

مدل سازی حجم حساس در محاسبه سطح مقطع آسیب پرتویی SEU ناشی از پرتوهای فضایی

سعید بوربور^۱، سیدامیر حسین فقهی^{۲*} و حمید جعفری^۳

۱، ۲ و ۳- گروه کاربرد پرتوها، دانشکده مهندسی هسته‌ای، دانشگاه شهید بهشتی

* تهران، کد پستی ۱۹۸۳۹۶۳۱۱۳

a_feghi@sbu.ac.ir

یکی از مهم‌ترین پارامترها در محاسبه سطح مقطع آسیب SEU ناشی از پرتوهای فضایی، شکل و اندازه حجم حساس سلول حافظه الکترونیکی است. تاکنون مدل‌های مختلفی برای محاسبه حجم حساس ارائه شده است، لیکن ارزیابی جامعی از میزان انطباق نتایج حاصل از به‌کارگیری این مدل‌ها با نتایج تجربی صورت نگرفته است. در این مقاله، نتایج حاصل از مدل‌های *Tetrahedral RPP* و *Nested Sensitive Volume* برای محاسبه حجم حساس سلول حافظه الکترونیکی مقایسه می‌شود. در این محاسبات، اثر لایه‌های فلزی و اکسیدی و همچنین اثر پهن شدن انرژی در نظر گرفته شده است. این محاسبات با استفاده از کد مونت کارلو GEANT4 انجام شده است. نتایج مقایسه پاسخ محاسبات انجام شده و آزمایش‌های تجربی برای حافظه الکترونیکی AT60142، بیانگر این است که مدل RPP اختلاف زیادی با نتایج آزمایش‌های عملی دارد و مدل *Tetrahedral* با وجود پاسخ نسبتاً قابل قبول در LET های کم در LET های بالا همچنان اختلاف زیادی با نتایج آزمایش‌های عملی نشان می‌دهد. در نهایت مدل *Nested Sensitive Volume* که در تمامی LET ها پاسخ مناسبی دارد، دارای نزدیک‌ترین پاسخ به نتایج آزمایش‌های عملی است.

واژه‌های کلیدی: حجم حساس، آسیب SEU، GEANT4، حافظه‌های الکترونیکی

علائم و اختصارات

مقدمه

محیط فضا شامل طیف گسترده‌ای از تابش‌های فضایی است که عمدتاً شامل پروتون‌ها، الکترون‌ها و یون‌های سنگین پرانرژی است. این تابش‌ها می‌توانند آسیب‌های گوناگونی را بر تجهیزات الکترونیکی، اجزای بنیادی تشکیل‌دهنده واحدهای سخت‌افزاری فضایی و زیرسیستم‌های استفاده شده در ماهواره‌ها و فضاپیماها، وارد سازند. یکی از اثرات تابش یون پر انرژی روی مدارهای الکترونیکی ایجاد خطای SEE^۴ یا حادثه تک رخدادی است. خطای SEE گونه‌های متفاوتی از قبیل SEU^۵، SEL^۶، SET^۷ و ... دارد.

E_{dep}	انرژی برجای گذاشته شده
ρ	چگالی ماده هدف
LET	انتقال خطی انرژی
D	ضخامت حجم حساس
θ	زاویه برخورد ذره با حجم حساس
L	طول مؤثر حرکت ذره در داخل حجم حساس

۱. دانشجوی کارشناسی ارشد

۲. دانشیار (نویسنده مخاطب)

