

ساخت میکروکانال با استفاده از فرآیند برجسته‌سازی گرم

علیرضا شمس^۱، علی امیری^۲، سعید دل‌آرام فریمانی^۳، حسن حاج‌قاسم^۴، منصور محتشمی‌فر^۵، مجیدرضا علی‌احمدی^۶

چکیده

در این مقاله فرآیند ساخت میکروکانال‌ها با استفاده از روش برجسته‌سازی گرم ارائه گردیده است. همچنین با استفاده از راهکارهایی، پیچیدگی‌ها و هزینه ساخت کاهش داده شده و از موادی پلیمری، کم هزینه و سازگار با نمونه‌های زیستی بهره گرفته شده تا برای استفاده در ابزارهای ریزسیال مناسب باشند. برای ایجاد میکروکانال‌ها ابتدا مته‌ری از جنس پلیمر SU-8 با استفاده از روش‌های لیتوگرافی استاندارد، روی یک زیرلایه شیشه‌ای ساخته شده، سپس با اعمال فشار و حرارت طی فرآیندی کنترل شده، میکروکانال مورد نظر در بستری از جنس پلیمر PMMA ایجاد گردیده است. استفاده از مهر SU-8 صافی سطح بهتری را در کف کانال منجر شده و به ایجاد جریان‌های آرام در داخل کانال کمک می‌نماید. همچنین دیواره کانال‌ها به طور قابل قبولی عمود بوده و این مسئله در تصاویری که با میکروسکوپ روبش الکترونی گرفته شده، به خوبی نشان داده شده است. عوامل موثر بر کیفیت ساختار ایجاد شده از قبیل دما، فشار و زمان حرارت دهی مورد بررسی قرار گرفته و مقادیر بهینه تعیین گردیده‌اند. همچنین، میکروکانال‌های ساخته شده در این مقاله دارای عرض ۱۵ میکرومتر و عمقی برابر ۴۰ میکرومتر می‌باشند.

کلید واژه

برجسته‌سازی گرم، MEMS، SU-8، میکروکانال، PMMA

مقدمه

مواد در حوزه MEMS با محدودیت‌هایی همراه است. از این رو است که گذر از مواد پایه سیلیکونی به سمت مواد دیگر به ویژه پلیمرها، یک نیاز ضروری به نظر می‌رسد. در سال‌های اخیر، روش‌های ساخت بر پایه مواد پلیمری که به طور کلی لیتوگرافی نرم^۷ نامیده می‌شوند، بیشتر مورد توجه بوده‌اند. فرآیندهای ساخت مختلف این روش‌ها از جمله میکرو قالبگیری تزریقی^۸، ریخته‌گری^۹، برجسته‌سازی گرم^{۱۰} و کنده‌کاری با لیزر^{۱۱} در بخش Bio-MEMS و حسگرهای شیمیایی بسیار مطلوب‌اند [۳]. مواد پلیمری دارای مشخصات فیزیکی و شیمیایی مناسبی بوده (از جمله رسانایی الکتریکی پایین و پایداری شیمیایی بالا) [۲]، قیمت پایینی داشته و تولید انبوه آن‌ها آسان است. از طرف دیگر برای بکارگیری در ابزارهای بیولوژیکی مناسب‌تر بوده و غالباً سازگاری بیولوژیکی خوبی دارند [۴]. در این میان، برجسته‌سازی گرم را می‌توان به عنوان جایگزین مناسبی برای فرآیندهای سیلیکونی جهت ایجاد طرح‌های میکرونی بکار برد [۳]. در برجسته‌سازی گرم، فرآیند-های میکروماشین‌کاری پیچیده و گران قیمت، فقط برای ساخت یک مهر اولیه مورد نیاز بوده و پس از ساخت مهر، تولید

سیستم‌های میکروالکترومکانیکی در دهه‌های اخیر پیشرفت چشمگیری داشته و کاربردهای بسیار متنوعی نیز پیدا کرده‌اند که از جدیدترین آنها می‌توان الکترونیک، نانوبری، فناوری اطلاعات و صنایع شیمیایی و مهمتر از همه علوم زیستی را نام برد [۱]. اگرچه در ساخت MEMS اغلب از سیلیکون و گاهاً شیشه به عنوان اولین گزینه یاد می‌شود، اما فرآیندهای ساخت سیلیکونی نسبتاً گران بوده و برای محصولات ارزان قیمت با فرآیندهای ساده، مناسب نمی‌باشند. علاوه بر این، سادگی ساخت ادوات پلیمری و عدم استفاده از مواد شیمیایی مضر و شفافیت و انعطاف پذیری مناسب پلیمرها، تمایل برای استفاده از پلیمرها به جای سیلیکون و شیشه را افزایش می‌دهد [۱ و ۲]. مواد پایه سیلیکونی اگرچه از کیفیت سطح خوبی برخوردارند، اما دارای مشکلاتی از جمله عدم شفافیت، ناسازگاری با نمونه‌های بیولوژیکی و شکنندگی هستند. لذا کاربردهای این

^۱ کارشناس ارشد الکترونیک، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، a.shamsi89@gmail.com

