

ساخت ماسک لیتوگرافی موجبر ماخ – زندر به کمک جاروب لیزری

امیرحسین شهبازی^۱، محمد آزاده^۲، خسرو معدنی‌پور^۳، عطا... کوهیان محمدآبادی^۱

۱. دانشکده فیزیک، دانشگاه تهران

۲. دانشکده علوم کامپیوتر و ریاضیات، دانشگاه تهران

۳. آزمایشگاه اندازه‌گیری اپتیک، دانشگاه صنعتی امیرکبیر

۴. پژوهشکده اپتیک، لیزر و فوتونیک، دانشگاه صنعتی امیرکبیر

چکیده – در این مقاله به نحوه ساخت ماسک لیتوگرافی یک به یک جهت تولید انواع موجبرها و بطور خاص موجبر ماخ-زندر در بستر الکترواپتیک پرداخته‌ایم. برای این کار ابتدا روی زیرلایه‌ای از جنس شیشه، لایه نازکی از مس لایه‌نشانی کرده و سپس با استفاده از جاروب لیزری طرح‌واره موجبر ماخ – زندر روی آن ایجاد می‌گردد. لیزر مورد استفاده از نوع دیودی با طول موج 405nm و توان 65mW می‌باشد. پهنای کندی به ازای ضخامت لایه‌نشانی شده 100nm، 8.5μm می‌باشد. زاویه میان شاخه‌های ایجاد شده در اتصال Y ماسک ماخ – زندر 2.8° در نظر گرفته شده است.

کلید واژه: جاروب لیزری، لایه نازک مس، ماسک لیتوگرافی، موجبر ماخ – زندر.

Constructing Photomask for Mach – Zehnder Waveguide using Laser Scanning

Amir Hossein Shahbazi¹, Mohammad Azadeh², Khosrow Madani Pour^{3, 4}, Ataollah Koochian Mohammad Abadi¹

1. Faculty of Physics, University of Tehran

2. Faculty of Computer Science, University of Tehran

3. Optical Measurement Laboratory, Amirkabir University of Technology

4. Optic, Laser and Photonic Research Group, Amirkabir University of Technology

Abstract- In this paper we describe a technique to construct a photomask which is used for Mach – Zehnder waveguide. For this goal, a copper thin-film on glass substrate was deposited. Then with laser scanning ablation, the pattern of Mach – Zehnder waveguide is created on the sample. A diode laser with wavelength of 405nm and total power of 65mW was used. The width of ablation is 8.5μm for a thin-film with a thickness of 100nm. The angle of Y junction is 2.8°.

Keywords: Copper Thin-Film, Laser Scanning, Photomask, Mach – Zehnder waveguide.

۱- مقدمه

موجبرهای نوری کاربرد گسترده‌ای در مخابرات و صنایع وابسته به اپتیک و الکترواپتیک دارد [۱]. ساخت موجبرهای نوری در بستر بلورهای الکترواپتیک از روش‌های رایج کنترل سیگنال‌های نوری در بستر فیبر است [۲]. بسترهای الکترواپتیک به شرایط محیطی واکنش نشان داده و به این ترتیب توانایی تغییر خواص اپتیکی سیگنال در موجبر الکترواپتیک وجود دارد [۳].

یکی از روش‌های پیاده‌سازی الگوی موجبرهای الکترواپتیک، طرح‌واره‌ی تداخل‌سنج ماخ - زندر است [۴]. به‌طور معمول به کمک روش‌های لیتوگرافی و ماسک‌های استاندارد، الگوی تداخل‌سنج روی بستر الکترواپتیک پیاده‌سازی می‌گردد. در این مقاله روشی برای ساخت ماسک‌های خاص مانند موجبر ماخ - زندر به کمک جاروب لیزری و کندگی حاصل از آن ارائه می‌گردد.

۲- مبانی تئوری

در مبانی تئوری ساخت ماسک اپتیکی به کمک جاروب لیزری، باید اثر کندگی لیزری (Laser ablation) لایه نازک را برای لیزر پالسی و پیوسته مورد بررسی قرار داد.

