

اندازه گیری دز پرتوهای گاما با استفاده از ترانزیستورهای ماسفت بر اساس جابجایی ولتاژ آستانه

حمید جعفری^{*}، سعید بوربور

گروه کاربرد پرتوها، دانشگاه شهید بهشتی، تهران

خلاصه:

ترانزیستورهای ماسفت می‌توانند به عنوان دزیمتر برای اندازه گیری دقیق مقدار دز پرتوهای یونساز از جمله پرتوهای گاما مورد استفاده قرار گیرند. کمیت مهم در دزیمتری توسط ماسفت‌ها، مقدار تغییرات ولتاژ آستانه ترانزیستور می‌باشد که با مقدار تابش وارد بر ترانزیستور رابطه تقریباً خطی دارد. هدف از این کار طراحی و ساخت یک مدل از دستگاه رسم کننده جریان-ولتاژ در ناحیه کاری خطی برای استخراج و اندازه گیری ولتاژ آستانه ترانزیستورهای ماسفت به منظور اندازه گیری دز پرتوهای گاما در کاربرد های مختلف می‌باشد. به کمک این دستگاه می‌توان به صورت هم‌زمان جریان الکتریکی و ولتاژ هر سه پایه ترانزیستور را با دقت بالایی در بازه وسیعی از جاروب گیت ثبت و بررسی نمود. این دستگاه قابلیت اندازه‌گیری جریان و ولتاژ با قدرت تفکیک نامی ۰.۰۳٪ را دارا است. کالیبراسیون پرتویی این دزیمترها با پرتوهای ماسفت‌ها در دز های ۵ تا ۱۰۰ گری انجام شده است. وابستگی دمایی این ترانزیستور ها نیز با توجه به ضریب تغییرات دمایی در تمامی این اندازه گیری ها لحاظ شده است.

کلمات کلیدی: ترانزیستور ماسفت، ولتاژ آستانه، دز پرتویی، منحنی جریان-ولتاژ

Measurement of Gamma Dose Using MOSFET Transistors Based on Threshold Voltage Shift

H. Jafari^{*}, S. Boorboor

Radiation Application Department, Shahid Beheshti University, Tehran, IRAN

Abstract:

MOSFET transistors can be used as a dosimeter to accurately measure the ionizing radiation dose, including gamma rays. An important quantity in dosimetry by MOSFETs is the amount of voltage change across the transistor threshold, which is almost linearly related to the amount of radiation entering the transistor. The purpose of this work is to design and construct a model of current-voltage drawing device in linear working area for extracting and measuring the threshold voltage of MOSFET transistors in order to measure the dose of gamma rays in different applications. The electric current and voltage of all three transistor pins can be recorded and checked with high accuracy in a wide range of gate sweeps at the same time. This device has the ability to measure current and voltage with a nominal resolution of 0.003%. Radiation calibration of these dosimeters was performed by irradiating MOSFETs in doses of 5 to 100 Gy. The temperature dependence of these transistors has been also taken into account in all these measurements according to the coefficient of temperature change.

Keywords: MOSFET transistor, threshold voltage, radiation dose, current-voltage curve

Email: hjafari63@gmail.com

۱. مقدمه

اندازه گیری دز پرتوهای یونساز همواره یکی از مهمترین مسائل مربوط به حفاظت پرتویی در کاربردهای مختلفی مانند پزشکی هسته ای، راکتور، شتابدهنده، فضا و ... بوده است [1-3]. از آنجاییکه محیط های پرتویی نامبرده هر کدام دارای انواع مختلفی از پرتوها با طیف وسیعی از انرژی ها و شارهای پرتویی هستند، دزیمترهای متنوعی برای اندازه گیری دقیق مقدار دز مورد استفاده قرار می گیرد. یکی از این موارد استفاده از قطعات نیمه رسانا و به طور خاص ترانزیستورهای ماسفت به عنوان دزیمتر می باشد که اصطلاحاً به آنها رادفت^۱ گفته می شود [4]. ایده استفاده از ترانزیستور ماسفت به عنوان یک ابزار سنجش ذرات یونساز سال ها پیش مطرح شده است. اما با این وجود برای استفاده عملی از ترانزیستورهای ماسفت به عنوان دزیمتر باید اصلاحاتی در مرحله ساخت آن انجام شود. به همین دلیل استفاده از این ابزار از دو دهه گذشته شروع به افزایش کرد. هم اکنون به کمک پیشرفت صنایع ساخت قطعات نیمه هادی، 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 اتا فک یونش، TLD، دیودها و ... استفاده شوند [5].