^۲ کارشناس ارشد الکترونیک، دانشگاه صنعتی مالک اشتر

^۳ کارشناس ارشد الکترونیک، دانشگاه صنعتی مالک اشتر

^۴ دانشیار دانشکده علوم و فنون نوین، دانشگاه تهران

^۵ کارشناس ارشد فیزیک، دانشگاه صنعتی مالک اشتر

^۶ کارشناس ارشد فیزیک، دانشگاه صنعتی امیرکبیر

تاریخ دریافت: ۱۰ آبان ۱۳۹۲ تاریخ پذیرش: ۳ آذر ۱۳۹۲

^۷ Soft Lithography

^۸ Injection molding

^۹ Casting

^{۱۰} Hot Embossing

^{۱۱} Laser ablation

عامل مهمی که در روش برجسته‌سازی گرم باید در نظر گرفته شود، ضریب انبساط حرارتی مهر و بستر است. این ضریب برای بستر PMMA برابر 55 ppmK^{-1} ، برای مهر SU-8 در حدود 52 ppmK^{-1} و در مهرهای سیلیکانی و شیشه‌ای بین $2-4 \text{ ppmK}^{-1}$ می‌باشد [۸]. همانطور که دیده می‌شود، ضریب انبساط حرارتی مهر SU-8 نزدیک زیرلایه پلیمری است، بنابراین تنش حرارتی پسماند کمتری بین زیرلایه و مهر SU-8 بوجود آمده، که باعث جدایی آسان مهر از زیرلایه پلیمری شده و در نتیجه آسیب کمتری به مهر و زیرلایه پلیمری می‌رسد [۹ و ۲].

مزیت دیگر مهرهای SU-8 هموارتر بودن سطح آنها نسبت به نوع سیلیکونی است. مسطح بودن ساختار ایجاد شده در ادوات MEMS بویژه در ابزارهای میکروفولوییدیکی از اهمیت بسزایی برخوردار است. به عنوان مثال، وجود ناهمواری در کف میکروکانال‌ها در جداسازی DNA، آشکارسازی را با مشکل مواجه می‌سازد [۹]. جدول ۱، میزان ناهمواری سطح مهر و سطح بستر را برای مهرهای سیلیکونی ساخته شده بروش سونش خشک، سونش مرطوب با KOH و نیز مهرهای SU-8 نشان می‌دهد. همانطور که ملاحظه می‌شود، ناهمواری سطح مهرهای SU-8 بسیار کمتر از مهرهای سیلیکونی است [۵]. تاکنون مقالات متعددی در مورد فرآیند برجسته‌سازیگر ممنتشر شده است [۲ و ۳ و ۸ و ۹ و ۱۰].

جدول ۱. ابعاد ناهمواری‌های سطح مهر و بستر در سیلیکون و SU-8 [5]

بستر	مهر	جنس مهر
۳/۱ nm	۴ nm	سونش خشک (DRIE)
۶۸/۳ nm	۷۶/۶ nm	سونش مرطوب با KOH در جهت [110]
۱/۵ nm	۱ nm	سونش مرطوب با KOH در جهت [100]
۰/۷ nm	۰/۵ nm	SU-8

روش مورد استفاده

در این مقاله از مهرهای نرم برای برجسته‌سازی گرم جهت ساخت میکروکانال‌هایی بروی بستری از جنس پلیمر PMMA بهره گرفته شده است. با این تفاوت که سعی شده است هزینه ساخت مهر کاهش یابد تا برای تولید انبوه مناسب باشد. از طرف دیگر، کمینه ابعاد^{۱۶} ساختار ایجاد شده در این مقاله ۱۵ میکرون است که در مقایسه با روش‌های قبلی مانند [۸] و [۹] و [۱۰] کمتر است. لازم به ذکر است، استفاده از زیرلایه شیشه‌ای مشکل عدم چسبندگی لایه SU-8 به زیرلایه و عدم استحکام کافی مهر را به همراه دارد. در این مقاله برای رفع این مشکل،

قطعه مورد نظر براحتی توسط فرآیند برجسته‌سازی گرم قابل تکرار است [۵]. بطور کلی، برجسته‌سازی گرم عبارتست از مهرزنی الگوی مورد نظر بروی یک بستر (غالباً پلیمری)، همراه با افزایش دما به بالاتر از نقطه گذار بستر پلیمری؛ کهبه دلیل بازدهی مناسب، تولید ارزان و سادگی فرآیند ساخت به عنوان یکی از پرکاربردترین روش‌های ساخت ادوات پلیمری بحساب می‌آید [۱ و ۳ و ۴].

