کند و در آنجا نابود می‌شود. فوتون‌های نابودی به طور همزمان و به وسیله شمارنده‌های سوسوزن NaI(Tl) ، که از مواجهه مستقیم با چشمه محافظت شده‌اند، آشکار می‌شوند. یکی از آشکارسازها، روی بازوی متحرکی قرار می‌گیرد تا اندازه‌گیری تعداد شمارش در زمان معین، در زوایای مختلف امکان‌پذیر باشد. موازی‌سازهای سربی در مقابل آشکارسازها، تفکیک‌پذیری زاویه‌ای ابزار را تعیین می‌کنند که به طور معمول کمتر از 1 میلی‌رادیان (متناظر با انرژی $0/25$ کیلوالکترون‌ولت) است.



شکل ۳- طرح‌واره دستگاه اندازه‌گیری همبستگی زاویه‌ای. برای به دست آوردن تفکیک‌پذیری زاویه‌ای بالا، آشکارسازها باید در فاصله چندمتری از هم قرار گیرند.

برای اندازه‌گیری زوایای انحراف کوچک، آشکارسازها با فاصله چندین متر از یکدیگر قرار می‌گیرند. برای به دست آوردن شمارش مناسب، آشکارسازها و شکاف‌ها در امتداد محور x ، تا جای ممکن طولانی انتخاب می‌شوند. در نتیجه انرژی تحلیل‌گر تک‌کاناله، برای فوتون‌های 511 کیلوالکترون‌ولت تنظیم شده است و دستگاه به راحتی تپ‌های همزمان را به عنوان تابعی از θ_z می‌شمارد. جمع‌آوری داده برای یک منحنی همبستگی زاویه‌ای با آمار قابل قبول، معمولاً نیازمند شمارش بیش از دو روز است. چیدمان موجود در شکل (۳) با توجه به شکل موازی‌سازها، هندسه شکاف طولانی نامیده می‌شود. دستگاه می‌تواند انحراف زاویه‌ای در راستای z را اندازه‌گیری کند و در نتیجه آهنگ شمارش برابر خواهد بود با [۲۱]:

$$N(\theta_z) = c \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} dp_x dp_y \rho(p_x, p_y, \theta_z m_0 c) \quad (3)$$

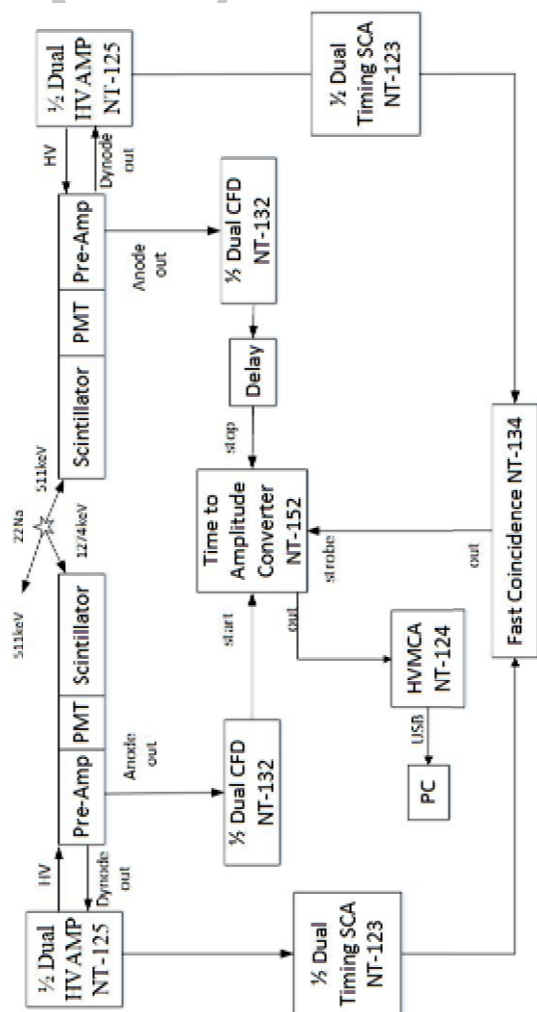
که در آن $\rho(p_x, p_y, p_z)$ توزیع تکانه جفت الکترون-پوزیترون نابود شده در درون نمونه است. همان‌طور که قبلاً هم به آن اشاره شد، وقتی پوزیترون در تعادل گرمایی با نمونه باشد، تکانه آن قابل

تپ آخرین داینود، مثبت اما نسبتاً کند است. این تپ که حاوی اطلاعات مربوط به انرژی پرتوی گامای ورودی به آشکارساز است پس از تقویت اولیه توسط مدار پیش تقویت کننده (که در داخل آشکارساز تعبیه شده است)، وارد نوعی مدار تقویت کننده شده و کاملاً گاوسی شکل می شود. این تپ سپس وارد یک تحلیگر تک کاناله زمانی که روی محدوده انرژی خاصی تنظیم شده، می شود. به این ترتیب با در نظر گرفتن رابطه نسبتاً خطی ارتفاع تپ با انرژی گاما، می توان آشکارساز را برای تشخیص ورود گاما با انرژی مورد نظر تنظیم کرد.

