

سوئیچ شتاب قابل تنظیم با استفاده از دو نوع تحریک بر اساس تکنولوژی ممز (MEMS)

لقمان مولودزاده^۱، دانشجوی کارشناسی ارشد؛ سعید افرنگ^۲، استادیار؛ قادر رضازاده^۳، استاد

۱-دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر - دانشگاه ارومیه- ارومیه- ایران - l.moloudzade67@gmail.com

۲-دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر - دانشگاه ارومیه- ارومیه- ایران - s.afrang@urmia.ac.ir

۳-دانشکده فنی و مهندسی - دانشگاه ارومیه- ارومیه- ایران - g.rezazadeh@urmia.ac.ir

چکیده: در این مقاله طراحی و شبیه‌سازی ساختار جدیدی از سوئیچ میکرو ماشینی عمل‌کننده با شتاب، با قابلیت تنظیم برای شتاب موردنظر ارائه شده است. با استفاده از سوئیچ پیشنهادی امکان سنجش شتاب در محدوده بین میلی جی (g) الی نود جی میسر گردیده است. جهت تنظیم شتاب موردنظر در بازه ذکر شده از دو تحریک الکترواستاتیک شانه‌ای و پیزوالکتریک استفاده شده است. از تحریک الکترواستاتیک شانه‌ای، به علت رنج خطی بالای آن و تحریک پیزوالکتریک به علت دقت بالای تنظیم سوئیچ در شتاب‌های خیلی کم و عدم وجود پدیده پایین کش (pull in) بهره برده شده است. در ساختار پیشنهادی جهت جلوگیری از پدیده پایین کش از متوقف کننده در تحریک الکترواستاتیک استفاده شده است. در بخش تحریک پیزوالکتریک معادلات حاکم بر جابجایی ناشی از تحریک پیزوالکتریک استخراج شده است. بر اساس طراحی انجام‌گرفته رزولوشن ساختار حدود ۰/۱۵ جی است. ولتاژ آستانه پایین کش برای تحریک الکترواستاتیک شانه‌ای ۵۰ ولت و حداکثر ولتاژ تنظیم تحریک پیزوالکتریک ۸۵ ولت است. ساختار پیشنهادی بر اساس محاسبات انجام‌گرفته در نرم‌افزار اینتلیسویت (intellisuite) شبیه‌سازی شده و نمودارهای حاصل از شبیه‌سازی جهت صحت سنجی با نمودارهای حاصل از متلب مقایسه شده است.

واژه‌های کلیدی: سوئیچ، شتاب، سیستم‌های میکرو الکترومکانیک، قابل تنظیم، تحریک الکترواستاتیک.

MEMS Based Tunable Acceleration Switch Using Two Type Actuators

Logman Moloudzade¹, MSc Student; Saeid Afrang², Assistant Professor; Ghader Rezazadeh³, Professor

1- Faculty of Electrical and Computer Engineering, Urmia University, Urmia, Iran, Email: l.moloudzade67@gmail.com

2- Faculty of Electrical and Computer Engineering, Urmia University, Urmia, Iran, Email: s.afrang@urmia.ac.ir

3- Faculty of Engineering, Urmia University, Urmia, Iran, Email: g.rezazadeh@urmia.ac.ir

Abstract: In this paper design and simulation of a new tunable acceleration MEMS switch is proposed. Using the proposed switch, it is possible to measure the accelerations in the range between milli-g and 90g. To tune the desired acceleration switching, two actuators are used. These actuators are electrostatic comb drive and piezoelectric actuator. The electrostatic comb drive actuator operates in high linear range and the piezoelectric actuator can measure very low accelerations without pull in phenomenon. In the structure, the stopper is used to avoid pull in phenomenon due to the electrostatic actuation. In the piezoelectric actuator section, the governing equations for the deflection due to piezoelectric actuation is extracted. Based on design, the resolution is about 0.15g. The pull in voltage of electrostatic comb drive actuator is 50 volt and maximum voltage tuning of piezoelectric actuator is 85 volt. To verify, the proposed structure is first calculated using matlab software and then simulated using intellisuite software.

Keywords: Acceleration switch, MEMS, piezoelectric actuator, electrostatic actuator, tune, pull in.

تاریخ ارسال مقاله: ۱۳۹۷/۰۱/۲۳

تاریخ اصلاح مقاله: ۱۳۹۷/۰۴/۲۹، ۱۳۹۷/۰۷/۰۳ و ۱۳۹۷/۰۹/۰۶

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۷/۱۱/۰۸

نام نویسنده مسئول: سعید افرنگ

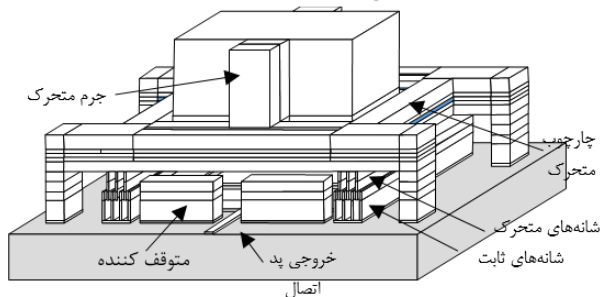
نشانی نویسنده مسئول: ایران- ارومیه- پردیس نازلو- دانشگاه ارومیه- دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر.

۱- مقدمه

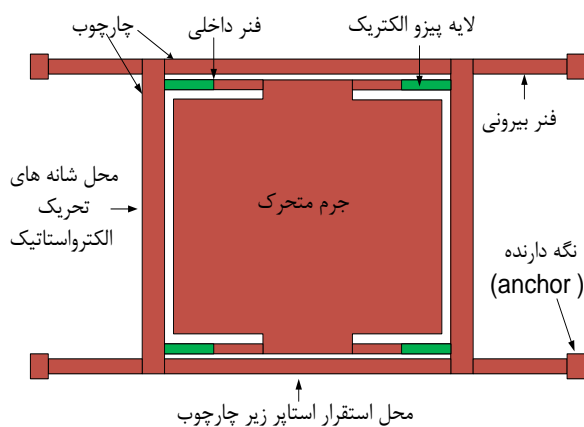
شتاب‌های کوچک‌تر از یک جی را میسر کرده است. روابط حاکم بر جابجایی جرم به ازای ممان خمشی ناشی از تحریک پیزوالکتریک برای ساختار پیشنهادی ارائه شده است. در این کار تحقیقی که در ادامه آمده است ابتدا ساختار و عملکرد سوئیچ پیشنهادی توضیح داده شده است. سپس سوئیچ بر اساس مشخصات موردنظر در دو قسمت الکترواستاتیک و پیزوالکتریک طراحی گردیده است. در ادامه ساختار با استفاده از نرم‌افزار اینتلیسویت شبیه‌سازی شده و نتایج شبیه‌سازی با نتایج حاصل از محاسبه جهت صحت سنجی مورد مقایسه قرار گرفته است. در نهایت نتایج حاصله با کارهای دیگران مورد مقایسه قرار گرفته است.

۲- ساختار و عملکرد سوئیچ

شکل ۱ ساختار کلی سوئیچ عمل‌کننده با شتاب پیشنهادی را نشان می‌دهد. ساختار پیشنهادی شامل جرم متحرک، مجموعه فنرهای بیرونی و داخلی، صفحات شانه‌ای متحرک وصل شده به یک چارچوب، شانه‌های ثابت، پدهای اتصال سوئیچ، پدهای بایاس و متوقف‌کننده‌ها است.



الف - نمای سه‌بعدی



الف - نمای دوبعدی (دید عمودی)

شکل ۱: شماتیک سوئیچ عمل‌کننده با شتاب پیشنهادی

صفحات شانه‌ای متحرک، مابین فنرهای بیرونی و داخلی و متصل به آن‌ها قرار گرفته‌اند. این صفحات شانه‌ای از طریق فنرهای داخلی به جرم متحرک متصل می‌باشند. عملکرد ساختار پیشنهادی به این صورت

تکنولوژی میکروماشینینگ در دهه‌های اخیر رشد چشم‌گیری در شاخه‌های مختلف علمی و صنعتی داشته است [۱-۲۷]. سوئیچ عمل‌کننده با شتاب یکی از محصولات این تکنولوژی نوین است. سوئیچ ذکرشده نوعی از سوئیچ‌های الکتریکی است که در شتاب تعریف شده‌ای عمل کرده و اتصال الکتریکی را برقرار می‌کند. این نوع از سوئیچ‌ها کاربردهای وسیعی در ایمنی خودرو جهت باز کردن کیسه هوا و قطع بنزین در تصادفات و در دستگاه‌های پرتابل نظیر تلفن همراه دارند. از طرف دیگر قطعاتی که با استفاده از تکنولوژی مزم ساخته شده‌اند دارای ویژگی‌های خاص نظیر کوچکی در اندازه، توان مصرفی کم، حساسیت بالا و نسبتاً ارزان در مقایسه با انواع مشابه دیگر می‌باشند. به همین علت در سال‌های اخیر توجه به ساخت سوئیچ‌های عمل‌کننده با شتاب با تکنولوژی مزم بیشتر شده است. اولین سوئیچ عمل‌کننده با شتاب و با استفاده از تکنولوژی مزم در سال ۱۹۷۲ توسط ولف و همکاران [۱] ساخته شد. این سوئیچ شامل مجموعه‌ای از بیم‌های یکسر گیردار با طول‌های متفاوت است. به طوری که هر بیم با یک شتاب معین عمل کلید زنی را انجام می‌دهد. طرز عمل سوئیچ به این صورت است که با اعمال شتاب معین و با در نظر گرفتن جرم بیم و فاصله نوک بیم از سطح ویفر، نوک بیم به پد روی سطح ویفر برخورد کرده و اتصال موردنظر برقرار می‌شود. کارهای انجام‌گرفته بعدی را می‌توان در دسته‌بندی‌های مختلف قرار داد. بر اساس این دسته‌بندی‌ها حرکت جرم متحرک در تعدادی از سوئیچ‌های در راستای عمود بر سطح ویفر [۷-۱۱] و در تعدادی دیگر به صورت افقی و در راستای سطح ویفر [۱۴-۸] است. مطالعات متنوع دیگر انجام گرفته بر اساس مکانیسم، شامل سوئیچ قفل شونده [۱۱، ۱۳] و سوئیچ عمل‌کننده با مایع متحرک [۱۴] است. علی‌رغم کارهای مهم انجام‌گرفته، تحقیقاتی که در زمینه سوئیچ‌های عمل‌کننده با شتاب قابل تنظیم صورت گرفته بسیار محدود است. از جمله آن تحقیقات می‌توان به اولین کار انجام‌گرفته توسط ولف و همکاران [۱] اشاره کرد. در کار دیگر انجام‌شده توسط کیم و همکاران [۹] کلید زنی در دو جهت و تنظیم به صورت پیوسته است. در نمونه دیگر ارائه‌شده توسط کمار و همکاران [۱۰] تنظیم کلید زنی به صورت دیجیتالی است و با استفاده از دو بیت، شتاب‌های بسیار کم بین صفر و یک جی اندازه‌گیری شده است.

