



طراحی مفهومی پایشگر مواد با استفاده از اشعه ایکس - سه انرژی

علیرضا مازوچی، فائزه رحمانی*، فریدون عباسی دوانی، روح اله قادری

دانشگاه شهید بهشتی، دانشکده مهندسی هسته ای، گروه کاربرد پرتوها

چکیده

در این مقاله به طراحی مفهومی پایشگر اشعه X سه انرژی شامل لامپ 160keV اشعه X، فیلتر چندلایه K و آشکارساز چندطبقه پرداخته شده است. محاسبات طراحی با کد MCNPX به منظور انتخاب نوع فیلتر و آشکارساز و نیز ضخامت های آنها انجام شده است. اشعه X توسط فیلترهای چندلایه لایه K شامل Ba و Gd به ترتیب با ضخامت $170\mu\text{m}$ و $10\mu\text{m}$ به سه انرژی مجزا تفکیک می شود. فوتون های عبوری نیز توسط آرایه ای از آشکارساز خطی چند لایه ای سوسوزن- فوتودیود شامل CsI(Tl) و ZnSe(Te) به ترتیب با ضخامت $40\mu\text{m}$ و 5mm شمرده شده اند. محاسبات با خطای کمتر از ۱٪ انجام شده است.

کلید واژه: پایشگر مواد با سه انرژی، فیلتر لایه K، آشکارساز چندطبقه، کد MCNPX

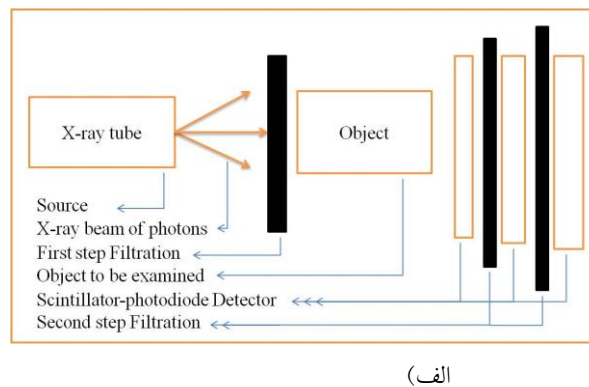
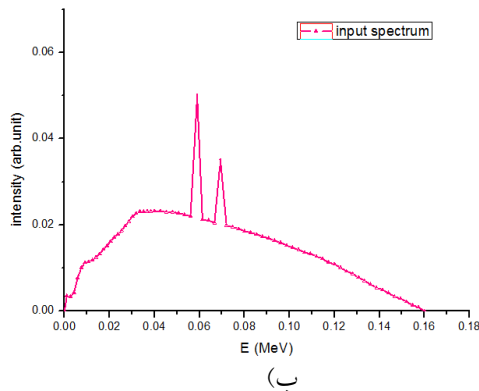
مقدمه

در رادیوگرافی و توموگرافی، تصویربرداری با اشعه X تک انرژی تنها اطلاعاتی در مورد چگالی شیء مورد آزمایش فراهم می آورد که این روش برای تشخیص دقیق اشیاء بخصوص در حالتی که فوتون از چند عنصر مختلف عبور می کند، کافی نمی باشد [۱]. روش انرژی دوگانه اشعه X با ترکیبی از دو طیف مستقل انرژی، بطور گسترده ای برای تخمین عدد اتمی و چگالی در سیستم های بازرسی و تصویر برداری به منظور کسب اطلاعات در مورد ترکیب ماده استفاده می شود. در سیستم های دو انرژی ترکیب ماده با استفاده از تضعیف دو انرژی متفاوت (دومعادله برای محاسبه دو مجهول) در یک ماده تعیین می شود، اما اغلب بیشتر از دو مجهول در این سیستم ها وجود دارد که استفاده از سیستم های سه انرژی را قابل پذیرش می کند. در این سیستم باید بهینه سازی پارامترهایی مانند قلهی انرژی بهینه، سیستم فیلترسازی و خصوصیات آشکارسازها انجام شود. مقالات متعددی در مورد طراحی آشکارسازها، طراحی فیلتر، طراحی سیستم های پایشگر با دو

