بیستمین کنفرانس اپتیک و فوتونیک ایران
و ششمین کنفرانس مهندسی و فناوری فوتونیک ایران
۸ تا ۱۰ بهمن ماه۱۳۹۲ - دانشگاه صنعتی شیراز

ساخت میکروآیینه انعطاف‌پذیر پلیمری با تحریک الکتروستاتیک

مهرناز اسفندیاری[۱]، رضا اسدی[۲]، پیام حیدری[۳] و علیرضا شمسی[۴]

[۱و۲] تهران، لویزان، دانشگاه صنعتی مالک اشتر

[۳و۴] تهران، رودهن، دانشگاه آزاد اسلامی واحد رودهن

چکیده - دراین مقاله روشی نوین جهت ساخت میکروآیینه انعطاف‌پذیر پلیمری مبتنی بر عملگرالکترواستاتیک ارائه شده‌است. استفاده از عملگرالکترواستاتیک در ساخت میکروآیینه‌ها بدلیل دقت بالا و سادگی در ساخت،گزینه‌ی مطلوبی می‌باشد.اما نیاز به ولتاژ تحریک بالا استفاده ازاین نوع عملگر را محدود می‌کند. برای رفع این مشکل، یکی از راهکارها استفاده از مواد پلیمری با مدول الاستیک بسیار پایین بجای سیلیکون است. اما آیینه ساخته شده با استفاده از پلیمر، صافی سطح کمتری در مقایسه با سیلیکون دارد. دراین مقاله برای غلبه براین مشکل از راهکاری برای ساخت میکروآینه استفاده شده که علاوه بر تمام مزایای آینه پلیمری از نظر صافی سطح با نمونه های سیلیکونی برابری می کند.

کلید واژه- اپتیک تطبیقی ، پلیمر SU-8، عملگر الکتروستاتیکی ، میکرو آیینه.

Fabrication of deformable polymer micro mirror with electrostatic actuation

Mehrnaz Esfandiari[1], Reza Asadi[2], Payam Heydari[3], Alireza Shamsi[4]

[1,2] Maleke Ashtar university of Technology, Lavizan, Tehran.

[3,4] Islamik Azad university, Rodehen branch, Rodehen, Tehran

Abstract- In this paper,a novel method for fabrication of a polymeric deformable micro-mirror with electrostatic actuator is presented.Electrostatic actuators are a desirable choice for micro-mirrors due to their accurate deformation control and simple fabrication process.Despite these promising the development of the electrostatic actuator is limited because of for high actuation voltage.To solve this problem,we utilize metalized thin SU-8 diaphragm as deformable mirror.but the Surface roughness of polymeric mirror is lower than silicon ones.in this paper we propose the fabrication method to overcome this problem.Furthermore the proposed method has using a fast and low-cost fabrication method by the high quality of surface mirror.

Keywords: Adaptive optics, electrostatic actuator, micromirror,SU-8.

[Downloaded from www.opsi.ir on 2026-11-05]

۱- مقدمه

آئینه‌های انعطاف پذیر یکی از موثرترین ادوات در تکامل سیستم‌های اپتیکی از قبیل سویچ های نوری، پرژکتورهای دیجیتال نوری[1] (DLP)، نمایشگرهای لیزر HD[2] و سیستم های اپتیک تطبیقی می باشند. با استفاده از این آئینه ها، امکان رفع اثرات نامطلوب ناشی از آبیراه های مختلف در سیستمهای تصویر بردار و افزایش دقت هندسی سیستمهای اپتیکی فراهم می شود. [۱و۲]

آئینه های انعطاف پذیر معمولاً بر مبنای عملگر های پیزو الکتریک و در ابعاد بزرگ ساخته می‌شدند که مشکلاتی از قبیل هزینه بالا و وزن زیاد را به همراه داشت اما در دهه-های اخیر با بهره‌گیری از تکنولوژیMEMS[3] و روش‌های میکروماشینکاری حجمی و سطحی، آیینه‌های انعطاف پذیر در ابعاد میکرو با توان مصرفی پایین، دقت و سرعت عملکرد بالا ساخته می‌شوند[۳].