در مقاله پیشنهادی ساختار جدیدی برای تنظیم پیوسته شتاب ارائه شده است. این ساختار علاوه بر جدید بودن دارای تفاوت‌های دیگر به شرح زیر است. در این ساختار برای اولین بار کلید زنی به صورت تنظیم پیوسته و در راستای عمود بر سطح ویفر انجام‌گرفته است. به همین دلیل امکان استفاده از دو تحریک در یک ساختار به وجود آمده است. از طرف دیگر با توجه به استفاده از دو نوع تحریک، اولاً امکان تنظیم در یک بازه بزرگ‌تر فراهم گردیده است. ثانیاً مزایای دو تحریک توأم مورد استفاده قرار گرفته است. بطوریکه تحریک الکترواستاتیک شانه‌ای محل نقطه پایین کش را به عقب انداخته است و تحریک پیزو امکان سنجش

در محدوده تعیین شده است. رابطه (۱) بیانگر ارتباط بین جرم، فنر و جابجایی به ازای شتاب اعمالی است [۱۵].

$$F=ma=kx \quad (1)$$

بر اساس این معادله، نیروی اعمالی به جرم m موجب شتاب a در جرم می شود و نیروی مقابله کننده ناشی از فنر k ، سیستم را بعد از طی مسافت x به حالت تعادل درمی آورد. بر اساس رابطه مذکور، به ازای جرم و فنر مشخص، میزان جابجایی جرم، متناسب با شتاب اعمالی است. از طرف دیگر اندازه ضریب فنریت فنرها، تأثیر مستقیم در اندازه ولتاژ اعمالی به سیستم، جهت تعیین موقعیت اولیه جرم دارد؛ بنابراین جهت پایین آوردن ولتاژ اعمالی، حتی الامکان بایستی مقدار ضریب فنریت را پایین در نظر گرفت. از طرف دیگر کم بودن مقدار ضریب فنریت بایستی باعث افزایش تنش بیش از حد مجاز روی فنرها گردد به طوری این تنش از تنش تسلیم ماده مورد استفاده در جرم و فنر بیشتر گردد. لذا با توجه به موارد ذکر شده و همچنین پس خوردگی حاصل از محاسبات اولیه، مقدار ضریب فنریت معادل برابر $2/4$ نیوتن بر متر در نظر گرفته می شود. از طرف دیگر کل جابجایی جرم با در نظر گرفتن حداکثر شتاب اعمالی و تحریک های اعمال شده تعیین می شود. در این ساختار برای هر کدام از جابجایی های انجام شده ناشی از تحریک های الکترواستاتیک و پیزوالکتریک سه میکرومتر و در کل شش میکرومتر در نظر گرفته شده است. حال با مشخص بودن حداکثر میزان جابجایی، ضریب فنریت و حداکثر شتاب اعمالی 90 جی، اندازه جرم مورد نیاز از معادله یک قابل محاسبه بوده و مقدار $15/5$ میکروگرم به دست می آید. ساختار دارای دو مجموعه فنر با نام های فنرهای بیرونی و فنرهای داخلی است که نسبت به همدیگر به صورت سری قرار گرفته اند.

مقدار ضریب فنریت معادل فنرهای داخلی و خارجی که به صورت fixed-guided end قرار گرفته اند در سه راستای x و y و z به ترتیب از روابط (۲)، (۳) و (۴) به دست می آید [۱۶].

$$K_x = \frac{4Ewh}{l} \quad (2)$$

$$K_y = \frac{4Ehw^3}{l^3} \quad (3)$$

$$K_z = \frac{4Ewh^3}{l^3} \quad (4)$$

در این روابط E ، w ، h و l به ترتیب مدول یانگ، پهنا، ضخامت و طول فنرها است.

همان طور که در جدول یک آورده شده است؛ طراحی ساختار پیشنهادی به گونه ای است که ضریب فنریت معادل فنرهای بیرونی و داخلی متصل به جرم متحرک معلق، در دو راستای x و y از سه راستای x و y و z بسیار زیاد است بطوریکه جابجایی ناشی از شتاب اعمالی برای محدوده وسیعی از شتابها در دو راستای مذکور ناچیز است. بنابراین اگر شتاب هم زمان در سه راستا اعمال شود تأثیری در اندازه گیری شتاب در جهت z نخواهد داشت. در راستای z مقدار ضریب فنریت به گونه ایست که

است که با اعمال شتاب به جرم متحرک که از جنس فلز آلومینیوم است. جرم مذکور به پایین کشیده شده و با اتصال به پدهای سوئیچ که روی سطح ویفر قرار گرفته اند باعث وصل الکتریکی بین پدهای اتصال شود. هدف، ارائه ساختاری است که بتواند عمل سوئیچینگ را به ازای شتاب های مختلف انجام دهد. این کار با تغییر موقعیت اولیه جرم متحرک نسبت به پدهای اتصال امکان پذیر است. در این صورت هرگاه موقعیت تغییر یافته جرم، نسبت به پدها نزدیک باشد در شتاب های کم، عمل سوئیچینگ صورت می گیرد و اگر این موقعیت تغییر یافته دور از پدها باشد با شتاب های بزرگ عمل سوئیچینگ امکان پذیر است. جهت تنظیم موقعیت از دو تحریک الکترواستاتیک و پیزوالکتریک استفاده می شود. بطوریکه جهت ایجاد تغییر در موقعیت اولیه تا نصف فاصله از پدها، فقط از تحریک الکترواستاتیک و جهت قرار گرفتن جرم متحرک در نصف دیگر فاصله به طور هم زمان از تحریک الکترواستاتیک و پیزوالکتریک استفاده می شود. با اعمال ولتاژ به صفحات شانه ای متحرک و ثابت، نیروی الکترواستاتیک ایجاد شده بین صفحات، مجموعه جرم متحرک و فنرهای داخلی و همچنین فنرهای بیرونی را از موقعیت اولیه به سمت پایین می کشد. لازم به توضیح است که در این مرحله تنها فنرهای بیرونی خم می شوند و مجموعه صفحات شانه ای متحرک، فنرهای داخلی و جرم متحرک در یک سطح به سمت پایین حرکت می کنند. اعمال ولتاژ بیشتر و به تبع آن حرکت بیشتر به سمت پایین تا جایی قابل قبول است که این حرکت خطی باشد. از یک مکان به بعد، اعمال ولتاژ بیشتر، باعث جهش ناگهانی شانه های متحرک به سمت پایین شده و مجموعه جرم متحرک و فنرهای داخلی و بیرونی را نیز با خود به سمت پایین خواهد برد. این ناحیه، غیر قابل کنترل و غیر قابل استفاده است. جهت جلوگیری از وارد شدن شانه های متحرک به ناحیه مذکور از متوقف کننده استفاده شده است. موقعیت متوقف کننده که در پیرامون پدها و چسبیده به ویفر قرار دارد به گونه ای است که از ادامه حرکت شانه های متحرک و فنرهای بیرونی به سمت پایین جلوگیری می کند. حال اگر منظور، سنجش شتاب های کم باشد جرم متحرک بایستی در نیمه پایینی و نزدیک به پدها قرار بگیرد. در این حالت ابتدا ماکزیمم ولتاژ تحریک الکترواستاتیک به صفحات شانه ها اعمال می شود. این ولتاژ جرم متحرک را تا نیمه، پایین می آورد و نهایتاً حرکت جرم توسط متوقف کننده ها متوقف می شود. در ادامه با حفظ ولتاژ تحریک الکترواستاتیک، ولتاژ دوم به صفحات لایه پیزوالکتریک اعمال می شود. نیروی حاصل از تحریک پیزوالکتریک که روی فنرهای داخلی قرار گرفته اند جرم متحرک را در نیمه پایینی جابجا کرده و در مکان مورد نظر قرار می دهد.

۳- طراحی سوئیچ

اولین گام در طراحی سوئیچ، تعیین مقادیر جرم و فنر، متناسب با حداکثر و حداقل شتاب اعمالی جهت سوئیچینگ است. گام بعدی، تعیین اندازه ولتاژهای اعمالی به تحریک های پیزوالکتریک و الکترواستاتیک، جهت تنظیم موقعیت جرم، متناسب با شتاب های اعمالی

پیزوالکتریک جهت تغییر موقعیت اولیه جرم استفاده شده است. وظیفه تحریک الکترواستاتیک، جابجایی جرم از حالت سکون و در فاصله شش میکرومتری از پدهای اتصال تا فاصله سه میکرومتری از آنها است. بطوریکه بتوان شتاب‌های در محدوده ۵۰ جی الی ۹۰ جی را با تغییر تحریک الکترواستاتیک اندازه گرفت. تحریک الکترواستاتیک به صورت شانه‌ای بوده و راستای حرکت شانه‌ها در جهت عمود بر سطح ویفر است. پروسه ساخت ساختار پیشنهادی بر اساس ماشین‌کاری سطحی است. به علت محدودیت‌های ماشین‌کاری سطحی امکان ایجاد شانه‌های با طول بیشتر در جهت عمود بر سطح ویفر میسر نمی‌باشند و لذا با اعمال ولتاژ، علاوه بر نیروی الکترواستاتیک ایجادشده بین صفحات شانه‌های متحرک و ثابت، نیروی الکترواستاتیک دومی نیز بین دو صفحه موازی شامل نوک شانه‌های متحرک و صفحه موازی با آن در قسمت انتهایی شانه‌های ثابت به وجود می‌آید که با توجه به فاصله کم بین دو صفحه ذکرشده نیروی مذکور قابل توجه است و بایستی در محاسبات مدنظر قرار گیرد. رابطه (۵) نیروهای الکترواستاتیک موجود در تحریک شانه‌ای و همچنین نیروی فنریت مقابله‌کننده با این نیروهای الکترواستاتیک را نشان می‌دهد [۱۷].

$$\frac{n\varepsilon_0 w v^2}{g} + \frac{n\varepsilon_0 v t^2}{(d-x)^2} = kx \quad (5)$$

در این رابطه K ضریب فنریت معادل فنر بیرونی، x اندازه جابجایی جرم و شانه‌ها در جهت عمودی، n تعداد شانه‌ها، d فاصله اولیه بین نوک شانه‌های متحرک و انتهایی شانه‌های ثابت، w پهنای شانه‌ها، t ضخامت شانه‌ها، g فاصله بین صفحات شانه‌های متحرک و ثابت و v ولتاژ اعمالی است. سمت راست تساوی، نیروی فنریت مقابله‌کننده با نیروی الکترواستاتیک اعمالی است. جمله اول در سمت چپ تساوی نیروی الکترواستاتیک حاصل از صفحات شانه‌ای ثابت و متحرک را نشان می‌دهد. جمله دوم در سمت چپ تساوی، نیروی الکترواستاتیک حاصل از دو صفحه موازی شامل صفحه موجود در نوک شانه‌های متحرک و صفحه مقابل آن در قسمت انتهایی شانه‌های ثابت است. راستای این نیرو عمود بر سطح ویفر بوده و مقدار آن متناسب با فاصله بین صفحات ذکر شده است. بطوریکه اگر فاصله بین این صفحات از یک حد معین کمتر شود پدیده پایین کش اتفاق می‌افتد. ولتاژی را که در آن این پدیده اتفاق می‌افتد ولتاژ آستانه نامیده می‌شود. مکان نقطه پایین کش با انتخاب مناسب پارامترهای موجود در رابطه (۵) می‌تواند تغییر کند. موقعیت مکانی این نقطه در عملکرد ساختار تأثیرگذار است. بطوریکه این نقطه، محل جدایش بین دو تحریک موجود در ساختار است. در ساختار پیشنهادی، این نقطه در وسط بین سطح پایینی جرم و سطح بالایی پدها یعنی در فاصله سه میکرومتر از سطح پایینی جرم در نظر گرفته شده است. در عمل با توجه به اینکه در حول منطقه‌ای که پایین کش روی می‌دهد تغییرات غیرخطی و ناپایدار است لذا محل نقطه پایین کش و نقطه جدایش بین دو تحریک، متفاوت انتخاب می‌شود. با انتخاب مناسب پارامترهای رابطه دو، نقطه پایین کش سه و نیم میکرومتر از سطح زیرین جرم انتخاب گردیده است.

