

اندازه‌گیری میزان تأثیر تابش نوترون بر ثابت آسیب جریان معکوس α دیود

امیر حسینی^۱، سیدامیر حسین فقهی^{۲*}، حمید جعفری^۳ و میربشیر آقایی^۴

۱، ۲ و ۳- گروه کاربرد پرتوها، دانشکده مهندسی هسته‌ای، دانشگاه شهید بهشتی

۴- گروه قدرت، دانشکده مهندسی برق، دانشگاه آزاد تهران - جنوب

*تهران، ولنجک

a_fegghi@sbu.ac.ir

هنگامی که قطعات الکترونیکی در معرض تابش نوترون قرار می‌گیرند بر اثر اندرکنش‌های نوترون در این قطعات، مشخصات الکتریکی آنها مانند ظرفیت خازنی، جریان بایاس معکوس، طول عمر حامل اقلیت و غیره ... تغییر می‌کنند. این تغییرات بسیار مهم است تا آنجا که ممکن است عملکرد قطعه را مختل کرده و آن را از کار بیندازد. بنابراین اندازه‌گیری میزان آسیب ناشی از نوترون در این قطعات بسیار ضروری است. یکی از مهم‌ترین پارامترهایی که در بیان آسیب وارده به قطعات الکترونیکی به کار می‌رود، ثابت آسیب جریان معکوس α است. این ثابت (α)، شیب نمودار جریان معکوس بر حسب شارش است که نشان‌دهنده تغییرات جریان معکوس بر حسب شارش است. هدف از انجام این کار اندازه‌گیری ثابت آسیب جریان معکوس α برای دیودهای IN4007، BYV27 و BYV95 در ولتاژها و دماهای مختلف است. این دیودها در راکتور تحقیقاتی تهران پرتودهی شدند و نتایج به دست آمده با روابط تئوری انطباق خوبی دارد.

واژه‌های کلیدی: ثابت آسیب جریان معکوس، تابش نوترون، آسیب جابه‌جایی، دیود

علائم و اختصارات	
J_p	چگالی جریان رانشی حفره
J_n	چگالی جریان رانشی الکترون
μ_p	قابلیت حرکت حفره
μ_n	قابلیت حرکت الکترون
Φ	شارش
α	ثابت آسیب جریان معکوس
W	عرض پیوند
E_g	انرژی باند ممنوع
E_A	انرژی فعال‌سازی
T	دما بر حسب کلوین
I	جریان الکتریکی
E	میدان الکتریکی
Q	بار الکتریکی
A	سطح مقطع
n	غلظت الکترون
P	غلظت حفره
N_{eff}	غلظت حامل مؤثر
N_i	غلظت حامل ذاتی
N_D	غلظت ناخالصی‌های دهنده
N_A	غلظت ناخالصی‌های پذیرنده
V_d	سرعت متوسط
I_p	جریان رانشی حفره
I_n	جریان رانشی الکترون

۱. کارشناسی ارشد

۲. دانشیار (نویسنده مخاطب)

۳. کارشناسی ارشد

۴. دانشجوی کارشناسی

مقدمه

قطعات مورد استفاده در تجهیزاتی است که در برابر تابش کار می‌کنند. بسیاری از سیستم‌های الکترونیکی باید در محیط‌های تابش هسته‌ای نیز عمل کنند. مثال‌هایی از چنین سیستم‌هایی عبارتند از: سیستم‌های الکترونیکی به کار رفته در فضاپیما و ماهواره‌ها، هواپیماهایی که در ارتفاع بالا پرواز می‌کنند، دستگاه‌های مورد استفاده در نیروگاه‌های هسته‌ای، آشکارسازهای مورد استفاده در شتاب‌دهنده‌های پرنرژی ذرات، روبات‌هایی که برای مدیریت پسمانداری هسته‌ای مورد استفاده قرار می‌گیرند، بسیاری از سیستم‌های نظامی حتی اگر هیچ زمانی در برابر تابش هسته‌ای قرار نگیرند، باید برای شرایط تابشی القا شده از تسلیحات هسته‌ای آماده‌سازی شده باشند و غیره. با توجه به کاربرد زیاد قطعات الکترونیک در محیط‌های تابشی اهمیت و ضرورت انجام محاسبات آسیب پرتویی در این قطعات به شدت احساس می‌شود.

تأثیر پرتو روی قطعات نیمه‌هادی شامل اثر آسیب جابه‌جایی، آسیب یونیزان، آسیب‌های تک رخدادی و واکنش‌های هسته‌ای است. در این میان آسیب‌های جابه‌جایی اتمی و یونیزاسیون اهمیت بیشتری دارند. تأثیر یونیزاسیون آزاد شدن الکترون‌ها از اتم‌هایشان است. تولید نقص‌های ناشی از آسیب‌های تک رخدادی و هسته‌ای در مقایسه با تولید نقص‌های حاصل از آسیب جابه‌جایی خیلی مهم به نظر نمی‌رسد. آسیب جابه‌جایی زمانی اتفاق می‌افتد که اتم‌ها از مکان خود در شبکه بیرون آیند [۲]. آسیب جابه‌جایی در واکنش‌های پراکندگی الاستیک و غیرالاستیک نوترون، که نوترون‌ها مقداری از انرژی‌شان را به هسته اتم می‌دهند اتفاق می‌افتد. برای جابه‌جا کردن یک اتم از شبکه پایدار به اندازه انرژی بستگی اتم E_d انرژی نیاز است. اگر انرژی منتقل شده به اتم از E_d بیشتر باشد اتم از مکان خود در شبکه بلور بیرون می‌آید. این جابه‌جایی‌ها در شبکه کریستال، اتم‌های بین شبکه‌ای و جاهای خالی تولید می‌کنند که آنها را جفت فرانکل می‌نامند [۳]. نتیجه همه این اندرکنش‌ها تولید حالت‌های پایدار نقص است که سطوح انرژی در باند ممنوع ایجاد می‌کنند و تعداد حامل‌های مؤثر (N_{eff}) در نواحی P و n را تغییر می‌دهند که در نتیجه باعث تغییر در جریان معکوس می‌شود. تغییر جریان معکوس می‌تواند باعث تخریب و از کار افتادن مدارهای الکترونیکی شود. بنابراین در کاربردهای فضایی لازم است که میزان تغییر جریان از قبل پیش‌بینی شود. برای بیان اثر تابش بر روی سیلیکون به طور کلی فرض شده است که آسیب، با مقدار انرژی که صرف جابه‌جایی شده متناسب است [۴].

