بیست و یکمین کنفرانس اپتیک و فوتونیک ایران
و هفتمین کنفرانس مهندسی و فناوری فوتونیک ایران
۲۳ تا ۲۵ دی ماه ۱۳۹۳، دانشگاه شهید بهشتی

تعیین کیفیت تحریر لیزری برای ساخت ماسک اپتیکی به کمک تابع انتقال مدولاسیون

امیر حسین شهبازی[۱]، خسرو معدنی پور[۲و۳] و عطا ا... کوهیان[۱]
۱- دانشکده فیزیک - دانشگاه تهران
۲- آزمایشگاه اندازه گیری اپتیکی - دانشگاه صنعتی امیر کبیر
۳- پژوهشکده اپتیک، لیزر و فوتونیک - دانشگاه صنعتی امیرکبیر

چکیده- یکی از روش‌های لیتوگرافی، جاروب لیزری است. این روش همچنین در ساخت ماسک اپتیکی کاربرد دارد. در مقاله پیش‌رو روشی برای تعیین کیفیت ماسک اپتیکی به کمک تابع انتقال مدولاسیون ارائه می‌گردد. برای ساخت ماسک از لایه نازک اکسید مس که جذب بالایی در طیف مرئی و فرابنفش دارد، به همراه جاروب لیزر پرتوان ۵۳۲nm استفاده شد. همچنین تصویر ماسک به کمک میکروسکوپ ذخیره و بعد از تصحیح آن و تبدیل فوریه ، تابع انتقال مدولاسیون تشکیل و معیاری از کیفیت بدست می‌آید.

کلید واژه- تابع انتقال مدولاسیون، جاروب لیزری، لایه نازک مس و ماسک اپتیکی.

Quality Determination of Laser Scanning in Optical Mask Construction by Modulation Transfer Function

Amir Hossein Shahbazi[۱], KhosrowMadani Pour[۲,۳], Ataollah Koohian[۱]
۱- Faculty of Physics - University of Tehran
۲-Optical Measurement Laboratory -Amirkabir University of Technology
۳- Optics, Laser & Photonic Research Group - Amirkabir University of Technology

Abstract- Laser scanning is one of the methods used in Lithography. It's also usefull in optical masks construction. In this paper a method for quality determination of optical masks is presented. The method is based on Modulation Transfer Function (MTF). In order to construct an optical mask, a copper thin film (with high absorption in visible and UV spectra) and a high power ۵۳۲nm scanning laser is utilized. Finialy MTF is formed using Fourier transform of the mask image which could be interpreted as a qulity factor.

Keywords: Modulation transfer function, laser scanning, copper thin film, and optical mask.

[Downloaded from opsi.ir on 2026-10-31]

این مقاله در صورتی دارای اعتبار است که در سایت www.opsi.ir قابل دسترسی باشد

۱- مقدمه

ماسک اپتیکی کاربردهای متنوعی در لیتوگرافی مهندسی اپتیک دارد. روش‌های متنوعی برای ساخت ماسک اپتیکی وجود دارد که جاروب لیزری یکی از این روش‌ها است[۱]. جاروب لیزری بر اساس دو دسته برهمکنش نور و ماده دسته بندی می‌شود؛ روش اول به کمک فوتورزیست و پرداخت آن پیاده سازی می‌شود و روش دوم به کمک لایه نازک فلزی و کندگی (کند و سوز[۱]) و یا اکسید شدن لیزری میسر می‌گردد[۲], [۳]. لایه نازک کروم یکی از موارد پرکاربرد در ساخت ماسک به کمک جاروب لیزری است[۴]. این لایه در تابش لیزر UV اکسید شده و بعد از یک سلسله عملیات تکمیلی ماسک مورد نظر را تشکیل می‌دهد. این روش محدودیت‌هایی نیز دارد که از جمله آن می‌توان به مشابهت در پیاده سازی با فوتورزیست منفی[۲] اشاره کرد. انتخاب دیگر این دسته از روش‌های ساخت ماسک، لایه نازک مس است که برای ساخت ماسک‌های خطی (شکاف و توری) ایده‌آل است[۵]. این روش به دلیل استواری بر کندگی، محدودیت‌هایی در ابعاد خطوط، ضخامت ماسک و غیره دارد که اهمیت معرفی معیارهای کیفیت ماسک را دوچندان می‌کند. در این مقاله به معرفی روش جدید و ساده در ساخت ماسک اپتیکی به همراه چگونگی تعیین کیفیت آن می‌پردازیم.

