طراحی و ساخت میکروآیینه شکل‌پذیر 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: دراین مقاله روشی نوین جهت ساخت میکروآیینه انعطاف‌پذیر پلیمری مبتنی‌بر عملگرالکترواستاتیک ارائه شده‌است. میکروآیینه‌های انعطاف‌پذیر معمولاً در سیستم‌های اپتیک تطبیقی جهت تصحیح اعوجاج‌های موجود در جبهه موج نور بکار می‌روند ازاین‌رو می‌بایست دارای دیافراگمی منعطف باشند. در این تحقیق دیافراگم میکروآئینه، از جنس پلیمرSU-8 ساخته شده و بر روی آرایه‌ای از الکترودهای ثابت قرارگرفته‌است. 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 گونه ای که دیافراگرم به شعاع ۲/۵mm و ضخامت ۱۰μm را با اعمال ولتاژ۱۲۰ولت حدود ۴μm جابجا می کند . علاوه‌براین، استفاده از مواد پلیمری بجای سیلیکون در ساخت دیافراگم، سادگی و کم‌هزینه بودن فرآیند ساخت را نیز به همراه دارد. اما دیافراگم های پلیمری رایج، صافی سطح کمتری در مقایسه با نمونه‌های سیلیکون دارند. دراین مقاله برای غلبه براین مشکل از راهکاری جدیدی برای ساخت میکروآیینه استفاده شده که علاوه‌بر تمام مزایای آیینه 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 الکتروستاتیکی ، میکرو آیینه.

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

[Downloaded from jiaeee.com on 2026-11-20]
[DOR: 20.1001.1.26765810.1397.15.2.11.1]
Journal of Iranian Association of Electrical and Electronics Engineers - Vol.15- No.2-Summer 2018

۱- مقدمه

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

سیستم‌های اپتیک تطبیقی شامل بخش‌های متعددی هستند که مهمترین آنها، آیینه‌ها می‌باشند. با استفاده از این آیینه‌ها، امکان رفع اثرات نامطلوب ناشی از ابیراهی‌های مختلف در سیستم‌های تصویربردار و افزایش دقت هندسی سیستم‌های اپتیکی فراهم می‌شود [۱و۲].

در یک سیستم اپتیک تطبیقی، دیافراگم آیینه به صورت دینامیکی بگونه‌ای کنترل می‌شود که جابجایی فازی دقیقاً برخلاف جابجایی فازی که سبب ایجاد ابیراهی در جبهه موج مرجع شده را، به جبهه موج تابشی[۲] اعمال کند. در نتیجه این عمل، جابجایی فازی آیینه آیینه و ابیراهی، یکدیگر را خنثی کرده و جبهه موج نهایی کاملا 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[۳]) مورد استفاده قرار می گیرد [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 درچشم پزشکی مورد استفاده قرار می‌گیرند باید کوچک، قابل حمل و ارزان قیمت باشند. این در حالی است که آیینه‌های تطبیقی متداول، معمولا مشکلاتی از قبیل هزینه بالا و وزن زیاد، پیچیدگی و ابعاد بزرگ را به همراه دارند اما در دهه‌های اخیر با بهره‌گیری از تکنولوژیMEMS[۴] و روش‌های میکروماشینکاری حجمی و سطحی، آیینه‌های 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].

میکروآیینه ها در دو نوع دیافراگم پیوسته و گسسته ساخته می‌شوند، که با توجه به خصوصیات منحصر به فردشان کاربردها متفاوتی دارند. اگرچه آیینه های پیوسته سرعت کمتری نسبت به آیینه های 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 ضریب پرشدگی[۵] مطلوب و ساخت ساده تر نسبت به آیینه‌های گسسته، برای استفاده در سیستم های اپتیک تطبیقی بسیار مناسب تر هستند [۶].

مشخصات آیینه‌های انعطاف پذیر بسته به کاربرد آنها متفاوت است اما بازرترین آنها عبارتند از: میزان جابجایی، سرعت پاسخ دهی و صافی سطح [۷] که ارتباط مستقیم با نوع عملگری دارد که برای تحریک آیینه 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 عملگرها، همواره مورد توجه طراحان و سازندگان ادوات MEMS به‌ویژه در میکروآیینه‌ها بوده‌اند. یکی ازپرکاربردترین و متداول ترین این عملگرها، عملگر الکتروستاتیکی با دو صفحه موازی[۶] 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 [۸]، 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.

