

**Research Paper**

# Calculation and Measurement of Leakage Current Variations Due to Displacement Damage for A Silicon Diode Exposed to Space Protons

S.Shoorian<sup>1\*</sup>, H.Jafari<sup>2</sup>, S.A. Hossein Fegghi<sup>3</sup> and Gh. Aslani<sup>4</sup>

1,2,3. Department of Radiation Application Shahid Beheshti University, Tehran, Iran

4. Agricultural, Medical and Industrial Research School, Nuclear Science and Technology Research Institute, AEOI, Karaj-Iran

\*h\_jafari@sbu.ac.ir

*The presence of ionizing radiation in the space environment due to trapped particles, solar particles, and cosmic rays can be a serious threat to the proper functioning of electronic components used in satellites and spacecraft. 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 space protons was also done by SILVACO software. The results show that the leakage current increases by about 1.85 times its amount before irradiation, up to about 96.2 nA/μm by the increase in the proton flux up to  $2.1 \times 10^{12}$  p/cm<sup>2</sup>. Irradiation of BPW34 photodiodes under 30 MeV protons was performed to validate simulation results.*

**Keywords:** leakage current, silicon diode, SILVACO, proton radiation, GEANT4, Displacement damage

---

1. M.Sc.  
2. Assistant Professor (Corresponding Author)  
3. Professor  
4. M.Sc.

مقاله علمی - پژوهشی

# محاسبه و اندازه‌گیری تغییرات جریان نشتی ناشی از آسیب جابه‌جایی برای یک دیود سیلیکونی در معرض تابش پروتون‌های فضایی

سارا شوریان<sup>۱</sup>، حمید جعفری<sup>۲\*</sup>، سیدامیر حسین فقهی<sup>۳</sup> و غلامرضا اصلانی<sup>۴</sup>

۱، ۲ و ۳- دانشکده مهندسی هسته‌ای، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران

۴- مرکز تحقیقات کشاورزی و پزشکی هسته‌ای، کرج، ایران

h\_jafari@sbu.ac.ir

فوتودیودها به‌عنوان آشکارسازهای نوری دارای کاربردهای فراوانی در زمینه‌های مختلف از جمله ستاره‌شناسی، ارتباطات نوری، حسگرهای زیستی و نظامی هستند. حضور پرتوهای یونیزان در محیط فضایی از جمله ذرات بدم افتاده، ذرات خورشیدی و پرتوهای کیهانی، می‌تواند تهدیدی جدی برای عملکرد صحیح قطعات الکترونیکی به‌کار رفته در ماهواره‌ها و فضاییماها باشند. در این کار اثرات آسیب جابه‌جایی در بوجود آمدن جریان نشتی در یک دیود سیلیکونی، به‌عنوان 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 غیریونیزان در قطعه استفاده شده است. شبیه‌سازی پارامترهای الکتریکی این قطعه و بررسی تغییرات آن‌ها در معرض پروتون‌های فضایی نیز توسط نرم‌افزار سیلواکو 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  $96/\mu\text{A}/\mu\text{m}$  می‌رسد. به‌منظور اندازه‌گیری و اعتبارسنجی رفتار جریان نشتی این نوع قطعات از پرتودهی فوتودیودهای نوع BPW34 با پروتون‌های  $30 \text{ MeV}$  استفاده شده است.

واژه‌های کلیدی: جریان نشتی، دیود سیلیکونی، سیلواکو، تابش پروتونی، GEANT4، آسیب جابه‌جایی

## علائم و اختصارات

$T_{R0}$  طول عمر حامل قبل از تابش  
 $T_R$  طول عمر حامل بعد از تابش

Single Event Effect (SEE)	اثر تک‌رخدادی
Total Ionizing Dose (TID)	دز یونیزان کلی
Displacement Damage (DD)	آسیب جابه‌جایی
Non-Ionizing Energy Loss (NIEL)	اتلاف انرژی غیریونیزان
Primary Knock on Atom (PKA)	اتم پس‌زده شده اولیه

## مقدمه

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

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

۱. کارشناس ارشد

۲. استادیار (نویسنده مخاطب)

۳. استاد

۴. کارشناس ارشد

از تابش‌های پرنرژی بر روی مواد جامد، از شروع ناگهانی فن‌آوری هسته‌ای در طول جنگ جهانی دوم آغاز شد. بنابراین نقطه آغازین در زمینه آسیب‌های پرتویی در سال ۱۹۴۳ می‌باشد. پیش از آن، مطالعات بسیاری در زمینه برهمکنش‌های پرتو با ماده صورت گرفته بود. در حقیقت، از زمان کشف پرتوهای ایکس و رادیواکتیو طبیعی، کارهای زیادی در زمینه فیزیک مرتبط با تابش و مواد انجام شده بود که نهایتاً منجر به نظریه‌های جدیدی در زمینه ساختارهای اتمی و بلوری شد. اکثر بررسی‌های اولیه در این زمینه، به‌علت وجود چشمه‌های کم انرژی و کم شدت، آسیبی در پی نداشته ولی در عین حال اثبات شد که تابش می‌تواند بر ساختار شیمیایی برخی از مواد تاثیرگذار باشد.

دیل و همکارانش در سال ۱۹۹۴ به مقایسه نتایج مونت کارلو و محاسبات تحلیلی آسیب جابجایی ناشی از اندرکنش‌های غیرکشسان پروتون در Si پرداختند. با افزایش انرژی پروتون فرودی و کاهش حجم حساس، برد پاره‌های شکافت به کمترین ابعاد رسیده و واریانس آسیب پیکسل به پیکسل به شدت افزایش یافت. روش مونت کارلو برای توصیف توزیع انرژی آسیب استفاده شد. این شبیه‌سازی هیستوگرام جریان تاریکی ناشی از پروتون  $63 \text{ MeV}$  را دقیق‌تر از روش‌های تحلیلی پیش‌بینی می‌کند [۵]. مسنجر به‌همراه همکارانش به محاسبه حساسیت آسیب جابجایی و دز یونیزان به طیف انرژی پروتون تا حداقل انرژی  $100 \text{ eV}$  برای پروتون‌های فضایی در سال ۱۹۹۷ پرداختند. نتایج کار آن‌ها بیان می‌دارد که برای محاسبه دقیق دز آسیب جابجایی در یک قطعه حفاظ‌گذاری شده باید طیف انرژی دیفرانسیلی پروتون را تا حداقل انرژی آستانه برای جابجایی اتمی بدست آورد [۶].