پس از اینکه یکی از آشکارسازها برای تشخیص ورود گامای ۱۲۷۴ کیلو الکترون ولت یعنی لحظه تولید پوزیترون تنظیم شد، خروجی ماژول CFD متناظر با آن آشکارساز به ورودی شروع مبدل اختلاف زمان به ولتاژ^۵ (TAC)، متصل می شود و خروجی CFD متناظر با آشکارساز دوم که بر روی انرژی ۵۱۱ کیلو الکترون ولت (یک گامای حاصل از نابودی پوزیترون) تنظیم شده، به ورودی توقف TAC وصل می شود. TAC می تواند بسته به تنظیمات مورد نظر کاربر، اختلاف زمانی بین تپ های شروع و توقف را در ناحیه ۱۰ نانو ثانیه تا ۲ میلی ثانیه و با دقت بهتر از ۱۰ پیکوثانیه به دامنه یک تپ ولتاژ تبدیل کند. این تپ ولتاژ که حاوی اطلاعات مربوط به اختلاف زمانی بین تپ های تولید شده در دو آشکارساز است، وارد مدار یک تحلیگر چند کاناله می شود. تحلیگر چند کاناله، می تواند ارتفاع تپ هایی که وارد آن می شوند را با دقت ۱۲ بیت یعنی یک در ۴۰۹۶ قسمت، تعیین کند. به این ترتیب با ترکیب ۲ عدد CFD، مقداری کابل هم محور برای ایجاد تأخیری معین در تپ شروع، یک عدد TAC و یک عدد MCA به همراه رایانه شخصی، اختلاف زمانی معادل ۷ پیکوثانیه را اندازه گیری و ثبت کرده ایم. اما در عمل و به هنگام کار با آشکارسازهای گاما، هرگز چنین قدرت تفکیکی برای تپ های خروجی از آشکارسازها به دست نمی آید. به این دلیل که باید به نحوی شرط انرژی نیز برای پرتوهای گامای ورودی و تپ های شروع و توقف در نظر گرفته شود. همانگونه که پیشتر ذکر شد، ماژول های CFD تنها قادر به تعیین لحظه تشکیل تپ هستند و اطلاعات انرژی را از تپ آن استخراج نمی کنند. برای این منظور از یک مدار تشخیص هم زمانی مطابق شکل (۵) استفاده می شود. این مدار با قدرت تفکیک ۱۰ نانو ثانیه قادر است هم زمانی بین تپ های خروجی از دو تحلیگر تک کاناله را تشخیص دهد. به این صورت که هرگاه آشکارساز مربوط به انرژی ۱۲۷۴ keV ورود این گاما را توسط SCA تشخیص داد و به ماژول تشخیص هم زمانی اعلام کرد، تنها در صورتی که در بازه ۱۰ تا ۱۰۰ نانو ثانیه قبل و بعد از این تپ، آشکارساز دوم ورود گامای ۵۱۱ کیلو الکترون ولت را از طریق تحلیگر

سانتی متر مربع) قرار داده شد. سپس دو قطعه یکسان از ماده مورد آزمایش، در دو طرف این مجموعه قرار گرفت.

هنگامی که یک پرتوی گاما وارد آشکارساز سوسوزن شود، نور مرئی تولید شده توسط آشکارساز - که تعداد فوتون های آن متناسب با انرژی بجا مانده از گاما در داخل آشکارساز است - به لامپ تکثیر کننده فوتونی می رسد و تعدادی الکترون از فوتوکاتد کنده می شود. سپس این الکترون ها در داخل لامپ تکثیر شده و در نهایت تپ خروجی آشکارساز به دست می آید. تپ پایه آند تکثیر کننده، دارای قطبیت منفی با زمان صعودی در حدود ۰/۶ نانو ثانیه است که از آن برای ثبت لحظه ورود پرتوی گاما استفاده می شود. این تپ بدون هیچگونه تغییری وارد یک ماژول تحلیل گر کسر ثابت^۴ یا CFD می شود. این ماژول قادر است لحظه ورود تپ های مختلفی که دامنه آنها به نسبت ۱ تا ۱۰۰ برابر یکدیگر متغیرند، را با یک تأخیر ثابت به طور نسبتاً یکسان (با تفاوت کمتر از ± 40 پیکوثانیه) آشکار نماید.



شکل ۵- طرح واره کلی سیستم اندازه گیری طول عمر پوزیترون

5. Time to Amplitude Converter

4. Constant Fraction Discriminator

سیستم تولید و انتقال باریکه پوزیترون حرارتی

به منظور مطالعه لایه‌های سطحی، زیرسطحی و همچنین عمق معینی از نمونه، نیاز به باریکه‌ای از پوزیترون‌های کم انرژی داریم که اولاً انرژی آن‌ها کم و قابل تنظیم باشد (از مرتبه کیلو الکترون ولت) و ثانیاً پهنای انرژی آن‌ها محدود باشد تا متناظر با آن، گستره معینی از عمق نمونه، مورد مطالعه قرار گیرد. به همین منظور، سیستم تولید باریکه پوزیترون حرارتی، با حمایت مالی طرح‌های نوین وزارت صنعت معدن و تجارت، و همکاری فنی شرکت‌های داخلی در دانشگاه سیستان و بلوچستان طراحی و ساخته شده است.