فیزیک الکترونیک

الکترون‌های مقید اتم‌ها و ملکول‌ها در یک جامد، سطوح فعال انرژی به همراه یک باند ممنوع بین آنها را تشکیل می‌دهند. در یک

با توجه به انتقال انرژی در اندرکنش پرتوها با مواد، هر یک از آنها دارای اثراتی خواهد بود که گاهی اوقات مفید و سازنده و در برخی موارد موجب آسیب‌رسانی به ساختار مواد می‌شود. در پی این اندرکنش‌ها تغییراتی در خواص ذاتی مواد مانند خواص مکانیکی، رسانایی، ساختار بلوری، مشخصات پیوند اتمی، دمای ذوب، خواص مغناطیسی، ظرفیت بار، خاصیت فلورسانسی، خاصیت پلاستیکی، تاب ارتجاعی، حد بیشینه استحکام کششی و حتی رنگ مواد و ... ایجاد می‌شود. این تغییرات در قطعات الکترونیکی، میدلهای مکانیکی، ابررساناها، حسگرهای دمایی، آلیاژها، پلیمرها، مواد آلی و فلزات موجود در ساختارهای تشکیل‌دهنده تجهیزاتی که در معرض تابش قرار می‌گیرند، رخ می‌دهد. اثرات در برخی موارد گذرا و زود گذر و در برخی حالات با توجه به نوع اندرکنش و انرژی پرتوها و حساسیت مواد دائمی خواهد بود. اطلاع از هر یک از تغییرات ایجاد شده بر اثر تابش می‌تواند موجب پیشرفت در طراحی سیستم‌های تابشی و انتخاب مناسب مواد به کار رفته در ساختارهای تشکیل‌دهنده می‌شود.

بررسی آسیب‌های پرتویی به لحاظ تنوع در نوع و انرژی چشمه‌های تابشی، تنوع در مواد و محیط تابش؛ اعم از آلیاژها، فلزات، قطعات حساس الکترونیکی و حتی بدن انسان و تفاوت در فیزیک هر یک از آنها، مسئله‌ای بسیار پیچیده است. بررسی و تحقیق در هر یک از این موارد ذکر شده به زمانی طولانی، امکانات وسیع، کار گروهی بسیار گسترده و افراد متخصص در زمینه‌های مختلف نیاز دارد. محیط تابشی فضا شامل نوترون‌ها، پروتون‌ها، الکترون‌ها، فوتون‌ها و یون‌های سنگین با طیف انرژی‌های متفاوتی هستند که بسته به مأموریت ماهواره‌ها و فضاپیماها می‌توانند در محیط‌های تابشی با شارها و نوع پرتوهای متفاوتی قرار بگیرند.

از جمله سیستم‌های موجود در ماهواره‌ها و فضاپیماها، سیستم‌های الکترونیکی هستند که وجود این محیط‌های پیچیده باعث توجه بیشتر تأثیر تابش‌های فضایی بر عملکرد قطعات الکترونیک مانند دیود و ترانزیستورها و ... شده است. پرتوهای فضایی اثرات مخربی بر مدارهای الکترونیکی دارند به طوری که حتی می‌توانند یک مأموریت فضایی را در لحظات آغازین با شکست مواجه سازند. علاوه بر این، این پرتوها باعث افت کارایی مدارهای الکترونیکی به مرور زمان می‌شود. منبع این پرتوها، ذرات به دام افتاده در میدان مغناطیسی زمین، ذرات خورشیدی و ذرات کیهانی هستند [۱].

میزان آسیب به مدت زمان در معرض پرتوبودن و مدار ماهواره یا فضاپیما در داخل فضا و همچنین به شار ذرات بستگی دارد.

هدف این کار اندازه‌گیری آسیب ناشی از تابش نوترون در قطعات الکترونیکی، به‌عنوان یکی از حساس‌ترین و مهم‌ترین

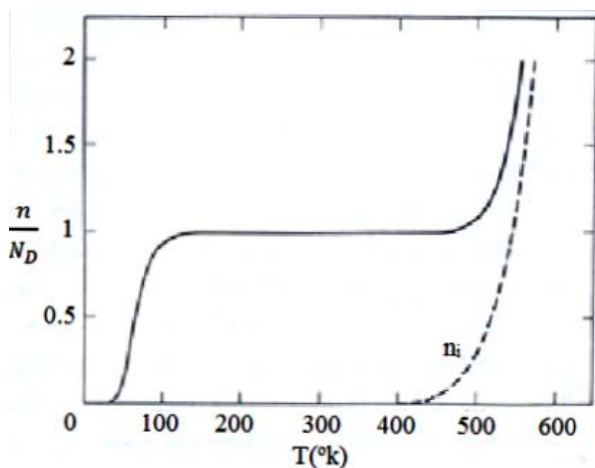
جامد به دلیل بالابودن تعداد الکترون‌ها سطوح انرژی بسیار به هم نزدیک هستند و با افزایش انرژی در باند چیده شده‌اند. باند ظرفیت الکترون‌هایی را شامل می‌شود که فقط به یک هسته جامد مقید هستند. برای مثال در سیلیسیم، آنها در پیوندهای کوالانسی هستند. باند هدایت شامل الکترون‌های آزاد است که می‌توانند به هدایت الکتریکی مواد کمک کنند. بین باندهای هدایت و ظرفیت، یک ناحیه انرژی وجود دارد که هیچ سطح مجازی در آن وجود ندارد. این ناحیه باند ممنوع (E_g) نامیده می‌شود. پهنای این ناحیه عایق، نیمه‌هادی، یا هادی بودن ماده را تعیین می‌کند. در یک نیمه هادی پهنای باند ممنوع تقریباً ۱ الکترون‌ولت است. به عنوان مثال در دمای اتاق برای سیلیسیم $E_g=1/12$ الکترون‌ولت و برای ژرمانیوم، $E_g=0/67$ الکترون‌ولت است [۵ و ۶]. الکترون‌های مقید اتم‌ها و ملکول‌ها در یک جامد می‌توانند با کسب انرژی از باند ظرفیت به باند هدایت بروند و یک جای خالی در باند ظرفیت به جای گذارند که به آن حفره می‌گویند. هر دو حامل الکترون و حفره می‌توانند در میدان الکتریکی نیمه‌هادی حرکت کنند. چگالی الکترون و حفره را به ترتیب با n و p نشان می‌دهند. حاصل ضرب n و p در یک نیمه هادی در یک دمای معین مقدار ثابتی است که از رابطه ۱ به دست می‌آید.

$$np = n_i^2 \quad (1)$$

که n_i غلظت حامل ذاتی یعنی غلظت حامل در نیمه هادی خالص است. این مقدار در سیلیسیم $1/45 \times 10^{10}$ سانتی مترمکعب است [۵ و ۶].