سامرز بیان داشت که در قطعات Si، GaAs و InP تناسب مستقیمی بین ضرایب آسیب پروتون و NIEL وجود دارد. در نتیجه تمام آن‌چه برای محاسبات نیاز است شار دیفرانسیلی پروتون، اندازه-گیری‌های انجام شده برای یک انرژی پروتون و محاسبه مقدار NIEL است [۷]. کارهای جون با در نظر گرفتن پراکندگی کولنی برای پروتون‌ها با انرژی کمتر از  $10 \text{ MeV}$  مقادیر دقیق‌تری برای NIEL به ارمغان آورد [۸].

اسرور به‌همراه پالکو در سال ۲۰۰۶، به توصیف اثرات آسیب جابجایی با تاکید بر مهم‌ترین مکانیزم‌های آن، افزایش بازترکیب حامل و تولید حامل بدلیل سطوح ایجاد شده در شکاف انرژی سیلیکون به‌واسطه تابش، پرداخته‌اند. در این کار، رفتار رژیم انتقال NIEL از نقص‌های نقطه‌ای (برای مقادیر NIEL کمتر از  $5 \times 10^{-5} \text{ cm}^{-2}/\text{g}$  بزرگتر از  $2 \times 10^{-4} \text{ MeV-cm}^{-2}/\text{g}$ ) بر حسب افزایش اثر زیرخوشه‌ها با افزایش NIEL، مدل شده است. اشباع در مقادیر به نسبت بالای NIEL جایی که تعداد زیرخوشه‌های تولید شده بطور خطی با

سه منبع اصلی برای تابش یونیزان در محیط‌های فضایی عبارتند از پرتوهای کیهانی، ذرات تولید شده حین رخدادهای ذرات خورشیدی و ذرات به‌دام افتاده در کمربند مغناطیسی سیاره‌ها. بخش اعظم پرتوهای کیهانی متشکل از پروتون‌ها بوده اما تمامی عناصر را شامل شده و می‌توانند انرژی‌های بسیار بالایی (تا  $10^{11} \text{ GeV}$ ) داشته باشند که این امر موجب نفوذپذیری بسیار زیاد آن‌ها شده و ناتوانی در حفاظت در مقابل آن‌ها را در پی دارد. دسته دوم تابش‌های یونیزان در فضا، از خورشید نشأت می‌گیرند. این ذرات شامل تمامی عناصر طبیعی از پروتون تا اورانیوم بوده و شار آن‌ها به دوره خورشیدی وابسته می‌باشد و می‌تواند به بیش از  $10^5$  ذره بر سانتی‌متر مربع بر ثانیه با انرژی بیشتر از  $10 \text{ MeV/nucleon}$  برسد. میدان مغناطیسی زمین (شامل دو بخش ذاتی و خارجی ناشی از بادهای خورشیدی) قادر است ذرات باردار را گیراندازد. دو کمربند متمایز توسط ذرات گیر افتاده در میدان مغناطیسی زمین شکل می‌گیرد: کمربند خارجی که بیشتر از الکترون تشکیل شده است و کمربند داخلی که بیشتر شامل پروتون است [۱].

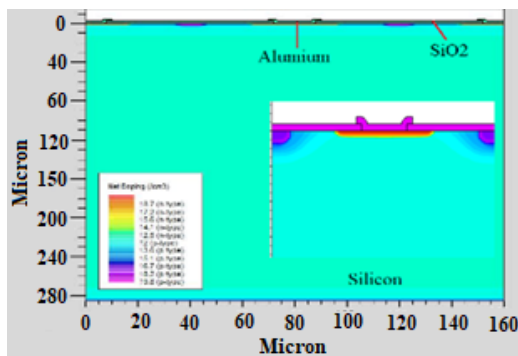
همانگونه که بیان شد پروتون‌ها نقش به‌سزایی در محیط پرتویی فضایی ایفا می‌کنند و حفاظ‌گذاری سیستم در برابر پروتون‌های فضایی مستلزم بررسی اثرات پروتون‌ها بر روی قطعات الکترونیکی است. پرتو می‌تواند از راه‌های متعددی بر قطعات الکترونیکی تاثیر بگذارد. پرتو می‌تواند ماده قطعه را یونیزه کرده و سبب افزایش جریان و بار شود (SEE)، ساختار اتمی ماده را تغییر داده و باعث تغییر عملکرد قطعه شود (TID) و در صورتی که از انرژی کافی برخوردار باشد سبب آسیب فیزیکی و دائمی به قطعه شود (DD). وجود سطوح بالای پرتوهای برخورد کننده به کریستال سیلیکونی این ساختارها در محیط تابشی، باعث بروز نقص‌هایی در آنها می‌شود. اتلاف انرژی غیر یونیزان (NIEL) پرتو فرودی ممکن است باعث جابجایی اتم‌های سیلیکون از جای خود در شبکه و تولید یک اتم بین‌نشین و یک تهی‌جا (جفت فرنکل) شود. به اتمی که به دلیل تابش از جای خود در شبکه جابجا شده است، PKA<sup>۵</sup> 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 [۲، ۳]. از مهم‌ترین اثرات مراکز نقص ناشی از تابش بر خواص الکترونیکی دیود سیلیکونی تولید حرارتی جفت‌های الکترون - حفره در سطح نزدیک باند میانی، افزایش جریان نشتی، تغییر ولتاژ تخلیه و کاهش عمر حامل‌های بار می‌باشد [۴].

انگیزه اصلی برای مطالعه جدی در زمینه آسیب پرتویی ناشی

ATLAS رفتار الکتریکی ساختار نیمه‌هادی را پیش‌بینی نموده و دیدگاهی راجع به مکانیزم‌های فیزیکی مربوط به عملکرد قطعه می‌دهد. این پیش‌بینی رفتار با اعمال شبکه‌بندی بدست می‌آید. با اعمال معادلات دیفرانسیلی بدست آمده از قوانین ماکسول به این شبکه رفتار الکتریکی قطعه را می‌توان شبیه‌سازی نمود.

برای بررسی اثر نقص‌ها برخواص ماکروسکوپی قطعه از قبیل جریان نشتی و ظرفیت خازنی آن، باید از دستور trap استفاده نمود. استفاده از این دستور نیازمند به‌کارگیری مدل SRH است. طول عمر حامل‌ها به چگالی نقص‌ها وابسته است که این چگالی پس از برخورد PKA، از تقسیم تعداد نقص‌های ایجاد شده در کریستال بر حجم کریستال بدست می‌آید. بررسی اثر PKA بر ساختار کریستال توسط برنامه لمپس<sup>۷</sup> محاسبه شده و تعداد و مکان نقص‌های ایجاد شده با نرم‌افزار اوتو<sup>۸</sup> قابل بررسی است.

