

## مطالعه اثر تابش گاما روی خواص الکتریکی MOSFET و دیود MOS برای کاربرد دزیمتری

توکل توحیدی\* و شهریار رحمت‌اله‌پور

پژوهشکده کاربرد پرتوها- مجتمع پژوهشی شمال غرب کشور (بناب)، پژوهشگاه علوم و فنون هسته‌ای، بناب، آذربایجان شرقی، ایران.  
\*آذربایجان شرقی، بناب، پژوهشگاه علوم و فنون هسته‌ای، پژوهشکده کاربرد پرتوها- مجتمع پژوهشی شمال غرب کشور (بناب)، کدپستی: ۵۵۵۳۱-۱۱۱۱۳  
پست الکترونیکی: [ttohidi@aeoi.org.ir](mailto:ttohidi@aeoi.org.ir)

### چکیده

در این کار، اثر تابش پرتو گاما روی خواص ترانزیستورهای اثر میدان نیمه‌هادی اکسید فلزی (MOSFET) (براساس تغییر ولتاژ آستانه‌شان در اثر پرتو دهی) بررسی شده است. ابتدا، اثر تابش گاما روی ترانزیستورهای PMOS تجاری موجود در بازار برای دزیمتری مطالعه گردید. نتایج نشان داد که پاسخ آشکارساز نسبت به دز دریافتی خطی نیست، بنابراین در ناحیه‌های مختلف مورد بررسی قرار گرفت. سپس، دیودهای MOS (به صورت اتصال  $Al/n-Si/SiO_2/Al$ ) به عنوان دزیمتر ساخته شدند. نمونه‌های ساخته شده در دزهای میلی‌گری تا کیلوگری تابش دهی و رفتار الکتریکی آن‌ها مورد بررسی قرار گرفتند. مشاهده شد که در بایاس مستقیم تغییرات جریان، کم اما در بایاس معکوس و در ولتاژهای کمتر از ۲۰ ولت تغییرات جریان دیودها نسبت به دز دریافتی، زیاد و مقدار آن قابل اندازه‌گیری بود. هم‌چنین مشاهده گردید که حساسیت دیود یک عدد ثابت نیست و این ناشی از این مسأله است که منحنی تغییرات دز نسبت به جریان خطی نمی‌باشد. از روی منحنی‌ها سه ناحیه نسبتاً خطی به دست آمد و حساسیت‌ها نسبت به این سه ناحیه محاسبه گردید.

کلیدواژه‌گان: اکسیدهای فلزی، تابش گاما، دیودهای MOS، دزیمتر، حساسیت.

### ۱. مقدمه

آن‌ها (آهنگ‌ها) یا کمیت‌های مرتبط با اشعه یونیزه را اندازه‌گیری یا ارزیابی می‌کند. یک دزیمتر به همراه قرائت‌گر آن یک سیستم دزیمتری گفته می‌شود [۱]. دزیمتر علاوه بر کنترل و نمایش دز دریافتی انسان از تابش، در فرآیندهای صنعتی و پزشکی هم مورد استفاده قرار می‌گیرد. در حال حاضر، از انواع مختلف دزیمترهای پرتوی استفاده می‌شود که در زیر به اختصار به آن‌ها اشاره شده است [۱]. تاریخچه و انواع

پرتو دهی گاما به‌طور قابل توجهی در زمینه‌های مختلفی از صنعت، پزشکی، نظامی و تحقیقاتی مورد استفاده قرار می‌گیرد. پرتوگاما با وجود کاربردهای بسیار مفید، در عین حال برای انسان خطرناک است. لذا لازم است میزان پرتوگیری پرتوکاران، اندازه‌گیری و کنترل گردد. این کار با وسیله‌ای به نام دزیمتر انجام می‌شود. دزیمتر تابشی، دستگاهی است که به‌طور مستقیم یا غیرمستقیم دز جذب شده، معادل دز، مشتقات زمانی

می‌باشد [۹]. لذا این دزیمترها هم دارای اهمیت زیادی می‌باشند.

حساس‌ترین قسمت دستگاه MOSFET یا MOS در برابر اشعه یونیزان لایه اکسیدی است که در آن جفت‌های الکترون-حفره توسط پرتوهای یونیزه تولید می‌شوند. در واقع عملکرد اصلی دزیمتر MOS براساس تولید جفت‌های الکترون-حفره در دی‌اکسیدسیلیکون  $\text{SiO}_2$  به‌علت تابش یونیزه‌کننده فرودی می‌باشد. وقتی تابش روی آشکارساز MOS تابیده می‌شود باعث بیرون انداختن الکترون‌ها از اتم‌های لایه  $\text{SiO}_2$  و حرکت آن‌ها به سمت حفره‌ها (با بار مثبت) می‌شود. الکترون‌های تولیدشده که تحرکشان در دمای اتاق چهار برابر بزرگتر از حفره‌ها است به‌سرعت به سوی الکتروود گیت حرکت می‌کنند. حفره‌هایی که از بازترکیب اولیه فرار می‌کنند به‌طور نسبی بدون حرکت مانده و در نزدیکی نقطه تولیدشان می‌مانند. متناظر با حفره‌ها، بار منفی تصویری در سیلیکون تولید می‌گردد که این خود باعث کاهش سد پتانسیل می‌شود. اندازه‌گیری مقدار این بار، متناسب با مقدار دُز دریافتی می‌باشد [۱۰].

در مراجع [۱۱-۱۵] از ترانزیستورهای تجاری اثر میدان نیمه‌هادی اکسید فلزی (MOSFET) نوع n و p به‌عنوان یک سیستم دزیمتری تابش‌های گاما استفاده شده است. نتایج به‌دست آمده نشان‌دهنده این است که ترانزیستورهای نوع p حساسیت دزیمتری بالایی نسبت به ترانزیستورهای نوع n دارند و همچنین ترانزیستورهای با ضخامت اکسید گیت بالا حساسیت دزیمتری بالایی نسبت به سایر ترانزیستورهای هم‌نوع خود دارند.

در مرجع [۱۶] دیودهای PIN با هندسه‌های مختلف ساخته شده و جهت دزیمتری نوترون، استفاده شده‌اند. در بررسی به‌عمل آمده مشخص شده است که تغییرات ولتاژ نسبت به دُز غیرخطی می‌باشد. در مرجع [۱۷] از دیود

دزیمتراهای فردی در ایران توسط جعفری‌زاده و همکارانش قبلاً ارائه شده است [۲].

