ساخت یک نوع کیوپلیت (QP) برای تولید پرتو چرخان

محمد یگانه[۲و۱]، علی‌محمد خزایی[۱]، سیف‌اله رسولی[۳و۱] و نازنین ایلیات[۲]

[۱] دانشکده‌ی فیزیک، دانشگاه تحصیلات تکمیلی علوم پایه زنجان، جاده گاوازنگ، زنجان
[۲] گروه فیزیک، واحد زنجان، دانشگاه آزاد اسلامی، زنجان، ایران
[۳] مرکز پژوهشی اپتیک، دانشگاه تحصیلات تکمیلی علوم پایه زنجان، زنجان

چکیده - عبور باریکه‌ی تخت با قطبشِ خاص از محیط فازی با الگوی مشخص اما نایکنواختی از ناهمسانگردی می‌تواند پرتو چرخان تولید کند. در واقع ایجاد تکینگی در الگوی قطبش پرتو می‌تواند منجر به ایجاد پرتو چرخان برای قطبش خاصی گردد. این تکینگی در محیط فازی را می‌توان با نظم‌دهی به مولکول‌های بلورمایع که دارای ناهمگنی مشخصی باشند ایجاد کرد. ابزاری که دارای این ویژگی باشد کیوپلیت (QP) نامیده می‌شود. می‌توان به این ابزار، صفحه‌ی القاگر بار توپولوژیکی روی جبهه‌ی موج با بهره‌گیری از توزیع مناسبی از جهت‌گیری مولکول‌های بلورمایع نیز نام نهاد. در این مقاله روشی تجربی برای ساخت یک نوع القاگر بار توپولوژیکی،QP، ارائه می‌شود. در این کار، با نظم‌دهی سمتی به مولکول‌های بلورمایع، یک QP با پارامتر q=1 ساخته شد. مشاهده گردید که با اعمال اختلاف پتانسیل مناسب به این قطعه، دوشکستی مورد نظر القاء شد و در نتیجه نمایه‌ی شدت نور لیزر ورودی با قطبش دایروی، از الگوی گاوسی به شکل مرکزتاریک متقارن تغییر یافت. مقادیر شیب جبهه‌ی موج این الگو توسط حسگر جبهه‌ی موج دوکانالهٔ مارهای اندازه‌گیری شد و نشان داده شد که جبهه‌ی موج نور عبوری، الگوی چرخان دارد و بار توپولوژیکی منتسب به آن ۲ است.

کلید واژه- بار توپولوژیکی، بلورمایع، پرتو چرخان، تکنیک مارپ، کیوپلیت.

Construction of a q-plate for Generating Vortex Beam

Mohammad Yeganeh[1, 2], Ali Mohammad Khazaei[1], Saifollah Rasouli[1, 3] and Nazanin Iliyat[2]

[1] Department of Physics, Institute for Advanced Studies in Basic Sciences (IASBS), Zanjan, Iran
[2] Department of Physics, Zanjan Branch, Islamic Azad University, Zanjan, Iran
[3] Optics Research Center, Institute for Advanced Studies in Basic Sciences (IASBS), Zanjan, Iran

Abstract- Propagation of a plane wave having a special polarization state through a phase plate with a spatially variable pattern of anisotropy leads to a vortex beam generation. The polarization singularity can be created with a specified pattern of liquid crystal molecules on a phase plate. Such a device contains so characteristics named q-plate (QP). In this work, we introduce an experimental method for fabrication of an electrically tunable QP with parameter q=1 in which liquid crystal molecules aligned in the azimuthal direction. By applying a suitable AC voltage on the device, we achieve to the desired value of birefringence and as a result the incident beam having a Gaussian intensity profile changed to a beam of a profile with symmetric doughnut shape. Wave-front slopes were measured with a two channel wave-front sensor based on moiré deflectometry. The result demonstrates that the wave-front of the passing beam has vortex shape with topological charge of equal to 2.

Keywords: liquid crystal, moiré technique, q-plate, topological charge, vortex beam.

