

طیف‌سنجی طول عمر نابودی پوزیترون در نانوپودرهای فریت نیکل و اکسید آهن

سید مرتضی عسگریان و زهره کارگر

بخش فیزیک، دانشکده علوم، دانشگاه شیراز، شیراز

پست الکترونیکی: kargar@shirazu.ac.ir

(دریافت مقاله: ۱۳۹۵/۰۷/۲۹؛ دریافت نسخه نهایی: ۱۳۹۷/۰۹/۱۲)

چکیده

در این پژوهش طیف‌سنج طول عمر نابودی پوزیترونی راه اندازی و توان تفکیک آن بهینه شد. این طیف‌سنج از نوع سریع-کند بوده و دارای توان تفکیک زمانی 250 ps است. برای تحلیل طیف طول عمر نابودی پوزیترون به دست آمده و استخراج مؤلفه‌های طول عمر و شدت‌های آنها از نرم‌افزار پاسکوال استفاده شده است. پوزیترون‌ها از یک چشمه رادیواکتیو $^{22}\text{NaCl}$ به شدت $20 \mu\text{Ci}$ که در ورق مایلاری به ضخامت $7 \mu\text{m}$ بسته‌بندی شده، تولید می‌شوند. به منظور تعیین تصحیحات مربوط به چشمه، اندازه‌گیری طیف طول عمر پوزیترون در قطعه‌های آلومینوم بدون عیب و ورق‌های مایلار انجام شدند. طیف طول عمر نابودی پوزیترون در نانوپودرهای فریت نیکل و اکسید آهن اندازه‌گیری شدند. کوتاه‌ترین مؤلفه به نابودی پوزیترون‌های ناجایگزیده در نمونه نسبت داده شد. مؤلفه طول عمر میانی ناشی از نابودی پوزیترون در حفره‌های کاتیونی هشت وجهی و چهاروجهی در ساختار اسپینل نمونه‌ها و مقداری هم به نابودی پوزیترون در سطح نانوذرات و خوشه‌های حفره‌ای نسبت داده شد. بلندترین مؤلفه طول عمر ناشی از نابودی برگنش اورتوپوزیترونیم در حفره‌های بزرگ بین ذرات پودرها است.

واژه‌های کلیدی: طیف‌سنجی طول عمر نابودی پوزیترون، نانوپودر فریت نیکل، نانوپودر اکسید آهن، جایگاه‌های هشت وجهی و چهاروجهی

۱. مقدمه

قابل استفاده باشند. این ضرورت‌های رو به فزون تکنولوژی‌های آینده، نمی‌تواند تنها با بهبود در ویژگی‌های مواد متداول به دست آیند؛ بلکه در نظر گرفتن مفاهیم جدید در طراحی مواد برای ساخت موادی مقاوم در برابر آسیب‌های تابشی و مکانیکی شدید، لازم است [۱]. یکی از مواردی که در ساخت مواد و همچنین کارایی ماده باید در نظر گرفته شود و اخیراً توجه زیاد به آن شده است، عیوب موجود در ماده است [۲]. این عیوب ممکن است در حین ساخت در ماده ایجاد شوند یا در هنگام

امروزه در زمینه‌های گوناگونی مانند تولید انرژی و تکنولوژی‌های مختلف مرتبط با صنعت، موادی مورد نیاز است که بتوانند در شرایط سخت مانند تنش زیاد، دما، دز تابشی و محیط‌های خورنده شدید کارایی داشته باشند. مثلاً راکتورهای هسته‌ای مولد انرژی، در آینده به موادی نیاز دارند که در برابر دماهای بالا و شارهای تابشی زیاد مقاوم باشند و در محیط‌های خورنده بدون آن که آسیب ببینند، برای مدت زمانی طولانی

هسته‌ای بخش فیزیک دانشگاه شیراز را گزارش می‌دهیم که با توجه به اطلاعات ما با توان تفکیک زمانی 250 ps بهترین توان تفکیک زمانی در کشور را دارد. نوع تجهیزات مورد استفاده، نحوه قرارگیری آنها، تنظیم توان تفکیک و طریقه اندازه‌گیری طیف‌سنجی طول عمر نابودی پوزیترون توضیح داده می‌شود. نحوه ساخت چشمه تولید کننده پوزیترون و به دست آوردن مؤلفه‌های طول عمر نابودی پوزیترون مربوط به چشمه گزارش شده است.

با توجه به این که در سال‌های اخیر استفاده از این تکنیک برای به دست آوردن چگالی و نوع عیوب در نانومواد بالاخص نانوپودرها افزایش یافته است [۱۲-۱۴] در ادامه با استفاده از تکنیک طیف‌سنجی طول عمر پوزیترون به بررسی عیوب در نانوپودرهای فریت نیکل و اکسید آهن گاما می‌پردازیم. نشان می‌دهیم که با استفاده از این تکنیک می‌توان حفره‌های خالی در جایگاه‌های چهاروجهی و هشت وجهی را به دست آورد. همچنین با توجه به این که در دانشگاه‌ها و مراکز پژوهشی مختلفی در ایران به طور گسترده‌ای بر روی نانوپودرهای فریت‌های مختلف تحقیق و پژوهش می‌شود [۱۵-۱۷]، این پژوهش می‌تواند بیان کننده قابلیت روش طیف‌سنجی نابودی پوزیترون در تعیین جایگاه‌های خالی و عیوب در نانومواد باشد.

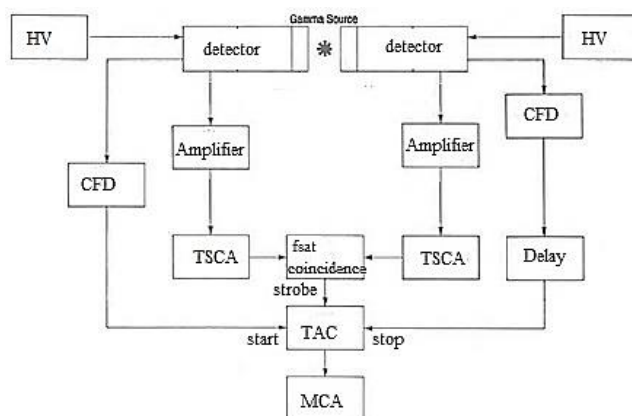
۲. روش آزمایشگاهی

برای اندازه‌گیری طول عمر نابودی پوزیترون از یک مدار همزمانی سریع- کند استفاده شده است. این مدار شامل آشکارسازهای پلاستیکی، تقویت کننده‌های اسپکتروسکوپی، تبعیض‌گرهای کسر ثابت (CFD)، تحلیلگرهای تک کاناله زمانی (TSCA)، مبدل زمان به دامنه (TAC)، دستگاه همزمانی سریع و تحلیلگر چند کاناله (MCA) است. در این سامانه دستگاه‌های تقویت کننده، تحلیلگرهای تک کاناله زمانی و دستگاه همزمانی سریع برای قسمت کند یا انرژی مدار بسته می‌شوند و دستگاه‌های تبعیض‌گر کسر ثابت، دستگاه مبدل زمان به دامنه و تحلیلگر چند کاناله برای قسمت سریع یا زمانی مدار مورد