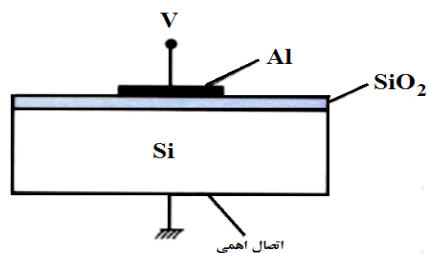
طی چند دهه اخیر، برای آشکارسازی تابش یونیزان، قطعات و مواد جدید مانند فیبر کربن [۳]، قطعات اکسید فلزی [۴]، مواد نیمه‌هادی آلی [۵]، ترانزیستور اثر میدان نیمه‌هادی اکسید فلزی [۶] و غیره مورد تحقیق و بررسی قرار گرفته‌اند. در بین انواع حسگرهای تابشی موجود، حسگر تابشی به شکل قطعه MOS (Metal Oxide Semiconductor) به‌دلیل کوچک بودن، ذخیره‌سازی بار به‌مدت طولانی، ولتاژ کار پایین، مستقل بودن از میزان دُز و حساسیت قابل تنظیم اهمیت زیادی دارد. اما برخی از محدودیت‌ها، از جمله اشباع ولتاژ آستانه پس از دریافت حداکثر دُز، وابستگی حساسیت به انرژی تابش و غیره را دارد. علاوه بر این، عملکرد حسگر به کیفیت اکسید گیت<sup>۱</sup>، ضخامت لایه اکسید فلزی و ولتاژ بایاس بستگی دارد [۷].

ترانزیستور اثر میدان نیمه‌هادی اکسید فلزی، یک ترانزیستور سیلیکونی با ابعاد بسیار کوچک در حد چند صد نانومتر می‌باشد که به‌خاطر بسیار کوچک بودن، و در صورت ساخته شدن به‌صورت مدارات مجتمع، توانایی تفکیک مکانی بالایی دارد. این ترانزیستورها به‌علت ابعاد کوچکشان، تضعیف بسیار کمی را در اشعه موجب می‌شوند که این امر به‌ویژه در دزیمتری داخل بدن مفید و حائز اهمیت می‌باشد.

دزیمتراهای MOSFET<sup>۲</sup> به‌طور گسترده در تکنولوژی فضایی برای کمک به اطلاع از محیط تابشی فضایی مورد استفاده قرار گرفته‌اند [۸]. آشکارسازهای MOSFET یک پیشینه طولانی در کاربرد به‌عنوان دزیمتر فضایی دارد اما به‌طور نسبی استفاده از آن در رادیوتراپی تکنیک تازه و جدیدی

<sup>۱</sup> Gate Oxide

<sup>۲</sup> Metal Oxide Field Effect Transistors



شکل (۱): ساختار دیود MOS.

مراحل ساخت دیود MOS مورد مطالعه به صورت زیر می باشد:

- ۱) تمیزکاری شیمیایی زیرلایه سیلیکونی.
- ۲) ایجاد اتصال اهمی با آلومینیوم به ضخامت ۱۲۰ نانومتر در طرفی که پولیش نشده به عنوان زمین با دستگاه لایه نشانی تبخیر در خلأ.
- ۳) ایجاد لایه اکسیدی سیلیکون ( $\text{SiO}_2$ ) روی سیلیکون با روش اکسیداسیون سیلیکون در هوا.
- ۴) گذاشتن ماسک فلزی (توری) روی  $\text{SiO}_2$  و ایجاد اتصال اهمی روی  $\text{SiO}_2$  به عنوان گیت.
- ۵) ایجاد اتصال‌های سیمی روی زمین و گیت دیود.

برای دُزهای زیر یک گری، چشمه نقطه‌ای کبالت-۶۰ با اکتیویته ۲۱۲ میکروکوری ساخت شرکت پارس ایزوتوپ روی دزیمتر مدل RDS-120 (RADOS) گذاشته شده و مقدار نرخ دُز  $\dot{D}$  برحسب  $\mu\text{Gy}/h$  خوانده شد. سپس MOSFET و دیود را روی چشمه نقطه‌ای گذاشته و به عنوان مثال بعد از گذشت زمان ۷ هفته (دقیقاً ۱۲۲۴ ساعت) مقدار دُز برابر با  $0.41 \text{ Gy}$  ( $D = \dot{D} \times h = 0.41 \text{ Gy}$ ) گری اندازه‌گیری شد.

برای آهنگ دُزهای متوسط و بالا، MOSFET در سامانه‌ی پرتودهی ثابت واقع در مجتمع پژوهشی شمال غرب کشور پرتودهی شد. برای دُزهای متوسط، MOSFET در سامانه‌ی پرتودهی ثابت بناب، در نقاط با نرخ دُز مشخص و برای زمان معلوم قرار داده شده و مقدار دُز به دست آمد. قبلاً برای سامانه‌ی ثابت نرخ دُز مشخص در نقاط خاص با استفاده از کد

ساخته شده PIN، در محدوده‌ی ۰/۲-۱ گری جهت دزیمتری گاما، استفاده شده است. بار ذخیره شده در دیود به عنوان خروجی استفاده شده و تغییرات بار نسبت به دُز بررسی شده است. نتایج نشان داد که تغییرات بار نسبت به دُز، خطی بوده و حساسیت دیودهای ساخته شده حدود  $4 \frac{nC}{cGy}$  می باشد. در مرجع [۱۸] دیودهای مختلف شاتکی تحت تابش چشمه‌ی کبالت ۶۰ در محدوده‌ی ۱۰-۰/۱ گری قرار گرفته و نشان داده شده که تغییرات بار نسبت به دُز، خطی و حساسیت دیودهای ساخته شده حدود  $200-6 \frac{nC}{cGy}$  می باشد. در مرجع [۱۹] از دیود دوسطحی (MOS)، جهت دزیمتری نوترون‌های سریع استفاده شده است. در مرجع [۲۰] دیودهای مختلف ساخته شده PIN، برای دزیمتری گاما و نوترون مورد استفاده قرار گرفته است و نتایج آن‌ها نشان می دهد که تغییرات ولتاژ دیود برحسب دُز، برای گاما کم ولی برای نوترون زیاد می باشد. مقدار حساسیت دیودهای ساخته شده حدود  $0.02 \frac{mV}{Gy}$  اندازه‌گیری شده‌اند. در این کار، نشان داده شد که می توان از ترانزیستورهای PMOS تجاری برای دزیمتری استفاده کرد. همچنین، با عنایت به امکانات موجود در مجتمع پژوهشی شمال غرب کشور (بناب)، دیودهای MOS برای استفاده در دزیمتری ساخته شدند. رفتار الکتریکی نمونه‌های ساخته شده، تحت تابش گاما با دُزهای مختلف از میلی‌گری تا کیلوگری مورد بررسی قرار گرفت.

