بررسی و مقایسه پاسخ ترانزیستورهای ماسفت DIP و SMD به‌عنوان دزیمتر پرتوهای گاما

INC29-1132

پریما حسینی*[۱]، حمید جعفری[۲]، آرمین مسیبی[۳] و سعید بوربور[۴]

۱،۲ و ۴- گروه کاربرد پرتوها، دانشگاه شهید بهشتی، تهران.

۳- گروه پژوهشی پرتوفرآوری و دزیمتری، پژوهشکده کاربرد پرتوها، پژوهشگاه علوم و فنون هسته‌ای، تهران.

چکیده:

استفاده از ترانزیستورهای ماسفت به عنوان دزیمتر و برای اندازه‌گیری مقدار دز پرتوهای یون‌ساز، کاربردهای وسیعی دارد. مقدار تغییرات ولتاژ آستانه ترانزیستور ماسفت توسط پرتودهی، یکی از پارامترهای مهم در اندازه‌گیری دز تابشی می‌باشد. هدف از این کار، بررسی و مقایسه ترانزیستورهای ماسفت نوع دیپ(DIP) و اس ام دی(SMD) از لحاظ پاسخ آن‌ها در یک میدان پرتوی گاما و اندازه‌گیری میزان حساسیت آن‌ها به عنوان یک دزیمتر می‌باشد. در این کار تجربی، جریان الکتریکی و ولتاژ هر سه‌پایه ترانزیستور با دقت بالایی در بازه وسیعی از جاروب گیت قبل و بعد از پرتودهی ثبت و بررسی گردید. اختلاف مقدار ولتاژ آستانه قبل و بعد از پرتودهی، نشان‌دهنده مقدار جریان تابشی در ماسفت‌ها می‌باشد. پرتودهی ماسفت‌ها در این کار، در دزهای ۱-۱۰۰ گری صورت گرفت. نتایج نشان داد که در محدوده دزهای تا ۴۰ گری، پاسخ برای قطعه CD4007 نوع DIP بیشتر از نوع SMD است و نوع N این قطعه دارای بیشترین حساسیت در حدود ۱۸,۷۴ mV/Gy است. در دزهای بالاتر (تا ۱۰۰ گری) نیز نشان داد که پاسخ ترانزیستورهای نوع P از ماسفت CD4007 از نوع SMD دارای حساسیت بیشتری از نوع N آن هستند و پاسخی به مراتب بالاتر (بیش از ۲۰ برابر) از ترانزیستور BSS92 از نوع DIP دارند. خروجی ماسفت‌ها از هر دو نوع DIP و SMD نیز دارای روندی کاملاً خطی در پاسخ دزیمتری هستند.

کلیدواژه‌ها: پرتوهای گاما، ترانزیستور ماسفت، دزیمتر، ولتاژ آستانه.

Investigating and comparing the response of DIP and SMD MOSFET transistors as gamma radiation dosimeters

P. Hoseini*[1], H. Jafari[2], A. Mosayebi[3] and S. Boorboor[4]

1,2,4- Radiation Application Department, Shahid Beheshti University, Tehran, IRAN.

3- Radiation Processing and Dosimetry Research Group, Radiation Application Research Institute, Nuclear Science and Technology Research Institute, Tehran, IRAN.

Abstract:

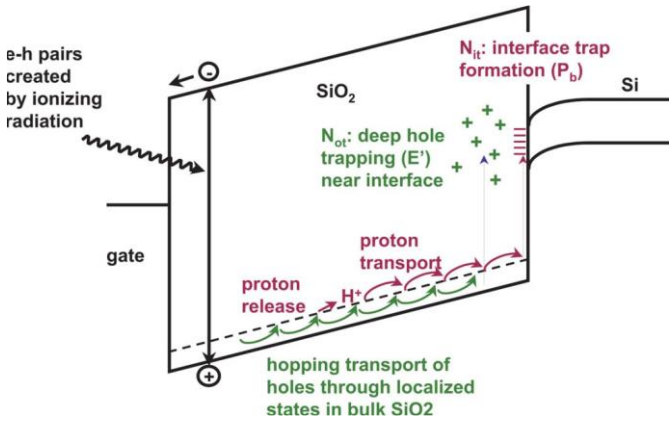
The use of MOSFET transistors as a dosimeter and for measuring the dose of ionizing radiation has wide applications. The amount of changes in the threshold voltage of the MOSFET transistor due to irradiation is one of the important parameters in the measurement of radiation dose. The purpose of this work is to investigate and compare DIP and SMD MOSFET transistors in terms of their response in a gamma ray field and measure their sensitivity as a dosimeter. In this experimental work, the electric current and voltage of all three pins of the transistor were recorded and analyzed with high accuracy in a wide range of the gate sweep before and after irradiation. The difference in threshold voltage value before and after irradiation indicates the amount of radiation current in MOSFETs. In this work, MOSFETs were irradiated in doses of 1-100 Gy. The results showed that in the range of doses up to 40 Gy, the response for the DIP type CD4007 component is higher than the SMD type, and the N type of this component has the highest sensitivity of about 18.74 mV/Gy. In higher doses (up to 100 Gy) it also showed that the response of P-type transistors from the CD4007 SMD MOSFET is more sensitive than its N-type and has a much higher response (more than 20 times) than the BSS92 DIP type transistor. The output of MOSFETs of both DIP and SMD types also have a completely linear trend in dosimetric response.

Keywords: Gamma radiation, MOSFET transistor, Dosimeter, Threshold voltage.

۱- مقدمه:

دزیمتری تابش دارای کاربردهای بسیاری است که یکی از حوزه‌های مهم کاربرد آن، دزیمتری پزشکی است و در آن دز جذب شده موردنیاز درمان و هر دز جذب شده جانبی کنترل می‌شود؛ به معنای دیگر در پرتودرمانی برای اطمینان از صحت دز تحویلی به تومور، یعنی دز برنامه‌ریزی شده و تحویل شده را ارزیابی می‌کند[۱]. دزیمترهای متنوعی برای اندازه‌گیری دقیق مقدار دز مورداستفاده قرار می‌گیرد[۱]. یکی از این موارد استفاده از قطعات نیمه‌رسانا ترانزیستورهای ماسفت به عنوان دزیمتر است. استفاده از ترانزیستور ماسفت به عنوان یک ابزار سنجش ذرات یونیزان سال‌ها پیش مطرح شد[۱]. دزیمترهای ماسفت بازخوانی سریع دز را فراهم می‌کنند. علاوه بر این، اطلاعات به‌طور دائم در ماسفت ذخیره می‌شود[۱]. بنابراین، اندازه‌گیری کل دز انباشته شده در طول دوره درمان را می‌توان به دست آورد. اندازه کوچک آن‌ها باعث می‌شود که برای اندازه‌گیری در مناطق با شیب دز بالا (به عنوان مثال، در براکی تراپی) بسیار مفید باشند. همچنین به آن‌ها اجازه می‌دهد تا به‌راحتی داخل حفره‌های بدن، بدون ایجاد ناراحتی بیش از حد برای بیمار وارد شوند[۲]. آن‌ها در طول زمان تابش نیازی به اتصال به قرائت‌گر ندارند، بنابراین نیاز به کابل‌هایی که در سراسر اتاق درمان عبور می‌کنند را از بین می‌برد. در سال‌های اخیر استفاده از دزیمترهای ماسفت به شدت در پرتودرمانی رو به افزایش است و از اهمیت بالایی در جراحی‌ها و براکی تراپی دارد. این قطعات دارای امکان بازخوانی زمان واقعی، ابزار دقیق ساده و استحکام بالایی هستند. علاوه بر این، دزیمترهای ولتاژ دوگانه ماسفت مستقل از دما هستند که در دزیمتری بالینی یک مزیت می‌باشد[۳]. این دزیمترها به دلیل سادگی و سرعت بالا در قرائت در مواردی که مقدار دز در بیرون بدن موردنیاز است، دارای عملکرد بهتری نسبت به دزیمترهای دیگر می‌باشند[۵-۴].