در این سیستم، پوزیترون‌های یک چشمه پرتوزا وارد کندکننده می‌شوند. فرآیند کندکنندگی، بر این اصل استوار است که تابع کار پوزیترون، Φ_+ ، در سطح بسیاری از جامدات، منفی است. ضخامت کندکننده به مراتب کمتر از میانگین عمق نفوذ است و بنابراین، کسر کوچکی از پوزیترون‌ها درون کندکننده حرارتی شده و برای آن‌ها پدیده پخش رخ می‌دهد. اگر طی فرایند پخش، سطح کندکننده غنی از پوزیترون شود، پوزیترون‌ها به طور خود به خودی از سطح به بیرون فرار می‌کنند. انرژی این پوزیترون‌ها، برابر با تابع کار پوزیترون درون ماده کندکننده به علاوه انرژی حرارتی پوزیترون است. عناصر با عدد اتمی بالا برای کندکنندگی مناسب هستند چرا که نسبت طولی میانگین انتشار به فاصله حرارتی شدن، در آن‌ها بیشتر است. به عنوان مثال، ورقه تنگستن تک بلوری با ضخامت چند میکرومتر که جهت‌گیری آن در راستای (۱۰۰) است، انتخاب مناسبی برای کندکننده است. از آنجا که ممکن است پوزیترون طی فرایند انتشار در کندکننده درون ناکاملی‌های شبکه به دام بیفتد، باید تعداد تله‌های پوزیترون در نمونه، تا حد امکان کم باشد. برای این منظور، عیوب موجود در ورقه را طی فرایند بازپخت، تا حد ممکن از بین می‌برند. تابع کار سطح تنگستن، $\Phi_+ = -3.0 eV$ است و کارایی کندکننده‌ها با استفاده از ورقه‌های تنگستنی، تا 3×10^{-3} گزارش شده است [۲۲]. برخی از مهم‌ترین ویژگی‌های باریکه‌های پوزیترونی در مقایسه با چشمه‌های پرتوزا را می‌توان چنین برشمرد:

۱. پوزیترون‌ها انرژی معین و قابل تنظیم دارند. بنابراین می‌توان با تنظیم انرژی، عمق معینی از نمونه را مورد مطالعه قرار داد. از طرفی، برای مطالعه لایه‌های نازک، سطح و مناطق نزدیک به سطح به پوزیترون‌های کم انرژی احتیاج داریم. پوزیترون‌های ساطع شده از دستگاه تولید پوزیترون حرارتی برای این مطالعات مفید هستند. برای پوزیترون‌های تک انرژی، مشخصه توقف به صورت مشتق یک تابع گاوسی تعریف می‌شود [۲۳]:

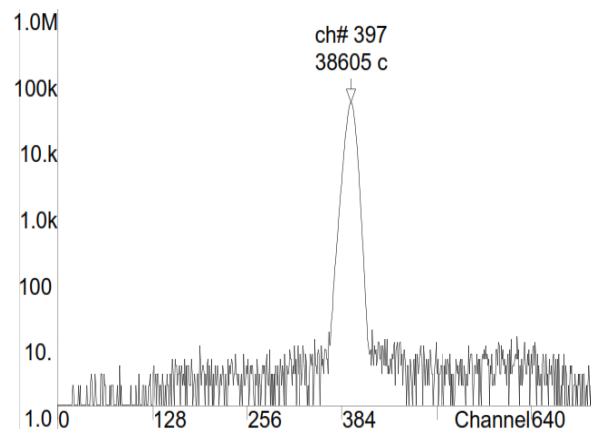
تک‌کاناله خود اعلام کند، این ماژول سیگنالی در خروجی ظاهر می‌کند که به مدار TAC اجازه تبدیل اختلاف زمان به ولتاژ را می‌دهد. بنابراین ترکیب ماژول‌های مربوط به بخش زمان و بخش انرژی می‌تواند تا حد زیادی تضمین کند، تپ‌هایی که با اختلاف زمانی آن‌ها اندازه‌گیری شده است مربوط به تولید و نابودی پوزیترون است. تصویر ماژول‌های الکترونیکی به همراه آشکارسازهایی از نوع سوسوزن پلاستیکی سریع، در شکل (۶) دیده می‌شوند.