مشخصات آئینه های انعطاف پذیر متناسب با کاربرد آنها متفاوت است اما بازرترین آنها عبارتند از : میزان جابجایی، سرعت پاسخ دهی و صافی سطح [۴]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 بوده است. اما نیروهای الکتروستاتیکی 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[۵و۶]. 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.[۷] برای رفع این مشکل، یکی از روشهای پیشنهادی استفاده از مواد پلیمری مانند SU-8 است که مدول یانگ آنها نسبت به سیلیکون کمتراست[۷]، اما با توجه به اینکه در این روش برای لایه نشانی SU-8 باید از لایه نشانی با صفحه چرخان[4] استفاده کرد، دستیابی به سطوح صاف و بدون اعوجاج یکی از چالشهای اصلی می‌باشد.

برای رفع این چالشها، در این مقاله روش جدیدی برای ساخت آینه‌های انعطاف پذیر پلیمری ارائه می شود که در آن 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 می باشد. ضمن اینکه به علت استفاده از دیافراگم پلیمری با مدول یانگی ۵۰ برابر کمتر از سیلیکون[۷]، مقدار جابجایی قابل توجهی با ولتاژ تحریک نسبتاً پایین بدست می آید.

در این روش، 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 DRIE 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.

علاوه براین، با توجه به اینکه دیافراگم بر روی آرایه‌ای از عملگرها قرار می‌گیرد می توان آن را با دقت بیشتری و به صورت کنترل شده جابجا کرد.

۲- ساختار میکروآیینه

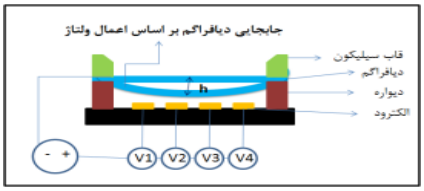
همانگونه که در شکل ۱ نشان داده شده‌است، میکروآئینه ساخته شده از دو بخش مجزا تشکیل شده است. قسمت اول، مجموعه ای از الکترودهای ثابت که بر روی زیرلایه شیشه‌ای قرار دارد و قسمت دوم، الکترود متحرک که به صورت دیافراگمی پلیمری از جنس SU-8 به ضخامت ۱۰میکرومتر بوده و روی آن با لایه‌ای از فلز پوشانده شده و بر روی یک قاب نگه دارنده سیلیکونی قرار گرفته است. نیروی جاذبه الکترواستاتیکی بین دو الکترود با بار مخالف، سبب جابجایی الکترود متحرک می شود. فاصله بین

[1] digital light projector
[2] high-definition (HD) laser display,
[3] Microelectromechanical

[4] Spin coating

[Downloaded from www.opsi.ir on 2026-11-05]

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 چندین میلیمتر است. با استفاده از این ویژگی می‌توان ضخامت دیافراگم و فاصله بین دیافراگم و الکترودهای ثابت را با مقادیر دلخواهی پیاده سازی نمود. همانگونه که در فرآیند ساخت اشاره خواهد شد، در انتها این دو قسمت به یکدیگر چسبانده[5] می شوند.

