

طراحی و ساخت دستگاه اندازه‌گیری دز پرتوهای گاما با استفاده از ترانزیستورهای ماسفت بر اساس جابه‌جایی ولتاژ آستانه

سعید بوربور و حمید جعفری*

گروه کاربرد پرتوها، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران.

*تهران، دانشگاه شهید بهشتی، گروه کاربرد پرتوها، کدپستی: ۱۹۸۳۹۶۹۴۱۱

پست الکترونیکی: H_jafari@sbu.ac.ir

چکیده

یکی از مسائل بسیار مهم در تأسیسات پرتودهی و مأموریت‌های فضایی، تعیین دز حاصل از ذرات یونیزان موجود در محیط پرتویی است. دزیمترهای ماسفت از جمله ابزارهای اندازه‌گیری دز در این محیط‌ها می‌باشند که علاوه بر حساسیت بسیار بالا نسبت به پرتو، قابلیت تحمل شار بالایی از ذرات را نیز دارند. این ابزار هم‌چنین دارای حجم کوچک، توان مصرفی پایین و قابلیت اطمینان بالا هستند. هدف از این کار، طراحی و ساخت یک سامانه دزیمتر پرتویی ماسفت بر اساس تغییرات ولتاژ آستانه ترانزیستور می‌باشد. کالیبراسیون پرتویی این سامانه با پرتودهی ماسفت‌ها در دزهای مختلف (از ۵ تا ۱۰۰ Gy) در آزمایشگاه استاندارد ثانویه SSDL، سازمان انرژی اتمی، کرج انجام گرفت. وابستگی دمایی این ترانزیستورها نیز با توجه به ضریب تغییرات دمایی در تمامی این اندازه‌گیری‌ها لحاظ شد. نتایج نشان می‌دهد، پاسخ این ماسفت‌ها به دز پرتویی مختلف تقریباً به صورت خطی بوده و دارای حساسیتی در حدود ۱ تا ۶ mV/Gy است که می‌توان بسته به محیط پرتوی و ابعاد مورد نیاز این ماسفت‌ها از انواع مختلف آن استفاده کرد.

کلیدواژگان: دزیمتر ماسفت، جابه‌جایی ولتاژ آستانه، منحنی جریان-ولتاژ، ضریب حساسیت دمایی.

۱. مقدمه

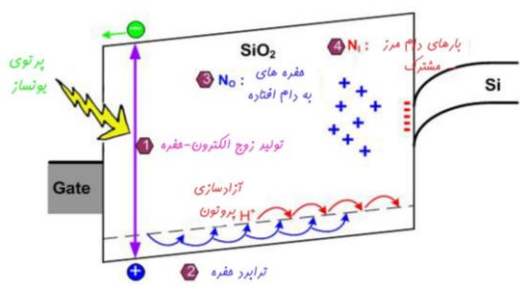
یکی از مسائل بسیار مهم در محیط‌های کار با پرتوهای یونساز مانند پزشکی هسته‌ای، راکتور، شتاب‌دهنده و مأموریت‌های فضایی، تعیین دز پرتویی می‌باشد [۱-۳]. از آنجایی که محیط‌های پرتویی نامبرده هر کدام دارای انواع مختلفی از پرتوها با طیف وسیعی از انرژی‌ها و شارهای پرتویی هستند، دزیمترهای متنوعی برای اندازه‌گیری دقیق مقدار دز مورد استفاده قرار می‌گیرند. یکی از این موارد استفاده از قطعات

نیمه‌رسانا و به‌طور خاص ترانزیستورهای ماسفت^۱ به‌عنوان دزیمتر می‌باشد که اصطلاحاً به آن‌ها رادفت^۲ گفته می‌شود [۴]. ایده استفاده از ترانزیستور ماسفت به‌عنوان یک ابزار سنجش ذرات یونساز سال‌ها پیش مطرح شده است. اما با این وجود برای استفاده عملی از ترانزیستورهای ماسفت به‌عنوان دزیمتر باید اصلاحاتی در مرحله ساخت آن انجام شود. به‌همین دلیل

^۱ MOSFET

^۲ RADFET

مورد یک میدان به کار رفته در قطعه ماسفت) سوق می‌یابند. تحرک کم حفره‌ها و حضور دام‌ها در نزدیکی مرز مشترک Si-SiO_2 باعث به دام انداختن حفره‌ها در لایه دی‌اکسیدسیلیکون می‌شود. محل دام‌ها بعد از گیراندازی یک حفره، یک بار مثبت به دست می‌آورد. حضور چنین دام‌های اکسیدی مثبت در لایه عایق آستر گیت از ترانزیستورهای ماسفت و خازن‌ها، ولتاژ آستانه قطعه را جابه‌جا می‌کند و هم‌چنین جریان نشتی را افزایش می‌دهد. مشاهدات تجربی اثبات کرده است که اندازه این جابه‌جایی با مجذور ضخامت اکسید تغییر می‌کند. این فرایندهای اصلی که در پاسخ پرتویی وابسته به زمان مشارکت دارند با شماره‌های ۱ تا ۴ علامت‌گذاری شده‌اند. فرایندهای ۱ تا ۳ ضمن تولید، ترابرد و به دام افتادن حفره‌ها در فیلم SiO_2 انجام می‌شوند و فرایند ۴ نیز با تجمع دام‌های به وجود آمده ناشی از پرتو در مرز مشترک Si-SiO_2 به وقوع می‌پیوندد. دو فرایند اول (۱ و ۲) مربوط به پاسخ کوتاه‌مدت می‌باشند. این پاسخ کوتاه‌مدت در دمای اتاق، در حدود پیکوثانیه تا چندین ثانیه است و بستگی به میدان اعمال شده، نوع پرتو، دما و ضخامت اکسید دارد. فرایندهای ۳ و ۴ مربوط به پاسخ بلندمدت سیستم‌های بر پایه فناوری ماس^۱ می‌باشند. این اثرات پرتویی بلندمدت هستند که از طریق جابه‌جایی‌های پارامتری در قطعات ماسفت مانند جابه‌جایی ولتاژ آستانه معرفی می‌شوند و می‌توانند برای ساعت‌ها و سال‌ها ادامه داشته باشند.



