Archive of SID

استفاده از روش لیتوگرافی نرم جهت ایجاد میکروساختارها روی بستر آب‌دوست‌شده پلیمر PMMA

علیرضا شمسی[۱]، دانشجوی دکتری؛ سعید دل‌آرام فریمانی[۲]، کارشناس ارشد؛ احمد عفیفی[۳]، استادیار

۱- دانشکده برق و الکترونیک - دانشگاه صنعتی مالک اشتر - تهران - ایران - a.shamsi89@gmail.com
۲- دانشکده برق و الکترونیک - دانشگاه صنعتی مالک اشتر - تهران - ایران - saeed_delaram_mut@yahoo.com
۳- دانشکده برق و الکترونیک - دانشگاه صنعتی مالک اشتر - تهران - ایران - ah_afifi@iust.ac.ir

چکیده: روش‌های ساخت لیتوگرافی نرم به دلیل سادگی و هزینه پایین و سازگاری مناسب آن‌ها با تولید انبوه امروزه توجه محققین در زمینه ساخت سیستم‌های میکروالکترومکانیکی قرار گرفته‌اند. در این مقاله، روشی مفید و کم‌هزینه برای ایجاد میکرو ساختارها با استفاده از برجسته‌سازی گرم در مواد پلیمری ارائه گردیده است. مهر مورداستفاده برای این کار از جنس پلیمر SU-8 بوده که روی یک زیرلایه شیشه‌ای ساخته‌شده است. فرآیند حرارتی مورداستفاده در این روش شامل پارامترهای مهمی همچون دما و فشار است که همگی موردبررسی قرار گرفته‌اند. برای اینکه بتوان از ساختار ایجادشده در ابزارهای میکروسیال استفاده نمود، بستر آب‌گریز PMMA، آب‌دوست گردیده تا بتوان از آن در ابزارهای میکروسیال استفاده نمود. همچنین در این مقاله ساختارهایی با کمینه ابعاد ۱۵ میکرومتر و ارتفاع ۵۰ میکرومتر ساخته‌شده‌اند که برای کاربردهای میکروفلویدیکی قابل‌قبول است. ویژگی‌های بارز این روش ساخت، سادگی به دلیل عدم به‌کارگیری تجهیزات پیشرفته آزمایشگاهی و هزینه کم به سبب استفاده از زیرلایه شیشه‌ای برای مهر و ورق‌های پلکسی به‌عنوان بستر می‌باشند.

واژه‌های کلیدی: لیتوگرافی نرم، MEMS، SU-8، میکروساختار، PMMA.

Fabrication of Microstructures on a Hydrophilic Modified PMMA Substrate using Soft Lithography Method

A.R Shamsi[1], PhD Student; S. Delaram Farimani[2], MSc; A. Afifi[3], Assistant Professor

1- Faculty of Electrical and Electronics Engineering, Maleke Ashtar University of Technology, Tehran, Iran, Email: a.shamsi89@gmail.com
2- Faculty of Electrical and Electronics Engineering, Maleke Ashtar University of Technology, Tehran, Iran, Email: saeed_delaram_mut@yahoo.com
3- Faculty of Electrical and Electronics Engineering, Maleke Ashtar University of Technology, Tehran, Iran, Email: ah_afifi@iust.ac.ir

Abstract: Soft lithography fabrication methods have been used enormously by MEMS researchers in recent years, due to their low cost and simplicity and batch fabrication feasibility. In this paper, a low cost and useful technique to fabricate Microstructures on a polymeric substrate by hot embossing is presented. The used master has been fabricated from SU-8 polymer on a glass substrate. The main parameters of hot embossing quality such as temperature and pressure are discussed and the optimum values are determined. The hydrophobic surface of PMMA substrate is modified to hydrophilic in order to be used in Microfluidic devises. As a good approach, Microchannels by minimum feature size of 15μm and depth of 50μm are implemented in this paper. Major advantages of this method are simplicity and low cost, because of not-complicated equipment and inexpensive materials for substrate.

Keywords: Soft lithography, MEMS, SU-8, microstructures, PMMA.

تاریخ ارسال مقاله: ۱۳۹۳/۰۸/۰۲
تاریخ اصلاح مقاله: ۱۳۹۳/۰۹/۱۱ و ۱۳۹۴/۰۳/۰۶
تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۴/۰۳/۱۶
نام نویسنده مسئول: علیرضا شمسی
نشانی نویسنده مسئول: ایران – تهران- لویزان - دانشگاه صنعتی مالک اشتر - دانشکده برق و الکترونیک.

www.SID.ir

Archive of SID

۱- مقدمه

سیستم‌های میکروالکترومکانیکی در دهه‌های اخیر پیشرفت چشمگیری داشته و کاربردهای بسیار متنوعی در حوزه‌های الکترونیک، ناوبری، فناوری اطلاعات، صنایع شیمیایی و مهم‌تر از همه علوم زیستی پیدا کرده‌اند [۱]. اگرچه در ساخت ادوات MEMS اغلب از سیلیکون و گاهی شیشه به‌عنوان اولین گزینه جهت زیرلایه یاد می‌شود، اما فرآیندهای ساخت پایه سیلیکونی نسبتاً گران بوده و برای محصولات ارزان‌قیمت با فرآیندهای ساده، مناسب نمی‌باشند. علاوه بر این، سادگی ساخت ادوات پلیمری و عدم استفاده از مواد شیمیایی مضر و شفافیت و انعطاف‌پذیری مناسب پلیمرها، تمایل برای استفاده از پلیمرها به‌جای سیلیکون و شیشه را افزایش می‌دهد [۲،۱].