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

۱- مقدمه

از سال ۱۹۹۲که پرتو چرخان توسط آلن و همکاران به‌صورت تجربی تولید شد[۱]، روش‌های مختلفی برای تولید این دسته از پرتوها پیشنهاد گردیده است که در تمامی این روش‌ها هدف، اضافه کردن یک فاز وابسته به زاویه‌ی سمتی روی صفحه‌ی عرضی پرتو نسبت به راستای انتشار آن است. سرراست‌ترین کار این است که پرتو نور را از یک صفحه‌ی فازی با الگوی فازی که وابستگی فضایی به زاویه‌ی سمتی دارد عبور دهیم[۲]. ساخت چنین صفحه‌ی فازی بسیار مشکل است و ساخت آن نیاز به ظرافت بالایی دارد و تنها برای یک طول‌موج قابل استفاده است. روش دیگر، پراش از توری‌های فازی یا دامنه‌ای است که در بخش فازی تابع عبور آنها، جمله‌ای وابسته به زاویه‌ی سمتی به‌شکل $l\varphi$ وجود داشته باشد که φزاویه‌ی سمتی و l یک عدد صحیح است. به این توری‌ها، توری‌های دارای نقص شبکه‌ای می‌گویند[۳]. روش دیگری که می‌تواند برای ایجاد پرتو چرخان به‌کار رود، استفاده از قطبش است. اگر به‌جای توری دامنه‌ای یا فازی دارای الگوی شعاعی از ساختاری استفاده کنیم که قطبش نور را در یک دور حول مرکزش به‌تناوب تغییر دهد، می‌توان نشان داد که برای ویژه حالات پایه‌ی قطبش دایروی، پرتوهای چرخان به‌صورت هم‌زمان با علامت‌های مخالف تولید می‌شوند. در اینجا علامت بارهای توپولوژیکی پرتوهای چرخان تولید شده به قطبش نور وابسته است و می‌توان با وارد کردن پرتوی با قطبش دایروی مشخص، پرتو چرخان با جهت چرخش مشخص را ایجاد نمود. قابلیت نظم‌دهی بسیار خوب بلورهای مایع در آرایش‌های مختلف فضایی به‌صورت همگن و یا ناهمگن، این قابلیت را به ما می‌دهند که بتوان به دلخواه وضعیت قطبش نور را در نقاط مختلف مقطع باریکه‌ی فرودی کنترل کرد. پیش از این ساخت سلول بلورمایع به‌منظور تولید پرتو چرخان با بار توپولوژیکی ± 2 به روش نظم‌دهی نوری انجام شده است[۴]. پرتو تولید شده دارای ویژگی‌های منحصر به‌فردی از جمله داشتن تکینگی فازی است. این ابزار، اسپین ذاتی فوتون‌های نوری را به اندازه‌حرکت مداری چرخشی (OAM) تبدیل می‌نماید. این ابزار با اهداف مختلفی از جمله تصویربرداری، طیف‌نگاری، کروناگرافی، میکروماشین‌کاری، تله‌اندازی نوری، ارتباطات کوانتومی و میکروسکوپی با تفکیک بسیار بالا ساخته شده است[۵-۷]. ساخت این وسیله جهت تولید پرتوهای چرخان با هر بار توپولوژیکی صحیح دل‌خواه نیز انجام شده است و آنرا کیوپلیت (QP) نام‌گذاری کرده‌اند[۸]. این وسیله یک تیغه‌ی نیم‌موج است که محور نوری آن به نسبت صحیح یا نیم‌صحیح از تغییر زاویه‌ی سمتی تغییر می‌کند. ضریب این تغییر q است که پارامتر نقص شبکه‌ای ناشی ازساختار فضایی محورهای نوری در نقاط مختلف سطح آن‌را تعیین می‌کند. ما در این کار قصد داریم تا به معرفی روشی بسیار ساده برای تولید یک QP با پارامتر $q=1$ بپردازیم.

