ساخت تراشه میکروشاره با میکروماشین‌کاری لیزری

هدیه پازکیان [۱]، سارا صفایی [۲]، محمود ملاباشی [۱]، حسین امیری [۲]

چکیده

در این مقاله از ماشین‌کاری پلیمر PMMA با لیزر CO_2 به منظور ایجاد مجراهای دو بعدی میکرو (با ابعاد کمتر از ۵۰۰ میکرون) استفاده شده است. به منظور ایجاد کانال میکرو، نمونه با دو شاریدگی J/cm^2 ۴۴/۹ و ۴۸/۴ و سرعت‌های پایش متفاوت از مرتبه $\mu m/s$ ۵۰۰-۶۳ توسط لیزر CO_2 تپی مورد تابش قرار گرفته است و در مراحل بعدی برای تکمیل تراشه میکرو شاره، تراشه T شکل توسط لیزرهای CO_2 به پلیمر جوش داده شده‌است. نتایج حاکی ازعملکرد بهتر لیزر CO_2 پیوسته نسبت به تپی برای اتصال تراشه میکروشاره است.

واژه‌های کلیدی: میکروکانال، کندگی با لیزر نانو ثانیه، لیزر CO_2.

۱- مقدمه

مجراهای میکروسیال برای کاربردهای مختلف به ویژه آنالیز شیمیایی و پزشکی استفاده می‌شوند. نمونه‌ای از این کاربردها عبارتند از: بررسی کردن فاضلاب، انتقال دارو به بدن بیمار و تشخیص نقاط درمان[۱]. امروزه تعداد زیادی از این سامانه‌ها به روش های متنوع با سیلیکون ساخته شده و وارد بازار می‌شوند[۲]. انتخاب سیلیکون برای دستگاههایی با دوام طولانی مناسب است. اما استفاده از آن درسامانه‌هایی که یک بار استفاده از دستگاه آن‌ها را آلوده می‌کند مانند کاربردهای پزشکی، مقرون به صرفه نیست. به همین دلیل برای اینگونه کاربردها از پلیمرها استفاده می‌شود که ارزان قیمت هستند. از طرف دیگر سامانه‌های میکروسیال به چندین روش ساخته می‌شوند، برخی از این روش‌ها بر مبنای ساخت از یک سازه برتر با میکروماشین کاری لیزری و سپس تولید در مقیاس انبوه با روش‌هایی مانند منبت کاری داغ[۳] و قالب-گیری تزریقی[۴] است. روشی که امروزه به آن توجه شده میکروماشین‌کاری لیزری است که نسبت به دو روش ذکر شده از لحاظ کیفی بهتر و از لحاظ اقتصادی مقرون به صرفه‌تر است.

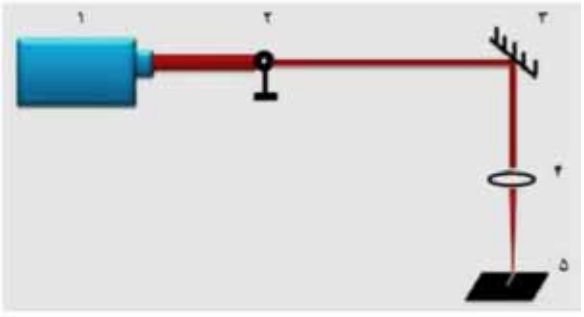
در این مقاله از لیزرCO_2 برای ساخت مجراهایی با ابعاد میکرو روی پلیمر PMMA استفاده شده است.

۱) استادیار، پژوهشگاه علوم و فنون هسته ای،
h_pazokian@iust.ac.ir
۲) کارشناس ارشد، دانشکده فیزیک، دانشگاه علم و صنعت ایران
۳) استاد، دانشکده فیزیک، دانشگاه علم و صنعت ایران.
mollabashi@iust.ac.ir

سرعت‌های پایش از مرتبه $\mu m/s$ ساخت میکروکانال-های بسیار پیچیده را در عرض چندین ثانیه امکان‌پذیر می‌سازد. اگرچه میکروساختارهای لیزری غالباً با لیزرهای UV ایجاد شده‌اند. اما نتایج آزمایش‌ها نشان می‌دهد لیزر CO_2 نیز می‌تواند گزینه مناسبی در غیاب لیزرهای UV باشد.

