



## بررسی و محاسبه جریان نشتی دیود سیلیکونی در معرض تابش پروتون‌های فضایی با استفاده از تغییرات طول عمر حامل‌ها

سارا شوریان<sup>۱</sup>، حمید جعفری<sup>۱</sup>، سید امیرحسین فغهی<sup>۱</sup>

<sup>۱</sup> گروه کاربرد پرتوها، دانشکده مهندسی هسته‌ای، دانشگاه شهید بهشتی، تهران

### چکیده:

در این کار تغییرات جریات نشتی در یک دیود سیلیکونی، به عنوان آرایه اصلی بسیاری از قطعات الکترونیکی، در معرض تابش پروتون‌های فضایی مورد بررسی قرار گرفته است. به این منظور از کد مونت کارلوی GEANT4 برای محاسبه اتلاف انرژی غیر یونیزان در قطعه استفاده شده است. شبیه‌سازی پارامترهای الکتریکی این قطعه و تغییرات آن‌ها در شارهای مختلف پرتوهای پروتونی نیز توسط نرم‌افزار SILVACO انجام شده است. نتایج نشان می‌دهد که جریان نشتی با افزایش شارش پروتون‌های فرودی تا  $2.1 \times 10^{12} \text{ p/cm}^2$  در حدود  $1/85$  برابر مقدار آن قبل از تابش افزایش پیدا کرده و به حدود  $96.2 \text{ nA}/\mu\text{m}$  می‌رسد.

**کلمات کلیدی:** جریان نشتی، دیود سیلیکونی، SILVACO، تابش پروتونی، GEANT4

## Investigating and calculating the leakage current of silicon diode exposed to sputtering of protons using carrier lifetime changes

Shoorian, Sarah; Jafari, Hamid; Fegghi, S.A.H

Shahid Beheshti University: Nuclear Engineering, Faculty & Department

### Abstract:

In this work, the leakage current variation of a silicon diode, as the basic element of many electronic components, has been investigated in the exposure of space protons. For this purpose, the GEANT4 Monte Carlo code has been used to calculate the non-ionizing energy loss in the device. The simulation of electrical parameters for irradiation of different proton fluxes has been also done by SILVACO software. The results show that the leakage current increases up to about  $96.2 \text{ nA}/\mu\text{m}$  by the increase in the proton flux up to  $2.1 \times 10^{12} \text{ p/cm}^2$ , which is about 1.85 times in comparison to its amount before irradiation,

**Keywords:** Leakage current, Silicon diode, SILVACO, Proton radiation, GEANT4

### ۱. مقدمه:

دیودها ساده‌ترین ساختار نیمه‌هادی‌ها هستند که بدلیل عملکردشان در هدایت جریان الکتریکی، کاربردهای فراوانی دارند. از جمله کاربردهای معمول آن‌ها در ماهواره‌ها و فضاپیماها می‌توان به موارد زیر اشاره نمود:



- اصلاح ولتاژ، مانند تبدیل ولتاژ ac به ولتاژ DC
- منبع ولتاژ ثابت در مدارهای کوتاه
- اندازه‌گیری دما
- حفاظت در برابر ولتاژ

وجود سطوح بالای پرتوهای یونیزان برخورد کننده به کریستال سیلیکونی این ساختارها در فضا، باعث بروز نقص‌هایی در آنها می‌شود. این اندرکنش‌ها به نوع ذره و انرژی آن بستگی دارند. در انرژی‌های پایین‌تر قسمت بزرگ‌تری از انرژی ذره صرف یونیزاسیون اتم‌های سیلیکون در شبکه می‌شود. این یونیزاسیون بطور کامل برگشت‌پذیر است. اتلاف انرژی غیر یونیزان (NIEL) ممکن است باعث جابجایی اتم‌های سیلیکون از جای خود در شبکه و تولید یک اتم بین‌نشین و یک تهی‌جا (جفت فرنگل) شود. به اتمی که به دلیل تابش از جای خود در شبکه جابجا شده است، PKA گفته می‌شود. اگر انرژی PKA به اندازه کافی بزرگ باشد، باعث جابجایی اتم‌های سیلیکون دیگری از جایگاه خود در شبکه می‌شود و آبشاری از نقص‌ها تولید می‌کند. این نقص‌ها سبب تولید سطوح جدید انرژی در باند ممنوعه می‌شوند [۱]. از مهم‌ترین اثرات مراکز نقص ناشی از تابش بر خواص الکتریکی دیود سیلیکونی تولید حرارتی جفت‌های الکترون-حفره در سطح نزدیک باند میانی، افزایش جریان نشتی، تغییر ولتاژ تخلیه و کاهش عمر حامل‌های بار می‌باشد [۲].