۲- مبانی نظری

می‌خواهیم نشان دهیم یک QP با پارامتر q می‌تواند قطبش دایروی را به پرتو چرخان با بار توپولوژیکی $l=\pm 2q$ تبدیل کند. به این منظور ما در اینجا از روش ماتریس جونز بهره می‌گیریم. فرض می‌کنیم بردار راهنمای مولکول‌های بلورمایع روی سطح QP دارای مؤلفه‌های $\vec{n}(\vec{\rho})=(\sin\theta\cos\alpha,\sin\theta\sin\alpha,\cos\theta)$ باشد. این راستا، همان راستای موضعی محور نوری نیز می‌باشد. θمتمم زاویه‌ی قطبی نسبت به محور z هاست که عمود بر تیغه فرض می‌شود. φزاویه‌ی سمتی و $\vec{\rho}$ بردار مکان از محل مرکز تیغه و روی سطح آن است. این رابطه به این معنی است که راستای بردار راهنمای مولکول‌های بلورمایع نسبت به سطح تیغه زاویه‌ای به‌اندازه‌ی θ دارند. همچنین زاویه‌ای نیز در مؤلفه‌ی سمتی خود به‌اندازه‌ی α نسبت به راستای مثبت محور x ها دارند. فرض می‌کنیم این زاویه به‌صورت زیر به موقعیت مکانی مولکول‌ها روی سطح تیغه بستگی داشته باشد:

$$\alpha(\varphi)=q\varphi+\alpha_0, \qquad (۱)$$

φ زاویه‌ی سمتی است و از محل مرکز تیغه تعریف شده است. α_0 مقداری ثابت و حقیقی دارد و راستای بردار راهنمای مولکول‌ها را در زاویه‌ی سمتی صفر نشان می‌دهد. qضریب صحیح و یا نیم‌صحیحی است که سرعت تغییرات زاویه‌ی بردار راهنمای مولکول‌ها را نسبت به تغییر زاویه‌ی سمتی تعیین می‌کند. در حالت خاصی که $q=1$ و $\alpha_0=0$ باشد، مولکول‌ها به‌صورت شعاعی و اگر برای همان مقدار از q، $\alpha_0=\pi/2$ باشد، مولکول‌ها

به‌صورت دایروی نظم‌دهی شده‌اند. حال می‌خواهیم بردار جونز مربوط به این ساختار را به‌دست آوریم: هر نقطه از سطح QP به‌صورت موضعی یک تیغه‌ی دوشکستی با دو شکستی $\Delta n(\theta)=n_e(\theta)-n_o$ است که تأخیر فاز $\Gamma=2\pi L\Delta n/\lambda$ ایجاد می‌کند. در اینجا λ طول‌موج و L ضخامت تیغه است. ماتریس جونز این تیغه، زمانیکه $\alpha=0$ باشد برابر است با:

$$\tilde{J}(\alpha=0)=\begin{bmatrix} e^{+i\Gamma/2} & 0 \\ 0 & e^{-i\Gamma/2} \end{bmatrix}, \qquad (۲)$$

برای اینکه این ماتریس برای زوایای مختلف α تعیین شود، لازم است که این ماتریس را بین ماتریس‌های دوران R با علامت‌های مخالف قرار دهیم ($\tilde{J}(\alpha)=\mathrm{R}(-\alpha)J(0)\mathrm{R}(\alpha)$). اگر نور ورودی به تیغه دارای قطبش دایروی باشد، می‌توان وضعیت نور عبوری از تیغه را به شکل زیر به‌دست آورد[۹]:

$$\tilde{J}(\alpha)\begin{bmatrix}1\\ \pm i\end{bmatrix}=\cos(\tfrac{\Gamma}{2})\begin{bmatrix}1\\ \pm i\end{bmatrix}+i\sin(\tfrac{\Gamma}{2})\begin{bmatrix}1\\ \mp i\end{bmatrix}e^{\pm i(2q\varphi+2\alpha_0)}, \qquad (۳)$$

