مجله سنجش و ایمنی پرتو، جلد ۸ شمارهٔ ٤، ویژه‌نامه پرتوهای یون‌ساز، ۱۳۹۹، صفحه ۷-۱٤
پنجمین کنفرانس ملی سنجش و ایمنی پرتوهای یون‌ساز و غیریون‌ساز (مهرماه ۱۳۹۷)
تاریخ دریافت مقاله: ۱۳۹۷/۰٦/۰۱، تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۷/۰۷/۰۱

طراحی و کالیبراسیون یک آشکارساز غیرفعال برای تفکیک ذرات نوترون، پروتون و آلفا در میدان‌های تابش مخلوط

فرید بهرامی[۱]، سمانه برادران[۲*] ، فریدون میانجی[۲] و رضا فقیهی[۱]

[۱]گروه مهندسی، پرتوپزشکی، دانشگاه شیراز، شیراز، ایران.
[۲]گروه ایمنی پرتویی، پژوهشکده راکتور و ایمنی، پژوهشگاه علوم و فنون هسته‌ای، تهران، ایران.
[*]تهران، سازمان انرژی اتمی ایران، پژوهشگاه علوم و فنون هسته‌ای، گروه ایمنی پرتویی، کدپستی: ۱٤۳۹۹۵۱۱۱۳
پست‌الکترونیکی:sbaradaran@aeoi.org.ir

چکیده

در این مقاله کالیبراسیون آشکارساز ردپای هسته ایCR-39 نسبت به هر یک از ذارت پروتون، نوترون و آلفا به طور جداگانه تحت شرایط خورش یکسان صورت گرفته است. بدین منظور از چشمه استاندارد امرسیوم- بریلیوم و فانتوم پلاکسی گلاس برای پرتودهی نوترون، از چشمه استاندارد امرسیوم و کولیماتورهای برنجی برای پرتودهی آلفا و از شتابدهنده واندوگراف برای پرتودهی نوترون استفاده شده است. برای آشکارسازی ردپاها روی CR-39 از محلول خورش سدیم هیدروکسید 6.25N و دمای خورش ۸۵ درجه سانتی گراد استفاده شده است. در نهایت با استفاده از نتایج به دست آمده حفاظ های مختلف آشکارسازی طراحی شد که قادر به تفکیک ذرات نوترون سریع، نوترون حرارتی، نوترون آلبدو و پروتون و آلفا در میدان های مخلوط بوده و در مورد ذرات باردار علاوه بر مشخص کردن سهم هر ذره از توانایی جداسازی انرژی نیز برخوردار بوده است.

کلیدواژگان: آشکار سازهای رد پای هسته ای حالت جامد، CR-39، کالیبراسیون، تفکیک، میدان های مخلوط.

۱. مقدمه

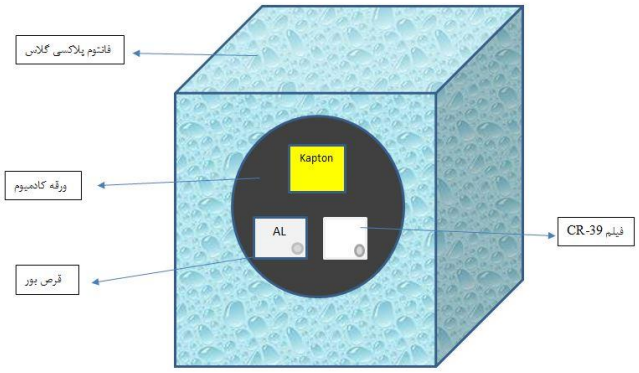
در گذشته از روش‌های مختلفی برای جداسازی ذرات استفاده می‌شد که از آن جمله میتوان به جداسازی ذرات با استفاده از تکنیک زمان پرواز، استفاده از سنتیلاتورهای پلاستیک، استفاده از آشکارساز فوسویچ و نیز استفاده از چندین آشکارساز ردپای خورشی برای جداسازی ذرات اشاره نمود [۱-۵]. امروزه با توجه به قابل استفاده نبودن آشکارسازهای فعال در برخی شرایط و محیط ها، استفاده از آشکارسازهای غیرفعال به طور گسترده‌ای مورد توجه قرار گرفته است. یکی از آشکاسازهای غیرفعال مورد استفاده، آشکارسازهای ردپای هسته‌ای حالت جامد (SSNTDs) می‌باشند که عملکرد آن‌ها بر اساس شکست زنجیره مونومرها و ایجاد ردپا در مسیر ذرات میباشد. این آشکارسازها خصوصیات مهمی از قبیل یکنواختی بالا، راندمان