انرژی و روش های مختلف تجزیه و تحلیل آنها نوشته شده است، اما هیچ گاه طراحی و شبیه سازی فیلترها و آشکارساز های چند طبقه در یک سیستم سه انرژی مورد بحث قرار نگرفته است [۶-۲]. در این مقاله، محاسبات مربوط به طراحی یک پایشگر اشعه ی X سه-انرژی با استفاده از لامپ 160 kV اشعه ی X، آرایه ای خطی از آشکارسازهای چند لایه ی سوسوزن-فوتودیود و فیلتر لبه ی K برای جداسازی انرژی انجام شده است. نوع فیلترها و نیز مواد آشکارسازی به همراه ضخامت های مناسب با کد MCNPX تعیین شده اند. در نهایت بهترین انتخاب از تنظیمات آشکارساز مطابق با طیف خروجی از فیلترهای باریکه ی اشعه ی X ارائه شده اند.

روش کار

فیلترسازی برای سیستم های بازرسی اشعه ی X چندانرژی در دو مرحله انجام می شود. (۱) فیلترسازی نزدیک چشمه و قبل از ماده مورد آزمایش، (۲) فیلترسازی بعد از عبور پرتو از ماده و بین طبقات آشکارساز. آرایش مناسب برای یک سیستم پایشگر اشعه ی X سه انرژی در شکل (۱-الف) نمایش داده شده است.



شکل ۱. الف) نمایی از چشمه، فیلتر و ترتیب آشکارسازها (ب) طیف خروجی از آند تنگستن ی یک لامپ اشعه ی ایکس

چشمه ی فوتون، یک لامپ اشعه ی X با ولتاژ 160 kV با جریان 1 mA است. باریکه خروجی از چشمه، طیف پیوسته ای از فوتون های X-ray می باشد (شکل ۱-ب). برای ایجاد سه قله ی انرژی مجزا باریکه باید قبل از رسیدن به ماده، از فیلتر عبور کند. برای دستیابی به تبعیض بالای عناصر در مواد غیر متراکم همچون بسته ها، چمدان ها و تولیدات غیر فلزی کارخانجات، دو قله انرژی باید کمتر از 100 keV باشند، زیرا در این محدوده انرژی، جذب فوتوالکتریک مواد بسیار متفاوت است. برای تفکیک طیف به دو قله ی مجزا معمولاً از عناصری



با انرژی لبه ی K در محدوده ۱۰۰-۳۰ keV، به عنوان فیلتر استفاده می شود که با ضخامتی مناسب بر روی یک ورقه ی آلومینیومی قرار می گیرند. ورقه ی آلومینیومی هم به عنوان نگهدارنده فیلتر و هم یک فیلتر بالاگذر برای حذف ناحیه ی کم انرژی (LE) طیف می باشد.

جدول ۱. فهرستی از مواد معمول برای فیلتر لبه ی K [۳]

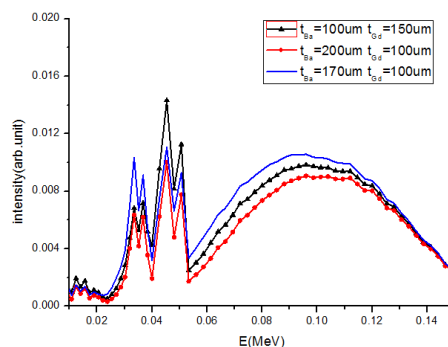
عدد اتمی	عنصر	انرژی لبه ی K (keV)
۳۹	Y	۱۷,۰۳۲
۴۸	Cd	۲۶,۷۰۴
۵۶	Ba	۳۷,۲۹۹
۵۸	Ce	۴۰,۴۳۸
۶۲	Sm	۴۶,۸۳۳
۶۴	Gd	۵۰,۲۱۵
۶۷	Ho	۵۵,۵۹۹
۷۰	Yb	۶۱,۲۸۲