در سالهای اخیر استفاده از دزیمترهای ماسفت به شدت در پرتو درمانی گسترش یافت. به دلیل حجم بسیار کوچک این دزیمترها را می توان وارد بدن بیمار کرده و از مقدار واقعی دز در ناحیه مورد نظر اطلاعات بدست آورد. قرائت ساده این دزیمتر سبب شده است که با اتصال بدون سیم هم مقدار دز اندازه گیری 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 [4]. دزیمترهای ماسفت در مراکز تحقیقاتی مربوط به صنایع فضایی نیز در حال استفاده و تکامل هستند. شرکت های سازنده قطعات الکترونیک نیز قسمتی از تولیدات خود را به ساخت این گونه دزیمترها اختصاص داده اند. علاوه بر این شرکت های خاصی نیز در این زمینه دزیمتری در جهان شروع به کار کرده اند و ماژول های اندازه گیری را بر اساس دزیمترهای ماسفت ارائه می کنند [6].

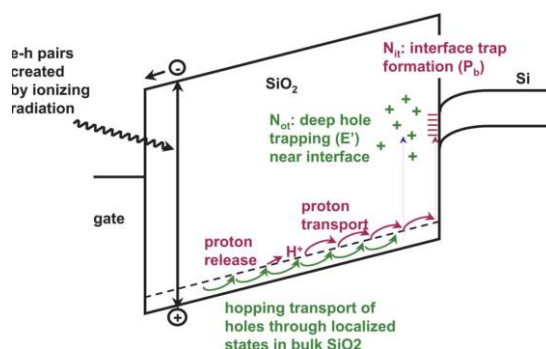
کمیت مهم در دزیمتری توسط ماسفتها، مقدار تغییرات ولتاژ آستانه ترانزیستور می باشد. در آزمایش های متنوعی نشان داده شده است که تغییرات ولتاژ آستانه ترانزیستور ماسفت با مقدار تابش وارد بر ترانزیستور رابطه تقریباً خطی دارد. در ساده ترین شکل این رابطه را می توان توسط معادله (۱) بیان کرد [7].

$$\Delta V_T = A \times D^n \quad (1)$$

¹ Radfet

در این رابطه ΔV_T ، D ، n و A به ترتیب تغییرات ولتاژ آستانه، مقدار دز در لایه عایق گیت ترانزیستور، درجه خطی بودن و ضریب ثابت هستند. درجه خطی بودن رابطه به کیفیت ساخت ماسفت، ضخامت لایه اکسید، میدان الکتریکی و تا حدودی به دز کل بستگی دارد. بصورت ایده‌ال این وابستگی‌ها خطی بوده و مقدار پارامتر n باید نزدیک به یک باشد.

در شکل (۱) فرایند برخورد ذرات با لایه اکسید ترانزیستور، ایجاد بارها و ترابرد بارها نشان داده شده است. هنگام برخورد ذرات یونساز با لایه اکسید ترانزیستور، زوج‌های الکترون-حفره در این لایه ایجاد می‌شوند. پس از ایجاد بارها، مقداری از آنها با یکدیگر ترکیب می‌شوند که تعداد بارهای ترکیب شده به نوع ذره فرودی، میدان الکتریکی، دما و ... بستگی دارد. بارهای باقی مانده تحت تأثیر میدان الکتریکی شروع به حرکت می‌کنند. در لایه اکسید قابلیت تحرک الکترون‌ها هزاران مرتبه از قابلیت تحرک حفره‌ها بیشتر است. بنابراین در مدت زمان چند پیکو ثانیه الکترون‌ها از لایه اکسید خارج می‌شود. اما حفره‌ها در تله‌های موجود در لایه اکسید برای مدت بسیار طولانی به دام می‌افتند. علاوه بر این هنگام برخورد ذرات با لایه اکسید احتمال آزاد سازی اتم هیدروژن و ایجاد یک پروتون وجود دارد. این پروتون‌ها در راستای میدان الکتریکی حرکت کرده و ممکن است که باعث تخریب و جابجایی ترازهای انرژی در سطح مشترک لایه اکسید و سیلیکون شوند [8].



