

طراحی و ساخت میکروآبینه شکل پذیر پلیمری جهت استفاده در سیستم‌های اپتیک تطبیقی

مهرناز اسفندیاری^۱ رضا اسدی^۲ پیام حیدری^۳

۱- دانش آموخته کارشناسی ارشد، مجتمع مهندسی برق الکترونیک، دانشگاه مالک اشتر، تهران، ایران
me_esfandiari2000@yahoo.com

۲- استادیار، مجتمع مهندسی برق الکترونیک، دانشگاه مالک اشتر، تهران، ایران
rasadi56@gmail.com

۳- استادیار، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه آزاد اسلامی واحد رودهن، تهران، ایران
pheydari@riau.ac.ir

چکیده: در این مقاله روشی نوین جهت ساخت میکروآبینه انعطاف‌پذیر پلیمری مبتنی بر عملگر الکترواستاتیک ارائه شده است. میکروآبینه‌های انعطاف‌پذیر معمولاً در سیستم‌های اپتیک تطبیقی جهت تصحیح اعوجاج‌های موجود در جبهه موج نور بکار می‌روند از این‌رو می‌باشد دارای دیافراگمی منعطف باشند. در این تحقیق دیافراگم میکروآبینه، از جنس پلیمر-SU-8 ساخته شده و بر روی آرایه‌ای از الکترودهای ثابت قرار گرفته است. این دیافراگم با مدول یانگی حدود ۵۰ برابر کمتر از نمونه‌های رایج سیلیکونی، امکان جابجایی دیافراگم بیشتر و در نتیجه قابلیت تصحیح ابیراها با ولتاژ کمتر را مقدور می‌سازند به گونه‌ای که دیافراگم به شعاع ۲/۵ mm و ضخامت ۱۰ μm را با اعمال ولتاژ ۱۲۰ ولت حدود ۴ μm جایجا می‌کند. علاوه بر این، استفاده از مواد پلیمری بجای سیلیکون در ساخت دیافراگم، سادگی و کم‌هزینه بودن فرآیند ساخت را نیز به همراه دارد. اما دیافراگم‌های پلیمری رایج، صافی سطح کمتری در مقایسه با نمونه‌های سیلیکون دارند. در این مقاله برای غلبه بر این مشکل از راهکاری جدیدی برای ساخت میکروآبینه استفاده شده که علاوه بر تمام مزایای آبینه پلیمری از نظر صافی سطح با نمونه‌های سیلیکونی برابری می‌کند. نتیجه اندازه گیری ناهمواری سطحی حدود واریانس ناهمواری سطح ۲۰ نانومتر را نشان داد. همچنین، به منظور بهینه کردن طرح ساختاری از شبیه‌سازی المان محدود استفاده شده است.

کلمات کلیدی: اپتیک تطبیقی، پلیمر-SU-8، عملگر الکترواستاتیکی، میکروآبینه.

تاریخ ارسال مقاله: ۱۳۹۳/۰۳/۳۱

تاریخ پذیرش مشروط مقاله: ۱۳۹۵/۰۵/۱۸

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۵/۰۹/۰۳

نام نویسنده‌ی مسئول: مهرناز اسفندیاری

نشانی نویسنده‌ی مسئول: مجتمع مهندسی برق الکترونیک، دانشگاه مالک اشتر، تهران، ایران



۱- مقدمه

صفی سطح [۷] که ارتباط مستقیم با نوع عملگری دارد که برای تحریک آینه به کار می‌رود. میکروعملگرهای الکتروستاتیکی، با توجه به مزایایی همچون حساسیت مناسب، پاسخ‌دهی سریع، دقت بالا، قابلیت مجتمع سازی با تکنولوژی CMOS و ساخت ساده‌تر نسبت به سایر عملگرهای، همواره مورد توجه طراحان و سازندگان ادوات MEMS بهویژه در میکروآینه‌ها بوده‌اند. یکی از پرکاربردترین و متداول ترین این عملگرهای، عملگر الکتروستاتیکی با دو صفحه مواری^۱ می‌باشد که علاوه بر فرآیند ساخت ساده‌تر، قابلیت پیاده‌سازی با مواد پلیمری را نیز دارد. آنجاییکه پیچیدگی زمان بر بودن مراحل ساخت و هزینه بالای تجهیزات همواره از مهمترین چالش‌های پیش رو در عرصه تولید قطعات MEMS بوده‌اند [۸]. لذا یافتن راهکارهای برای ایجاد سهولت در ساخت و عدم نیاز به استفاده از روش‌های پرهزینه بهویژه برای تولید اینبهو می‌تواند بسیار مثمر ثمر واقع شود.

اما نیروهای الکتروستاتیکی در ابعاد میکرومتر نسبتاً کوچک بوده و برای ایجاد جابجایی قابل توجه، ولتاژ تحریک بالایی نیاز دارد. حال آنکه استفاده از سیلیکون به عنوان پرکاربردترین ماده برای ساخت این قطعات، بر این مشکل می‌افزاید [۹ و ۱۰]. چراکه سیلیکون با داشتن مدول یانگ در حدود 160 GPa نه تنها مقاومت مکانیکی بالایی در مقابل تغییر وضع مکانیکی از خود نشان می‌دهد، بلکه برای ایجاد جابجایی به نیروی الکتروستاتیکی زیادی نیاز دارد و این امر سبب افزایش ولتاژ تحریک موردنیاز در عملگر الکتروستاتیکی می‌شود [۱۰]. برای رفع این مشکل، یکی از روش‌های پیشنهادی، استفاده از مواد پلیمری مانند SU-8 است که مدول یانگ آنها نسبت به سیلیکون کمتر است [۱۱]. اما با توجه به اینکه در این روش برای لایه نشانی SU-8 باید از لایه نشانی با صفحه چرخان^۲ استفاده کرد، و همچنین بدليل تنش پسماند ایجاد شده در حین فرآیند تولید، دستیابی به سطوح صاف و بدون اعوجاج یکی از چالش‌های اصلی می‌باشد.

