Journal of Iranian Association of Electrical and Electronics Engineers
Vol. 23 No. 2, 2026
DOI: 10.66224/jiaeee.23.2.50

Nanolithography Using the Femtosecond Direct Laser Writing Method

Mona Soraya[1], Gholam-Mohammad Parsanasab[2], Leila Hajshahvaladi[3]

[1] PhD, Integrated Photonics Laboratory (IPL), Faculty of Electrical Engineering, Shahid Beheshti University, Tehran, Iran
[2] PhD, Integrated Photonics Laboratory (IPL), Faculty of Electrical Engineering, Shahid Beheshti University, Tehran, Iran
gm-parsanasab@sbu.ac.ir
[3] PhD, Integrated Photonics Laboratory (IPL), Faculty of Electrical Engineering, Shahid Beheshti University, Tehran, Iran

Abstract:
This research has examined the process of nanolithography using the femtosecond laser direct writing method. Nanolithography is an advanced technology that enables the fabrication of microscopic and nanoscale structures. This process, in addition to the ability to produce very small and fast electronic devices such as micro and nanochips, is also used in the fabrication of flexible and powerful nanophotonic components for integrated photonic circuits. Using this technique, the ability to fabricate waveguides and micro-rings with very smooth surfaces has been investigated, which leads to a significant reduction in optical loss during wave propagation in these structures. This technology can be very useful in improving the efficiency and performance of various devices.

Keywords: Integrated photonic circuits, Nanolithography, Femtosecond laser direct writing method, Optical waveguides, Microring, Optical loss, Two photon Absorption

Article Type: Research

Received: 05. 11. 2024

Revised: 24. 07. 2025

Accepted: 04. 06. 2026

Corresponding author: Mona Soraya

Corresponding author's address: Integrated Photonics Laboratory (IPL), Faculty of Electrical Engineering, Shahid Beheshti University,Tehran, Iran

Copyright © 2026 The Authors. Published by Iranian Association of Electrical and Electronics Engineers.
This work is licensed under a Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International license (https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/). Non-commercial uses of the work are permitted, provided the original work is properly cited.

1. Motivation of the work

Nanolithography plays a critical role in the fabrication of advanced electronic, photonic, and microelectromechanical devices. Conventional lithographic techniques such as electron-beam lithography, ion-beam lithography, and standard photolithography often suffer from limitations including high fabrication cost, complex processing requirements, limited three-dimensional patterning capability, and constraints imposed by the optical diffraction limit. These challenges become increasingly significant as the demand for nanoscale and highly integrated photonic devices continues to grow.

Femtosecond laser direct writing based on two-photon absorption has emerged as a promising alternative for high-resolution micro- and nanofabrication. The technique enables localized polymerization within a confined focal volume, allowing the fabrication of structures with dimensions below the diffraction limit while maintaining high flexibility in design. Furthermore, the method provides the capability of true three-dimensional fabrication without requiring masks or vacuum environments.

The motivation of this work is to investigate the principles, advantages, and practical implementation of femtosecond laser direct writing for nanolithography applications. Particular attention is given to its ability to fabricate high-quality optical waveguides and microring structures with reduced surface roughness and lower optical losses, which are essential requirements for modern integrated photonic circuits.

2. Contributions

This work presents a comprehensive investigation of femtosecond laser direct writing for nanolithography and highlights its advantages compared with conventional fabrication techniques. A detailed comparison is provided between femtosecond laser lithography and alternative methods in terms of achievable feature size, fabrication flexibility, three-dimensional patterning capability, system complexity, and substrate compatibility.

The study explains the physical mechanism of two-photon absorption and demonstrates how this nonlinear optical phenomenon enables sub-diffraction-limited fabrication. An optimized experimental setup developed in the Integrated Photonics Laboratory is described, including laser power control, spatial filtering, automatic focusing, and high-precision motion control.

The work further demonstrates the fabrication of nanoscale structures, optical waveguides, microrings, and three-dimensional microstructures using femtosecond laser exposure. Experimental observations confirm the capability of producing structures with dimensions around 200 nm and significantly improved surface quality compared with conventional UV laser lithography. These results illustrate the potential of the proposed approach for integrated photonics, nanophotonics, and MEMS/NEMS applications.

3. Procedures

The experimental study was carried out using a femtosecond laser direct writing system based on two-photon polymerization. The setup consisted of a femtosecond laser source with a pulse duration of approximately 100 fs and a repetition rate of 80 MHz. The laser wavelength was adjusted near 800 nm to match the two-photon absorption requirements of the SU-8 photoresist. The optical system included beam steering mirrors, adjustable polarizers for power control, a beam splitter for real-time power monitoring, a spatial filter for beam quality enhancement, and a microscope objective for tight focusing. A high-precision Newport motion stage with nanometer-scale positioning capability was employed to move the sample according to predefined writing paths.

The fabrication process relied on localized polymerization within the focal volume generated by two-photon absorption. Different laser powers and exposure conditions were investigated to evaluate their effects on lithographic resolution. Various structures, including nanoscale patterns, optical waveguides, coupled microrings, and three-dimensional microstructures, were fabricated and examined. The resulting structures were analyzed with respect to fabrication quality, dimensional accuracy, surface smoothness, and overall suitability for photonic device applications.

4. Findings

The results demonstrate that femtosecond laser direct writing is a highly effective method for nanolithography and advanced microfabrication. Due to the nonlinear nature of two-photon absorption, polymerization was confined to a very small focal volume, enabling fabrication beyond the diffraction limit of conventional optical lithography.

Experimental structures with characteristic dimensions of approximately 200 nm were successfully fabricated. The method also enabled the realization of high-quality optical waveguides and microring resonators with smooth sidewalls and reduced structural imperfections. Compared with structures fabricated using conventional UV laser exposure, the femtosecond-laser-fabricated devices exhibited significantly improved geometric accuracy and cleaner gaps between adjacent features.

In addition, the technique demonstrated excellent capability for creating complex three-dimensional microstructures. The combination of high spatial resolution, maskless fabrication, and compatibility with various materials makes the approach attractive for integrated photonics, optical communication systems, microelectromechanical devices, and nanoscale functional components.

5. Conclusion

This study reviewed the principles and implementation of femtosecond laser direct writing for nanolithography applications. By utilizing two-photon absorption, the

technique overcomes many limitations of conventional lithographic methods and enables high-resolution, maskless, and three-dimensional fabrication.

The experimental results confirmed the successful fabrication of nanoscale structures, optical waveguides, microrings, and complex three-dimensional architectures with high precision and excellent surface quality. Structures with dimensions around 200 nm were achieved, demonstrating the capability of the method to operate below the diffraction limit.

The combination of flexibility, fabrication accuracy, reduced optical losses, and three-dimensional patterning capability makes femtosecond laser lithography a powerful platform for future developments in integrated photonics, nanophotonics, and advanced microsystems technologies.

نشریه مهندسی برق و الکترونیک ایران

نشریه مهندسی برق و الکترونیک ایران، سال بیست و سوم، شماره دوم، تابستان ۱۴۰۵، صفحات ۵۰-۵۸

DOI: 10.61882/jiaeee.23.2.50

نانو لیتوگرافی با استفاده از روش نوشتن مستقیم لیزر فمتوثانیه

مونا ثریا[۱]، غلام محمد پارسانسب[۲]، لیلا حاج شاه ولدی[۳]

۱- دکتری- آزمایشگاه مدارهای مجتمع نوری، دانشکده مهندسی برق، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران

۲- دکتری- آزمایشگاه مدارهای مجتمع نوری، دانشکده مهندسی برق، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران

gm-parsanasab@sbu.ac.ir

۳- دکتری- آزمایشگاه مدارهای مجتمع نوری، دانشکده مهندسی برق، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران

چکیده: این پژوهش به بررسی فرآیند نانولیتوگرافی با استفاده از روش نوشتن مستقیم لیزر فمتوثانیه پرداخته است. نانولیتوگرافی، یک فن‌آوری پیشرفته است که امکان ساخت ساختارهای میکروسکوپی و نانومتری را فراهم می‌کند. این فرآیند، علاوه بر توانایی در ساخت ادوات الکترونیکی بسیار کوچک و سریع همچون میکرو و نانوچیپ‌ها، در ساخت عناصر نانونوری انعطاف‌پذیر و قدرتمند برای مدارهای مجتمع نوری نیز کاربرد دارد. با استفاده از این تکنیک، توانایی ساخت موجبرها و میکروررینگ‌هایی با سطوح بسیار هموار بررسی شده است که منجر به کاهش چشمگیر اتلاف نوری هنگام پیشروی موج در این ساختارها می‌گردد. این فناوری می‌تواند در افزایش بهره‌وری و عملکرد ادوات بسیار مفید واقع شود.