ثبت بالا، ارزان بودن و حساسیت به ذرات با LET بالا و حساس نبودن به ذرات گاما که خود یک مزیت میتواند باشد را دارا هستند [٦]. یکی از آشکارسازهای ردپای هسته ای حالت جامد آشکارساز پلی آلی دی گلیکول کربنات میباشد که تحت نام تجاری CR-39 شناخته می‌شود.

از آشکارساز مذکور در تحقیقات مختلفی چون دزیمتری نوترون، اسپکترومتری غیرفعال آلفا و نوترون، دزیمتری رادون، دزیمتری تابش محیط فضا برای کادر فنی و خدمه هواپیما، کنترل حفاظ‌های هواپیماها و ماهواره‌ها و غیره استفاده می‌شود [۱۱–۷]. با توجه به خصوصیات یاد شده، هدف این مقاله طراحی و ساخت آشکارسازی با استفاده از تکنیک ردپا برای ثبت پرتوهای نوترون، آلفا و پروتون در میدان‌های تابشی مخلوط می‌باشد .آشکارساز طراحی شده می‌تواند روی بدن پرتوکار یا کارکنان هواپیما و در صورت ممکن نبودن، روی محیطی که حدالامکان عملکردش شبیه به بدن باشد (چون حجم زیادی از بدن حدود ۸۰٪ را آب تشکیل می‌دهد) مانند مخازن آب و غیره قرار گیرد.

۲. مواد و روش‌ها

ساختار کلی آشکارساز همانطور که در شکل (۱) نشان داده شده است شامل ۳ آشکارساز ردپای خورشیCR-39 میباشد. طرح و روش اولیه بر پایه بهره‌گیری از عوامل هندسی با شرایط بهینه، ترکیب مناسب اجزا و بکارگیری فیلترهای مناسب برای ثبت جداگانه اثرات ذرات پروتون، نوترون و آلفا بر آشکارساز ساخته شده در میدان مخلوط می‌باشد. با این تفکیک میتوان سهم ناشی از هر ذره را تعیین کرد که با توجه به ضریب کیفیت هر ذره میتوان دز معادل را برای پرتوکاران و مردم به دست آورد. برای طراحی آشکارساز مذکور از فیلم‌های ردپای خورشی CR-39 ، قرص بور و ورقه کادمیوم با ضخامت و قطر بهینه[۱۲]، لایه کپتون و لایه آلومینیوم استفاده شده است. برای کالیبراسیون آشکارساز فوق به هر یک از ذرات پروتون، نوترون و آلفا به ترتیب از شتابدهنده واندوگراف سازمان انرژی اتمی، چشمه امرسیوم- بریلیوم استاندارد و چشمه امرسیوم-۲٤۱ استاندارد استفاده شده است.



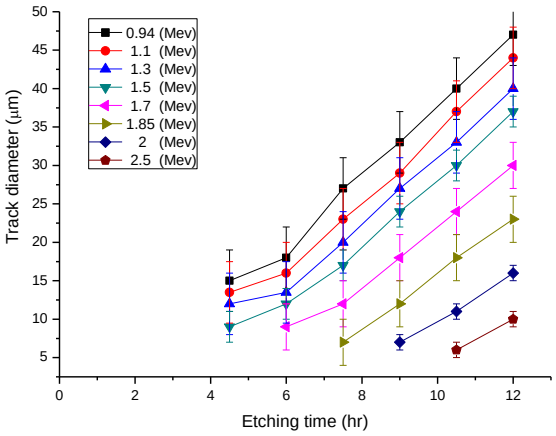
شکل (۱): شمایی از آشکارساز طراحی شده با حفاظ های مورد استفاده.

