



## طراحی، ساخت و تست یک دزیمتر برای سنجش دز یون‌ساز تجمعی با کاربرد فضایی

رضا امجدی فرد<sup>\*</sup>، فرهاد باقر اسکویی، امید شکوفا

پژوهشکده سامانه‌های ماهواره، پژوهشگاه فضایی ایران، کد پستی: ۱۹۹۷۹۹۴۳۱۳، تهران- ایران

\*Email: r.amjadifard@isrc.ac.ir

### مقاله‌ی پژوهشی

تاریخ دریافت مقاله: ۹۹/۹/۲۳ تاریخ پذیرش مقاله: ۹۹/۱۱/۱۳

### چکیده

شرایط محیطی فضا اثرات نامطلوبی بر عملکرد مدارات الکترونیکی دارد. عدم وجود سازوکار همرفت در انتقال حرارت، تأثیرات پلاسما، پرتوهای فضایی و اجرام فضایی از جمله عوامل خرابی یا کاهش عمر تجهیزات به کار گرفته شده در ماهواره‌ها هستند. در این میان پرتوهای فضایی منشأ بروز آسیب‌های متنوعی بر مواد و قطعات استفاده شده در ماهواره‌ها به‌شمار می‌روند. یکی از این آسیب‌ها "دز یون‌ساز تجمعی" است که یک اثر تدریجی بوده و به مرور زمان منجر به خرابی و کاهش کیفیت و عمر قطعات الکترونیکی می‌شود. داشتن اطلاعات دقیق از محیط پیرامونی ماهواره این امکان را فراهم می‌سازد تا با طراحی مناسب و بهینه بر عمر و قابلیت اطمینان آن افزود. دزیمترها ابزار مناسبی برای سنجش پرتوها هستند که متناسب با نوع پرتوی یون‌ساز و میزان تابش انتخاب می‌شود. در پژوهش حاضر تلاش شده است تا با توجه به محیط عملیاتی یک ماهواره، جزئیات طراحی، ساخت و تست یک دزیمتر برای سنجش دز یون‌ساز تجمعی ارائه شود. اساس کار این دزیمتر بر پایه اندازه‌گیری تغییرات افت ولتاژ ناشی از پرتوهای جذب شده بر روی یک نیمه‌هادی از نوع RadFET است. صحت عملکرد طرح فوق با ارائه نتایج شبیه‌سازی و آزمون‌های عملکردی تأیید می‌شود. پاسخ سریع، توان مصرفی کم و پایداری حرارتی مناسب، از جمله ویژگی‌های این دزیمتر است.

**کلیدواژه‌ها:** دزیمتر، دز یون‌ساز تجمعی، ماهواره، RadFET

## Design, implementation and test of a space qualified dosimeter for total ionizing dose measurement

R. Amjadifard\*, F. Bagheroskouei, O. Shekoofa

Satellite Research Institute, Iranian Space Research Center, Postal Code: 1997994313, Tehran - Iran

### Research Article

Received 13.12.2020, Accepted 1.2.2021

### Abstract

The space environment can cause severe problems for electronic circuits. The plasma, radiation, debris, and no thermal convection are some space environment-specific conditions. Space radiations are the source of several damages, such as total ionizing dose (TID). During a satellite's mission life, the TID gradually degrades the quality of the electronic components. Designing reliable equipment requires enough information about the mission environment. Some part of this information could be obtained employing dosimetry. There are several dosimeters based on the type and intensity of radiation sources. In the present work, a dosimeter has been introduced that could measure the TID for a satellite in a low earth orbit. This dosimeter uses a RadFET to measure the TID. The simulation results and implemented version of the dosimeter verify the accuracy and quality of the proposed dosimeter. The low power consumption, fast data recording, and thermal stability are some of the features of the proposed dosimeter.

**Keywords:** Dosimeter, Total ionizing dose, Satellite, RadFET



## ۱. مقدمه

پرتوهای فضایی به دلیل وجود فعالیت‌های هسته‌ای خورشیدی، ذرات باردار به دام‌افتاده اطراف زمین، پرتوهای کیهانی، انفجار ابر نواخترها و ... به وجود می‌آیند. این پرتوها در حین عبور از مواد و قطعات الکترونیکی، تأثیرات متفاوتی بر روی آن‌ها می‌گذارند. از بین تابش‌ها با ماهیت فوتونی به پرتوهای فرسوخ، فرابنفش، ایکس و گاما و از بین تابش ذره‌ای می‌توان به پروتون، الکترون، نوترون، بتا، آلفا و یون‌های سنگین اشاره نمود. تابش‌ها را می‌توان به دو دسته یون‌ساز و غیر یون‌ساز دسته‌بندی کرد. هرگاه انرژی پرتوها به گونه‌ای باشد که توانایی یون‌سازی در ماده را داشته باشند و منجر به کنده شدن الکترون از یک تراز اتمی گردند، یون‌ساز نامیده می‌شوند. پرتوهایی که چنین قابلیت ندارند، پرتوهای غیر یون‌ساز نام دارند. پرتوهای یون‌ساز را نیز می‌توان به دو دسته یون‌ساز مستقیم و یون‌ساز غیرمستقیم دسته‌بندی کرد.

علاوه بر این، پرتوهای فضایی را می‌توان با توجه به منشأ پدیدآورنده خود به سه دسته که عبارتند از کیهانی، خورشیدی و به دام افتاده<sup>۱</sup> تقسیم‌بندی نمود. پرتوهای کیهانی شامل ۸۵٪ پروتون، ۱۲٪ ذرات آلفا و ۳٪ الکترون می‌باشند. پرتوهای خورشیدی متناسب با فوران‌های آنی و فعالیت‌های دوره‌ای آن، می‌توانند از نظر نوع ذرات و انرژی آن‌ها تغییرات قابل توجهی داشته باشند. این پرتوها غالباً شامل الکترون و پروتون می‌باشد. انرژی پروتون‌های تابش‌های خورشیدی گاهی می‌تواند تا ۱ GeV هم برسد [۱]. برخی از پرتوهای کیهانی و پرتوهای حاصل از فوران‌های خورشیدی، که غالباً الکترون و پروتون هستند، در نواحی خاصی از میدان مغناطیسی زمین به نام کمربندهای ون‌آلن<sup>۲</sup> به دام می‌افتند. ذرات به دام‌افتاده عمدتاً الکترون‌های با انرژی کم‌تر از ۷ MeV (که به راحتی می‌توان در مقابل آن حفاظ‌سازی نمود) و پروتون‌های با انرژی بیش‌تر از ۱ MeV هستند [۲]. بسته به نوع ماده هدف، نوع اندرکنش و میزان تأثیر آن متفاوت خواهد بود. در دستگاه‌های الکترونیکی سه دسته آسیب بررسی می‌شود که عبارتند از آسیب جابه‌جایی<sup>۳</sup>، دز یون‌ساز تجمعی<sup>۴</sup> (یا TID) و آسیب تک‌رخداد<sup>۵</sup> [۳].