مدل در سیلواکو به‌صورت یک دیود سیلیکونی نوع p با ابعاد سطح مقطعی  $2 \times 160 \times 285 \mu\text{m}^2$  و دوپینگ بور  $10^{17} \times 1$  تعریف می‌شود که شرایط بایاس  $0.6 \text{ V}$  به آن اعمال شده است. ساختار هندسی دیود سیلیکونی نوع p شبیه‌سازی شده در شکل ۱ آورده شده است. ابعاد سیستم  $24a \times 24a \times 24a \text{ cm}^3$  است که a در آن ثابت شبکه بوده و مقدار آن برای سیلیکون برابر  $5/431$  آنگستروم است. این ابعاد با توجه به انرژی‌های انتخاب شده برای PKA و محاسبات برد آن‌ها در سیلیکون با استفاده از کد SRIM انتخاب شده است [۱۶].



**شکل ۱-** ساختار دیود سیلیکونی نوع p شبیه‌سازی شده توسط نرم‌افزار سیلواکو  
آسیب‌های پرتویی در سیلیکون ناشی از NIEL ذراتی که انرژی آن‌ها از انرژی آستانه جابجایی بیشتر است (حدود  $21 \text{ eV}$ )، چراکه این ذرات باعث خروج اتم سیلیکون از جایگاه خود در شبکه و تولید یک PKA می‌شوند. نقص‌های ایجاد شده در شبکه سیلیکونی سبب تغییر برخی خواص الکتریکی قطعه می‌شوند.

یکی از مهمترین پارامترهای الکتریکی تاثیرگذار در خروجی یک دیود سیلیکونی، جریان نشتی آن است که با بوجود آمدن مراکز

NIEL افزایش می‌یابد، اتفاق می‌افتد. شرایط عملی با NIEL‌های به نسبت ثابت با عمق نفوذ، ذرات تک انرژی با انرژی زیاد که برد آن‌ها در سیلیکون بسیار بزرگتر از ابعاد قطعه پرتودهی شده است، محقق شد. در چنین شرایطی می‌توان NIEL را معادل دز آسیب جابجایی در واحد شار ذره دانست [۹].

به‌رغم دقت بیشتر روش تجربی، از آنجا که آزمایش‌های 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 [۱۰، ۱۱].

در این کار به منظور بدست‌آوردن طیف شار پروتون‌های فضایی از نرم‌افزار OMERE استفاده شده است [۱۲]. تغییرات جریان نشتی در یک دیود سیلیکونی در معرض شارش‌های مختلف این تابش پروتونی نیز توسط نرم‌افزار سیلواکو<sup>۷</sup> محاسبه شده است [۱۳]. همچنین کد مونت کارلوی GEANT4 برای بدست آوردن اتلاف انرژی غیریونی‌زان به‌کارگرفته شده است [۱۴]. به منظور اندازه‌گیری و اعتبارسنجی تغییرات جریان نشتی، فوتودیودهای نوع BPW34 تحت تابش پروتونی سیکلوترون قرار گرفته و داده‌ها تا بعد از مراحل بازپخت بدست آمده‌اند.

## روش کار

### شبیه‌سازی

به‌منظور بدست آوردن جریان نشتی قطعه دیود سیلیکونی از نرم‌افزار شبیه‌سازی قطعات الکترونیکی SILVACO استفاده شده است. نرم‌افزار SILVACO یک برنامه کامپیوتری است که توانایی شبیه‌سازی قطعات الکتریکی در دو و سه بعد را دارد. با این شبیه‌ساز می‌توان خواص الکتریکی مرتبط با ساختار فیزیکی و شرایط بایاس معین را با معادلات برگرفته از قوانین ماکسول پیش‌بینی کرد [۱۵]. این برنامه توزیع ابتدایی پارامترهای فیزیکی را محاسبه نموده و رفتار الکتریکی قطعات را در حالت پایدار، گذرا یا شرایط سیگنال کوچک پیش‌بینی می‌کند. این پیش‌بینی با حل معادله پواسون و معادلات پیوستگی حامل در دو بعد انجام می‌شود. S-Pisces معادلات پایه نیمه‌هادی را بر شبکه‌های مثلثی غیریکنواخت حل می‌کند. مشخصه‌های آلاینش و ساختار قطعه ممکن است از توابع، داده‌های اندازه‌گیری شده بصورت عملی یا برنامه‌های مدل‌سازی فرآیند بدست آیند.

پروتودهی مورد بررسی قرار گرفت.



شکل ۲ - فوتودیود نوع BPW34

فوتودیودها نوعی از قطعات الکترونیکی حساس به نور هستند که بسته به مورد عملیات لازم می‌توانند انرژی نورانی را به جریان الکتریکی تبدیل کنند. فوتودیودها شباهت زیادی به دیودهای نیمه رسانای معمولی دارند، به گونه‌ای که در ساختمان بسیاری از دیودهایی که به صورت دیود فوتونی ساخته می‌شوند از پیوند PIN استفاده می‌شود. در این قطعات، جریان قطعه با برخورد نور به ناحیه نیم‌رسانای حساس به نور ایجاد می‌شود. پیوند pn از طریق یک روزنه‌ی مجهز به عدسی در معرض نور قرار می‌گیرد. اگر نوری در کار نباشد، تنها جریان نشتی کوچکی که ناشی از انرژی گرمایی است از قطعه می‌گذرد. این جریان را جریان تاریکی می‌نامند که در حدود نانوآمپر است. با رسیدن نور به پیوند یک جریان  $I_x$  ایجاد می‌شود که با شدت نور مناسب است [۲۱، ۲۲]. فوتودیود استفاده شده در این آزمایش، دارای طیف حساسیت نوری ۴۰۰-۱۰۰۰nm است.

برخی از مشخصات فوتودیود از قبیل جریان نشتی و مستقیم در شدت نوری صفر و جریان نشتی در طول موج‌های مختلف مورد بررسی قرار گرفته‌اند. در این آزمایشات به منظور حذف اثر نور محیطی بر عملکرد قطعه، قطعه مطابق شکل ۳ در دو جعبه سیاه داخل هم قرار داده شده است. حداکثر ولتاژ معکوس برای فوتودیود نوع BPW34 برابر ۳۰V اعمال شده است. برای بررسی تغییرات جریان بر حسب طول موج نور فرودی، دیودهای نوری با طول موج‌های مختلف درون جعبه‌ها قرار داده شدند تا تنها تأثیر طول موج معین بررسی شود.