در این مقاله روشی نوین برای ساخت میکروآینه انعطاف پذیر پلیمری جهت استفاده در سیستم‌های اپتیک تطبیقی ارائه شده است. در این روش از دیافراگم پیوسته SU-8 با پوشش فلزی و قاب سیلیکونی بر روی مجموعه‌ای از عملگرهای الکتروستاتیک استفاده شده است. مزیت این روش صافی سطح مناسب به همراه سادگی نسی فرآیند ساخت به علت استفاده از روش سوئش شیمیایی می‌باشد. ضمن اینکه به علت استفاده از دیافراگم پلیمری با مدول یانگی ۵۰ برابر کمتر از سیلیکون [۱۱]، مقدار جابجایی قابل توجهی با ولتاژ تحریک نسبتاً پایین بدست می‌آید.

در روش ارائه شده، ضمن دستیابی به صافی مطلوب، با استفاده از سوئش شیمیایی به جای سوئش‌های متداول فیزیکی، نیاز به استفاده از تجهیزات گران‌قیمت و پیچیده مانند سوئش خشک^۳ مرتفع گردیده و زمان ساخت در قیاس با سایر روش‌ها کاهش چشمگیری داشته است که آن را به گزینه مناسبی برای تولید اینبهو بهویژه در ادواتی که دارای دیافراگم هستند مبدل می‌سازد.

در سیستم‌های اپتیکی، عواملی چون تغییر ضربی شکست محیط انتشار نور و وجود ذرات معلق در هوا موجب می‌گردد تا جبهه موج دچار اعوجاج و نوسان شود که در نهایت، میهم شدن جزئیات تصویر را به همراه دارد. از بین بردن اثرات فوق نیازمند جبران سازی جبهه موج است که بهوسیله سیستم‌های اپتیک تطبیقی انجام می‌پذیرد [۱].

در یک سیستم اپتیک تطبیقی، دیافراگم آینه به صورت دینامیکی بگونه‌ای کنترل می‌شود که جابجایی فازی دقیقاً برخلاف جابجایی فازی که سبب ایجاد ایبراهی در جبهه موج مرجع شده را، به جبهه موج تابشی^۴ اعمال کند. در نتیجه این عمل، جابجایی فازی آینه و ایبراهی، یکدیگر را خنثی کرده و جبهه موج نهایی کاملاً یکنواخت و عاری از هرگونه اعوجاج خواهد شد [۳].

کاربردهای اپتیک تطبیقی در سیستم‌های تصویر بردار در نجوم و صنایع نظامی و همینطور در زمینه‌های ارتباطات لیزر (سویچینگ و کوپلینگ) و تصویربرداری پزشکی (به ویژه چشم پزشکی)^۵ مورد استفاده قرار می‌گیرد [۴].

در چشم پزشکی برای عکس برداری از شبکیه نیاز به ادوات اپتیک تطبیقی است؛ اما این قطعات با انواع مشابه که در تلسکوپ‌ها به کار می‌روند تفاوت‌هایی دارند. قطعاتی که در چشم پزشکی مورد استفاده قرار می‌گیرند باید کوچک، قابل حمل و ارزان قیمت باشند. این در حالی است که آینه‌های تطبیقی متداول، معمولاً مشکلاتی از قبیل هزینه بالا و وزن زیاد، پیچیدگی و ابعاد بزرگ را به همراه دارند اما در دهه‌های اخیر با بهره‌گیری از تکنولوژی MEMS^۶ و روش‌های میکروماشینکاری حجمی و سطحی، آینه‌های انعطاف پذیر در ابعاد میکرومتر با توان مصرفی پایین، دقت و سرعت عملکرد بالا ساخته می‌شوند که برای بسیاری از کاربردهای اپتیک تطبیقی مناسب هستند [۵].

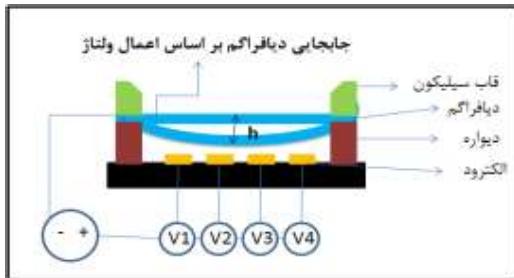
میکروآینه‌ها در دو نوع دیافراگم پیوسته و گسسته ساخته می‌شوند، که با توجه به خصوصیات منحصر به فردشان کاربردهای متفاوتی دارند. اگرچه آینه‌های پیوسته سرعت کمتری نسبت به آینه‌های گسسته دارند و میزان جابجایی که ایجاد می‌کنند محدود است اما به سبب قابلیت بالای آنها در اصلاح جبهه موج و عدم ایجاد گسستگی فاز در جبهه موج تابیده شده و ضربی پرشدگی^۷ مطلوب و ساخت ساده تر نسبت به آینه‌های گسسته، برای استفاده در سیستم‌های اپتیک تطبیقی سیلر مناسب تر هستند [۶].