شکل (۱): شماتیکی از فرایندهای اصلی در برخورد پرتوی یونساز برای یک ساختار ماسفت.

استفاده از این ابزار از دو دهه گذشته شروع به افزایش کرد. هم‌اکنون به کمک پیشرفت صنایع ساخت قطعات نیمه‌هادی، دزیمترهای ماسفت یکی از پرکاربردترین دزیمترها هستند. قابلیت اطمینان بالا، مقاومت در برابر ضربه، فشار، رطوبت و دیگر عوامل مخرب و هم‌چنین قرائت بسیار آسان، حجم بسیار کوچک آن باعث شده است که در بسیاری موارد ماسفت‌ها به جای دزیمترهایی مانند اتاقلک یونش، TLD، دیودها و ... استفاده شوند [۵]. در سال‌های اخیر استفاده از دزیمترهای ماسفت به شدت در پرتودرمانی گسترش یافت. به دلیل حجم بسیار کوچک این دزیمترها را می‌توان وارد بدن بیمار کرده و از مقدار واقعی دز در ناحیه مورد نظر اطلاعات به دست آورد. قرائت ساده این دزیمتر سبب شده است که با اتصال بدون سیم هم مقدار دز اندازه‌گیری شده به دستگاه ثبت کننده ارسال شود. هم‌چنین در مواردی که مقدار دز در بیرون بدن مورد نیاز است، این دزیمترها به دلیل سادگی و سرعت بالا در قرائت بر دزیمترهای دیگر ارجحیت دارند [۴]. دزیمترهای ماسفت در مراکز تحقیقاتی مربوط به صنایع فضایی نیز در حال استفاده و تکامل هستند. شرکت‌های سازنده قطعات الکترونیک نیز قسمتی از تولیدات خود را به ساخت این گونه دزیمترها اختصاص داده‌اند. هم‌چنین شرکت‌های بین‌المللی دیگری در زمینه ماژول‌های اندازه‌گیری دزیمترهای ماسفت شروع به کار کرده‌اند [۶].

در شکل ۱ شماتیکی از فرایندهای رخ داده در یک ساختار دزیمتر ماسفت با یک بایاس مثبت اعمال شده به گیت آن بعد از برخورد پرتوی یونساز نشان داده شده است [۷ و ۸]. اتلاف انرژی یونش در دی‌اکسیدسیلیکون (SiO_2) باعث تولید جفت‌های الکترون-حفره می‌شود که به‌طور ذاتی دارای تحرک‌پذیری‌های متفاوتی هستند. کسری از این جفت‌های الکترون-حفره‌های تولید شده دست‌خوش بازترکیب می‌شوند در حالی که الکترون‌های باقی‌مانده سریعاً به سطوح مشترک (در

^۱ MOS

بر ترانزیستور رابطه تقریباً خطی دارد [۸].

روش‌های متعددی برای استخراج مقدار ولتاژ آستانه وجود دارد و مدارهای استخراجگر مختلفی نیز برای اندازه‌گیری خودکار این پارامتر پیشنهاد شده است [۹-۱۶]. معمولاً، به منظور بالابردن اطمینان و کیفیت اندازه‌گیری ولتاژ آستانه ماسفت، در روش‌های آزمایشگاهی از رابطه جریان درین نسبت به ولتاژ گیت در ناحیه کاری اشباع استفاده می‌شود. در ناحیه کاری اشباع، جریان عبوری از درین قابل توجه بوده و با نسبت سیگنال به نویز مناسبی قابل اندازه‌گیری است. با این وجود، اثرات ناشی از مقاوت‌های پارازیتی سری و موازی اتصالات ماسفت و افت قابلیت تحرک بارهای درون کانال در جریان بالا، سبب کاهش دقت اندازه‌گیری نهایی خواهد شد. به منظور کاهش این اثرات، بهتر است که با حفظ سیگنال به نویز مناسب، اندازه‌گیری منحنی جریان-ولتاژ در ناحیه کاری خطی انجام شود.

هدف از این کار، طراحی و ساخت یک دستگاه اندازه‌گیری دز پرتوهای یونساز از جمله پرتوهای گاما براساس تغییرات ولتاژ آستانه ترانزیستور ماسفت در ناحیه کاری خطی می‌باشد.

۲. مواد و روش‌ها

به دست آوردن منحنی جریان-ولتاژ و اندازه‌گیری منحنی هدایت انتقالی^۱ یک ماسفت نیازمند ثبت ولتاژ روی قطعه و جریان عبورکننده از قطعه به‌طور همزمان و با دقتی مناسب است. هم‌چنین لازم است که منابع ولتاژ کنترل‌شونده‌ای نیز در دستگاه تعبیه شود. به‌کمک این منابع، پتانسیل پایه ورودی قطعه در بایاس خاصی تنظیم می‌شود و مقدار جریان و ولتاژ پایانه‌های دیگر قطعه توسط مدارهای اندازه‌گیری سنجیده خواهد شد. به این روش می‌توان آرایه‌ای از ولتاژ ورودی قطعه

تجمع بارهای مثبت در لایه اکسید باعث جابه‌جایی توزیع پتانسیل در این لایه می‌شود. مقدار ولتاژ آستانه ترانزیستور به‌طور مستقیم با پارامتر ولتاژ نوار تخت رابطه دارد. از طرفی مقدار بارهای جمع شده در لایه اکسید مطابق رابطه ۲ ولتاژ نوار تخت ترانزیستور را جابه‌جا می‌کند.