شکل ۳ - جعبه ساخته شده به منظور تست قطعات فوتودیودی

آزمایش‌ها با پروتون‌های ۳۰MeV سیکلوترون کرج انجام شد. سیکلوترون کرج که C-30 نام دارد و نمایی از آن در شکل ۴ نشان

بازترکیب با سطوح جدید انرژی در باند ممنوعه ناشی از ذرات فرودی، افزایش پیدا می‌کند. بنابراین باعث افزایش در تولید گرمایی حامل‌های بار می‌شود. این فرآیند در شبیه‌سازی توسط نرم‌افزار سیلواکو برحسب تصحیح طول عمر حامل‌های اقلیت تعریف می‌شود که ترم تولید-بازترکیب گرمایی SRH در معادلات پیوستگی حامل‌های بار را کنترل می‌نماید [۱۷]. تغییرات طول عمر حامل‌های اقلیت با شار ذره فرودی،  $\Phi$ ، در سیلیکون و تحت شرایط تعادلی بصورت رابطه (۱) توصیف می‌شود [۱۸].

$$(\tau_r) = 1/(\tau_{r0}) + K_r \Phi \quad (1)$$

که  $\tau_{r0}$  و  $\tau_r$  به ترتیب طول عمر حامل قبل و پس از تابش می‌باشند و 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 غیریونیزان ذره می‌باشد [۱۹]. بنابراین می‌توان از این ماهیت برای تخمین‌زدن 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 هستند، از رابطه (۲) برای بدست آوردن ثابت آسیب طول عمر این پروتودهی 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 [۱۹]. 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 است [۲۰].

به منظور بدست آوردن طیف شارش پروتون‌های فضایی نیز از نرم‌افزار OMERE استفاده شده است. این نرم‌افزار قادر به شبیه‌سازی محیط فضا به لحاظ شار ذرات مختلف و انرژی‌های آن‌هاست [۱۲].

### آزمایش‌های تجربی

برای اطمینان از صحت نتایج بدست آمده، رفتار یک مدل فوتودیود BPW34 که در شکل ۲ نشان داده شده است، قبل و بعد از



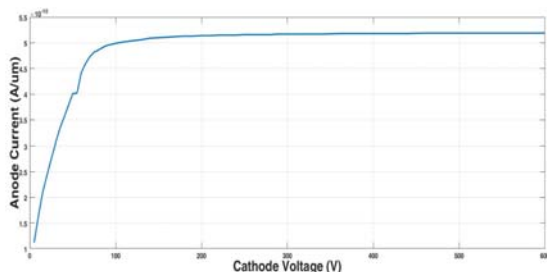
شکل ۵- فوتودیوهای BPW34 سوار شده بر پولک آهنی برای پرتودهی با پروتون‌های ۳۰ MeV توسط سیکلوترون کرج



شکل ۶- چیدمان آزمایش جهت اندازه‌گیری پارامترهای الکتریکی فوتودیودها

## نتایج

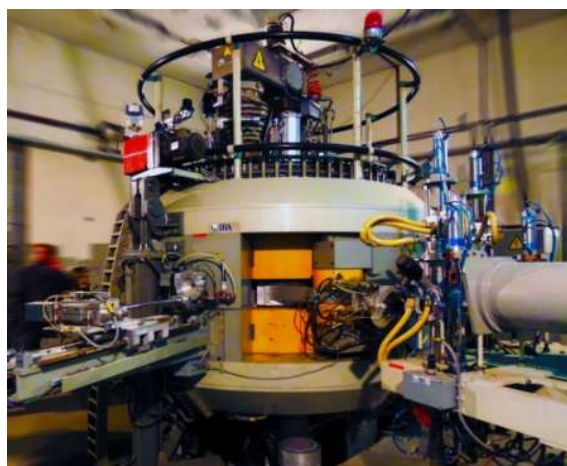
تغییرات جریان نشتی دیود سیلیکونی شبیه‌سازی شده در سیلوکو بر حسب بایاس معکوس اعمال شده قبل از پرتودهی در شکل ۷ نشان داده شده است. ملاحظه می‌شود که جریان نشتی با افزایش بایاس، افزایش یافته و در مقادیر بالاتر از ۹۰ ولت با دقت ۴/۶٪ تقریباً ثابت باقی مانده است. این مقدار جریان نشتی در حدود ۵۲ nA در هر میکرومتر 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 [۲۴].



شکل ۷- 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 ۸ نشان داده شده است.

داده شده است، یک شتاب‌دهنده دایره‌ای از نوع AVF می‌باشد که قادر است یون‌های  $H^+$  را تا ۳۰ MeV شتاب دهد. یون‌های منفی به‌وسیله یک ورقه نازک از جنس کربن کنده می‌شوند و به یون‌های پروتون ( $H^+$ ) تبدیل می‌شوند و سپس با تغییر مسیر در میدان مغناطیسی سیکلوترون استخراج خواهند شد. قطر قطب‌های سیکلوترون کرج ۱/۸ متر و طول شکاف هوایی در آن ۳ سانتی‌متر می‌باشد. این سیکلوترون می‌تواند باریکه‌ای از ذرات پروتون با شدت حداکثر ۳۸۰ میکروآمپر تولید نماید [۲۳].



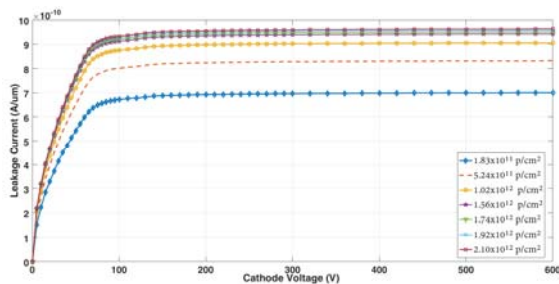
شکل ۴- سیکلوترون C-30 سازمان انرژی اتمی کرج

هنگام اندازه‌گیری مشخصه‌های قطعات پرتو دیده، متوجه شدیم که عملکرد این قطعات دچار مشکل شده است؛ با افزایش شدت نور تابیده شده جریان خروجی آن‌ها کاهش پیدا می‌کرد. با اندازه‌گیری ولتاژ دو سر این فوتودیودها معلوم شد که پیوند pn در اثر برخورد با پروتون‌ها از بین رفته است. از آن‌جا که هرچه انرژی پروتون کمتر باشد،  $dE/dx$  آن بیشتر خواهد بود، تلاش شد با افزایش انرژی پروتون‌های فرودی، انرژی برجا مانده در قطعه را کاهش داده تا از سوختن قطعات ممانعت به‌عمل آید. لذا این‌بار آزمایش با پروتون‌های ۳۰ MeV و تنها بر روی فوتودیوهای نوع BPW34 انجام پذیرفت. از آن‌جاکه سیکلوترون تحقیقاتی نیست، لذا انرژی پروتون‌های فرودی  $30 \pm 2\%$  MeV خواهد بود.