۲- مبانی نظری

یکی از روش‌های کیفیت تصویر سازی، اندازه‌گیری تابع انتقال اپتیکی یا Optical Transfer Function (OTF) المان اپتیکی است. این روش برای المان‌هایی همچون لنزها، توری‌ها و تیغه‌ها کاربرد فراوانی دارد. OTF در فضای فرکانس تعریف می‌شود و از دو بخش انتقال مدولاسیون (MTF) و انتقال فاز (PTF) تشکیل شده است[۶].

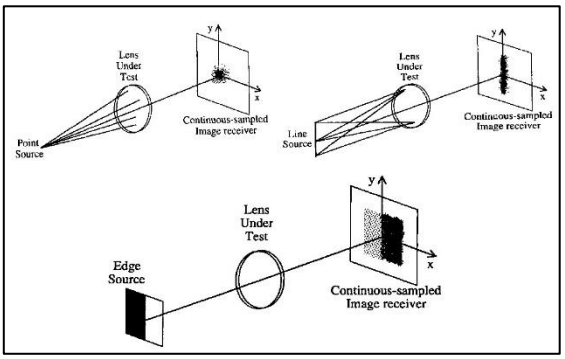
$$i(x,y) \Rightarrow o(x,y) \qquad (۱)$$

$$I(\nu,\mu) = FT\{i(x,y)\}, I(\nu,\mu) = FT\{i(x,y)\} \qquad (۲)$$

$$I(\nu,\mu) = OTF(\nu,\mu) * O(\nu,\mu) \qquad (۳)$$

$$OTF(\mu,\nu) = MTF(\mu,\nu)e^{iPTF(\mu,\nu)} \qquad (۴)$$

در اینجا o و i نماینده طرح شدت در صفحه جسم و تصویر، O و I تبدیل فوریه آن دو و μ و ν فرکانس‌های فضایی در راستای x و y است.



شکل ۱ – چگونگی تشکیل PSF، LSF و ESF برای یک لنز آزمون از منابع نقطه‌ای، خطی و لبه‌ای.

تابع MTF که بخش حقیقی تابع OTF به شمار می‌آید، نماینده میزان وفاداری المان مورد آزمایش در فرکانس‌های فضایی مختلف است. به این ترتیب می‌توان با محاسبه آن معیاری از کیفیت المان اپتیکی را بدست آورد. هرچه میزان ابیراهی المان اپتیکی بیشتر باشد، میزان MTF آن به خصوص در فرکانس‌های بالاتر کاهش می‌یابد. روش‌های متنوعی برای تعیین کیفیت به کمک MTF وجود دارد که از جمله آن می‌توان به محاسبه به کمک تابع پخشیدگی نقطه (PSF)، پخشیدگی خط (LSF) و پخشیدگی لبه (ESF) نام برد. برای تعیین کیفیت ماسک اپتیکی باید به تشابه آن با یکی از الگوهای بالا توجه نمود. برای مثال در مورد یک ماسک به شکل روزنه، تابع پخشیدگی نقطه مورد استفاده قرار می‌گیرد. هرچه روزنه از حالت ایده‌آل (از نظر شک و تقارن و همچنین نقطه‌ای بودن و شکل لبه‌ها) دورتر باشد، MTF آن در فرکانس‌های فضایی کوچتر به صفر میل می‌کند. در اینجا تفاوت ظریفی بین MTF یک ماسک و برای مثال یک لنز وجود دارد و آن این است که در مورد لنز منبع نقطه‌ای (یا خطی و یا لبه) ایده‌آل فرض می‌شود و تصویر حاصل از آن با یک ثبات (CCD یا حسگر) با MTF مشخص (یا MTF واحد که مشابه ثبات ایده‌آل است) ثبت شده و به کمک تبدیل فوریه OTF و MTF آن