در شکل ۱، فرایند برخورد ذرات با لایه اکسید ترانزیستور، ایجاد بارها و ترابرد بارها ارائه شده است که هنگام برخورد پرتوهای یون‌ساز با لایه اکسید ترانزیستور، زوج‌های الکترون-حفره در این لایه ایجاد می‌شوند. بعد 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. تحت تأثیر میدان الکتریکی، بارهای باقی‌مانده شروع به حرکت می‌کنند. همچنین قابلیت تحرک الکترون‌ها در لایه اکسید هزاران مرتبه از قابلیت تحرک حفره‌ها بیشتر می‌باشد. بنابراین در مدت زمان چند پیکو ثانیه الکترون‌ها از لایه اکسید خارج می‌شوند ولی حفره‌ها در تله‌های موجود در لایه اکسید برای مدت بسیار طولانی باقی می‌مانند. علاوه بر این احتمال آزادسازی اتم هیدروژن و ایجاد یک پروتون هنگام برخورد ذرات با لایه اکسید وجود دارد. حرکت این پروتون‌ها در راستای میدان الکتریکی می‌تواند باعث تخریب و جابجایی ترازهای انرژی در سطح مشترک لایه اکسید و سیلیکون شود[۶].



شکل ۱: فرایند برخورد ذرات با لایه اکسید ماسفت، ایجاد بارها و ترابرد بارها[۷].

عامل جابجایی توزیع پتانسیل در این لایه تجمع بارهای مثبت در لایه اکسید می‌باشد و از طرفی مطابق رابطه (۱) مقدار بارهای جمع شده در لایه اکسید، ولتاژ نوار تخت ترانزیستور را جابجا می‌کند.

$$V_{fb} = \emptyset_{ms} - \frac{Q_{ss}}{C_{ox}} \quad (۱)$$

در رابطه (۲)، $\emptyset_{ms}$، Q_{ss} و C_{ox} 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 می‌باشند. همان‌طور که در این رابطه ملاحظه می‌گردد، با افزایش مقدار بارهای به تله افتاده در لایه اکسید، ولتاژ نوار تخت ترانزیستور بیشتر تغییر می‌کند[۷]. این پارامتر ولتاژ نوار تخت به‌طور مستقیم با مقدار ولتاژ آستانه ترانزیستور رابطه دارد. کمیت مهم در دزیمتری توسط ماسفت‌ها، مقدار تغییرات ولتاژ آستانه ترانزیستور می‌باشد. در آزمایش‌های متنوعی نشان داده شده است که تغییرات ولتاژ آستانه ترانزیستور ماسفت با مقدار تابش وارد بر ترانزیستور رابطه تقریباً خطی دارد. در ساده‌ترین شکل این رابطه را می‌توان توسط معادله (۲) بیان کرد[۷].

$$\Delta V_T = A \times D^n \quad (۲)$$

در معادله (۱)، ΔV_T، D، n و A به ترتیب تغییرات ولتاژ آستانه، مقدار دز در لایه عایق گیت ترانزیستور، درجه خطی بودن و ضریب ثابت می‌باشند. عواملی مانند کیفیت ساخت ماسفت، ضخامت لایه اکسید، میدان الکتریکی و تا حدودی دز کل بر درجه خطی بودن رابطه تأثیرگذار هستند. به‌صورت ایده‌ال این عوامل خطی می‌باشد و مقدار پارامتر n باید نزدیک به یک باشد.

روش‌های متعددی برای استخراج مقدار ولتاژ آستانه وجود دارد و همچنین مدارهای استخراج‌گر مختلفی برای اندازه‌گیری خودکار این پارامتر ارائه شده است .بخش بزرگی از روش‌های موجود برای تعیین ولتاژ آستانه شامل اندازه‌گیری استاتیک جریان درین انتقالی برحسب ولتاژ گیت (مشخصه I_D-V_g) از یک ترانزیستور می‌باشند[۱۱-۸].

۲- مواد و روش:

در این کار، دو مدل ترانزیستور ماسفت شامل BSS92 که یک ترانزیستور DIP نوع P و CD4007 که ترانزیستوری هم با ساختار SMD و هم DIP شامل دو نوع N و P بود به عنوان دزیمتر انتخاب و موردبررسی قرار گرفت. اندازه‌گیری منحنی ولتاژ-جریان در ناحیه کاری اشباع ترانزیستور صورت گرفت. برای اندازه‌گیری ولتاژ آستانه ترانزیستورهای ماسفت به‌منظور اندازه‌گیری دز پرتوهای گاما از دستگاه رسام منحنی جریان- ولتاژ ساخته شده در دانشکده مهندسی هسته‌ای شهید بهشتی استفاده شده است[۷]. نمای ظاهری دستگاه موجود در شکل ۲ نشان داده شده است.