مشخصات آینه‌های انعطاف پذیر بسته به کاربرد آنها متفاوت است اما بازترین آنها عبارتند از: میزان جابجایی، سرعت پاسخ دهنی و



۲- ساختار میکروآینه

همانگونه که اشاره شد، در این مقاله از عملگر الکتروستاتیک به عنوان محرك در میکروآینه استفاده شده است. در یک عملگر الکتروستاتیکی با دو صفحه موازی، در اثر اعمال ولتاژ بین دو الکترود، به دلیل تجمع بارهای مخالف در الکترودها، نیروی جاذبه‌ای بین آنها ایجاد شده و سبب جابجایی الکترود متحرک می‌شود. شکل (۱) مدل ساده‌ای از خازن با دو صفحه موازی را نشان می‌دهد. که با استفاده از آن می‌توان به صورت تقریبی میزان جابجایی دیافراگم متحرک را در اثر اعمال ولتاژ بدست آورد.



شکل (۲): شماتیک از میکروآینه مورد طراحی شده

یکی از پارامترهای بسیار مهم در طراحی عملگرهای الکتروستاتیکی با صفحات موازی مقدار ولتاژ قطع آنهاست، در صورتی که ولتاژ ورودی بزرگتر یا مساوی ولتاژ قطع آنها باشد الکترود متحرک ناگهان به سمت صفحه ثابت پایینی کشیده می‌شود. اگر بایاس به همین صورت ادامه داشته باشد باعث ایجاد اثرات خطرناکی مثل جرقه و اتصال کوتاه شده و خرابی دستگاه را به همراه دارد. از این رو مهمترین محدودیت موجود در عملگرهای الکتروستاتیک، محدودیت میزان جابجایی دیافراگم متحرک است که تنها به $\frac{1}{3}$ فاصله بین صفحات محدود می‌شود و پس از آن پدیده قطع "رخ می‌دهد" [۱۲].

روش‌های مختلفی برای افزایش ولتاژ قطع وجود دارد که یکی از موثرترین آنها افزایش ثابت فریت است. با افزایش ولتاژ قطع، محدوده حرکت پایدار الکترود متحرک نیز افزایش می‌یابد [۱۳].

در طرح ارائه شده در این مقاله با توجه به اینکه اطراف دیافراگم کاملاً محصور شده است، ثابت فریت افزایش یافته و میزان جابجایی پایدار دیافراگم متحرک نیز بیشتر شده است. این پدیده در حین انجام تست عملی قطعه ساخته شده نیز مشاهده گردید.

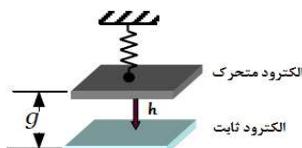
اما افزایش ثابت فریت باعث افزایش ولتاژ تحریک قطعه می‌شود که به سبب استفاده پلیمر با مدول یانگ کوچک برای ساخت دیافراگم، میزان کرنش آن در مقابل اعمال ولتاژ بیشتر شده و در نتیجه ولتاژ تحریک افزایش چشم گیری نمی‌یابد.

۳- مدل‌سازی ریاضی

آینه با تحریک الکتروستاتیکی را می‌توان به صورت یک خازن با دو صفحه موازی در نظر گرفت که یکی از صفحات آن روی زیر لایه ثابت شده و صفحه دیگر که دیافراگم آینه است به صورت انعطاف پذیر می‌باشد. ولتاژ اعمال شده به این دو صفحه، نیروی جاذبه‌ای بین آنها ایجاد می‌کند. نیروی جاذبه سبب اعمال فشار به دیافراگم شده و باعث جابجایی دیافراگم انعطاف‌پذیر در جهت نزدیک شدن به الکترود ثابت می‌شود.

این رفتار مکانیکی ساده را می‌توان با تئوری صفحه کیریشوف^{۱۱} که در مورد جایه جایی صفحات می‌باشد توصیف کرد [۱۴].

$$\frac{\partial^4 w}{\partial x^4} + 2 \frac{\partial^4 w}{\partial^2 x \partial^2 y} + \frac{\partial^4 w}{\partial y^4} = \Delta \Delta w = \frac{p}{D} \quad (1)$$



شکل (۱): مدلی از خازن دو صفحه موازی

شکل (۲) ساختار کلی میکروآینه ساخته شده را نشان می‌دهد. با توجه به اینکه از عملگر الکتروستاتیکی در ساخت این قطعه استفاده شده، میکروآینه از دو بخش جدا تشکیل شده است. بخش اول، مجموعه ای از الکترودهای ثابت می‌باشد که روی زیرلایه شیشه‌ای ایجاد شده است. قسمت دوم، الکترود متحرک است که به صورت دیافراگم پلیمری از جنس SU-8 میکرومتر می‌باشد؛ که با پوشاندن لایه ای از فلز بر روی سطح زیرین، این دیافراگم به الکترود متحرک رساناً 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. از آنجاییکه میکروآینه مورد نظر چهت بکارگیری در سیستم‌های اپتیک تطبیقی ساخته شده است، لذا می‌بایست به گونه‌ای طراحی شود که بتواند تغییر شکل مناسب را داشته باشد بدین منظور، الکترود پایینی به صورت آرایه‌ای ساخته شده‌اند.

فاصله بین الکترودها و دیافراگم نیز بوسیله دیواره‌هایی از جنس SU-8 ایجاد گردیده است. مزیت مهم دیگر پلیمر SU-8، قابلیت آن در لایه نشانی با ضخامت‌های متنوع از ۵۰۰ نانومتر تا چند میلیمتر است [۱۱]. با استفاده از این ویژگی می‌توان ضخامت دیافراگم و فاصله بین دیافراگم و الکترودهای ثابت را با مقادیر دلخواهی پیاده‌سازی نمود. درنهایت و همانگونه که در فرآیند ساخت اشاره خواهد شد؛ در انتهای، دو قسمت میکروآینه به یکدیگر جسبانده^{۱۲} می‌شوند.

