



محاسبه بهره گداخت سطحی در هدف جامد برای مولد نوترون صنعتی ۴۰۰ وات

قیانوری، مریم^(۱) - صداقت موحد، مرتضی^(۱) - رضایی، عماد^(۱) - باقری، علی - اصل زعیم، علیرضا*^(۱)

^۱ سازمان انرژی اتمی، پژوهشگاه علوم و فنون هسته‌ای، پژوهشکده پلازما و گداخت هسته‌ای

چکیده:

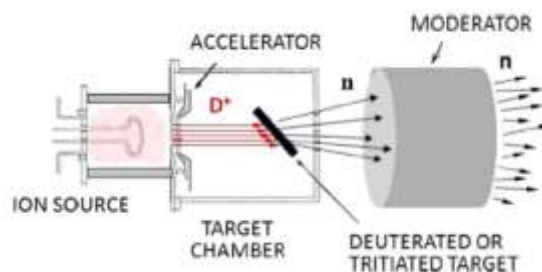
بررسی‌های اخیر نشان داده است در دستگاه‌های محصورسازی پلازما که به عنوان مولدهای نوترون به کار می‌روند انجام گداخت هسته‌ای بر روی سطح هدف‌های جامد بیشترین سهم در تولید نوترون‌های گداخت را دارد. در این مولدهای نوترون؛ هدف‌ها معمولاً به صورت یک سطح جامد که در آن دوتریوم و یا تریتیوم بارگذاری شده است در معرض پرتو یون‌های دوتریوم قرار می‌گیرند. در این مقاله میزان اثر پارامترهای مختلف بر بهره نوترون، با استفاده از سطح مقطع‌های تجربی واکنش هسته‌ای $d(d,n)$ و به کارگیری نرم‌افزار *SRIM* محاسبه گردیده است. در این مطالعه به دلیل خواص مناسب جذب سطحی هیدروژن در تیتانیوم، این فلز به عنوان هدف در نظر گرفته و محاسبات تا توان چهارصد وات و جریان‌های مختلف باریکه انجام گرفته است. نتایج این کار بستگی نمایی بهره نوترون به انرژی یون‌های برخوردی با هدف را نشان می‌دهد. همچنین حداکثر تولید نوترون با این روش در ولتاژ و جریان‌های بالا یون دوتریوم در حدود 10^{11} نوترون بر ثانیه تخمین زده شد که با حد بالای تجربی مولدهای نوترون صنعتی همخوانی خوبی دارد.

واژه‌های کلیدی: گداخت سطحی، مولد نوترون گداخت، هدف جامد، تیتانیوم

مقدمه:

کاربردهای مولدهای نوترونی قابل حمل در صنایع و پزشکی هسته‌ای به سرعت در حال گسترش است. از جمله این کاربردها می‌توان به روش BNCT در درمان سرطان‌های مغز و یا رادیوگرافی نوترونی اشاره نمود که همگی نیازمند یک چشمه نوترونی با شار بالا می‌باشند [۱]. استفاده از راکتوهای شکافت و یا چشمه‌های مولد نوترون مانند اورانیوم و یا کالیفورنیوم؛ دارای هزینه‌های بالای ساخت و نگهداری به ویژه از منظر حفاظت در برابر پرتو می‌باشند. لذا در سال‌های اخیر تحقیقات وسیعی برای طراحی و ساخت دستگاه‌های کوچک مولد نوترون بر پایه همجوشی هسته‌ای و استفاده آنها از در حال انجام است. در این نوع مولدهای نوترون معمولاً، از گاز غیر رادیواکتیو دوتریوم (ایزوتوپ هیدروژن) برای تولید نوترون استفاده می‌کنند. مزیت اصلی این نوع مولد نوترون قابلیت تولید نوترون کنترل شده است. در حقیقت تولید نوترون با به کار انداختن دستگاه شروع و با خاموش کردن آن متوقف می‌شود.