شکل ۲: نمای ظاهری دستگاه رسام منحنی جریان- ولتاژ ترانزیستورهای ماسفت ساخته شده در دانشگاه شهید بهشتی[۷].

مطابق شکل (۲) برای اتصال قطعه تحت آزمایش به دستگاه، کانکتورهایی بر روی آن تعبیه شده است. توسط این کانکتورها، حفاظ، سیگنال اصلی و سیگنال پس‌خورد برای پایانه‌های گیت، درین و سورس، به برد آزمایش متصل می‌شود. همچنین کانکتور جداگانه‌ای بر روی دستگاه برای اتصال به حسگر دمای موجود در محفظه برد آزمایش، فراهم آورده شده است. این سامانه قبلاً توسط آزمایش پرتویی در آزمایشگاه دزیمتری استاندارد ثانویه (SSDL) کرج، کالیبره شده است[۷].

پرتودهی ماسفت‌ها در این کار نیز در آزمایشگاه دزیمتری استاندارد ثانویه کرج در دزهای ۱۰۰-۱ گری انجام گرفت. به‌منظور آزمایش پایداری و تعیین دقت، تعداد ۵ عدد ترانزیستور از نوع BSS92 و ۳ عدد از نوع CD4007 مورد پرتودهی قرار گرفته و قرائت منحنی I-V هرکدام از آن‌ها نیز سه مرتبه‌صورت گرفته است. میانگین تمامی این داده‌ها به همراه انحراف از معیار مشاهده شده در هر دز محاسبه گردید. در شکل (۳) سیستم پرتودهی آزمایشگاه دزیمتری استاندارد ثانویه کرج به همراه نحوه قرارگیری نمونه‌های مختلف (برد شامل ماسفت) در هر بار پرتوگیری نشان داده شده است. پرتودهی قطعات، بدون بایاس انجام شده است.

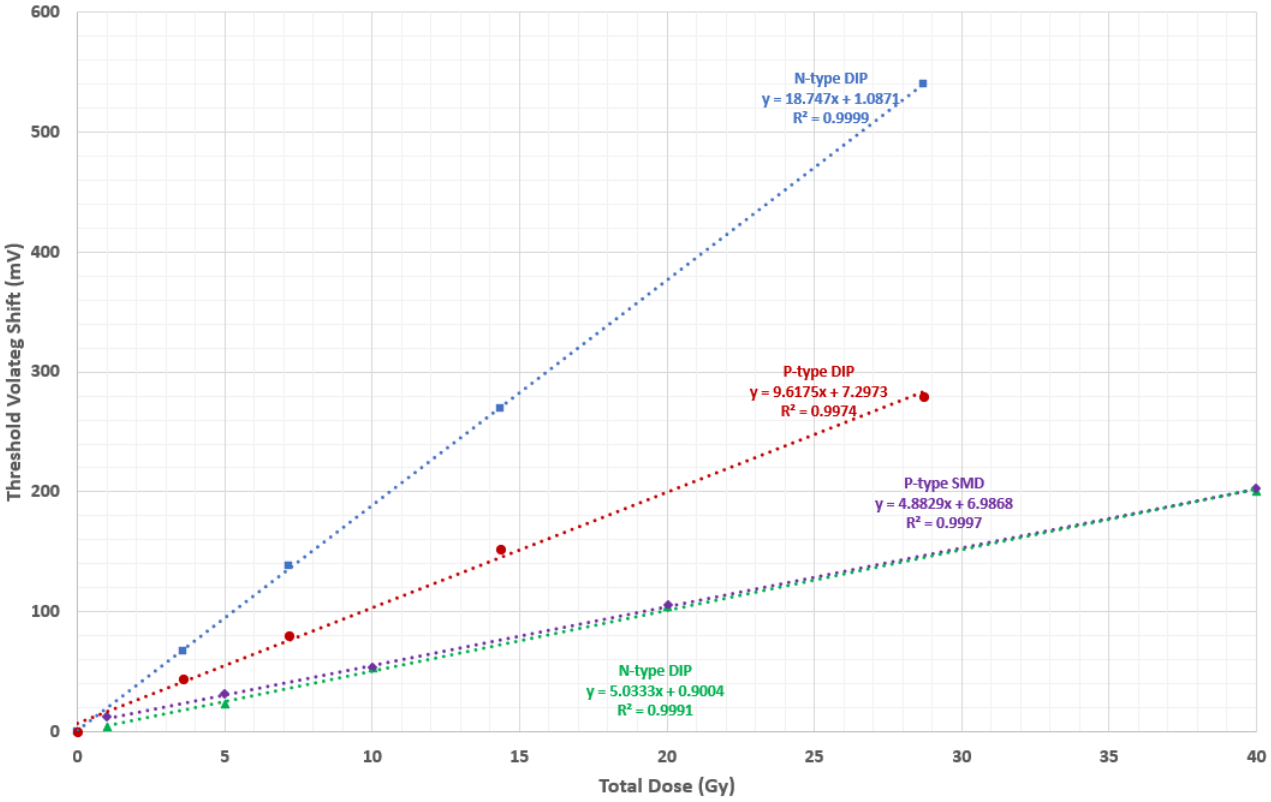
شکل ۳: سیستم پرتودهی آزمایشگاه دزیمتری استاندارد ثانویه کرج و برد قرارگیری قطعات ماسفت.

