

بررسی تغییرات مشخصه‌های الکتریکی ترانزیستورهای دوقطبی پیوندی، قبل و پس از پرتودهی گاما

مریم امینی^{۱*}، علیرضا وجدانی نقره‌ئیان^۱ و سیدمحمد رضوی^۲

^۱گروه فیزیک، دانشگاه نیشابور، نیشابور، خراسان رضوی، ایران.

^۲گروه مهندسی برق، دانشگاه نیشابور، نیشابور، خراسان رضوی، ایران.

*خراسان رضوی، نیشابور، دانشگاه نیشابور، گروه فیزیک، کدپستی: ۹۳۱۹۷-۷۴۴۰۰

پست الکترونیکی: m.amini@neyshabur.ac.ir

چکیده

ترانزیستورهای پیوندی دوقطبی ($BJTs^1$) قطعات نیمه‌هادی فعالی هستند که معمولاً به‌عنوان تقویت‌کننده و سوئیچینگ استفاده می‌شوند. در این تحقیق، ترانزیستورها برای کار در ناحیه‌ی فعال بایاس شده‌اند و با اندازه‌گیری مشخصه‌های الکتریکی قطعات، قبل و بعد از فرایند پرتودهی توسط چشمه‌ی ^{60}Co ، اثر تابش گاما بر روی هر یک از این مشخصه‌ها بررسی گردیده است. به‌منظور اندازه‌گیری هر مشخصه، ابتدا مدار مناسب برای هر ترانزیستور طراحی گردیده، سپس اندازه‌گیری‌های لازم انجام شده است. نتایج تجربی نشان می‌دهند که با افزایش دز دریافتی توسط هر ترانزیستور، جریان کلکتور کاهش و ولتاژ کلکتور-امیتر افزایش می‌یابد. به‌طوری که بیش‌ترین تغییر در مقدار مشخصه‌های ترانزیستورهای BD911 و 2N3420، پس از دریافت دز ۲۰ kGy مشاهده می‌شود. از طرفی دزهای تابشی کمتر از ۱ kGy تأثیر اندکی بر روی مشخصه‌های الکتریکی ترانزیستورهای BJT دارند. بنابراین می‌توان گفت که این ترانزیستورها دارای مقاومت ساختاری بیش‌تری در مقابل پرتو بوده و می‌توان از آن‌ها در طراحی مدارهای الکترونیکی و دستگاه‌هایی که در محیط‌های تابشی به کار می‌روند، استفاده نمود.

کلیدواژه‌گان: ترانزیستور BJT، تابش گاما، مشخصه‌های الکتریکی.

¹ Bipolar Junction Transistors

۱. مقدمه

همان‌طور که می‌دانیم، امروزه تکنولوژی فضایی بخش بسیار بزرگی از زندگی بشر را تشکیل می‌دهد. تکنولوژی‌هایی مانند سیستم پیش‌بینی آب‌وهوا، ناوبری جهانی، ماهواره‌ها و پخش اطلاعات، سیستم‌های مخابراتی و همچنین سیستم‌های نظارتی و ارتش، همگی به شدت بر زیرساخت‌های فضایی متکی می‌باشند [۱،۲]. نیاز به مطالعه‌ی اثر محیط‌های تابشی بر روی مشخصه‌های قطعات نیمه‌رسانا، با گسترش حوزه‌ی فضایی و انرژی و توسعه‌ی اکتشافات و به دلیل استفاده‌ی گسترده‌ی این قطعات در قسمت‌های مختلف فضاپیماها و نیروگاه‌های هسته‌ای، روزبه‌روز بیش‌تر می‌شود. وجود ذرات دارای انرژی بالا نظیر الکترون‌ها، پروتون‌ها و نوترون‌ها، در چنین محیط‌هایی بسیار قابل توجه است. پرتوهای یونیزان ساطع شده از منابع تابشی، بخش عمده‌ی محیط‌های تابشی فضا و سایت‌های هسته‌ای را تشکیل می‌دهند که باعث ایجاد ناهنجاری در سیستم‌های الکترونیکی و ماهواره‌های ارتباطی می‌شوند [۳]. تابشی که یک دستگاه نیمه‌رسانا تحت تأثیر آن قرار دارد، می‌تواند منجر به تغییر یا آسیب در عملکرد طبیعی آن دستگاه شود. به‌طور کلی اثراتی که تابش می‌تواند بر روی دستگاه‌های نیمه‌رسانا بگذارد را می‌توان در چهار دسته طبقه‌بندی نمود: اثرات پالس الکترومغناطیس^۱، اثرات میزان دز بالا، تغییر حالت ایجاد شده توسط یک ذره‌ی یونیزان^۲ و اثرات کلی دز [۴].