مطابق این رابطه، در حالت خاصی که تأخیر فاز اعمالی بر تیغه برابر $(2m+1)\pi$ با mهای صحیح باشد، پرتو نور خروجی، نوری با قطبش دایروی در خلاف جهت اولیه خواهد بود که فازی به‌اندازه‌ی $\pm(2q\varphi+2\alpha_0)$ در سطح آن سوار شده است. جمله‌ی $\pm 2q\varphi$ دلالت بر این دارد که پرتو تولید شده، پرتو چرخان با بار توپولوژیکی $l=\pm 2q$ است. علامت‌های مثبت و منفی به ترتیب مربوط به قطبش‌های نور دایروی راست‌گرد و چپ‌گرد است.

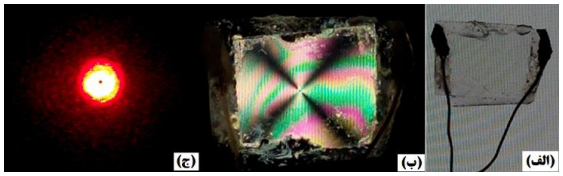
۳- کارهای تجربی

برای ساخت QP از دو قطعه‌ی شیشه‌ای به ابعاد $2.5\times 3\,cm^2$ و ضخامت $0.7\,mm$ که روی آن‌ها لایه‌ی رسانای ITO لایه‌نشانی شده بود استفاده گردید. به‌منظور نظم‌دهی به مولکول‌های بلورمایع ازطریق برهم‌کنش سطحی، لایه‌ی نازک پلیمری PVA به‌روش غوطه‌وری در محلول ۲٪ جرمی پلیمر در آب روی سطح شیشه‌ها لایه‌نشانی گردید و فرایند پخت در کوره‌ی الکتریکی در دمای ۸۰°C به مدت ۲۰ دقیقه انجام پذیرفت[۱۰]. هدف ما در این کار ایجاد آرایش سمتی برای مولکول‌ها به‌منظور ساخت یک QP با پارامتر $q=1$ و $\alpha_0=\pi/2$ می‌باشد. به این منظور از یک دریل الکتریکی با پایه‌ی ثابت برای چرخاندن هریک از سطوح روی پارچه‌ی مخملی به‌منظور ایجاد شیارهای دایروی روی آنها استفاده شد. برای ایجاد فضای خالی بین سطوح رسانای شیشه، ذرات شیشه‌ای با قطر $6\pm 0.5\,\mu m$ تولید گردید[۱۱]. ارزیابی قطر مؤثر ذرات تولید شده با قرار دادن این ذرات در فضای بین دو لام شیشه‌ای و گرفتن طیف عبوری از آنها در تابش عمودی در بازه‌ی طیف مرئی انجام شد[۱۲]. قطر اندازه‌گیری شده‌ی این ذرات برابر $5.98\mu m$ به‌دست آمد. با ایجاد این مقدار از فاصله در یک سلول بلورمایع با آرایش موازی، تأخیر فاز نسبی بیشینه در طول‌موج $632.8\,nm$ و در دمای ۲۷°C که دوشکستی بلورمایع ۰/۱۷ می‌باشد، حدود 3.21π است. با اعمال ولتاژ مناسب، این مقدار می‌تواند به 3π کاهش یابد و منجر به تولید پرتو چرخان خالص گردد. در ادامه، این ذرات با بلورمایع $5CB$ در فاز همسانگرد (بالاتر از ۳۵/۱°C) مخلوط شد. برای وارد کردن بلورمایع به فضای میان دو شیشه، مخلوط بلورمایع و میکروذرات را روی یکی از آن‌ها ریخته و شیشه‌ی دوم را روی شیشه‌ی اول طوری قرار می‌دهیم که مراکز شیارهای دایروی ایجاد شده روی سطحشان روی هم قرار گیرد. این کار هم‌زمان با قرار دادن مجموعه بین دو قطبشگر خطی عمود برهم، در دمای پایین‌تر از دمای گذار انجام شد. در انتها درزگیری لبه‌ها با چسب انجام گرفت. در شکل (۱-الف)، QP ساخته شده مشاهده می‌شود. شکل (۱-ب) تصویری است که با قرارگرفتن قطعه بین دو قطبشگر عمود برهم و با تابش نورسفید از پشت مجموعه گرفته شده است. مطابق انتظار، شکل ایجاد شده، چهار پره است که این الگو مشخصه‌ی الگوی کانوسکوپیک $q=1$ است.