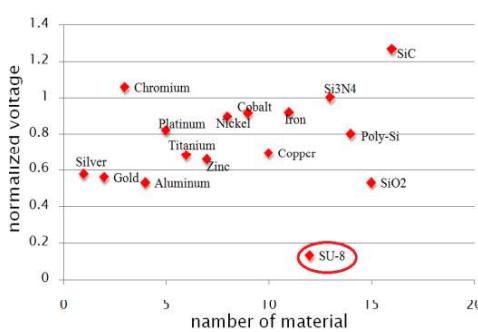
در شبیه‌سازی سعی شده تاثیر پارامترهای مختلف بر روی ولتاژ تحریک و میزان جابجایی بررسی شود.

با توجه به رابطه (۷) و (۸) که به ترتیب مشخص کننده ولتاژ تحریک و میزان جابجایی دیافراگم دایره ای می‌باشند، مشخص است که ولتاژ و جابجایی متاثر از دو بخش جداگانه است، یک بخش مربوط به مشخصات ساختار، مانند ابعاد و ضخامت دیافراگم است و بخش دوم مربوط به مشخصات ماده انتخاب شده به عنوان دیافراگم نظیر مدول یانگ می‌باشد.

$$V = \sqrt{\left(\frac{16\pi ER^3}{3t^2(1-v^2)} + 4\pi\sigma t\right) \times \frac{8g_0}{27A}} \approx \underbrace{\sqrt{\frac{E}{(1-v^2)}}}_{\text{خصوصیات}} \times \underbrace{\sqrt{\frac{Rg_0}{t^2}}}_{\text{هنده ساختار}} \quad (7)$$

$$w(r) = \frac{3(1-v^2)a^4\epsilon_0\epsilon_r V^2}{8Eh^3g_0^2} \left[1 - \left(\frac{r}{a}\right)^2\right]^2 \approx \underbrace{\frac{(1-v^2)}{E}}_{\text{خصوصیات ماده}} \times \underbrace{\frac{a^4}{h^3g_0^2}}_{\text{هنده ساختار}} \times \left[1 - \left(\frac{r}{a}\right)^2\right]^2 \quad (8)$$

از این رو انتخاب ماده مناسب جهت ساخت دیافراگم، نقش به سزای در عملکرد قطعه دارد. معمولاً برای ساخت دیافراگم میکرو آینه‌ها از موادی همچون سیلیکون نایتراید یا SOI^{۱۳} استفاده می‌شود که دارای مدول یانگ بالایی هستند و نیروی زیادی نیز برای تحریک احتیاج دارند. اما در مقابل، مواد پلیمری مانند SU-8^{۱۴} می‌تواند جایگزین مناسبی برای این مواد باشد. با توجه به اینکه مدول یانگ در SU-8 حدود ۴/۵ GPa است [۱۱]، نسبت به موادی مانند Si₃N₄ یا SiO₂ مدول یانگی حدود ۱۶۰ GPa می‌باشد و لولایت کمتری برای تحریک نیاز دارد [۱۵ و ۱۶].



شکل (۳): ولتاژ تحریک نرمالیزه شده تعدادی از مواد نسبت به Si₃N₄

شکل (۳) ولتاژ تحریک مواد مختلف نظیر طلا، آلومینیوم، اکسید سیلیکون که نسبت به ولتاژ تحریک Si₃N₄ نرمالیزه شده است را نشان می‌دهد. علت اینکه ولتاژهای بقیه مواد نسبت به ماده Si₃N₄ نرمالیزه کرده‌ایم این است که این ماده یکی از متداولترین مواد در ساخت

$$D = \frac{Eh^3}{12(1-v^2)} \quad (2)$$

که در رابطه (۱) نشان دهنده جابجایی و D صلبیت خمشی^{۱۲} و میزان بار یا فشاری که روی صفحه اعمال می‌شود. همانطور که مشخص است مقدار D متاثر از نوع ماده، مدول یانگ E ، ضریب پواسون v و ضخامت h آن می‌باشد [۱۲].

با حل رابطه (۱) و در نظر گرفتن شرایط مرزی $w(a)=0$, $w'(0)=0$ میزان جابجایی نقطه به نقطه دیافراگم قابل محاسبه است. رابطه کلی جابجایی دیافراگم دایره‌ای عبارت است از:

$$w(r) = \frac{pa^4}{64D} \left(1 - \frac{r^2}{a^2}\right) = w(0) \left(1 - \frac{r^2}{a^2}\right)^2 \quad (3)$$

در رابطه (۳)، a شعاع دیافراگم، r شعاع پایه‌ای که دیافراگم بر روی آن قرار دارد و D ضریب صلبیت خمشی می‌باشد. با در نظر گرفتن رابطه بین نیرو و فشار می‌توان فشار اعمالی را با بر حسب نیروی الکتروستاتیکی بدست آورد.

$$p = \frac{f_e}{A} \quad (4)$$

$$f_e = \frac{\epsilon_0 \epsilon A V^2}{2g^2} \quad (5)$$

در رابطه (۵)، A مساحت الکترودها، ϵ ضریب دی الکتریک، ϵ_0 ضریب نفوذ پذیری خلاء، g فاصله بین صفحات و V ولتاژ اعمالی به الکترودها می‌باشد.

