



آشکارسازی اشعه ایکس پر انرژی توسط آشکارساز گازی مقیاس ریز با استفاده از کد MCNPX

حضری پور ، سعیده^(۲) - نگارستانی ، علی^(۱) - رضایی ، محمدرضا^(۱)

^(۱) دانشگاه تحصیلات تکمیلی صنعتی و فناوری پیشرفته ، دانشکده برق ، گروه مهندسی هسته ای

^(۲) دانشگاه تحصیلات تکمیلی صنعتی و فناوری پیشرفته ، دانشکده علوم و فناوری های نوین ، دانشجوی دکتری گروه فیزیک

چکیده:

هدف از این مقاله، بررسی پاسخ آشکارساز میکرومگاز به یک باریکه‌ی x با انرژی 2.3 MeV با استفاده از مبدل‌های فوتون به نوترون و بهینه‌سازی اجزای آشکارساز با استفاده از شبیه‌سازی مونت کارلو کد MCNPX است. نتایج نشان می‌دهد که D_2O با بهره‌ی 2×10^{-5} بهترین گزینه جهت تبدیل فوتون‌نوترون‌های پرتوهای ایکس با انرژی 2.3 MeV می‌باشد. جهت مطالعه‌ی پاسخ آشکارساز میکرومگاز به فوتون‌های اشعه‌ی ایکس پر انرژی، ضخامت الکتروود بالایی، نوع گاز، محل میکروشبکه، فاصله‌ی بین حفره‌ها (pitch)، قطر سوراخ‌های میکروشبکه و ابعاد ناحیه‌ی تکثیر بررسی و بهینه‌سازی شده است. جریان خروجی آشکارساز به ازای یک فوتون برابر با 5.12 pA بدست می‌آید.

کلمات کلیدی: آشکارساز گازی، میکرومگاز، فوتون‌نوترون، اشعه‌ی ایکس، MCNPX

مقدمه :

به طور کلی آشکارسازی پرتو ایکس توسط فیلم عکاسی، آشکارساز سوسوزن، آشکارساز نیمرسانا و آشکارساز گازی انجام می‌شود. آشکار ساز گازی ساده‌ترین آشکارسازی است که نسبت به اثرهای یونش تابش هسته ای در یک گاز حساس است. این نوع از آشکارسازها دارای محفظه‌ای هستند که حاوی حجم مشخصی از گاز می‌باشند. انواع آشکارسازهای گازی شامل اتافک یونیزاسیون، آشکارساز تناسبی و آشکارساز گایگرمولر می‌باشد. آشکارساز تناسبی گازی چندسیمی حساس به موقعیت، اولین بار توسط چارپک^۱ در سال ۱۹۶۸، پیشنهاد شد [۱]. در سال ۱۹۸۸ انتون اود^۲ اتافک های گازی میکرو نواری^۳ (MSGC) مثل آشکارساز گازی میکرو الگو^۴ را مطرح کرد [۲]. این آشکارسازها با مقیاس ریز ساختار و ناحیه‌ی تکثیر کوچکشان مشخص می‌شوند که این ویژگی اجازه‌ی دسترسی به قدرت تفکیک مکانی چند میکرومتر را می‌دهد که در دنبال کردن ذره یا کاربردهای تصویربرداری توسط تابش بسیار مفید است. امروزه این آشکارسازها طراحی های مختلفی دارند که مشخصه عمومی شان داشتن ناحیه تقویت کوچک بین کاتد و آند و در حدود کمتر از 1 mm است. یکی از انواع این آشکارسازها، نوع میکرومگاز می‌باشد.