علی‌رغم دقت بیشتر روش تجربی، از آنجا که آزمایش عملی هزینه زیادی داشته و زمانی طولانی برای اجرا نیاز دارند، با استفاده از شبیه‌سازی می‌توان در زمان و هزینه صرفه‌جویی نمود. همچنین از آنجا که مشاهدات تجربی شکل‌گیری نقص‌های نقطه‌ای ناشی از برخوردها بخاطر زمان بسیار کوتاه و مقیاس فضایی بسیار کوچک (ps, nm) تقریباً غیرممکن است، مدل‌سازی شکل‌گیری نقص و شبیه‌سازی قطعه برای درک مکانیزم‌های پیچیده شکل‌گیری نقص و عملکرد ساختارهای تابش دیده ضروری است [۳].

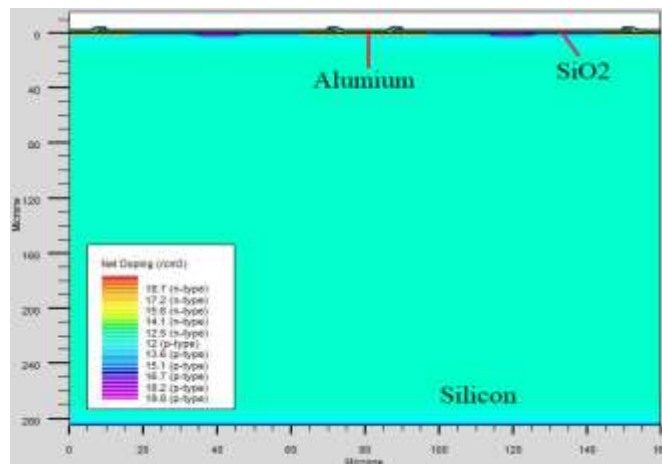
در این کار به منظور بدست آوردن طیف شار پروتون‌های فضایی از نرم افزار OMERE استفاده شده است. تغییرات جریان نشتی در یک دیود سیلیکونی در معرض شارش‌های مختلف این تابش پروتونی نیز توسط نرم افزار SILVACO بدست آورده شده است. همچنین کد مونت کارلوی GEANT4 برای محاسبه اتلاف انرژی غیر یونیزان به کار گرفته شده است.

<sup>1</sup> Non Ionizing Energy Loss

<sup>2</sup> Primary Knock on Atom

## ۲. روش کار:

نرم افزار SILVACO یک برنامه کامپیوتری است که توانایی شبیه سازی قطعات الکتریکی در دو و سه بعد را دارا می باشد. با این شبیه ساز می توان خواص الکتریکی مرتبط با ساختار فیزیکی و شرایط بایاس معین را با معادلات برگرفته از قوانین ماکسول پیش بینی نمود [۴]. در اینجا نیز به منظور بررسی تغییرات پارامترهای الکتریکی یک دیود سیلیکونی در یک میدان پروتونی از این نرم افزار استفاده شده است. مدل یک دیود سیلیکونی نوع p با ابعاد سطح مقطعی  $285 \times 160 \mu\text{m}^2$  و دوپینگ بور  $1 \times 10^{12}$  تعریف می شود که شرایط بایاس  $0-600 \text{ V}$  به آن اعمال شده است. ساختار هندسی دیود سیلیکونی نوع p شبیه سازی شده در شکل ۱ آورده شده است.



