



عملکرد تجهیزات سیستم‌های میکروالکترومکانیکی در فضا

ستار محمدی اسفراجانی، مجتبی کلاه‌دوزان، مهدی صالحی

گروه مهندسی مکانیک، واحد نجف آباد، دانشگاه آزاد اسلامی، نجف آباد، ایران

Email: satar.iran@gmail.com

تأثیر گذار، تأثیر پرتوهای کیهانی موجود در فضای اطراف زمین است. این مقاله مروری بر تحقیقات معدود پژوهشگرانی است که به امکانات آزمایشگاهی و به تحقیقات فضایی دسترسی داشته‌اند. در این مرور تلاش گردیده است تا ضمن معرفی مکانیزم و نوع آسیب‌های متداول حاصل از پرتوها، فاکتورهای تأثیر گذار بر حساسیت یک دستگاه به تابش پرتوها نیز بررسی شود.

واژه های کلیدی: فضا، پرتوهای کیهانی، سیستم‌های میکروالکترومکانیکی، سیلیکون

خصوص در مورد ماهواره‌های کوچکتر که دارای حفاظت کمتری هستند لازم می‌سازد [۲].

پرتوها در فضا، ناشی از الکترون‌های به دام افتاده، پرتون‌های خورشیدی، پرتوهای کیهانی^۵ و... می‌باشند. انواع اصلی از پرتو که در نزدیکی زمین با آن مواجه هستیم، عبارتند از: [۳]

پرتوهای به دام افتاده: الکترون^۷ و پروتون^۸ پرانرژی که در اطراف زمین (کمربند وان آلن^۹) گیر افتاده است. میزان انرژی الکترون تا چند مگا ولت و پروتون تا چند صد مگا ولت می‌باشد.

ذرات پرانرژی خورشیدی: عمدتاً پروتون بسیار پرانرژی، تا ۳۰۰ مگا ولت می‌باشد. (شدت تا حد زیادی نسبت به زمان تغییر می‌کند)، همچنین تابش فرابنفش^{۱۰} و اشعه ایکس^{۱۱} به طور پیوسته توسط پرتوهای کیهانی خورشیدی تولید می‌شوند.

پرتوهای کیهانی بزرگ: ذرات بسیار پرانرژی (از ۱ مگا ولت تا ۱ گیگا ولت)، عمدتاً پروتون، ذرات آلفا^{۱۲} و همچنین شامل یون‌های سنگین می‌باشد.

سیلیکون^{۱۳} به دلیل مزایای فراوان از قبیل: اکسیداسیون سطح در دمای بالا، نقطه ذوب بالا و... از عمده موادی است که در

چکیده: تلاش امروز بشر برای دستیابی به سیاره های دورتر از زمین، با محدودیت‌هایی از قبیل تأمین سوخت و انرژی و ابعاد فضا پیماها رو به رو است. با توجه به مزایای فراوان دستگاه های سیستم‌های میکروالکترومکانیکی، از قبیل وزن و سایز کوچک و سطح انرژی کم، استفاده از این دستگاه ها در مأموریت های فضایی دارای جذابیت بسیاری است. لذا با توجه به گسترش و نیاز به استفاده از دستگاه های سیستم‌های میکروالکترومکانیکی در زمینه‌های متفاوت، نیاز است تا کلیه عواملی که بر عملکرد این دستگاه ها تأثیر گذارند، بررسی شوند. یکی از این عوامل

۱- مقدمه:

ترکیب وزن و مصرف نیروی کم، حجم کوچک و امکان یکپارچه سازی با کنترل و حسگرهای الکترونیک، دستگاه های سیستم‌های میکروالکترومکانیکی^۱ را برای برنامه های کاربردی فضا ایده‌آل می‌سازد. با پیشرفت تکنولوژی، تجهیزات سیستم های میکروالکترومکانیکی به ما این امکان را می‌دهد تا با ساخت سیستم‌هایی با اندازه و وزن کوچکتر، مانند انواع حسگرها، سوئیچ‌های میکروالکترومکانیکی^۲ و...، امکان ساخت ماهواره های کوچکتر و ارزان تر و هوشمندتر فراهم شود. از نمونه‌های تجهیزات سیستم‌های میکروالکترومکانیکی که در صنعت فضایی مورد استفاده قرار می‌گیرند، می‌توان به شتاب سنج^۳ و یا ژيروسکوپ میکرونی^۴ و... اشاره نمود [۲ و ۱]. امروزه در طراحی تجهیزات سیستم‌های میکروالکترومکانیکی که کاربردهای حساس و با ایمنی بالا دارند، حداکثر دقت رعایت می‌شود. اما وقتی دستگاه بخواهد در فضا مورد استفاده قرار گیرد، به دلیل شوک های حرارتی و مکانیکی و لرزش‌ها در طی مسیری که فضا پیما طی می‌کند و حتی محیط خلاءای که در آن قرار می‌گیرد، لزوم دقت در طراحی و در نظر گرفتن عوامل بیشتر را، به

