

اندازه‌گیری شار نوترون‌های سریع در حین انجام آزمایش PIGE

ایمان روح پرور^۱، علیرضا جوکار^۲، طیب کاکاوند^{۱*} و حسین رفیع خیری^۲

^۱ گروه فیزیک، دانشکده علوم پایه، دانشگاه بین‌المللی امام خمینی (ره)، قزوین، ایران.

^۲ پژوهشکده فیزیک و شتابگرها، پژوهشگاه علوم و فنون هسته‌ای، صندوق پستی ۳۴۸۶-۱۱۳۶۵، تهران، ایران.

* قزوین، دانشگاه بین‌المللی امام خمینی (ره)، گروه فیزیک، کد پستی ۳۴۱۴۸۹۶۸۱۸.

پست الکترونیکی: kakavand@sci.ikiu.ac.ir

چکیده

هدف از این مقاله تعیین شار نوترون‌های سریع فرودی بر آشکارساز HPGe در طول اندازه‌گیری بهره پرتوی گامای هدف ضخیم BN است. اندازه‌گیری‌ها با باریکه دوترون با انرژی‌های ۰/۶، ۰/۸، ۱ و ۱/۲ MeV انجام شد. در این کار، با استفاده از بهره پرتوی گامای ۵۹۶ keV حاصل از واکنش‌های $^{74}\text{Ge}(n,\gamma)^{74}\text{Ge}$ و $^{73}\text{Ge}(n,\gamma)^{74}\text{Ge}$ ، شار نوترون‌های سریع و همچنین سهم واکنش‌های گیراندازی و پراکندگی غیرالاستیک در بهره قله گامای ۵۹۶ keV اندازه‌گیری شده است. مزیت روش، این است که نیاز به تجهیزات اضافی نیست و شار نوترون‌های سریع با استفاده از طیف گامای جمع‌آوری شده، به صورت برخط اندازه‌گیری می‌شود.

کلیدواژگان: آسیب نوترون‌های سریع، PIGE، HPGe، پرتوی گامای ۵۹۶ keV.

۱. مقدمه

تعدادی از عناصر سبک با مقایسه با بهره پرتوی گامای هدف ضخیم^۳ انجام می‌شود.

در واکنش‌های PIGE وقتی انرژی ذرات فرودی بیش‌تر از سد کولنی باشد، علاوه بر گسیل پرتوی گاما، انواع دیگر محصولات نیز تولید شوند. به دلیل این‌که انرژی برانگیختگی منتقل شده به هسته مرکب نحوه واپاشی آن را مشخص می‌کند، کانال برتر واکنش وابسته به انرژی فرودی پرتابه است. با افزایش انرژی برانگیختگی هسته مرکب، تعداد کانال‌ها و محصولات

گسیل گامای-ذره القایی (PIGE^۱) یک روش تحلیلی قدرتمند است که اساس آن آشکارسازی پرتوهای گامای آنی حاصل از برهمکنش ذرات باردار (نوعاً p، d یا He) با هسته‌های سبک نزدیک به سطح هدف است. با ثبت پرتوهای گامای حاصل با آشکارساز HPGe^۲ می‌توان نوع، غلظت و نمایه عمقی عناصر سبک ($Z \leq 20$) را در نواحی سطحی مواد جامد تا عمق چند میکرومتر اندازه‌گیری نمود. در حال حاضر، به علت نبود مقادیر دقیق و قابل اعتماد داده‌های سطح مقطع بعضی از واکنش‌ها آنالیز

^۳ Thick Target Gamm-ray Yield

^۱ Particle Induced Gamma-ray Emission

^۲ High Purity Germanium

سبک مانند لیتیم و بور با باریکه دوترون که نوترون‌های انرژی بالا تا ۱۴ MeV تولید می‌کنند، اهمیت زیادی دارد. به طور معمول در آزمایشگاه‌ها دز نوترون‌ها را با استفاده از دزیمترهای نوترونی اندازه‌گیری می‌شود. اگرچه با این روش تخمین تعداد نوترون‌ها دریافتی توسط آشکارساز بسیار مشکل است [۶].

