بیست و سومین کنفرانس اپتیک و فوتونیک و نهمین کنفرانس مهندسی و فناوری فوتونیک ایران
دانشگاه تربیت مدرس
۱۴-۱۲ بهمن ۱۳۹۵
23rd Iranian Conference on Optics and Photonics and 9th Conference on Photonics Engineering and Technology
Tarbiat Modares University, Tehran, Iran
January 31- February 2, 2017

دوپایایی نوری در بلور فوتونی یک بعدی با ولتاژ خارجی برای طراحی کلیدزنی تمام نوری کنترل پذیر

فاطمه مسلمی و کاظم جمشیدی قلعه

گروه فیزیک دانشگاه شهید مدنی آذربایجان

چکیده- در این مقاله، کنترل پذیری کلیدزنی تمام نوری در ساختار بلور فوتونی یک بعدی نشان داده شده‌است. ساختاری شامل لایه نقص لیتیم نیوبات ($LiNbO_3$) با پاسخ غیرخطی و یک جفت لایه‌ی نقره جهت اعمال ولتاژ خارجی با آرایشی به صورت $(AB)^5$ Ag $LiNbO_3$ Ag $(BA)^5$ که در آن A, B لایه‌های دی‌الکتریک با پاسخ خطی هستند پیشنهاد شده‌است. از روش ماتریس انتقال خطی درلایه‌های دی‌الکتریک و حل معادله هلمولتز برای یافتن پاسخ غیرخطی در لایه نقص غیرخطی استفاده شده‌است. وابستگی پاسخ نوری لایه $LiNbO_3$ به ولتاژ سبب جابجایی مد نقص و کنترل پذیری الکتریکی طیف تراگسیل خطی ساختار می‌شود. همچنین، پاسخ غیر خطی لایه $LiNbO_3$، از طریق جابجایی دینامیکی خواص نوری منجربه کنترل پذیری پدیده‌های غیرخطی از جمله دوپایایی نوری می‌شود. جابجایی فرکانس مد نقص خطی و کنترل پذیری آستانه‌ی کلیدزنی با ولتاژ خارجی نشان داده شده‌است.

کلید واژه- بلور فوتونی، دوپایایی و کلید نوری، کنترل پذیری، مد نقص

Optical Bistability in 1D Photonic Crystal with External Voltage for Designing of Controllable all-Optical Switching

Fatemeh Moslemi, Kazem Jamshidi-Ghaleh

Department Of Physics, Azarbaijan Shahid Madani University, Tabriz, Iran

Abstract- In this paper, the all-optical switching controllability in one-dime photonic crystal (1DPC) structure is illustrated. A structure containing lithium niobate defect layer with nonlinear response and a pairs of Ag layers for contact electrode with arrangement of $(AB)^5$ Ag $LiNbO_3$ Ag $(BA)^5$, where A and B are dielectric layers with linear responses is proposed. The linear transfer matrix method in dielectric layers and solving of Helmholtz equation to find the nonlinear responses in nonlinear defect layer are used. Voltage dependent of optical responses in $LiNbO_3$ layer, causes the electrically shifting of the defect mode and the controllability of the linear transmittance spectrum. Also, the nonlinear responses of $LiNbO_3$ cause to tunability of nonlinear responses via the dynamically shifting the optical properties. The frequency shift of the linear defect mode and tunability of bistability threshold with external Voltage are illustrated.

Keywords: Photonic crystal, optical bistability, optical switching, controllable, defect mode

[Downloaded from www.opsi.ir on 2026-11-03]

این مقاله به شرط در دسترس بودن در وبگاه www.opsi.ir معتبر است.

