تعیین محاسباتی به‌هم‌ریختگی‌های تک‌حادثه‌ای (SEU) ناشی از پروتون‌های موجود در مدار LEO برای یک حافظه SRAM با تکنولوژی نوین نانومتری CMOS

INC29-1226

معصومه سلیمانی‌نیا*

سازمان انرژی اتمی، پژوهشگاه علوم و فنون هسته‌ای، پژوهشکده کاربرد پرتوها، صندوق پستی: ۸۶۳-۱۴۳۹۵

چکیده:

در این پژوهش، بررسی سطح مقطع به‌هم‌ریختگی‌های تک‌حادثه‌ای (SEU) در یک حافظه SRAM با تکنولوژی ۶۵ نانومتری CMOS در برابر پروتون‌های موجود در مدار LEO (MeV 200-6/0) با استفاده از ابزار شبیه‌ساز GEANT4 انجام شد و یافته‌ها با یک کار تجربی مقایسه گردید. نتایج، حاکی از بیشترین احتمال وقوع SEU برای پروتون‌های کمتر از 1 MeV، در نتیجه‌ی مکانیزم یونش مستقیم است. با توجه به سهم بالای پروتون‌ها در مدار LEO و نقش انکارناپذیر آن‌ها در ایجاد SEU، برآوردی از احتمال آسیب‌پذیری قطعات الکترونیک با تکنولوژی‌های نانومتری کنونی پیش از به کارگیری آن‌ها در مأموریت‌های فضایی ضرورت دارد.

کلیدواژه‌ها: به‌هم‌ریختگی تک‌حادثه‌ای (SEU)، پروتون‌های مدار LEO، حافظه SRAM با تکنولوژی نانومتری CMOS، GEANT4

A computational determination of proton- induced Single Event Upset (SEU) in LEO orbit for a new nanometric CMOS SRAM

Masume Soleimaninia*

Radiation Applications Research School, Nuclear Science and Technology Research Institute, P.O. Box: 14395-836

Abstract:

In this research, the proton-induced Single Event Upset (SEU) cross-section of a 65 nm CMOS SRAM has been investigated in LEO orbit (0.6- 200 MeV) using GEANT4 simulation toolkit. Then, the results were compared with an experimental work. The findings indicate the highest probability of SEU occurrence for proton energies less than 1 MeV due to the direct ionization mechanism. Considering the importance of protons in LEO orbit and their undeniable role in inducing SEU, an estimate of the vulnerability of new nanometric technologies is necessary before being used in space missions.

Keywords: Single Event Upset (SEU), protons in LEO orbit, nanometric CMOS SRAM, GEANT4

مقدمه:

در قرن حاضر، اکتشافات فضایی پتانسیل تغییرات شگرفی در زندگی بشر دارند. یافتن منابع جدید انرژی، پیش‌بینی آب و هوا، چگونگی تغییرات در محیط زیست و شناسایی عوامل تهدیدکننده حیات انسان در سطح زمین، تنها بخشی از اطلاعات ارسالی ماهواره‌ها است که می‌تواند به کمک تحقیقات فضایی در اختیار او قرار گیرد. از نقطه‌نظر پرتو، فضا یکی از مهم‌ترین محیط‌ها است که طیف وسیعی از ذرات با انرژی‌های مختلف را شامل می‌شود. بدین جهت، عملکرد صحیح قطعات الکترونیک به کار گرفته شده در سامانه‌های فضایی بسیار حائز اهمیت است. بر اساس مطالعات بدینگ‌فیلد[۱] و همکاران در سال ۱۹۹۶، ۴۵٪ اختلالات ایجاد شده در فضاپیماها ناشی از آسیب‌های ذرات موجود در فضا است [۱]. ذرات موجود در فضا به سه دسته تقسیم می‌شوند [۲]. دسته نخست، ذرات نشأت گرفته از خورشید هستند که شامل پروتون‌ها، الکترون‌ها و یون‌های سنگین می‌باشند. دومین دسته، پرتوهای کیهانی[۲] هستند که منشأ آن‌ها خارج از منظومه شمسی بوده و پروتون‌ها و یون‌های سنگین را شامل می‌شوند. دسته سوم نیز ذراتی هستند که توسط میدان مغناطیسی زمین در کمربند وان‌آلن[۳] گیراندازی شده و الکترون‌ها و پروتون‌ها را شامل می‌شوند. بیشتر ماهواره‌ها در مدار LEO[۴] که در ارتفاع ۱۶۰ تا ۲۰۰۰ کیلومتری سطح زمین است، مستقر می‌شوند. ماهواره‌های قرار گرفته در این مدار چندین بار در روز از میان ذراتی که در کمربند وان‌آلن به دام افتاده‌اند، عبور می‌کنند. از این رو، بررسی آسیب پرتویی در قطعات الکترونیک به کار گرفته شده در آنها از اهمیت بالایی برخوردار است.