۳- نتایج:

در جدول (۱) مطابق شکل ۴ تغییرات اندازه‌گیری شده جابجایی ولتاژ آستانه ترانزیستورهای CD4007 در دزهای مختلف تا ۴۰گری نشان داده شده است. در این شکل نتایج نوع‌های DIP و SMD این مدل ترانزیستور مقایسه شده‌اند. نتایج نشان می‌دهد که جابجایی ولتاژ آستانه برای قطعه نوع DIP در تمامی دزهای موردنظر بیشتر از نوع SMD است. البته نوع N این قطعات DIP دارای بیشترین حساسیت در حدود 18.74 mV/Gy است. نوع P قطعات DIP دارای حساسیتی از مرتبه 9.61 mV/Gy می‌باشد. اما در مورد قطعات SMD تقریباً تفاوت بین نوع P و نوع N این قطعات تا محدوده دز ۴۰گری ناچیز بوده و حساسیت آن‌ها در حدود 5 mV/Gy است. هر دو نوع قطعات DIP و SMD نیز دارای یک جواب خطی مناسب می‌باشند که به‌صورت یک خط نقطه‌چین بر روی داده‌ها فیت شده است.

جدول۱: تغییرات ولتاژ آستانه ترانزیستور CD4007 برای انواع DIP و SMD در دزهای مختلف تا ۴۰ گری

	CD4007 N-type DIP	CD4007 P-type DIP	CD4007 N-type SMD	CD4007 P-type SMD
Dose (Gy)	ΔVth _Ave(mV)	ΔVth _Ave(mV)	ΔVth _Ave(mV)	ΔVth _Ave(mV)
0	0	0	0	0
1	0.25	0.10	4.75	12.66
5	67.42	43.81	23.73	31.65
10	138.74	79.70	53.80	53.80
20	269.60	151.51	104.43	106.01
40	539.22	279.38	200.95	202.53



