

## ساخت میکروعملگر الکترواستاتیکی با استفاده از پلیمر SU-8 جهت استفاده در ادوات MEMS با دیافراگم پیوسته

مهرناز اسفندیاری<sup>۱</sup>، رضا اسدی<sup>۲</sup>، پیام حیدری<sup>۳</sup>، علیرضا شمس<sup>۴</sup>

۱ کارشناسی ارشد برق الکترونیک، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، me\_esfandiari2000@yahoo.com

۲ استادیار دانشکده برق الکترونیک دانشگاه صنعتی مالک اشتر

۳ استادیار دانشکده مکانیک دانشگاه آزاد اسلامی واحد رودهن

۴ کارشناسی ارشد برق الکترونیک، دانشگاه صنعتی مالک اشتر

تاریخ دریافت: ۹۲/۴/۲۲ تاریخ پذیرش: ۹۴/۵/۱۷

## چکیده

در این مقاله روشی نوین جهت ساخت میکروعملگر الکترواستاتیکی با دیافراگمی کاملاً پیوسته جهت استفاده در قطعاتی بر مبنای حرکت دیافراگم متحرک با استفاده از مواد پلیمری و میکرو ماشینکاری ارائه شده است. دقت بالا و ساده‌تر بودن فرآیند ساخت، محرک‌های الکترواستاتیکی را به گزینه مطلوبی برای ساخت محرک، در سیستم‌های میکروالکترومکانیک (MEMS) مبدل نموده است، اما نیاز به ولتاژ تحریک بالا، استفاده از آنها را در قطعات MEMS با محدودیت‌هایی همراه ساخته است. لیکن در این مقاله، برای رفع این مشکل با توجه به انعطاف‌پذیری و پایین بودن مدول یانگ پلیمر SU-8، دیافراگم متحرک از جنس این پلیمر ساخته شده و بوسیله لایه‌ای فلزی پوشانده شده است همچنین برای ایجاد فاصله بین دو الکتروود نیز از پلیمر SU-8 استفاده گردیده است. علاوه بر این، استفاده از مواد پلیمری بجای سیلیکون، سادگی و کم هزینه بودن فرآیند ساخت را نیز به همراه دارد. همچنین در این طرح، به منظور بهینه کردن طرح ساختاری از روش‌های طراحی المان محدود استفاده شد. ضخامت دیافراگم ساخته شده ۱۰ میکرومتر و فاصله بین الکتروود ثابت ۲۵ میکرومتر است. مقدار جابجایی عملگر الکترواستاتیکی با استفاده از یک سیستم اپتیکی خود کانون اندازه‌گیری شد و مقدار جابجایی آن از حدود چند نانومتر تا ۴ میکرومتر به ازای اعمال ولتاژ ۰ تا ۲۰۰ ولت بدست آمد.

## کلیدواژه

پلیمر SU-8، سیستم‌های میکروالکترومکانیکی، عملگر الکترواستاتیکی، میکروعملگر.

## مقدمه

این رو، میکروعملگرها به عنوان کاربردی‌ترین قطعات برای به حرکت درآوردن بخش‌های متحرک در این سیستم‌ها و همچنین کلیه سیستم‌های میکروالکترومکانیکی (MEMS)، بیش از دو دهه است که در حال گسترش بوده و از جایگاه مهمی در عرصه ساخت ادوات MEMS برخوردار گشته‌اند. به طور کلی میکروعملگرها سیگنال الکتریکی را به سیگنال مکانیکی نظیر نیرو و جابجایی تبدیل می‌کند [۳].

انواع عملگرهایی که در ادوات میکرونی کاربرد دارند عبارت‌اند از: عملگر حرارتی؛ عملگر مغناطیسی، عملگر پیزوالکتریک عملگر الکترواستاتیکی است.

در میان عملگرها اگرچه عملگرهای حرارتی و مغناطیسی نیرو و جابجایی بزرگی را ایجاد می‌کنند اما به سبب توان مصرفی بالایی که دارند تلفات حرارتی زیادی تولید می‌کنند که برای سیستم‌های میکرونی چندان مطلوب نمی‌باشد. علاوه بر این بکارگیری مواد