یکی از دلایل اصلی مطالعه‌ی پاسخ این قطعات به پرتوهای یونیزان، طراحی دستگاه مورد استفاده برای اندازه‌گیری دز پرتو در محیط‌های مختلف است. زیرا در ساخت این دستگاه از قطعاتی نظیر ترانزیستور استفاده می‌شود. بنابراین آگاهی از درستی عملکرد این قطعات در برابر پرتو، به‌منظور طراحی

سیستم الکترونیکی‌ای که بتواند به‌درستی در مدار عمل نماید بسیار حائز اهمیت است [۵]. مطالعات نشان می‌دهند که مقدار مشخصه‌های الکتریکی ترانزیستور و همچنین کیفیت عملکرد ترانزیستورهای پیوندی دوقطبی، در اثر دریافت دزی که در طول چرخه‌ی عمر خود با آن مواجه می‌شوند، کاهش می‌یابد [۴]. آسیب کلی دز بر روی ترانزیستورهای پیوندی دوقطبی گسسته و مدارهای پیوسته‌ی خطی که با پردازش قدیمی‌تری ساخته شده‌اند، به دلیل کاربردهای فضایی آن‌ها بسیار حائز اهمیت است. اثر کرک^۳ محدود به چگالی جریان ترانزیستورهای گسسته با ولتاژ شکست بالا در کلکتور می‌شود. چون ترانزیستورها باید در سطوح تزریق پایین قرار گیرند، حساسیت آن‌ها به پرتوهای یونیزان افزایش می‌یابد. همواره باید توجه نمود که شرایط بایاس در طول مدت تابش، اثرات متفاوتی را بر روی ترانزیستورهای مجزا و مدار مجتمع خواهد گذاشت. به‌طوری که دستگاه‌های گسسته، به‌شدت وابسته به شرایط بایاس می‌باشند، درحالی که آسیب در IC‌های خطی، در حالت وجود بایاس یا عدم وجود آن مشابه خواهد بود. همچنین تفاوت‌های بزرگی در پاسخ این دستگاه‌ها به نرخ دز پایین وجود دارد [۵]. در چند مورد از تحقیقات انجام‌شده، برای بایاس ترانزیستور، جریان کلکتور را ثابت در نظر گرفته، سپس به ازای مقادیر مختلفی از I_c ، جریان بیس و امپتر را اندازه‌گیری کرده و تغییرات آن‌ها را برحسب تغییرات دز دریافتی ترانزیستور رسم نموده‌اند [۴،۱]. استفاده از این نوع بایاس برای مدارهایی که تابش‌دهی و اندازه‌گیری مقادیر مشخصه‌ها به‌صورت همزمان انجام می‌شود، مورد بسیار مناسبی می‌باشد.

³ Kirk Effect

¹ Electromagnetic Pulse Effects (EMPs)

² Single Event Upsets (SEU)

نتایج آزمایش‌های انجام شده بر روی ترانزیستورها (قبل و بعد از تابش دهی آن‌ها)، نشان می‌دهد که I_B به طور غیرمنتظره‌ای با افزایش دز جذب شده توسط ترانزیستور، افزایش می‌یابد. این عبارت به این معنا است که در جریان سطحی، نوسان‌سازی نسبی مربوط به سطح وجود دارد و این اتفاق تنها زمانی رخ می‌دهد که تخلیه‌ی پایه‌ی p در ترانزیستورهای BJT نوع NPN که تحت آزمایش قرار دارند وجود داشته باشد. این امر به نوبه‌ی خود می‌تواند منجر به کاهش I_C شود، به طوری که در زمان حیات ترانزیستور، حامل اقلیت کاهش می‌یابد و بنابراین کاهش در $\frac{1}{h_{fe}}$ برای قطعات تحت تابش اتفاق می‌افتد. قابل ذکر است که در پژوهش‌های انجام شده، با وجود ثابت گرفتن I_C مقدار این مشخصه پس از تابش دهی تغییر می‌کند [۴].