## ۲. روش کار

ساختار دزیمترهای اکسید فلزی نیمه‌هادی (MOS) ساخته شده به صورت  $\text{Al}/n\text{-Si}/\text{SiO}_2/\text{Al}$  می باشد که لایه بالایی آن الکتروود فلزی، لایه میانی اکسید سیلیکون و لایه پایینی سیلیکون و در طرف دیگر سیلیکون اتصال فلزی می باشد که به طور شماتیک در شکل ۱ نشان داده شده است.

برای به‌دست آوردن منحنی I-V قطعه بر روی برد الکترونیکی قرار داده شده ولتاژ DC متغیر از ۰ تا ۳۰ ولت به دو سر قطعه اعمال گردید. جریان برای هر ولتاژ (در غیاب نور) و تا حد امکان عاری از اغتشاش، با دستگاه پیکوآمپر متر Keithley مدل ۶۷۸۵ اندازه‌گیری و ثبت گردید. با توجه به حساسیت دیود نسبت به اغتشاش نوری و میدان مغناطیسی، علاوه بر این که با کاغذ معمولی پوشانده شد هم‌چنین در داخل یک محفظه استیل با دیواره‌هایی به ضخامت ۳ mm نیز قرار داده شد. لازم به ذکر می‌باشد که تمام نمونه‌ها در ۰، ۰/۴۱، ۰/۴۱، ۱۰، ۳۰، ۳۱، ۲۰۰۰، ۹۲۵۰ و ۱۰۲۵۰ گری دُز تابش داده شدند که دُز تجمعی به‌ترتیب برابر ۰، ۰/۴۱، ۰/۸۲، ۱۰/۸۲، ۴۰/۸۲، ۷۱/۸۲، ۲۰۷۱/۸۲، ۱۱۳۲۲/۸۲، ۲۱۵۷۲/۸۲ گری می‌شود. MOSFT (و یا دیود) در حالت غیرفعال (passive) در معرض تابش گاما قرار داده شد. در این حالت هیچ مداری به قطعه وصل نبوده و تمام پایه‌های قطعه به هم متصل و در معرض تابش گاما قرار گرفتند. سپس پایه‌های قطعه (ماسفت و یا دیود) از هم باز شده و قطعه در مدار مربوط به اندازه‌گیری جریان گذاشته شده و منحنی ولتاژ-جریان، گیت-درین رسم گردید. این عمل برای دُزهای مختلف تکرار و منحنی ولتاژ آستانه برحسب جریان درین (برای هر دُز کل دریافتی) رسم شد.

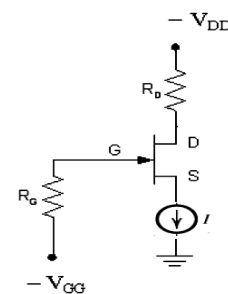
### ۳. نتایج و بحث

#### ۱.۳. بررسی اثر پرتو گاما روی MOSFET

با توجه به اکتیویته پایین چشمه کبالت نقطه‌ای در زمان‌های پرتو دهی کم (یک تا دو ساعت) تغییر چندانی در ولتاژ آستانه MOSFET ها مشاهده نگردید. اما طبق انتظار در زمان‌های پرتو دهی بیش‌تر جابه‌جایی ولتاژ آستانه در آن‌ها مشاهده شد. منحنی‌های جریان درین-سورس به ولتاژ گیت-سورس در این مدت پرتو دهی برای MOSFET در شکل ۳ به‌صورت

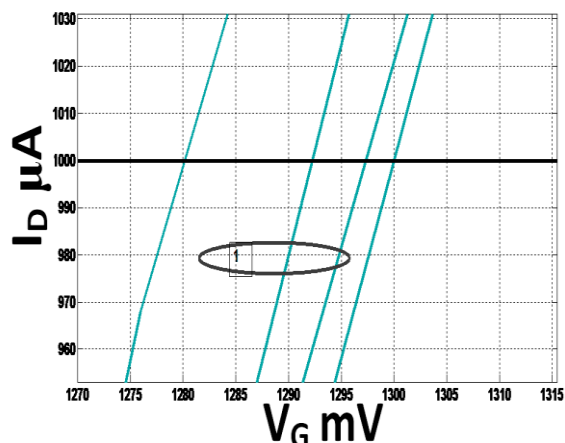
MCNP محاسبه و ثبت شده‌اند. لازم به ذکر است که برای دُزهای متوسط روش دُزیمتری با پرسپیکس دقیق نمی‌باشد و دلیل آن این است که اولاً به‌اندازه کافی پایدار و مستقل از شرایط محیط نمی‌باشند. ثانیاً محدوده‌ی دُز آن‌ها برای دُزهای بالای 1 KGy می‌باشد. محدوده‌ی دُز اعلام‌شده توسط سازندگان برای پرسپیکس 1-50 KGy می‌باشد. یعنی در این محدوده جواب می‌دهد. بدیهی است که اگر بخواهیم زیر 1 KGy استفاده کنیم جواب دقیق نیست و اصلاً حق استفاده نداریم. برای دُزهای بالا، MOSFET در سامانه‌ی ثابت و با روش دزیمتری با پرسپیکس پرتو دهی گردید. به‌همراه MOSFET یک عدد دزیمتر پرسپیکس داخل جعبه قرار داده و بعد از پرتو دهی و با استفاده از روش استاندارد اندازه‌گیری شدت جذب در طول‌موج ۳۱۴ nm و تقسیم بر ضخامت پرسپیکس و استفاده از نمودار کالیبراسیون (این نمودار کالیبراسیون قبلاً به‌دست آمده است) مقدار دُز دریافتی محاسبه گردید.

