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

طراحی و ساخت توری پراش چنگالی‌شکل و تولید گرداب نوری حامل تکانه زاویه‌ای

ابوالفضل حسینی[۱]، محمدرضا رشیدیان وزیری[۲*]، ابراهیم غلامی حاتم[۱]، فاطمه عزیزپور[۳]، رضا آزموده سرودی[۴]

[۱] گروه فیزیک، دانشکده علوم پایه، دانشگاه ملایر، ایران

[۲] پژوهشکده‌ی فوتونیک و فناوری‌های کوانتومی، علوم و فنون هسته‌ای، تهران، ایران

mrashidian@aeoi.org.ir

[۳] دانشکده فیزیک، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران، ایران

[۴] مرکز ملی علوم و فنون لیزر ایران، هشتگرد، ایران

چکیده - در این کار به گزارش طراحی، ساخت و مشخصه‌یابی توری‌های پراش چنگالی شکل با فاصله خطوط میکرومتری پرداخته شده است. روشی ساده برای ساخت توری‌ها ارائه شده و با بررسی پارامترهای ساخت، روش بهینه سازی شده است. چیدمان نوری مورد استفاده برای تولید گرداب نوری از توری‌های چنگالی شکل و نتایج تولید گرداب نوری ارائه شده است. نتایج بیانگر آن است که با روش ارائه شده در این کار، فاصله خط بهینه برابر با ۱۷۵ میکرومتر بوده و با توری حاصل از آن می‌توان گرداب نوری با کیفیت مناسب را تولید کرد.

کلید واژه- توری اپتیکی، گرداب نوری، میکروساختار.

Design and preparation of fork-shaped diffraction grating and generation of optical vortex carrying orbital angular momentum

Abolfazl Hosseini[1], Mohammad Reza Rashidian Vaziri[2*], Ebrahim Gholami Hatam[1], Fatemeh Azizpour[3], Reza Azmoodeh Sorodi

[1] Department of Physics, Faculty of Science, Malayer University, Malayer, Iran
[2] Photonics and Quantum Technologies Research School, Nuclear Science and Technology research Institute, Tehran, Iran
mrashidian@aeoi.org.ir
[3] Department of Physics, Iran University of Science and Technology, Tehran, Iran
[4] Iranian National Center for Laser Science and Technology, Hashtgerd, Iran

Abstract- In this work, the report of design, preparation and characterization of fork-shaped diffraction gratings with micrometric line spacing is presented. A simple preparation method is proposed and by investigating the preparation parameters, the method is optimized. The used optical setup for generation of optical vortex from the fork-shaped gratings and the obtained results are also presented. The results show that using the proposed method, optimal line spacing is about 175 mm and the obtained grating can produce a good quality optical vortex.

Keywords: Optical grating, Optical vortex, Microstructure.

[Downloaded from www.opsi.ir on 2025-07-28]

مقدمه

تکانه زاویه‌ای قطبشی (اسپینی)، تنها نوع تکانه زاویه‌ای نیست که یک موج الکترومغناطیسی می‌تواند با خود حمل کند. فوتون همانند باقی ذرات می‌تواند حامل تکانه زاویه‌ای مداری نیز باشد. گرداب‌های نوری ویژگیهای خاصی دارند که در سال‌های گذشته کاربرد آن‌ها را در زمینه‌های نوری گوناگون به همراه داشته است. به عنوان مثال، گرداب‌های نوری به عنوان انبرک‌های نوری برای دستکاری اجسام کوچک استفاده می‌شوند . یکی از کاربردهای مهم گرداب-های نوری ویژگی ذاتی موجبری آن‌ها است. تاریکی مرکز گرداب و حلقه نور اطراف آن همچون یک موجبر با هسته دارای ضریب شکست بزرگ و غلافی با ضریب شکست کوچکتر است. این ویژگی برای کلیدزنی نوری [۱] و یا در نجوم برای هاله‌نگاری [۲] به کار گرفته می‌شود. چندین روش برای قرار دادن گرداب‌های نوری در یک پرتو پس زمینه مانند پرتو گاوسی لیزری وجود دارد. این روش‌ها شامل استفاده از مدولاتورهای فضایی نور، صفحات فاز چرخشی، آینه تغییر شکل‌پذیر و تمام‌نگاری رایانه‌ای [۳] هستند. در این کار به گزارش ساخت توری‌های پراش چنگالی شکل به روش تمام‌نگاری رایانه‌ای پرداخته شده است. توری‌های مختلف پراش با تغییر فاصله بین خطوط آماده شده و گرداب نوری تولید شده توسط آن‌ها مورد بررسی قرار گرفته است.