معمولاً اتم‌های ناخالصی با ۳ الکترون ظرفیت (بور) یا ۵ الکترون ظرفیت (فسفر، آرسنیک) در شبکه بلور سیلیسیم وارد می‌کنند که باعث تغییر در مشخصات الکتریکی نیمه‌هادی می‌شود. غلظت ناخالصی‌های دهنده را با N_D و غلظت ناخالصی‌های پذیرنده را با N_A نشان می‌دهند. غلظت حامل‌های آزاد در یک کریستال سیلیسیم ناخالص شده با اتم‌های دهنده، برابر است با $n=N_D$. در این کریستال اکثریت حامل‌ها الکترون‌ها هستند و ماده سیلیکون نوع n نامیده می‌شود. به‌طور مشابه یک کریستال سیلیسیم ناخالص شده با اتم‌های پذیرنده سیلیکون نوع p نامیده می‌شود و غلظت حامل‌های آزاد اکثریت (حفره‌ها) برابر با $p=N_A$ است.

در دماهای بسیار بالا غلظت حامل‌های ذاتی افزایش یافته و همه نیمه‌هادی‌ها ذاتی می‌شوند. شکل (۱) نمودار غلظت حامل اکثریت برحسب دما برای نمونه سیلیسیم که به میزان $ND = 1015 \text{ \#/cm}^3$ با فسفر ناخالص شده است را نمایش می‌دهد. برای نمونه سیلیسیم موجود، در محدوده وسیعی از دما n تقریباً با ND برابر است. این ناحیه را ناحیه حرارتی غیر ذاتی می‌نامند. در دماهای پایین نزدیک به صفر کلون n به مقداری بسیار کمتر از ND کاهش می‌یابد و همین‌طور که T به سمت



شکل ۱- نسبت چگالی الکترون‌ها به چگالی ناخالصی‌های دهنده در دماهای مختلف (نمودار نقطه چین مربوط به غلظت حامل ذاتی n_i)

حرکت هر ذره باردار بر اثر میدان الکتریکی را رانش می‌گویند. هرگاه یک نیمه هادی در یک میدان الکتریکی قرار گیرد حفره‌ها در جهت میدان الکتریکی و الکترون‌ها در خلاف جهت میدان الکتریکی شتاب می‌گیرند و در نیمه‌هادی جریان جاری می‌شود. جریان عبارت است از باری که در واحد زمان از صفحه عمود بر جهت جریان عبور کند [۳]. جریان رانشی حفره‌ها با رابطه ۲ داده می‌شود:

$$I_p = qpV_d A \quad (2)$$

که در آن p تعداد حفره‌ها، q بار الکتریکی حفره، V_d سرعت متوسط حفره‌ها و A سطح مقطع نیمه‌هادی است. چگالی جریان به صورت رابطه ۳ تعریف می‌شود [۸]:

$$J_p = qpV_d \quad (3)$$

تغییر ثابت آسیب جریان معکوس α با ولتاژ

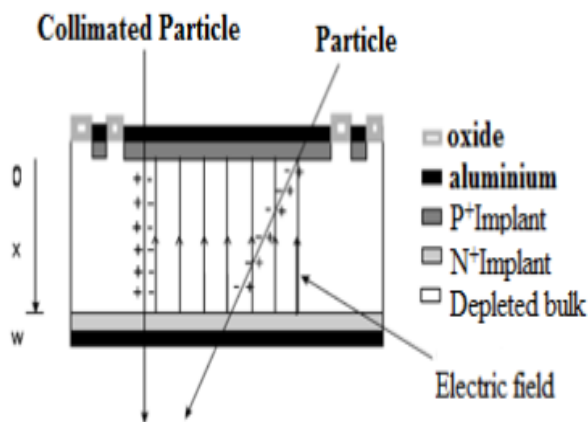
یک پیوند $P \pm n$ که به طور معکوس بایاس شده در شکل (۳) نشان داده شده است. هنگامی که ذرات یونیزان از این پیوند عبور می‌کنند، جفت حفره- الکترون (e-h) در امتداد مسیر ذرات ایجاد می‌شود. این جفت‌ها قبلاً از اینکه بتوانند دوباره باهم ترکیب شوند توسط میدان الکتریکی در ناحیه تخلیه به طرف آند (الکترون‌ها) یا کاتد (حفره‌ها) حرکت می‌کنند و از هم جدا می‌شوند. حرکت بار تولید شده یک سیگنال روی الکترودهای دیود طبق قانون رامو^۵ ایجاد می‌کند که در رابطه ۸ نشان داده شده است [۹]:

$$\Delta Q = Q \frac{\Delta x}{w} \quad (8)$$

که W ضخامت پیوند است. جریان القا شده توسط رابطه ۹ به دست می‌آید:

$$i(x) = \frac{dQ}{dt} = \frac{Q}{w} \frac{dx}{dt} = \frac{Q}{w} \mu E(x) \quad (9)$$

همان‌طور که ملاحظه می‌شود جریان با میدان الکتریکی رابطه مستقیم دارد. در یک مقدار شارش ثابت هرچه ولتاژ معکوس و میدان الکتریکی قوی‌تر باشد بازده جمع‌آوری بارهای ناشی از پرتودهی افزایش می‌یابد و جریان بیشتر می‌شود. در واقع میدان الکتریکی ضعیف قادر به جمع‌آوری تمام بارهای تولید شده نیست و هرچه میدان قوی‌تر باشد میزان بیشتری از بارها را می‌تواند جمع‌آوری کند و جریان افزایش می‌یابد. این افزایش جریان باعث افزایش ثابت آسیب جریان معکوس α می‌شود.