در این کار MOSFET ها را در مد غیرفعال (یعنی بدون بایاس و بدون قطعات جانبی) با شماره تجاری به‌صورت FQD11P06 60V PMosfet تحت تابش پرتو قرار دادیم. برای اندازه‌گیری ولتاژ آستانه MOSFET از مدار شکل ۲ استفاده شد. در این مدار درین به ولتاژ منفی ۱۵ ولت و گیت به ولتاژ منفی متغیر و پایه سورس MOSFET به زمین متصل می‌گردد. مقاومت‌های گیت و درین ده کیلو اهم می‌باشند.



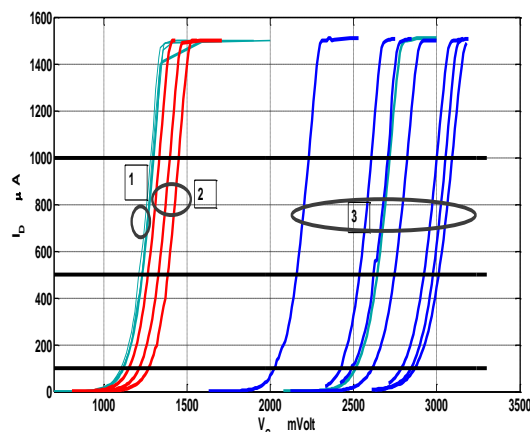
شکل (۲): مدار لازم برای اندازه‌گیری ولتاژ آستانه قبل و بعد از

پرتو دهی برای ماسفت نوع P.



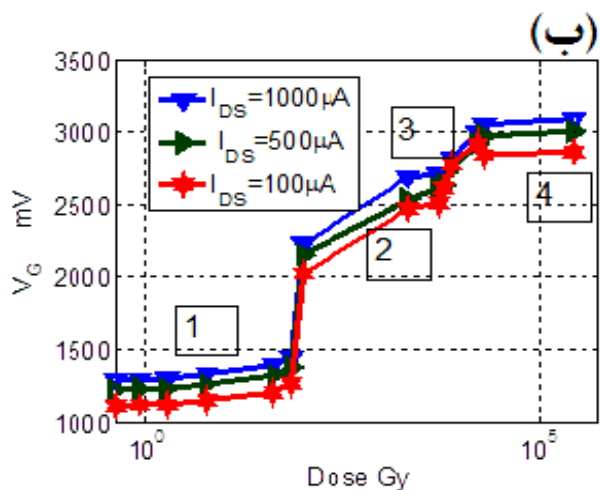
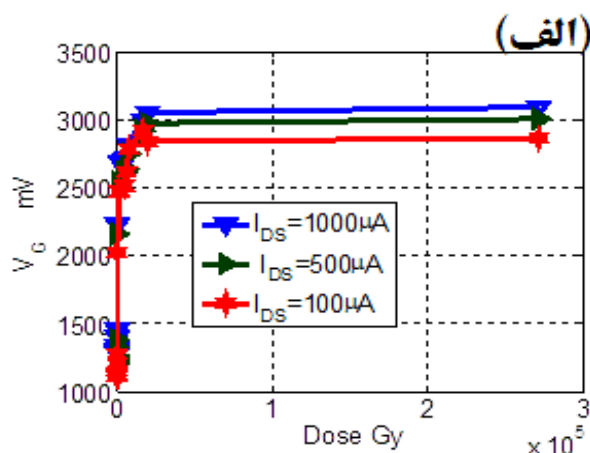
شکل (۴): تغییرات ولتاژ آستانه MOSFET با دز تابشی باز شده ی قسمت ۱ شکل ۳ با جریان مرجع ۱۰۰۰ میکروآمپر.

خطی آمده است. در این شکل منحنی ولتاژ آستانه برحسب مقدار دز کل دریافتی برای سه جریان مرجع ۵۰۰ و ۱۰۰ و ۱۰۰۰ میکروآمپر به ترتیب با اعداد ۱ و ۲ و ۳، نشان داده شده است. گروه منحنی های شماره یک برای دزهای پایین، شماره دو برای دزهای متوسط و شماره سه برای دزهای بالا می باشد که در ادامه توضیح داده می شود.



شکل (۳): تغییرات ولتاژ آستانه MOSFET با دز تابشی.

بزرگ شده ی گروه شماره یک شکل ۳ برای دزهای تجمعی پایین، یعنی ۰، ۰/۴۱، ۰/۸۲، ۱۰/۸۲ گری، و به ترتیب افزایش دز، در شکل ۴ آمده است. جریان مرجع ۱۰۰۰ میکروآمپر در نظر گرفته شده است. اولین منحنی، نشان دهنده حالت بدون دز است که ولتاژ آستانه آن برابر ۱۲۸۰ میلی ولت می باشد. شکل ۵-الف منحنی ولتاژ آستانه (یا همان ولتاژ گیت  $V_G$ ) برحسب مقدار دز کل دریافتی  $D$  را برای سه جریان مرجع ۵۰۰، ۱۰۰ و ۱۰۰۰ میکروآمپر نشان می دهد. در دزهای پایین، تغییرات ولتاژ آستانه واضح نیست، از این رو در شکل ۵-ب به صورت لگاریتمی نشان داده شده است. شکل ۵-ب منحنی ولتاژ آستانه برحسب مقدار دز کل دریافتی  $D$  را برای دزهای پایین تر از ۳ کیلوگری به صورت لگاریتمی نشان می دهد. منحنی ولتاژ آستانه را می توان به چهار ناحیه مطابق شکل تقسیم کرد. با توجه به شکل، برای دزهای بالاتر از ۳ کیلوگری، ولتاژ آستانه اشباع می شود (ناحیه ۴).

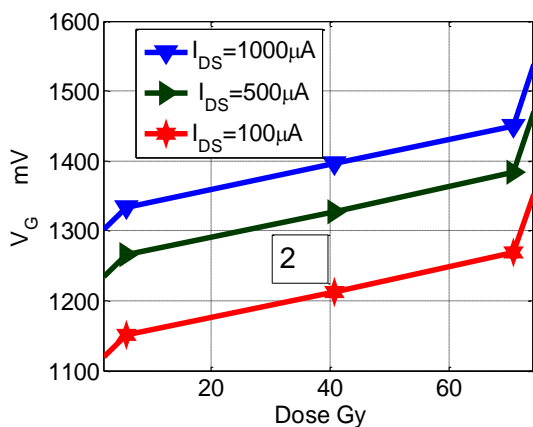


شکل (۵): (الف) منحنی ولتاژ آستانه برحسب مقدار دز کل دریافتی برای سه جریان مرجع، (ب) منحنی ولتاژ آستانه برحسب مقدار دز کل دریافتی برای دزهای پایین تر از ۳ کیلوگری.

