



بیست و هفتمین کنفرانس اپتیک و فوتونیک ایران و سیزدهمین کنفرانس مهندسی و فناوری فوتونیک ایران، دانشگاه سیستان و بلوچستان، زاهدان، ایران.
۱۴-۱۶ بهمن ۱۳۹۹



کد مقاله : ۲-۹-۲۱۰-۱۰-A

شبیه‌سازی عدسی مدی بر پایه بلورمایع با فاصله کانونی تنظیم‌پذیر

عیسی احمدعلیدخت^۱، عزالدین مهاجرانی^۲، محمد محمدی مسعودی^۳

^{۱,۲} دانشگاه شهید بهشتی، پژوهشکده لیزر و پلاسما

^۲ دانشگاه تهران، دانشکده علوم و فنون نوین

در این مقاله خواص الکترواپتیکی عدسی با فاصله کانونی تنظیم‌پذیر با ساختار مدی بررسی شد. روابط حاکم بر این ساختار شامل توزیع اختلاف پتانسیل در لایه مدی و توزیع زاویه محور طولی مولکول‌های بلورمایع در سلول می‌باشند. این روابط با دو روش تفاضل عددی محدود و المان عددی محدود در محیط نرم‌افزاری متلب پیاده‌سازی و اجرا شد. راه‌نوری باریکه نوری عبوری از سلول حاوی بلورمایع E7 و با ساختار مدی به ازای تغییرات ولتاژ و مقاومت سطحی لایه مدی بررسی شد. در فرکانس ۱ کیلوهرتز و ضخامت سلول ۲۰ میکرون، مقدار ولتاژ و مقاومت سطحیکه در آن فاصله کانونی کمترین مقدار خود را دارند به ترتیب ۲.۹ ولت و ۱۲۵ مگا اهم بر مربع به دست آمد.

کلید واژه- بلورمایع، عدسی با فاصله کانونی تنظیم‌پذیر، عدسی مدی.

Modal Liquid Crystal Lens with Tunable Focal Length Simulation

Isa Ahmadalidokht¹, Ezzedin Mohajerani², Mohammad Mohammadimasoudi³

^{1,2}Shahid Beheshti University, Laser & Plasma Institute

³University of Tehran, Faculty of New Sciences and Technologies

I_Alidokht@sbu.ac.ir¹, E-mohajerani@sbu.ac.ir², m.masoudi@gmail.com³

In this paper electro-optical properties of focal length tunable lens with modal structure were investigated. Modal structure governing equations include modal layer electrical potential distribution and liquid crystal director angle distributions in the cell. These equations were written by finite difference and finite element method in MATLAB environment. Optical path length of cell with E7 liquid crystal and modal structure were examined with different electrical voltages and surface resistances. In frequency of 1 kHz, minimum focal length of lens was obtained in electrical voltage of 2.9 volt and surface resistance of 125 MΩ/sq.

Keywords: Liquid Crystal, Lens with Tunable Focal Length, Modal Lens.

مقدمه

مولکول‌های بلورمایع ساختار بلوری دوشکستی دارند. آنها با توجه به داشتن دوقطبی دائمی و یا القائی می‌توانند در حضور محرک‌های خارجی نظیر میدان الکتریکی بچرخند. این چرخش باعث تغییر ضریب شکست بلورمایع شده و راه‌نوری باریکه نوری گذرنده از سلول حاوی بلورمایع را تغییر می‌دهد. چرخش مولکول‌های بلورمایع در حضور میدان الکتریکی و متعاقبا تغییر راه‌نوری باریکه نوری گذرنده از آن اساس فیزیکی بسیاری از کاربردها از جمله نمایشگرها [۱]، مدولاتورهای فضایی نوری [۲] می‌باشد.

