بیست و چهارمین کنفرانس اپتیک و فوتونیک و دهمین کنفرانس مهندسی و فناوری فوتونیک ایران
۱۰ الی ۱۲ بهمن ۹۶ - دانشگاه شهرکرد
24th Iranian Conference on Optics and Photonics (ICOP 2018) and
9th Iranian Conference on Photonics Engineering and Technology (ICPET 2018)
Jan 30 - Feb 1 , 2018 - Shahrekord University

# بررسی ساختارهای میکروتخلخلی و میکروموجی ایجاد شده بر روی سطح پلیمر PMMA در برهمکنش با لیزر پالسی $CO_2$

میترا وصال[۱]، سحر سهرابی[۱]، محسن منتظرالقائم[۲]، هدیه پازکیان[۲]، محمود ملاباشی[۱]

[۱]دانشکده فیزیک، دانشگاه علم و صنعت ایران

[۲]پژوهشگاه علوم و فنون هسته ای، پژوهشکده فوتونیک و فناوری های کوانتومی

چکیده - تراشه های میکروشاره کاربردهای بسیار مهمی در حوزه‌های مختلف تحقیقاتی مانند سنتز شیمیایی، بیوتکنولوژی و تکنولوژی شاره های اپتیکی دارند. در میان مواد پلیمری متنوعی که برای ساخت ابزارهای میکروشاره مورد استفاده قرار میگیرند، پلیمر پلی‌متیل‌متاآکریلات (PMMA) بدلیل قیمت پایین، شفافیت و زیست سازگاری که به ویژه در کاربردهای بیولوژیکی مهم است، بیشتر مورد استفاده می‌باشد. میکروماشین کاری لیزری یکی از روش های مهم در ساخت میکروکانال در تراشه میکروشاره است. بدنبال میکروماشین کاری لیزری، آرایه ای از میکرو و نانوساختارها در کفِ میکروکانال‌ها ایجاد می‌گردد که شکل و اندازه آن‌ها به پارامترهای تابش بستگی دارد. این ساختارها می‌تواند بر بازده میکروکانال‌ها تاثیر گذارد. در این مقاله، ساختارهای میکروتخلخلی و میکروموجی ایجاد شده بر روی سطح پلیمر PMMA پس از تابش با لیزر پالسی $CO_2$ مورد مطالعه قرار گرفته است. به منظور بررسی مورفولوژی سطح، قبل و بعد از تابش، از میکروسکوپ الکترونی پویشگر (SEM) استفاده گردیده است.

**کلید واژه- پلیمر *PMMA*، لیزر پالسی $CO_2$، ساختار میکروتخلخلی، ساختار میکروموجی، میکروکانال**

# Investigation of The Formation of Microporose and Microwave Structures on the PMMA Polymer Surface Following $CO_2$ Pulsed Laser Irradiation

Mitra Vesal [1], Sahar Sohrabi [1], Mohsen Montazeralghaem[2], Hedieh Pazokian [2], Mahmoud Mollabashi [1]

[1] Physics Department, Iran university of science and technology, Tehran, Iran
[2]Photonics and Quantum Technologies research school, Nuclear Science & Technology Research Institute, Tehran, Iran

Abstract- Microfluidics chips have gained important applications in many areas of the research, such as chemical synthesis, bio and optofluidic technologies. Among the various polymeric materials used for fabrication of the microfluidic devices, Polymethylmethacrylate (PMMA) is mostly used because of its low cost, transparency and biocompatibility which is important, especially for the biological applications. laser micromachining is one of the most important manufacturing methods used for fabrication of the microchannels. Following laser micromachining different micro and nano structures arrays may appear on the bottom of the microchannel depended on the irradiation parameters. Formation of these structures affects the total throughput of the microchannels. In this article, the formation of microporose and microwave structures on the surface of PMMA polymer following pulsed $CO_2$ laser irradiation is studied. Scanning electron microscopy (SEM) was used for the investigation of the surface morphology before and after irradiation.