شار نوترون‌های سریع فرودی بر آشکارساز HPGe را می‌توان از طیف گاما ثبت شده توسط آشکارساز تحت تابش نیز اندازه‌گیری کرد. در اثر پراکندگی غیرکشسان نوترون‌های سریع با ایزوتوپ‌های پایدار ژرمانیوم چندین قله نامتقارن پهن در طیف گاما ظاهر می‌شود. از مهم‌ترین این قله‌ها می‌توان به قله‌های $^{76}\text{Ge}(n,n'\gamma)^{76}\text{Ge}$ حاصل از واکنش $^{76}\text{Ge}(n,n'\gamma)^{76}\text{Ge}$ ۵۹۶ keV و $^{76}\text{Ge}(n,n'e)^{76}\text{Ge}$ حاصل از واکنش $^{76}\text{Ge}(n,n'e)^{76}\text{Ge}$ ۶۹۳ keV و واکنش $^{76}\text{Ge}(n,n'\gamma)^{76}\text{Ge}$ اشاره کرد [۷-۱۴]. در واقع با مشاهده هر یک از قله‌ها، مشخصه واکنش‌های فوق و تعیین بهره گامای آن‌ها، می‌توان شار نوترون‌های سریع را در محل آشکارساز و در حین انجام آزمایش PIGE به‌دست آورد.

اندلیچ^۸ و همکارانش، از بهره قله ۵۹۶ keV حاصل از واکنش‌های $^{76}\text{Ge}(n,\gamma)^{76}\text{Ge}$ و $^{76}\text{Ge}(n,n'\gamma)^{76}\text{Ge}$ برای تخمین شار نوترون‌ها سریع و حرارتی در محل آشکارساز استفاده کردند. آن‌ها سهم نوترون‌های سریع و حرارتی در بهره گامای ۵۹۶ keV را با برازش منحنی قله‌ی نامتقارن با یک معادله پیشنهادی تفکیک نمودند [۱۵].

هدف از این کار پژوهشی، اندازه‌گیری شار نوترون‌های سریع تولید شده در حین آزمایش PIGE برای تعیین بهره پرتوی گامای هدف ضخیم بور با باریکه دوترون است. در این کار، با استفاده از گامای ۵۹۶ keV حاصل از واکنش ناکشسان $^{76}\text{Ge}(n,n'\gamma)^{76}\text{Ge}$ ، شار نوترون‌های سریع حاصل از واکنش‌های

واکنش نیز افزایش می‌یابد. در روش PIGE، بیش‌تر واکنش‌های هسته‌ای که برای آنالیز عناصر سبک استفاده می‌شوند، با گسیل نوترون‌های سریع همراه هستند [۱]. وجود آشکارساز HPGe در این محیط تابش نوترونی، امکان آسیب آشکارساز را مطرح می‌کند. مطالعات انجام‌شده نشان می‌دهند که این آشکارسازها در مقابل نوترون‌های سریع مستعد آسیب هستند [۲].

تاکنون مطالعات زیادی بر اثر تابش نوترون‌های سریع بر عملکرد آشکارسازها منتشر شده است. برهمکنش غیرکشسان نوترون سریع با هسته ژرمانیوم منجر به برانگیختگی هسته ژرمانیوم و گسیل پرتو گاما می‌شود. انرژی پس‌زنی^۳، بیش‌تر از انرژی ۱۰۰ eV می‌تواند برای خارج کردن اتم پس‌زده از شبکه اتمی جسم جامد کافی باشد و باعث ایجاد مراکز گیراندازی حفره^۴ متعددی در ساختار بلور ژرمانیوم آشکارساز شود [۱]. این مراکز باعث کاهش بهره جمع‌آوری حفره‌ها، پهن شدگی و ایجاد دنباله در قسمت کم انرژی قله‌ها و نهایتاً افت قدرت تفکیک انرژی آشکارساز خواهند شد [۳، ۴]. آستانه آسیب تابش نوترون‌های سریع بر آشکارساز HPGe، بسته به طیف انرژی نوترون‌ها، نوع و هندسه بلور آشکارساز و چیدمان آزمایش در بازه 10^8 تا 10^{11} n/cm^۲ توسط نشریه‌ها گزارش شده است [۳]. در طیف انرژی یکسان نوترون‌های فرودی، آشکارسازهای ژرمانیوم هم‌محور^۶ نسبت به آشکارسازهای ژرمانیوم تخت^۷ آسیب‌پذیرترند و آشکارسازهای HPGe نوع p نسبت به آشکارسازهای نوع n با هندسه برابر آسیب‌پذیرتری در مقابل تابش نوترون‌ها دریافت می‌کنند [۵].