مواد پایه سیلیکونی اگرچه از کیفیت سطح خوبی برخوردارند، اما دارای مشکلاتی ازجمله عدم شفافیت و شکنندگی هستند. لذا کاربردهای این مواد در حوزه ریزسیالات با محدودیت‌هایی همراه است. ازاین‌رو گذر از مواد پایه سیلیکونی به سمت مواد دیگر به‌ویژه پلیمرها، یک نیاز ضروری به نظر می‌رسد. در سال‌های اخیر، تکنیک‌های ساخت بر پایه مواد پلیمری که به‌طورکلی لیتوگرافی نرم نامیده می‌شوند، بیش‌تر موردتوجه بوده‌اند. فرآیندهای ساخت مختلف این تکنیک ازجمله میکرو قالب‌گیری تزریقی، ریخته‌گری، برجسته‌سازی گرم[۱] و کنده‌کاری با لیزر[۲] در بخش Bio-MEMS، آزمایشگاه روی یک مدول[۳]، میکروسیستم‌های آنالیز کلی[۴] و سنسورهای شیمیایی بسیار مطلوب هستند [۳]. مواد پلیمری دارای مشخصات فیزیکی و شیمیایی مناسبی بوده (ازجمله رسانایی الکتریکی پایین و پایداری شیمیایی بالا) [۲]، قیمت پایینی داشته و تولید انبوه آن‌ها آسان است [۴]. در این میان، برجسته‌سازی گرم را می‌توان به‌عنوان جایگزین مناسبی برای پروسه‌های سیلیکونی جهت ایجاد طرح‌های میکرونی به کار برد [۳]. به‌طورکلی، برجسته‌سازی گرم عبارت است از مهرزنی الگوی موردنظر بر روی یک پلیمر، همراه با افزایش دما به بالاتر از نقطه گذار بستر پلیمری؛ که به دلیل بازدهی مناسب، تولید ارزان و سادگی فرآیند ساخت به‌عنوان یکی از پرکاربردترین روش‌های ساخت ادوات پلیمری به‌حساب می‌آید [۱]. در برجسته‌سازی گرم، فرآیندهای میکروماشین‌کاری پیچیده و گران‌قیمت، فقط برای ساخت یک مهر اولیه موردنیاز بوده و هنگامی‌که مهر ساخته شد، ساخت قطعه موردنظر به‌راحتی توسط فرآیند برجسته‌سازی گرم، می‌تواند تکرار شود [۶،۵].

مهرهای فرآیند برجسته‌سازی گرم بر اساس ماده مورداستفاده در ساخت آن‌ها به دودسته کلی مهرهای سخت و مهرهای نرم تقسیم می‌شوند. مهرهای سخت اغلب سیلیکونی یا فلزی هستند. مهرهای سیلیکونی با روش سونش یونی واکنشی عمیق[۵] (DRIE) و تر، سونش می‌شوند. روش DRIE هزینه بالایی داشته و روش سونش تر نیز دیواره‌های ساختار را به‌صورت زاویه‌دار سونش می‌کند. همچنین گوشه‌های بیرونی مهر شکل نامنظمی خواهند داشت. فرآیند LIGA نیز نیازمند تجهیزات اشعه x و لوازم گران‌قیمت است [۶،۱]. مهرهای فلزی با روش‌هایی همچون ماشین‌کاری CNC، کنده‌کاری با لیزر و آب‌کاری الکتریکی قابل ساخت هستند [۴،۱]. ماشین‌کاری CNC محدودیت نسبت عمق به عرض[۶] داشته و علاوه بر ایجاد سطحی ناهموار، کنترل مناسبی روی ابعاد ایجادشده ندارد. همچنین این ماشین‌ها اغلب قادر به ماشین‌کاری ساختارهایی با ابعاد کم‌تر از ۵۰ میکرومتر نیستند.

کنده‌کاری با لیزر نیز ناهمواری‌هایی تا چند صد نانومتر به همراه داشته و نیازمند تجهیزات پیچیده است. دراین‌بین، اگرچه آب‌کاری الکتریکی، سطح هموارتری می‌دهد، اما پرهزینه [۳] و زمان‌بر است [۱].