طراحی توری‌ها به روش تمام‌نگاری رایانه‌ای

تمام‌نگارهای رایانه‌ای با محاسبه و رسم توزیع شدت نقشهای تداخلی حاصل از برهم‌نهش یک موج تخت زاویه‌دار شده و امواج گرداب نوری بدست آمده است. مطابق با نظریه تمام‌نگاری، در صورت ساخت این تمام‌نگار، اگر باریکه موج تخت اولیه به تمام‌نگار ساخته شده برخورد کند، امواج گرداب نوری بازسازی شده و از تمام‌نگار خارج خواهند شد. موج تخت را می‌توان به شکل $E_1 = e^{-i(k_x x + k_z z)}$ و موج گرداب نوری را می‌توان به شکل ساده $E_2(r,\theta,z) = E_0 e^{il\theta} e^{-ik_z z}$ بیان کرد؛ که در آن l بیانگر بار فضایی گرداب نوری و $\theta = tg^{-1}(y/x)$ مؤلفه سمتی در دستگاه مختصات استوانه‌ای است. با استفاده از روابط مربوط به موج‌های تخت و گرداب نوری، می‌توان رابطه تداخل را به شکل زیر نوشت:

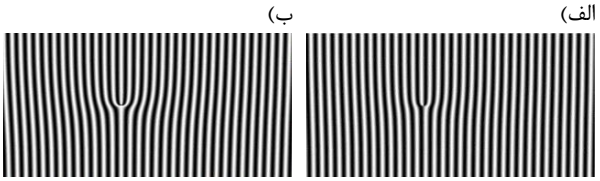
$$H = \cos\left(\frac{2\pi}{\Lambda} r\cos\theta - l\theta\right) \qquad (۱)$$

که در آن Λ فاصله بین خطوط طرح تداخلی (دوره تناوب فضایی طرح) شکل گرفته است. رابطه (۱) نشاندهنده یک تمام‌نگار دامنه‌ای است. برای تبدیل تمام‌نگار دامنه‌ای (۱) به تمام‌نگار فازی، کافی است عبارت ریاضی مربوط تمام‌نگار در آرگومان تابع نمایی مورد استفاده قرار گیرد:

$$T = e^{-iH} = e^{i\cos\left(l\theta - \frac{2\pi}{\Lambda} r\cos\theta\right)} \qquad (۲)$$

این رابطه برای تبدیل تمام‌نگار دامنه‌ای به فازی و ساخت تمام‌نگارهای رایانه‌ای در این کار مورد استفاده قرار گرفته است. بار یا مرتبه مد لاگر-گاؤسی تولیدی توسط تمام‌نگار با استفاده از مقدار عدد صحیح l تعیین می‌شود. دوره تناوب فاصله بین خطوط توری نیز با استفاده از مقدار Λ مشخص می‌شود. شکل ۱ طرح توری‌های پراش چنگالی شکل با بارهای فضایی برابر با ۱ و ۲ را نشان می‌دهد که با محاسبه و ترسیم رابطه (۳) در محیط متلب بدست آمده است. همانطور که در شکل مشخص است، تعداد شاخه‌های چنگال برابر است با مقدار بار فضایی.

[Downloaded from www.opsi.ir on 2025-07-28]



شکل ۱: تصاویر دیجیتال سطح خاکستری (الف و ب) توری‌های پراش بدست آمده به روش تمام‌نگاری رایانه‌ای برای بارهای فضایی برابر با یک و دو .

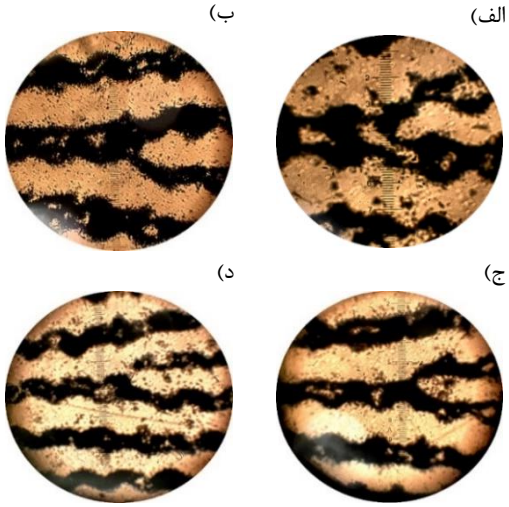
تصاویر دیجیتالی ارائه کننده تصاویر توری‌ها در شکل‌های ۱-الف و ب از نوع سطح خاکستری با مقادیر پیکسلی بین ۰ تا ۲۵۶ هستند. برای انتقال این تصاویر دیجیتال به سطح محیط‌های مادی و ساخت فیزیکی توری‌ها، باید این تصاویر به تصاویر دودویی با مقادیر پیکسلی برابر با صفر یا یک تبدیل شوند. برای اینکار باید حد آستانه‌ای را تعریف کرد، به شکلی که مقادیر کم‌تر از این حد آستانه با صفر و مقادیر بیش‌تر از آن با یک جایگزین شوند. اگر $f(x,y)$ نشاندهنده ماتریس تصویر سطح خاکستری و $g(x,y)$ نشاندهنده ماتریس تصویر دودویی معادل باشند:

$$g(x,y)=\begin{cases}1 \text{ if } f(x,y)\geq T\\ 0 \text{ if } f(x,y)<T\end{cases} \qquad (۳)$$