نسبت به محدوده شتاب موردنظر، جابجایی متناسب با شتاب اعمالی صورت می‌گیرد. اگر در راستای موردنظر، دو شتاب در جهت‌های مختلف اعمال شوند. شتاب منتهی برآیند دو شتاب اعمالی خواهد بود؛ و اگر یکی از آنها شتاب مزاحم و در جهت مخالف شتاب موردنظر باشد به نظر می‌رسد راه‌حلی برای حذف شتاب مزاحم وجود نداشته باشد. مقدار ضریب فنریت به دست آمده در بالا ضریب فنریت معادل از دیدگاه شتاب اعمالی و در راستای Z است. طراحی ساختار از دیدگاه شتاب به گونه ایست که فنریت معادل تقریباً برابر با اندازه فنرهای داخلی است. به عبارت دیگر اندازه فنرهای بیرونی خیلی بزرگ‌تر از اندازه فنرهای داخلی در نظر گرفته شده است. مقادیر موردنظر در طراحی در راستای Z برای فنرهای داخلی دو و چهاردهم نیوتن بر متر و برای فنرهای خارجی سی و دو نیوتن بر متر است. به عبارت دیگر فنرهای بیرونی بیشتر از ده برابر بزرگ‌تر از فنرهای داخلی است. این اختلاف در فنریت باعث می‌شود شتاب اعمالی تنها فنرهای داخلی را تحت تأثیر قرار داده و تأثیر شتاب بر فنرهای خارجی ناچیز گردد.

جدول ۱: مشخصات هندسی و مواد تشکیل‌دهنده در ساختار

پیشنهادی

مشخصات	اندازه
مدول یانگ فنرها (آلومینیوم)	۶۸ GPa
مدول یانگ (ZnO)	۷۴ GPa
ضریب پیزوالکتریک (d31) لایه ZnO	۵ N/pC
طول، پهنای و ضخامت فنر بیرونی	۲۸-۴۰-۴ μm
طول، پهنای و ضخامت فنر داخلی	۱۷۰-۲۰-۱/۳ μm
طول، پهنای و ضخامت لایه پیزو	۸۵-۲۰-۱/۴ μm
ضریب فنریت معادل بیرونی	۴۴۸۰۰ (K _{1x}) N/m ۳۱۷۲ (K _{1y}) N/m ۳۲ (K _{1z}) N/m
ضریب فنریت معادل داخلی	۴۱۶۰۰ (K _{2x}) N/m ۵۷۵ (K _{2y}) N/m ۲/۴ (K _{2z}) N/m
تعداد و فاصله شانه‌ها از همدیگر	۳-۱ μm
طول، پهنای و ضخامت شانه‌ها	۶۰۰-۷-۳ μm
فاصله بین نوک شانه‌های متحرک و انتهای شانه‌های ثابت قبل از اعمال شتاب و ولتاژ	۶ μm
هم‌پوشانی عمودی شانه‌ها	۱ μm
اندازه جرم متحرک	۱۵/۵ μg
طول، پهنای و ضخامت جرم متحرک	۵۰۰-۴۸۰-۲۳/۸ μm

۳-۱- طراحی سوئیچ در ناحیه تحریک الکترواستاتیک شانه‌ای

همان‌طور که در بخش‌های قبلی ذکر گردید هدف از ارائه ساختار پیشنهادی، قابل تنظیم شدن سوئیچ عمل‌کننده با شتاب به ازای شتاب‌های مختلف در یک محدوده مشخص است. جهت عملی کردن این هدف، نیاز به تغییر موقعیت اولیه جرم به ازای شتاب موردنظر و قبل از اعمال شتاب است. به همین منظور از دو تحریک الکترواستاتیک و

تحریک پیزوالکتریک، نیرو به صورت یکسان بوده و همچنین از سمت ثابت فنر تا نیمه فنر در نظر گرفته شده است بنابراین:

$$a=l/2 \quad (7)$$

$$w_a = w_l = w \quad (8)$$

جایگذاری روابط (7) و (8) در رابطه (6) رابطه (9) را می دهد.

$$y = -\frac{w}{24EI} \left(l - \frac{l}{2} \right)^3 \left(l + \frac{l}{2} \right) \quad (9)$$

معادله ممان خمشی مدل بررسی شده به صورت زیر است [۱۸].

$$M = -\frac{w_a}{6l} (l-a)^2 (2l+a) - \frac{w_l - w_a}{24l} (l-a)^2 (3l+a) \quad (10)$$

همچنین با جایگذاری (7) و (8) در رابطه (۱۰) داریم.

$$M = -\frac{w}{6l} \left(l - \frac{l}{2} \right)^2 \left(2l + \frac{l}{2} \right) \quad (11)$$

مقدار W از رابطه (۱۱) به صورت رابطه (۱۲) به دست می آید.

$$w = -\frac{6MI}{\left(l - \frac{l}{2} \right)^2 \left(2l + \frac{l}{2} \right)} \quad (12)$$

با جایگذاری رابطه (۱۲) در رابطه (۹) جابجایی جرم به ازای ممان

خمشی ناشی از نیروی اعمالی در حالت کلی را به دست می دهد

$$y = \frac{6MI \left(l - \frac{l}{2} \right)^3 \left(l + \frac{l}{2} \right)}{24EI \left(l - \frac{l}{2} \right)^2 \left(2l + \frac{l}{2} \right)} \quad (13)$$

$$y = -\frac{6MI^2}{48EI} \quad (14)$$

در رابطه اخیر EI ضریب سختی خمشی تیر است که از رابطه زیر به دست می آید [۱۹].

$$\frac{1}{EI} = \frac{A_x D_x - B_x^2}{A_x} \quad (15)$$

A_x و B_x و D_x از روابط زیر به دست می آیند:

$$A_x = \iint_A E(Z) dA \quad (16)$$

$$B_x = \iint_A E(Z) Z dA \quad (17)$$

$$D_x = \iint_A E(Z) Z^2 dA \quad (18)$$

در این روابط A سطح مقطع عرضی بیم و $E(Z)$ مدول یانگ پیزوالکتریک است.

ممان خمشی پیزوالکتریک M_p از رابطه زیر به دست می آید [۱۹].

$$M_p(x) = \iint_A E(Z) (Z - Z_0) \varepsilon_p(x, y, z) dy dz \quad (19)$$

در رابطه اخیر $Z_0 = A_x / B_x$ نشان دهنده فاصله محور خنثی از

محور وسط تیر و $\varepsilon_p(x, y, z)$ استرین پیزوالکتریک خارجی است

که از رابطه زیر به دست می آید [۱۹]:

$$\varepsilon_p(x, y, z) = \frac{d_{31} D_3(x)}{\varepsilon_{33}} \quad (20)$$

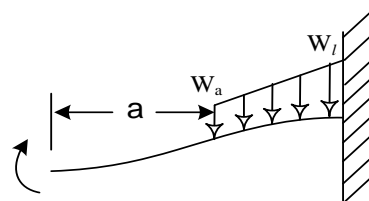
مقادیر متناظر پارامترهای رابطه دو و همچنین مشخصات هندسی و مواد ساختار پیشنهادی برای هر دو قسمت تحریک الکترواستاتیک و پیزوالکتریک در جدول یک آورده شده است.

بر اساس محاسبات، پایین کش به ازای ولتاژ ۵۴ ولت در نقطه ۳/۴ میکرومتر اتفاق می افتد. ولی جهت جلوگیری از وارد شدن شانه های متحرک به ناحیه غیرخطی و ناپایدار، در فاصله سه میکرومتر از جابجایی جرم، از یک متوقف کننده جهت توقف چارچوب متصل به شانه های متحرک، استفاده شده است. در این نقطه ولتاژ اعمالی به شانه ها ۵۰ ولت است.

۳-۲- طراحی سوئیچ در ناحیه تحریک پیزوالکتریک

ماده پیزوالکتریک مورد استفاده در طرح پیشنهادی ZnO است. دلیل استفاده از این ماده، پروسه ساخت آسان آن است. ماده پیزو به صورت لایه نازک روی فنرهای داخلی لایه نشانی شده است. لذا زمانی که هدف، سنجش شتاب های کمتر از ۵۰ جی است ابتدا با اعمال ولتاژ مناسب به شانه های تحریک الکترواستاتیک، فنرهای بیرونی خم می شود، جرم متحرک در اثر خمش فنرهای بیرونی پایین آمده و چارچوب در وضعیت وصل به متوقف کننده ها قرار می گیرد. سپس با حفظ ولتاژ تحریک الکترواستاتیک، با اعمال ولتاژ مناسب دیگر به لایه پیزوالکتریک، فنرهای داخلی خم شده و جرم متحرک را در موقعیت جدید متناسب با ولتاژ اعمالی دوم قرار می دهد. هدف به دست آوردن رابطه بین ولتاژ اعمالی به لایه پیزوالکتریک و اندازه جابجایی ناشی از اعمال ولتاژ است.

چهار فنر داخلی نگه دارنده جرم از نظر شرایط کناره های به صورت fixed-guided end می باشند. به عبارت دیگر از طرف جرم به صورت guided end و از طرف چارچوب fix می باشند. در ساختار پیشنهادی، نیروی اعمالی ناشی از لایه پیزو به صورت توزیع شده واژ سمت ثابت فنر تا نیمه فنر است. شکل ۲ مدل فنر داخلی به همراه نیروی اعمال شده و شرایط کرانه ای در حالت کلی را نشان می دهد.



شکل ۲: فنر داخلی به همراه نیروی اعمال شده و شرایط کرانه ای

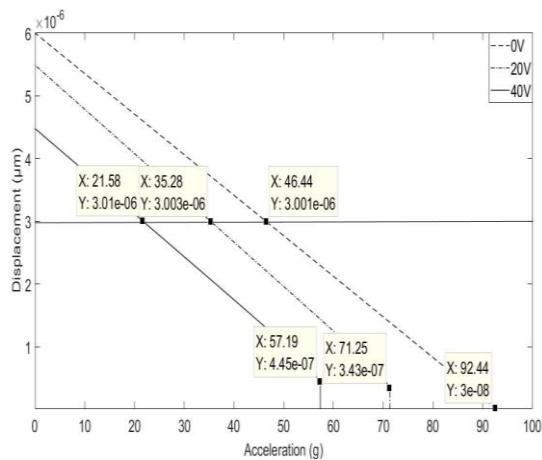
رابطه (۶) چگونگی جابجایی فنر اشاره شده در شکل ۲ به ازای نیروی توزیع شده و متغیر را نشان می دهد [۱۸].

$$y = -\frac{w_a}{24EI} \left(l - a \right)^3 \left(l + a \right) - \frac{w_l - w_a}{240EI} \left(l - a \right)^3 \left(3l + 2a \right) \quad (6)$$

در این رابطه a فاصله انتهای نیروی اعمالی از جرم، l طول فنر، w_a اندازه نیروی اعمالی در نقطه a، w_l اندازه نیروی اعمالی در طرف ثابت فنر، E مدول یانگ فنر و I گشتاور دوم سطح مقطع فنر است. از آنجایی که در

که موقعیت اولیه جرم در محدوده تحریک الکترواستاتیک است؛ و نمودار شکل ۵ برای حالتی است که موقعیت اولیه جرم در محدوده تحریک پیزوالکتریک است.

شکل ۴ نمودار جابجایی برحسب شتاب به ازای مقادیر مختلف ولتاژ، حاصل از روابط یک و دو توسط نرم‌افزار متلب و بدون استفاده از متوقف کننده را نشان می‌دهد. همان‌طور که از شکل ملاحظه می‌شود برای حالتی که ولتاژ تحریک الکترواستاتیک اعمال نشده است شتاب 93g لازم است تا جرم متحرک شش میکرومتر جابجا شده و با برخورد به پدها اتصال الکتریکی برقرار شود. بر اساس شکل ۴ و برای حالت‌هایی که ولتاژهای تحریک الکترواستاتیک ۲۰ و ۴۰ ولت اعمال شده است به ترتیب جابجایی‌های اولیه ۰/۶ و ۱/۲ میکرومتر از حالت سکون جرم در شتاب صفر حاصل شده است به سبب این جابجایی‌های اولیه شتاب کمتری برای سوئیچ زنی موردنیاز است. هرگاه نیروی الکترواستاتیک به همراه نیروی دوم (نیروی حاصل از شتاب اعمالی) به مجموعه جرم و فنر اعمال شود ولتاژ پول این به تأخیر می‌افتد و متناسب با ولتاژ و نیروی اعمالی، بعد از طی مسافت طولانی‌تر روی می‌دهد. اثر این پدیده در نمودارها مشخص است. بطوریکه نمودارهای شتاب را در نزدیکی‌های محل اتصال غیرخطی می‌کند. ولی با توجه به اینکه در عمل و در فاصله سه میکرومتری از محل اتصال، از متوقف کننده استفاده شده است. لذا در فاصله‌های بعد از سه میکرومتر با توجه به متوقف شدن شانه‌های متحرک، شتاب به‌صورت خطی رفتار خواهد کرد.



