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

شبیه‌سازی و ساخت تزویجگر سمتی به روش لیتوگرافی نگاشت مستقیم لیزری

حسین حیدری زفره[۱]، راضیه طالبی[۱و۲]

[۱]دانشکده فیزیک، دانشگاه اصفهان، اصفهان [۲]گروه اپتیک کوانتومی، دانشکده فیزیک، دانشگاه اصفهان
h.heidaryzefreh@sci.ui.ac.ir, r.talebi@sci.ui.ac.ir

چکیده – در این مقاله، ساخت تزویجگرهای سمتی بر پایه‌ی ماده‌ی پلیمری SU-8 مورد بررسی قرار گرفته است. به منظور یافتن پارامترهای بهینه تزویجگر سمتی از نرم‌افزار شبیه‌سازی Optiwave استفاده شده است. برای ساخت تزویجگر سمتی از روش لیتوگرافی نگاشت مستقیم لیزری استفاده شده است. تزویجگر سمتی از دو موجبر یکسان و نزدیک به هم تشکیل شده است. به واسطه‌ی جفت‌شدگی میدان‌های میرا مدهای منتشر شده در هریک از موجبرها، انرژی می‌تواند میان دو موجبر انتقال یابد. در این مقاله، جفت‌شدگی نور بین دو موجبرِ تزوجیگر سمتی نیز مورد بررسی قرار گرفته است. از تزویجگرهای سمتی می‌توان به عنوان فیلترهای نوری، مدولاتور شدت و سوئیچ‌های نوری استفاده کرد.

کلید واژه- تزویجگر سمتی، جفت‌شدگی نور، لیتوگرافی، ماده‌ی پلیمری SU-8 ، نگاشت مستقیم لیزری.

Simulation and Fabrication of Directional Coupler by Direct Laser Lithography Method

Hossein Heidaryzefreh[1], Razieh Talebi[1,2]

[1]Department of Physics, University of Isfahan, Isfahan[2] QuantumOpticsGroup, Department of Physics, University of Isfahan
h.heidaryzefreh@sci.ui.ac.ir, r.talebi@sci.ui.ac.ir

Abstract- In this paper, the fabrication of directional coupler based on SU-8 polymer material is investigated. In order to find the optimal parameters of directional coupler, Optiwave software, which is simulation software, is used. Direct laser mapping lithography method is used to fabricate directional coupler. The directional coupler consists of two identical waveguides, which are close to each other. Energy can be transferred between two waveguides due to the coupling of evanescent fields, which are propagating in each waveguide. In this paper, the light coupling between two waveguides is also studied. The directional coupler is used as optical filters, intensity modulators and optical switches.

Keywords: Directional Coupler, Light Coupling, Lithography, SU-8 Polymer Material, Direct Write Laser.

مقدمه

تزویجگرهای سمتی از جمله ادوات هدایت کننده‌ی نور هستند که نقش مهمی در مدارهای مجتمع نوری دارند. از تزویجگرهای سمتی می‌توان به عنوان فیلترهای نوری، مدولاتور شدت، جمع کننده‌ها و سوئیچ‌های نوری استفاده کرد. از جمله اجزاء سازنده‌ی تزویجگرهای سمتی، موجبرهای نوری هستند [۱]. تزویجگر سمتی از دو موجبر یکسان تشکیل شده است که موجبرها در فاصله‌ی بسیار نزدیک به یکدیگر قرار گرفته‌اند. فضای میان دو موجبر هوا است [۲]. هنگامی که دو موجبر، در ابعادی در محدوده‌ی میکرومتری، به هم نزدیک می‌شوند، به واسطه‌ی جفت-شدگی میدان‌های میرا مدهای منتشر شده در هر یک از موجبرها، انرژی می‌تواند میان دو موجبر انتقال یابد. طول جفت‌شدگی و گاف بین دو موجبر بر میزان جفت‌شدگی نور در تزویجگر سمتی تأثیر فراوانی دارد [۳]. بنابراین، محاسبه‌ی این دو پارامتر در ساخت تزوجیگرهای سمتی اهمیت فراوانی دارد.