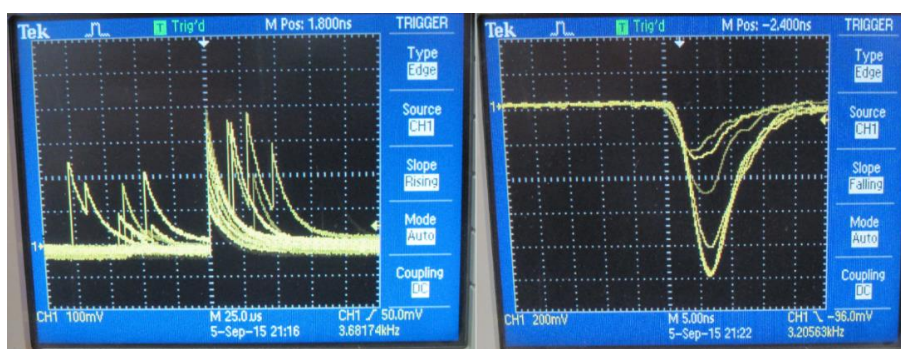
استفاده از ماده، در آن ایجاد شوند. امروزه اندازه‌گیری نوع و چگالی عیوب و همچنین تاثیر آنها بر ویژگی‌های مختلف ماده توجه زیادی را به خود جلب کرده است. ثابت شده است که عیوب بر ویژگی‌های الکتریکی [۳]، مغناطیسی [۴] و اپتیکی [۵] ماده اثر می‌گذراند. بنابراین نیاز به سامانه‌های تشخیصی برای بررسی و مطالعه دقیق شرایط ایجاد عیوب و نحوه رفتار آنها در ماده وجود دارد.

طیف‌سنجی نابودی پوزیترون تکنیکی هسته‌ای است که به عنوان روشی برای بررسی عیوب در مواد به ویژه حفره‌ها در جامدات توسعه داده شده است. این تکنیک به عنوان ابزاری قدرتمند برای کمی سازی نوع و چگالی عیوب در جامدات قابلیت زیادی دارد. پوزیترون‌ها در عیوب نوع حفره که چگالی‌های الکترونی کمتری دارند گیراندازی می‌شوند و باعث افزایش طول عمر نابودی پوزیترون می‌شوند [۲]. گیراندازی پوزیترون در عیوب بر اساس تشکیل یک پتانسیل جاذب در عیوب حجم باز مانند تهی‌جاها، توده‌های تهی‌جا و ناجابه‌جایی‌ها است. دلیل اصلی برای این پتانسیل جاذب، فقدان یون‌های مثبت دافع در چنین عیوبی است. هنگامی که پوزیترون در یک عیب حجم باز گیراندازی می‌شود پارامترهای نابودی به طرز قابل ملاحظه‌ای تغییر می‌کنند. در یک عیب حجم باز به واسطه چگالی الکترونی کمتر، طول عمر پوزیترون افزایش می‌یابد. در نتیجه، تحلیل طیف به دست آمده از تابش نابودی پوزیترون، امکان آشکارسازی عیوب را در شبکه ممکن می‌سازد. همچنین تکنیک‌های مرتبط با نابودی پوزیترون کاربردهای گسترده‌ای در مطالعه حفره‌های شبکه و توده‌های حفره‌ای در بلورها یافته‌اند. این روش‌ها همچنین به طور فزاینده‌ای در مطالعه مرزهای دانه‌ای و فصول مشترک در مواد بس‌بلور و مواد نانو فاز به کار برده می‌شوند [۶ و ۷].

اخیراً در ایران چندین دانشگاه اقدام به راه اندازی سامانه طیف‌سنجی طول عمر پوزیترون کرده‌اند و نتایج پژوهش‌هایشان را در مجله‌های داخلی [۸] و در کنفرانس‌های مختلف در ایران ارائه کرده‌اند [۹-۱۱]. در این مقاله ما نحوه راه اندازی یک سامانه طیف‌سنجی طول عمر نابودی پوزیترون در آزمایشگاه



شکل ۱. سامانه زمان گیری سریع - کند نوعی استفاده شده برای اندازه‌گیری‌های همزمان گاما-گاما.



شکل ۲. (رنگی در نسخه الکترونیکی) سمت راست تپ آند، سمت چپ تپ دایند خروجی از آشکارساز مورد استفاده در آزمایش. محور افقی در صفحه اسیلوسکوپ محور زمان است و مقیاس آن در چپ ۵ ns و در راست ۲۵ μs است.

طیف‌های به دست آمده باید بر اساس زمان باشند، در نتیجه باید مبدل زمان به دامنه را مدرج کرد و رابطه بین شماره کانال و زمان را به دست آورد.

مدرج کردن مبدل زمان به دامنه را بدین طریق انجام می‌دهیم که خروجی قسمت سریع آشکارسازها (خروجی آند) را به تبعیض‌گرهای کسر ثابت و خروجی تبعیض‌گر کسر ثابت را به قسمت شروع مبدل زمان به دامنه و خروجی تبعیض‌گر دیگر را با استفاده از کابل‌های تأخیر با طول‌های مختلف (تأخیرهای مختلف) به قسمت توقف مبدل زمان به دامنه وصل می‌کنیم و در نهایت خروجی مبدل زمان به دامنه به MCA وصل می‌شود. خروجی نرم‌افزار MCA برای کابل‌های تأخیر ۲، ۳، ۴ و ۵ متری در شکل ۳ نشان داده شده است. منحنی تغییرات شماره کانال بر حسب زمان در شکل ۴ دیده می‌شود و همان طور که در شکل نشان داده شده است این رابطه به