در منحنی مشخصه‌ی ترانزیستور، جریان کلکتور ترانزیستوری که در حالت اشباع قرار دارد، به طور قابل توجهی با افزایش دز دریافت شده توسط ترانزیستور، کاهش می‌یابد، اما V_{CE} در ناحیه‌ی اشباع تقریباً ثابت است [۷].

در این جا مطالعات انجام شده، بر روی ترانزیستورهای تابش دیده توسط چشمه‌ی گاما می‌باشد، زیرا پرتوی گاما دارای نقش بسیار مهمی در علم و فناوری، صنعت، پزشکی، کشاورزی، بخش‌های انرژی و... است [۸].

همان‌طور که می‌دانیم، بخشی از پرتوی گاما که به ماده می‌رسد، بر اثر برخورد با آن، ممکن است توسط ماده جذب شود و یا از آن پراکنده گردد [۹]. از طرفی برهم‌کنش پرتوی گاما با ماده شامل سه فرایند اصلی: اثر فوتوالکتریک، پراکندگی کامپتون و تولید زوج می‌شود [۱۰].

به‌طور کلی، برخورد پرتو با ماده می‌تواند سبب یونش و ایجاد برانگیختگی داخلی، درون ساختار ماده شود. براین اساس

طبق اثری که پرتو می‌تواند بر روی ساختار مواد بگذارد، در این پژوهش به بررسی اثر تابش بر روی مشخصه‌های الکتریکی ترانزیستورهای BJT پرداخته شده است. تابش دهی این قطعات با استفاده از چشمه‌ی ^{60}Co انجام شده و مقدار مشخصه‌های هر ترانزیستور، قبل و بعد از فرایند پرتو دهی اندازه‌گیری شده است.

تفاوت اصلی این پژوهش با پژوهش‌های انجام شده، نحوه‌ی بایاس ترانزیستورها و بررسی اثر تابش گاما پس از فرایند تابش دهی بر روی ترانزیستورها می‌باشد.

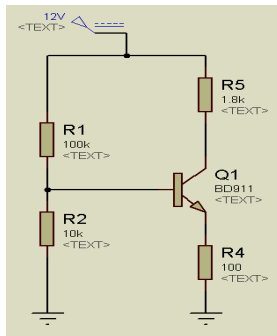
همان‌طور که گفته شد، نوع بایاس با توجه به نحوه‌ی بررسی مشخصه‌های ترانزیستور تابش دیده، متفاوت است.

در این تحقیق، با قرارگیری هر ترانزیستور درون مدار و اندازه‌گیری تمام مشخصه‌های ترانزیستور، قبل و بعد از فرایند تابش دهی، مقادیر مربوط به جریان‌های کلکتور، امیتر و هر ۳ ولتاژ ترانزیستور، درون جداول ۱ تا ۴ و شکل‌های ۱ و ۲ گزارش شده‌اند.

۲. روش کار

در این تحقیق ابتدا با مطالعه‌ی دقیق ترانزیستورها و نحوه‌ی عملکرد آن‌ها، ترانزیستورهای BJT به‌عنوان نمونه‌های مورد بحث گزینش شده و نوع NPN آن مورد بررسی قرار گرفته است. علت انجام آزمایش بر روی این ترانزیستورها، شناسایی میزان تأثیر پرتو بر روی مشخصه‌های الکتریکی آن‌ها و همچنین شناسایی آستانه‌ی تحمل هر ترانزیستور می‌باشد. منظور از چگونگی اثر پرتو، تأثیری است که یک پرتو می‌تواند بر روی مشخصه‌های یک قطعه‌ی نیمه‌رسانا بگذارد.

باید توجه نمود که اثر پرتو دهی گاما با دزهای مختلف، تأثیرات متفاوتی بر روی انواع ترانزیستورها دارد، از طرفی هر



شکل (۱): مدار تست ترانزیستورهای BJT.