آشکارساز CR-39 با ضخامت ۷۵۰ µm از شرکت tastrack خریداری و توسط کاتر به قطعات 1cm×1cm بریده شده است [۱۳]. تمامی نمونه ها پس از پرتودهی در محلول سدیم هیدروکسید 6.25 N در دمای ۸۵ ° C خورش شدند. در ادامه به چگونگی کالیبراسیون این آشکارسازها (CR-39) به هر یک از ذرات ذکر شده و نتایج پرداخته می‌شود.

۱،۲. پرتودهی نمونه‌های CR-39 با ذرات پروتون

در این آزمایش برای پرتودهی پرتون از شتابدهنده واندوگراف سازمان انرژی اتمی استفاده شده است. با توجه به حداکثر توان تفکیک فیلم ، فویل طلا برای پراکندگی پرتون ها به کار رفته است. این پرتون های با انرژی MeV ۲/۵–۰/۹ به سطح نمونه تابیده شده است. پرتون‌های تابیده شده به فویل طلا برخورد کرده و به صورت الاستیک به سمت عقب پراکنده می شوند

(روش پس پراکندگی رادرفورد). انرژی پرتون های بازگشتی از فویل طلا حداکثر ٤٠ KeV با بیم اصلی تفاوت دارند که این مقدار قابل صرف نظر کردن است. در شکل (۲) نتیجه حاصل از پرتودهی در انرژی های مختلف ارائه گردیده است.

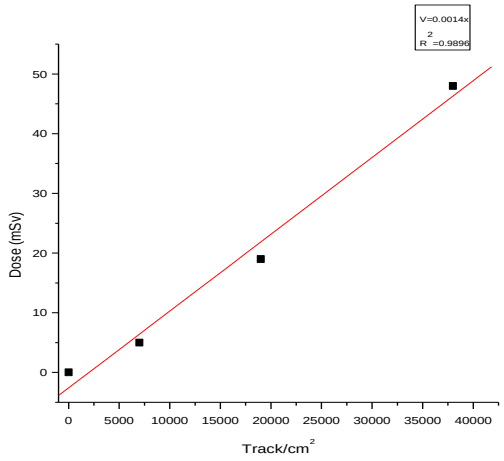


شکل(۲): پاسخ CR-39 به پروتون بر اساس زمان خورش در انرژی‌های متفاوت در محلول خورش سدیم هیدروکسید 6.25N در دمای خورش (۱ ± ۸۵° C)

۲,۲. پرتودهی نمونه‌های CR-39 با ذرات نوترون

در این تحقیق برای پرتودهی نوترون از چشمه امرسیوم-بریلیوم ^{241}Am-Be استاندارد با آهنگ گسیل 1.96×10^{7} n/s استفاده شده است. قرص بور نیز برای تبدیل نوترون‌های حرارتی و آلبدوی بازگشتی از بدن به ذرات آلفا به کار برده شده است.

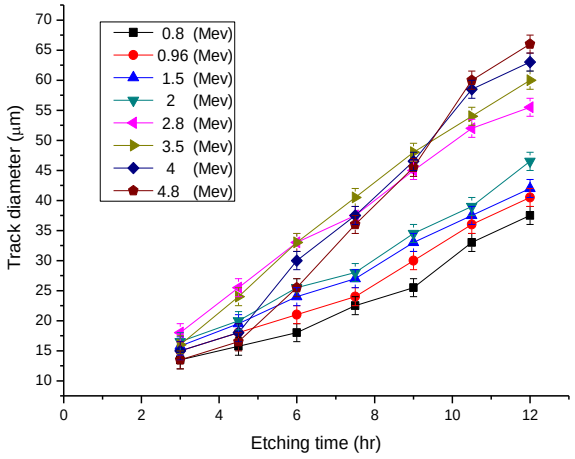
ضخامت جرمی و قطر قرص بور مورد استفاده در این آشکار ساز برابر ۷/۵ mg/cm^2 و ۸ mm می باشد[۱۲]. برای ثبت کردن نوترون‌های آلبدو ناشی از برخورد نوترون های سریع به فانتوم آب و حذف نوترون‌های حرارتی از ورقه کادمیوم استفاده شده است. فانتوم مورد استفاده در این آزمایش یک پلاکسی گلاس استاندارد پر شده از آب به مساحت cm^2 ۳۰×۳۰ بوده است. با بررسی نتایج حاصل از پرتودهی با ذرات نوترون و محاسبه سهم نوترون‌های سریع منحنی کالیبراسیون این آشکارساز به ذرات نوترون سریع بدست آمد که در شکل زیر مشاهده میشود(شکل (۳)).