سازوکارهای آسیب پرتویی قطعات الکترونیک را می‌توان در سه دسته کلی آسیب جابه‌جایی[۵]، دز یونیزان کل[۶] و اثرات تک‌حادثه‌ای[۷] مورد بررسی قرار داد. از دو دسته نخست، تحت عنوان اثرات انباشته[۸] نیز یاد می‌شود. اثرات انباشته به آسیب یا دز جذبی ناشی از تعداد زیادی ذرات اطلاق می‌شود، در حالی‌که اثرات تک‌حادثه‌ای به تأثیر تنها یک ذره بر عملکرد قطعه اشاره دارد [۳]. اثرات انباشته به تدریج پارامترهای عملیاتی قطعات نظیر ولتاژ آستانه و جریان نشتی را تغییر می‌دهند، حال آنکه رخدادهای تک‌حادثه‌ای موجب بروز تغییرات ناگهانی و یا رفتارهای گذرا در مدار می‌شوند [۳]. امروزه، تکنولوژی CMOS[۹] در صنعت هوافضا به وفور مورد استفاده قرار می‌گیرد. از مهمترین ویژگی‌های این تکنولوژی می‌توان به نویزپذیری اندک و کاهش ابعاد[۱۰] آن اشاره نمود. کاهش ابعاد در تکنولوژی‌های نوین سبب شده تراشه‌ها سرعت پردازش بالاتر و توان مصرفی پایین‌تری داشته باشند [۴]. علی‌رغم این مزایا، کاهش ابعاد در تکنولوژی‌های نانومتری کنونی منجر به افزایش حساسیت آن‌ها در برابر پرتو شده است [۴]. مطالعات سال‌های اخیر نشان داده‌اند، رخدادهای تک‌حادثه‌ای مهمترین دلیل از کار افتادن قطعات الکترونیک با تکنولوژی‌های نوین در دنیای امروز محسوب می‌شوند که به چند دسته تقسیم می‌شوند [۴]. متداول‌ترین آن‌ها، به‌هم‌ریختگی‌های تک‌حادثه‌ای[۱۱] (SEU) هستند که در قطعات دیجیتال نظیر حافظه‌ها روی می‌دهند. این رویداد زمانی به وقوع می‌پیوندد که بار برجا گذاشته درون قطعه