۲- روش انجام

برای ماشین‌کاری از لیزر CO_2 تپی با پهنای ۱۰۰ ns و توان قله ۵۰ کیلووات استفاده شده است. روزنه‌ای به قطر ۰/۶cm به منظور انتخاب اندازه لکه دلخواه در مسیر قرار داده شده و سپس پرتو توسط یک آیینه با زاویه ۴۵ درجه و عدسی با فاصله کانونی ۱۰cm روی نمونه متمرکز شد. نمونه روی میز متحرکی که با سرعت مشخص در یک بعد حرکت می‌کند قرار داده شده و با شاریدگی‌ها و سرعت‌های پایش مختلف مورد تابش قرار گرفت. در مواردی که نیاز به شاریدگی‌های پایین‌تر بود، یک تضعیف کننده در مسیر پرتو قرار داده شد تا انرژی تپ کاهش یابد. در این کار تجربی تراشه میکروکانال در دو مرحله ساخته شده است. در مرحله اول ایجاد میکرو کانال T شکل توسط لیزر CO_2 با نرخ تکرار ۱ Hz انجام شد و کیفیت و ابعاد مجراهای ایجاد شده با استفاده از میکروسکوپ الکترونی(SEM) مورد بررسی قرار گرفت. در مرحله بعدی، برای ایجاد تراشه T شکل میکروشاره، بعد از انتخاب بهینه شرایط و ایجاد مجرا، روش اتصال لیزری مورد استفاده قرار گرفت. عمل پوشاندن و جوش دادن دو پلیمر به منظور تکمیل میکرو تراشه توسط لیزرهای CO_2 با عملکرد پیوسته و تپی انجام گرفت و نتایج آن با یکدیگر مقایسه گردید. شکل۱ طرحواری از چیدمان آزمایشگاهی برای ایجاد میکرو کانال T شکل را نشان می‌دهد.



شکل۱: چیدمان آزمایش: ۱- لیزر CO_2 ، ۲-روزنه، ۳- آیینه، ۴- عدسی ۵- میز متحرک

۳- نتایج

در میکروماشین‌کاری لیزری شرایط تابش مثل طول-موج، شاریدگی و شرایط پردازش مثل سرعت پایش عوامل مهم در ایجاد ساختارهای میکرو هستند. بدین منظور در این آزمایش بعد از بررسی شاریدگی‌های مختلف برای ایجاد میکرومجرا دو شاریدگی J/cm^2 ۴۴/۹ و ۴۸/۴ انتخاب و اثر آن با تغییرات سرعت روی ابعاد میکرو مجرا مورد بررسی قرار گرفت.

شکل (۲) نمودار تغییرات عمق و پهنای مجرا را بر حسب سرعت در دو شاریدگی J/cm^2 ۴۴/۹ و ۴۸/۴ نشان می‌دهد. خطوط مشکی نشان دهنده پهنا و خطوط آبی رنگ عمق میکرو مجراها را بیان می‌کنند. همان‌طور که نمودار نشان می‌دهد مجرا در شاریدگی بیشتر دارای ابعاد بزرگتری است. از طرفی پهنای مجراها در مقایسه با عمق بیشتر بوده و با افزایش سرعت در شاریدگی ثابت، عمق و پهنا کاهش می‌یابد.

این تفاوت در ابعاد در سرعتهای بیشتر محسوس‌تر است. به عبارت دیگر پهنا و به ویژه عمق مجرا با افزایش سرعت ابتدا با شیب زیاد شروع به کاهش کرده و با افزایش بیشتر سرعت، شیب کاهش می‌یابد.