در ماموریت‌های فضایی و برای آگاهی از محیط تابشی فضا حسگرهای خاصی مورد نیاز است. برخی از این حسگرها علاوه بر شمارش تعداد ذرات قادرند نوع ذره را نیز مشخص سازند [۴]. از آن‌جا که در پاره‌ای از موارد اطلاع از اثرات تابش اهمیت

بیش‌تری دارد، از حسگری به نام دزیمتر استفاده می‌شود که می‌تواند مقدار انرژی دریافتی بر واحد جرم ماده در ماده هدف را مشخص نماید و واحد آن در SI، ژول بر کیلوگرم است که با گری (Gy) بیان می‌شود.

اثر دز یون‌ساز تجمعی در قطعات نیمه‌هادی ناشی از عبور پرتوهای یون‌ساز از داخل لایه‌های دی‌الکتریک (اکسیدها، نیتrideها و غیره) است. به عبارت دیگر در مسیر حرکت پرتوهای فوق‌انبوهی از زوج‌های الکترون و حفره ایجاد می‌شود. الکترون‌ها به دلیل قابلیت تحرک زیاد، به سرعت از ناحیه فوق‌خارج می‌شوند اما اغلب حفره‌ها در لایه اکسید باقی مانده و این منجر به تغییر خواص الکتریکی قطعه خواهد شد. این آسیب (دز یون‌ساز تجمعی) می‌تواند اثرات مختلفی بر قطعه بگذارد که از میان آن‌ها می‌توان به تغییر ولتاژ آستانه، افزایش جریان نشتی سطحی و نویز اشاره کرد [۵].

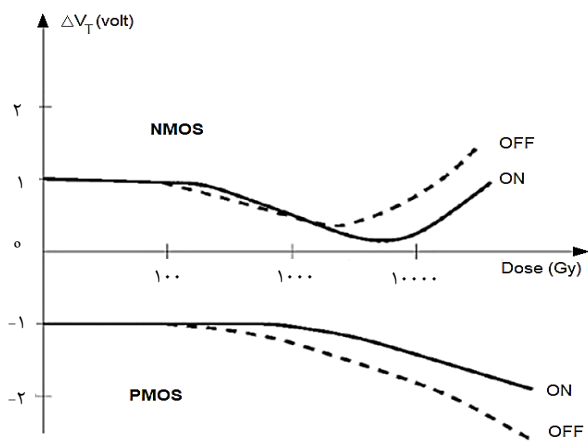
از آن‌جا که بار به دام‌افتاده از یون‌سازی مثبت است، ولتاژ آستانه ماس‌ف‌های<sup>۶</sup>  $n$  کانال کاهش می‌یابد، بدون اعمال بایاس خارجی به آن‌ها، به‌طور کامل خاموش نمی‌شوند. اما در ماس‌ف‌های  $p$  کانال طرفی، ولتاژ آستانه افزایش کرده و از این‌رو روشن شدن و درایو آن‌ها سخت‌تر می‌شوند. قابلیت تحرک حامل‌ها نیز که بر سرعت سوئیچینگ و جریان درایو سوئیچ‌ها (ماسفت‌ها) اثر مستقیم دارد، به تدریج افت می‌کند. در قطعات Bipolar، بارهای به دام‌افتاده در لایه‌های اکسید، باز ترکیب سطحی را افزایش و بهره ترانزیستورهای دوقطبی را کاهش می‌دهند. اگر چگالی ذرات به دام‌افتاده به اندازه کافی بالا باشد، یک لایه وارونگی می‌تواند در قسمت‌هایی که حامل  $P$  دارند به وجود آید که مساحت سطحی پیوند را افزایش می‌دهد. این رخداد بهره ترانزیستورها را تحت تأثیر قرار می‌دهد و می‌تواند موجب افزایش قابل توجه در جریان نشتی شود [۳، ۶].

## ۲. مبانی نظری

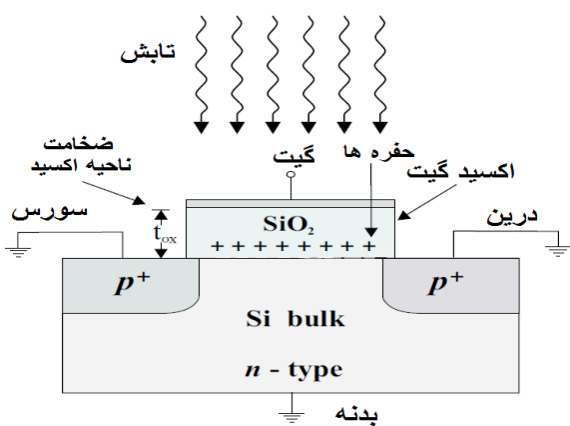
همان‌طور که پیش‌تر عنوان شد، مقدار دز دریافتی هنگام پرتوگیری وابسته به عدد اتمی ماده هدف است. در قطعات الکترونیکی، ماده غالب سیلیکون است و از این‌رو مقدار دز دریافتی برای این ماده تعریف می‌شود. بر این اساس برای سنجش و اندازه‌گیری میزان دز یک المان از جنس سیلیکون مورد نیاز است. هم‌چنین قطعه فوق باید علاوه بر تحمل محیط پرتویی، ویژگی‌های خود را حفظ نماید تا داده‌های اندازه‌گیری شده توسط آن در گذر زمان از اعتبار یکسانی برخوردار باشد. برای این منظور استفاده از ماس‌ف‌ت گزینه مناسبی است [۷-۱۰].

1. Trapped
2. Van Allen
3. Displacement Damage
4. Total Ionizing Dose
5. Single Event Effect





شکل ۱. چگونگی تغییرات ولتاژ آستانه با افزایش دز [۱۲].



شکل ۲. ساختار یک RadFET تحت تابش.

### ۳. انتخاب حسگر

محیط عملکرد دزیتر فوق، همان محیط مأموریت ماهواره یعنی مدار LEO با ارتفاع ۵۰۰ km و زاویه انحراف ۵۵ درجه با عمر ۳ سال می‌باشد. میزان تابش‌هایی که در مدت عملیات به واحد سطح می‌رسد، حدوداً برابر با ۱۰۰ krad خواهد بود؛ این میزان در درون ماهواره برابر با ۵ krad است [۱۵]. از این رو باید علاوه بر در نظر گرفتن این الزام در انتخاب حسگر، در جانمایی مناسب و حفاظت‌سازی سایر اجزای الکترونیکی مرتبط با آن نهایت دقت صورت پذیرد. همچنین در انتخاب نوع حسگر و مدارهای مرتبط باید به سایر الزامات نظیر الزامات توانی، ابعادی، وزنی، حرارتی، ارتباطی و مکانیکی توجه نمود.