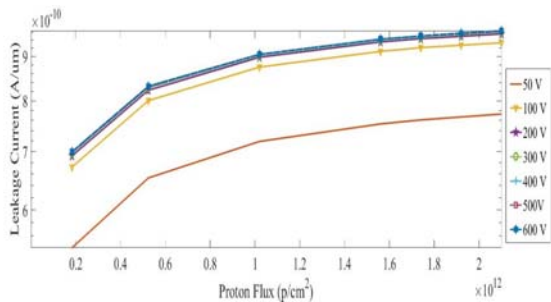
پرتودهی بر روی ۱۵ فوتودیود BPW34 انجام پذیرفت. فوتودیودها در دسته‌های سه‌تایی بر روی پولک آهنی مطابق شکل ۵ تحت تابش پنج جریان مختلف  $0.2, 0.25, 0.5, 1, 2, 5 \mu A$  و  $3/85$  که به ترتیب معادل  $1.25 \times 10^{12}, 1.25 \times 10^{12}, 1.25 \times 10^{12}, 1.25 \times 10^{12}, 1.25 \times 10^{12}, 1.25 \times 10^{12}$  قرار گرفتند. شکل ۶ چیدمان اندازه‌گیری را که شامل پیکوآمپر متر، منبع تغذیه، جعبه سیاه و قطعات می‌باشد نمایش می‌دهد.

**جدول ۱-** طول عمر حامل‌ها برحسب تغییرات شار پروتون‌های فضایی مدار LEO در طول مدت مأموریت‌های مختلف

طول عمر (s)	شار ( $p/cm^2$ )	طول مأموریت (سال)
$4/81 \times 10^{-8}$	$1/83 \times 10^{11}$	۱
$2/45 \times 10^{-8}$	$5/24 \times 10^{11}$	۳
$1/42 \times 10^{-8}$	$1/02 \times 10^{12}$	۶
$9/83 \times 10^{-9}$	$1/56 \times 10^{12}$	۹
$8/90 \times 10^{-9}$	$1/74 \times 10^{12}$	۱۰
$8/14 \times 10^{-9}$	$1/92 \times 10^{12}$	۱۱
$7/49 \times 10^{-9}$	$2/10 \times 10^{12}$	۱۲



**شکل ۱۰-** تغییرات جریان آند بر حسب ولتاژ کاتد برای شارهای متفاوت در طول فعالیت بیشینه خورشیدی

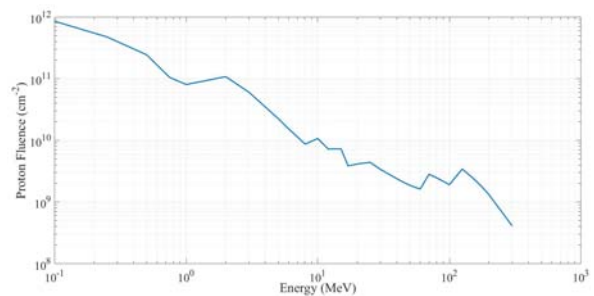


**شکل ۱۱-** تغییرات جریان آند بر حسب شار پروتون فرودی در ولتاژهای متفاوت در طول فعالیت بیشینه خورشیدی

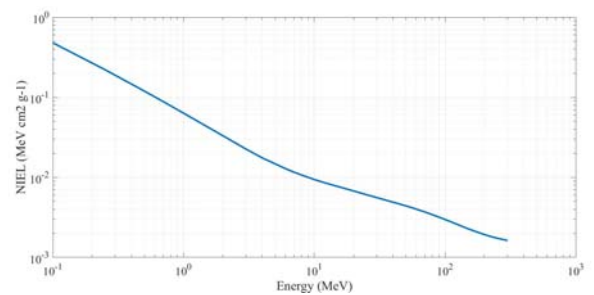
همانگونه که گفته شد، برای صحت‌سنجی نتایج شبیه‌سازی فوتودیودهای نوع BPW34 تحت تابش پروتون‌های  $30 \text{ MeV}$  قرار گرفتند و رفتار الکتریکی آن‌ها قبل و پس از پرتودهی مورد بررسی قرار گرفت. رفتار الکتریکی قطعات قبل از تابش در شکل‌های ۱۲ و ۱۳ نمایش داده شده است. برای اندازه‌گیری جریان قطعه از دستگاه پیکوآمپر متر شرکت کیتلی<sup>۹</sup> استفاده شده است که همانطور که از اسم آن پیداست، دارای دقتی در حد پیکوآمپر می‌باشد.

همانگونه که در شکل ۹ نشان داده شده است، اتلاف انرژی غیریونیزان 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،  $21 \text{ eV}$  در نظر گرفته شده است.

بنابراین مطابق رابطه (۲)، محاسبه NIEL تابش پروتون‌های فضایی در سیلیکون با استفاده از مقادیر در شکل ۹، منجر به ثابت آسیب  $k_p$  به مقدار  $5/88 \times 10^{-5} \text{ cm}^2 \text{ s}^{-1}$  می‌شود.



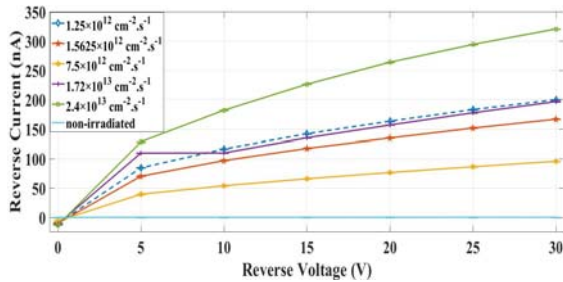
**شکل ۸-** توزیع انرژی شار پروتون‌های گیر افتاده موجود در مدار LEO



**شکل ۹-** 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 LEO در فاصله  $617 \text{ km}$  از سطح زمین و با طول مدت مأموریت‌های مختلف (از یک سال تا ۱۲ سال) در معرض شارش پروتون‌ها از مرتبه  $10^{11}$  تا  $10^{12} \text{ p/cm}^2$  می‌توان 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 ۱۰ و تغییرات آن بر حسب شار فرودی در شکل ۱۱ رسم شده‌اند.

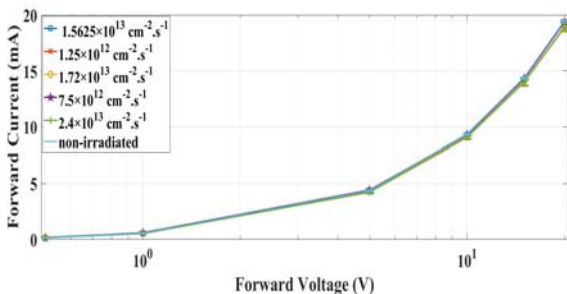
معادل  $1.25 \times 10^{12} \text{ cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$  و  $1.5625 \times 10^{12} \text{ cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ ، پروفایل باریکه به کلی تغییر کرده و به همین دلیل این دو جریان بصورت جدا از سایر جریان‌ها بررسی خواهند شد. تغییرات جریان نشتی میانگین برای جریان‌های نام‌برده از پروتون‌های  $30 \text{ MeV}$  در شکل ۱۵ نشان داده شده است.