مهرهای پلیمری

مهرهای فرآیند برجسته‌سازی گرم بر اساس ماده مورد استفاده در ساخت آنها به دو دسته کلی مهرهای سخت و مهرهای نرم تقسیم می‌شوند. مهرهای سخت اغلب سیلیکونی یا فلزی هستند. مهرهای سیلیکونی با روش سونش یونی واکنشی عمیق^{۱۲} (DRIE) و تر^{۱۳}، سونش می‌شوند. روش DRIE هزینه بالایی داشته و روش سونش تر نیز دیواره‌های ساختار را به صورت زاویه‌دار سونش می‌کند. همچنین گوشه‌های بیرونی مهر شکل نامنظمی خواهند داشت [۱ و ۵]. مهرهای فلزی با روش‌هایی همچون ماشین‌کاری CNC، کنده‌کاری با لیزر و آبکاری الکتریکی قابل ساخت هستند [۱ و ۴]. ماشین‌کاری CNC محدودیت نسبت عمق به عرض^{۱۴} داشته و علاوه بر ایجاد سطحی ناهموار، کنترل مناسبی روی ابعاد ایجاد شده ندارد. همچنین این ماشین‌ها اغلب قادر به ماشین‌کاری ساختارهایی با ابعاد کمتر از ۵۰ میکرومتر نیستند. کنده‌کاری با لیزر نیز ناهمواری‌هایی تا چندصد نانومتر به همراه داشته و نیازمند تجهیزات پیچیده است. در این بین، اگرچه آبکاری الکتریکی، سطح هموارتری می‌دهد، اما پرهزینه [۳] و زمان‌بر است [۱].

مهرهای نرم، از مواد پلیمری ساخته شده و قادرند تا دماهایی پایین تر از T_g خودشان در برجسته‌سازی گرم بکار روند [۱]. این روش ساده‌تر، سریع‌تر و ارزان‌تر از دو روش پیشین است. مزیت مهرهای نرم، پایین بودن ضریب انبساط آنها و در نتیجه تنش حرارتی پسماند کمتر آنهاست [۶]. یکی از مواد مناسب برای ساخت مهر نرم، پلیمر SU-8 است. این پلیمر که محصول شرکت Microchem می‌باشد، در واقع نوعی فتورزیست منفی است. از آنجائیکه SU-8 در غلظت‌های مختلفی توسط شرکت سازنده عرضه می‌شود، لذا با انتخاب SU-8 مناسب و کنترل سرعت چرخش هنگام لایه‌نشانی چرخشی^{۱۵} می‌توان آن را با ضخامت‌های زیاد (تا ۲۰۰۰ میکرون) لایه نشانی نموده و امکان ایجاد ساختارهای ضخیم را نیز فراهم ساخت [۷].

^{۱۲} Deep Reactive Ion Etching

^{۱۳} Wet

^{۱۴} Aspect ratio

^{۱۵} Spin coating

^{۱۶} Minimum feature size

همچون میزان همواری زیرلایه، عدم وجود ناخالصی بر روی سطح زیرلایه، جنس زیرلایه و همچنین به نحوه لایه‌نشانی، پخت و ظهور ماده SU-8 بستگی دارد. [۱۲ و ۱۳] برای ساخت یک مهر مناسب نیاز به زیرلایه‌ای است که به طور کامل تمیز شده و از هر گونه چربی و مواد آلی پاک شده باشد. بدین منظور از روش استاندارد RCA برای تمیز کردن زیرلایه استفاده می‌شود. مطابق این روش ابتدا لام‌های شیشه‌ای در ابعاد $25\text{mm} \times 25\text{mm}$ برش خورده و سپس در محلول آمونیوم هیدروکساید، آب اکسیژنه و آب به مدت ده دقیقه تحت دمای 80°C تا 90°C درجه نگه داشته شده و پس از شستشو در آب مقطر، با فشار هوای تمیز خشک می‌شوند. سپس با استون شست‌وشو شده و برای اینکه سطح آنها کاملاً بی‌آب شود، به مدت ۲۰ دقیقه تحت دمای 180°C درجه حرارت داده می‌شوند [۱۷].

ضخامت SU-8 مورد نظر برای ایجاد کانال، $40\ \mu\text{m}$ میکرون است، بنابراین از SU-8 نوع 2025 محصول شرکت Microchem استفاده می‌شود. طبق دستورالعمل استفاده از SU-8 که توسط شرکت سازنده ارائه شده است، برای دستیابی به ضخامت $40\ \mu\text{m}$ میکرون، سرعت چرخش در لایه‌نشانی چرخشی 2000 دور بر دقیقه است. پس از لایه‌نشانی چرخشی SU-8، نمونه بصورت پلکانی پخت اولیه^{۱۹} داده می‌شود. برای این منظور، نمونه مطابق دستور شرکت سازنده در دمای 65°C و 95°C حرارت داده می‌شود. پس از اتمام پخت اولیه، نمونه به آرامی خنک می‌شود تا تنش حرارتی پسماند تا حد امکان کاهش پیدا کرده [۱۲] و چسبندگی SU-8 به سطح زیرلایه بهبود یابد. در مرحله بعد، نمونه پخت خورده در معرض نوردهی با ماسک طراحی شده قرار گرفته و برای مدت ۶۰ ثانیه نور UV به آن تابیده می‌شود.