شکل ۴: نمودار جابجایی برحسب شتاب به ازای مقادیر مختلف ولتاژ اعمالی به شانه‌ها با استفاده از نرم‌افزار محاسباتی متلب

شکل ۵ نمودار جابجایی برحسب شتاب به ازای مقادیر مختلف ولتاژ اعمالی به صفحات پیزوالکتریک، حاصل از روابط یک و بیست‌وسه توسط نرم‌افزار متلب را نشان می‌دهد. همان‌طور که از نمودارها ملاحظه می‌شود جهت جابجایی جرم به‌اندازه سه میکرومتر و سوئیچ زنی بدون اعمال بایاس، شتاب ۵۳ جی لازم است. این مقدار شتاب با در نظر گرفتن وضعیت سری فنرهای داخلی با خارجی و همچنین با در نظر گرفتن کاهش حدود ده‌درصدی جرم ناشی از حذف جرم چارچوب در ناحیه پیزوالکتریک به دست می‌آید.

در رابطه (۲۰)، d_{31} ضریب پیزوالکتریک، $D_3(x)$ جابجایی لایه دی الکتریک در لایه پیزوالکتریک و ϵ_{33} ضریب نفوذپذیری است که از رابطه زیر به دست می‌آید [۱۹]:

$$D_3(x) = \epsilon_{33}(1 - K_{31}^2) \frac{V}{h_p} + \frac{\epsilon_{33} K_{31}^2}{d_{31} h_p} \int_p S_1(x, z) dz \quad (21)$$

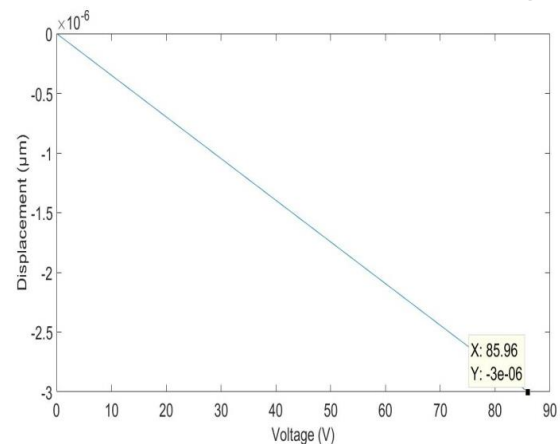
در رابطه بالا V ولتاژ اعمالی، h_p ضخامت لایه پیزو، K_{31} ضریب تزویج پیزوالکتریک و $S_1(x, z)$ استرین در جهت x است. سمبل p کرانه‌های انتگرال‌گیری در طول ضخامت لایه پیزوالکتریک است. با استفاده از روابط بالا رابطه ممان خمشی لایه پیزوالکتریک به‌صورت زیر است:

$$M_p(x) = b d_{31} \frac{V}{h_p} \int_p E_p(z - z_0) dz \quad (22)$$

با جایگذاری رابطه (۲۲) در رابطه (۱۴) رابطه ولتاژ برحسب جابجایی به دست می‌آید

$$V_p = \frac{8d_0 E I h_p}{l^2 b d_{31} \int_p E_p(z - z_0) dz} \quad (23)$$

با اعمال پارامترهای موجود در جدول یک نمودار شکل ۳ حاصل می‌شود. شکل ۳ نمودار جابجایی جرم برحسب ولتاژ اعمالی حاصل از رابطه بیست‌وسه بدون اعمال شتاب و با استفاده از نرم‌افزار محاسباتی متلب را نشان می‌دهد.

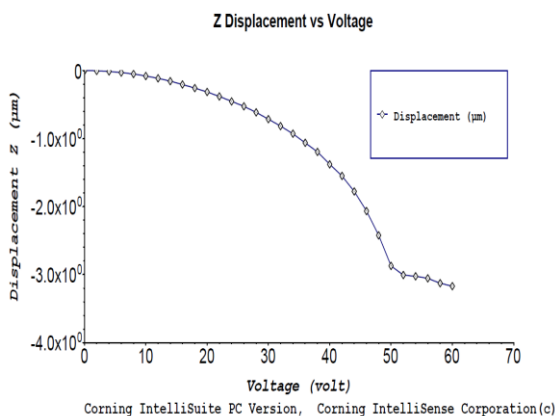


شکل ۳: نمودار جابجایی جرم برحسب ولتاژ اعمالی حاصل از رابطه بیست‌وسه بدون اعمال شتاب و با استفاده از نرم‌افزار محاسباتی متلب

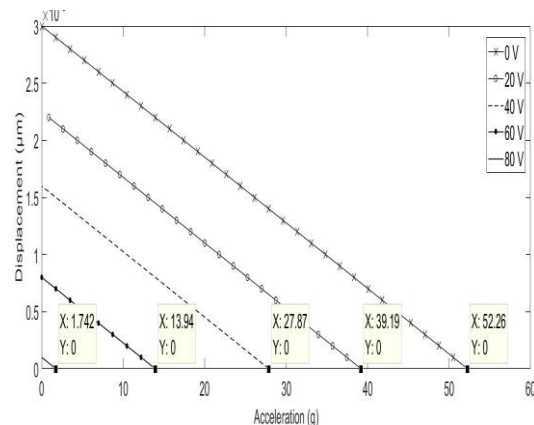
همان‌طور که از نمودار ملاحظه می‌شود با اعمال ولتاژ، فاصله اولیه بین جرم و نقطه اتصال در سطح ویفر جهت سنجش شتاب‌های کم کاهش می‌یابد. بطوریکه حداکثر ولتاژ موردنیاز جهت سنجش شتاب‌های زیر یک جی برابر ۸۷ ولت است.

۳-۳ نتایج محاسباتی شتاب اعمالی

نتایج جابجایی برحسب شتاب با در نظر گرفتن موقعیت اولیه جرم، در دو نمودار کلی نمایش داده شده است. نمودار شکل ۴ برای حالتی است



شکل ۷: نمودار جابجایی جرم برحسب ولتاژ اعمالی به شانه‌ها حاصل از شبیه‌سازی (حالتی که از متوقف کننده استفاده شده است)

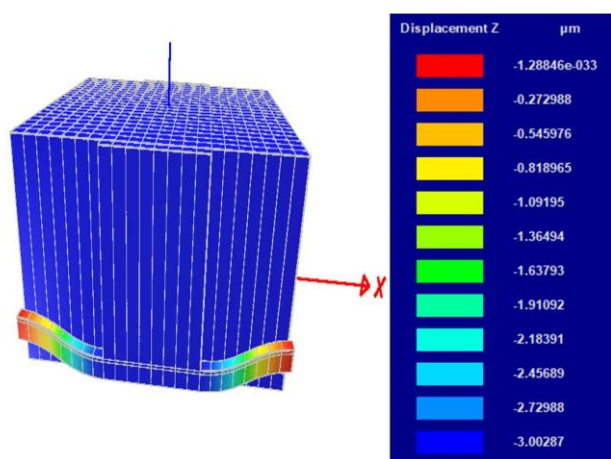


شکل ۵: نمودار جابجایی برحسب شتاب به ازای مقادیر مختلف ولتاژ اعمالی به صفحات پیزو با استفاده از نرم‌افزار محاسباتی متلب

۴-۲- شبیه‌سازی سوئیچ در ناحیه تحریک پیزوالکتریک

شکل ۸ شماتیک ساختار در حالت تحریک پیزوالکتریک و جابجایی سه میکرومتر ناشی از اعمال حداکثر ولتاژ ۸۰ ولت به صفحات پیزوالکتریک با استفاده از شبیه ساز اینتلیسویت را نشان می‌دهد.

نرم‌افزار اینتلیسویت مورد استفاده در این کار تحقیقی قادر به رسم نمودار در حوزه تحریک پیزوالکتریک نیست. به همین علت ولتاژهای گسسته از صفر تا هشتاد ولت به لایه پیزوالکتریک در نرم‌افزار اینتلیسویت اعمال و جابجایی‌های متناظر یادداشت می‌گردد. با انتقال داده‌ها به نرم‌افزار متلب نمودار جابجایی برحسب ولتاژ اعمالی مطابق شکل ۹ حاصل می‌گردد. نتایج نشان داده شده در شکل ۹ با نتایج حاصل از محاسبه که در شکل ۳ آورده شده است هم‌خوانی دارد.



شکل ۸: شماتیک ساختار در حالت تحریک پیزوالکتریک و جابجایی سه میکرومتر (ساختار جهت وضوح بیشتر در جهت Z بزرگ‌نمایی شده است)

۴-۳- شبیه‌سازی شتاب اعمالی

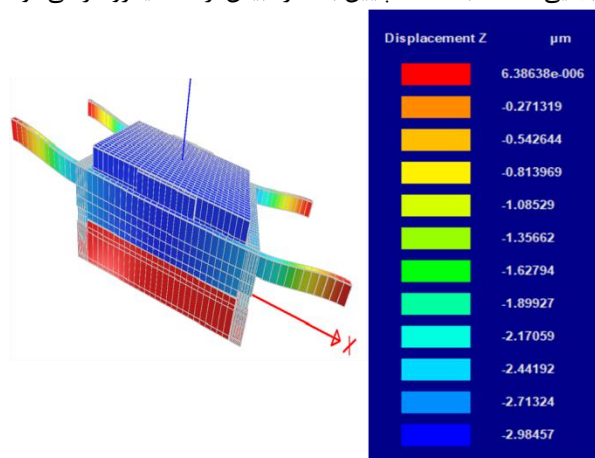
شکل ۱۰ نمودار جابجایی برحسب شتاب به ازای مقادیر مختلف ولتاژ اعمالی به شانه‌های تحریک الکترواستاتیک حاصل از شبیه‌سازی را

۴-۱- نتایج شبیه‌سازی تحریک‌ها و شتاب اعمالی

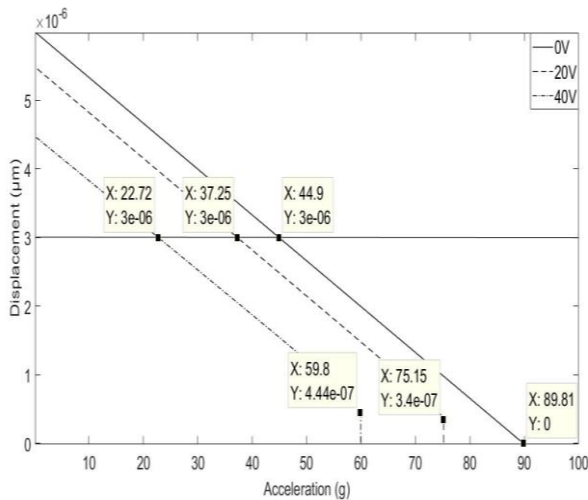
جهت تأیید محاسبات انجام گرفته در بخش‌های قبل، ساختار پیشنهادی با استفاده از نرم‌افزار اینتلیسویت شبیه‌سازی می‌گردد. شبیه‌سازی‌ها در دو مرحله انجام می‌گیرد. مرحله اول، شبیه‌سازی تحریک‌های الکترواستاتیک و پیزوالکتریک است. با توجه به این‌که از متوقف کننده جهت جداسازی دو تحریک کننده از هم استفاده شده است. لذا شبیه‌سازی‌های انجام گرفته برای تحریک‌های الکترواستاتیک و پیزوالکتریک به صورت مستقل از هم صورت می‌گیرد. مرحله دوم شبیه‌سازی شتاب اعمالی است.