کلمات کلیدی: مدارهای مجتمع نوری، نانولیتوگرافی، روش نوشتن مستقیم لیزر فمتوثانیه، موجبرهای نوری، میکروررینگ، اتلاف نوری، جذب دو فوتونی

نوع پژوهش: پژوهشی

دریافت: ۱۴۰۳/۸/۱۵

بازنگری: ۱۴۰۴/۰۵/۰۲

پذیرش: ۱۴۰۵/۳/۱۴

نام نویسنده‌ی مسئول: دکتر غلام محمد پارسانسب

نشانی نویسنده‌ی مسئول: آزمایشگاه مدارهای مجتمع نوری، دانشکده مهندسی برق، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران

حق انتشار این مستند، متعلق به نویسندگان آن است. ۱۴۰۵ ©. ناشر این مقاله، انجمن مهندسین برق و الکترونیک ایران است.

این مقاله تحت گواهی زیر منتشرشده و هر نوع استفاده غیرتجاری از آن مشروط بر استناد صحیح به مقاله و با رعایت شرایط مندرج در آدرس زیر مجاز است.

Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International license
(https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/)

۱- مقدمه

ساختارهای میکرومتری و نانومتری همواره نقش مهمی در زمینه‌های علمی مختلف ایفا می‌کنند. لیتوگرافی یکی از رایج‌ترین روش‌های تولید این گونه ساختارها است که شامل مجموعه مراحل عملی برای انتقال یک طرح بر روی یک بستر زیرلایه می‌باشد. از جمله فرآیندهای متداول لیتوگرافی می‌توان به لیتوگرافی با باریکه الکترون و لیتوگرافی با باریکه یون اشاره کرد. در این روش‌ها، اسکن یک پرتوی متمرکز از الکترون‌ها یا یون‌ها، طرح را روی یک لایه حساس به الکترون یا یون منتقل می‌کند [۱]. لیتوگرافی پروب روبشی و نانوحکاکی نیز دو روش مبتنی بر استفاده از خواص فیزیکی و شیمیایی ماده هستند که با کمک نیروی مکانیکی، تغییر شکل مستقیم ایجاد می‌کنند [۲و۳]. یکی دیگر از روش‌های رایج، فوتولیتوگرافی یا لیتوگرافی نوری است که بر اساس تابش پرتوهای نوری با طول موج‌های مختلف روی لایه حساس به نور، طرح مورد نظر را منتقل می‌کند. این فرآیند به دو شکل انجام می‌شود: انتقال طرح به کمک منبع ثابت و ماسک، یا استفاده از باریکه متمرکز نور برای نوشتن مستقیم طرح روی لایه که به روش لیتوگرافی نوشتن مستقیم لیزری معروف است [۳].

لیتوگرافی به روش نوشتن مستقیم لیزری دارای مزایایی نسبت به سایر روش‌ها است که باعث شده است در جهان به‌طور گسترده مورد استفاده قرار گیرد. از جمله این مزایا می‌توان به سادگی استفاده و نگهداری تجهیزات موردنیاز، امکان ساخت نمونه‌های دست‌ساز و آزمایشگاهی با عملکرد قابل‌قبول، قابلیت برپایی سیستم‌ها با هزینه مناسب، امکان استفاده از طول‌موج‌های مختلف به‌منظور بهره‌مندی از طیف گسترده انواع فوتورزیست‌ها، عدم نیاز به محیط خلأ بالا و قابلیت نوشتن مستقیم طرح با استفاده از لیزر بر روی مواد حساس به نور اشاره کرد [۴ ، ۵].

با وجود این مزایا، سیستم‌های نوشتن مستقیم با لیزر محدودیت‌هایی نیز دارند. برای مثال، به علت محدودیت ناشی از پدیده پراش نور، کوچک‌ترین ابعاد قابل دستیابی در لیتوگرافی با این روش حدود یک میکرومتر است [۲]. توضیح آنکه هرچند از نظر تئوری حد پراش نور برابر با نصف طول‌موج است (برای مثال، در طول‌موج ۴۰۰ نانومتر این مقدار حدود ۲۰۰ نانومتر خواهد بود)، اما به‌دلیل اثرات پراکندگی فوتون‌ها، در عمل کوچک‌ترین ابعاد قابل لیتوگرافی حدود ۵ تا ۱۰ برابر بزرگ‌تر می‌شود. همچنین، استفاده از لیزرهایی با طول‌موج بسیار کوتاه از نظر تأمین منبع و اجزای اپتیکی دشوار است. علاوه بر این، انجام لیتوگرافی سه‌بعدی با استفاده از لیزرهای معمولی امکان‌پذیر نیست، زیرا نور متمرکز در تمام عمق نفوذ بر فوتورزیست تأثیر می‌گذارد و محدود کردن این اثر تنها به ناحیه فوکوس بسیار مشکل است. در نهایت، در ساخت ادوات نوری مانند موجبرها، به‌دلیل پراکندگی فوتون‌ها، دیواره‌ها دارای ناهمواری سطحی می‌شوند که این امر باعث افزایش تلفات عملکردی می‌گردد [۶].

به‌کارگیری لیزر فمتوثانیه برای لیتوگرافی می‌تواند این محدودیت‌ها را برطرف کرده و مزایای قابل‌توجهی فراهم آورد، از جمله:

ایجاد ساختارهای زیر حد پراش: کوچک‌ترین ابعاد قابل تولید با روش‌های لیتوگرافی نوری معمولی بیش از یک میکرومتر است، زیرا ناحیه کانونی تمام سیستم‌های نوری به حد پراش محدود می‌شود. در نتیجه، برای ایجاد ساختارهای ظریف‌تر، معمولاً از لیتوگرافی باریکه الکترونی (EBL) استفاده می‌شود. با این حال، استفاده از لیزر فمتوثانیه و بهره‌گیری از جذب دو فوتونی امکان ایجاد ساختارهایی با ابعاد چندصد نانومتر را به‌سادگی فراهم می‌کند [۷، ۸].

کاهش هزینه و پیچیدگی: لیتوگرافی باریکه الکترونی نیازمند شرایط خلأ بالا و فوتورزیست‌های خاص با هزینه زیاد است، در حالی که لیتوگرافی نوری دو فوتونی را می‌توان با سامانه‌های فوتونیکی ساده و حتی دست‌ساز پیاده‌سازی کرد.

قابلیت لیتوگرافی سه‌بعدی: در روش‌های معمول، حرکت پرتو روی نمونه تنها در دو بعد امکان‌پذیر است، اما در لیتوگرافی دو فوتونی به دلیل آنکه فرکانس نور تابشی در ناحیه جذب فوتورزیست قرار ندارد، فرایند پلیمریزاسیون فقط در یک حجم بیضوی کوچک در محل کانون رخ می‌دهد. با کنترل موقعیت کانون در راستای عمق، امکان ساخت ساختارهای پیچیده سه‌بعدی فراهم می‌شود [۸، ۹].