شکل ۱۵- تغییرات جریان نشتی فوتودیوهای نوع BPW34 پس از تابش با شارهای تابشی مختلف از پروتون‌های  $30 \text{ MeV}$

مشاهده می‌شود همانگونه که انتظار می‌رفت با برخورد پروتون‌های  $30 \text{ MeV}$  با قطعه جریان نشتی قطعه افزایش یافته و حدود  $1000$  برابر مقدار قبل تابش شده است.

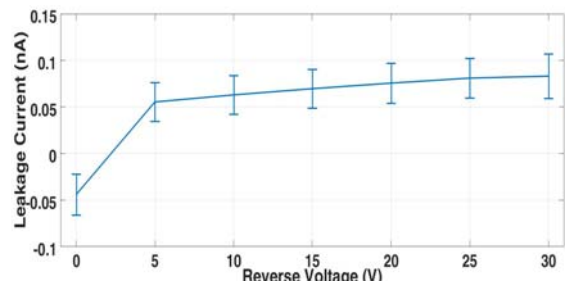
شکل ۱۶ جریان مستقیم قطعه را پس از تابش برای شارهای مختلف فرودی نشان می‌دهد. همان‌گونه که در شکل ۱۶ مشاهده می‌شود، جریان مستقیم قطعه پس از تابش کاهش می‌یابد ولی رفتار تغییر نمی‌کند، به طوری که پس از تابش با افزایش جریان تابش و ولتاژ، جریان کاهش می‌یابد. از طرفی شیب تغییرات جریان بر حسب ولتاژ اندکی کاهش یافته است. بیشترین تغییر جریان قطعه پس از تابش را می‌توان در جریان فرودی  $2/75 \mu\text{A}$ ، شار  $1.72 \times 10^{13} \text{ cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$  و ولتاژ  $20 \text{ V}$  به میزان  $0/57 \text{ mA}$  معادل  $2/92\%$  اختلاف مشاهده نمود. بدین ترتیب تابش فرودی تاثیر چشم‌گیری بر جریان مستقیم قطعه نخواهد داشت.



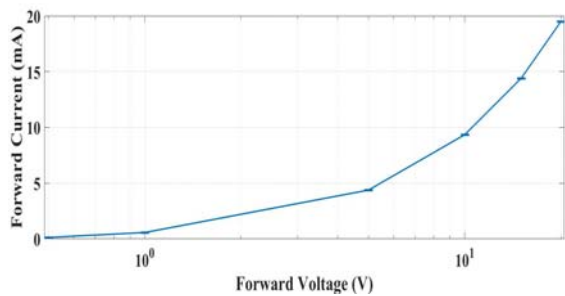
شکل ۱۶- جریان مستقیم فوتودیوهای نوع BPW34 پس از تابش با شارهای تابشی مختلف از پروتون‌های  $30 \text{ MeV}$

شکل ۱۷ میانگین تغییرات جریان مستقیم بر حسب ولتاژ قطعه را برای جریان‌های تابشی مختلف نسبت به قبل از پرتودهی نشان می‌دهد. همانطور که گفته شد از آن‌جا که پس از دو پرتودهی ابتدایی،  $\text{cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$

محاسبه و اندازه‌گیری تغییرات جریان نشتی ناشی از آسیب جابه‌جایی برای یک دیود سیلیکونی در ...

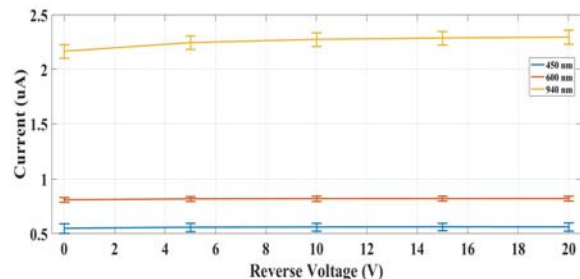


شکل ۱۲- منحنی متوسط جریان نشتی بر حسب ولتاژ فوتودیوهای BPW34 در شدت نوری صفر



شکل ۱۳- منحنی I-V میانگین قبل تابش برای فوتودیوهای BPW34

در شکل ۱۴ میانگین تغییرات جریان نشتی این فوتودیوها بر حسب تغییرات ولتاژ برای طول موج‌های  $450 \text{ nm}$ ،  $460 \text{ nm}$  و  $480 \text{ nm}$  نشان داده شده است.

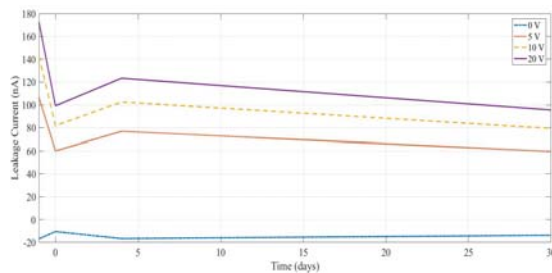


شکل ۱۴- تغییرات جریان نشتی بر حسب ولتاژ فوتودیوهای BPW34 برای طول موج‌های فرودی  $450 \text{ nm}$ ،  $460 \text{ nm}$  و  $480 \text{ nm}$

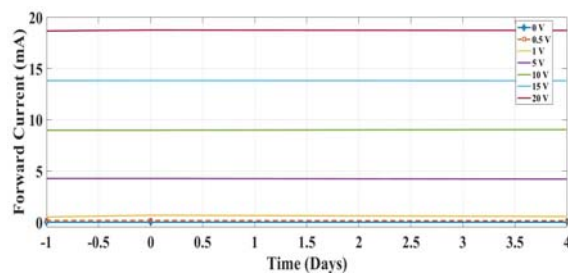
برای بررسی جریان بر حسب طول موج نور فرودی در این آزمایش، از دیوهای نوری با طول موج‌های  $450 \text{ nm}$ ،  $460 \text{ nm}$  و  $480 \text{ nm}$  که به ترتیب دوتای اول دارای رنگ‌های صورتی، نارنجی در ناحیه مرئی و سومی در ناحیه فرورسرخ هستند، استفاده شده است. لازم به ذکر است که این دیوها دارای شدت نوری متفاوت هستند.

