بیست و هشتمین کنفرانس اپتیک و
فوتونیک ایران و چهاردهمین کنفرانس
مهندسی و فناوری فوتونیک ایران،
دانشگاه شهید چمران اهواز،
خوزستان، ایران.
۱۴-۱۲ بهمن ۱۴۰۰

طراحی و ساخت سیستم خودکانونی به روش آستیگماتیسم جهت استفاده در لیتوگرافی لیزری

محسن غضنفر[۱]، ابراهیم بحرودی[۲]، حمید لطیفی[۲]

۱. تهران، اوین، دانشگاه شهید بهشتی، دانشکده فیزیک

۲. تهران، اوین، دانشگاه شهید بهشتی، پژوهشکده لیزر و پلاسما

latifi@sbu.ac.ir

چالش‌های متعددی در ساخت مدارهای مجتمع فوتونیکی وجود دارد. یکی از چالش‌های ساخت این نوع از مدارها، خودکانونی بلادرنگ پرتو لیزر بر روی سطح فوتورزیست در لیتوگرافی لیزری است. در این راستا یک سیستم خودکانونی طراحی و ساخته شد. این سیستم بر اساس روش آستیگماتیسم عمل می‌کند. این سیستم خودکانونی می تواند با دقت ۱۳۰ نانومتر ناهمواری‌های سطح فوتورزیست را تشخیص داده و بدون استفاده از نرم‌افزار و به صورت یک سیستم خوداتکا با سرعت بسیار بالا در هنگام لیتوگرافی لیزری عمل کند.

کلید واژه- آستیگماتیسم، خوداتکا، خودکانونی، فوتورزیست، مدار مجتمع فوتونیکی

Design and Fabrication of an Auto-Focus System Based on Astigmatism Method for Direct Write Laser Lithography

Mohsen Ghazanfar[۱], Ebrahim Behroodi[۲], Hamid Latifi[۲]

۱. □□□□□□□, □□□□, □□□□□□□ □□□□□□□□□ □□□□□□□□□□□, □□□□□□□□ □□ □□□□□□□□

۲. Tehran, Evin, Shahid Beheshti University, Laser and Plasma Research Institute

latifi@sbu.ac.ir

There are many challenges to build an integrated photonic circuit. One of the challenges of building such circuits is the instant auto-focus of the laser beam on the surface of the photoresist. In this regard an auto-focus system was built and fabricated. This system is based on astigmatism method. This auto-focus system can distinguish surface roughness of the photoresist with resolution of ۱۳۰ nanometers and operate without the use of any software and as a standalone system with very high speeds while the direct write laser lithography is being done.

[Downloaded from opsi.ir on 2026-11-05]

Keywords: Astigmatism, Auto-Focus, Integrated Photonic Circuit, Photoresist, Standalone

[Downloaded from opsi.ir on 2026-11-05]

مقدمه

با کوچک شدن ویژگی‌ها و جزئیات طرح در لیتوگرافی لیزری جهت داشتن طرحی با جزئیات یکنواخت و عاری از هرگونه عیب، این ضرورت ایجاد می‌شود تا سیستمی طراحی شده که بتواند فاصله‌ی بین objective lens و سطح فوتورزیست را با دقت نانومتری و با سرعتی بالا در فاصله کانونی objective lens حفظ کند. ناهمواری‌های سطح زیرلایه، ناهمواری‌های ایجاد شده بر روی سطح فوتورزیست در هنگام لایه نشانی، عدم تنظیم دقیق سطح زیر لایه در هنگام لیتوگرافی، آلودگی‌های سطح فوتورزیست و لرزش‌های محیطی از جمله عواملی هستند که نیاز به ایجاد یک سامانه‌ی خودکانونی با دقت و سرعت بالا را برجسته می‌سازد. اولین سیستم خودکانونی ساخته شده توسط این تیم تحقیقاتی دقت خودکانونی برابر با ۴ میکرومتر داشته و اصلاحات فاصله‌ی کانونی بر بستر نرم افزار صورت می گرفت[۱]. در سیستم گزارش شده در این مقاله دقت خودکانونی پرتو لیزر افزایش داشته و اصلاحات فاصله‌ی کانونی نیز بر بستر سخت‌افزار و با استفاده از روش‌های اپتیکی، با سرعت بالایی با استفاده از آشکارساز فوتونی چهارتایی صورت می‌گیرد. این سیستم خودکانونی جهت استفاده در ساخت مدارهای مجتمع فوتونیکی طراحی شده است اما قابلیت استفاده از این سیستم در تصویر برداری‌های اپتیکی که نیاز به اسکن سطح دارند نیز وجود دارد.