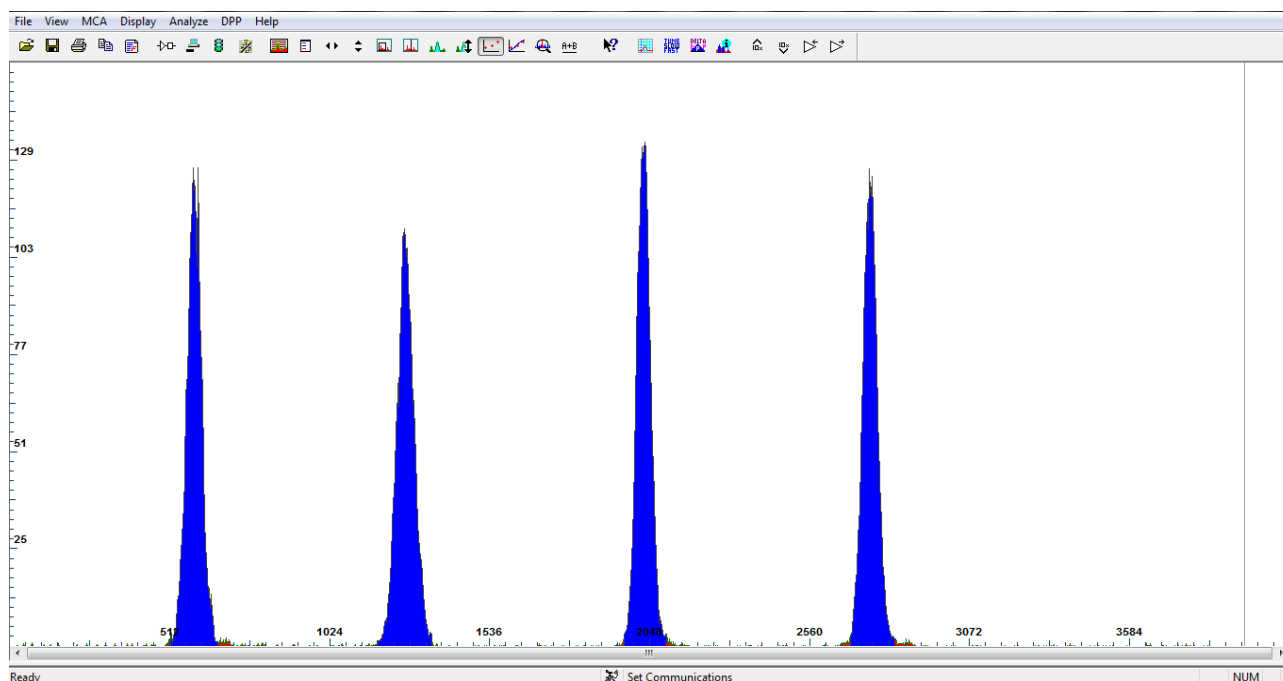
استفاده قرار می‌گیرند. سامانه زمان‌گیری سریع - کند مورد استفاده برای اندازه‌گیری‌های همزمان گاما-گاما در شکل ۱ نشان داده شده است.

آشکارساز مورد استفاده در این پژوهش دارای سوسوزنی پلاستیکی به ابعاد یک اینچ است که به صورت مخروطی سر بریده استفاده شده است. در شکل ۲ نمایی از تپ‌های مثبت و منفی آشکارساز مورد استفاده، نشان داده شده است. زمان خیز تپ منفی این سوسوزن در خروجی پیش تقویت کننده، ۵ ns است.

۲.۱. مدرج کردن مبدل زمان به دامنه و تحلیلگر چند

کاناله زمانی

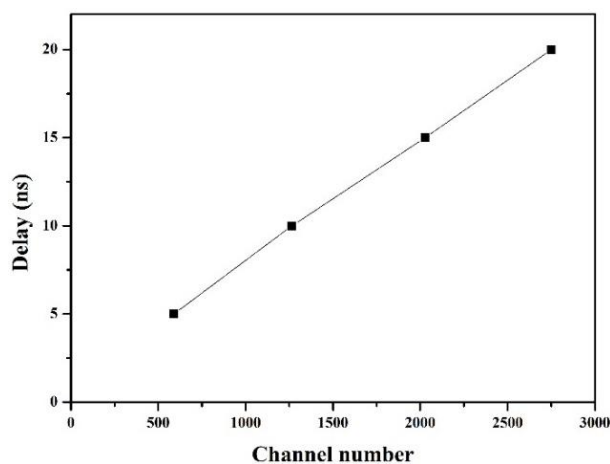
طیف‌هایی که در اندازه‌گیری طول عمر نابودی پوزیترون به دست می‌آیند، بر حسب شماره کانال‌ها هستند. با توجه به این که برای تجزیه و تحلیل طیف‌های طول عمر نابودی پوزیترون،



شکل ۳. (رنگی در نسخه الکترونیکی) خروجی نرم افزار دستگاه MCA برای درجه بندی کردن زمانی محور افقی در TAC و MCA. قله ها به ترتیب از چپ به راست برای سیم های تأخیر ۲، ۳، ۴ و ۵ متر ایجاد شده اند.

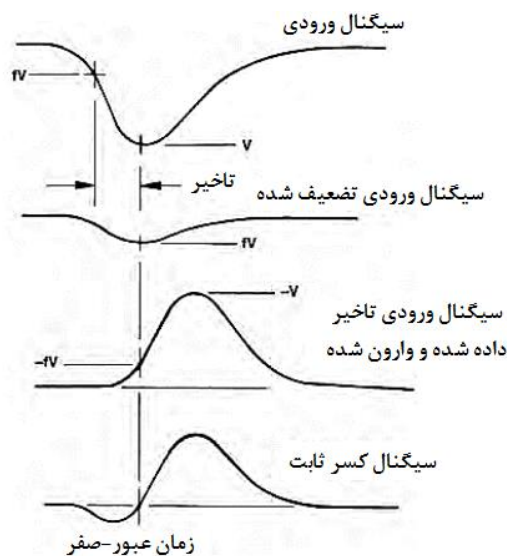
۲.۲. تعیین توان تفکیک زمانی سامانه

تعیین کمترین توان تفکیک زمانی آشکارسازها و مدار الکترونیکی جمع آوری داده ها، بسیار مهم است. پارامترهایی که بر توان تفکیک زمانی بهینه نهایی اثر می گذارند شامل این موارد هستند: ولتاژ آشکارسازها، طول کابل تأخیر و گام در CFD، هندسه و نوع سوسوزن ها و عدم تطبیق امپدانس بین مدول های الکتریکی. برای این کار از یک چشمه ^{60}Co که دو گامای تقریباً همزمان 1.17 MeV و 1.33 MeV دارد، استفاده شد. به ازای ولتاژی که در ابتدا برای آشکارسازها در نظر می گیریم و نوع و هندسه خاصی که سوسوزن انتخابی ما در آشکارسازها دارند و همچنین مدول های الکتریکی (مرتبط با CFD) که برای بستن مدار اندازه گیری زمانی انتخاب کرده ایم، حال باید طول کابل تأخیر و گام در CFD را به روشی که در ادامه بیان می شود، برای کمترین توان تفکیک زمانی تنظیم کنیم. اگر هر یک از موارد پیش گفته مانند ولتاژ آشکارسازها یا نوع و هندسه سوسوزن ها یا یکی از مدول های الکتریکی تغییر کردند، باید دوباره طول کابل تأخیر و گام در CFD تنظیم شوند.



شکل ۴. منحنی تغییرات شماره کانال بر حسب زمان برای درجه بندی کردن TAC و MCA.

صورت خطی است. بنابراین در صفحه نمایش نرم افزار دستگاه MCA برای قسمتی که طیف طول عمر نابودی پوزیترون قرار می گیرد، تغییرات شماره کانال بر حسب زمان خطی است و هر کانال $5/8$ پیکوثانیه است. همچنین می توان این کار را فقط با یک تبعیض گر انجام داد، در این حالت قله های ایجاد شده به ازای طول های مختلف کابل بسیار باریک خواهند بود.