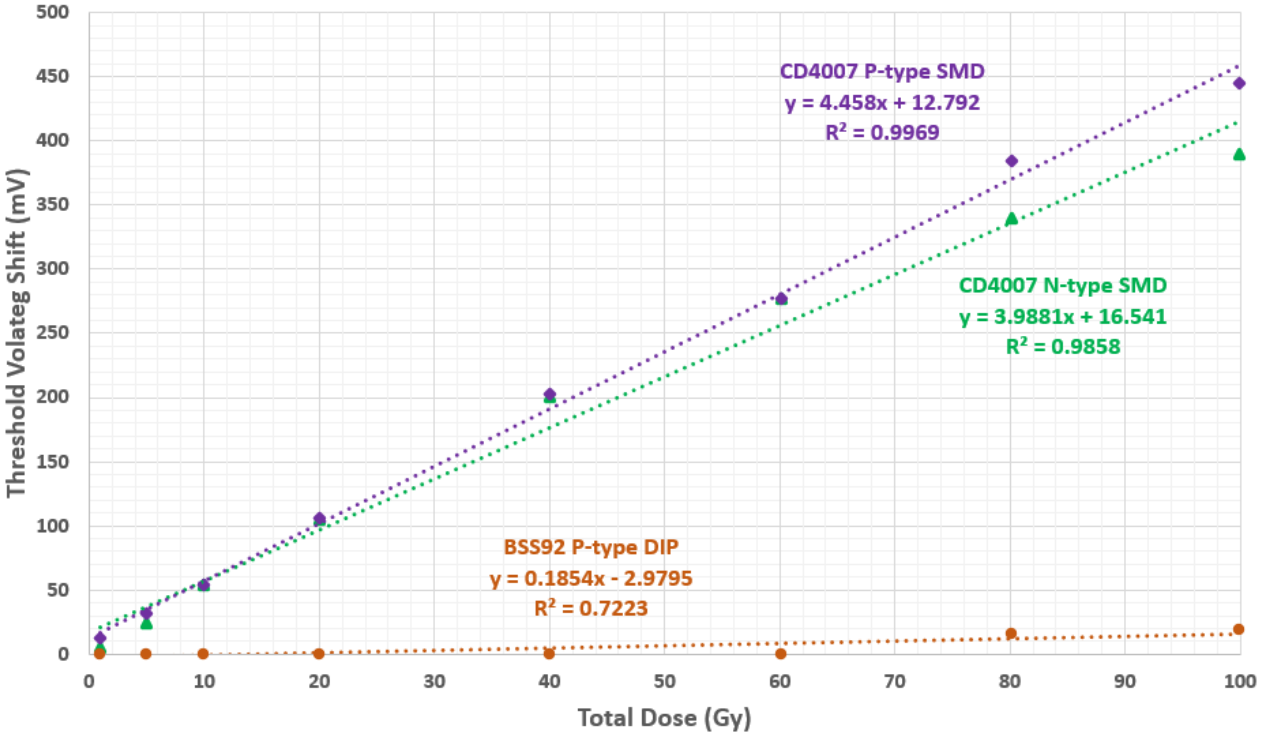
شکل ۴: تغییرات ولتاژ آستانه ترانزیستور CD4007 برای انواع DIP و SMD در دزهای مختلف تا ۴۰ گری.

در جدول ۲ مطابق شکل ۵ تغییرات ولتاژ آستانه ترانزیستورهای ماسفت در محدوده دزهای بالاتر (۱ تا ۱۰۰ گری) نشان داده شده است. در این شکل نوع SMD قطعات CD4007 با نوع DIP ترانزیستور ماسفت BSS92 مقایسه شده‌اند. در این شکل به وضوح نشان می‌دهد که داده‌های نوع N و نوع P ماسفت CD4007 در دزهای بالا تقریباً از هم جدا شده و نوع P آن با 4.45 mV/Gy از نوع N آن با 3.98 mV/Gy حساسیت بیشتری دارد. البته هر دو نوع این ترانزیستور دارای پاسخی بالاتر از ترانزیستور BSS92 از نوع DIP می‌باشد. البته حساسیت قطعه BSS92 تقریباً از ۶۰ گری آغاز می‌شود و زیر این حد دز پاسخی از قطعه دریافت نمی‌شود. روند پاسخ ماسفت‌های نوع P نیز دارای بیشترین حد خطی بودن با پارامتر فیت R^2 برابر با ۰/۹۹۶۹ در این محدوده دز موردنظر می‌باشد.