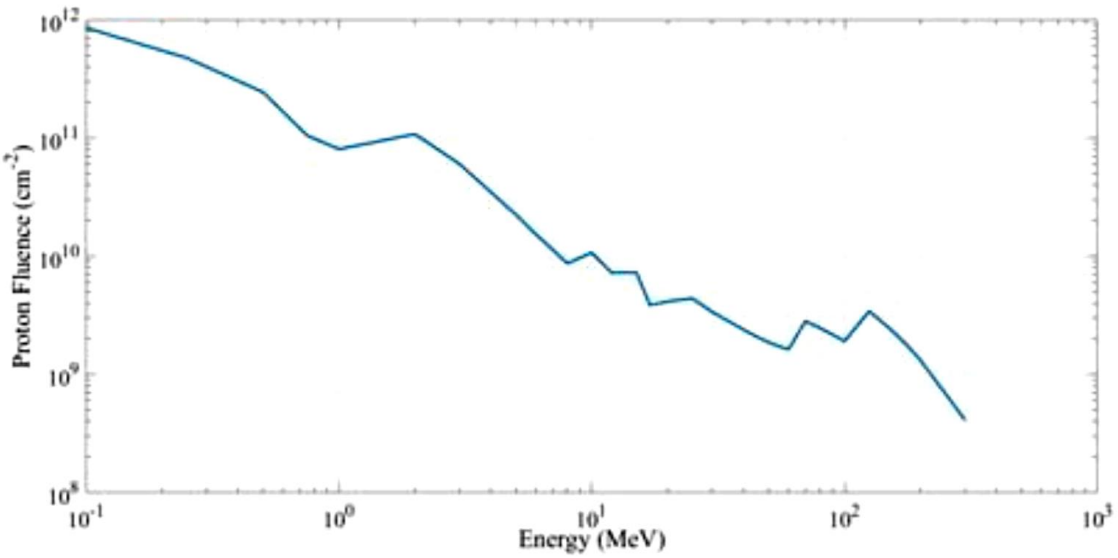
---

[۱] Bedingfield
[۲] Galactic Cosmic Ray (GCR)
[۳] Van Allen
[۴] Low Earth Orbit
[۵] Displacement Damage
[۶] Total Ionizing Dose
[۷] Single Event Effects
[۸] Cumulative Effects
[۹] Complementary-Metal-Oxide-Semiconductor
[۱۰] Scaling
[۱۱] Single Event Upset

در نتیجه برخورد ذره فرودی به اندازه‌ای باشد که بتواند حالت منطقی یک بیت را تغییر دهد. اهمیت این رویدادها تا آن جاست که نقشه راهبردی انجمن صنعت نیمه‌هادی[۱]، آن‌ها را به عنوان مهمترین تهدید برای عملکرد مطمئن سیستم‌های الکترونیک در تکنولوژی‌های جدید برشمرده است [۵]. دو کمیت کلیدی برای محاسبه احتمال وقوع این دسته از اثرات، حجم حساس و بار بحرانی است. حجم حساس قطعه، حجمی است که کلیه بارهای برجا گذاشته شده توسط ذرات اولیه و ثانویه مؤثر بر رویداد را شامل می‌شود. بار بحرانی نیز کمترین مقدار بار ایجاد شده درون حجم حساس برای وقوع یک رویداد است [۶]. از آنجا که پروتون‌ها بیشترین سهم از ذرات موجود در فضا را دارند، بخش قابل ملاحظه‌ای از تحقیقات SEU به خصوص در کاربردهای فضایی به آنها اختصاص داده شده است [۷، ۸].

یکی از پرکاربردترین و در عین حال آسیب‌پذیرترین قطعات در برابر پرتو، حافظه‌ها هستند که بر مبنای چگونگی ذخیره‌سازی و دسترسی به اطلاعات، انواع مختلفی دارند. متداول‌ترین آنها حافظه‌های دسترسی تصادفی ایستا (SRAM[۲]) است که از آن به دلیل سرعت بالا در انواع مختلف پردازنده‌ها استفاده می‌شود و عملکرد صحیح آن‌ها در مدارهای الکترونیک حائز اهمیت است. حافظه‌های پرکاربرد SRAM مساحت زیادی از سطح تراشه را در پردازنده‌های کنونی اشغال کرده و بار بحرانی آن‌ها در تکنولوژی‌های کنونی نسبتاً اندک است [۹]. از این رو، گزینه مناسبی جهت تحقیق پیرامون SEU محسوب می‌شوند.

با توجه به بررسی‌های انجام شده، در کشور ما ماهواره‌ها به مدار LEO پرتاب می‌شوند. محققان در سال ۲۰۱۳ دریافتند که پروتون‌های موجود در این مدار منجر به وقوع مقادیر قابل ملاحظه‌ای از به‌هم‌ریختگی‌ها در قطعات حساس الکترونیک شده‌اند [۱۰]. به جهت اهمیت موضوع، در این پژوهش به‌هم‌ریختگی‌های ایجاد شده توسط پروتون‌های موجود در مدار LEO برای یک حافظه با تکنولوژی نانومتری نوین (SRAM با تکنولوژی ۶۵ نانومتری CMOS) تحقیق شده است تا تخمینی از حساسیت تکنولوژی‌های جدید در میدان پرتویی پروتون به دست آورده شود. بدین منظور در ابتدا باید طیف انرژی پروتون‌های موجود در مدار LEO دانسته شود. شکل ۱، شارش و انرژی پروتون‌های موجود در مدار LEO را که شامل پروتون‌های به دام‌افتاده، پروتون‌های GCR و پروتون‌های خورشیدی می‌باشد، با استفاده از نرم افزار OMERE نشان می‌دهد [۱۱].



