تاثیر پارامترهای تابش در میکروماشینکاری PMMA با لیزر Nd:YAG

هدیه پازکیان [۱]، محمد جواد سبحانی [۲]، حسین امیری [۱]، محمود ملاباشی [۲]

چکیده

در این مقاله کندگی لیزری مستقیم برای ایجاد میکروکانال‌های با قطر چند صد میکرون برروی پلیمر PMMA با استفاده از هارمونیک دوم لیزر نانوثانیه Nd:YAG (λ =۵۳۲nm)، استفاده شده است. اثر شاریدگی، تعداد تپ، نرخ تکرار و نیز نسبت ابعادی مورد بررسی قرار گرفته است. بیشینه نسبت ابعادی به‌دست آمده برای سوراخ‌های ایجاد شده برابر ۲۹ بوده است.

واژه‌های کلیدی: میکروکانال ، میکرو ماشین کاری، لیزر Nd:YAG. ، نسبت ابعادی

۱- مقدمه

امروزه، تراشه‌های میکروشاره برای کاربردهای گوناگونی به خصوص کاربردهای پزشکی، ساخته و روانه بازار می-شوند. در دو دهه گذشته تکنولوژی ساخت تجهیزات میکروشاره‌ها به ابزاری پیشرفته در علوم و مهندسی برای سنتزهای شیمیایی تبدیل شده است. از زمان ابداع سنتز شیمیایی، تنها روش متعارف در راکتورهای ساکن با چرخش و یا تکان دادن به عنوان تنها عامل ترکیب استفاده می‌شد. امروزه میکروراکتورها با قابلیت-های بالا در ترکیب و گرمادهی در مقابله با روشهای متعارف هستند که باعث بهبود تولید و بازده شده‌اند. اندازه کوچک، ایمن بودن و کنترل آسان واکنش‌های خطرناک و واکنش‌های سمی از قابلیت‌های میکروراکتور است.

در میان روش‌های مختلفی که برای ایجاد میکرو ساختارها در مواد مختلف و به ویژه پلیمرها مورد استفاده قرار می‌گیرد، کندگی لیزری به دلایل مختلف از جمله دقت و سرعت و نیز عدم نیاز به اتاق تمیز، لایه‌نشانی و مواد شیمیایی یکی از بهترین روشهایی است که مورد استفاده قرار می‌گیرد[۱]. نور لیزر در برهمکنش با نمونه تحت شرایط مختلف، منجر به تغییرات سطحی و حجمی و یا کندگی در نمونه می‌شود.

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

از طرف دیگر تنوع زیاد و قیمت مناسب پلیمرها نیز سبب گردیده که این مواد بستر مناسبی برای ایجاد این میکروساختارها باشند. یکی از اهداف مهم در ایجاد و کنترل میکروساختارها در دنیای امروز دستیابی به تراشه‌ای است که عموماً برای ترکیب و جداسازی مواد استفاده می‌شوند که به این تراشه‌ها اصطلاحاً lab on a chip گفته می‌شود. آنالیز مواد در کمترین زمان و بیشترین دقت از ویژگی‌های مهم این تراشه‌هاست. استفاده از این نوع تراشه‌ها باعث کاهش مواد مصرفی، افزایش بازدهی ترکیب و حذف روش‌های مازاد (مانند روش کروماتوگرافی) برای دستیابی به ترکیب بهینه شده است[۲]. به عنوان مثال از جمله کاربردهای مهم این تراشه‌ها در نشان‌دارسازی زیست مولکول‌ها با استفاده از رادیونوکلئیدها در پزشکی هسته‌ای است که استفاده از آن‌ها باعث کنترل‌پذیری واکنش‌ها در میکروراکتورها شده است[۳].

طیف جذبی پلیمرها در ناحیه فرابنفش نشان می‌دهد که اغلب آن‌ها در این ناحیه جذب بالایی دارند و بنابراین لیزرهای اگزایمر کاندیداهای مناسبی برای کندگی لیزری پلیمرها هستند. از طرف دیگر هزینه بالای این لیزرها، استفاده از لیزرهای موجود در ناحیه مرئی و مادون قرمز در نرخ‌های تکرار بالا، نیز دستیابی به این هدف را تا حد قابل قبولی امکان‌پذیر می‌سازد. به عنوان مثال لیزر Nd:YAG به دلیل کیفیت خوب پرتو از جمله لیزرهای مهم در میکروماشین‌کاری است.