مهرهای نرم، از مواد پلیمری ساخته‌شده و می‌توانند تا دماهایی پایین‌تر از T_g خودشان در برجسته‌سازی گرم به کار گرفته شوند [۱]. این روش ساده‌تر، سریع‌تر و ارزان‌تر از دو روش پیشین است. مزیت مهرهای نرم، پایین بودن ضریب انبساط آن‌ها و درنتیجه تنش حرارتی پس‌ماند کم‌تر آن‌ها است [۵]. یکی از مواد مناسب برای ساخت مهر نرم، پلیمر SU-8 است. این پلیمر که محصول شرکت Microchem است، درواقع نوعی فتورزیست منفی است. ازآنجایی‌که SU-8 در غلظت‌های مختلفی توسط شرکت سازنده عرضه می‌شود، لذا با انتخاب SU-8 مناسب و کنترل سرعت چرخش هنگام لایه‌نشانی چرخشی[۷] می‌توان آن را با ضخامت موردنیاز لایه‌نشانی نموده و با انجام فرآیند لیتوگرافی مطلوب، ساختار موردنظر را با ارتفاع مناسب در آن ایجاد نمود [۷].

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 سیلیکونی و شیشه‌ای بین ۲ تا ۴ $ppmK^{-1}$ است [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 به وجود آمده که باعث جدایی آسان مهر از زیرلایه پلیمری شده و درنتیجه آسیب کم‌تری به مهر و زیرلایه پلیمری می‌رسد [۹،۲].

مزیت دیگر مهرهای SU-8 هموارتر بودن سطح آن‌ها نسبت به نوع سیلیکونی است؛ که در برخی از ابزارهای میکروفلویدیکی ممکن است نقش مهمی ایفا نماید. به‌عنوان‌مثال، وجود ناهمواری در کف میکروساختارها در جداسازی DNA، آشکارسازی را با مشکل مواجه می‌سازد [۹]. جدول (۱) میزان ناهمواری سطح مهر و سطح بستر را برای مهرهای سیلیکونی ساخته‌شده به روش سونش خشک، سونش مرطوب با KOH و نیز مهرهای SU-8 نشان می‌دهد. همان‌طور که ملاحظه می‌شود، ناهمواری سطح مهرهای SU-8 کم‌تر از مهرهای سیلیکونی است [۶].

www.SID.ir

Archive of SID

جدول ۱: ابعاد ناهمواری‌های سطح مهر و بستر در سیلیکون و **SU-8** [۶]

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

مهرهای ساخته‌شده به روش‌های مختلف برای استفاده در برجسته‌سازی گرم به‌طور خلاصه در جدول ۲ بررسی شده و ویژگی‌های مهم آن‌ها با یکدیگر مورد مقایسه قرار گرفته‌اند. در این مقاله از مهرهای SU-8 برای برجسته‌سازی گرم جهت ساخت میکروساختارهایی بروی بستری از جنس پلیمر PMMA استفاده شده است. اگرچه مهرهای سیلیکونی (با توجه به اطلاعات مندرج در جدول ۲) در بسیاری موارد مورداستفاده قرار گرفته‌اند [۹،۲]، اما ساخت آن‌ها نیاز به تجهیزات آزمایشگاهی پیشرفته (از قبیل DRIE) داشته و هزینه‌بر است. همچنین در مهرهای دیگری که با استفاده از SU-8 روی یک زیر لایه سیلیکونی ساخته‌شده‌اند [۸، ۱۱] نیز هزینه بالای ویفرهای سیلیکونی می‌بایست موردتوجه قرار گیرد. درحالی‌که در این مقاله از پلیمر SU-8 برای ساخت مهرها روی زیرلایه شیشه‌ای استفاده شده است که تنها نیاز به لایه نشانی چرخشی و نوردهی اشعه ماورای بنفش دارد. لذا در عین سادگی، هزینه ساخت بسیار کم‌تری دارد. همچنین کم‌ترین ابعاد ایجادشده در این مقاله ۱۵ میکرون است که با توجه به اطلاعات ذکرشده در جدول ۲ در مقایسه با موارد مشابه کم‌تر است.

در این مقاله، ابتدا روش ساخت مهر موردنظر با استفاده از پلیمر SU-8 و سپس فرآیند برجسته‌سازی گرم در دمای بالای ۱۶۰ درجه سلسیوس توضیح داده شده و تصاویری نیز از میکروساختارهای ایجادشده با این روش نشان داده خواهند شد. در ادامه، به موضوع آب‌دوست کردن ساختار پلیمری بروش پلاسما پرداخته خواهد شد. در انتها، عوامل مؤثر بر کیفیت برجسته‌سازی موردبررسی قرار خواهند گرفت.