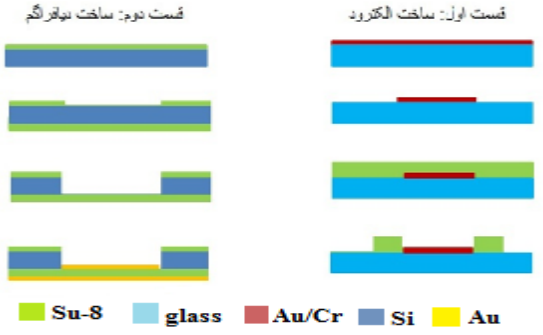


شکل ۱ :شماتیکی از میکروآیینه مورد بررسی

۳- فرآیند ساخت

شکل۲ خلاصه‌ای از فرآیند ساخت این میکروآیینه را نشان می‌دهد. جهت ساخت دیفراگم، ابتدا SU-8 از نوع 2010 به روش لایه نشانی با صفحه چرخان با سرعت ۳۰۰۰ دور بر دقیقه به ضخامت ۱۰ میکرومتر روی یک بستر سیلیکونی لایه نشانی شده است. از سیلیکون به عنوان قاب نگه دارنده دیافراگم استفاده شده است. سپس ناحیه میانی سیلیکون را به شکل الگویی مربع شکل به طور کامل با روش سونش شیمیایی با کاتالیز فلزی سونش نموده‌ایم [۸] تا به SU-8 برسیم. با توجه به اینکه لایه-نشانی مواد پلیمری با استفاده از صفحه چرخان انجام می شود به سختی می توان سطح کاملا یکنواخت وبدون اعوجاج ایجاد کرد لذا لایه نشانی پلیمر بر روی سیلیکون سبب می‌شود سطحی از پلیمر لایه نشانی شده که روی سیلیکون قرار می‌گیرد، کاملا یکنواخت شود سپس با سونش سیلیکون به دیافراگم پلیمری کاملا یکنواخت و بدون اعوجاج میرسیم. از طرف دیگر، نوع و جهت کریستالی ویفر سیلیکون مورد استفاده اهمیتی در این روش سونش بکار رفته در این مقاله نداشته و روی هر نوع ویفری قابل پیاده‌سازی است و این موضوع یکی دیگر از مزایای این روش سونش می باشد.

سپس با استفاده از دستگاه لایه نشانی حرارتی، پشت دیافراگم، با فلز طلا به ضخامت ۱۵۰نانومتر پوشانده شده تا رسانا گشته و به عنوان الکترود متحرک مورد استفاده قرار گیرد. سپس قسمت روی دیافراگم را نیز با همان روش، با فلز طلا می‌پوشانیم تا سطح شفاف آیینه شکل گیرد. (شکل ۳-ب)



شکل ۲:مراحل ساخت

مزیت عمده این روش این است که برای سونش سیلیکون نیازی به استفاده از دستگاه DIRE یا سایر روش‌های پر هزینه 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 و۱۲۰ نانومتر روی زیرلایه‌ای شیشه‌ای لایه نشانی شده و به شکل مجموعه‌ای از الکترودهای شش ضلعی سونش شده اند. سپس با استفاده از SU-8 2025 الگویی به شکل دیواره در پیرامون الکترود فلزی با ضخامت ۲۵ میکرومتر ایجاد گردیده است. (شکل ۳-الف)

در انتها دیافراگم ساخته شده و الکترودهای احاطه شده با دیواره‌ها را با استفاده از SU-8 2002 به عنوان ماده چسبنده[6] به یکدیگر چسبانده‌ایم.



شکل ۳: الف)تصویری از الکترود های شش ضلعی به همراه دیواره
ب)دیافراگم پلیمری

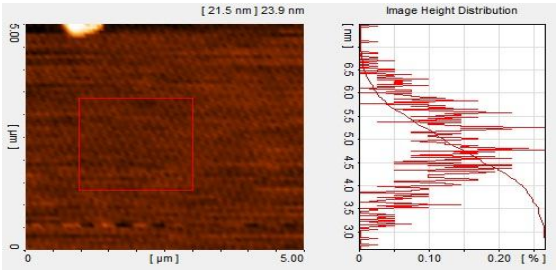
[5] Bonding

[6] Adhesion Layer

[Downloaded from www.opsi.ir on 2026-11-05]

