



انجمن حفاظت در برابر اشعه ایران

مقاله پژوهشی

مجله سنجش و ایمنی پرتو، جلد ۹، شماره ۱، زمستان ۱۳۹۹، صفحه ۴۳-۵۴

تاریخ دریافت مقاله: ۱۳۹۹/۰۹/۰۱، تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۹/۱۲/۲۴



امکان سنجی پتانسیل آرایش (دوپینگ) سیلیکون در ستون حرارتی راکتور تحقیقاتی تهران

محمدرضا کاردان، زهره غلامزاده*، الهام باورنگین، عطیه جزءوزیری، یاسر کاسه‌ساز، ارسلان عزتی،

ناهید صادقی و فاطمه علیزاده

پژوهشکده راکتور و ایمنی هسته‌ای، پژوهشگاه علوم و فنون هسته‌ای، سازمان انرژی اتمی، تهران، ایران.

*تهران، سازمان انرژی اتمی، پژوهشگاه علوم و فنون هسته‌ای، پژوهشکده راکتور و ایمنی هسته‌ای، کدپستی: ۱۴۱۵۵-۱۳۳۹

پست الکترونیکی: cadmium_109@yahoo.com

چکیده

تولید نیمه‌هادی‌هایی نظیر سیلیکون آلیبده شده توسط فسفر در تولید قطعات الکترونیک قدرت و صنایع مختلف نظیر خودروسازی و نیروگاه‌های خورشیدی کاربردهای بسیار زیادی دارد. فرآیند آرایش که اصطلاحاً دوپینگ سیلیکون نامیده می‌شود، با هر یک از روش‌های شیمیایی و هسته‌ای قابل انجام است. از آنجایی که یکنواختی ناخالصی تزریق شده در روش شیمیایی مناسب نیست، روش‌های ناخالص‌سازی سیلیکون به روش تابش دهی نوترونی در دنیا به شدت دنبال می‌شود. در این کار، پتانسیل ستون حرارتی راکتور تحقیقاتی تهران برای انجام آرایش سیلیکون با استفاده از کد شبیه‌سازی MCNPX بررسی شده است. نتایج حاصل از این کار نشان می‌دهد شار نوترون‌های حرارتی و نسبت شار نوترون‌های حرارتی به نوترون‌های سریع در مکان بهینه به ترتیب 1.2×10^{12} n/s.cm² و ۴۴۱ می‌باشد که نشان می‌دهد ستون حرارتی راکتور تهران می‌تواند مکان مناسبی برای آرایش سیلیکون باشد.

کلیدواژگان: آرایش سیلیکون، راکتور تحقیقاتی تهران، ستون حرارتی، کد MCNPX

۱. مقدمه

نیمه‌رساناها در درون دستگاه‌های گوناگونی استفاده می‌شوند. اساس ساخت پردازشگرها و ریزپردازنده‌ها و تمام دستگاه‌هایی که به نحوی اطلاعات و عملیاتی را پردازش می‌کنند، نیمه‌رسانا است. در کامپیوترها، دستگاه‌های عکس برداری پزشکی، باتری خورشیدی، سلول‌های فوتوولتائیک و پخش‌کننده‌ها از این نیمه‌رساناها استفاده می‌شود. سیلیکون یکی از عناصر سازنده زمین است که بعد از اکسیژن بیشترین فراوانی را در پوسته زمین دارد به طوری که ۲۵٪ از جرم پوسته زمین از سیلیکون تشکیل شده است. سیلیکون‌ها در تولید بسیاری از نیمه‌هادی‌ها کاربرد دارند [۱].

نیمه‌رساناها دو نوع هستند که شامل نیمه‌رسانای ذاتی (خالص) و نیمه‌رسانای غیرذاتی (دارای ناخالصی) می‌باشند. در نیمه‌رسانای ذاتی تعداد حفره و الکترون برابر است، در صورتی که در نیمه‌رسانای غیرذاتی چنین نیست. نیمه‌رسانای غیرذاتی با آلییدن نیمه‌رسانای چهار ظرفیتی با یک عنصر سه یا پنج ظرفیتی پدید می‌آید. برای رسیدن به مقاومت الکتریکی مطلوب نیمه‌هادی‌های مورد استفاده در صنایع، نیاز است در حدود ۱ تا ۱۰ ppm ناخالصی به کریستال سیلیکون اضافه شود.

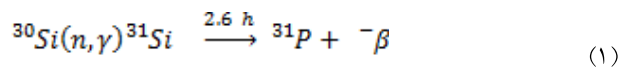
NTD-Si برای تولید تریتورها استفاده کرد که یک موفقیت استفاده تجاری عملی در این حوزه محسوب می‌شد [۲].

به دلیل برتری ویژگی‌های نیمه‌رسانای تولید شده به‌روش NTD، بین سال ۱۹۷۴ و ۱۹۷۶ میلادی روش NTD توسط تعدادی از راکتورهای تحقیقاتی در ایالات متحده، انگلیس و دانمارک به‌کار گرفته شد و به‌سرعت مقدار سیلیکون تابش‌شده به چندین تن رسید [۴].

مقاومت یک رسانا رابطه مستقیم با طول آن و رابطه معکوس با سطح مقطع دارد. همان‌طور که طول و سطح مقطع یک رسانا بر مقاومت الکتریکی آن اثر دارند، جنس ماده تشکیل‌دهنده هادی نیز بر مقاومت الکتریکی تأثیر خواهد داشت. زیرا هادی‌هایی مانند مس، نقره، آلومینیوم و... ویژگی‌های الکتریکی و فیزیکی متفاوتی دارند. لذا عموماً با دخیل کردن چگالی هر رسانا رابطه‌ای با عنوان مقاومت ویژه^۲ با واحد $\Omega \cdot \text{cm}$ معرفی می‌گردد که برای بیان مقاومت تولید شده در یک کریستال استفاده می‌شود.