۳. کارشناسی ارشد

4. Single Event Effect

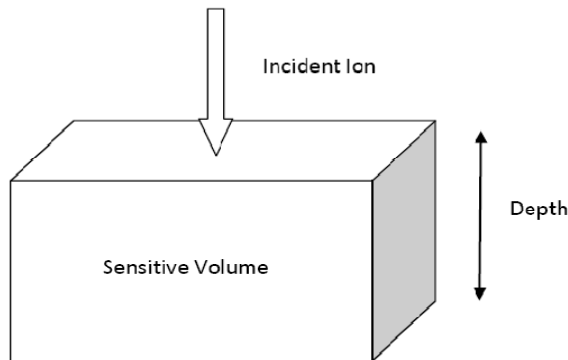
5. Single Event Upset

محاسبه کرد. برای این کار حجم ترانزیستور را به عنوان حجم حساس در نظر گرفته و مقدار انرژی بر جای گذاشته شده توسط یون فرودی در این حجم محاسبه می شود. شکل ها و مدل های متفاوتی برای تقریب زدن این حجم ارائه شده است که ساده ترین آن مدل RPP^۱ است [۲-۵]. با پیشرفت فناوری ساخت قطعات نیمه هادی ابعاد ترانزیستورها به زیر میکرومتر کاهش پیدا کرده و مدل ساده RPP را نمی توان برای شبیه سازی قطعات جدید استفاده کرد. به همین دلیل باید از مدل های پیشرفته تر برای مدل سازی این حجم حساس استفاده شود. پس از مدل سازی حجم حساس سلول حافظه الکترونیکی با استفاده از مدل های RPP و غیر RPP در کد مونت کارلو GEANT4، انرژی بر جای گذاشته شده توسط یون های فرودی برای تخمین مقدار سطح مقطع آسیب SEU بر حسب LET^۲ محاسبه می شود. در ادامه مقادیر حاصل از مدل سازی حجم حساس، با مقادیر حاصل از اندازه گیری های تجربی مقایسه و در نهایت بهترین مدل برای تعریف حجم حساس سلول حافظه الکترونیکی معرفی می شود.

مدل RPP

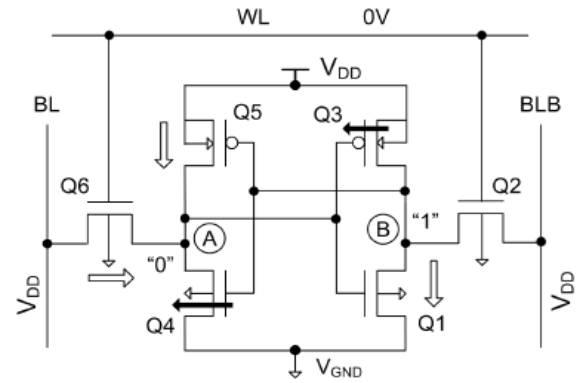
این مدل، ساده ترین راه برای در نظر گرفتن حجم حساس تعریف یک حجم هندسی به شکل مکعب مستطیل با ابعاد ثابت است، به گونه ای که بهره جمع آوری بار در تمام این حجم مقدار ثابتی باشد (شکل ۲). در مدل های قدیمی مانند RPP سطح مقطع ایجاد خطای SEU بر حسب LET ذرات، به صورت مستقل از انرژی و نوع ذره بیان می شود. با در نظر گرفتن LET ذرات به عنوان متغیر مستقل برای تابع سطح مقطع SEU، انرژی بر جا گذاشته شده توسط ذره ای با LET مشخص در طول مسیر D درون این حجم طبق رابطه (۱) به دست می آید.

$$E_{dep} = \rho \cdot LET \cdot D \quad (1)$$



شکل ۲- هندسه حجم حساس در مدل RPP

در مورد مدارهای حافظه SRAM^۳ خطای SEU می تواند مقدار منطقی یک سلول از حافظه را معکوس کند و باعث از بین رفتن عدد واقعی ذخیره شده درون سلول شود. در شکل (۱) مدار داخلی یک سلول حافظه SRAM نشان داده شده است [۱].