محاسبه‌ی نظری طول جفت‌شدگی

هنگامی که نور در یک موجبر در جهت z+ منتشر می شود، میدان الکتریکی مد منتشر شده در موجبر به صورت زیر بیان می‌شود [۳]

$$\vec{E}_i(x,y,z) = A_i(z)\vec{\varepsilon}_i(x,y), \qquad (۱)$$

که i =1, 2، $A_i(z)$ دامنه‌ی مختلط میدان الکتریکی نور در هر موجبر و $\vec{\varepsilon}_i(x,y)$ تابع توزیع فضایی آن است. جفت شدگی بین مدهای منتشر شده در دو موجبر با معادلات جفت‌شده دامنه‌ی دو مد، به صورت زیر بیان می شود [۳]

$$\frac{dA_1(z)}{dz} = -i\,\beta_1 A_1(z) + k_{12}A_2(z), \qquad (۲)$$

$$\frac{dA_2(z)}{dz} = -i\beta_2 A_2(z) + k_{21}A_1(z), \qquad (۳)$$

که z طول جفت‌شدگی، β_1 و β_2 ثابت‌های انتشار نور، به ترتیب، در موجبرهای اول و دوم هستند. همچنین، k_{12} و k_{21} ضرایب جفت‌شدگی بین مدها هستند. با توجه به یکسان بودن جنس و ضخامت موجبرها، ثابت‌های انتشار و ضرایب جفت‌شدگی یکسان در نظر گرفته می‌شود $\left(k = k_{12} = k_{21}, \beta_1 = \beta_2\right)$. همچنین، با توجه به شرایط مرزی، توان خروجی در موجبرهای اول و دوم در مکان با تعیین دامنه‌ی میدان موجبرها از معادلات جفت شده‌ی (۲) و (۳)، به ترتیب، به صورت روابط زیر بیان می‌شوند [۳]

$$P_1(z) = A_1(z)A_1^*(z) = \cos^2(kz)\, e^{-\alpha z}, \qquad (۴)$$

$$P_2(z) = A_2(z)A_2^*(z) = \sin^2(kz)\, e^{-\alpha z}. \qquad (۵)$$

در روابط (۴) و (۵)، α ضریب اتلاف نوری موجبر است و وابسته به جنس موجبر است. توان خروجی دو موجبر تابعی از طول جفت‌شدگی z و ضریب جفت‌شدگی k است. طبق روابط (۴) و (۵)، طول مورد نیاز برای انتقال کامل توان از یک موجبر به موجبر دیگر (z = L)، به صورت زیر محاسبه می‌شود [۳]

$$L = \frac{\pi}{2k} + \frac{m\pi}{k}, \qquad m = 0,1,2,\ldots \qquad (۶)$$

به ازای $m = 0$، طول اولین مرتبه‌ی انتقال کل توان از موجبر اول به موجبر دوم که طول تزویجگر (L_0) نامیده می‌شود، به دست می‌آید.

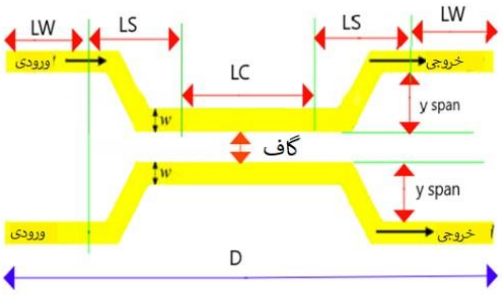
ضریب جفت‌شدگی k به صورت زیر تعریف می‌شود [۳]

$$k = \frac{2h^2 q e^{-qS}}{\beta w\left(q^2 + h^2\right)}, \qquad (۷)$$

که در این رابطه، S گاف دو موجبر، h و β، به ترتیب، ثابت های انتشار موج در راستای محورهای y و z هستند، همچنین، w ضخامت موجبر و q ضریب تضعیف نور در راستای محور y است.

شبیه‌سازی تزویجگر سمتی

در این بخش، با شبیه‌سازی تزویجگرهای سمتی با کمک نرم‌افزار Optiwave، مقدار بهینه‌ی طول جفت‌شدگی و گاف بین دو موجبر، تعیین می‌شود. تزویجگر سمتی از جنس ماده‌ی پلیمری SU-8 با ضریب شکست ۱/۵۶۹ است که بر زیرلایه SiO_2 با ضریب شکست ۱/۴۴، قرار گرفته است. در شکل ۱، نمایی از تزوجیگر سمتی و پارامترهای طراحی آن نشان داده شده است.



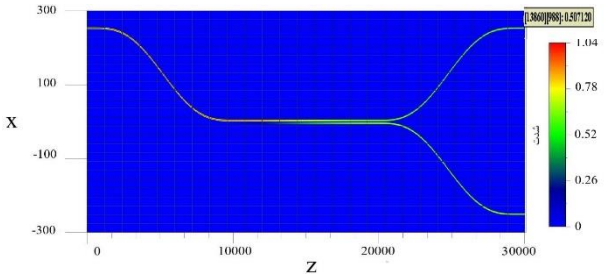
شکل ۱: نمایی از تزویجگر سمتی و پارامترهای طراحی آن در شبیه‌سازی.