در راکتورهای مختلف، ناخالص‌سازی سیلیکون در مکان‌های مختلفی انجام می‌شود. از آنجایی که محل مورد نظر باید به‌گونه‌ای باشد که شار نوترون سریع در این محل بسیار کم‌تر از شار نوترون حرارتی باشد، لذا یکی از بهترین مکان‌های پرتودهی کریستال‌های سیلیکون، ستون حرارتی است. در راکتور ۳۰ مگاوات MARIA در کشور لهستان شار نوترون حرارتی محل ناخالص‌سازی سیلیکون $6 \times 10^{12} \text{ n/s.cm}^2$ و شار نوترون سریع محل $4/5 \times 10^{10} \text{ n/s.cm}^2$ است. در این راکتور، برای تولید کریستال‌های دارای مقاومت $100 \Omega \cdot \text{cm}$ برنامه‌ریزی شده است و در مدت ۵ سال ۳۰۰ کیلوگرم کریستال پرتودهی شده است. در محل پرتودهی، شار نوترون حرارتی از مرتبه

از سال ۱۹۷۰ میلادی NTD^۱ سیلیکون به‌طور گسترده‌ای برای تولید سیلیکون نیمه‌هادی دارای مقاومت یکنواخت برای ساخت قطعات الکترونیکی مورد استفاده قرار گرفته است. ایده تولید نیمه‌رساناها با مقاومت کاملاً یکنواخت توسط روش NTD در ابتدا توسط لارک هولویتز در سال ۱۹۵۱ میلادی ارائه شد [۲]. NTD سیلیکون براساس واکنش هسته‌ای زیر است:



توزیع یکنواخت ایزوتوپ‌های ^{31}P در نمونه کریستال سیلیکون و همچنین امکان کنترل دقیق شار نوترون می‌تواند در دست‌یابی به همگنی مقاومت مشخص شده در محصول نهایی تأثیرگذار باشد. در روش مرسوم، ناخالص‌سازی سیلیکون با افزودن ناخالصی‌ها در هنگام رشد کریستال انجام می‌شود. در بیش‌تر موارد، این رویه‌ها منجر به توزیع ناهمگن ناخالصی‌ها (^{31}P) در کریستال می‌شود، لازم به ذکر است که فسفر در طبیعت تک‌ایزوتوپی است لذا ذکر فسفر-۳۱ در روش شیمیایی فقط به دلیل مقایسه با روش NTD صورت پذیرفته است. به‌عنوان نمونه، آرایش معمولی نوع n (تزیق فسفر) منجر به تغییرات بزرگ آرایش تا ۵۰٪ می‌شود [۲].

در روش NTD، همگن بودن محصول نهایی به عوامل زیر بستگی دارد:

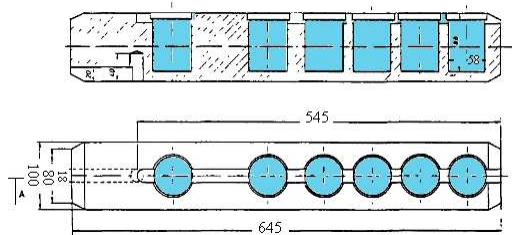
(۱) یکنواختی کریستال رشد داده شده اولیه، (۲) تفاوت بین غلظت نهایی و اولیه ناخالصی‌ها، (۳) یکنواختی شار نوترون در راکتور و (۴) ابعاد و قطر کریستال‌های سیلیکون [۳].

در حالی که تکنیک NTD به‌مدت دو دهه در آزمایشگاه‌های تحقیقاتی شناخته شده و مورد استفاده قرار گرفته بود، اما تا اواسط دهه ۱۹۷۰ میلادی از نظر تجاری تا حدی قابل استفاده نبود. در سال ۱۹۷۳، یک محقق آلمانی از

² Resistivity¹ Neutron Transmutation Doping

از راکتور حرارتی با توان ۲۵۰ کیلووات و متوسط شار در حدود $2 \times 10^{12} \text{ n/s.cm}^2$ نیز می‌توان برای آرایش کریستال‌های Si استفاده کرد. در این حالت تنها محدودیت، زمان تابش زیاد است (حدود ۳۵۰ ساعت) و با این راکتور می‌توان مقاومت‌هایی در حدود $50 \text{ } \Omega\text{cm}$ تولید کرد [۷].

هم‌چنین لازم به ذکر است که اولین آرایش تجاری سیلیکون در راکتور ۵ مگاوات DR2 دانمارک در سال ۱۹۷۴ انجام شد. در این راکتور، تابش‌های سیلیکون قطر ۲ اینچ در قوطی‌های آلومینیومی به قطر ۵۳ میلی‌متر در یک استند گرافیت افقی در ستون حرارتی انجام می‌شد، نمایی از این استند در شکل ۲ نشان داده شده است. ارتفاع هر کریستال ۸ cm و شار نوترون حرارتی محل $3 \times 10^{12} \text{ n/s.cm}^2$ و نسبت حرارتی به سریع بیش از ۱۰۰۰ بوده است [۸].



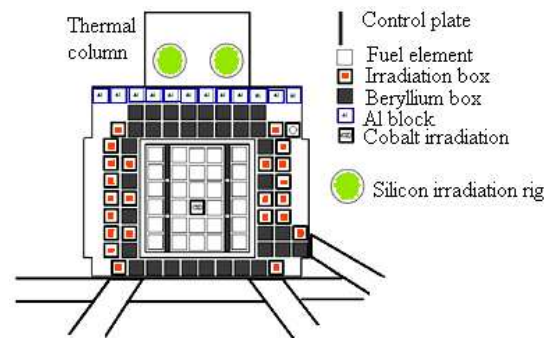
شکل (۲): نگهدارنده پرتو دهی کریستال سیلیکون در راکتور DR2 در محل ستون حرارتی [۸].

راکتور ۵ مگاوات EA-R1 در برزیل نیز کریستال‌های ۵ اینچ دارای ارتفاع ۵۰۰ میلی‌متر را برای ایجاد مقاومت $30 \text{ } \Omega\text{cm}$ پرتو دهی می‌کند و ظرفیت تولید آن ۱/۲ تن در سال است [۹].

در کار انجام شده توسط پذیرنده و همکاران (۱۹۹۲) ویفرهای سیلیکون توسط نوترون‌های حرارتی تابش داده شدند. طیف گاما ویفرهای تابش داده شده با شمارش نمونه‌ها توسط یک آشکارساز ژرمانیوم بسیار خالص به دست آمد. نتایج این کار نشان می‌داد که مقاومت الکتریکی ویفرهای سیلیکونی در نتیجه تابش نوترونی افزایش یافته بود که می‌تواند ناشی از آسیب اشعه در ساختار بلوری باشد [۱۰].

$2 \times 10^{12} \text{ n/s.cm}^2$ و عموماً زمان پرتو دهی حدود ۱۵ ساعت بوده است [۴].

ستون حرارتی در راکتور ۲۰ مگاوات ET-RR-2 برای ایجاد یک میدان نوترون حرارتی با شدت و خلوص بالا به منظور انجام کارهای زیر مورد استفاده قرار می‌گیرد: (الف) تهیه یک شار نوترون حرارتی برای ناخالص‌سازی سیلیکون، (ب) ایجاد شار حرارتی برای آنالیز فعال‌سازی نوترون و (ج) تأمین شار نوترون حرارتی با شدت زیاد برای اهداف BNCT. در شکل ۱ نمایی از مکان پرتو دهی کریستال سیلیکون در این راکتور نشان داده شده است.



شکل (۱): محل پرتو دهی کریستال سیلیکون در محل ستون حرارتی راکتور ET-RR-2 [۶].