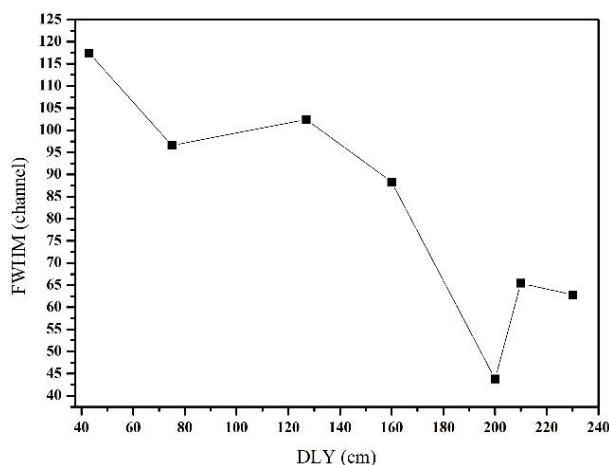


شکل ۶. نحوه کار تبعض گر کسر ثابت (CFD) برای تعیین زمان عبور صفر. عبور صفر. عبور صفر تپ دو قطبی تولید شده برای زمان تولید تپ منطقی خروجی استفاده می‌شود.

شکل ۷ و مدل QUAD CFD ۹۳۵ است و تکنیک زمان‌گیری کسر ثابت را که در شکل ۶ نشان داده شده است، برای انتخاب یک نقطه زمانی روی هر تپ ورودی که مستقل از دامنه تپ است را به عنوان مبدأ تولید تپ خروجی انتخاب می‌کند.

تنظیم گام بر اساس دستورالعمل شرکت سازنده در کاتالوگ دستگاه انجام می‌شود تا زمان عبور از صفر برای تمام تپ‌های ورودی به تبعض گر تقریباً برهم منطبق باشند. بر اساس دستورالعمل بیان شده در کاتالوگ برای تنظیم گام، سیگنال‌های تصادفی تولید شده از هر آند PMT به ورودی تبعض گر وصل می‌شود. سیگنال نمایشگر کسر ثابت می‌تواند با اسیلوسکوپ سریع که در ۵۰ اهم ترمینال شده و به طور داخلی تریگر شده است، دیده شود. به ازای هر ولتاژ منبع تغذیه آشکارساز و طول کابل تأخیر خاص، پتانسیومتر گام در پنل جلویی CFD به حدی تنظیم می‌شود که تمام تپ‌های دو قطبی دیده شده برای تمام دامنه‌ها در نمایشگر کسر ثابت تقریباً از یک نقطه در خط زمینه و در زمان یکسان (عبور صفر) بگذرند (همان طور که در شکل ۷ دیده می‌شود).

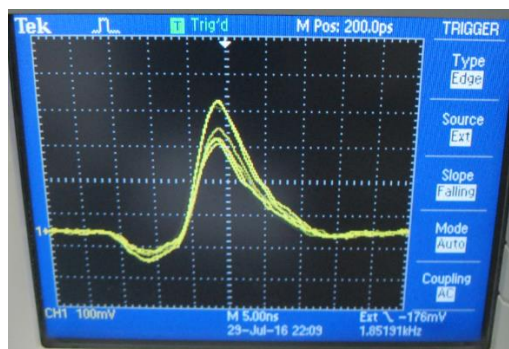
طیف به دست آمده از سامانه طول عمر نابودی پوزیترون برای تعیین توان تفکیک زمانی سامانه در شکل ۸ نشان داده



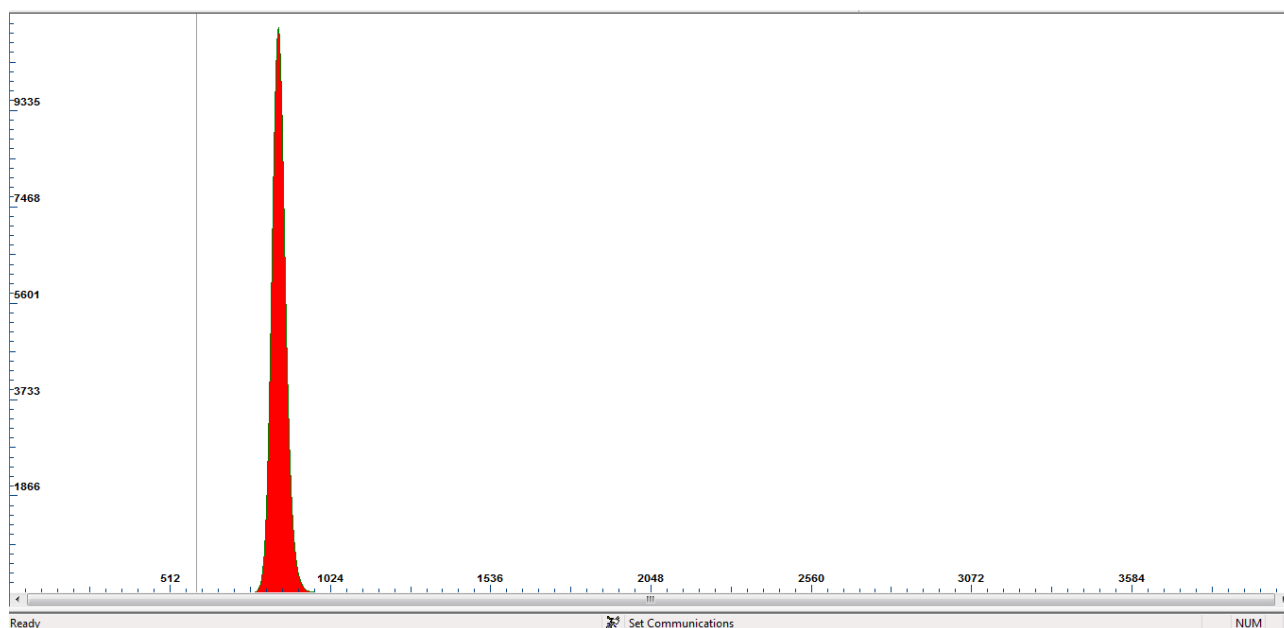
شکل ۵. تفکیک زمانی سامانه طیف‌سنجی طول عمر پوزیترون برای سیم‌های تأخیر متفاوت در تأخیر خارجی CFDها.

کابل تأخیر کسر ثابت (DLY)، تعیین کننده مقدار تأخیر تپ خروجی است که به تأخیر داخلی اضافه می‌شود تا کل تأخیر شکل دهی کسر ثابت را تشکیل دهد. انتخاب تأخیر شکل دهی کسر ثابت برای بهترین کارایی زمانی با سوسوزن و PMT مفروض به طور تجربی انجام می‌شود. برای تعیین طول کابل تأخیر داخلی (DLY) در CFDها، سیم‌های با طول‌های مختلف را امتحان و کمترین تفکیک زمانی برای سیم دو متر به دست آمد. مقدار تفکیک برای سیم‌های با طول‌های مختلف در شکل ۵ نشان داده شده است.