۱-۲- فرمول‌بندی کندگی لیزر پالسی

در لیزرهای پالسی دو پارامتر زمانی پهنای پالس و نرخ تکرار در کندگی نقش اساسی دارند [۵]، [۶]. انرژی حاصل از هر پالس از انتگرال زمانی روی توان خروجی بدست می‌آید:

$$\int_0^{t_p} P_{out} dt = P_{out} t_p = E_0 \quad (1)$$

اگر فرض کنیم که برای تمامی پالس‌ها، در مدت زمان t_p (پهنای پالس)، توان خروجی P_{out} ثابت باشد، انرژی هر پالس مقدار ثابت E_0 را خواهد داشت. اگر انرژی فوق به نمونه‌ای بتابد خواهیم داشت:

$$\eta E_0 = \iint_{-\infty}^{+\infty} F_0 \exp\left(-\left(\frac{x^2}{2\sigma_x^2} + \frac{y^2}{2\sigma_y^2}\right)\right) dx dy \quad (2)$$

که η بازده جذب، F_0 بیشینه شار دریافتی نمونه، σ_x و σ_y نیم پهنای باریکه در دو مقطع عمودی و افقی است. با انتگرال‌گیری برای شار در مختصات (x, y) خواهیم داشت:

$$F(x, y) = \frac{\eta E_0}{2\pi\sigma_y\sigma_x} \exp\left(-\left(\frac{x^2}{2\sigma_x^2} + \frac{y^2}{2\sigma_y^2}\right)\right) \quad (3)$$

حال در صورتی که باریکه لیزر متقارن باشد، می‌توان نوشت:

$$\sigma_y = \sigma_x = \sigma \Rightarrow \left(\frac{x^2}{2\sigma_x^2} + \frac{y^2}{2\sigma_y^2}\right) = \frac{r^2}{2\sigma^2} \quad (4)$$

اگر فرض کنیم کندگی تا مرز شعاع r رخ دهد، شار در مرز باید شار آستانه یا F_{th} باشد. به این ترتیب برای قطر کندگی داریم [۷]:

$$D = 2\sigma \sqrt{2\ln\left(\frac{\eta E_0}{2\pi\sigma^2 F_{th}}\right)} = 2\sigma \sqrt{2\ln\left(\frac{E_0}{E_{th}}\right)} \quad (5)$$

با توجه به رابطه بالا انرژی آستانه $E_{th} = \frac{2\pi\sigma^2 F_{th}}{\eta}$ بدست می‌آید. به ازای انرژی آستانه در رابطه (۵) شعاع کندگی صفر خواهد بود و انرژی بیشتر، شعاع کندگی بزرگتر از صفر را ایجاد خواهد کرد.

۲-۲- فرمول‌بندی کندگی لیزر پیوسته

عرض کندگی حاصل از تابش لیزر پیوسته در راستای عمود بر جهت حرکت (جاروب)، بستگی به مدت زمان تابش موثر بر یک مقطع خاص خواهد داشت. با فرض جابجایی با سرعت V و در راستای y خواهیم داشت:

$$\eta P_0 = \iint_{-\infty}^{+\infty} I_0 \exp\left(-\left(\frac{x^2}{2\sigma_x^2} + \frac{y^2}{2\sigma_y^2}\right)\right) dx dy$$

$$\Rightarrow \eta P_0 = 2\pi I_0 \sigma_y \sigma_x \text{ و } I_0 = \frac{\eta P_0}{2\pi\sigma_y\sigma_x} \quad (6)$$

با توجه به رابطه (۶)، شدت در مختصات (x, y) عبارت‌است از:

$$I(x, y) = \frac{\eta P_0}{2\pi\sigma_y\sigma_x} \exp\left(-\left(\frac{x^2}{2\sigma_x^2} + \frac{y^2}{2\sigma_y^2}\right)\right) \quad (7)$$

برای محاسبه شار دریافتی در مقطع $y = y_0$ باید روی زمان تابش انتگرال گرفته شود:

$$F(x, y) = \int_{-T}^T I(x, y) dt = \frac{\eta P_0}{2\pi\sigma_y\sigma_x} \exp\left(-\left(\frac{x^2}{2\sigma_x^2}\right)\right) \int_0^T 2 \exp\left(-\left(\frac{(Vt)^2}{2\sigma_y^2}\right)\right) dt \quad (8)$$