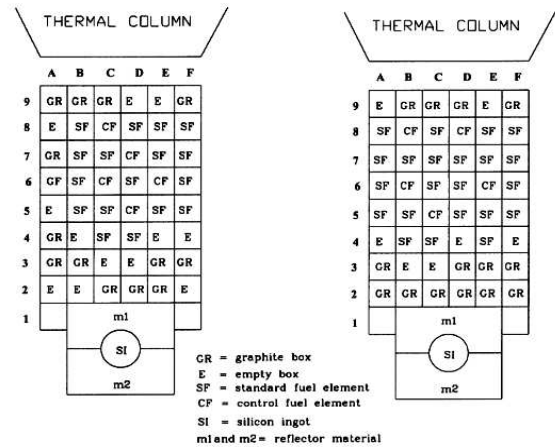
در این راکتور، در محل‌های A و B شار نوترون حرارتی $1 \times 10^{12} \text{ n/s.cm}^2$ و در محل C شار نوترون حرارتی $0.5 \times 10^{12} \text{ n/s.cm}^2$ است [۵].

یک عامل مهم بهینه‌سازی فرایند آرایش سیلیکون استفاده از نسبت مقاومت نهایی به مقاومت اولیه حداقل بزرگتر از ۱۰ در یک مکان معین است. شار سریع معمولاً بخشی از طیف نوترون با انرژی بیش از ۰/۱۸ MeV در نظر گرفته شده است. مطلوب است تا حد ممکن طیف نوترون در محل ناخالص‌سازی سیلیکون بسیار حرارتی شده باشد تا آسیب به شبکه کریستالی توسط نوترون‌های سریع تا حد ممکن کاهش یابد. ممکن است عملیات حرارتی برای رفع نقص در شبکه کریستالی پس از NTD انجام گردد. ثابت شده است که حتی

در پرتو دهی کریستال‌های سیلیکون، یکنواختی شارش دریافتی اهمیت بسزایی دارد و لازم است اختلاف شارش بیشینه و کمینه در راستای شعاعی و یا محوری کریستال تقسیم بر شارش کمینه دریافتی کریستال کمتر از ۱۰٪ باشد؛ این فاکتور اصطلاحاً^۱ ARV نامیده می‌شود. در واقع هرچه شار محوری و شعاعی یکنواخت‌تر باشد امکان دستیابی به این فاکتور ساده‌تر خواهد بود. در راکتور WWR-K ۶ مگاواتی جمهوری قزاقستان، در کریستال سیلیکون پرتو دهی شده با شارش $4 \times 10^{16} \text{ n/cm}^2$ به مدت ۴ ساعت و یفرهایی با مقاومت‌های $400 \Omega \text{ cm}$ تولید شده است. در محل پرتو دهی این کریستال نسبت شارش نوترون حرارتی به سریع بیش از ۱۲ و سرعت چرخش شعاعی کریستال حدود ۲ rpm بوده است [۱۱].

هم‌چنین در کار انجام شده توسط محققان در سال ۲۰۱۲ به این موضوع اشاره شده است که نوترون‌های سریع و پرتوهای گاما باعث نقص و جابه‌جایی شبکه در کریستال سیلیکون می‌شوند. در توصیه‌های مدارک منتشر شده توسط آژانس انرژی اتمی بین‌المللی در زمینه ناخالص‌سازی سیلیکون به این موضوع اشاره شده است که نسبت شار حرارتی به سریع باید حدود ۷ باشد و دما در موقعیت تابش‌دهی باید کمتر از ۱۸۰ درجه سانتی‌گراد باشد [۷]. از آنجایی که مطلوب‌ترین حالت تولید سیلیکون نیمه‌رسانا به روش NTD استفاده از مکانی است که کم‌ترین نقص و جابه‌جایی^۲ شبکه‌های کریستالی سیلیکون را ایجاد کند، ستون حرارتی راکتور تحقیقاتی تهران به‌عنوان مکان مناسب انتخاب شده است و در این کار به بررسی پتانسیل استفاده از این مکان برای ناخالص‌سازی سیلیکون پرداخته خواهد شد.

در سال ۲۰۰۲ شبیانی و همکارانش به بررسی پرتو دهی کریستال سیلیکون در یک باکس نزدیک قلب راکتور با استفاده از کدهایی مانند MCNP، WIMS، و CITATION پرداخته‌اند. طرح این پرتو دهی در شکل ۳ ارائه شده است [۲].



شکل (۳): نمایی از طراحی مکان پرتو دهی کریستال سیلیکون با قطر بیشینه ۳ اینچ در کار انجام شده توسط شبیانی و همکاران [۲].

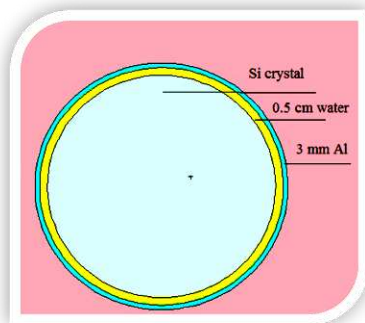
طبق نتایج ارائه شده توسط شبیانی و همکارانش، نسبت شار نوترون حرارتی به سریع در محل بررسی شده برای ناخالص‌سازی سیلیکون بین ۲/۵ تا ۶/۵ در راستای شعاعی کریستال تغییر می‌کند [۲]. لازم به ذکر است هرچه قدر کندکننده بیش‌تری در مسیر کریستال قرار گیرد، شار نوترون سریع دریافتی در کریستال کاهش می‌یابد که این موضوع باعث می‌گردد الزام حرارت‌دهی کریستال بعد از پرتو دهی به علت رفع جابه‌جایی‌های اتفاق افتاده در شبکه کریستالی به واسطه نوترون‌های سریع (نقص شبکه) حذف گردد از طرفی فاصله گرفتن از قلب، شار نوترون حرارتی را کاهش می‌دهد و زمان پرتو دهی را افزایش خواهد داد. لذا مشخص نمودن یک مکان بهینه که اهداف مورد نظر را به‌طور هم‌زمان برآورده کند، حائز اهمیت است.

¹ Axial Resistivity Variation

² displacement

۲. مواد و روش‌ها

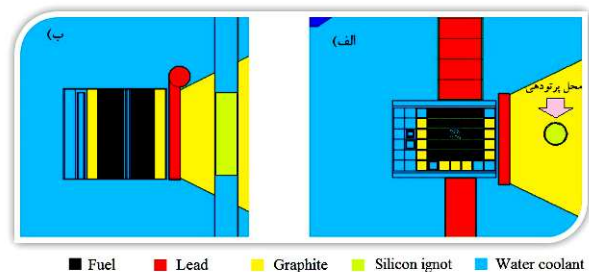
شده است. قطر این کریستال ۶ اینچ و ارتفاع آن ۶۰ سانتی‌متر در نظر گرفته شده است. این کریستال درون یک قوطی آلومینیومی با ضخامت بدنه ۳ میلی‌متر در نظر گرفته شده است و برای خنک‌سازی آن بین کریستال و بدنه قوطی ۰/۵ سانتی‌متر آب قرار داده شده است.