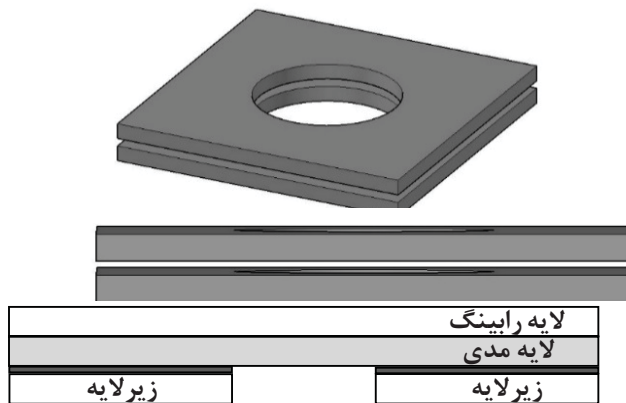
از جمله کاربردهای بلورمایع ساخت عدسی تنظیم‌پذیر می‌باشد [۳]. برای ساخت این عدسی، سلول با روزنه خروجی دایروی و حاوی بلورمایع را در نظر بگیرید. اگر شدت میدان الکتریکی در وسط روزنه کوچکتر از شدت آن در لبه‌های روزنه باشد، مولکول‌های بلور مایع در لبه‌های روزنه بیشتر چرخیده و پروفایل عدسی‌گونه راه‌نوری ایجاد می‌کنند. روش‌های مختلفی برای ساخت عدسی تنظیم‌پذیر بلورمایع وجود دارد [۴]. یکی از این روش‌ها ساخت این عدسی بر اساس ساختار مدی^۲ می‌باشد [۵]. در ساختار مدی، از یک لایه مدی نیم‌رسانا با مقاومت سطحی $2-200 \text{ M}\Omega/\text{sq}$ برای ایجاد میدان الکتریکی ناهمگن در سلول حاوی بلورمایع استفاده می‌شود (شکل ۱). یکی از مزیت‌های این ساختار نسبت به ساختارهای قبلی، قابلیت ساخت عدسی با روزنه بزرگتر می‌باشد. در این مقاله رفتار الکترواپتیکی این عدسی بررسی و شبیه‌سازی خواهد شد. روابط حاکم بر عدسی تنظیم‌پذیر با ساختار مدی این ساختار را می‌توان با دو رابطه درهم‌تنیده (۱) و (۲) مدل کرد [۶].

(۱)

در رابطه (۱)، ρ_s مقاومت سطحی، ω فرکانس، v دامنه ولتاژ، ϵ_0 ثابت دی‌الکتریک فضای آزاد، ϵ' ثابت دی‌الکتریک حقیقی بلورمایع و ϵ'' ثابت دی‌الکتریک موهومی بلورمایع می‌باشند.

(۲)

در رابطه (۲)، K_{ii} ضرایب الاستیک بلورمایع، ϵ_e ثابت دی‌الکتریک بلورمایع در راستای محور طولی، ϵ_o ثابت دی‌الکتریک بلورمایع در راستای محور عرضی، d ضخامت سلول، v دامنه ولتاژ و θ زاویه محور طولی بلورمایع نسبت به محور z می‌باشند.



شکل ۱: طرح عدسی تنظیم‌پذیر مدی بر پایه بلورمایع

در رابطه (۱) پارامترهای مربوط به جهت‌گیری بلورمایع حضور دارند. از طرف دیگر، در رابطه (۲) اختلاف پتانسیل در نقاط سطح ساختار باید تعریف شود. به این معنی که روابط (۱) و (۲)، روابط درهم‌تنیده بوده و باید هم‌زمان

¹Spatial light modulators

²Modal

جدول ۱: پارامترهای استفاده شده در شبیه‌سازی

ϵ_0	۵.۲
ϵ_e	۱۹.۰
n_0	۱.۵۲۱۱
n_e	۱.۷۴۶۴
K_{11}	$\times 10^{-10}$
K_{22}	.
K_{33}	$\times 10^{-10}$
مقاومت سطحی لایه	$50 \text{ M}\Omega/\text{sq}$
ضخامت سلول	$20 \mu\text{m}$
قطر روزنه عدسی	۵mm
فرکانس ولتاژ	۱KHz

بر اساس ماهیت روابط، رابطه (۱) بر اساس روش المان محدود و رابطه (۲) بر اساس روش تفاضل محدود در محیط نرم‌افزاری متلب^۵ نوشته شد.

شبیه‌سازی با اعمال ولتاژهای مختلف و به ترتیب از ۰.۱ تا مقدار ۱۰ ولت و با گام‌های ۰.۲ ولت انجام شد. فاز به‌دست آمده (شکل ۲) در هر ولتاژ بر اساس ضریب زرنیک مرتبه ۲ رسم شد (شکل ۳).