مشخصه‌های جریان نشتی و مستقیم با شدت نوری صفر این قطعات بلافاصله پس از پرتودهی اندازه‌گیری شدند. این مشخصه‌ها پس از حدود  $4$  ساعت دوباره اندازه‌گیری شدند که تغییرات آن‌ها قابل چشم‌پوشی بود. با توجه به قطع برق سیکلوترون پس از دو آزمایش ابتدایی، جریان‌های  $0/2 \mu\text{A}$  و  $0/25 \mu\text{A}$  با شار پروتونی





شکل ۱۸ - جریان نشتی فوتودیود BPW34 قبل و پس از بازیخت با حرارت ۳۵۰ °C



شکل ۱۹ - جریان مستقیم فوتودیود BPW34 قبل و پس از بازیخت با حرارت ۳۵۰ °C

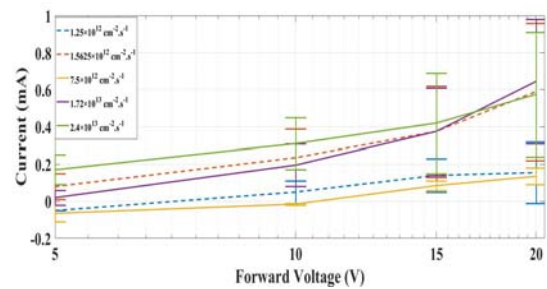
همان گونه که مشاهده می شود، بازیخت سبب کاهش جریان نشتی شده است که این امر به سبب افزایش موبیلیتی به تبع آن افزایش بازترکیب صورت پذیرفته است. بازیخت تاثیر چندانی بر جریان مستقیم نداشته است. هرچند بدون تکرارپذیری نمی توان قاطع نتیجه گیری نمود اما ممکن است بتوان با افزایش دما، قسمتی از آسیب ناشی از نقص ها را جبران نمود.

## بحث و نتیجه گیری

برخورد ذرات باردار به اتم های سیلیکون و اتلاف انرژی غیریونیزان این ذرات سبب خروج اتم سیلیکون از جایگاه خود در شبکه و تولید یک PKA می شود. نقص های ایجاد شده در شبکه سیلیکونی سبب تغییر برخی خواص الکتریکی قطعه سیلیکونی می شوند. نقص ها بسته به تراز انرژی آن ها درگاف انرژی، پارامترهای ماکروسکوپی قطعه را دچار تغییر می کند. با افزایش شار تابش فرودی تولید نقص هایی با سطوح نزدیک به مرکز گاف انرژی که به عنوان مراکز تولید و بازترکیب حامل عمل می کنند، افزایش می یابد. الکترون ها می توانند از لایه ظرفیت به تراز نقص برانگیخته شده و از آن جا با محرک حرارتی بسیار راحت تر از گذار مستقیم به باند هدایت بروند. به همین دلیل، ترازهای انرژی نزدیک به مرکز گاف انرژی تولید جفت های حامل بار آزاد کرده و سبب افزایش جریان نشتی پس از تابش می شوند.

نتایج بدست آمده از محاسبه جریان نشتی یک دیود سیلیکونی نوع p در معرض شارش های متفاوت تابش های پروتونی در مدار مفروض نشان می دهد که جریان نشتی با افزایش شار پروتون های فرودی تا  $2/1 \times 10^{12}$  p/cm<sup>2</sup> در حدود ۱/۸۵ برابر مقدار آن قبل

$10^{12} \times 1/25$  و  $10^{12} \times 1/56$ ، دلیل قطع برق دستگاه دوباره راه اندازی شد و پروفایل باریکه تغییر نمود؛ لذا با در نظر گرفتن این امر همانطور که گفته شد، می توان دید که با افزایش جریان تابشی فرودی تغییرات و شیب جریان مستقیم قطعه افزایش می یابد. البته این روند برای دو شار  $10^{13} \times 1/72$  و  $2/4 \times 10^{13}$  تا قبل از ولتاژ ۱۷ V صادق نمی باشد که ممکن است ناشی از تغییرات پروفایل باریکه باشد.



شکل ۱۷ - تغییرات جریان مستقیم فوتودیودهای نوع BPW34 پس از تابش با شارهای تابشی مختلف از پروتون های ۳۰ MeV

در ادامه یکی از فوتودیودهای پرتودیده با دمای ۳۵۰ °C به منظور بررسی اثر دما بر بازترکیب نقص ها، حرارت داده شد. رفتار قطعه قبل و بعد از بازیخت در جداول ۲ و ۳ و شکل های ۱۸ و ۱۹ آورده شده است.

جدول ۲ - رفتار جریان نشتی فوتودیودهای نوع BPW34 پس از تابش با پروتون های ۳۰ MeV، قبل و پس از بازیخت

ولتاژ (V)	جریان نشتی قبل از بازیخت (nA)	جریان نشتی بلافاصله پس از بازیخت (nA)	جریان نشتی ۴ روز پس از بازیخت (nA)	جریان نشتی حدود یک ماه پس از بازیخت (nA)
۰	-۱۶/۹	-۱۰/۶	-۱۶/۷	-۱۳/۸
۵	۱۰۶/۴	۶۰	۷۶/۹	۵۹/۵
۱۰	۱۴۲/۸	۸۱/۸	۱۰۲/۵	۷۹/۴
۱۵	۱۷۲/۴	۹۹/۲	۱۲۳/۳	۹۵/۵
۲۰	۱۹۸/۲	۱۱۵/۱	۱۴۱/۸	۱۰۹/۷
۲۵	۲۲۱/۴	۱۲۹/۲	۱۵۸/۳	۱۲۲/۶
۳۰	۲۴۲/۵	۱۴۲/۳	۱۷۳/۱	۱۳۴/۶

جدول ۳ - رفتار جریان مستقیم فوتودیودهای نوع BPW34 پس از تابش با پروتون های ۳۰ MeV، قبل و پس از بازیخت

ولتاژ (V)	جریان مستقیم قبل از بازیخت (mA)	جریان مستقیم بلافاصله پس از بازیخت (mA)	جریان مستقیم ۴ روز پس از بازیخت (mA)
۰	۰	۰	۰
۰/۵	۰/۱۶۸	۰/۱۶۷	۰/۱۳۶
۱	۰/۵۰۸	۰/۶۷۵	۰/۵۶۰
۵	۴/۲۶۰	۴/۲۶۰	۴/۲۰۰
۱۰	۸/۹۷۰	۸/۹۷۰	۹/۳۰۰
۱۵	۱۳/۸۰۰	۱۳/۸۱۰	۱۳/۷۹۰
۲۰	۱۸/۶۵۰	۱۸/۷۴۰	۱۸/۷۰۰