شکل ۱- توزیع انرژی و شارش پروتون‌های موجود در مدار LEO [۱۱].

[۱] Semiconductor Industry Association (SIA)

[۲] Static-Random-Access-Memory

روش کار:

به منظور تعیین به‌هم‌ریختگی‌های ایجاد شده در حافظه SRAM، ابتدا یکی از سلول‌های آن مطابق با مرجع [۱۲] با استفاده از ابزار شبیه‌ساز GEANT4 شبیه‌سازی شد. مدل شبیه‌سازی شده از بخش‌های زیرلایه سیلیکونی به ابعاد 10 µm*4.1 µm*10 µm و حجم حساس به ابعاد 2.2 µm*2.2 µm*1 µm و لایه‌های BEOL[۱] که برقراری اتصالات درونی مدار را بر عهده دارند، تشکیل و بار بحرانی برابر با ۱/۳۵ fC در نظر گرفته شد [۱۲]. چنانچه اشاره شد، به‌هم‌ریختگی زمانی اتفاق می‌افتد که بار ایجاد شده درون حجم حساس بیش از بار بحرانی باشد. شبیه‌سازی ساختار رد پروتون‌های فرودی و ذرات ثانویه ایجاد شده با استفاده از مدل‌های فیزیکی G4Em Standard Physics_Option4 و QGSP_BERT_HP انجام شد. محدوده انرژی پروتون‌های فرودی مورد مطالعه در این پژوهش از ۶۰۰ keV تا ۲۰۰ MeV در نظر گرفته شد. حد پایین انرژی با توجه به لایه‌های BEOL به گونه‌ای انتخاب شد که پروتون‌ها بتوانند پس از عبور از آن‌ها و رسیدن به حجم حساس در ایجاد به‌هم‌ریختگی مشارکت کنند. برای تعیین سطح مقطع SEU، از رابطه (۱) استفاده شده است.

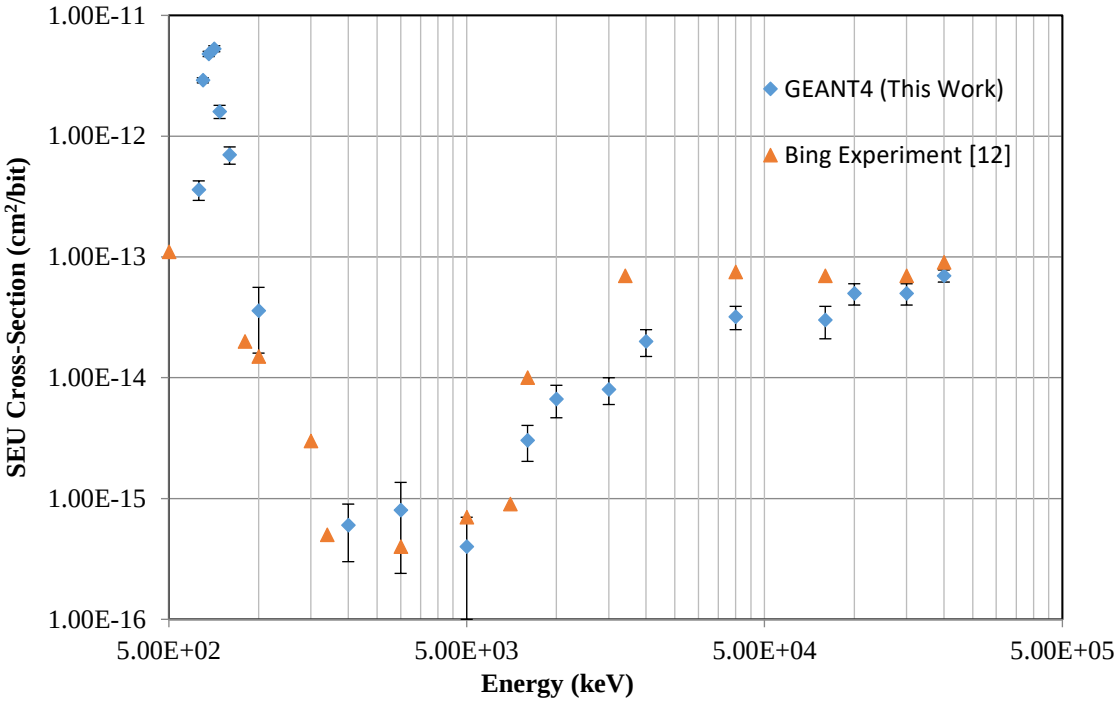
$$\sigma = \frac{N}{\emptyset} \qquad (۱)$$