سطح مقطع فوتوالکتریک برای انرژی های پایین تر از ۵۰ keV نسبتاً بالا و سطح مقطع کامپتون در انرژی های حدود ۱۰۰ keV به بیشینه مقدار خود می رسد. برای جداسازی بهتر مواد، دو قله از این سه قله ی انرژی باید کمتر از ۵۰ keV تنظیم شوند. مطابق با جدول ۱ عناصر Y، Cd و Ba برای اولین لایه از فیلتر و عناصر Ce، Sm، Gd و Ho برای دومین لایه از فیلتر گزینه های مناسبی محسوب می شوند. از آنجا که لایه دوم فیلتر با ضخامت چند صد میکرومتر تضعیف بالایی روی فوتون های با انرژی پایین تر از ۲۰ keV می گذارد، عناصر Y و Cd برای اولین لایه مناسب نیستند، لذا Ba با چگالی کمتر، به عنوان لایه ی اول فیلتر انتخاب می شود. برای جداسازی بهینه بین دو قله ی پایین انرژی، عناصر Ce و Sm برای لایه ی دوم فیلتر مناسب نمی باشند. در نتیجه جفت عناصر [Ba,Gd] و [Ba,Ho] انتخاب شدند تا جداسازی مطلوب تر انرژی با تضعیف کمتر باریکه فراهم شود و بازدهی بالایی در تبعیض عدد اتمی و چگالی ماده بوجود آید (ترجیحاً سه قله ی برابر و مجزا). نتایج مربوط به استفاده از جفت عنصر [Ba,Gd] با ضخامت های مختلف از Ba و Gd در جدول ۲ آمده است. مطابق با شرایطی که گفته شد، بهترین انتخاب ۱۷۰ μm باریم برای لایه ی اول و ۱۰۰ μm گادولینیم برای لایه ی دوم فیلتر می باشد.

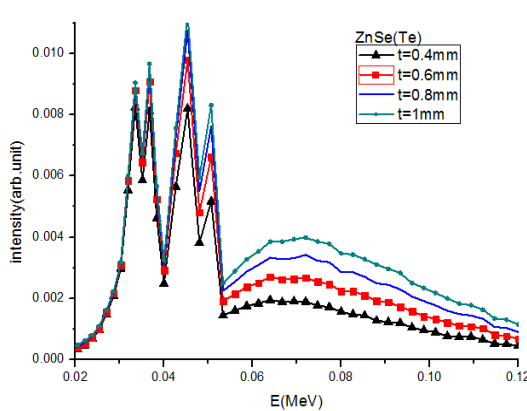
جدول ۲. شدت خروجی مطابق با سه- انرژی برای ضخامت های مختلفی از فیلتر [Ba,Gd]

	Ba-Gd : Ba ضخامت : Gd ضخامت						
	$100\mu\text{m}$	$150\mu\text{m}$	$150\mu\text{m}$	$200\mu\text{m}$	$200\mu\text{m}$	$200\mu\text{m}$	$170\mu\text{m}$
37keV - قله انرژی کم (LE1)	۰,۰۰۷۱۷	۰,۰۰۹۴	۰,۰۰۶۷۱	۰,۰۱۲۲۴	۰,۰۰۸۷۱	۰,۰۰۶۲	۰,۰۰۹۱۲
50keV - قله انرژی کم (LE2)	۰,۰۱۱۲۵	۰,۰۱۰۰۵	۰,۰۰۹۲۹	۰,۰۰۸۶۶	۰,۰۰۸۲۹	۰,۰۰۷۷۶	۰,۰۰۹۲۹
100keV - قله انرژی بالا (HE)	۰,۰۰۹۸۴	۰,۰۱۰۷۴	۰,۰۰۹۴۲	۰,۰۱۱۸۱	۰,۰۱۰۳۴	۰,۰۰۹۰۷	۰,۰۱۰۵۷