از میان حسگرهای موجود، سه نوع حسگر با شماره‌های UDOS۰۰۱، RFT۳۰۰-CC۱۰G۱ و TY۱۰۰۴ کاربرد بیشتری دارند که با توجه به الزامات مشخص شده برای مأموریت فوق و در نظر گرفتن دو عامل سهولت تأمین و هزینه مناسب، در طرح پیشنهادی از حسگر TY۱۰۰۴ استفاده شده است. در شکل ۳ تصویری از این حسگر و ساختار داخلی آن نشان داده شده است.

پدیده اساسی که به‌عنوان معیاری برای اندازه‌گیری استفاده می‌شود، تغییر ولتاژ آستانه در ماس‌فت است که از رابطه زیر به دست می‌آید [۱۱]:

$$\Delta V = A \cdot D^n \quad (1)$$

که در آن  $A$  یک ضریب ثابت،  $D$  مقدار دز (Gy) و  $n$  معرف درجه خطی بودن سیستم است که وابسته به ضخامت اکسید، میدان الکتریکی و دز جذب شده می‌باشد. مطابق شکل ۱ مقدار ولتاژ آستانه در قطعات NMOS (ماس‌فت از نوع  $n$ ) با افزایش دز در ابتدا کاهش و سپس به مرور افزایش می‌یابد. اما ولتاژ آستانه در قطعات PMOS (ماس‌فت از نوع  $p$ ) با افزایش دز، همواره روندی کاهشی خواهد داشت [۱۲].

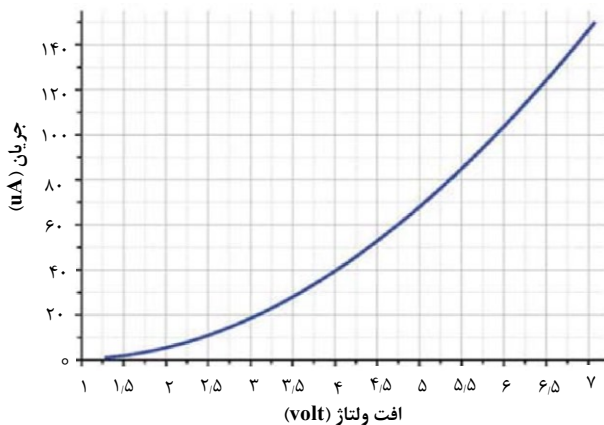
مطابق شکل فوق عملکرد PMOS در مقایسه با NMOS در دزهای زیاد یکنواخت بوده و به‌همین دلیل از این نوع ماس‌فت در غالب دزیترها استفاده می‌شود. از مزایای استفاده از PMOS به‌عنوان حسگر در مقایسه با سیستم‌های دزیتری دیگر، می‌توان به قرائت سریع، عدم محوشدگی<sup>۱</sup> (از زمان دریافت دز تا زمان قرائت آن) مقدار دز جذب شده تا لحظه اندازه‌گیری، ابعاد کوچک حسگر، بازه گسترده دز قابل اندازه‌گیری، توان مصرفی و قیمت کم و کاربرد آسان آن اشاره نمود. اما نیاز به کالیبراسیون برای میدان‌های تابشی متفاوت، حد آستانه نسبتاً بالا (شروع از ۱ rad) و عدم قابلیت استفاده مجدد از معایب این حسگر می‌باشند [۱۱].

با در نظر داشتن ویژگی‌های فوق، در اغلب دزیترها از قطعه‌ای به‌نام RadFET استفاده می‌شود. یک RadFET، ماس‌فتی از نوع  $P$  کانال و بهینه‌سازی شده با حساسیت بالا به پرتوی یون‌ساز است. در واقع با افزایش ضخامت ناحیه اکسید، حساسیت این حسگر نسبت به پرتو افزایش یافته اما از طرف دیگر در مقایسه با ماس‌فت‌های  $p$  کانال عادی، مقدار بیشینه ولتاژ آستانه کاهش می‌یابد [۱۳]. عملکرد حسگر به این صورت است که با جذب تابش در اکسید گیت و به‌دام افتادن حفره‌ها در این ناحیه، ولتاژ آستانه RadFET تغییر می‌کند. این تغییر متناسب با دز تابشی است. در شکل ۲ نمایی از یک RadFET و محل به‌دام افتادن حفره‌ها نشان داده شده است. تشخیص مقدار تغییر ولتاژ آستانه از طریق اعمال یک جریان تحریک DC (در محدوده ده‌ها میکرو آمپر) به حسگر و قرائت افت ولتاژ ناشی از آن انجام می‌شود. مقدار محوشدگی نیز در این نوع حسگرها عملاً به‌دلیل بایاس نشدن حسگر در زمان پرتوگیری، ناچیز و قابل‌صرف‌نظر کردن می‌باشد [۱۴].

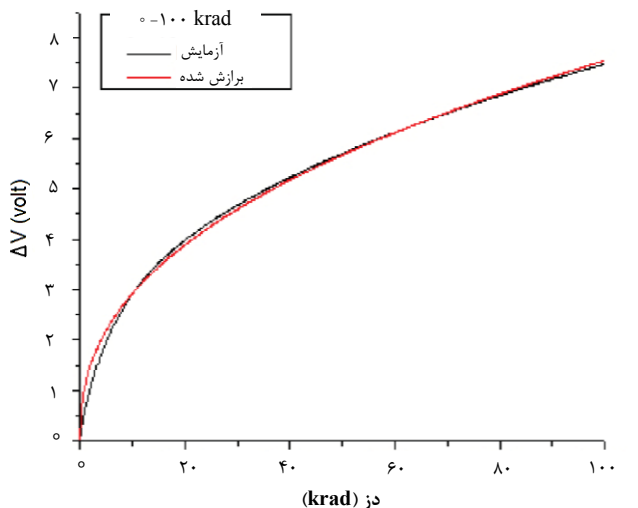
#### 1. Fading



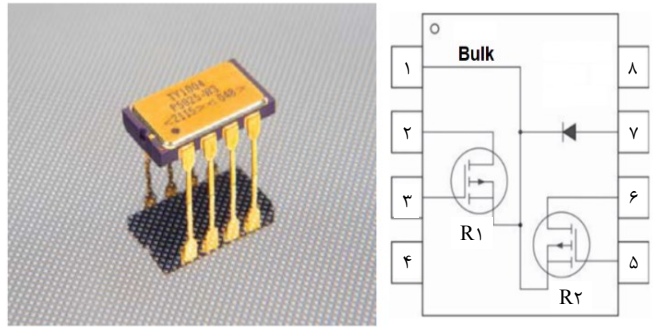
• تحمل شرایط محیط مأموریت و سابقه استفاده در فضا با بررسی مأموریت‌های مختلف فضایی، میکروکنترلر MSP430F1611 از محصولات شرکت Texas Instruments انتخاب شد. این میکروکنترلر در بسیاری از مأموریت‌های فضایی استفاده شده است. به‌طور مثال می‌توان به ماهواره Cube-Swiss اشاره نمود که از سال ۲۰۰۹ فعال می‌باشد. توان مصرفی این میکروکنترلر در حد میلی‌وات می‌باشد که یک مزیت عمده نسبت به سایر میکروکنترلرهایی است که قابلیت‌های عملکردی مشابه دارند. لازم به ذکر است که کلیه قطعات استفاده شده در دزیومتر یا مطابق با استانداردهای MIL بوده و یا نظیر میکروکنترلر انتخاب شده، دارای سابقه بلندمدت استفاده در فضا هستند.