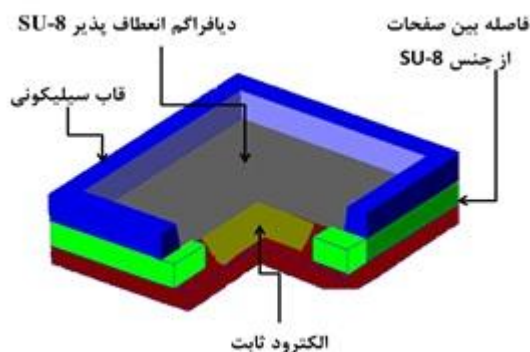
سیستم‌های بر پایه‌ی حرکت دیافراگم متحرک نظیر میکروپمپ-ها، میکروآیینها از کاربردهای وسیعی در زمینه‌های مختلف به ویژه علوم زیستی و پزشکی برخوردار هستند. بخش‌های اصلی این قطعات شامل دیافراگم انعطاف‌پذیر پیوسته و یک عملگر<sup>۱</sup>، جهت به حرکت درآوردن دیافراگم متحرک است [۱]. این سیستم‌ها معمولاً بر مبنای عملگرهای پیزوالکتریک و در ابعاد بزرگ ساخته می‌شدند که مشکلاتی از قبیل هزینه بالا و وزن زیاد را به همراه داشتند. اما در دهه‌های اخیر با توسعه سیستم‌های میکروالکترومکانیکی<sup>۲</sup>، قطعات مذکور در ابعاد میکرو با توان مصرفی پایین، دقت و سرعت عملکرد بالا ساخته می‌شوند [۲]. از

1 Actuator  
2 MicroElectroMechanical Systems

با توجه به ویژگی‌های مثبت این عملگر، اعم از ولتاژ تحریک پایین، سرعت پاسخ‌دهی قابل قبول و جابجایی مناسب آن، می‌توان در ساخت انواع دیگری از قطعات که شامل دیافراگم انعطاف‌پذیر پیوسته همراه با محرک الکترواستاتیکی می‌باشند نظیر سنسورهای فشار، میکروپمپ و میکروآینه نیز از میکروعملگر الکترواستاتیکی مورد بررسی استفاده نمود.

### ساختار میکروعملگر و طرز کار آن

شکل ۱ ساختار کلی میکروعملگر ساخته شده را نشان می‌دهد. همانگونه که در این شکل مشخص است این قطعه از دو بخش مجزا تشکیل شده است. بخش اول، الکتروود ثابت است که روی زیرلایه شیشه‌ای ایجاد شده است. قسمت دوم، الکتروود متحرک که به صورت دیافراگم پلیمری از جنس SU-8 به ضخامت ۱۰ میکرومتر می‌باشد؛ که با پوشاندن لایه‌ای از فلز بر روی سطح زیرین، این دیافراگم به الکتروود متحرک رسانا تبدیل می‌شود. در طرح ارائه شده جهت حفظ استحکام دیافراگم و افزایش طول عمر قطعه، اطراف دیافراگم را قابی از جنس سیلیکون احاطه کرده است.



شکل ۱. شماتیکی از میکروعملگر الکترواستاتیکی مورد بررسی

فاصله بین الکتروودها و دیافراگم نیز بوسیله دیواره‌هایی از جنس SU-8 ایجاد گردیده است. مزیت مهم دیگر پلیمر SU-8، قابلیت آن در لایه‌نشانی با ضخامت‌های متنوع از ۵۰۰ نانومتر تا چند میلیمتر است [۱۱]. با استفاده از این ویژگی می‌توان ضخامت دیافراگم و فاصله بین دیافراگم و الکتروودهای ثابت را با مقادیر دلخواهی پیاده‌سازی نمود. درنهایت و همانگونه که در فرآیند ساخت اشاره خواهد شد؛ درانتها، دو قسمت میکروعملگر به یکدیگر چسبانده می‌شوند.

از این رو با توجه به ساختار عملگر مورد نظر، می‌توان آن را به صورت مدل ساده‌ای از خازن با دو صفحه موازی مدل کرد

مغناطیسی و ساخت ادوات مغناطیسی شبیه سیم‌پیچ در فرآیند میکروماشینکاری، بسیار مشکل خواهد بود. اما عملگرهای پیرو الکتریک علاوه بر ایجاد جابجایی بزرگ و توان مصرفی پایین فرآیند ساخت ساده‌ای دارند اما جهت ساخت آنها امکانات پیشرفته‌ای مورد نیاز است که ساخت آنها را با محدودیت‌هایی مواجه می‌کند [۵].

در مقابل، میکروعملگرهای الکترو استاتیکی علاوه بر ساخت ساده-تر نسبت به دیگر عملگرها امکان ایجاد جابجایی‌هایی بزرگ با مصرف توان پایین را نیز فراهم می‌کنند [۴].

از طرف دیگر، میکروعملگرهای الکترواستاتیکی، با توجه به مزایایی همچون حساسیت مناسب، پاسخ‌دهی سریع، دقت بالا، قابلیت مجتمع‌سازی با تکنولوژی CMOS و ساخت ساده‌تر نسبت به سایر عملگرها، همواره مورد توجه طراحان و سازندگان عرصه MEMS بوده‌اند. اما نیروهای الکترواستاتیکی در ابعاد میکرومتر نسبتاً کوچک بوده و برای ایجاد جابجایی قابل توجه، ولتاژ تحریک بالایی مورد نیاز است. حال آنکه استفاده از سیلیکون به عنوان پرکاربردترین ماده برای ساخت این قطعات، بر این مشکل می‌افزاید [۷و۶]. چراکه سیلیکون با داشتن مدول یانگ در حدود ۱۶۰ GPa نه تنها مقاومت مکانیکی بالایی در مقابل تغییر وضعیت مکانیکی از خود نشان می‌دهد، بلکه برای ایجاد جابجایی به نیروی الکترواستاتیکی زیادی نیاز دارد و این امر سبب افزایش ولتاژ تحریک مورد نیاز در عملگر الکترواستاتیکی می‌شود [۸].