$$V_{fb} = \phi_{ms} - \frac{Q_{ss}}{C_{ox}} \quad (1)$$

در این رابطه ϕ_{ms} ، Q_{ss} ، C_{ox} به ترتیب اختلاف تابع کار بین فلز گیت و نیمه‌هادی بستر ترانزیستور، مقدار بارهای به‌تله‌افتاده در لایه اکسید و ظرفیت خازن لایه اکسید هستند. همان‌طور که در این رابطه ملاحظه می‌گردد، با افزایش مقدار بارهای به‌تله‌افتاده در لایه اکسید، ولتاژ نوار تخت ترانزیستور تغییرات بیشتری می‌کند. از طرفی، مقدار ولتاژ آستانه ترانزیستور به‌طور مستقیم با پارامتر ولتاژ نوار تخت در ارتباط است. بنابراین داریم:

$$\Delta V_{Th} \sim \frac{Q_{ss}}{C_{ox}} \quad (2)$$

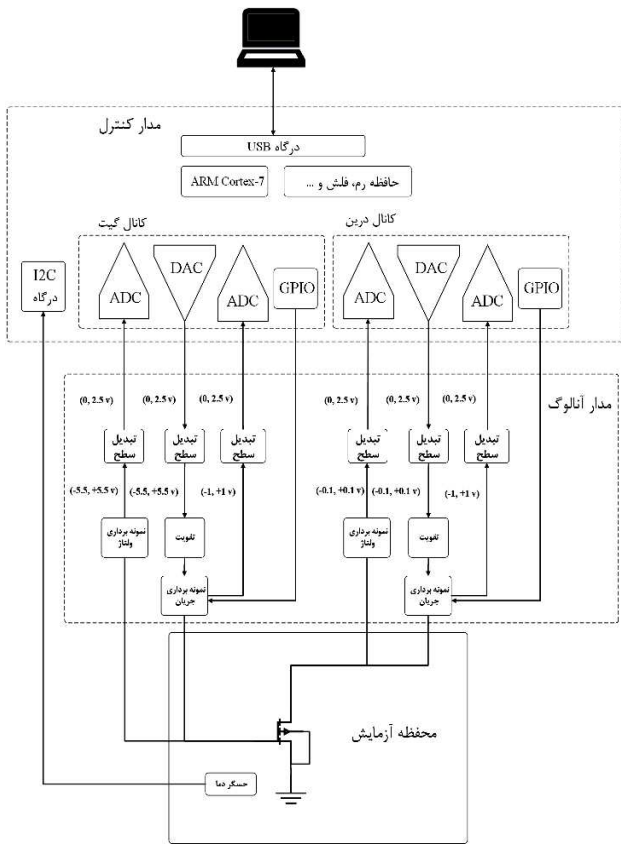
می‌دانیم که مقدار ظرفیت خازنی، به‌طور معکوس با ضخامت لایه عایق در ارتباط است. هم‌چنین، مقدار بار ایجاد شده در لایه عایق گیت به‌طور مستقیم با ضخامت این لایه ارتباط دارد. در نتیجه، برای تغییرات ولتاژ آستانه خواهیم داشت:

$$\Delta V_{Th} \sim D d_{ox}^2 \quad (3)$$

که در این رابطه D و d_{ox} به ترتیب مقدار دز و ضخامت لایه اکسید (عایق گیت) هستند. همان‌طور که ملاحظه می‌شود، مقدار تغییرات ولتاژ آستانه با توان دوم ضخامت لایه اکسید در ارتباط است. در مورد دزیتر ماسفت نیز، بهترین معیار تغییرات ولتاژ آستانه ترانزیستور با مقدار دز جذب شده در ترانزیستور است. در آزمایش‌های متنوعی نشان داده شده است که تغییرات ولتاژ آستانه ترانزیستور ماسفت با مقدار تابش وارد

^۱ Trans-conductance

مقدار به محدوده $+2/5$ تا 0 ولت نگاشت شده و توسط مبدل آنالوگ به دیجیتال اندازه‌گیری خواهد شد. هم‌چنین برای اطمینان بیشتر، ولتاژ هر کدام از پایانه‌های ترانزیستور نیز به‌طور هم‌زمان اندازه‌گیری می‌شود. اندازه‌گیری دمای محیط اطراف قطعه تحت آزمایش توسط یک حسگر دما از نوع LM35 با دقت $0/5^{\circ}C$ انجام می‌شود. این حسگر بر روی یک پراب آزمایش قرار گرفته است و توسط کانکتورهای مخصوص به مدار کنترل دستگاه متصل می‌شود.



شکل (۲): بلوک دیاگرام دستگاه رسم‌کننده منحنی جریان-ولتاژ ساخته شده.

روند اندازه‌گیری منحنی جریان-ولتاژ در شکل ۳ نشان داده شده است. در ابتدا مشخصات اندازه‌گیری از جمله بازه جاروب ولتاژ گیت، اندازه گام حرکت در جاروب گیت و ولتاژ درین از سوی رایانه دریافت می‌شود. در هر اندازه‌گیری دمای قطعه در قبل و بعد از انجام فرایند جاروب، اندازه‌گیری شده و در حافظه میکروکنترلر نگه‌داری می‌شود. برای شروع

و جریان خروجی قطعه به‌دست آورد. با رسم این آرایه، منحنی مشخصه جریان-ولتاژ قطعه به‌دست می‌آید.

