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

بررسی غیر خطیت اپتیکی ناشی از گرادیان در بلور مایع نماتیک هیبرید

جعفر پور صمد، سمیه بهمنی

گروه مهندسی اپتیک و لیزر دانشگاه بناب، بناب، آذربایجان شرقی، ایران

چکیده – با تابانیدن نور لیزر به سلول مویین حاوی بلور مایع نماتیک هیبرید، جذب نور و بازچرخش ملکول ها در اثر پدیده ترمومکانیکی و تغییرات ضریب شکست نور در اثر این بازچرخش بررسی شده است و شیفت فاز نور لیزر فرودی اندازه گیری شده است. نتایج حاصل نشان میدهد که با استفاده از این روش می توان غیر خطیت اپتیکی محیط را تا حدود زیادی تغییر داد.

کلید واژه- بلور مایع، بازچرخش ملکولی ،ضریب شکست، غیر خطیت

Investigation of optical nonlinearity due to temperature gradient in the hybrid nematic liquid crystal

Jafar poursamad, Somaye bahmani

Department of Laser and Optical Engineering , University of Bonab , Bonab , Azarbaijan-e Sharghi , Iran

Abstract-Absorption of a plane laser beam in a themocapillary nematic liquid crystal cell and consequent molecular director reorientation due thermomechanical effect is studied. It was shown that significant changes can occur in the index of refraction due to thermomechanical effect.

Keywords: liquid crystal, Molecular Reorientation, Refractive index, Non-linear drainage

[Downloaded from opsi.ir on 2025-10-31]

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

۱- مقدمه

در کریستال‌های مایع نماتیک، اثرات گرمایی به دلیل وابستگی پارامترهای فیزیکیشان به دما، مانند انرژی آزاد فرانک، ضریب جذب نور و ضریب شکست، بسیار مهم هستند[۱]. پدیده‌های مختلفی برای ایجاد بازچرخش مولکولی در بلورهای مایع وجود دارد که منجر به بازچرخش مولکولی و تغییر جهت بردار هادی می‌شوند. از جمله آنها می‌توان به پدیده ترمومکانیکی و انبساط حجمی اشاره کرد[۲]. مولکول‌های کریستال مایع به طور منظم در یک جهت سمتگیری می‌کنند که راستای محور بزرگتر توده مولکول‌ها را بردار هادی می‌نامند و محور اپتیکی محیط بر آن منطبق است. در این مقاله با در نظر گرفتن یک سلول شیشه‌ای افقی با ضخامت حدود صد میکرومتر که مولکول‌های کریستال مایع در داخل آن به صورت هیبرید (ملکول‌ها در صفحه پایینی در راستای محور x یعنی موازی صفحات سلول واقعند و در طی ضخامت سلول زاویه شان به شکل $\frac{\pi z}{2l}$ تغییر یافته و در صفحه‌ی بالایی در راستای محور z و عمود بر دیواره سلول قرار گرفته اند.) نظم گرفته اند، نور لیزر تخت را به صورت موازی با صفحات سلول به داخل آن تابش می‌دهیم(شکل ۱). اثرات ترمومکانیکی موجب جذب جزیی نور شده و گرادیان دمایی در طول سلول می آفریند که بازچرخش ملکول ها را در پی دارد. بنابراین با بررسی پدیده ترمومکانیکی در اثر جذب نور لیزر و ایجاد گرادیان دما بازچرخش مولکولهای بلور مایع را تحلیل خواهیم کرد. میزان شیفت فاز نور لیزر که در اثر غیر خطیت اپتیکی ایجاد شده در محیط، حاصل شده بررسی می شود.

شکل ۱: تابش نور لیزر به سلول حاوی بلورمایع نماتیک هیبرید

۱- ۱- مفاهیم و معادلات

گرادیان دمای حاصل از جذب نور تخت، موجب ایجاد نیروی ترمومکانیکی و در نتیجه اعمال گشتاور بر روی مولکول‌ها شده و بازچرخش آنها را در پی خواهد داشت. با کنترل شدت نور لیزر مقدار بازچرخش مولکول‌ها قابل کنترل است[۴]. با ایجاد تغییر شکل در توده کریستال مایع، مولکول‌ها با ضرایب کشسانی مربوط به نوع تغییر شکل، در مقابل جابجایی و دوران مقاومت نشان می‌دهند که مجموع انرژی صرف شده در واحد حجم برای تغییر شکل کریستال مایع، چگالی انرژی آزاد فرانک نامیده می‌شود. سه نوع تغییر شکل عبارتند از پخ شدگی، پیچش و خمش که ثابت‌های کشسانی آنها به ترتیب با K_1، K_2 و K_3 نشان داده می‌شود. اگر هر سه تغییر شکل ممکن اتفاق بیافتد چگالی انرژی فرانک از رابطه زیر بدست خواهد آمد [۱]:

$$F=\frac{1}{2}K_1\left(\nabla.\hat{n}\right)^2+\frac{1}{2}K_2\left(\hat{n}.\nabla\times\hat{n}\right)^2+\frac{1}{2}K_3\left(\hat{n}\times\nabla\times\hat{n}\right)^2 \qquad (۱)$$