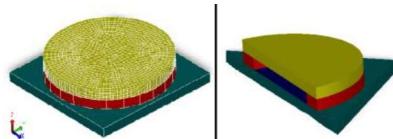
با جایگذاری روابط (۴) و (۵) در رابطه حاکم بر جابجایی دیافراگم میزان جابجایی دیافراگم دایره‌ای به صورت رابطه (۶) خواهد بود [۱۴].

$$w(r) = \frac{3(1-v^2)a^4\epsilon_0\epsilon_r V^2}{8Eh^3g_0^2} \left[1 - \left(\frac{r}{a}\right)^2\right]^2 \quad (6)$$

با توجه به رابطه (۶) جابجایی با E که معرف مدول یانگ است، رابطه خطی دارد. اما از آنجایی که رابطه جابجایی با تغییر در ضخامت دیافراگم (h) و فاصله بین صفحات (g)، یک رابطه معکوس به ترتیب با توان سوم و توان دوم است. این پارامترها تاثیر به سزایی در عملکرد میکروآینه و میزان جابجایی دارند. به عنوان مثال با کاهش ضخامت دیافراگم جابجایی میکروآینه می‌تواند به صورت چشم‌گیری افزایش یابد اما کاهش ضخامت تاثیر منفی بر روی صافی و یکنواختی سطح دیافراگم خواهد داشت.

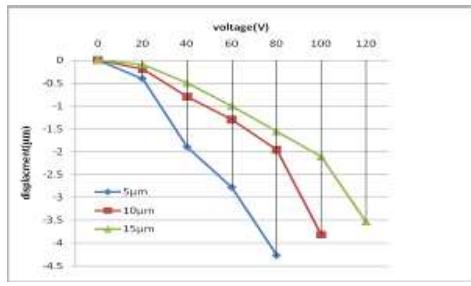
۴- شبیه سازی

در این مقاله هدف از شبیه‌سازی بررسی جابجایی دیافراگم میکروآینه به ازای تغییرات در پارامترهای مختلف است. از آنجاییکه پایین بودن ولتاژ تحریک در ساخت میکروآینه‌ها یک نکته اساسی است از این رو



شکل (۵): ساختار بدست آمده از شبیه‌سازی مراحل ساخت و مشبندی انجام شده توسط نرم‌افزار Coventor

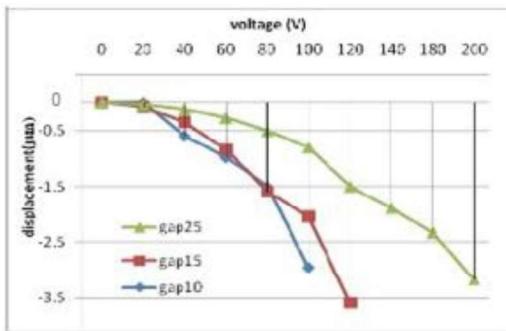
با توجه به اهمیت ضخامت دیافراگم و فاصله بین صفحات، این دو فاکتور توسط نرم‌افزار Coventor مورد بررسی قرار گرفتند. نتیجه بررسی میزان جابجایی مرکز دیافراگم به ازای سه ضخامت مختلف ۵، ۱۰ و ۱۵ میکرومتر که توسط نرم‌افزار Coventor انجام پذیرفته است، در شکل (۶) آمده است.



شکل (۶): نمودار میزان جابجایی به ازای اعمال ولتاژ برای ضخامت‌های مختلف دیافراگم با فاصله بین صفحات ۱۰ میکرومتر و شعاع ۲/۵ میلی متر

همانگونه که انتظار می‌رفت میزان جابجایی به ازای ضخامت کمتر دیافراگم، بیشتر خواهد بود لذا ضخامت ۱۰ میکرومتر به عنوان ضخامت مورد نظر جهت ساخت انتخاب گردید. ضخامت کمتر از این مقدار چالش‌های ساخت نظری پارگی دیافراگم و عدم پکنواختی سطح را به همراه دارد [۱۸].

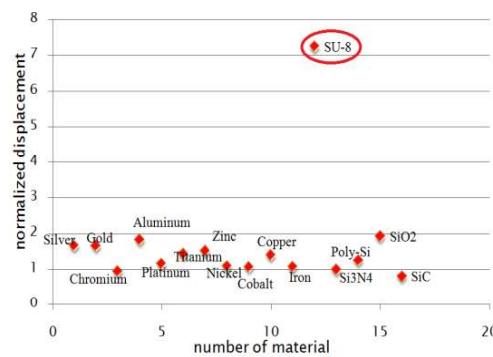
میزان جابجایی به ازای ولتاژ مختلف برای فاصله صفحات مختلف حاصل از شبیه‌سازی را می‌توان در شکل (۷) دید.



شکل (۷): نمودار میزان جابجایی به ازای اعمال ولتاژ در نمونه‌هایی با فاصله صفحات مختلف و ضخامت ۱۰ میکرومتر و شعاع ۲/۵ میلی متر

دیافراگم بوده و مدول یانگی نزدیک به سیلیکون دارد. همانگونه که این شکل نشان می‌دهد SU-8 ولتاژ تحریک کوچکتری نسبت به بقیه مواد دارد به عنوان مثال ولتاژ تحریک آن تقریباً سه برابر کمتر از ولتاژ تحریک اکسید سیلیکون و ۲ برابر کمتر از ولتاژ سیلیکون نایتراید می‌باشد. [۱۵ و ۱۶]

پارامتر بعدی که در عملکرد میکروآینینه‌ها باید به آن توجه کرد میزان جابجایی است که به ازای ولتاژ‌های مختلف ایجاد می‌شود. هرچه این جابجایی بیشتر باشد عملکرد میکروآینینه چشم گیرتر است. هر چه مدول یانگ ماده کمتر باشد میزان جابجایی بیشتر خواهد بود. شکل (۴) میزان جابجایی دیافراگم دایره‌ای با مواد مختلف را نسبت به جابجایی دیافراگم از جنس Si_3N_4 نرم‌الیزه کرده ایم.



