

Original Research Paper**A Simulation Study of Single Event Burnout (SEB) in a High-Voltage PiN Diode****Masume Soleimaninia*** 

Nuclear Science and Technology Research Institute, Atomic Energy Organization of Iran, Tehran, Iran

ARTICLE INFO**Article History:**

Received 03 April 2024

Revised 08 June 2024

Accepted 10 June 2024

Available Online 23 June 2024

Keywords:

Pin diode

Linear Energy Transfer (LET)

Single Event Burnout (SEB)

Silvaco TCAD

SRIM

ABSTRACT

Exposure to ionizing radiation in space can potentially destroy electronic devices due to single-event effects (SEEs). Developing modern space technology requires high-voltage devices to supply demand for the increased electric power. A widely recognized problem for power electronic devices in space is single event burnout (SEB), which is a destructive form of SEE. SEB is a catastrophic failure in a high-voltage device initiated by the passage of high-energy particles during the device's OFF state (reverse bias). Consequently, these devices may lose their performance in space applications. This research investigates the occurrence of SEB in a high-voltage PiN diode through simulation using the Silvaco TCAD tool. The necessity of this investigation stems from the increased use of high-voltage components in spacecraft. To achieve this, a PiN diode with a breakdown voltage of 3.3 kV was simulated in the Silvaco TCAD tool, considering the appropriate physical models. Subsequently, the diode's characteristic curve was obtained. In the next step, an incident beam with varying values of linear energy transfer (LET) related to carbon ions was irradiated onto the diode. The variations in carrier concentration, current, and electric field were studied. The results indicate that when ions strike the diode, the electric field increases up to five times, and the concentration of carriers rises significantly, leading to a sharp increase in device current and a temperature rise to 1800 K, beyond the melting point of silicon. This condition suggests failure due to burnout from local heating caused by the multiplication of ion-generated carriers in the simulated PiN diode, which is consistent with earlier research experiments. Based on these results, the capability of the Silvaco tool to simulate SEB has been confirmed.

*Corresponding Author's E-mail: msoleimaninia@aeoi.org.ir**How to Cite this Article:**M. Soleimaninia, "A simulation study of single event burnout (SEB) in a high-voltage pin diode," *Journal of Space Science and Technology*, Vol. 17, No. 3, pp. 71-82, 2024, (in Persian), <https://doi.org/10.22034/jsst.2024.1482>.**COPYRIGHTS**© 2024 by the authors. Published by Aerospace Research Institute. This article is an open access article distributed under the terms and conditions of [The Creative Commons Attribution 4.0 International \(CC BY 4.0\)](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/).

مقاله پژوهشی

بررسی رخداد سوختن تک‌حادثه‌ای (SEB) در یک دیود پین ولتاژ - بالا به کمک شبیه‌سازی

معصومه سلیمانی‌نیا* 

دکتری، پژوهشگاه علوم و فنون هسته‌ای، سازمان انرژی اتمی ایران، تهران، ایران

چکیده

به‌کارگیری قطعات الکترونیک در فضا، پتانسیل تخریب آن‌ها را به دلیل وقوع رخدادهای تک‌حادثه‌ای (SEE) به دنبال خواهد داشت که دسته‌بندی‌های متعددی برای آن وجود دارد. یکی از این دسته‌بندی‌ها که به‌طور گسترده بر عملکرد قطعات ولتاژ-بالا در کاربردهای فضایی تأثیر می‌گذارد، رخداد سوختن تک‌حادثه‌ای (SEB) است که با عبور ذرات پرانرژی از این قطعات در وضعیت بایاس معکوس روی می‌دهد و سبب از بین رفتن عملکرد صحیح و در نهایت، سوختن آن‌ها می‌شود. در این پژوهش، وقوع رخداد SEB در یک دیود PiN ولتاژ - بالا به کمک شبیه‌سازی با استفاده از نرم‌افزار Silvaco TCAD مورد بررسی قرار گرفته است. ضرورت این بررسی، به واسطه استفاده روزافزون قطعات ولتاژ-بالا در سامانه‌های فضایی ایجاد شده است. برای این منظور در ابتدا، ساختار یک دیود پین با ولتاژ شکست ۳/۳ کیلوولت به کمک مدل‌های فیزیکی مناسب در نرم‌افزار، شبیه‌سازی و منحنی مشخصه آن به‌دست آورده شد. در این پژوهش، یون‌های کربن به عنوان یکی از یون‌های موجود در فضا انتخاب شدند. در گام بعد، یون‌های فرودی کربن با مقادیر مختلف LET به آن تابانیده و تغییرات ایجاد شده در غلظت حامل‌ها، همچنین جریان و میدان الکتریکی مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان دادند پس از برخورد یون‌ها، میدان الکتریکی به شکل موضعی تا ۵ برابر افزایش یافته و غلظت حامل‌ها زیاد می‌شود که منجر به افزایش شدید جریان و نیز افزایش دما تا ۱۸۰۰ درجه کلون (فراتر از نقطه ذوب سیلیکون) می‌گردد. این شرایط نشان‌دهنده از کارافتادگی و سوختن دائمی دیود در نتیجه ایجاد گرمایش موضعی است که به واسطه تکثیر بسیار زیاد حامل‌ها در میدان الکتریکی بالای درون قطعه به وجود آمده است. نتیجه حاصل، با آزمون‌های تجربی که پیشتر توسط محققان انجام شده بود، مطابقت دارد. بدین ترتیب، توانمندی نرم‌افزار Silvaco برای شبیه‌سازی رخداد SEB مورد تأیید قرار می‌گیرد.

اطلاعات مقاله

تاریخچه مقاله:

دریافت ۱۵ فروردین ۱۴۰۳

بازنگری ۱۹ خرداد ۱۴۰۳

پذیرش ۲۱ خرداد ۱۴۰۳

اولین انتشار ۳ تیر ۱۴۰۳

واژه‌های کلیدی:

دیود پین

انتقال خطی انرژی

رخداد سوختن تک‌حادثه‌ای (SEB)

Silvaco TCAD

SRIM

*پست الکترونیکی نویسنده مسئول: msoleimaninia@aeoi.org.ir

How to Cite this Article:

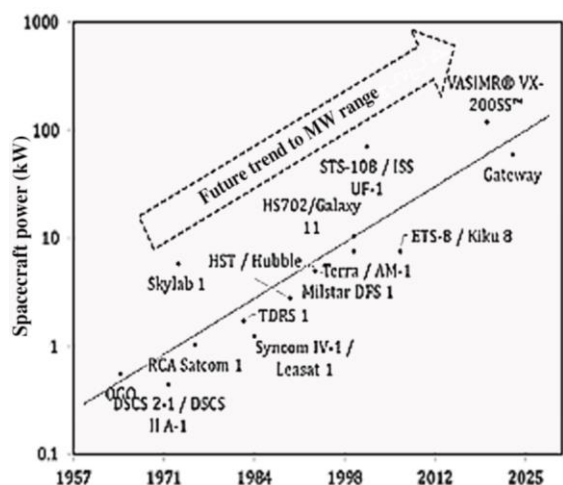
M. Soleimaninia, "A simulation study of single event burnout (SEB) in a high-voltage pin diode," *Journal of Space Science and Technology*, Vol. 17, No. 3, pp. 71-82, 2024, (in Persian), <https://doi.org/10.22034/jsst.2024.1482>.



COPYRIGHTS

© 2024 by the authors. Published by Aerospace Research Institute. This article is an open access article distributed under the terms and conditions of [The Creative Commons Attribution 4.0 International \(CC BY 4.0\)](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/).