Keywords: PMMA polymer, pulsed $CO_2$ laser, Microporose structure, Microwave structure, Microchannel



این مقاله در صورتی دارای اعتبار است که در سایت www.opsi.ir قابل دسترسی باشد

[ Downloaded from opsi.ir on 2026-11-06 ]

## ۱- مقدمه

در مبحث ساخت میکروشاره، یکی از موارد توجه، ایجاد ساختارهای میکرو و نانو در سطح کانال‌های ایجاد شده با ماشین‌کاری لیزری است. این ساختارها تاثیر زیادی در بازده میکروکانال دارند. از طرف دیگر این ساختارها تاثیر زیادی در تغییر میزان خورش در اسید برای ایجاد میکروکانال در مواد به ویژه شیشه‌های اصلاح شده با تابش دارند. لیزر پالسی $CO_2$، لیزری متداول و در دسترس در صنعت می‌باشد. از طرفی پلیمر PMMA از جمله پلیمرهای ارزان و مهم برای ایجاد تراشه‌های میکروشاره است. جذب مناسب این پلیمر در طول‌موج مربوط به لیزر $CO_2$ باعث می‌شود که بتوان از میکروماشین‌کاری با لیزر برای ایجاد میکروکانال روی آن استفاده کرد. بدین منظور در این مقاله میکروساختارهای ایجاد شده روی پلیمر PMMA در اثر تابش با لیزر $CO_2$ پالسی و اثر دو پارامتر شاریدگی و تعداد پالس لیزر ( که از جمله عوامل موثر در تعیین مورفولوژی ناحیه تحت تابش می‌باشند[۱و۲])، روی ابعاد و نوع ساختارها و چگونگی ایجاد و نحوه تغییرات آن‌ها مورد بررسی قرار گرفته است.

## ۲- آزمایش

### ۲-۱- مواد

در این آزمایش از پلیمر پلی متیل متاکریلات با نام اختصاری PMMA با ضخامت ۱ سانتی‌متر، استفاده گردیده است.

### ۲-۲- چیدمان آزمایشگاهی

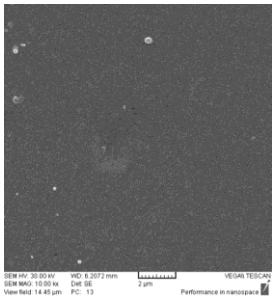
لیزر پالسی $CO_2$ با طول موج ۹۵۵۰ نانومتر، با تخلیه الکتریکی عرضی یا TE با ماکزیمم انرژی هر پالس ۳ ژول و پهنای پالس ۱۰۰ نانوثانیه، برای تابش نمونه‌ها مورد استفاده قرار گرفته است. همچنین به منظور دستیابی به شاریدگی های بسیار بالاتر ازآستانه کندگی پلیمر PMMA(۱۵۰۰ میلی‌ژول بر سانتی‌متر مربع)، که جزء شرایط تابشی مدنظر در این تحقیق بوده است، در چیدمان آزمایشگاهی از عدسی با فاصله کانونی ۵۰ سانتی‌متر (برای شاریدگی های زیر ۱۰۰۰۰ میلی‌ژول بر سانتی‌متر مربع) و ۱۰ سانتی‌متر (برای شاریدگی های بالاتر از ۱۰۰۰۰ میلی‌ژول بر سانتی‌متر مربع)، استفاده شده است. به سبب گوسی بودن شدت پرتو لیزر و به منظور جداسازی قسمت مرکزی پرتو، حفره ای با قطر ۱/۵ سانتی‌متر در چیدمان فوق بکارگرفته شده است. نور خروجی از لیزر پس از عبور از حفره وارد عدسی شده و سپس به نمونه ( که فاصله آن با عدسی، با توجه به میزان شاریدگی لازم در هر مرحله از آزمایش، تنظیم می‌گردد) برخورد می‌کند.

### ۲-۳- ابزار اندازه گیری

به منظور اندازه‌گیری انرژی از دستگاه ژول متر FieldMaster Coherent GS استفاده شد. دستگاه میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM)، برای بررسی تغییرات مورفولوژی و ساختارهای ایجاد شده روی سطح بعد از تابش مورد استفاده قرار گرفت.

## ۳- نتایج حاصله و بحث لازم

در این قسمت، قبل از شروع بررسی سطح و ریزساختارهای سطحی ایجاد شده بر روی نمونه های تابش دیده در شرایط مختلف، تصویر نمونه قبل از تابش، در شکل ۱، که عاری از هرگونه ریزساختار (در ابعاد میکرو و نانومتری) می‌باشد، نمایش داده شده است.