میکروعملگرهای الکترواستاتیکی ساختارهای متنوعی دارند که برخی از آنها برای کاربردهایی خاص طراحی شده‌اند، اما یکی از پرکاربردترین و متداول‌ترین آنها، عملگر الکترواستاتیکی با دو صفحه موازی<sup>۳</sup> می‌باشد که علاوه بر فرآیند ساخت ساده‌تر، قابلیت پیاده‌سازی با مواد پلیمری را نیز دارد. از آنجائیکه پیچیدگی و زمان‌بر بودن مراحل ساخت و هزینه بالای تجهیزات همواره از مهمترین چالش‌های پیش رو در عرصه تولید قطعات MEMS بوده اند، [۱۰] لذا یافتن راهکارهایی برای ایجاد سهولت در ساخت و عدم نیاز به استفاده از روش‌های پرهزینه به‌ویژه برای تولید انبوه می‌تواند بسیار مثمر ثمر واقع شود.

در این مقاله، یک میکروعملگر الکترواستاتیکی بصورت دوصفحه موازی با الکتروود متحرک از جنس پلیمر SU-8 و الکتروود ثابت فلزی، ساخته شده است. پلیمر SU-8 به دلیل داشتن مدول یانگی ۵۰ برابر کمتر از سیلیکون، مقاومت کمتری در برابر خمش از خود نشان داده و برای جابجا نمودن آن نیروی کمتری مورد نیاز است [۹و۸]. از طرف دیگر، روش ساخت ارائه شده بسیار ساده‌تر و کم‌هزینه‌تر بوده و نیاز به استفاده از تجهیزات پیچیده و گران‌قیمت مانند سونش DRIE نداشته و زمان ساخت کمتری در مقایسه با سایر روش‌ها مورد نیاز است.

4 Bonding

3 Parallel Plate

با توجه به رابطه ۵ جابجایی با  $E$  که معرف مدول یانگ است، رابطه خطی دارد. اما از آنجایی که رابطه جابجایی با تغییر در ضخامت دیافراگم ( $t$ ) و فاصله بین صفحات ( $g$ )، یک رابطه معکوس به ترتیب با توان سوم و توان دوم است، این پارامترها تاثیر به سزایی در عملکرد عملگر و میزان جابجایی دارند. به عنوان مثال با کاهش ضخامت دیافراگم جابه‌جایی می‌تواند به صورت چشم‌گیری افزایش یابد و اما کاهش ضخامت تاثیر منفی بر روی صافی و یکنواختی سطح دیافراگم خواهد داشت.

### شبیه‌سازی

در این مقاله هدف از شبیه‌سازی، بررسی جابجایی دیافراگم به ازای تغییرات در پارامترهای مختلف و استخراج مقادیر بهینه جهت ساخت است. از آنجاییکه پایین بودن ولتاژ تحریک در ساخت میکروعملگرها یک نکته اساسی است، در شبیه‌سازی سعی شده تاثیر پارامترهای مختلف بر روی ولتاژ تحریک و میزان جابجایی بررسی شود تا با کمترین ولتاژ تحریک بتوان جابجایی مناسب را بدست آورد.

با توجه به رابطه ۶ و ۷ که مستخرج از روابط ۳ و ۵ هستند به ترتیب مشخص کننده ولتاژ تحریک و میزان جابجایی دیافراگم مربعی می‌باشند، مشخص است که ولتاژ و جابجایی متأثر از دو بخش جداگانه است، یک بخش مربوط به مشخصات ماده انتخاب شده به عنوان دیافراگم نظیر مدول یانگ، و بخش دوم وابسته به مشخصات ساختار، مانند ابعاد و ضخامت دیافراگم است [۱۳].

$$V = \sqrt{\frac{2khg^2}{\epsilon A}} \cong \underbrace{\sqrt{E}}_{\text{خصوصیات مواد}} \times \underbrace{\sqrt{\frac{t^3 g_0}{l^3}}}_{\text{هندسه ساختار}} \quad (6)$$