در این رابطه، σ سطح مقطع به‌هم‌ریختگی، N تعداد به‌هم‌ریختگی‌های ایجاد شده و Ø شارش ذرات گسیل شده از چشمه است. شارش پروتون‌های فرودی به منظور برآورد قابل قبولی از میزان به‌هم‌ریختگی‌ها به ازای انرژی‌های مختلف پروتون بیش از $۱۰^{۷}\ cm^{-2}$ در نظر گرفته شد.

نتایج:

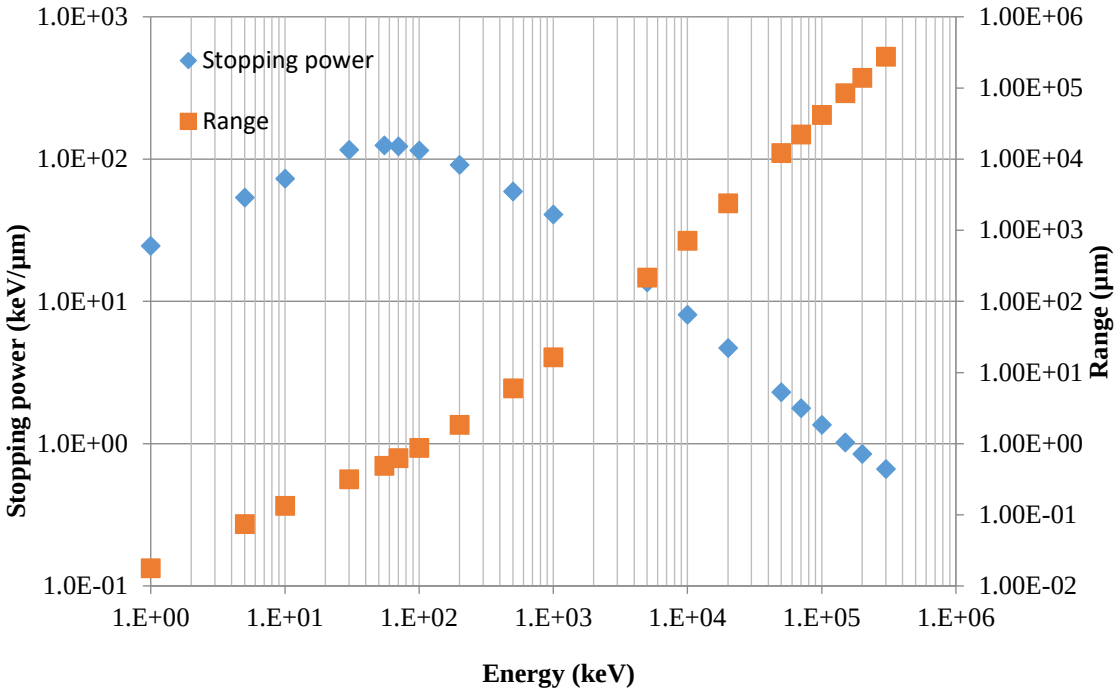
نتایج به دست آمده از محاسبات به‌هم‌ریختگی در این پژوهش، در شکل ۲ نشان داده شده است. برای صحت‌سنجی، از داده‌های تجربی گزارش شده در پژوهش بینگ[۲] و همکارانش با استفاده از شتاب‌دهنده تاندم EN-18 در دانشگاه پکن و مؤسسه پژوهشی PSI-PIF استفاده شد[۱۲]. چنانچه از نمودارهای شکل ۲ برمی‌آید، تطابق قابل قبولی میان نتایج وجود دارد. در شکل ۲، برای پروتون‌های فرودی با انرژی کمتر از حدوداً ۱ MeV، خطا کمتر از ۵٪ است. در انرژی‌های بالاتر پروتون، میزان به‌هم‌ریختگی‌ها به نحو قابل ملاحظه‌ای کاهش و در نتیجه خطای آماری افزایش یافته است.