شکل (۴): جابجایی نرم‌الیزه شده تعدادی از مواد نسبت به Si_3N_4

با توجه به اینکه مدول یانگ SU-8 بسیار پایین بوده لذا همانگونه که انتظار داشتیم جابجایی دیافراگم ساخته شده با آن نسبت به بقیه مواد در ولتاژی یکسان به صورت چشمگیری بیشتر خواهد بود. به عنوان مثال جابجایی ایجاد شده در دیافراگم SU-8 نسبت به جایه جایی دیافراگمی از جنس Si_3N_4 حدود ۷ برابر بیشتر بوده که این مقدار بسیار چشم‌گیر و حائز اهمیت است.

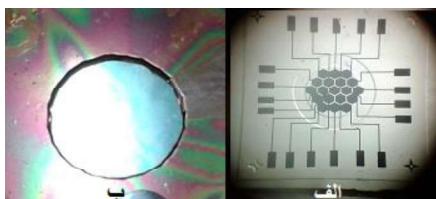
با مشخص شدن ماده مناسب جهت ساخت دیافراگم، نوبت به بررسی تاثیر عوامل ساختاری مانند ابعاد، ضخامت و فاصله بین صفحات بر روی میزان جابجایی و ولتاژ تحریک می‌رسد.

در این مقاله، برای تحلیل مکانیکی دیافراگم و بدست آوردن پاسخ‌دهی سنسور مورد نظر به ولتاژ اعمال شده، از نرم افزار Coventor بهره گرفته شده است. این نرم‌افزار، علاوه بر حل مسائل دینامیکی در قطعات MEMS با تحلیل گره‌های مختلف، قابلیت شبیه‌سازی 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 بهصرفه می‌باشد. شکل (۵) ساختار ایجاد شده پس از شبیه‌سازی فرآیند ساخت و مشبندی انجام شده در Coventor را نشان می‌دهد.

علاوه بر این، سونش سیلیکون با چنین عمقی (حدود ۴۵۰ میکرومتر) با بسیاری از روش‌ها امکان‌پذیر نمی‌باشد.

برای ساخت الکترود و دیواره‌ها، ابتدا فلزات کروم و طلا به ترتیب با ضخامت‌های ۳۰ و ۱۲۰ نانومتر به روش لایه‌نشانی تبخیر حرارتی^{۱۴} روی زیرلایه‌ای شیشه‌ای لایه نشانی شده و با استفاده از روش لیتوگرافی استاندارد، با ایجاد الگویی دایره‌ای شکل در ماده فتورزیست شیلپی. سونش شده‌اند. سپس فتورزیست SU-8 ۲۰۱۰ به ضخامت ۱۰ میکرومتر با استفاده از لایه‌نشانی چرخشی روی آن نشانه شده و پس از پخت اولیه در دماهای ۶۵ و ۹۵ درجه با فرآیند لیتوگرافی استاندارد نوردهی گردید. در مرحله بعد، پخت بعد از نوردهی^{۱۵} در دماهای ۶۵ و ۹۵ درجه صورت گرفته و شکل دیواره‌ها در مایع ظهور^{۱۶} مختص به SU-8 ظاهر گردید (شکل ۱۰-الف).

در انتهای می‌بایست دیافراگم و دیواره‌ها به یکدیگر چسبانده شوند. راههای مختلفی برای چسباندن قطعات مختلف در سیستم‌های میکروالکترومکانیکی وجود دارد که از آن جمله می‌توان به چسباندن با استفاده از ماده چسبنده^{۱۷} و چسباندن حرارتی اشاره نمود [۲۰]. در این مقاله به دلیل اختناب از ایجاد تنفس پسماند بین دیافراگم و سیلیکون که به علت تفاوت در ضربی 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 استفاده شده است. به این صورت که لایه ای از فتورزیست SU-8 ۲۰۰۲ با استفاده از لایه‌نشانی چرخشی روی الکترود زیرین لایه نشانی کرده (شکل ۱۰-الف) سپس دیافراگم پلیمری (شکل ۱۰-ب) را روی الکترود زیرین قرار داده و با استفاده از میکروسکوپ نوری در محل مناسب قرار گرفته و با اندکی فشار در اطراف قاب سیلیکونی دو الکترود به یکدیگر متصل شده و در نهایت با فرآیند لیتوگرافی استاندارد نوردهی گردید تا اتصال کاملاً محکم شود. به علت یکپارچه بودن ساختار امکان گرفتن تصویر میکروسکوپ الکترونی امکان پذیر نبود.

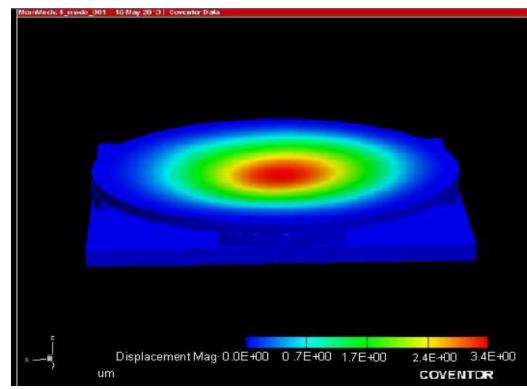


شکل (۱۰): (الف) تصویری از الکترود ها به همراه دیواره (ب) دیافراگم پلیمری

۶- بحث و نتایج

همانگونه که در قسمت مقدمه اشاره شد، سه پارامتر اصلی مشخص کننده کیفیت میکروآینه عبارت‌اند از: صافی سطح، میزان جابجایی و سرعت پاسخ‌دهی. برای بررسی این موارد در آینه ساخته شده، پس از ساخت قطعه، ناهمواری‌های سطح آن با استفاده از میکروسکوپ اتمی^{۱۸}

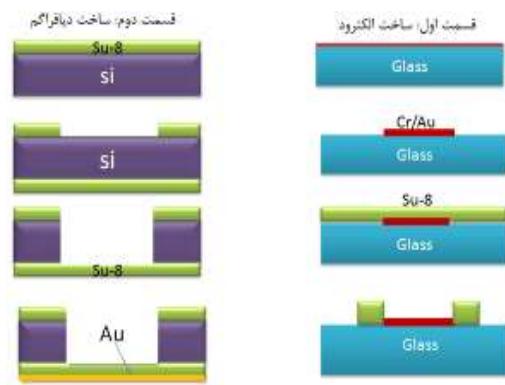
شکل (۸) نیز شماتیکی از میزان جابجایی دیافراگم ۱۰ میکرومتر با فاصله صفحات ۱۰ میکرومتر به ازای اعمال ولتاژ ۶۰ ولت را نشان می‌دهد.