شکل ۱- مدار داخلی یک سلول حافظه SRAM

در حالت کارکرد عادی مدار مقدار ذخیره شده درون این سلول، توسط اعمال پس خورد از نقطه A و B به گیت های ترانزیستورهای مقابل، ثابت است. ترانزیستور Q1 دارای ولتاژ گیت صفر منطقی بوده بنابراین خاموش است و فقط جریان نشتی بسیار اندکی از آن عبور می کند، اما به علت وجود اختلاف پتانسیل الکتریکی بین پایه های درین و سورس این ترانزیستور، یک میدان الکتریکی ایجاد می شود و الکترون-حفره های حاصل از یونیزاسیون ذره خارجی توسط این میدان جمع آوری می شود. جمع آوری این بارها باعث القای جریانی در ترانزیستور می شود. مقدار این جریان به پارامترهای مختلفی وابسته است که مهم ترین آن تعداد حامل های بار تولید شده از یونیزاسیون ذره ورودی است، به طوری که هر چه مقدار بار تولید شده بیشتر باشد جریان بیشتری از ترانزیستور عبور می کند. اگر مقدار این جریان به اندازه کافی زیاد باشد می تواند باعث شود که ولتاژ درین ترانزیستور Q1 به مقداری کمتر از یک منطقی افت کند، از طرفی با وجود باز خورد از نقطه A به گیت ترانزیستورهای Q4، Q5، ترانزیستور Q4 به حالت خاموش و Q5 به حالت روشن هدایت می شوند و به این ترتیب سطح منطقی این سلول حافظه معکوس می شود. برای مدل سازی این پدیده باید مقدار بار تولید شده توسط ذره فرودی را درون حجم ترانزیستوری که ابتدا خاموش است

6. Single Event LatchUp
7. Single Event Transient
8. Static Random Access Memory

9. Rectangular Parallel Pipe
10. Linear Energy Transfer

بالا دیده می‌شود که مقدار سطح مقطع اندازه‌گیری شده از آزمایش یک مقدار رو به افزایش دارد و سطح مقطع در LETهای بالا از مقطع هندسی خود ترانزیستور بزرگ‌تر است. دلیل این مسئله جمع‌آوری بار از بیرون پیوند است که توسط دز شعاعی نسبتاً زیاد یون‌های سنگین به‌وجود می‌آید [۹-۱۱]. این پدیده باعث می‌شود که میدان الکتریکی درون پیوند ترانزیستور از حالت متمرکز درون پیوند خارج شده و بتواند بارهایی را جمع‌آوری کند که بیرون از پیوند خود ترانزیستور قرار دارند. به این ترتیب سطح مقطع خطای SEU برای یک سلول حافظه می‌تواند از مساحت مقطع ترانزیستور حساس بزرگ‌تر شده و برای ذرات سنگین حتی از مقطع کل سلول هم بیشتر شود. به عبارتی دیگر یک یون می‌تواند باعث SEU در چند سلول حافظه شود. از مدل نستد ولوم^{۱۳} برای مدل کردن این پدیده استفاده می‌شود. یعنی به جای اینکه حجم حساس را درون ترانزیستور تعریف کنند آن را معادل مساحت کل سلول حافظه فرض کرده و بهره جمع‌آوری بار متفاوتی به قسمت‌های مختلف آن نسبت می‌دهند.

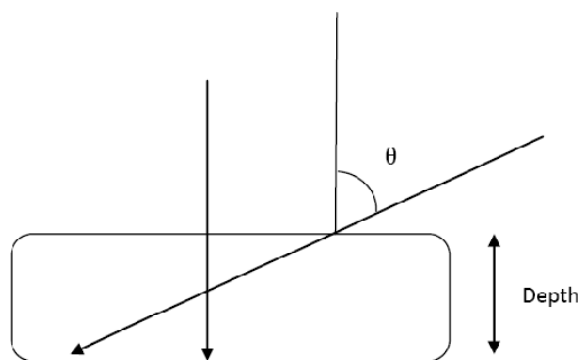
در مدل‌های جدید علاوه بر اصلاحات انجام شده روی شکل هندسی و بهره جمع‌آوری بار، ساز و کارهای برجا گذاشتن انرژی درون حجم حساس با دقت بیشتری بررسی می‌شود. پهن‌شدگی انرژی در حجم‌های از مرتبه میکرومتر بیشتر دیده می‌شود [۱۲]. اثر پهن‌شدگی انرژی برای ذراتی که LET نزدیک به مقدار LET_{th} آستانه (LET_{th}) دارند، تأثیر زیادی روی نرخ خطای SEU دارد و برای تعیین سطح مقطع SEU اثر این پدیده هم لحاظ می‌شود [۶]. در مدل‌سازی‌های پیشرفته‌تر از معماری واقعی داخل قطعه استفاده می‌شود و با در نظر گرفتن میدان الکتریکی درون ترانزیستورها، مقدار حقیقی بار جمع‌آوری شده توسط میدان الکتریکی محاسبه می‌شود [۱۳].