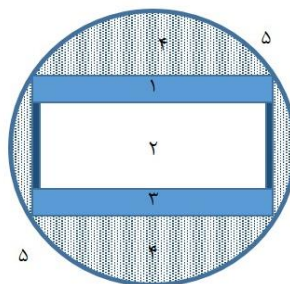
۱ Charpak
۲ Anton Oed
۳ Micro Strip Gas Counter
۴ Micro Pattern

آشکارساز میکرومگاز، در سال ۱۹۹۲ توسط چارپک برای اولین بار معرفی و طراحی شد [۳]. در سال ۱۹۹۶ این آشکارساز به عنوان ابزاری موثر برای آشکارسازی حساس به مکان ذرات با شار بالا معرفی شده و شهرت قابل توجهی در کاربردهای فیزیک ذرات انرژی بالا پیدا کرد [۴]. از مزایای این نوع آشکارساز، این است که ناحیه تولید بار و تکثیر آن، یکسان نمی‌باشد و از این رو تمامی الکترونها دارای ضریب تکثیر یکسان خواهند بود. این آشکارسازها جهت آشکارسازی الکترون، پروتون، نوترون، آلفا و ... توسط محققین مختلفی توسعه یافته‌اند [۵-۷]. در این تحقیق اشعه‌ی X را از لحاظ انرژی به دو دسته‌ی با انرژی بالاتر از 2 Mev و کمتر از 2 Mev تقسیم کرده ایم. چگونگی بکارگیری میکرومگاز با توجه به انرژی و شدت پرتوی X متغیر است. یک آشکارساز میکرومگاز جهت آشکارسازی پرتوهای X با انرژی بالاتر از 2 Mev و با آهنگ بالا طراحی و بهینه‌سازی می‌شود که در ادامه به چگونگی روش آن اشاره خواهد شد. در این بهینه‌سازی از کد شبیه‌سازی مونت کارلو MCNPX که یک کد اتمی-هسته‌ای چندمنظوره می‌باشد، استفاده شده است.

روش کار :

کد MCNPX یکی از قویترین کدهای محاسباتی بر پایه روش مونت کارلو و اعداد تصادفی می‌باشد. این کد در طراحی راکتورهای هسته‌ای، طراحی آشکارسازها، چاه پیمایی هسته‌ای، پرتو پزشکی و دیگر موارد کاربردهای بسیاری دارد.

برای استفاده از این کد باید یک فایل ورودی شامل بخش‌های مشخصی تهیه گردد [۸]. این بخش‌ها شامل کارت هندسه، کارت سطوح، کارت سلول‌ها، کارت چشمه و کارت داده‌ها توصیف می‌شوند. هندسه‌ی آشکارساز شامل ۵ سلول است که براساس اجزای آشکارساز مطابق شکل ۲ تعریف شده اند.



شکل ۱: نمایش سلول‌های تعریف شده در کد mcnp

سلول یک، صفحه‌ای استیل به ابعاد $10 \times 10 \times Z_1$ (برحسب سانتیمتر) است که Z_1 باید بهینه شود. سلول دو، حجمی از گاز هوا یا P10 در فشار یک اتمسفر است که ابعاد آن $10 \times 10 \times 0.3$ (برحسب سانتیمتر) می‌باشد. سلول سه، صفحه‌ای استیل به ابعاد $10 \times 10 \times 0.1$ (برحسب سانتیمتر) است. بدنه‌ی دستگاه از جنس پلکسی گلاس به ضخامت یک سانتیمتر می‌باشد. سلول چهارم فضای داخل یک کره به استثنای آشکارساز است که محل قرار گرفتن مبدل و چشمه‌ی اشعه‌ی X می‌باشد. سلول پنجم، کل فضای خارج از کره است که هیچ



ماده ای را شامل نمی‌شود. در مرحله‌ی دوم نیز یک صفحه‌ی میکروشبکه به مجموعه‌ی این سلول‌ها اضافه می‌شود که بین دو الکتروود بالا و پایین قرار گرفته و مکان دقیق آن نیز با بهینه‌سازی تعیین می‌شود. بدین ترتیب ناحیه‌ی بین الکتروود بالایی و میکروشبکه، ناحیه‌ی سوق و ناحیه‌ی بین میکروشبکه تا الکتروود پایینی، ناحیه‌ی تکثیر خواهد بود.

