شبیه‌سازی اثرات تابش پروتون‌ها بر قطعات الکترونیکی با نرم‌افزار G4SEE

INC29-1089

فیصل اطمینان[۱و۲*]، نادیا زرقی[۳]

۱. گروه فیزیک، دانشکده‌ی علوم، دانشگاه بیرجند، صندوق پستی ۹۷۱۷۵/۶۱۵، بیرجند- ایران
۲. شرکت دانش‌بنیان آرکا صنعت کران، کد پستی ۷۱۸۷۶۱۱۶۷۷، شیراز- ایران
۳. گروه فیزیک، دانشکده علوم، دانشگاه فردوسی مشهد، کدپستی ۹۱۷۷۹۴۸۹۷۴، مشهد، ایران.

چکیده:

تابش‌های کیهانی، ذرات پرانرژی و یونیزه کننده مانند پروتون‌ها، یون‌های سنگین و الکترون‌ها، در محیط تابشی فضایی اثرات قابل‌مشاهده بسیاری را بر روی قطعات الکترونیکی القا می‌کنند. از تکنیک‌های حفاظ سازی می‌توان برای کاهش سطح دز مشاهده شده توسط دستگاه‌ها استفاده کرد، اما این حفاظ‌سازی قادر به مقابله با اثرات تک رویداد (SEE) ناشی از ذرات بسیار پرانرژی (تا چند صد مگا الکترون‌ولت به ازای هر نوکلئون در مورد یون‌های سنگین) نیست. تشعشعات کیهانی دشوارترین شبیه‌سازی روی زمین هستند، زیرا شارهای مربوط به این انرژی خارج از امکانات بشر برای انجام آزمایش مربوطه بر روی زمین هست. همچنین یون‌های سنگین با چنین انرژی‌های بالایی می‌توانند ذرات ثانویه را از طریق برهمکنش‌های هسته‌ای تولید کنند که می‌تواند باعث یونیزاسیون اضافی شود که منجر به اثرات نامطلوب می‌شود. در اینجا ابزار جدید شبیه‌سازی G4SEE معرفی شده و با استفاده از آن اثرات SEE مانند انرژی جذب‌شده و توزیع انرژی جنبشی در یکSRAM ناشی از پروتون‌های تک انرژی تا بیشینه‌ی 10MeV شبیه‌سازی و محاسبه شده است.

کلیدواژه‌ها: پروتون‌های پرانرژی، قطعات الکترونیکی، کد شبیه‌ساز G۴SEE.

Simulation of Protons Effects on Electronic Devices by G4SEE Tool Kit

Faisal Etminan[1,2*], Nadia Zarghi

1. Department of Physics, Faculty of Science, University of Birjand, P.O.BOX:97175/615, Birjand, Iran.
2. Arka Sanat Karan Knowledge-Based Company, P.O.BOX:7187611677, shiraz, Iran.
3. Department of Physics, Faculty of Sciences, Ferdowsi Mashhad University, P.O. 9177948974, Mashhad, Iran.

Abstract:

Cosmic rays, energetic and ionizing particles such as protons, heavy ions and electrons, induce many visible effects on electronic components in the space radiation environment. Shielding techniques can reduce the dose level observed by the devices, but it is unable to deal with single event effects (SEE) caused by energetic particles (up to several hundred mega electron volts per nucleon for heavy ions). Cosmic rays are the most difficult to simulate on earth, because the fluxes of this energy are beyond the capabilities of humans to perform the relevant experiments on Earth. In addition, heavy ions of such high energies can produce secondary particles through nuclear interactions which can induce additional ionization that leads to adverse effects. Here, new simulation tool kit G4SEE is introduced and SEE effects such as absorbed energy and kinetic energy distribution in a SRAM due to the monoenergetic protons by maximum energy 10 MeV have been simulated and measured.

Keywords: Energetic protons, Electronic Devices, G4SEE tool kit.