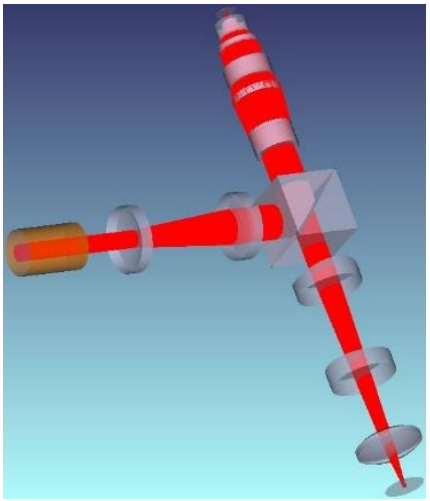
تئوری عملکرد سیستم

سیستم خودکانونی طراحی شده بر اساس روش آستیگماتیسم عمل می‌کند. در این روش از لنز آستیگماتیک به عنوان روشی اپتیکی جهت تشخیص ناهمواری‌های سطح استفاده شده است و اساس کار به این صورت است که یک منبع لیزر فرابنفش (۴۰۴ نانومتر) جهت ایجاد طرح بر روی فوتورزیست و یک منبع لیزر قرمز (۶۶۷ نانومتر) مجزا جهت استفاده در سیستم خودکانونی وجود دارد که هردو طول موج توسط اسپکترومتر اندازه گیری شده است و پرتوی منبع نوری سیستم خودکانونی پس از بازتاب از سطح فوتورزیست و عبور از لنز آستیگماتیک بر روی آشکارساز فوتونی چهارتایی تصویر می شود. با تغییر فاصله‌ی بین objective lens و سطح فوتورزیست پرتوهای بازتاب شده از سطح همگراتر و یا واگراتر شده و با عبور از لنزهای آستیگماتیک به شکل‌های بیضی عمودی، دایره و بیضی افقی در می‌آیند و با استفاده از آشکارساز فوتونی چهارتایی می‌توان این تغییرات را ثبت و اصلاحات مورد نیاز را جهت حفظ فاصله اعمال کرد[۲]. سیستم به گونه‌ای طراحی شده تا هنگامی که سطح فوتورزیست در فاصله‌ی کانونی Objective lens قرار دارد بر روی آشکارساز دایره و هنگامی که این فاصله بیشتر شود دایره به بیضی عمودی تغییر کرده و هنگامی که این فاصله کمتر شود دایره به بیضی افقی تغییر پیدا کند. دقت سیستم به کوچکترین ناهمواری سطح فوتورزیست که توسط سیستم خودکانونی قابل تشخیص است اطلاق می‌شود با توجه به انعطاف پذیری سیستم این دقت می تواند از ۱۳۰ نانومتر تا چند میکرومتر متغیر باشد، البته در صورت استفاده از immersion fluid objective lens این دقت به صورت تئوری می‌تواند تا ۶۰ نانومتر نیز افزایش پیدا کند. دامنه‌ی دینامیکی سیستم به حداکثر دامنه‌ی تغییرات ناهمواری سطح فوترزیست اطلاق می‌شود که سیگنال‌های دریافتی توسط آشکارساز چهارتایی مناسب هستند تا سیستم خودکانونی بتواند اصلاحات مورد نیاز را اعمال کند. دامنه‌ی دینامیکی سیستم‌های خودکانونی مرسوم اپتیکی مقادیری بین ۱۰ تا ۴۰ میکرومتر دارند و سیستم طراحی و ساخته شده دامنه‌ی دینامیکی ۲۰ میکرومتری دارد.

[Downloaded from opsi.ir on 2026-11-05]

شبیه سازی

نرم افزار استفاده شده جهت شبیه سازی اپتیکی، نرم افزار Zemax می‌باشد. در شبیه سازی‌های صورت گرفته، ابتدا از یک فیلتر فضایی به همراه دو عدد عدسی محدب و مقعر جهت تمیز سازی و پهن نمودن بیم لیزر استفاده می شود سپس از یک objective lens، یک beam splitter، دو عدد عدسی استوانه‌ای به همراه یک عدد عدسی محدب به عنوان سیستم آستیگماتیسم استفاده شده است. همچنین جهت اعمال تأثیرات بازتاب سطح فوتورزیست از آینه استفاده شد. در عمل فوتورزیست استفاده شده از نوع SU۸ است که حدودا به میزان ۴ درصد بازتاب از سطح دارد و تفاوت شبیه سازی با ساخت سیستم در میزان توان اپتیکی دریافت شده توسط آشکار ساز بوده و استفاده از آینه تاثیری در اپتیک هندسی طرح نخواهد داشت.