هوا ترکیبی از عناصر مختلف با درصدهایی مطابق با گزارش ICRU می‌باشد [۱۰]. گاز P10 نیز ترکیبی از گازهای آرگون به میزان ۹۰٪ و متان به میزان ۱۰٪ است. چشمه‌ی استفاده شده، چشمه‌ی استفاده شده یک چشمه‌ی X با انرژی بیش از 2 MeV است که به صورت عمود بر مبدل تابیده می‌شود. از تالی‌های مختلف جهت محاسبه تعداد الکترون‌های تولید شده در ناحیه‌ی سوق و تکثیر، الکترون‌های وارد شده به محیط سوق از الکتروود بالایی، دوز بجا مانده در ناحیه‌ی سوق و ناحیه‌ی تکثیر و نیز دوز بجا مانده در داخل حفره‌های میکرومش استفاده می‌شود. از مش تالی F₁ برای محاسبه دوز عمقی در نواحی مختلف آشکارساز استفاده شده است.

نتایج :

فایل ورودی نوشته شده جهت بهینه‌سازی آشکارساز میکرومگاز با استفاده از کد MCNPX نسخه 2.6 که توانایی ترابرد ۳۲ ذره مختلف را دارد در محیط ویندوز ۱۰ با حافظه ۸ گیگابایت، سرعت ۲/۵ گیگاهرتز و i7 cpu اجرا شده است. نتایج این شبیه‌سازی برای مواد مختلفی که جهت تبدیل اشعه‌ی X پر انرژی به نوترون‌های کم انرژی بکار رفته‌اند در جدول ۱ گزارش شده است. باتوجه به جدول از هر مبدل می‌توان برای آشکارسازی رنج بخصوصی از اشعه‌های X پر انرژی بین 20-2 MeV استفاده کرد. بطور مثال جهت **آشکارسازی اشعه‌ی X با انرژی 2.3 MeV و انرژی 7.6 MeV به ترتیب از مبدل‌های آب سنگین و تنگستن** استفاده شده است. نتایج نشان می‌دهد که آب سنگین پاسخ انرژی نوترونی تیزتری در انرژی 60 keV با بهره‌ی $\gamma=2 \times 10^{-5}$ نسبت به تنگستن از خود نشان می‌دهد و نیز طیف فوتونوترون‌های اشعه‌ی X پر انرژی تولید شده برای D₂O پهنای خیلی کمتری نسبت به w دارد (شکل‌های ۲ - الف و ۲ - ب). بنابراین در ادامه جهت بررسی پاسخ آشکارساز به فوتون‌های اشعه‌ی X با انرژی 2.3 MeV، از مبدل آب سنگین (D₂O) استفاده شده است.

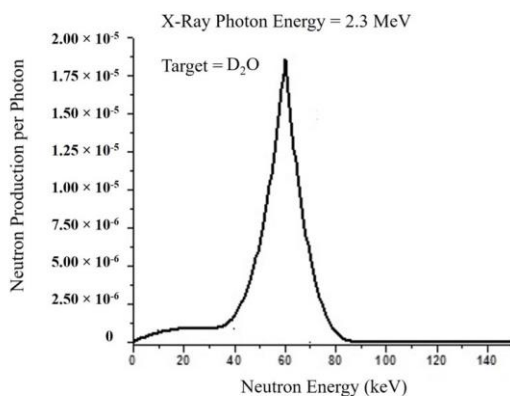
همان طور که در شکل ۲ مشاهده می‌شود که تغییر ضخامت پنجره‌ی ورودی یعنی ورقه‌ی استیل بالا، تعداد الکترون‌های خارج شده از الکتروود بالایی به محیط سوق برای هوا و گاز p10 در محیط سوق برای فوتونوترون‌ها در حالتی که تعداد فوتون‌های چشمه ۱۰^۶ ذره باشد مطابق شکل ۳ می‌باشد. شکل ۳ نشان می‌دهد که ضخامت بهینه الکتروود بالایی که از جنس استیل در نظر گرفته شده هم برای هوا و هم برای گاز P10 به اندازه‌ی ۰/۰۰۲۶ سانتیمتر است. اگر کل فضای آشکارساز طبق شکل ۴ به ۷۵۰۰۰۰ مش مکعبی مساوی با ابعاد ۰/۲×۰/۲×۰/۲ سانتیمترمربع و ضخامت ۰/۰۰۱ سانتیمتر (تعداد ۲۵۰۰ مش در سطح آشکارساز و