روش کار

برای محاسبه سطح مقطع SEU باید مدل‌های ارائه شده برای محاسبه SEU را درون کد محاسباتی پیاده کرد و مقدار انرژی بر جای گذاشته شده توسط یون را درون حجم حساس به دست آورد. برای این محاسبات از کد GEANT4 استفاده می‌شود. کد مونت کارلو GEANT4 بر مبنای زبان شیئی گرای ++C نوشته شده است و از این رو به راحتی توسعه‌پذیر است. این کد قابلیت‌های زیادی برای شبیه‌سازی انواع اندرکنش‌های فیزیکی مانند یونیزاسیون ذرات باردار، ترابرد فوتون‌های نوری، گاما، نوترون و دیگر ذرات است [۱۴]. هر اندرکنش فیزیکی در یک کلاس تعریف می‌شود و مجموعه‌ای از این اندرکنش‌ها یک لیست از

برای تولید یک SEU در سلول حافظه، مقدار انرژی برجا گذاشته شده باید از انرژی آستانه تولید آپست^{۱۱} بیشتر باشد، بنابراین اگر ذره‌ای بتواند در گذر از مسیری از درون این حجم، انرژی بیشتر از انرژی آستانه در این حجم به جای بگذارد باعث تولید یک خطای SEU می‌شود. طول مسیری که ذره در این حجم طی می‌کند عامل مهمی است که علاوه بر ضخامت خود این حجم به زاویه برخورد ذره با این حجم نیز بستگی دارد [۵ و ۲]. همان‌طور که در شکل (۳) دیده می‌شود طول مسیر ذره‌ای که با زاویه θ از این حجم عبور می‌کند طبق رابطه (۲) بیشتر از طول مسیر ذره‌ای است که به طور عمود این ناحیه را طی می‌کند.

$$L = D / \cos \theta \quad (2)$$



شکل ۳- اثر زاویه بر طول مسیر مؤثر ذره فرودی

مدل‌های غیر RPP

در واقعیت، ناحیه حساس یک شکل مکعبی با ابعاد ثابت ندارد، از طرفی بهره جمع‌آوری بار در تمام این حجم یکسان نیست و مقدار آن به میدان الکتریکی و میزان ناخالصی توزیع شده در نیمه‌هادی بستگی دارد [۸ و ۷].

در مدل‌سازی‌های جدیدتر برای در نظر گرفتن این موضوع از هندسه‌های دیگری برای تعریف حجم حساس استفاده شده است. با در نظر گرفتن یک هرم به جای مکعب (در مدل هرمی^{۱۲})، سطح مقطع محاسبه شده برای SEU در LETهای پایین تا حد خیلی زیادی به مقادیر به دست آمده از آزمایش نزدیک می‌شود [۶]. قاعده این هرم برابر اندازه مساحت ترانزیستور حساس و ارتفاع آن معادل عمق بستر در سلول حافظه در نظر گرفته می‌شود. در این مدل ابعاد حجم حساس برای تمام ذرات یکسان و محدود به حجم ترانزیستور است و بهره جمع‌آوری بار در کل این حجم ثابت فرض می‌شود. در LETهای پایین پاسخ این مدل مناسب است ولی در LETهای

11. Upset

12. Tetrahedral

13. Nested volume

در نظر گرفته می‌شود. با توجه به مقادیر سطح مقطع به دست آمده از آزمایش، آغاز ایجاد خطای SEU مربوط به تحریک توسط یون نیتروژن است. طیف انرژی بر جای گذاشته شده در حجم حساس توسط یون نیتروژن با انرژی ۱۳۹ مگا الکترون ولت در شکل (۵) نشان داده شده است. متوسط انرژی بر جای گذاشته شده از یون نیتروژن در هنگام عبور از حجم حساس برابر ۴۴۰ کیلو الکترون ولت است. با در نظر گرفتن این مقدار انرژی به عنوان انرژی بحرانی، دیگر یون‌های موجود در جدول (۱) که همگی دارای LET بیشتری نسبت به یون نیتروژن هستند، می‌توانند این انرژی را در حجم حساس بر جای بگذارند. بنابراین همان‌طور که در شکل (۶) نشان داده شده است، پاسخ مدل RPP در محاسبه سطح مقطع آسیب SEU رفتار پله‌ای خواهد بود. از شکل مشخص است که سطح مقطع محاسبه شده در تمامی LETها تفاوت بسیار زیادی با سطح مقطع به دست آمده از آزمایش دارد. به دلیل اینکه بهره جمع‌آوری بار و توزیع میدان الکتریکی در تمام حجم حساس یکسان نیست، باید از هندسه‌های دیگری استفاده کرد.