شکل ۶-الف منحنی ولتاژ آستانه  $V_G$  برحسب مقدار دز کل دریافتی  $D$  را برای دزهای پایین (کم تر از ۲ گری و

شکل ۷ منحنی ولتاژ آستانه برحسب مقدار دُز کل دریافتی را برای دُزهای متوسط (بیشتر از ۲ و کمتر از ۷۰ گری و ناحیه ۲) نشان می‌دهد.

با برازش منحنی با خط راست، این معادله  $V_G = 1.7986 \times D + 1322.9$  حاصل و در نتیجه حساسیت برابر با  $S = \frac{\partial V_G}{\partial D} = 1.7986 \text{ V/Gy}$  به دست می‌آید. حساسیت ترانزیستور مورد آزمایش در این کار در محدوده‌ی دُز ۱۰ تا ۷۰ گری، ۶۶ برابر مقادیر ذکر شده در مرجع [۲۱] می‌باشد.

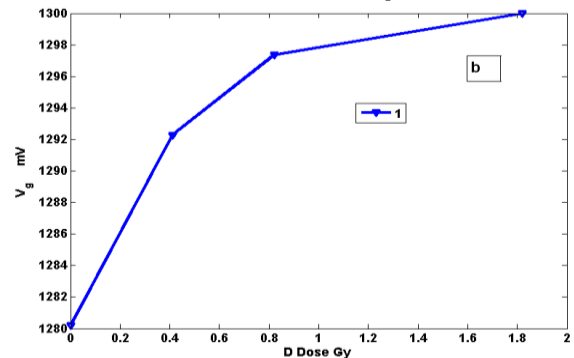
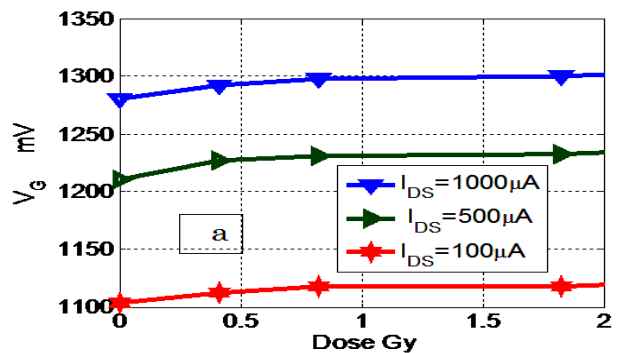


شکل (۷): منحنی ولتاژ آستانه برحسب مقدار دُز کل دریافتی برای دُزهای متوسط.

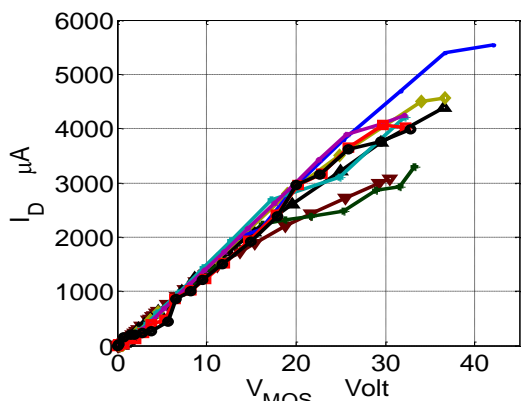
شکل ۸ منحنی ولتاژ آستانه برحسب مقدار دُز کل دریافتی را برای دُزهای بالا (بیشتر از ۷۰ گری و کمتر از ۲۰۰۰۰ گری) که با ناحیه ۳ در شکل ۳ مشخص شده بود، نشان می‌دهد. در این محدوده با برازش منحنی با خط راست، معادله‌ی  $V_G = 0.03153 \times D + 2486.1$  به دست می‌آید و در نتیجه مقدار حساسیت برابر  $S = \frac{\partial V_G}{\partial D} = 0.03153 \text{ V/Gy}$  حاصل می‌شود. در محدوده‌ی دُزهای ۱ تا ۱۰ کیلوگری، حساسیت ۱/۱۶ برابر مقادیر ذکر شده در مرجع [۱۱] می‌باشد. البته همان‌طور که از شکل هم مشخص است در این ناحیه، منحنی به‌طور کامل خطی نیست.

ناحیه (۱) نشان می‌دهد. برای به دست آوردن حساسیت، با برازش منحنی ولتاژ آستانه  $V_G$  برحسب مقدار دُز کل دریافتی  $D$  با خط راست، معادله  $V_G = 9.68 \times D + 1285.1$  به دست می‌آید (جریان مرجع ۱۰۰۰ میکروآمپر در نظر گرفته شده است). به دلیل وجود مقدار ثابت ۱۲۸۵ (ولتاژ آستانه بدون دُز) در نمودار داده‌ها نزدیک هم می‌باشد لذا برای بهتر دیدن تغییرات ولتاژ آستانه با دُز، این مقدار پس‌زمینه را کم می‌کنیم که در شکل ۶-ب و برای جریان مرجع ۱۰۰۰ میکروآمپر رسم شده است. از این داده‌ها مقدار حساسیت برابر  $S = \frac{\partial V_G}{\partial D} = 9.69 \text{ V/Gy}$  به دست می‌آید.

مقادیر مختلفی برای حساسیت در مقالات ذکر شده است. برای مثال در مرجع [۲۱] مقدار حساسیت  $S = 27 \text{ V/mGy}$  ذکر شده است. حساسیت ترانزیستور مورد آزمایش در این کار و در محدوده‌ی دُز ۱۰ تا ۱۰۰۰ میلی‌گری، ۳۰۰ برابر مقادیر ذکر شده در مرجع بالا می‌باشد. این اختلاف می‌تواند مربوط به متفاوت بودن نوع ترانزیستورهای MOSFET باشد.