۱. مقدمه

قطعات الکترونیکی مدرن نسبت به محیط تابشی فضایی بسیار حساس هستند. وجود ذرات پرانرژی و یا یونیزه کننده (پروتون‌ها، یون‌های سنگین و الکترون‌ها) اثرات قابل‌مشاهده بسیاری را القا می‌کنند. این اثرات از کاهش عملکرد تا اختلالات عملکردی که می‌تواند بر هر عملیات سیستم تأثیر بگذارد، متغیر است. پس از این اثرات دستگاه‌های شامل قطعات الکترونیکی مثل ماهواره‌ها ممکن است عمر کوتاه یا خرابی‌های بزرگ را تجربه کنند.

از تکنیک‌های حفاظ‌سازی می‌توان برای کاهش سطح دز مشاهده شده توسط دستگاه‌ها استفاده کرد، اما این حفاظ‌سازی قادر به مقابله با اثرات تک رویداد (SEE) ناشی از ذرات بسیار پرانرژی (تا چند صد مگا الکترون‌ولت (MeV) به ازای هر نوکلئون در مورد یون‌های سنگین) نیست. استفاده روزافزون از دستگاه‌های تجاری یا مقاوم نشده[1] در پروژه‌های فضایی نیازمند آزمایش‌های دقیق و روش‌های تضمین سختی برای ارزیابی بهتر ریسک برای یک مأموریت است. همان‌طور که پیچیدگی دستگاه‌های مدرن افزایش می‌یابد، به نظر می‌رسد که پاسخ آن‌ها به تشعشع متنوع می‌شود و حالت‌های جدید خرابی به‌طور معمول مشاهده می‌شود. این ذرات در برهمکنش با دستگاه‌های نیمه‌هادی اثرات مختلفی ایجاد می‌کنند[۱]:

I. تجمع همگن جذب دز یونیزه کننده در مدت زمان طولانی در عایق‌ها منشأ اثر دز یونیزه کل (TID[2]) است. این عمدتاً به دلیل تعداد زیاد ذرات (الکترون، پروتون) است و منجر به تخریب پارامتری عملکرد الکتریکی دستگاه‌ها می‌شود.

II. انباشته شدن دز غیر یونیزه ناشی از پروتون‌ها یا الکترون‌های با انرژی بالا، باعث ایجاد نقص‌هایی در شبکه ساختاری مواد می‌شود که منجر به اثرات آسیب جابجایی (DD[3])می‌گردد. آن‌ها در برخی از کلاس‌های دستگاه‌ها (حسگرها، CCD، تقویت کننده‌ها ...) بسیار حیاتی هستند و باعث تخریب پارامترهای الکتریکی یا افزایش پارازیت پس‌زمینه‌ای می‌شوند.

III. جذب ناگهانی دز یونیزه کننده قوی از یک‌ذره، در یک منطقه حساس از دستگاه‌ها باعث ایجاد SEE می‌شود. این آشفتگی آنی ناشی از پروتون‌ها و یون‌های سنگین است و منجر به ناهنجاری‌های عملکردی در بیشتر انواع دستگاه‌ها می‌شود.

۲. سازوکار مقدماتی و اساسی SEE

ساز وکارهای فیزیکی منجر به SEE را می‌توان به عنوان جذب بار الکتریکی ناشی از یک برهمکنش یونی سنگین در یک حجم حساس (SV[4]) توصیف کرد که پیامد آن انباشت بار در گره خروجی مدار است. این حجم حساس یک اتصال بایاس- معکوس است که در آن میدان الکتریکی داخلی امکان جمع‌آوری بار را فراهم می‌کند. به‌منظور ساده‌سازی، حجم حساس با استفاده از حجم مستطیلی موازی (RPP[5]) مدل‌سازی شده است[۲]. یون‌های سنگین، انرژی را در ماده با یونیزاسیون (برای محدوده انرژی موردنظر) از دست می‌دهند. این برهمکنش را می‌توان در دو مرحله توصیف کرد. مرحله‌ی اول، تولید پرتوهای δ: ذره ورودی با الکترون‌های محیط از طریق پراکندگی کولمبی برهمکنش می‌کند و الکترون‌های ثانویه را تولید می‌کند. مرحله‌ی دوم، ایجاد جفت الکترون–حفره: پرتوهای δ (الکترون‌های ثانویه) با محیط برهمکنش می‌کنند و جفت‌های e–h را ایجاد می‌کنند. جذب بار با استفاده از انتقال انرژی خطی مدل‌سازی می‌شود که مقدار انرژی منتقل شده از طریق یونیزاسیون در واحد طول مسافت طی‌شده در هدف است و به‌طورمعمول با واحد جرم بیان می‌شود:

$$\mathrm{Let}(x) = \frac{1}{\rho}\frac{dE}{dx}(x), \left[\frac{\mathrm{MeV}}{\mathrm{mg.\,cm^2}}\right] \quad (۱)$$

[1] non-hardened
[2] Total Ionising Dose
[3] Displacement Damage
[4] Sensitive Volume
[5] Rectangular ParallelePided volume

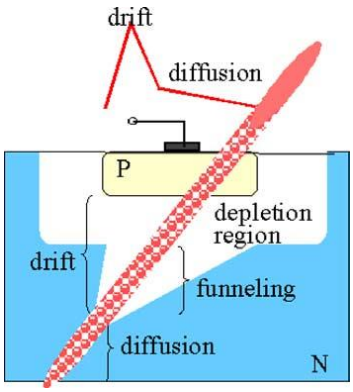
که ρ چگالی هدف (mg/cm^3)، E و x به ترتیب انرژی (MeV) و برد ذرات (cm) هستند. E_{dep} انرژی جذب‌شده[6] اولین کمیت موردتوجه برای SEE در دستگاه‌ها است. استفاده از پارامتر LET امکان محاسبات E_{dep} را در حجمی با ابعاد شناخته شده فراهم می‌کند. در شرایط تزریق سطح بالا، سه سازوکار اساسی در نیمه‌هادی انجام می‌شود (شکل ۱ را ببینید):

I. جفت‌های e-h ایجاد شده در ناحیه تخلیه (که دوباره ترکیب نمی‌شوند) به دلیل پتانسیل داخلی و یا میدان خارجی اعمال شده از هم جدا می‌شوند. بنابراین جریان‌های الکترون و حفره جداگانه در نیمه‌هادی مشاهده می‌شوند؛

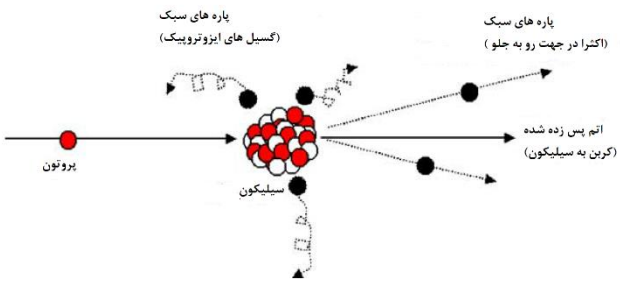
II. به دلیل چگالی بالای بارها در مسیر، افت ولتاژ، که در ابتدا بر روی منطقه تخلیه[7] قرار دارد، در امتداد مسیر به زیر لایه(بستر) به شکل یک قیف رخ می‌دهد. بنابراین، بارها را می‌توان در فواصل طولانی‌تر از طریق مکانیسم رانش[8] جمع‌آوری کرد؛

III. سپس بارهای اضافی با انتشار[9] به محل اتصال منتقل می‌شوند.

در مورد پروتون‌ها، SEE یک سازوکار غیرمستقیم است و اثر آن از طریق جذب بار ناشی از ذرات ثانویه دیده می‌شود (شکل ۲).



شکل۱. سازوکار انباشت بار الکتریکی در یک قطعه‌ی نیمه‌هادی(این شکل از مرجع [۱] اقتباس شده است).



شکل۲. برهمکنش ناکشسان یک پروتون با یک اتم سیلیکون (این شکل از مرجع [۱] اقتباس شده است).