[۱] Back-End-Of-Line
[۲] Bing



شکل ۲- مقایسه‌ای از سطح مقطع به‌هم‌ریختگی تک‌حادثه‌ای محاسبه شده برای پروتون‌ها با ابزار شبیه‌ساز GEANT4 در این پژوهش و کار تجربی انجام شده در پژوهش بینگ و همکاران [۱۲].

با توجه به منحنی‌های شکل ۲، مقدار بیشینه‌ای در سطح مقطع SEU وجود دارد که مربوط به انرژی‌های کمتر از MeV ۱ است. با افزایش انرژی پروتون‌ها، سطح مقطع به نحو قابل ملاحظه‌ای کاهش یافته است. بر اساس محاسبات انجام شده با کد SRIM [۱۳] که در شکل ۳ نشان داده شده است، بیشترین میزان توان ایستانندگی پروتون‌ها درون سیلیکون برابر با ۱۲۵ keV/μm در انرژی ۵۵ keV است. از این رو، منطقی به نظر می‌رسد پروتون‌هایی که پس از عبور از لایه‌های BEOL با انرژی حدود ۵۵ keV خود را به حجم حساس رسانیده باشند، نقش بالایی در افزایش سطح مقطع ایفا کنند. بررسی‌های بیشتر نشان می‌دهند برای پروتون‌های کمتر از MeV ۱، یونش مستقیم پروتون‌ها درون حجم حساس و برای پروتون با انرژی‌های بالاتر، یون‌های پس‌زده سیلیکون و ذرات ثانویه ایجاد شده ناشی از پراکندگی‌های کشسان و ناکشسان اندرکنش‌های پروتون با مواد سازنده لایه‌های BEOL حافظه SRAM مکانیزم‌های غالب ایجاد به‌هم‌ریختگی هستند [۱۴].



شکل ۳- نمودار برد و توان ایستانندگی پروتون به ازای انرژی‌های مختلف درون سیلیکون محاسبه شده با کد SRIM [۱۳].

از شکل ۱ پیداست که بخش قابل توجهی از پروتون‌های موجود در مدار LEO پروتون‌های کم‌انرژی هستند. با توجه به نتایج این پژوهش، بیشترین احتمال وقوع به‌هم‌ریختگی مربوط به این دسته از پروتون‌هاست. وقتی از حفاظ‌های بهینه برای فضاپیماها به منظور کاهش اثرات انباشته در فضا استفاده می‌شود، شارش و انرژی پروتون‌ها با توجه به اندرکنش آن‌ها با مواد حفاظ و نیز اجزای سازنده قطعه الکترونیک کاهش می‌یابد. اینکه کاهش انرژی پروتون‌های رسیده به حجم حساس قطعه مورد بررسی، چگونه بر احتمال وقوع به‌هم‌ریختگی تأثیر می‌گذارد، مسئله‌ای است که باید با توجه به ویژگی‌های قطعه الکترونیک و نیز ضخامت و جنس حفاظ طراحی شده، مورد ارزیابی قرار گیرد. لذا، تعیین سطح مقطع SEU در این شرایط ضرورت دارد.