شکل (۵): سطح مقطع کریستال سیلیکون مدل‌سازی شده توسط کد MCNPX.

در ادامه، محل مناسب کریستال سیلیکون به منظور افزایش نسبت شار حرارتی به شار سریع، کاهش گرمای به‌جای مانده ناشی از ذرات نوترون و گاما درون کریستال و نیز حفظ شار حداقلی $1 \times 10^{12} \text{ n/s.cm}^2$ تعیین گردید. در ابتدا، برای محاسبات شار نوترون درون کریستال از قابلیت مش تالی کد MCNPX استفاده شد و توزیع شار نوترون محوری و شعاعی در دو گروه $E_n < 4 \text{ eV}$ و $E_n > 0.18 \text{ MeV}$ به‌عنوان نماینده‌های گروه انرژی حرارتی و سریع به ترتیب بررسی شد. فاصله مرکز کریستال سیلیکون از مرکز قلب در درون دهانه ستون حرارتی به ترتیب ۸۰، ۹۰ و ۱۰۰ انتخاب شد که مکان ۱۰۰ cm انتهای دهانه ستون حرارتی است و فراتر رفتن از آن امکان‌پذیر نیست. پس از تخمین مکان مناسب کریستال، بررسی توزیع شار محوری و شعاعی نوترون در گروه‌های انرژی مختلف نیز بررسی شد. برای محاسبات گرمای به‌جای مانده درون کریستال از قابلیت تالی F6 کد محاسباتی استفاده شد. در نهایت مکان مناسب کریستال به جهت برآورده کردن مفروضات مطلوب بیان‌شده در قبل پیشنهاد گردید.

کد محاسباتی MCNPX قادر به ترابرد ۳۴ نوع ذره از جمله ذرات نوترون و فوتون است. این کد محاسباتی قادر است انواع مسائل راکتور و شتاب‌دهنده‌ها را مدل‌سازی کرده و با هم‌خوانی خوبی نسبت به اندازه‌گیری‌های تجربی رفتار نوترونیک و یا پرتوژی آن‌ها را مشخص نماید [۱۳]. لذا در این کار از کد MCNPX برای مدل‌سازی قلب راکتور تحقیقاتی تهران استفاده شده است. راکتور تحقیقاتی تهران یک راکتور ۵ MW است که مطابق شکل ۴ توسط این کد محاسباتی شبیه‌سازی شده است.



شکل (۴): شبیه‌سازی محل پرتودهی کریستال سیلیکون در محل دهانه ستون حرارتی راکتور تحقیقاتی تهران (الف) نمای افقی قلب، (ب) نمای عمودی قلب.

در واقع کد محاسباتی MCNPX با در دست داشتن کتابخانه سطح برهم‌کنش‌های مختلف نوترون با مواد مختلف در انرژی‌های مختلف نوترون و نیز کتابخانه واپاشی ایزوتوپ‌ها، نیمه عمر رادیوایزوتوپ‌های مختلف، ثوابت واپاشی، ماتریس‌های رزنانس و غیره با روش مونت‌کارلو به محاسبه احتمال برخورد، نشت و یا جذب یک نوترون ضمن ترابرد آن در محیط هندسه شبیه‌سازی شده می‌پردازد و به صورت آماری پس از محاسبات فوق با توجه به روابط و فرمول‌هایی که در برنامه خود دارد شار نوترون و یا گرمای به‌جای مانده را در هر بخش از ماده و هندسه قلب مدل‌سازی شده محاسبه می‌کند. در شکل ۵ کریستال سیلیکون استوانه‌ای-شکل تعبیه شده در دهانه ستون حرارتی نشان داده

$$H(E) = \sigma_T(E)H_{ave}(E) \quad (۴)$$

که

$$H_{ave}(E) = E - \sum_i P_i(E)[\bar{E}_{out}(E) - Q_i + \bar{E}_{\gamma i}(E)] \quad (۵)$$

σ_T = سطح مقطع کل نوترون

E = انرژی نوترون تابشی

$P_i(E)$ = احتمال واکنش i ام

E_{out} = میانگین انرژی نوترون خروجی برای واکنش i ام

Q_i = مقدار Q واکنش i ام

$E_{\gamma i}$ = انرژی متوسط گاماها برای واکنش i ام

پاسخ گرما در تالی F6 برای فوتونها از طریق رابطه ۶

محاسبه می شود:

$$H(E) = \sigma_T(E)H_{ave}(E) \quad (۶)$$

$$H_{ave}(E) = \sum_{i=1}^3 P_i(E) * (E - \bar{E}_{out}) \quad (۷)$$

که

$i = ۱$ پراکندگی ناهمسان (کامپتون) با فاکتورهای شکل

$i = ۲$ تولید زوج الکترون/پوزیترون

$i = ۳$ فوتوالکتریک [۱۳-۱۴].

همچنین فاکتور پیک شعاعی و محوری کریستال در هر مکان پرتوهای با نسبت شار بیشینه به میانگین محاسبه گردید. لازم به ذکر است که هرچه قدر عدد به یک نزدیک تر باشد مطلوب تر است.

۳. نتایج و بحث

در ابتدا کریستال سیلیکون در فاصله ۸۰ cm از مرکز قلب درون دهانه ستون حرارتی قرار داده شد. در این مکان ۳۴ cm گرافیت، ۸ cm سرب و ۷ cm بازتابنده گرافیت بین لبه آخرین ردیف سوخت های قلب و لبه کانال محتوی کریستال سیلیکون قرار دارد. در شکل ۶ توزیع شار نوترون شعاعی این مکان نشان داده شده است.

برای محاسبات شار نوترون در کد MCNPX از تالی F4

استفاده می شود در واقع، برای تعیین شار ذرات ورودی به یک حجم، از این تالی استفاده می شود. اگر ذره ای با وزن W و انرژی E در یک سلول مشخص دارای حجم V ارتفاع پیمایش T ایجاد کند، این ارتفاع پیمایش مشارکت WT/V در شار (شارش) سلول ایجاد می کند. میانگین به عنوان تالی F4 در خروجی MCNPX گزارش می شود.