شکل ۳. نمودار تغییرات ولتاژ آستانه ناشی از تغییر جریان تزریقی به RadFET [۱۶].



شکل ۴. نمودار تغییرات ولتاژ آستانه حسگر بر حسب دز دریافتی [۱۶].



شکل ۵. حسگر پرتو TY1004 [۱۶].

بازه حرارتی پیش‌بینی شده برای محیط عملکردی حسگر با توجه به داده‌هایی که از تحلیل‌های حرارتی حاصل شده، بین  $-40^{\circ}\text{C}$  تا  $85^{\circ}\text{C}$  در بیرون ماهواره و بین  $-15^{\circ}\text{C}$  تا  $65^{\circ}\text{C}$  در درون ماهواره می‌باشد.

مطابق برگه‌های اطلاعات فنی [۱۶]، بازه دز قابل تشخیص برای این حسگر از  $1\text{ rad}$  تا  $100\text{ krad}$  است. در شکل ۴ نمودار تغییرات ولتاژ آستانه، ناشی از تغییر جریان تزریقی به RadFET و در شکل ۵ میزان تغییرات ولتاژ آستانه حسگر بر حسب دز دریافتی نشان داده شده است.

#### ۴. ساختار و چگونگی عملکرد دزیومتر

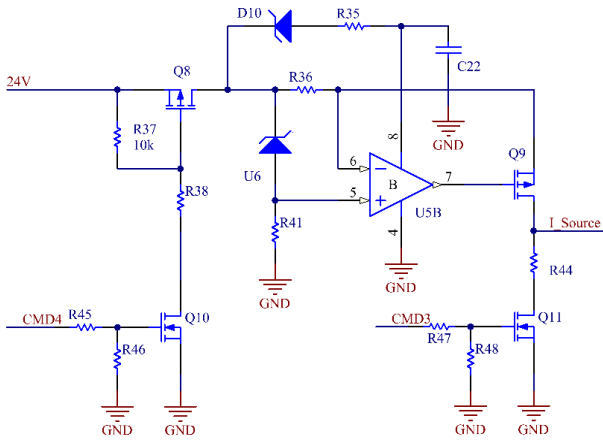
بلوک دیاگرام عملکردی یا همان زیرمدارهای دزیومتر در شکل ۶ نشان داده شده است. مطابق این شکل مهم‌ترین اجزای دزیومتر عبارتند از مدارهای تغذیه، کنترلر، منبع جریان، بار موقت، حسگرهای دما و تابش و سایر مدارهای جانبی که در ادامه جزئیات هر یک از این بخش‌ها ارائه خواهد شد.

#### ۱.۴ کنترلر

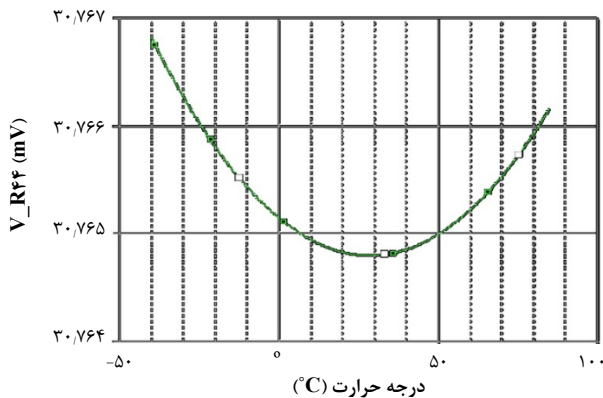
هسته اصلی دزیومتر یک میکروکنترلر است که وظیفه کنترل عملکرد سایر اجزاء، پردازش اولیه اطلاعات، ارسال اطلاعات به پردازش‌گر اصلی ماهواره و دریافت فرامین را بر عهده دارد. الزامات اساسی که در انتخاب این میکرو کنترلر لحاظ شده‌اند، عبارتند از:

- چهار عدد درگاه دیجیتال خروجی برای خاموش/ روشن کردن اجزای دزیومتر
- دو کانال آنالوگ ورودی همراه با یک مبدل آنالوگ به دیجیتال برای خواندن اطلاعات حسگرهای پرتو و دما
- یک درگاه سریال برای برقراری ارتباط با پردازش‌گر اصلی ماهواره (دریافت فرامین و ارسال اطلاعات حسگرها).
- توان مصرفی کم





شکل ۷. مدار منبع جریان و بار موقتی.

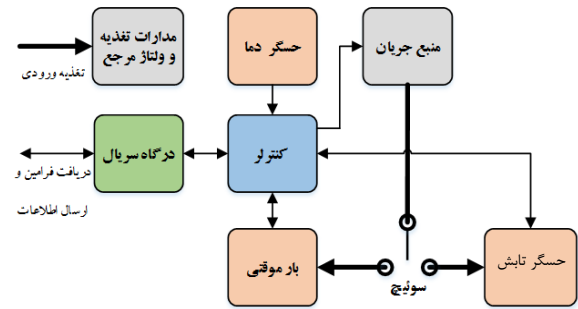


شکل ۸. نمودار تأثیر دما بر عملکرد منبع جریان، حاصل شبیه‌سازی عملکرد مدار شکل ۷.

#### ۲.۴ حسگر تابش و دما

حسگر پرتو دارای دو حالت کاری (حالت تابش که حسگر در معرض پرتوهاست و حالت قرائت دز) است. در حالت اول یا همان حالت تابش، لازم است کلیه پایه‌های حسگر به زمین متصل شوند. مادامی‌که حسگر در این حالت قرار دارد، متناسب با نوع و شدت پرتوهای ورودی، یون‌های مثبت و منفی در آن ایجاد شده و منجر به افزایش مقاومت درین-سورس در RadFET می‌گردد.

در حالت قرائت دز، لازم است جریان دقیقی از حسگر عبور داده شده و افت ولتاژ دو سر آن اندازه‌گیری شود. این افت مطابق شکل ۵ معیاری برای اندازه‌گیری دز می‌باشد. تغییر وضعیت اتصالات پایه‌های حسگر در دو حالت کاری به کمک یک رله انجام می‌شود. کنترلر پیش از هدایت جریان خروجی منبع به سمت حسگر با اعمال یک فرمان به رله، تغییر وضعیت دلخواه را ایجاد می‌کند. بدیهی است برای این‌که کلیه جریان خروجی منبع از حسگر عبور کند، باید پیش از اندازه‌گیری افت



شکل ۶. بلوک دیاگرام داخلی دزیومتر.