شکل ۳- تولید حامل‌ها در طول مسیر خط ذرات و توزیع میدان الکتریکی در دیود سیلیکونی

سرعت رانش، یک تابع خطی از میدان الکتریکی اعمال شده است که طبق رابطه ۴ به دست می‌آید.

$$V_d = \mu_p E \quad (4)$$

که در آن μ_p قابلیت حرکت حفره، ثابت تناسب بین V_d و E است. با ترکیب روابط ۳ و ۴ رابطه ۵ به دست می‌آید.

$$J_p = q \mu_p p E \quad (5)$$

به‌طور مشابه برای الکترون‌ها رابطه ۶ به دست می‌آید.

$$J_n = q \mu_n n E \quad (6)$$

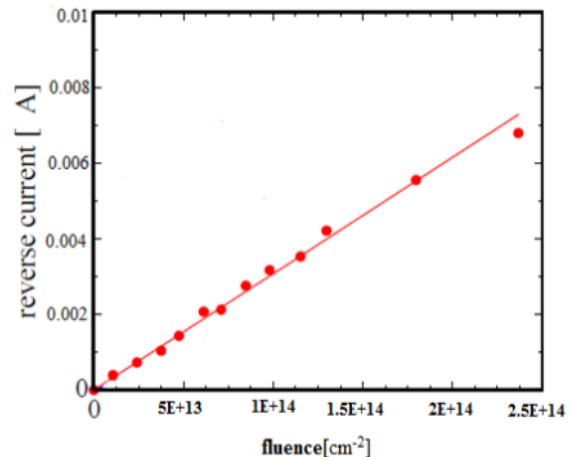
روابط ۵ و ۶ نشان می‌دهد که چگالی جریان الکترون و حفره به‌صورت خطی متناسب با میدان الکتریکی اعمالی است.

معرفی ثابت آسیب جریان معکوس

جریان ناشی در یک دیود پرتودهی شده که به‌طور معکوس بایاس شده است و دارای دو مؤلفه است. یکی مؤلفه جریان ذاتی دیود و دیگری مؤلفه حجمی که وابسته به غلظت مراکز تولید است [۵]. به‌طور تجربی مشاهده شده است که جریان ناشی در یک دیود بایاس معکوس، به‌صورت خطی با شارش افزایش می‌یابد. وابستگی جریان به شارش ذرات یونیزان می‌تواند به صورت رابطه ۷ نوشته شود:

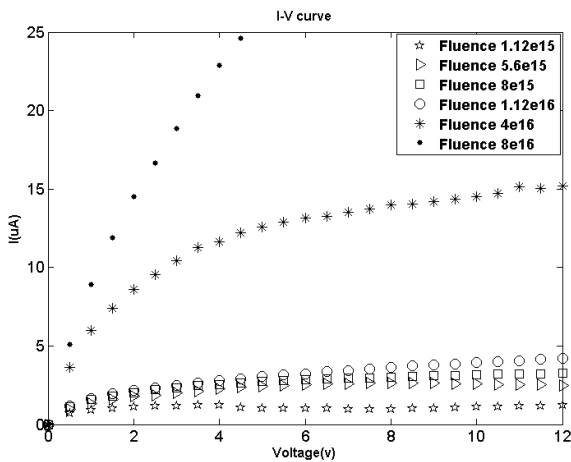
$$\Delta I = I(\varphi) - I(\varphi = 0) = \alpha \cdot \varphi \quad (7)$$

که در آن α ثابت آسیب جریان معکوس نامیده می‌شود. α شیب نمودار جریان بر حسب شارش است. شکل (۲) افزایش جریان بر اثر افزایش شارش را نشان می‌دهد. تناسب جریان با شارش، نتیجه می‌دهد که افزایش جریان به دلیل ایجاد خطی مراکز ترکیب و تولید فعال است که بر جریان معکوس ذاتی غالب می‌شود. ارتباط بین جریان ناشی و شارش تابش یونیزان بر اساس این فرض است که جریان تولیدی بدنه که با چگالی نقص‌های تابشی القا شده متناسب است و جریان اندازه‌گیری شده را تحت کنترل قرار می‌دهد [۵].

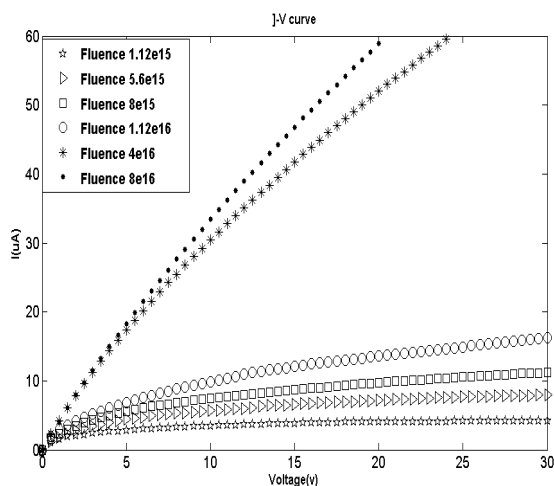


شکل ۲- تغییرات جریان ناشی در یک دیود بایاس معکوس بر حسب شارش

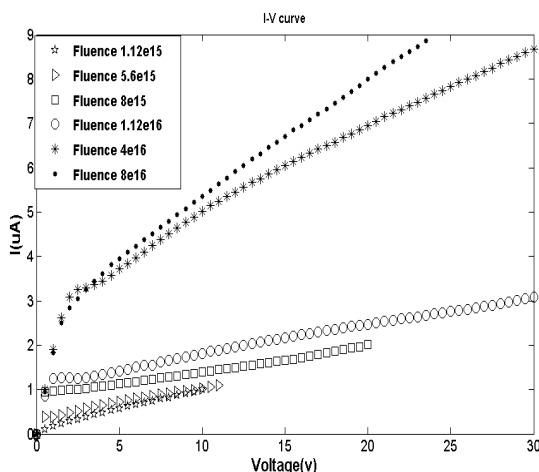
دمای ثابت (دمای محیط ۲۸ تا ۳۰ درجه) اندازه‌گیری شد که نتایج آن در شکل‌های (۴) تا (۶) آورده شده است.