بنابراین در مدت زمان انجام آزمایش PIGE برای کاهش آسیب آشکارساز HPGe لازم است بر دز نوترون‌ها در اطراف آشکارساز نظارت شود. این شرایط، به‌ویژه برای آنالیز عناصر

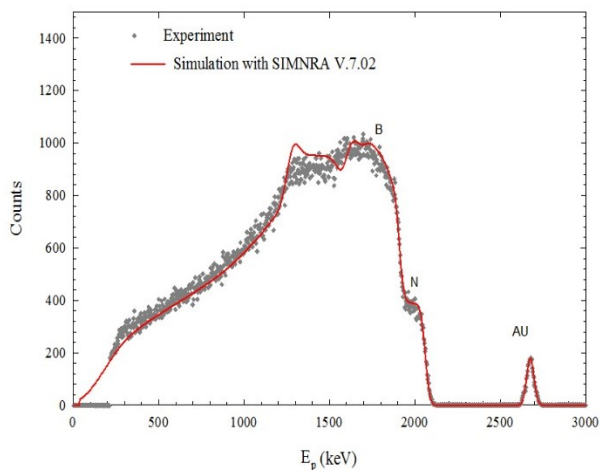
^۷ Planar

^۸ Andelić

^۳ Recoil Energy

^۴ Hole Trapping Centers

^۶ Coaxial



شکل (۱): طیف تجربی و شبیه‌سازی پروتون‌های پس‌پراکنده حاصل از بمباران هدف BN/Au با باریکه پروتون ۲/۷ MeV.

برای اندازه‌گیری بهره پرتوی گامای هدف ضخیم، هدف BN/Au با باریکه دوترون در انرژی‌های ۰/۶، ۰/۸، ۱ و ۱/۲ MeV، با جریان باریکه دوترون ۱-۲ nA بمباران شد. در مدت انجام آزمایش ۷/۵ μC بار بر روی هدف جمع شد. همچنین برای حذف تابش زمینه نوترونی ناشی از واکنش D(d,n) با دوترون‌های کاشته شده بر سطح هدف در حین پرتودهی با باریکه دوترون، اندازه‌گیری‌ها از انرژی بالا ۱/۲ MeV شروع شده و با گام‌های ۲۰۰ keV به انرژی ۱ MeV ختم شدند. طیف گامای حاصل از بمباران هدف BN/Au با باریکه دوترون ۱ MeV در شکل ۲ نشان داده شده است. در این شکل، قله ۵۹۶ keV حاصل از واکنش‌های ${}^{74}\text{Ge}(n, \gamma){}^{74}\text{Ge}$ و ${}^{74}\text{Ge}(n, \gamma){}^{74}\text{Ge}$ و همچنین قله گامای ۱۳۹/۹ keV حاصل از واکنش ${}^{74}\text{Ge}(n, \gamma){}^{74}\text{Ge}$ به‌طور واضح مشخص‌اند. مشخصه قله ۵۹۶ keV این است که، علاوه بر انرژی گامای گسیلی، انرژی پس‌زنی هسته ${}^{74}\text{Ge}$ حاصل از برخورد نوترون‌های سریع نیز باعث تولید حامل‌های بار می‌شود. همان‌طور که در شکل ۲ دیده می‌شود، این اثر خود را در دنباله کشیده شده قله ۵۹۶ keV (دنباله انرژی بالای قله) نشان می‌دهد.

نوترون‌زای ${}^{10}\text{B}(d, n){}^{11}\text{B}$ ، ${}^{11}\text{B}(d, n){}^{12}\text{C}$ و ${}^{14}\text{N}(d, n){}^{14}\text{O}$ فرودی بر آشکارساز HPGe به‌دست آمده است. سهم نوترون‌های حرارتی در بهره گامای قله ۵۹۶ keV حاصل از واکنش ${}^{74}\text{Ge}(n, \gamma){}^{74}\text{Ge}$ با استفاده از بهره گامای ۱۳۹/۹ keV حاصل از واکنش ${}^{74}\text{Ge}(n, \gamma){}^{74}\text{Ge}$ تصحیح شد.