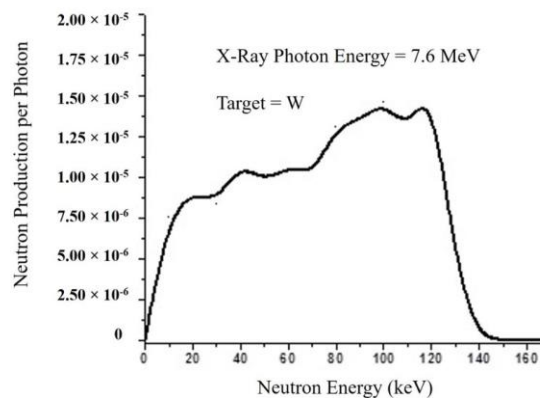
تعداد ۳۰۰ مش در راستای عمودی) طبق شکل ۴ تقسیم شود، دوز بجا مانده در ناحیه‌ی تکثیر و سوق آشکارساز برای هوا و P10 در حضور میکروشبکه بصورت تابعی از ارتفاع در شکل ۵ نشان داده شده است.

جدول شماره (۱): انرژی آستانه‌ی تولید فوتونوترون از هدف های مختلف

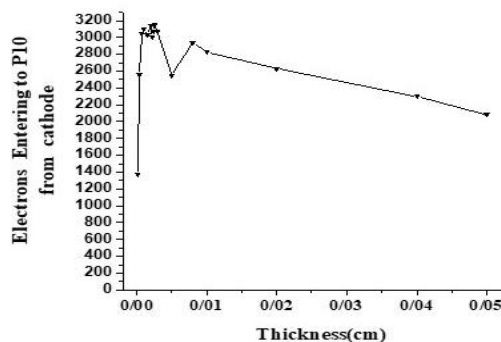
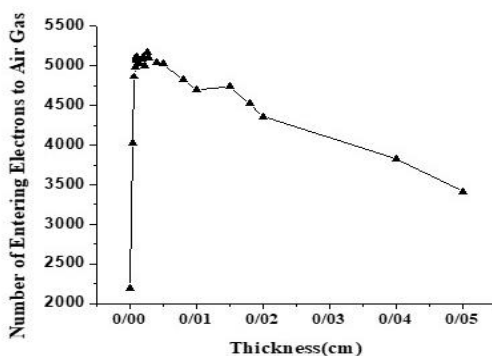
انرژی آستانه (MeV)	ماده‌ی هدف	ردیف
۱/۶۶۷	^9Be	۱
۲/۲۲۵	^2D	۲
۳/۶۹۷	^6Li	۳
۴/۹	^{13}C	۴
۷/۲۵۱	^7Li	۵
۲/۳	D_2O	۶
۷/۶	W	۷



شکل ۲- ب: طیف فوتونوترون‌های تولید شده در اثر اشعه‌ی ایکس بر انرژی فرود آمده بر هدف D_2O

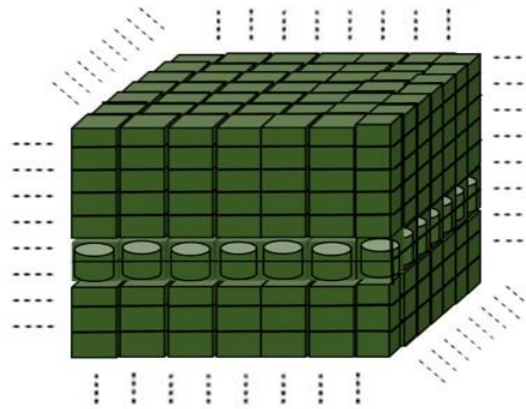


شکل ۲- الف: طیف فوتونوترون‌های تولید شده در اثر اشعه‌ی ایکس بر انرژی فرود آمده بر هدف تنگستن