⁵ Cosmic microwave background radiation

⁶ Trapped electrons

⁷ Electron

⁸ Proton

⁹ Van Allen Radiation Belt

¹⁰ Ultraviolet (UV)

¹¹ X-rays

¹² Alpha particle

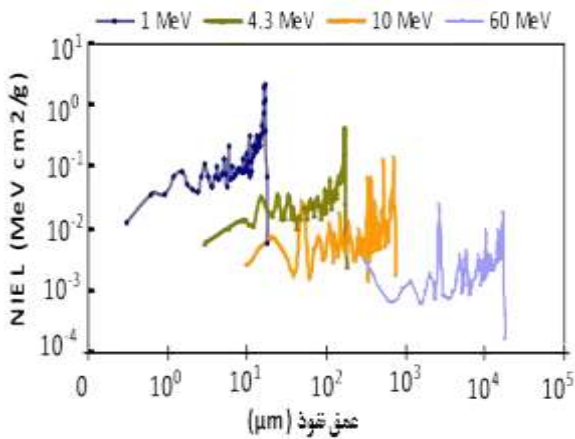
¹³ Silicon

¹ Micro-Electro-Mechanical Systems (MEMS)

² MEMS switch

³ Accelerometer

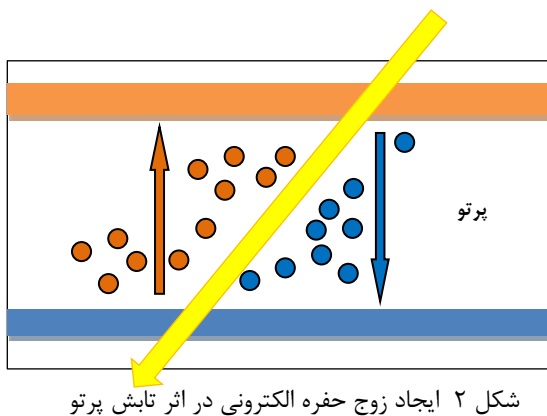
⁴ Micro-machined gyroscopes



شکل ۱ بررسی رابطه اثر از دست دادن انرژی غیر یونیزان (NIEL) و نفوذ پرتو پروتون در سیلیکون [۵]

۲-۱-۲- یونیزاسیون

بیشتر انرژی از دست رفته از عکس العمل تابش به یک جذب کننده در نهایت تبدیل به زوج حفره الکترونی^{۲۰} می‌شود (شکل ۲). انرژی مورد نیاز تنها ۱۸ ولت برای اکسید سیلیکون (SiO_2) می‌باشد. الکترونها و حفره‌ها دارای تحرک بسیار متفاوت می‌باشند. الکترونها و حفره‌ها، قابلیت رسانایی نمونه، (حتی عایق کننده‌ها^{۲۱}) را افزایش می‌دهند. حفره‌ها می‌توانند تبدیل به تله‌های به دام افتاده در عایق کننده‌های اکسیژن-سیلیکون (SiO_x)، نیتريد-سیلیکون (SiN_x) شوند که منجر به تخریب جدی دستگاه‌های سیستم‌های میکرو الکترومکانیکی شوند. افزایش انرژی یونیزان، منجر به تجمع نقص فعال الکتریکی می‌شود، زیرا میدان الکتریکی تمایل دارد که الکترونها و حفره‌ها را حرکت دهد و نتیجه آن، تغییر در اثر پرتوهای یونیزان بر روی دستگاه است [۱، ۵ و ۷].