در فرآیند برجسته‌سازی گرم، ماسک منفی طرح، بر روی مهر ایجاد می‌شود، در اینصورت پس از انتقال طرح از مهر بر روی زیرلایه، ساختار مورد نظر بر روی زیرلایه ایجاد خواهد شد. از آنجایی که SU-8 یک فوتورزیست منفی است، پس از نوردهی، بخش‌هایی که در معرض نوردهی قرار گرفته‌اند باقی خواهند ماند و باقی بخش‌ها در محلول ظهور حل خواهند شد. طبق دستورالعمل استفاده از SU-8، پس از نور دهی، نمونه باید یک مرحله پخت بعد از نوردهی^{۲۰} داده شود [۱۷]. برای این منظور، ابتدا نمونه از دمای محیط تا دمای 65°C گرم شده و پس از مدتی در دمای 95°C پخت داده شده و در نهایت نمونه به آرامی سرد می‌شود. پس از آن، نمونه برای مدت ۵ دقیقه در محلول ظهور SU-8 قرار می‌گیرد تا قسمت‌هایی که در معرض نور قرار نداشتند، حذف شده و ساختار مورد نظر ظاهر می‌شود.

با بکارگیری روش‌هایی از قبیل تمیز نمودن و بی‌آب کردن^{۱۷} سطح زیرلایه و پخت سخت^{۱۸} مهرها استحکام آنها را افزایش داده‌ایم. همچنین استفاده از PMMA که T_g نسبتاً پایینی (در حدود 105°C درجه سلسیوس) دارد موجب می‌گردد تا در دماهای پایین‌تری نرم شود. از همین ویژگی به نحوی بهره گرفته شده که با افزایش دما تا مقادیر خیلی بالاتر از T_g ، PMMA نرم‌تر شده و انعطاف بیشتری از خود نشان داده و از آسیب دیدن مهر جلوگیری بعمل آید. چراکه در این صورت، برای برجسته‌سازی گرم فشار کمتری مورد نیاز خواهد بود و مهر نیروی کمتری را تحمل می‌کند.

اگرچه مهرهای سیلیکونی در بسیاری موارد مانند [۲ و ۹] مورد استفاده قرار گرفته‌اند، اما ساخت آنها نیاز به تجهیزات آزمایشگاهی پیشرفته (از قبیل DRIE) داشته و هزینه‌بر است. در حالیکه در این مقاله مهرها با استفاده از SU-8 ساخته شده‌اند و برای ساخت آنها تنها به لایه نشانی چرخشی و نوردهی اشعه ماورای بنفش نیاز است. در مهرهای دیگری که با استفاده از SU-8 روی یک زیر لایه سیلیکونی ساخته شده‌اند [۸ و ۱۱] نیز هزینه بالای ویفرهای سیلیکونی می‌بایست مورد توجه قرار گیرد. اما در این مقاله از شیشه به عنوان زیرلایه مهر استفاده می‌گردد، لذا روش ارائه شده، کمترین هزینه را برای تولید مهر به همراه داشته و برای ساخت ادوات در آزمایشگاه‌هایی که امکانات محدودی دارند بسیار مناسب می‌باشد. چرا که بدون لایه نشانی فلزات و سونش قابل ساخت بوده و نیاز به اتقا تمیز با کلاس تمیزی پایین نیز ندارد. پس از ساخت مهر SU-8 بروی بستر شیشه، فرآیند برجسته‌سازی گرم به نحوی که توضیح داده خواهد شد، در دمای بالای 160°C درجه سلسیوس انجام گرفته و ساختار میکروکانال‌های مورد نظر بروی بستر پلیمری ایجاد می‌شود.

در ادامه، ابتدا روش ساخت مهر و سپس فرآیند برجسته‌سازی گرم توضیح داده شده و تصاویری نیز از میکروکانال‌های ایجاد شده با این روش نشان داده خواهند شد. در آخر، عوامل موثر بر کیفیت برجسته‌سازی مورد بررسی قرار خواهند گرفت.

فرآیند ساخت پیشنهادی

ساخت مهر

در این مقاله از ماده SU-8 برای ساخت مهر اولیه استفاده و طرح مورد نظر بروی بستر شیشه ایجاد شده است. در این میان، یکی از مهمترین مسائلی که باید مد نظر قرار داد، برقراری چسبندگی مناسب بین SU-8 و زیرلایه است که به عوملی

^{۱۹} prebake

^{۲۰} Post exposure bake

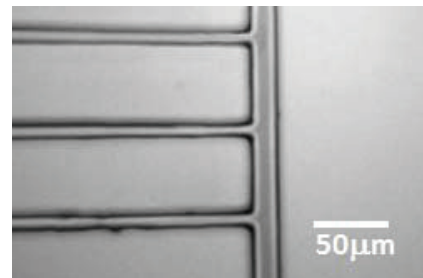
^{۱۷} dehydration

^{۱۸} Hard bake

۱۷]. چراکه مواد پلیمری استفاده شده در برجسته سازی گرم، بسیار ارزان تر از ویفر سیلیکون بوده و فرآیندهای میکروماشین-کاری پیچیده، فقط برای ساخت یک مهر اولیه نیاز است. هنگامیکه مهر ساخته شد، ساختار مورد نظر براحتی توسط فرآیند برجسته سازی گرم، می تواند تکرار شود [۴]. اما با روش ارائه شده در این مقاله ساخت مهرها نیز فرآیند چندان پیچیده ای نداشته و به دلیل استفاده از زیرلایه شیشه ای برای مهر، هزینه تولید مهر نیز بسیار کاهش می یابد. ایجاد ساختار با پلیمر SU-8 تنها نیاز به دستگاه لایه نشانی چرخشی^{۲۳} برای لایه نشانی SU-8 و دستگاه لیتوگرافی برای تابش UV دارد. به دلیل یک مرحله ای بودن لیتوگرافی، ساخت این مهرها نیازی به تنظیم دقیق^{۲۴} نیز ندارد.