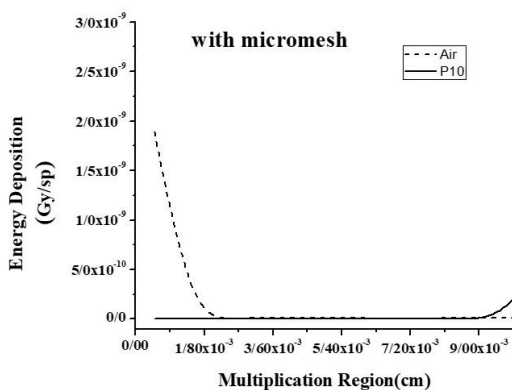


شکل ۳- ب : تعداد الکترون های وارد شده از الکتروود به هوا

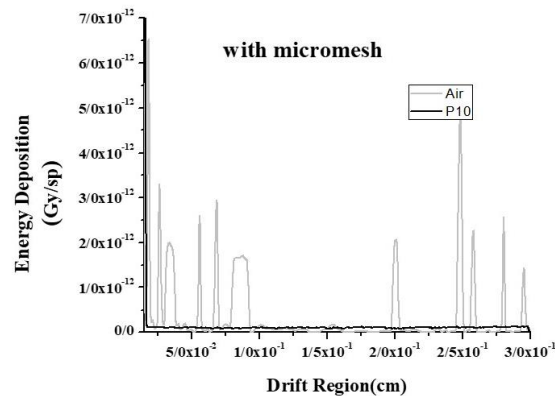
شکل ۳- الف : تعداد الکترون های وارد شده از الکتروود به گاز P-10



شکل ۴: نمایش مش بندی کل فضای آشکارساز



شکل ۵ - ب : انرژی بجامانده فوتون در ناحیه تکثیر



شکل ۵ - الف : انرژی بجامانده فوتون در ناحیه سوق

همانطور که در شکل ۵ مشاهده می شود در ناحیه سوق و نزدیک میکرومش در هوا دوز بیشتری نسبت به گاز P10 بجا گذاشته می شود و تقریباً در تمام ناحیه تکثیر دوز بجامانده در هوا نسبت به گاز P10 بزرگتر است. بنابراین هوا نسبت به گاز P10 گاز مناسب تری جهت آشکارسازی نوترون های ایجاد شده از پدیده فوتونوترون می باشد.

مجموع دوز در دو ناحیه حساس آشکارساز با گاز هوا (با چگالی $1.29 \times 10^{-6} \text{ kg/cm}^3$) با حجم $2 \times 10^{-4} \text{ cm}^3$ برابر با $2 \times 10^{-9} \text{ Gy}$ می باشد در نتیجه میزان انرژی بجامانده به ازای یک نوترون (E) برابر با $5.16 \times 10^{-19} \text{ J}$ یا 3.22 eV بدست می آید.



تعداد الکترونها تولید شده در اثر یک فوتون پرنرژ (n₀) برابر با حاصلضرب بهره ی تولید فوتونوترون (γ)، میزان انرژي بجامانده در اثر یک نوترون (E) تقسیم بر انرژي لازم برای تولید یک زوج یون در گاز هوا (w=35eV) می باشد. جریان آشکارساز برابر است با:

$$I = \frac{kn_0e}{t} = \frac{k\gamma Ee}{tw}$$

k ضریب تکثیر گاز (k=10⁵)، e بار الکترون و t زمان جمع آوری بار است که برابر است با ۰/۰۱۵μs. بنابراین جریان خروجی آشکارساز به ازای یک فوتون برابر با 5.12 pA بدست می آید که عدد مناسبی برای ورودی یک تقویت کننده می باشد که متصل به آشکارساز میکرومگاز است.