#### ۲.۴ منبع جریان و بار موقتی

برای سنجش مقدار افت ولتاژ آستانه حسگر باید جریانی ثابت از آن عبور داده شود. برای داشتن کم‌ترین توان تلفاتی و نیز کاهش حساسیت حسگر به دما، باید حداقل جریانی معادل  $10 \mu A$  از حسگر عبور داد. این جریان توسط یک منبع جریان مطابق شکل ۷ تأمین می‌شود. مطابق این شکل با اعمال فرمان CMD4 از سوی کنترلر، سوئیچ‌های Q8 و Q10 روشن شده و در نتیجه ولتاژ تغذیه مدار (۲۴ V) وصل می‌شود. سپس تراشه U5B جریان ثابت را در خروجی برقرار می‌کند. اما برای بسته شدن مسیر جریان و نیز اندازه‌گیری مقدار آن، یک بار به صورت موقت در مدار قرار داده می‌شود؛ به این ترتیب که کنترلر پیش از وصل نمودن ولتاژ تغذیه، فرمان CMD3 را اعمال می‌کند تا با روشن شدن سوئیچ Q11 عبور جریان از مقاومت R44 (بار موقت) ممکن شود. در این بخش تراشه‌های U5، U6 از نوع بسیار کم‌مصرف<sup>۱</sup> انتخاب شده‌اند. از آن‌جاکه افت ولتاژ حسگرهای پرتو رابطه مستقیمی با جریان عبوری از آن دارد (شکل ۴)، ضروری است تا در هر نوبت قرائت حسگرهای پرتو، مقدار خروجی منبع جریان نیز ثبت شود.

با توجه به بازه دمایی محیط مأموریت و برای اطمینان از عدم حساسیت منبع جریان به دما، مدار منبع جریان به کمک نرم‌افزار ORCAD شبیه‌سازی شد و تغییرات جریان خروجی برحسب دما مطابق شکل ۸ رسم گردید. محور عمودی در این شکل افت ولتاژ ناشی از عبور جریان منبع بر روی مقاومت R44 است. همان‌طور که در شکل ۸ مشاهده می‌شود، افت ولتاژ ناشی از این تغییرات بر روی مقاومت R44 بسیار ناچیز (در حد چند میکروولت) بوده که قابل‌صرف‌نظر کردن می‌باشد.

1. Ultra-Low Power



### ۵. ساخت، تست و صحنه‌گذاری

پس از نهایی شدن طراحی و ارزیابی نتایج شبیه‌سازی‌ها، طرح فیبر مدارچاپی و جعبه نیز مشخص شده و نسبت به تهیه قطعات و سفارش‌گذاری فیبر مدارچاپی و ساخت جعبه اقدام گردید.

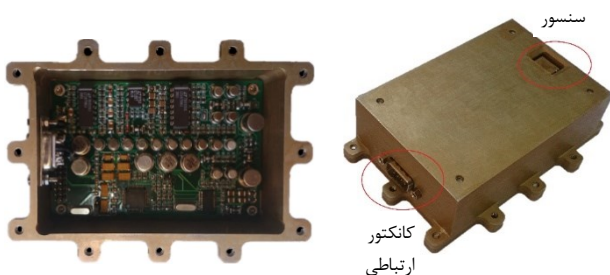
پس از مونتاژ قطعات، در مرحله راه‌اندازی، هر یک از اجزای دزیمر به‌طور مجزا تست و کالیبره می‌شوند. در شکل ۹ نمایی از درون و بیرون محصول نهایی نشان داده شده است. ابعاد دزیمر با احتساب فلنچ‌ها برابر  $27 \times 90 \times 126$  mm<sup>۳</sup> می‌باشد. جرم محصول نهایی شامل برد الکترونیکی و جعبه برابر ۲۹۴ g است.

جعبه دزیمر از جنس آلومینیوم می‌باشد. حسگر تابش زیر فیبر مدار چاپی و به‌گونه‌ای مونتاژ شده است که از روزه‌ای خاص بیش‌ترین مقدار پرتو را دریافت کند. ضخامت جعبه مطابق با الزامات تعیین شده برای تحمل شوک‌ها و ارتعاشات زمان پرتاب ماهواره در حدود ۲ mm در نظر گرفته شده است. با انجام شبیه‌سازی توسط نرم‌افزار تحت وب SPENVIS، مشخص می‌شود که مقدار دز در درون جعبه به مقداری کم‌تر از ۱۰ krad کاهش خواهد یافت. این مقدار دز مطابق با استاندارد ECSS-E-HB-۱۰-۱۲A قابل قبول می‌باشد [۱۸].

#### ۱.۵ تست منبع جریان

با وجود کالیبراسیون زیر مدارها، به‌دلیل حیاتی بودن عملکرد منبع جریان، آزمونی خاص در نظر گرفته شد تا در صورت هرگونه فاصله گرفتن جریان خروجی از مقدار نامی، بتوان نسبت به ارزیابی و اعتباردهی به اطلاعات دریافتی از ماهواره اقدام نمود. از این‌رو مطابق شکل ۱۰ تغییرات افت ولتاژ دو سر حسگر به‌ازای تغییرات جریان خروجی منبع ثبت گردید تا در صورت نیاز، مورد استفاده قرار گیرد. بیان ریاضی منحنی شکل ۱۰ مطابق رابطه زیر به‌دست می‌آید (با ضریب رگرسیون ۰/۹۹۷۷):

$$I = 1,5 \times 10^{-6} \times V^{2,55} \quad (2)$$



شکل ۹. نمایی از برد دزیمری (داخل و بیرون جعبه).

ولتاژ دو سر حسگر، بار موقتی از مدار خارج شود. لازم به ذکر است که ولتاژ خروجی حسگر ابتدا توسط مدارهای تقویت‌کننده به سطح ولتاژ قابل قبول برای کنترلر رسیده و سپس توسط یک مبدل آنالوگ به دیجیتال، که درون کنترلر قرار دارد، قرائت می‌گردد. با توجه به این‌که مبدل فوق ۱۲ بیتی می‌باشد، دقت دزیمر در محدوده خطی از شکل ۵ ( $5 \text{ krad}$ ) تا  $30 \text{ krad}$  در حدود  $40 \text{ rad}$  و در ابتدای کار آن (محدوده صفر تا  $4 \text{ krad}$ ) در حدود  $6 \text{ rad}$  می‌باشد. در انتها و پس از اتمام اندازه‌گیری‌ها با روندی معکوس، مجدداً کنترلر حسگر را در حالت تابش قرار داده و منبع جریان را خاموش می‌کند.

به‌منظور انجام برخی پردازش‌های ضروری، علاوه بر افت ولتاژ دو سر حسگر، مقدار خروجی منبع جریان و نیز دمای حسگر اندازه‌گیری و ثبت می‌شوند. حسگر دما از نوع AD۵۹۰ انتخاب شده است که علاوه بر مصرف ناچیز با توجه به ماهیت جریانی بودن خروجی آن، تأثیرپذیری کمی نسبت به نویز دارد.