هندسه‌ای که مورد استفاده قرار می‌گیرد، یک هرم با ارتفاع ۱ میکرومتر و مساحت مقطع 1×0.58 میکرومتر مربع است، سطح مقطع خطای به دست آمده از این هندسه در شکل (۷) ارائه شده است. پاسخ مدل هرمی نشان می‌دهد که در LETهای پایین این مدل از نتایج به دست آمده از آزمایش پیروی می‌کند، اما در LETهای بالا تفاوت زیاد شده به طوری که برای یون زینان مقدار سطح مقطع به دست آمده از آزمایش ۱۰ برابر بزرگ‌تر از مقدار محاسبه شده است. با اعمال تابع ویبال^{۱۴} روی سطح مقطع به دست آمده از آزمایش، مقدار حداکثر سطح مقطع ۱۵ میکرومتر مربع به دست می‌آید. با در نظر گرفتن این مقدار به عنوان مساحت حجم حساس و در نظر داشتن این واقعیت که بهره جمع‌آوری بار در این حجم تابعی نزولی از فاصله بین نقطه برخورد یون و مرکز ترانزیستور است، منحنی شکل (۸) به عنوان تابع پاسخ قطعه مدل سازی شده با استفاده از مدل نستد ولوم به دست می‌آید.

همان‌طور که در شکل (۸) دیده می‌شود، مقدار سطح مقطع محاسبه شده برای بیشتر یون‌ها از مدل نستد ولوم نزدیک به نتایج آزمایش است. بیشترین اختلاف دیده شده بین مدل نستد ولوم و آزمایش برای یون آهن است. این اختلاف حتی در مدل‌های پیشرفته‌تر که معماری داخلی قطعه را وارد شبیه‌سازی می‌کنند نیز وجود دارد و یک مشکل عمومی در محاسبات SEU به شمار می‌رود. برای مقایسه عددی، در جدول (۲) مقادیر محاسبه شده از مدل‌ها و مقادیر آزمایش آورده شده است. در سطر اول نام یون‌های استفاده

اندرکنش‌های مورد انتظار را فراهم می‌کنند که فیزیک لیست نامیده می‌شود. برای محاسبه مقدار انرژی بر جا گذاشته شده در این حجم حساس از فیزیک لیست استاندارد^{۱۴} استفاده شده است. در این فیزیک، لیست مقدار یونیزاسیون حاصل از یون‌های باردار، الکترون‌ها و غیره و همچنین اندرکنش گاما با ماده محاسبه می‌شود. ماده درون حجم حساس از جنس سیلیکون با چگالی 2.33 گرم بر سانتی‌متر مکعب است که سطح آن تحت تابش عمودی یون‌های آورده شده در جدول (۱) قرار می‌گیرد. فرایند شبیه‌سازی بر اساس محاسبه انرژی گذاشته شده از هر ذره فرودی به‌طور جداگانه است. شبیه‌سازی بر SRAM مدل AT60142 انجام می‌شود که از جمله قطعات حساس مورد استفاده در مدار یک کاوشگر فضایی است [۶]. در شکل (۴) هندسه مورد استفاده در شبیه‌سازی نشان داده شده است، ناحیه حساس برای مدل نستد سنسیتیو ولوم^{۱۵} مکعب بزرگ‌تر است که در مکان‌های مختلف دارای بهره جمع‌آوری بار متفاوت است، هندسه RPP به صورت خط چین و برای مدل هرمی به صورت مثالی با خط تو پر نشان داده شده است که مساحت مقطع بالایی آن معادل مساحت مقطع بالایی یکی از ترانزیستورهای تشکیل دهنده سلول حافظه AT60142 است.