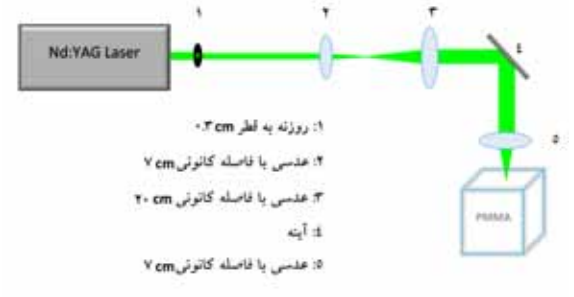
در سوراخکاری لیزری، برای بیشینه عمقی که می‌توان ایجاد کرد، مقدار مشخصی وجود دارد. این مسئله به دلیل کاهش نفوذ پرتو به داخل نمونه در اثر هندسه پرتو و نیز توده ذرات ایجاد شده (توده پلاسمایی) در اثر کندگی است که مانع برهم‌کنش کافی پرتو با سطح کنده نشده می‌شود. از طرف دیگر پارامترهای تابش از جمله شاریدگی، طول موج، تعداد تپ، نرخ تکرار و پهنای تپ به میزان زیادی روی بیشینه عمق تاثیر می‌گذارند. به همین دلیل در این مقاله اثر تعداد تپ، شاریدگی و نرخ تکرار روی ابعاد میکروسوراخ (میکروکانال) ایجاد شده با لیزر مورد بررسی قرار می‌گیرد.

پلیمر پلی‌متیل‌متااکریلیت (PMMA) با مونومرهای $C_5O_2H_8$ داری عبوردهی تقریباً ۹۲ درصد در طیف مرئی (۵۳۲nm) است. ویژگی‌های بارز این پلیمر استحکام بالا و مقاومت در برابر عوامل جوی است. همچنین این پلیمر غیرمتخلخل است و آب را جذب نمی‌کند. از این روی جذب بیوملکول‌ها از طریق پلیمر بسیار کم و آلودگی کمتری به وجود می‌آید[۴]. این ویژگی‌ها سبب شده که پلیمر PMMA در کاربردهای پزشکی بسیار مورد توجه قرار گیرد.

۲- روش انجام آزمایش

منبع نوری در این آزمایش، هارمونیک دوم لیزر Nd:YAG با سوئیچ Q و طول موج ۵۳۲ nm، پهنای تپ تقریبی ۷ ns می‌باشد. لیزر به صورت سامانه نوسانگر- تقویت‌کننده عمل می‌کند. شکل۱ چیدمان آزمایشگاهی را نشان می‌دهد. از آنجا که توزیع شدت لیزر به صورت گاوسی است، روزنه‌ای به قطر ۰,۳cm مقابل نور لیزر قرارداده شده تا قسمت مرکزی باریکه با شدت تقریباً یکنواخت انتخاب شود. پرتو پس از عبور از عدسی اول (شماره ۲) با فاصله کانونی ۷ cm، وارد

عدسی دوم (شماره۳) با فاصله کانونی ۲۰ cm شده و سپس توسط آینه با زاویه ۴۵ درجه و عدسی سوم (شماره ۵) با فاصله کانونی ۷ cm روی نمونه متمرکز می‌شود. انرژی در هر مرحله بعد از عدسی سوم با استفاده از ژول‌متر اندازه‌گیری می‌شود. مساحت لکه روی نمونه و تقریباً در محل کانون به طور تجربی تقریباً برابر با $۷۹\times۱۰^{-۶}cm^۲$ اندازه‌گیری شده است. نمونه در تعداد تپ‌های مختلف (۰-۶۰۰۰ تپ) و شاریدگی‌های $mJ/cm^۲$ ۷۶۰، ۸۹۰ و ۱۰۲۰ تابش‌دهی شده و سپس کانال‌های ایجاد شده با استفاده از میکروسکوپ دیجیتال با حسگر تصویر Color CMOS و نسبت بزرگنمایی ۵۰ x -۱۰۰۰ x مورد بررسی قرار گرفته‌اند.