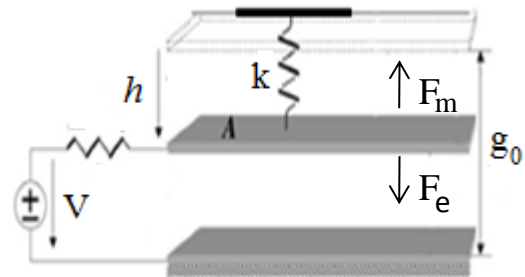
با فرض اینکه طول ضلع دیافراگم مربعی برابر  $l$  باشد. می‌توان گفت که مساحت دیافراگم برابر است با:  $A = l^2$ . سپس با جایگذاری در رابطه (۳) داریم:

$$h(r) = \frac{\alpha \epsilon_0 \epsilon_r V^2 l^4}{2Eg^2 t^3} \approx \frac{1}{E} \times \frac{l^4}{g^2 t^3} \quad (7)$$

هندسه ساختار      خصوصیات مواد

از این رو، انتخاب ماده مناسب جهت ساخت دیافراگم نقش به سزایی در عملکرد قطعه دارد. معمولا در ادوات MEMS برای ساخت دیافراگم از موادی همچون سیلیکون ناپتراید<sup>۶</sup> و یا از سیلیکون با لایه قربانی اکسید سیلیکون در ویفرهای SOI<sup>۷</sup> استفاده

(شکل ۲) و با استفاده از آن می‌توان به صورت تقریبی میزان جابجایی دیافراگم متحرک را در اثر اعمال ولتاژ بدست آورد. در این نوع عملگر الکترواستاتیکی در اثر اعمال ولتاژ بین دو الکتروود، به دلیل تجمع بارهای مخالف در الکتروودها، نیروی جاذبه‌ای بین آنها ایجاد شده و سبب جابجایی الکتروود متحرک می‌شود.



شکل ۲. مدلی از خازن دو صفحه موازی [۱۲]

برای برقراری تعادل در سیستم، پس از اعمال ولتاژ می‌بایست نیروی الکترواستاتیک  $F_e$  با نیروی کشش  $F_m$  فنر برابر باشد. می‌دانیم که نیروهای الکترواستاتیکی و نیروی کشش فنر برابرند با [۱۳]:

$$F_e = \frac{Q}{2\epsilon A} = \frac{V^2 A \epsilon}{2g^2} \quad (1)$$

$$F_m = kh \quad (2)$$

که  $Q$  بار ذخیره شده رو صفحات،  $A$  مساحت صفحات،  $V$  ولتاژ اعمالی به دو الکتروود،  $g$  فاصله بین صفحات،  $g_0$  فاصله اولیه صفحات و  $k$  ثابت فنریت و  $h$  میزان جابجایی الکتروود متحرک می‌باشد. با مساوی قرار دادن این دو نیرو (روابط ۱ و ۲)، میزان جابجایی از رابطه ۳ بدست می‌آید:

$$h = \frac{V^2 A \epsilon}{2kg^2} \quad (3)$$

ثابت فنریت برای دیافراگم مربعی با ضلع  $L$  و ضخامت  $t$  در رابطه ۴ بیان شده است:

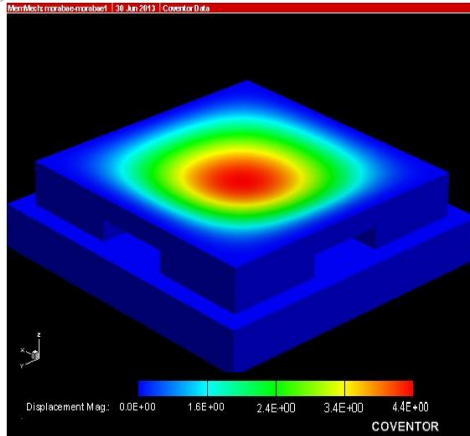
$$k = \frac{Et^3}{al^2} \quad (4)$$

که در آن  $\frac{1}{\alpha} = 0.0138$  و  $E$  مدول یانگ<sup>۵</sup> است. [۱۳] با جایگذاری رابطه ۴ در رابطه ۳، میزان جابجایی کلی دیافراگم مربعی بدست می‌آید (رابطه ۵).

$$h = \frac{V^2 A \epsilon l^2 \alpha}{2g^2 E t^3} \quad (5)$$

6 Si3N4  
7 Silicon-on-Insulator

5 Young's Modulus



شکل ۸. میزان جابجایی دیافراگم ۱۰ میکرومتر با فاصله صفحات ۱۰ میکرومتر به ازای اعمال ولتاژ ۱۰۰ ولت