شکل (۱) ساختار دیود سیلیکونی نوع p شبیه سازی شده توسط نرم افزار SILVACO

آسیب های پرتویی در سیلیکون ناشی از NIEL ذراتی که انرژی آن ها از انرژی آستانه جابجایی بیش تر است (حدود  $20 \text{ eV}$ ) ایجاد می شود چراکه این ذرات باعث خروج اتم سیلیکون از جایگاه خود در شبکه و تولید یک PKA می شوند. نقص های ایجاد شده در شبکه سیلیکونی سبب تغییر برخی خواص الکتریکی قطعه سیلیکونی می شوند.

یکی از مهمترین پارامترهای الکتریکی تاثیرگذار در خروجی یک دیود سیلیکونی، جریان نشتی آن می باشد که با بوجود آمدن مراکز باز ترکیب با سطوح جدید انرژی در باند ممنوعه ناشی از ذرات فرودی، افزایش پیدا می کند. بنابراین باعث افزایش در تولید گرمایی حامل های بار می شود. این فرآیند در شبیه سازی بر حسب تصحیح طول عمر حامل های اقلیت تعریف می شود که ترم تولید-باز ترکیب گرمایی SRH در



معادلات پیوستگی حامل‌های بار را کنترل می‌نماید [۵]. تغییرات طول عمر حامل‌های اقلیت با شار ذره فرودی،  $\phi$ ، در سیلیکون و تحت شرایط تعادلی بصورت رابطه (۱) توصیف می‌شود [۶].

$$\phi = \frac{1}{\tau r_0} + K_{\tau} \frac{1}{\tau r} \quad (1)$$

که  $\tau_r$  و  $\tau_{r0}$  به ترتیب طول عمر حامل قبل و پس از تابش می‌باشند و  $K_{\tau}$  ثابت آسیب طول عمر است. ثابت آسیب طول عمر توصیف‌گر جزئیات اطلاعات پدیده مربوط به اندرکنش‌های فیزیکی بین ذرات فرودی و ماده نیمه‌هادی است.

بسیاری از بررسی‌های تجربی نشان‌دهنده فرض یک تناسب خطی مستقل از نوع ذره فرودی بین ثابت آسیب طول عمر و اتلاف انرژی غیر یونیزان ذره می‌باشد [۷]. بنابراین می‌توان از این ماهیت برای تخمین زدن ثابت آسیب برای یک ذره (در یک انرژی مشخص) از مقادیر این آسیب برای تمامی ذرات دیگر استفاده کرد. با توجه به اینکه نوع ذره فرودی در این کار پروتون‌های گیرافتاده در فضا می‌باشند، از رابطه (۲) برای بدست آوردن ثابت آسیب طول عمر این پرتودهی استفاده شده است.

$$K_p / K_n = NIEL_p / NIEL_n \quad (2)$$

مقدار  $K_n$  برای نوترون ۱ MeV با در نظر گرفتن  $NIEL_n = 2.04 \text{ keVcm}^2/\text{gr}$  در سیلیکون در حدود  $10^{-7} \text{ cm}^2/\text{s}$  بدست آمده است [۷]. بنابراین در اینجا نیاز به محاسبه  $NIEL_p$  برای پروتون‌های فضایی به منظور بدست آوردن ثابت آسیب دیود سیلیکونی است. یکی از رهیافت‌های اصلی در این زمینه، استفاده از مدل‌های تئوریکال برای محاسبه اندرکنش‌های هسته‌ای ذرات فرودی با مواد می‌باشد. در این کار از کد مونت کارلوی ترابرد ذرات GEANT4 استفاده شده است. این کد با زبان برنامه‌نویسی C++ توسعه یافته و شامل مدل‌های متفاوتی برای محاسبه اندرکنش‌ها در بازه‌های وسیعی از انرژی می‌باشد [۸].