بهبود کیفیت ساختارها: در روش‌های پیشین، پراکندگی الکترون‌ها یا فوتون‌ها می‌تواند موجب پلیمریزاسیون ناخواسته در اطراف دیواره‌های طرح شود. اما در لیتوگرافی با لیزر فمتوثانیه که از تابش فروسرخ (IR) استفاده می‌کند، فوتون‌های کم‌انرژی پراکنده‌شده فاقد اثر فوتوشیمیایی در محیط اطراف هستند و این امر موجب صاف‌تر شدن دیواره‌ها و کاهش تلفات اپتیکی می‌شود [۹]. همچنین، این ویژگی از آسیب به مواد حساس به نور مجاور ناحیه لیتوگرافی جلوگیری می‌کند.

امکان پردازش مستقیم فلزات: این روش قابلیت کندن مستقیم بر روی سطوح فلزی مانند آلومینیوم را نیز داراست [۱۰].

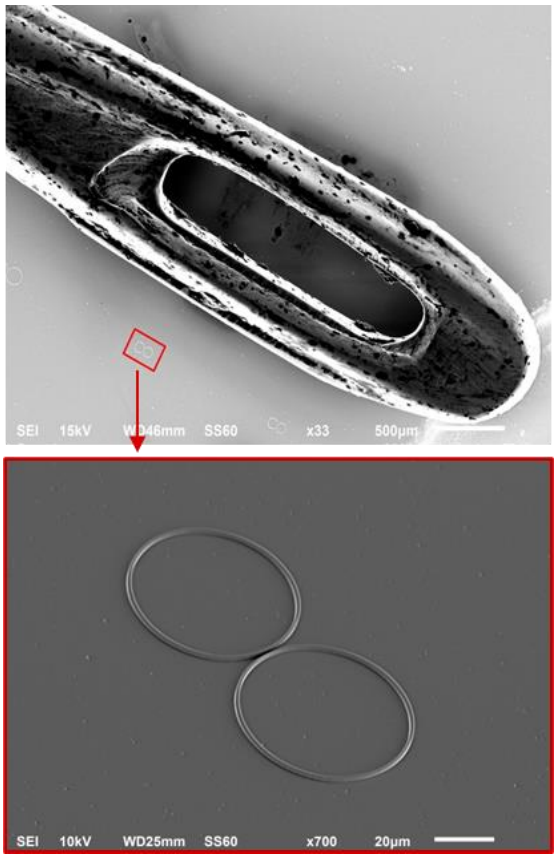
با توجه به این نوآوری‌ها و مزایا، روش ارائه شده کاملاً موضوعی جدید و پژوهشی محسوب شده و به توسعه فناوری‌های نانو در کشور کمک شایانی می‌کند.

اساس کار لیتوگرافی با لیزر فمتوثانیه بر پایه جذب دو فوتونی است که در این مقاله به تفصیل توضیح داده خواهد شد [۱۱]. پلیمریزاسیون دو فوتونی (TPP) به عنوان روشی مؤثر در طراحی و ساخت اجزای مختلف مدارهای مجتمع کاربرد دارد. در تکنیک پلیمریزاسیون دو فوتونی باریکه متمرکز لیزر فمتوثانیه روی لایه‌های پلیمری مخلوط

SU-8 همراه با ماده فعال رودامین B حرکت کرده و تغییر شیمیایی دلخواه در نواحی خاص ایجاد می‌کند. سپس با روش‌های مرسوم لیتوگرافی، این نواحی از یکدیگر تفکیک می‌شوند. با بهره‌گیری از این روش، امکان ساخت ادوات مختلف مدارهای مجتمع الکترونیکی و فوتونیکی از جمله لیزرهای حالت جامد در قالب ریزقرص‌ها، ریزحلقه‌ها [۱۲] و تشدیدکننده‌های ریزحلقه‌ای دوتایی و سه‌تایی با ضریب کیفیت بسیار بالا (حدود ده هزار در طول موج ۶۱۲.۴ نانومتر)، آستانه پایین و فواصل چند صد نانومتری فراهم می‌شود [۱۳-۱۴]. همچنین این تکنیک توانایی ساخت موجبرها و میکروورینگ‌هایی با سطوح بسیار هموار را داراست که موجب کاهش قابل توجه اتلاف نوری در این ساختارها می‌شود [۱۵،۱۶].

این دقت و ظرافت ساخت، پیش‌نیاز اولیه تولید اکثر مدارهای مجتمع تمام فوتونیکی [۱۷] و برخی مدولاتورهای الکترواپتیکی است که کاربردهای گسترده‌ای در مخابرات [۱۸] و محاسبات نوری دارند.

در شکل ۱ ابعاد کلی یک ریزساختار تولید شده به روش لیتوگرافی با لیزر فمتو ثانیه در مقایسه با یک سوزن خیاطی قابل مشاهده است.



شکل (۱): نمای میکروسکوپی یک ریزساختار تولیدشده با روش لیتوگرافی لیزر فمتوثانیه در کنار یک سوزن خیاطی

علاوه بر بیان قابلیت دستیابی به ساختارهایی با ابعاد چندصد نانومتر، مزایای دیگر روش مورد استفاده نسبت به سایر روش‌های متداول نانولیتوگرافی مورد بررسی قرار گرفته است. جدول (۱) به‌طور خلاصه مقایسه و ارزیابی عددی عملکرد روش‌های رایج لیتوگرافی، از جمله nanoimprint و electron beam lithography، را ارائه می‌دهد.

جدول(۱) : مقایسه و ارزیابی عددی عملکرد روش های لیتوگرافی

	لیتوگرافی نوشتن لیزری ساده	لیتوگرافی باریکه الکترونی	لیتو گرافی نانو ایمپرینت	لیتو گرافی لیزر فمتو ثانیه
پیچیدگی سامانه و نیاز به خلاء	ندارد	دارد	ندارد	ندارد
قابلیت ساخت ساختارهای سه بعدی	ندارد	ندارد	دارد	دارد
انعطاف‌پذیری در طراحی هندسی	متوسط	پایین	محدود	سیار بالا
نیاز به استفاده از ماسک	ندارد	دارد	دارد	ندارد
کمینه ابعاد ویژگی (Minimum Feature Size)	1 µm	10 nm	10–50 nm	100 nm
تفکیک‌پذیری (Resolution)	متوسط	بسیار بالا	بالا	بالا
بسترهای قابل‌استفاده	محدود (پلیمر، رزین)	محدود (رزین روی ویفر)	متوسط (وابسته به قالب)	گسترده (شیشه، پلیمر، فلز)
حداکثر ابعاد ناحیه قابل لیتوگرافی	چند سانتی‌متر مربع	چند صد میکرومتر مربع	تا چند اینچ ویفر	چند سانتی‌متر مربع
مزیت شاخص روش	دو بعدی با دقت متوسط	دقت بالا روی سطوح صاف و در خلاء	نیاز به قالب و فرایند تماس	طراحی سه بعدی بدون ماسک روی هر سطح

در این پژوهش، اصول و روش‌های لیتوگرافی لیزری فمتوثانیه به‌طور کامل شرح داده می‌شود. همچنین، چیدمان آزمایشگاهی بهینه و نتایج حاصل از آن نیز تشریح خواهد شد. لازم به ذکر است کلیه‌ی شکل های ساخت و لیتوگرافی شده ارائه شده در این مقاله از تولیدات همین گروه می‌باشد.