۲. مواد و روش‌ها

اندازه‌گیری‌ها در خط باریکه PIGE شتاب‌دهنده و اندوگراف پژوهشگاه علوم و فنون هسته‌ای انجام شد. برای جمع‌آوری طیف‌های گاما، از یک آشکارساز ژرمانیوم فوق‌خالص نوع P که در زاویه 90° نسبت به راستای خروجی باریکه نصب شده استفاده گردید. اندازه بلور آشکارساز $6.58 \text{ cm} \times 6.58 \text{ cm}$ و حجم فعال آن 213 cm^3 است. بهره نسبی و قدرت تفکیک انرژی آشکارساز در انرژی ۱/۳۳ MeV، به‌ترتیب ۵۰ درصد و ۱/۹۵ keV و همچنین محفظه واکنش از جنس آلومینیوم با پوشش بیرونی آنودایز شده است. برای حذف تابش زمینه از یک حفاظ سربی استوانه‌های شکل به ضخامت ۵ cm و طول ۱۳ cm دور تا دور آشکارساز استفاده گردید. برای نمونه هدف، از قرص پرس شده پودر خالص BN استفاده شد. با توجه به نارسا بودن قرص، یک لایه نازک طلا به ضخامت حدود $85 \pm 10^{15} \text{ atom/cm}^2$ برای تعیین بار و جلوگیری از جرقه زدن (در هنگام برخورد باریکه با هدف) بر روی سطح قرص نشانده شد. ضخامت فیلم طلا با استفاده از طیف پروتون‌های پس‌پراکنده حاصل از بمباران هدف با باریکه پروتون ۲/۷ MeV و شبیه‌سازی طیف‌های تجربی با نرم افزار SIMNRA [۱۶] تعیین شده است. شکل ۱، طیف تجربی و شبیه‌سازی پروتون‌های پس‌پراکنده حاصل از بمباران هدف BN/Au با باریکه پروتون ۲/۷ MeV را نشان می‌دهد.

نوترون‌های تک انرژی در اثر برخوردهای متوالی با مواد پیرامون و هسته‌های ژرمانیوم دارای یک طیف انرژی خواهند بود. لازم به توضیح است که، انرژی آستانه واکنش هسته‌ای $^{76}\text{Ge}(n,n'\gamma)^{76}\text{Ge}$ ($E_\gamma=596\text{ keV}$)، 0.6 MeV است.

۳. بحث و نتیجه‌گیری

شار نوترون‌های سریع فرودی بر بلور آشکارساز $\phi_f(n/cm^2 \cdot s)$ با استفاده از رابطه زیر به دست می‌آید:

$$I_{596} = N_{\gamma f} \sigma_n \varepsilon_{596} \phi_f + N_{\gamma \gamma} \sigma_\gamma \varepsilon_{596} \phi_n \quad (2)$$

در رابطه فوق، I_{596} (cps) بهره کل گامای 596 keV حاصل از واکنش ناکشسان $^{76}\text{Ge}(n,n'\gamma)^{76}\text{Ge}$ با نوترون‌های سریع و واکنش گیراندازی $^{76}\text{Ge}(n,\gamma)^{76}\text{Ge}$ با نوترون‌های حرارتی ($N_{\gamma f}$ (atom/cm²) و $N_{\gamma \gamma}$ (atom/cm²)) به ترتیب تعداد چگالی هسته‌های ایزوتوپ‌های ^{76}Ge و ^{76}Ge ، V (cm³) حجم آشکارساز، σ_n (barn) و σ_γ (barn) به ترتیب سطح مقطع واکنش‌های $^{76}\text{Ge}(n,n'\gamma)^{76}\text{Ge}$ و $^{76}\text{Ge}(n,\gamma)^{76}\text{Ge}$ ، ε_{596} (%) بازده ذاتی آشکارساز برای انرژی گاما 596 keV و ϕ_{th} (n/cm²·s) شار نوترون‌های حرارتی هستند.