۴-۱-۱- شبیه‌سازی سوئیچ در ناحیه تحریک الکترواستاتیک شانه‌ای

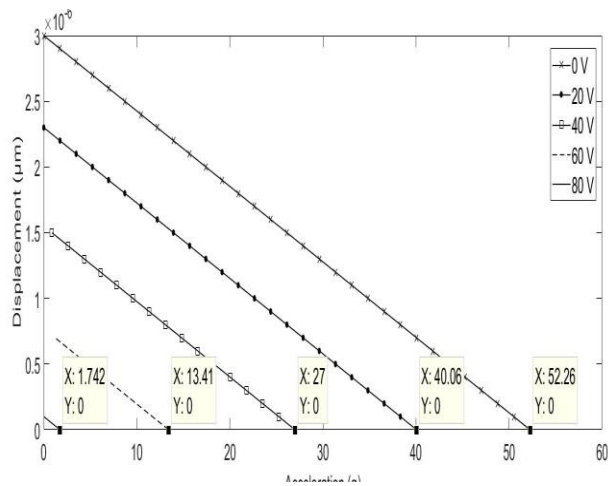
شکل ۶ شماتیک ساختار درحالی‌که شانه‌های متحرک بعد از سه میکرومتر جابجایی توسط متوقف کننده متوقف شده را نشان می‌دهد. شکل ۷ نمودار جابجایی جرم برحسب ولتاژ اعمالی را در حالی نشان می‌دهد که از متوقف کننده استفاده شده است. متوقف کننده مانع از جابجایی شانه‌ها به سمت پایین به اندازه بیش از سه میکرومتر می‌شود.



شکل ۶: شماتیک ساختار در حالتی که شانه‌های متحرک بعد از سه میکرومتر جابجایی توسط متوقف کننده متوقف شده است (ساختار جهت وضوح بیشتر در جهت Z بزرگ‌نمایی شده است)



شکل ۱۰: نمودار جابجایی برحسب شتاب به ازای مقادیر مختلف ولتاژ اعمالی به شانه‌ها حاصل از شبیه‌سازی

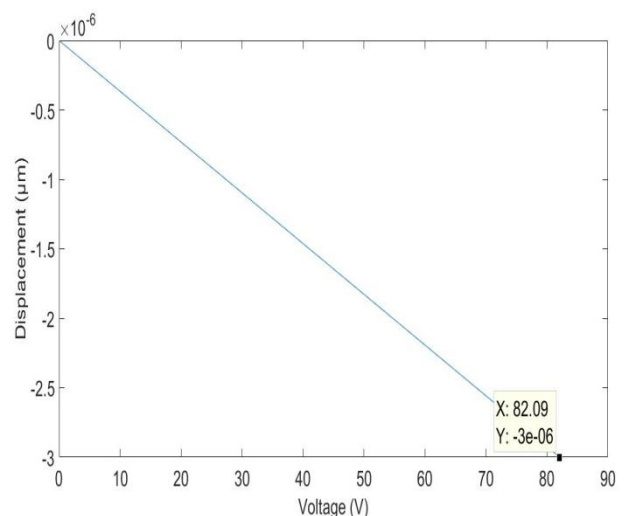


شکل ۱۱: نمودار جابجایی برحسب شتاب به ازای مقادیر مختلف ولتاژ اعمالی به صفحات پیرو حاصل از شبیه‌سازی

شکل ۱۱ نمودار جابجایی برحسب شتاب به ازای مقادیر مختلف ولتاژ اعمالی به صفحات لایه پیروالکتریک تا ۸۰ ولت، با استفاده از شبیه‌ساز اینتلیسویت را نشان می‌دهد. با مقایسه نمودار حالت بدون بایاس شکل ۱۱ حاصل از شبیه‌سازی با استفاده از نرم‌افزار Intellisuite با شکل ۵ که حاصل از محاسبه است اختلافی بین دو شکل ملاحظه نمی‌شود. چون مقادیر جرم و فنر برای این حالت دقیق می‌باشند. برای حالت با بایاس، جزئی خطا بین نتایج حاصل از شبیه‌سازی و محاسبات وجود دارد. در کل نتایج شبیه‌سازی با نتایج حاصل از محاسبات توسط نرم‌افزار متلب باهم، هم‌خوانی دارد. درعین حال درستی روابط استخراج‌شده را نشان می‌دهد.

شکل ۱۲ استرس واردشده به فنرهای داخلی تحت جابجایی سه میکرومتر را نشان می‌دهد. از روی شکل حداکثر استرس حدود ۳۹ مگا پاسکال است. با توجه به اینکه yield strength آلومینیوم ۲۸۰ مگا پاسکال است. لذا استرس واردشده به ساختار در محدوده مجاز است.

نشان می‌دهد. شتاب حاصل از شبیه‌سازی برای بدون بایاس جهت کلید زنی ۹۰ جی است. به عبارت دیگر برای آنکه جرم بتواند مسافت شش میکرومتری را طی کرده و پدهای روی ویفر را به هم وصل کند باید شتاب ۹۰ جی به جرم اعمال شود. با مقایسه حالت بدون بایاس شکل ۱۰ با شکل ۴ ملاحظه می‌شود که اختلاف 3g بین نتیجه حاصل از شبیه‌سازی و محاسبات وجود دارد. علت دو چیز است. اول اینکه اندازه جرم در طی مسیر شش میکرومتری و بعد از طی سه میکرومتر به علت ممانعت از حرکت شانه‌ها توسط متوقف کننده حدود ده درصد کاهش می‌یابد. این موضوع در شبیه‌سازی، منجر به افزایش میزان شتاب جهت کلید زنی می‌شود. از طرف دیگر فنریت معادل ناشی از شتاب، از سری بودن k_1 با k_2 حاصل می‌شود. در صورتی که در محاسبات برای کل مسیر k_2 در نظر گرفته شده است. خطای حاصل از تفاوت ذکرشده به گونه ایست که منجر به کاهش میزان شتاب جهت کلید زنی نسبت به حالت محاسباتی می‌شود. نهایتاً با توجه به دو مورد ذکرشده در ساختار پیشنهادی نتیجه حاصل از شبیه‌سازی به اندازه ۳ جی کمتر از نتیجه حاصل از روابط خواهد بود. تفاوت دیگر شکل ۱۰ با شکل ۴ مربوط به حالتی است که ولتاژ تحریک الکترواستاتیک اعمال شده است. در رسم نمودار شکل ۴ از رابطه دو استفاده شده است. در این رابطه چه برای حالت تحریک شانه‌ای و چه برای حالت صفحات موازی از اثرات لبه میدان (fringing field) صرف‌نظر شده است. این اثر در شبیه‌سازی باعث تقویت میدان الکتریکی و جابجایی نسبتاً بیشتر نسبت به نمودار شکل ۴ که ناشی از محاسبات است خود را نشان می‌دهد. در کل، نتایج شبیه‌سازی با نتایج حاصل از محاسبات توسط نرم‌افزار متلب تا حدود زیادی منطبق بر هم هستند. لازم به توضیح است که نمودار حاصل از شبیه‌سازی به علت فقدان قابلیت رسم نمودار جابجایی برحسب شتاب توسط نرم‌افزار شبیه‌ساز اینتلیسویت به طریق نقطه‌یابی و با استفاده از نرم‌افزار متلب رسم شده است.



شکل ۹: نمودار جابجایی جرم برحسب ولتاژ اعمالی حاصل از رابطه بیست‌وسه بدون اعمال شتاب حاصل از شبیه‌سازی

اندازه ξ که نسبت میرایی سیستم نامیده می‌شود یکی از عوامل مهم تعیین‌کننده در رفتار پاسخ گذرا است بطوریکه هرگاه اندازه نسبت میرایی بین صفر و یک باشد پاسخ گذرا نوسانی میرا و اگر بزرگ‌تر از یک باشد پاسخ فوق میرا خواهد بود. در کل، جابجایی جرم، ناشی از اندازه شتاب اعمالی و وضعیت پاسخ حالت گذرای سیستم است در حالی که پاسخ حالت گذرا، نوسانی میرا باشد در اندازه جابجایی ناشی از شتاب اعمالی اثر گذاشته و مقدار جابجایی بیشتر از مقداری خواهد بود که در حالت استاتیک مورد بررسی قرار گرفته است میزان تفاوت بین نتایج تحلیل‌های استاتیک و دینامیک به اندازه فرکانس رزونانس طبیعی سیستم و مدت زمان شتاب اعمالی (عرض نصف پریود شتاب) بستگی دارد. بطوریکه هرگاه زمان تناوب فرکانس رزونانس طبیعی سیستم به اندازه کافی کوچک‌تر از مدت زمان شتاب اعمالی باشد اثر پاسخ حالت گذرا در اندازه جابجایی جرم ناچیز خواهد بود. اگر پاسخ گذرای سیستم فوق میرا باشد تأثیری ناچیز در نتایج تحلیل استاتیک خواهد گذاشت.

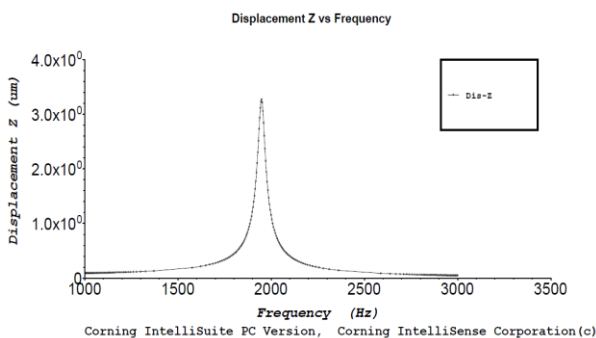
حال جهت بررسی اثر پاسخ گذرای سیستم در نتایجی که قبلاً به دست آمده است اندازه ξ برای ساختار پیشنهادی بر اساس رابطه (۲۹) محاسبه می‌شود [۲۰].

$$\xi = \frac{c}{2\sqrt{km}} \quad (29)$$

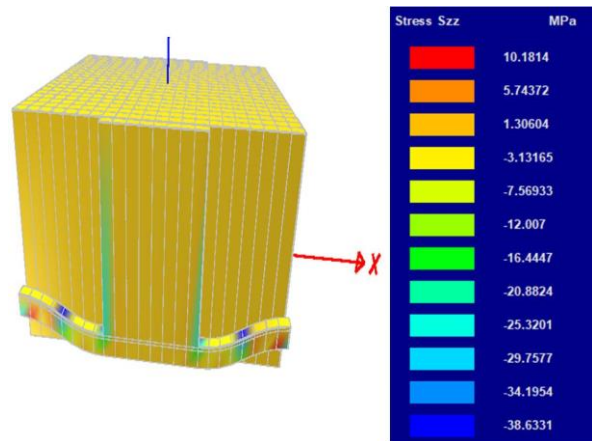
مقدار ضریب خفگی c نیز از رابطه (۳۰) قابل محاسبه است [۲۱].

$$c = \frac{\mu b^3}{3g_0} \quad (30)$$

در رابطه (۳۰) مقدار l و b به ترتیب طول و عرض جرم و g_0 فاصله جرم از الکتروود پایینی است. μ در رابطه اخیر ضریب چسبندگی سیال زیر جرم متحرک است و با توجه به اینکه سیال مورد نظر هوا و یا نیتروژن در نظر گرفته شده است مقدار آن برابر $\mu = 1.85 \times 10^{-5}$ است. با توجه به مقادیر موجود در جدول یک و روابط (۲۸) الی (۳۰) اندازه فرکانس رزونانس و مقدار ξ به ترتیب برابر ۱.۹ GHz و ۱۴ به دست می‌آید. شکل ۱۳ شبیه‌سازی انجام گرفته توسط نرم‌افزار اینتلیسویت جهت صحت سنجی فرکانس رزونانس است که مطابق با مقدار مورد محاسبه است.