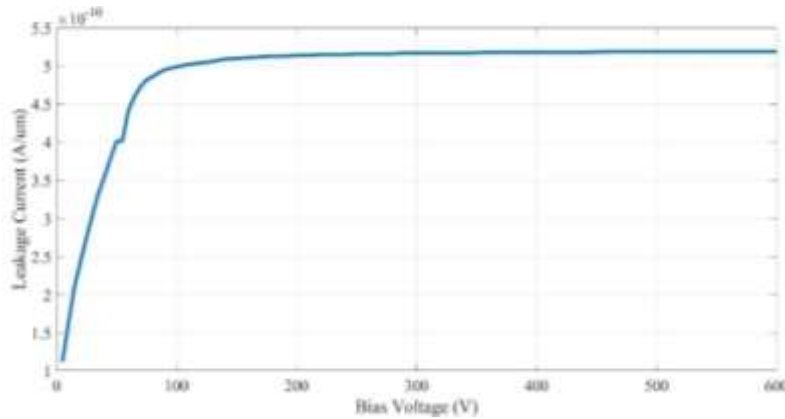
به منظور بدست آوردن طیف شارش پروتون‌های فضایی نیز می‌توان از نرم‌افزار OMERE استفاده کرد. این نرم‌افزار قادر به شبیه‌سازی محیط فضا به لحاظ شار ذرات مختلف و و انرژی‌های آن‌ها می‌باشد [۹].

### ۳. نتایج:

تغییرات جریان نشتی دیود سیلیکونی شبیه‌سازی شده بر حسب بایاس معکوس اعمال شده قبل از پرتودهی در شکل ۲ نشان داده شده است. ملاحظه می‌شود که جریان نشتی با افزایش بایاس، افزایش یافته و در مقادیر بالاتر از ۹۰ ولت با دقت ۴/۶٪ تقریباً ثابت باقی مانده است. این مقدار جریان نشتی در حدود ۵۲ nA در هر میکرومتر از قطعه می‌باشد. رفتار

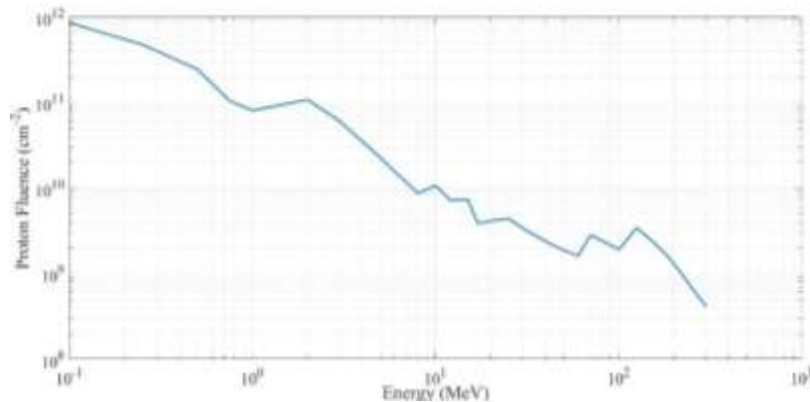


کیفی تغییرات جریان نشتی قطعه شبیه‌سازی شده، مشابه با نتایج بدست آمده از کارهای پژوهشی دیگر بر روی یک دیود سیلیکونی می‌باشد [۱۰].



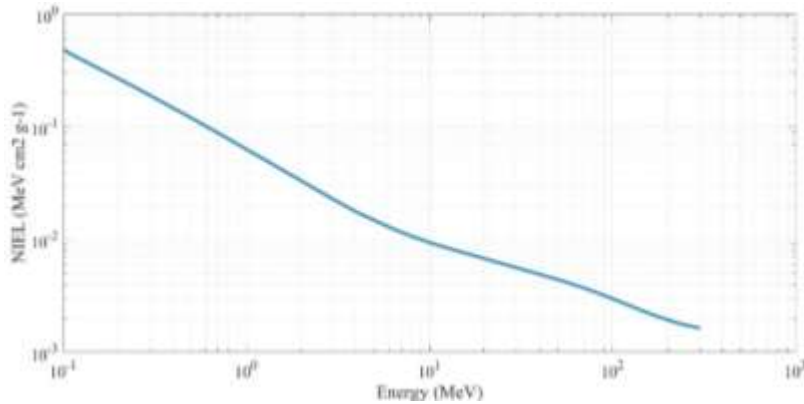
شکل (۲) منحنی جریان-ولتاژ دیود نمونه قبل از تابش