پس از محاسبه انرژی فرانک گشتاورهای الاستیسیته ویسکوزیته و ترمومکانیکی را بدست می‌آوریم [۶، ۵]. معادله تعادل گشتاوری به صورت زیر نوشته می شوند:

$$\Gamma_{els}+\Gamma_{vis}+\Gamma_{tm}=0 \qquad (۲)$$

از طرف دیگر معادله گرما طبق رابطه زیر محاسبه می‌شود[٤]:

$$\rho c_p\left(\frac{\partial T}{\partial t}+\vec{v}.\overrightarrow{\nabla T}\right)=\nabla.\left(\underline{k}\,\overrightarrow{\nabla T}\right)+\sigma'_{ik}\frac{\partial v_i}{\partial x_k}+Q \qquad (۳)$$

در این رابطه ρc_p ظرفیت گرمایی ویژه حجمی، $\underline{k}$ ضریب رسانش گرمایی، δ'_{ik} تانسور تنش ویسکوزیته و Q چگالی انرژی گرمایی داده شده به کریستال مایع در واحد زمان است که از رابطه $Q=\alpha I_0 e^{\alpha x}$ محاسبه می‌شود.

که در آن $\alpha=\frac{\alpha_\perp+\alpha_\parallel}{2}$، $\alpha_\parallel$ و $\alpha_\perp$ به ترتیب ضریب جذب نور در راستای موازی و عمود بر راستای انتشار نور و I_0 شدت اولیه نور لیزر است. ($\alpha_\parallel$ و $\alpha_\perp$ به طول موج پرتوی نور فرودی بستگی دارند). گرادیان دمایی در محیط سلول باعث شارش کریستال مایع شده، بنابراین میدان سرعتی درون سلول القا می‌کند که با حل معادله ناویر استوکس محاسبه می‌شود. معادله ناویر استوکس برای بلور مایع نماتیک به شکل زیر بیان می‌شود[۱]:

$$\rho\left[\frac{\partial\vec{v}}{\partial t}+(\nabla.\vec{v})\vec{v}\right]=-\overrightarrow{\nabla p}+\overrightarrow{f_{vis}}+\overrightarrow{f_E}+\overrightarrow{f_{Tm}} \qquad (۴)$$

در این رابطه ρ چگالی واحد حجم کریستال مایع، $\vec{v}$ سرعت شارش کریستال مایع نماتیک، $\overrightarrow{\nabla p}$ فشار هیدرودینامیکی و جملات بعدی به ترتیب نیروهای ویسکوزیته، الاستیکی و ترمومکانیکی هستند. کریستال

[Downloaded from opsi.ir on 2025-10-31]

مایع نماتیک از نظر اپتیکی ماده ای دوشکستی و تک محور است، با تابش نور غیر قطبیده بر یک منشور حاوی بلور مایع نماتیک هیبرید نورهای خروجی، دو پرتوی جدا از هم با قطبش خطی هستند، که قطبش یکی عمود بر صفحه شکست و دیگری مماس بر این صفحه است. با استفاده از قانون اسنل ضرایب شکست مربوط به دو پرتوی خروجی از رابطه‌ی $n_{e,o}=\frac{\sin(\frac{\alpha+\delta_{e,o}}{2})}{\sin(\frac{\alpha}{2})}$ بدست می‌آید [۳]. در این رابطه α زاویه پرتوی فرودی، اندیس های e و o به ترتیب مربوط به پرتو غیر عادی و عادی منتشر شده در داخل نماتیک هستند. با انتشار نور لیزر در داخل کریستال مایع، پرتو عادی و غیر عادی به دلیل اختلاف ضریب شکست، مسیر اپتیکی را با سرعت های متفاوتی طی خواهند کرد که اختلاف فاز ایجاد شده بین این دو پرتودر طول مسیر اپتیکی شیفت فاز نامیده می‌شود. شیفت فاز ایجاد شده در نور عبوری با طول موج λ از داخل کریستال مایع به ضخامت L برابر است با [۳]:

$$\Delta\Phi=\frac{2\pi}{\lambda}\int_0^l[n_{eff}(z,\theta)-n_o]dz \qquad (۵)$$

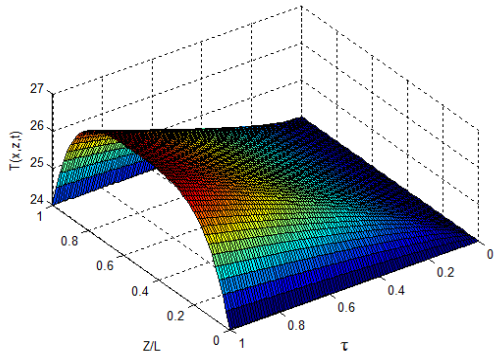
۱-۲- فرضیات، شرایط مرزی و اولیه مساله

با توجه به اینکه نور لیزر در جهت محور x بوده و بزرگی سلول در راستای y بینهایت فرض شده است، بازچرخش در صفحه x-z خواهد بود، یعنی $\delta n_y=0$. در نتیجه بردار دیرکتور تغییر یافته به صورت $\hat{\boldsymbol{n}}=(n_x,0,n_z)$ خواهد بود **که** در آن $n_x=\sin\theta(t,z)$ و $n_z=\cos\theta(t,z)$ و $\theta(t,z)$ زاویه محور اپتیکی ماده نسبت به راستای z است. سلولی که در نظر گرفته‌ایم در راستای x و z دارای طول محدود و در راستای yطویلتر است، لذا در محاسبات خود از عبارت $\frac{\partial}{\partial y}$ صرفنظر خواهیم کرد. از طرف دیگر با توجه به اینکه طول سلول در مقایسه با عرض آن بیشتر است،تغییرات دما در راستای x بسیار کوچکتر از تغییرات آن در راستای z است و می‌توان از تغییرات دمایی در راستای x نسبت به zصرفنظر کرد ملکول‌ها در دیواره لنگر اندازی قوی دارند.

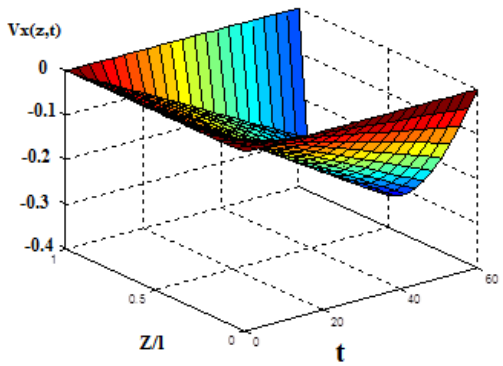
مقادیر ثابت مربوط به معادلات عبارتند از [۶]:

$$k_1=6\times10^{-7}\frac{erg}{cm};k_2=7.5\times10^{-7}\frac{erg}{cm}$$
$$k_{\parallel}=2.4\times10^{-3}\frac{W}{cmK};k_{\perp}=1.3\times10^{-3}\frac{W}{cmK}$$
$$\gamma_1=0.788Ps;\xi=10^{-12}\frac{J}{mK};\rho c_p=1\frac{J}{cm^3K}$$
$$\alpha_{\perp}=2cm^{-1};I_0=20\frac{W}{cm^2};L=100\mu m;l_0=1cm$$

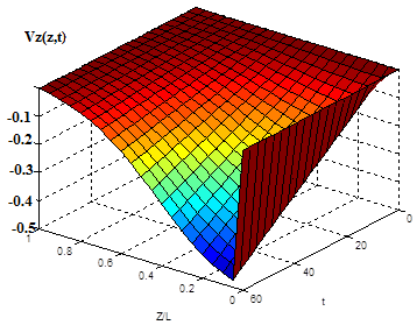
۲-نمودارها و بحث:



نمودار۱. تغییرات دما بر حسب ضخامت سلول(بر حسب سلسیوس)

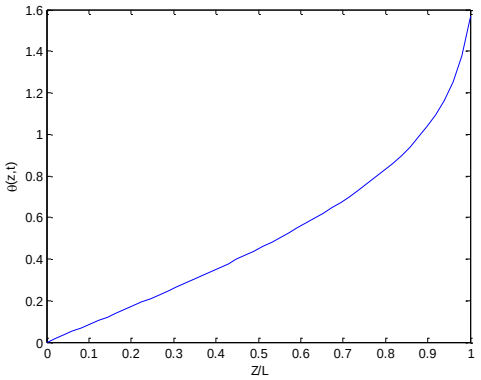


نمودار۲.سرعت ملکولها در راستای افقی سلول(میکرومتر بر ثانیه)

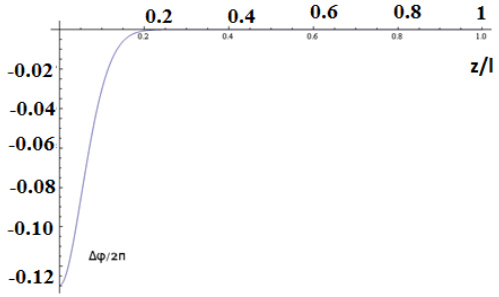


نمودار۳.سرعت ملکول ها در راستای عمودی(میکرومتر بر ثانیه)