شکل ۱- افزایش میزان توان مصرفی در فضاپیماها در گذر زمان [۲].

Fig. 1. The increase of power in spacecrafts in time [2].

تغییر در عملکرد یا از کارافتادن قطعات ولتاژ- بالا در فضاپیماها و ماهواره‌ها از پرتوهای کیهانی موجود در فضا نتیجه می‌شود. سه منبع اصلی پرتوهای یونساز در فضا، پرتوهای کیهانی، ذرات تولید شده ناشی از طوفان‌های خورشیدی و ذرات به دام‌افتاده در کمربند مغناطیسی زمین (کمربند ون‌آلن) می‌باشند. پرتوهای کیهانی که منشأ آن‌ها خارج از منظومه شمسی می‌باشد، متشکل از پروتون‌ها و یون‌های سنگین هستند. در رویدادهایی نادر، انرژی یون‌های سنگین تا حد 10^{20} eV گزارش شده است [۴]. از دهه ۱۹۶۰، زمانی که اولین ماهواره‌ها در مدار قرار گرفتند، اثرات نامطلوب تشعشعات بر روی قطعات الکترونیک، بسیار مورد توجه قرار گرفتند. به‌طور کلی، قرارگیری قطعات الکترونیک در معرض انواع مختلف پرتو در کاربردهای فضایی می‌تواند موجب آسیب و بروز اختلال در عملکرد آن‌ها شود. پرتوگیری این قطعات ممکن است منجر به از دست رفتن موقتی داده‌ها تا از کار افتادن دائمی آن‌ها گردد. اثرات پرتو بر قطعات الکترونیک به دو گروه کلی اثرات انباشته و اثرات تک‌حادثه‌ای (SEE) تقسیم می‌شوند [۵]. اثرات انباشته، تغییرات تدریجی در پارامترهای عملکردی قطعه به وجود می‌آورند، در حالی که اثرات تک‌حادثه‌ای موجب بروز تغییرات ناگهانی دائم و یا رفتارهای گذرا در مدار می‌شوند. این اثرات، دسته‌بندی‌های متعددی دارند که هر یک قطعات مشخصی را تحت تأثیر قرار می‌دهند. به عنوان مثال، به‌هم‌ریختگی‌های تک‌حادثه‌ای (SEU) عمدتاً حافظه‌ها را متأثر می‌سازند [۶]. دسته‌ای دیگر از رخداد‌های SEE که قطعات ولتاژ بالا همچون دیودها و ماسفت‌های توان را تحت تأثیر قرار می‌دهند، رخداد SEB است که پس از برخورد ذرات با انرژی بالا، تغییر آنی در پاسخ قطعه به وجود آورده و منجر به خرابی کامل قطعه خواهد گردید [۷].

علائم و اختصارات

| | |
|---|----------------------------|
| Breakdown Voltage (VBD) | ولتاژ شکست |
| Bipolar Junction Transistor (BJT) | ترانزیستور دوقطبی پیوندی |
| Displacement Damage | آسیب جابه‌جایی |
| Linear Energy Transfer (LET) | انتقال خطی انرژی |
| Single Event Effect (SEE) | اثرات تک‌حادثه‌ای |
| Single Event Burnout | سوختن تک‌حادثه‌ای |
| Total Ionizing Dose | دز یونیزان کل |
| Technology Computer Aided Design (TCAD) | طراحی فناوری به کمک رایانه |

مقدمه

صنعت هوافضا طی دهه‌های اخیر، رشد چشم‌گیری را تجربه کرده و این‌گونه به نظر می‌رسد که این روند، همچنان تداوم داشته باشد. در راستای اجرای پلتفرم‌های فضایی در مقیاس بزرگ مانند ایستگاه‌های فضایی و ماهواره‌های بزرگ، تولید برق به‌زودی به سطح مگاوات خواهد رسید [۱]. چنانچه در شکل ۱ نشان داده شده است، افزایش توان مصرفی در فضاپیماها ظرف سال‌های اخیر، رشد چشم‌گیری داشته و تقاضا برای قطعات نیمه‌هادی ولتاژ- بالا را افزایش داده است. با توجه به این نمودار انتظار می‌رود، روند ثابت افزایش تقاضای انرژی در آینده رشد کند [۲]. فناوری‌های آینده ذخیره توان و انرژی برای پلتفرم‌های تحقیقات فضایی باید بتواند با قابلیت اطمینان بالایی بدون تعمیر و نگهداری به مدت بیش از ۳۰ سال در فضا دوام بیاورد. در سال ۲۰۱۶، سازمان ملی هوانوردی و فضایی (ناسا)¹، اولویت نخست فناوری‌های فضایی آینده در فضاپیماها را توسعه پیشران‌های الکتریکی معرفی نمود که در آن‌ها قطعات نیمه‌هادی توان- بالا به‌کار گرفته می‌شوند و باید ظرف چندین دهه در محیط‌های با مقادیر بالای پرتو فعالیت کنند. از این‌رو، استفاده از قطعات ولتاژ بالا در فضاپیماها و سیستم‌های پیشران مدرن کنونی، امری ضروری و اجتناب‌ناپذیر است [۳].

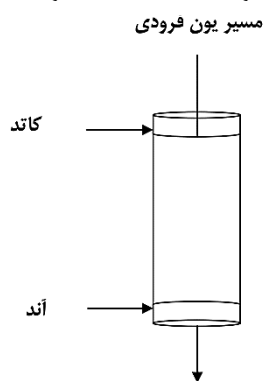
1. National Aeronautics and Space Administration (NASA)

استفاده از نرم افزار Silvaco TCAD انجام شده و توانمندی این نرم افزار در پیش بینی وقوع این رخداد مورد بررسی قرار خواهد گرفت.

روش انجام کار

مدل سازی قطعات نیمه رسانا با استفاده از شبیه سازی های عددی، حاوی اطلاعات سودمندی پیرامون چگونگی عملکرد آنهاست. نرم افزار Silvaco TCAD که برای این پژوهش مورد استفاده قرار گرفته است، یک برنامه کامپیوتری است که توانایی شبیه سازی قطعات الکتریکی به صورت دو بعدی و سه بعدی را داراست. به کمک این شبیه ساز، خواص الکتریکی انواع مختلف قطعات با معادلات برگرفته از قوانین ماکسول پیش بینی می شود [۱۸].

به منظور بررسی رخداد SEB، یک دیود پین با ساختار نشان داده شده در شکل ۲، متشکل از لایه های N و P در نقش آند و کاتد با مقادیر دوپینگ نشان داده شده در جدول ۱ در نظر گرفته شد. چنانچه در شکل ۲ نشان داده شده است، یون های فرودی، به ساختار دیود پین با ولتاژ شکست ۳۳۰۰ ولت تابانیده شدند.



شکل ۲- ساختار مورد استفاده در شبیه سازی دیود پین.

Fig. 2. The simulated structure of PiN diode.

پارامترهای مختلف مربوط به ساختار شبیه سازی شده، در جدول ۱ آورده شده است.

جدول ۱- پارامترهای به کار گرفته شده در شبیه سازی ساختار دیود.