شکل (۸): میزان جابجایی دیافراگم ۱۰ میکرومتر با فاصله صفحات ۱۰ میکرومتر و شعاع ۲/۵ میلی‌متر به ازای اعمال ولتاژ ۱۰۰ ولت

۵- روش ساخت

شکل ۹ خلاصه‌ای از فرآیند ساخت این میکروآینه را نشان می‌دهد. جهت ساخت دیافراگم، ابتدا SU-8 از نوع ۲۰۱۰ به روش لایه‌نشانی چرخشی با سرعت ۳۰۰۰ دور بر دقیقه به ضخامت ۱۰ میکرومتر روی یک بستر سیلیکونی لایه‌نشانی شده است. از سیلیکون به عنوان قاب نگهدارنده دیافراگم استفاده شده است. سپس ناحیه میانی سیلیکون را به شکل الگویی دایره شکل به طور کامل با روش سونش شیمیایی مرتبط با کاتالیزور فلزی [۱۹] سونش نموده‌ایم تا به SU-8 برسیم (شکل ۱۰-ب). در مرحله بعد، با استفاده از دستگاه لایه نشانی حرارتی، پشت دیافراگم با لایه‌ای از فلز طلا به ضخامت ۱۵۰ نانومتر پوشانده شده تا رسانا گشته و به عنوان الکترود متحرک مورد استفاده قرار گیرد.



شکل (۹): مراحل ساخت

مزیت عمده این روش این است که برای سونش سیلیکون نیازی به استفاده از دستگاه DIRE یا سایر روش‌های پرهزینه و زمان بر نیست.

و بر اساس آن یک نمونه میکرو آینه با قابلیت جابجایی تا ۴/۵ میکرومتر طراحی و ساخته شد.

قطعه ساخته شده نسبت به نمونه های مشابه که معمولاً از جنس سیلیکون ساخته می شوند، قابلیت جابجایی بیشتر و ولتاژ کاری کمتری دارد. برای مقایسه در جدول (۱)، نتایج چند نمونه از قطعات ساخته شده مبتنی بر سیلیکون و نمونه ساخته شد در این تحقیق ارائه شده است.

جدول (۱): مقایسه ای بین میکرو آینه های مشابه و میکروآینه ساخته شده

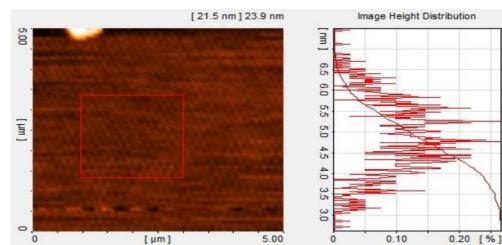
جنس	ابعاد	ضخامت	حداکثر ولتاژ	حداکثر جابجایی
[۲۱] سیلیکون نایتراید	۱*۱mm	۱ μm	۱۳۰	۲ μm
[۲۲] سیلیکون	۱ mm	۱ μm	۱۲۰	۲ μm
SU-8 پلیمر	۲/۵ mm	۱۰ μm	۱۲۰	۴ μm

ضمن اینکه روش مورد استفاده در این تحقیق برای مواد پلیمری نسبت به روشهای دیگر بسیار ساده تر و کم هزینه تر می باشد. لذا می توان از این روش به منظور تولید انبوه میکروآینه برای کاربردهای متنوعی نظری اپتیک تطبیقی استفاده کرد.

مراجع

- [1] Kim, W., Kim, J., "Micro mirror array, manufacturing method of the micro mirror array, and floating display device including the micro mirror array". United States patent application US 15/205,754. 2017.
- [2] Bai, Y., "Design, Fabrication, and Characterization of a 2-D SOI MEMS Micromirror with Sidewall Electrodes for Confocal MACROscope Imaging". PhD thesis, Ontario: University of Waterloo, 2010.
- [3] Jia, K., "Development and application of high fill factor, small footprint MEMS micromirrors and micromirrors arrays". PhD thesis, university of Florida, 2009.
- [4] Kanno, I., Kunisawa, T., Suzuki, T., Kotera, H., "Development of Deformable Mirror Composed of Piezoelectric Thin Films for Adaptive Optics". IEEE journal of selected topics in quantum electronics. vol.13,pp. 155-161,2007.
- [5] Friese, Ch., Zappe, H., "Deformable Adaptive Optical Mirrors". Microelectromechanical system, vol.17, pp.11-19, 2008.
- [6] Zhu, G., Lévine, J., Praly, L., Peter, Y., "Flatness-Based Control of Electrostatically Actuated MEMS With Application to Adaptive Optics: A Simulation Study". Journal of microelectromechanical system, vol.15,2006.
- [7] Suzuki, J., Onishi, Y., Terao, K., Takao, H., Shimokawa, F., Oohira, F., Suzuki, T., "Development of a two-dimensional scanning micro-mirror utilizing magnetic polymer composite". Japanese Journal of Applied Physics, vol. 55, pp. 6S1-06GP01, 2016.
- [8] Metwally, K., Robert , L., "SU-8-based rapid tooling for thermal embossing".vol.15,pp.273-283,2011.