بلوک دیاگرامی از دستگاه اندازه‌گیری منحنی جریان-ولتاژ طراحی و ساخته شده در شکل ۲ نشان داده شده است. در قسمت دیجیتال و کنترل دستگاه از یک میکروکنترلر STM32H750 استفاده شده است. این میکروکنترلر مجهز به مبدل آنالوگ به دیجیتال ۱۶ بیتی، مبدل دیجیتال به آنالوگ ۱۲ بیتی، پردازنده ARM، حافظه رم، فلش و درگاه‌های ارتباطی از قبیل USB، USART، I2C و ... می‌باشد. بنابراین نیاز به استفاده از ادوات جانبی برای تبدیل سیگنال‌ها برطرف می‌گردد. در قسمت آنالوگ دستگاه دو کانال جداگانه برای درین و گیت در نظر گرفته شده است. این دو کانال مشابه یکدیگر هستند، با این تفاوت که گستره جاروب ولتاژ درین در محدوده $+100$ تا -100 میلی‌ولت و گستره جاروب ولتاژ گیت در محدوده $+0/5$ تا $-0/5$ ولت قرار دارد. مشخصات اندازه‌گیری از جمله بازه جاروب ولتاژ گیت، اندازه گام حرکت در جاروب ولتاژ گیت و ولتاژ درین از سوی کاربر توسط نرم‌افزار نوشته شده در محیط MATLAB دریافت می‌شود. دمای قطعه در قبل و بعد از انجام فرایند جاروب، به‌طور خودکار توسط حسگر در کنار قطعه ماسفت مورد نظر، اندازه‌گیری شده و به‌همراه تمامی مقادیر اندازه‌گیری شده از جمله جریان‌ها، ولتاژها برای ارائه و ترسیم از طریق پورت USB به رایانه ارسال می‌شود. این برنامه، کار رسم منحنی جریان-ولتاژ و نهایتاً استخراج پارامترهای ترانزیستور مانند ولتاژ آستانه را انجام می‌دهد. برای اتصال مدار کنترلر به قسمت آنالوگ لازم است که ولتاژ مبدل دیجیتال به آنالوگ به محدوده‌های جاروب مورد نظر نگاشت شود. سپس این سیگنال بافر شده و به سمت خروجی دستگاه هدایت می‌شود. جریان الکتریکی گذرنده از این مسیر، توسط یک مدار اندازه‌گیری جریان، به ولتاژی بین $+1$ تا -1 ولت تبدیل می‌شود. سپس این

نمای ظاهری دستگاه ساخته‌شده به‌همراه جعبه مدار واسط برای اتصال و خوانش قطعات ماسفت مجهز به سنسور دمایی در شکل ۴ نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، برای اتصال قطعه تحت آزمایش به دستگاه، کانکتورهایی بر روی دستگاه تعبیه شده است. توسط این کانکتورها، حفاظ، سیگنال اصلی و سیگنال پس‌خورد برای پایانه‌های گیت، درین و سورس، به پراب آزمایش متصل می‌شود. هم‌چنین کانکتور جداگانه‌ای بر روی دستگاه برای اتصال به حسگر دمای موجود در محفظه پراب فراهم آورده شده است.

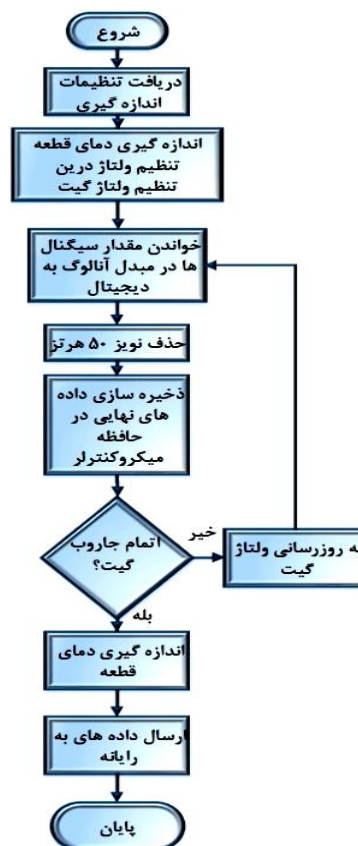


شکل (۴): نمای ظاهری دستگاه رسم‌کننده منحنی جریان-ولتاژ ساخته‌شده به‌همراه جعبه مدار واسط برای اتصال و خوانش قطعات ماسفت.

در این کار، سه مدل ترانزیستور ماسفت مختلف از نوع P و N شامل 3N165، J177 و k1398 به‌عنوان دزیتر انتخاب و تهیه شده است. قطعه k1398 به‌صورت SMD تهیه شده است. ویژگی‌های مهم این قطعات از جمله، حداکثر ولتاژ قابل تحمل گیت و جریان نشی آن‌ها در جدول ۱ آورده شده است. ولتاژ گیت قابل تحمل این سه قطعه به‌ترتیب ۴۰، ۳۰ و ۵۰ ولت می‌باشد. بنابراین این قطعات ۳ ناحیه حساسیت گوناگون برای دزسنجی را فراهم می‌کنند. از طرفی، تمامی این قطعات از نوع ماسفت تخت هستند که کار با آن‌ها را ساده می‌کند.

فرایند جاروب، ابتدا پتانسیل پایانه درین در ولتاژ تعیین‌شده از سوی کاربر قرار می‌گیرد. هم‌چنین، پتانسیل گیت نیز در اولین نقطه اندازه‌گیری تنظیم می‌شود. مقدار مبدل آنالوگ به دیجیتال برای دفعاتی با فاصله زمانی مناسب خوانده می‌شود. با به‌کارگیری منطق فیلتر دیجیتال در میکروکنترلر، هارمونی ۵۰ هرتز از سیگنال‌ها حذف می‌شود. سپس این مقادیر پالایش‌شده با توجه به ساختار قسمت آنالوگ دستگاه به مقادیر ولتاژ و جریان درین و گیت تبدیل شده و در آرایه‌هایی درون حافظه میکروکنترلر ذخیره می‌شوند.

پس از اندازه‌گیری مقادیر در یک ولتاژ گیت، مقدار این ولتاژ با توجه به گام جاروب، به‌روزرسانی شده و پتانسیل گیت در مقدار جدید تنظیم می‌شود. در صورتی که تمام نقاط مورد نظر، جاروب شده باشند، دمای قطعه بار دیگر اندازه‌گیری خواهد شد. با درخواست رایانه، تمامی مقادیر اندازه‌گیری‌شده از جمله جریان‌ها، ولتاژها و دماها به رایانه ارسال می‌شود.