Table 1. The used parameters in simulation of the diode structure.

| Region | Length (μm) | Doping (cm^{-3}) |
|--------|--------------------------|-----------------------------|
| n^+ | 20 | 1×10^{18} |
| n^- | 300 | 3×10^{13} |
| p^+ | 20 | 1×10^{18} |

هنگامی که پرتو به ماده نیمه هادی برخورد می کند، بخشی از انرژی خود را ضمن مکانیزم های یونش و یا برانگیزش اتم ها از دست

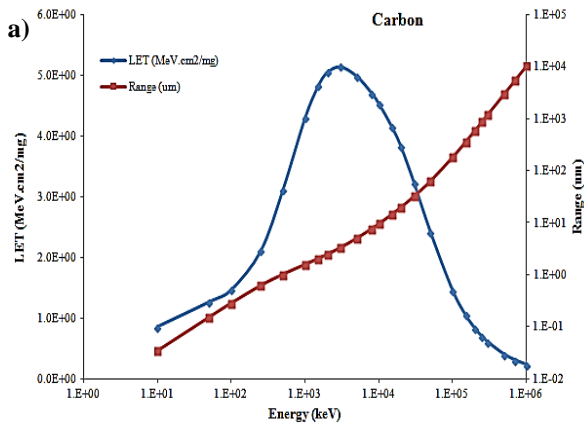
ایده اصلی این پژوهش، بر مبنای نیاز روزافزون به استفاده از قطعات ولتاژ بالا در کاربردهای فضایی است که با افزایش ولتاژ اعمال شده، احتمال از کارافتادگی و سوختن آنها در نتیجه رخداد SEB در نتیجه اندرکنش پرتوهای کیهانی افزایش خواهد یافت [۸].

رخداد SEB نخستین بار در سال ۱۹۸۶ در ماسفت های توان گزارش شد و سبب از کارافتادن آنها گردید [۹]. پس از آن، Titus و همکارانش وقوع این پدیده را در ترانزیستورهای دوقطبی BJT گزارش دادند [۱۰]. برای نخستین بار در سال ۱۹۹۴، حساسیت دیودهای توان نیز نسبت به SEB توسط Kabza و همکاران، مشاهده گردید [۱۱]. Zeller و همکارانش، مدلی توسعه دادند که میزان از کارافتادگی را بر پایه وابستگی به بایاس اعمال شده توصیف می کرد که انطباق قابل قبولی با داده های تجربی داشت [۱۲].

با توسعه فناوری در سال های اخیر، پژوهش های متعددی پیرامون این رخداد بر روی انواع ترانزیستورها با ساختارها و مواد سازنده مختلف، همچنین احتمال وقوع آنها انجام گرفت [۱۷-۱۳]. انجام تجربی آزمون های پرتویی از این دست برای قطعات و فناوری های مختلف، به دلیل ماهیت مخرب آنها، امری پرهزینه، زمان بر و چالش برانگیز است. از طرف دیگر، با توجه به این که قابلیت اطمینان عملکرد سیستم های توان-بالا برای مأموریت های فضایی بسیار حائز اهمیت است، درک کامل مکانیزم از کار افتادن این دسته از سیستم ها می تواند زمینه ساز ارائه راه کارهایی جهت بهبود عملکرد آنها باشد. یکی از راهکارهای متداول مورد استفاده برای رسیدن به این مهم، مدل سازی و شبیه سازی است.

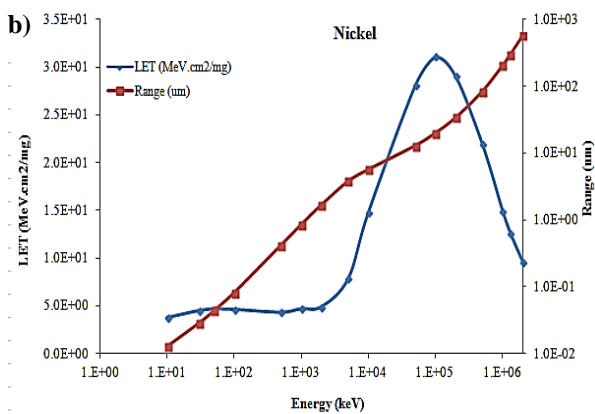
دیودها، ساده ترین ساختار را در بین قطعات نیمه هادی دارا هستند که کاربردهای فراوانی در ماهواره ها و فضاییماها دارند. یکی از انواع دیودها، دیود پین است که در سوئیچینگ RF و فوتودیودها بسیار پر کاربرد می باشد. این دیود، شامل سه لایه N، P و i است که لایه i با دوپینگ ذاتی بین دو لایه N و P قرار دارد. لایه های N و P با دوپینگ بالا، پایانه های مثبت و منفی قطعه یعنی آند و کاتد را تشکیل می دهند. لایه i به عنوان عایق عمل کرده و یک میدان الکتریکی بالا به وجود می آورد که سبب ایجاد حرکت حامل های بار می گردد. از آنجا که ساختار P-i-N در بیشتر قطعات ولتاژ بالا وجود دارد، بررسی رخداد مخرب SEB، در ساختار ساده دیود پین می تواند بینش عمیقی پیرامون علل وقوع آن فراهم آورد.

با توضیحات فوق، در این پژوهش، مکانیزم وقوع از کارافتادگی و سوختن یک دیود پین با ولتاژ شکست ۳۳۰۰ ولت (V_{BD}) به کمک شبیه سازی مورد بررسی قرار گرفته است. بدین منظور، یون های کربن، نیکل و کریبتون با مقادیر مختلف LET انتخاب شده اند. شبیه سازی ها با



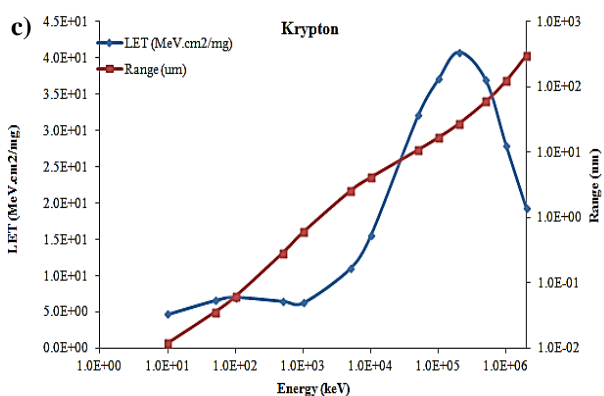
شکل ۳- الف) نمودار برد و توان ایستاندگی یون‌های کربن درون سیلیکون.

Fig. 3. a) Range and LET of Carbon ions in the silicon.



شکل ۳- ب) نمودار برد و توان ایستاندگی یون‌های نیکل درون سیلیکون.

Fig. 3. b) Range and LET of Nickel ions in the silicon.



شکل ۳- ج) نمودار برد و توان ایستاندگی یون‌های کریپتون درون سیلیکون.

Fig. 3. c) Range and LET of Krypton ions in the silicon.

داده و تعداد زیادی الکترون- حفره در امتداد طول مسیر خود ایجاد می‌نماید. مقدار میانگین انرژی از دست داده ذره بر واحد طول مسیر با مفهوم انتقال خطی انرژی بیان شده و از آن تحت عنوان LET یاد می‌شود. این کمیت، معمولاً به چگالی ماده هدف بهنجار شده و بر حسب $\text{MeV.cm}^2/\text{mg}$ بیان می‌شود. کمیت مذکور در نرم‌افزار Silvaco TCAD با عبارت دستوری LET بیان می‌شود. در سیلیکون که ماده غالب مورد استفاده در ادوات نیمه‌هادی است، تقریباً $3/6 \text{ eV}$ انرژی صرف ایجاد یک جفت الکترون- حفره می‌شود [۱۹]. ماهیت برخورد یون به قطعه الکترونیک، ذاتاً سه‌بعدی است که برای ساختارهای متقارن، می‌توان آن را با شبیه‌سازی‌های دو بعدی جایگزین نمود.