گام، حرکت زمانی تپ خروجی نسبت به تپ ورودی است که نتیجه‌ای از تغییرات در دامنه و زمان خیز تپ‌های ورودی به تبعض گر است. در حالی که این تغییرات در تپ ورودی ممکن است تنها نتیجه‌ای از نوسانات آماری یا نوفه تپ باشد، آنها بر فرایند رهاسازی (تریگر) به کار برده شده به وسیله تبعض گر برای فرستادن تپ شروع یا توقف به TAC اثر می‌گذارند. چون تپ‌هایی با محدوده گسترده‌ای از دامنه‌ها، باید به کار برده شوند، این دامنه‌های متفاوت باعث ایجاد تفاوت‌هایی در مبدا زمانی برای تپ‌های مختلف شده که به آنها گام گفته می‌شود و به تبع آن باعث افزایش توان تفکیک زمانی می‌شوند. در نتیجه برای رسیدن به کمینه توان تفکیک زمانی، کمینه کردن گام مهم می‌شود. تبعض گر کسر ثابتی که در این پژوهش استفاده شده است ساخت شرکت آر تک



شکل ۷. (رنگی در نسخه الکترونیکی) تنظیم صحیح گام برای یکی از CFDها در آزمایشگاه.



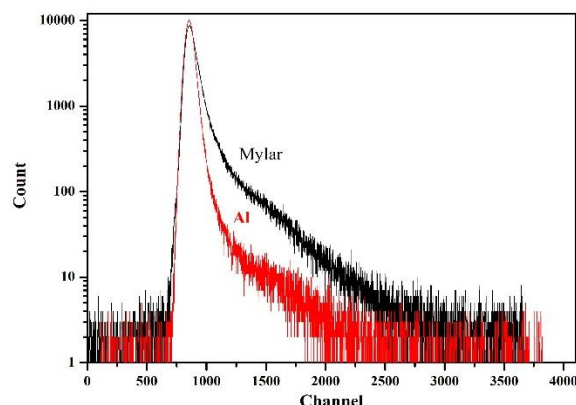
شکل ۸. (رنگی در نسخه الکترونیکی) طیف به دست آمده برای اندازه‌گیری تفکیک زمانی طیف‌سنج طول عمر پوزیترون با استفاده از چشمه کبالت ۶۰.

طول عمر نابودی پوزیترون، دو نمونه یکسان در دو طرف ورقه چشمه قرار داده شد و آشکارسازها در دو طرف نمونه‌ها قرار گرفتند. ضخامت یا مقدار نمونه‌ها باید به حدی باشد تا اطمینان حاصل شود تقریباً تمام پوزیترون‌ها در نمونه‌های تحت بررسی نابود می‌شوند.

از آنجا که تعدادی از پوزیترون‌ها همیشه در خود چشمه و ورق مایلر نابود می‌شوند پس باید طول عمر مربوط به نابودی پوزیترون‌ها در چشمه و ورق مایلر را بدانیم تا از موارد مربوط به نمونه‌ها جدا یا کم کنیم. در این قسمت می‌خواهیم مؤلفه‌های طول عمر نابودی پوزیترون ناشی از نابودی در چشمه و ورق

شده است. این اندازه‌گیری برای مدت زمان ۲۲ ساعت است. در طی اندازه‌گیری آهنگ جمع‌آوری شمارش‌ها ۱۲ cps بود. کمینه تفکیک در سامانه اندازه‌گیری طول عمر برای چشمه ^{60}Co در پنجره‌های انرژی ^{60}Co برابر مقدار ۲۵۰ پیکوثانیه به دست آمد.

۳.۲. تهیه چشمه تولید پوزیترون و تصحیح مربوط به آن
برای تولید پوزیترون در آزمایشگاه از چشمه ^{22}Na با شدت ۲۰ میکروکوری که در ورقه‌ای از جنس آلومینیوم مایلر با ضخامت ۷ میکرومتر ریخته شده بود، استفاده شد. برای اندازه‌گیری‌های



شکل ۹. (رنگی در نسخه الکترونیکی) طیف طول عمر به دست آمده از اندازه‌گیری نابودی پوزیترون در آلومینوم خالص بدون عیب (Al) و چندین ورق مایلاری که چشمه از آنها ساخته شده است.

جدول ۱. مؤلفه‌های اندازه‌گیری شده طول عمر نابودی پوزیترون در آلومینوم و ورق‌های مایلار. مؤلفه‌های طول عمر بر حسب ps و شدت‌ها بر حسب درصد بیان شده‌اند. مقادیر داخل پرانتز خطا هستند که بر حسب درصد بیان شده‌اند.

I_3	τ_3	I_2	τ_2	I_1	τ_1	
(۰/۱) ۴/۳	(۱/۶) ۳۰۰۰	(۰/۲) ۱۴/۲	(۰/۳) ۱۵۰۰	(۰/۱) ۸۱/۵	(۰/۶) ۳۰۰	مایلار
(۰/۱) ۳	(۰) ۱۵۰۰	(۱) ۵	(۰) ۳۰۰	(۱/۱) ۹۲	(۱/۸) ۱۷۰	آلومینوم

۱۵۰۰ به دست آمده از ورق‌های مایلار در نرم‌افزار PASCAL، تک مؤلفه طول عمر به دست آمده، ۱۷۰ ps مربوط به آلومینوم است که با مقدار گزارش شده برای آلومینوم بدون عیب ۱۶۰-۱۷۰ ps تطابق دارد [۲۲]. شدت‌های به دست آمده برای مؤلفه‌های ۳۰۰ ps و ۱۵۰۰ ps مربوط به مایلار به ترتیب ۵ و ۳ درصد است. این شدت‌ها و مؤلفه‌های مربوط به آنها به عنوان تصحیح چشمه در اندازه‌گیری‌های طول عمر نابودی پوزیترون استفاده شدند.

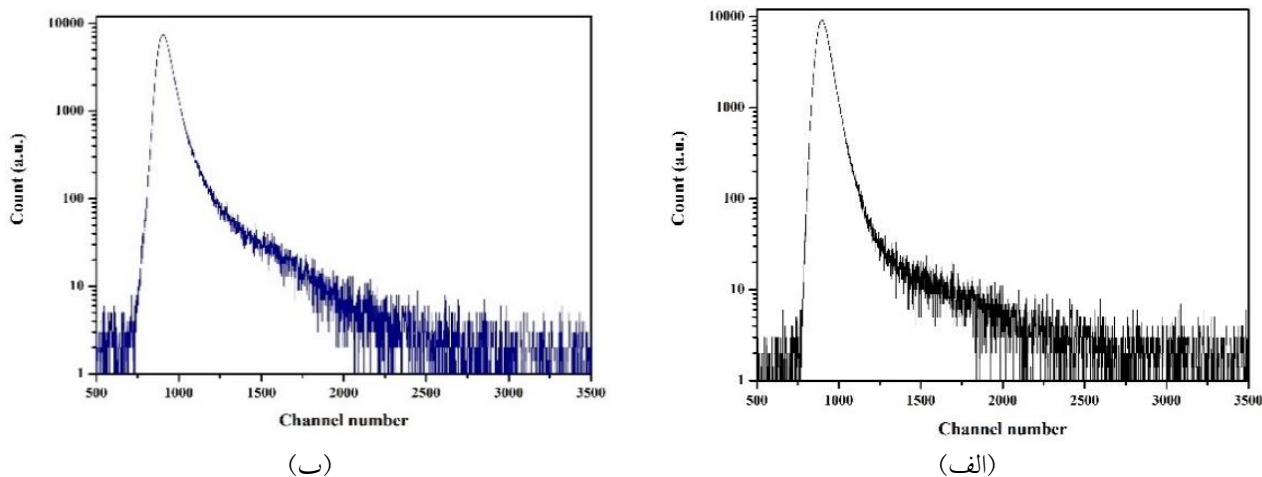
۳. طیف‌سنجی طول عمر نابودی پوزیترون در

نانوپودرهای فریت‌های اسپینلی

در این قسمت طیف طول عمر نابودی پوزیترون در نمونه‌های فریت نیکل و اکسید آهن اندازه‌گیری شده است. هر دو نانوپودر دارای ساختار اسپینلی با فرمول شیمیایی NiFe_2O_4 و $\text{Fe}_{x/3}\text{O}_4$ (یا $\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$) هستند که در آنها آنیون‌های اکسیژن جایگاه‌های هشت وجهی و چهاروجهی تشکیل داده و کاتیون‌های فلزی آهن و نیکل در درون این جایگاه‌ها قرار