برای محاسبه انتگرال زمانی در رابطه (۸) باید تغییر متغیرهای $\tau = \frac{Vt}{\sqrt{2}\sigma_y}$ و تبدیل حد بالای انتگرال $T \rightarrow \frac{VT}{\sqrt{2}\sigma_y}$ انجام گردد. به این ترتیب برای شار خواهیم داشت:

$$F(x, y) = \frac{\eta P_0}{2\sqrt{\pi}V\sigma_x} \exp\left(-\left(\frac{x^2}{2\sigma_x^2}\right)\right) \operatorname{erf}\left(\frac{VT}{\sqrt{2}\sigma_y}\right) \quad (9)$$

در این عبارت منظور از $\operatorname{erf}(\alpha)$ ، تابع خطا (Error Function) است که به ازای $\alpha = 0$ ، صفر و برای $\alpha \rightarrow \infty$

مقدار یک را خواهد داشت. با معکوس سازی عبارت (۹) برای x (پهنای کندگی) داریم:

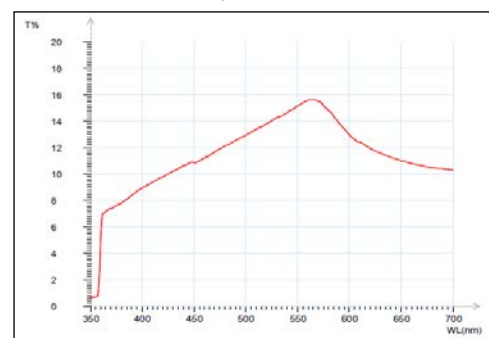
$$D = \sigma_x \sqrt{2 \ln \left(\frac{\eta P_0}{2\sqrt{\pi} V \sigma_x F_{th}} \operatorname{erf} \left(\frac{VT}{\sigma_y} \right) \right)}$$

$$= \sigma_x \sqrt{2 \ln \left(\frac{P_0}{P_{th}} \right)} \quad , \quad P_{th} = \frac{2\sqrt{\pi} V \sigma_x F_{th}}{\eta \operatorname{erf} \left(\frac{VT}{\sigma_y} \right)} \quad (10)$$

که در آن D پهنای کندگی خواهد بود. در عبارت اخیر اگر فرآیند بی‌دررو باشد، تابع خطا در بینهایت محاسبه می‌شود و مقدار واحد اختیار می‌کند. در این حالت عبارت توان آستانه مشابه انرژی آستانه در لیزر پالسی خواهد بود. با این حال در واقعیت این فرض به دلیل رسانش و پخش گرمایی عملاً صحیح نیست و زمان در معادله (۱۰) غیر بینهایت است ولی برای ساده‌سازی می‌توان تابع خطا را یک در نظر گرفت [۸].

۳- چیدمان تجربی

برای جاروب لیزری از یک چیدمان آزمایش شامل لیزر 65mW با طول موج 405nm و یک تیغه شیشه‌ای با ابعاد 0.2×20×20mm به عنوان باریکه‌شکن (برای بررسی بازتاب سطح و کانونی نمودن باریکه روی لایه‌نازک) و یک لنز با فاصله کانونی 7.5mm و قطر دهانه‌ی 5mm برای کانونی نمودن باریکه لیزر، استفاده شد. ماسک خام شامل لایه نازک مس با ضخامت 100nm و روی بستر شیشه (لام) می‌باشد. از دلایل استفاده از لایه نازک مس می‌توان به جذب بالای آن در طول موج‌های مرز آبی و ماوراء بنفش (در لایه نازک با ضخامت‌های کم) اشاره کرد (شکل ۱).



شکل ۱: نمودار میزان عبور در طول موج‌های مختلف برای لایه نازک مس با ضخامت 100nm.

با توجه به شکل ۱، میزان عبور برای لایه نازک حدود 9% می‌باشد. باتوجه به بازتاب کمتر از 50% برای این نمونه، جذب بیش از 40% خواهد بود. به این ترتیب می‌توان ضریب بازده را معادل جذب در نظر گرفت.

به کمک رابطه (۱۰) و با شرایط جاروب لیزری (سرعت 40μm/s، پهنای باریکه حدود 2μm، شار آستانه 4J/cm²) و اعمال تقریب مطرح شده (واحد در نظر گرفتن تابع خطا) می‌توان قطر کندگی حدود 8.5μm را پیشبینی نمود.