محاسبات به ترتیب برای مدل RPP و سپس پاسخ هندسه هرمی با وجود اثر پهن‌شدگی انرژی مورد بررسی قرار می‌گیرد و در آخر پاسخ مدل نستد ولوم محاسبه می‌شود. پاسخ این مدل‌ها در سه شکل مجزا با مقدار حاصل از نتایج آزمایشگاهی اندازه‌گیری سطح مقطع SEU برای این SRAM مقایسه شده است.

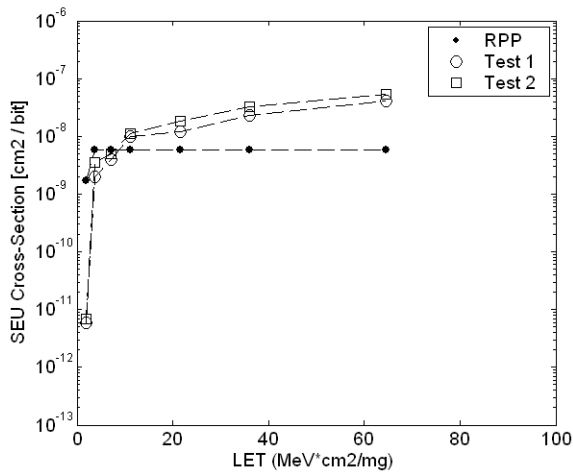
جدول ۱- مشخصات یون‌های استفاده شده در آزمایش [۶]

انتقال خطی انرژی (MeV . cm ² / mg)	انرژی یون (MeV)	نام یون
۱/۸۴۰	۱۳۹	¹⁵ ₇ N
۳/۷۲۰	۱۸۶	²⁰ ₁₀ Ne
۷/۰۴۴	۲۷۸	³⁰ ₁₄ Si
۱۱/۰۹	۳۷۲	⁴⁰ ₁₈ Ar
۲۱/۶۱	۵۲۳	⁵⁶ ₂₆ Fe
۳۵/۹۹	۷۶۸	⁸² ₃₆ Kr
۶۵/۵۰	۱۲۱۷	¹³¹ ₅₆ Xe

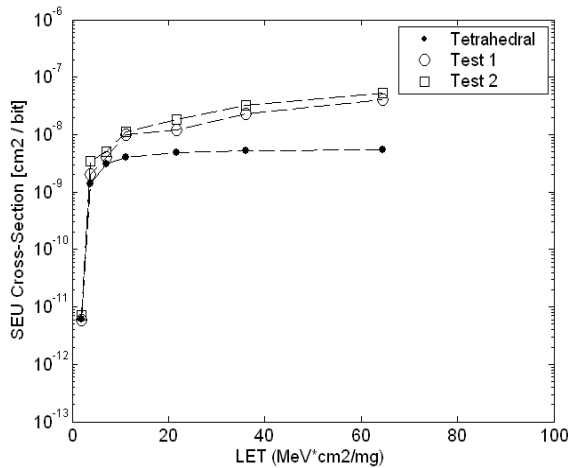
نتایج

برای محاسبه پاسخ مدل RPP، حجم حساس یک مکعب مستطیل با ابعاد مقطع 1×0.58 میکرومتر مربع و ضخامت ۱ میکرومتر

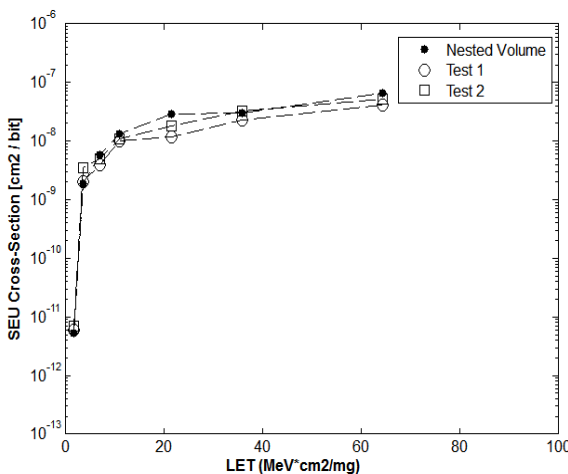
14. Standard EM Physics List
15. Nested sensitive volume