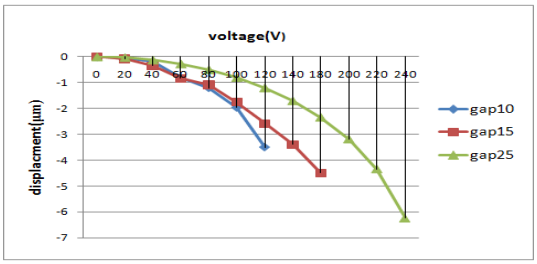
۴- بحث و نتایج

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 AFM اندازه‌گیری شد که حدود ۲۰ نانومتر بدست آمد (شکل۴) که در مقایسه با موارد مشابه، صافی سطح آن، دو برابر افزایش داشته است [۳]. همچنین وضوح تصویر ایجاد شده ناشی از بازتابش نور از سطح آیینه، مربوط به تختی و صاف بودن سطح آئینه می‌باشد. خطای تخت بودن، نسبت به یک سطح تخت ایده آل اندازه گرفته می شود که باید کمتر از $\lambda/10$ باشد که در نمونه ساخته شده برای نور مرئی کاملا محرز گردیده است.



شکل ۴: ناهمواری سطح اندازه‌گیری شده توسط میکروسکوپ نیروی اتمی

برای آزمودن صحت عملکرد میکرو آیینه، ولتاژهایی در محدوده ۰ تا ۲۰۰ ولت به یکایک 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 نمونه‌های ساخته شده با فاصله صفحات ۱۰ تا ۲۵ میکرومتر به ازای ولتاژهای مختلف در شکل۵ به نمایش در آمده است. همانگونه که در نمودار مشخص است، برای ولتاژ ۱۲۰ ولت جابجایی در نمونه های مختلف از ۱/۲ تا ۳/۵ میکرومتر می باشد که در مقایسه با نمونه‌های سیلیکونی ساخته شده مانند [۹] بیش از ۳ مرتبه افزایش یافته است.



شکل ۵ نمودار میزان جابجایی به ازای اعمال ولتاژ برای دیافراگم به ضخامت ۱۰میکرو متر

۵- نتیجه گیری

در پژوهش حاضر، تکنولوژی جدیدی برای ساخت میکروآینه انعطاف پذیر از جنس پلیمر، پیشنهاد و بر اساس آن یک نمونه میکرو آینه با قابلیت جابجایی تا ۴/۵ میکرومتر و ناهمواری سطح ۲۰nm 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. ضمن اینکه روش مورد استفاده در این تحقیق برای مواد پلیمری نسبت به روشهای دیگر بسیار ساده تر و کم هزینه‌تر می باشد. لذا می‌توان از این روش به منظور تولید انبوه میکروآیینه برای کاربردهای متنوعی نظیر اپتیک تطبیقی استفاده کرد.

مراجع

[1] J. M. EDWARDS, "*MODELING AND FEEDBACK CONTROL OF A MEMS ELECTROSTATIC ACTUATOR*" Cleveland State University, December, 2008 .

[2] Tyng-Yow Chen, Chen-Wei E. Chiu. "*A Large-Stroke MEMS Deformable Mirror Fabricated by Low-Stress Fluoropolymer Membrane*". **IEEE PHOTONICS TECHNOLOGY LETTERS** , 2008.

[3] 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 SYSTEMS**,2006.

[4] J. E.Lin, "*Design and Characterization of MEMS Micromirror Devies*" department of Electrical and computer engineering McGill university, montreal,Quebec,Canada, 2001.

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

[6] Nicolae Lobontiu, Ephrahim Garcia. *"Mechanics of Microelectromechanical Systems*". Springer Science, United States of America,2005.

[7] Friese Ch.,Zappe H. "*Deformable Polymer Adaptive Optical Mirrors*". **Microelectromechanichal system**, 2008.

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

[9] Miller L.,Agronin M.,Bartman R,."*Fabrication and characterization of a micromachined deformable mirror for adaptive optics applications*".**SPIE**, 1993.

[Downloaded from www.opsi.ir on 2026-11-05]