در رابطه (۲)، بهره گامای I_{596} از سطح زیر قله 596 keV طیف تجربی شکل ۲ به دست می‌آید. مقدار سطح مقطع σ_n برای نوترون‌های سریع در بازه انرژی 0.6 تا 13.6 MeV ، $1/36$ بارن و سطح مقطع σ_γ برای نوترون‌های حرارتی $14/4$ بارن گزارش شده‌اند [۲۰-۱۸]. این مقادیر در رابطه (۲)، مورد استفاده قرار می‌گیرند. برای تعیین بازده ذاتی آشکارساز با استفاده از کد شبیه‌سازی مونت کارلو MCNPX تعیین شده است. برای این کار از یک چشمه حجمی مطابق با هندسه بلور آشکارساز (با توجه به ضخامت لبه داخلی تا لبه خارجی آشکارساز) در چهار گام استفاده شد و در نهایت از بازده‌های به دست آمده میانگین گرفته شد، که شکل ۳ چیدمان چشمه و بلور آشکارساز را نشان

طبق معادله زیر انرژی پس‌زنی هسته ^{76}Ge قویاً به انرژی و زاویه پراکندگی نوترون فرودی بستگی دارد [۱۷]:

$$E_r = \frac{4 \times 74}{(1 + 74)^2} E_n \cos^2 \theta \quad (1)$$

که در رابطه فوق E_r (MeV) انرژی پس‌زنی هسته ^{76}Ge ، E_n (MeV) انرژی نوترون فرودی و θ زاویه پراکندگی نوترون فرودی هستند.

در این آزمایش واکنش‌های نوترون‌زای $^{11}\text{B}(d,n)^{11}\text{C}$ ، $^{11}\text{B}(d,n)^{11}\text{C}$ و $^{14}\text{N}(d,n)^{14}\text{O}$ به عنوان منبع تولید نوترون‌های سریع هستند. در جدول ۱، انرژی نوترون‌های سریع تولید شده در زاویه 90° (نسبت به راستای خروجی باریکه) حاصل از بمباران هدف ضخیم BN با باریکه دوترون 1 MeV محاسبه و ارائه شده است که در آن M_x (amu) جرم سکون هسته هدف، M_y (amu) جرم سکون هسته نهایی، M_d (amu) جرم دوترون فرودی، M_n (amu) جرم نوترون، T_d (MeV) انرژی جنبشی هسته دوترون فرودی و T_n (MeV) انرژی جنبشی نوترون‌های خروجی است.

جدول (۱): انرژی نوترون‌های سریع حاصل از بمباران هدف BN با باریکه دوترون 1 MeV در زاویه 90° .

واکنش	$^{11}\text{B}(d,n)^{11}\text{C}$	$^{14}\text{N}(d,n)^{14}\text{O}$	$^{11}\text{B}(d,n)^{11}\text{C}$
M_x (amu)	۱۰/۰۱۲۹	۱۴/۰۰۳۰	۱۱/۰۰۹۳
M_y (amu)	۱۱/۰۱۱۴	۱۵/۰۰۳۰	۱۲/۰۰۰۰
M_n (amu)	۱/۰۰۸۷	۱/۰۰۸۷	۱/۰۰۸۷
M_d (amu)	۲/۰۱۳۶	۲/۰۱۳۶	۲/۰۱۳۶
Q (MeV)	۶/۴۷۰۰	۵/۰۷۲۰	۱۳/۷۳۰۰
T_d (MeV)	۱/۰۰۰۰	۱/۰۰۰۰	۱/۰۰۰۰
T_n (MeV)	۶/۶۰۰	۵/۲۴۰۰	۱۳/۳۳۰۰

در جدول ۱، می‌توان مشاهده کرد انرژی جنبشی نوترون‌های حاصل از واکنش‌های هسته‌ای $^{11}\text{B}(d,n)^{11}\text{C}$ ، $^{11}\text{B}(d,n)^{11}\text{C}$ و $^{14}\text{N}(d,n)^{14}\text{O}$ ، به ترتیب 6.6 ، 13.33 و 5.5 MeV است. این