شکل ۶- ماژول‌های الکترونیکی سیستم اندازه‌گیری طول عمر پوزیترون

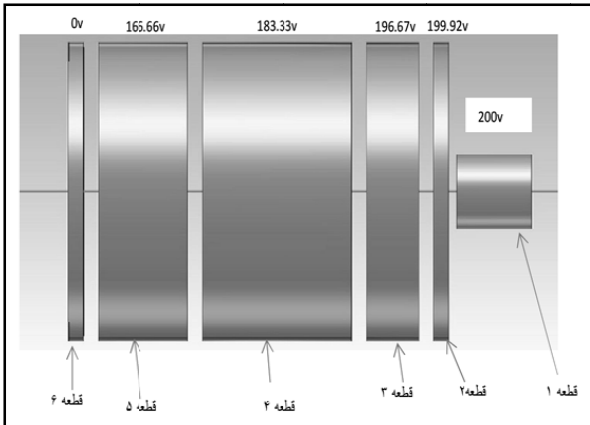
اندازه‌گیری قدرت تفکیک زمانی

به منظور تعیین قدرت تفکیک زمانی سیستم از یک چشمه ^{60}Co با فعالیت حدود ۱۰ میکروکوری استفاده شد. پس از کالیبره کردن مجموعه ماژول‌های CFD، TAC، MCA توسط کابل‌های تأخیردهنده تپ، هر کانال در MCA در مد ۱۰۲۴ کانالی، معادل ۲۷/۵ پیکوثانیه به دست آمد. سپس به مدت ۴۰۰۰۰ ثانیه طیف زمانی مربوط به همزمانی پرتوهای گامای ۱۱۷۳ کیلو الکترون‌ولت و ۱۳۳۲ کیلو الکترون‌ولت چشمه کبالت جمع‌آوری و ثبت شد. با توجه به طیف به دست آمده که در شکل (۷) نمایش داده شده است، عرض نیم پهنای در واقع قدرت تفکیک زمانی برای این سیستم در حدود ۱۲ کانال یعنی معادل ۳۳۰ پیکوثانیه به دست آمده است.



شکل ۷- طیف زمانی جمع‌آوری شده حاصل از چشمه ^{60}Co

هدایت‌کننده می‌شوند. طرح کلی این لنز در شکل (۸) نمایش داده شده است.



شکل ۸- طرح کلی لنزهای استخراج‌کننده پوزیترون [۱۷]

سپس باریکه پوزیترونی وارد لوله‌ای خمیده می‌شود. در این مرحله، مسیر پوزیترون‌های کم انرژی به کمک ۲۳ عدد سیم لوله مشابه که با آرایش خاصی در امتداد لوله قرار گرفته‌اند، از مسیر پوزیترون‌های پرانرژی جدا می‌شود. شعاع انحنای پوزیترون‌های پرانرژی کم است و بنابراین، اگر به هر دلیل پوزیترون‌های سریع وارد محفظه شوند، نمی‌توانند بر روی همان مسیر پوزیترون‌های کم انرژی حرکت کنند و در نهایت باریکه پوزیترون خروجی، تکفام می‌شود. با توجه به اینکه پوزیترون‌های کم انرژی به راحتی توسط میدان مغناطیسی زمین یا میدان‌های مغناطیسی احتمالی موجود در آزمایشگاه، منحرف می‌شوند، حفاظت باریکه در مقابل این میدان‌ها، بسیار حائز اهمیت است. به همین جهت، در مسیر حرکت پوزیترون و در مکان‌های معین، دو پیچ هلمهولتز تعبیه شده که تأثیرپذیری مسیر حرکت پوزیترون از میدان مغناطیسی زمین را اصلاح می‌کند. در نهایت، باریکه خروجی به سمت اتاقک تابش نمونه هدایت می‌شود. اتاقک به گونه‌ای طراحی شده که به طور همزمان چهار نمونه در آن قرار می‌گیرد. هر نمونه می‌تواند به طور مجزا و در زمان دلخواه، مورد تابش قرار گیرد. تمامی اجزاء از جمله محفظه چشمه، کندکننده، لنزهای استخراج، لوله هدایت‌گر و اتاقک تابش نمونه، همگی در خال بالا قرار می‌گیرند.

فرایند ایجاد خال به صورت تمام اتوماتیک و توسط پمپ‌های توربو و روتاری انجام می‌شود. این سیستم توانایی ایجاد خال در گستره 10^{-6} میلی‌بار را دارد که برای عبور پوزیترون مناسب است. طرح کلی و محل قرارگرفتن سیم لوله‌ها و پیچ‌های هلمهولتز در شکل (۹) نشان داده شده است [۱۷].

$$p(x) = -\frac{d}{dx} e^{-(x/x_0)^2} \quad (۴)$$

میانگین عمق توقف برابر است با:

$$\bar{x} = 0.886x_0 = AE^n [keV] \quad (۵)$$

که در آن E انرژی پوزیترون است و

$$A = \frac{4}{\rho} \mu g/cm^2, \quad n \cong 1.6 \quad (۶)$$

این روابط بیان می‌دارد که برای نفوذ پوزیترون در عمق مشخصی از ماده، کافی است انرژی پوزیترون را تنظیم کنیم. بسته به انرژی پوزیترون‌های فرودی، میانگین عمق نفوذ از یک نانومتر تا چند میکرومتر تغییر می‌کند. باریکه‌ای از پوزیترون‌ها با انرژی ۲۰ کیلو الکترون‌ولت، دو میکرومتر در سیلیسیم و یک میکرومتر در گالیوم آرسناید نفوذ می‌کنند.

۲. باریکه را می‌توان به مقطع معینی از هدف تابانید. امروزه با پیشرفت فناوری تولید باریکه‌های پوزیترونی، باریکه‌هایی با پهنای یک میکرومتر تولید می‌شوند که از این باریکه‌ها می‌توان در انواع مختلف میکروسکوپ‌های پوزیترونی استفاده کرد.

۳. در چشمه‌های پرتوزا، بسته به ضخامت چشمه و پوشش آن، همواره کسر معینی از پوزیترون‌ها درون خود چشمه نابود می‌شوند. اما هنگامی که از باریکه‌ها استفاده می‌کنیم، می‌توان با بهره‌گیری از یک اتاقک خال و انتقال پوزیترون، مطمئن بود که نابودی مورد مطالعه، درون نمونه اتفاق می‌افتد. این کاهش زمینه، سبب می‌شود که تحلیل اطلاعات ساده‌تر و نتایج، قابل اعتمادتر باشند.