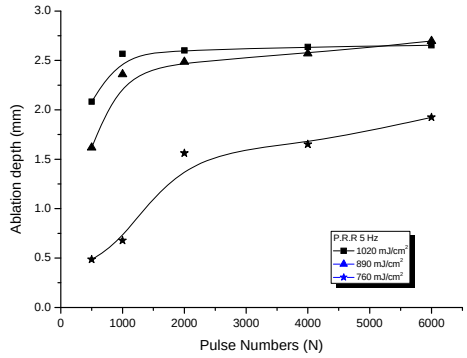


شکل۱: چیدمان آزمایش

۳- نتایج و بحث

۳-۱- تاثیر تعداد تپ و شاریدگی بر عمق کندگی

نمودارهای عمق کندگی بر حسب تعداد تپ و در شاریدگی‌های متفاوت در شکل ۲ نشان داده شده‌است. همان طور که در نمودار مشخص است، در تمام شاریدگی‌ها در ابتدا و با افزایش تعداد تپ، عمق کندگی افزایش می‌یابد و بعد از تعداد مشخصی تپ مقدار آن تقریبا ثابت مانده و تغییرات ناچیز است. این مسئله با افزایش شاریدگی محسوس‌تر بوده و تعداد تپی که در آن این پدیده اتفاق می‌افتد با افزایش شاریدگی کاهش می‌یابد؛ به طوری که تعداد تقریبی آن در شاریدگی‌های $mJ/cm^۲$ ۷۶۰، ۸۹۰ و ۱۰۲۰ به ترتیب ۲۰۰۰، ۱۲۰۰ و ۱۰۰۰ تپ است. بنابراین با توجه به میزان شاریدگی لازم است که از تعداد تپ‌های کمتری برای ایجاد میکروکانال استفاده گردد. همچنین نمودار نشان می‌دهد که افزایش انرژی تغییرات چندانی در طول کانال (عمق کندگی) ایجاد نمی کند، چرا که انتهای کانال از فاصله کانونی فاصله گرفته و شاریدگی در عمق بیشتر، کاهش می‌یابد.



شکل ۲: نمودار عمق کندگی بر حسب تعداد تپ در شاریدگی‌های mJ/cm^2 ۷۶۰، ۸۹۰ و ۱۰۲۰ تکرار 5Hz

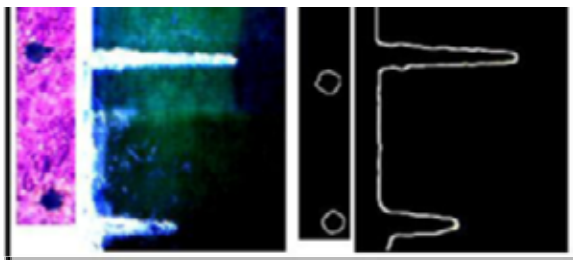
بیشینه عمقی که می‌توان با این شاریدگی‌ها به آن دست یافت درجدول ۱ ارائه شده است.

جدول ۱: بیشینه عمق سوراخ در شاریدگی و تعداد تپ مشخص

شاریدگی (mJ/cm^2)	۷۶۰	۸۹۰	۱۰۲۰
تعداد تپ برای کندگی بیشینه	۲۰۰۰	۱۲۰۰	۱۰۰۰
بیشینه عمق کندگی(mm)	۱/۹۳	۲/۶۵	۲/۷۰

همان‌طور که در جدول مشخص است، با استفاده از شاریدگی میانی ۸۹۰ mJ/cm^2 و تعداد ۱۲۰۰ تپ می‌توان به نتیجه بهینه دست یافت. چراکه در شاریدگی‌های کمتر با تعداد تپ بیشتر بیشینه عمق کندگی حدود ۱۰۰ µm کمتر است.

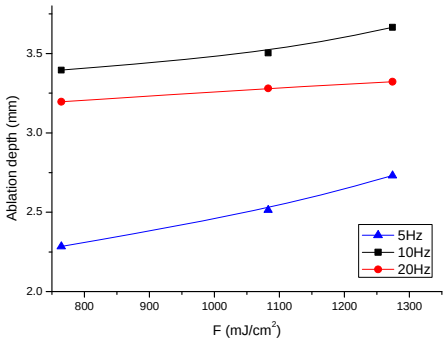
شکل ۳ تصویر نوعی از سوراخهای ایجاد شده با ۵۰۰ و ۱۰۰۰ تپ را در شاریدگی ۸۹۰ mJ/cm^2 که توسط میکروسکوپ نوری گرفته شده را نشان می‌دهد.