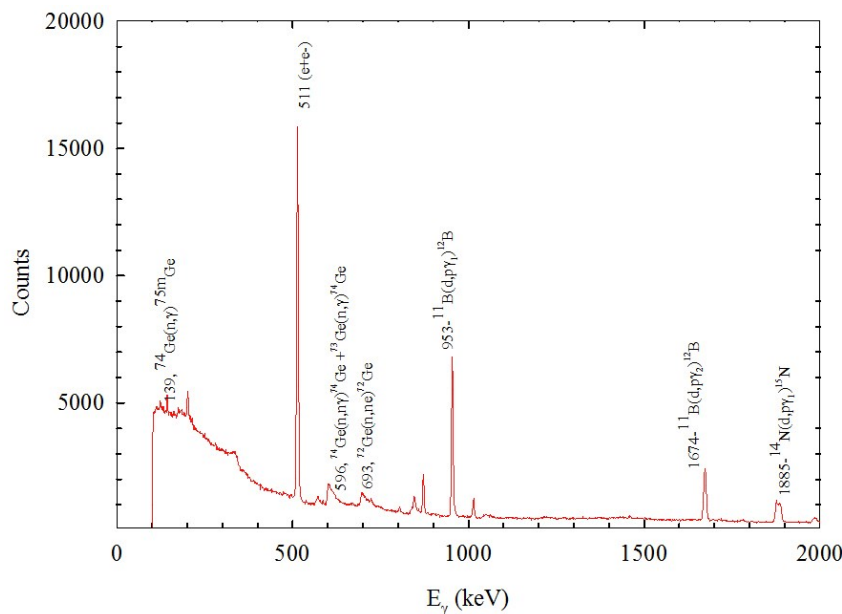
نتایج نشان می‌دهد شار نوترون‌های سریع ناشی از واکنش‌های هسته‌ای $^{10}\text{B}(d,n)^{11}\text{C}$ ، $^{11}\text{B}(d,n)^{12}\text{C}$ و $^{14}\text{N}(d,n)^{15}\text{O}$ با هدف ضخیم BN، ($3100 \text{ n}/\mu\text{C}\cdot\text{cm}^2$) $(\text{n}/\text{cm}^2\cdot\text{s})$ $6/4$ است. همچنین با استفاده از بهره گاما $139/9 \text{ keV}$ واکنش $^{76}\text{Ge}(n,\gamma)^{77\text{m}}\text{Ge}$ ، شار نوترون‌های حرارتی ($290 \text{ n}/\mu\text{C}\cdot\text{cm}^2$) $(\text{n}/\text{cm}^2\cdot\text{s})$ $0/6$ به دست آمد. سهم نوترون‌های سریع و حرارتی از بهره کل گامای 596 keV به ترتیب 80% و 20% تعیین شد.

بنابراین با توجه به نتایج، در طول اندازه‌گیری بهره پرتوی گامای هدف ضخیم BN با باریکه دوترون با جریان 1 nA و انرژی پایین تر از $1/2 \text{ MeV}$ ، مقدار کل فلئونس نوترون‌های سریع در حدود $2/3 \times 10^4 \text{ n}/\text{cm}^2$ به دست آمد. این مقدار با حد پایین آستانه آسیب آشکارساز HPGe در مقابل تابش نوترون‌های سریع یعنی $10^8 \text{ n}/\text{cm}^2$ فاصله زیادی دارد.

می‌دهد. از شبیه‌سازی بازده ذاتی آشکارساز در انرژی گاما 596 keV برابر با 26% به دست آمد. در رابطه (۲)، برای تعیین شار نوترون‌های سریع تنها نیاز است که شار نوترون‌های حرارتی Φ_{th} اندازه‌گیری شود. شار نوترون‌های حرارتی، $\Phi_{\text{th}}(\text{n}/\text{cm}^2\cdot\text{s})$ را می‌توان از بهره گاما $139/9 \text{ keV}$ حاصل از واکنش $^{76}\text{Ge}(n,\gamma)^{77\text{m}}\text{Ge}$ و رابطه زیر تعیین نمود [۲۱]:

$$\Phi_{\text{th}} = \frac{I_{139/9}}{N_{76} \left(\frac{\epsilon_{139/9} + \alpha_{\text{TOT}}}{1 + \alpha_{\text{TOT}}} \right) \sigma_{\text{th}}} \quad (3)$$