شکل(۳): منحنی کالیبراسیون نوترون سریع در میدان ^{241}Am-Be در مدت زمان خورش ۵ ساعت در محلول خورش سدیم هیدروکسید (۱ C ± ۸۵°)

۳,۲. پرتودهی نمونه‌های CR-39 با ذرات آلفا

برای پرتودهی فیلم‌ها با ذرات آلفا از چشمه ^{241}Am استاندارد با انرژی آلفای ۵/٤۸ MeV استفاده شده است. انرژی ذرات آلفای برخوردی با سطح آشکارساز با زیاد کردن فاصلهٔ آشکارساز با منبع تولید آلفا در هوا کاهش می‌یابد و به عبارت دیگر هر فاصله معادل با طیف خاصی از انرژی ذرات آلفاست. برای این منظور از کولیماتورهای برنجی در ارتفاعات مختلف استفاده شد. تعداد ذرات آلفای برخورد کننده با سطح آشکارساز در همه انرژی‌ها مشخص می باشد.



شکل(۴): پاسخ فیلم CR-39 به آلفا در زمان‌های خورش مختلف در انرژی‌های مختلف در محلول خورش سدیم هیدروکسید 6.25N در دمای خورش (۱ ± ۸۵° C).

۳. بحث و نتایج

برای طراحی آشکارساز تفکیک کننده از هشت فیلم CR-39 در دو گروه چهار تایی برای دو سری پرتودهی استفاده شد. با وجود اینکه این چهارفیلم می توانند به صورت چسبیده به هم استفاده گردد، با این حال برای اطمینان از یکنواخت بودن پرتودهی از چهار فیلم با اندازه $1\times1\ cm^2$ استفاده گردید. فیلم های شماره یک و دو و سه به صورت زیر تعریف میشوند.

۱- از دو فیلم که بین آن‌ها ورقه کادمیوم قرار داشت و پشت و روی ورقه قرص بور چسبیده شده است استفاده گردید .

۲- روی فیلم دیگر لایه کپتون به ضخامت 7.5 μm قرار داشت.

۳- روی فیلم آخرورقه آلومینیوم به ضخامت ٤٥ μm قرار داشت .

در سری اول پرتودهی این آشکارسازها با پروتون‌های انرژی ۱/۵ MeV و سپس آلفای ۱MeV ناشی از چشمه امرسیوم استاندارد با استفاده از کولیماتور برنجی و در نهایت با نوترون-های چشمه امرسیوم-بریلیوم استاندارد با دز ٤ mSv پرتودهی شدند. در این مرحله برای حذف ذرات آلفا از دو لایه کپتون استفاده شد. در سری دوم پرتودهی فیلم‌ها ابتدا با پروتون‌های با انرژی ۱/۲ MeV و سپس آلفای ۱/۵ MeV ناشی از چشمه امرسیوم استاندارد با استفاده از کولیماتور برنجی با انرژی و در نهایت با نوترون‌های چشمه امرسیوم-بریلیوم با دز ٤ mSv پرتودهی شدند. در مرحله دوم پرتودهی برای حذف ذرات آلفا یک لایه کپتون به کار برده شد. برای تمامی نمونه‌ها ، به مدت ۵ ساعت با محلول خورش 6.25 N سدیم هیدروکسید فرایند آشکار سازی انجام شد. با فیلم شماره ۱ می‌توان اثر تمام ذرات را ثبت نمود. یعنی این فیلم اثر مخلوط همه ذرات (پروتون، نوترون و آلفا) را ثبت می کند. در تمام نواحی این فیلم به جز ناحیه‌ای که قرص بور قرار دارد تمام ذرات نوترون، آلفا و پروتون ثبت خواهد شد. در زیر ناحیه قرص بور به دلیل ضخامت کافی قرص بور و برد کوتاه ذرات آلفا و پروتون ، این ذرات نمی‌توانند از حفاظ بور عبور کنند. این قرص می-تواند نوترون‌های حرارتی را جذب نموده و ذرات آلفا ایجاد نماید که این ذرات آلفای القایی ناشی از نوترون حرارتی، متفاوت با آلفای تابشی از چشمه امرسیوم و آلفای زمینه می-باشند. در فیلم شماره ۲ ضخامت لایه کپتون به گونه‌ای است که (با ملاحظه نتایج محاسبات نرم افزار TRIM) جلوی ذرات آلفا گرفته شده واین ذرات کاملاً متوقف خواهند شد. انرژی تمام ذرات پروتون به دلیل وجود این لایه به مقدار مشخصی کاهش خواهد یافت که با نتایجی که از اجرای این نرم افزار حاصل شد، به راحتی می‌توان انرژی ذرات پروتونی که به سطح آشکارساز می‌رسند را محاسبه نمود. پس در این ناحیه تنها می توان اثر ذرات نوترون وپروتون را دید. در نتیجه از اختلاف فیلم شماره ۱ که تمام ذرات را ثبت کرده و فیلم شماره ۲ که نوترون‌ها و پروتون‌ها را ثبت کرده میتوان تعداد ذرات آلفا را مشخص نمود. در فیلم شماره ۳ از یک فویل