شکل ۲ ایجاد زوج حفره الکترونی در اثر تابش پرتو

ساختار تجهیزات سیستم‌های میکرو الکترومکانیکی به کار می‌رود. در این مقاله، تلاش شده تا تأثیرات پرتوها بر عملکرد سیلیکون هم با توجه به کاربرد فراوان آن در تجهیزات سیستم‌های میکروالکترومکانیکی بررسی شود. لازم است به این نکته هم اشاره کرد که با توجه به طیف گسترده‌ای از مواد، فن-آوری‌ها و کاربردهای زیاد دستگاه‌های سیستم‌های میکرو-الکترومکانیکی، هیچ روش آزمون استاندارد برای اثر تابش بر سیستم‌های میکروالکترومکانیکی وجود ندارد، هر چند تعدادی روش به این منظور پیشنهاد شده است [۵ و ۶].

۲. آثار پرتوهای کیهانی بر مواد

۲-۱- فرآیندهای تخریب

ذرات پر انرژی و فوتون‌ها^{۱۴} با انتقال انرژی به مواد و نفوذ در آنها باعث آسیب می‌شوند. سازوکار^{۱۵} از دست دادن انرژی پیچیده است، اما نوع آسیب ایجاد شده را می‌توان با توجه به پیامدها، به دو نوع جابجایی اتمی و یونیزاسیون^{۱۶}، طبقه بندی کرد.

۲-۱-۱- از دست دادن انرژی غیر یونیزان^{۱۷}

قسمتی از انرژی انتقال یافته از ذرات پر انرژی و یا حتی از فوتون‌ها به هدف، نتیجه انتقال شدت حرکت هسته اتم است، که می‌تواند به این دلیل باشد که اتم‌ها از موقعیت اولیه به سمت جاهای خالی و یا به مناطق معیوب در شبکه می‌روند. فرآیند جابجایی اتمی را به عنوان "آسیب عمده"^{۱۸} نامیده می‌شود. حتی فوتون با انرژی کافی، می‌تواند منجر به از دست دادن این انرژی غیر یونیزه یا آسیب جابجایی^{۱۹} شود. آسیب جابجایی دارای تعداد نتایج زیادی است. مهمترین آنها برای دستگاه‌های الکترونیکی کاهش طول عمر فرستنده‌های کوچک، کاهش قابلیت حرکت فرستنده‌ها، و... است [۱، ۴ و ۵].

در یک پژوهش که توسط خوزه گومز و رابرت شی [۵]، بر روی تأثیر تابش پروتون بر روی سیلیکون انجام گرفت، مشخص شد که هرچه میزان قدرت پرتو نوترون کم باشد، نفوذ کمتر و اثر از دست دادن انرژی غیر یونیزان بیشتر می‌شود، بالعکس، با زیاد شدن میزان شدت تابش، نفوذ بیشتر و کاهش اثر از دست دادن پرتو غیر یونیزان ایجاد خواهد گشت. (شکل ۱)

¹⁴ Photon

¹⁵ Mechanism

¹⁶ Ionizing

¹⁷ Non-Ionizing Energy Loss (NIEL)

¹⁸ Bulk Damage

¹⁹ Displacement damage

²⁰ Electron-Hole Pair (EHP)

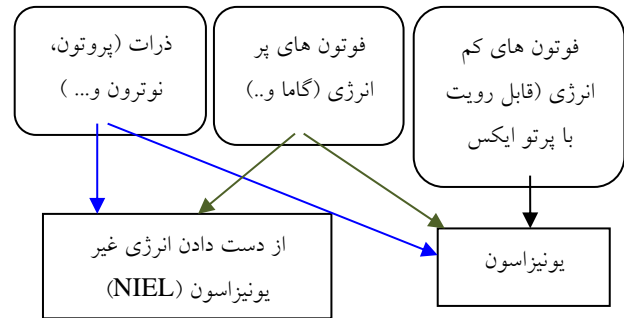
²¹ Insulators

۲-۲. پیامدهای تخریب

۲-۲-۲- نیمه هادی ها

آسیب جابجایی، منجر به تغییرات الکتریکی و مکانیکی می‌شود. تغییرات الکتریکی به علت تغییر در طول عمر حامل‌های کوچک و تمرکز، می‌تواند اثر مهمی بر روی اتصال‌های یک نیمه‌رسانای مثبت با یک نیمه‌رسانای منفی^{۲۲} (اتصالات P-N) (یکسو کننده ها)^{۲۳}، ترانزیستور پیوندی دوقطبی^{۲۴} و همچنین سلول های خورشیدی) داشته باشد.