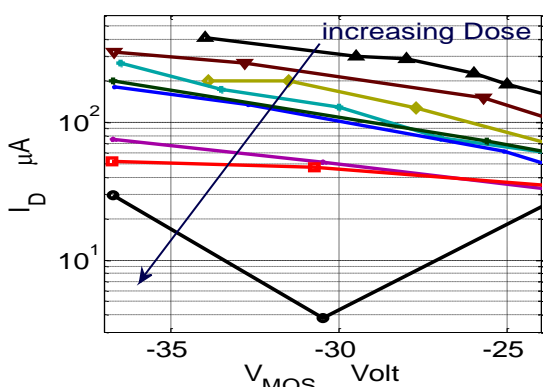


شکل (۶): (الف) منحنی ولتاژ آستانه برحسب مقدار دُز کل دریافتی برای دُزهای پایین برای سه جریان، (ب) منحنی ولتاژ آستانه بدون پس‌زمینه و برای جریان مرجع ۱۰۰۰ میکروآمپر.



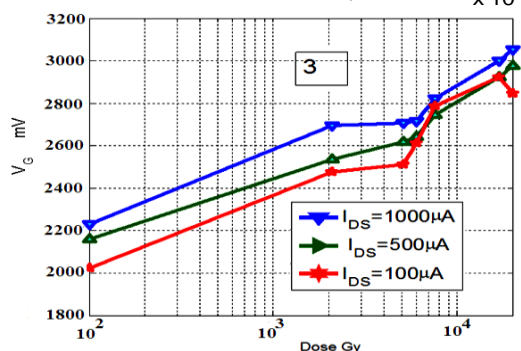
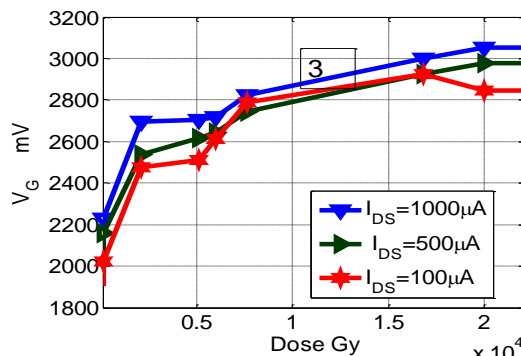
شکل (۱۰): منحنی دیود در بایاس مستقیم و برای دُزهای مختلف.

در بایاس‌های کم مربوط به بایاس معکوس، منحنی‌ها روی هم می‌افتند ولی با افزایش ولتاژ، منحنی‌ها از هم باز می‌شوند برای مثال در ولتاژ ۳۰- ولت، جریان دیود بین ۲۰ تا ۴۰۰ میکروآمپر تغییر می‌کند. با افزایش دُز جریان دیود کاهش می‌یابد. شکل ۱۱ منحنی جریان- ولتاژ را در محدوده‌ی ۲۴- تا ۳۷- ولت نشان می‌دهد.



شکل (۱۱): منحنی جریان- ولتاژ در حالت بایاس معکوس در محدوده‌ی ۲۵- تا ۳۷- ولت.

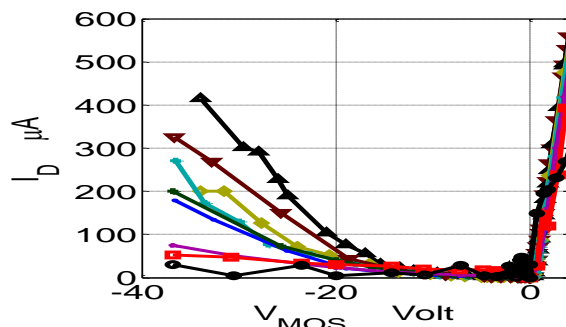
منحنی جریان برحسب مقدار دُز کل دریافتی برای سه ولتاژ دیود ۲۰- و ۲۵- و ۳۰- ولت در شکل ۱۲ نشان داده شده است. مشاهده می‌شود که منحنی جریان برحسب مقدار دُز کل دریافتی، خطی نمی‌باشد و سه ناحیه‌ی نسبتاً خطی می‌توان در نظر گرفت. گروه منحنی‌های شماره ۱ برای دُزهای پایین، شماره ۲ برای دُزهای متوسط و شماره ۳ برای دُزهای بالا می‌باشد که در ادامه توضیح داده می‌شود.



شکل (۸): منحنی ولتاژ آستانه برحسب مقدار دُز کل دریافتی برای دُزهای بالا.

### ۲.۳. بررسی اثر پرتو گاما روی دیود MOS

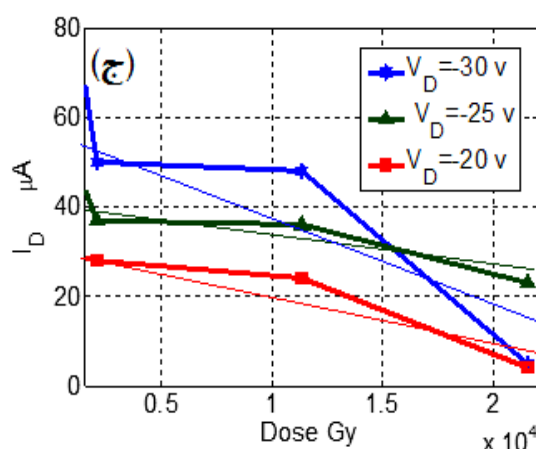
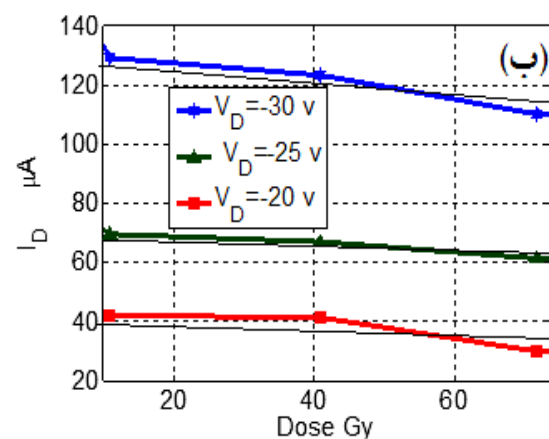
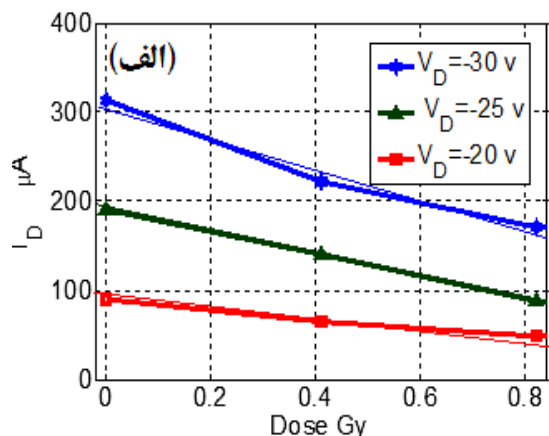
در شکل ۹ منحنی جریان برحسب ولتاژ برای بایاس مستقیم و معکوس بین ۴ تا ۴۰- ولت قبل و بعد از تابش، برای دیود ساخته شده رسم شده است. منحنی جریان- ولتاژ برای حالت بایاس مستقیم بین ۰ تا ۴۰ ولت در شکل ۱۰ به‌طور جداگانه نشان داده شده‌اند. با توجه به شکل مشاهده می‌شود که منحنی‌ها خطی بوده و تقریباً روی هم افتاده‌اند. حساسیت دیود در این حالت کم بوده و در نتیجه نمی‌توان از این قسمت دیود برای دزیمتری استفاده کرد.