در این مقاله از پلیمر PMMA بعنوان بستر استفاده شده است. همانطور که اشاره شد در برجسته سازی گرم، از اعمال فشار و حرارت برای انتقال طرح مهر بر روی زیر لایه استفاده می شود. دمای لازم برای انجام فرآیند باید بالاتر از T_g زیرلایه PMMA و کمتر از T_g مهر SU-8 باشد تا در حین فرآیند، PMMA انعطاف پذیر بوده و مهر کاملاً سخت و بدون تغییر شکل بماند. مقادیر این دماها برای PMMA و SU-8 نوردهی شده به ترتیب در حدود ۱۰۵ و ۲۴۰ درجه است [۳ و ۴]. بنابراین تنظیم دما در انجام این فرآیند نقش بسزایی دارد. فشار اعمالی حین فرآیند نیز از اهمیت زیادی برخوردار بوده و با افزایش دما و فشار میزان دقت افزایش می یابد. اما از طرفی افزایش دما اغلب موجب افزایش تنش حرارتی پسماند شده و باعث بروز چسبندگی در زمان جداسازی مهر از زیرلایه PMMA می گردد [۵]. اما با توجه به اینکه مهر انتخاب شده خود نوعی پلیمر است و ضریب انبساط حرارتی آن بسیار نزدیک به بستر PMMA است، لذا تنش حرارتی پسماند بسیار کم بوده و مشکلی برای افزایش دما وجود ندارد. به همین دلیل دمای فرآیند برجسته سازی گرم 160°C انتخاب می شود. بدین ترتیب دیگر نیازی به اعمال فشار زیاد نبوده و فشار اعمال شده برای این فرآیند ۱/۲ مگاپاسکال است. نحوه اعمال حرارت و فشار در شکل ۳ نمایش داده شده است.

در مرحله آخر، جهت افزایش استحکام ساختار و از بین رفتن ترک های موجود بر روی آن، ساختار به مدت ۲۰ دقیقه در دمای ۱۷۰ الی ۱۸۰ درجه حرارت داده می شود. نمونه مهر ساخته شده با SU-8 در شکل ۱ نشان داده شده است.



شکل ۱. مهر ساخته شده با پلیمر SU-8

فرآیند برجسته سازی گرم

بطور کلی، فرآیند برجسته سازی گرم شامل سه مرحله اصلی است. در مرحله اول، مهر و زیرلایه پلیمری تا دمای بالاتر از دمای گذار^{۲۱} زیرلایه پلیمری (T_g) گرم می شوند. دمای گذار، دمایی است که پلیمر از حالت شیشه ای خارج شده و نرم و انعطاف پذیر می شود. در مرحله دوم، مهر تحت یک فشار از پیش تنظیم شده، بروی زیرلایه فشرده می شود تا الگوی ایجاد شده روی مهر، بروی زیرلایه پلیمری منتقل شود. در مرحله آخر، پس از سپری شدن مدت زمانی از فشردن مهر بروی زیرلایه، سیستم تا دمایی پایین تر از T_g سرد شده و زیرلایه و مهر از یکدیگر جدا می شوند. شکل ۲ مراحل فرآیند برجسته سازی گرم را نشان می دهد [۱].



شکل ۲. مراحل برجسته سازی گرم

این فرآیند می تواند جایگزین مناسبی برای فرآیندهای سیلیکونی بوده [۱۴ و ۱۵]. و امکان ساخت انبوه و ارزان سیستمها و ادوات میکروالکترونیکی و نیز قطعات میکروفولوییدیکی ساخته شده بروی بسترهای PMMA برای کاربردهای پزشکی و شیمی تجزیه، مانند سیستمهای تجزیه و تحلیل کامل میکرونی ($\mu\text{-TAS}$)، را بوجود خواهد آورد [۱۶ و

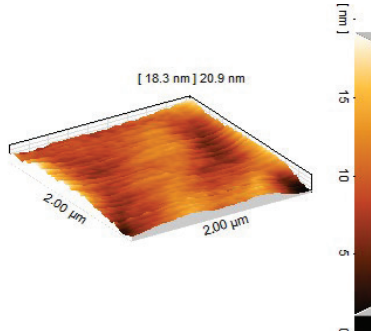
^{۲۳} Spin coater
^{۲۴} alignment

^{۲۱} Glass transition temperature
^{۲۲} Micro total analysis systems

بسزایی در نحوه به جریان افتادن سیال در آن و حتی کیفیت مخلوط شدن مواد موجود در کانال دارد [۹]. در شکل ۵ تصویر میکروسکوپ نیروی اتمی (AFM) از کف کانال ایجاد شده در پلیمر PMMA نشان داده شده است. همانگونه که در شکل مشخص است، پستی بلندی های کف کانال کمتر از ۲۰ نانومتر می‌باشند.

