

بررسی قدرت تفکیک طیف نگار ساندویچی نیمه هادی و بهبود آن

علیرضا، مازوچی^۱؛ فریدون، عباسی دوانی^{۱*}؛ فائزه، رحمانی^۱؛ محمد عماد، عادللی خواه^۲

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

۲-دانشگاه شهید بهشتی، دانشکده مهندسی هسته ای، گروه چرخه سوخت هسته‌ای

چکیده

در این مقاله، به معرفی طیف نگار ساندویچی نیمه‌هادی سیلیکونی و بررسی قدرت تفکیک آن پرداخته شده و روش‌هایی برای بهبود آن ارائه شده است. این طیف نگار شامل هدف لیتیومی و دو آشکارساز نیمه‌هادی در دو طرف برای آشکارسازی و اندازه‌گیری طیف نوترون است. برخورد نوترون با هدف لیتیومی موجب گسیل ذرات باردار می‌شود که توسط آشکارسازهای نیمه‌هادی که با کولیماتورهای (به منظور افزایش قدرت تفکیک) از هدف جدا شده‌اند، جمع‌آوری می‌شوند. در این مقاله با استفاده از شبیه‌سازی با کد MCNPX، آشکارسازی متشکل از لیتیوم ($0.7 \mu\text{m}$) و سیلیکون ($100 \mu\text{m}$) به همراه کولیماتور بین آنها به عنوان طیف نگاری با قدرت تفکیک ۱۲٪ معرفی شده است.

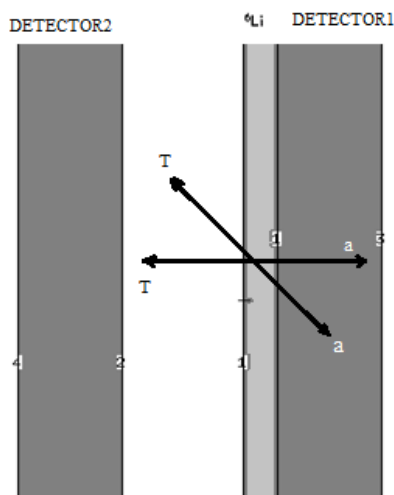
کلید واژه: طیف نگار ساندویچی نیمه هادی، قدرت تفکیک، کولیماتور، کد MCNPX

مقدمه

عمده‌ترین چالش در اندازه‌گیری‌های نوترونی در راکتورهای شکافت، آشکارسازی و اندازه‌گیری انرژی نوترون‌های گسیل شده است. نوترون‌ها ذراتی بی‌بارند و مستقیماً ماده را یونیزه نمی‌کنند [۱]. لذا در فرآیند طیف نگاری، مستقیماً انرژی این ذرات آشکار نمی‌شود. روش‌های ممکن در آشکارسازی و طیف سنجی باریکه‌های نوترونی در محیط راکتورها عبارتند از: (۱) ثبت انرژی هسته‌های پس زده شده، (۲) ثبت انرژی ذرات باردار و (۳) ثبت انرژی گاماها گسیلی از هسته‌های برانگیخته [۲-۳]. طیف نگارهای ساندویچی نیمه‌هادی یکی از ابزارهای طیف نگاری در راکتورها، بخصوص راکتورهای توان پایین و ZEBRA محسوب می‌شوند که در فضای راکتور نصب می‌شوند [۴]. در مجاورت قلب راکتور، شار نوترونی بالا باعث تخریب ساختار کریستالی آشکارسازهای نیمه‌هادی و ایجاد خطا در پاسخ سیستم‌های آشکارسازی می‌گردد. در این طیف نگارها، اندرکنش‌های (n, p) و (n, α) بسیار محتمل هستند و انرژی ذرات گسیل شده برابر با انرژی نوترون‌های فرودی و Q حاصل از اندرکنش می‌باشد. در برخورد نوترون کند با لیتیوم، ذرات آلفا و تریتیوم گسیل می‌شود ${}^2\text{H}(n, \alpha){}^1\text{Li}$. انرژی آزاد شده در این واکنش، 4.78 MeV است. برای آشکارسازی ذرات باردار از سیلیکون استفاده شده، زیرا دارای قدرت تفکیک انرژی بسیار بالایی می‌باشد. لیتیوم در آشکارسازی