در این پژوهش، برای شبیه‌سازی از مدل دریافت- دیفیوژن استفاده گردید. علاوه بر آن، مدل یونش برخوردی^۱ نیز به کار گرفته شد، چون با گرادپان بزرگی از میدان الکتریکی به هنگام برخورد ذره فرودی مواجه هستیم [۲۰]. اطلاعات مربوط به شبیه‌سازی یون فرودی در جدول ۲، نشان داده شده است. شایان ذکر است که شبیه‌سازی‌ها به ازای یون‌های فرودی کربن، نیکل و کریپتون انجام شد که از جمله یون‌های فراوان موجود در فضا بوده و با توجه به آزمایشات تجربی انجام شده در مرجع [۲۱]. سبب ایجاد از کارافتادگی و بروز آسیب به قطعات ولتاژ- بالا شده‌اند. بدین منظور، عمق‌های مختلفی از بار برجا گذاشته شده با توجه به انرژی یون فرودی، در نظر گرفته و جریان گذرای ناشی از آن‌ها درون قطعه مورد بررسی قرار گرفت.

جدول ۲- پارامترهای مورد استفاده در شبیه‌سازی به هنگام برخورد یون فرودی.

Table 2. The used parameters in the simulations.

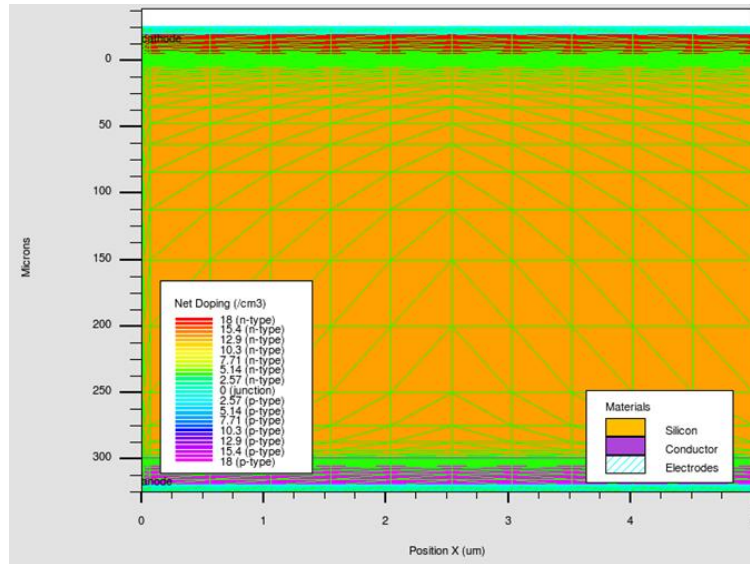
| Parameter | Value |
|------------------------------|-------------------------------------|
| Linear Energy Transfer (LET) | 0.025-2 $\text{MeV.cm}^2/\text{mg}$ |
| Track Radius | 0.05 μm |
| Track Length | Due to the ion range in the device |
| Temperature | 300 K |

برای انجام شبیه‌سازی‌ها در گام نخست، با استفاده از SRIM نمودار برد و توان ایستاندگی یون‌های کربن، نیکل و کریپتون به ازای انرژی‌های مختلف، مطابق با منحنی‌های شکل ۳ (الف، ب، پ)، به‌دست آمد [۲۲].

نتایج و بحث

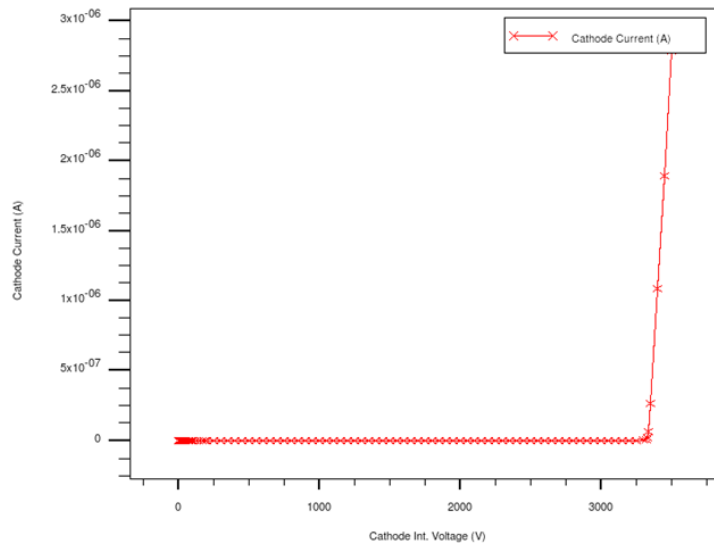
و همچنین منحنی مشخصه بایاس معکوس آن در نرم افزار Silvaco و همچنین منحنی مشخصه بایاس معکوس آن در نرم افزار Silvaco را نشان می دهند.

شکل های ۴ و ۵، ساختار شبیه سازی شده دیود به همراه مش بندی



شکل ۴- ساختار مش بندی به کار گرفته شده در شبیه سازی دیود پین.

Fig. 4. The used meshing structure in the simulation of PiN diode.



شکل ۵- منحنی مشخصه بایاس معکوس دیود پین در نرم افزار Silvaco.

Fig. 5. The characteristic curve of the PiN diode in the reverse bias mode in Silvaco tool.

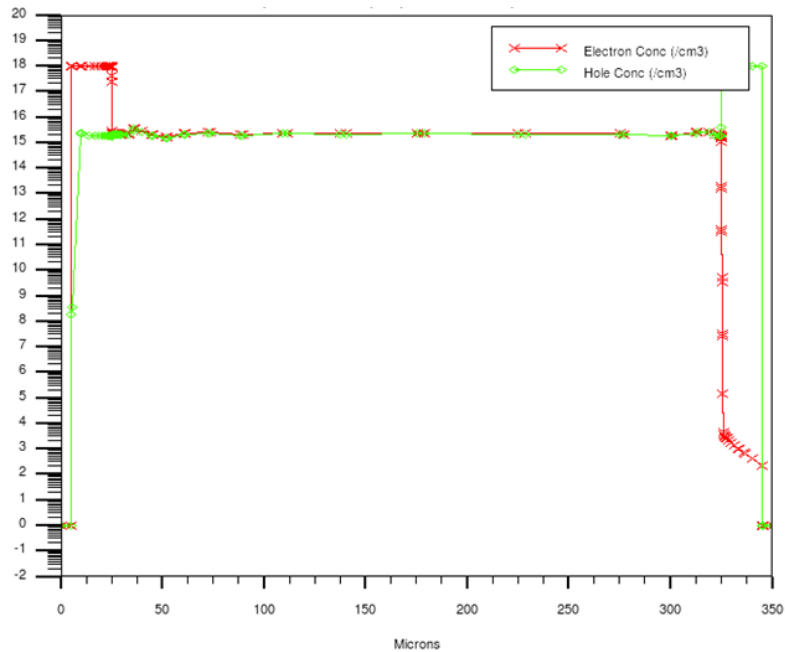
می شوند. حامل های برجا گذاشته شده، در نتیجه میدان الکتریکی به سمت الکترودها سوق یافته و به دلیل وجود گرادیان غلظت در نواحی مختلف در راستای شعاعی، پخش ۲ می شوند. افزایش شدید حامل ها و تجمع آنها

نتایجی که در ادامه آورده شده است، مربوط به یون های فرودی کربن می باشند. پس از برخورد این یون ها، جفت الکترون- حفره های ایجاد شده، به واسطه وجود میدان الکتریکی درون دیود از هم جدا