بحث و نتایج

کیفیت مناسب برجسته سازی منوط به کنترل عوامل موثر در فرآیند است که مهمترین آن‌ها عبارتند از دما، فشار و مدت زمان فرآیند حرارت دهی [۵].



شکل ۵. تصویر AFM از کف کانال ایجاد شده با برجسته سازی گرم در پلیمر PMMA

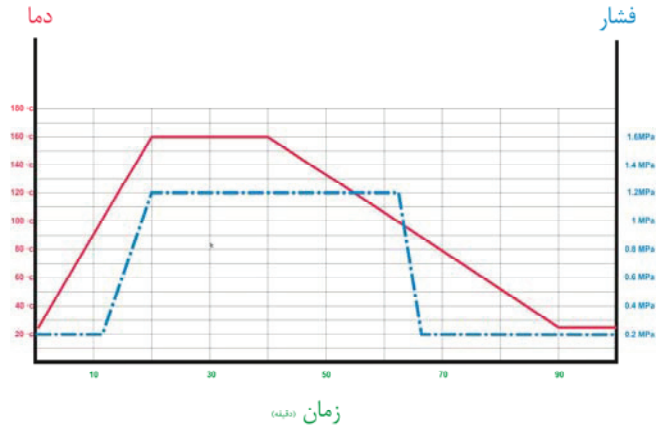
در این بخش هر یک از این عوامل مورد بحث و بررسی قرار می‌گیرند. زمان برجسته سازی باید به حدی باشد تا بستری که در اثر حرارت نرم شده است، فرصت کافی برای جاری شدن در فضای بین برجستگی‌های مهر را داشته و شکل مناسب را به خود بگیرد. برای بررسی اثر دما و فشار، معیارهایی برای سنجش کیفیت برجسته سازی تعریف شده اند که عبارتند از:

- همانند سازی^{۲۸}
- عمق ساختار ایجاد شده
- عمود بودن دیواره کانال‌ها (نسبت عمق به عرض)
- کمینه ابعاد طرح ایجاد شده
- میزان آسیب وارده به مهر

برجسته سازی به ازای دماها و فشارهای مختلفی انجام گرفته و کیفیت میکروکانال‌های ایجاد شده با توجه به معیارهای فوق مورد ارزیابی قرار گرفته‌اند.

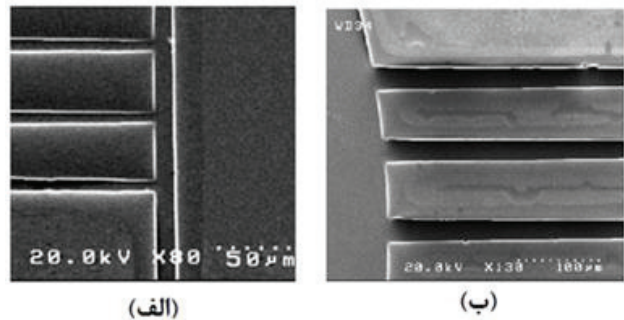
تاثیر افزایش دما

اگر دمای فرآیند کمتر از حد مورد نیاز باشد، بستر PMMA به اندازه کافی نرم و حالت پذیر نشده و طرح مورد نظر با عمق مناسب درون آن ایجاد نخواهد شد. از طرف دیگر به دلیل سخت بودن بستر، با اعمال فشار، مهر دچار آسیب خواهد شد.



شکل ۳. دما و فشار اعمال شده حین فرآیند برجسته سازی

برای این منظور، مهر و بستر پلیمری به یکدیگر متصل شده و تحت فشار ۰/۱ مگاپاسکال وارد فر^{۲۵} می‌شوند. با افزایش تدریجی دما، از دمای ۱۱۰°C به تدریج فشار نیز افزایش یافته تا به ۱/۲ مگاپاسکال می‌رسد. سپس ساختار به مدت ۲۰ دقیقه در دمای ۱۶۰°C باقی می‌ماند تا ساختار مهر به خوبی بر روی بستر منتقل شود. بعد از کاهش دما تا ۹۰°C فشار از روی ساختار برداشته شده و اصطلاحاً جداسازی^{۲۶} صورت می‌گیرد. بعد از خنک شدن سیستم، مهر و بستر به راحتی از هم جدا می‌شوند. تصاویر میکروسکوپ روبش الکترونی (SEM^{۲۷}) از ساختار ایجاد شده توسط فرآیند برجسته‌سازی گرم، در شکل ۴ نشان داده است. عمودی بودن دیواره‌های کانال که تاثیر مهمی بر نحوه حرکت سیال در آن دارد، در تصویر (ب) این شکل مشخص است.









شکل ۴. تصویر SEM از میکروکانال‌های ایجاد شده. (الف) تصویر کانال‌ها. (ب) نمایی نزدیک تر که عمودی بودن دیواره‌های کانال مشخص است.