آلومینیوم به ضخامت ٤٥ µm استفاده شد که این ضخامت با توجه به محاسبات می‌تواند جلوی ذرات آلفا و پروتون را با انرژی‌های مذکور بگیرد. پس در این ناحیه فقط نوترون خواهیم داشت که از اختلاف این فیلم و فیلم شماره ۲ میتوان تعداد پروتون‌ها را به دست آورد. تا این مرحله ما توانستیم ذرات را جدا کنیم. حال پس از جداسازی ذرات میتوان دز ناشی از نوترون سریع را محاسبه و انرژی ذرات پروتون و آلفا را با توجه به کالیبراسیون‌هایی که انجام دادیم، تفکیک کرد. برای مثال در فیلم شماره ۲ که فقط پروتون و نوترون وجود دارد، با توجه به اینکه قطر ردپاهای پروتون تقریباً یکسان می‌باشد با میانگین‌گیری قطر ذرات و منحنی‌های کالیبراسیون مربوطه تقریباً میتوان به انرژی پروتون پی برد. البته باید دقت نمود که تمامی این فیلم‌ها از شماره ۱ تا ۳ در محلول خورش یکسان سدیم هیدروکسید 6.25N به مدت ۵ ساعت و دمای 85°C خورش شوند. فیلم شماره ۱ آشکارسازی است که تمام ذرات را ثبت کرده است (بدون حفاظ). فیلم شماره ۲ آشکارسازی است که در آن پروتون و نوترون ثبت شده است (با استفاده از لایه کپتون) و در فیلم شماره ۳ فقط اثر ذرات نوترون به جای مانده است (با استفاده از ورقه آلومینیومی).

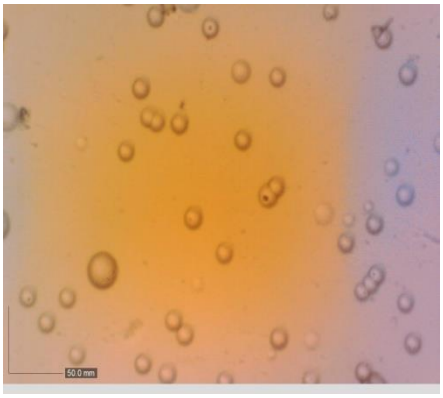
حال با استفاده از نتایجی که به دست آمد به راحتی می‌توان با تفریق فیلم‌ها از یکدیگر به تعداد ذرات نوترون و پروتون و آلفا پی برد. آشکارساز طراحی شده را می‌توان به افرادی که در میدان‌های مخلوط پرتوی کار می‌کنند ارائه نمود تا این آشکارساز بر روی بدن (سینه) آن ها قرارداده شود. در صورتی که استقرار آشکارساز روی بدن پرتوکار ممکن نباشد چون حدود ۸۰٪ بدن انسان را آب تشکیل می‌دهد این آشکارساز می‌تواند روی محیطی مانند مخازن آب که عملکرد شبیه به بدن دارد، نصب شود. در صورت وجود ذرات باردار با انرژی بالا یا شار بالای موجود در محیط با این آشکارساز تفکیک کننده ذرات میتوان اقدامات چاره ساز حفاظتی را در صورت لزوم انجام داد. همچنین این آشکارساز را میتوان در هواپیما و ماهواره‌ها قرار داده تا برآوردی از تعداد ذرات برخوردی (نوترون و پروتون و آلفا) و انرژی ذرات باردار (آلفا و پروتون) داشته باشیم و بتوان برای حفاظت از پرسنل و قطعات الکترونیکی نیز استفاده کرد.