توزیع انرژی شارش پروتون‌های موجود در مدار LEO زمین که شامل پروتون‌های به‌دام افتاده، پروتون‌های GCR و پروتون‌های خورشیدی است با استفاده از نرم‌افزار OMERE بدست آمده و در شکل ۳ نشان داده شده است. همانگونه که در شکل ۴ نشان داده شده است، اتلاف انرژی غیر یونیزان طیف پروتونی بدست آمده در حجم حساس دیود سیلیکونی با در نظر گرفتن مدل‌های فیزیکی اندرکنش‌های هسته‌ای برای پراکندگی‌های کشسان و ناکشسان در کد مونت کارلوی Geant4، محاسبه شده است. انرژی آستانه جابجایی در سیلیکون، ۲۱ eV در نظر گرفته شده است. بنابراین مطابق رابطه (۲)، محاسبه NIEL تابش پروتون‌های فضایی در سیلیکون با استفاده از مقادیر در شکل ۴، منجر به ثابت آسیب kp به مقدار  $5/88 \times 10^{-5} \text{ cm}^2\text{s}^{-1}$  می‌شود.





شکل (۳) توزیع انرژی شار پروتون‌های گیر افتاده موجود در مدار LEO



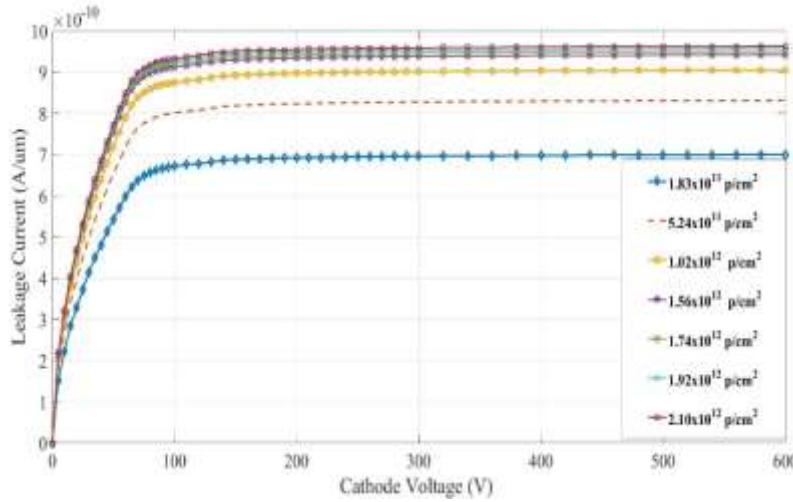
شکل (۴) توزیع NIEL محاسبه شده ناشی از تابش پروتون‌های فضایی در ساختار سیلیکونی

با قرار گرفتن این دیود سیلیکونی در ساختار قطعات الکترونیکی ماهواره در مدار چرخش مورد نظر و با طول مدت ماموریت‌های مختلف (از یک سال تا ۱۲ سال) در معرض شارش پروتون‌ها از مرتبه  $10^{11}$  تا  $10^{12}$   $p/cm^2$  می‌گیرد. بنابراین با بررسی تغییرات طول عمر حامل‌ها می‌توان تغییرات جریان نشتی این قطعه در این شارها را بدست آورد. مقادیر طول عمر حامل‌ها در شارهای پرتویی مختلف از پروتون‌ها در جدول (۱) آورده شده است. این کاهش در طول عمر حامل‌ها با افزایش شار پروتون‌های فرودی، نشان از افزایش پدیده بازترکیب در اثر آسیب پرتویی در ساختار قطعه سیلیکونی تحت تابش دارد. تغییرات جریان نشتی بر حسب ولتاژ کاتد در شکل ۵ و تغییرات آن بر حسب شار فرودی در شکل ۶ رسم شده‌اند.