شکل ۱: فرایند برخورد ذرات با لایه اکسید ماسفت، ایجاد بارها و ترابرد بارها

تجمع بارهای مثبت در لایه اکسید باعث جابجایی توزیع پتانسیل در این لایه می‌شود. مقدار ولتاژ آستانه ترانزیستور بطور 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 جابجا می‌کند.

$$V_{fb} = \Phi_{ms} - \frac{Q_{ss}}{C_{ox}} \quad (2)$$

در این رابطه C_{ox} و Q_{ss} ، ϕ_{ms} به ترتیب اختلاف تابع کار بین فلز گیت و نیمه‌هادی بستر ترانزیستور، مقدار بارهای به تله افتاده در لایه اکسید و ظرفیت خازن لایه اکسید هستند. همانطور که در این رابطه ملاحظه می‌گردد، با افزایش مقدار بارهای به تله افتاده در لایه اکسید، ولتاژ نوار تخت ترانزیستور تغییرات بیشتری می‌کند.

روش‌های متعددی برای استخراج مقدار ولتاژ آستانه وجود دارد و مدارهای استخراج‌گر مختلفی نیز برای اندازه‌گیری خودکار این پارامتر پیشنهاد شده است [9-16]. بخش بزرگی از روش‌های موجود برای تعیین V_T بر مبنای اندازه‌گیری استاتیک جریان درین انتقالی بر حسب ولتاژ گیت (مشخصه I_D-V_g) از یک ترانزیستور می‌باشد [10-12]. اغلب این روش‌های I_D-V_g از ناحیه وارونگی قوی استفاده می‌کنند [10-14]، و فقط تنها تعداد محدودی از ناحیه وارونگی ضعیف استفاده می‌کنند [14-16]. در اغلب موارد برای غلبه بر نویز در اندازه‌گیری، عملیات اندازه‌گیری جریان-ولتاژ در ناحیه کاری اشباع یا نزدیک به اشتباع صورت می‌پذیرد. البته در برخی موارد نیز این عملیات در ناحیه کاری خطی صورت می‌گیرد.

یک ویژگی معمول در اغلب روش‌های استخراج V_T بر مبنای مشخصه‌های انتقالی I_D-V_g اثرگذاری شدید مقامت‌های سری پارازیتی درین و سورس و افت موبیلیتی کانال بر روی مقدار نهایی V_T استخراج شده می‌باشد. این وضعیت کاملاً نامطلوب است چرا که مقدار V_T استخراج شده باید مستقل از اجزای پارازیتی و تغییرات موبیلیتی باشد. به منظور حذف تاثیر این اثرات ناخواسته، چند روش بر مبنای اندازه‌گیری ظرفیت خازنی به صورت تابعی از ولتاژ یا همان روش‌های $C-V$ پیشنهاد شده است [14]. با این حال، روش‌های $C-V$ دارای معایبی از جمله نیاز به ابزار دقیق با وضوح بالا برای اندازه‌گیری ظرفیت خازنی کوچک موجود در ماسفت‌ها، بخصوص در قطعاتی با طراحی هندسی بسیار کوچک می‌باشند. یک روش دیگری که اخیراً پیشنهاد شده است نیازمند اندازه‌گیری‌های مکرر بر اساس عملگر اختلاف تناسبی^۲ می‌باشد [13]

روش‌ها ذکر شده شامل اندازه‌گیری منحنی ولتاژ-جریان و یا ولتاژ-ظرفیت ترانزیستور می‌باشند. روش مبتنی بر منحنی ولتاژ-جریان از دقت بیشتری نسبت به دیگر روش‌ها برخوردار است. معمولاً اندازه‌گیری منحنی ولتاژ-جریان در ناحیه کاری اشباع ترانزیستور انجام می‌شود و اندازه‌گیری در ناحیه اشباع مشکلاتی به دنبال دارد از جمله: افزایش توان تلفاتی بر روی ترانزیستور، عدم توانایی رسم منحنی در ولتاژهایی بزرگتر از ولتاژ آستانه ترانزیستور، افزایش سهم مقاومت‌های پارازیتی و غیره. نتایج اندازه‌گیری‌های مختلف نشان داده است که روش‌های مبتنی بر تحلیل منحنی جریان-ولتاژ ترانزیستور در ناحیه خطی به دلیل تکرار پذیری بالا، عدم آسیب به قطعه، حذف دخالت مقاومت‌های پارازیتی و سادگی رفتار ترانزیستور در این ناحیه، دارای دقت بالاتری نسبت به دیگر روش‌ها هستند [9].