از نظر فنی، اگر $\Phi(r, E, \Omega)$ انرژی و توزیع زاویه ای

جریان به عنوان تابعی از مکان باشد، در واقع، مقدار F4 از رابطه

زیر تعیین می گردد [۱۴]:

$$F4 = \frac{1}{V} \int_V dV \int_E dE \int_{4\pi} d\Omega \Phi(r, E, \Omega) \quad \left(\frac{\#}{\text{cm}^2 \text{ source particle}} \right) \quad (۲)$$

برای محاسبات گرمای به جای مانده، کد MCNPX از تالی

F6 استفاده می کند که تمام انرژی به جای مانده ناشی از ذرات

اولیه مختلف در زمان واکنش هسته ای محاسبه می شود و انرژی

ذرات ثانویه، اگر قرار نباشد ردیابی شوند (یعنی روی کارت

MODE موجود نباشند) در نقطه برهم کنش ذخیره می شود.

انرژی پس زنی هسته ای نیز در نقطه برهم کنش ذخیره می شود،

مگر این که ترابرد یون سنگین مشخص شود. برای به دست

آوردن دقیق ترین میزان انرژی به جای مانده، کاربر باید تمام

ذرات ثانویه ممکن (آنهایی که احتمال تولید آن ها در

برهم کنش وجود دارد) را در کارت MODE در نظر بگیرد. در

کد MCNPX از روابط زیر برای محاسبه گرمای به جای مانده

استفاده می شود.

$$F_6 = \frac{\rho_a}{\rho_g} \int_V \int_t \int_E H(E) \Phi(r, E, t) dE dt \frac{dV}{V} \left(\frac{\text{MeV}}{g \cdot (\text{Source particle})} \right) \quad (۳)$$

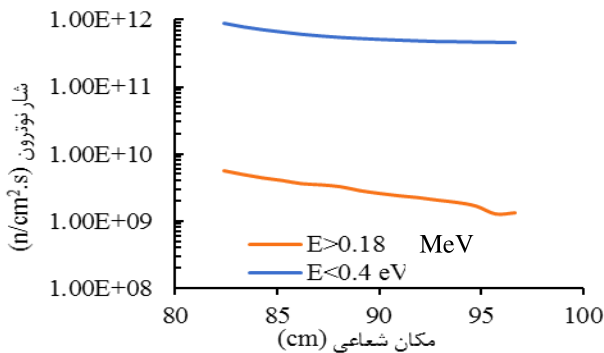
که ρ_a چگالی اتمی است (سانتی متر مکعب/اتم)، ρ_g چگالی

جرمی است (سانتی متر مکعب/گرم) و $H(E)$ پاسخ گرما است

(که به نوکلیدها در یک ماده اضافه می شود). پاسخ گرما در

تالی F6 برای نوترون ها از طریق رابطه ۴ محاسبه می شود:

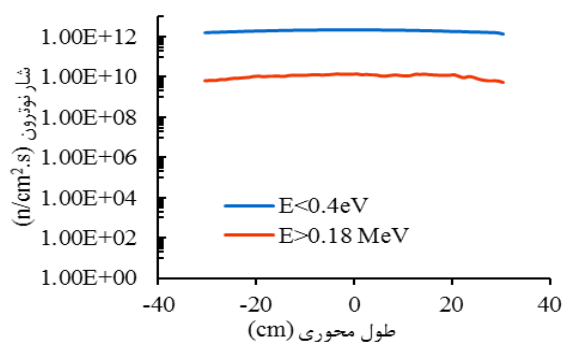
نیز قابل رفع است. هم‌چنین محاسبات فوق‌الذکر برای مکان دارای فاصله مرکز به مرکز کریستال تا قلب راکتور ۹۰ cm تکرار شد. در شکل ۸ نمودار تغییرات شعاعی شار نوترون درون کریستال واقع در این مکان نشان داده شده است.



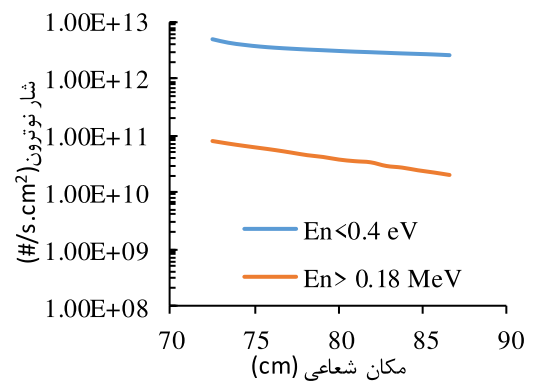
شکل (۸): توزیع شار شعاعی در داخل کریستال سیلیکون ۶ اینچ در فاصله ۹۰ cm از مرکز قلب.

در این مکان نسبت شار حرارتی به شار سریع ۱۸۵ است. هم‌چنین میانگین انرژی نوترون درون کریستال ۱۹/۳ eV است. گرمای ناشی از پرتوهای گاما درون کریستال ۸۵/۳ وات است و گرمای ناشی از نوترون بسیار ناچیز است. هم‌چنین میانگین شار نوترون حرارتی در این محل 2×10^{12} n/s.cm² است. فاکتور پیک شار شعاعی یعنی نسبت شار حرارتی به میانگین حدود ۱/۵۴ است.

در شکل ۹، توزیع محوری شار نوترون در این مکان نشان داده شده است. براساس محاسبات، پیک شار محوری نوترون حرارتی در این مکان ۱/۱۵ است.



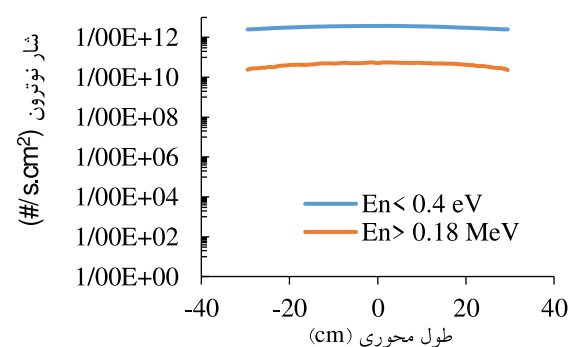
شکل (۹): توزیع شار محوری در داخل کریستال سیلیکون ۶ اینچ در فاصله ۹۰ cm از مرکز قلب.



شکل (۶): توزیع شار شعاعی در داخل کریستال سیلیکون ۶ اینچ در فاصله ۸۰ cm از مرکز قلب.

در این مکان نسبت شار حرارتی به شار سریع ۷۶ است. هم‌چنین انرژی نوترون درون کریستال ۴۳ eV است. گرمای ناشی از پرتوهای گاما درون کریستال ۱۳۷ وات است و گرمای ناشی از نوترون بسیار کمتر است. شار نوترون حرارتی در این محل 3×10^{12} n/s.cm² است. فاکتور پیک شار شعاعی یعنی نسبت شار حرارتی به میانگین حدود ۱/۴۶ است. لازم به ذکر است عدم یکنواختی شار شعاعی با چرخاندن کریستال قابل رفع شدن است.