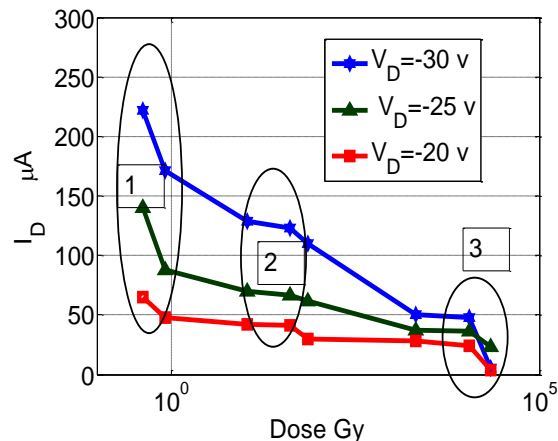
شکل (۹): منحنی جریان برحسب ولتاژ برای بایاس مستقیم و معکوس بین ۴ تا ۴۰- ولت قبل و بعد از تابش.



مقدار کم حساسیت در این حالت نشان‌دهنده این است که دیود برای دُز بالا حساس نمی‌باشد. منحنی حساسیت برحسب مقدار دُز کل دریافتی برای ولتاژ مرجع ۲۵- ولت در شکل ۱۴، نشان داده شده است. حساسیت با افزایش دُز، به شدت کاهش می‌یابد. لذا این دیود برای دُزهای پایین در حد گری مناسب می‌باشد.



شکل (۱۳): منحنی جریان برحسب مقدار دُز کل دریافتی برای دیود MOS در دُزهای (الف) پایین، (ب) متوسط و (ج) بالا.



شکل (۱۲): منحنی جریان برحسب مقدار دُز کل دریافتی برای سه ولتاژ مرجع ۲۰- و ۲۵- و ۳۰- ولت.

در شکل ۱۳ منحنی جریان برحسب دُز برای دُزهای پایین، متوسط و بالا و برای سه ولتاژ مرجع ۲۰- و ۲۵- و ۳۰- ولت، به همراه برازش خطی آمده است. با توجه به شکل مشاهده می‌شود که ولتاژ مرجع ۲۵- بیش‌ترین خطیت را نسبت به ولتاژهای دیگر دارد. لذا از این به بعد، منحنی‌ها را در ولتاژ مرجع ۲۵- در نظر می‌گیریم. با برازش منحنی (ولتاژ مرجع ۲۵-) با خط راست، معادلات خطی ۱، ۲ و ۳ به ترتیب برای دُزهای پایین، متوسط و بالا به صورت زیر به دست می‌آید که در آن  $D$  دُز برحسب گری و  $I_D$  جریان دیود برحسب  $\mu A$  می‌باشد.

$$I_D = -125 \times D + 190 \quad (1)$$

و از این معادله حساسیت برای دُزهای پایین برابر

$$S = \frac{\partial I_D}{\partial D} = 125 \left( \frac{\mu A}{Gy} \right) \text{ به دست می‌آید.}$$

$$I_D = -0.13 \times D + 71 \quad (2)$$

معادله ۲ حساسیت برای دُزهای متوسط را برابر

$$S = \frac{\partial I_D}{\partial D} = 0.13 \left( \frac{\mu A}{Gy} \right) \text{ به دست می‌دهد.}$$

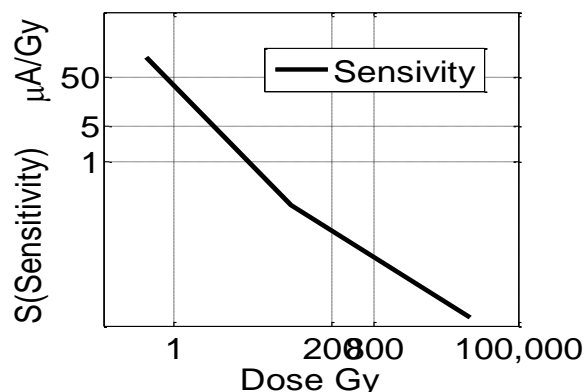
$$I_D = -0.0007 \times D + 40 \quad (3)$$

حساسیت برای دُزهای بالا با استفاده از معادله ۳ برابر

$$S = \frac{\partial I_D}{\partial D} = 0.0007 \left( \frac{\mu A}{Gy} \right) \text{ به دست می‌آید.}$$



گردید که دُز تابشی در منحنی ولتاژ- جریان نمونه‌ها تأثیر دارد. این تأثیرات در بایاس مستقیم بسیار کم و قابل صرف نظر می‌باشد، زیرا دیود در این قسمت حساسیت لازم نسبت به دُز دریافتی را نداشت. به عبارت دیگر از مقدار جریان در یک ولتاژ خاص نمی‌توان به مقدار دُز دریافتی رسید. اما در بایاس معکوس و در ولتاژهای پایین‌تر برای مثال در ولتاژهای ۲۰- ولت، دیودها نسبت به دُز دریافتی تغییر جریان نشان دادند که مقدار این تغییر جریان قابل اندازه‌گیری می‌باشد و همین‌طور حساسیت دیود نیز به دست آمد که با توجه به این که منحنی تغییرات دُز نسبت به جریان خطی نبود لذا حساسیت دیود نیز یک عدد ثابت به دست نیامد. لذا سه ناحیه نسبتاً خطی در نظر گرفته شده و حساسیت‌ها نسبت به این سه ناحیه حساب گردید. با توجه به بیشترین حساسیت در ناحیه ۱۰۰-۰ گری، بهترین رنج استفاده‌ی دزیمتر نیز این بازه پیشنهاد می‌شود.