دستگاه های ترانزیستور اثر میدان^{۲۵} و ترانزیستور اثر میدانی نیمه‌رسانا-اکسید-فلز^{۲۶} بسیار کمتر حساس به این تأثیرات هستند. برای تغییرات مکانیکی، حتی در چنده‌گذاری^{۲۷} بالا، میزان آسیب به سیلیکون، خیلی ناچیز است و مدول یانگ^{۲۸}، به طور قابل توجهی تغییر نمی‌کند. در حیطه الکترونیک این اثر را می‌توان نادیده گرفت. برای دستگاه‌های سیستم‌های میکرو الکترومکانیکی مانند تشدید کننده‌ها^{۲۹} که حساس به تغییر در مدول یانگ هستند، به بررسی های بیشتری مورد نیاز است [۱].



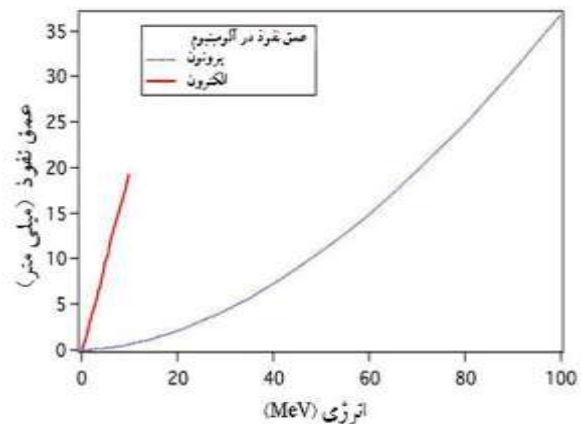
شکل ۳ پیامدهای تخریب با توجه به نوع پرتو [۱ و ۸]

۳. طبقه‌بندی اثرات پرتوها بر روی تجهیزات سیستم‌های میکرو الکترومکانیکی

در پژوهش‌هایی که بر روی مواد مختلف انجام گرفت، مشخص گردید که یک ماده جدا از ذات اولیه خود با توجه به سیستمی که بر اساس آن عمل می‌کند، حساسیت‌ها و پیامدهای مختلفی را که ناشی از یک تابش پرتو مشخص است، را از خود نشان می‌دهد. در "جدول ۱"، میزان حساسیت و نوع آسیب‌های ایجاد شده به علت شارژ دی الکتریک با توجه به نوع سیستم عمل کننده در سیستم‌های میکرو الکترومکانیکی، بیان شده است [۱].

۲-۲-۱- فلزات

هیچ گزارش مهم و قابل توجه‌ای از تخریب فلز بوسیله تشعشع در فضا گزارش نشده است. برای مأموریت‌های فضایی، فرض می‌شود که فلزات تحمل تابش را دارند [۶ و ۹]. میزان نفوذ پرتو به شدت و نوع آن بستگی دارد. در دو پژوهش [۷ و ۱۰]، یک قطعه آلومینیوم (از نوع استاندارد مورد استفاده در سفینه‌های فضایی)، با ضخامت ۴ میلی‌متر را به ترتیب تحت پرتو افکنی الکترون و پرتون قرار گرفت. مشخص شد که در شدت‌های کم، پرتو الکترون به عمق بیشتری نفوذ می‌کند. (شکل ۴).



شکل ۴ مقایسه میزان نفوذ پرتو الکترون و پروتون در

آلومینیوم به ضخامت ۴ میلی‌متر [۱۰]