اما نیروهای الکتروستاتیکی در ابعاد میکرومتر نسبتاً کوچک بوده و برای ایجاد جابجایی قابل توجه، ولتاژ تحریک بالایی نیاز دارند. حال آنکه استفاده از سیلیکون به عنوان پرکاربردترین ماده برای ساخت این قطعات، بر این مشکل می‌افزاید [۴و۹]. چراکه سیلیکون با داشتن مدول یانگ در حدود ۱۶۰GPa نه تنها مقاومت مکانیکی بالایی در مقابل تغییر وضعت 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 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[۷] استفاده کرد، و همچنین بدلیل تنش پسماند ایجاد شده در حین فرآیند تولید، دستیابی به سطوح صاف و بدون اعوجاج یکی از چالشهای اصلی می‌باشد.

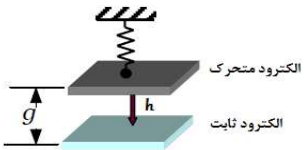
در این مقاله روشی نوین برای ساخت میکروآیینه انعطاف پذیر پلیمری جهت استفاده در سیستم های اپتیک تطبیقی ارائه شده است. در این روش از دیافراگم پیوسته SU-8 با پوشش فلزی و قاب سیلیکونی بر روی مجموعه‌ای از عملگرهای الکتروستاتیک استفاده شده است. مزیت این روش صافی سطح مناسب به همراه سادگی نسبی فرآیند ساخت به علت استفاده از روش سونش 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 سونش شیمیایی به جای سونش‌های متداول فیزیکی، نیاز به استفاده از تجهیزات گران‌قیمت و پیچیده مانند سونش خشک[۸] مرتفع گردیده و زمان ساخت در قیاس با سایر روش‌ها کاهش چشمگیری داشته‌است که آن را به گزینه مناسبی برای تولید انبوه به‌ویژه در ادواتی که دارای دیافراگم هستند مبدل می‌سازد.

[Downloaded from jiaeee.com on 2026-11-20]
[DOR: 20.1001.1.26765810.1397.15.2.11.1]

۲- ساختار میکروآیینه

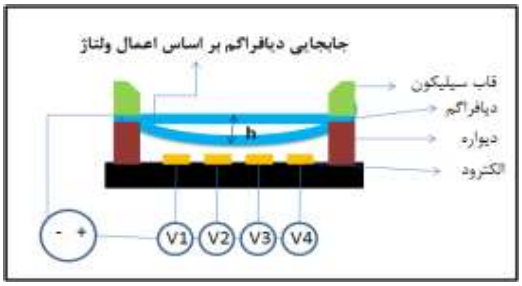
همانگونه که اشاره شد، در این مقاله از عملگر الکتروستاتیک به عنوان محرک در میکروآیینه استفاده شده‌است. در یک عملگر الکتروستاتیکی با دو صفحه موازی، در اثر اعمال ولتاژ بین دو الکترود، به دلیل تجمع بارهای مخالف در الکترودها، نیروی جاذبه‌ای بین آنها ایجاد شده و سبب جابجایی الکترود متحرک می‌شود. شکل (۱) مدل 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(۱): مدلی از خازن دو صفحه موازی

شکل (۲) ساختار کلی میکروآیینه ساخته شده را نشان می‌دهد. با توجه به اینکه از عملگر الکتروستاتیکی در ساخت این قطعه استفاده شده، میکروآیینه از دو بخش مجزا تشکیل شده است. بخش اول، مجموعه ای از الکترودهای ثابت می باشد که روی زیرلایه شیشه‌ای ایجاد شده است. قسمت دوم، الکترود متحرک است که به صورت دیافراگم پلیمری از جنس SU-8 به ضخامت ۱۰میکرومتر می‌باشد؛ که با پوشاندن لایه ای از فلز بر روی سطح زیرین، این دیافراگم به الکترود 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. از آنجاییکه میکروآیینه مورد نظر جهت بکارگیری در سیستم‌های اپتیک تطبیقی ساخته شده‌است، 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؛ درانتها، دو قسمت میکروآیینه به یکدیگر چسبانده[۹] می شوند.



شکل(۲): شکل شماتیک از میکروآیینه 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 صفحه‌ی 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[۱۰] رخ می دهد [۱۲].

روش های مختلفی برای افزایش ولتاژ قطع وجود دارد که یکی از موثرترین آنها افزایش ثابت فنریت است. با افزایش ولتاژ قطع، محدوده حرکت پایدار الکترود متحرک نیز افزایش می یابد [۱۳].

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

اما افزایش ثابت فنریت 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 نمی یابد.