اصول لیتوگرافی لیزر فمتو ثانیه

پیش‌تر اشاره شد که اساس کار لیتوگرافی لیزری فمتوثانیه بر پایه‌ی جذب دو فوتونی است. هنگام استفاده از لیزرهای پالسی کوتاه، به دلیل توان لحظه‌ای بالای پرتو و چگالی بالای فوتون، احتمال وقوع پدیده‌های غیرخطی نوری قابل ملاحظه است. یکی از این پدیده‌ها، جذب دو فوتونی است. در فرآیند جذب دو فوتونی، همان‌طور که در شکل ۱ (الف) نشان داده شده است، یک اتم با جذب همزمان دو فوتون لیزری، از حالت پایه به حالت برانگیخته انتقال می‌یابد. این فرآیند زمانی رخ می‌دهد که ماده نسبت به تابش با فرکانس ω شفاف است، اما نسبت به دو برابر آن کاملاً جاذب می‌باشد. در این شرایط، فوتون‌های پرتو با فرکانس ω جذب نخواهند شد، اما اگر شدت تابش ورودی زیاد باشد، جذب همزمان دو فوتون محتمل می‌شود. نرخ گذار اتمی بین دو تراز حقیقی ماده طبق معادله (۱) محاسبه می‌شود.

$$R = \frac{\sigma I}{\hbar\omega} \qquad (۱)$$

در تابش‌های با شدت بالا که پاسخ‌های غیرخطی مرتبه های بالاتر ماده مشاهده می‌شود، سطح مقطع جذب یک عدد ثابت نخواهد بود و طبق معادله (۲) با شدت تابش فرودی بر ماده ارتباط مستقیم دارد.

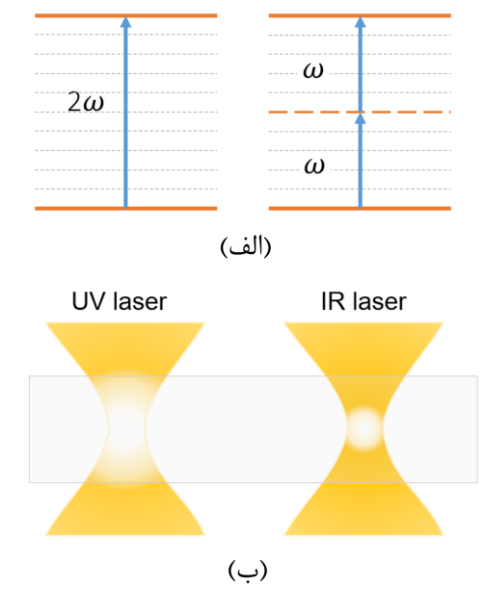
$$\sigma = \sigma^{(2)} I \qquad (۲)$$

بنابراین، رابطه نرخ گذار اتمی ناشی از جذب دو فوتونی با معادله (۳) به دست خواهد آمد:

$$R = \frac{\sigma^{(2)} I^2}{\hbar\omega} \qquad (۳)$$

نتایج نشان می‌دهد که نرخ این تبدیل با توان دوم شدت پرتو تابش ورودی ارتباط مستقیم دارد و در شدت‌های بسیار بالا به مقدار قابل قبولی می‌رسد [۱۹].

جذب دو فوتونی می‌تواند در پلیمرها یا مواد آلی حساس به نور رخ دهد. به این معنی که مواد و مولکول‌هایی که با جذب فوتون‌های پرانرژی (مانند نور فرابنفش) در آنها واکنش‌های شیمیایی اتفاق می‌افتد، می‌توانند با جذب همزمان دو یا چند فوتون کم‌انرژی‌تر (مانند مادون قرمز) همان واکنش را انجام دهند. به عنوان مثال، اگر یک ماده فوتورزیست به نور ۴۰۰ نانومتر حساس باشد، می‌توان با تابش نور لیزر فمتوثانیه‌ی ۸۰۰ نانومتر همان اثر را با استفاده از پدیده جذب دو فوتونی ایجاد کرد. البته باید توجه داشت که این پلیمریزه شدن با کمک تابش مادون قرمز نیازمند شدت ورودی بسیار بیشتری از تابش فرابنفش قبلی است. لیزرهای مادون قرمز پالسی پیوسته توانایی تولید این میزان از شدت (بدون تخریب ماده) را ندارند، بنابراین ما ملزم به استفاده از پرتو لیزر مادون قرمز پالس کوتاه کانونی شده هستیم تا میزان چگالی توان ورودی به فوتورزیست را به میزان مورد نیاز برسانیم. در شکل ۱(ب)، باریکه‌ی فوکوس شده‌ی لیزر برای دو حالت لیزر فرابنفش معمولی و لیزر فمتوثانیه مادون قرمز نشان داده شده است. همان‌طور که در این شکل مشخص است، ناحیه‌ی اثر باریکه‌ی لیزر معمولی در کل عمق ماده یا فوتورزیست گسترده شده است، در حالی که ناحیه اثر لیزر فمتوثانیه فقط در یک حجم بیضی‌شکل در مرکز ناحیه‌ی فوکوس است، که به آن ناحیه‌ی پلیمریزاسیون گفته می شود. ابعاد ناحیه جذب دو فوتونی (بیضی شکل) می‌تواند از ابعاد نقطه فوکوس پرتو نیز کوچک‌تر باشد [۲۰،۲۱]. وقتی این ناحیه موثر بر ماده فوتورزیست حرکت کند، فرآیند لیتوگرافی پلیمریزاسیون دو فوتونی (TPP)رخ می‌دهد.



شکل (۲): الف) نمودار تراز های انرژی در فرایند جذب معمولی و جذب دوفوتونی، (ب) باریکه‌ی فوکوس شده‌ی لیزر برای دو حالت لیزرUV معمولی و لیزر فمتو ثانیه IR

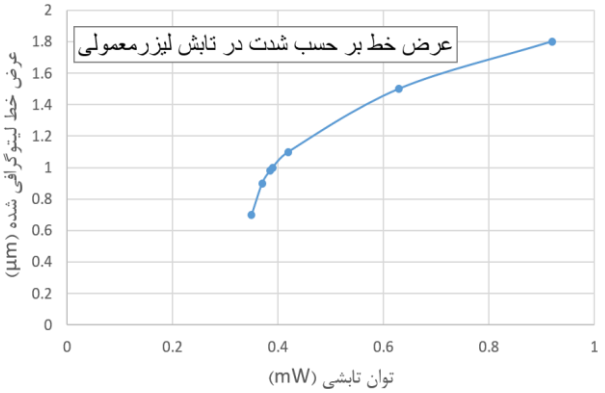
در واقع، چگالی فوتون‌های مادون‌قرمز در نواحی خارج از حجم جذب دوفوتون (TPA) بسیار پایین است، به طوری که اثرات غیرخطی در آن قابل چشم‌پوشی هستند. بنابراین، اثر فتوشیمیایی در فتورزیست فقط در ناحیه‌ی TPA رخ می‌دهد و بالا و پایین آن بدون هیچ اثری باقی می‌ماند. در نتیجه، محدوده‌ی اثر پرتو لیزر فقط به نقطه‌ی کانون محدود شده و به اندازه‌ی حجم TPA است. با کاهش شدت نور لیزر، می‌توان حجم ناحیه‌ی TPA را کوچک‌تر کرد. همچنین، با حرکت دادن نقطه‌ی کانون پرتو در سه بعد، می‌توان ساختارهای سه‌بعدی پیچیده‌ای را ایجاد کرد.