شکل (۱۴): منحنی حساسیت بر حسب مقدار دُز کل دریافتی برای ولتاژ مرجع ۲۵- ولت.

#### ۴. نتیجه‌گیری

در این پژوهش، ابتدا ترانزیستورهای PMOS موجود در بازار برای دزیمتری استفاده شد. مشاهده شد که پاسخ آشکارساز نسبت به دُز دریافتی خطی نیست و لذا در ناحیه‌های مختلف مورد بررسی قرار گرفتند. سپس دیودهای MOS برای استفاده دزیمتری ساخته شدند. در دُزهای میلی‌گری تا کیلوگری تابش‌دهی انجام و رفتار الکتریکی آن‌ها بررسی شد. مشاهده

## ۵. مراجع

- [1] A.M.H. Abaza. New Trend in Radiation Dosimeters, American Journal of Modern Physics, 7(2018) 21–30.
- [۲] منصور جعفری‌زاده، فیروزه ناظری و فریبا قشلاقی. پیشینه و سیر تحولات خدمات دزیمتری فردی در ایران. مجله سنجش و ایمنی پرتو، ۱(۵) (۱۳۹۵) ۳۵–۴۱.
- [3] J. Ma, J.T.W. Yeowa, J.C.L. Chow and R.B. Barnett. A carbon fiber-based radiation sensor for dosimetric measurement in radiotherapy, Carbon, 46 (2008) 1869–1873.
- [4] V.S.S. Srinivasan and A. Pandya. Feasibility study of thin film Al/SnO<sub>2</sub>/n-Si gate stack for gamma radiation dosimetry, Radiation Measurements, 44 (2009) 325–327.
- [5] H.N. Raval, S.P. Tiwari, R.R. Navan and V.R. Rao. Determining ionizing radiation using sensors based on organic semiconducting material, Applied Physics Letters, 94(12) (2009) 123304.
- [6] I.S. Kwan, A.B. Rosenfeld, Z.Y. Qi, D. Wilkinson, M.L.F. Lerch, D.L. Cutajar, M. Safavi-Naeni, M. Butson, J.A. Bucci, Y. Chin and V.L. Perevertaylo. Skin dosimetry with new MOSFET detectors, Radiation Measurements, 43 (2008) 929–932.
- [7] V.S.S. Srinivasan and A. Pandya. Dosimetry aspects of hafnium oxide metal-oxide semiconductor (MOS) capacitor, Thin Solid Films, 520(2011) 574–577.
- [8] L. Adams and A. Holmes-Siedle, The development of an MOS dosimetry unit for use in space, IEEE Transactions on Nuclear Science, 25(6) (1978) 1607–1612.
- [9] R. Ramani, S. Russell and P.O. Brien. Clinical dosimetry using MOSFETs, International Journal of Radiation Oncology. Biology. Physics (IJROBP), 37 (1997) 959–964.
- [10] T.R. Oldham. Total Ionizing Dose Effect in MOS Oxides and Devices, IEEE Transactions on Nuclear Science, 50(3) (2003) 483–499.
- [11] M. Soubra, J. Cygler and G.F. Mackay. Evaluation of a Dual Metal Oxide-Silicon Semiconductor Field Effect Transistor Detector as a Radiation Dosimeter, Medical Physics, 21(4) (1994) 567–572.
- [12] I. Thomson and M.H. Reece. Semiconductor MOSFET Dosimetry, Proceedings of Health Physics Society Annual Meeting (1988).
- [13] A. Holmes-Siedle and L. Adams. RADFET: A review of the use of metal oxide-silicon devices as integrating dosimeters, Radiation Physics and Chemistry, 28 (1986) 235–244.
- [14] R. Varadhan, J. Miller, B. Garrity and M. Weber. In vivo prostate IMRT dosimetry with MOSFET detectors using brass buildup caps, Journal of Applied Clinical Medical Physics (JACMP), 7(4) (2006) 22–32.
- [15] G. Sarraayrouse and S. Siskos. Radiation dose measurement using MOSFETs, IEEE Instrumentation & Measurement Magazine, 1(2) (1998) 26–34.
- [16] A. Rosenfeld, M. Yudelev, M.L.F. Lerch, I. Cornelius, P. Griffin, V.L. Perevertailo, I.E. Anokhin, O.S. Zinets, V.I. Khivrich, M. Pinkovskaya, D. Alexiev and M. Reinhard. Neutron Dosimetry with planar silicon p-i-n Diodes, IEEE Transactions on Nuclear Science, 50(6) (2003) 2367–2372.
- [17] R. Kumar, S.D. Sharma, A. Philomina and A. Topkar. Dosimetry Characteristics of a PIN Diode for Radiotherapy Application, Technology in Cancer Research & Treatment, 13(14) (2014) 361–367.
- [18] S. Pini, M. Bruzzi, M. Bucciolini, E. Borch, S. Lagomarsino, D. Menichelli, S. Miglio, F. Nava and S. Sciortino. High-bandgap semiconductor dosimeters for radiotherapy applications, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment, 514 (2003) 135–140.
- [19] A.Q. Hu, M. Yu, C.Z. Zhou, C. Fan, C.C. Liu, S.N. Wang, B.H. Shi, L. Qi, J.Y. Wang and Y.F. Jin. Bilateral PIN diode for fast neutron dose measurement, IEEE Transactions on Nuclear Science, 61(3) (2014) 1311–1315.
- [20] L. Panwar, H.S. Chaudhary, S.G. Vajapurkar, D. Bohra and P.K. Bhatnagar. Silicon PIN diode neutron dosimetry, Indian Journal of Pure & Applied Physics, 48 (2010) 813–816.
- [21] T.P. Ma and P.V. Dressendorfer. Ionizing Radiation Effects in MOS Devices and Circuits. John Wiley & Sons, New York, (1989) 269–272, Chapter 5.