1. Drift
2. Diffuse

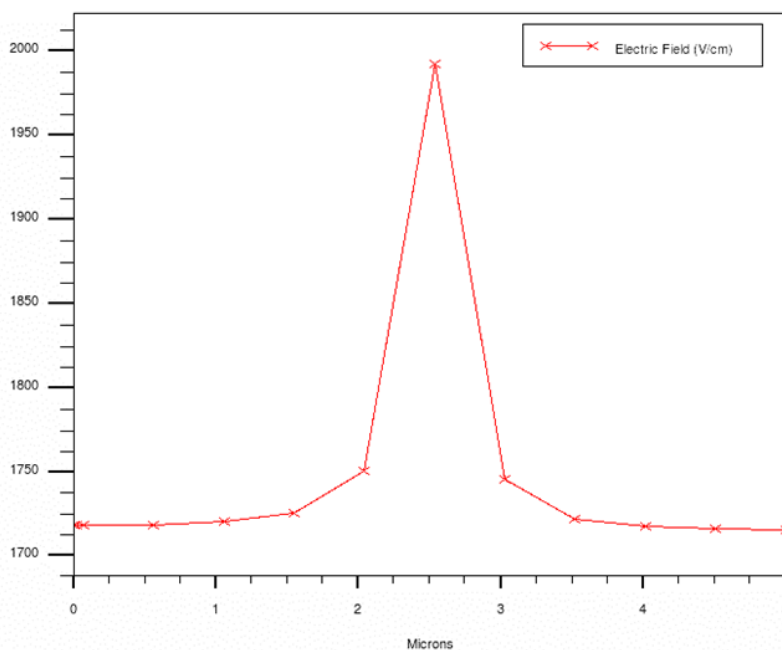
به مقدار اولیه باز می‌گردد. بارهای برجا گذاشته شده ناشی از برخورد یون فرودی، غلظت حامل‌های اولیه را تغییر داده و میدان الکتریکی به موجب آن افزایش می‌یابد. افزایش میدان الکتریکی در نقطه برخورد یون فرودی، در دو راستای x و y، در شکل ۷ (الف و ب) نشان داده شده است.

در اطراف الکترودهای آند و کاتد در شکل ۶ قابل مشاهده می‌باشد. چنانچه در این شکل نشان داده شده است، حفره‌ها به سمت آند و الکترون‌ها به سمت کاتد جریان می‌یابند. این پدیده گذرا بوده و در انتهای مسیر یون، دانسیته حامل‌ها به دلیل باز ترکیب آن‌ها کاهش یافته و جریان



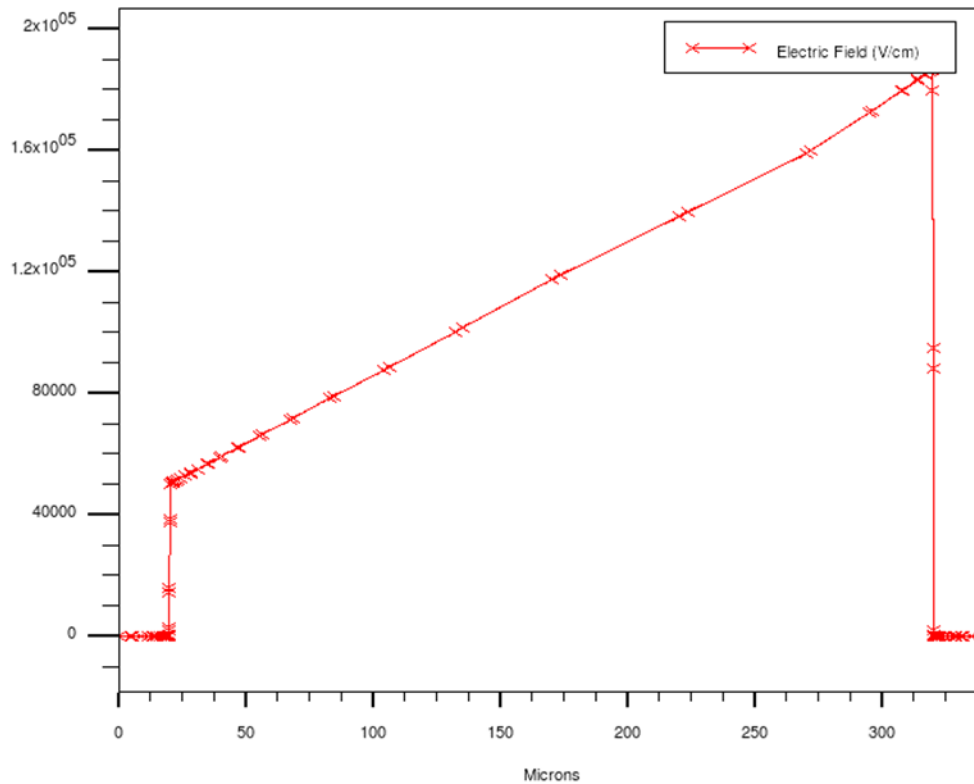
شکل ۶- تجمع الکترون‌ها و حفره‌ها در اطراف کاتد و آند در نخستین لحظات پس از برخورد یون فرودی.

Fig. 6. Electron- hole concentration around the anode and cathode electrodes in the initial time after ion strike.



شکل ۷- الف)- تغییرات میدان الکتریکی در امتداد محور x درون دیود پس از برخورد یون فرودی.

Fig. 7. a) The variation of the electric field in the device along x axis after the ion strike.



شکل ۷-ب) تغییرات میدان الکتریکی در امتداد محور y درون دیود پس از برخورد یون فرودی.

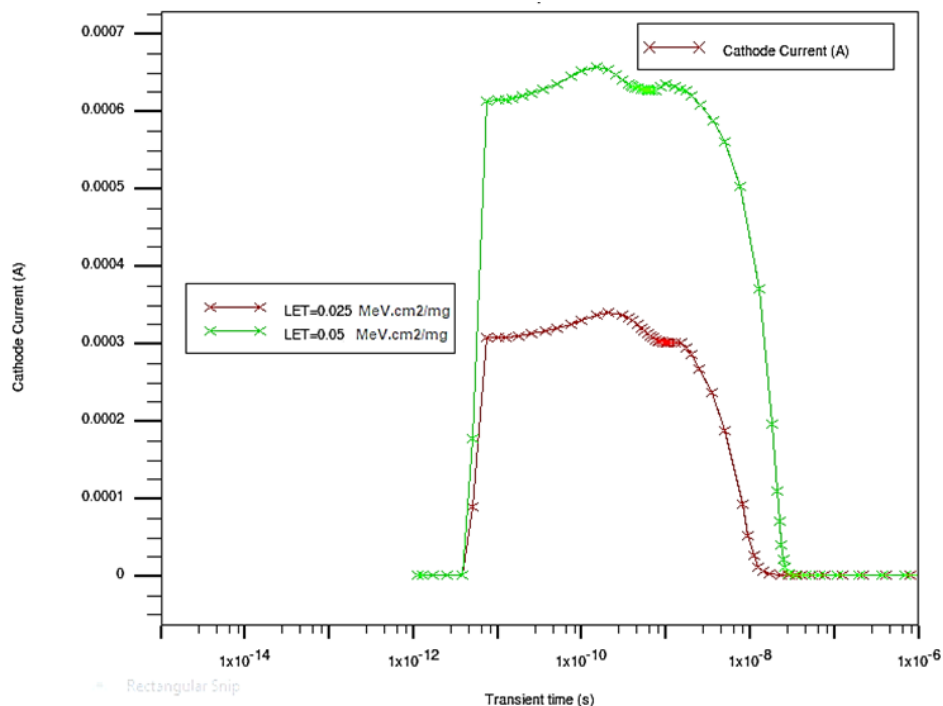
Fig. 7. b) The variation of the electric field in the device along y axis after the ion strike.