[6] deposited energy
[7] depletion region
[8] drift mechanism
[9] diffusion

ابزارهای مونت‌کارلو (MC) به‌طور گسترده در حوزه اثرات تشعشع بر روی الکترونیک[۳] و به‌ویژه برای کاربردهای شتاب‌دهنده‌ها با انرژی بالا استفاده می‌شوند. در حیطه‌ی موضوع دومی، کدهای MC برای اثرات تشعشع به‌طور کلی در دو روش مکمل استفاده می‌شود: اول، برای شبیه‌سازی محیط تشعشع پیچیده تولید شده در اطراف شتاب‌دهنده[۴]؛ دوم، برای شبیه‌سازی برهمکنش بین چنین محیط‌های تشعشعی و اجزای میکروالکترونیکی مورد استفاده قرار می‌گیرد. در مورد SEEs، این نوع دوم شبیه‌سازی شامل رصد جذب انرژی به‌صورت رویداد به رویداد در حجم‌های میکرومتریک است که نشان دهنده‌ی حجم‌های حساس SEE (SVs) است. مزیت کلیدی چنین شبیه‌سازی‌هایی با توجه به داده‌های تجربی تکمیلی، این است که می‌توانند احتمال SEE را درنتیجه طیف بسیار وسیعی از ذرات و انرژی‌های موجود در محیط شتاب‌دهنده و به‌طور معمول به‌صورت تجربی در دسترس نیستند، ارائه دهند.

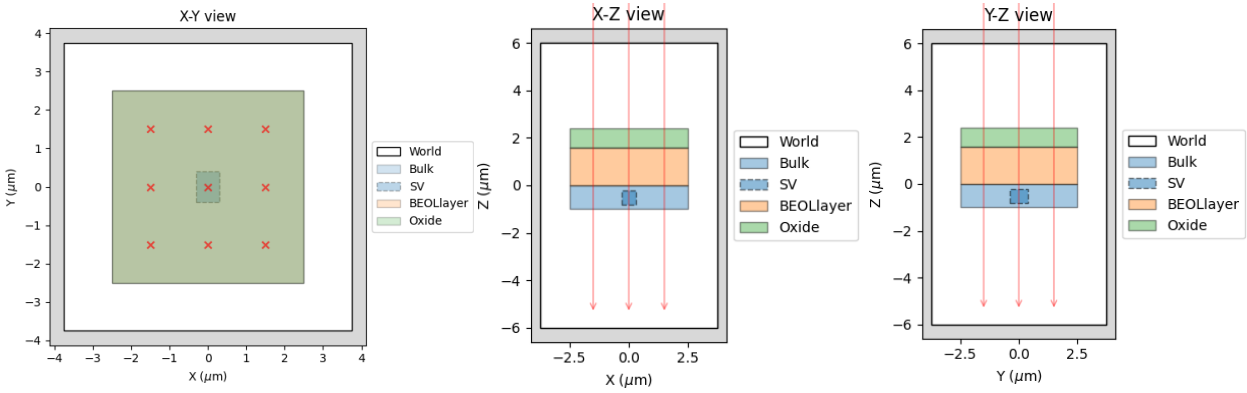
در زمینه پروژه‌ی تابش تا الکترونیک (R۲E) در سرن[۵]، شبیه‌سازی‌های SEE MC به‌طور گسترده به‌منظور مدل‌سازی مورد استفاده قرار می‌گیرند به عنوان مثال تأثیر مواد با Z بالا در وابستگی پاسخ SEE به انرژی[۶]، اثر برهمکنش‌های هسته‌ای از یون‌های سنگین[۷]، سهم سایر ذرات باردار در نرخ کلی[۸] SEU و همچنین سطح مقطع SEE پیون‌ها ($\pi^{\pm}$) و تأثیر آن بر محیط میدان‌های ترکیبی[۹] استفاده می‌شوند. ابزار MC اولیه که تاکنون برای چنین شبیه‌سازی‌هایی استفاده شده FLUKA بود که توسط CERN توسعه داده و منتشر شد[۱۰و۱۱]. تعدادی از ابزارهای شبیه‌سازیMC به‌طور خاص برای شبیه‌سازی‌های SEE توسعه یافته‌اند یا برای چنین شبیه‌سازی‌هایی در دهه‌های گذشته استفاده شده‌اند[۱۲]. به عنوان مثال، چارچوب‌های شبیه‌سازی، مانند[۱۴] TIARA ،[۱۳] MRED و MUSCA-SEP [۱۵] برای شبیه‌سازی‌های SEE توسعه داده شدند، اما، متأسفانه، هیچ یک از این ابزارها منبع باز و در دسترس برای کاربران عمومی نیستند. ابزارهای دیگر عبارتند از کدهای پیچیده و همه‌منظوره MC، مانند Geant4(G4) [۱۶]، FLUKA [۱۰] و MCNP(x) [۱۷] ، که همگی می‌توانند برای شبیه‌سازیSEE استفاده شوند، اما هیچ‌کدام از آن‌ها برای این هدف خاص بهینه نشده‌اند. جعبه‌ابزار G4SEE، روشی بهینه برای ثبت جذب انرژی به‌طور مستقیم و غیرمستقیم، رویداد به رویداد و ذره به ذره را در حجم‌های میکرومتری امکان‌پذیر می‌کند. G4SEE یک کد رایگان و به‌طورکامل متن باز است و از آدرس تارنمای [۱۸] قابل دسترسی است و به کل جامعه‌ی اثرات تشعشع اجازه می‌دهد هم به عنوان کاربر و هم به عنوان مشارکت‌کننده جعبه‌ابزار درگیر شوند. نسخه‌ی استفاده شده در اینجا بر اساس آخرین دو نسخه اصلی G4 است.