۳- مدل‌سازی ریاضی

آیینه 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 آیینه 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 جابه‌جایی دیافراگم انعطاف‌پذیر در جهت نزدیک شدن به الکترود ثابت می‌شود.

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

$$\frac{\partial^4 w}{\partial x^4}+2\frac{\partial^4 w}{\partial^2 x\partial^2 y}+\frac{\partial^4 w}{\partial y^4}=\Delta\Delta w=\frac{p}{D} \qquad (۱)$$

[Downloaded from jiaeee.com on 2026-11-20]
[DOR: 20.1001.1.26765810.1397.15.2.11.1]
Journal of Iranian Association of Electrical and Electronics Engineers - Vol.15- No.2-Summer 2018

$$D=\frac{Eh^3}{12\left(1-\upsilon^2\right)} \qquad (۲)$$

که در رابطه (۱) w نشان دهنده جابه‌جایی و D صلبیت خمشی[۱۲] و p میزان بار یا فشاری که روی صفحه اعمال می‌شود. همانطورکه مشخص است مقدارD متاثر از نوع ماده، مدول یانگ E، ضریب پواسون υ و ضخامت h آن می‌باشد[۱۴].

با حل رابطه (۱) و در نظر گرفتن شرایط مرزی $w(a)=0,\ w'(a)=0,\ w'(0)=0$ میزان جابه‌جایی نقطه به نقطه دیافراگم قابل محاسبه است. رابطه کلی جابه‌جایی دیافراگم دایره‌ای عبارت است از: [۱۴]

$$w(r)=\frac{pa^4}{64D}\left(1-\frac{r^2}{a^2}\right)=w(0)\left(1-\frac{r^2}{a^2}\right)^2 \qquad (۳)$$

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.

$$p=\frac{f_e}{A} \qquad (۴)$$

$$f_e=\frac{\varepsilon_0\varepsilon A V^2}{2g^2} \qquad (۵)$$

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].

$$w(r)=\frac{3(1-\upsilon^2)a^4\varepsilon_0\varepsilon_r V^2}{8Eh^3g_0^2}\left[1-\left(\frac{r}{a}\right)^2\right]^2 \qquad (۶)$$

با توجه به رابطه (۶) جابه جایی 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 میکروآیینه و میزان جابجایی دارند. به عنوان مثال با کاهش ضخامت دیافراگم جابه‌جایی میکرو آیینه می‌تواند به صورت چشم‌گیری افزایش یابد اما کاهش ضخامت تاثیر منفی برروی صافی و یکنواختی سطح دیافراگم خواهد داشت.

۴- شبیه سازی

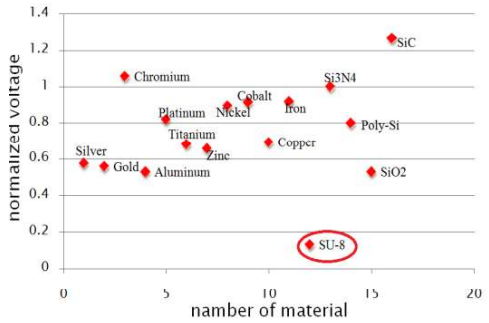
در این مقاله هدف از شبیه‌سازی بررسی جابجایی دیافراگم میکروآیینه به ازای تغییرات در پارامترهای مختلف است. از آنجاییکه پایین بودن ولتاژ تحریک در ساخت میکروآیینه‌ها یک نکته اساسی است از این رو در شبیه‌سازی سعی شده تاثیر پارامترهای مختلف بر روی ولتاژ تحریک و میزان جابجایی بررسی شود.

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.

$$V=\sqrt{\left(\frac{16\pi ER^3}{3t^2(1-\upsilon^2)}+4\pi\sigma t\right)\times\frac{8g_0}{27A}}\cong\underbrace{\sqrt{\frac{E}{(1-\upsilon^2)}}}_{\text{خصوصی‌ات}}\times\underbrace{\sqrt{\frac{Rg_0}{t^2}}}_{\text{هندسه ساختار}} \qquad (۷)$$

$$w(r)=\frac{3(1-\upsilon^2)a^4\varepsilon_0\varepsilon_r V^2}{8Eh^3g_0^2}\left[1-\left(\frac{r}{a}\right)^2\right]^2\approx\underbrace{\frac{(1-\upsilon^2)}{E}}_{\text{خصوصی‌ات مواد}}\times\underbrace{\frac{a^4}{h^3g_0^2}\times\left[1-\left(\frac{r}{a}\right)^2\right]^2}_{\text{هندسه ساختار}} \qquad (۸)$$