۳-۱- ارزیابی QP

به‌منظور ارزیابی قطعه‌ی ساخته شده، از نور پهن و موازی‌شده‌ی لیزر He-Ne بهره گرفته شد. در ادامه یک پرتوشکن قطبنده به‌همراه تیغه‌ی ربع موج، قطبش نور لیزر را به قطبش دایروی تبدیل می‌کند و سپس این پرتو از QP عبور داده می‌شود. یک ولتاژ مربعی با فرکانس حدود $5KHz$ به QP اعمال گردید. ولتاژ اعمالی به قطعه به گونه‌ای تنظیم شد تا الگوی شدتی مرکز تاریک روی پرده مشاهده شود. ولتاژ اعمالی در این حالت توسط

اسیلوسکوپ $Vpp = 1.72mV$ اندازه‌گیری شد. الگوی ایجاد شده روی پرده در شکل (۱-ج) مشاهده می‌گردد. در انتها، برای اندازه‌گیری بار توپولوژیکی پرتو چرخان تولید شده، از حسگر جبهه‌ی موج دوکانالهی مارهای استفاده نمودیم. گام توری‌های مورد استفاده $15L/mm$ و فاصله‌ی آنها از هم، در هر کانال $70mm$ بود. جزئیات اندازه‌گیری مشابه کار قبلی است[۱۳]. لازم به توضیح است که از پرتو عبوری از QP با اعمال ولتاژ بالا (حدود $25V$) که در آن جابه‌جایی الگوهای ماره کاملاً از بین می‌رفت به‌عنوان پرتو مرجع استفاده گردید. مقدار بار توپولوژیکی به‌دست آمده برابر 1.79 ± 0.30 بود. از آنجا که مقدار این کمیت باید صحیح باشد، مقدار ۲ نزدیک‌ترین مقدار برای بار توپولوژیکی اندازه‌گیری شده برای پرتو است که مطابق مقدار مورد انتظار می‌باشد. در شکل (۲)، نحوه‌ی چینش و الگوهای ثبت شده‌ی ماره در دو کانال و نیز الگوی شیب جبهه‌ی موج برای پرتو تولید شده را نشان می‌دهد.



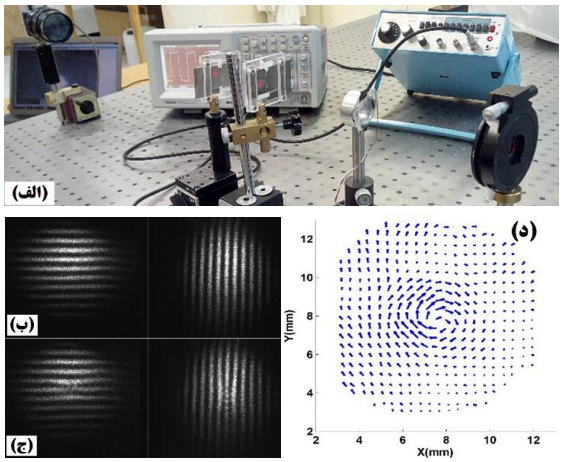
شکل ۱: الف- تصویر QP ساخته شده، ب- الگوی کانوسکوپیک ظاهر شده بین دو قطبشگر عمود برهم و ج- پرتو مرکزتاریک ایجاد شده.