مولدهای نوترون به عنوان منابع نوترون‌های سریع، اپیترمال^۲ و حرارتی^۳ در کاربردها متنوعی مانند تحقیقات، صنعت و پزشکی مورد استفاده قرار می‌گیرند. این مولدها معمولاً از سه جز اصلی منبع یون، شتابدهنده الکتروستاتیک و هدف^۴ ساخته می‌شود. در شکل (۱) شمای کلی از اجزای اصلی یک مولد نوترون نمایش داده شده است. یکی از اجزای مهم مولد نوترون هدف می‌باشد که پرتوی یون‌های هیدروژن به آن برخورد می‌کند.



شکل (۱): شمای کلی از ساختار یک مولد نوترون و اجزای اصلی آن.

هدف‌ها در مولدهای نوترونی که شار بالایی از نوترون تولید می‌کنند معمولاً بصورت زیر ساخته می‌شود: یک لایه فلزی با ضریب جذب زیاد هیدروژن که معمولاً از یک فلز از گروه Y، Sc، Zr، Ti و لانتانیدها برای لایه جذب کننده هیدروژن به عنوان اولین لایه در معرض تابش یونی انتخاب می‌شود. این لایه نازک دارای ضریب جذب بالای هیدروژن که بخار رسوب آن بر روی یک لایه حامل که دارای ضرایب کوچک جذب و انتشار هیدروژن است قرار می‌گیرد. طول عمر لایه فلزی قابل جذب هیدروژن عموماً با کند و پاش لایه توسط بمباران یونی کاهش می‌یابد. بنابراین، فلزاتی که نسبتاً به کندی دچار کند و پاش می‌شوند، به عنوان مثال Ti و Sc، ترجیحاً برای لایه جذب کننده هیدروژن انتخاب می‌شوند [۲].

یک لایه حامل که فلزی است دارای ضرایب جذب و انتشار پایین هیدروژن و ضریب بالایی از هدایت حرارتی است و لایه فلزی اول بر روی آن قرار داده می‌شود. به عنوان مثال، مس یا نقره معمولاً با توجه به هدایت حرارتی خوب برای فلز لایه حامل انتخاب می‌شود. لایه حامل باید خنک شود تا انرژی حرارتی آزاد شده در طول بمباران یونی و واکنش‌ها از بین برود. از این رو هدایت حرارتی فلز لایه حامل باید خوب باشد. بنابراین ترجیحاً مس یا نقره به عنوان ماده‌ای برای لایه حامل استفاده می‌شود [۲].

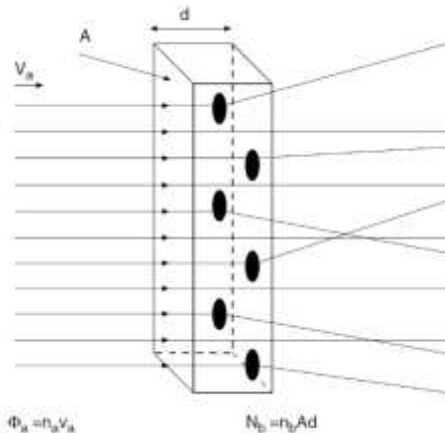
^۲ Neutron generator
^۳ Epithermal
^۴ Thermal
Target

هدف‌ها به طور کلی به دو دسته گازی یا جامد تقسیم می‌شوند البته در تعداد کمی از کاربردها، استفاده از هدف‌های مایع سودمند می‌باشد. هدف‌های مایع یا جامد با فشار بخار به اندازه کافی کم، داخل سیستم خلاء مولد نوترون نصب می‌شوند و باریکه یونی به طور مستقیم به سطح برخورد می‌کند. برای بررسی تحلیلی این موضوع، روند زیر را در نظر می‌گیریم.