از این رو انتخاب ماده مناسب جهت ساخت دیافراگم، نقش به سزای در عملکرد قطعه دارد. معمولا برای ساخت دیافراگم میکرو آیینه‌ها از موادی همچون سیلیکون نایترایدو 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، می‌تواند جایگزین مناسبی برای این مواد باشد. با توجه به اینکه مدول یانگ SU-8 در حدود ۴/۵ GPa است [۱۱]، نسبت به موادی مانند Si یا Si_3N_4 که مدول یانگی حدود ۱۶۰ GPa می‌باشد ولتاژ کمتری برای تحریک نیاز دارد [۱۵ و۱۶و۱۷].



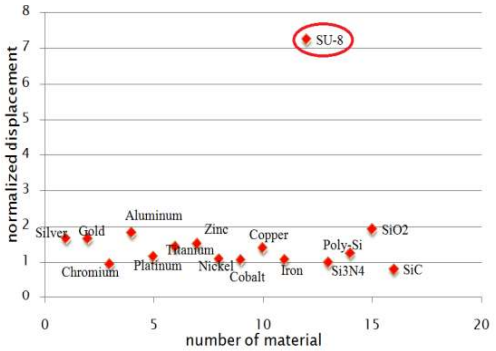
شکل (۳): ولتاژ تحریک نرمالیزه شده تعدادی از مواد نسبت به Si3N4

شکل (۳) ولتاژ تحریک مواد مختلف نظیر طلا، آلومینیوم، اکسید سیلیکون که نسبت به ولتاژ تحریک Si_3N_4 نرمالیزه شده است را نشان می‌دهد. علت اینکه ولتاژهای بقیه مواد نسبت به ماده Si_3N_4 نرمالیزه کرده‌ایم این است که این ماده یکی از متداولترین مواد در ساخت

[Downloaded from jiaeee.com on 2026-11-20]
[DOR: 20.1001.1.26765810.1397.15.2.11.1]

دیافراگم بوده و مدول یانگی نزدیک به سیلیکون دارد. همانگونه که این شکل نشان می دهد SU-8 ولتاژ تحریک کوچکتری نسبت به بقیه مواد دارد به عنوان مثال ولتاژ تحریک آن تقریبا سه برابر کمتر از ولتاژ تحریک اکسید سیلیکون و ۲ برابر کمتر از ولتاژ سیلیکون نایتراید می باشد. [۱۵ و۱۶و۱۷]

پارامتر بعدی که در عملکرد میکروآیینه ها باید به آن توجه کرد میزان جابجایی است که به ازای ولتاژهای مختلف ایجاد می‌شود. هرچه این جابجایی بیشتر باشد عملکرد میکروآیینه 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.

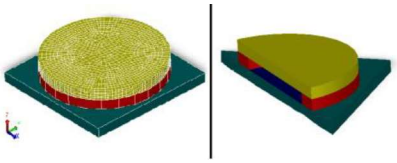


شکل(۴): جابجایی نرمالیزه شده تعدادی از مواد نسبت به Si3N4

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 جابه جایی دیافراگمی از جنس Si_3N_4 حدود ۷ برابر بیشتر بوده که این مقدار بسیار چشم‌گیر و حائز اهمیت است.

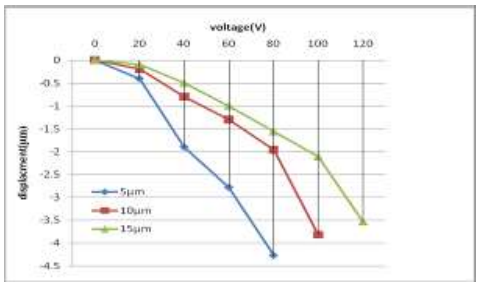
با مشخص شدن ماده مناسب جهت ساخت دیافراگم، نوبت به بررسی تاثیر عوامل ساختاری مانند ابعاد، ضخامت و فاصله بین صفحات بر روی میزان جابجایی و ولتاژ تحریک می رسد.

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 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 به‌صرفه می‌باشد. شکل (۵) ساختار ایجاد شده پس از شبیه سازی فرآیند ساخت و مش‌بندی انجام شده در Coventor را نشان می‌دهد.