شکل۱: تصویر SEM نمونه PMMA قبل از تابش

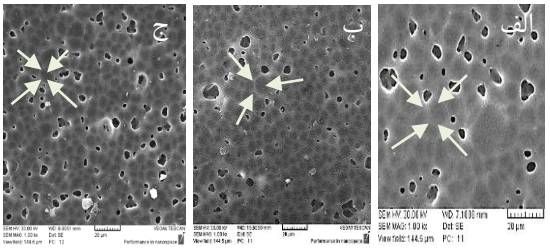
در این تحقیق، شرایط تابشی متفاوتی از نقطه نظر شاریدگی و تعداد پالس تابشی بر روی نمونه اعمال گردیده است. در شاریدگی های بسیار بالاتر از آستانه کندگی پلیمر، شامل شاریدگی های ۴۰۰۰، ۸۰۰۰ و ۱۲۰۰۰ میلی‌ژول بر سانتی‌متر مربع، نمونه تنها تحت تابش تک پالس قرار گرفته و در تعداد پالس های بالاتر شامل ۵۰ و ۱۰۰ پالس، تنها شاریدگی ۲۰۰۰ میلی‌ژول برسانتی‌متر مربع، بررسی شده است. همانطور که در شکل های ۲ و ۳ مشاهده می‌شود، در تمامی شاریدگی های فوق ، تابش در مرکز ناحیه تابشی



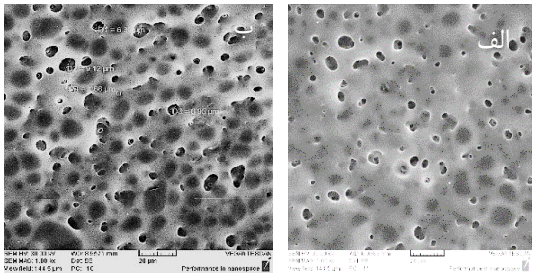
این مقاله در صورتی دارای اعتبار است که در سایت www.opsi.ir قابل دسترسی باشد

[ Downloaded from opsi.ir on 2026-11-06 ]

منجر به ایجاد تخلل‌هایی با ابعاد میکرومتر، که در اینجا آن‌ها را ساختارهای میکروتخلخلی می‌نامیم، شده است.




شکل۲: تصاویر SEM میکروتخلخل های ایجاد شده روی سطح PMMA پس از تابش تک پالس با طول موج ۹۵۵۰ نانومتر با نرخ تکرار ۲ هرتز و در شاریدگی: الف)۴۰۰۰، ب) ۸۰۰۰ و ج)۱۲۰۰۰ میلی‌ژول بر سانتی‌متر مربع



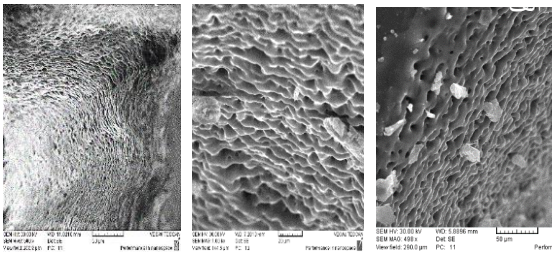

شکل۳: تصاویر SEM میکروتخلخل های ایجاد شده روی سطح PMMA پس از تابش با طول موج ۹۵۵۰ نانومتر در شاریدگی ۲۰۰۰ میلی‌ژول بر سانتی‌متر مربع با نرخ تکرار ۱ هرتز و با تعداد پالس: الف)۵۰ و ب)۱۰۰