۲- چیدمان آزمایشگاهی

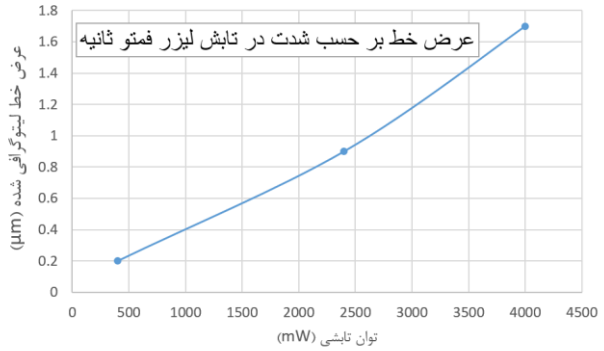
فرآیند نوشتن مستقیم با لیزر فمتوثانیه در این پژوهش با استفاده از چیدمان آزمایشگاهی نشان داده شده در شکل (۳)، انجام شده است. این چیدمان از دو لیزر مجزا تشکیل شده است: یک لیزر قرمز پیوسته با توان ۱۰ میلی وات که برای سیستم کانونی کردن خودکار استفاده می‌شود (مسیر سبز رنگ) و یک لیزر فمتوثانیه که برای نوشتن مستقیم روی ماده حساس به نور استفاده می‌گردد (مسیر قرمز رنگ). لیزر فمتوثانیه دارای طول پالس ۱۰۰ فمتوثانیه با فرکانس تکرار پالس

۸۰ مگاهرتز است. طول موج این لیزر قابل تنظیم بوده و می‌تواند در محدوده ۶۹۰ تا ۱۰۴۰ نانومتر تنظیم شود. انتخاب طول موج لیزر فمتوثانیه باید با توجه به محدوده حساسیت ماده حساس به نور انجام شود. برای مثال، اگر ماده حساس به نور در محدوده ۴۰۰ نانومتر جذب داشته باشد، طول موج لیزر باید در محدوده ۸۰۰ نانومتر (دو برابر طول موج جذب ماده) تنظیم شود تا از فرایند لیتوگرافی TPP استفاده شود. با توجه به استفاده از فوتورزیست منفیSU8 ، طول‌موج لیزر در بازه ۷۹۰ تا ۸۱۰ نانومتر تنظیم گردید.

کنترل کیفیت و شدت پرتو لیزر فمتوثانیه به کمک دو آینه و دو دریچه در مسیر پرتو انجام می‌شود. در میان این دو دریچه، دو قطبشگر قرار دارند که یکی قابل چرخش و دیگری ثابت است. از آنجایی که شدت پرتو تابشی با حجم ناحیه TPP رابطه مستقیم دارد، لازم است تا شدت پرتو همواره در کنترل باشد. برای این منظور، یک بیم اسپلیتر مقداری از پرتوی خارج شده از قطبشگرها را به یک توان سنج هدایت می‌کند تا شدت پرتوی در حال تابش در هر لحظه اندازه‌گیری و با کمک قطبشگر قابل چرخش کنترل شود. شکل ۳ پهنای خطوط ایجادشده را بر حسب شدت تابش در لیتوگرافی با لیزر پیوسته نشان می‌دهد. شکل ۴ همین داده را برای لیزر پالسی فمتوثانیه نمایش می‌دهد. مقایسه این دو شکل بیانگر آن است که تابش لیزر پالسی فمتوثانیه، با وجود توان تابشی بیشتر، امکان ایجاد ساختارهایی با پهنای کمتر و دقت بالاتر را فراهم می‌آورد.



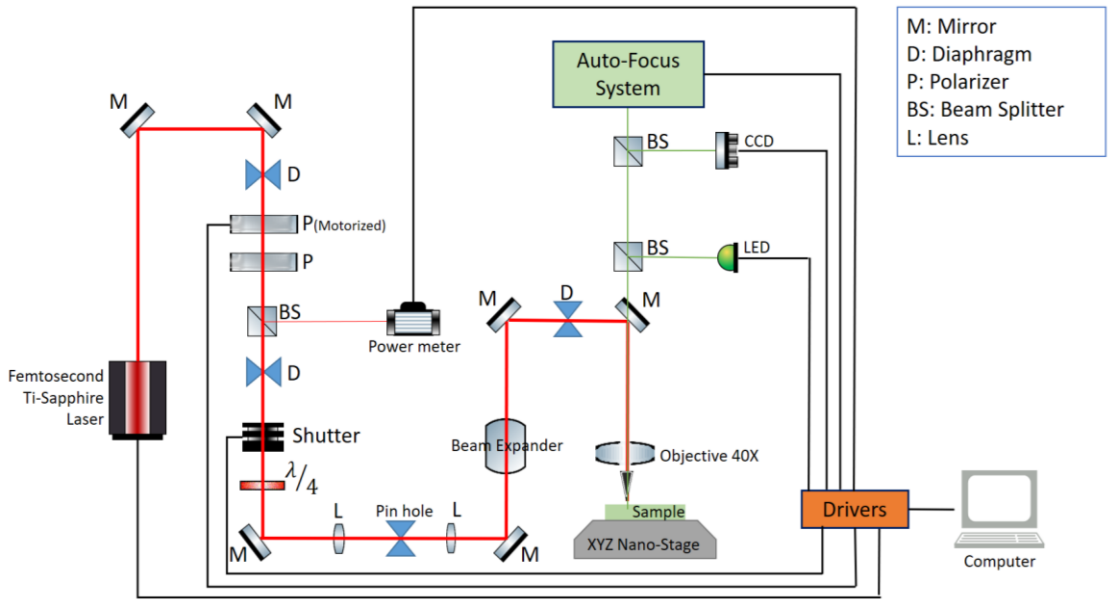
شکل (۳): عرض خط لیتوگرافی شده در اثر تابش لیزر پیوسته معمولی در توان‌های تابشی متفاوت



شکل (۴): عرض خط لیتوگرافی شده در اثر تابش لیزر پالس کوتاه فمتوثانیه در توان‌های تابشی متفاوت

شکل ۵ چیدمان آزمایشگاهی لیتوگرافی جذب دو فوتونی با لیزر فمتوثانیه در آزمایشگاه مدارهای مجتمع نوری را نشان می دهد. به جهت ایجاد طرح‌های چند مرحله‌ای، از یک شاتر برای قطع و وصل تابش پرتو استفاده می‌شود. ورود نور قطبیده شده به یک تیغه ربع موج، یک پرتو با قطبش دایره‌ای یکنواخت ایجاد می‌کند که به همسانگرد بودن ناحیه اثر پرتو کمک می‌کند. همچنین، برای دستیابی به باریکه‌ای با توزیع فضایی گوسی مناسب، یک فیلتر فضایی در مسیر پرتو قرار داده شده است. فیلتر فضایی شامل دو عدسی است که میان آنها یک دریچه با قطر ۲۵ میکرومتر قرار دارد. این فیلتر با حذف ناهنجاری‌های فضایی پرتو و موازی‌سازی مجدد آن، پرتوی کانونی شده مناسب را برای نوشتن مستقیم فراهم می‌کند. پس از آماده‌سازی پرتوی کانونی شده گوسی، آن را با یک عدسی شیئی X۵۰ روی نمونه کانونی می‌کنیم. برای ایجاد الگوهای متفاوت، نمونه را بر روی یک جابجاگر قرار می‌دهیم و با حرکت جابجاگر، طرح مورد نظر را با لیزر بر سطح نمونه می‌نویسیم. جابجاگر و سایر تجهیزات الکترونیکی توسط نرم‌افزار LabVIEW کنترل می‌شوند. در این چیدمان از پایه متحرک مدل XMS50 ساخت شرکت Newport استفاده شده است. پایه مکانیکی مورد استفاده دارای محدوده حرکتی ۵۰ میلی‌متر، حداقل گام حرکتی ۱ نانومتر و حداکثر سرعت ۳۰۰ میلی‌متر بر ثانیه است. در انجام لیتوگرافی‌های این پژوهش، سرعت حرکت پایه روی ۵۰ میکرومتر بر ثانیه تنظیم شد.

یک سیستم کانونی خودکار با کمک یک برنامه بازخورد حلقه بسته در حین حرکت پایه، از فوکوس ماندن پرتو اطمینان حاصل می‌کند. برای مشاهده نمونه در انتهای چیدمان، یک دوربین و یک LED قرار داده شده است. با عبور پرتوی خروجی LED از یک فیلتر، اطمینان حاصل می‌کنیم که طول موج آن بالا است و از ناحیه جذبی فوتورزیست دور است.