برای ساخت طرح‌واره موجبر ماخ - زندر شرایط جدول ۱ در نظر گرفته شد.

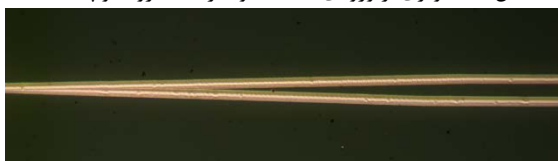
جدول ۱: مشخصات استفاده شده در جاروب لیزری.

مقدار	مشخصه
5mm	طول ورودی و خروجی
5mm	طول هر بازو
1mm	طول اتصال Y
2.8642°	زاویه گشودگی اتصال
40μm/s	سرعت جاروب

به این ترتیب به کمک یک سیستم جاروب سه محوره شرایط بالا به ترتیب زیر انجام شد:

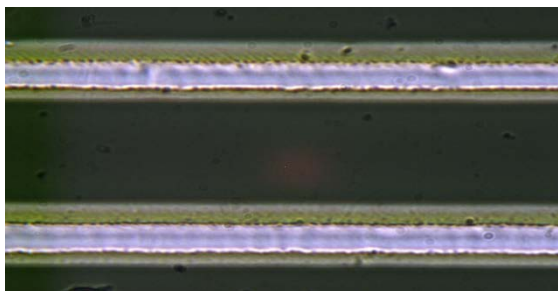
- (۱) قرارگیری در فاصله کانونی (محور Z).
- (۲) حرکت در راستای افقی با سرعت 40μm/s برای ایجاد ورودی موجبر (محور X) به طول 5mm.
- (۳) حرکت همزمان در راستای افقی و عمودی برای ایجاد شاخه اول اتصال Y ورودی (محور X و Y) به طول 1mm و عرض 50μm.
- (۴) حرکت در راستای افقی برای ایجاد بازوی اول (محور X) به طول 5mm.
- (۵) حرکت همزمان در راستای افقی و عمودی برای ایجاد شاخه اول اتصال Y خروجی (محور X و Y) به طول 1mm و عرض 50μm.
- (۶) حرکت همزمان در راستای افقی و عمودی برای ایجاد شاخه دوم اتصال Y خروجی (محور X و Y) به طول 1mm و عرض 50μm.
- (۷) حرکت در راستای افقی برای ایجاد بازوی دوم (محور X).
- (۸) حرکت همزمان در راستای افقی و عمودی برای ایجاد شاخه دوم اتصال Y ورودی (محور X و Y) به طول 1mm و عرض 50μm.
- (۹) قرارگیری در خارج از کانون (محور Z) و انتقال به محل اشتراک خروجی و اتصال Y (محور X) به ارتفاع 1mm- و طول 7mm.

شکل ۴: تصویری از ورودی ماسک موجبر با میکروسکوپ 100x.



شکل ۵: نمایی از اتصال Y ورودی ماسک با میکروسکوپ 10x.

به عنوان جمع‌بندی این نکته قابل ذکر است که روش معرفی شده قابلیت ایجاد طرحواره‌های متنوع را دارد. همچنین با توجه به کنترل نرم‌افزاری جابجاگر سه بعدی به کمک کد رایانه‌ای، پارامترهای مختلف در آن دیده شده و محدود به شرایط معرفی شده نیست.



شکل ۶: نمایی از بازوهای ماسک با فاصله‌ی 50μm و ضخامت 8.5μm با میکروسکوپ نوری 100x.



شکل ۷: نمایی از اتصال Y خروجی ماسک با میکروسکوپ 10x.