22 P-N junctions

23 Emperature

24 Bipolar Junction Transistor (BJT)

25 Field-Effect Transistor (FET)

26 Metal-Oxide-Semiconductor Field-Effect Transistor (MOSFET)

27 Dose

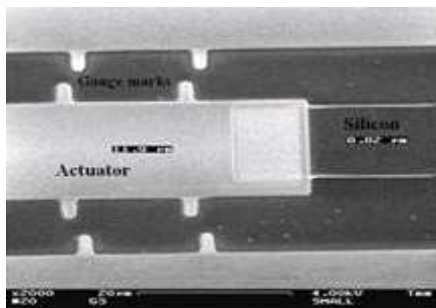
28 Young's modulus

29 Intensifiers

برای تجهیزات الکترواستاتیک در سیستم‌های میکرو الکترومکانیکی، علت اصلی آسیب، انباشت بار در لایه‌های دی الکتریک، ناشی از تابش پرتوهای یونیزه کننده است که باعث تغییر در واسنجی این گونه تجهیزات می‌گردد [۱۳ و ۱۴]. یک آئینه پیزو الکتریک پس از ۲۰ (Krad) پرتو دهی، تغییراتی در خمش آئینه از خود نشان می‌دهد. (در مقایسه با نمونه‌هایی که پرتو دهی نشده‌اند)، که این خود عامل مهمی در افزایش نشت جریان در تجهیزات است [۱۵]. آزمایش‌ها بر روی شتاب سنج‌ها و تعویض کننده‌های فرکانس رادیویی نشان می‌دهد که واسنجی در چنده‌گذاری بالای ۳۰ (Krad) اتفاق می‌افتد [۱۴ و ۱۶]. در تعویض کننده‌های فرکانس رادیویی، تغییرات در اثر تابش پرتو آلفا با چنده‌گذاری ۵ مگا ولت مشاهده شده است [۱۷]. آزمایشگاه ملی سندیا در ایالات متحده آمریکا، تغییرات رفتاری بر روی تجهیزاتی که شامل دی الکتریک (SiO_2 و SiN_x) هستند را در چنده‌گذاری ۱۰ (Mard) و در بعضی موارد تا ۱ (Grad) را گزارش داده است [۱۸].

۴-۳. اثرات پرتوهای نوترون، فوتون و گاما بر تجهیزات سیستم‌های میکرو الکترومکانیکی

گوستیس و همکاران [۱۹]، به بررسی اثرات نوترون‌ها و پرتوهای فوتون گاما بر خواص الکترومکانیکی مواد مختلفی که به طور معمول در ساخت تجهیزات سیستم‌های میکرو الکترومکانیکی استفاده می‌شوند، پرداخته‌اند. به این منظور، شارژ ناشی از تابش‌های القاء شده بر روی غشاءهای دی الکتریک مختلف، که در ساختار نیمه هادی عایق فلزی^{۳۴} استفاده می‌شود، مورد مطالعه قرار گرفت. برای این آزمون یک غشاء حرارتی اکسید سیلیکون (SiO_2) و یک غشاء اکسید آلومینیوم (Al_2O_3) توسط روش رسوب لایه اتمی^{۳۵} و یک غشاء نیترات سیلیکون (Si_3N_4) بوسیله روش رسوب بخار شیمیایی کم فشار^{۳۶} به وجود آمد (شکل ۵).



(الف)

نوع عملگر در MEMS	میزان حساسیت به شارژ دی الکتریک	نوع آسیب به علت شارژ دی الکتریک
الکترواستاتیک	زیاد	تغییر در واسنجی ^{۳۰} سنسور های خازنی
مغناطیس	خیلی ضعیف	تغییر در شکست ولتاژ
پیزو	ضعیف تا متوسط	تغییر در کالیبراسیون

جدول ۱ میزان حساسیت و نوع عیوب ایجاد شده به علت شارژ دی الکتریک با توجه به نوع سیستم عملگر در سیستم‌های میکروالکترومکانیکی [۱۲ و ۱۳]

۴. خلاصه‌ای از نتایج آزمایشهای تأثیر پرتوها بر روی تجهیزات سیستم‌های میکرو الکترومکانیکی

با توجه به حجم گسترده کاربرد تجهیزات سیستم‌های میکرو الکترومکانیکی، در این قسمت به برخی از نتایج برخی از پژوهش‌ها اشاره می‌گردد. بررسی تأثیر تابش پرتوها در این گونه تجهیزات پرداخته اند، اشاره می‌گردد. در پایان، برخی از راهکارهای کاهش این اثرات بیان می‌شود.

۴-۱- آسیب‌های مکانیکی به علت آسیب جابجایی

گزارشی از تغییرات قابل توجه در مدول یانگ و استحکام تسلیم^{۳۱} سیلیکون حتی در مقادیر بالای تابش تشعشع داده نشده است. این موضوع به این دلیل است که سیلیکون، ماده ای ذاتاً مقاوم است. [۶ و ۹]. در گزارشهای تازولی و همکاران، تأثیر مخرب پروتون (با توان ۲ مگا ولت) بر روی سوئیچ‌های فرکانس رادیویی^{۳۲} که به صورت الکترواستاتیک^{۳۳} عمل می‌کنند، نشان داده شد. همچنین آنها با پرتو دهی نمونه‌ها با پرتوهای ایکس تا ۱۰ کیلو ولت آسیب جابجایی قابل توجهی مشاهده نکردند [۴].