### فرآیند ساخت

شکل ۹ خلاصه‌ای از فرآیند ساخت این میکروعملگر را نشان می‌دهد. برای ساخت الکتروود پایینی و دیواره‌ها، ابتدا فلزات کروم و طلا به ترتیب با ضخامت‌های ۳۰ و ۱۲۰ نانومتر به روش لایه نشانی تبخیر حرارتی<sup>۹</sup> روی زیرلایه‌ای شیشه‌ای لایه نشانی شده (مرحله ۱) و با استفاده از روش لیتوگرافی استاندارد، با ایجاد الگویی مربعی شکل با ماسک شماره (۱) در ماده فتورزیست Shipley محصول شرکت Microposit، سونش شده‌اند (مرحله ۲). سپس فتورزیست SU-8 2010 به ضخامت ۱۰ میکرون با استفاده از لایه نشانی چرخشی روی آن نشانده شده (مرحله ۳) و پس از پخت اولیه در دماهای ۶۵ و ۹۵ درجه با فرآیند لیتوگرافی استاندارد با استفاده از ماسک شماره (۲) نوردهی گردید. در مرحله بعد، پخت بعد از نوردهی<sup>۱۰</sup> در دماهای ۶۵ و ۹۵ درجه صورت گرفته و شکل دیواره‌ها در مایع ظهور<sup>۱۱</sup> مختص به SU-8 ظاهر گردید (مرحله ۴).

جهت ساخت دیافراگم، ابتدا SU-8 از نوع 2010 به روش لایه نشانی چرخشی با سرعت ۳۰۰۰ دور بر دقیقه به ضخامت ۱۰ میکرومتر روی یک بستر سیلیکونی لایه نشانی شده است (مرحله ۵). از سیلیکون به عنوان قاب نگه‌دارنده دیافراگم استفاده شده است. سپس ناحیه میانی سیلیکون، از پشت به شکل الگویی مربع شکل با ماسک شماره (۳) به طور کامل با روش سونش شیمیایی مرطوب با کاتالیزور فلزی [۱۸] سونش شده تا غشای SU-8 معلق شود (مراحل ۶ و ۷).

در این روش، محلولی شامل  $H_2O_2$  و HF با نسبت‌های معین ۵ به ۱ در حضور یک فلز خنثی مانند نقره و طلا، برای سونش سیلیکون مورد استفاده قرار می‌گیرد در این فرآیند سطح سیلیکون در مجاورت ذرات فلزی، در محلول حاوی HF و  $H_2O_2$

می‌شود که دارای مدول یانگ بالایی هستند و نیروی زیادی نیز برای تحریک احتیاج دارند. اما در مقابل، مواد پلیمری مانند SU-8، می‌تواند جایگزین مناسبی برای این مواد باشد. با توجه به اینکه مدول یانگ SU-8 در حدود ۴/۵ GPa است [۱۱]، نسبت به مواد مرسوم مانند Si یا  $Si_3N_4$  که دارای مدول یانگی در حدود ۱۶۰ GPa می‌باشند ولتاژ کمتری برای تحریک نیاز دارد. [۱۴ و ۱۵ و ۱۶] از طرف دیگر، میزان جابجایی در اثر ولتاژ اعمال شده نیز در موادی که مدول یانگ کوچکتری دارند، بیشتر است. این جابجایی عامل مهمی در سنجش کارکرد میکروعملگر محسوب می‌شود. با توجه به کمتر بودن مدول یانگ SU-8، جابجایی آن طبق رابطه (۷) بیشتر از موادی همچون Si و  $Si_3N_4$  خواهد بود. [۱۴ و ۱۵].

با مشخص شدن ماده مناسب جهت ساخت دیافراگم نوبت به بررسی تاثیر عوامل ساختاری مانند ابعاد، ضخامت و فاصله بین صفحات بر روی میزان جابجایی و ولتاژ تحریک می‌رسد.

در این مقاله، برای تحلیل مکانیکی دیافراگم و بدست آوردن پاسخ‌دهی سنسور مورد نظر به ولتاژ اعمال شده، از نرم افزار کاونتور<sup>۸</sup> بهره گرفته شده است. این نرم‌افزار، علاوه بر حل مسائل دینامیکی در قطعات MEMS با تحلیل‌گرهای مختلف، قابلیت شبیه سازی فرآیند ساخت و اطمینان از صحت فرآیند انتخابی قبل از اقدام به ساخت را نیز دارد که به نوبه خود ویژگی مهمی محسوب می‌گردد. چرا که شروع فرآیند ساخت در بسیاری از موارد هزینه‌بر بوده و امکان سنجی آن قبل از شروع فرآیند بسیار به صرفه می‌باشد.

با توجه به اهمیت ضخامت دیافراگم، فاصله بین صفحات و ابعاد دیافراگم، هر سه این عوامل توسط نرم‌افزار کاونتور مورد بررسی قرار گرفته و مقادیر بهینه برای ساخت مطابق جدول ۱ استخراج گردیدند.