بحث و نتیجه گیری :

با استفاده از کد mcnp یک آشکارساز میکرومگاز با ابعاد ۱۰×۱۰×۰/۳ cm جهت آشکارسازی اشعه ی ایکس پرنرژي با انرژي 2.3 MeV بهینه سازی شده است. بهترین مبدل برای تبدیل اشعه ی X پرنرژي به فوتونوترون های قابل آشکارسازی توسط میکرومگاز، دوترون است. ضخامت بهینه الکتروود بالایی بین ۰/۰۱ تا ۰/۰۲۶ سانتیمتر برای هر دو گاز هوا و p10 است. بطور کلی پاسخ آشکارساز و دوز انرژي بجا مانده براساس انرژي اشعه، جنس گاز، ضخامت الکتروود بالایی بهینه سازی شده است. نتایج نشان می دهند که این آشکارساز توانایی آشکارسازی اشعه ی ایکس با انرژي بالای 2 MeV را دارد.

مراجع :

- [1] G. Charpak, R. *et al*, The use of multiwire proportional counters to select and localize charged particles, Nucl. Instrum. Meth. 62 (1968).
- [2] A. Oed, Micro pattern structures for gas detectors, Nucl. Instrum. Meth. A 471 (2001).
- [3] G. Charpak, Electronic imaging of ionizing radiation with limited avalanches in gases, Reviews of modern physics, 65 (1993).
- [4] Y. Giomataris, *et al*, MICROMEAS: a high-granularity position-sensitive gaseous detector for high particle-flux environments, Nucl. Instrum. Meth. A 376, (1996).
- [5] S. Andriamonje, S. Aune, G. Bignan, C. Blandin, E. Ferrer, I. Giomataris, *et al*, New neutron detectors based on Micromegas technology, Nucl. Instrum. Meth. A 525 (2004).
- [6] J. Pancin, *et al*, Piccolo Micromegas: First in-core measurements in a nuclear reactor, Nucl. Instrum. Meth. A 592 (2008).
- [7] S. Aune, *et al*, Neutron detection in high γ background using a micromegas detector, Nucl. Instrum. Meth. A 572 (2007).
- [8] J. F. Briesmeister, MCNP--A general Monte Carlo code for neutron and photon transport: Los Alamos National Laboratory, (1986).
- [9] ICRU, *Tissue Substitutes in Radiation Dosimetry and Measurement*, Report 44 of the International Commission on Radiation Units and Measurements (Bethesda, MD), (1989).



پاسخ به نظریات داوران محترم

با سلام و احترام

ضمن تشکر از نظریات مفید داوران محترم، پاسخ به سوالات مطرح شده توسط ایشان، به شرح ذیل می باشد:

- مبدل تنگستن و آب سنگین در جدول لحاظ گردید.
- هدف اصلی معرفی ایده و روش کار بوده که برای مثال برای دو ماده تنگستن و آب سنگین به عنوان هدف، شبیه سازی صورت گرفته است و در ضمن به علت محدودیت تعداد صفحات مقاله و نیاز به ذکر مطالب دیگر، برای بقیه ی مواد تنها به اطلاعات مربوطه در قالب جدول اکتفا شده است.
- طیف اشعه ی ایکس یک چشمه ی فرضی با انرژی ثابت 2.3 MeV جهت معرفی ایده بوده است. بنابراین این طیف فرضی تنها شامل یک خط طیفی با احتمال 100% است.
- در پاراگراف مربوط به نتایج متن مقاله اصلاح شده و به این صورت در آمده است: جهت آشکارسازی اشعه X با انرژی 2.3 MeV و انرژی 7.6 MeV به ترتیب از مبدل های آب سنگین و تنگستن استفاده شده است. در شکل ۲ هم طیف فوتونوترون های تنگستن برای انرژی 7.6 MeV و طیف فوتونوترون های آب سنگین برای انرژی 2.3 MeV رسم شده است.
- زیرنویس جدول و شکل ۲ و شکل ۳ بازنویسی شد.
- برای بدست آوردن حداقل ضخامت الکتروود بالایی، در شبیه سازی و متن برنامه ی کد MCNP، آنقدر ضخامت را تغییر دادیم که تعداد الکترون های وارد شده به گاز که از خروجی کد MCNP بدست می آید مقدار ماکسیمم را داشته باشد. در نمودار شکل ۳ نیز نمودار مربوطه تعداد الکترون های وارد شده به گاز را برحسب ضخامت الکتروود نمایش می دهد. درضمن با مش بندی بسیار ریز شبیه سازی این قسمت صورت گرفته است.
- شکل ۷ که اشتباهها در متن اشاره شده بود حذف گردید.