بحث و نتیجه‌گیری:

در این پژوهش، سطح مقطع به‌هم‌ریختگی‌های تک‌حادثه‌ای (SEU) به منظور بررسی حساسیت یک حافظه SRAM با تکنولوژی ۶۵ نانومتری CMOS، نسبت به پروتون‌های موجود در مدار LEO (۰/۶ -۲۰۰ MeV) تعیین شد. محاسبات، با استفاده از ابزار شبیه‌ساز GEANT4 انجام شدند و یافته‌ها با یک کار تجربی مقایسه گردید. نتایج، تطابق قابل قبولی را نشان دادند که حاکی از بیشترین احتمال وقوع به‌هم‌ریختگی‌ها به ازای پروتون‌های کمتر از ۱ MeV است. با افزایش انرژی پروتون، به‌هم‌ریختگی‌ها به نحو قابل ملاحظه‌ای کاهش می‌یابد. نتایج بررسی‌ها پیرامون سازوکار ایجاد به‌هم‌ریختگی‌ها نشان دادند که در انرژی‌های کمتر از ۱ MeV، یونش مستقیم پروتون‌ها و در انرژی‌های بالاتر اندرکنش‌های کشسان و ناکشسان پروتون با مواد سازنده قطعه الکترونیک، مکانیزم غالب به‌هم‌ریختگی می‌باشند. با توجه به طیف انرژی وسیع پروتون‌ها در مدار LEO، در مأموریت‌های فضایی که از حفاظ برای فضاپیماها به منظور کاهش آسیب‌های ناشی از اثرات انباشته در قطعات الکترونیک استفاده می‌شود، باید تأثیر آن در افزایش یا کاهش میزان به‌هم‌ریختگی نیز مورد ارزیابی قرار گیرد.

مراجع:

[1] K. L. Beding_eld; R. D. Leach; M. B. Alexander; Spacecraft system failures and anomalies attributed to the natural space environment. NASA reference publication 1390, August 1996. [2] J.H. Adams et al., “Cosmic ray effects on microelectronics, Part 1: The near-earth particle environment”, August 1981.
[3] Petersen, Edward. Single event effects in aerospace. John Wiley & Sons (2011).
[4] N.A. Dodds, J.R. Schwank, M.R. Shaneyfelt, P.E. Dodd, B.L. Doyle, M. Trinczek, W. Ewart, Hardness assurance for proton direct ionization-induced SEEs using a high-energy proton beam, IEEE Transactions on Nuclear Science 61, no. 6 (2014): 2904-2914.
[5] Semiconductor Industry Association (SIA), “International roadmap for semiconductors 2012 update,” [Online] http://www.itrs.net, 2012.
[6] F. Schrimp et al., Physical mechanisms of single-event effects in advanced microelectronics, Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. B, 1-2 (2007) 1133-1136.
[7] A. Owens et al., An assessment of radiation damage in space-based germanium detectors due to solar proton events, Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. A, 2-3 (2007) 285-301.
[8] B. Doucin et al., Model of single event upsets induced by space protons in electronic *devices*, In Proceedings of the Third European Conference on Radiation and its Effects on Components and Systems, pp. 402-408. *IEEE*, (1995).
[9] R. Naseer et al., Critical charge characterization for soft error rate modeling in 90nm SRAM, In 2007, IEEE International Symposium on Circuits and Systems, pp. 1879-1882.
[10] T.P. O’Brien and J.E. Mazur, “The Space Radiation and Plasma Environment”, in RADECS 2013 Short Course, 2013.
[۱۱] سارا شوریان، حمید جعفری، سید امیرحسین فقهی "بررسی و محاسبه جریان نشتی دیود سیلیکونی در معرض تابش پروتونهای فضایی با استفاده از تغییرات طول عمر حامل ها "، بیست و پنجمین کنفرانس هسته‌ای ایران.

[12] Y. Bing et al., Impact of energy straggle on proton-induced single event upset test in a 65-nm SRAM cell, Chin. Phys. B, 26(8), (2017) p.088501.
[13] J.F. Ziegler et al., SRIM - The stopping and range of ions in matter, Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. B 268 (11) (2010) 1818.
[14] Soleimaninia, M., G. Raisali, and A. Moslehi. "A detailed simulation study on the effect of energy and angle of incidence for low energy protons on Single Event Upsets induced in nanometer CMOS SRAM." Journal of Instrumentation 16, no. 03 (2021): P03015.