در شکل ۷ (الف و ب)، مختصات فرضی برخورد یون فرودی، وسط دیود در نظر گرفته شده است. پس از برخورد یون فرودی چنانچه مشاهده می‌شود، مقدار میدان الکتریکی در این نقطه با ایجاد یک پیک تیز نسبت به سایر نقاط افزایش می‌یابد. در راستای y نیز انرژی برجا گذاشته شده توسط یون فرودی که تولید بسیار زیاد حامل‌ها را در پی داشته، سبب افزایش شدید میدان الکتریکی درون قطعه شده است. انتظار می‌رود، هر اندازه تعداد حامل‌های ایجاد شده در نتیجه یون فرودی بیشتر باشد، افزایش میدان و به تبع آن افزایش جریان نیز بیشتر خواهد بود. شکل ۸، جریان گذرای ایجاد شده در الکتروود کاتد را به ازای دو مقدار LET=0.025 MeV.cm²/mg و LET=0.05 MeV.cm²/mg از یون فرودی را نشان می‌دهد.

بیش تری زیاد شده و جریان کاتد به شکل برگشت‌ناپذیری، افزایش می‌یابد که بیانگر حالتی است که SEB روی داده است. شکل ۹، نمونه‌ای از شبیه‌سازی‌های انجام شده به کمک نرم‌افزار به هنگام وقوع رخداد SEB را نشان می‌دهد. شبیه‌سازی‌ها برای کربن به ازای مقادیر LET=0.025, 0.05, 0.1, 0.2 MeV.cm²/mg انجام شده است. در این بررسی، چنانچه از شکل ۹ برمی‌آید، به‌ازای مقدار LET=0.1 MeV.cm²/mg پدیده SEB روی داده است.

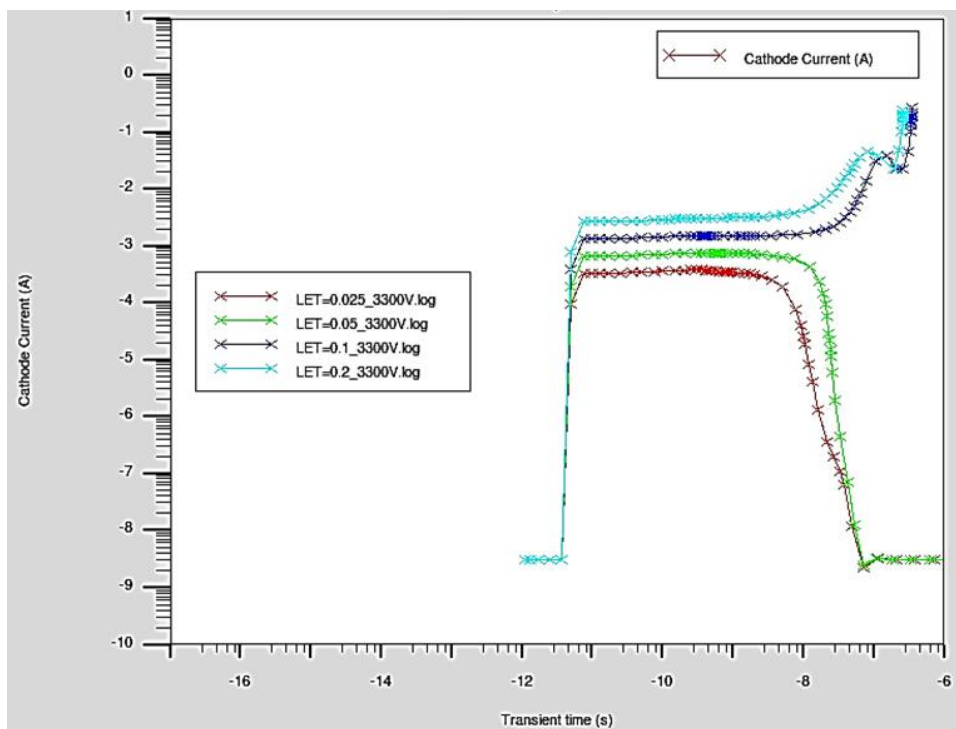
علاوه بر تولید بسیار زیاد حامل‌ها و افزایش جریان، در برخی منابع به افزایش دمایی قطعه در نتیجه برخورد یون‌های فرودی نیز اشاره شده است [۲۳]. به جهت مطالعه این کمیت نیز، در راستای بررسی‌های انجام گرفته، تغییرات دما در نتیجه برخورد یون‌های فرودی با مقادیر متفاوت LET مورد بررسی قرار گرفت که نتایج آن در شکل ۱۰ (الف و ب) نشان داده شده است. نتایج به‌دست آمده در بخش (الف) نشان می‌دهند که افزایش حامل‌ها به هنگام برخورد یون‌های فرودی موجب گردیده تا دما به صورت لحظه‌ای درون دیود افزایش یابد. هر اندازه، تعداد حامل‌های ایجاد شده بیشتر باشند، افزایش دما و به تبع آن، زمان مورد نیاز برای رسیدن به حالت پایدار اولیه نیز بیشتر خواهد بود.

با توجه به نتایج شکل ۸، پس از برخورد یون فرودی، افزایشی در جریان کاتد ایجاد می‌شود که بعد از مدت زمان بسیار کوتاهی به مقدار اولیه باز می‌گردد. نکته جالب آن است که هر چه LET یون فرودی و تعداد حامل‌های ایجاد شده بیشتر باشد، مقدار افزایش جریان نیز بیشتر بوده و مدت زمان بازگشت به حالت اولیه نیز طولانی‌تر است. با افزایش بیشتر مقدار LET، تعداد حامل‌ها با شدت



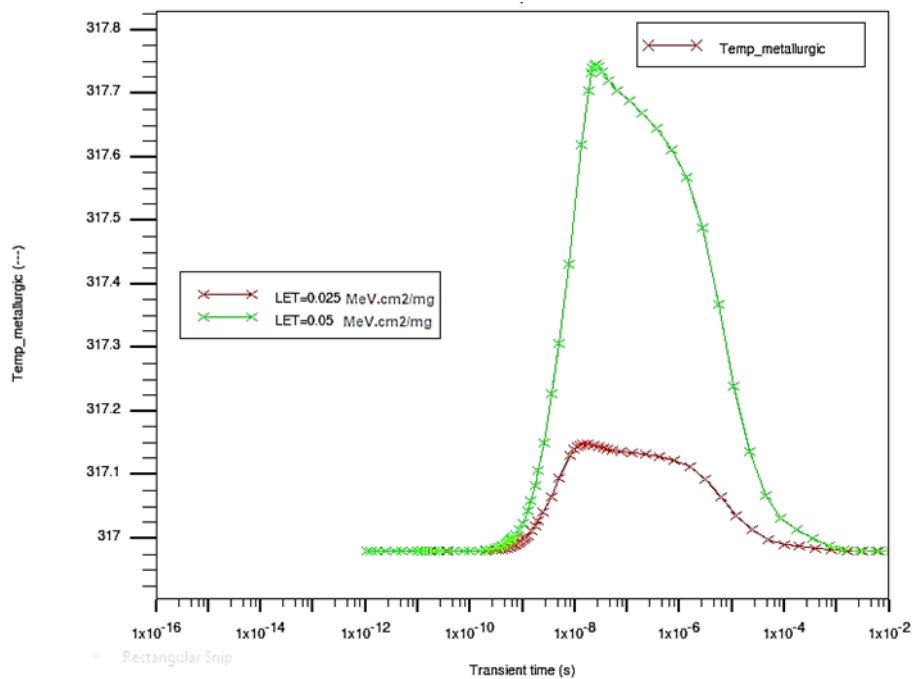
شکل ۸- جریان گذرای ایجاد شده در کاتد در نتیجه برخورد یون فرودی کربن با مقادیر LET=0.025 MeV.cm²/mg و LET=0.05 MeV.cm²/mg.