جدول ۲- پارمترهای مهم بهینه شده با استفاده از شبیه سازی نرم افزاری

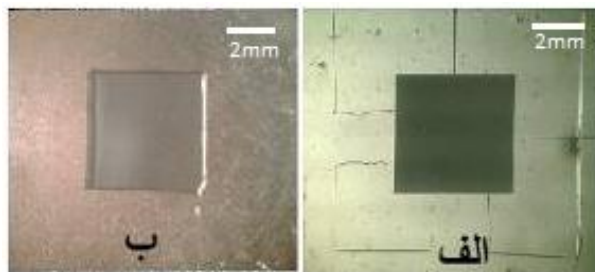
پارمتر مورد نظر	مقدار بهینه شده
ضخامت دیافراگم	۱۰ میکرومتر
فاصله بین صفحات	۱۰ میکرومتر
ابعاد دیافراگم	۵ mm×۵mm

شکل ۸ نتیجه شبیه سازی میزان جابجایی دیافراگم که با نرم‌افزار کاونتور انجام شده است را نشان می‌دهد. در این شبیه‌سازی، ضخامت دیافراگم ۱۰ میکرومتر از جنس SU-8 و با فاصله صفحات ۱۰ میکرومتر و ولتاژ اعمال شده ۱۰۰ ولت در نظر گرفته شده‌اند.

9 Thermal Evaporation Deposition  
10 Post Bake  
11 Developer

Archive of SID

مزیت عمده این روش این است که برای سونش سیلیکون نیازی به استفاده از دستگاه DIRE یا سایر روش‌های پر هزینه و زمان‌بر نیست. علاوه بر این، سونش سیلیکون با چنین عمقی (حدود ۴۵۰ میکرومتر) با بسیاری از روش‌ها امکان‌پذیر نمی‌باشد. در انتها، می‌بایست دیافراگم و دیواره‌ها به یکدیگر چسبانده می‌شدند. راه‌های مختلفی برای چسباندن در سیستم‌های میکروالکترومکانیکی وجود دارد که از آن جمله می‌توان به چسباندن با استفاده از ماده چسبنده<sup>۱۲</sup> و چسباندن حرارتی اشاره نمود. [۱۹]. در این مقاله به دلیل اجتناب از ایجاد تنش پسماند بین دیافراگم و سیلیکون که به علت تفاوت در ضریب انبساط حرارتی آنها رخ می‌دهد، روش چسباندن با استفاده از ماده چسبنده را انتخاب نمودیم تا از حرارت دادن مجدد دیافراگم جلوگیری بعمل آید. بدین منظور از لایه ای نازک از فتورزیست SU-8 2002 استفاده شده است.

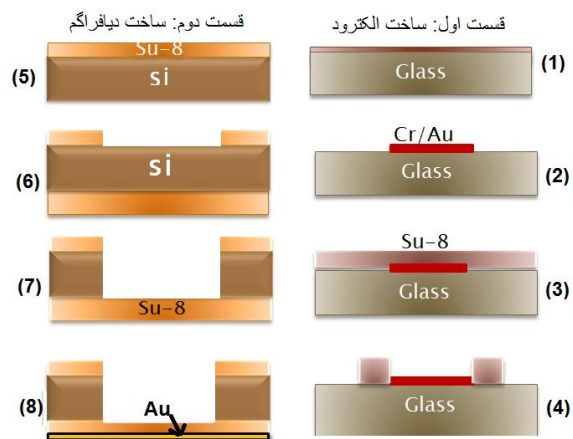


شکل ۱۱. تصویر میکروسکوپ نوری از قطعه ساخته شده الف) الکتروود ثابت به همراه دیواره ب) دیافراگم پلیمری

نتایج

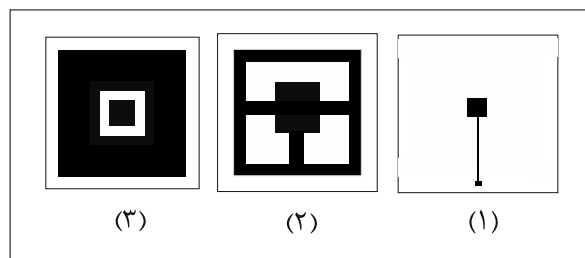
برای آزمودن صحت عملکرد میکرو عملگر، ولتاژهایی در محدوده صفر تا ۱۲۰ ولت به الکتروود ثابت اعمال شده و جابجایی دیافراگم با استفاده از یک سیستم اپتیکی مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفته است. سیستم اپتیکی مورد استفاده از نوع خودکانون است که در شکل ۱۲ روش عملکرد آن نشان داده شده است.