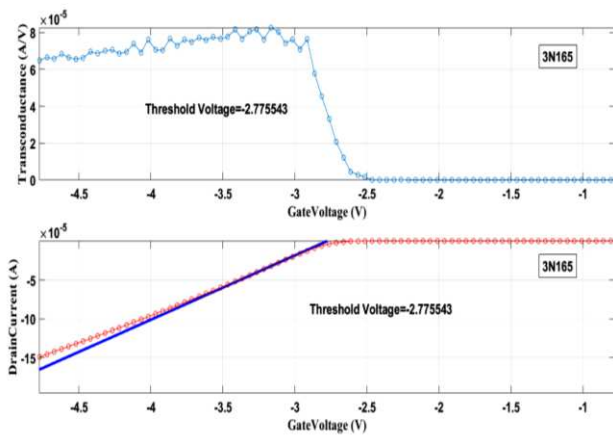
شکل (۳): روند اندازه‌گیری منحنی جریان-ولتاژ دستگاه ساخته شده.

جدول (۱): مشخصات قطعات انتخاب شده به عنوان دزسنج ماسفت.

نام قطعه	نوع ماسفت	تعداد ترانزیستور در هر بسته بندی	ولتاژ قابل تحمل گیت (V)	جریان نشتی گیت (pA)
3N165	PMOS	۲	۱/۳۸	۱۰ >
J177	PMOS	۱	۱/۲۱	۱۰۰۰ >
K1398	NMOS	۱	۱/۴۵	۵۰۰۰ >

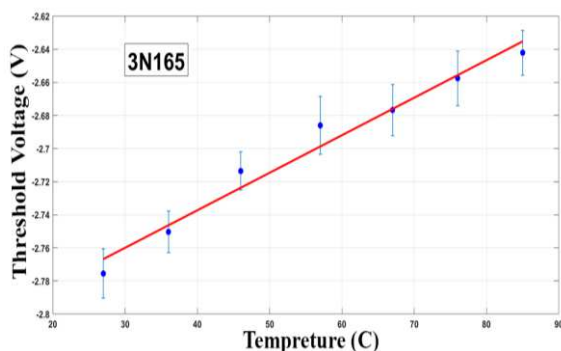
۳. نتایج

در شکل ۶ منحنی مشخصه‌های جریان درین برحسب ولتاژ گیت و مشخصه‌های g_m-V_g (ضریب هدایت متقابل برحسب ولتاژ گیت) برای تعیین ولتاژ آستانه ماسفت 3N165 نشان داده شده است. این منحنی تحت ولتاژ درین -سورس ۱۰ میلی ولت ثبت شده است. در شرایط دمای محیط، ولتاژ آستانه به دست آمده برابر با 0.15 ± 0.00277543 V می باشد.



شکل (۶): منحنی ضریب هدایت متقابل-ولتاژ و جریان-ولتاژ ترانزیستور ماسفت 3N165.

وابستگی دمایی ولتاژ آستانه ترانزیستورهای 3N165 در شکل ۷ نشان داده شده است. در هر دما سه ترانزیستور اندازه گیری شده است و مقادیر به صورت میانگین و خطای آن آورده شده است. در این جا نیز ملاحظه می شود که مقدار ولتاژ آستانه ترانزیستورها به صورت خطی با دما تغییر می کند. ضریب تغییرات دمایی ولتاژ آستانه برای این نوع ترانزیستورها برابر $0.20 \pm 0.0055/9$ mV/°C اندازه گیری شده است.



شکل (۷): وابستگی دمایی ولتاژ آستانه ترانزیستورهای 3N165.

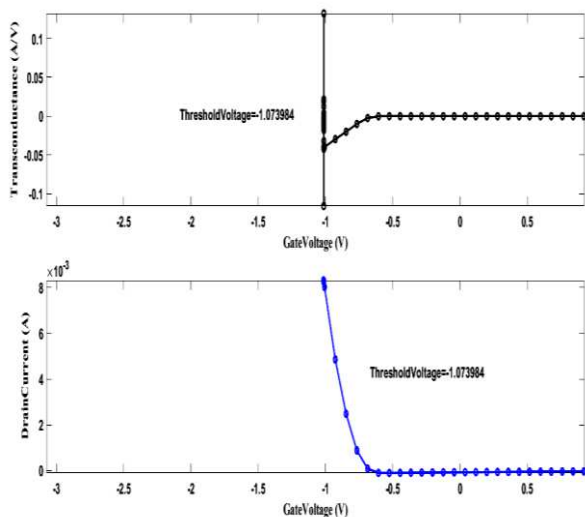
تست پرتویی به منظور کالیبراسیون این سامانه دزیمتری انجام شد و ماسفت‌ها در معرض پرتوی گامای چشمه استاندارد (دزهای ۵، ۱۰، ۲۰، ۴۰، ۶۰ و ۱۰۰ گری (Gy) قرار داده شده‌اند. به این منظور از آزمایشگاه استاندارد ثانویه (SSDL^۱), سازمان انرژی اتمی کرج استفاده شده است. همچنین به منظور بررسی تست پایداری، از هر مدل ماسفت ۳ عدد مورد پرتو دهی قرار گرفته و قرائت منحنی جریان-ولتاژ هر کدام از آن‌ها نیز در ۳ مرتبه جداگانه انجام شده است. در نهایت، میانگین تمامی این داده‌ها به همراه انحراف از معیار مشاهده شده در هر دز، گزارش شده است. در شکل ۵، سیستم پرتو دهی آزمایشگاه SSDL کرج به همراه برد قرار گیری قطعات ماسفت مختلف در هر بار پرتو گیری نشان داده شده است. پرتو دهی قطعات در بایاس صفر انجام شده است. همچنین برای حذف اثر دما در اندازه گیری ولتاژ آستانه، ضریب وابستگی دمایی ولتاژ آستانه ترانزیستورها به دما، اندازه گیری شده است.