جدول ۲: مروری بر مهرهای ساخته‌شده برای استفاده در برجسته‌سازی گرم، مزایا، معایب و ویژگی‌های مهم آن‌ها

نقاط ضعف	مزیت‌ها	هزینه ساخت مهر	کمینه ابعاد ایجادشده	فناوری مورداستفاده برای ساخت	جنس مهر
- گران‌قیمت - شکننده بودن مهر	تعداد تکرارپذیری خوب	بسیار بالا	۲۵ میکرون	سونش مرطوب و خشک	سیلیکون [۳، ۹ و ۱۰]
- پرهزینه - نیاز به تجهیزات آب‌کاری دارد	قابلیت ساخت تعداد زیاد با یک مهر	بالا	۱۰۰ میکرون	آب‌کاری الکتریکی روی SU-8 با زیرلایه سیلیکونی	نیکل [۲]
-هزینه بیشتر به دلیل زیرلایه سیلیکونی	عمر بیشتر مهر	متوسط	۵۰ تا ۱۰۰ میکرون	لیتوگرافی نوری	SU-8 روی زیرلایه سیلیکونی [۸، ۱۰]
- فرآیند ساخت طولانی و پیچیده - نیاز به چند ماده مانند PDMS و SU-8	ابعاد پایین	بسیار بالا	۱ تا ۳ میکرون	لیتوگرافی نوری و لیتوگرافی نرم در قالب از جنس PDMS	اپوکسی [۳]
	- ابعاد نسبتاً پایین - هزینه خیلی کم	پایین	۱۵ میکرون	لیتوگرافی نوری	SU-8 روی زیرلایه شیشه‌ای

۲- فرآیند ساخت مهر

در این مقاله از ماده SU-8 ۲۰۲۵ محصول شرکت Microchem برای ساخت مهر اولیه استفاده و طرح موردنظر بر روی بستر شیشه ایجادشده است. در این میان، یکی از مهم‌ترین مسائلی که باید مدنظر قرار داد، برقراری چسبندگی مناسب بین SU-8 و زیرلایه است که به عواملی مانند 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، ۱۳]. برای ساخت یک مهر مناسب نیاز به زیرلایه‌ای است که به‌طور کامل تمیز شده و از هرگونه 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 ۲۵×۲۵ میلی‌متر برش خورده و سپس در محلول آمونیوم هیدروکساید، آب‌اکسیژنه و آب به مدت ده دقیقه تحت دمای ۸۰ تا ۹۰ درجه نگه‌داشته و پس از شستشو در آب مقطر، با فشار هوای تمیز خشک می‌شوند. سپس با استون شستشو شده و برای اینکه سطح آن‌ها کاملاً بی‌آب[۸] شود، به مدت ۲۰ دقیقه تحت دمای ۱۸۰ درجه حرارت داده می‌شوند [۷].

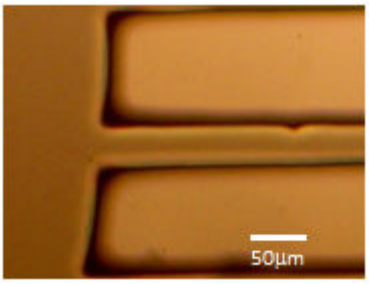
ضخامت SU-8 موردنظر برای ایجاد ساختار، ۵۰ میکرون است، بنابراین با توجه به راهنمای ارائه‌شده توسط شرکت سازنده، از SU-8 نوع ۲۰۲۵ استفاده می‌شود. طبق دستورالعمل استفاده از SU-8 که توسط شرکت سازنده ارائه شده است، برای دستیابی به ضخامت ۵۰ میکرون، سرعت چرخش در لایه‌نشانی چرخشی ۲۰۰۰ دور بر دقیقه است. پس از لایه‌نشانی چرخشی SU-8، نمونه به‌صورت پلکانی پخت اولیه۹ داده می‌شود. برای این منظور، نمونه به مدت ۳۰ دقیقه در دمای ۶۵ درجه سانتی‌گراد حرارت داده می‌شود، سپس دما تا ۹۵ سانتی‌گراد افزایش داده شده و حدود ۲۰ دقیقه در این دما باقی می‌ماند. پس از اتمام پخت اولیه، نمونه به‌آرامی خنک می‌شود تا تنش حرارتی پسماند

www.SID.ir

Archive of SID

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 طراحی‌شده 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 این صورت پس از انتقال طرح از مهر بر روی زیرلایه، ساختار موردنظر بر روی زیرلایه ایجاد خواهد شد. ازآنجایی‌که SU-8 یک فتورزیست 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 نوردهی، به نمونه باید یک مرحله پخت بعد از نوردهی[۱۰] داده شود که جهت تکمیل اتصالات عرضی[۱۱] در نواحی نورخورده صورت می‌گیرد [۷]. برای این منظور، ابتدا نمونه از دمای محیط تا دمای ۶۵ درجه سانتی‌گراد گرم شده و به مدت ۳۰ دقیقه باقی می‌ماند و سپس در دمای ۹۵ سانتی‌گراد به مدت ۱۵ دقیقه پخت داده شده و درنهایت نمونه به‌آرامی سرد می‌شود. پس‌ازآن نمونه برای مدت ۷ دقیقه در محلول ظهور SU-8 قرار می‌گیرد تا قسمت‌هایی که در معرض نور قرار نداشتند، حذف شده و ساختار موردنظر ظاهر می‌شود. در مرحله آخر، جهت افزایش استحکام ساختار و از بین رفتن ترک‌های موجود بر روی آن، ساختار به مدت ۲۰ دقیقه در دمای ۱۷۰ الی ۱۸۰ درجه حرارت داده می‌شود. تصویر میکروسکوپی از نمونه مهر ساخته‌شده با SU-8 در شکل ۱ نشان داده شده است.