در تصاویر شکل ۲ مشاهده می‌شود که در شاریدگی‌های بسیار بالاتر از آستانه کندگی، و با تابش تک پالس، با افزایش شاریدگی، میانگین اندازه تخلخل‌ها همزمان با افزایش تعداد و تراکم آنها، کاهش می‌یابد. ایجاد ناخالصی در پلیمرها حین فرایند ساخت از جمله عواملی‌است که باعث ایجاد ساختارهای مختلف روی سطح آن‌ها در اثر تابش با لیزر می‌شود. این مسئله به دلیل وجود یک شاریدگی آستانه کندگی برای هر ماده با توجه به طول‌موج مورد استفاده در تابش می‌باشد. با فرض وجود ناخالصی در پلیمر افزایش چگالی تخلخل‌ها با افزایش میزان شاریدگی را می‌توان چنین توجیه نمود که افزایش انرژی فرودی بر واحد سطح پلیمر باعث کندگی درصد بیشتری از ناخالصی‌ها می‌شود. ضمن آنکه پراکندگی میکروتخلخل‌ها نیز می‌تواند دلیلی بر وجود ناخالصی در نقاط مختلف و به‌صورت تصادفی باشد. از طرف دیگر دقت در تصاویر SEM تشکیل حوزه‌های میکرومتری با اشکال شبیه به تخلخل‌های ایجاد شده روی سطح در اثر تابش را نشان می‌دهد (مانند ناحیه مشخص شده در شکل۲). ایجاد استرس در پلیمر حین فرایند ساخت از دیگر عوامل مهم در ایجاد ساختار روی سطح است. با این وجود این حوزه‌ها در تصویر SEM نمونه قبل از تابش (شکل ۱) دیده نمی‌شوند. بنابراین به نظر می‌رسد حوزه‌های میکرونی یا در حجم ماده وجود دارند و یا به‌دلیل ایجاد استرس در پلیمر حین فرایند تابش ایجاد شده‌اند. ایجاد سوراخ‌های میکرو در اثر تابش را نیز می‌توان به عدم تحمل استرس در نقاطی از سطح و کندگی انفجاری بعد از ذوب-شدگی نسبت داد. در بررسی نحوه تغییر میکروتخلخل‌ها با توجه به نظریه اول (وجود ناخالصی) بر حسب تعداد پالس (در شاریدگی ثابت و بالاتر از آستانه کندگی)، آنچه قابل بیان است و از تصویر ۳ میتوان بدان دست یافت، این است که افزایش تعداد پالس، موجب رها شدن تدریجی نقاط ناخالصی سطح از قید نواحی اطرافشان، در طی چند مرحله، می‌گردد و در واقع نقاط ناخالصی از سطح که به علت کمتر بودن میزان ناخالصی و بیشتر بودن تقیدشان به نواحی مجاور، در پالس‌های اولیه قادر به جدا شدن از سطح نبوده اند، بعد از تابش هرپالس تدریجاً از این وابستگی‌ها آزاد شده و در نهایت پس از برخورد پالس‌های متوالی، از سطح کنده می‌شوند. به همین علت با افزایش تعداد پالس‌های تابشی، تعداد تخلخل‌ها نیز افزایش می‌یابد. این درحالیست که تعداد ریزحفره‌های کوچکتر، برحسب افزایش تعداد پالس لیزر، سیر نزولی را طی می‌کنند. مجموع این تغییرات موجب افزایش تراکم تخلخل در ناحیه تابش دیده با افزایش تعداد پالس تابشی، می‌گردد. از طرفی طبق نظریه وجود حوزه‌های استرسی نیز افزایش چگالی ساختارها با توجه به افزایش تعداد پالس را می‌توان به آزاد شدن بیشتر حوزه‌های استرسی نسبت داد. همان‌طور که اشاره شد ساختارهای فوق در مرکز ناحیه تابش ایجاد شده‌اند. با بررسی نواحی اطراف مرکز تابش ساختارهای موجی‌شکل مشاهده می‌گردد. شکل ۴ تصویر میکروسکوپ الکترونی از ساختارهای ایجاد شده در اطراف ناحیه تابش داده شده در شاریدگی ۲۰۰۰ میلی‌ژول بر سانتی‌متر مربع( بالاتر از آستانه کندگی) و در تعداد پالس های ۵۰، ۱۰۰ و ۲۰۰ پالس را نشان می‌دهد.



این مقاله در صورتی دارای اعتبار است که در سایت www.opsi.ir قابل دسترسی باشد

[ Downloaded from opsi.ir on 2026-11-06 ]



شکل ۴: تصاویر SEM میکروموج های ایجاد شده روی سطح PMMA پس از تابش با طول موج ۹۵۵۰ نانومتر در شاریدگی ۲۰۰۰ میلی‌ژول بر سانتی‌متر مربع با نرخ شاریدگی ۱ هرتز و با تعداد پالس: الف)۵۰ ، ب)۱۰۰ و ج) ۲۰۰