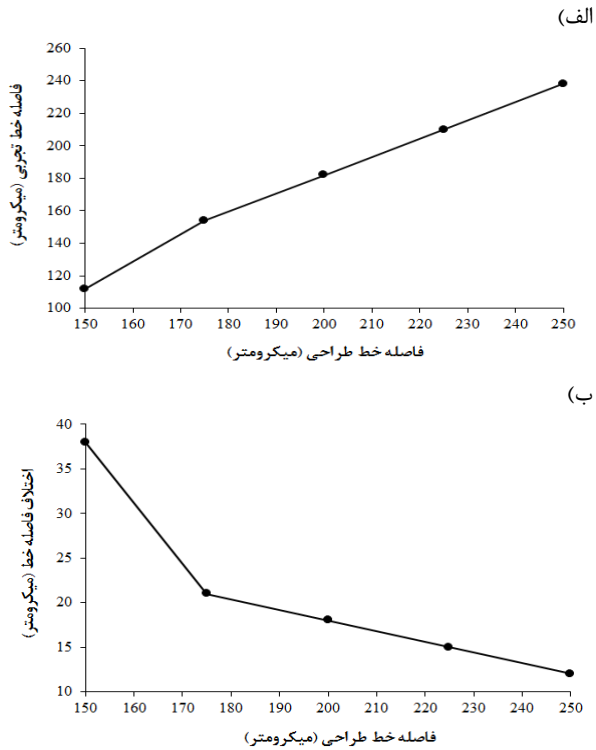
که در آن T حد آستانه است. با استفاده از این رابطه ریاضی برای تک تک پیکسل‌های تصویر، می‌توان آن را از سطح خاکستری به سطح دودویی تبدیل کرد. در این کار با آزمون و خطا حد آستانه برابر با ۰/۶ به عنوان حد مطلوبی که عرض خطوط سیاه و سفید یکسانی را تولید می‌کند مورد استفاده قرار گرفته است. در ادامه این تصاویر با پرینتر سابلمیشن با تفکیک بالا بر روی طلق‌های شفاف مناسب چاپ شده‌اند. پرینترهای سابلمیشن به شکلی گسترده در صنعت چاپ مورد استفاده قرار گرفته و نسبت به پرینترهای معمول قدرت تفکیک به مراتب بالاتری دارند.

نتایج

تصاویر میکروسکوپ نوری تهیه شده از تعدادی از توری‌ها در شکل ۲ نشان داده شده است. فاصله بین خطوط این توری‌ها از ۱۵۰ میکرومتر تا ۲۵۰ میکرومتر با گام‌های ۲۵ میکرومتری در طراحی‌ها متغیر در نظر گرفته شده است. برای بررسی انطباق فاصله خطوط بدست آمده در فاز ساخت توری‌ها با فاصله خطوط در نظر گرفته شده اولیه در طراحی‌ها، فاصله خطوط تجربی با استفاده از تصاویر میکروسکوپ نوری استخراج شده است.



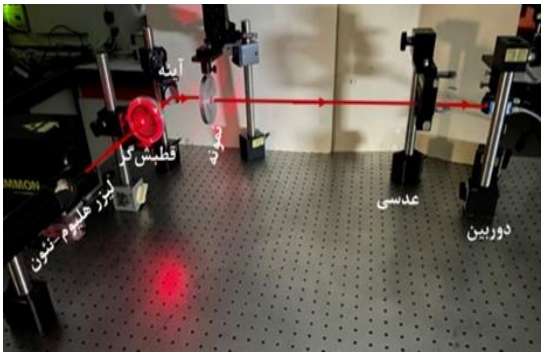
شکل ۲: تصاویر میکروسکوپ نوری توری‌های چنگالی با بار فضایی برابر با ۱ و فاصله خط برابر با الف) ۲۵۰، ب) ۲۲۵، ج) ۲۰۰ و د) ۱۷۵ میکرومتر.



شکل ۳: تفاوت فاصله خطوط در نظر گرفته شده در فاز طراحی و فاصله خطوط بدست آمده پس از ساخت توری‌های چنگالی شکل.