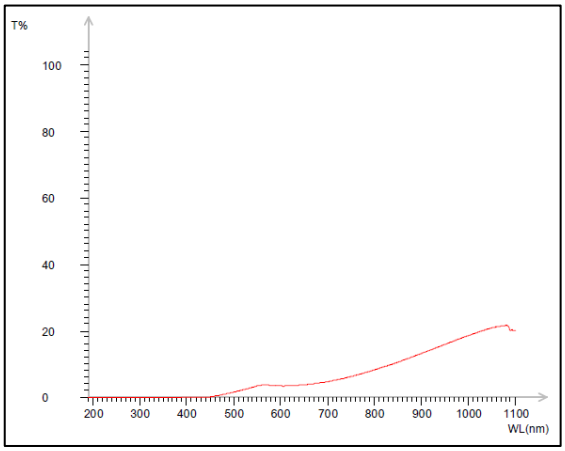
[۱] این دو واژه برگردان کلمه Ablation است.
[۲] Negative Photoresist

[Downloaded from opsi.ir on 2026-10-31]

مشخص می‌شود. در مورد ماسک اپتیکی شکل ایده‌آل آن قبل از ساخت مشخص است و تصویر خود ماسک اپتیکی به عنوان تابع انتقال آن در نظر گرفته می‌شود و تصویرسازی باید به کمک سیستم دیگری (مانند میکروسکوپ و یا SEM) انجام شود که خود دارای تابع انتقال است[۷].

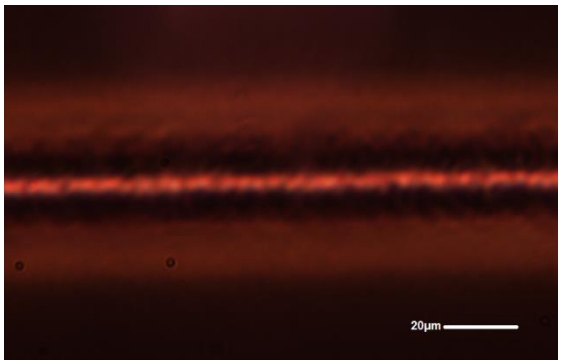
۳- شرح مراحل ساخت

برای ساخت ماسک اپتیکی از لایه نشانی مس به کمک روش‌اسپاترینگ بر روی تیغه لامل به ابعاد ۱۵x۱۵x۰.۲mm استفاده شد و لایه‌ای ۲۰۰nm از مس تشکیل شد. در هنگام فرایند لایه‌نشانی به دلیل فشار خلاء ناکافی دستگاه اسپاترینگ، وجود اکسیژن در کنار نمونه و گرم شدن نمونه معمولا لایه نازک اکسید شده و جذب آن در طول موج‌های زیر ۵۵۰nm افزایش می‌یابد. این عامل ناخواسته باعث می‌شود طیف عبوری نمونه به لایه نازک اکسید مس شباهت بیشتری یابد و محدودیت طیفی و شدتی لیزر مورد استفاده برای کندگی تا حد مناسبی مرتفع شود.



شکل ۲- طیف عبور لایه نازک اکسید مس.