روش کار

در انجام گداخت هسته‌ای بر روی سطح هدف‌های جامد فرض می‌کنیم باریکه‌ای از یون‌ها با سرعت V_a و با چگالی n_a (تعداد بر واحد حجم) بر روی سطح هدفی با چگالی n_b اتم در واحد حجم و سطح A و ضخامت d برخورد نماید. در شکل (۲) شمای کلی از هندسه این نوع برخورد نشان داده شده است. در این هندسه اگر فرض کنیم سطح مقطعی که هر هسته اتم هدف برای انجام واکنش هسته‌ای تولید نوترون عرضه می‌کند برابر با σ باشد، آنگاه می‌توان رابطه (۱) را برای نرخ انجام واکنش‌های هسته‌ای نوشت:

$$\dot{N} = \sigma \dot{N}_{in} \frac{N_t}{A} \quad (1)$$



شکل (۲): هندسه برخورد باریکه یون با هدف جامد.

که در این رابطه N_t تعداد کل هسته‌های موجود در هدف است که می‌توان آنرا به صورت $\frac{\rho_i A d}{M_{Atomic}} N_{av}$ بر حسب

چگالی جرمی هدف نوشت. لذا می‌توان رابطه (۲) را به صورت زیر نوشت:

$$\dot{N} = \sigma \dot{N}_{in} \frac{N_t}{A} = \sigma \dot{N}_{in} \frac{\rho A d}{M_{Atomic}} N_{av} \quad (2)$$



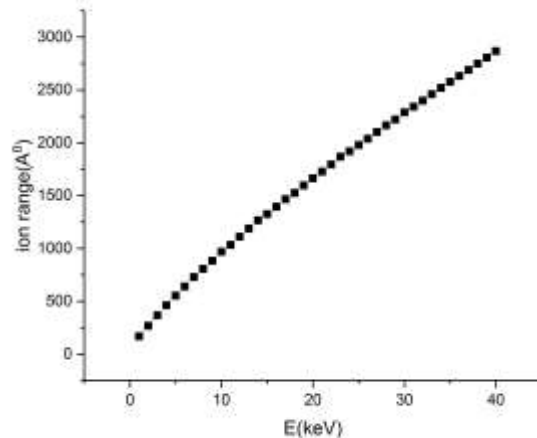
با فرض اینکه یون‌های فرودی دارای یک بار مثبت باشند (فرضی که در اکثر شتابدهنده‌های دوتریوم فرض معقولی است) لذا برای یک هدف بسیار نازک که در آن انرژی باریکه یون فرودی تغییر چندانی نمی‌کند می‌توان رابطه (۳) را برای بهره واکنش‌های هسته‌ای نوشت:

$$\dot{N} = \sigma \frac{I}{e} \frac{\rho d}{M_{Atomic}} N_{av} = \frac{\sigma(\text{mbarn}) \times I(\text{mA}) \times \rho d(\mu\text{g}/\text{cm}^2)}{M(\text{g}/\text{mol})} \times 3.76 \times 10^6 \quad (3)$$

محاسبات فوق با فرض ثابت ماندن انرژی باریکه یون در حین عبور از هدف برقرار است ولی اگر هدف کمی ضخیمتر باشد و افت انرژی یون در آن قابل چشم پوشی نباشد می‌توان رابطه (۴) را به صورت زیر نوشت:

$$\dot{N} = \sigma \dot{N}_{in} \frac{\rho A d}{M_{Atomic} A} N_{av} = \frac{N_{av} I}{e M} \int_{E_{out}}^{E_{in}} \frac{\sigma(E)}{S(E)} dE = 7.83 \times I(\text{mA}) \times Y \times 10^9 \quad (4)$$