همان‌طور که شکل ۱ نشان می‌دهد، برای تست ترانزیستور درون مدار، ابتدا ولتاژ ۱۲ ولت به مدار اعمال شده، سپس ۴ مقاومت متفاوت (براساس ترانزیستور قرار گرفته شده در مدار)، انتخاب شده و مدار توسط ترانزیستور و مقاومت‌ها بسته شده است. مدار در نظر گرفته شده برای هر ترانزیستور، برای عملکرد آن در ناحیه‌ی فعال بایاس شده است. پس از بستن مدار و اعمال ولتاژ به آن، جریان‌های عبوری از پایه‌ی کلکتور، امیتر و بیس اندازه‌گیری شده اند، از طرفی علاوه بر جریان‌ها، ولتاژ بیس-امیتر، بیس-کلکتور و کلکتور-امیتر نیز اندازه‌گیری شده و مقادیر آن‌ها ثبت گردیده‌اند. پس از انجام آزمایش‌های مربوط به هر ترانزیستور، یک عدد از هر نوع، درون پنج بسته‌ی مجزا قرار داده شده و ترانزیستورها برای انجام فرایند پرتودهی بسته‌بندی شده‌اند. این نکته بسیار قابل توجه است که ترانزیستورهای موردآزمایش در این پژوهش، 2N3420 و BD911 می‌باشند. همان‌طور که گفته شد، این دو ترانزیستور از نوع NPN هستند و دارای مقاومت دمایی تا 25°C می‌باشند. پس از تکمیل فرایند بسته‌بندی ترانزیستورها، هر بسته در مقابل چشمه‌ی ^{60}Co قرار داده شده و هر یک از آن‌ها دز خاصی را دریافت نموده است. فرایند پرتودهی مربوط به این پژوهش، توسط هماهنگی‌های انجام شده در محل سازمان انرژی اتمی ایران انجام شده و اکتیویته‌ی چشمه‌ی مورد استفاده برای فرایند پرتودهی، 8302 کوری و آهنگ دز دریافتی توسط هر نمونه، $1/98$ Gy/sec می‌باشد.

ترانزیستور می‌تواند آستانه‌ی تحمل خاصی برای دریافت دز داشته باشد (به عبارتی پس از دریافت دز بیش‌تر از مقدار آستانه، رفتار الکتریکی خود را تغییر می‌دهد).

با این حال به‌منظور انجام دقیق مطالعات، آزمایش‌های لازم برای اندازه‌گیری هر یک از مشخصه‌های الکتریکی ترانزیستور در ناحیه‌ی فعال، قبل از انجام فرایند پرتودهی نیز انجام شده‌اند، به‌گونه‌ای که با آزمایش ترانزیستور در مدارهای مختلف، مدار مناسب برای عملکرد صحیح آن در ناحیه‌ی فعال شناسایی شده، سپس ترانزیستور به منظور انجام آزمایش‌های لازم برای اندازه‌گیری مشخصه‌ها، درون مدار قرار داده شده است. شرایط در نظر گرفته‌شده برای انجام تمامی این آزمایش‌ها، شرایط استاندارد آزمایشگاهی (به عبارتی دمای حدود $25 \pm 3^{\circ}\text{C}$ برای محیط) می‌باشد.

همان‌طور که می‌دانیم، ترانزیستور پیوندی دوقطبی که در بسیاری از موارد با نام مختصر ترانزیستور شناخته می‌شود، در حقیقت به صورت یک منبع جریان کنترل شده با جریان، عمل می‌نماید. همچنین در ترانزیستور پیوندی دوقطبی، حامل‌های اکثریت و حامل‌های اقلیت، هردو در ایجاد جریان دخالت دارند و این ترانزیستورها از اتصال سه لایه بلور نیمه‌هادی تشکیل می‌شوند. لایه‌ی وسط، بیس (B) و دولایه‌ی جانبی، یکی امیتر (E) و دیگری کلکتور (C) نام دارد و نوع ناخالصی بلور بیس با امیتر و کلکتور کاملاً متفاوت است. به‌عنوان مثال در ترانزیستورهای PNP، بیس از بلور نوع N و امیتر و کلکتور از نوع P هستند و در ترانزیستورهای NPN، بیس از بلور نوع P و دولایه‌ی دیگر از نوع N ساخته می‌شوند.

در شکل ۱ مدار شناسایی شده برای تست ترانزیستور BJT نشان داده شده است.

جدول (۱): ولتاژهای BD911 در ناحیه‌ی فعال

(قبل و بعد از تابش دهی).