۴. نتیجه‌گیری

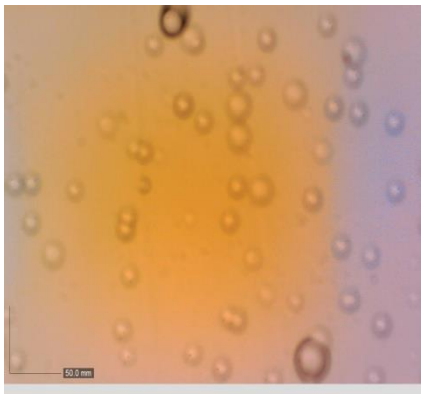
با پرتودهی آشکارساز CR-39 با ذرات نوترون توسط چشمه استاندارد امرسیوم بریلیوم منحنی کالیبراسیون این آشکارساز با ذرات نوترون حاصل شد و از این منحنی میتوان برای تشخیص تعداد ذرات نوترون سریع ثبت شده در میدان ناشناس استفاده کرد. نتایج حاصل از پرتودهی پروتون با شتابدهنده واندوگراف نشان داده شد که با بیرون آوردن نمونه‌ها در زمان‌های خورش با بازه ۱/۵ ساعت میتوان اسپکترومتری تابش پروتون انجام شود که ردپاهای واضح پروتون‌ها با انرژی‌های مختلف در زمان‌های خورش متفاوت و قطر ردپاهای متفاوت در هر دو محلول خورش قابل تفکیک می‌باشند. همچنین در بازه انرژی پرتودهی پروتون‌های MeV ۲/۵–۰/۹٤ نشان داده شد که با افزایش انرژی پروتون قطر ردپا کاهش یافته و با افزایش زمان خورش نیز قطر ردپا افزایش می‌یابد. نمونه‌های پرتودهی شده با ذرات آلفا توسط چشمه امرسیوم استاندارد در بازه‌های زمانی ۱/۵ ساعت خورش شدند و نتایج حاصل نشان داد که در زمان‌های خورش بیشتر قابلیت تفکیک انرژی برای این ذره بهتر میتواند صورت پذیرد. در نتیجه با انجام این آزمایش نیز اسپکترومتری تابش آلفا با استفاده از آشکارساز ردپای خورشی CR-39 صورت پذیرفت. همچنین در تمامی مراحل رؤیت شد که با افزایش زمان خورش قطر ردپای تمام ذرات افزایش می‌یابد. از تمامی نتایج حاصل میتوان به عنوان اطلاعات کالیبراسیون برای قرار دادن

این آشکارساز در میدان مخلوط ناشناخته استفاده کرد. در نهایت با طراحی آشکارساز تفکیک کننده ذرات با ترکیب مناسب مواد و حفاظ‌های مختلف جداسازی سهم ذرات پروتون، آلفا و نوترون سریع و نوترون حرارتی و نوترون آلبدو و همچنین جداسازی انرژی ذرات پروتون و آلفا صورت گرفت.