شکل ۶- سطح مقطع آسیب SEU به دست آمده بر حسب LET با استفاده از مدل RPP



شکل ۷- سطح مقطع آسیب SEU به دست آمده بر حسب LET با استفاده از مدل هرمی

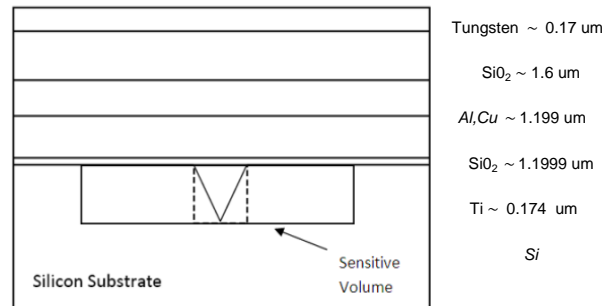


شکل ۸- سطح مقطع آسیب SEU به دست آمده بر حسب LET با استفاده از مدل نستد ولوم

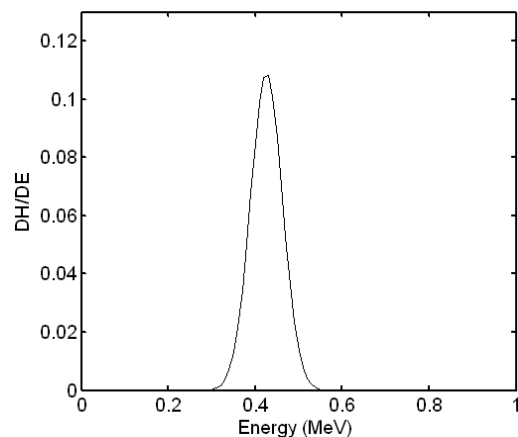
شده در آزمایش آورده شده، در سطریهای بعدی مقدار نتایج به دست آمده از آزمایش و مدل های محاسباتی نشان داده شده است. در دو سطر آخر مقدار خطای نسبی پاسخ مدل نسبت ولوم نسبت به مقادیر آزمایش ۱ و ۲ آورده شده است.

نتیجه گیری

پاسخ سه مدل محاسباتی مطرح شده برای مدل سازی ناحیه حساس در ایجاد خطای SEU نسبت به مقادیر آزمایش مقایسه شد. با توجه به نتایج به دست آمده، سطح مقطع خطای SEU برای یون های سنگین از ابعاد ترانزیستورهای تشکیل دهنده سلول حافظه بزرگ تر است. بنابراین مدل های با ابعاد ثابت و محدود به اندازه ترانزیستور درون سلول نمی توانند پاسخ مناسبی برای یون های سنگین ایجاد کنند. به عبارتی ناحیه حساس مورد نظر محدود به ابعاد ترانزیستور نیست. مدل RPP در تمامی LET ها پاسخ مناسبی ارائه نمی دهد، مدل هرمی فقط در LET های پایین که سطح مقطع خطای SEU کمتر از مقطع هندسی ترانزیستور است پاسخ قابل قبولی دارد و در نهایت مدل نستد ولوم نزدیک ترین پاسخ به نتایج تجربی است.



شکل ۴- هندسه استفاده شده برای شبیه سازی AT60142 در کد GEANT



شکل ۵- طیف انرژی بر جای گذاشته شده در حجم حساس توسط یون نیتروژن با انرژی ۱۳۹ مگا الکترون ولت

جدول ۲- مقادیر سطح مقطع‌های آسیب SEU محاسبه‌شده بر حسب [cm²/bit] با استفاده از مدل های RPP، هرمی و نستد ولوم و مقایسه آنها با داده‌های تجربی