برای ایجاد کندگی از لیزر هارمونیک دوم Nd:YAG ۵۳۲nm با پمپاژ دیودی (که جزء لیزرهای CW بشمار می‌آید) و توان ۱۰۰mW استفاده شد. همچنین یک قطبشگر خطی برای کاهش شدت لیزر و رساندن توان آن به حدود ۵۰mW در مسیر لیزر قرار داده شد. در نهایت به کمک یک میکرولنز با فاصله کانونی ۶mm و قطر موثر ۳mm (NA = ۰،۵) پرتوی لیزر کانونی شده و به سطح لایه نازک تابانده شد. نتیجه کندگی در تصویر میکروسکوپی شکل ۳ آمده است.



شکل ۳- بخشی از تصویر میکروسکوپ (لنز شئ ۱۰۰x) از شکاف ایجاد شده به کمک لیزر ۵۳۲nm.

۴- چگونگی تعیین کیفیت

با توجه به شکاف ایجاد شده به کمک کندگی لیزری (حدود ۸µm) روش ESF[۳] برای تعیین کیفیت مناسب به نظر می‌رسد. برای تحلیل به کمک ESF ابتدا باید آن را به پخشیدگی خط که مشابه با پخشیدگی نقطه به شکل مستقیم قابل تحلیل است، تبدیل نمود. برای این کار می‌بایست ابتدا لبه‌های شکاف (لبه چپ و راست) مشخص را مشخص نموده و سپس در مقطعی از تصویر، تابعی به آن دو برازش می‌شود. بعد از آن با مشتق گیری از تابع برازش شده، دو LSF[۴] تشکیل می‌شود و با اعمال تبدیل فوریه و محاسبه مقدار مطلق آن، MTF هر لبه جداگانه بدست می‌آید. در حالت ایده‌آل می‌باید شکل شکاف به شکل پله‌ای و تیز باشد. با اعمال مشتق روی لبه‌های ایده‌آل دو تابع دلتا خواهیم داشت تبدیل فوریه تابع دلتا واحد است. با این تحلیل خواهیم داشت[۸]:

$$O'(\mu,\nu) = 1 \quad \Rightarrow \quad I'(\mu,\nu) = OTF(\mu,\nu) \qquad (۵)$$

$$MTF(\mu,\nu) = |I'(\mu,\nu)| = |FT\{i'(x,y)\}| \qquad (۶)$$

در معادلات (۵) و (۶) منظور از O’، I’ و i’ به ترتیب تبدیل فوریه مشتق لبه ایده‌آل، تبدیل فوریه مشتق لبه مورد بررسی و مشتق لبه مورد بررسی است.

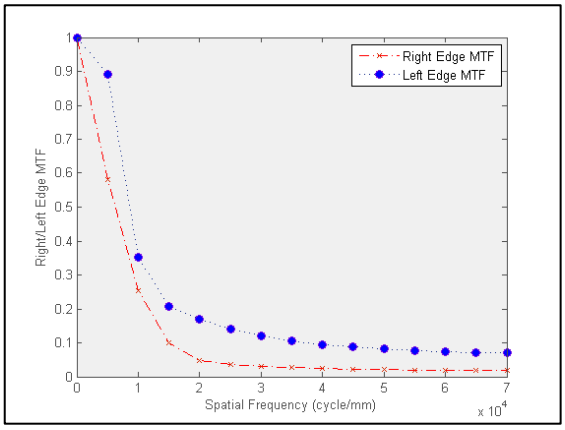
بعد از ثبت تصویر میکروسکوپی با ابعاد ۱۰۲۴x۷۶۸

[۳] Edge Spread Function
[۴] Line Spread Function

[Downloaded from opsi.ir on 2026-10-31]

pixel، مقطع میانی آن (در ستونی با مختصات ۳۸۴) مورد بررسی و تعیین کیفیت قرار گرفت. به کمک نرم‌افزار برازش Table Curve ۲D تابعی چندجمله‌ای به مقطع منتخب برازش داده شد و بعد از مشتق گیری، تبدیل فوریه آن در محیط نرم‌افزار Matlab محاسبه و برای دو لبه، MTF به ازای فرکانس‌های فضایی مختلف رسم گردید. فرکانس‌های فضایی از طریق محاسبه عکس ابعاد پیکسل (که معادل ۲۰۰nm برای هر پیکسل است) به دست آمد که محور افقی نمودار MTF را تشکیل می‌دهد.