#### ۴.۴ درگاه سریال و سایر مدارهای تغذیه

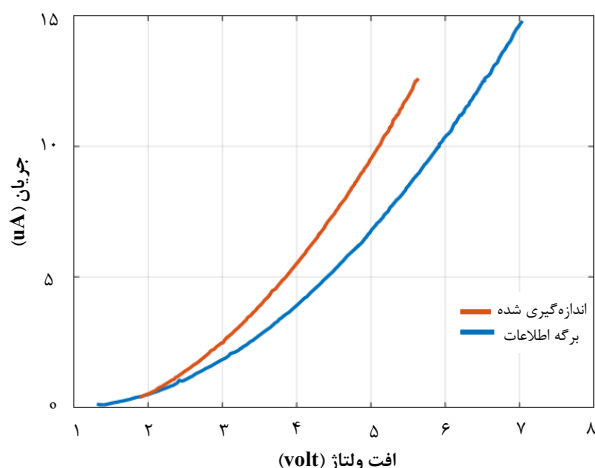
یک درگاه سریال به‌منظور ایجاد ارتباط دزیمر با پردازش‌گر مرکزی ماهواره در نظر گرفته شده است. پردازش‌گر مرکزی ماهواره در زمان‌های موردنظر، تغذیه دزیمر را وصل کرده و آن را روشن می‌کند و سپس با تأخیری مشخص، فرمانی مبنی بر ارسال اطلاعات را از طریق درگاه سریال به دزیمر می‌دهد. از آن سو، با روشن شدن دزیمر، کنترلر مقادیر افت ولتاژ دو سر حسگر، دما و مقدار جریان خروجی منبع را ثبت کرده و منتظر دریافت فرمان از سوی پردازش‌گر مرکزی ماهواره خواهد ماند. کنترلر به محض دریافت فرمان، اطلاعات فوق را به پردازش‌گر اصلی ماهواره ارسال می‌کند. این اطلاعات همراه با اطلاعات مربوط به زمان قرائت، برای پردازش‌های تکمیلی به ایستگاه زمینی ارسال می‌شوند.

بخش تغذیه شامل مدارهایی است که سطوح مختلف ولتاژ موردنیاز اجزای ماهواره و نیز ولتاژهای مرجع دقیق برای مبدل آنالوگ به دیجیتال و حسگر دما را تأمین می‌کند. در این بخش یک مدار حفاظتی در برابر اضافه جریان به‌منظور حفاظت در برابر پدیده قفل‌شدگی<sup>۱</sup> در نظر گرفته شده است. این پدیده که ناشی از محیط تابش‌های فضایی می‌باشد، منجر به بروز اتصال کوتاه در قطعات نیمه‌هادی می‌شود که در صورت عدم استفاده از حفاظت‌های مناسب، در نهایت منجر به از کار افتادن تجهیزات خواهد شد [۱۷].

#### 1. Latch-Up



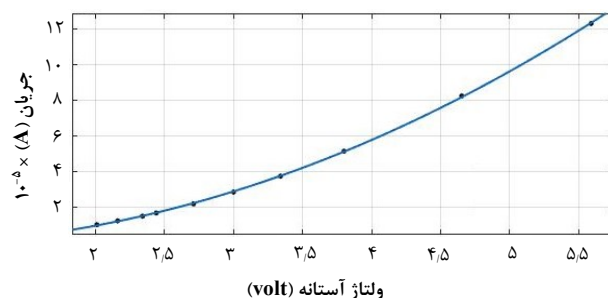
(۰،۹۹۵) [۲۲]. مطابق برگه‌های اطلاعات فنی حسگر، در صورت جذب  $100 \text{ krad}$  در حسگر، تغییراتی برابر با  $6/5 \text{ V}$  در ولتاژ آستانه آن خواهد شد. در این آزمون حسگر در شانزده مرحله تحت تابش قرار گرفته است. گام‌های تابش در دزهای کم به هم نزدیک‌تر بوده و در دزهای زیاد با فاصله بیش‌تری انتخاب شده‌اند (به دلیل نمایی بودن شکل سیگنال خروجی حسگر). در جدول ۱ نتایج این آزمون ارائه شده است.



شکل ۱۱. مقایسه داده‌های آزمون و برگه‌های اطلاعات فنی حسگر.

جدول ۱. نتایج آزمون پرتودهی در مرکز تابش گامای سازمان انرژی اتمی

ولتاژ آستانه (V)	تغییرات ولتاژ آستانه (V)	دز یون‌ساز تجمعی (krad)
۲،۶۷	۰،۶۷	۱
۳،۴۹	۱،۴۹	۳
۴،۷۲	۲،۷۲	۶
۴،۸۸	۲،۸۸	۹
۴،۹	۲،۹۱	۱۲
۵،۴۳	۳،۴۳	۱۶
۶،۰۲	۴،۰۲	۲۰
۶،۵۴	۴،۵۴	۳۰
۶،۹۸	۴،۹۸	۴۰
۷،۴۷	۵،۴۷	۵۰
۷،۷	۵،۷	۶۰
۸،۲۳	۶،۲۳	۷۰
۸،۴۵	۶،۴۵	۸۰
۹،۶	۷،۶	۹۰
۹،۷	۷،۷	۱۰۰
۹،۸	۷،۸	۱۲۰



شکل ۱۰. نمودار تغییر ولتاژ آستانه RadFET برحسب تغییرات جریان تزریقی به آن.

داده‌های شکل ۱۰ با آن‌چه در شکل ۴ از برگه‌های اطلاعات فنی حسگر ارائه شده، اندکی تفاوت دارد. همین تفاوت، اهمیت اجرای این آزمون و ثبت نتایج را به‌منظور کالیبره نمودن دزیومتر روشن می‌سازد. برای مقایسه بهتر، این دو منحنی در شکل ۱۱ مجدداً ترسیم شده‌اند.

#### ۲.۵ آزمون حسگر تابش

هدف اصلی از ساخت دزیومتر، سنجش دز یون‌ساز تجمعی است و از این رو باید دزیومتر به‌نحوی تحت تابش قرار گرفته و عملکرد آن ارزیابی شود. بدیهی است این آزمون مخرب بوده و حسگر تحت تابش دیگر کاربردی نخواهد داشت.

چشمه تابشی مورد استفاده طبق استاندارد فضایی اروپا و استاندارد MIL می‌تواند کبالت  $60$  باشد [۱۹، ۲۰]. این ایزوتوپ از کبالت، دو پرتوی گاما با انرژی‌های  $1.33 \text{ MeV}$  و  $1.17 \text{ MeV}$  گسیل می‌کند [۲۱]. دز یون‌ساز تجمعی ناشی از این پرتوها در قطعات الکترونیکی، معادل دز ناشی از پرتوهای فضایی بوده و لذا امکان ارزیابی دزیومتر به کمک چشمه فوق وجود دارد [۱۹، ۲۰]. بر همین اساس و برای اطمینان خاطر بیش‌تر، دو مرکز پرتودهی که از چشمه فوق استفاده می‌کنند به‌منظور اجرای آزمون فوق انتخاب شدند؛ در ادامه به روند اجرای آزمون در هر مرکز اشاره شده است.