شکل ۴- نمودار I-V دیود BYV27 در شارش‌های مختلف



شکل ۵- نمودار I-V دیود BYV95 در شارش‌های مختلف



شکل ۶- نمودار I-V دیود 1N4007 در شارش‌های مختلف

تغییر ثابت آسیب جریان معکوس α با دما

جریان نشستی به شدت تحت تأثیر دماست. وابستگی دمایی جریان نشستی برای دیودهای پرتودهی نشده به صورت گسترده‌ای مطالعه شده است و داده‌های به‌دست آمده با رابطه ۱۰ هم‌خوانی دارد [۱۰-۱۳]:

$$I \propto T^2 \exp\left(-\frac{E_A}{k_B(T+273.2)}\right) \quad (10)$$

که در آن انرژی فعال‌سازی و T دما بر حسب سلسیوس است. مقدار E_A توسط افراد مختلف از ۰/۶ تا ۰/۷ به‌دست آمده است [۱۴ و ۱۵]. ثابت آسیب جریان معکوس α نیز با دما تغییر می‌کند. زیرا با افزایش دما اندازه شکاف انرژی مواد نیمه‌هادی کاهش می‌یابد و در نتیجه در یک مقدار شارش ثابت تعداد بیشتری حامل تولید می‌شود و α افزایش می‌یابد. اندازه شکاف انرژی برای سیلیسیم بر حسب دما در رابطه ۱۱ آورده شده است [۸ و ۷]:

$$E_g = 1.1557 - \frac{7.021 \times 10^{-4} T^2}{1108 + T} \quad (11)$$

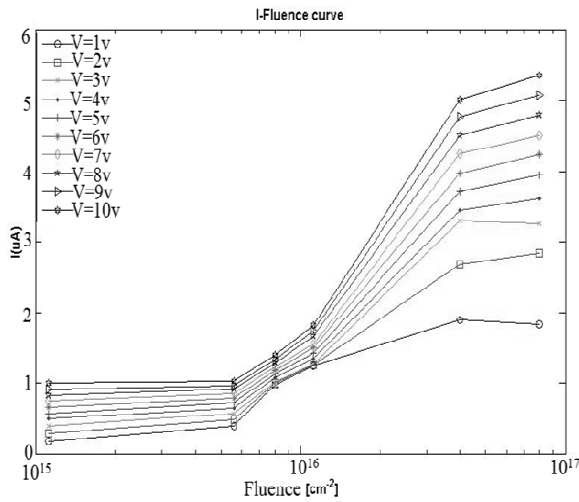
در دماهای بالا افزایش ثابت آسیب جریان معکوس α بسیار کند و ناچیز است. علت این مسئله این است که در دماهای بالا تعداد حامل‌های ذاتی نیمه‌هادی به‌شدت افزایش یافته و حامل‌های ناشی از پرتودهی در مقابل آنها قابل صرف‌نظر است. در این حالت می‌گویند نیمه‌هادی ذاتی شده است.

روش کار

راکتور تحقیقاتی تهران با طیف نوترون شکافت با شار بالای 10^{13} به‌عنوان چشمه پرتودهی در این کار مورد استفاده قرار گرفته است. عملیات پرتودهی در ۶ شارش مختلف $5/6 \times 10^{15}$ ، $1/12 \times 10^{15}$ ، 8×10^{15} ، $1/12 \times 10^{16}$ ، 4×10^{16} ، 8×10^{16} ضریب سختی K برای راکتور تحقیقاتی تهران برابر $2-10 \times 10^{20.57}$ است شارش‌های معادل نوترون ۱ میکروالکترون‌ولت عبارتند از: $1/35 \times 10^{14}$ ، $9/65 \times 10^{13}$ ، $6/75 \times 10^{13}$ ، $2/1 \times 10^{13}$ ، $4/82 \times 10^{14}$ ، $9/65 \times 10^{14}$ تعداد بر سانتی‌متر مربع. پرتودهی بر روی سه نوع دیود با نام‌های تجاری 1N4007، BYV27 و BYV95C انجام شد که هر نمونه دیود در ۶ شارش مختلف پرتودهی شد. سپس جریان معکوس دیودها در ولتاژها و دماهای مختلف اندازه‌گیری شد. برای اندازه‌گیری جریان معکوس دیودها از دستگاه 819 LCR Meter که دقت بسیار بالایی دارد استفاده شده است.

نتایج

ابتدا تغییرات جریان بر حسب ولتاژ در شارش‌های مختلف و در



شکل ۹- نمودار جریان بر حسب شارش در ولتاژهای مختلف برای دیود 1N4007

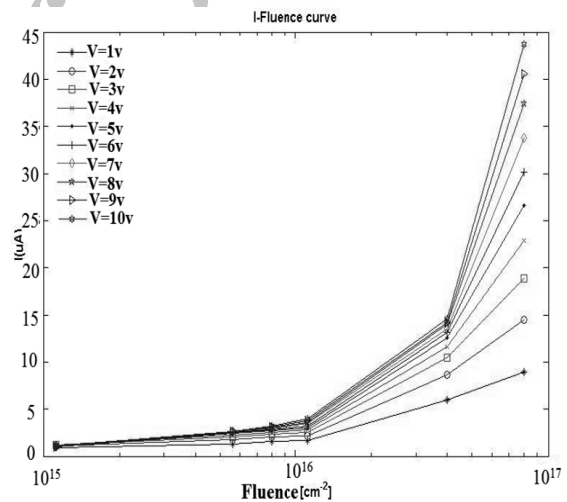
از شکل‌های (۷) تا (۹) می‌توان حداکثر شارش یا ولتاژ معکوس قابل تحمل دیود در یک مأموریت فضایی را استخراج کرد. به عنوان مثال اگر بدانییم شارشی که دیود در طول یک مأموریت فضایی دریافت می‌کند کمتر از 10^{17} است و جریان معکوس این دیود در مدار الکترونیکی نباید از ۱۵ میکروآمپر افزایش یابد اگر از دیود BYV27 استفاده شود حداکثر ولتاژ معکوس قابل تحمل حدود ۲ ولت، اگر از دیود BYV95 استفاده شود حداکثر ولتاژ معکوس قابل تحمل حدود ۴ ولت، و اگر از دیود 1N4007 استفاده شود ولتاژها بیشتر از ۳۰ ولت را هم می‌تواند تحمل کند زیرا حداکثر جریان آن در ۳۰ ولت با استفاده از شکل (۶) حدود ۱۰ میکروآمپر است. شیب نمودار جریان بر حسب شارش، ثابت آسیب جریان معکوس (α) است. بنابراین با استفاده از شکل‌های (۷) تا (۹)، تغییرات ثابت آسیب جریان معکوس (α) بر حسب ولتاژ به‌دست آمد که نتایج در جدول (۱) و شکل‌های (۱۰) تا (۱۲) آورده شده است.