شکل ۱: تصویر میکروسکوپ نوری از مهر ساخته‌شده با پلیمر SU-8

۳- فرآیند برجسته‌سازی گرم

به‌طورکلی فرآیند برجسته‌سازی گرم شامل سه مرحله اصلی است. در مرحله اول، مهر و زیرلایه پلیمری تا دمای بالاتر از دمای گذار[۱۲] زیرلایه پلیمری (T_g) گرم می‌شوند. دمای گذار، دمایی است که پلیمر از حالت شیشه‌ای خارج شده و نرم و انعطاف‌پذیر می‌شود. در مرحله دوم، مهر تحت یک فشار از پیش‌تنظیم‌شده، بر روی زیرلایه فشرده می‌شود تا الگوی ایجادشده روی مهر، بر روی زیرلایه پلیمری منتقل شود. در مرحله آخر، پس از سپری شدن مدت زمانی از فشردن مهر بر روی زیرلایه، سیستم تا دمایی پایین‌تر از T_g سرد شده و زیرلایه و مهر از یکدیگر جدا می‌شوند [۱]. این فرآیند می‌تواند جایگزین مناسبی برای فرآیندهای سیلیکونی بوده و امکان ساخت انبوه و ارزان سیستم‌ها و ادوات میکروالکترومکانیکی و نیز قطعات میکروفلویدیکی ساخته‌شده بر روی بسترهای PMMA برای کاربردهای پزشکی و شیمی تجزیه را به وجود خواهد آورد [۱۷-۱۴]. چراکه مواد پلیمری استفاده‌شده در برجسته‌سازی گرم، بسیار ارزان‌تر از ویفر سیلیکون بوده و فرآیندهای میکروماشین‌کاری پیچیده، فقط برای ساخت یک مهر اولیه نیاز است.

هنگامی‌که مهر ساخته شد، ساختار موردنظر به‌راحتی توسط فرآیند برجسته‌سازی گرم، می‌تواند تکرار شود [۴]. اما با روش ارائه‌شده در این مقاله ساخت مهرها نیز فرآیند چندان پیچیده‌ای نداشته و به دلیل استفاده از زیرلایه شیشه‌ای برای مهر، هزینه تولید مهر نیز بسیار کاهش می‌یابد. ایجاد ساختار با پلیمر SU-8 تنها نیاز به دستگاه لایه‌نشانی چرخشی[۱۳] برای لایه نشانی SU-8 و دستگاه لیتوگرافی برای تابش UV دارد. به دلیل یک مرحله‌ای بودن لیتوگرافی، ساخت این مهرها نیازی به تنظیم دقیق[۱۴] نیز ندارد.

در این مقاله از پلیمر PMMA به‌عنوان بستر استفاده شده است. همان‌طور که اشاره شد، در برجسته‌سازی گرم از اعمال فشار و حرارت برای انتقال طرح مهر بر روی زیر لایه استفاده می‌شود. 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 انعطاف‌پذیر 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, ۴]. بنابراین تنظیم دما در انجام این فرآیند نقش به سزایی دارد. فشار اعمالی حین فرآیند نیز از اهمیت زیادی برخوردار بوده و با افزایش دما و فشار میزان دقت افزایش می‌یابد. اما از طرفی افزایش دما اغلب موجب افزایش تنش حرارتی پسماند شده و باعث بروز چسبندگی در زمان جداسازی مهر از زیرلایه PMMA می‌گردد [۶]. اما با توجه به اینکه مهر انتخاب‌شده 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 برجسته‌سازی گرم ۱۶۰ درجه سانتی‌گراد انتخاب می‌شود. بدین ترتیب دیگر نیازی به اعمال فشار زیاد نبوده و فشار اعمال‌شده برای این فرآیند ۱/۲ مگاپاسکال است.

برای این منظور، ابتدا مهر و بستر پلیمری به یکدیگر متصل شده و تحت فشار ۰/۱ مگاپاسگال وارد فر می‌شوند. با افزایش تدریجی دما، از دمای ۱۱۰ درجه سانتی‌گراد به‌تدریج فشار را نیز افزایش داده تا به ۱/۲ مگاپاسکال برسد. سپس ساختار به مدت ۲۰ دقیقه در دمای ۱۶۰ درجه سانتی‌گراد باقی می‌ماند تا ساختار مهر به‌خوبی بر روی بستر منتقل شود. بعد از کاهش دما تا ۹۰ درجه سانتی‌گراد فشار از روی ساختار برداشته شده و جداسازی[۱۵] صورت می‌گیرد. بعد از خنک شدن سیستم، مهر و بستر به‌راحتی از هم جدا می‌شوند [۱۸]. تصویر میکروسکوپ روبش الکترونی (SEM[۱۶]) از ساختار ایجادشده توسط

www.SID.ir

Archive of SID

فرآیند برجسته‌سازی گرم، در شکل ۲ نشان داده است. عرض ساختارهای ایجادشده در این شکل ۵۰ میکرومتر است.