- [8] Jun, I., Xapsos, M.A., Messenger, S.R., Burke, E.A., Walters, R.J., Summers, G.P. and Jordan, T., "Proton nonionizing energy loss (NIEL) for device applications," *IEEE Transactions on Nuclear Science*, Vol. 50, No. 6, 2003, pp. 1924-1928.
- [9] Srour, J.R. and Palko, J.W., "A Framework for Understanding Displacement Damage Mechanisms in Irradiated Silicon Devices," *IEEE Transactions on Nuclear Science*, Vol. 53, No. 6, 2006, pp. 3610-3620.
- [10] Li, H. and et al., "The evolution of interaction between grain boundary and irradiation-induced point defects: Symmetric tilt GB in tungsten," *Journal of Nuclear Materials*, Vol. 500, 2018, pp. 42-49.
- [11] Shoorian, S., Jafari, H. and Feghhi, S.A.H., "Investigating and calculating the leakage current of silicon diode exposed to sputtering of protons using carrier lifetime changes," *25<sup>th</sup> Iranian Nuclear Conference*, 2020.
- [12] OMERE website. Available, [on line]: <http://www.trad.fr/OMERE-Software.html>.
- [13] *User manual of Silvaco ATLAS- Device Simulation Software [online documents], Silvaco Inc. 2013.*
- [14] Agostinelli, S. and et al othets, "GEANT4 - a simulation toolkit," *Nucl. Instr. Meth.A*, Vol. 506, No. 3, pp. 250-303.
- [15] Silvaco International, *ATLAS User's Manual (vol I & II)*, 1998.
- [16] James F., Ziegler, M. D. and Biersack, J. P. Ziegler, M. D., Biersack, J. P., *SRIM - "The stopping and range of ions in matter," Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B*, Vol. 268, Issue 11-12, 2010, pp. 1818-1823.
- [17] Shockley, W. and W.T. Read, "Statistics of the Recombinations of Holes and Electrons," *Physical Review*, Vol. 8, No. 5, 1952, pp. 835-842.
- [18] Dowell, J.D.H., Kenyon, R. J., Mahout, I. R. and et al. "Irradiation tests of photodiodes for the ATLAS SCT readout," *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research. Section A, Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, Vol. 424, No. 2-3, 1999, pp. 483-494.
- [19] Akkerman, A. and et al., "Updated NIEL calculations for estimating the damage induced by particles and  $\gamma$ -rays in Si and GaAs," *Radiation Physics and Chemistry*, Vol. 62, No. 4, 2001, pp. 301-310.
- [20] Jafari, H. and Feghhi, S.A.H., "Analytical modeling for gamma radiation damage on silicon photodiodes," *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, Vol. 816, 2016, pp. 62-69.
- [21] Thomas L. Floyd, Y.Y., Yanhui Zhang, *Electronic Devices*. 8<sup>th</sup> ed. April 6th 2007: Prentice Hall.
- [22] S. Sedra, A. and C. Smith, K., *Microelectronic Circuits*, USA: Oxford University Press, 2003, p. 1392.
- [23] Abarbakooh, A. L. and et al., Measurement of proton energy output from C-30 cyclotron in Karaj, Master's Thesis, K. N. Toosi University of Technology, 2002 (in persian)
- [24] Topper, A.D. and et al., "Compendium of Current Total Ionizing Dose and Displacement Damage Results from NASA Goddard Space Flight Center and NASA Electronic Parts and Packaging Program," *To be published in the Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE) Nuclear and Space Radiation Effects Conference (NSREC), Radiation Effect Data Workshop proceedings*, New Orleans, Louisiana, July 17-21, 2017.

از تابش افزایش پیدا می‌کند و به حدود  $2/96 \text{ nA}/\mu\text{m}$  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 شبیه‌سازی تنها به بررسی اثر نقص‌های جابجایی پرداخته شد. بر اساس مدل چهار لایه‌ای، جفت فرنگل‌های تولید شده باعث بوجود آمدن چهار تراز انرژی جدید در باند ممنوعه می‌شوند که سه عدد از آن‌ها تراز پذیرنده‌گون و یکی از آن‌ها ترازبخشنده‌گون است. در شبیه‌سازی انجام شده در این کار، تاثیر شکل‌گیری ترازهای نقص‌های بخشنده‌گون بر پارامترهای الکتریکی قطعه مورد بررسی قرار گرفته است. در آزمایش‌های عملی انجام گرفته، با پرتوگیری فوتودیودها، جریان نشتی آن‌ها تا حدود ۱۰۰۰ برابر افزایش یافت. از آن‌جاکه در آزمایش‌های عملی، تغییرات پارامترهای الکتریکی ناشی از شاری از پرتوها به بزرگی  $10^{12} \text{ cm}^{-2}$  بوده و تمامی انواع نقص‌ها و خطاهای محیط، آزمایشگر و وسایل اندازه‌گیری نیز در آن تاثیرگذار می‌باشند، مقدار کمی نتایج را نمی‌توان با هم مقایسه نمود.

در همین راستا می‌توان محاسبات بیشتری نیز به‌منظور 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.

## مراجع

- [1] Bagatin, M.E., Gerardin, S. (Ed.), *Ionizing Radiation Effects in Electronics*, Boca Raton, 2016:.
- [2] Hönniger, F., *Radiation damage in silicon: Defect analysis and detector properties*. 2008, (Hamburg U.). p. 187.
- [3] Shoorian, S., Jafari, H. and Feghhi, S.A.H., "Investigating and Calculating of Silicon Displacement defect due to irradiation on Photodiodes Using Carrier Lifetime Changes," *25<sup>th</sup> ICOP and 11th ICEPT*, 2019.
- [4] Srour, J.R., Marshall, C.J. and Marshall, P.W., "Review of Displacement Damage Effects in Silicon Devices," *IEEE Transactions on Nuclear Science*, Vol. 50, Issue. 3, 2003, pp. 653 - 670.
- [5] Dale, C.J., et al., "A comparison of Monte Carlo and analytic treatments of displacement damage in Si microvolumes." *IEEE Transactions on Nuclear Science*, Vol. 41, No. 6, 1994, pp. 1974-1983.
- [6] Messenger, S.R., Xapsos, M.A., Burke, E.A., Walters, R.J. and Summers, G.P., "Proton Displacement Damage and Ionizing Dose for Shielded Devices in Space," *IEEE Transactions on Nuclear Science*, Vol. 44, Issue. 6, 1997, pp. 2169 - 2173.
- [7] Summers, G.P., Burke, E.A., Shapiro, P., Messenger, S.R., and Walters, R.J., "Damage correlations in semiconductors exposed to gamma, electron and proton radiations," *IEEE Transactions on Nuclear Science*, Vol. 40, No. 6, 1993, pp. 1372-1379.