۳. مواد و روش‌ها

ما در اینجا محاسبات SEE را برای یک SRAM[۱۰] (شکل۳) ساخته شده از نیترید سیلسیوم (Si_3N_4) انجام داده‌ایم. هندسه‌ی این قطعه به همراه همه‌ی ابعاد در شکل۴ نمایش داده شده است. چشمه در اینجا یک صفحه‌ی مستطیلی شکل که پروتون‌های تک انرژی تا بیشینه‌ی ۱۰ MeV و تعداد اولیه‌ی ۱۰۰ میلیون ساطع می‌کند، اختیار شده است (این اعداد فقط به خاطر سادگی در محاسبات و محدودیت در منابع محاسباتی انتخاب شده است. در کارهای آینده چشمه‌های واقعی‌تر با طیف‌های انرژی گسترده‌تر و نزدیک به آنچه در طبیعت است، در نظر گرفته خواهد شد).

شکل۳. یک SRAM یا حافظه‌ی استاتیک.

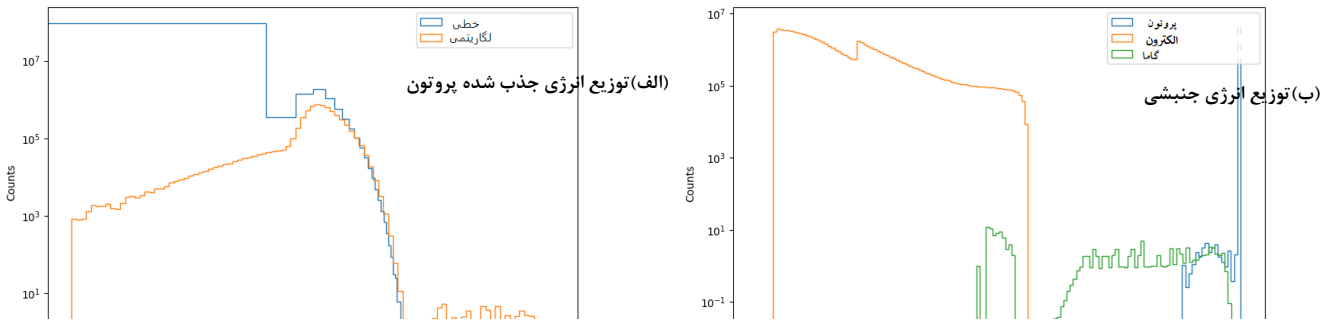
[10] Static random-access memory



شکل ٤. هندسه‌ی قطعه‌ی SRAM.