۴- آب‌دوست نمودن سطح پلیمر

ورق‌های PMMA مورداستفاده در این مقاله به‌طور ذاتی آب‌گریز می‌باشند. اما با توجه به این‌که میکروساختارهای پلیمری به‌ویژه ابزارهای میکروفلویدیکی عمدتاً جهت استفاده در علوم زیستی ساخته می‌شوند [۴]، آب‌دوست بودن سطح پلیمر تأثیر بسزایی در کارایی این ابزارها دارد. به‌عنوان‌مثال، میزان جذب ناخواسته پروتئین در سطح آب‌گریز بسیار بیشتر از سطح آب‌دوست است [۱۹]. ازاین‌رو، آب‌دوست نمودن سطح میکروساختار ایجادشده امری ضروری به نظر می‌رسد.

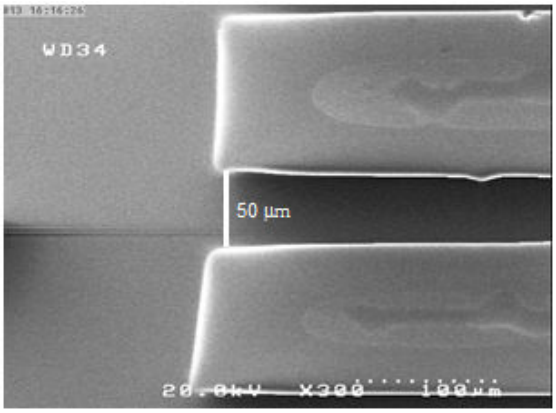
تاکنون روش‌های متنوعی برای آب‌دوست نمودن سطح پلیمرها ارائه گردیده است. ازجمله می‌توان به تابش با لیزر اگزایمر در خلأ[۱۷] [۲۰]، لایه‌نشانی فاز بخار مواد آلی [۲۱]، آمینولیزه کردن[۱۸] [۲۲] و فعال‌سازی با پلاسمای بخار آب[۱۹] [۲۳] اشاره نمود. در این مقاله از روش کنده‌کاری با پلاسما[۲۰] بهره گرفته شده است. به‌نحوی‌که سطح پلیمر در دستگاه لایه‌نشانی حرارتی سرب (ساخت شرکت یارنیکان) به مدت پانزده دقیقه با توان ۱۰۰ وات در معرض تابش پلاسما قرار گرفته و پس‌ازآن آب‌دوست می‌شود. پلاسمای مورداستفاده در این مقاله پلاسمای اکسیژن بوده است که غالباً برای فعال کردن سطح پلیمرهایی از قبیل PDMS به کار می‌رود.

همان‌طور که می‌دانیم، پلاسما حاوی ذرات باردار پرانرژی است. هنگامی‌که این ذرات پرانرژی به سطح ماده پلیمری برخورد می‌کنند باعث شکسته شدن پیوندهای بین اتم‌های سطحی شده و رادیکال‌های سطحی را به وجود می‌آورند. مجاورت این رادیکال‌ها با مولکول‌های آب ایجاد گروه‌های قطبی هیدروکسیل را به همراه داشته و درنهایت نیروی جاذبه بین مولکول‌های آب و سطح پلیمر را افزایش می‌دهد [۲۴]. البته درصورتی‌که توان پلاسمای ایجادشده بیش‌ازحد موردنیاز باشد، برخورد ذرات باردار به سطح، موجب سونش سطح پلیمر خواهد شد. لذا توان انتخابی در حدی است که تنها باعث شکسته شدن پیوندهای سطحی شود.

۵- بحث و نتایج

کیفیت مناسب برجسته‌سازی منوط به کنترل عوامل مؤثر در فرآیند است که مهم‌ترین آن‌ها عبارت‌اند از دما، فشار و مدت‌زمان فرآیند حرارت‌دهی [۶]. در این بخش هر یک از این عوامل موردبحث و بررسی قرار می‌گیرند. زمان برجسته‌سازی 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. در این مقاله، برای اینکه فرصت فوق برای بستر فراهم شود، مدت‌زمان حرارت‌دهی را ۲۰ دقیقه انتخاب نمودیم. برای بررسی اثر دما و فشار، معیارهایی برای سنجش کیفیت برجسته‌سازی تعریف شده‌اند که عبارت‌اند از:

- همانندسازی[۲۱]
- عمق ساختار ایجادشده
- عمود بودن دیواره حفره‌ها (نسبت عمق به عرض)
- مینیمم ابعاد طرح ایجادشده
- میزان آسیب وارده به مهر



شکل ۲: تصویر **SEM** از میکروساختارهای ایجادشده

برجسته‌سازی به ازای دماها و فشارهای مختلفی انجام گرفته و کیفیت میکروساختارهای ایجادشده با توجه به معیارهای فوق مورد ارزیابی قرار گرفته‌اند.