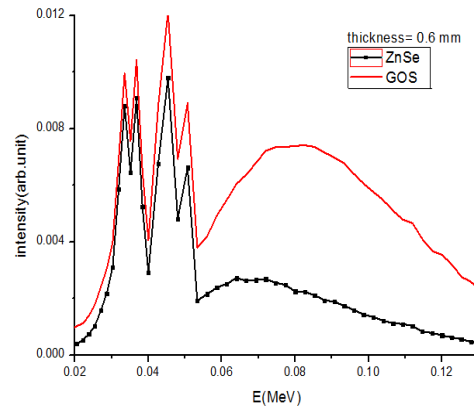
برای جفت عناصر [Ba, Ho] نیز با استفاده از شبیه سازی شدت سه انرژی خروجی در ضخامت های مختلف محاسبه شده است. بهترین انتخاب $170\mu\text{m}$ باریم برای لایه اول و $100\mu\text{m}$ هولیمیم برای لایه دوم فیلتر می باشد. ورقه‌ی آلومینیومی به عنوان نگهدارنده فیلتر قابلیت فیلترسازی انرژی های کمتر از 20keV را نیز دارد. در طراحی، دو ورقه‌ی آلومینیومی با ضخامت های 1mm و 2mm در مقابل باریکه‌ی خروجی از تیوب قرار گرفته اند که ضخامت 1mm نتایج بهتری را نشان داد. در ادامه برای آشکارسازی انرژی، یک آشکار ساز دو طبقه طراحی شده است. هر طبقه، یک آشکار ساز سوسوزن-فوتودیود می باشد که توسط یک فیلتر فلزی میانی به منظور حذف انرژی های پایین، از هم جدا شده اند. طبقه‌ی بالاتر می تواند یا از نوع $\text{ZnSe}(\text{Te})$: (ترکیبی غیر آلی بصورت پودر سفید با چگالی $7,32\text{gr/cm}^3$) یا از نوع $\text{ZnSe}(\text{Te})$ باشد. برای آشکارسازی انرژی های پایین به علت بازدهی بالاتر، مناسب تر است و فیلتر خوبی برای آشکار ساز انرژی بالا می باشد، زیرا عدد اتمی مؤثر آن تقریباً برابر با عدد اتمی مس که معمولاً از آن به عنوان فیلتر میانی استفاده می شود، می باشد.



شکل ۲. طیف خروجی از ضخامت های مختلفی از فیلتر [Ba,Gd]



(ب)



(الف)

شکل ۳. الف) طیف دریافتی از 0.7mm فسفر GOS و ZnSe(Te) ب) طیف دریافتی از ۴ ضخامت مختلف از ZnSe(Te)

همانطور که در شکل (۳-الف) مشاهده می شود، تضعیف آشکارساز ZnSe در انرژی های بالا به علت چگالی کمتر، پایین تر از تضعیف GOS می باشد. از آنجا که ZnSe(Te) شفافیت خوبی ندارد استفاده از آن در ضخامت های بالاتر از ۳ تا 4mm پیشنهاد نمی شود. شکل (۳-ب) شدت پرتو آشکار شده برای چهار ضخامت مختلف از ZnSe(Te) را نشان می دهد. این آشکارساز برای آشکارسازی انرژی های پایین انتخاب شده است. برای انتخاب موثرترین ضخامت باید از فرمول (۱) استفاده نماییم.

$$\text{بازدهی آشکارسازی انرژی کم} = \frac{\text{ارتفاع پالس دومین قله انرژی پایین}}{\text{ارتفاع پالس قله انرژی بالا}}$$

بازدهی آشکارسازی انرژی پایین برای ضخامت های $400\mu\text{m}$ ، $600\mu\text{m}$ ، $800\mu\text{m}$ و $1000\mu\text{m}$ محاسبه شده (جدول ۳) است. مطابق با این نتایج، ضخامت $400\mu\text{m}$ بهترین گزینه برای فیلتر ZnSe(Te) می باشد.

جدول ۳. بازدهی آشکارساز ZnSe(Te) در ضخامت های مختلف

Thickness(mm)	۰,۴	۰,۶	۰,۸	۱
$\frac{LE^2 \text{ Pulse Height}}{HE \text{ Pulse Height}}$	۴,۱۵	۳,۶۲	۳,۱۹	۲,۹۲

برای آشکارساز انرژی بالا (HE)، عموماً CsI(Tl)، GOS و CdWO_4 بصورت تجاری در دسترس هستند که در ضخامت 9mm مقایسه شده اند. آشکارساز CsI(Tl) با چگالی 4.5gr/cm^3 در مقایسه با GOS و CdWO_4 بازدهی و بهره‌ی نوری بالاتری دارد که بطور گسترده‌ای در آشکارسازی فوتون های با انرژی متوسط به بالا استفاده می شود. بنابراین یک کریستال CsI(Tl) با ضخامت 9mm (با اتصال به فوتودیود Si PIN) به عنوان آشکارساز طبقه‌ی پایین تر استفاده می شود. از آنجا که آشکارساز طبقه‌ی بالاتر، هر دو قله‌ی پایین انرژی را