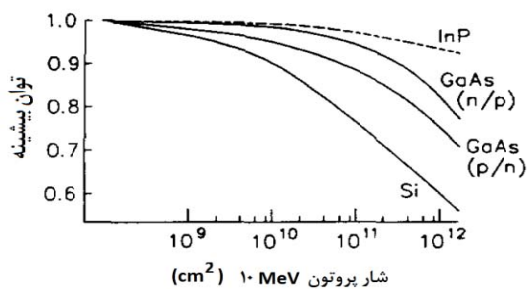
۴. چشمه‌های پوزیترونی نیمه عمر معین و محدود دارند. در بعضی موارد ممکن است نیمه عمر چشمه با زمان انجام آزمایش قابل مقایسه باشد که موجب تغییراتی در پایداری سیستم می‌شود. با استفاده از باریکه‌های الکترونی به منظور تولید باریکه پوزیترونی، می‌توان شدت باریکه را تحت کنترل داشت.

طراحی و ساخت سیستم تولید باریکه پوزیترون حرارتی

این سیستم هم اکنون مراحل پایانی بهینه‌سازی اجزاء را سپری می‌کند. در این سیستم، از دو میلی کوری ماده پرتوزای ^{22}Na به عنوان چشمه تولید پوزیترون استفاده می‌شود. پوزیترون‌ها به سمت کندکننده تنگستن بس بلور با ضخامت ده میکرومتر تابیده می‌شوند. پوزیترون‌های کند شده در کندکننده، با استفاده از لنزهای الکترواستاتیک، از کندکننده جدا شده و تا انرژی معینی شتاب می‌گیرند. شبیه‌سازی‌های انجام شده توسط نرم‌افزار CST، استفاده از یک لنز شش قسمتی به طول ۵ سانتی‌متر را پیشنهاد می‌کند. اختلاف پتانسیل بین ابتدا و انتهای لنز، ۲۰۰ الکترون‌ولت است. بنابراین، با فرض اینکه انرژی اولیه پوزیترون‌ها در حدود ۵eV باشد، باریکه پوزیترون‌های خروجی با انرژی ۲۰۵ الکترون‌ولت وارد لوله

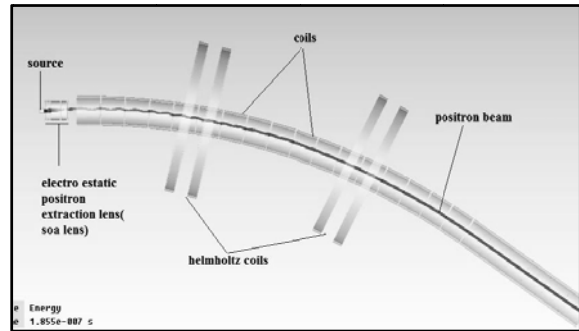
بررسی تأثیرات تابش بر سلول‌های خورشیدی

در سال‌های اخیر، همواره از سلول‌های خورشیدی به عنوان عمده‌ترین منبع تعیین انرژی الکتریکی لازم برای سفینه‌های فضایی استفاده شده است [۲۴]. رویارویی مستقیم سلول‌ها با پرتوهای مخرب، ممکن است با گذشت زمان، باعث تغییر در بازدهی سلول و حتی از کار افتادن آن شود. بنابراین، شناخت جامع و اساسی از نحوه تأثیرپذیری این پیوندگاه‌ها از تابش‌های فضایی، امری حیاتی است. به طور کلی می‌توان گفت که تابش‌ها سبب ایجاد عیب در ساختار نیمه رسانا می‌شود. این عیوب به عنوان مراکز بازجذب در ماده عمل می‌کنند و با جذب حامل‌ها، موجب کاهش بازدهی سلول خورشیدی می‌شود. به بیان دقیق‌تر، بازدهی سلول‌های خورشیدی، تابعی از چگالی عیوب، سطح مقطع گیراندازی حامل‌ها توسط عیب و همچنین موقعیت مکانی عیب نسبت به باند رسانش در نیمه‌رساناست [۲۴]. اما تأثیرات تابشی بر روی مواد و حتی پیکربندی‌های مختلف از یک نیمه‌رسانا، به دلیل تفاوت در نوع و آهنگ ایجاد عیب در ماده، با هم متفاوت است و تلاش برای دستیابی به مواد و پیکربندی مناسب به منظور دستیابی به سلول‌های خورشیدی با بازدهی بالاتر و مقاومت پرتویی بیشتر، بسیار حائز اهمیت است. به عنوان مثال، بررسی تأثیر تابش‌های پروتونی بر روی سلول‌های خورشیدی مختلف که در آن‌ها از نیمه‌رساناهای معروف GaAs, Si (پیکربندی‌های n-p و p-n) و InP استفاده شده است، به وضوح نشان می‌دهد که مقاومت پرتویی InP در مقایسه با سایر نمونه‌ها بیشتر است. این مطلب با رسم نمودار توان خروجی سلول بر حسب میزان دز تابش دریافتی توسط پروتون‌های ۱۰ مگا الکترون‌ولت در شکل (۱۲) نشان داده شده است [۲۵].