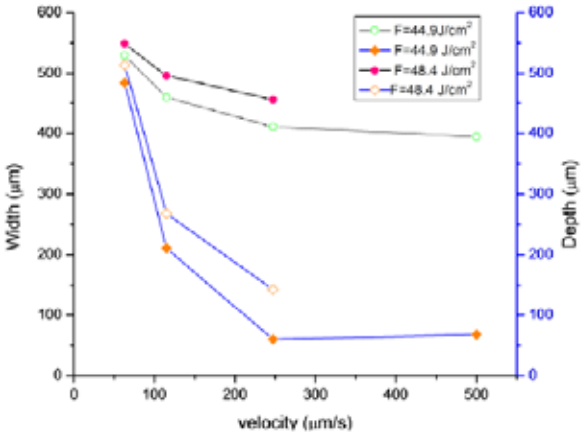
جدول ۱: مشخصات میکرومجراهای ایجاد شده با شاریدگی ۴۴/۹ J/cm^2

شماره مجرا	عمق(µm) Depth	پهنا(µm) Width	پهنا/عمق Aspect ratio	سرعت پایش (µm/s)
۱	مجرا ایجاد نشد	مجرا ایجاد نشد	مجرا ایجاد نشد	۵۰۰
۲	۶۷/۵۰	۴۱۰/۸۳	۰/۱۴	۲۴۷
۳	۲۱۰/۸۲	۴۵۹/۵۲	۰/۴۶	۱۱۵
۴	۴۸۳/۸۱	۵۲۹/۷۳	۰/۹۱	۶۳

جدول ۲: مشخصات میکرومجراهای ایجاد شده با شاریدگی ۴۸/۴ J/cm^2

شماره مجرا	عمق(µm) Depth	پهنا(µm) Width	پهنا/عمق aspect ratio	سرعت پایش (µm/s)
۵	۵۹/۵۱	۳۹۴/۶۰	۰/۱۷	۵۰۰
۶	۱۴۲/۸۱	۴۵۵/۴۲	۰/۳۱	۲۴۷
۷	۲۶۷/۹۲	۴۹۵/۵۳	۰/۵۴	۱۱۵
۸	۵۱۳/۴۰	۵۴۹/۱	۰/۹۳	۶۳

تغییرات کم ابعاد در سرعت‌های بالا به دلیل ناکافی بودن زمان لازم برای برهم‌کنش پرتو و سطح است. این مسئله باعث کاهش بازده کندگی و در نتیجه تغییرات ناچیز در عمق و پهنا در سرعت‌های بالا می‌شود.



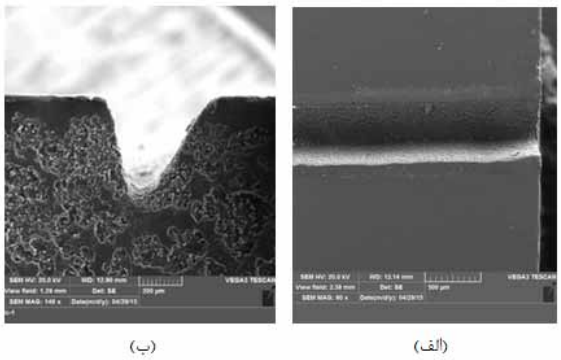
شکل ۲: تغییرات پهنا و عمق میکرومجرا نسبت به سرعت پایش با شاریدگی‌های متفاوت

برای انتخاب بهترین میکرومجرا، مشخصات ابعادی آنها را که با دو شاریدگی ۴۴/۹ J/cm^{2}و ۴۸/۴ ایجاد شده‌اند بررسی می‌کنیم. یکی از موارد مهم در ساخت و کاربرد میکرو مجراها نسبت ابعادی است. نسبت ابعادی به صورت نسبت عمق یا ارتفاع به کوچک‌ترین بُعد افقی (پهنا) آن، تعریف می‌شود.

به طور کلی می‌توان گفت هر چه عدد نسبت ابعادی و اندازه کلی ساختار کوچک‌تر باشد، ایجاد آن ساختار مشکل‌تر است. این نسبت در میکروماشین‌کاری نقش بسیار مهمی را ایفا می‌کند و می‌بایست بهینه نسبت ابعادی در میکرو مجراها حاصل شود. بدین منظور کنترل شرایط آزمایش برای ایجاد میکرو مجرا با نسبت ابعادی دلخواه بسیار مهم است. افزایش قطر هیدرولیکی منجر به افزایش حجم سیال می‌شود و این موضوع باعث افزایش پراکندگی محوری می‌شود. در نتیجه افزایش پراکندگی محوری در نهایت به علت رقیق کردن محلول باعث می‌شود عملکرد سیال در خروجی کاهش یابد. پس باید از میکرومجراهایی با نسبت ابعادی

بالا صرف نظر کرد. مناسب‌ترین میکرومجرا برای کاربرد در تراشه آزمایشگاهی باید دارای نسبت ابعادی عمق به پهنای کمتر از ۰/۳ باشد تا پراکندگی محوری کاهش یابد[۵]. جداول ۱ و ۲ به ترتیب مشخصات ابعادی میکرومجراهای ایجاد شده در دو شاریدگی J/cm^2 ۴۴/۹ و ۴۸/۴ با تغییرات سرعت را نشان می‌دهد.