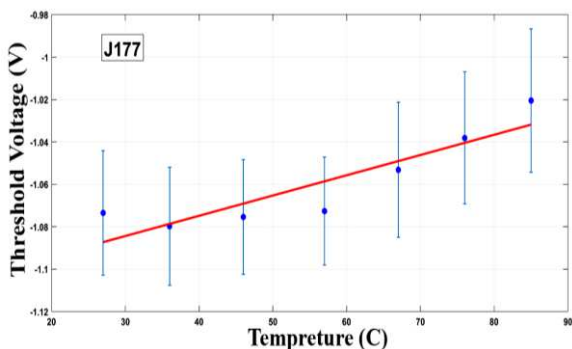
شکل (۵): سیستم پرتو دهی آزمایشگاه SSDL کرج و برد قرار گیری قطعات ماسفت.

¹ Secondary Standard Dosimetry Laboratory (SSDL)

آورده شده است. در این جا نیز ملاحظه می‌شود که مقدار ولتاژ آستانه ترانزیستورها به صورت خطی با دما تغییر می‌کند. ضریب تغییرات دمایی برای این نوع ترانزیستورها برابر $0.71 \pm 0.07 \text{ mV/}^\circ\text{C}$ اندازه‌گیری شده است.



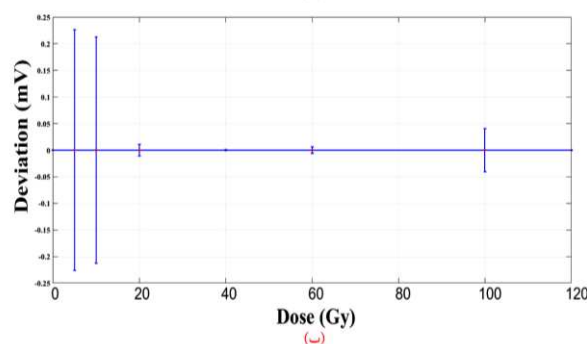
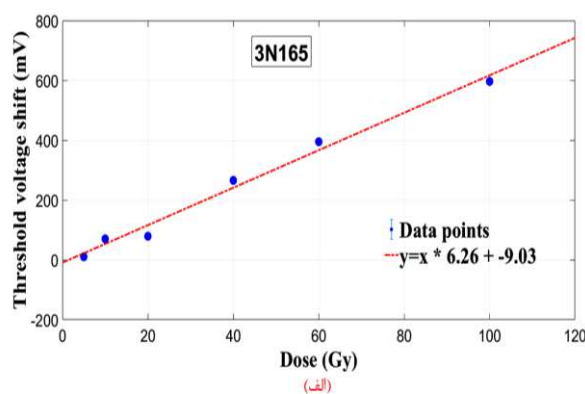
شکل (۹): منحنی ضریب هدایت متقابل-ولتاژ و جریان-ولتاژ ترانزیستور ماسفت J177.



شکل (۱۰): وابستگی دمایی ولتاژ آستانه ترانزیستورهای J177.

در شکل ۱۱ تغییرات ولتاژ آستانه ترانزیستور J177 که از ترانزیستورهای JFET نوع P در دزهای مختلف است به همراه خطای مربوط به هر کدام از داده‌ها نشان داده شده است. روند تغییرات ولتاژ آستانه نشان‌دهنده تقریباً خطی بودن این تغییرات است که خط برازش شده نیز در شکل نمایش داده شده است. شیب این نمودار بیانگر حساسیت این قطعه در میدان پرتویی است که حدود $0.96 \pm 0.02 \text{ mV/Gy}$ است. مقدار خطای این پارامتر مربوط به انحراف از خطی بودن کامل می‌باشد.

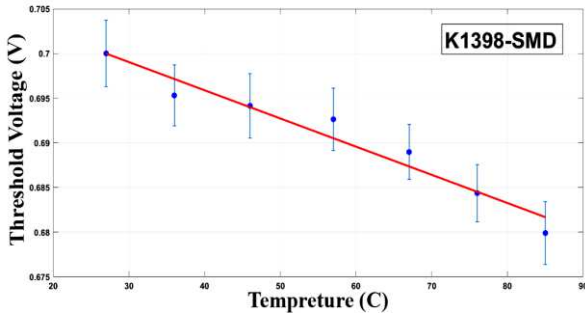
تغییرات ولتاژ آستانه ترانزیستور 3N165 که از ترانزیستورهای ماسفت نظامی در یک بسته‌بندی فلزی با ۲ عدد ترانزیستور نوع P است در دزهای مختلف به همراه خطای مربوط به هر کدام از داده‌ها در شکل ۸ نشان داده شده است. در این جا نیز خط برازش شده نشان از روند تغییرات ولتاژ آستانه تقریباً خطی با دز می‌باشد. حساسیت این قطعه در میدان پرتویی در حدود $6.26 \pm 0.03 \text{ mV/Gy}$ است.



شکل (۸): تغییرات ولتاژ آستانه ترانزیستور 3N165 در دزهای مختلف (ب) خطای مربوط به هر کدام از داده‌ها.