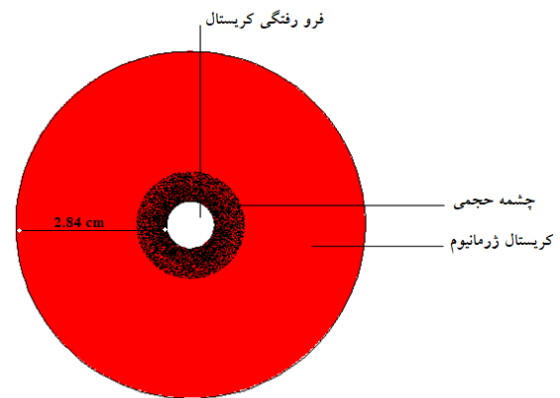
که در آن $I_{139/9}(\text{cps})$ بهره گاما (مساحت زیر قله) انرژی $139/9 \text{ keV}$ ، $\sigma_{\text{th}}(\text{barn})$ واکنش $^{76}\text{Ge}(n,\gamma)^{77\text{m}}\text{Ge}$ (برابر با $0/17$ [۱۷])، $\epsilon_{139/9}(\%)$ بازده ذاتی آشکارساز در انرژی گاما $139/9 \text{ keV}$ (برابر با 86%) و α_{TOT} ضریب تبدیل داخلی کلی (برابر با $1/6$ [۲۲]) هستند. با به دست آمدن شار نوترون‌های حرارتی از معادله (۳) و جایگذاری در معادله (۲)، سهم نوترون‌های سریع به دست می‌آید.



شکل (۲): طیف گاما به دست آمده از برهم‌کنش بین نوترون‌های حاصل از بمباران هدف ضخیم BN با باریکه دوترون 1 MeV و بلور ژرمانیوم.

آشکارساز HPGe به دست آمد. سهم نوترون‌های حرارتی در بهره گامای قله ۵۹۶ keV حاصل از واکنش $^{73}\text{Ge}(n,\gamma)^{74}\text{Ge}$ با استفاده از بهره گامای ۱۳۹/۹ keV حاصل از واکنش $^{74}\text{Ge}(n,\gamma)^{75\text{m}}\text{Ge}$ تصحیح شد. نتایج مقدار کل فلئونس نوترون‌های سریع در طول آزمایش را حدود $2/3 \times 10^4 \text{ n/cm}^2$ نشان می‌دهد. این مقدار با حد پایین آستانه‌ی آسیب آشکارساز HPGe در مقابل تابش نوترون‌های سریع یعنی 10^8 n/cm^2 فاصله زیادی دارد.

مزیت روش استفاده شده در این کار این است که نیاز به تجهیزات اضافی نیست و نوترون‌های به صورت برخط نظارت می‌شوند. با انجام این پژوهش این امکان فراهم می‌شود تا در حین آنالیزهای PIGE شار سریع نوترون‌های فرودی بر آشکارساز HPGe تعیین شود. تا با کنترل پارامترها آزمایش مانند جریان باریکه و مقدار بار جمع شده بر هدف (زمان آزمایش) زمینه کاهش آسیب نوترونی آشکارساز را فراهم کرد.



شکل (۳): چیدمان چشمه حجمی و بلور آشکارساز.

۴. نتیجه گیری

در این پژوهش با استفاده از طیف گامای جمع‌آوری شده در حین اندازه‌گیری بهره پرتوی گامای هدف ضخیم BN با باریکه دوترون با جریان ۱ nA و انرژی پایین‌تر از ۱/۲ MeV، شار نوترون‌های سریع تعیین شد. در این کار، با استفاده از گامای ۵۹۶ keV حاصل از واکنش ناکشسان $^{74}\text{Ge}(n,n'\gamma)^{74}\text{Ge}$ ، شار نوترون‌های سریع حاصل از واکنش‌های نوترونزای $^{10}\text{B}(d,n)^{11}\text{C}$ ، $^{11}\text{B}(d,n)^{12}\text{C}$ و $^{14}\text{N}(d,n)^{15}\text{O}$ فرودی بر