مایلار را به دست آوریم. برای این کار از دو قطعه آلومینیومی خالص پخت داده شده بدون عیب و چندین ورق مایلار که برای ساخت چشمه به کار برده‌ایم، استفاده می‌کنیم. طیف طول عمر نابودی پوزیترون در این نمونه‌ها در شکل ۹ نشان داده شده‌اند. مؤلفه‌های طول عمر نابودی پوزیترون در مایلار و آلومینیوم با استفاده از نرم‌افزار PASCAL به دست آمدند و در جدول ۱ نشان داده شده است.

مؤلفه‌های طول عمر ۳۰۰ و ۱۵۰۰ پیکوثانیه در مایلار مربوط به خود مایلار است در حالی که مؤلفه ۳۰۰۰ ps ناشی از نابودی اورتوپوزیترونیم در هوای بین ورق‌های مایلار است. مقادیر به دست آمده در این پژوهش در محدوده مقادیر گزارش شده در مقالات است [۱۸-۲۱]. به این ترتیب مؤلفه‌های طول عمر مربوط به ورق چشمه پوزیترون به دست آمد. حال برای به دست آوردن شدت مؤلفه‌های مربوط به چشمه از دو قطعه آلومینیومی مشابه با ضخامت ۰/۰۶۳ inch استفاده شد. با اندازه‌گیری طیف طول عمر نابودی پوزیترون و وارد کردن مؤلفه‌های ۳۰۰ ps و ۱۵۰۰ ps



شکل ۱۰. (رنگی در نسخه الکترونیکی) طیف طول عمر نابودی پوزیترون اندازه‌گیری شده در نمونه‌های (الف) نانوپودر فریت نیکل (ب) نانوپودر اکسید آهن.

جدول ۲. مؤلفه‌های طول عمر نابودی پوزیترون و شدت‌های آنها و همچنین میانگین طول عمر نابودی پوزیترون برای نمونه‌های اندازه‌گیری شده. مؤلفه‌های طول عمر بر حسب ps و شدت‌ها و خطاها بر حسب درصد بیان شده‌اند.

نمونه	τ_1	I_1	τ_2	I_2	τ_3	I_3	τ_m
نانوپودر فریت نیکل	۱۴۰ (۰/۷)	۸۱/۴۵ (۰/۵)	۳۷۶ (۰/۵)	۱۶ (۱)	۲۳۶۰ (۰/۸)	۲/۵۵ (۰/۵)	۲۳۴/۳۷
نانوپودر اکسید آهن	۱۷۸ (۱/۷)	۷۱/۴۶ (۴/۵)	۳۷۲ (۱/۰)	۲۵/۹۸ (۳)	۲۶۲۰ (۲/۷)	۲/۵۴ (۰/۱)	۲۹۰/۴۵

مؤلفه‌های طول عمر و شدت‌هایشان برسد و دیگری این است که با توجه به روابطی که وجود دارد و برای مؤلفه‌ها و شدت‌های طول عمر مفروض، یک طیف طول عمر شبیه‌سازی کنند و از برازش طیف طول عمر شبیه‌سازی شده با طیف طول عمر تجربی مؤلفه‌های طول عمر و شدت‌هایشان را به دست آورند. هر دو این روش با استفاده از نرم‌افزارهایی که نوشته می‌شوند، انجام می‌شود. ما از روش دوم استفاده کرده‌ایم و مؤلفه‌های طول عمر نابودی پوزیترون برای نمونه‌های اندازه‌گیری شده را با استفاده از نرم‌افزار پاسکوال به دست آورده و در جدول ۲ نشان داده شده‌اند.

در این نانوپودرها، مؤلفه طول عمر کوچک‌تر τ_1 ناشی از نابودی پوزیترون‌های ناجایگزیده در قسمت‌های بدون عیب در داخل نانوپودرها است و بخش کوچکی هم ناشی از زمان باقی ماندن پوزیترون‌های گیراندازی شده در حالت‌های بلوخ است [۲۳]. مؤلفه دوم τ_2 بیشتر ناشی از نابودی پوزیترون در

می‌گیرند. در مورد اکسید آهن، مربع نشان دهنده جایگاه‌های خالی در این ساختار است که برای الزام ختثایی بار، تعدادی از جایگاه‌ها خالی هستند. در این پژوهش نشان می‌دهیم که این سامانه به تغییرات در چگالی حفره‌ها در جایگاه‌های هشت وجهی و چهاروجهی حساس است و می‌توان با استفاده از این روش تغییر در چگالی حفره‌ها را اندازه‌گیری کرد. به منظور تعیین دقیق میزان چگالی حفره‌ها در نمونه‌های با ساختار اسپینلی نیاز است که اطلاعات به دست آمده از این روش با اطلاعات حاصل از روش‌های دیگر به طور همزمان بررسی شود.

طیف طول عمر پوزیترون در نانوپودرهای فریت نیکل و اکسید آهن در شکل ۱۰ نشان داده شده است. برای به دست آوردن مؤلفه‌های طول عمر و شدت‌های مربوط به این مؤلفه‌ها از طیف طول عمر اندازه‌گیری شده، دو روش وجود دارد: یکی این که طیف طول عمر به دست آمده را تجزیه کنند و به