همانگونه که در بخش مقدمه اشاره گردید، صافی سطح مهرهایی که با SU-8 ساخته میشوند. در مقایسه با سیلیکون سونش یافته بهتر است. لذا کف کانال‌هایی که با مهرهای SU-8 ساخته می‌شوند نیز صافتر بوده که این امر در بزارهای میکروسیال اهمیت بسزایی دارد. ساختار سطح کف کانال تاثیر

Oven^{۲۵}
De-embossing^{۲۶}
Scanning Electron Microscope^{۲۷}

Fidelity^{۲۸}







دما (°C)	کیفیت
۹۰	
۱۰۵	
۱۲۰	
۱۴۰	
۱۶۰	
۱۸۰	

تاثیر افزایش فشار

پارامتر مهم دیگر در برجسته سازی، فشار اعمالی حین فرآیند است. اعمال فشار زیاد موجب آسیب مهر گردیده و با کاهش بیش از حد فشار، بستر پلیمری نرم شده، به خوبی در فضاهای خالی مهر جاری نشده و لذا الگوی مورد نظر به شکل مناسب و با عمق لازم بر روی بستر ایجاد نخواهد شد [۵]. در این بخش مولفه های کیفی به ازای فشارهای مختلف مورد بررسی قرار گرفته و نتایج آزمایشات فوق در

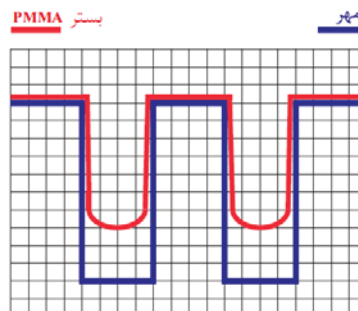
جدول ۳ آمده اند. با توجه نتایج ذکر شده در جدول ۳، بهترین برجسته سازی در فشار ۱/۲ مگاپاسکال صورت می گیرد.

جدول ۳. کیفیت نمونه های ساخته شده در فشارهای مختلف. کامل تر بودن دایره ها مبین کیفیت بهتر است.

فشار (Mpa)	کیفیت
۰/۲	
۰/۵	
۰/۸	
۱	
۱/۲	
۱/۶	

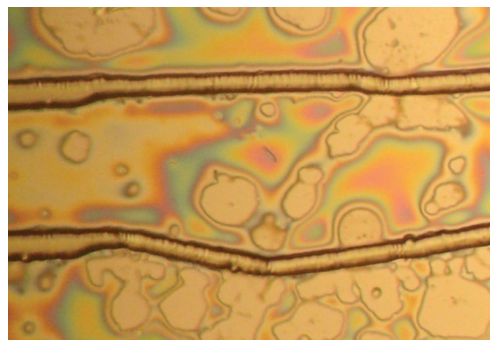
ویژگی های کلی نمونه ساخته شده به طور خلاصه در جدول ۴ به نمایش درآمده است. با توجه به اهمیت نسبت عمق به عرض در ساختارهای MEMS و تکرار پذیری فرآیند برجسته سازی با مهر (از نقطه نظر تولید انبوه) و زمان صرف شده برای ساخت هر نمونه، به نظر می رسد روش ارائه شده در این مقاله می تواند برای طراحی فرآیند هایی کم هزینه و با تیراژ بالا جهت تولید ادوات یکبار مصرف راهگشا باشد.

علاوه بر این، نسبت طول به عرض ساختار ایجاد شده نیز قابل قبول نبوده و همانند شکل ۷ دیواره هایی منحنی وار ایجاد خواهند شد [۵].



شکل ۶. شکل دیواره های ایجاد شده در برجسته سازی با دمای پایین

با افزایش بیش از حد دمای فرآیند، استحکام مهر نیز کمتر شده و همانطور که در شکل ۷ ملاحظه می شود، مهر دچار آسیب خواهد شد. در این مقاله با کنترل فرآیند افزایش و کاهش دما و نیز کاهش سرعت تغییرات دمایی، از آسیب دیدن مهر و ایجاد تنش حرارتی پسماند مابین مهر و زیرلایه جلوگیری شده است.



شکل ۷. مهر آسیب دیده در اثر حرارت بیش از حد

جدول ۲ کیفیت نمونه های ساخته شده در دماهای مختلف را مقایسه نموده است. همانگونه که از این جدول بر می آید، دایره مربوط به دمای ۱۶۰ درجه کامل است. لذا این دما بهترین نتیجه را از خود نشان داده است.

جدول ۲. کیفیت نمونه های ساخته شده به ازای دماهای مختلف. کامل تر بودن دایره ها مبین کیفیت بهتر است.