همان‌طور که از جداول مشخص است، مجراهای ایجاد شده با شاریدگی J/cm^2 ۴۴/۹ دارای نسبت‌های ابعادی بهتری هستند. از طرف دیگر حفظ نسبت ابعادی مناسب با کاهش بیشتر ابعاد مجرا به ویژه پهنا مورد توجه است. هرچند افزایش سرعت طبق نمودار شکل ۲ باعث کاهش پهنا می‌شود، اما این کاهش در عمق محسوس‌تر است. با این وجود بکارگیری عدسی با فاصله کانونی کوچکتر و کاهش اندازه لکه لیزر در کانون روشی عملی در بهبود اندازه پهنای مجرا است. شکل (۳) تصویر SEM از سطح مقطع نوعی مجرای ایجاد شده با شاریدگی J/cm^2 ۴۴/۹ و سرعت پایش $63\mu m/s$ را نشان می‌دهد.



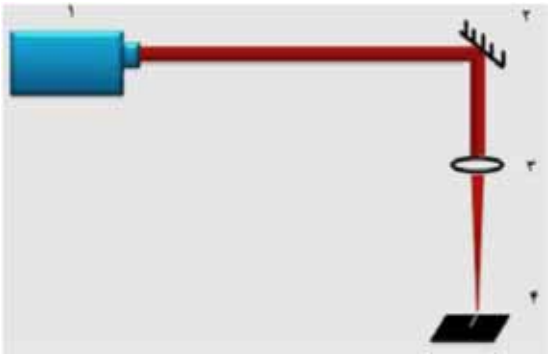
شکل (۳): تصویر SEM از سطح مقطع مجرا با شرایط تابش‌دهی: $f_{rr} = 1\,Hz$ ، $v = 63\ \mu m/s$ ، $F = 44/9\ J/cm^2$
(الف): نما از بالا ، (ب): نما از سطح مقطع

۳-۱- اتصال دو پلیمر PMMA به یکدیگر

بعد از بررسی‌های لازم برای ایجاد میکرومجرا مناسب با میکروماشین‌کاری لیزری جهت ایجاد تراشه با انتخاب یکی از شرایط مناسب (مجرا ۲ و ۵ و ۶) در جداول ۱ و ۲، نیاز است تا سطح میکرو مجرا با پلیمر دیگری پوشانده شود. برای این کار می‌توان از پلیمرهای مختلف و روش‌های گوناگون اتصال استفاده کرد. یکی از روش‌هایی که امروزه برای اتصال مورد توجه است استفاده از جوشکاری لیزری است.

در این میان پرکاربردترین لیزر، لیزر دی اکسید کربن است. از طرفی مناسب‌ترین گزینه برای اتصال، پلیمری با ویژگی‌های حرارتی نزدیک به پلیمر پایه می‌باشد. از اینرو از خود پلیمر PMMA برای اتصال استفاده شد. برای این کار میکرو مجرا T شکل با استفاده از شرایط بهینه روی PMMA پایه ایجاد شد. پلیمر هم اندازه‌ی آن که بدون هیچ کندگی است، روی آن قرار گرفت به نحوی که سطح میکرو مجراها کاملاً پوشیده شوند. سپس دو پلیمر توسط گیره به هم محکم شده تا فاصله بین دو پلیمر به حداقل برسد. برای اتصال این دو قطعه پرتو لیزر با عدسی به فاصله کانونی۱۰cm متمرکز شد. قطعه از لبه روی میز متحرک در فاصله ۸/۶ cm از عدسی (یعنی دی فوکوس: در مکان $\delta = +1/4$ cm) قرار داده شد و لکه لیزر در فاصله بین دو پلیمر به نحوی تنظیم شد که کل فاصله را بپوشاند.