نوترون‌های انرژی بالا و لیتیوم فلوراید در آشکارسازی نوترون‌های کم انرژی (در گستره‌ی چند ده هزارم الکترون ولت تا ۸ مگا الکترون ولت) استفاده می شود [۱]. فرآیند ساخت آشکارسازهای لیتیوم فلوراید با شماتیک مشاهده شده در شکل ۱، بر این اساس است که ابتدا لایه‌ای با ضخامت بسیار کم از LiF روی یکی از آشکارسازهای سیلیکونی تبخیر شده و آشکارساز دیگر در فاصله‌ای مشخص در خلأ، نسبت به هدف لیتیومی قرار می گیرد. وجود خلأ مانع از اکسید شدن فلز لیتیوم و اتلاف انرژی ذرات باردار خواهد شد. هدف اصلی در این مقاله، معرفی طیف نگارهای ساندریچی نیمه هادی برای نوترون‌های تک انرژی، بررسی قدرت تفکیک انرژی و روش هایی در جهت بهبود آن است.



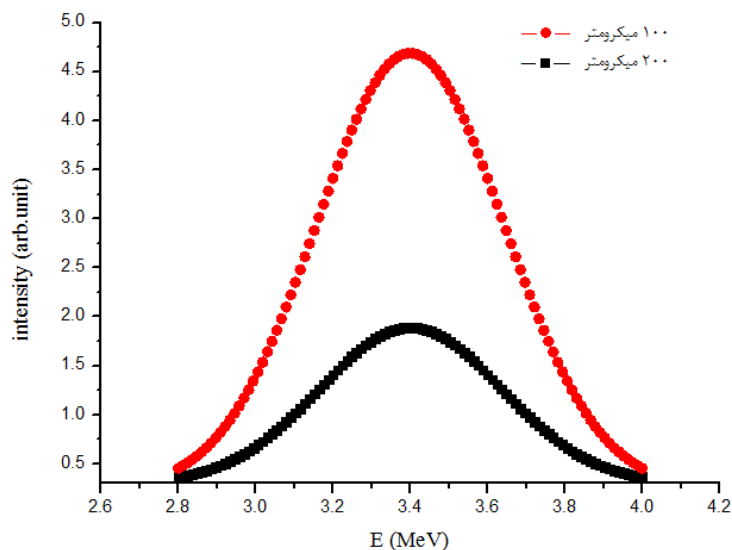
شکل ۱. شماتیک از طیف نگار ساندریچی نیمه هادی

روش کار

ضخامت لیتیوم (یا لیتیوم فلوراید) و نیز ضخامت آشکارسازهای نیمه هادی سیلیکونی از عوامل مؤثر بر قدرت تفکیک انرژی آشکارسازهای ساندریچی نیمه هادی محسوب می شوند. ضخامت بهینه‌ی سیلیکون در این طرح، به انرژی باریکه‌های نوترونی در فضای اطراف راکتور بستگی دارد. ابتدا با استفاده از کد مونت کارلوی MCNPX بهینه‌ی انرژی تریتون (سبک ترین ذره ثانویه‌ی گسیل شده از اندرکنش نوترون با لیتیوم) که انرژی بیشتری را حمل می کند، تعیین می شود. سپس برد آن در سیلیکون با استفاده از نرم افزار SRIM ۲۰۱۳ محاسبه شده و نهایتاً ضخامت بهینه سیلیکون تعیین می گردد. در این شبیه سازی‌ها، ضخامت دیودهای سیلیکونی برای آشکارسازی نوترون های تک انرژی (۱ MeV) بهینه شده است. در برخورد نوترون ۱ MeV با هسته اتم لیتیومی، تریتون با انرژی ۴/۲ MeV گسیل شده و به ساختار آشکارساز نیمه هادی سیلیکونی برخورد می کند.



در این شرایط، ضخامت بهینه‌ی دیود سیلیکونی یعنی ضخامتی که بیشترین انرژی در آن به جا بماند، مطابق با نتایج نرم افزار SRIM، تقریباً $100 \mu m$ محاسبه می شود. ضخامت لایه ${}^6\text{LiF}$ نیز بر قدرت تفکیک انرژی آشکارساز تأثیر گذار است، ضخامت باید به اندازه ای باشد که امکان اندرکنش نوترون با آن افزایش یابد و از طرفی ضخامت کم باشد تا ذرات آلفا و تریتون طی عبور از هدف لیتیومی تلفات کمتری داشته و قدرت تفکیک بهتری حاصل شود. در طیف نگاری نوترونی، مناسب ترین ضخامت لایه ${}^6\text{LiF}$ حدود $0.7 \mu m$ محاسبه شده است [۵-۶]. اثر تغییرات ضخامت سیلیکونی بر قدرت تفکیک انرژی آشکارساز بررسی شد. بدین منظور، ارتفاع پالس خروجی آشکارساز برای ضخامت $100 \mu m$ و $200 \mu m$ (ضخامت بهینه و دوبرابر آن) محاسبه شده است. همانطور که در شکل ۲ مشاهده می شود، با افزایش ضخامت لایه های سیلیکون، دامنه خروجی و قدرت تفکیک انرژی آشکارساز کاهش می یابد. انرژی نوترون ها در این شبیه سازی 1 MeV بوده است. قله‌ی انرژی در طیف آشکارساز کمتر از مقدار نظری محاسبه شده است زیرا کسری از انرژی محصولات اندرکنش در محیط لیتیومی تلف می شود.