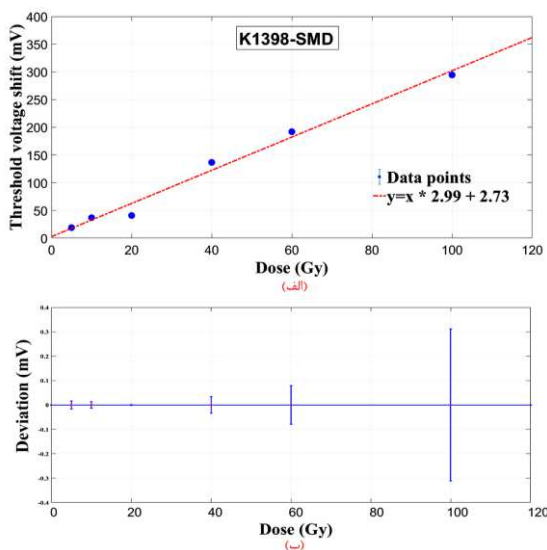
منحنی مشخصه‌های I-V و مشخصه‌های g_m -V_g برای تعیین ولتاژ آستانه ماسفت J177 در شکل ۹ نشان داده شده است. این منحنی تحت ولتاژ درین-سورس ۱۰ میلی‌ولت ثبت شده است. ولتاژ آستانه به دست آمده در شرایط دمایی محیط برابر با $1.073984 \pm 0.073984 \text{ V}$ می‌باشد. این حساسیت تقریباً یک ششم ترانزیستور ماسفت 3N165 از نوع P می‌باشد. وابستگی دمایی ولتاژ آستانه ترانزیستورهای J177 در شکل ۱۰ نشان داده شده است. در هر دما سه ترانزیستور اندازه‌گیری شده است و مقادیر به صورت میانگین و خطای آن

آورده شده است. در این جا نیز ملاحظه می شود که مقدار ولتاژ آستانه ترانزیستورها به صورت خطی با دما تغییر می کند. ضریب تغییرات دمایی برای این نوع ترانزیستورها برابر $14/3 \pm 0/5 \text{ mV}/^\circ\text{C}$ اندازه گیری شده است.



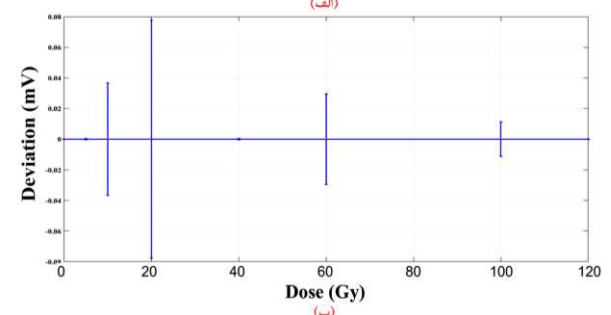
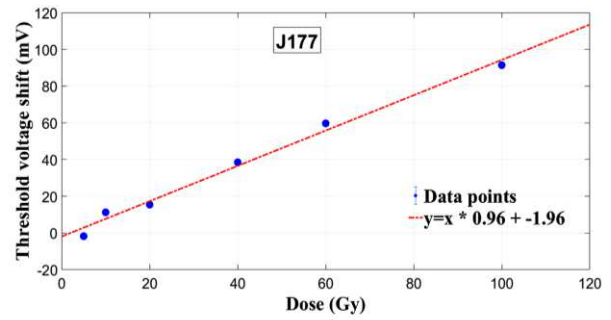
شکل (۱۳): وابستگی دمایی ولتاژ آستانه ترانزیستورهای K1398.

در این سامانه از ترانزیستورهای نوع SMD برای کاربرد در نواحی بسیار کوچک نیز استفاده شده است. در شکل ۱۴، تغییرات ولتاژ آستانه ترانزیستور k1398-smd که از ترانزیستورهای ماسفت با سوچینگ سرعت بالا از نوع N در دزهای مختلف است به همراه خطای مربوط به هر کدام از داده ها نشان داده شده است. این قطعه روند تغییرات ولتاژ آستانه تقریباً خطی نسبت به دز با حساسیت در حدود $2/99 \pm 0/95 \text{ mV}/\text{Gy}$ است. این حساسیت تقریباً ۳ برابر نوع معمولی این ترانزیستور می باشد.



شکل (۱۴): تغییرات ولتاژ آستانه ترانزیستور k1398-smd در دزهای

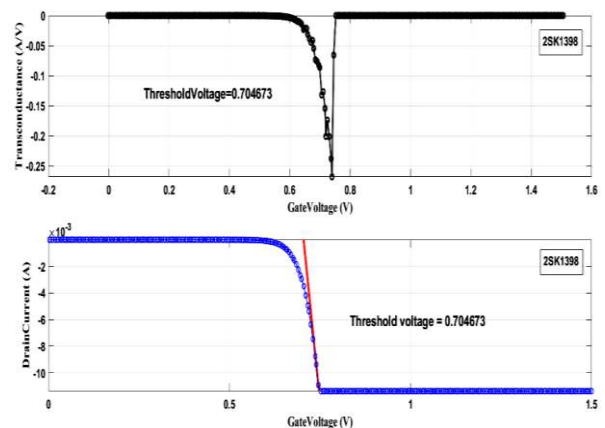
مختلف، (ب) خطای مربوط به هر کدام از داده ها.



شکل (۱۱): الف) تغییرات ولتاژ آستانه ترانزیستور J177 در دزهای

مختلف، (ب) خطای مربوط به هر کدام از داده ها.

منحنی مشخصه های I-V و مشخصه های $\text{gm}-V_g$ برای تعیین ولتاژ آستانه ماسفت K1398 در شکل ۱۲ نشان داده شده است. این منحنی تحت ولتاژ درین-سورس ۱۰ میلی ولت ثبت شده است. ولتاژ آستانه به دست آمده در شرایط دمایی محیط $0/704 \pm 0/004 \text{ V}$ می باشد.



شکل (۱۲): منحنی ضریب هدایت متقابل-ولتاژ و جریان-ولتاژ

ترانزیستور ماسفت K1398.