V_{CE} (ولت)	V_{BC} (ولت)	V_{BE} (ولت)	میزان دز دریافتی توسط ترانزیستور BD911
$6/0 \pm 0/05$	$-5/36 \pm 0/05$	$0/582 \pm 0/005$	۰
$5/93 \pm 0/05$	$-5/29 \pm 0/05$	$0/585 \pm 0/005$	۱۰ Gy
$5/88 \pm 0/05$	$-5/22 \pm 0/05$	$0/580 \pm 0/005$	۲۰ Gy
$6/02 \pm 0/05$	$-5/38 \pm 0/05$	$0/585 \pm 0/005$	۲۰۰ Gy
$6/42 \pm 0/05$	$-5/78 \pm 0/05$	$0/581 \pm 0/005$	۱ kGy
$8/42 \pm 0/05$	$-7/79 \pm 0/05$	$0/582 \pm 0/005$	۲۰ kGy

جدول (۲): جریان‌های BD911 در ناحیه‌ی فعال

(قبل و بعد از تابش دهی).

I_E (میلی آمپر)	I_C (میلی آمپر)	میزان دز دریافتی توسط ترانزیستور BD911
$3/23 \pm 0/05$	$3/22 \pm 0/05$	۰
$3/29 \pm 0/05$	$3/19 \pm 0/05$	۱۰ Gy
$3/28 \pm 0/05$	$3/16 \pm 0/05$	۲۰ Gy
$3/28 \pm 0/05$	$3/18 \pm 0/05$	۲۰۰ Gy
$3/02 \pm 0/05$	$2/91 \pm 0/05$	۱ kGy
$1/83 \pm 0/05$	$1/81 \pm 0/05$	۲۰ kGy

جدول (۳): ولتاژهای 2N3420 در ناحیه‌ی فعال

(قبل و بعد از تابش دهی).

V_{CE} (ولت)	V_{BC} (ولت)	V_{BE} (ولت)	میزان دز دریافتی توسط ترانزیستور 2N3420
$8/92 \pm 0/05$	$-8/37 \pm 0/05$	$0/582 \pm 0/005$	۰
$8/72 \pm 0/05$	$-8/09 \pm 0/05$	$0/584 \pm 0/005$	۱۰ Gy
$10/58 \pm 0/05$	$-10/03 \pm 0/05$	$0/511 \pm 0/005$	۲۰ Gy
$10/20 \pm 0/05$	$-9/63 \pm 0/05$	$0/528 \pm 0/005$	۲۰۰ Gy
$9/16 \pm 0/05$	$-8/61 \pm 0/05$	$0/539 \pm 0/005$	۱ kGy
$10/91 \pm 0/05$	$-10/34 \pm 0/05$	$0/535 \pm 0/005$	۲۰ kGy

به‌عنوان مثال، برای دریافت دز ۱ kGy توسط ترانزیستور، نمونه حدود ۸ دقیقه و ۲۳ ثانیه در مقابل چشمه قرار داده شده‌است. فرایند دریافت دز توسط هریک از بسته‌ها، در شرایط محیطی یکسان انجام شده و مقادیر این دزها به صورت ۱۰ Gy، ۲۰ Gy، ۲۰۰ Gy، ۱ kGy و ۲۰ kGy می‌باشند. فاصله‌ی زمانی بین پرتودهی قطعات و تست آن‌ها درون مدار، کم‌تر از یک هفته بوده است. پس از اتمام فرایند پرتودهی، هر ترانزیستور مجدداً در مدار نشان داده شده توسط شکل ۱ قرار داده شده و پس از اعمال ولتاژ ۱۲ ولت به دو سر مدار، مشخصه‌های الکتریکی آن، که شامل ولتاژ و جریان‌های مختلف ترانزیستور می‌باشند، مجدداً مورد اندازه‌گیری قرار گرفته‌اند.

بنابراین تفاوت اصلی این پژوهش با سایر موارد انجام شده، بررسی مشخصه‌ها پس از اتمام فرایند پرتودهی می‌باشد، به همین دلیل شرایط بایاس ترانزیستورها متفاوت از حالت اندازه‌گیری مقدار مشخصه‌ها حین تابش دهی بوده و از حالت بایاس با ثابت گرفتن جریان کلکتور استفاده نگردیده است و ترانزیستورها در ناحیه‌ی فعال بایاس شده‌اند و به عبارتی ولتاژها و جریان‌های لازم توسط مقاومت‌ها به گونه‌ای فراهم گردیده، که این قطعات در ناحیه‌ی فعال کار کنند.