۴. نتایج و نتیجه‌گیری

تغییرات انرژی جذب‌شده E_{deb} و انرژی جنبشی E_k مربوط به این قطعه‌ی الکترونیکی درشکل۵ با اندازه بین[11] ۱۰۰، به ترتیب نشان داده شده است. در قسمت (الف) منحنی به رنگ‌های آبی و نارنجی تعداد پروتون‌ها برحسب انرژی جذب‌شده بین ۰ev تا ۱۰۰kev (به‌صورت خطی با شمارش بیشینه در انرژی 0.0 با مقدار 9.393×10^7 با انحراف معیار 5.252×10^4) و۱۰ evتا ۱ MeV (به‌صورت لگاریتمی با شمارش بیشینه در انرژی 3.162×10^{-3} با مقدار 7.571×10^5 با انحراف معیار 6.344×10^2)، به ترتیب نشان می‌دهند. در قسمت (ب) شکل۵، منحنی به رنگ آبی تعداد پروتون‌هایی با انرژی جنبشی در محدوده‌ی ۱kev تا ۱۰ MeV ، رنگ نارنجی تعداد الکترون‌ها با انرژی جنبشی در بازه‌ی ۱۰ev تا ۱۰۰kev و در نهایت رنگ سبز تعداد پرتوهای گاما با انرژی جنبشی بین ۱ kev تا ۱۰ MeV نشان می‌دهد. آنجایی که E_{dep} رابطه‌ی مستقیمی با احتمال رخ دادن SEE در قطعه دارد، در مثال شکل ۵ می‌توان گفت با توجه به هندسه و مواد به کار گرفته شده برای این قطعه احتمال رخ دادن SEE برای پروتون‌ها با انرژی کمتر از حدود 0.1 MeV بیشتر است بعد از آن احتمال رخ دادن SEE برای انرژی‌های بیشتر از این مقدار بسیار کمتر است. از قسمت (ب) شکل۵ دیده می‌شود که پروتون‌ها، الکترون‌ها و پرتوهای گاما چگونه بر اساس تعداد برحسب انرژی در ناحیه‌ی حساس قطعه‌ی الکترونیکی توزیع شده‌اند. بر اساس این توزیع حاصل از شبیه‌سازی باید قطعه را طوری طراحی کرد که



شکل۵. قسمت (الف) نشان‌دهنده‌ی انرژی جذب شده E_{dep} توسط پروتون‌ها و قسمت (ب) انرژی جنبشی مربوط به پروتون‌ها، الکترون‌ها و گاماها را به تصویر می‌کشد. در (ب) کمیت‌ها همه در مقیاس لگاریتمی هستند.

[11] Bin-size

حضور این ذرات در ناحیه‌ی حساس به کمترین مقدار ممکن برسد و یا به عبارتی دیگر این توزیع به دست آمده آسیب‌پذیری قطعه را به ما نشان می‌دهد.

با توجه به افزایش روزافزون استفاده از قطعات نیمه‌هادی بسیار فشرده و کوچک در مدارهای الکترونیکی ماهواره‌ها، سفینه‌ها و همچنین هزینه‌های بسیار زیاد پروژه‌های فضایی توسعه نرم‌افزارهای شبیه‌ساز جهت بررسی اثرات یون‌های سنگین در فضا بر روی این قطعات قبل از عملیات میدانی بسیار پراهمیت است. بسته‌ی نرم‌افزاری G4SEE که به‌تازگی (حدود سه ماه قبل از نوشتن این مقاله) به‌صورت رایگان و متن باز ارائه شده است، ابزاری مفید و توانمند برای انجام این‌گونه شبیه‌سازی‌ها است. G4SEE امکانات و پتانسیل‌های فراوانی دارد، ما در این کار اثرات پروتون‌های پرانرژی بر یک SRAM و آسیب‌پذیری آن تحت تابش، بررسی و شبیه‌سازی کردیم.