در جدول ۱، مقادیر پارامترهای طراحی تزویجگر سمتی مشخص شده است که به جزء دو پارامتر که عبارتند از طول جفت‌شدگی (LC) و گاف (S) بین دو موجبر، پارامترهای دیگر طراحی، مقادیر ثابت در نظر گرفته شده‌اند.

جدول ۱- پارامترهای تزویجگر سمتی با طول جفت‌شدگی و گاف متغیر.

گاف دو موجبر (S)	طول جفت شدگی (LC)	نصف فاصله دو پایانه (yspan)	طول منحنی (LS)	طول موجبر ورودی و خروجی (LW)	ضخامت موجبر (W)
۱ تا ۲ µm	۶ تا ۱۲ mm	۲۵۰ µm	۹۵۰۰ µm	۵۰۰ µm	۶ µm

جفت‌شدگی ۵۰ :۵۰ که در مدارهای متجمع نوری اهمیت فراوانی دارد، حالت بهینه‌ی جفت‌شدگی در تزویجگر سمتی است که در شکل ۲، طرح شبیه‌سازی آن نشان داده شده است. این تزویجگر دارای طول جفت‌شدگی ۱۰ میلیمتر و گاف ۱/۵ میکرومتر است.



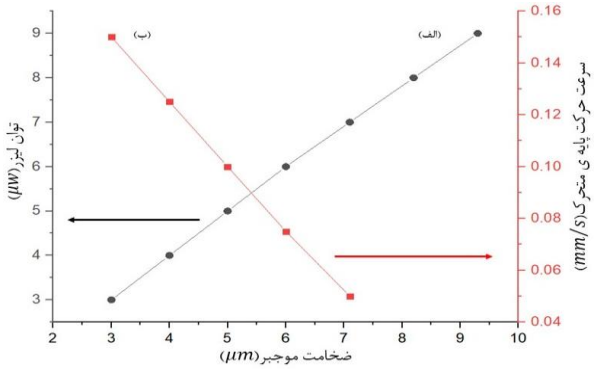
شکل ۲: شبیه‌سازی تزویجگر سمتی با جفت‌شدگی ۵۰ : ۵۰ و دارای طول جفت‌شدگی ۱۰ میلیمتر و گاف ۱/۵ میکرومتر.

ساخت تزویجگر سمتی

یکی از رایج‌ترین روش‌ها برای ساخت موجبرها روش لیتوگرافی نگاشت مستقیم لیزری است که شامل سه مرحله است. اولین مرحله، لایه‌نشانی است که برای لایه‌نشانی زیرلایه تمیز مورد نیاز است. در این پژوهش، SU-8 2005 بر زیرلایه SiO_2 به کمک دستگاه لایه‌نشانی دورانی انباشته می‌شود. با تنظیم سرعت چرخش و زمان چرخش، ضخامت ماده‌ی پلیمری SU-8 روی سطح زیرلایه کنترل می‌شود. پس از لایه‌نشانی، نمونه در دمای ۹۵ درجه سلسیوس، به مدت ۳۰ دقیقه حرارت داده می‌شود.

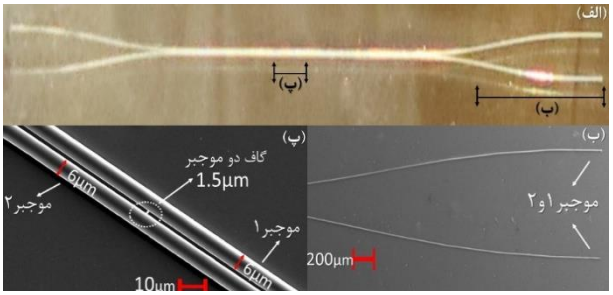
در مرحله دوم، به منظور ایجاد طرح تزویجگر سمتی روی نمونه، با سامانه نگاشت مستقیم لیزری که مجهز به لیزری با طول‌موج ۳۶۵ نانومتر است، نوردهی انجام می‌شود. پرتو لیزر پس از کانونی شدن با عدسی Olympus 40x ، به سطح لایه‌ی SU-8 می‌تابد و طرح موجبرهای تزویجگر سمتی روی نمونه نگاشته می‌شود. در چیدمان نوردهی، علاوه بر لیزر، با استفاده از پایه‌ی متحرک سه محوره با دقت ۱۰۰ نانومتر و متصل به رایانه که مجهز به نرم‌افزارLabview است، طرح تزویجگر سمتی، بر لایه SU-8 نگاشته می‌شود. در این مرحله، با تغییر شدت لیزر و سرعت حرکت پایه‌ی متحرک، ضخامت موجبر و گاف دو موجبر برای رسیدن به پارامتر بهینه، کنترل می‌شود. شکل ۳ نشان می‌دهد که هر چه شدت لیزر بیشتر می‌شود، ضخامت موجبر نیز افزایش می‌یابد. از طرفی هر چه

سرعت حرکت پایه‌ی متحرک کمتر باشد، ضخامت موجبر افزایش می‌یابد.