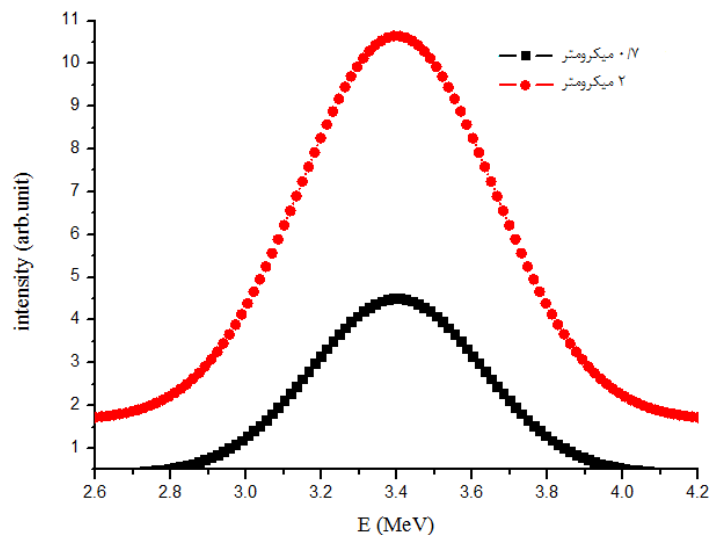
شکل ۲. مقایسه ای بر قدرت تفکیک و دامنه خروجی آشکارساز ساندویچی سیلیکون در دو ضخامت سیلیکون

$$t=100\mu m \rightarrow R = \frac{FWHM}{H_0} = \frac{0.590}{3.388} = 17.4\%$$

$$t=200\mu m \rightarrow R = \frac{FWHM}{H_0} = \frac{0.658}{3.388} = 20\%$$



همچنین می بایست اثر ضخامت لایه ${}^6\text{LiF}$ بر قدرت تفکیک انرژی آشکارساز نیز بررسی گردد. طیف ارتفاع پالس خروجی در ضخامت $0.7\mu\text{m}$ (ضخامت بهینه) و $2\mu\text{m}$ محاسبه شده است. همانطور که در شکل ۳ مشاهده می شود با افزایش ضخامت لایه های ${}^6\text{LiF}$ قدرت تفکیک انرژی آشکارساز کاهش می یابد.

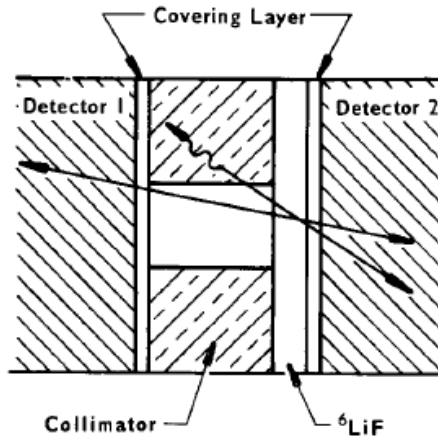


شکل ۳. پالس خروجی آشکارساز در دو ضخامت مختلف ${}^6\text{LiF}$

$$t=0.7\mu\text{m} \rightarrow R = \frac{\text{FWHM}}{H_0} = \frac{0.59}{3.388} = 17.4\%$$