جدول۲: تغییرات ولتاژ آستانه ترانزیستورهای CD4007 از نوع SMD و BSS92 از نوع DIP در دزهای مختلف تا ۱۰۰ گری

	CD4007 P-type SMD	CD4007 N-type SMD	BSS92 P-type DIP
Dose (Gy)	ΔVth _Ave(mV)	ΔVth _Ave(mV)	ΔVth _Ave(mV)
0	0	0	0

1	12.66	4.75	0.28
5	31.65	23.73	0.3
10	53.80	53.80	0.33
20	106.01	104.43	0.31
40	202.53	200.95	0.37
60	276.90	276.90	0.45
80	384.49	340.19	15.82
100	444.62	389.24	18.99



شکل ۵: تغییرات ولتاژ آستانه ترانزیستورهای CD4007 از نوع SMD و BSS92 از نوع DIP در دزهای مختلف تا ۱۰۰ گری.

۴- نتیجه‌گیری:

در این کار تجربی، اندازه‌گیری دز پرتوهای گاما با استفاده از ترانزیستورهای ماسفت (CD4007 و BSS92) از انواع مختلف نوع DIP و SMD انجام گردید. پاسخ دزیمتری این ماسفت‌ها بر اساس جابجایی ولتاژ آستانه آن‌ها که از منحنی I-V استخراج می‌شود، می‌باشد. اندازه‌گیری جریان تابشی توسط این دزیمترها با پرتودهی در دزهای مختلف (از ۱ تا ۱۰۰ گری) در آزمایشگاه دزیمتری استاندارد ثانویه SSDL کرج-ایران در شرایط محیطی (دما و فشار) یکسان انجام شده است. نتایج نشان داد که در محدوده دزهای تا ۴۰ گری، پاسخ برای قطعه CD4007 نوع DIP در تمامی دزهای موردنظر بیشتر از نوع SMD است و نوع N این قطعه دارای بیشترین حساسیت در حدود 18.74 mV/Gy است. هر دو نوع DIP و SMD نیز دارای روندی کاملاً خطی در پاسخ دزیمتری می‌باشند. البته لازم به ذکر است با توجه به فرایند مختلف ساخت و ساختار درونی هرکدام از این ترانزیستور، مطالعات دقیق‌تر نیازمند اطلاع از این فرایندها می‌باشد که در حال حاضر برای این قطعات انتخاب شده در دسترس نمی‌باشد و این مطالعه به عنوان قطعات تجاری قابل دسترس در بازار انجام شده است. نتایج بررسی‌های در دزهای بالاتر (تا ۱۰۰ گری) نیز نشان داد که پاسخ ترانزیستورهای نوع P از

ماسفت CD4007 از نوع SMD دارای حساسیت بیشتری از نوع N آن هستند و پاسخی به مراتب بالاتر (بیش از ۲۰ برابر) از ترانزیستور BSS92 از نوع DIP دارند.

مراجع:

[1] Chuang, C. F., Verhey, L. J., & Xia, P. (2002). Investigation of the use of MOSFET for clinical IMRT dosimetric verification. Medical physics, 29(6), 1109-1115.

[2] Cheung, T., Butson, M. J., & Peter, K. N. (2004). Effects of temperature variation on MOSFET dosimetry. Physics in Medicine & Biology, 49(13), N191.

[3] L. Frohlich, "DOSFET-L02: An advanced online dosimetry system for radfet sensors," presented at the IBIC, UK, 2013.

[4] ramaseshan, R., Kohli, K. S., Zhang, T. J., Lam, T., Norlinger, B., Hallil, A., & Islam, M. (2004). Performance characteristics of a microMOSFET as an in vivo dosimeter in radiation therapy. Physics in Medicine & Biology, 49(17), 4031.

[5] World health organIzatIon, radiotherapy risk profile, Who press, geneva (2008).

[6] 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.

[7] بوربور و جعفری. "طراحی و ساخت دستگاه اندازه‌گیری دز پرتوهای گاما با استفاده از ترانزیستورهای ماسفت بر اساس جابجایی ولتاژ آستانه." مجله سنجش و ایمنی پرتو ۹,۱ (۲۰۲۱): ۰-۰.

[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] Zhou X, Lim KY, Lim D. 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] Katto H. Device parameter extraction in the linear region of MOSFET's. IEEE Electron Dev Lett 1997;18:408–10.

[11] Lau MM, Chiang CYT, Yeow YT, Yao ZQ. Measurement of VT and Leff using MOSFET gate-substrate capacitance. In: Proceedings of the 1999 International Conference on Microelectronic Test Structures, 1999. p. 152–5.