تغییرات ضریب زرنیک مرتبه ۴ نشان دهنده تغییرات فاصله‌کانونی عدسی با ولتاژ می‌باشد. رفتار این نمودار با آزمایش‌های تجربی انجام شده در آزمایشگاه هم‌خوانی دارد. فاصله‌کانونی عدسی با افزایش ولتاژ کاهش یافته و در یک ولتاژ تغییرات آن کندتر می‌شود. برای تحلیل این نمودار می‌توان گفت که چرخش مولکول‌های لایه سلول نسبت به وسط آن با شروع ولتاژ و افزایش آن بیشتر می‌باشد و در یک ولتاژ مشخص مولکول‌های لایه حداکثر چرخش خود را انجام داده‌اند و با چرخش مولکول‌های وسط سلول روند تغییرات فاصله‌کانونی کندتر و عکس خواهد بود.

حل شود. با توجه به اینکه حل هم‌زمان این روابط پیچیده است از روش ترتیبی برای حل این روابط استفاده می‌شود. در این روش ابتدا فرض می‌شود که محور طولی مولکول‌های بلورماید در راستای موازی سطح جهت‌گیری کرده‌اند. رابطه (۱) با این فرض حل می‌شود و اختلاف پتانسیل در سطح ساختار به‌دست می‌آید. این اختلاف پتانسیل باعث چرخش بلورماید در سلول بر اساس رابطه (۲) می‌شود. چرخش بلور مایع در این قسمت می‌تواند پارامترهای ثابت دی‌الکتریک جدیدی برای رابطه (۱) مشخص کند. بدین صورت رابطه (۱) بر اساس پارامترهای جدید بلور مایع حل می‌شود و متعاقباً اختلاف پتانسیل جدید به‌دست می‌آید. این حلقه تا به حداقل رسیدن اختلاف در زاویه محور طولی بلورماید ادامه پیدا می‌کند. میدان توزیع زاویه‌ای محور طولی بلورماید که از این شبیه‌سازی به‌دست می‌آید در نهایت به توزیع ضریب شکست سلول و متعاقباً به راه‌نوری تبدیل می‌شود.

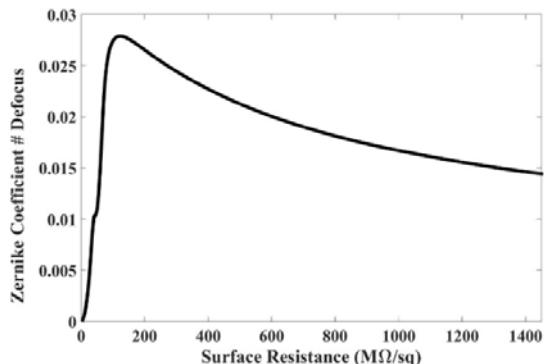
باریکه نوری عبوری از داخل این سلول بر اساس طول موج خود تغییر فاز می‌دهد و این تغییر فاز باعث ایجاد فاز کروی همگرا در باریکه عبوری می‌شود. فاز عبوری را می‌توان از دیدگاه ابیراهی با ضرایب توابع متعامد زرنیک^۳ مشخص کرد. ضریب مرتبه ۴ به‌دست آمده مقدار انحناء جبهه‌موج را نشان می‌دهد که مربوط به فاصله‌کانونی عدسی می‌باشد. ضریب مرتبه ۲ و ۳ مربوط به انحراف باریکه نوری در امتدادهای X ، Y ^۴ هستند. ضرایب بالاتر مربوط به ابیراهی‌های مرتبه بالاتر (کما، استیگماتیسم و ...) عدسی می‌باشد.

نتایج

در این شبیه‌سازی پارامترهای مربوط به بلورماید E7 و پارامترهای مربوط به ساختار سلول مطابق جدول (۱) در شبیه‌سازی استفاده شد.

³ Zernike polynomials⁴Tip/Tilt⁵MATLAB

نتیجه می‌توان از این شبیه‌سازی برای پیش‌بینی ابیراهی-های عدسی و همچنین تاثیر پارامترهای ولتاژ، فرکانس، مقاومت سطحی، اندازه روزنه و ضخامت سلول و پارامترهای ماده بلورمایع استفاده کرد.