Fig. 8. Transient current induced in cathode after carbon ion strike due to LET=0.025 MeV.cm²/mg & LET=0.05 MeV.cm²/mg.

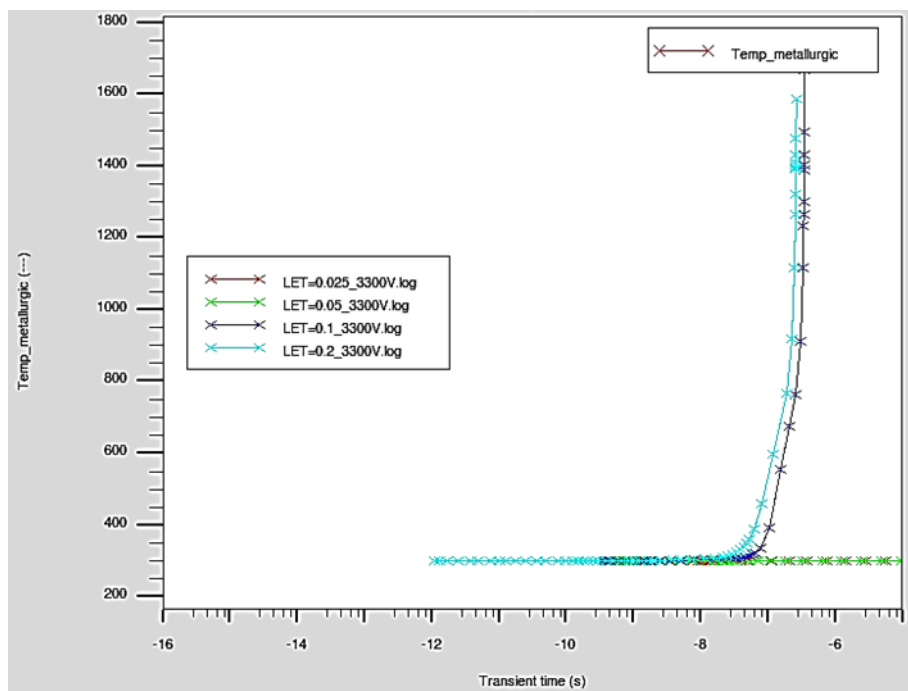


شکل ۹- مقایسه‌ای از تغییرات جریان کاتد به ازای مقادیر مختلفی از LET یون کربن فرودی به هنگام وقوع SEB و عدم وقوع آن.

Fig. 9. A comparison among the change of the cathode current due to different values of LET when SEB occurred.



(a)



(b)

شکل ۱۰- الف) افزایش برگشت پذیر دما در نتیجه افزایش حامل‌ها درون دیود در نتیجه برخورد یون کربن فرودی با مقادیر LET=0.025 MeV.cm²/mg و LET=0.05 MeV.cm²/mg. ب) افزایش برگشت ناپذیر دما در نتیجه برخورد یون‌های فرودی با LET= 0.1 MeV.cm²/mg و LET=0.2 MeV.cm²/mg.

Fig 10. a)The reversible increase of temperature in the device due to the ion strike with LET=0.025 MeV.cm²/mg & LET=0.05 MeV.cm²/mg. b) irreversible increase of temperature due to the ion strike due to LET=0.1 MeV.cm²/mg & LET=0.2 MeV.cm²/mg.

نقطه ذوب سیلیکون را در پی خواهد داشت. این حالت، شرایط برگشت‌ناپذیری را نشان می‌دهد که نشان‌دهنده وقوع رخداد SEB درون دیود است که پیش‌تر در آزمون‌های تجربی محققان نیز مشاهده شده بود. با توجه به نتایج به‌دست آمده، هر اندازه جریان بیشتری از حامل‌ها وجود داشته باشد، گرمایش بیشتری درون قطعه پدیدار خواهد شد. بدین ترتیب، با توجه به نتایج قابل قبول به‌دست آمده با مراجع، می‌توان گفت که نرم‌افزار Silvaco TCAD، ابزاری کارا جهت انجام محاسبات مربوط به رخداد SEB در قطعات ولتاژ- بالا می‌باشد.

تعارض منافع

هیچگونه تعارض منافع توسط نویسنده بیان نشده است.

مراجع

- [1] V. Madonna, P. Giangrande, and M. Galea, "Electrical power generation in aircraft: review, challenges, and opportunities," *IEEE Transactions on Transportation Electrification*, vol. 4, no. 3, pp. 646-659, 2018, <https://doi.org/10.1109/TTE.2018.2834142>.
- [2] S. Gollapudi and I. Omura, "Altitude dependent failure rate calculation for high power semiconductor devices in aviation electronics," *Japanese Journal of Applied Physics*, vol. 60, 2021, Art. no. SBBD19, <https://doi.org/10.35848/1347-4065/abebc0>.
- [3] L. Khurelbaatar *et al.*, "Space radiation induced failure rate calculation method using energy deposition probability function for high-voltage semiconductor device," *Materials Today Communications*, vol. 35, 2023, Art. no. 105499, <https://doi.org/10.1016/j.mtcomm.2023.105499>.
- [4] G. Soelkner, W. Kaindlb, H. Schulzea, and G. Wachutkab, "Reliability of power electronic devices against cosmic radiation-induced failure," *Microelectronics Reliability*, vol. 44, no. 9-11, pp. 1399-1406, 2004, <https://doi.org/10.1016/j.microrel.2004.07.024>.
- [5] P. E. Dodd and L. W. Massengill, "Basic mechanisms and modeling of single-event upset in digital microelectronics," *IEEE Transactions on Nuclear Science*, vol. 50, no. 3, pp. 583-602, 2003, <https://doi.org/10.1109/TNS.2003.813129>.
- [6] G. Raisali, M. Soleimaninia, and A. Moslehi, "Determination of the sensitive volume and critical charge for induction of seu in nanometer srams," *Journal of Space Science and Technology*, vol. 16, no. 2, pp. 43-54, 2023, <https://doi.org/10.30699/jsst.2023.1423>.
- [7] W. Bendel and E. Petersen, "Proton upsets in orbit," *IEEE Transactions on Nuclear Science*,

با افزایش بیشتر LET یون فرودی تا $LET=0.1 \text{ MeV.cm}^2/\text{mg}$ مشابه با آنچه که در تغییرات جریان کاتد مشاهده شده بود، دما درون قطعه به شکل برگشت‌ناپذیری افزایش یافته است. این پدیده، حاکی از آن است که وجود میدان‌های الکتریکی بزرگ و غلظت بالای حامل‌ها در دیود ولتاژ بالا منجر به ایجاد پدیده خود-گرمایش^۱ شده است. این نتیجه پیشتر، در خلال انجام آزمون‌های تجربی نیز گزارش شده بود [۲۱]. بنابراین، دیودهای ولتاژ- بالا پس از برخورد یون‌های فرودی، در معرض افزایش دما قرار دارند. انرژی برجا گذاشته شده توسط یون‌ها، ممکن است استحکام پیوندهای بلور سیلیکون را کاهش داده و منجر به ذوب شدن آن گردد. نتایج شبیه‌سازی شکل ۱۰ (ب) نشان می‌دهند که در حالتی که SEB رخ داده است، دمای درون قطعه تا حدود ۱۸۰۰ درجه کلون افزایش یافته است. این در حالی است که ذوب سیلیکون در دمای ۱۶۸۷ درجه کلون روی می‌دهد.