۴-۲- حسگرها و محرک‌های الکترواستاتیک در سیستم‌های میکرو الکترومکانیکی

³⁴ Metal insulator semiconductor

³⁵ Atomic Layer Deposition (ALD)

³⁶ Low Pressure Chemical Vapor Deposition (LPCVD)

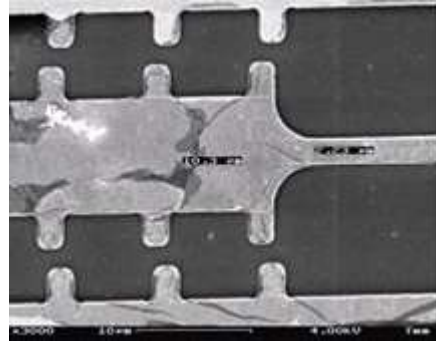
³⁰ Calibration

³¹ Yield Strength

³² Radio Frequency (RF) switch

³³ Electrostatic

کیهانی بر تجهیزات سیستم‌های میکرو الکترومکانیکی، تنها برای محدود پژوهشگرانی در دنیا امکان پذیر است که به امکانات آزمایشگاهی و به تحقیقات فضایی دسترسی دارند. این مقاله مروری بر این تحقیقات است. در این متن، ضمن معرفی مکانیزم و نوع آسیب‌های متداول حاصل از تابش پرتوها، فاکتورهای تأثیر گذار بر حساسیت یک دستگاه به تابش پرتوها نیز بررسی شد. این تحقیقات نشان داد که تابش پرتوهای کیهانی فاکتور بسیار مهمی است که در بعضی از مواقع باعث شکست، افزایش رسانایی و یا به هم ریختگی کالیبراسیون دستگاه‌ها به ویژه تجهیزات سیستم‌های میکرو الکترومکانیکی می‌شود. لذا لازم است تا میزان حساسیت تجهیزات به تابش پرتو بررسی شود تا با اخذ روش‌های مناسب، تأثیرات نامطلوب ناشی از پرتوها به حداقل رسانید. نوع پرتو، شدت پرتو، نوع سیستم عمل‌گر، بیشترین عواملی هستند که بر میزان حساسیت تجهیزات به تابش پرتو تأثیر گذارند.



(ب)

شکل ۵. الف) تصویر میکرونی، از قطعه برای آزمایش سیلیکون، ب) تصویر میکرونی از قطعه که نیترات سیلیکون بر روی آن لایه نشانی شده است. [۱۹].

در این آزمایش از یک نوسان سنج داپلر لیزری (از نوع Polytec MSA 500)، برای مطالعه خاص آزمون تشدید شونده، قطعه‌ای که با نیترات سیلیکون (Si_3N_4) لایه نشانی شده است، استفاده شد. سپس، یک لایه نازک بسیار منعکس کننده طلا بر روی نیترات سیلیکون (Si_3N_4) به منظور بهبود موج^{۳۷} بازگشتی از پرتو لیزر به نوسان سنج داپلر لیزری، نشانده شد. در پایان آزمایش و تحلیل نتایج مشخص شد که کاهش پاسخ الاستیک از نمونه‌های آزمایش شده، دیده نشد و بارهای به دام افتاده به ویژه در دی الکتریک نازک‌تر مشاهده شد.

۴-۴ - روش‌هایی برای کم کردن و یا زدودن اثر بارهای القایی:

- با تغییراتی در جسم می‌توان اثر بارهای القایی را کم و یا از بین برد. مهمترین این تکنیک‌ها، که به طور تجربی بدست آمده‌اند به شرح زیر می‌باشد:
۱. تغییر هندسه به منظور زدودن دی الکتریک از بین و زیر سطحی که در آن حرکت می‌کند.
 ۲. تغییر هندسه به منظور کم کردن منطقه تحت پرتو دهی شده
 ۳. تغییر هندسه به منظور کم کردن به شارژ به دام افتاده
 ۴. اضافه کردن لایه‌ای برای پراکندگی دی الکتریک
 ۵. تغییر دی الکتریک متریال‌ها

۵- نتیجه‌گیری و جمع‌بندی

کاوش در فضا بدون در نظر گرفتن تأثیر تابش پرتوهای کیهانی بر تجهیزات امکان پذیر نیست. پژوهش در زمینه تأثیر پرتوهای

Measurements, S1350-4487, No. 14-00142-5, 2014.