² proportional difference operator

به منظور ثبت منحنی جریان بر حسب ولتاژ قطعات، از دستگاه‌های رسام جریان - ولتاژ استفاده می‌شود. این دستگاه برای تحلیل رفتار قطعات مختلف از جمله انواع دیودها، دیودهای کنترل شونده، ترانزیستورهای ماسفت و ... کاربرد دارد. مدل‌های مختلفی از این دستگاه در توان‌های کاری مختلف، دقت‌های متفاوت و امکانات جانبی متفاوت توسط شرکت‌های بزرگ تولید ابزارهای اندازه‌گیری ارائه شده‌اند. اما قیمت این دستگاه‌ها بسیار بالا بوده و دسترسی به آنها بسیار مشکل می‌باشد. از طرفی برای بدست آوردن اطلاعات کافی مربوط به پارامترهای قطعه، در دست داشتن منحنی جریان- ولتاژ قطعه اهمیت ویژه‌ای دارد.

هدف از این کار طراحی و ساخت یک مدل از دستگاه رسام جریان- ولتاژ در ناحیه کاری خطی برای استخراج و اندازه‌گیری ولتاژ آستانه ترانزیستورهای ماسفت به منظور اندازه‌گیری دز پرتوهای گاما در کاربردهای مختلف می‌باشد.

۲- مواد و روش‌ها:

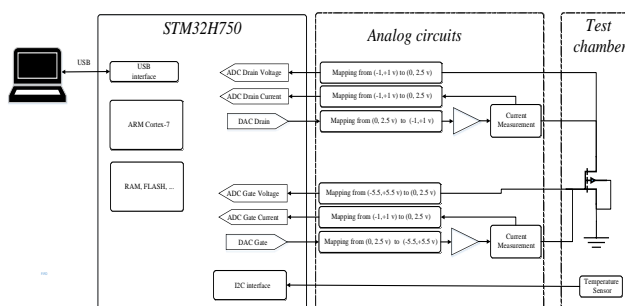
همانطور که در قسمت مقدمه بیان شد یکی از راه‌های اندازه‌گیری مقدار دز پرتوهای گاما با استفاده از ترانزیستورهای ماسفت، بدست آوردن منحنی جریان- ولتاژ (I-V) و استخراج پارامتر ولتاژ آستانه می‌باشد. بطور کلی برای بدست آوردن منحنی I-V و اندازه‌گیری منحنی هدایت انتقالی^۳ یک ماسفت لازم است که ولتاژ روی قطعه و جریان عبور کننده از قطعه بطور همزمان و با دقتی مناسب ثبت گردد. علاوه بر مدارهای اندازه‌گیری ذکر شده، لازم است که منابع ولتاژ کنترل شونده‌ای نیز در دستگاه تعبیه شود. به کمک این منابع، پتانسیل پایه ورودی قطعه در بایاس خاصی تنظیم می‌شود و مقدار جریان و ولتاژ پایانه‌های دیگر قطعه توسط مدارهای اندازه‌گیری سنجیده می‌شود. به این روش می‌توان آرایه‌ای از ولتاژ ورودی قطعه و جریان خروجی قطعه بدست آورد. با رسم این آرایه، منحنی مشخصه I-V قطعه بدست می‌آید.

شکل ۲، بلوک دیاگرامی از دستگاه اندازه‌گیری منحنی I-V ساخته شده را نشان می‌دهد. 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 بر طرف 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 +۱۰۰ تا -۱۰۰ میلی‌ولت و گستره جاروب ولتاژ گیت در محدوده +۵/۵ تا -۵/۵ 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 نرم افزار نوشته شده در محیط MATLAB دریافت می‌شود. دمای قطعه در قبل و

³ Trans-conductance

بعد از انجام فرایند جاروب، به طور خودکار توسط حسگر در کنار قطعه ماسفت مورد نظر، اندازه‌گیری شده و به همراه 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.