۵-۱- تأثیر میزان دما و فشار حین فرآیند برجسته‌سازی

اگر دمای فرآیند کم‌تر از حد موردنیاز باشد، بستر PMMA به‌اندازه کافی نرم و حالت پذیر نشده و طرح موردنظر با عمق مناسب درون آن ایجاد نخواهد شد. از طرف دیگر به دلیل سخت بودن بستر، با اعمال فشار، مهر دچار آسیب خواهد شد. علاوه بر این، نسبت طول به عرض ساختار ایجادشده نیز قابل‌قبول نبوده و دیواره‌هایی منحنی‌وار ایجاد خواهند شد [۶]. با افزایش بیش‌ازحد دمای فرآیند، استحکام مهر نیز کم‌تر شده و مهر آسیب خواهد دید.

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.

عامل دیگری که بر کیفیت برجسته‌سازی مؤثر است، فشار اعمالی حین فرآیند است. اگر فشار اعمالی بیش‌ازحد زیاد باشد، احتمال آسیب دیدن مهر وجود دارد. از طرف دیگر، با کاهش فشار، بستر پلیمری که در اثر حرارت نرم شده است، نمی‌تواند به‌خوبی در فضاهای خالی مهر جاری شود و درنتیجه الگوی موردنظر با عمق لازم بر روی بستر ایجاد نخواهد شد [۶]. در این بخش، مؤلفه‌های کیفی برجسته‌سازی به ازای فشارها و دماهای مختلف موردبررسی قرار گرفته و نتایج آزمایش‌های فوق در جدول ۳ آمده‌اند. با توجه نتایج ذکرشده در جدول، بهترین

www.SID.ir

Archive of SID

برجسته‌سازی در فشار ۱/۲ مگاپاسکال و دمای ۱۶۰ درجه سلسیوس صورت می‌گیرد.

جدول ۳: مقایسه کیفیت نمونه‌های ساخته‌شده به ازای دماها و فشارهای مختلف

فشار (MPa) \ دما(c)	90	105	120	140	160	180
0.2						
0.5						
0.8						
1						
1.2						
1.5						

۶- نتیجه‌گیری

در این مقاله با استفاده از روش لیتوگرافی نرم، با ساخت مهری جدید و کم‌هزینه که برای برجسته‌سازی گرم بسیار مفید است، میکروساختارهایی بر روی یک بستر پلیمری از جنس PMMA ساخته شدند. مهر موردنظر از جنس پلیمر SU-8 و روی زیرلایه شیشه‌ای ساخته‌شده و به دلیل عدم استفاده از زیرلایه سیلیکونی و بی‌نیازی به فرآیندها و تجهیزات پیشرفته آزمایشگاهی در مقایسه با موارد مشابه ساده‌تر و کم‌هزینه‌تر است.

همچنین با توجه به آب‌گریز بودن بستر PMMA، با به‌کارگیری روش کنده‌کاری با پلاسما، سطح پلیمر آب‌دوست گردیده است. مدت‌زمان برجسته‌سازی، دما و فشار اعمال‌شده از مهم‌ترین عوامل مؤثر بر کیفیت برجسته‌سازی هستند. فرآیند ساخت برای دماها و فشارهای مختلفی انجام گرفته و مقادیر بهینه آن‌ها به ترتیب برابر ۱۶۰درجه و ۱/۲ مگا پاسکال به دست آمده‌اند. ساختارهای ساخته‌شده در این مقاله دارای کمینه ابعاد ۱۵ و عمق ۵۰ میکرون می‌باشند که در مقایسه با موارد مشابه بهبود چشم‌گیری پیدا کرده است.

مراجع

[1] Y. Fan, T. Li, W. Lau, and J. Yang, "A rapid hot-embossing prototyping approach using SU-8 molds coated with metal and anti-stick coatings," *Micro-electro-mechanical Systems*, vol. 21, no. 4, pp. 875-881, 2012.

[2] S.C. Chen, M.C. Lin, R.D. Chien, and W.L. Liaw, "Hot embossing of micro-featured devices," *International Conference on Mechatronics*, Taipei, Taiwan, 2005.

[3] T. Koerner, L. Brown, R. Xie, and R.D. Oleschuk, "Epoxy resins as stamps for hot embossing of microstructures and microfluidic channels," *Sensors and Actuators B*, vol. 107, pp. 632-639, 2005.

[4] Y. Zhao, and T. Cui, "Fabrication of high-aspect-ratio polymer-based electrostatic comb drives using the hot embossing technique," *J. Micromech. Micro Eng.*, vol. 13, pp. 430-435, 2003.

[5] Harsonl, H.J. Lu, Y.C. Liu, Y.C. Lam, and X.C. Shan, "Experimental studies on polymer deformation and flow in micro hot embossing," *Electronics Packaging Technology Conference, 8th*, Singapore, EPTC '06, 2006.