از ترانزیستور در حالت فعال می‌توان به‌عنوان تقویت‌کننده یا تثبیت‌کننده‌ی ولتاژ (رگولاتور) و ... استفاده نمود. نتایج به دست آمده از اندازه‌گیری‌های قبل و بعد از پرتودهی، در جدول‌های ۱ تا ۴ ثبت شده‌اند و نمودارهای مربوط به تغییرات ولتاژ کلکتور-امیتر و جریان کلکتور برای ترانزیستور BD911، برحسب دزهای مختلف رسم گردیده‌اند.

۳. بحث و نتایج

استفاده از ترانزیستورهای BJT در ناحیه‌ی فعال به‌عنوان تقویت‌کننده یا تثبیت‌کننده‌ی ولتاژ (رگولاتور) بسیار حائز اهمیت می‌باشد، بنابراین با استفاده از مدار شکل ۱، ابتدا این ترانزیستورها در ناحیه‌ی فعال بایاس شده، سپس آزمایش‌های لازم برای اندازه‌گیری هر مشخصه، قبل و بعد از فرایند پرتودهی انجام شده است. ترانزیستورهای مورد استفاده از نوع NPN می‌باشند، بنابراین منبع تغذیه‌ی مورد استفاده برای آن‌ها، باید دارای مقدار مثبت باشد که مقدار آن ۱۲ ولت در نظر گرفته شده است.

باتوجه به جدول‌های ۱ و ۳، به دلیل قرارگیری دو ترانزیستور در ناحیه‌ی فعال، V_{BE} و V_{CE} مثبت بوده و V_{BC} دارای مقدار منفی می‌باشد. همچنین V_{BE} تقریباً دارای مقدار $0.6V$ است که برابر با ولتاژ یک دیود در بایاس مستقیم می‌باشد.

باتوجه به جدول ۲ برای ترانزیستور BD911 و جدول ۴ برای ترانزیستور 2N3420، با افزایش دز دریافتی توسط ترانزیستور، جریان کلکتور به‌دلیل به دام افتادن اکسید در سطح $Si-SiO_2$ ، کاهش می‌یابد. این تغییرات در شکل ۲ که مربوط به ترانزیستور BD911 می‌باشد نیز به‌خوبی قابل مشاهده‌اند.

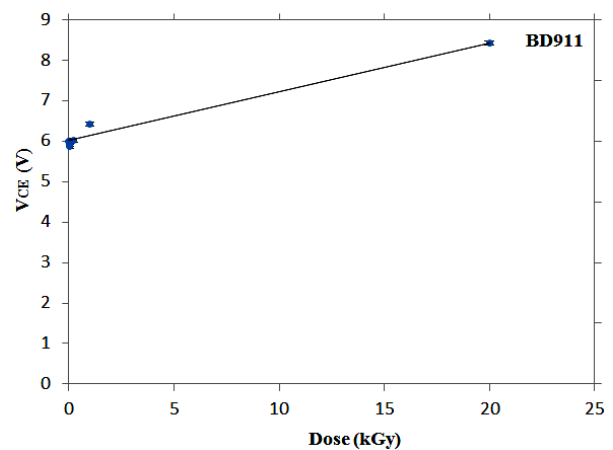
تغییرات مشاهده شده به این معناست که در جریان سطحی، به‌دلیل تخلیه‌ی پایه‌ی p در ترانزیستورهای BJT نوع NPN که تحت پرتودهی قرار گرفته‌اند، نوسان‌سازی نسبی سطح وجود داشته، که به نوبه‌ی خود منجر به کاهش I_C می‌شود. این تغییر می‌تواند نسبت تغییر بار کلکتور به تغییر ولتاژ بیس (gm) ترانزیستور را نیز تغییر دهد.