سپاسگزاری

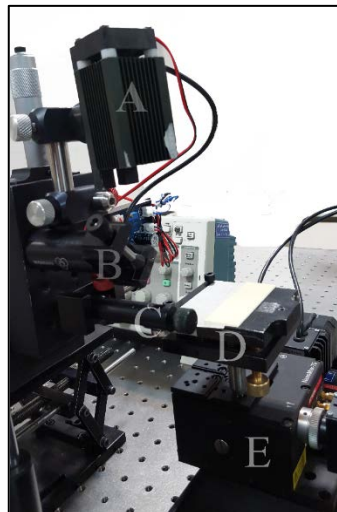
از تمامی اعضای آزمایشگاه پژوهشی لیزر دانشکده فیزیک دانشگاه تهران و آزمایشگاه اندازه‌گیری اپتیکی پژوهشکده اپتیک، لیزر و فوتونیک دانشگاه صنعتی امیرکبیر که نهایت همکاری را با این گروه تحقیقاتی داشته‌اند، خالصانه سپاسگزاریم.

مراجع

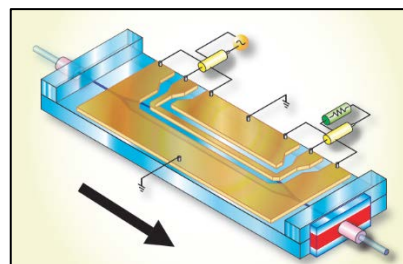
- [1] E. L. Wooten, K. M. Kissa, A. Yi-Yan, E. J. Murphy, D. a. Lafaw, P. F. Hallemeier, D. Maack, D. V. Attanasio, D. J. Fritz, G. J. McBrien, and D. E. Bossi, "A review of lithium niobate modulators for fiber-optic communications systems," IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron., vol. 6, no. 1, pp. 69-82, 2000.
- [2] W.-C. Chang, C.-Y. Sue, C.-H. Ko, M.-Y. Hsun, L.-Y. Chang, and H.-Y. Liu, "Ni:LiNbO₃ Mach-Zehnder modulators with a combinational type waveguide structure," vol. 20, no. 6, pp. 364-367, 1999.
- [3] SUMITOMO OSAKA CEMENT CO., "Application Note for LN Modulators," 2007.
- [4] G. Singh, R. P. Yadav, and V. Janyani, "Ti indiffused Lithium Niobate (Ti:LiNbO₃) Mach-Zehnder interferometer all optical switches: A review," New, Adv. Technol., pp. 311-322, 2007.
- [5] M. Hashida, A. F. Semerok, O. Gobert, G. Petite, Y. Izawa, and J. F.- Wagner, "Ablation threshold dependence on pulse duration for copper," in Applied Surface Science, 2002, vol. 197-198, pp. 862-867.
- [6] M. Stafe, I. Vlădoiu, C. Neguțu, and I. M. Popescu, "Experimental investigation of the nano-second laser ablation rate of aluminum," Rom. Rep. Phys., vol. 60, no. 3, pp. 789-796, 2008.
- [7] J. Jandeleit, A. Horn, R. Weichenhain, E. . Kreutz, and R. Poprawe, "Fundamental investigations of micromachining by nano- and picosecond laser radiation," Applied Surface Science, vol. 127-129, pp. 885-891, 1998.
- [8] H. Sonnenberg, "Laser-scanning parameters and latitudes in laser xerography," Appl. Opt., vol. 21, no. 10, pp. 107-124, 1982.

۱۰) حرکت در راستای افقی برای ایجاد خروجی ماسک (محور X) به طول 5mm.

۱۱) قرارگیری در حالت خارج از کانون برای اتمام کندگی (محور Z) -1mm.



شکل ۲: نمایی از چیدمان تجربی: لیزر (A)، باریکه شکن (B)، لنز کانونی‌کننده (C)، نگهدارنده نمونه (D)، جابجاگر سه محوره (E).



شکل ۳: چگونگی کارکرد مدولاتور (موجبر آبی و الکترون طلایی) ماخ - زندر به همراه نمایی از اتصال فیبر ورودی و خروجی [۳].

۴- جمع‌بندی و نتیجه‌گیری

به کمک جاروب لیزری روی لایه نازک مس طرح‌واره ماسک موجبر ماخ - زندر ایجاد شد. این ماسک به طور میانگین دارای پهنای خط $8.5 \pm 0.3 \mu\text{m}$ و دارای زاویه اتصال Y 2.89° می‌باشد که در مراجع مختلف برای ساخت مدولاتور مخابراتی مناسب است [۱]. شکل ۴ تا شکل ۷ تصاویر ماسک ایجاد شده را زیر میکروسکوپ نشان می‌دهند.