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

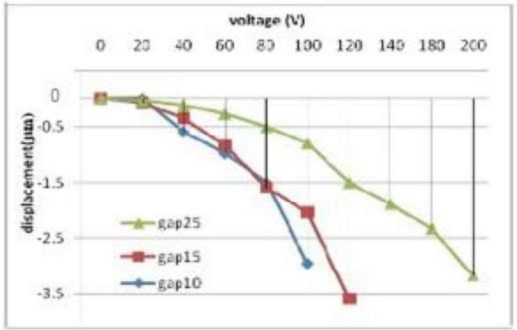
با توجه به اهمیت ضخامت دیافراگم و فاصله بین صفحات، این دو فاکتور توسط نرم‌افزار Coventor مورد بررسی قرار گرفتند. نتیجه بررسی میزان جابجایی مرکز دیافراگم به ازای سه ضخامت مختلف ۵، ۱۰ و ۱۵ میکرومتر که توسط نرم‌افزار Coventor انجام پذیرفته است، در شکل (۶) آمده است.



شکل (۶): نمودار میزان جابجایی به ازای اعمال ولتاژ برای ضخامت‌های مختلف دیافراگم با فاصله بین صفحات ۱۰ میکرومتر و شعاع ۲/۵میلی 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 چالش های ساخت نظیر پارگی دیافراگم و عدم یکنواختی سطح را به همراه دارد[۱۸].

میزان جابجایی به ازای ولتاژ مختلف برای فاصله صفحات مختلف حاصل از شبیه سازی را می توان در شکل (۷) دید.

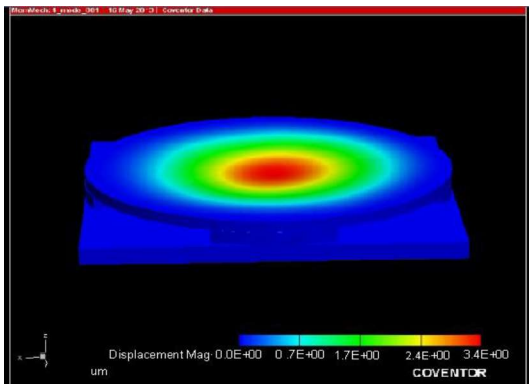


شکل (۷): نمودار میزان جابجایی به ازای اعمال ولتاژ در نمونه هایی با فاصله صفحات مختلف و ضخامت ۱۰میکرومتر و شعاع ۲/۵میلی متر

[Downloaded from jiaeee.com on 2026-11-20]

[DOR: 20.1001.1.26765810.1397.15.2.11.1]
Journal of Iranian Association of Electrical and Electronics Engineers - Vol.15- No.2-Summer 2018

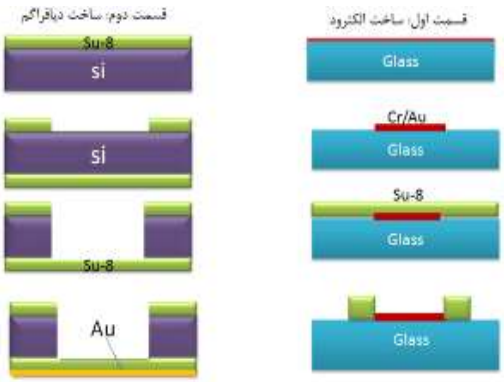
شکل (۸) نیز شماتیکی از میزان جابجایی دیافراگم ۱۰میکرومتر با فاصله صفحات ۱۰میکرومتر به ازای اعمال ولتاژ ۶۰ ولت را نشان می-دهد.



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

۵- روش ساخت

شکل۹ خلاصه‌ای از فرآیند ساخت این میکروآیینه را نشان می‌دهد. جهت ساخت دیافراگم، ابتدا SU-8 از نوع 2010 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 مرطوب با کاتالیزور فلزی [۱۹] سونش نموده‌ایم تا به SU-8 برسیم (شکل۱۰-ب). در مرحله بعد، با استفاده از دستگاه لایه نشانی حرارتی، پشت دیافراگم با لایه‌ای از فلز طلا به ضخامت۱۵۰ نانومتر پوشانده شده تا رسانا گشته و به عنوان الکترود متحرک مورد استفاده قرار گیرد.

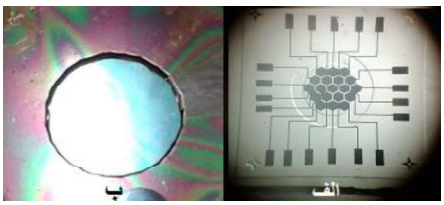


شکل (۹): مراحل ساخت

مزیت عمده این روش این است که برای سونش سیلیکون نیازی به استفاده از دستگاه DIRE یا سایر روش‌های پرهزینه و زمان‌بر نیست. علاوه‌براین، 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 Shipley، سونش شده‌اند. سپس فتورزیست SU-8 2010 به ضخامت ۱۰ میکرون با استفاده از لایه‌نشانی چرخشی روی آن نشانده 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 (شکل۱۰-الف).