شکل ۱۲- نمودار تغییرات توان خروجی بر حسب شار پروتون تابشی روی نیمه‌رساناهای مختلف [۲۵]

روش‌های مختلفی برای اندازه‌گیری مستقیم پارامترهای خروجی سلول‌ها از جمله ولتاژ و توان خروجی و میزان پایداری این پارامترها و در نهایت تأثیرپذیری این مشخصه‌ها از تابش‌های مختلف وجود دارد، اما روش طیف سنجی پوزیترون با درون‌یابی منشأ این تغییرات و تعیین وابستگی پارامترهای خروجی با نوع، غلظت و محل تمرکز



شکل ۹- نحوه قرار گرفتن سیم‌لوله‌ها و پیچ‌های هلمهولتز به منظور هدایت صحیح باریکه [۱۷]

تصویر بدنه اصلی دستگاه شامل اتاقک چشمه، لوله انتقال باریکه، اتاقک نمونه و پمپ‌های خلأ در شکل (۱۰) نمایش داده شده است. شکل (۱۱) تصویری از صفحه کنترل دستگاه را نمایش می‌دهد که با کمک این صفحه می‌توان پارامترهای مختلف دستگاه از جمله فشار هوا در قسمت‌های مختلف، موقعیت دریچه‌های کنترل وضعیت پمپ‌های توربو و روتاری را مشاهده و کنترل کرد. کنترل میدان‌های الکتریکی و مغناطیسی، جریان‌ها و ولتاژهای مورد نیاز نیز توسط این صفحه انجام می‌گیرد.



شکل ۱۰- تصویری از بدنه اصلی سیستم تولید باریکه پوزیترون حرارتی



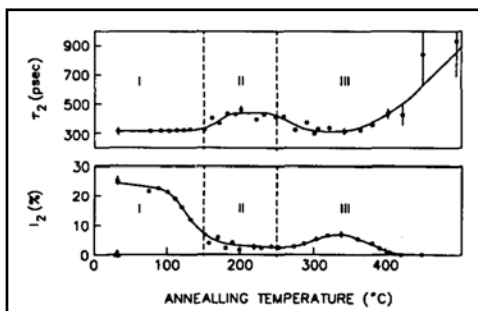
شکل ۱۱- صفحه کنترل سیستم تولید باریکه پوزیترون حرارتی

در شکل (۱) نمایش داده شده است. به عنوان مثال، می‌توان به بررسی تأثیر دمای بازپخت بر روی نمونه سیلیکونی که تحت تأثیر تابش نوترونی قرار گرفته است اشاره کرد. اطلاعات مورد نیاز برای مطالعه این نمونه در جدول (۱) آورده شده است.

جدول ۱- مقادیر اندازه‌گیری شده برای نابودی پوزیترون سیلیکون [۲۴]

Defect	Life Time (ps)
Bulk	222±2
Monovacancy	266±10
Divacancy	325±20
Quadrivacancy	435±30
Hexavacancy	525≈
Oxygen interstitials	100≈
Oxygen-vacancy complexes	240≈

اندازه‌گیری‌های مربوط به آزمایش تعیین طول عمر پوزیترون نشان می‌دهد که دو مؤلفه طول عمر برای نمونه پس از تابش وجود دارد [24]: $\tau_1 = 226$ پیکوثانیه با شدت $I_1 \approx 76\%$ و $\tau_2 = 325$ پیکوثانیه با شدت $I_2 \approx 24\%$ با توجه به جدول (۱)، $\tau_1 = 226$ پیکوثانیه مربوط به نابودی درون خود سیلیسیم و $\tau_2 = 325$ پیکوثانیه مربوط به نابودی پوزیترون‌های به دام افتاده در جاهای خالی دوتایی است. شکل (۱۴) نشان می‌دهد که بعد از ۲۰ دقیقه بازپخت، τ_2 و I_2 مشخصاً تغییر می‌کنند. با توجه به رفتار بازپخت، می‌توان محدوده تغییرات را به سه قسمت تقسیم کرد. در مرحله اول (دمای ۳۰ تا ۱۵۰ درجه سانتی‌گراد) τ_2 تغییر نمی‌کند ولی مقدار I_2 تا ۷٪ کاهش می‌یابد. این فرایند متناظر با بازترکیب عیوب توسط اتم‌های بین شبکه‌ای است. مرحله دوم (۱۵۰ تا ۲۵۰ درجه سانتی‌گراد) با تغییر در مقدار τ_2 تا مقدار میانگین ۴۳۵ پیکوثانیه همراه است که به معنی تغییر در نوع عیب است. این رفتار به سبب حرکت جاهای خالی دوتایی و تشکیل جاهای خالی چهارتایی است. با بالاتر رفتن دما و عبور از مرز ۲۶۰ درجه، بار دیگر τ_2 کاهش می‌یابد و به مقدار اولیه‌اش برای جاهای خالی دوتایی نزدیک می‌شود. این مسئله به دلیل شکستن پیوندهای چهارتایی و تبدیل آن به جاهای خالی دوتایی است. این فرایند تا ۳۴۰ درجه ادامه دارد و کاهش مقدار I_2 در دماهای بالاتر از ۳۴۰ درجه و رسیدن به مقدار صفر، نشان‌دهنده بازترکیب کامل عیوب است.