A



B

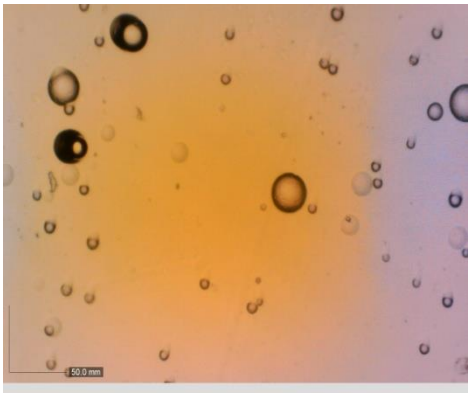


شکل(۵): A) تصویر مربوط به میدان مخلوط آلفای MeV ۱ و پروتون MeV ۱/۵ و نوترون با دز mSv ۴ (پرتودهی سری اول) خورش شده در محلول سدیم هیدروکسید به مدت ۵ ساعت B) تصویر مربوط به میدان مخلوط آلفای MeV ۱/۵ و پروتون MeV ۱/۲ و نوترون با دز mSv ۴ (پرتودهی سری دوم) خورش شده در محلول سدیم هیدروکسید به مدت ۵ ساعت

۵. قدردانی

از همکاری صمیمانه بخش حفاظت در برابر اشعه سازمان انرژی اتمی ایران که تامین کننده وسایل مربوط آشکارساز ردپای هسته ای حالت جامد بوده اند، تشکر و قدردانی می‌گردد.

A



B

شکل(۶): A) تصویر مربوط به میدان مخلوط پروتون MeV ۱/۵ و نوترون با دز mSv ۴ خورش شده در محلول سدیم هیدروکسید به مدت ۵ ساعت B) تصویر مربوط به میدان نوترون با دز mSv ۴ زیر منطقه قرص بور خورش شده در محلول سدیم هیدروکسید به مدت ۵ ساعت

۶. مراجع

[1] S. Akkoyun. Time of flight discrimination between gamma-rays and neutrons by using artificial neural networks. Ann. Nucl. Energy. 55(2013) 297-301.

[2] A. Jancar, Z. Kopecký, J. Dressler, M. Veškrna, M. Matěj, et al. Pulse shape discrimination of the new plastic scintillators in neutron-gamma mixed field using fast digitizer card. Radiat. Phys. Chem.116 (2015) 60-64.

[3] I. A. Pawelczak, A.M. Glenn, H.P. Martinez, M.L. Carman, et al. Boron-loaded plastic scintillator with neutron-γ pulse shape discrimination capability. Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. 751(2014), 62-69.

[4] M. Takada, S. Taniguchi, T. Nakamura, N. Nakao, et al. Characteristics of a phoswich detector to measure the neutron spectrum in a mixed field of neutrons and charged particles. Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. 476(2002) 332-336.

[5] A. Majeed, F. Humayun, S. M. Ahmad, S. A. Durrani. A simple technique to discriminate various charged particles using SSNTDs. Nucl. Tracks. Radiat. Meas. 22(1993) 679-682.

[6] D. Nikezic and k. N. Yu. Formation and growth of tracks in nuclear track materials. Mat. Sci. Eng. 46(2004) 51-123.

[7] F. Castillo, G. Espinosa, , J.I. Golzarri, , D. Osorio, et al. Fast neutron dosimetry using CR-39 track detectors with polyethylene as radiator. Radiat. Meas. 50(2013) 71-73.

[8] D. Fan, W. Zhuo, , B. Chen, C. Zhao, et al. An improved electrostatic integrating radon monitor with the CR-39 as alpha particle detector. Radiat. Prot. Dosim. 167(2015) 1-3.

[9] S. Codaira, R.V. Tolochek, , I. Ambrozova, H. Kawashima, et al. Verification of shielding effect by the water-filled materials for space radiation in the International Space Station using passive dosimeters. Adv. Space. Res. 53(2014) 1-7.

[10] S. Paul, S.P. Tripathy, G.S. Sahoo, T. Bandyopadhyay, et al. Measurment of fast neutron spectrum using CR-39 detectors and a new image analysis program. Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. 729(2013) 444-450.

[11] M. E. Ghazaly. On alpha particle spectroscopy based on the over-etched track length in PADC. Radiat. Eff. Defects S. 167(2012) 421-427.

[12] M. Sohrabi, M. Katouzi. Some characteristics of the AEOI neutriran albedo neutron personnel dosemeter. Radiat. Prot. Dosim. 34(1990) 149-152.

[13] F. Bahrami, F. Mianji, R. Faghihi, M. Taheri, et al. Response of CR-39 to 0.9–2.5 MeV protons for KOH and NaOH etching solutions, Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. 813(2016) 96-101.