سونش می‌شود. به طور کلی روند سونش در این محلول‌های شیمیایی، بر پایه اکسید کردن سیلیکون توسط  $H_2O_2$  و سونش کردن اکسید سیلیکون توسط HF موجود در محلول می‌باشد. به این ترتیب که چون پتاسیل الکتروشیمیایی  $H_2O_2$  مثبت‌تر از انرژی باند ظرفیت Si می‌باشد، می‌تواند حفره‌هایی به باند ظرفیت سیلیکون تزریق کند و باعث اکسید شدن سطح آن شود. سطح اکسید سیلیکون ایجاد شده در مجاورت HF از بین می‌رود. اما سرعت این فرآیند بسیار پایین است در حدود ۱۰۰ نانومتر در ساعت. برای رفع این مشکل نیاز به کاتالیزوری داریم که بتواند انرژی فعال سازی باند‌هایی ظرفیت Si را کاهش دهد تا  $H_2O_2$  بتواند به راحتی سیلیکون را اکسید کند. که در این محلول از  $AgNO_3$  به عنوان این کاتالیزور استفاده شده است [۱۸]. در مرحله بعد، با استفاده از دستگاه لایه نشانی حرارتی تحت خلأ، پشت دیافراگم با لایه‌ای از فلز طلا به ضخامت ۳۰ نانومتر پوشانده شده تا رسانا گشته و به عنوان الکتروود متحرک مورد استفاده قرار گیرد (مرحله ۸).



شکل ۹. مراحل ساخت میکروعملگر

ماسک‌های مورد استفاده در ساخت میکروعملگر در شکل ۱۰ نشان داده شده‌اند.



شکل ۱۰. ماسک‌های مورد استفاده در ساخت میکروعملگر

## Archive of SID

همانگونه که در نمودار مشخص است، برای ولتاژ ۱۰۰ ولت جابجایی در نمونه حدود ۴ میکرومتر می‌باشد که در مقایسه با نمونه‌های سیلیکونی ساخته شده (از جمله مرجع [۲۰]) بیش از ۴ مرتبه افزایش یافته است.

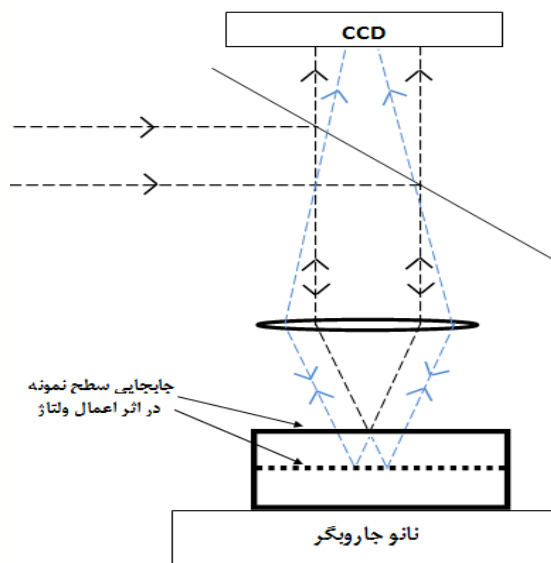
### نتیجه‌گیری

در پژوهش حاضر، تکنولوژی جدیدی برای ساخت عملگر الکترواستاتیکی با دو صفحه موازی از جنس پلیمر، پیشنهاد و بر اساس آن یک نمونه ساخته شد.

قطعه ساخته شده نسبت به نمونه‌های مشابه که معمولاً از جنس سیلیکون ساخته می‌شوند، قابلیت جابجایی بیشتر و ولتاژکاری کمتری دارد. ضمن اینکه روش مورد استفاده در این تحقیق برای مواد پلیمری نسبت به روش‌های دیگر بسیار ساده‌تر و کم‌هزینه‌تر می‌باشد. لذا می‌توان از این روش به منظور تولید انبوه میکروعملگر الکترواستاتیکی برای کاربردهای متنوعی نظیر میکروآییننه‌ها و فشارسنجها استفاده کرد.