شکل ۳: تصویر میکروسکوپ نوری از سوراخ‌های ایجاد شده با تعداد ۵۰۰ و ۱۰۰۰ تپ و در شاریدگی ۸۹۰ mJ/cm^2

۳-۲ تاثیر نرخ تکرار بر عمق کندگی

برای تعیین دقیق رفتار عمق کندگی بر حسب تغییرات شاریدگی و نیز نرخ تکرار، نمودار عمق کندگی بر حسب شاریدگی در نرخ تکرار ۵ و ۱۰ و ۲۰ هرتز در شکل ۴ نمایش داده شده است.



شکل ۴: نمودار عمق کندگی بر حسب شاریدگی در لیزر با فرکانس Hz ۵ و ۱۰ و ۲۰

همانطور که در این نمودار مشخص است طول کانال‌ها، کم و بیش رفتار خطی نسبت به تغییرات شاریدگی دارند. همانطور که در شکل مشخص است، بیشترین طول کندگی نزدیک به ۴ میلیمتر است. همچنین با افزایش شاریدگی تغییرات چندانی در طول کندگی مشاهده نمی کنیم زیرا در شاریدگی‌های بالا و به دلیل دور شدن از نقطه کانونی این روند کاهش یافته و به مقدار ثابتی می‌رسد.

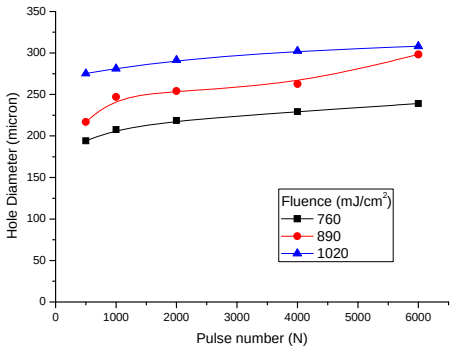
از طرف دیگر یکی از پارامترهای مهم در بیشینه عمق قابل دستیابی در سوراخ‌کاری لیزری نرخ تکرار تپ است. این مسئله بویژه در موادی که دارای جذب کم در طول‌موج مورد استفاده هستند مهم می‌باشد. پدیده انباشتگی گرما در اثر افزایش نرخ تکرار باعث افزایش ضریب جذب موثر ماده در طول‌موج مورد نظر شده و بنابراین نرخ کندگی افزایش می‌یابد. این مسئله به خوبی در نمودار شکل ۴ نمایان است. همان‌طور که مشخص است مقدار تقریبی بیشینه عمق قابل دستیابی با افزایش دو برابری نرخ تکرار برای شاریدگی‌های ۷۶۰ mJ/cm^2، ۸۹۰ و ۱۰۲۰ به ترتیب ۲/۷۵، ۳/۵۷

و ۳/۹۲ mm است. مقایسه این نتایج با جدول ۱ نشان می‌دهد که افزایش نرخ تکرار در کنار افزایش شاریدگی می‌تواند باعث افزایش محسوس در عمق شود. این مسئله به دلیل ایجاد توده ذرات و ناکافی بودن انرژی پرتو برای عبور از توده ذرات و ایجاد کندگی در شاریدگی‌های کمتر است.

اما این افزایش نرخ تکرار تا کجا می‌تواند باعث افزایش عمق سوراخ شود؟ همان‌طور که از نمودار مشخص است، در نرخ تکرار ۲۰ Hz، هرچند افزایش شاریدگی باعث افزایش عمق کندگی می‌شود اما مقدار بیشینه کندگی در هر شاریدگی به طور محسوسی کمتر از میزان آن در شاریدگی‌های متناظر در نرخ تکرار ۱۰Hz است. این مسئله بیانگر یک رابطه بهینه بین نرخ تکرار، تعداد تپ و شاریدگی برای ایجاد بیشینه عمق کندگی با این لیزر است.