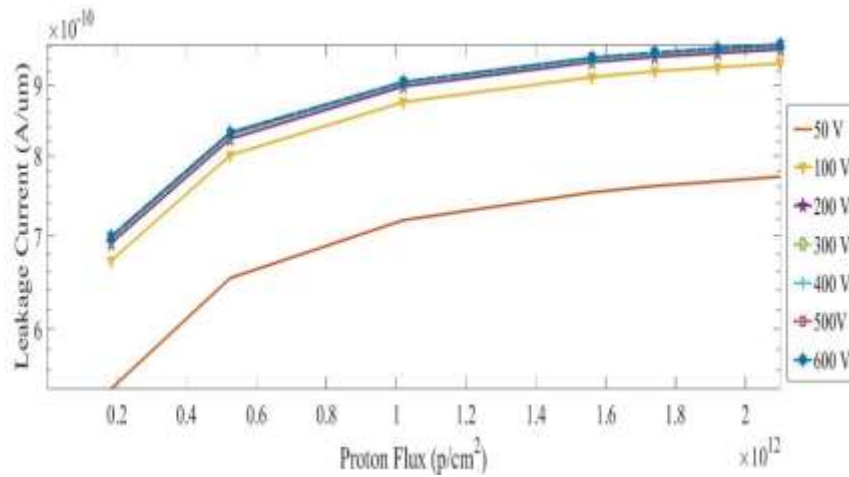
جدول (۱) طول عمر حامل‌ها بر حسب تغییرات شار پروتون‌های فضایی مدار LEO در فاصله ۶۱۷ کیلومتری از سطح

زمین

طول ماموریت (سال)	شار ( $p/cm^2$ )	طول عمر (s)
1	$1.83 \times 10^{11}$	$4.81 \times 10^{-8}$
3	$5.24 \times 10^{11}$	$2.45 \times 10^{-8}$
6	$1.02 \times 10^{12}$	$1.43 \times 10^{-8}$
9	$1.56 \times 10^{12}$	$9.83 \times 10^{-9}$
10	$1.74 \times 10^{12}$	$8.9 \times 10^{-9}$
11	$1.92 \times 10^{12}$	$8.14 \times 10^{-9}$
12	$2.10 \times 10^{12}$	$7.49 \times 10^{-9}$



شکل (۵) تغییرات جریان آند بر حسب ولتاژ کاتد برای شارهای متفاوت در طول فعالیت بیشینه خورشیدی



شکل (۶) تغییرات جریان آند بر حسب شار پروتون فرودی در ولتاژهای متفاوت در طول فعالیت بیشینه خورشیدی

#### ۴. بحث و نتیجه‌گیری:

برخورد ذرات باردار به اتم‌های سیلیکون و اتلاف انرژی غیریونیزان این ذرات سبب خروج اتم سیلیکون از جایگاه خود در شبکه و تولید یک PKA می‌شود. نقص‌های ایجاد شده در شبکه سیلیکونی سبب تغییر برخی خواص الکتریکی قطعه سیلیکونی می‌شوند. نقص‌ها بسته به تراز انرژی آن‌ها در گاف انرژی، پارامترهای میکروسکوپی قطعه را دچار تغییر می‌کند. با افزایش شار تابش فرودی تولید نقص‌هایی با سطوح نزدیک به مرکز گاف انرژی که بعنوان مراکز تولید و بازترکیب حامل عمل می‌کنند، افزایش می‌یابد. الکترون‌ها می‌توانند از لایه ظرفیت به تراز نقص برانگیخته شده و از