10. SRIM by James F. Ziegler: <http://www.srim.org/>

11. Iniewski, K., [Radiation Effects in Semiconductors], CRC Press, 2010.

12. L. P. Schanwald et al., "Radiation effects on surface micromachined comb drives and microengines," *IEEE Trans. Nucl. Sci.*, Vol. 45, No. 6, pp2789–2798, 1998.

13. A. Crunteanua, A. Pothiera, P. Blondya, F. Dumas-Bouchiatb, C. Champeauxb, A.Catherinotb, P. Tristantb, O. Vendier c, C. Drevonc, J.L. Cazauxc, L. Marchand, "Gamma radiation effects on RF MEMS capacitive switches", *Microelectronics Reliability*, Vol. 46, pp1741–1746, 2006.

14. S.S. McClure, L.D. Edmonds, Radiation effects in micro-electromechanical systems (MEMS): RF relays, *IEEE Trans. Nucl. Sci.*, Vol. 49, pp3179–3202, 2002.

15. T.F. Miyahira, et al., "Total dose degradation of MEMS optical mirrors", *IEEE Transactions on Nuclear Science*, Vol 50, Iss 6, Part 1, pp1860 – 1866 , 2003.

16. L. D. Edmonds, G. M. Swift, and C. I. Lee, "Radiation response of a MEMS accelerometers: an electrostatic force," *IEEE Trans. Nucl. Sci.*, Vol. 45, pp. 2779–2788, 1998.

17. J. Ruan , E. Papandreou , M. Lamhamdi, M. Koutsourelis, F. Coccetti, P. Pons ,G. Papaioannou , R. Plana, "Alpha particle radiation effects in RF MEMS capacitive switches", *Microelectronics Reliability*, Vol. 48, pp1241–1244, 2008.

18. Shea, H, "Radiation sensitivity of microelectromechanical system devices", *J. Micro/Nanolith. MEMS MOEMS*, Vol. 8, No.3, 031303, 2009.

19. P. Gkotsis, V. Kilchytska, U. Bhaskar, O. Militarub, X. Tanga, C. Fragkiadakis, P.B. Kirbyc, J.-P. Raskina, D. Flandre and L. A. Francis, "Neutron and gamma radiation effects on MEMS structures", *Procedia Engineering*, Vol. 25, pp172 –17, 2011.

1. Herbert R. Shea, "Effects of Radiation on MEMS", *J. Micro/Nanolith. MEMS MOEMS*, Vol.8, No. 3-031303, Jul-Sep 2009.

2. Herbert R. Shea, "Reliability of MEMS for space applications", *Proc. of SPIE*, Vol. 6111, 61110A, 2006.

3. H. C. Koons, J. E. Mazur, R. S. Selesnick, J. B. Blake, J. F. Fennell, J. L. Roeder, and P. C. Anderson, "The impact of the space environment on space systems," *Aerospace Corp., Report* No. TR-99(1670)-1, 20 July 1999.

4. A. Tazzoli, G. Cellere, V. Peretti, A. Paccagnella, and G. Meneghesso, "Radiation sensitivity of OHMIC RF-MEMS switches for spatial applications", in *Proc. 22nd Intl. Conf. Micro Electro Mechan. Syst.(MEMS)*, pp. 634–637, 2009.

5. João Gomes and Herbert R. Shea, "Displacement damage effects in silicon MEMS at high proton doses", *Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne, Microsystems for Space Technologies Laboratory, CH-2002 Neuchâtel, Switzerland, Proc. of SPIE*, Vol. 7928 79280G-10, 2002.

6. L.Wang, J. Tang, Q-A Huang, "Gamma and electron beam irradiation effects on the resistance of micromachined polycrystalline silicon beams", *Sensors and Actuators*, A 177, pp.99– 104, 2012

7. Caffey JR, Kladitis PE, The effects of ionizing radiation on microelectromechanical systems (MEMS) actuators: electrostatic, electrothermal, and bimorph. MEMS 2004 17th IEEE conference on 2005;133-136.

8. European Space Agency Procedures Standards and Specifications, document ESA PSS-01-609 (May 1993) Radiation Design Handbook, available at: <https://escies.org/ReadArticle?docId=263>

9. J.F. Felix , D.L. da Cunha , M. Aziz , E.F. da Silva Jr., D. Taylor , M. Henini , W.M. de Azevedo, "Effect of Gamma Radiation on the Electrical Properties of Polyaniline/Silicon Carbide Heterojunctions", *Radiation*