شایان ذکر است که شبیه‌سازی‌های فوق به ازای مقادیر برد و LET مختلف برای یون‌های نیکل و کریبتون نیز انجام شدند و تغییرات مشابهی در روند افزایش جریان و دما در آن‌ها مشاهده گردید. در مورد این یون‌ها نیز گزارشاتی مبنی بر ایجاد از کار افتادگی در آزمایشات تجربی گزارش شده است که حاکی از افزایش دمای درون قطعه تا بالاتر از نقطه ذوب آن اشاره دارد [۲۴].

نتیجه‌گیری

در این پژوهش، به کمک شبیه‌سازی با استفاده از نرم‌افزار Silvaco TCAD به بررسی سازوکار وقوع رخداد SEB در یک دیود بین با ولتاژ شکست ۳۳۰۰ ولت پرداخته شد. بدین منظور در گام نخست، هندسه دیود با به کارگیری مدل‌های فیزیکی مناسب، شبیه‌سازی گردید. سپس، به منظور بررسی مکانیزم وقوع SEB، با در نظر گرفتن محتمل‌ترین حالت برای وقوع این پدیده (شرایط بیاس معکوس)، پرتو فرودی با مقادیر مختلف LET به نواحی مختلف دیود تابانیده شد و تغییرات ایجاد شده در غلظت حامل‌ها، تغییرات جریان و میدان الکتریکی پس از برخورد یون فرودی مشاهده گردید. شایان ذکر است که شبیه‌سازی‌های مذکور برای مقادیر مختلف برد و LET از یون‌های کربن انجام شد که اطلاعات آن‌ها به کمک SRIM به‌دست آمد. این یون‌ها، یکی از یون‌های فراوان در محیط فضا هستند. نتایج حاصل از شبیه‌سازی بیانگر آن است که با برخورد یون‌های فرودی به ساختار دیود بین، میدان الکتریکی به صورت موضعی افزایش یافته و غلظت حامل‌ها به شدت زیاد می‌شود که به نوبه خود، افزایش شدید جریان همراه با افزایش دما تا رسیدن به

1. Self-heating

- in *31st International Conference on Microelectronics (MIEL)*, Nis, Serbia, 2019, pp. 71-74, <https://doi.org/10.1109/MIEL.2019.8889645>.
- [17] M. T. Littlefair, S. Simdyankin, S. Turvey, C. Groves, and A. B. Horsfall, "Single event burnout sensitivity of SiC and Si," *Semiconductor Science and Technology*, vol. 37, no. 6, 2022, Art. no. 065013, 2022, <https://doi.org/10.1088/1361-6641/ac668c>.
- [18] A. Luu *et al.*, "Sensitive volume and triggering criteria of SEB in classic planar VDMOS," *IEEE Transactions on Nuclear Science*, vol. 57, no. 4, pp. 1900-1907, 2010, <https://doi.org/10.1109/TNS.2010.2044808>.
- [19] A. K. Srivastava, N. Saini, P. Chatterjee, T. Michael, and S. Patyal, "TCAD simulation of the mixed irradiated n-MCz Si detector: Impact on space charges, electric field distribution," *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, vol. 1049, 2023, Art. no. 168031, <https://doi.org/10.1016/j.nima.2023.168031>.
- [20] X. Liao, Y. Liu, C. Xu, J. Li, and Y. Yang, "Single event burnout hardening technique for high-voltage p-i-n diodes with field limiting rings termination structure," *IEEE Transactions on Electron Devices*, vol. 69, no. 2, pp. 675-681, 2022, <https://doi.org/10.1109/TED.2021.3137135>.
- [21] A. M. Albadri, R. Schrimpf, D. Walker, and S. Mahajan, "Coupled electro-thermal simulations of single event burnout in power diodes," *IEEE Transactions on Nuclear Science*, vol. 52, no. 6, pp. 2194-2199, 2005, <https://doi.org/10.1109/TNS.2005.60691>.
- [22] J. F. Ziegler, J. P. Biersack, and M. D. Ziegler, *SRIM, the Stopping and Range of Ions in Matter*, SRIM Company, 2008.
- [23] D. Walker, T. Fisher, A. Albadri, and R. Schrimpf, "Simulation of single-event failure in power diodes," in *ASME International Mechanical Engineering Congress and Exposition, Heat Transfer*, vol. 7, New Orleans, Louisiana, USA, 2002, pp. 39-45, <https://doi.org/10.1115/IMECE2002-32116>.
- [24] A. Albadri, R. D. Schrimpf, K. F. Galloway, and D. G. Walker, "Single event burnout in power diodes: Mechanisms and models," *Microelectronics Reliability*, vol. 46, no. 2-4, pp. 317-325, 2006, <https://doi.org/10.1016/j.microrel.2005.06.015>.
- vol. 30, no. 6, pp. 4481-4485, 1983, <https://doi.org/10.1109/TNS.1983.4333158>.
- [8] M. Ciappa and M. Pocaterra, "Characterization of the onset of carrier multiplication in power devices by a collimated radioactive alpha source," *Microelectronics Reliability*, vol. 100-101, 2019, Art. no. 113343, <https://doi.org/10.1016/j.microrel.2019.06.035>.
- [9] A. Waskiewicz, J. Groninger, V. Strahan, and D. Long, "Burnout of power MOS transistors with heavy ions of californium-252," *IEEE Transactions on Nuclear Science*, vol. 33, no. 6, pp. 1710-1713, 1986, <https://doi.org/10.1109/TNS.1986.4334670>.
- [10] J. L. Titus, G. H. Johnson, R. D. Schrimpf, and K. F. Galloway, "Single-event burnout of power bipolar junction transistors," *IEEE Transactions on Nuclear Science*, vol. 38, no. 6, pp. 1315-1322, 1991, <https://doi.org/10.1109/23.124111>.
- [11] H. Kabza *et al.*, "Cosmic radiation as a cause for power device failure and possible countermeasures," in *6th International Symposium on Power Semiconductor Devices and Ics*, Davos, Switzerland, 1994, pp. 9-12, <https://doi.org/10.1109/ISPSD.1994.583620>.
- [12] H.-R. Zeller, "Cosmic ray induced breakdown in high voltage semiconductor devices, microscopic model and phenomenological lifetime prediction," in *6th International Symposium on Power Semiconductor Devices and Ics*, Davos, Switzerland, 1994, pp. 339-340, <https://doi.org/10.1109/ISPSD.1994.583762>.
- [13] X.-X. Fei, Y. Wang, X. Luo, M.-T. Bao, C.-H. Yu, and X.-J. Li, "Research of single-event burnout and hardened GaN MISFET with embedded PN junction," *Microelectronics Reliability*, vol. 110, 2020, Art. no. 113699, <https://doi.org/10.1016/j.microrel.2020.113699>.
- [14] J. Lu *et al.*, "Impact of varied buffer layer designs on single-event response of 1.2-kV SiC power MOSFETs," *IEEE Transactions on Electron Devices*, vol. 67, no. 9, pp. 3698-3704, 2020, <https://doi.org/10.1109/TED.2020.3008398>.
- [15] M. Pocaterra and M. Ciappa, "Single event burnout failures caused in silicon carbide power devices by alpha particles emitted from radionuclides," *e-Prime-Advances in Electrical Engineering, Electronics and Energy*, vol. 5, 2023, Art. no. 100203, <https://doi.org/10.1016/j.prime.2023.100203>.
- [16] P. Gromova *et al.*, "Heavy-ion-induced single event burnout in SiC schottky diodes: safe operating area,"