که در این رابطه $S(E) = -\frac{dE}{\rho dx}$ نشان دهنده اتلاف انرژی باریکه یونی در حین عبور از هدف و $Y = \int_{E_{out}}^{E_{in}} \frac{\sigma(E)}{S(E)} dE$ بهره هدف می‌باشد. در انرژی‌های بالا برای باریکه (حدود چند مگا الکترون ولت) رابطه تئوری دقیقی برای آهنگ اتلاف انرژی (تابع S) وجود دارد که به رابطه بت معروف است [۳] ولی در انرژی‌های پایین رابطه بت با نتایج تجربی اختلاف نسبتاً زیادی دارد. از رابطه S می‌توان عمق نفوذ یون‌ها در یک هدف را به صورت انتگرال این تابع در روی پارامتر عمق نفوذ محاسبه نمود محاسبات برای عمق نفوذ در مواد و ایزوتوپ‌های مختلف برای یون‌های مختلف توسط روش مونت کارلو در نرم افزارهایی مانند SRIM قابل محاسبه هستند. برای یون‌های دوتریوم و هدف از جنس تیتانیوم این محاسبات بر حسب انرژی ذره فرودی محاسبه شده است. نتایج این محاسبات در شکل (۳) میزان عمق نفوذ دوتریوم در هدف تیتانیوم بر حسب انرژی دوتریوم‌ها را نشان می‌دهد.

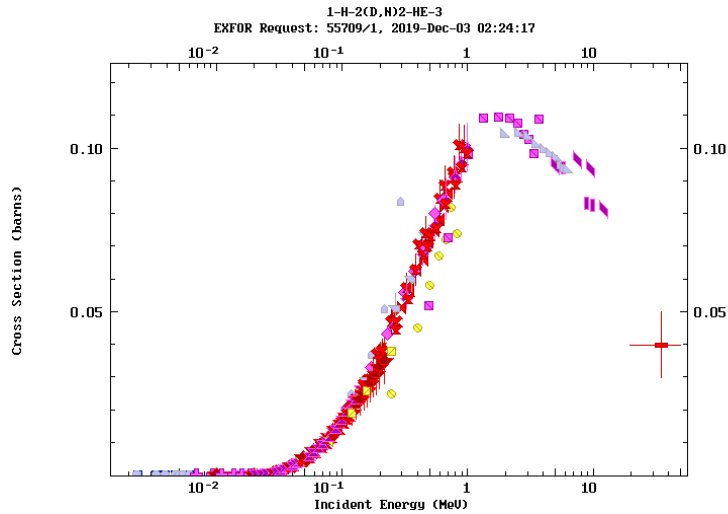


شکل (۳): عمق نفوذ یون‌های دوتریوم بر حسب آنگستروم در هدف تیتانیومی بر حسب انرژی یون‌های فرودی.

وابستگی سطح مقطع‌های هسته‌ای به انرژی یون فرودی را معمولاً با مدهای مختلفی شبیه‌سازی می‌کنند ولی مقادیر قطعی سطح مقطع‌ها باید با آزمایش اندازه‌گیری گردند. در برخورد یون با هسته اتم، به دلیل نیروی دافعه کولنی انتظار می‌رود طبق قوانین مکانیک کوانتومی سطح مقطع انجام واکنش هسته‌ای با احتمال تونل زنی از سد کولنی متناسب باشد. از طرفی مدل‌های اپتیکی و استفاده از مدل برخورد امواج تخت با یک هسته نشان می‌دهند که سطح مقطع واکنش هسته‌ای متناسب با عکس انرژی یون فرودی باشد [۴]. لذا با در نظر گرفتن این ملاحظات معمولاً می‌توان سطح مقطع‌ها را با حاصل ضرب این دو احتمال و به صورت رابطه (۵) بیان نمود:

$$\sigma = \frac{a}{E} \exp\left(\frac{-b}{\sqrt{E}}\right) \quad (5)$$

که در این رابطه E انرژی یون فرودی و a و b ثابت‌هایی هستند که از تطبیق رابطه (۵) با سطح مقطع‌های تجربی بدست می‌آیند. نمودار شکل (۴) سطح مقطع‌های تجربی واکنش را برای تولید نوترون نشان می‌دهد.