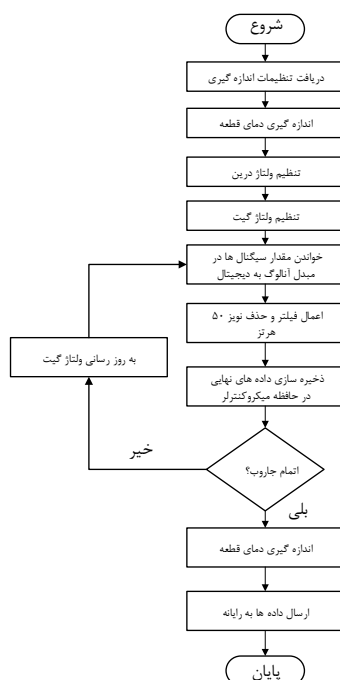
برای اتصال مدار کنترلر به قسمت آنالوگ لازم است که ولتاژ مبدل دیجیتال به آنالوگ به محدوده‌های جاروب مورد نظر نگاشت شود. سپس این سیگنال بافر شده و به سمت خروجی دستگاه هدایت می‌شود. جریان الکتریکی گذرنده از این مسیر، توسط یک مدار اندازه‌گیری جریان، به ولتاژی بین $+1$ تا -1 ولت تبدیل می‌شود. سپس این مقدار 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 پایه‌های ترانزیستور نیز به طور هم‌زمان اندازه‌گیری می‌شود. اندازه‌گیری دمای محیط اطراف قطعه تحت آزمایش توسط یک حسگر دما از نوع LM35 با دقت 0.1°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 رسم کننده منحنی I-V ساخته شده

در شکل ۳ روند اندازه‌گیری منحنی I-V 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 فرایند جاروب، ابتدا پتانسیل پایانه درین در ولتاژ تعیین شده 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 بکارگیری منطق فیلتر دیجیتال در میکروکنترلر، هارمونی ۵۰ هرتز از سیگنال‌ها حذف می‌شود. سپس این مقادیر پالایش شده 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، به روزرسانی 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 اندازه‌گیری شده از جمله جریان‌ها، ولتاژها و دماها به رایانه ارسال می‌شود.



شکل ۳: روند اندازه‌گیری منحنی I-V دستگاه ساخته شده

نمای ظاهری دستگاه ساخته شده نیز 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 رسم کننده منحنی I-V ساخته شده

در این کار، سه مدل ترانزیستور ماسفت شامل 3N165، J177 و k1398 به عنوان دزسنج انتخاب و تهیه شده است. ویژگی‌های مهم این قطعات از جمله، حداکثر ولتاژ قابل تحمل گیت و جریان نشستی آنها در جدول (۱) آورده شده است. ولتاژ گیت قابل تحمل این سه قطعه به ترتیب 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.

جدول ۱: مشخصات قطعات انتخاب شده به عنوان دزسنج ماسفت

نام قطعه	نوع ماسفت	تعداد ترانزیستور در هر بسته‌بندی	ولتاژ قابل تحمل گیت (V)	جریان نشستی گیت (pA)
3N165	PMOS	۲	۴۰	< ۱۰
J177	PMOS	۱	۳۰	< ۱۰۰۰
K1398	NMOS	1	۵۰	< ۵۰۰۰

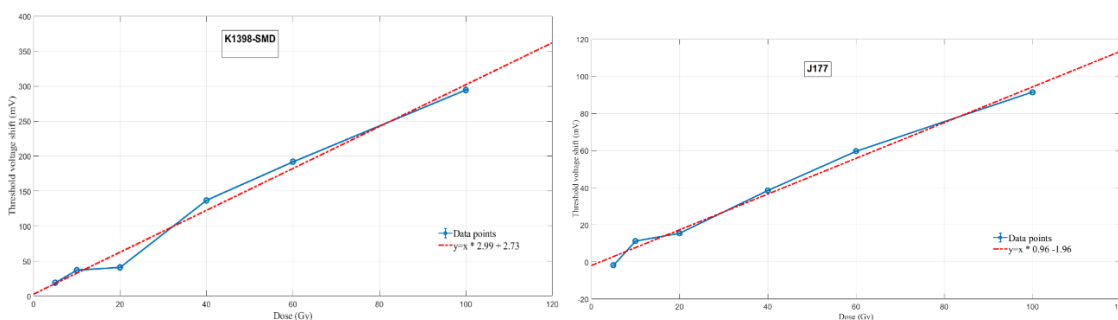
تست پرتویی به منظور کالیبراسیون این سامانه دزیمتری انجام شد و ماسفت‌ها در معرض دز گامای استاندارد (دزهای ۵، ۱۰، ۲۰، ۴۰، ۶۰ و ۱۰۰ گری (Gy)) قرار داده شده‌اند. به این منظور از مرکز پرتودهی SSDL کرج استفاده شده است. همچنین به منظور بررسی تست پایداری، از هر مدل ماسفت ۳ عدد مورد پرتودهی قرار گرفته و قرائت منحنی I-V هر کدام از آنها نیز در ۳ مرتبه صورت گرفته است که میانگین تمامی این داده‌ها به همراه انحراف از معیار مشاهده شده در هر دز آورده شده است. در شکل ۵ سیستم پرتودهی استاندارد مرکز SSDL کرج به همراه برد قرارگیری قطعات ماسفت مختلف در هر بار پرتوگیری نشان داده شده است. پرتودهی قطعات در بایاس صفر انجام شده است. همچنین برای حذف اثر دما در اندازه‌گیری ولتاژ آستانه، ضریب وابستگی دمایی ولتاژ آستانه ترانزیستورها به دما، اندازه‌گیری شده است.