- [6] Harson L., H. J. Lu, Y. C. Liu, Y. C. Lam1 and X. C. Shan, "Experimental Studies on Polymer Deformation and Flow in Micro Hot Embossing", Electronics Packaging Technology Conference, EPTC '06, Dec 2006 8th, Singapore.
- [7] www.michrochem.com, 2013.02.12.
- [8] Kh. Metwally, L. Robert, R. Salut and Ch. Khan Malek, "SU-8-based rapid tooling for thermal roll embossing", DTIP, 11-13 May. 2011, Aix-en-provence, France.
- [9] Mandy B. Esch, S. Kapur, G. Irizarry, V. Genova, "Influence of master fabrication techniques on the characteristics of microfluidic channels", Lab Chip, May 2004, vol. 3, pp. 122-128.
- [10] J. M. Li, C. Liu, X. D Dai, H. H Chen, Y. Liang, H. L Sun, H. Tian and X. P Ding, "PMMA microfluidic devices with threedimensional features for blood cell filtration", J. of Micromech. Microeng., 2008, vol. 18, 095021
- [11] A. Mathur, S.S. Roy, M. Tweedie, S. Mukhopadhyay, S.K. Mitra, J.A. McLaughlin, "Characterisation of PMMA microfluidic channels and devices fabricated by hot embossing and sealed by direct bonding", Current Applied Physics, 2009, vol. 9, PP. 1199-1202.
- [12] S. Grist, J. N. Patel, M. Haq, B. L. Gray, B. Kaminska, "Effect of surface treatments/coatings and soft bake profile on surface uniformity and adhesion of SU-8 on a glass substrate", J. Microfluidics Biomems and Medical Microsystems VIII, 2010, vol. 7593, pp. 75930F-1-75930F-9.
- [13] X. Mao, J. Yang, A. Ji and F. Yang, "Two New Methode To Improve The Lithography Precision For SU-8 Photoresist On Glass Substrate", IEEE Conference of MEMS 2012, Paris, France, pp. 337-340.
- [14] Becker H. and Heim U., "Hot embossing as a method for the fabrication of polymer high aspect ratio structures", Sensors Actuators A.83, 2000, pp. 130-517.
- [15] Becker H. and Heim U., "Silicon as tool material for polymer hot embossing", Proc. 12th IEEE Conference of MEMS'99, 1999, Florida, USA, pp. 228-31.
- [16] Lee G-B, S-H. Chen, G-R. Huang, W-C. Sung, Y-H. Lin, "Microfabricated plastic chips by hot embossing methods and their applications for DNA separation and detection", J. Sensors Actuators B.75, 2001, pp. 142-148.
- [17] Becker H. and Heim U., "Microfluidic devices for μ -TAS applications fabricated by polymer hot embossing", Proc. SPIE 3515, 1998, pp. 82-177.

جدول ۴. ویژگی‌های کلی نمونه ساخته شده در این مقاله

ویژگی	نمونه ساخته شده
نسبت عمق به عرض	۳:۱
کمینه ابعاد ایجاد شده	۱۵ میکرون
تعداد نمونه قابل ساخت با هر مهر	بیشتر از ۵ نمونه
زمان لازم	۶۰ تا ۸۰ دقیقه

نتیجه گیری

در این مقاله میکروکانال‌هایی با روش برجسته‌سازی گرم بر روی یک بستر پلیمری ساخته شدند. این روش برخلاف روش‌های ساخت بر پایه سیلیکون، بسیار کم‌هزینه و سریع بوده و نیازی به استفاده از مواد شیمیایی مخاطر آمیز و تجهیزات پیشرفته ندارد. در این روش که نوعی لیتوگرافی نرم می‌باشد، با بکارگیری مهری که با استفاده از پلیمر SU-8 روی زیرلایه‌ای از جنس شیشه ساخته شده، میکروکانال‌هایی با عرض ۱۵ و عمق ۴۰ میکرومتر بروی بستری از جنس PMMA با استفاده از فرآیند حرارتی تحت فشار معین ایجاد گردید. مدت زمان برجسته‌سازی، دما و فشار اعمال شده از مهمترین عوامل موثر بر کیفیت برجسته‌سازی هستند. فرآیند ساخت برای دماها و فشارهای مختلفی انجام گرفته و مقادیر بهینه آن‌ها به ترتیب برابر ۱۶۰ درجه سلسیوس و ۱/۲ مگاپاسکال بدست آمده‌اند.

مراجع:

- [1] Y. Fan, T. Li, W.-M. Lau, and J. Yang, "A Rapid Hot-Embossing Prototyping Approach Using SU-8 Molds Coated With Metal and Antistick Coatings", Microelectromechanical systems, Aug. 2012, vol.21, no.4, pp. 875-881.
- [2] S. C. Chen, M. C. Lin, R. D. Chien and W. L. Liaw, "Hot Embossing of Micro-Featured Devices", International Conference on Mechatronics, July 10-12, 2005, Taipei, Taiwan.
- [3] T. Koerner, L. Brown, R. Xie, Richard D. Oleschuk, "Epoxy resins as stamps for hot embossing of microstructures and microfluidic channels", Sensors & Actuators B, vol.107, Feb 2005, pp. 632-639.
- [4] Y. Zhao and T. Cui, "Fabrication of high-aspect-ratio polymer-based electrostatic comb drives using the hot embossing technique", J. Micromech. Microeng, 2003, vol.13, pp. 430-435.
- [5] Mandy B. Esch, S. Kapur, G. Irizarry, V. Genova, "Influence of master fabrication techniques on the characteristics of embossed microfluidic channels", Lab On a Chip, vol.3, May 2003, pp. 121-127.

Microchannel fabrication by Hot embossing Process