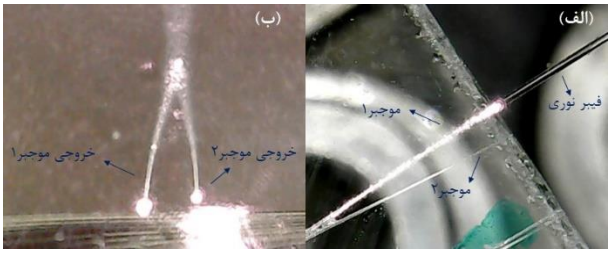
شکل ۳: (الف) نمودار تغیرات توان لیزر بر ضخامت موجبر با سرعت نگاشت ثابت ۰/۱ میلی‌متر بر ثانیه. (ب) نمودار تغیرات سرعت پایه‌ی متحرک بر ضخامت موجبر با توان ثابت ۵ میکروووات.

در مرحله آخر، نمونه در دمای ۹۵ درجه سلسیوس به مدت ۲۰ دقیقه بازپخت می‌شود. به منظور ظهور طرح نگاشته شده، نمونه‌ی بازپخت شده در حلال SU-8 Developer قرار می‌گیرد و به دلیل اینکه SU-8 فوتورزیست منفی است، بخش‌هایی از ماده‌ی پلیمری SU-8 که به آن نور تابش نشده است، حذف می‌شود و طرح تزویجگر باقی می‌ماند. شکل ۴ تزویجگر سمتی ساخته شده با پارامترهای بهینه را نشان می‌دهد.



شکل ۴: (الف) تزویجگر سمتی ساخته شده با ماده پلیمری SU-8 که دارای ضخامت ۶ μm و گاف ۱/۵ μm است. (ب) تصاویر SEM از دو شاخه تزویجگرسمتی. (پ) تصاویر SEM از گاف بین دو موجبر تزویجگر سمتی ساخته شده.

برای بررسی جفت‌شدگی نور در تزویجگر سمتی از منبع نوری با طول موج ۹۸۰ نانومتر استفاده می‌شود. در شکل ۵ (الف)، نور به کمک فیبر نوری به یکی از موجبرهای تزویجگر سمتی جفت شده است و در شکل ۵ (ب) از هر دو موجبر تزویجگر خارج شده است. بنابراین، با وجود گاف در ناحیه طول جفت‌شدگی، انتقال نور از موجبر اول به موجبر دوم رخ می‌دهد و بین دو موجبر جفت‌شدگی ایجاد می‌شود.



شکل ۵: (الف)جفت‌شدگی نور به یکی از شاخه‌های تزویجگرسمتی با ضخامت ۶ میکرومتر و گاف ۱/۵ میکرومتر. (ب) خروج نور از هر دوشاخه تزویجگر.

نتیجه‌گیری

در این مقاله، نشان داده‌ایم که با تغییر توان لیزر و سرعت نگاشت آن، می‌توان ضخامت موجبرهای تزویجگر سمتی را کنترل کرد. با تنظیم توان لیزر ۶ میکروووات و سرعت پایه‌ی متحرک ۰/۱ میلی‌متر بر ثانیه موجبر تزویجگر سمتی با ضخامت ۶ میکرومتر از جنس SU-8 2005 ساخته شد. از تزویجگرهای سمتی در مدار مجتمع نوری می‌توان به عنوان تقسیم کننده‌های شدتی و فیلترهای نوری استفاده کرد.

مرجع‌ها

[1] P. Xu, J. Zheng, J. K. Doylend, and A. Majumdar, “Low-Loss and Broadband Nonvolatile Phase-Change Directional Coupler Switches,” ACS Photonics, vol. 6, no. 2, pp. 553–557, Feb. 2019.

[2] R. C. Alferness, “Guided-Wave Devices for Optical Communication,” IEEE Journal of Quantum Electronics, vol. 17, no. 6. pp. 946–959, 1981.

[3] R. G. Hunsperger, Integrated Optics. New York, NY: Springer New York, 2009