(LE^1, LE^2) را آشکار می کند، پالس خروجی آن باید از یک سیستم آستانه ای که بعد از پیش تقویت کننده قرار می گیرد، عبور کند تا تعیین شود فوتون های آشکار شده، مربوط به کدامیک از قله های پایین انرژی می باشد. آهنگ شار بالاتر موجب افزایش دقت در تبعیض مواد و اندازه گیری چگالی می گردد، بنابراین مطابق با زمان وپاشی سوسوزن، جمع آوری بار در فوتودیود، ثابت زمانی الکترونیک سیستم، بیشینه آهنگ شمارش قابل آشکارسازی توسط سیستم آشکارساز و در نهایت پیکربندی سیستم، می توان شار فوتون ها را (متناسب با جریان تیوب) تنظیم نمود.

نتیجه گیری

در طراحی مفهومی پیشگر اشعه X سه انرژی بر اساس شبیه سازی با کد MCNPX، عناصر گوناگونی با ضخامت های مختلف به عنوان فیلتر لبهی K مورد بررسی قرار گرفتند. فیلترهای مختلف با انرژی لبهی K حدود 11keV تا 7keV مقایسه شدند که بهترین رفتار مربوط به فیلتر Ba, Gd با ضخامت های $100\mu\text{m}$ و $170\mu\text{m}$ بود که منجر به تولید سه قلهی انرژی مجزا با کمترین تضعیف روی طیف اشعه X شد. فوتون عبوری از مواد نیز باید قابل آشکارسازی باشد. از میان آشکارسازها ZnSe(Te) با ضخامت $400\mu\text{m}$ و CsI(Tl) با ضخامت 9mm برای تفکیک سه قلهی انرژی در خروجی بهترین رفتار را نشان دادند. با توجه به وجود سه قله انرژی و قابلیت تفکیک این انرژی ها، این سیستم می تواند به عنوان تبعیض گر مواد، تخمین عدد اتمی و اندازه گیری چگالی با دقت بالاتر نسبت به سیستم های دو انرژی استفاده شود.

مراجع

- [۱] Rebuffel, V. and J.M. Dinten, ۲۰۰۷. "Dual-energy X-ray imaging: benefits and limits", Insight, ۴۹(۱۰):۵۸۹-۵۹۴.
- [۲] Balles A., S. Zabler, Th. Ebersperger, R. Hanke, Optimized detector concept for inline phase contrast and Born-type retrieval algorithms using polychromatic micro- and nano-focus X-ray Sources, St. Petersburg, Russia, ۲۰۱۲.
- [۳] Kobayashi S., Advantage of appropriate K-edge filters for one-shot dual-energy subtraction sialography, Dentomaxillofacial Radiology (۱۹۹۸) ۲۷, ۱۵۱-۱۶۲.
- [۴] Dong-Goo Kang, Younghun Sung, SungSu Kim, SeongDeok Lee, Multiple object decomposition based on independent component analysis of multi-energy x-ray projections, Image Processing (ICIP), ۲۰۰۹ ۱۶th IEEE International Conference on, Page: ۴۱۷۳ - ۴۱۷۶.
- [۵] Jiyoung Choi, Dong-Goo Kang, Sunghoon Kang, Younghun Sung, A statistical framework for material decomposition using multi-energy photon counting x-ray detector, Biomedical Imaging (ISBI), ۲۰۱۲ ۹th IEEE International Symposium on, page: ۱۳۰۰ - ۱۳۰۳.
- [۶] Johnston S. M., G. A. Johnson, C. T. Badea, A Material Decomposition Method for Dual Energy Micro-CT, Medical Imaging ۲۰۰۹: Physics of Medical Imaging, Proc. of SPIE Vol. ۷۲۵۸ ۷۲۵۸۲۱-۱.