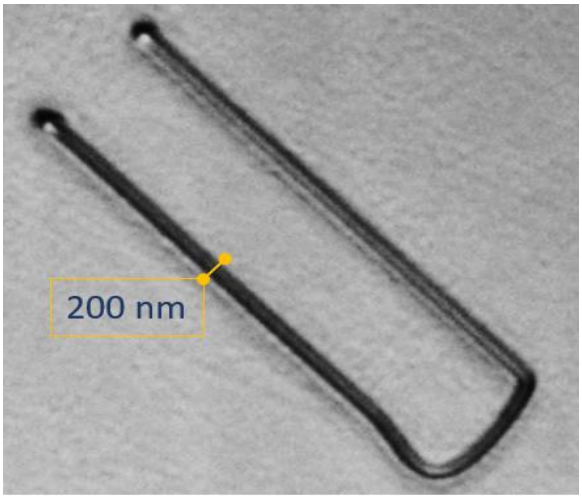
شکل (۵): چیدمان آزمایشگاهی لیتوگرافی جذب دو فوتونی با لیزر فمتوثانیه در آزمایشگاه مدارهای مجتمع نوری

۳- نتیجه‌گیری

این پژوهش به طور جامع اصول کارکرد و روش آزمایشگاهی لیتوگرافی نوشتن مستقیم با لیزر فمتوثانیه را شرح داده است. همان‌طور که پیش‌تر بررسی شد، این روش به دلیل پلیمریزاسیون در ناحیه جذب دو فوتونی، مزایای زیادی نسبت به دیگر روش‌های لیتوگرافی دارد. یکی از کاربردهای این فناوری، نانولیتوگرافی است؛ فرآیندی برای چاپ، نوشتن یا حکاکی دقیق الگوهای میکروسکوپی جهت ایجاد ساختارهای فوق‌العاده کوچک در ابعاد نانومتری زیر حد پراش نور. نانولیتوگرافی معمولاً برای ساخت ادوات الکترونیکی بسیار کوچک و سریع مانند میکروچیپ‌ها و نانوچیپ‌ها کاربرد دارد و در ساخت عناصر نانونوری انعطاف‌پذیر و قدرتمند مدارهای مجتمع نوری نقش مهمی دارد [۲۲].

شکل ۶ یک نمونه ساختار نانومتری تولید شده به روش لیتوگرافی نوشتن مستقیم با لیزر فمتوثانیه را نمایش می‌دهد.

در یک نمونه ساخت، عرض خطوط ایجادشده حدود ۲۰۰ نانومتر بود. برای این طرح، از لیزر پالسی با فرکانس ۸۰ مگاهرتز، طول پالس ۱۰۰ فمتوثانیه و انرژی هر پالس ۵ نانوژول استفاده گردید.



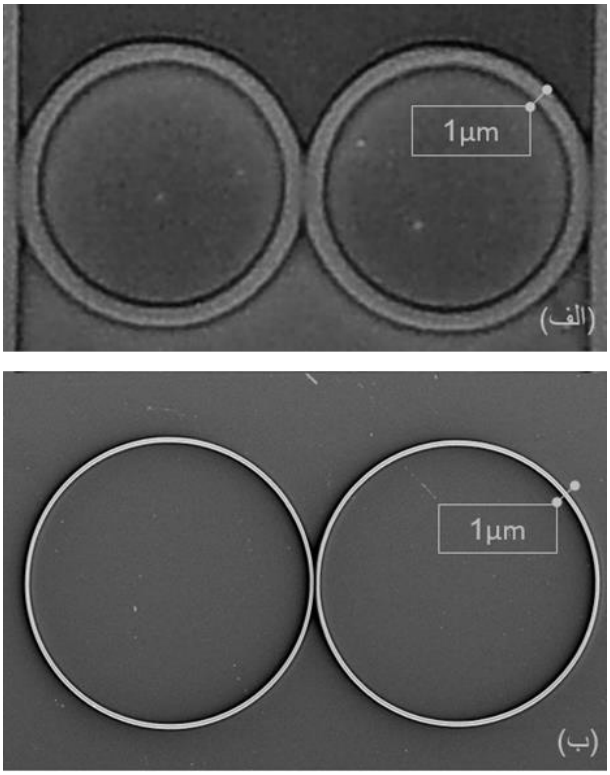
شکل(۶): نانوساختار تولیدشده با استفاده از لیتوگرافی جذب دوفوتونی توسط لیزر فمتوثانیه

فرآیند نانولیتوگرافی می‌تواند علاوه بر ایجاد ساختارهای نانو، به افزایش بهره‌وری و عملکرد کلیه قطعات نیز کمک کند. به این معنی که، در صورتی که برای ساخت قطعاتی با ابعاد میکرونی، از این روش استفاده کنیم، ساختار هایی با بازدهی مناسب تر و با کیفیت تر بدست خواهد آمد، که نشان‌دهنده دقت و کارایی بالای این روش است. [۲۳]

شکل ۷ کیفیت دو جفت ریز حلقه تولید شده با استفاده از روش لیتوگرافی نوری با لیزر معمولی(الف) و فمتو ثانیه(ب) را به نمایش می گذارد. شکل (۷-الف) حاصل تابش لیزر UV با طول موج ۴۰۵ نانومتر با توان ۰.۳۸۵ میلی وات و شکل (۷-ب) حاصل تابش لیزر پالسی با

طول‌موج ۸۱۰ نانومتر، فرکانس ۸۰ مگاهرتز، طول پالس ۱۰۰ فمتوثانیه و انرژی هر پالس ۳۰ نانوژول است.

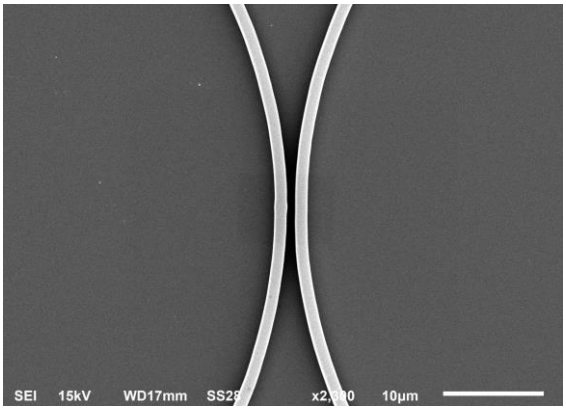
اختلاف ظرافت و کیفیت در این دو ساختار مشهود است. فوتون های پراکنده شده، باعث بزرگتر شدن ناحیه ی پلیمریزاسیون و تاثیر نامطلوب بر نواحی اطراف شده است. در نتیجه‌ی این رخ داد، در شکل (۷-الف) بر خلاف شکل (۷-ب) ، گپ بین دو ریز حلقه، به ابعاد ۵۰۰ نانومتر، دچار پلیمریزه شدن جزئی شده و پس از آن به طور کامل خالی نشده است. این امر تفاوت چشمگیری در کیفیت عملکرد این دو ساختار به همراه خواهد داشت.



شکل (۷): الف) یک جفت ریزحلقه تولیدشده با روش لیتوگرافی نوری با استفاده از لیزر پیوسته معمولی. ب) یک جفت ریزحلقه تولیدشده با روش لیتوگرافی نوری با استفاده از لیزر پالسی کوتاه فمتوثانیه

همچنین همانطور که قبلاً اشاره شد، توانایی ساخت موجبرها و میکروورینگ‌هایی با ناهمواری سطحی بسیار کم، یکی از نکات مهم این روش است؛ زیرا منشاء اصلی اتلاف در مدارهای مجتمع نوری، تضعیف موج به علت ناهمواری سطح دیواره مسیر است.