[Downloaded from opsi.ir on 2025-10-31]



نمودار۴. تغییرات زاویه‌ی بردار دیرکتور ملکول‌ها بر حسب رادیان



نمودار۵. شیفت فاز نور لیزر بر حسب رادیان

بر طبق نمودار۱ گرما درون سلول انتشار می‌یابد تا تعادل گرمایی در سلول برقرار شده و نمودار به حالت اشباع برسد در مدت زمانی حدود ۶۰ ثانیه تعادل گرمایی در سلول برقرار شده و از آن زمان به بعد تغییرات دما نامحسوس است. در میانه‌های سلول میزان افزایش دما ماکزیمم و در حدود ۲ درجه سلسیوس است. نمودارهای ۲ و ۳ به ترتیب سرعت شارش ملکول‌های کریستال مایع در راستای افقی و عمودی سلول را نشان می‌دهند همانطور که پیداست گرادیان دمایی در سلول منتقل شده و در میانه‌های ضخامت سلول بیشترین شارش را ایجاد می‌کند سرعت شارش بلور مایع در راستای افقی و عمودی سلول از مرتبه میکرومتر است. نمودار ۴ نمایشگر تغییرات زاویه‌ی بردار دیرکتور ملکول‌های بلور مایع است که قبل از ایجاد گرادیان دمایی با افزایش ضخامت به صورت خطی افزایش می‌یابد اما بعد از ایجاد گرادیان دمایی از حالت خطی خارج می‌شود بیشترین میزان بازچرخش ملکولی مربوط به میانه های ضخامت سلول است و در حدود ۰/۳ رادیان می باشد. در شکل ۵ مشاهده می‌شود نور لیزر به اندازه ۰/۱۲ رادیان شیفت فاز یافته و تغییر مسیر می‌دهد. نور پروب عبوری از این محیط شیفت فازی به صورت $\Delta\varphi = k\,\Delta nL$ را احساس می‌کند که در این رابطه Δn تغییرات ضریب شکست ایجاد شده در محیط خواهد بود. درصورتی که نور پروب در ناحیه‌ی مریی باشد بعد از عبور از سلول به صورت دایره‌های هم مرکز روشن و تاریک بر دیواره روبرویی خواهد بود که با شمارش تعداد این حلقه‌ها و ضرب تعداد آنها در 2π شیفت فاز ایجاد شده به صورت تجربی قابل اندازه‌گیری می‌باشد. محاسبه‌ی تئوری که در این مقاله انجام شده بر حسب پارامترهای داده شده $\Delta n = 0.758\times10^{-3}$ خواهد بود[۶].

نتیجه گیری:

با استفاده از نور لیزر با شدت $20\frac{w}{cm^2}$ تغییرات ضریب شکستی از مرتبه 10^{-3} در بلور مایع نماتیک هیبرید ایجاد شد. ایجاد این اندازه از تغییرات ضریب شکست در محیط‌های دیگر مستلزم استفاده از شدت‌های بسیار بالاتر نور می‌باشد. در نتیجه روش ارائه شده می‌تواند روش مقرون به صرفه در ایجاد تغییرات ضریب شکست باشد که اینجا مزیت ویژه‌ی بلورهای مایع نسبت به محیط‌های دیگر اپتیکی، در ایجاد غیر خطیت اپتیکی بوسیله نورهای با شدت پایین، مشخص می‌شود.

مرجع‌ها

[1] I. C. Khoo, "*Liquid Crystals*" .2nd Ed. New Jersy: John wiley & sons, (2007).
[2] Gennes, G, *The physics of Liquid Crystals*, **New York, Oxford University Press** (1993).
[3] I. C. Khoo, S. Slussarenko, B. D Guenther and W. V. Wood, "*Optically Induced Space Charge Fields, DC Voltage*, and *Extraordinarily Large Nonlinearity in Dye-doped Nematic Liquid Crystals*", **Opt. Lett**.(1994)
[4] I. C. Khoo, & others *"Liquid Crystal Film and Nonlinear Optical Liquid Cored Fiber Array for ps-cw Frequency Agile Laser Optical Limiting Application* ", **Opt. Express**(12)(1998)
[5] I. C. Khoo, & others *"Liquid Crystal Film and Nonlinear Optical Liquid Cored Fiber Array for ps-cw Frequency Agile Laser Optical Limiting Application* ", ***Opt. Express***, 2 No12, (1998)
[6] R. S. Akopyan and B. Ya .Zel'dovich *"Institute of Mechanic roblems*, **USSR Academy of Sciences Zh,Eksp.Teor.Fiz.87**(1960)

[Downloaded from opsi.ir on 2025-10-31]