شکل ۱۳- طول عمر نابودی پوزیترون و شدت عیوب در نمونه سیلیکونی بعد از ۲۰ دقیقه بازپخت. خطوط عمودی مرحله‌بندی دمایی را مشخص می‌کند [۲۴].

عیب، اطلاعات مفیدی در اختیار آزمایشگر قرار می‌دهد. بدیهی است که با شناخت نوع و نحوه ایجاد عیب، می‌توان روش‌هایی برای جلوگیری یا حتی بازترکیب آن، ارائه کرد. همچنین، استفاده از باریکه‌های پوزیترونی به منظور تعیین مکان عیب نسبت به سطح، ضروری است. همانگونه که قبلاً اشاره کردیم، با تنظیم انرژی باریکه پوزیترون، مطابق رابطه (۵) می‌توان عمق نفوذ پوزیترون را تعیین کرد و در نهایت اطلاعات به دست آمده را به سطح یا لایه معینی در فاصله مشخص نسبت به سطح، نسبت داد.

برای بررسی عیوب به روش پهن‌شدگی دوپلری، معمولاً از مشخصه S استفاده می‌شود که به صورت تعداد شمارش‌ها در محدوده معینی از مرکز طیف نسبت به شمارش در کل طیف، تعریف می‌شود. این قسمت از طیف، مربوط به نابودی پوزیترون با الکترون‌های لایه والانس است. هنگامی که پوزیترون درون عیب به دام می‌افتد، احتمال نابودی آن با الکترون‌های لایه ظرفیت بیشتر می‌شود که این مسئله موجب افزایش مشخصه S در نمونه حاوی عیب می‌شود. به طور کلی، مشخصه S اندازه‌گیری شده، مربوط به جمع وزنی مشخصه‌های مربوط به نابودی از ترازهای مختلف است یعنی:

$$S_M = f_b S_b + \sum_i f_i S_i \quad (7)$$

که در آن زیرنویس‌های M و b به ترتیب مربوط به مقادیر اندازه‌گیری شده و نمونه بدون عیب است. f نشان‌دهنده کسر نابودی در تراز است و جمع بر روی i نوع عیب بسته می‌شود. این تحلیل در مواردی که یک نوع عیب بیشترین غلظت را دارد، بسیار کاربردی است که در این حالت می‌توان رابطه (۷) را اینگونه بازنویسی کرد:

$$S_M = (1 - f_t) S_b + f_t S_t \quad (8)$$

که در آن پایین نویس t مربوط به پوزیترون به دام افتاده در عیب است. از آنجا که S_t بزرگ‌تر از S_b است (و البته هر دو ثابتند) بنابراین افزایش S_M نشان‌دهنده افزایش f_t و بنابراین غلظت عیب است.

با استفاده از روش دیگر طیفسنجی پوزیترون یعنی تعیین طول عمر نیز می‌توان به طور مشابه عیوب مختلف را شناسایی و غلظت نسبی آن‌ها را تعیین کرد. این کار را می‌توان با برازش تابعی به شکل

$$N(t) = \sum_i I_i \exp(-t/\tau_i) \quad (9)$$

بر روی منحنی به دست آمده از اندازه‌گیری طول عمر پوزیترون، انجام داد. در رابطه اخیر، I_i و τ_i به ترتیب شدت و طول عمرهای اندازه‌گیری شده هستند. پایین نویس i را می‌توان به کریستال بدون عیب یا هر یک از عیوب نسبت داد. همچنین، مقادیر مربوط به طول عمر مربوط به نمونه بدون عیب و همچنین طول عمر پوزیترون در هر نوع عیب را می‌توان به صورت تجربی یا با استفاده از مدل‌های تئوری تعیین کرد. بنابراین، با معلوم بودن اطلاعات مربوط به τ_i ‌ها، می‌توان نوع و شدت عیوب را تعیین کرد. نمونه‌ای از این اندازه‌گیری

نتیجه گیری

۱. با توجه به قدرت تفکیک زمانی، سیستم اندازه گیری طول عمر پوزیترون دانشگاه سیستان و بلوچستان، به سادگی می توان نوع و شدت نواقص احتمالی ایجاد شده در ساختار مواد، ناشی از انواع تابش در محیط هایی همچون جو زمین و مافوق آن را تخمین زد. بنابراین معرفی این سیستم به کاربران بالقوه و توسعه نرم افزاری و سخت افزاری، به ویژه بهبود قدرت تفکیک زمانی آن، از اقدامات آتی نویسندگان این مقاله است.
۲. استفاده از باریکه های پوزیترونی، مطالعه سطح یا عمق معینی از نمونه را ممکن می سازد. بنابراین، استفاده از این باریکه ها برای مطالعه قطعات نیمه رسانا که معمولاً از قرار گرفتن چندین لایه بر روی یکدیگر تشکیل می شود، ضروری است. همچنین با توجه به اینکه قدرت نفوذ تابش های مخرب تابعی از انرژی آن هاست، در مواردی که عیوب تنها در گستره معینی از عمق نمونه تولید می شوند، نیاز به استفاده از باریکه های پوزیترونی به منظور مطالعه عمق معین، اجتناب ناپذیر است.