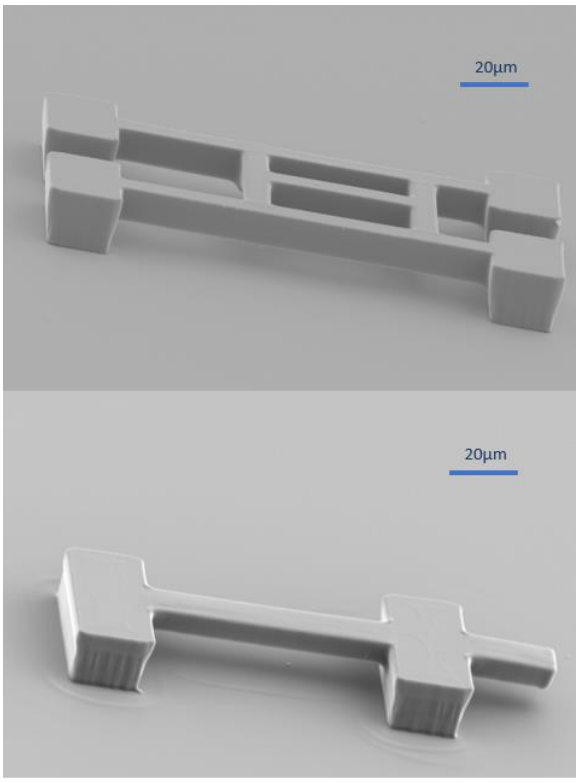
شکل ۸ نمای بزرگ‌نمایی شده حفره میان ریزحلقه‌ها که دقت، ظرافت ساخت و صافی سطح دیواره‌ها را نشان می‌دهد. لذا در این شکل ها کیفیت بالای سطح دیواره های موجبرها و عدم وجود ناهمواری در آنها کاملا مشهود است.



شکل (۸): نمای بزرگ‌نمایی شده حفره میان ریزحلقه‌ها که دقت، ظرافت ساخت و صافی سطح دیواره‌ها را نشان می‌دهد

پیش‌تر همچنین ذکر شد، این روش امکان ساخت الگوهای سه‌بعدی پیچیده و دلخواه را با استفاده از پرتو متمرکز لیزر فمتوثانیه فراهم می‌آورد. این فناوری در ساخت ساختارهای پیچیده مورد استفاده در دستگاه‌های ریزالکترومکانیکی یا نانوالکترومکانیکی کاربرد دارد. به عنوان مثال، شتابسنج‌ها از پرکاربردترین حسگرهای حوزه ریزالکترومکانیکی هستند که برای ساخت آنها نیازمند لیتوگرافی سه‌بعدی روی پلیمر SU8 حساس به نور هستیم.

شکل ۹ نمونه‌ی تولید شده‌ی یکی از این ساختارهای سه بعدی را نشان می‌دهد [۲۴]. در نمونه‌ای دیگر، از لیزر پالسی با طول‌موج ۸۰۰ نانومتر، فرکانس ۸۰ مگاهرتز، طول پالس ۱۰۰ فمتوثانیه و انرژی هر پالس ۵۰ نانوژول بهره گرفته شد. برای ایجاد چنین ساختارهایی، حداکثر توان لیزر به‌کار گرفته شده و انرژی خروجی در محدوده ۵۰ تا ۷۰ نانوژول تنظیم گردید. نوردهی طرح با خطوطی با فاصله ۱ میکرومتر از یکدیگر انجام شد که موجب ایجاد ساختاری پیوسته و مستحکم گردید.



شکل (۹): نمونه‌ای از ریزساختار سه‌بعدی تهیه‌شده به روش لیتوگرافی جذب دوفوتونی

مراجع

[1] J. E. E. Baglin, Ion beam nanoscale fabrication and lithography-A review, Appl. Surf. Sci, Vol. 9, No. 258, 2012

[2] S. T. Howell. A. Grushina, F. Holzner, et al., Thermal scanning probe lithography_a review, Microsystems & Nanoengineering, Nature, Vol. 6, No. 21, 2020.

[3] L. J. Guo, Nanoimprint Lithography: Methods and Material Requirements. Adv. Mater, Wiley, Vol. 4, No. 19, 2007.

[4] P. Se.Young, S. Lee, J. Yang, et al., Patterning Quantum Dots via Photolithography: A Review, Adv. Mater, Wiley Publishing, Vol. 35, No. 41, 2023.

[5] D. Suwandi, R. Aziz, A. Sifa, et al., Dry film photoresist application to a printed circuit board (PCB) using a maskless photolithography method, Int. J. Technol, Vol. 5, No. 10, 2019.

[6] C. Tan, T. Ren, D. Qu, et al., Maskless photolithography based on ultraviolet micro-LEDs and direct writing method for improving pattern resolution, Opt. Express, No. 32, 2024.

[7] A. Yakuhina, A. Kadochkin, V. Svetukhin, et al., Investigation of Side Wall Roughness Effect on Optical Losses in a Multimode Si3N4 Waveguide Formed on a Quartz Substrate, Photonics, Vol. 7, No. 104, 2020.

[8] M. Bellec, A. Royon, B. Bousquet, et al., Beat the diffraction limit in 3D direct laser writing in photosensitive glass, Opt. Express, No. 17, 2009.

[9] A. Martinez, M. Duboy, I. Khrushchev, Direct Writing of Fibre Bragg Gratings by Femtosecond Laser, Electronics Letters, Vol. 19, No. 40, 2004.

[10] S. Rauh, K. Wobbeking, M. Li, et al., From Femtosecond to Nanosecond Laser Micro structuring of Conical Aluminum Surfaces by Reactive Gas Assisted Laser Ablation, ChemPhysChem, Wiley, No. 21, 2020.

[11] H. Nishiyama, Y. Hirata, Femtosecond Laser Nonlinear Lithography, Chapter 4, IntechOpen, 2010.

[12] Ghasemi H, Yavari M H. Design and Simulation of Silicon Optical Modulator Based on Microring Resonator. Journal of Iranian Association of Electrical and Electronics Engineers 2022; 19 (2) :47-54

[13] G. M. Parsanasab, M. Moshkani, A. Gharavi, Femtosecond laser direct writing of single mode polymer micro ring laser with high stability and low pumping threshold, Opt. Express, No. 7, 2015

[14] M. Jahangiri, F. Moradiani, G. M. Parsanasab, et al., High side-mode suppression ratio with a Vernier effect single-mode laser using triple coupled microrings, Scientific Reports, No. 13, 2023.

[15] F. Moradiani, P. A. Arvanagh, G. M. Parsanasab, et al., Single-mode lasing by tailoring the excitation of localized surface plasmon resonances to whispering gallery modes in a microring laser, Opt. Express, Vol. 31, No. 10, 2023.

[16] M. Jahangiri, G. M. Parsanasab, F. Moradiani, Wavelength-selective Single-mode Laser by Joint Use of Parity-time Symmetry and Vernier Effect in Symmetric and Asymmetric Coupled Microrings, Journal of Lightwave Technology, Vol. 42, No. 5, 2023.

[17] Jalali T. Analysis of Photonic Crystal Power Splitter Waveguide. Journal of Iranian Association of Electrical and Electronics Engineers 2017; 13 (4) :59-64

[18] Bahrami-Chenaghlou F, Habibzadeh-Sharif A, Ahmadpour A. Design and full-wave analysis of a dual-purpose compact all-optical integrated circuit for ultra-fast signal processing. Journal of Iranian Association of Electrical and Electronics Engineers 2023; 20 (3) :59-66

[19] R.W. Boyd, Nonlinear Optics, Second Edition, 1992

[20] S. Maruo, O. Nakamura, S. Kawata, Three-dimensional microfabrication with two-photon absorbed photopolymerization, Opt. Letters, Vol. 2, No. 22, 1997.

[21] F. Jipa, M. Zamfirescu, A. Velea, et al., Femtosecond Laser Lithography in Organic and Non-Organic Materials, Chapter 3, 2013

[22] P. Malekzadeh, G. M. Parsanasab, H. Nikbakht, et al., A high extinction ratio plasmonic SU-8 waveguide polarizer, Opt. Com., No. 487, 2021.

[23] A. Mafakheri, G. M. Parsanasab, P. Sorayaie, et al., Highly efficient DFB laser-assisted grating As2S3 chalcogenide for integrated photonics, Journal of Lightwave Technology, Vol. 42, No. 14, 2024.