شکل ۱۳: نمودار جابجایی نسبت به فرکانس با استفاده از شبیه‌سازی



شکل ۱۲: استرس وارد شده به ساختار در حالت تحریک پیزوالکتریک و جابجایی سه میکرومتر

۵- تحلیل دینامیکی

تاکنون بررسی‌های انجام گرفته بر اساس تحلیل استاتیکی ساختار بوده است. نظر به اینکه شتاب در یک بازه زمانی اعمال می‌شود. بطوریکه ابتدا از صفر شده و بعد از گذشت زمان هرچند بسیار کم به مقدار مورد نظر رسیده و سپس با گذشت زمان از بین می‌رود. از طرف دیگر جرم موجود در ساختار، قبل از برخورد با الکتروود پایینی یک وضعیت گذرا را طی می‌کند. لذا لازم است که اثر پاسخ گذرای سیستم به شتاب اعمالی بر عملکرد سوئیچ مورد بررسی قرار گیرد. شتاب اعمالی را می‌توان به صورت یک نیم موج سینوسی مدل کرد.

رفتار دینامیکی ساختار با رابطه (۲۴) بیان می‌شود [۲۰].

$$m \frac{d^2 z}{dt^2} + c \frac{dz}{dt} + kz = f_{ext}$$

در این رابطه m جرم قسمت متحرک ساختار، c ضریب خفگی، k ضریب فنریته معادل در جهت z و f_{ext} نیروی حاصل از شتاب اعمالی $a(t)[u(t) - u(t - \tau)]$ در زمان τ و در جهت z است که به صورت رابطه (۲۵) بیان می‌شود.

$$f_{ext} = ma(t)[u(t) - u(t - \tau)] \quad (25)$$

رابطه (۲۴) را می‌توان بصورت رابطه (۲۶) نوشت.

$$\frac{d^2 z}{dt^2} + 2\alpha \frac{dz}{dt} + \omega_n^2 z = a(t)[u(t) - u(t - \tau)] \quad (26)$$

در این رابطه α ضریب میرایی و ω_n فرکانس رزونانس طبیعی سیستم می‌باشند که به ترتیب به صورت زیر تعریف می‌شوند.

$$\alpha = \xi \omega_n \quad (27)$$

$$\omega_n = \sqrt{\frac{k}{m}} \quad (28)$$

۷- مقایسه

جدول ۲ معدود کارهای انجام شده در رابطه با سوئیچ‌های عمل کننده با شتاب را نشان می‌دهد. در همه سوئیچ‌ها ولتاژ تحریک، از نوع الکترواستاتیک است. در کار ارائه شده توسط سانگ گو [۲] از سه سوئیچ با جرم و فنرهای متفاوت جهت کلید زنی با سه شتاب متفاوت استفاده شده است. در سه کار بعدی [۸ و ۹ و ۱۰]، شتاب‌های متفاوت با تنظیم فاصله بین دونقطه اتصال، میسر گردیده است. در کار انجام شده توسط کومر [۱۰] تنظیم فاصله به صورت دیجیتالی انجام گرفته است. بطوریکه عمل کلید زنی تنها برای چهار شتاب امکان پذیر گردیده است. در دو کار بعدی انجام گرفته توسط کیم و همکاران [۸ و ۹] تنظیم فاصله به صورت پیوسته است. مزیت کار پیشنهادی، وسیع بودن دامنه تنظیم شتاب نسبت به کارهای دیگر است.

جدول ۲: مقایسه کارهای انجام گرفته در رابطه با سوئیچ‌های شتاب

تنظیم شده

پژوهشگر	نوع تنظیم	نوع تحریک	جهت حرکت	محدوده شتاب (g)	ولتاژ بیشینه (ولت)	نتایج
سانگ گو [۲]	گسسته (سه سوئیچ)	الکترو استاتیک	عمودی	۱۴ ۳۵ ۴۷	۳۲ ۵۶ ۷۶/۵	ساخت
کومر [۱۰]	دیجیتال	الکترو استاتیک	افقی	۰ ۰/۳۸ ۰/۶۷ ۱	۴۷	ساخت
کیم [۸]	پیوسته	الکترو استاتیک	افقی	۱۱-۳۰	۳۰	ساخت
کیم [۹]	پیوسته	الکترو استاتیک	افقی (دو جهت)	۲-۳۰	۳۰	ساخت
این کار تحقیقی	پیوسته	الکترو استاتیک و پیرو الکتریک	عمودی	۰-۹۰	۵۰ و ۸۰	طراحی و شبیه سازی

۸- پروسه ساخت

مراحل ساخت طرح پیشنهادی در شکل ۱۴ آورده شده است. قبل از توضیح مراحل ساخت، ابتدا تصویر کلی از مواد بکار رفته در پروسه‌ها، روش‌ها و دستگاه‌های موردنیاز و مشکلات نمایش سه بعدی بعضی مراحل، توضیح داده می‌شود.

چهار ماده اصلی استفاده شده در پروسه ساخت عبارتند از: ۱- ماده پیروالکتریک ZnO به عنوان یکی از تحریک‌های موردنظر ۲- پلیامید (PI-2562 polyimide) به عنوان لایه قربانی ۳- آلومینیوم، به عنوان عنصر اصلی تشکیل دهنده ساختار ۴- ماده ظهور فتورزیست، مورد استفاده در پروسه لیتوگرافی.

لایه نشانی پیروالکتریک با کیفیت خوب (درجه خلوص بالا، مقاومت بالا...) از نکات مهم پروسه ساخت پیشنهادی است. دو نوع متفاوت پیروالکتریک‌ها وجود دارند که یک نوع از آن‌ها مانند PZT ولتاژ کار

نظر به اینکه مقدار ξ به دست آمده بزرگ تر از یک است. بنابراین پاسخ گذرای سیستم نوسانی میرا نیست. این پاسخ به صورت فوق میرا است. در نتیجه پاسخ حالت گذرا به ازای یک شتاب مشخص، تأثیری در اندازه جابجایی نخواهد داشت.

۶- رزولوشن و دقت

رزولوشن در یک حس گر به معنی کوچک ترین تغییری است که یک حس گر می تواند شناسایی کرده و اندازه گیری کند. اندازه رزولوشن به دقت اندازه گیری بستگی دارد. تعیین کمترین شتاب ممکن اعمالی به ساختار پیشنهادی جهت کلید زنی، به معنی تعیین رزولوشن ساختار می باشد. بدین مذکور، بایستی جرم متحرک در کمترین فاصله ممکن از پدهای اتصال تنظیم گردد. تنظیم کمترین فاصله با اعمال دو ولتاژ عملی می شود. ابتدا با اعمال ولتاژ الکترواستاتیک حداکثر، چهار چوب و جرم متصل به آن به پایین حرکت کرده سپس توسط متوقف کننده‌ها متوقف شده و در فاصله سه میکرومتری از پدهای اتصال قرار می گیرد. سپس با حفظ ولتاژ الکترواستاتیک ولتاژ دیگری به صفحات پیرو اعمال می شود. مقدار ولتاژ دوم به گونه ایست که جرم را در مکان موردنظر و در کمترین فاصله از پدهای اتصال قرار می دهد. جهت تعیین کمترین فاصله موردنظر، بایستی اطلاعات دقیقی از دامنه ناهمواری های موجود در سطح بالایی پدهای اتصال و سطح زیرین جرم متحرک در دست باشد. کار تحقیقی ارائه شده در مرجع [۲۲] به مطالعه ناهمواری های ایجاد شده بر روی سطح آلومینیوم توسط دستگاه کندو پاش (sputter) پرداخته است. بر اساس بررسی انجام گرفته و با کنترل پارامترهای لایه نشانی دستگاه کندو پاش، دامنه ناهمواری های سطح آلومینیوم را به حداقل مقدار ممکن یعنی سه نانومتر رسانده اند. ناهمواری های مذکور جزئی از ضخامت لایه نشانی شده به حساب می آیند. عدم توانایی در تشخیص دقیق اندازه دامنه ناهمواری، ضریب سختی فنرها و اندازه جرم، تعیین کننده دقت است. با توجه به اینکه جرم متحرک از طریق آبرکاری لایه نشانی شده است دانستن مقدار دقیق دانسیته حجمی در افزایش دقت مؤثر است. بر اساس مرجع [۲۳] مقدار دقیقی برای دانسیته حجمی آلومینیوم به دست آمده است. با توجه به کوچک بودن ابعاد فنرها، اثر تغییر در ابعاد در اندازه ضریب فنریت قابل اغماض نیست. با وجود این، طی یک آزمایش می توان مقدار دقیق ضریب فنریت بعد از ساخت را به دست آورد. اندازه تنظیم و تشخیص ناهمواری موجود در سطوح آلومینیوم اثر مستقیم در اندازه رزولوشن ساختار دارد. حال اگر خطای ناشی از تنظیم و تشخیص برای حداقل دامنه ناهمواری را یک نانومتر فرض کنیم و حداقل دقت ده درصد برای کمترین شتاب مدنظر باشد. در آن صورت حداقل فاصله ممکن بین سطح بالایی پدهای پایین و سطح پایینی جرم متحرک با در نظر گرفتن اینکه ناهمواری ها جزئی از ضخامت لایه نشانی شده می باشند باید ده نانومتر گردد. حداقل شتاب متناظر جهت کلید زنی با در نظر گرفتن فاصله مذکور و مشخص شدن مقادیر دقیق ضریب فنریت و دانسیته حجمی، برابر یک صد و پنجاه میلی جی است.

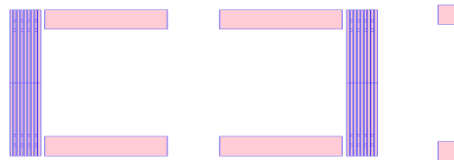
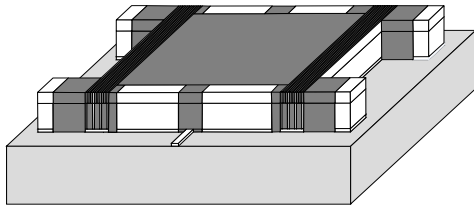
به ضخامت $6\mu\text{m}$ نشانده شده و لیتوگرافی می‌شود سپس الکتروپلیتینگ آلومینیوم به ضخامت $6\mu\text{m}$ انجام می‌گیرد. توضیحا اینکه ارتفاع $6\mu\text{m}$ فاصله ایست که برای حداکثر جابجایی جرم در نظر گرفته شده است. در مرحله سوم هدف اضافه کردن شانه‌های متحرک بالایی و هم‌زمان ادامه افزایش ارتفاع شانه‌های ثابت پایینی، انکورها و متوقف کننده‌ها است. لذا مطابق شکل ۱۴ - ج ابتدا لایه نشانی آلومینیوم به ضخامت $1\mu\text{m}$ توسط دستگاه sputter و یا evaporator صورت گرفته و به دنبال آن لیتوگرافی و لایه‌برداری انجام می‌شود و سپس جهت افزایش ارتفاع قالب بیرونی و همچنین پر کردن فاصله‌های خالی بین شانه‌ها پلیامید (PI-2562) نشانده و برای یکسان‌سازی سطح بین پلیامید و آلومینیوم عمل پولیشینگ (cmp) روی پلیامید انجام می‌گیرد. توضیحا اینکه $1\mu\text{m}$ اندازه هم‌پوشانی بین شانه‌های متحرک و ثابت است. در مرحله چهارم به‌منظور افزایش ارتفاع شانه‌های متحرک، انکورها و متوقف کننده‌ها با استفاده از روش الکتروپلیتینگ و به کمک پلیامید به‌عنوان لایه قربانی و قالب، لایه نشانی آلومینیوم به داخل قالب به ضخامت $3\mu\text{m}$ مطابق شکل ۱۴ - د انجام می‌شود. مرحله پنجم نیز به افزایش ارتفاع شانه‌های متحرک و انکورها، منهای متوقف کننده‌ها با استفاده از روش الکتروپلیتینگ و به کمک پلیامید به‌عنوان لایه قربانی و قالب و لایه نشانی آلومینیوم داخل قالب مطابق شکل ۱۴ - ه اختصاص داده شده است. ارتفاع لایه نشانی در این مرحله $3\mu\text{m}$ است. ضخامت آلومینیوم این مرحله به همراه ضخامت آلومینیوم مرحله قبل که جمعاً $6\mu\text{m}$ است ارتفاع شانه‌های متحرک غیر همپوشانی شده است. در مرحله ششم فنرهای داخلی، جرم متحرک و صفحه وصل کننده شانه‌های متحرک به همدیگر ایجاد می‌شود. در این مرحله مطابق شکل ۱۴ - و ابتدا لایه نشانی آلومینیوم به ضخامت $1.1\mu\text{m}$ توسط دستگاه sputter و یا evaporator صورت گرفته و به دنبال آن لیتوگرافی و لایه‌برداری انجام می‌شود و سپس جهت افزایش ارتفاع قالب بیرونی و همچنین پر کردن فاصله‌های خالی بین شانه‌ها پلیامید (PI-2562) نشانده و برای یکسان‌سازی سطح بین پلیامید و آلومینیوم عمل پولیشینگ (cmp) روی پلیامید انجام می‌گیرد. فنرهای فلزی داخلی ایجاد شده به‌عنوان الکتروپایینی تحریک پیزوالکتریک استفاده خواهند شد. با توجه به اتصال فلزی شانه‌های متحرک و فنرهای داخلی، چنانچه در پروسه‌های بعدی نشان داده خواهد شد از طریق انکور شماره ۳، ولتاژ صفر ولت به شانه‌های متحرک تحریک الکترواستاتیک و الکتروپایینی تحریک پیزوالکتریک اعمال خواهد گردید.