در شکل ۷ توزیع شار نوترون محوری این مکان نشان داده شده است.

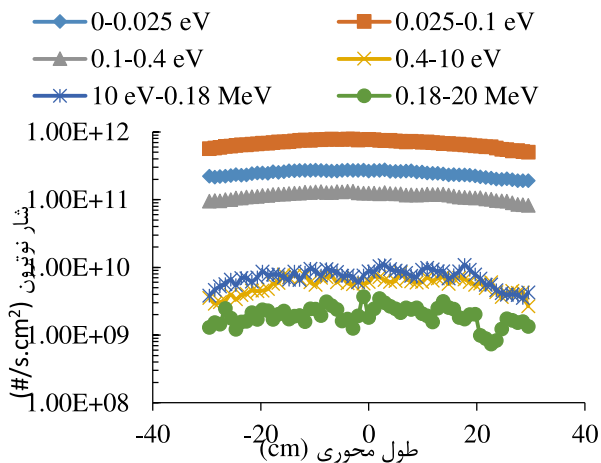


شکل (۷): توزیع شار محوری در داخل کریستال سیلیکون ۶ اینچ در فاصله ۸۰ cm از مرکز قلب.

در این مکان فاکتور پیک محوری ۱/۱۴ است و مجدداً لازم به ذکر است با حرکت عمودی کریستال عدم یکنواختی محوری

مناسب، نسبت شار حرارتی به سریع حداقل ۷ برابر (طبق توصیه آژانس انرژی اتمی بین المللی) و نیز گرمای به جای مانده در کریستال بود را به خوبی برآورده می کند. مکان ۱۰۰ cm به لحاظ نسبت حرارتی به سریع بسیار بالاتر و نیز انرژی نوترون حرارتی بسیار کمتر مطلوب تر است ولی زمان مورد نیاز پرتو دهی هر کریستال را حداقل ۳ برابر می کند. در مکان ۱۰۰ cm گرمای به جای مانده ناشی از پرتوهای گاما درون کریستال ۰/۰۰۲ W/g است. لذا در صورت انتخاب محل های دور از قلب در راکتور تحقیقاتی تهران، این زمان به ۲ الی ۳ برابر افزایش می یابد.

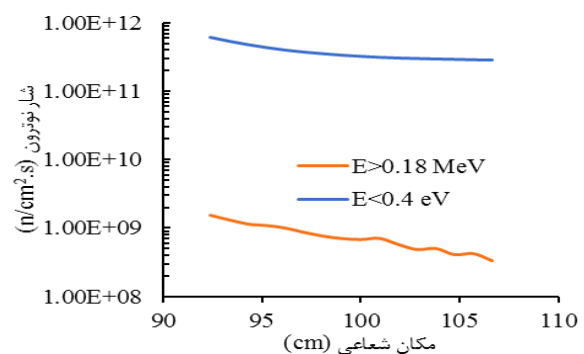
در شکل ۱۲، توزیع محوری شار نوترون در گروه های بیشتر انرژی در راستای محوری کریستال سیلیکون دارای قطر ۶ اینچ که در فاصله ۱۰۰ cm از قلب واقع شده است، نشان داده شده است. هم چنان که شکل ۱۲ نشان می دهد، عمده نوترون های داخل کریستال دارای انرژی کمتر از ۰/۴ eV هستند و شار نوترون های انرژی بیشتر از ۰/۴ eV بسیار کمتر است.



شکل (۱۲): توزیع شار محوری در گروه های مختلف انرژی در داخل کریستال سیلیکون ۶ اینچ در فاصله ۱۰۰ cm از مرکز قلب.

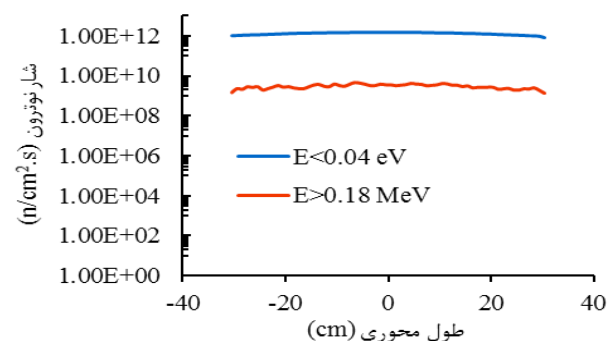
در جدول ۲ ویژگی های کانال های مختلف پرتو دهی سیلیکون در دهانه ستون حرارتی با یکدیگر مقایسه شده است.

محاسبات توزیع شار در مکان ۱۰۰ cm از مرکز قلب انجام شد. توزیع شعاعی شار نوترون در شکل ۱۰ نشان داده شده است. در این مکان نسبت شار حرارتی به شار سریع ۴۴۱ است. هم چنین انرژی میانگین نوترون درون کریستال ۸/۳ eV است. گرمای ناشی از پرتوهای گاما درون کریستال ۵۴/۱ وات است و گرمای ناشی از نوترون بسیار ناچیز است. هم چنین شار نوترون حرارتی در این محل 1×10^{12} n/s.cm² است. فاکتور پیک شار شعاعی یعنی نسبت شار حرارتی بیشینه به میانگین حدود ۱/۶۳ است.



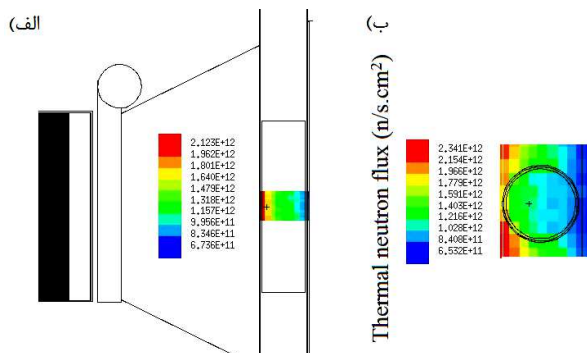
شکل (۱۰): توزیع شار شعاعی در داخل کریستال سیلیکون ۶ اینچ در فاصله ۱۰۰ cm از مرکز قلب.

در شکل ۱۱، توزیع شار نوترون حرارتی در راستای محوری کریستال نشان داده شده است. در این مکان فاکتور پیک محوری ۱/۱۳ است.



شکل (۱۱): توزیع شار محوری در داخل کریستال سیلیکون ۶ اینچ در فاصله ۱۰۰ cm از مرکز قلب.

در کل، سه مکان بررسی شده دهانه ستون حرارتی به لحاظ حداقل ملاحظات برشمرده شده که شامل شار نوترون حرارتی



شکل (۱۳): توزیع شار نوترون حرارتی در قسمت میانی کریستال سیلیکون ۶ اینچ در فاصله ۱۰۰ cm از مرکز قلب (الف) نمای محوری، (ب) نمای شعاعی.