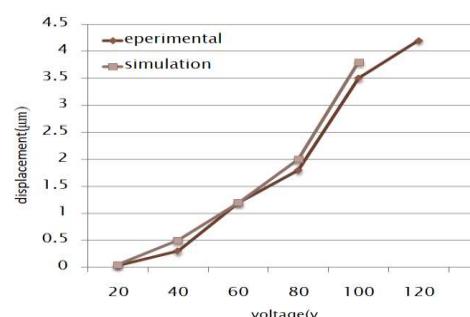
اندازه گیری شد که حدود واریانس ناهمواری سطح ۲۰ نانومتر بدست آمد (شکل (۱۱)) آینه می باشد:



شکل (۱۱): ناهمواری سطح اندازه گیری شده توسط میکروسکوپ نیروی اتمی

علاوه بر صافی سطح برای آزمودن صحت عملکرد میکرو آینه، ولتاژ هایی در محدوده صفر تا ۱۲۰ ولت به همه الکترودها اعمال شده و جابجایی دیافراگم با استفاده از یک سیستم اپتیکی مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفته است. سیستم اپتیکی مورد استفاده از نوع خود کانون بوده و نمودار جابجایی های اندازه گیری شده توسط این سیستم برای نمونه ای ساخته شده با فاصله صفحات و ضخامت دیافراگم ۱۰ میکرومتر به ازای ولتاژ های مختلف در شکل (۱۲) به نمایش در آمده است. همانگونه که در نمودار مشخص است، مقادیر بدست آمده از تست با مقادیر شبیه سازی تقریباً برابر است.

با توجه به شکل به ازای ولتاژ ۱۲۰ ولت میزان جابجایی ۴/۲ میکرومتر بوده که از $\frac{1}{3}$ فاصله بین صفحات بیشتر است این در حالی است که در عملگرهای الکترواستاتیکی با دو صفحه موازی، معمولاً در این فاصله پدیده قطع رخ می دهد اما در نمونه ساخته شده به سبب افزایش ثابت فریت این پدیده در این فاصله رخ نداده و محدوده حرکت پایدار دیافراگم افزایش یافته است. همچنین همانگونه که نتایج نشان می دهد به سبب استفاده از دیافراگم پلیمری ولتاژ تحریک در محدوده مناسبی قرار دارد.



شکل (۱۲): نمودار میزان جابجایی به ازای اعمال ولتاژ برای دیافراگم به ضخامت ۱۰ میکرومتر

۷- نتیجه گیری

در پژوهش حاضر، روش جدیدی برای ساخت میکروآینه انعطاف پذیر از جنس پلیمر جهت استفاده در سیستم های اپتیک تطبیقی، پیشنهاد

-
- ¹⁶ Developer
¹⁷ Adhesion Bonding
¹⁸ AFM

[9] Tyng-Yow, Ch., Chen, W.E., "A Large-Stroke MEMS Deformable Mirror Fabricated by Low-Stress Fluoropolymer Membrane". IEEE photonics technology letters ,vol.20,pp.830-832, 2008.

[10] Towghian, Sh., "A Large-Stroke Electrostatic Micro-Actuator" .PHD thesis ,University of Waterloo , Ontario, Canada, 2010 .

[11] www.michrochem.com, Jan. 2013.02.12.

[12] Piyabongkarn, D., Sun, Y., Rajamani, R., Sezen, A., "Travel Range Extension of a MEMS Electrostatic Microactuator".vol.13, pp.138-145,2005.

[13] Edwards, J.M., "Modeling and feedback control of a MEMS electrostatic actuator", PhD thesis ,Cleveland State University, 2008 .

[14] Bao M., "Analysis and Design Principles of MEMS Devices" Elsevier B.V,2005.

[15] Hu, F., Tang, Y., Qian, Y., "Design of a MEMS micromirror actuated by electrostatic repulsive force" Optik, vol.123,pp.387-390, 2012.

[16] Sasaki, T., Hane, K., "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.

[17] Hu, F., Yao, J., Qiu, Ch., Ren, H., "A MEMS micromirror driven by electrostatic force" Journal of Electrostatics, vol.68,pp.237-242, 2010.

[18] Friese, Ch., Wissmann, M., "Polymer-based membrane mirrors for micro-optical sensors" IEEE, pp.667-672, 2003.

[19] Lianto, P., Yu, Sh., Wu, J., Thompsonad, V., "Vertical etching with isolated catalysts in metal-assisted chemicaletching of silicon". The Royal Society of Chemistry, pp . 1-8, 2012.

[20] Shamsi, A., Amiri, A., et el, "low cost method for hot embossing of microstructures on PMMA by SU-8 master".microsystem technology, vol.20, pp. 1925-31, 2014.

[21] Gupta, A., kumar, S., "Deformable Membrane Mirror for Wavefront Correction". Defence science journal, vol.59, pp.590, 2009.

[22] Kurczynski, P., Dyson, H., "Fabrication and measurement of low-stress membrane mirrors for adaptive optics".applied optics, vol.43, pp. 3573-80, 2004.

زیرنویس‌ها

¹ Adaptive optic system

² incident wavefront

³ ophthalmology

⁴ Microelectromechanical

⁵ Fill factor

⁶ Parallel plate

⁷ Spin coating

⁸ DRIE

⁹ Bonding

¹⁰ Pull in

¹¹ Kirchhoffs plate theory

¹² flexural rigidity

¹³ silicon-on-insulator

¹⁴ Thermal evaporation deposition

¹⁵ Post Bake