جدول ۱- ثابت آسیب جریان معکوس (α) در ولتاژهای مختلف برای دیودهای

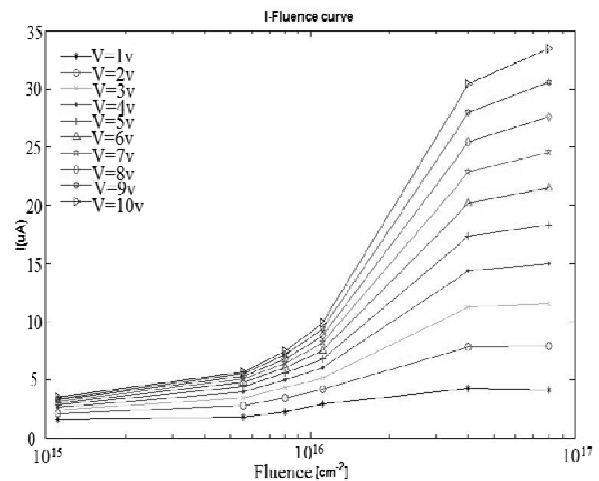
BYV27، BYV95 و 1N4007

α [A. cm ²]	BYV27	BYV95	1N4007
۱V	$1/0.636 \times 10^{-22}$	$3/2171 \times 10^{-22}$	$1/8777 \times 10^{-22}$
۲V	$1/7576 \times 10^{-22}$	$7/5474 \times 10^{-22}$	$3/2465 \times 10^{-22}$
۳V	$2/30.56 \times 10^{-22}$	$11/97 \times 10^{-22}$	$2/851 \times 10^{-22}$
۴V	$2/79.55 \times 10^{-22}$	$16/287 \times 10^{-22}$	$4/21.3 \times 10^{-22}$
۵V	$3/261 \times 10^{-22}$	$20/56 \times 10^{-22}$	$4/5842 \times 10^{-22}$
۶V	$3/69.1 \times 10^{-22}$	$24/755 \times 10^{-22}$	$4/8991 \times 10^{-22}$
۷V	$4/13.5 \times 10^{-22}$	$28/791 \times 10^{-22}$	$5/22.7 \times 10^{-22}$
۸V	$4/5624 \times 10^{-22}$	$32/846 \times 10^{-22}$	$5/5362 \times 10^{-22}$
۹V	$4/9361 \times 10^{-22}$	$36/775 \times 10^{-22}$	$5/58.1 \times 10^{-22}$
۱۰V	$5/31.6 \times 10^{-22}$	$40/671 \times 10^{-22}$	$6/1365 \times 10^{-22}$

در کاربردهای فضایی با توجه به مداری که ماهواره در آن قرار می‌گیرد و میزان تابشی که دریافت می‌کند و مداری الکترونیکی که دیود در آن استفاده شده است می‌توان دیود مناسب را انتخاب کرد. به عنوان مثال اگر ولتاژ معکوس دیود در مدار مورد استفاده 10v است و جریان معکوس آن نباید بیشتر از ۵ میکروآمپر شود با استفاده از شکل‌های (۴) تا (۶) اگر از دیود BYV27 استفاده شود حداکثر شارش قابل تحمل حدود 1.2×10^{16} ، اگر از دیود BYV95 استفاده شود حداکثر شارش قابل تحمل حدود 5×10^{15} و اگر از دیود 1N4007 استفاده شود حداکثر شارش قابل تحمل حدود 4×10^{16} خواهد بود. که با دانستن میزان شارش نوترون در طول حرکت ماهواره می‌توان دیود مناسب را انتخاب کرد. سپس با استفاده از شکل‌های (۴) تا (۶) تغییرات جریان بر حسب شارش در ولتاژهای ۱ تا ۱۰ ولت و در دمای ثابت را به‌دست آمد که نتایج در شکل‌های (۷) تا (۹) آورده شده است.