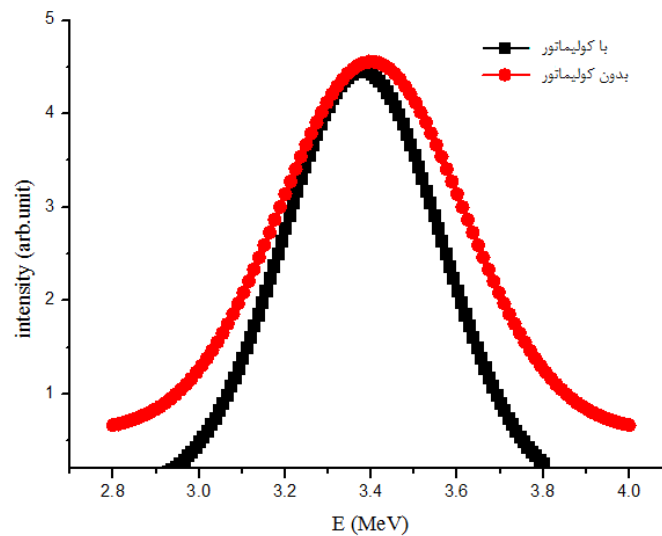
$$t=2\mu\text{m} \rightarrow R = \frac{\text{FWHM}}{H_0} = \frac{0.8}{3.388} = 23\%$$

پس از اینکه ضخامت بهینه ی هدف ${}^6\text{LiF}$ و آشکارساز سیلیکونی تعیین گردید، برای بالا بردن قدرت تفکیک انرژی آشکارساز استفاده از یک کولیماتور بین هدف ${}^6\text{LiF}$ و آشکارساز سیلیکونی پیشنهاد می شود. کولیماتور باعث انتقال ذرات به آشکارساز در زاویه ی فضایی مشخصی شده و مانع از عبور ذرات پراکنده در جهات دیگر می شود. در این صورت، احتمال عبور ذرات باردار گسیل شده با بیشینه ی انرژی از کولیماتور و ثبت آن ها در آشکارساز افزایش یافته و در نتیجه قدرت تفکیک آشکارساز بهبود می یابد.



شکل ۴. شماتیکی از آشکارساز ساندویچی نیمه هادی پیشنهادی

در شکل ۵ پاسخ خروجی طیف نگار ساندویچی نیمه هادی با تصحیحات ذکر شده و بکارگیری کولیماتور در آن مشاهده می شود. این طیف نگار در آشکارسازی نوترون هایی با انرژی ۱ MeV دارای قدرت تفکیک ۱۲٪ می باشد.



شکل ۵. افزایش قدرت تفکیک آشکارساز ساندویچی سیلیکون با استفاده از کولیماتور



نتیجه گیری

در این مقاله به بررسی ضخامت لایه های مختلف مواد بکار رفته در آشکارساز ساندویچی نیمه هادی سیلیکونی به عنوان یکی از مهم ترین عوامل اثر گذار بر قدرت تفکیک پرداخته شده است. ضخامت بهینه لیتیوم به منظور حداکثر احتمال اندرکنش نوترون با لیتیوم و حداقل اتلاف ذرات باردار گسیل شده در آن $0.7 \mu m$ و ضخامت سیلیکون به منظور جذب حداکثری انرژی ذرات باردار رسیده به سیلیکون $100 \mu m$ محاسبه شد. برای بیشینه کردن قدرت تفکیک مبتنی بر ضخامت های محاسبه شده، ایده استفاده از کولیماتور برای ثبت ذراتی که تنها در یک جهت از لیتیوم گسیل و وارد سیلیکون می شوند، پیشنهاد شد که باعث ارتقای قدرت تفکیک به ۱۲٪ گردید.

مراجع

- [۱] R. A. Wolfe and W. F. Stubbins, A Neutron Spectrometer Employing Charged-Particle Collimation to Improve Resolution, Nucl. Instrum. Meth. 60, 246 (1968).
- [۲] M. G. Silk, The Determination of Fast-Neutron Spectra in Thermal Reactors by Means of a High-Resolution Semiconductor Spectrometer, Atomic Energy Research Establishment, Nucl. Instrum. Meth. 66, 93 (1968).
- [۳] G. B. Bishop, A Li Sandwich Semiconductor Detector For Fast Neutron Spectrum Measurement, NORTH-HOLLAND PUBLISHING CO., Nucl. Instrum. Meth. 62, 247 (1968).
- [۴] H. Bluhm and D. Stegemann, Theoretical and Experimental Investigations for an improved application of the Li Semiconductor Sandwich Spectrometer, Nucl. Instrum. Meth. 70, 141 (1969).
- [۵] P. J. Clements, The Calibration of Li Semiconductor Sandwich Spectrometers, Nucl. Instrum. Meth. 127, 61 (1975).
- [۶] Roger A. Rydin, DESIGN CONSIDERATIONS FOR A SEMICONDUCTOR SANDWICH FAST NEUTRON SPECTROMETER