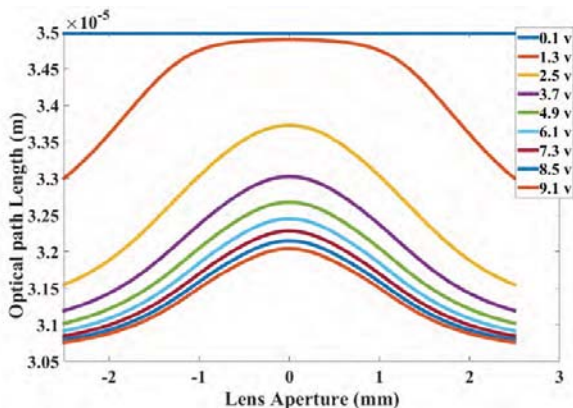


شکل ۴: تغییرات ضریب زرنیک مرتبه دوم (فاصله‌کانونی) با تغییر در مقاومت سطحی لایه مدی

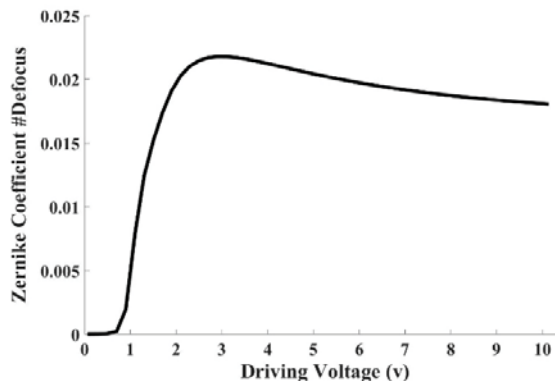
مرجع‌ها

- [1] Jhou-Pu Yang, et al, "Characterization of the spatially anamorphic phenomenon and temporal fluctuations in high-speed, ultra-high pixels-per-inch liquid crystal on silicon phase modulator", *Opt. Express*, Vol. 27, Issue 22, pp. 32168-32183, (2019).
- [2] Gitae Moon, et al, "Fabrication of Pre-Tilted Vertical Alignment Layers for High-Speed Liquid Crystal Display Using Bi-functional Photoreactive Monomers", *Mol Cryst Liq Cryst*, Vol. 687, Issue 1, (2019).
- [3] S. Sato, "Liquid-crystal lens-cells with variable focal length", *Jpn. J. Appl. Phys.* 18, 1679(1979).
- [4] Su Xu, et al, "Fast-Response Liquid Crystal Microlens" *Micromachines*, Vol 5, 300-324 (2014).
- [5] Louis Begel, Tigran Galstian, "Liquid crystal lens with corrected wavefront asymmetry" *Applied Optics*, Vol. 57, No. 18 (2018).
- [6] G. Vdovin, I.R. Guralnik, S.P. Kotova, M.Yu. Loktev, A.F. Naumov, "LC lenses with variable focal lengths. I. Theory," *Quantum Electronics*, Vol 26, pp. 256-260 (1999).

همچنین در این شبیه‌سازی تغییرات فاصله‌کانونی نسبت به مقاومت سطحی نیز بررسی شد.



شکل ۲: تغییر فاز باریکه عبوری نور از سلول با تغییر ولتاژ



شکل ۳: تغییرات ضریب زرنیک مرتبه دوم (فاصله‌کانونی) با تغییر ولتاژ

این بررسی در ولتاژ ثابت ۲.۹ ولت و مقاومت سطحی از مقدار $1500 - 5 M\Omega/sq$ انجام شد (شکل ۴). همانگونه که در شکل ۴ نشان داده شده است، مقدار فاصله‌کانونی در ولتاژ ثابت ۲.۹ ولت، با افزایش مقاومت سطحی کاهش یافته (ضریب زرنیک مرتبه ۴ افزایش می‌یابد) و در مقاومت سطحی $125 M\Omega/sq$ مقدار بیشینه خود را دارد. در مقاومت سطحی‌های بیشتر از این مقدار روند تغییرات فاصله‌کانونی افزایشی می‌شود.

جمع‌بندی

با توجه به اینکه انجام تست تجربی برای رسیدن به حالت بهینه نیازمند تغییر بسیاری از پارامترها می‌باشد، در