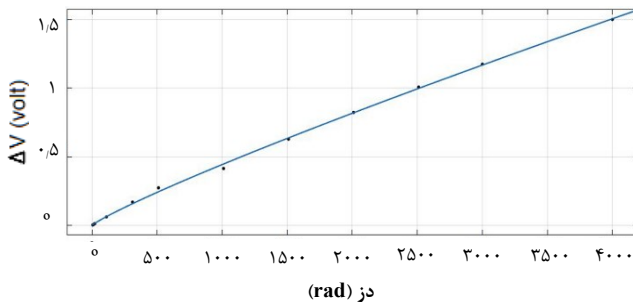
#### ۱.۲.۵ اجرای آزمون در مرکز تابش گاما- سازمان انرژی اتمی ایران

در این مرکز حسگر توسط یک بالابر به نزدیکی چشمه منتقل شده و متناسب با زمان حضور حسگر در کنار چشمه، مقدار پرتوی موردنظر به آن تابیده خواهد شد. لازم به ذکر است که تبدیل دز در هوا به دز در ماده (در قطعات الکترونیک ماده اصلی سیلیکون در نظر گرفته می‌شود) با یک ضریب تصحیح انجام می‌شود. این ضریب تصحیح بسیار نزدیک به یک است



جدول ۲. نتایج آزمون تابشی در آزمایشگاه پارس ایزوتوپ

ولتاژ آستانه (V)	تغییرات ولتاژ آستانه (V)	دز یون ساز تجمعی (krad)
۲,۱۰۲۲۹۹		
۲,۱۰۴۷۴۷	۰,۰۰۲۴۴۹	۰,۰۰۵
۲,۱۰۸۴۲۱	۰,۰۰۶۱۲۲	۰,۰۱
۲,۱۱۴۵۴۳	۰,۰۱۲۲۴۴	۰,۰۲
۲,۱۶۳۵۱۹	۰,۰۶۱۲۲۰	۰,۱۱
۲,۲۷۱۲۶۶	۰,۱۰۸۷۴۷	۰,۳۱
۲,۳۷۵۳۴۰	۰,۱۰۴۰۹۳	۰,۵۱
۲,۵۱۶۱۴۷	۰,۱۴۱۳۴۸	۱,۰۱
۲,۷۳۰۴۱۷	۰,۲۱۴۲۷۰	۱,۵۱
۲,۹۲۵۰۹۷	۰,۱۹۴۶۸۰	۲,۱۱
۳,۱۰۹۹۸۲	۰,۱۸۴۸۸۵	۲,۵۱
۳,۳۰۶۱۹۷	۰,۱۹۶۲۱۵	۳
۳,۶۰۳۴۱۶	۰,۲۹۷۲۱۹	۴



شکل ۱۳. منحنی تغییرات ولتاژ خروجی حسگر بر حسب مقدار دز (پارس ایزوتوپ).

این منحنی در مقایسه با شکل ۱۲ در دزهای کم انطباق بیشتری با شکل ۵ دارد. از این رو باید هنگام پردازش داده‌های دریافتی از ماهواره به این نکته توجه داشت. به عبارت دیگر برای ولتاژهای اندازه‌گیری شده که کم‌تر از ۱,۵ V باشند، باید از رابطه ۴ و برای ولتاژهای بزرگ‌تر از آن باید از رابطه ۳ برای محاسبه دز استفاده نمود.

یکی از مزیت‌های دزیمتر پیشنهادی توان مصرفی بسیار ناچیز آن است. با وجود زیاد بودن سطح ولتاژ منبع ورودی (۲۴ تا ۳۲ V) توان مصرفی دزیمتر هنگام کارکرد کم‌تر از ۲۰۰ mW می‌باشد. دلیل این مزیت در وحله اول انتخاب قطعات کم‌مصرف و از آن مهم‌تر استفاده از یک شبکه سوئیچ و رله می‌باشد که با استفاده از آن دیگر نیازی به روشن بودن دستگاه حین پرتوگیری نیست. به عبارت دیگر می‌توان این دزیمتر را به دلخواه و با فاصله زمانی زیاد (به‌طور مثال هر روز یک‌بار) روشن کرده و پس از اندازه‌گیری مقدار دز (این اندازه‌گیری در کم‌تر از یک دقیقه قابل انجام است) مجدداً آن را

نمودار تغییرات ولتاژ آستانه بر حسب میزان دز با استفاده از جعبه‌ابزار برازش منحنی در نرم‌افزار متلب مطابق شکل ۱۲ رسم شده است.

منحنی فوق را می‌توان در قالب رابطه ۳ بیان نمود. ضریب رگرسیون برای رابطه به دست آمده برابر ۰,۹۸۸ می‌باشد.

$$\Delta V = 0.06212 \times D^{0.4146} \quad (3)$$

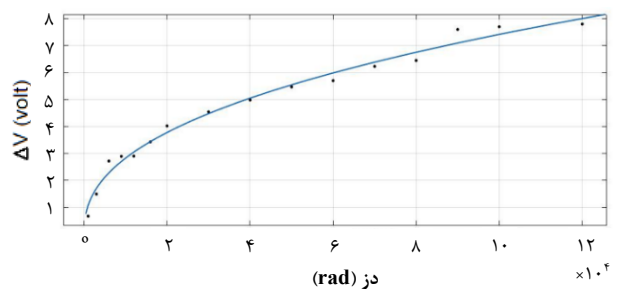
### ۲.۲.۵ اجرای آزمون در آزمایشگاه پارس ایزوتوپ

با توجه به احتمال قرارگیری ماژول دزیمتری درون سازه اصلی ماهواره (به‌منظور کسب اطلاعات از شرایط قطعات درون ماهواره) و با توجه به این که مقدار بیشینه دز رسیده به درون ماهواره در حدود ۵ krad می‌باشد [۱۵]، بررسی دقیق تغییرات ولتاژ آستانه بر حسب دز جذب شده در محدوده صفر تا ۵ krad ضروری است. با توجه به محدودیت تجهیزات مستقر در مرکز تابش گاما برای پرتودهی‌هایی با دقت و مقادیر کم، چند آزمون تکراری در آزمایشگاه پارس ایزوتوپ انجام شد که نتایج آن در ادامه آمده است.

در این آزمون حسگر در دوازده مرحله تحت تابش قرار گرفته است به‌گونه‌ای که گام‌های تابش در دزهای پایین به هم نزدیک‌تر بوده و در دزهای بالا فاصله بیشتری از دارند. در جدول ۲ میزان دز تجمعی، افت ولتاژ روی حسگر و تغییرات آن ارائه شده است.