نام یون	N	Ne	Si	Ar	Fe	Kr	Xe
داده‌های آزمایش ۱ [۶]	6×10^{-12}	2×10^{-9}	4×10^{-9}	1×10^{-8}	$1/2 \times 10^{-8}$	$2/3 \times 10^{-8}$	$4/1 \times 10^{-8}$
داده‌های آزمایش ۲ [۶]	7×10^{-12}	$3/5 \times 10^{-9}$	5×10^{-9}	$1/1 \times 10^{-8}$	$1/8 \times 10^{-8}$	$3/2 \times 10^{-8}$	$5/3 \times 10^{-8}$
مدل RPP	$1/5 \times 10^{-9}$	$0/58 \times 10^{-8}$	$0/58 \times 10^{-8}$	$0/58 \times 10^{-8}$	$0/58 \times 10^{-8}$	$0/58 \times 10^{-8}$	$0/58 \times 10^{-8}$
مدل هرمی	$6/037 \times 10^{-12}$	$1/3715 \times 10^{-9}$	$3/08 \times 10^{-9}$	$4/009 \times 10^{-9}$	$4/8229 \times 10^{-9}$	$5/2674 \times 10^{-9}$	$5/5035 \times 10^{-9}$
مدل نستد ولوم	$5/246 \times 10^{-12}$	$1/8993 \times 10^{-9}$	$5/866 \times 10^{-9}$	$1/316 \times 10^{-8}$	$2/945 \times 10^{-8}$	$2/963 \times 10^{-8}$	$6/663 \times 10^{-8}$
خطای نسبی مدل نستد ولوم به آزمایش ۱ (درصد)	۱۲/۵	۵	۴۶/۶	۳۱/۶	۱۴۵/۴	۲۸/۸	۶۲/۵
خطای نسبی مدل نستد ولوم به آزمایش ۲ (درصد)	۲۵	۴۵/۷	۱۷/۳	۱۹/۶	۶۳/۶	۷/۴	۲۵

- [7] Streetman, B. G., *Solid State Electronic Device*, 4th Edition, Prentice Hall, 1995, pp.51-90.
- [8] Jasprit, S., *An Introduction to Semiconductor Devices*, 2nd Edition, McGraw-Hill, 1994, pp.12-53.
- [9] Fageeha, O., Howard, J. and Block, FL., "Distribution of Radial Energy Deposition around the Track of Energetic Charged Particles in Silicon," *Journal of Applied Physics*, Vol. 75, No. 5, 1994, pp.2317-2321.
- [10] Zoutendyk, J. A., Crescenta, La, Malone, C. J., Method of Measuring Field Funneling and Range Straggling in Semiconductor Charge Collection Junctions, Washington Dc, (United States Patent), 1987.
- [11] Bertrand, J. and Renaud, N., Single Event Transients Characterisation of ATC18RHA ASIC Family, (Workshop) Aerospace Marketing Engineer – Processors & Radiation Aspects, 2007.
- [12] Barak, J. and Akkerman, A., "Straggling and Extreme Cases in the Energy Deposition by Ions in Sub-Micron Silicon Volumes", *IEEE Transactions on Nuclear Science*, Vol. 52, No. 6, 2005, pp. 2175-2181.
- [13] Ke-Ying, Zh., Hong-Xia, G., Yin-Hong, L., "First Principles Simulation Technique for Characterizing Single Event Effects", *Journal of Chinese Physics B*, Vol. 20, No.6, 2011, pp.46-57.
- [14] Geant4 Physics Reference Manual, Available, [on line]: <http://geant4.web.cern.ch/geant4/>, 2011, pp. 201-212.

مراجع

- [1] Jahinuzzaman, S. M., Modeling and Mitigation of Soft Errors in Nanoscale SRA Ms. (Ph. D. Thesis) University of Waterloo, Waterloo, Ontario, Canada, 2008, pp.28-89.
- [2] Peterson, E. L., "Geometrical Factors on SEE Rate Calculations," *IEEE Transactions on Nuclear Science*, Vol. 44, No. 6, 1993, pp.1888-1909.
- [3] Duzellier, S. and Inguibert, C., "SEU Rate Calculation with GEANT4 (Comparison with CREME 86)", *IEEE Transactions on Nuclear Science*, Vol. 51, No. 5, 2004, pp.2805-2810.
- [4] Connell, L.W., Sexton, F.W. and Prinja, A. K., "Further Development of the Heavy Ion Cross Section for Single Event Upset", *Sandia National Laboratories. Albuquerque*, New Mexico, 1997.
- [5] Dodd, P. E, Shaney felt, M. R and Sexton, F. W., *Charge Collection and SEU from Angled Ion Strikes*, Report of Sandia National Laboratories, Albuquerque, Mexico, 1997.
- [6] Keating, A. and Oliveira, B., Mars Radiation Environment and Effects on EEE Components, (Ph.D. Thesis), Lisbon, 2008, pp.142-202.