مرحله هفتم لایه نشانی پیزوالکتریک به ضخامت $0.4\mu\text{m}$ به روش lift off مطابق شکل ۱۴ - ز است. مرحله هشتم لایه نشانی فلز به ضخامت $0.7\mu\text{m}$ و لیتوگرافی و لایه‌برداری جهت هم ضخامت کردن بیم حامل پیزو مطابق با مرحله هفتم و مرحله‌های بعد است. این مرحله در شکل ۱۴ - ک نشان داده شده است. در این مرحله جهت پوشش کناره‌های بیرونی، پلیامید به ضخامت $0.7\mu\text{m}$ نشانده شده سپس لیتوگرافی و لایه‌برداری می‌شود. مرحله نهم لایه نشانی عایق به ضخامت $0.1\mu\text{m}$ به

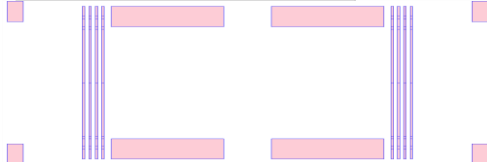
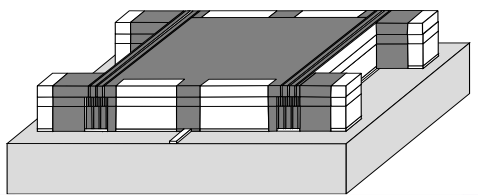
پایین ولی پروسه ساخت پیچیده‌ای دارند و نوع دوم مانند ZnO دارای ولتاژ کار بالا ولی با امکان لایه نشانی راحت نسبت به PZT می‌باشند. در ساختار پیشنهادهی پیزوالکتریک ZnO به علت راحتی ساخت در مقایسه با PZT انتخاب گردید. لایه نشانی ZnO را می‌توان با استفاده از دستگاه کندو پاش و target مربوطه طی یک مرحله انجام داد [۲۴].

دلیل استفاده از پلیامید (PI-2562 polyimide) به‌عنوان لایه قربانی آن است که پلیامید مذکور این قابلیت را دارد که در پروسه‌های متوالی، لایه پلیامید بر روی لایه پلیامید قبلی افزوده شود بدون آنکه اضافه کردن لایه جدید که همراه با دما است لطمه‌ای به کیفیت لایه‌های قبلی پلیامید بزند. از پلیامید مذکور در کارهای تحقیقاتی مختلف به‌عنوان لایه قربانی که به‌صورت متوالی بر روی هم انباشته می‌شوند استفاده شده است [۲۵]. درنهایت و در توضیح مراحل ساخت، هر مرحله از دو شکل که یکی سه‌بعدی و دیگری دوبعدی و نگاه از بالا است استفاده شده است. به‌طوری‌که این دو شکل مکمل یکدیگر در درک پروسه‌ها هستند. علت دیگر استفاده هم‌زمان از دو شکل به سبب آن است که نمایش اتصالات الکتریکی در شکل سه‌بعدی بسیار سخت است. لذا جزئیات اتصالات در شکل دوبعدی در شکل‌های ۱۴- م و ۱۴- ن آورده شده است.

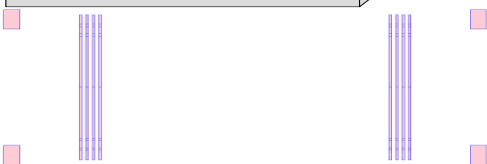
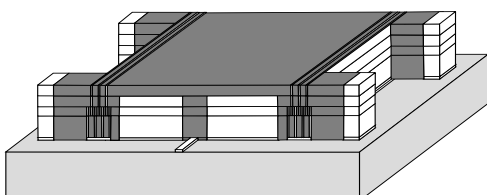
ابتدا ایجاد سطح پایینی شانه‌های ثابت، متوقف کننده‌ها، بایاس لاین، پدهای اتصال و انکورها با لایه نشانی آلومینیوم به ضخامت $0.1\mu\text{m}$ به روش lift off مطابق شکل ۱۴- الف بر روی ویفر سیلیکانی با مقاومت اهمی بالا و یا ویفر شیشه‌ای ایجاد می‌شود. استفاده از ویفر سیلیکانی با مقاومت اهمی بالا و یا ویفر شیشه‌ای به علت آن است که اتصال الکتریکی بین پدها و بایاس لاین صورت نگیرد. یک روش دیگر نیز می‌تواند ایجاد یک‌لایه ایزولاسیون از جنس عایق بین ویفر و فلز نشانده شده در مراحل بعدی است. نظر به خاصیت قلبیایی ماده ظهور فتورزیست، اگر محلول مذکور مدت‌زمانی طولانی‌تر از حد معمول در تماس با فلزاتی با دانسیته حجمی کم، نظیر آلومینیوم باشد به آن‌ها صدمه می‌زند. با توجه به اینکه در مراحل مختلف از فلز آلومینیوم استفاده شده است لذا در لیتوگرافی لایه‌های بالاتر، لایه‌های پایینی تر باید از محلول developer حفاظت شوند. با توجه به این‌که در هر بار لایه نشانی، قطعه از طرف سطح بالایی با آخرین لایه کاملاً پوشانده می‌شود بنابراین امکان نفوذ محلول developer از طریق سطح بالایی به لایه‌های زیرین وجود ندارد. دیواره‌های کناری قطعه، از نقاطی است که در معرض محلول مذکور است. لذا برای پوشاندن نقاط مذکور از پلیامید (PI-2562 polyimide) به‌عنوان قالب بیرونی در پروسه‌ها استفاده خواهد شد. لازم به توضیح است که جهت وضوح در نمایش پروسه‌ها، پوشش کناره‌های بیرونی در شکل‌ها آورده نشده است. در این مرحله نیز لایه پلیامید جهت ایجاد قالب بیرونی به‌اندازه $0.1\mu\text{m}$ نشانده، سپس لیتوگرافی و لایه‌برداری می‌شود. در مرحله بعد و مطابق شکل ۱۴- ب هدف ایجاد شانه‌های ثابت پایینی و ضخامت دادن به آن‌ها، ضخامت دادن به متوقف کننده‌ها و انکورها با استفاده از روش آبکاری (electroplating) است. به همین منظور ابتدا پلیامید (PI-2562 polyimide) به‌عنوان قالب و لایه قربانی



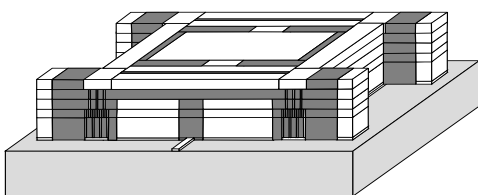
ج- لایه نشانی آلومینیوم، لیتوگرافی و لایه برداری



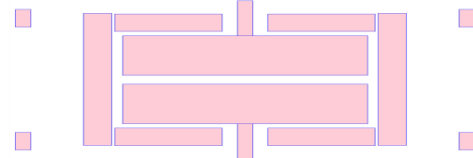
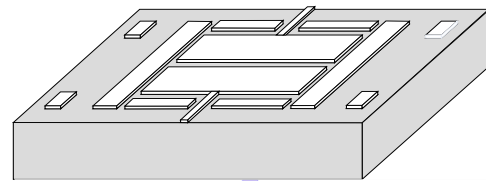
د- ایجاد قالب به کمک پلیماید و سپس لایه نشانی آلومینیوم به داخل قالب به روش آبکاری جهت افزایش ارتفاع شانه‌های متحرک، انکورها و متوقف کننده‌ها



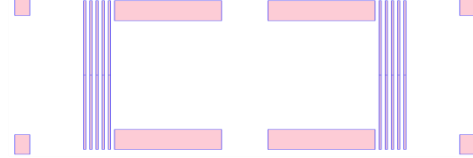
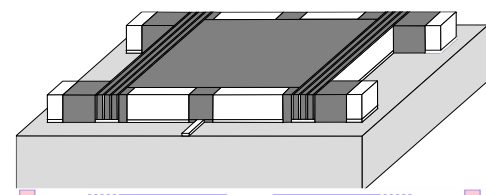
ه- ایجاد قالب به کمک پلیماید و سپس لایه نشانی آلومینیوم به داخل قالب به روش آبکاری جهت افزایش ارتفاع شانه‌های متحرک، انکورها منهای متوقف کننده‌ها



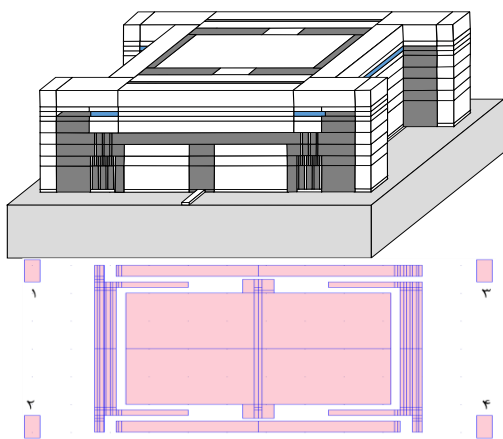
روش lift off جهت جلوگیری از افزایش ضخامت نیمه بدون پیروی بیم و همچنین ایزوله کردن الکتروود بالایی پیرو از شانه‌های متحرک و جلوگیری از تداخل ولتاژهای بایاس شانه‌ها و پیرو مطابق شکل ۱۴-ل است. مرحله ده لایه نشانی آلومینیوم به ضخامت 0.4um به روش lift off جهت ایجاد الکتروود بالایی و بردن خط خنثی به وسط لایه پیروالکتتریک مطابق شکل ۱۴-م است. در این مرحله جداسازی ولتاژهای اعمالی به لایه پیروالکتتریک و شانه‌های متحرک صورت می‌گیرد. در این مرحله نیز جهت پوشش کناره‌های بیرونی پلیماید به ضخامت 0.5um که برابر با مجموع ضخامت لایه‌های نهم و دهم است نشانده شده سپس لیتوگرافی و لایه برداری می‌شود. در مرحله آخر لایه نشانی فلز به ضخامت 4um جهت ایجاد فنرهای بیرونی انجام، لیتوگرافی و لایه برداری می‌شود. سپس جهت پوشش کناره‌های بیرونی، فنرهای بیرونی و چارچوب از پلیماید به ضخامت 4um به عنوان قالب استفاده می‌شود. در نهایت لایه نشانی آلومینیوم به ضخامت 18um با استفاده از روش electroplating جهت افزایش ضخامت جرم متحرک و سپس برداشتن لایه پلیماید با استفاده از روش (ashing) مطابق شکل ۱۴-ن انجام می‌گیرد.