در انتها، می‌بایست دیافراگم و دیواره‌ها به یکدیگر چسبانده شوند. راههای مختلفی برای چسباندن قطعات مختلف در سیستم‌های میکروالکترومکانیکی وجود دارد که از آن جمله می توان به چسباندن با استفاده از ماده چسبنده[۱۷] و چسباندن حرارتی اشاره نمود [۲۰]. 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. به این صورت که لایه ای از فتورزیست SU-8 2002 با استفاده از لایه‌نشانی چرخشی روی الکترود زیرین لایه نشانی کرده (شکل ۱۰-الف) سپس دیافراگم پلیمری(شکل۱۰-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 کاملا محکم شود. به علت یکپارچه بودن ساختار امکان گرفتن تصویر میکروسکوپ الکترونی امکان پذیر نبود.



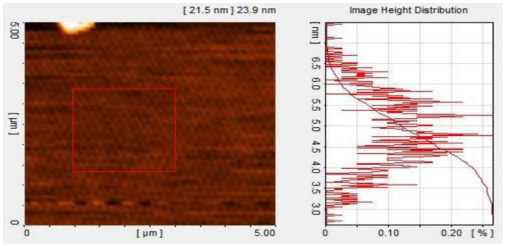
شکل (۱۰): الف)تصویری از الکترود ها به همراه دیواره ب)دیافراگم پلیمری

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]

[Downloaded from jiaeee.com on 2026-11-20]
[DOR: 20.1001.1.26765810.1397.15.2.11.1]

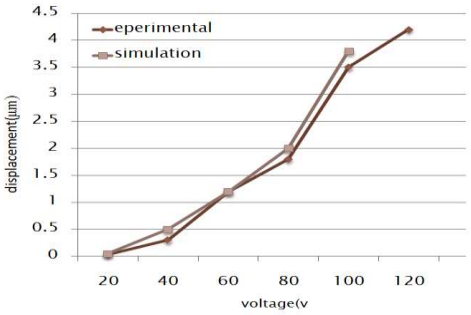
اندازه‌گیری شد که حدود واریانس ناهمواری سطح ۲۰ نانومتر بدست آمد (شکل (۱۱)) آیینه می‌باشد؛



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

علاوه بر صافی سطح برای آزمودن صحت عملکرد میکرو آیینه، ولتاژهایی 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 خودکانون بوده و نمودار جابجایی‌های اندازه گیری شده توسط این سیستم برای نمونه‌ی ساخته شده با فاصله صفحات و ضخامت دیافراگم ۱۰ میکرومتر به ازای ولتاژهای مختلف در شکل (۱۲) به نمایش در آمده است. همانگونه که در نمودار مشخص است، مقادیر بدست آمده از تست با مقادیر شبیه سازی تقریبا 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، معمولا در این فاصله پدیده قطع رخ می دهد اما در نمونه ساخته شده به سبب افزایش ثابت فنریت این پدیده در این فاصله رخ نداده و محدوده حرکت پایدار دیافراگم افزایش یافته است. همچنین همانگونه که نتایج نشان می‌دهد به سبب استفاده از دیافراگم پلیمری ولتاژ تحریک در محدوده مناسبی قراردارد.



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

۷- نتیجه‌گیری

در پژوهش حاضر، روش جدیدی برای ساخت میکروآینه انعطاف پذیر از جنس پلیمر جهت استفاده در سیستم های اپتیک تطبیقی، پیشنهاد و بر اساس آن یک نمونه میکرو آیینه 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 آیینه های مشابه و میکروآیینه 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
پلیمر su-8	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 هزینه‌تر می باشد. لذا می-توان از این روش به منظور تولید انبوه میکروآیینه برای کاربردهای متنوعی نظیر 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". Microelectromechanichal 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 microelectromechanichal 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.

[Downloaded from jiaeee.com on 2026-11-20]
[DOR: 20.1001.1.26765810.1397.15.2.11.1]

[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
[16] Developer
[17] Adhesion Bonding
[18] AFM

[Downloaded from jiaeee.com on 2026-11-20]
[DOR: 20.1001.1.26765810.1397.15.2.11.1]