تابش دهی از محل فصل مشترک به منظور اتصال دو پلیمر با لیزرهای CO_2 با مد کارکردی تپی و پیوسته حاصل گردید.



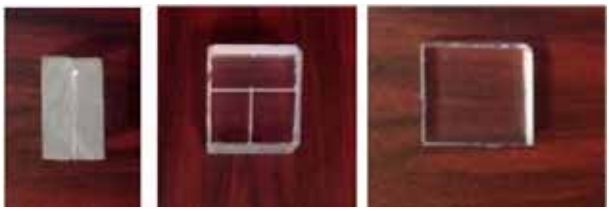
شکل ۴- طرحواری از چیدمان آزمایشگاهی جوشکاری با لیزر CO_2 (تپی و پیوسته): ۱- لیزر CO_2 پیوسته یا تپی، ۲-آیینه،۳- عدسی، ۴- میزمتحرک

۳-۲- اتصال دو پلیمر با استفاده از لیزر تپی

تابش‌دهی از محل فصل مشترک دوپلیمر با لیزر گازکربنیک تپی با نرخ تکرار HZ ۳، تحت شرایط شاریدگی و سرعت‌های متفاوت بررسی شد. هر چهار لبه با همین شرایط تابش‌دهی شدند. در همه این موارد اتصال مناسبی صورت گرفته و استحکام جوش کاملاً قابل قبول است. نتایج تجربی در جدول ۳ نشان داده شده است. همان‌طور که جدول نشان می‌دهد جوش-کاری در سرعت بالاتر در شرایط شاریدگی و نرخ تکرار یکسان عمق نفوذ و پهنای کمتری داشته و با وجود اتصال مناسب باعث صدمه کمتر به پلیمر پایه می‌شود.

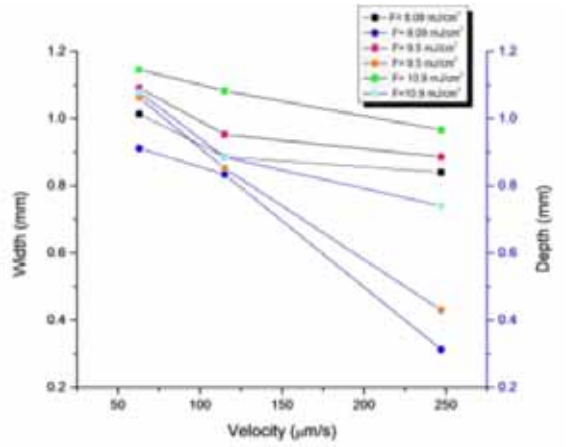
جدول ۳: مشخصات جوشکاری دو پلیمر PMMA

پهنا (mm)	عمق (mm)	سرعت پایش (µm/s)	شاریدگی (mJ/cm^2)	نرخ تکرار(Hz)
۱/۰۱	۰/۹۱	۶۳	۸/۰۹	۳
۰/۸۶	۰/۸۳	۱۱۵	۸/۰۹	۳
۰/۸۴	۰/۳۱	۲۴۷	۸/۰۹	۳

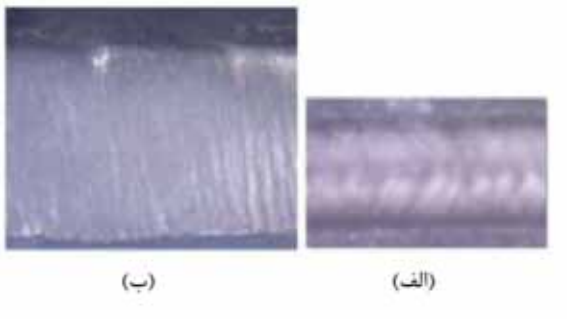


شکل ۵: نحوه قرارگیری دو پلیمر برای جوشکاری (الف) پلیمر PMMA با ابعاد دلخواه، (ب) قرار دادن دو پلیمر روی‌یکدیگر به تحوی که سطح آن پوشیده شود، (ج) نحوه قرارگیری پلیمر برای اتصال

در شکل ۶ تغییرات عمق و پهنای جوش با سرعت پایش نشان داده شده است. نکته قابل توجه این است که با افزایش سرعت پهنای جوش بیشتر از عمق جوش کاهش می یابد. در شکل ۷ کیفیت تصاویر نقاط اتصال از دو نمای متفاوت نشان داده شده است.