همان‌طور که در جدول‌های ۱ و ۳ مشاهده می‌شود، V_{BE} مثبت و V_{BC} منفی است، زیرا در ناحیه‌ی فعال، دیود بیس-

جدول (۴): جریان‌های 2N3420 در ناحیه‌ی فعال

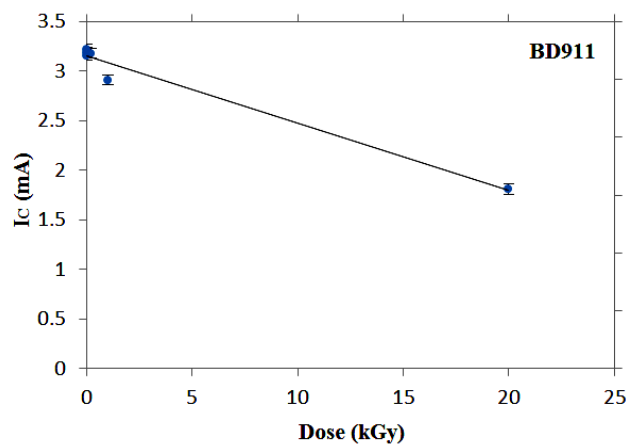
(قبل و بعد از تابش‌دهی).

I_E (میلی آمپر)	I_C (میلی آمپر)	میزان دز دریافتی توسط ترانزیستور
$1/17 \pm 0/05$	$1/13 \pm 0/05$	0
$1/78 \pm 0/05$	$1/75 \pm 0/05$	۱۰ Gy
$0/8 \pm 0/05$	$0/75 \pm 0/05$	۲۰ Gy
$1/03 \pm 0/05$	$0/96 \pm 0/05$	۲۰۰ Gy
$1/54 \pm 0/05$	$1/51 \pm 0/05$	۱ kGy
$0/70 \pm 0/05$	$0/55 \pm 0/05$	۲۰ kGy



شکل (۱): نمودار تغییر ولتاژ کلکتور امیتر، برحسب دز دریافتی توسط

ترانزیستور BD911.



شکل (۲): نمودار تغییر جریان کلکتور برحسب دز دریافتی توسط

ترانزیستور BD911.

امیتر در حالت تعادل مستقیم و دیود بیس-کلکتور در حالت بایاس معکوس قرار دارد.

همان‌طور که نتایج نشان می‌دهد، V_{CE} نیز دارای مقدار مثبت می‌باشد. با توجه به نتایج ثبت‌شده در جدول‌های ۱ و ۳، با افزایش دز دریافتی توسط ترانزیستور، V_{CE} افزایش می‌یابد. به عبارت دیگر، V_{CE} مقدار ثابتی ندارد و طبق نمودار شکل ۱، با افزایش دز دریافتی توسط ترانزیستور، تغییر می‌کند.

به عنوان مثال، در جدول‌ها و نمودارهای ۱ و ۲، که مربوط به ترانزیستور BD911 هستند، حداقل جریان کلکتور در حداکثر ولتاژ کلکتور-امیتر که $V_{CE} = 8.42$ است، به دست می‌آید. همچنین با توجه به جدول‌های ۳ و ۴، حداقل جریان کلکتور ترانزیستور 2N3420 در ولتاژ کلکتور-امیتر $V_{CE} = 10.91$ مشاهده می‌شود.

به طور کلی می‌توان گفت، تغییر در مشخصه‌های الکتریکی ترانزیستورهای BJT، توسط مکانیزم تحریک و انتقال الکترون از باند ظرفیت به باند رسانش انجام می‌شود. این امر موجب ایجاد تعداد زیادی اتم برانگیخته شده و همچنین تعداد حفره‌های ایجاد شده در باند ظرفیت را نیز افزایش می‌دهد که می‌تواند باعث تغییر در جریان کلکتور شود. قابل ذکر است که تابش‌دهی می‌تواند باعث افزایش دمای ماده‌ی درون ترانزیستور شود. با توجه به اینکه ماده‌ی تشکیل‌دهنده‌ی ساختار درونی هر دو ترانزیستور سیلیسیم است، این ماده دارای ظرفیت گرمایی ویژه‌ی 0.703 J/gr.K می‌باشد، بنابراین برای تغییر دمای آن به اندازه‌ی یک درجه‌ی کلونین، مقدار 703 Gy انرژی لازم است. پس تابش‌های بیش‌تر از 1 kGy می‌توانند بر روی آن‌ها تأثیر چشم‌گیری داشته باشند، ولی باید به این نکته دقت نمود که طبق ساختار در نظر گرفته شده برای این دو ترانزیستور، که

درون برگه‌ی مشخصات فنی^۱ آن‌ها نیز گزارش شده است، هر دو، تا دمای حدود 25°C از خود مقاومت نشان داده و دچار تغییرات چشم‌گیر در مقادیر مشخصه‌های خود نمی‌شوند و به عبارت دقیق‌تر، دمای کم‌تر از 25°C نمی‌تواند بر روی آن‌ها تأثیرات تخریبی بر جای بگذارد.