نمودار تغییرات ولتاژ آستانه بر حسب دز جذب شده با استفاده از جعبه‌ابزار برازش منحنی در نرم‌افزار متلب برای داده‌های جدول ۲ در شکل ۱۳ گزارش شده است. برای این منحنی نیز رابطه ۴ قابل‌استفاده است (ضریب رگرسیون برای رابطه به دست آمده برابر ۰,۹۹۹۳ است).

$$\Delta V = 0.009988 \times D^{0.8823} \quad (4)$$



شکل ۱۴. منحنی تغییرات ولتاژ خروجی حسگر بر حسب مقدار دز (مرکز تابش گاما).





7. R.E. Sharp, *Using RADFETs for alpha radiation dosimetry*, in: Proceedings of the 12th Conference on Radiation and Its Effects on Components and Systems (RADECS), [Sevilla, Spain](#) (2011).
8. M. Meguellati, et al, *RADFET dosimeter design for environment monitoring applications*, in: Proceedings of the 24th International Conference on Microelectronics (ICM), [Algiers, Algeria](#) (2012).
9. S.J. Kim, K.W. Min, D. Ko, *Use of a MOSFET for Radiation Monitoring in Space and Comparison with the NASA Trapped Particle Model*, [Journal of the Korean Physical Society](#), **48(4)**, 865 (2006).
10. F. Ravotti, *Response of RadFET Dosimeters to High Flouces of Fast Neutrons*, [IEEE Transactions on Nuclear Science](#), **52(4)**, (2005).
11. M.M. Pejovic, *P-Channel Mosfet as a Sensor and Dosimeter of Ionizing Radiation*, [Electronics and Energetics](#), **29(4)**, 509 (2016).
12. L. Ratti, *Ionizing Radiation Effects in Electronic Devices and Circuits*, [INFN Laboratori Nazionali di Lgnaro, Legnaro](#), (2013).
13. G. Spiezia, et al., *The LHC radiation monitoring system—RadMon*, [Procedings of Science](#), **1** (2011).
14. A. Holmes-Siedle, L. Adams, *The Mechanisms of Small Instabilities in irradiated Mos Ransistors*, [IEEE Transactions on Nuclear Science](#), **30(6)**, 4135 (1983).
15. D. Burlyaev, *M.Sc Thesis*, [Delft University of Technology](#), (2012).
16. Technical Data, *TY1004 400nm RADFET in 8L Side Braze Ceramic Package*, [Tyndall National Institute](#).
17. R. Amjadifard, M. Taherbaneh, *Space radiation effects on spacecraft and Latch-up mitigation methods*, [6th Conference of Iranian Aerospace society](#), [K.N. Toosi University of Technology](#) (2007), (In Persian).
18. ECSS-E-HB-10-12A, *Calculation of radiation and its effects and margin policy handbook*, [European Cooperation for Space Standardization](#), (2010).
19. European Space Components Coordination (ESCC), *Total dose Steady-State Irradiation Test Method*, [ESCC Basic Specification](#), No. 22900, (5), (2016).
20. MIL-STD-883E, *Test Method Standard Microcircuits*, (1996).
21. D. Herve, M. Beaume, D.V. Aken, *Cobalt-60, proton and electron irradiation of a radiation-hardened active pixel sensor*, in: Proceeding of the European Conference on Radiation and Its Effects on Components and Systems, [Bruges, Belgium](#), **535** (2009).
22. J.H. Hubbell, S.M. Seltzer, *Tables of X-Ray Mass Attenuation, Coefficients and Mass Energy Absorption, Coefficients 1 keV to 20 MeV for Elements Z = 1 to 92 and 48 Additional Substances of Dosimetric Interest*, ([NIST publication](#), 1995).

خاموش نمود. با این ترند متوسط توان مصرفی آن در بودجه‌های توانی ماهواره قابل چشم‌پوشی است. علاوه بر این، استفاده از قطعات نظامی/فضایی و نیز قطعاتی که سابقه استفاده طولانی مدت در فضا را دارند از دیگر ویژگی‌های این محصول است که قابلیت اطمینان آن را افزوده است.

#### ۶. نتیجه‌گیری

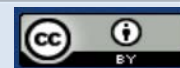
در این مقاله روند طراحی و ساخت یک نمونه دزیمر به منظور اندازه‌گیری دز یون‌ساز جمعی با قابلیت استفاده در فضا ارایه شد. به منظور اطمینان از عملکرد دزیمر فوق، علاوه بر شبیه‌سازی عملکرد مدارهای الکترونیکی، چندین آزمون عملکردی و تابشی طراحی و انجام شده است. نتایج حاصل از اجرای آزمون‌های فوق نشان‌دهنده عملکرد مناسب آن می‌باشد. دقت اندازه‌گیری برای این دزیمر حداقل ۶ rad بوده و بیشینه مقدار قابل‌اندازه‌گیری برابر ۱۰۰ krad است. پایداری حرارتی نیز یکی از ویژگی‌های این دزیمر است که ناشی از عملکرد مناسب منبع جریان به‌کار گرفته شده می‌باشد. اما مهم‌ترین ویژگی این دزیمر توان مصرفی کم آن به دلیل عدم نیاز به روشن بودن دستگاه حین پرتوگیری است. بر این اساس توان متوسط مصرفی دستگاه به‌شدت کاهش یافته و لذا در بودجه‌های توانی ماهواره قابل‌صرف‌نظر کردن می‌باشد. همین ویژگی استفاده از آن را در هر پروژه فضایی به‌راحتی ممکن می‌سازد.

#### مراجع

1. M.R. Patel, *SPACECRAFT POWER SYSTEMS*, ([CRC PRESS](#), New York, 2005).
2. E.G. Stassinopoulos, K.A. LaBel, *The Near-Earth Space Radiation Environment for Electronics*, [Boletin Informativo Space Magazine](#), **6**, (2004).
3. R.H. Maurer, et al, *Harsh Environments: Space Radiation Environment, Effects, and Mitigation*, [Johns Hopkins APL Technical Digest](#), **28(1)**, (2008).
4. C. Granja, et al, *The SATRAM Timepix spacecraft payload in open space on board the Proba-V satellite for wide range radiation monitoring in LEO orbit*, [Planetary and Space Science](#), **125**, 114 (2016).
5. P.V. Dressendorfer, *Basic mechanisms for the New Millennium*, in: Proceedings of the IEEE Nuclear and Space Radiation Effects Conference, [Short Course, Session III](#), (1998).
6. A. Holmes-Siedle, L. Adams, *Handbook of Radiation Effects*, 2th (London, [Oxford University Press](#), 2007).

#### COPYRIGHTS

©2021 The author(s). This is an open access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution (CC BY 4.0), which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, as long as the original authors and source are cited. No permission is required from the authors or the publishers.



#### استناد به این مقاله

رضا امجدی فرد، فرهاد باقر اسکویی، امید شکوفا (۱۴۰۱)، طراحی، ساخت و تست یک دزیمر برای سنجش دز یون‌ساز جمعی با کاربرد فضایی، ۹۹، ۹-۱

**DOR:** 20.1001.1.17351871.1401.43.1.1.4

**Url:** [https://jonsat.nstri.ir/article\\_1343.html](https://jonsat.nstri.ir/article_1343.html)