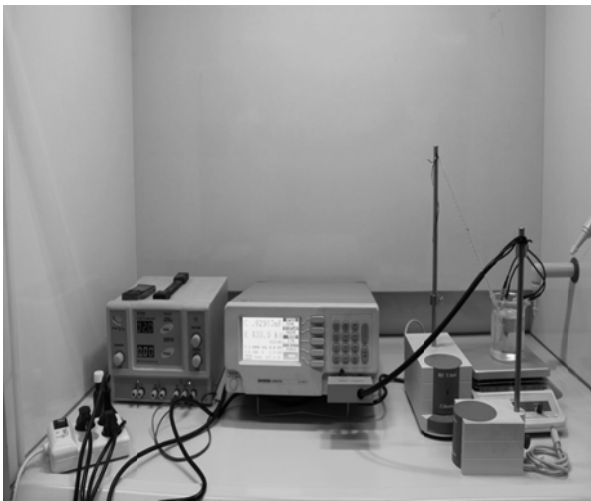


شکل ۷- نمودار جریان بر حسب شارش در ولتاژهای مختلف برای دیود BYV27

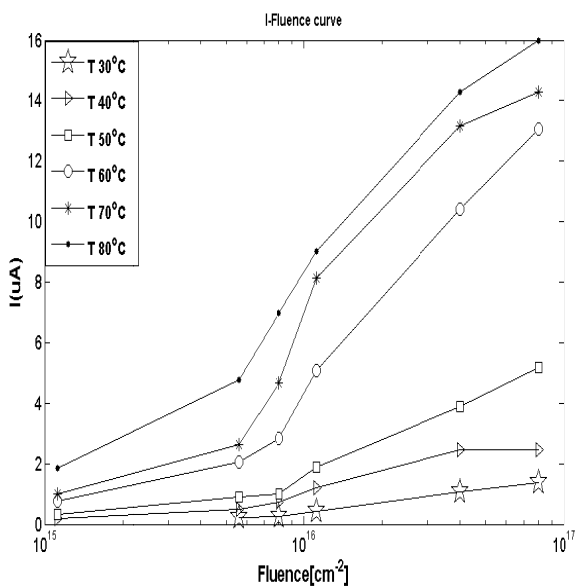


شکل ۸- نمودار جریان بر حسب شارش در ولتاژهای مختلف برای دیود BYV95

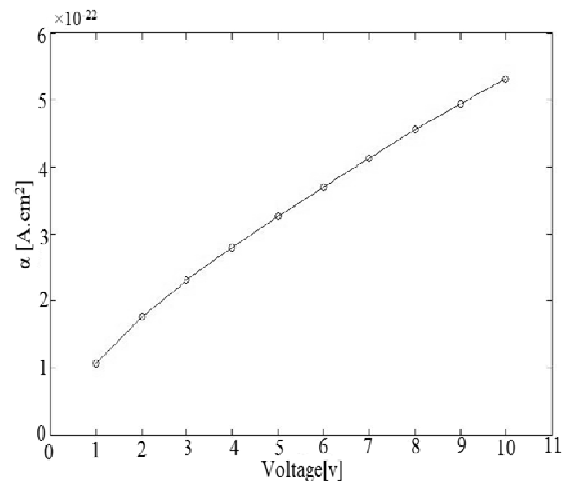
برای اندازه‌گیری ثابت آسیب جریان معکوس α در دماهای مختلف، ابتدا تغییرات جریان بر حسب شارش در دماهای مختلف اندازه‌گیری شد. برای اندازه‌گیری تغییرات جریان بر حسب شارش در دماهای مختلف از دستگاه LCR Meter 819 و حمام پارافین استفاده شد. همان‌طور که در شکل (۱۳) نشان داده شده است دیود در یک بشر پر از پارافین قرار داده شده و دمای پارافین به‌وسیله دستگاه گرم‌کننده شرکت AS One در دماهای مختلف تنظیم شد. ولتاژ معکوس دیودها در این آزمایش ۲۷V است. نتایج اندازه‌گیری تغییرات جریان بر حسب شارش در دماهای مختلف در شکل‌های (۱۴) و (۱۵) نشان داده شده است.



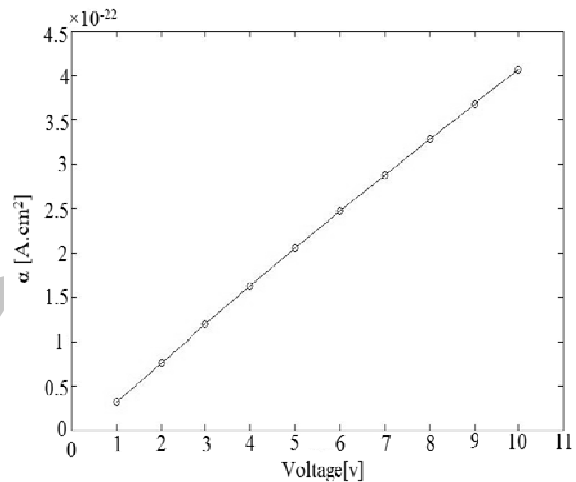
شکل ۱۳- چیدمان آزمایش اندازه‌گیری تغییرات جریان بر حسب شارش در دماهای مختلف



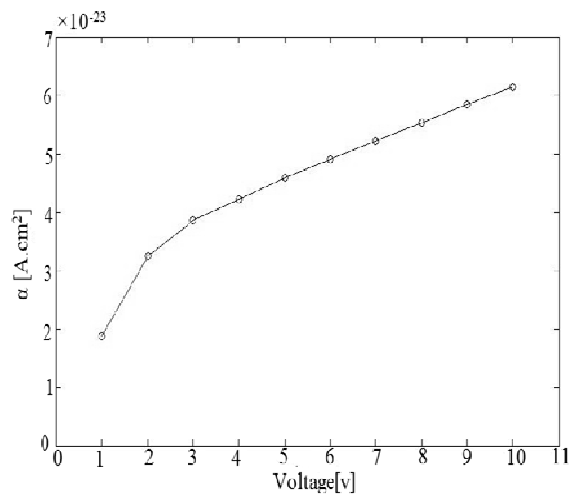
شکل ۱۴- جریان بر حسب شارش در دماهای مختلف برای دیود BYV95



شکل ۱۰- ثابت آسیب جریان معکوس α بر حسب ولتاژ برای دیود BYV27

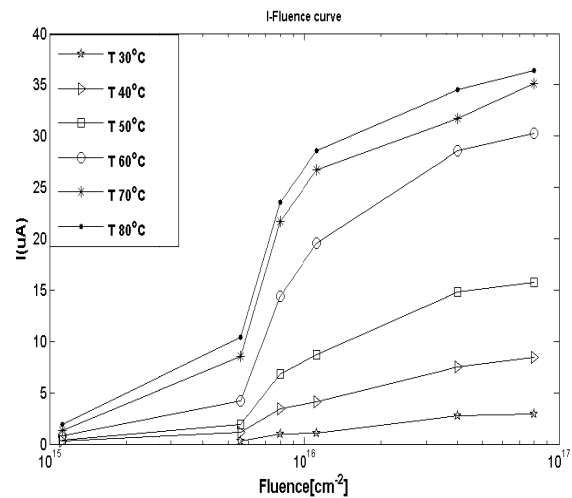
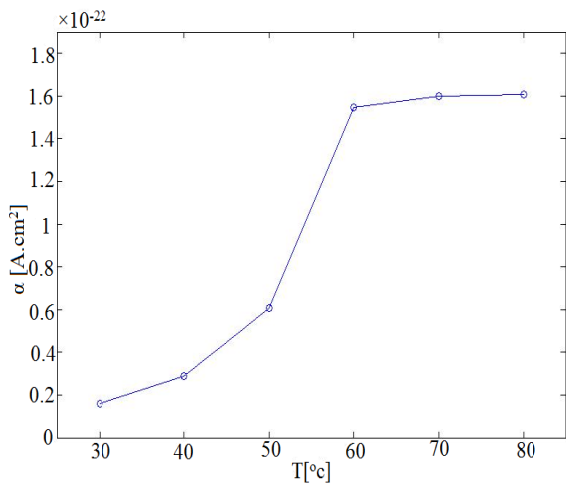


شکل ۱۱- ثابت آسیب جریان معکوس α بر حسب ولتاژ برای دیود BYV95C



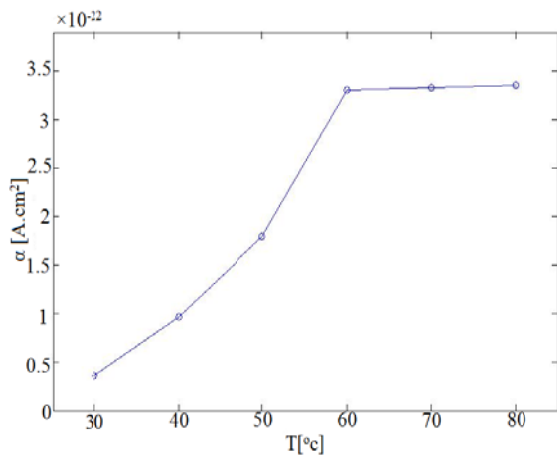
شکل ۱۲- ثابت آسیب جریان معکوس α بر حسب ولتاژ برای دیود 1N4007

پرتودهی در مقابل آنها قابل صرف نظر است. در این حالت می‌گویند نیمه‌هادی ذاتی شده است.