۳-۳ بررسی نسبت ابعادی سوراخ‌های ایجاد شده

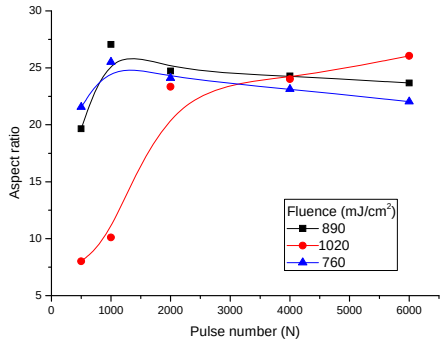
لازم به ذکر است که یکی از پارامترهای مهم برای بررسی سوراخ ایجاد شده توسط لیزر نسبت ابعادی است. این مسئله تاثیر زیادی در حرکت سیال داخل میکروکانال و در نتیجه کارایی آن دارد. نسبت ابعادی به عنوان عمق بر قطر سوراخ تعریف می‌شود. از آنجایی که اندازه قطر سوراخ تحت تاثیر پارامترهای تابشی مثل شاریدگی و نرخ تکرار قرار می‌گیرد بررسی تغییرات قطر برای دستیابی به ابعاد بهینه برای سوراخ ضروری است. شکل ۵ به طور نمونه نمودار قطر سوراخ‌های ایجاد شده را برحسب تعداد تپ و در شاریدگی‌های مختلف و نرخ تکرار ۱۰Hz نشان می‌دهد.



شکل ۵: نمودار قطر سوراخ حفاری شده بر حسب تعداد تپ در شاریدگی‌های ۷۶۰، ۸۹۰ و ۱۰۲۰ mJ/cm^2 تکرار ۱۰ Hz

نمودار نشان می‌دهد قطر سوراخ با افزایش شاریدگی افزایش می‌یابد. از طرف دیگر صرف نظر از میزان شاریدگی، مقدار قطر سوراخ در تعداد ۱۰۰۰ تپ ثابت مانده و با افزایش تعداد تپ تغییر نمی‌کند.

بررسی نسبت قطر و عمق سوراخ در نرخ تکرار Hz ۵ و ۱۰ نشان می‌دهد که بیشینه نسبت ابعادی قابل دستیابی با شرایط فوق ۲۹ می‌باشد که در شاریدگی ۱۰۲۰ mJ/cm^2 و نرخ تکرار ۱۰Hz به دست می‌آید (شکل ۶).



شکل ۶: نمودار نسبت ابعادی بر حسب تعداد تپ در شاریدگی‌های ۷۶۰، ۸۹۰ و ۱۰۲۰ mJ/cm^2 تکرار ۱۰ Hz

نتیجه گیری

به دلیل اهمیت ایجاد میکروکانال در پلیمرها برای ساخت تراشه‌های میکرو برای کاربردهای پزشکی و صنعتی در این مقاله سوراخهای ایجاد شده با ابعاد چند صد میکرون در پلیمر PMMA و با استفاده از هارمونیک دوم لیزر Nd:YAG مورد بررسی قرار گرفت. برای دستیابی به بهینه شرایط ماشینکاری لیزری در آزمایش تاثیر پارامترهایی تابش شامل تعداد تپ، شاریدگی و نرخ تکرار بر روی ابعاد میکروکانال در پلیمر PMMA بررسی شده است.

بهینه طول میکروکانال در حالت عملکرد لیزر با فرکانس۱۰HZ و در شاریدگی $۸۹۰mJ/cm^{۲}$ و تعداد تپ ۱۲۰۰ به دست آمد. همچنین اثر پارامترهای تابش‌دهی روی ابعاد سوراخ مورد بررسی قرار گرفت که بیشینه نسبت ابعادی ۲۹ برای کندگی‌ها به دست آمده است.

مراجع

[1] Becker, Holger, and Claudia Gärtner; "Polymer microfabrication technologies for microfluidic systems";*Analytical and bioanalytical chemistry* **390**, No. 1 (2008) 89-111.

[2] Whitesides, George M;"The origins and the future of microfluidics" *Nature* **442**, No. 7101 (2006) 368-373.

[3] Zeng, Dexing, Amit V. Desai, David Ranganathan, Tobias D. Wheeler, Paul JA Kenis, and David E. Reichert;"Microfluidic radiolabeling of biomolecules with PET radiometals*";Nuclear medicine and biology* **40**, No. 1 (2013) 42-51.

[4] Reif, Juergen;"Basic physics of femtosecond laser ablation";*Laser-Surface Interactions for New Materials Production*. Springer Berlin Heidelberg. (2010) 19-41.