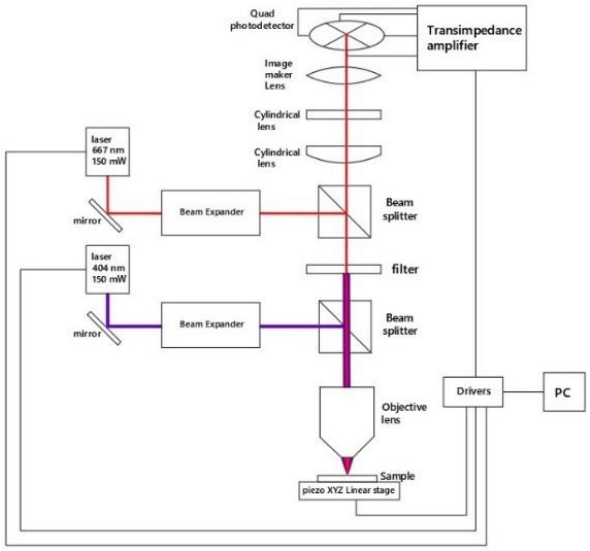


شکل ۱: شبیه سازی سیستم خودکانونی در نرم افزار زیمکس

ابعاد پرتوی ایجاد شده بر روی آشکارساز و فواصل اجزای اپتیکی جهت کاهش ابعاد نهایی سیستم از جمله پارامترهایی بودند که در نرم افزار بهینه شدند. استفاده از لنزهایی از قبیل لنز توریک به عنوان لنز آستیگماتیک و لنز پاول نیز بررسی شد. تمامی المان های موجود در یک objective lens به صورت کامل در شبیه سازی اعمال شدند.

ساخت سیستم

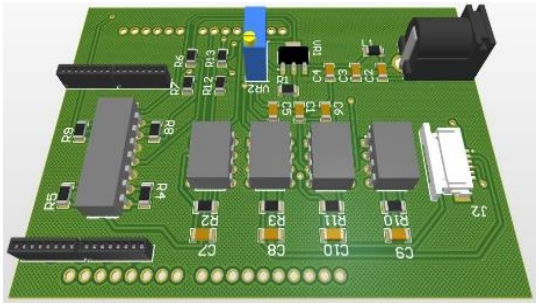
در ساخت سیستم خودکانونی استفاده از یک منبع نوری مجزا که منحصر به سیستم خودکانونی است اهمیت دارد زیرا در سیستم لیتوگرافی نیاز است تا بر حسب نیاز توان لیزر لیتوگرافی تغییر پیدا کند اما در سیستم خودکانونی این نیاز وجود دارد تا آشکار ساز فوتونی چهارتایی با یک توان مشخص و ثابت کالیبره شود.



شکل ۲: شماتیک کلی سیستم خودکانونی به همراه سیستم لیتوگرافی لیزری

استیج توسط نرم افزار LabVIEW کنترل شده و طرح مورد نظر با استفاده از دو محور استیج بر روی فوتورزیست اعمال می‌شود ضمنا هر دو لیزر توسط درایورهای مخصوص آن‌ها، توسط این نرم افزار کنترل می شود. سیگنال های ایجاد شده توسط هر صفحه‌ی آشکار ساز فوتونی چهارتایی نیاز به تقویت دارد. از این جهت مدار تقویت متناسب با آشکار ساز در نرم افزار Altium Designer طراحی شد و سیگنال‌های خروجی این مدار جهت کنترل سیستم خودکانونی به محور سوم استیج (محور Z) ارسال می شود.

[Downloaded from opsi.ir on 2026-11-05]

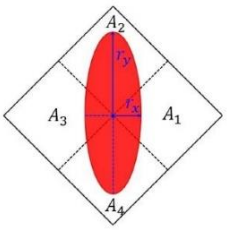


شکل ۳: مدار تقویت سیگنال آشکارساز

جهت تشخیص تغییرات دایره به بیضی بر روی آشکار ساز، سیگنال‌های تقویت شده با استفاده از رابطه‌ی (۱) پردازش می‌شود و پارامتر حاصله focus error signal(FES) نامیده می‌شود[۳].