شکل ۱۵- جریان بر حسب شارش در دماهای مختلف برای دیود 1N4007

شکل ۱۶- ثابت آسیب جریان معکوس α بر حسب دما برای دیود BYV95



شکل ۱۷- ثابت آسیب جریان معکوس α بر حسب دما برای دیود 1N4007

با استفاده از شکل‌های (۱۴) و (۱۵) می‌توان حداکثر شارش یا دمای قابل تحمل دیود در یک مأموریت فضایی را استخراج کرد. به عنوان مثال اگر شارش دریافتی توسط دیود در یک مأموریت فضایی 10^{16} باشد و جریان معکوس دیود در ولتاژ 2V نباید از ۴ میکروآمپر افزایش یابد اگر از دیود BYV95 استفاده کنیم حداکثر دمای قابل تحمل حدود ۶۰ درجه سانتی‌گراد و اگر از دیود 1N4007 استفاده کنیم حداکثر دمای قابل تحمل حدود ۴۰ درجه سانتی‌گراد خواهد بود. که با توجه به دمای ماهواره در مدار مورد استفاده می‌توان دیود مناسب را انتخاب کرد. با استفاده از شکل‌های (۱۴) و (۱۵) ثابت آسیب جریان معکوس α در دماهای مختلف به دست می‌آید. تغییرات α بر حسب دما برای دیودهای BYV95 و 1N4007 در جدول (۲) آورده شده و در شکل‌های (۱۶) و (۱۷) رسم شده است.

جدول ۲- ثابت آسیب جریان معکوس α بر حسب دما برای دیودهای BYV95 و 1N4007

α [A.cm ²]	BYV95	1N4007
۳۰.°C	$1/6 \times 10^{-22}$	$3/56 \times 10^{-22}$
۴۰.°C	$2/8 \times 10^{-22}$	$9/63 \times 10^{-22}$
۵۰.°C	6×10^{-22}	$1/79 \times 10^{-22}$
۶۰.°C	$1/54 \times 10^{-22}$	$3/3 \times 10^{-22}$
۷۰.°C	$1/59 \times 10^{-22}$	$3/33 \times 10^{-22}$
۸۰.°C	$1/6 \times 10^{-22}$	$3/35 \times 10^{-22}$

نتیجه گیری

همان‌طور که بیان شد جریان معکوس دارای یک مؤلفه است که به غلظت مراکز ترکیب و تولید وابسته است. هرچه غلظت مراکز ترکیب و تولید بر اثر پرتودهی بیشتر شود، ثابت آسیب جریان معکوس (α) بزرگ‌تر می‌شود و نشان‌دهنده این است که قطعه در برابر پرتو آسیب‌پذیرتر است. برعکس هرچه ثابت آسیب جریان معکوس (α) کوچک‌تر باشد نشان‌دهنده این است که قطعه در برابر پرتو مقاوم‌تر است. با توجه به اینکه ثابت آسیب جریان معکوس (α) وابسته به ولتاژ معکوس و دماست در هر کاربرد با توجه به دمای محیط و ولتاژ معکوس می‌توان مناسب‌ترین قطعه را انتخاب کرد.

همان‌طور که ملاحظه می‌شود ثابت آسیب جریان معکوس α با افزایش دما، افزایش می‌یابد ولی در دماهای بالا این افزایش بسیار کند و ناچیز است. علت این مسئله این است که در دماهای بالا تعداد حامل‌های ذاتی به شدت افزایش می‌یابد و حامل‌های ناشی از

مراجع

- [8] Navon, D. H., *Electronic Materials and Devices*, Boston, Houghton Mifflin, 1975.
- [9] Robert, M. B. and Donovan, R. P., *Fundamental of Silicon Integrated Device Technology*, Vol. 1, Prentice-Hall INC, 1967.
- [10] Gill, K., et al., "Radiation Damage by Neutrons Andphotons to Silicon Detectors", *Nucl. Inst. and Meth. A322*, 1992, pp.177-188.
- [11] Barberis, E., et al., "Temperature Effects on Radiation Damage to Silicon Detectors", *Nucl. Inst. and Meth. A326*, 1993, pp. 373-380.
- [12] Chilingarov, A., et al., "Radiation Studies and Operational Projections for Silicon in the Atlas Inner Detector," *6th Pisa Meeting on Advanced Detectors*, Vol. 360, Issues 1-2, Italia, 1995, pp. 432-437.
- [13] Lemeilleur, F., et al., "Study of Characteristic of Silicon Detectors Irradiated with 24GeV/c Protons between -20°C and $+20^{\circ}\text{C}$," *Nucl. Inst. and Meth. A360*, 1995, pp. 438-444.
- [14] Barberis, E., et al., "Radiation Damage in Silicon Detectors – Self Annealing Corrections," *SITP-Internal Note*, SITP-002, 1991.
- [15] Hall, G., et al., "Neutron Radiation Damage Studies of Silicon Detectors – Summary of Recent Results," *Imperial College Internal Note, IC/HEP/91/1*, 1991.
- [1] Leroy, C. and Rancoita, P. G., *Particle Interaction and Displacement Damage in Silicon Devices Operated in Radiation Environment*, IOP Publishing, 2007, pp.493-625.
- [2] Reed, R., LaBel, K., Kim, H., Leidecker, H. and Lohr, J., *Test Report of Proton and Neutron Exposures of Devices that Utilize Optical Components and Are Contained in the CIRS Instrument*, NASA Test Report i090397, 1997.
- [3] ASTM E722 Standard Practice for Characterizing Neutron Energy Fluence Spectra in Terms of an Equivalent Monoenergetic Neutron Fluence for Radiation-Hardness Testing of Electronics, *American Society for Testing Materials 722-94*, Philadelphia, Pennsylvania, 1994.
- [4] Korde, R., "The Effect of Neutron Irradiation on Silicon Photodiodes," *IEEE Transactions on Nuclear Science*, Vol. 36, Issue 6, 1989, pp. 2169-2175.
- [5] Fraser, D. A., *The Physics of Semiconductor Devices*, Oxford Physics Series, 4th Edition, 1986.
- [6] Sze, S. M., *Physics of Semiconductor Devices*, Second Edition, J. Wiley & Sons, 1981.
- [7] dler, R. B., Smith, A. C. and Longini, R. L., *Introduction to Semiconductor Physics, Semiconductor Electronics Education Committee (SEEC)*, Vol. 1, New York: Wiley, 1964.

Archive