[6] M.B. Esch, S. Kapur, G. Irizarry, and V. Genova, "Influence of master fabrication techniques on the characteristics of embossed microfluidic channels," *Lab Chip*, vol. 3, pp. 121-127, 2003.

[7] Available online at: www.michrochem.com, Jan. 2013.

[8] K. Metwally, L. Robert, R. Salut, and Chantal Khan Malek, "SU-8-based rapid tooling for thermal roll embossing," *DTIP, Aix-en-provence*, pp. 11-13, France, 2011.

[9] M.B. Esch, SahilKapur, G. Irizarry, and V. Genova, "Influence of master fabrication techniques on the characteristics of embossed microfluidic channels," *Lab Chip*, vol. 3, pp. 121-127, 2003.

[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 three-dimensional features for blood cell filtration," *J. of Micromech. Microeng.* vol. 18, 2008.

[11] A. Mathur, S.S. Roy, M. Tweedie, S. Mukhopadhyay, S.K. Mitra, and J.A. McLaughlin, "Characterization of PMMA microfluidic channels and devices fabricated by hot embossing and sealed by direct bonding," *Current Applied Physics*, vol. 9, pp. 1199-1202, 2009.

[12] S. Grist, J.N. Patel, M. Haq, B.L. Gray, and B. Kaminska, "Effect of surface treatments/coatings and soft bake profile on surface uniformity and adhesion of SU-8 on a glass substrate," *Proceedings of the SPIE*, vol. 93, pp. 75930F-1-75930F-9, 2010.

[13] X. Mao, *et al.*, "Two new methods to improve the lithography precision for SU-8 photoresist on glass substrate," *MEMS Conference*, Paris, France, pp. 337-340, 2012.

[14] G.B. Lee, *et al.*, "Micro-fabricated plastic chips by hot embossing methods and their applications for DNA separation and detection sensors actuators," *B75*, pp. 142-148, 2001.

[15] H. Becker, *et al*., "Microfluidic devices for μ-TAS applications fabricated by polymer hot embossing," *Proc. SPIE 3515*, pp. 82-177, 1998.

[16] H. Becker, and U. Heim, "Hot embossing as a method for the fabrication of polymer high aspect ratio structures," *Sensors Actuators A 83*, pp. 130-517, 2000.

[17] H. Becker, and U. Heim," Silicon as tool material for polymer hot embossing," *Proc. MEMS 99*, pp. 228-231, 1999.

[۱۸] علیرضا شمسی، علی امیری، سعید دلارام فریمانی، حسن حاج‌قاسم، منصور محتشمی‌فر و مجیدرضا علی‌احمدی، «ساخت میکروکانال با استفاده از فرآیند برجسته‌سازی گرم،» صنایع الکترونیک، دوره ۴، شماره ۲، تابستان ۱۳۹۲.

[19] K.L. Prime, and G.M. Whitesides, "Self-assembled organic monolayers: model systems for studying adsorption of proteins at surfaces," *Science*, vol. 252, pp. 1164-1167, 1991.

[20] A. Hozumi, T. Masuda, K. Hayashi, H. Sugimura, O. Takai, and T. Kameyama, "Spatially defined surface modification of poly (methyl methacrylate) using 172 nm vacuum ultraviolet light," *Langmuir*, vol.18, no. 23, pp. 9022-9027, 2002.

[21] A. Hiratsuka, H. Muguruma, K.H. Lee, *et al.*, "Organic plasma process for simple and substrate-independent surface modification of polymeric Bio-MEMS devices," *Biosens Bioelectron*, vol. 19, pp. 1667-1672, 2004.

www.SID.ir

Archive of SID

[22] A.C. Henry, T.J. Tut, M. Galloway, *et al.*, "Surface modification of poly (methyl methacrylate) used in the fabrication of microanalytical devices," *Anal Chem*, vol. 72, pp. 5331-5337, 2000.

[23] T.M. Long, S. Prakash, M.A. Shannon, *et al.*"Water-vapor plasma-based surface activation for trichlorosilane modification of PMMA," *Langmuir*, vol. 22, pp. 4104-4109, 2006.

[24] C. Yuen, R. Williams, M. Batterbury, and I. Grierson, "Modification of the surface properties of a lens material to influence posterior capsular o-pacification," *J. Clinical and Experimental Ophthalmology*, vol. 34, pp 568-574, 2006.

زیرنویس‌ها

۱ Hot Embossing

۲ Laser ablation

۳ Lab on a Module

۴ Micro-Total Analyzing Systems (μTAS)

۵ Deep Reactive Ion Etching

۶ Aspect ratio

۷ Spin coating

۸ Dehydrated

۹ Prebake

۱۰ Post exposure bake

۱۱ Crosslink

۱۲ Glass transition temperature

13 Spin coater

14 Alignment

۱۵ De-embossing

۱۶ Scanning Electron Microscope

۱۷ Vacuum ultraviolet (VUV) irradiation with exciter lamp

۱۸ Amino-Lysis

۱۹ Water-vapor plasma treatment

۲۰ Plasma aching

۲۱ Fidelity

www.SID.ir