در شکل ۱۳، وابستگی دمایی ولتاژ آستانه ترانزیستورهای K1398 نشان داده شده است. در هر دما سه ترانزیستور اندازه گیری شده است و مقادیر به صورت میانگین و خطای آن

۴. بحث و نتیجه‌گیری

در این کار یک سامانه دزیمتری برمبنای قطعات نیمه‌رسانای ماسفت با قابلیت استفاده در میدان‌های پرتویی مانند تأسیسات پرتودهی و مأموریت‌های فضایی و مراکز پرتودرمانی و غیره معرفی شد. اندازه‌گیری دز پرتوهای گاما با استفاده از ترانزیستورهای ماسفت مختلف از نوع P و N انجام شد. پاسخ دزیمتری این ماسفت‌ها براساس جابه‌جایی ولتاژ آستانه آن‌ها است که از منحنی I-V آن‌ها استخراج می‌شود. کالیبراسیون پرتویی این دزیمترها با پرتودهی ماسفت‌ها در دزهای مختلف (از ۵ تا ۱۰۰ گری) در آزمایشگاه SSDL کرج انجام شده است. وابستگی دمایی این ترانزیستورها نیز با توجه به ضریب تغییرات دمایی در تمامی این اندازه‌گیری‌ها لحاظ شده است. ترانزیستور J177 از ترانزیستورهای ماسفت معمولی و ارزان‌قیمت و از نوع P می‌باشد. پاسخ این ماسفت‌ها به دز پرتویی مختلف تقریباً به صورت خطی بوده و طبق نتایج به دست آمده دارای حساسیتی در حدود 1 mV/Gy و حدود

0.02% خطا در هر میلی‌گری هستند. ترانزیستور k1398-smd از ترانزیستورهای با حجم بسیار کم مورد استفاده در اندازه‌گیری‌های دز نقطه‌ای و کاربردهایی مانند پرتودرمانی می‌باشد. این ماسفت نیز دارای پاسخ تقریباً خطی و حساسیتی در حدود 3 mV/Gy و حدود 0.03% خطا در هر میلی‌گری هستند که حساسیت بیش‌تری نسبت به نوع معمولی آن نشان داده است. ترانزیستور 3N165 از ترانزیستورهای ماسفت نظامی و تقریباً گران‌قیمت‌تری هستند که به علت حساسیت بیش‌تر آن‌ها (6 mV/Gy) و حدود 0.01% خطا در هر میلی‌گری) در دزهای کم‌تر نیز قابلیت استفاده دارند.

۵. قدردانی و تشکر

این مقاله بخشی از طرح پژوهشی با حمایت صندوق حمایت از پژوهشگران و فناوران کشور می‌باشد. هم‌چنین به این وسیله از تمامی پرسنل آزمایشگاه دزیمتری استاندارد ثانویه سازمان انرژی اتمی، کرج کمال تشکر و قدردانی را داریم.

٦. مراجع

- [1] W. Schimmerling. Space Radiation Dosimetry, NASA, (1998).
- [2] A. Ballesteros, L. Debarberis, W. Voorbraak, J. Wagemans and P. D'hondt. Open issues in reactor dosimetry, *Progress in Nuclear Energy*, 52(7) (2010) 615-619.
- [3] M.G. Stabin, M. Tagesson, S.R. Thomas, M. Ljungberg and S.E. Strand. Radiation dosimetry in nuclear medicine, *Applied Radiation and Isotopes*, 50(1) (1999) 73-87.
- [4] L. Frohlich. DOSFET-L02: An advanced online dosimetry system for radfet sensors, presented at the IBIC, UK, (2013).
- [5] L.J. Asensio, M.A. Carvajal, J.A. Lopez-Villanueva, M. Vilches, A.M. Lallena and A.J. Palma. Evaluation of a low-cost commercial mosfet as radiation dosimeter, sensors and actuators A, 125 (2006) 288-295.
- [6] S.J. Kim, K.W. Min and D. Ko. Use of a MOSFET for Radiation Monitoring in Space and Comparison with the NASA Trapped Particle Model, *Korean Physical Society*, 48 (2005) 865-869.
- [7] D.K. Schroeder. Semiconductor material and device characterization, 2nd ed. NewYork: Wiley; (1998).
- [8] T.R. Oldham and F.B. McLean. Total ionizing dose effects in MOS oxides and devices, *Nuclear Science, IEEE Transactions on*, 50 (2003) 483-499.
- [9] X. Zhou, K.Y. Lim and D.A. Lim. simple and unambiguous definition of threshold voltage and its implications in deepsubmicron MOS device modeling. *IEEE Trans Electron Dev*, 46(4) (1999) 807-809.
- [10] H. Katto. Device parameter extraction in the linear region of MOSFET's, *IEEE Electron Dev Lett*, 18 (1997) 408-410.
- [11] J. Wang, M. Xu and C. Tan. An accurate relationship for determining the key parameters of MOSFETs by proportional difference operator method, *Solid-State Electron*, 44 (2000) 959-962.
- [12] P.R. Karlsson and K.O. Jeppson. An efficient method for determining threshold voltage, series resistance and effective geometry of MOS transistors, *IEEE Trans Semicond Manuf*, 9 (1996) 215-222.
- [13] C. Tan, M. Xu and Z. Wang. Proportional difference operator method and its application in studying subthreshold behavior of MOSFETs. *Solid-State Electron*. 44 (2000) 1059-1067.
- [14] M.M. Lau, C.Y.T. Chiang, Y.T. Yeow and Z.Q. Yao. Measurement of V_T and C_{eff} using MOSFET gate-substrate capacitance, In: *Proceedings of the 1999 International Conference on Microelectronic Test Structures*, (1999) 152-155.
- [15] C. Galup-Montoro, M.C. Schneider, A.L. Koerich and R.L.O. Pinto. MOSFET threshold extraction from voltage-only measurements, *Electron Lett*, 30 (1994) 1458-1459.
- [16] F. Thomas and W.T. Holman. MOSFET threshold voltage extractor circuits based on square-law behavior, In: *Sample S*, editor. *IEEE 42nd Midwest Symp Cir Syst*, 2 (2000) 1118-1121.