در سال‌های اخیر تحقیقات و تلاش‌هایی برای انجام ناخالص‌سازی سیلیکون در راکتور تحقیقاتی تهران انجام شده است که در این کار این موضوع به صورت تخصصی و با توجه به ملاحظات فنی مختلف مورد بررسی قرار گرفته است.

در راکتور تهران، در محل بررسی شده در دهانه ستون حرارتی در ارتفاع ۱۰ cm وسط کریستال ۶ اینچی با ارتفاع ۶۰ cm در مکان ۱۰۰ cm از مرکز قلب، پارامتر ARV ۳/۳٪ است. این یکنواختی محوری در وسط کریستال در شکل ۱۳ نیز دیده می‌شود. محاسبات نشان می‌دهد در ارتفاع ۲۰ cm وسط این کریستال پارامتر ARV ۶/۶٪ و در ارتفاع ۳۰ cm وسط کریستال این پارامتر ۱۲/۴٪ است.

لازم به ذکر است که در قسمت وسط کریستال ARV کمتر از ۱۰٪ بدون حرکت عمودی کریستال قابل حصول است. از آنجایی که ثابت بودن کریستال در مکان تعبیه شده در زمان پرتودهی مطلوب‌تر است روش دیگری که می‌توان به کار برد که منجر به تخت شدن شار نوترون در ارتفاع کریستال گردد این است که از شکل‌دهنده شار در مسیر کانال پرتودهی استفاده گردد. این شکل‌دهنده شار می‌تواند شامل ماده جاذب نوترون حرارتی با ضخامت متغیر در ارتفاع کانال (به عبارتی در ارتفاع کریستال) باشد. طراحی یک شکل‌دهنده شار نوترون

جدول (۱): مقایسه ویژگی‌های مکان‌های مختلف پرتودهی کریستال سیلیکون درون دهانه ستون حرارتی راکتور تحقیقاتی تهران.

مکان (cm)	میانگین شار نوترون حرارتی (n/s.cm ²)	نسبت شار حرارتی به سریع	میانگین انرژی نوترون (eV)	گرمای ناشی از نوترون (W)	گرمای ناشی از گاما (W)
۸۰	$3/3 \times 10^{12}$	۷۶	۴۳/۰	۰/۸۳۰	۱۳۷/۰
۹۰	$2/1 \times 10^{12}$	۱۸۵	۱۹/۳	۰/۲۲۰	۸۵/۳
۱۰۰	$1/2 \times 10^{12}$	۴۴۱	۸/۳	۰/۰۶۵	۵۴/۱

هم‌چنان که جدول ۱ نشان می‌دهد؛ مکان‌های مختلف دهانه ستون حرارتی شار بیش از 10^{12} n/s.cm² را دارا هستند. در مکان‌های دورتر از قلب دو مزیت عمده ایجاد می‌شود که عبارتند از انرژی نوترون کم‌تر و نیز گرمای به‌جای مانده کمتر در درون کریستال. انرژی میانگین کمتر نشان‌دهنده کاهش آسیب پرتویی ناشی از نوترون سریع است. با این وجود می‌توان درون دهانه ستون حرارتی بیش از یک کانال را برای پرتودهی سیلیکون اختصاص داد که کانال نزدیک به قلب را برای کریستال‌های قطر کوچک‌تر اختصاص داد زیرا گرمای به‌جای مانده درون آن‌ها کمتر خواهد شد و نیز زمان پرتودهی آن‌ها کوتاه‌تر خواهد بود.

در شکل ۱۳ توزیع شار نوترون حرارتی با انرژی کم‌تر از ۰/۴ eV در قسمت مرکزی (ارتفاع ۱۰ cm) کریستال سیلیکون ۶ اینچی نشان داده شده است. هم‌چنان که شکل نشان می‌دهد شار نوترون حرارتی در قسمت ۱۰ cm وسط کریستال با ارتفاع ۶۰ cm تقریباً یکنواخت است. لذا با حرکت عمودی کریستال ضمن پرتودهی می‌توان در تمام بخش‌های کریستال، شارش دریافتی یکنواختی را ایجاد کرد. هم‌چنین چرخش محوری کریستال می‌تواند عدم یکنواختی شارش دریافتی کریستال را برطرف سازد. لذا لازم است سیستم کنترل مکانیکی‌ای جهت ایجاد چرخش و حرکت عمودی کریستال در این کانال پرتودهی طراحی گردد.

در کل، هرچه شارش نوترون دریافتی کریستال بیشتر باشد می توان مقاومت بیش تری تولید کرد. لازم به ذکر است که هرچند گستره مختلف مقاومت ها مورد نیاز است ولی هر راکتور براساس ساعت های پرتو دهی امکان پذیر خود می تواند فقط تا محدوده مقاومت های خاصی را تولید کند.

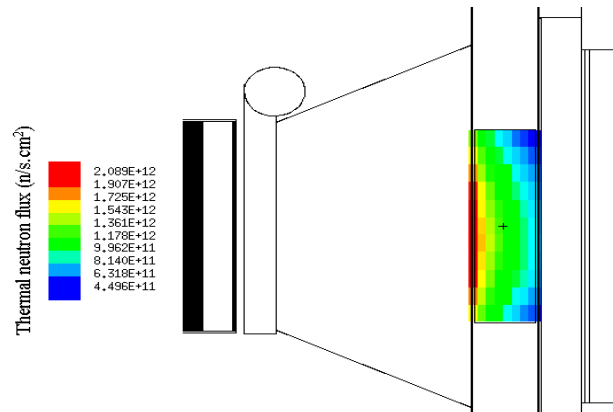
محاسبات کد MCNPX نشان می دهد آهنگ تولید اتم های فسفر ۳۱ درون کریستال $1.0^9 \times 10^8 \text{ atom/s.cm}^2$ است که انتظار می رود پس از ۹ ساعت پرتو دهی $1.0^{18} \times 2/8$ اتم فسفر-۳۱ درون کریستال تولید شود. هم چنین لازم به ذکر است که خطای آماری تمامی محاسبات کمتر از ۳٪ بوده است.