[24] M. Taghavi, H. Latifi, G. M. Parsanasab, et al., Simulation, Fabrication, and Characterization of a Sensitive SU-8-Based Fabry-Perot MOEMS Accelerometer, Journal of Lightwave Technology, Vol. 37, No. 9, 2019.

پیوست:

در فرآیند لیتوگرافی مستقیم با استفاده از لیزر فمتوثانیه، ساخت ساختارهای ریز و مینیاتوری نیازمند هماهنگی و کنترل دقیق اجزای مختلف چیدمان آزمایشگاهی است. برای این منظور، قطعاتی همانند جابجاگر، شاتر، دوربین و قطبشگر با استفاده از دستگاه کنترلر XPS-C8 ساخت شرکت Newport کنترل می‌گردد. این کنترلر امکان حرکت جابجاگر در راستاهای X و Y با سرعت دلخواه و ایجاد الگوهای

غیرخطی و انحنادار را فراهم می‌آورد. کنترلر XPS چهار نوع مسیر را پشتیبانی می‌کند:

۱. مسیر خط و قوس: این مسیر طرح‌های دو بعدی در صفحه X-Y را به مجموعه‌ای از خطوط مستقیم و قطاع‌هایی از دایره تقسیم می‌کند و آن‌ها را با دقت بالا و سرعت ثابت اجرا می‌کند.

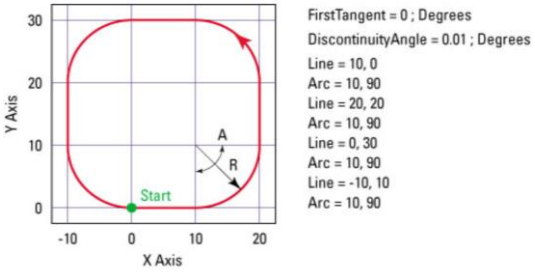
۲. مسیر Spline: این مسیر نیز مشابه مسیر خط و قوس است، اما امکان حرکت در سه بعد را فراهم می‌آورد.

۳. مسیر PVT: در این مسیر، هر جزء از مسیر به صورت جداگانه با مشخصات جابجایی، سرعت نهایی و زمان اجرا تعریف می‌شود. این امکان را فراهم می‌آورد که سرعت در طول مسیر تغییر کند.

۴. مسیر PT: این مسیر حالت ساده‌شده مسیر PVT است، که در آن فقط موقعیت هر جزء از مسیر و زمان اجرای آن مشخص می‌شود. این روش از گسستگی سرعت در بین المان‌ها جلوگیری می‌کند.

در روش خط و قوس، کل مسیر حرکت جابه‌جاگر را به خطوط صاف و قوس‌های دایره ای تقسیم می‌کنیم و آنها را به ترتیب معرفی می‌کنیم. مسیر از نقطه مختصات (۰و۰) آغاز می‌شود. برای رسم یک خط، تنها نیاز به مختصات نقطه پایانی داریم و برای رسم قوس، شعاع و زاویه طی شده قوس مورد نیاز است.

در شکل ۳ نمونه‌ای از یک مسیر ساده به همراه کد مربوطه آمده است. همانطور که مشاهده می‌شود، در سطر اول زاویه حرکت اولیه و در سطر دوم حداکثر اختلاف زاویه مجاز بین دو المان متوالی قید شده است. سپس، کل مسیر توسط مجموعه‌ای از خطوط و قوس‌ها به ترتیب رسم و معرفی شده است. هر خط با ذکر مختصات نقطه انتهایی و هر قوس با ذکر شعاع و زاویه طی شده مشخص شده است.



شکل (پ-۱): نمونه‌ای از کد مورد نیاز برای توضیح یک مسیر ساده به روش خط و قوس

در نهایت، مسیر مورد نظر برای هر المان باید به صورت یک فایل با پسوند TXT تولید شود. سپس این فایل باید با استفاده از ماژول FTP به حافظه کنترلر منتقل شود. پس از آن، کاربر می‌تواند با اجرای یک دستور، مسیر موجود در فایل را یک به یک اجرا کند. کنترلر XPS نیز با دقت، مسیر را اجرا کرده و سرعت و شتاب را در امتداد مسیر مشاهده می‌کند. این فرایند با استفاده از نرم‌افزار LabVIEW پیگیری می‌شود. LabVIEW یک زبان برنامه‌نویسی گرافیکی است که در آن آیکون‌های گرافیکی جایگزین کدنویسی‌های مرسوم شده است. این نرم‌افزار امکاناتی از جمله جمع‌آوری داده، پردازش سیگنال، رسم منحنی، پیاده‌سازی فیلترهای دیجیتال بر روی داده، مانیتورینگ و یا پروتکل‌های ارتباطی را برای کاربر فراهم می‌کند.

برای برقراری ارتباط بین اجزای مختلف شبکه، نیاز به یک مجموعه از قوانین و دستورالعمل‌های مشترک است که به آن، پروتکل گفته می‌شود. در این سیستم، از پروتکل TCP/IP استفاده شده است که ماژول FTP یکی از سرویس‌های این پروتکل می‌باشد. با استفاده از نرم‌افزار LabVIEW و برقراری ارتباط با XPS، ابتدا جابجاگر را در میانه‌ی دامنه‌ی حرکتی‌اش قرار می‌دهیم. سپس از قرارگیری نمونه در صفحه‌ی کانونی پرتو لیزر اطمینان حاصل می‌کنیم. برای پیدا کردن صفحه فوکوس باریکه لیزری، از یک دوربین کمک می‌گیریم. در صورتی که شکل نمونه واضح باشد، یعنی نمونه در صفحه فوکوس دوربین است. از آنجایی که صفحه فوکوس دوربین و باریکه لیزر یکسان است، پس نمونه در صفحه فوکوس چیدمان قرار دارد. نوردهی در فرایند لیزر، به شاتر تحت کنترل بستگی دارد. زیرا شاتر مسئول کنترل تابش یا عدم تابش پرتو لیزر بر روی زیرلایه است. بنابراین، در کل فرایند نوردهی، شاتر باید تحت کنترل قرار گیرد. همچنین، برای اجرای طرح‌های چند مرحله‌ای، باز و بسته کردن شاتر نقشی حیاتی ایفا می‌کند. برای این منظور، کنترل شاتر به صورت دستی و اتوماتیک در برنامه گنجانده شده است. برای ارتباط شاتر با XPS، از درگاه GPIO استفاده شده است؛ به طوری که با دریافت فرمان صفر، شاتر بسته و با دریافت فرمان یک، شاتر باز می‌شود.

برنامه با دریافت آدرس پوشه حاوی فایل‌های با پسوند TXT، اقدام به ساخت یک آرایه از تمامی المان‌های طرح می‌کند. سپس، برای ترسیم مسیر لحظه به لحظه، محتویات این آرایه را که به صورت رشته است، به آرایه‌ای از اعداد تبدیل می‌کند که دارای دو ستون است. ستون اول را به عنوان X و ستون دوم را به عنوان Y ذخیره می‌کند. در صورت نیاز کاربر برای تغییر نقطه شروع در راستای X یا Y، با تعیین مقدار X offset و Y offset، می‌تواند مقدار دلخواه را اعمال کند. سپس، این آرایه به عنوان ورودی به تابع XY Graph وارد می‌شود. در نهایت، برای نوشتن طرح بر روی لایه، ابتدا شاتر باز می‌شود و فایل ویرایش شده با استفاده از یک متغیر محلی به زیربرنامه XY Line Arc execution داده می‌شود. پس از تعیین سرعت و شتاب جابجاگر، آماده حرکت روی مسیر دلخواه می‌گردد. پس از اتمام و رسیدن به آخرین نقطه، شاتر بسته شده و کل فرایند برای المان بعدی طرح تکرار می‌شود تا زمانی که در صورت عدم وجود فایل جدید، برنامه متوقف می‌شود.

زیرنویس

TPP:	Two photon Polymerizations
TPA:	Two photon Absorption
IR:	Infrared Radiation
LED:	Light-Emitting Diode