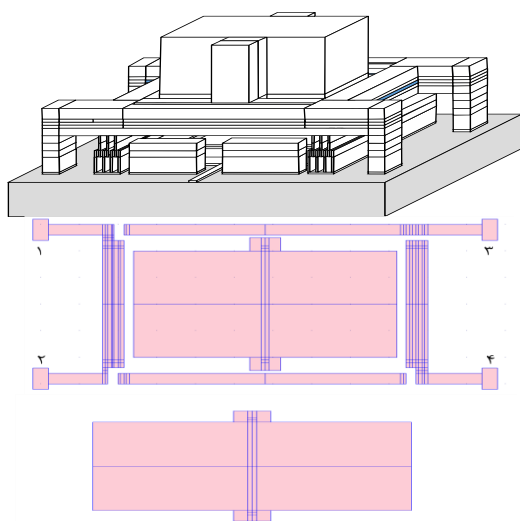
الف- لایه نشانی آلومینیوم به روش lift off جهت ایجاد سطح پایینی شانه‌های ثابت، متوقف کننده‌ها، بایاس لاین، پدهای اتصال و انکورها



ب- ایجاد شانه‌های ثابت پایینی و ضخامت دادن به آن‌ها، ضخامت دادن به متوقف کننده‌ها و انکورها با استفاده از روش آبکاری



م- لایه نشانی آلومینیوم به روش lift off

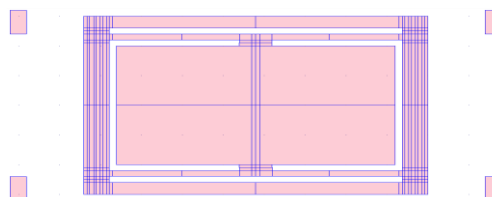


ن- لایه نشانی آلومینیوم به روش آبرکاری و سپس برداشتن لایه پلیماید به منظور رها سازی جرم متحرک

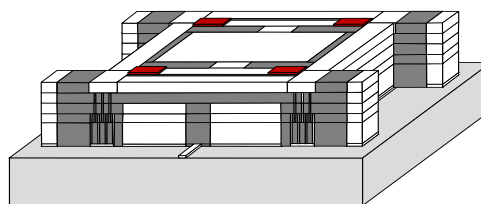
شکل ۱۴: مراحل ساخت طرح پیشنهادی

۹- نتیجه

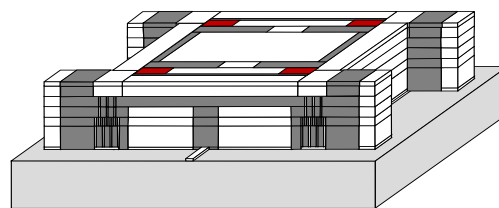
در این مقاله برای اولین بار تواما از دو تحریک الکترواستاتیک و پیزوالکتریک جهت تنظیم سوئیچ عمل کننده با شتاب استفاده گردید. استفاده از تحریک الکترواستاتیک شانه‌ای به علت رخداد پدیده پایین کش در فاصله‌ای دورتر نسبت به ساختار با تحریک الکترواستاتیک موازی، سبب افزایش محدوده شتاب موردسنجش گردید. استفاده تواما از دو تحریک نیز علت دیگر افزایش محدوده تنظیم در محدوده شتاب صفر الی نود جی بود. از طرف دیگر استفاده از تحریک پیزوالکتریک امکان سنجش شتاب‌های بسیار کم زیر یک جی جهت سوئیچ زنی را فراهم کرد. حداکثر ولتاژهای اعمالی به تحریک الکترواستاتیک شانه‌ای و پیزوالکتریک به ترتیب ۵۰ و ۸۰ ولت به دست آمد که با توجه به محدوده جابجایی نسبتاً بزرگ جرم، مقادیر قابل قبولی است. همچنین



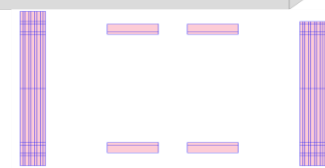
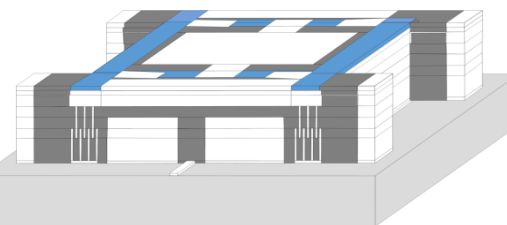
و- لایه نشانی آلومینیوم، لیتوگرافی و لایه برداری به منظور ایجاد فنرهای داخلی، جرم متحرک و صفحه وصل کننده شانه‌های متحرک به همدیگر و افزایش ارتفاع قالب بیرونی



ز- لایه نشانی پیزوالکتریک با روش lift off



ک- لایه نشانی آلومینیوم، لیتوگرافی و لایه برداری جهت هم ضخامت کردن بیم حامل پیزو مطابق با مرحله هفتم و مرحله‌های بعد



ل- لایه نشانی عایق به روش lift off

- روابط حاکم بر جابجایی جرم به ازای ممان خمشی ناشی از تحریک پیزوالکتریک برای ساختار پیشنهادی استخراج گردید. جهت صحت سنجی، ساختار از دو طریق محاسباتی توسط نرم‌افزار متلب و شبیه سازی توسط اینتلیسویت مورد بررسی قرار گرفت و نتایج تقریباً یکسانی را داد.
- مراجع**
- [1] W. D. Frobenius, S. A. Zeitman, M. H. White, D. D. O'Sullivan, and R. G. Hamel, "Microminiature ganged threshold accelerometers compatible with integrated circuit technology," *Electron Devices, IEEE Transactions on*, vol. 19, pp. 37-40, 1972.
- [2] J. Sang Go, Y. Ho Cho and K. Park, "Snapping microswitches with adjustable acceleration threshold," *Sensors and Actuators A: Physical*, 54, pp. 579-583, 1996.
- [3] X. Zhanwen, Z. Ping, N. Weirong, D. Liqun and C. Yun, "A novel MEMS omnidirectional inertial switch with flexible electrodes," *Sensors and Actuators A: Physical*, 212, pp.93-101, 2014.
- [4] J. Zhao, J. Jia and G. Chen, "A novel MEMS parallel-beam acceleration switch," In *Mechatronic and Embedded Systems and Applications, Proceedings of the 2nd IEEE/ASME International Conference on Mechatronics and Embedded Systems and Applications*, pp. 1-5, Beijing, China, 2006.
- [5] J.S. Go, Y.H. Cho, and B.M. Kwak, "Acceleration microswitches with adjustable snapping threshold," *Proceedings of the International Solid-State Sensors and Actuators Conference - TRANSDUCERS '95*, vol. 2, pp. 691-694, Stockholm, Sweden, 1995.
- [6] Z. Yang, G. Ding, H. Wang, H. Cai and X. Zhao, "Modeling, simulation and characterization of a micromachined acceleration switch with anti-stiction raised strips on the substrate," *IEEE Transactions on Components, Packaging and Manufacturing Technology*, 1(8), pp.1195-1204, 2011.
- [7] O. Sidek, M.M. Nawi and M.A. Miskam, "Analysis of low-g capacitive cantilever-mass micro-machined accelerometers," *International Journal of Engineering & Technology IJET-IJENS*, 10, p.141, 2010.
- [8] H. Kim, Y. Tang, Y. Kim and J. Kim, "MEMS acceleration switch capable of increasing threshold acceleration." *Electronics Letters*, vol. 48, no. 25 pp. 1614-1616, 2012.
- [9] H. Kim, Y. H. Jang, Y. K. Kim and J. M. Kim, "MEMS acceleration switch with bi-directionally tunable threshold," *Sensors and Actuators A: Physical*, 208, pp.120-129, 2014.
- [10] V. Kumar, R. Jafari and S. pourkamali, "Ultra-low power digitally operated tunable MEMS accelerometer," *IEEE Sensors Journal*, vol. 16, pp. 8715 – 8721, 2016.
- [11] Z. Y. Guo, Z. C. Yang, L. T. Lin, Q. C. Zhao, H. T. Ding, X. S. Liu, and G. Z. Yan, "Design, fabrication and characterization of a latching acceleration switch with multi-contacts independent to the proof-mass," *Sensors and Actuators A: physical*, 166(2), pp.187-192, 2011.
- [12] S. Liu, Y. Hao, S. Wang and D. Li, "MEMS-based low-g inertial switch," *Sensors & Transducers*, 176(8), pp.78, 2014.
- [13] L.J. Currano, M. Yu and B. Balachandran, "Latching in a MEMS shock sensor: Modeling and experiments," *Sensors and Actuators A: Physical*, 159(1), pp.41-50, 2010.
- [14] K. Yoo and J. Kim, "A novel configurable MEMS inertial switch using microscale liquid-metal droplet," *IEEE 22nd International Conference on Micro Electro Mechanical Systems* pp. 793-796, 2009.
- [15] W. Chen, Y. Wang, B. Zhu, G. Ding, H. Wang and Z. Yang, "A laterally driven micromechanical inertial switch with a compliant cantilever beam as the stationary electrode for prolonging contact time," *J. Micromech. Microeng.*, vol. 24, no. 6, 065020 (10pp), 2014.
- [16] G. K. Fedder, *Simulation of microelectromechanical systems*, Ph.D. Thesis, University of California at Berkeley, 1994.
- [17] V. P. Jaeklin, C. Linder, N. F. de Rooij and J. M. Moret, "Micromechanical comb actuators with low driving voltage," *J. Micromech. Microeng.*, vol. 2, no. 4, pp. 250-255, 1992.
- [18] W. C. Young and R. G. Budynas, *Roark's formulas for stress and strain*, New York: McGraw-Hill, 2002.
- [19] G. Klaasse, R. Puers and H. A. C. Tilmans, "Piezoelectric versus electrostatic actuation for a capacitive RF-MEMS switch. *Proc. SPIE*, pp.631-634, 2002.
- [20] W. Weaver, S. P. Timoshenko, and D. H. Young, *Vibration problems in engineering*, 5th edition, John Wiley & Sons, New York, 1990.
- [21] M. Bao and H. Yang, "Squeeze film air damping in MEMS," *Sensors and Actuators A: Physical*, 136, pp.3-27, 2007.
- [22] M. Muralidhar, G. Vijaya, M. S. Krupashankara, B. K. Sridhara, and T. N. Shridhara, "Studies on nanostructure aluminum thin film coatings deposited using DC magnetron sputtering process," *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering*, pp. 1-9, 2016.
- [23] Alumiplate, *Physical and mechanical properties of high purity electroplated aluminum*, <https://www.alumiplate.com/coating/properties/>.
- [24] J. Molarius, J. Kaitila, T. Pensala and M. Yelilammi, "Piezoelectric ZnO films by r.f. sputtering," *Journal of Material Science: Materials in Electronics*, 14, pp. 431-435, 2003.
- [25] D. H. Kim, M. W. Kim, J. W. Jeon, K. S. Lim and J. B. Yoon, "Modeling, design, fabrication and demonstration of a digital micromirror with interdigitated cantilevers," *Journal of Microelectromechanical Systems*, vol. 18, no. 6, pp. 1382-1395, 2009.
- [۲۶] علیرضا شمسی، سعید دل آرام فریمانی، احمد عقیفی «استفاده از روش لیتوگرافی نرم جهت ایجاد میکرو ساختارها روی بستر آبدوست شده پلیمر PMMA»، *مجله مهندسی برق دانشگاه تبریز*، شماره ۲، دوره ۴۶، صفحه ۱۳۳-۱۲۷، ۱۳۹۵.
- [۲۷] نیما طالبزاده، مزدک راد ملکشاهی، هادی ولادی، «ارائه روش نوین برای ساخت یک ریز مخلوط گر الکترواستاتیکی با الکترودهایی در دو سمت برای کاربری زیست‌فناوری»، *مجله مهندسی برق دانشگاه تبریز*، شماره ۱، دوره ۴۶، صفحه ۲۶۵-۲۵۵، ۱۳۹۵.