شکل ۶: تغییرات عمق و پهنای جوش با سرعت در شاریدگی متفاوت



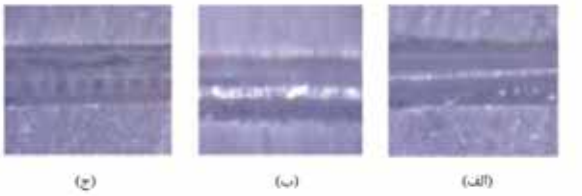
شکل ۷: جوشکاری با شاریدگی $8/09\ mJ/cm^2$ الف: نمای پهنای جوش ب: نمای عمق جوش

ب: اتصال دو پلیمر با استفاده از لیزر پیوسته

در روش اتصال با لیزر پیوسته از لیزر CO_2 با توان ۳ وات با سرعت پایش ۵۰۰µm/s، ۲۴۷µm/s و ۱۱۵ µm/s استفاده شد. مشخصات پهنا و عمق جوش در سرعت های مختلف ارائه شده است. در شکل۸ تغییرات عمق و پهنای جوش با سرعت پایش نشان داده شده است. نکته قابل توجه این است که با افزایش سرعت پهنای جوش بیشتر شده اما عمق جوش کاهش می‌یابد.

جدول۴: مشخصات جوش با لیزر CO_2 پیوسته

پهنا (mm)	عمق(mm)	سرعت پایش (µm/s)	توان (Watt)
۰/۹۰۴	۱/۲	۵۰۰	۳
۰/۸۳۷	۱/۴۶۷	۲۴۷	۳
۰/۷۶۶	۲/۰۲	۱۱۵	۳



شکل۸: جوشکاری با لیزر پیوسته ۳ وات: الف: سرعت پایش ۵۰۰µm/s، ب: سرعت پایش ۲۴۷µm/s، ج: سرعت پایش ۱۱۵µm/s

با توجه به دادهای تجربی و تصاویر می‌توان در یافت که از لحاظ کیفیت محل اتصال با لیزر پیوسته بسیار شفاف است. از اینرو این نوع جوشکاری ارجحیت بیشتری نسبت به اتصال با لیزر تپی دارد. به عبارتی محل اتصال جوشکاری بسیار تمیز است. چون میزان انرژی انتقالی توسط لیزر پیوسته بیشتر از لیزر تپی است برای اتصال نیاز بود از سرعتهای بالا استفاده شود. در سرعتهای پایین عمق بسیار افزایش می‌یافت.

نتیجه گیری

در این مقاله تراشه T شکل میکروشاره با استفاده از کندگی و اتصال لیزری ایجاد شد. بهینه شرایط شاریدگی و سرعت ماشین‌کاری برای دستیابی به نسبت ابعادی مناسب جهت انتقال میکروشاره در تراشه بدست آمد. همچنین برای ایجاد تراشه آزمایشگاهی نیاز به اتصال پلیمر دیگر به روی سطح کانال است که از لیزرهای CO_2 متفاوت در دو عملکرد تپی و پیوسته استفاده شد. با توجه به دادهای تجربی و تصاویر میکروسکوپی جوشکاری با لیزر پیوسته از کیفیت بهتری نسبت به تپی دارد.

مراجع

[1] S. C. Jakeway, A. J. de Mello and E. L. Russel, Fresenius' J. Anal.Chem.,2000, 366, 525-539

[2] G. Blankenstein and U. D. Larsen, Biosense. Bioelectron., 1998, 13(3-4), 427-438.

[3] L. Martynova, L. Locasio, M. Gaitan, G. W. Kramer, R. G .Christensen and W. A. MacCrehan, Anal. Chem., 1997, 69, 4783-4789

[4] H.Becker and U.Heim,Sens. Actuators, A, 2000, 83,130-135.

[5] J. Aubin, L Prat, C Xuereb, and C Gourdon, "Effect of microchannel aspect ratio on residence time distributions and the axial dispersion coefficient," *Elsevier*, vol. 48, no. 1, pp. 554-559, August 2008