نمونه اکسید آهن ($\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$) با ساختار اسپینل، برای رعایت شرط خنثایی بار، حفره‌های کاتیونی (جایگاه‌های هشت وجهی یا چهاروجهی خالی) بیشتری نسبت به فریت نیکل دارد. مؤلفه‌های طول عمر نابودی پوزیترون در جدول ۲ نشان داده شده است. همان طور که دیده می‌شود مؤلفه طول عمر τ_2 برای این نانوپودر با نانوپودر فریت نیکل تقریباً یکسان است که این می‌تواند ناشی از این باشد که چون نیکل و آهن عناصر کنار هم در جدول تناوبی هستند ابعاد حفره‌های کاتیونی هشت وجهی و چهاروجهی برای این دو نانوپودر تقریباً برابرند (ثابت شبکه برای نانوپودر فریت نیکل 8.33 \AA و برای اکسید آهن 8.34 \AA است که با استفاده از پراش پرتو ایکس به دست می‌آیند، در نتیجه شعاع حفره‌های کاتیونی هشت وجهی و چهاروجهی به ترتیب برای نانوپودر فریت نیکل 0.746 \AA و 0.513 \AA و برای نانوپودر اکسید آهن 0.748 \AA و 0.514 \AA محاسبه می‌شوند [۲۵]). شدت I_2 برای نانوپودر اکسید آهن بیشتر از نمونه نانوپودر فریت نیکل است و تأیید کننده این است که تعداد حفره‌های کاتیونی برای نانوپودر اکسید آهن بیشتر است. این نشان می‌دهد که برای نانوپودرهای فریت اسپینلی مؤلفه دوم در طیف‌سنجی طول عمر نابودی پوزیترون بیشتر ناشی از نابودی پوزیترون‌ها در جایگاه‌های چهار وجهی و هشت وجهی خالی است تا نابودی پوزیترون در حفره‌های بزرگ یا مرزهای دانه‌ای بین بلورک‌ها در نانوذرات. دلیل این عامل را شاید بتوان این ذکر کرد که حفره‌های کاتیونی هشت وجهی و چهاروجهی چون به وسیله آنیون‌های اکسیژن احاطه شده‌اند بار خالص منفی دارند، در حالی که حفره‌های بزرگ، یا خنثی هستند یا به دلیل این که تعداد آنیون‌های اکسیژن آنها کمتر است بار منفی کمتری دارند در نتیجه ضریب گیراندازی پوزیترون در آنها کمتر خواهد بود و سهم کمتری در مؤلفه طول عمر نابودی پوزیترون τ_2 خواهند داشت [۲ و ۲۶]. همچنین در نانوذرات چگالی عیوب زیاد است و این عامل باعث می‌شود که طول پخش پوزیترون‌ها به چند نانومتر کاهش یابد. در نتیجه بیشتر پوزیترون‌ها در درون نانوذره نابود می‌شوند و تعداد کمتری از

حفره‌های جایگاه‌های هشت وجهی و چهاروجهی موجود در ساختار اسپینل این نانوپودرها است و مقداری هم ناشی از نابودی پوزیترون‌ها در سطح نانوذرات و در حفره‌های بزرگ در داخل نانوذرات است. از آنجا که جایگاه‌های هشت وجهی و چهاروجهی به وسیله آنیون‌های اکسیژن (O^{2-}) احاطه شده‌اند، در نتیجه بار منفی دارند و پوزیترون‌ها را به سمت خود جذب کرده و آنها را گیراندازی می‌کنند. چون تعداد این تهی‌جاها جایگاه‌های هشت وجهی و چهاروجهی در این نمونه‌ها زیاد هستند، غالب پوزیترون‌ها در این جایگاه‌ها نابود می‌شوند. لکن اندازه τ_2 که بیان کننده ابعاد حفره است بزرگ‌تر از تک تهی‌جا است. دلیل آن می‌تواند ناشی از این حقیقت باشد که همیشه کسری از پوزیترون‌ها در سطح نانوذرات نابود می‌شوند و سهم طول عمر آنها وارد همین مؤلفه طول عمر τ_2 می‌شود و در نتیجه باعث افزایش طول عمر مؤلفه τ_2 نسبت به تک تهی‌جا می‌شود. طول عمر مشخصه نابودی پوزیترون در یک تک تهی‌جا تقریباً بین ۳۱۰ - ۲۵۰ ps در مواد نیم رسانا است [۲ و ۲۴]، در حالی که طول عمر مشخصه نابودی پوزیترون در سطح‌ها تقریباً بین ۵۰۰ - ۴۰۰ ps است [۲ و ۲۴]. از آنجا که اختلاف زمانی این دو طول عمر کمتر از توان تفکیک زمانی سامانه مورد استفاده است، این دو مؤلفه طول عمر به صورت یک مؤلفه طول عمر نشان داده می‌شوند.

همچنین اندازه تک تهی‌جا در مواد مختلف متفاوت است. برای مواد سرامیکی نیم رسانای دو اتمی مانند گالیوم فسفید طول عمر مشخصه نابودی پوزیترون در تک تهی‌جای گالیوم 260 ps و در تک تهی‌جای فسفر 295 ps گزارش شده است. برای تک تهی‌جاها آرسناید و گالیوم در گالیوم آرسناید به ترتیب طول عمر مشخصه نابودی پوزیترون 270 و 295 پیکوثانیه گزارش شده است [۲]. این مقادیر برای نمونه‌های حجمی بوده و ماده دو اتمی است. بنابراین شاید بتوان انتظار داشت که برای نمونه‌های نانوپودر با ترکیبات چند اتمی مانند نانوپودرهای فریت‌های اسپینلی طول عمر مشخصه نابودی پوزیترون در تک تهی‌جاها مقادیر بیشتری داشته باشد. در

۴. نتیجه گیری

در این پژوهش سامانه طیف‌سنج طول عمر نابودی پوزیترون راه اندازی و با انجام تنظیمات دقیق توان تفکیک زمانی سامانه به کمینه مقدار 250 ps رسانده شد. مدت زمان اندازه‌گیری هر طیف با بهینه نمودن قسمت‌های مختلف سامانه طیف‌سنج برای جمع آوری 10^6 شمارش به زمانی در حدود ۱۲ ساعت کاهش داده شد. چشمه مورد استفاده برای تولید پوزیترون، با ریختن مقدار معینی از مایع رادیواکتیو ^{22}Na بر روی ورق مایلار با ضخامت $7 \mu\text{m}$ تهیه شد. مقدار مایع ریخته شده به گونه‌ای محاسبه شد که فعالیت چشمه در زمان ساخت $20 \mu\text{Ci}$ باشد. با اندازه‌گیری طیف طول عمر نابودی پوزیترون از دو قطعه آلومینیوم خالص بدون عیب و ورق‌های مایلار سهم چشمه و ورق مایلار در طیف طول عمر نابودی پوزیترون تعیین شدند. برای تحلیل و به دست آوردن مؤلفه‌های طول عمر نابودی پوزیترون و شدت‌های مربوط به آنها از نرم‌افزار پاسکوال استفاده شد.

برای نانوپودر فریت اسپینلی، سه مؤلفه برای طیف طول عمر نابودی پوزیترون به دست آمد. مؤلفه اول ناشی از طول عمر بالک کاهش یافته به واسطه نابودی پوزیترون‌های ناجایگزیده در مناطق بدون عیب است. مؤلفه τ_2 بیشتر ناشی از نابودی پوزیترون‌ها در حفره‌های کاتیونی هشت وجهی و چهاروجهی و به مقدار کمتر در سطح ذرات و همچنین حفره‌های بزرگ در داخل ذرات است. مؤلفه سوم ناشی از نابودی برکنش اورتوپوزیترون‌یوم در حفره‌های بزرگ بین ذرات پودر است. چون ذرات پودر مغناطیسی هستند به یکدیگر چسبیده و در بین آنها حفره‌های بزرگ ایجاد می‌شود که پوزیترون می‌تواند در آنها گیراندازی شود.