[Downloaded from www.opsi.ir on 2025-07-28]

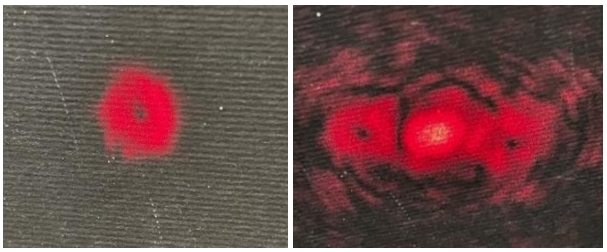
در شکل ۳ اختلاف بین فاصله خطوط در نظر گرفته شده در طراحی‌ها و فاصله خطوط بدست آمده پس از ساخت توری‌ها نشان داده شده است. عدم هماهنگی بین نرم-افزارهای چاپگر و نرم افزار دربردارنده فایل‌های گرافیکی، دلیل اصلی شکل گیری اختلاف بین فاصله خطوط طراحی و تجربی است. فاصله خطوط کم‌تر توری، بدلیل جدایی زاویه‌ای بیش‌تر مراتب پراش بعد از برخورد تابش باریکه لیزری، مطلوب است. بنابراین باید کم‌ترین فاصله خطی که قدرت تفکیک مناسبی هم در مرحله ساخت داشته باشد برای آزمایش‌های اپتیکی انتخاب شود. با در نظر داشتن این شرط، برای آزمایش‌های اپتیکی توری با فاصله خط ۱۷۵ میکرومتر انتخاب شده است. با استفاده از چیدمان تجربی نشان داده شده در شکل ۴، به بررسی گرداب‌های نوری شکل گرفته پس از پراش نور از آن‌ها پرداخته شده است. در این چیدمان از یک لیزر هلیوم-نئون (مدل Melles Griot 3225H-PC، ۱۰ میلی‌وات، ۶۳۲/۸ نانومتر) با خروجی قطبیده خطی استفاده شده است. به منظور اجتناب از رخداد اثرات گرمایی در محل توری، از یک قطبش‌گر جهت تنظیم توان فرودی استفاده شده است. نور توسط یک آینه تخت به سمت توری، که در محفظه نگه‌دارنده قرار داده شده است، هدایت می‌شود. نور پراشیده از توری توسط یک عدسی با فاصله کانونی ۷ سانتی‌متر در محل دوربین CCD تصویر شده است. تصاویر ثبت شده توسط دوربین دیجیتال به شکل برخط به رایانه منتقل شده است.



شکل ۴: چیدمان تجربی مورد استفاده برای تولید گرداب‌های نوری.

شکل ۵ طرح پراش شکل گرفته پس از برخورد باریکه لیزر به توری با فاصله خط ۱۷۵ میکرومتری و گرداب نوری مرتبه اول جدا شده از آن توسط روزنه قابل تنظیم را نشان می‌دهد. دایره پر شدت مرکزی در شکل ۵-الف، حاصل از پراش مرتبه صفر و با همان توزیع شدت نور مربوط به باریکه لیزر برخوردی به توری است. توزیع‌های شدت دایره‌ای توخالی (مدهای دوناتی یا مدهای لاگر-گاؤسی مرتبه اول) نشاندهنده گرداب‌های نوری تولید شده هستند. بارفضایی یکی از این مدها برابر با ۱- و دیگری برابر با ۱ است.

الف) ب)



شکل ۵: الف) طرح پراش از توری چنگالی شکل با فاصله خطوط برابر با ۱۷۵ میکرومتر. ب) گرداب نوری جدا شده از طرح پراش توسط یک روزنه تنظیم-پذیر.

نتیجه‌گیری

در این کار روشی ساده و قابل تکرار برای ساخت توری‌های پراش چنگالی‌شکل ارائه شده است. نتایج بیانگر آن است که با روش بکار گرفته شده در این مقاله، بهترین توری‌های برای تولید گرداب نوری با فاصله خط ۱۷۵ میکرومتر قابل حصول هستند. روش بکار گرفته شده در این مقاله را میتوان برای ساخت انواع توری‌های میکرومتری با فاصله خط بالا، نظیر توری‌های رانکی نیز بکار گرفت.

مرجع‌ها

[1] G. Molina-Terriza, L. Torner, E. M. Wright, J. J. Garcı´a-Ripoll, and V. M. Pe´rezGarcı´a, Opt. Lett. 26 (2001) 1601–1603.

[2] D. Rouan, P. Riaud, A. Boccaletti, Y. Clénet, and A. Labeyrie, I. Principle, Pub. Astron. Soc. Pacific 112 (2000) 1479- 1486.

[3] L. Yongxu, et al. *JOSA A* 36.4 (2019): 471-477.

[Downloaded from www.opsi.ir on 2025-07-28]