همانطور که در شکل ۴دیده می‌شود، دو لبه چپ و راست کیفیت مشابهی ندارند و این عامل می‌تواند نشان دهنده عدم تقارن باریکه لیزر در هنگام برخورد با لایه نازک باشد.



شکل ۴- MTF محاسبه شده برای دو لبه از مقطع شکاف در مختصات ستونی ۳۸۴.

۵- نتیجه‌گیری

روش جاروب لیزری به عنوان یک روش کارامد در ساخت ماسک اپتیکی معرفی شد. همچنین لایه نازک اکسید مس به عنوان بستر مناسب برای ساخت ماسک مورد استفاده قرار گرفت. به کمک تابع انتقال مدولاسیون (MTF)کیفیت لبه‌های شکاف ایجاد شده با کندگی لیزری، مورد بررسی قرار گرفت. پیشبینی می‌شود که باریکه لیزر کمی نامتقارن بوده و میزان کیفیت لبه‌های دو طرف شکاف یکسان نیست.

سپاسگزاری

برخود لازم می‌دانیم از اعضای آزمایشگاه پژوهشی اپتیک دانشکده فیزیک دانشگاه تهران و آزمایشگاه مرکزی دانشگاه صنعتی امیرکبیر تشکر به عمل آوریم و برای این عزیزان آرزوی توفیق روز افزون داریم.

مراجع

[۱] B. J. Lin, *Optical Lithography:Here Is Why*. SPIE Press, ۲۰۱۰, pp. ۲۸۸–۳۱۹،٤٠–٤٧،۲۱۳–۳۲۰.

[۲] J. Miller and M. Béthencourt, “Laser scanning lithography (LSL) for the soft lithographic patterning of cell adhesive self assembled monolayers,” ***Wiley Intersci. Biotechnol. Bioeng.***, ۲۰۰٦.

[۳] U. Okoroanyanwu, *Chemistry and Lithography*. USA: SPIE Press, **John Wiley & Sons Inc.**, ۲۰۱۰, p. ٦٥٩.

[٤] a G. Poleshchuk, E. G. Churin, V. P. Koronkevich, V. P. Korolkov, a a Kharissov, V. V Cherkashin, V. P. Kiryanov, a V Kiryanov, S. a Kokarev, and a G. Verhoglyad, “Polar coordinate laser pattern generator for fabrication of diffractive optical elements with arbitrary structure.,” ***Appl. Opt.***, vol. ۳۸, no. ۸, pp. ۱۲۹٥–۳۰۱, Mar. ۱۹۹۹.

[٥] O. Choupanian, A. Shahbazi, K. Madanipour, and A. Koohian, “Fabrication of Lithography Mask on Copper Thin-Film by Laser Direct Writing Method,” ***۳rd Iran. Conf. Laser Their Appl.***, ۲۰۱٤.

[٦] G. Boreman, *Modulation transfer function in optical and electro-optical systems*. **SPIE Press**, ۲۰۰۱, pp. ٤–۷،۷–۱٥،٦۹–۷٦.

[۷] A. H. Shahbazi, K. Pour, A. Koohian, M. Abadi, and E. Pazouki, “Investigating the Defocusing Phenomenon in CCD MTF Measurement Based On PSF Technique,” in ***۲۰th Iranian Conference on Optics and Photonics***, ۲۰۱۳, pp. ٥٨٥–٥٨٨.

[۸] S. Najafi and K. Madanipour, “Measurement of the modulation transfer function of a charge-coupled device array by the combination of the self-imaging effect and slanted edge method.,” ***Appl. Opt.***, vol. ٥۲, no. ۱۹, pp. ٤۷۲٤–۷, Jul. ۲۰۱۳.

[Downloaded from opsi.ir on 2026-10-31]