۵. مراجع

1. K. S. Krane. *Introductory Nuclear Physics*. Wilmington, DE, U.S.A., Wiley, 1988.
2. I. Vickridge, J. Tallon, M. Presland. High precision determination of ^{16}O in high T_c superconductors by DIGME. *Nucl. Instr. Meth. B.* 85 (1-4) (1994) 95-99.
3. H. W. Kraner, R. H. Pehl, E. E. Haller. Fast neutron radiation of high-purity germanium detectors. *IEEE Trans. Nucl. Sci.* 22 (1) (1975) 149-159.
4. W. A. Mahoney, J. C. Ling, A. S. Jacobson. Radiation damage of the HEAO C-1 germanium detectors. *Nucl. Instr. Meth. Phys. Res.* 185 (1-3) (1981) 449-458.
5. H. W. Kraner, J. Llacer. Neutron damage and annealing in high purity germanium radiation detectors. *Nucl. Instr. Meth.* 98 (3) (1972) 467-475.
6. Á. Z. Kiss, I. Biron, T. Calligaro, J. Salomon. Thick target yields of deuteron induced gamma-ray emission from light elements. *Nucl. Instr. Meth. Phys. Res. B.* 85 (1-4) (1994) 118-122.
7. Z. Elekes, A. Z. Kiss, I. Biron, T. Calligaro, J. Salomon. Thick target c-ray yields for light elements measured in the deuteron energy interval of $0.7 \pm 3.4 \text{ MeV}$. *Nucl. Instr. Meth. Phys. Res. B.* 168 (3) (2000) 305-320.
8. N. Jovančević, M. Krmar, D. Mrda, J. Slivka, I. Bikit. Neutron induced background gamma activity in low-level Ge-spectroscopy systems. *Nucl. Instr. Meth.* 612 (2) (2010) 303-308.
9. I. Abt, A. Caldwell, K. Kroninger, J. Liu, X. Liu, B. Majorovits. Neutron interactions as seen by a segmented germanium detector. *Euro. Phys. Jour. A.* 36 (2) (2008) 139-149.
10. N. Veselinović, D. Maletić, D. Joković, R. Banjanac, V. Udovičić, M. Savić, J. Puzović, I.V. Aničin, A. Dragić. Some peculiarities of digital gamma-ray spectroscopy with germanium detectors performed in presence of neutrons.

- Phys. Proc.* 59 (1) (2014) 63-70.
11. M. Baginova, P. Vojtyla, P. P. Povinec. Investigation of neutron interactions with Ge detectors. *Nucl. Instr. Meth. Phys. Res. A.* 897 (2018) 22-31.
 12. J. K. Tuli. *Thermal Neutron Capture Gamma-rays*. National Nuclear Data Center, Brookhaven National Laboratory, 1983.
 13. A. Miceli, G. Festa, R. Senesi, E. Perelli Cippo, L. Giacomelli, M. Tardocchi, A. Scherillo, E. Schooneveld, C. Frost, G. Gorinid, C. Andreani. Measurements of gamma-ray background spectra at spallation neutron source beamlines. *Anal. Atom. Spect.* 29 (10) (2014) 1897-1903.
 14. R. A. I. Bell. *Tables for Calibration of Radiation Detectors*. Austral. Nat. Univ. Rep. ANU-P/606, 1974.
 15. B. Anđelić, D. Knežević, N. Jovančević, M. Krmar, J. Petrović, A. Toth, Ž. Medić, J. Hansman. Presence of neutrons in the low-level background environment estimated by the analysis of the 595.8 keV gamma peak. *Nucl. Instr. Meth.* 852 (2017) 80-84.
 16. M. Mayer, SIMNRA, Report IPP 9/113, Max Planck institute für plasmaphysik, Garching, Germany, 1997.
 17. G. P. Skoro, I. V. Anicin, A. H. Kukoc, Dj. Krmptic, P. Adzic, R. Vukanovic, M. Zupancic. Environmental neutrons as seen by a germanium gamma-ray spectrometer. *Nucl. Instr. Meth.* 316 (2-3) (1992) 333-336.
 18. https://tendl.web.psi.ch/tendl_2021/_html/Ge/NeutronGe74gamma32.html
 19. K. Kazkaz, *Finding Excited-State Decays of Germanium-76*. PhD Thesis, University of Washington (2006) 44pp.
 20. C. Chasman, K. W. Jones, R. A. Ristinen. Fast neutron bombardment of a lithium-drifted germanium gamma-ray detector. *Nucl. Instr. Meth.* 37 (1965) 1-8.
 21. R. Wordel, D. Mouchel, T. Altitzoglou, G. Heusserb, B. Quintana Ames, P. Meynendonckxd. Study of neutron and muon background in low-level germanium gamma-ray spectrometry. *Nucl. Instr. Meth. Phys. Res. A.* 369 (2-3) (1996) 557-562.
 22. H. Krishnamoorthy, A. Garai, G. Gupta, N. Dokania, V. Nanal, R. G. Pillay, A. Shrivastava. Estimation of Neutron flux in TIFR Low background Experimental Setup (TiLES). *Proc. DAE-BRNS. Sym. Nucl. Phys.* 61 (18) (2016) 1014-1015.