۴- نتیجه‌گیری

دراین کار یک QP با پارامتر $q = 1$ با استفاده از یک سلول بلورمایع با آرایش سمتی ساخته شد. نظم‌دهی به مولکول‌های بلورمایع به‌روش سایش روی پلیمر PVA با الگوی دایروی انجام گردید. قطعه‌ی تولید شده در بین دو قطبشگر عمود برهم، الگوی کانوسکوپیکی مورد انتظار را ایجاد نمود. همچنین با عبور نور لیزر با قطبش دایروی، الگوی مرکزتاریک در نمایه‌ی پرتو عبوری از قطعه با اعمال ولتاژ مناسب مشاهده گردید. در انتها، جهت اندازه‌گیری بار توپولوژیکی پرتو تولید شده، از حسگر جبهه‌ی موج ماره‌ای استفاده شد که مقدار اندازه‌گیری شده در محدوده‌ی مورد انتظار به‌دست آمد.

سپاسگزاری

از آقای دکتر حبیب خوش‌سیما از دانشگاه تبریز بابت در اختیار قراردادن بلورمایع صمیمانه سپاسگزاری می‌نماییم.



شکل ۲: الف- چینش آزمایشگاهی حسگر جبهه‌ی موج ماره‌ای، ب- الگوهای ماره در دو کانال با اعمال ولتاژ $25V$، ج- با اعمال ولتاژ $Vpp = 1.72mV$ و د- بردارهای شیب جبهه‌ی موج پس از عبور از QP.

مراجع

[1] L. Allen, M.W. Beijersbergen, R.J.C. Spreeuw, J.P. Woerdman, "Orbital angular momentum of light and the transformation of Laguerre-Gaussian laser modes", Phys. Rew. A, 45 (1992) 8185.

[2] M.W. Beijersbergen, R.P.C. Coerwinkel, M. Kristensen, J.P. Woerdman, "Helical-wavefront laser beams produced with a spiral phase plate", Opt. Comm., 112 (1994) 321.

[3] S. Rasouli and M. Yeganeh, "Formulation of the moiré patterns formed by superimposing of gratings consisting topological defects: moire technique as a tool in singular optics detections ", J. Opt. 17 (2015) 105604.

[4] D. Ganic, X. Gan, and M. Gu, "Generation of doughnut laser beams by use of a liquid-crystal cell with a conversion efficiency near 100%", Opt. Lett., 27 (2002) 1351.

[5] D. G. Grier, "A revolution in optical manipulation", Nature, 424 (2003) 21.

[6] L. Marrucci, E. Karimi, S. Slussarenko, B. Piccirillo, E. Santamato, E. Nagali, and F. Sciarrino, "Spin-to-Orbital Optical Angular Momentum Conversion in Liquid Crystal "q-Plates": Classical and Quantum Applications", Mol. Cryst. Liquid Cryst., 561 (2012) 48.

[7] D. Mawet, E. Serabyn, K. Liewer1, Ch. Hanot, S. McEldowney, D. Shemo, and N. O'Brien, "Optical Vectorial Vortex Coronagraphs using Liquid Crystal Polymers: theory, manufacturing and laboratory demonstration", Opt. Exp., 17 (2009) 1902.

[8] L. Marrucci, "The q-plate and its future", J. Nanophotonics, 7 (2013) 078598.

[9] L. Marrucci, "Generation of Helical Modes of Light by Spin-to-Orbital Angular Momentum Conversion in Inhomogeneous Liquid Crystals", Mol. Cryst. Liquid Cryst., 488 (2008) 148.

[10] K. Takatoh, *Alignment Technologies and Applications of Liquid Crystal Devices*, Taylor & Francis, 2005.

[۱۱] محمد یگانه، حسن مجلل، ساخت فاصله‌انداز به‌روش ته‌نشینی، کنفرانس فیزیک ایران، شهریور ۱۳۹۱.

[12] I. C. Khoo, Shin-Tson Wu, "Optics and Nonlinear Optics of Liquid Crystals", World Scintific Publishing Co. Pte. Ltd. (1993) chapter 2.

[13] M. Yeganeh, S. Rasouli, M. Dashti, S. Slussarenko, E. Santamato, and E. Karimi, "Reconstructing the Poynting vector skew angle and wavefront of optical vortex beams via two-channel moiré deflectometery", Opt. Lett., 38 (2013) 887.