پوزیترون‌ها به سطح نانو ذره می‌رسند [۲۷].

مؤلفه‌های سوم برای نانوپودرها ناشی از نابودی پوزیترون به صورت نابودی اورتوپوزیترون‌یوم تشکیل شده در حفره‌های بزرگ ایجاد شده بین ذرات پودر است [۲۳]. در این حفره‌های بزرگ چون چگالی الکترون بسیار کم است، پوزیترون با یکی از الکترون‌های محیط تشکیل حالت مقید پوزیترون‌یوم می‌دهد که شبیه اتم هیدروژن است با این تفاوت که به جای پروتون، پوزیترون قرار گرفته است. اتم پوزیترون‌یوم دو حالت دارد: پاراپوزیترون‌یوم (p-Ps) که در آن اسپین الکترون و پوزیترون پادموازی هستند و دیگری اورتوپوزیترون‌یوم (o-Ps) که در آن اسپین الکترون و پوزیترون هم جهت هستند. طول عمر نابودی پاراپوزیترون‌یوم و اورتوپوزیترون‌یوم به ترتیب 125 ps و 140 ns است و به نسبت های ۱ به ۳ پوزیترون در این حالت‌ها نابود می‌شود. اگر اورتوپوزیترون‌یوم در داخل ماده ایجاد شود گاهی اوقات، پوزیترون با الکترونی از محیط که اسپین پادموازی با پوزیترون دارد، نابودی می‌شود و نه با الکترونی که حالت مقید را ایجاد کرده است. در این حالت طول عمر نابودی پوزیترون به چند نانوثانیه کاهش می‌یابد. به این فرایند برکنش^۱ گفته می‌شود [۲۸].

در پایان میانگین طول عمر نابودی پوزیترون در نمونه‌ها با استفاده از رابطه

$$\tau_m = \frac{\tau_1 I_1 + \tau_2 I_2 + \tau_3 I_3}{I_1 + I_2 + I_3}$$

به دست آمد [۲] و مقادیر در جدول ۲ نشان داده شده است. برای نانوپودرهای اکسید آهن چون تعداد حفره‌های کاتیونی در نانوذرات بیشتر از نانوپودر فریت نیکل است در نتیجه چگالی الکترونی در آنها کمتر و طول عمر میانگین پوزیترون‌ها بیشتر است.

۱. Pick off

مراجع

14. P M G Nambissan, C Upadhyay, and H C Verma, *Journal of Applied Physics*, **93** (2003) 6320.
۱۵. ب نصر، ج عمیقیان و م مظفری، مجله پژوهش فیزیک ایران ۶، ۳ (۱۳۸۵) ۴۹.
15. B Nasr, J Amighian, and M Mozaffar, *Iran. J. Phye. Res.* **6**, 1 (2006) 49.
۱۶. پوربافرانی، پ کاملی و ه سلامتی، مجله پژوهش فیزیک ایران ۸، ۴ (۱۳۸۷) ۱۱۹.
16. A Oorbafrani, P Kameli, and H Salamati, *Iran. J. Phye. Res.* **8**, 3 (2008) 119.
۱۷. م نصراصفهان‌ی، و و سپلاک، مجله پژوهش فیزیک ایران ۱۲، ۱ (۱۳۹۱) ۲۶۲.
17. M Nasr Isfahani and V Sepelak, *Iran. J. Phye. Res.* **12**, 3 (2012) 262.
18. A Bisi, G Gambarini, and L Zappa, *Il Nuovo Cimento B* **53** (1979) 428.
19. P Jain, S Bhatnagar, and A Gupta, *Journal of Physics C: Solid State Physics* **5** (1972) 2156.
20. F Becvár, J Čížek, and I Procházka, *Acta Physica Polonica A* **113** (2008) 1279.
21. F Bečvář, J Čížek, and I Procházka, *Applied Surface Science* **255** (2008) 111.
22. T Troev and V Pavlov, *Hyperfine Interactions* **80** (1993) 999.
23. A V Thorat, T Ghoshal, J D Holmes, P M G Nambissan, and M A Morris, *Nanoscale* **6** (2014) 608.
24. P J Schultz and K G Lynn, *Reviews of Modern Physics* **60** (1988) 701.
25. J Smit and H P Wijn, "Ferrites-Physical Properties of Ferrimagnetic Oxides in Relation to Their Technical Applications", N V Philip's Gloeilampenfabrieken, Eindhoven, Holland, (1965).
26. M J Puska and R Nieminen, *Reviews of Modern Physics* **66** (1994) 841.
27. C Hübner, T Staab, and R Krause-Rehberg, *Applied Physics A* **61** (1995) 203-206.
28. H-E Schaefer, R Würschum, R Birringer, and H Gleiter, *Physical Review B* **38** (1988) 9545.
1. I Beyerlein, A Caro, M Demkowicz, N Mara, A Misra and B Uberuaga, *Materials today* **16** (2013) 443.
2. R Krause-Rehberg, and H S Leipner, "Positron Annihilation in Semiconductors: Defect Studies", Springer-Verlag, Berlin Heidelberg (1999).
3. A Mukherjee, M Banerjee, S Basu, P M G Nambissan, and M Pal, *Journal Of Physics D: Applied Physics* **46** (2013) 495309.
4. Z Kargar, S M Asgarian, and M Mozaffari, *Nucl. Instr. and Meth. B* **375** (2016) 71.
5. F Selim, D Solodovnikov, M Weber, and K Lynn, *Applied Physics Letters* **91** (2007) 4105.
6. B Oberdorfer and R Würschum, *Physical Review B* **79** (2009) 184103.
7. J Čížek, I Procházka, M Cieslar, R Kužel, J Kuriplach, F Chmelík, I Stulíková, F Bečvář, O Melikhova, and R K Islamgaliev, *Physical Review B* **65** (2002) 094106.
۸. ا طیف‌فرد، ع امهماندوست خواجه داد، م خاقانی، م جعفرزاده خطیبانی و ع م پورصالح، مجله پژوهش فیزیک ایران ۱۵، ۱ (۱۳۹۴) ۳۳.
8. E Tayebfard, A A Mehmandoost Khajeh Dad, M Khaghani, M Jafarzadeh Khatibani, and A M Poorsaleh, *Iran. J. Phye. Res.* **15**, 1 (2015) 34.
۹. س م عسگریان، ز کارگر و ر ن گشتاسب، کنفرانس فیزیک ایران، دانشگاه شیراز، (۱۳۹۵).
۱۰. ب خمر، ع امهماندوست خواجه داد و م خاقانی، بیست و سومین کنفرانس هسته‌ای ایران، دانشگاه آزاد اسلامی واحد علوم و تحقیقات (۱۳۹۵).
۱۱. س م عسگریان، ز کارگر و م مظفری، بیست و دومین کنفرانس هسته‌ای ایران، دانشگاه یزد (۱۳۹۴).
12. S Chakrabarti, S Chaudhuri, and P Nambissan, *Physical Review B* **71** (2005) 064105.
13. S Chakraverty, S Mitra, K Mandal, P M G Nambissan, and S Chattopadhyay, *Physical Review B* **71** (2005) 024115.