آنجا با محرک حرارتی بسیار راحت‌تر از گذار مستقیم به باند هدایت برود. به همین دلیل، ترازهای انرژی نزدیک به مرکز گاف انرژی تولید جفت‌های حامل بار آزاد کرده و سبب افزایش جریان نشتی پس از تابش می‌شوند. نتایج بدست آمده از محاسبه جریان نشتی یک دیود سیلیکونی نوع p در معرض شارش‌های متفاوت تابش‌های پروتونی در مدار مفروض نشان می‌دهد که جریان نشتی با افزایش شار پروتون‌های فرودی تا  $10^{12} \text{ p/cm}^2$  در حدود  $1/85$  برابر مقدار آن قبل از تابش افزایش پیدا می‌کند و به حدود  $96/2 \text{ nA}/\mu\text{m}$  می‌رسد. افزایش شار پروتون‌های فرودی با کاهش در طول عمر حامل‌ها همراه است که نشان‌دهنده افزایش پدیده بازترکیب در اثر آسیب پرتویی در ساختار قطعه سیلیکونی تحت تابش می‌باشد. بنابراین استفاده از آشکارسازهای سیلیکونی در معرض تابش‌های فضایی نیازمند اصلاحاتی در خروجی قابل مشاهده آن‌ها می‌باشد. در همین راستا می‌توان محاسبات بیشتری نیز به منظور بررسی دیگر آسیب‌های پرتویی تاثیرگذار در عملکرد صحیح این قطعات مانند دز یونیزان کل و اثر تک رخدادی و همچنین تاثیر دیگر پرتوها با استفاده از این روش، انجام داد. البته لازم به ذکر است صحت نتایج شبیه‌سازی با انجام تست‌های تجربی قابل اعتبارسنجی می‌باشد لذا در مورد تابش‌های فضایی که قابلیت تست‌های تجربی و دسترسی‌های بسیار محدودی دارند، استفاده از ابزار شبیه‌سازی معتبر در پیش‌بینی تغییرات پارامترهای تاثیرگذار در عملکرد قطعه بسیار کاربردی و مفید خواهد بود.

## ۵. مراجع

- [1] F. Honniger, "Radiation Damage in Silicon - Defect Analysis and Detector Properties" DESY-THESIS-2008-002.
- [2] J. R. Srour, Fellow, Cheryl J. Marshall, and Paul W. Marshall, "Review of Displacement Damage Effects in Silicon Devices", IEEE TRANSACTIONS ON NUCLEAR SCIENCE, VOL. 50, NO. 3, JUNE 2003.
- [3] Hong Li a, et all. "The evolution of interaction between grain boundary and irradiationinduced point defects: Symmetric tilt GB in tungsten", Journal of Nuclear Materials, Volume 500, March 2018, Pages 42-49.
- [4] Silvaco International, ATLAS (vol I & II) User's Manual, (<http://www.silvaco.com/>).
- [5] W. Shockley, W.T. Read, "Statistics of the Recombinations of Holes and Electrons", Physical Review (1952).
- [6] J.D. Dowell, R.J. Homer, I.R. Kenyon, G. Mahout!, S.J. Oglesby, "Irradiation tests of photodiodes for the ATLAS SCT readout", Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A, Volume 424, Issue 2-3, p. 483-494.
- [7] A. Akkermana, J. Baraka, M.B. Chadwickb, J. Levinsona, M. Murata, Y. Lifshitz, "Updated NIEL calculations for estimating the damage induced", Radiation Physics and Chemistry, Volume 62, Issue 4, October 2001, Pages 301-310.





[8] H. Jafari, S.A.H. Fegghi, "Analytical modeling for gamma radiation damage on silicon photodiodes", Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A, Volume 816, 21 April 2016, Pages 62-69.

[9] <http://www.trad.fr/en/space/omere-software/>

[10] Alyson D. Topper, Michael J. Campola, Dakai Chen, Megan C. Casey, Ka-Yen Yau, Donna J. Cochran, Kenneth, A. LaBel, Raymond L. Ladbury, Timothy K. Mondy, Martha V. O'Bryan, Jonathan A. Pellish, Edward P. Wilcox, Edward J. Wyrwas, and Michael A. Xapsos, "Compendium of Current Total Ionizing Dose and Displacement Damage Results from NASA Goddard Space Flight Center and NASA Electronic Parts and Packaging Program", 2017 IEEE Radiation Effects Data Workshop (REDW)