تغییرات ایجاد شده در مشخصه‌های ترانزیستورهای مورد مطالعه، در دزهای بیش‌تر از 1 kGy قابل مشاهده‌اند. به عبارت دیگر، دزهای کم‌تر از این مقدار، تأثیر زیادی بر روی این دو ترانزیستور ندارند.

۴. نتیجه‌گیری

در این تحقیق، اثرات تابش گاما بر مشخصه‌های الکتریکی ترانزیستورهای BJT که در ناحیه‌ی فعال بایاس شده بودند، مورد مطالعه قرار گرفت. نتایج نشان می‌دهد که با افزایش دز دریافتی توسط هر ترانزیستور، V_{CE} افزایش و I_C کاهش می‌یابد. مقادیر دز بیش‌تر از 1 kGy ، حداکثر تأثیر را بر ویژگی‌های الکتریکی ترانزیستورهای BD911 و 2N3420 دارند، از طرفی حداکثر تغییر در جریان کلکتور ترانزیستورهای BD911 و 2N3420 در دز 20 kGy دیده می‌شود.

از تحقیق انجام شده بر روی ترانزیستورهای BJT می‌توان دریافت که این ترانزیستورها بهترین گزینه برای کار در ناحیه‌ی فعال و برای استفاده در محیط‌های تابشی با دز کم‌تر از 1 kGy می‌باشند، زیرا دارای مقاومت بالایی در مقابل افزایش دما بوده و از طرفی دزهای کم‌تر از 1 kGy تأثیر چندانی بر روی مشخصه‌های الکتریکی آن‌ها ندارند. پس می‌توان این ترانزیستورها را در طراحی مدارهای الکترونیکی و دستگاه‌های مورد استفاده در محیط‌های تابشی به کار برد.

¹ Datasheet

۵. مراجع

- [1] F.P. Chee, H.F.A. Amir and S. Salleh. Defect Generation in Bipolar Devices by Ionizing Radiation. *IOSR Journal of Applied Physics* 6.3 (2014) 92–101.
- [2] M.M. Oo, N.M. Rashid, J.A. Karim, M.M. Zin and N.F. Hasbullah. Neutron Radiation Effect On 2N2222 And NTE 123 NPN Silicon Bipolar Junction Transistors. In *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering* 53.1 (2013) p. 012013. IOP Publishing.
- [3] O. Zeynali, D. Masti, M. Nezafat and A. Mallahzadeh. Study of “Radiation Effects of Nuclear High Energy Particles” on Electronic Circuits and Methods to Reduce Its Destructive Effects. *Journal of Modern Physics* 2.12 (2011) 1567.
- [4] C.F. Pien, H.F.A. Amir, S. Salleh and A. Muhammad. Effects of total ionizing dose on bipolar junction transistor. *American Journal of Applied Sciences* 7.6 (2010) 807–810.
- [5] S. Dasgupta and P. Chakrabarti. Effect of ionising radiation on the characteristics of a MOSFET. *IEE Proceedings-Circuits, Devices and Systems* 147.2 (2000) 133–138.
- [6] A.H. Johnston, G.M. Swift and B.G. Rax. Total dose effects in conventional bipolar transistors and linear integrated circuits. *IEEE transactions on nuclear science* 41.6 (1994) 2427–2436.
- [7] G.J. D’Souza. The effect of 8 MeV electrons on 2N907A PNP transistor. *International Journal of Science, Environment and Technology* 1.5 (2012) 447–453.
- [8] V.P. Singh, A.M. Ali, N.M. Badiger and A.M. El-Khayatt. Monte Carlo simulation of gamma ray shielding parameters of concretes. *Nuclear Engineering and Design* 265 (2013) 1071–1077.
- [9] V.P. Singh, S.P. Shirmardi, M.E. Medhat and N.M. Badiger. Determination of mass attenuation coefficient for some polymers using Monte Carlo simulation. *Vacuum* 119 (2015) 284–288.
- [10] D.R. McAlister. Gamma ray attenuation properties of common shielding materials. PG Research Foundation, University Lane Lisle, IL 60532 (2012).