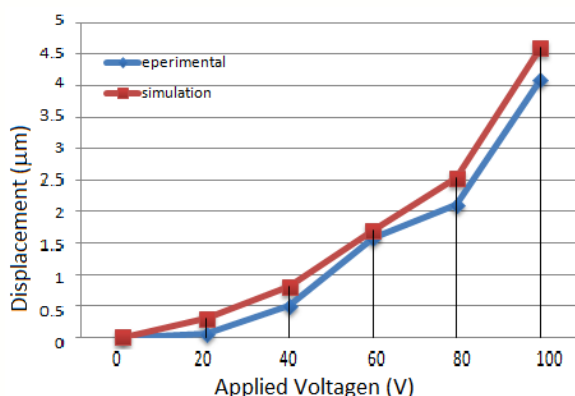
### مرجع‌ها

- [1] K. Hasikin, N. Soin, F. Ibrahim, "Modeling of a Polyimide Diaphragm for an Optical Pulse Pressure Sensor" IEEE, pp.1-5, 14-15 Dec. 2009.
- [2] D J Bell, T J Lu, N A Fleck. S M Spearing, "MEMS actuators and sensors: observations on their performance and selection for purpose" journal of micromechanics and microengineering, vol.15, pp. S153-S164, 2005.
- [3] E. O. Ernst Thielicke, "Microactuators and their technologies," Mechatronics, vol.10, pp. 431-455, 2000.
- [4] E. Lin J, "Design and Characterization of MEMS Micromirror Devies". Quebec: department of Electrical and computer engineering McGill university, montreal, Quebec, Canada, 2001.
- [5] Han Y, 2005. "A new piezoelectric microactuator with transverse and lateral control of head positioning system for high density hard disk drives". University of Kentucky.
- [6] Towghian Sh, "A Large-Stroke Electrostatic Micro-Actuator". PHD thesis, University of Waterloo, Ontario, Canada, 2010.
- [7] Nicolae Lobontiu, Ephrahim Garcia, *Mechanics of Microelectromechanical Systems*. Springer Science, United States of America. pp 1-418. See also <http://www.springeronline.com>
- [8] Friese Ch., Zappe H., "Deformable Polymer Adaptive Optical Mirrors". *Microelectromechanical system*, 17, february, pp.11-19, 2008.
- [9] Khaled S Ramadan, Tarek Nasr, Ian G Foulds, "Development of an SU-8 MEMS process with two metal electrodes using amorphous silicon as a sacrificial material" *journal of micromechanics and microengineering*, vol.23, pp. 035-037, 2013.



شکل ۱۲. روش اندازه‌گیری جابجایی سطح نمونه با استفاده از سیستم خود کانون

در این روش از یک عدسی شیئی استفاده می‌شود که سطح نمونه در کانون آن قرار داده می‌گردد طوری که مسیر پرتوهای نور فرودی و بازتابی از سطح نمونه با هم منطبق می‌شوند. سپس با جابجایی سطح نمونه بر اثر اعمال ولتاژ و خارج شدن سطح نمونه از کانون، مسیر پرتوی بازتابی تغییر می‌کند که باعث تغییر در تصویر تشکیل شده بر روی آشکارساز می‌شود. سپس با استفاده از یک نانو جاروبگر، مکان نمونه به اندازه و بر خلاف جهت جابجایی ناشی از اعمال ولتاژ، جابجا می‌شود تا مجدداً سطح نمونه در کانون قرار گیرد. و نمودار جابجایی‌های اندازه‌گیری شده توسط این سیستم برای نمونه‌ی ساخته شده با فاصله صفحات و ضخامت دیافراگم ۱۰ میکرومتر به ازای ولتاژهای مختلف در شکل ۱۳ به نمایش در آمده است. همانگونه که در نمودار مشخص است، مقادیر بدست آمده از تست با مقادیر شبیه‌سازی تقریباً برابر است.



شکل ۱۳. نمودار میزان جابجایی به ازای اعمال ولتاژ برای دیافراگم به ضخامت ۱۰ میکرومتر

- [10] Metwally K, Robert L, "SU-8-based rapid tooling for thermal embossing. may, pp.273-283, 2011.
- [11] www.michrochem.com, Jan. 2013.02.12.
- [12] G Zhu, J Lévine, L Praly, Y Peter. "Flatness-Based Control of Electrostatically Actuated MEMS With Application to Adaptive Optics: A Simulation Study". Journal of microelectromechanical system, vol.15, 2006.
- [13] Amita Gupta, Shailesh Kumar, Ranvir Singh, Monika Chaudhary, "Deformable Membrane Mirror for Wavefront Correction". Defence Science Journal. 59, November, pp. 590-594, 2009.
- [14] F. Hu, Y. Tang, Y. Qian, "Design of a MEMS micromirror actuated by electrostatic repulsive force" Optik, vol.123, pp.387-390, 2012.
- [15] T. Sasaki, K. Hane, "Initial deflection of silicon-on-insulator thin membrane micro-mirror and fabrication of varifocal mirror", Sensors and Actuators A: Physical, vol.172, pp.516-522, 2011.
- [16] F. Hu, J. Yao, Ch. Qiu, H. Ren "A MEMS micromirror driven by electrostatic force" Journal of Electrostatics, vol.68, pp.237-242, 2010.
- [17] Ch. Friese, M. Wissmann. "Polymer-based membrane mirrors for micro-optical sensors" IEEE, pp.667-672, 2003.
- [18] Lianto P., Yu sh., Wu J., Thompson V., "Vertical etching with isolated catalysts in metal-assisted chemical etching of silicon". *The Royal Society of Chemistry*, pp 1-8, 2012.
- [19] Shamsi A, Amiri A, et al, "low cost method for hot embossing of microstructures on PMMA by SU-8 master", *J. Microsystem Technology*. November, 2013., DOI: 10.1007/s00542-013-2000-z
- [20] Miller L., Agronin M., Bartman R., "Fabrication and characterization of a micromachined deformable mirror for adaptive optics applications. SPIE November, pp.1-15, 2000.