تشکر و قدردانی

از مدیران و پژوهشگران در شرکت دانش‌بنیان آرکا صنعت کران و کارکنان دفتر کارآفرینی و ارتباط با صنعت دانشگاه بیرجند کمال قدردانی و سپاس را دارم. تشکر ویژه از سرپرست تیم محافظت در برابر تابش سرن آقای دیوید لوکسانی[۱۲] که در ماه سپتامبر۲۰۲۲ نسخه‌ی رایگان کد G4SEE را در اختیار ما قرار دادند، را دارم.

مراجع

1. S. Duzellier,“Radiation effects on electronic devices in space.” *Aerosp. Sci. technol.* **9.1** (2005): 93-99.
2. E. Petersen, “Single event analysis and prediction”, *IEEE Nuclear and Space Radiation Effects Conference*, Short Course, Section III, 1997.
3. R. A. Weller et al., “General framework for single event effects rate prediction in microelectronics,” *IEEE Trans. Nucl. Sci.*, vol. **56**, no. 6, pp. 3098–3108, Dec. 2009.
4. K. Bilko et al., “Radiation environment in the LHC arc sections during run 2 and future HL-LHC operations,” *IEEE Trans. Nucl. Sci.*, vol. **67**, no. 7, pp. 1682–1690, Jul. 2020.
5. CERN Radiation to Electronics (R2E). Accessed: 2021. [Online]. Available: https://r2e.web.cern.ch
6. R.G.Alía et al. , “Energy dependence of tungsten-dominated SEL cross sections,” *IEEE Trans. Nucl. Sci.* , vol. **61**, no. 5, pp. 2718–2726, May 2014.
7. V. Wyrwoll et al., “Heavy ion nuclear reaction impact on SEE testing:From standard to ultra-high energies,” *IEEE Trans. Nucl. Sci.*, vol. **67**, no. 7, pp. 1590–1598, Jul. 2020.
8. R.G.Alia et al. , “Direct ionization impact on accelerator mixed-field soft-error rate,” IEEE *Trans. Nucl. Sci.*, vol. **67**, no. 1, pp. 345–352, Jan. 2020.
9. A. Coronetti et al., “The pion single-event effect resonance and its impact in an accelerator environment,” *IEEE Trans. Nucl. Sci.*, vol. **67**, no. 7, pp. 1606–1613, Jul. 2020.
10. G. Battistoni et al., “Overview of the FLUKA code,” *Ann. Nucl. Energy*, vol. **82**, pp. 10–18, Aug. 2015.
11. M. Cecchetto, et al., “Impact of thermal and intermediate energy neutrons on SRAM SEE rates in the LHC,” *IEEE Trans. Nucl. Sci.*, vol. **65**, no. 8, pp. 1800–1806, Aug. 2018.
12. R. A. Reed et al., “Anthology of the development of radiation transport tools as applied to single event effects,” *IEEE Trans. Nucl. Sci.*, vol. **60**, no. 3, pp. 1876–1911, Jun. 2013.
13. R. A. Reed et al., “Physical processes and applications of the Monte Carlo radiative energy deposition (MRED) code,” *IEEE Trans. Nucl. Sci.*, vol. **62**, no. 4, pp. 1441–1461, Aug. 2015.

[12] David Lucsanyi

14. P. Roche et al., “Application of the TIARA radiation transport tool to single event effects simulation,” *IEEE Trans. Nucl. Sci*., vol. **61**, no. 3, pp. 1498–1500, Jun. 2014.
15. G. Hubert etal., “Operational SER calculations on the SAC-C orbit using the multi-scales single event phenomena predictive platform (MUSCA SEP3),” IEEE Trans. Nucl. Sci., vol. 56, no. 6, pp. 3032–3042, Dec. 2009.
16. J. Allison et al., “Recent developments in Geant4,” Nucl. Instrum. *Methods Phys. Res. A, Accel. Spectrom. Detect. Assoc. Equip*., vol. **835**, pp. 186–225, Nov. 2016.
17. T. Goorley et al., “Initial MCNP6 release overview,” *Nucl. Technol.*, vol. **180**, no. 3, pp. 298–315, 2012.
18. https://cern.ch/G4SEE