مراجع

- [9] Singh, J. J., Holt, W. H. and Mock, W., "Positron Annihilation Spectroscopy with Magnetically Analyzed Beams," *NASA Langley Research Center*, TM-84535, 1982.
- [10] Esmizade, E., RazaviNoori, M. and Kalati, V. A., "Positron Annihilation Life-time Spectroscopy (PALS), Introduction and Applications in Polymer Science," *Journal of Educationalpolymerization*, Research of the Second Year, No.1, pp. 22-29, 1391.
- [11] Abedy, S. and Shirani, A., "Positron Life Time Measurement in Al Using a Coincidence System," *Iranian Physics Conference Proceedings*, No. 981, 1390.
- [12] Nezhad Basaidu, A., GEANT4 Simulation of a Coincidence System for Positron Annihilation Gamma Spectroscopy in Material, (M. Sc. Thesis), University of Sistan & Baluchestan, Jan. 2010.
- [13] Khaghani, M., Study of Positron Spectroscopy Methods and Development of Instrumentation for Doppler Broadening Technique, (M. Sc. Thesis), University of Sistan & Baluchestan, Jan.2010.
- [14] Nikoo, H., Simulation of ^{22}Na Positron Source Producing with Proton Beam below 30 MeV Energies in MCNPX, (M. Sc. Thesis), University of Sistan & Baluchestan, Feb. 2012.
- [15] Shamsaddiny-Lory, S., "Positron Annihilation Life-time Spectroscopy of Bulk Samples and Operating the Set-up," (M. Sc. Thesis), University of Sistan & Baluchestan, Feb. 2012.
- [16] Fattah-Moghadam-Talemi, L., Experimental Study of Wolfarm as a Positron Moderator, (M. Sc. Thesis), University of Sistan & Baluchestan, Feb. 2012.
- [17] Mohammadi-Dadkan, M., Calculation the Technical Details and Design a Bending Magnetic Transmission System for Transfer Slow Positron, (M. Sc. Thesis), University of Sistan & Baluchestan, Jan. 2013.
- [18] Puska, M. J. and Nieminen, R. M., "Theory of Positrons in Solids and on Solid Surfaces," *Reviews of Modern Physics*, Vol. 66, No. 3, 1994, p. 841.
- [19] Krause-Rehberg, R. and Leipner, H. S., *Positron Annihilation in Semiconductors*, Springer-Verlag Berlin Heidelberg New Yourk, 1999.
- [20] Mehmandoost-Khajah-Dad A. A., Mahjour-Shafiei, M. and Khaghani, M., "Development of a Doppler Broadening Positron Spectroscopy Setup and Relative Positron-Electron Momentum Distribution Measurement for Commercial Al," *Journal of Theoretical and Applied Physics*, Vol. 4, No. 4, 2011, pp. 9-12.
- [21] West, R. N., et.al, *Positron in Solids*, Edition P. Hautojarvi, Springer, Heidelberg, 1979.
- [22] Vehanen, A., Lynn, K. G., Schutz, P. J. and Eldrup, M., "Improved Slow-Positron Yield Using a Single Crystal Tungsten Moderator," *Applied Physics A*, Vol. 32, No. 3, 1983, p. 163
- [23] Stavola, M., *Identification of Defects in Semi-Conductors*, Academic Press, 1998.
- [24] Rohatgi, A., et. al, "A Review of Selected Techniques for Characterizing Radiation-Induced Defects in Solar Cells," *Solar Cells*, Vol. 31, No. 4, 1991, pp. 379-394.
- [25] Connors. D. C. and West. R. N., "Positron Annihilation and Defects in Metals," *Physical Letter A*, Vol. 30, No.1, 1969, p. 24.
- [1] Paul, D. A. L. and Saint-Pierre, L., "Rapid Annihilations of Positrons in Polyatomic Gases," *Physical Review Letters*, Vol.11, No. 11, 1963, pp.493-496.
- [2] Singh J. J., "Microstructural Characterization of Polymers with Positrons", *NASA Langley Research Center*, TM-110469, 1996.
- [3] Singh, J. J., Pater, R. H. and Eftekhari, A., "Microstructural Characterization of Semi-Interpenetrating Polymer Networks by Positron Life-time Spectroscopy," *NASA Langley Research Center*, TP-3617, 1996.
- [4] Singh, J. J., Sprinkle, D. R. and Eftekhari, A., "Positron Lifetime Spectroscopy for Investigation of thin Polymer Coatings", *NASA Langley Research Center*, TM-4421, 1993.
- [5] Semiconductor Device Laboratory Annual Report, "Theoretical and Experimental Studies of Radiation-Induced Damage to Semiconductor Surfaces and the Effects of this Damage on Semiconductor Device Performance", *NASA Grant NsG-588*, 1965.
- [6] Tuomisto, F., *Defect Characterization in Semiconductors with Positron Annihilation Spectroscopy*, Springer Handbook of Crystal Growth, 2010.
- [7] Weiss, A., Koymen, A. R., Mehl, D., Jensen, K. O., Lei, C. and Lee, K. H., "Positron Annihilation Induced Auger Electron Spectroscopy," *NASA Goddard Space Flight Center*, CP-3058, 1990, pp. 289-291.
- [8] Singh, J. J. and Eftekhari, A., "Investigation of Oxygen-Induced Quenching of Phosphorescence in Photoexcited Aromatic Molecules by Positron Annihilation Spectroscopy," *NASA Langley Research Center*, TP-3619, 1996.