۴. نتیجه گیری

در بسیاری از راکتورهای تحقیقاتی دنیا ناخالص سازی سیلیکون با ظرفیت چندین تن در حال انجام است. با توجه به این که این نیمه رساناها در صنایع گسترده ای مورد استفاده قرار می گیرند، تولید آن در راکتور تحقیقاتی تهران هم منجر به درآمدزایی می گردد، هم چنین نیاز بسیاری از صنایع داخل کشور را برآورده خواهد ساخت. محاسبات انجام شده در این کار نشان می دهد ستون حرارتی راکتور تحقیقاتی تهران به خوبی می تواند برای انجام ناخالص سازی سیلیکون مورد استفاده قرار گیرد. در مکان 100 cm از مرکز قلب، نسبت شار نوترون حرارتی به سریع بسیار بالا است و انرژی نوترون ها در طیف موجود درون کریستال سیلیکون $8/3 \text{ eV}$ است. ضمن این که در این مکان کل گرمای ناشی از گاما درون کریستال حدود 54 W است. این موارد همگی موجب کمترین آسیب به شبکه کریستال ضمن پرتو دهی خواهند شد. این مقدار گرما به راحتی با جریان آب راکتور تحقیقاتی تهران برداشت می شود و دما کریستال را کمتر از 180 درجه سانتی گراد (دمای بیشینه کریستال به جهت جلوگیری از نقص آن) حفظ خواهد کرد. در مورد لزوم یکنواختی شعاعی ناخالصی تولید شده در کریستال سیلیکون،

حرارتی می تواند در تحقیقات بعدی این پژوهش مورد بررسی قرار گیرد.

در شکل ۱۴، نمای توزیع شار نوترون حرارتی در ارتفاع کریستال درون کانال بهینه نشان داده شده است.



شکل (۱۴): توزیع شار نوترون حرارتی در ارتفاع کریستال سیلیکون ۶ اینچ در فاصله 100 cm از مرکز قلب.

محاسبات نشان می دهد با صرف زمان حدود ۹ ساعت در این مکان می توان به شارش راکتور WWR-K دست یافت. ضمن این که این مکان به لحاظ نسبت شار نوترون حرارتی به سریع نسبت به راکتور WWR-K وضعیت بسیار بهتری دارد. لذا امکان تولید مقاومت $400 \Omega \text{ cm}$ و مقاومت های کمتر از آن در راکتور تحقیقاتی تهران وجود دارد. هم چنین دستیابی به ظرفیت پرتو دهی حدود ۱ تن در سال در مکان ستون حرارتی راکتور تحقیقاتی تهران با توجه به پرتو دهی ۳ عدد کریستال در هر ماه به خوبی قابل پیش بینی است.

محاسبات کد MCNPX نشان می دهد با حضور کریستال در محل ستون حرارتی، ضریب تکثیر مؤثر (k_{eff}) قلب در مورد نزدیک ترین محل پرتو دهی به قلب (80 cm) حدود 1.07 pcm افزایش می یابد و در محل های دورتر تغییرات این عدد کمتر از 5 pcm است. لذا این کانال پرتو دهی که در خارج قلب قرار دارد تأثیری بر پارامترهای نوترونیکی قلب ندارد زیرا تغییر ضریب تکثیر مؤثر بسیار کمتر از کسر نوترون تأخیری قلب (1.05 pcm) است.

لازم به ذکر است که با چرخش شعاعی کریستال با سرعت ۲-۵ rpm این یکنواختی حاصل خواهد شد که در طراحی کانال پرتودهی راکتور تحقیقاتی تهران این فرایند اجرا خواهد شد. محاسبات نشان می‌دهد در راکتور تهران، در محل بهینه بررسی شده در دهانه ستون حرارتی در ارتفاع ۱۰ cm وسط کریستال ۶ اینچی با ارتفاع ۶۰ cm، پارامتر ARV ۳/۳٪ است.

با این حال در ارتفاع کل کریستال مقدار یکنواختی بیش از ۱۰٪ خواهد بود. لذا در طراحی کانال لازم است یکی از موارد جابه‌جایی محوری کریستال و یا استفاده از مواد شکل‌دهنده شار برای تخت کردن آن درون کانال پرتودهی مورد توجه قرار گیرد که در طراحی نهایی کانال پرتودهی این موارد لحاظ خواهد گردید.

۵. مراجع

- [۱] علی یادپروقی، نیمه‌رساناها و کاربردهای آنها، www.prozhe.com، ۱۳۹۸.
- [2] M.S. Schnoller. Breakdown behavior of rectifiers and thyristors made from striation-free silicon, *IEEE Transition Electron Devices*, 21(1974) 313-314.
- [3] S. Sheibani, F. Moattar, M. Ghannadi Maragheh and H. Khalafi. Investigation of a simple and efficient method for silicon neutron transmutation doping process in Tehran research reactor, *Annals of Nuclear Energy*, 29(2002) 1195-1208.
- [4] Neutron Transmutation Doping of Silicon at Research Reactors, IAEA-TECDOC, (1681).
- [5] M. Imam Mahmoud and H. Roushdy. Thermal neutron flux distribution in ET-RR2 reactor thermal column, *Nuclear Technology and Radiation Protection*, 17(2002) 64-67.
- [6] M.K. Shaat and M.A. Gaheen. Utilization of Egyptian Research Reactor and Modes of Collaboration, *Egyptian Research Reactor (ETRR-2)*, 15 August (2017).
- [7] Silicon transmutation doping techniques and practices, (International Atomic Energy Agency, Vienna (Austria); Otwock-Swierk (Poland), 20-22 Nov (1985).
- [8] K. Heydorn and K. Andresen. Neutron transmutation doping of silicon at Risoe National Laboratory, IAEA-TECDOC-No.456, (1988).
- [9] A.W. Carbonari, W. Pend Jr., J.R. Sebastião, R.N. Saxenaa and M.S. Dias. An irradiation rig for neutron transmutation doping of silicon in the IEA-R1 research reactor, *Nuclear Instrument and Method B*, 83(1993) 157-162.
- [10] A. Pazirandeh, G.R. Aslani and N. Shadan-poo. Silicon doping and trace element measurement by neutron activation technique, *Inorganic, organic, physical and analytical chemistry (B1110) conference*, (1992).
- [11] N. Takemoto, N. Romanova, N. Kimura, S. Gizatulín, T. Saito, A. Martyushov, D. Nakipov, K. Tsuchiya and P. Chkrov. Irradiation Test with Silicon Ingot for NTD-Si Irradiation Technology, (IAEA-Technology, 2015).
- [12] B. Munkhbat and T. Obara. Design concept of a small nuclear reactor for large-diameter NTD-Si using a conventional PWR full-length fuel assembly, *Journal of Nuclear Science and Technology*, 49(2012) 535-543.
- [13] D.B. Pelowitz. Users' manual versión of MCNPX2.6.0, LANL, LA-CP-07-1473, (2008).
- [14] J.K. Shultis and R.E. Faw. An MCNP primer Dept. of Mechanical and Nuclear Engineering, Kansas State University, copyright (2004-2010).
- [15] J.F. Briesmeister. MCNP-A General Monte Carlo N-Particle Transport code Version4C, Los Alamos National Laboratory Report, USA, LA-13709-M (2000).