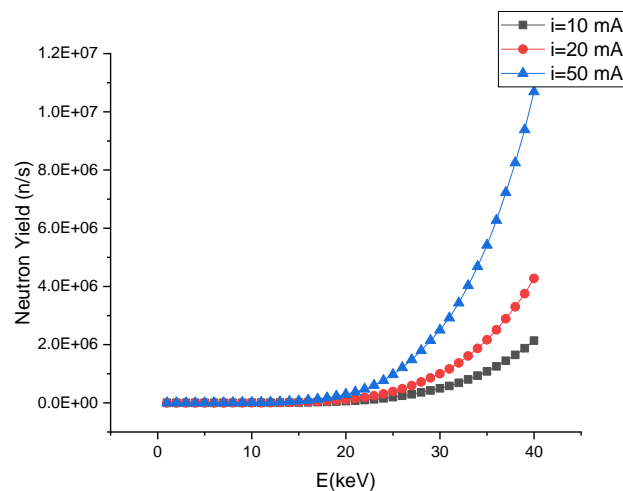


شکل (۴): سطح مقطع واکنش هسته‌ای $d(d,n)$ در محدوده انرژی کمتر از ده مگا الکترون ولت [۵]

برای هدفی که ضخامت آن برابر با برد یون باشد می‌توان رابطه زیر را برای محاسبه بهره نوشت:

$$Y = \int_0^{E_m} \frac{\sigma(E)}{\left(\frac{dE}{dx}\right)} dE = \int_0^L \sigma(E) dx \approx \sum_{i=1}^N \sigma(E_i) \Delta x_i \quad (6)$$

در این رابطه Δx عمق نفوذ یون در ماده هدف می‌باشد. در نمودار شکل (۵) انتگرال رابطه (۶) با استفاده از مقادیر تجربی سطح مقطع و مقادیری که با نرم افزار SRIM برای محاسبه برد بدست آمده بود، محاسبه گردیده است.



شکل (۵): نرخ تولید نوترون بر حسب انرژی باریکه یون دوتریوم با جریان‌های مختلف.



نتیجه‌گیری

در راستای ساخت مولد نوترون پربازده با توان در حدود چهارصد وات و برای تخمین نرخ تولید نوترون، و بررسی عوامل موثر بر آن، مدل‌سازی فیزیک انجام گرفت. با مدل‌سازی فیزیک مساله و استفاده از سطح مقطع‌های تجربی و به‌کارگیری نرم افزار SRIM، بهره هدف و نرخ تولید نوترون در جریان‌های مختلف باریکه محاسبه گردیدند. نتایج این کار نشان می‌دهد در محدوده انرژی چهل کیلو الکترون-ولت برای یون پرتابه، وابستگی نمایی نرخ تولید نوترون به انرژی پرتابه قابل مشاهده است همچنین با افزایش جریان یونی، نرخ تولید نوترون به صورت خطی افزایش نشان می‌دهد. این موضوع یکی از موارد مورد تحقیق برای ساخت مولدهای پالسی نوترون با جریان یونی بالا (مثلاً از مرتبه چند آمپر) است. این کار نیازمند خنک کاری هدف برای خروج حرارت تولید شده توسط این جریان از روی سطح هدف جامد می‌باشد.

مراجع:

- [1] Antolak, A.J., et al., "Negative ion-driven associated particle neutron generator" Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. A 806, (30–35) 2016.
- [2] J. Kim, "Neutron sources using DT mixed beams driven into solid target," Nucl. Instrum. Methods 145, (9-17) 1977.
- [3] Knoll, "Radiation Detection and Measurement," 4th Edition Wiley publication, 2015.
- [4] Kennet S. Krane "Introductory Nuclear Physics" SECOND EDITION SAMUEL S.M. WONG University of Toronto Wiley.
- [5] <https://www.nndc.bnl.gov> National nuclear data center, Brookhaven national laboratory.