شکل ۵: سیستم پرتودهی استاندارد مرکز SSDL کرج و برد قرارگیری قطعات ماسفت

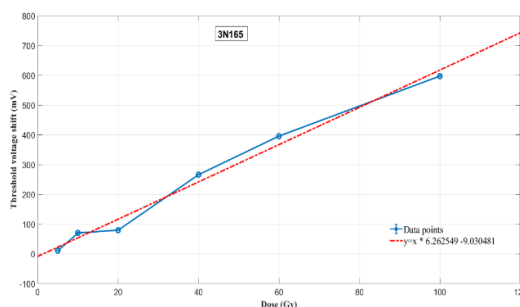
۳- نتایج:

در شکل ۶ تغییرات ولتاژ آستانه ترانزیستور J177 که از ترانزیستورهای JFET نوع P در دزهای مختلف است، نشان داده شده است. روند تغییرات ولتاژ آستانه نشان دهنده 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 $0.96 \pm 0.2 \text{ mV/Gy}$ است. مقدار خطای این پارامتر مربوط به انحراف از خطی بودن کامل می باشد.



شکل ۶: تغییرات ولتاژ آستانه ترانزیستور J177 در دزهای مختلف شکل ۷: تغییرات ولتاژ آستانه ترانزیستور smd-k1398 در دزهای مختلف

در این سامانه از ترانزیستورهای نوع SMD برای کاربرد در نواحی بسیار کوچک نیز استفاده شده است. در شکل (۷)، تغییرات ولتاژ آستانه ترانزیستور smd-k1398 که از ترانزیستورهای ماسفت با سوچینگ سرعت بالا از نوع N در دزهای مختلف است نشان داده شده است. این قطعه روند تغییرات ولتاژ آستانه تقریباً خطی نسبت به دز با حساسیت در حدود $2.99 \pm 0.95 \text{ mV/Gy}$ است. این حساسیت تقریباً ۳ برابر نوع معمولی این ترانزیستور می باشد. تغییرات ولتاژ آستانه ترانزیستور 3N165 که از ترانزیستورهای ماسفت نظامی در یک بسته‌بندی فلزی با ۲ عدد ترانزیستور نوع P است در دزهای مختلف در شکل (۸) نشان داده شده است. در اینجا نیز خط برازش شده نشان از روند تغییرات ولتاژ آستانه تقریباً خطی با دز می باشد. حساسیت این قطعه در میدان پرتویی در حدود $6.26 \pm 0.75 \text{ mV/Gy}$ است. این حساسیت تقریباً ۶ برابر نوع ترانزیستور ماسفت J177 از نوع P می باشد.



شکل ۸: تغییرات ولتاژ آستانه ترانزیستور 3N165 در دزهای مختلف

۴- نتیجه گیری:

در این کار یک سامانه دزیمتری بر مبنای قطعات نیمه رسانای ماسفت با قابلیت استفاده در میدان های پرتویی مانند تاسیسات پرتودهی و ماموریت های فضایی و مراکز پرتو درمانی و ... معرفی شد. اندازه گیری دز پرتوهای گاما با استفاده از ترانزیستورهای ماسفت مختلف از نوع P و N انجام شد. پاسخ دزیمتری این ماسفت ها بر اساس جابجایی ولتاژ آستانه آنها است که از منحنی I-V آنها استخراج می شود. کالیبراسیون پرتویی این دزیمترها با پرتودهی ماسفت ها در دز های مختلف (از ۵ تا ۱۰۰ گری) در مرکز استاندارد ثانویه SSDL کرج انجام شده است. وابستگی دمایی این ترانزیستور ها نیز با توجه به ضریب تغییرات دمایی در تمامی این اندازه گیری ها لحاظ شده است. ترانزیستور J177 از ترانزیستور های ماسفت معمولی و ارزان قیمت و از نوع P می باشد. پاسخ این ماسفت ها به دز پرتویی مختلف تقریباً به صورت خطی بوده و طبق نتایج بدست آمده دارای حساسیتی در حدود ۱ mV/Gy هستند. ترانزیستور k1398-smd از ترانزیستور های با حجم بسیار کم مورد استفاده در اندازه گیری های دز نقطه ای و کاربردهایی مانند پرتودرمانی می باشد. این ماسفت نیز دارای پاسخ تقریباً خطی و حساسیتی در حدود ۳ mV/Gy هستند که حساسیت بیشتری نسبت به نوع معمولی آن نشان داده است. ترانزیستور 3N165 از ترانزیستور های ماسفت نظامی و تقریباً گران قیمت تری هستند که به علت حساسیت بیشتر آنها (۶ mV/Gy) در دز های کمتر نیز قابلیت استفاده دارند.

مراجع:

- [1] W. Schimmerling, "Space Radiation Dosimetry," NASA1998.
- [2] A. Ballesteros, L. Debarberis, W. Voorbraak, J. Wagemans, P. D'hondt, Open issues in reactor dosimetry, Progress in Nuclear Energy, Volume 52, Issue 7, 2010, Pages 615-619,
- [3] M.G. Stabin, M. Tagesson, S.R. Thomas, M. Ljungberg, S.E. Strand, Radiation dosimetry in nuclear medicine, Applied Radiation and Isotopes, Volume 50, Issue 1, 1999, Pages 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. L'opez-Villanueva, M. Vilches, A. M. Lallena, and A. J. Palma, "Evaluation of a low-cost commercial mosfet as radiation dosimeter," sensors and actuators A, vol. 125, pp. 288-295, 2006.
- [6] K.-W. M. a. D. K. Sung-Joon Kim, "Use of a MOSFET for Radiation Monitoring in Space and Comparison with the NASA Trapped Particle Model," Korean Physical Society, vol. 48, pp. 865-869, 2005.
- [7] DK. Schroeder. Semiconductor material and device characterization, 2nd ed. New York: Wiley; 1998.
- [8] T. R. Oldham and F. B. McLean, "Total ionizing dose effects in MOS oxides and devices," Nuclear Science, IEEE Transactions on, vol. 50, pp. 483-499, 2003.
- [9] X. Zhou, KY. Lim, D. Lim, A simple and unambiguous definition of threshold voltage and its implications in deepsubmicron MOS device modeling. IEEE Trans Electron Dev 1999;46:807-9.
- [10] H. Katto, Device parameter extraction in the linear region of MOSFET's. IEEE Electron Dev Lett 1997;18:408-10.
- [11] J. Wang, M. Xu, C. Tan, An accurate relationship for determining the key parameters of MOSFETs by proportional difference operator method. Solid-State Electron 2000; 44:959-62.
- [12] PR. Karlsson, KO. Jeppson, An efficient method for determining threshold voltage, series resistance and effective geometry of MOS transistors. IEEE Trans Semicond Manuf 1996;9:215-22.
- [13] C. Tan, J. Wang, M. Xu, Proportional difference operator method and its application in studying subthreshold behavior of MOSFETs. Solid-State Electron 2000;44: 1059-67.
- [14] MM. Lau, CYT. Chiang, YT. Yeow, ZQ. Yao, Measurement of V_T and I_{eff} using MOSFET gate-substrate capacitance. In: Proceedings of the 1999 International Conference on Microelectronic Test Structures, 1999. p. 152-5.
- [15] C. Galup-Montoro, et al., MOSFET threshold extraction from voltage-only measurements. Electron Lett 1994;30:1458-9.
- [16] F. Thomas, WT. Holman, MOSFET threshold voltage extractor circuits based on square-law behavior. In: Sample S, editor. IEEE 42nd Midwest Symp Cir Syst, vol 2, 2000. p. 1118-21