در این آزمایش ساختارهای میکروموج در لبه ناحیه تابش و نیز ناحیه متاثر از گرما ایجاد شدند. در مبحث ایجاد ساختارهای پریودیک یا موجی شکل، بصورت کلی دو دسته ساختار با ابعاد نانومتری و میکرومتری، مطرح هستند. طبق تحقیقات، دلیل ایجاد دسته اول(موج‌هایی در ابعاد نانومتری)، تداخل نور لیزر با نور پراکنده شده از سطح تحت تابش، است[۳]. این گونه موج‌ها عمود بر قطبش نور فرودی تشکیل می‌گردند و ابعاد آن‌ها با مرتبه طول موج تابشی متناسب است. اما علت ایجاد دسته دوم(میکروموج‌ها)، موج‌های حرارتی می‌باشند. در واقع پس از تابش نور لیزر به نمونه، دمای ناحیه تحت تابش و اطراف آن به شدت بالا رفته و مواد در آن ناحیه به حالت مذاب در می‌آیند[۴]. این موضوع باعث برهم زدن تعادل گرمایی نمونه و در نتیجه ایجاد جریان همرفتی ( به منظور نزدیک شدن مجدد به تعادل گرمایی) می‌شود،که اصطلاحاً به آن، همرفت مارانگونی گفته می‌شود. هم چنین به علت دور شدن بسیار زیاد ماده از تعادل گرمایی در ناحیه تحت تابش ، تنش‌های موجود در نمونه که حین فرآیند ساخت و یا تابش ایجاد گردیده اند، آزاد شده [۵] و این موضوع باعث انتشار و هدایت جریان همرفتی به سمت دیواره ناحیه تابش دیده می‌گردد. در نهایت بعد از قطع شدن تابش، با انجماد مجدد، این میکروموج‌ها روی نمونه ایجاد می‌گردند. همانگونه که در شکل۴ مشاهده می‌شود، در شاریدگی ۲۰۰۰ میلی‌ژول بر سانتی‌متر مربع که بالاتر از آستانه کندگی PMMA می‌باشد، با افزایش تعداد پالس، شاهد کاهش پهنای عرضی میکروموج‌ها و افزایش تراکم و برجستگی آنها بر حسب افزایش تعداد پالس و کندگی لایه‌های پلیمر نیز، هستیم. در واقع به دلیل افزایش امواج تولید شده بر اثر افزایش تعداد پالس و برخورد این امواج به یکدیگر و فشرده شدن آنها در ناحیه کناره حفره، تراکم این ساختارها با افزایش تعداد پالس زیاد شده و این موضوع موجب کاهش پهنای عرضی میکروموج‌ها می‌شود که به علت ثابت بودن حجم ماده مذاب حمل شده توسط یک موج، منجر به افزایش ارتفاع و برجستگی میکروموج‌ها می‌گردد

## ۴- نتیجه گیری

پرتودهی سطح پلیمر PMMA با طول موج ۹۵۵۰ نانومتر لیزر پالسی $CO_2$ منجر به ایجاد ساختارهای میکروتخلخلی در مرکز و ساختارهای میکروموج در اطراف ناحیه تابشی میشود. تعداد و تراکم این ساختارها که در شاریدگی‌های بالاتر از آستانه کندگی پلیمر پدیدار می گردد، با افزایش شاریدگی، افزایش یافته و میانگین اندازه تخلخل‌ها کاهش می‌یابد. این درحالیست که بطور کلی ابعاد این سوراخ‌ها، در ابعاد میکرومتری می‌باشد. رفتار تخلخل‌ها بر حسب تغییر در تعداد پالس نیز همانند رفتار آن‌ها بر حسب تغییرات شاریدگی بوده و با افزایش تعداد پالس، تعداد تخلخل ها افزایش می یابد که این موضوع باعث کاهش میانگین اندازه میکروتخلخل های ایجاد شده بر روی سطح می گردد.

## مراجع


[۱] **پازکیان، هدیه، *برهمکنش لیزر با فیلم پلی اتر سولفون، مکانیسم ها و اثر لیزر روی زیست سازگاری و خون سازگاری آن*، رساله دکتری فیزیک اتمی مولکولی، دانشکده فیزیک، دانشگاه علم و صنعت ایران، ۱۳۹۰.**

**[۲] دادستان، ماهرخ، میرزاده، حمید، شریفی سنجانی، ناصر، *بررسی اثر لیزرهای اکسایمر و کربن دیواکسید بر خواص سطحی پلی اتیلن ترفتالات-۱*، علوم و تکنولوژی پلیمر، سال ۱۲، شماره ۱، ۱۳۷۸.**

**[3] D. Qi, H. Liu, W. Gao, S. Chen, C. Li, H. Lai, *et al.*, "Investigations of morphology and formation mechanism of laser-induced annular/droplet-like structures on SiGe film," *Optics express*, vol. 21, pp. 9923-9930, 2013.**

[4] **H. Niino and A. Yabe, "Excimer laser ablation of polyethersulfone derivatives: periodic morphological micro-modification on ablated surface," *Journal of Photochemistry and Photobiology A: Chemistry*, vol. 65, pp. 303-312, 1992.**

**[5] T. Bahners and E. Schollmeyer, "Morphological changes of the surface structure of polymers due to excimer laser radiation," *Journal of Applied Physics*, vol. 66, pp. 1884-1886, 1989.**




این مقاله در صورتی دارای اعتبار است که در سایت www.opsi.ir قابل دسترسی باشد

[ Downloaded from opsi.ir on 2026-11-06 ]