- به طور کلی ساز و کار این آشکارساز به این شرح است که ابتدا دوز اشعه در درون آشکارساز محاسبه شده و با توجه به فرمول‌های زیر که به دلیل محدودیت تعداد صفحات مقاله در متن مقاله ذکر نشده است، می‌توانیم جریان مربوط به اشعه را توسط این آشکارساز محاسبه کنیم. فرمول‌ها به صورت زیر هستند:

$$E = DM = D\rho V$$

در این رابطه E انرژی و D دوز بدست آمده از کد می‌باشد. M جرم مربوطه در فضای آشکارساز است که برحسب چگالی و حجم قابل محاسبه است.

$$n_0 = \frac{E}{w}$$

n_0 تعداد الکترون‌های تولید شده در ناحیه ی آشکارساز به ازای یک نوترون است.

$$I = \frac{kn_0e}{t}$$

k ضریب تقویت است که در حالت تئوری و در حالت تجربی برابر 10^4 و 10^6 می باشد و در اینجا مقدار متوسط 10^5 در نظر می گیریم. t نیز زمان جمع آوری یون می باشد که مقدار آن برابر ۱۰۰ نانوثانیه می باشد. به این ترتیب جریان خروجی آشکارساز بدست می آید.

- کار شبکه: با توجه به دوزی که به هر سلول شبکه می رسد در ناحیه ی تکثیر مربوط به آن، فرآیند تکثیر اتفاق می افتد و یک پالس در خروجی مشاهده می گردد. تعداد پالس‌های مشاهده شده نشان می دهد که چند حفره دریافت کننده ی دوز هستند که درون این حفره‌ها پدیده ی تکثیر اتفاق افتاده است. بنابراین با مطالعه ی تعداد حفره‌های درگیر، میتوان طیف زاویه ای فوتونوترون‌های تابیده شده از هدف و سپس طیف انرژی را بدست آورده و نیز شدت فوتونوترون‌ها را بدست آورد که با استفاده از آن میتوان شدت پرتو ایکس فرودی را برآورد کرد.

- نقش مبدل به این شرح است: هر چه انرژی پرتو ایکس بالا رود در محل حفره‌ها انرژی بیشتری به جا می ماند که با این انرژی، آشکارساز به ناحیه ی تخلیه یا arc وارد می شود و آشکارساز صدمه می بیند. به همین دلیل از مبدل استفاده می کنیم که فوتونوترون‌های مبدل انرژی کمتری دارند و دوز کمتری در ناحیه ی حساس به جا می گذارند و با استفاده از آن، آشکارساز در ناحیه ی تکثیر قرار می گیرد.

- تداخل به این صورت حل می شود: با توجه به اینکه پرتوی ایکس موازی با سطح آشکارساز به هدف تابیده می شود امکان ورود آن به آشکارساز کم بوده و با احتمال بسیار پایینی پرتوهای X اولیه به ناحیه ی حساس آشکارساز می رسند. بنابراین با یک موازی ساز، اشعه ی ایکس فقط به صورت عمود به هدف تابیده می شود و تداخلی به وجود نمی آید.



بیست و چهارمین کنفرانس هسته ای ایران



۱۳ و ۲ اسفندماه - دانشگاه اصفهان
P: ۱۳۳۵

با تشکر از توجه جنابعالی
سعیده خضری پور - علی نگارستانی - محمدرضا رضایی