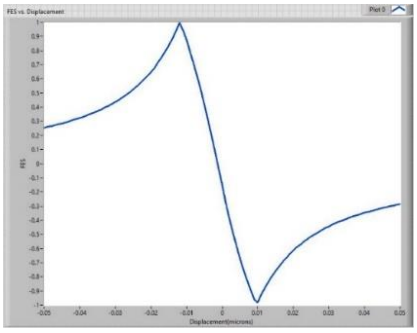
$$FES = \frac{(A_1 + A_3) - (A_2 + A_4)}{(A_1 + A_2 + A_3 + A_4)} \qquad (۱)$$

پارامترهای A_1, A_2, A_3, A_4 سیگنال‌های دریافتی از چهارصفحه‌ی آشکارساز فوتونی چهارتایی هستند و ترتیب قرار گرفتن آن ها همانند شکل زیر می باشد.



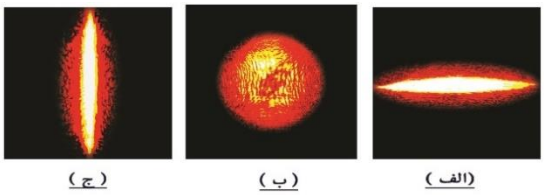
شکل ۴: نحوه تشکیل تصویر بر روی آشکارساز فوتونی چهارتایی

در صورتی که FES برابر با صفر باشد بر روی آشکار ساز دایره تشکیل شده و سطح فوتورزیست در فاصله‌ی کانونی objective lens قرار دارد و اگر این مقدار برابر با صفر نباشد دایره به بیضی عمودی یا افقی تبدیل می‌شود.



شکل ۵: نمودار FES بر حسب جابجایی سطح فوتورزیست

استیج استفاده شده دارای عملگر پیزوالکتریک است. پیزوالکتریک می‌تواند اصلاحات مورد نیاز سیستم خودکانونی را با دقت بسیار بالا و سرعت زیاد اعمال کند[۴]. سیگنال‌های دریافتی از مدار تقویت آشکار ساز با استیج به صورت لوپ بسته ارتباط برقرار می‌کند. تصویر تشکیل شده قبل از آشکارساز فوتونی چهارتایی با تغییرات فاصله‌ی سطح فوتورزیست تا objective lens به صورت شکل شماره ۶ می‌باشد.



شکل ۶: فاصله‌ی سطح فوتورزیست از نقطه‌ی کانونی objective lens الف. ۱۰+ میکرومتر ب. در نقطه کانونی ج. ۱۰- میکرومتر

نتیجه‌گیری

سیستم خودکانونی معرفی شده با دقت ۱۳۰ نانومتر و دامنه دینامیکی ۲۰ میکرومتر می تواند نیازهای صنعتی ساخت مدارهای مجتمع نوری را به خوبی برطرف نماید. این سیستم خودکانونی سرعت بالایی داشته و بر بستر سخت‌افزار عمل می‌کند و همچنین به راحتی قابلیت تطابق با سیستم‌های تصویربرداری اپتیکی را دارا بوده و انعطاف پذیری زیادی در قابلیت تغییر دقت و دامنه دینامیکی آن با توجه به نیاز مورد نظر، وجود دارد.

مرجع‌ها

[۱] بحرودی، ابراهیم و موسویان، علی و لطیفی، حمید،۱۳۸۹،شبیه سازی و ساخت سیستم خود کانونی شونده لیزری بر پایه ساختار میکروسکوپ لیزری هم کانونی،سومین کنفرانس مهندسی فوتونیک ایران،کرمان،https://civilica.com/doc/۱۰۵۶۹۳

[۲] Cohen, D.K., Gee, W.H., Ludeke, M. and Lewkowicz, J., ۱۹۸٤. Automatic focus control: the astigmatic lens approach. *Applied optics*, *23*(٤), pp.٥٦٥-٥٧٠.

[Downloaded from opsi.ir on 2026-11-05]

[۳] Bai, Z. and Wei, J., ۲۰۱۸. Focusing error detection based on astigmatic method with a double cylindrical lens group. *Optics & Laser Technology*, *106*, pp.۱٤٥-۱٥۱.

[٤] Kim, D.I., Rhee, H.G., Song, J.B. and Lee, Y.W., ۲۰۰۹, August. High-speed and precision auto-focusing system for direct laser lithography. In *Optical Manufacturing and Testing VIII* (Vol. ۷٤۲٦, p. ۷٤۲٦۱۰). International Society for Optics and Photonics.

[Downloaded from opsi.ir on 2026-11-05]