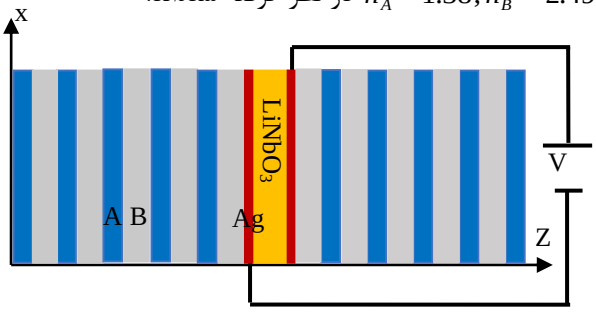
۱- مقدمه

بلورهای فوتونی نانو یا میکرو ساختارهایی هستند که از آرایه‌های متناوب از مواد ساخته می‌شوند. به علت پراش و پراکندگی که در فصل مشترک‌ها اتفاق می‌افتد، امواج الکترومغناطیسی در یک محدوده‌ی فرکانسی خاص نمی‌توانند از ساختار انتشار یابند. به این نواحی باند ممنوعه یا گاف باند فوتونی گفته می‌شود [۱]. گاف باند فوتونی به پارامترهای نوری و فیزیکی ساختار از جمله ضریب شکست و ضخامت لایه‌ها، کسر پرشدگی، زاویه و قطبش نور تابشی، آرایش و چیدمان ساختار و ....وابسته است. بسته به نوع موادی که در ساختار بلور استفاده می‌شود بلور فوتونی حاصل، خواص نوری ویژه‌ای از خود نشان می‌دهد. وجود همین ویژگی‌های منحصر به فرد قابل تنظیم، ساختار بلور فوتونی را کاندیدای خوبی برای طراحی ابزارهای تمام نوری کرده‌است. از آن جمله می توان به طراحی فیلتر نوری [۲]، کلید نوری [۳]، دیود تمام نوری [۴]، شکل دهنده‌های باریکه [۵] اشاره کرد. از طرف دیگر، برای استفاده بهینه از ساختار بلور فوتونی بایستی راهی برای کنترل پارامترهای نوری پیدا نماییم بدون اینکه ساختار آن تغییر کند. چون طیف تراگسیلی بلور فوتونی به گذردهی الکتریکی و نفوذ پذیری مغناطیسی لایه‌ها وابسته است، پس اگر بتوانیم گذردهی الکتریکی و یا نفوذپذیری لایه‌ها را با استفاده از عوامل خارجی از قبیل میدانهای الکتریکی یا مغناطیسی و ..... کنترل نماییم ساختار بلور فوتونی قابل کنترل حاصل خواهد شد. علاوه بر آنها، اگر شدت میدان فرودی در حدی باشد که پاسخ‌های غیرخطی در محیط القاء گردد، به علت وابستگی ضریب شکست به شدت، جابجایی دینامیکی در انتشار موج ایجاد شده و پدیده‌های غیرخطی از جمله دوپایایی نوری در محیط آشکار می‌شوند [۶] در نمودارهای دوپایایی نوری شدت خروجی تابع غیرخطی از شدت ورودی است. این امر باعث ایجاد حلقه پسماند می‌شود. در نتیجه می‌توان از چنین ساختارهایی به عنوان ترانزیستور نوری، حافظه‌های نوری و کلیدهای تمام نوری استفاده کرد [۳].

اگر چه در دو دهه‌ی اخیر آرایش‌های متنوعی شامل انواع مختلفی از سیستم‌های اتمی و نیم رساناها و غیره برای کنترل دوپایایی مورد بررسی قرار گرفته‌اند [۷]، با این حال در تمامی این تحقیقات برای یک آرایش و چیدمان ثابت، کنترل دوپایایی امکان پذیر نیست. ولی دوپایایی نوری بدست آمده از بلورهای فوتونی را می‌توان با تغییر پارامترهای فیزیکی و یا نوری ساختار تغییر داد. جابجایی دینامیکی لبه‌های گاف باند و یا مد نقص سبب ایجاد دوپایایی نوری در بلور فوتونی می‌شود [۸]. در این مقاله برای کنترل رفتار دوپایایی نوری، بلور فوتونی شامل لایه نقص لیتیم نیوبات با پاسخ غیرخطی را در نظر گرفته و نشان داده می‌شود که با اعمال ولتاژ خارجی رفتار دوپایایی نوری و آستانه‌ی کلیدزنی نوری قابل کنترل است. این تکنیک در مقاله‌ایی که اخیرا چاپ شده در ساختاری شامل لایه نقص آلاییده با نانوذرات فلزی با پاسخ غیرخطی نشان داده شده است [۹].

۲- مدل تئوری و نظری

طرحی از ساختار پیشنهادی برای کنترل دوپایایی نوری با آرایش $(AB)^5\ Ag\ LiNbO_3\ Ag\ (BA)^5$ در شکل-۱ رسم شده‌است. در این ساختار لایه‌های A و B به ترتیب محیط‌های دی‌الکتریک TiO_2 و MgF_2 با ضخامت‌های $d_A = 56nm, d_B = 84nm$ و ضریب شکست‌های ثابت $n_A = 1.38, n_B = 2.49$ در نظر گرفته شده‌اند.



شکل ۱: شمایی از بلور فوتونی یک‌بعدی پیشنهادی برای طراحی کلید نوری به شکل $(AB)^5\ Ag\ LiNbO_3\ Ag\ (BA)^5$. لیتیم نیوبات و دو لایه‌ی نقره، لایه‌های نقص ساختار متقارنند.

لیتیم نیوبات ($LiNbO_3$) به عنوان یکی از لایه‌های نقص، ساختار بلوری ناهمسانگردی دارد که خواص نوری آن به راستای موج انتشاری بستگی دارد [۱۰]. برای مثال اگر میدان اعمالی در راستای محور نوری بلور (در جهت محور Z) باشد ضریب شکست در این راستا مربوط به موج غیرعادی و به صورت زیر خواهد بود:

$$n_e(V) = n_{eo} - 0.5 n_{eo}^3 \gamma_{33} \frac{V}{d} \qquad (۱)$$

که در آن $n_{eo} = 2.2$، ضریب شکست غیرعادی بلور در غیاب

این مقاله به شرط در دسترس بودن در وبگاه www.opsi.ir معتبر است.

[Downloaded from www.opsi.ir on 2026-11-03]

ولتاژ خارجی، $\gamma_{33}=30.9 Pm/V$ ضریب الکترو- نوری و $d=110\ nm$ ضخامت لایه هستند. از طرفی برای بررسی رفتار دوپایایی نوری، لایه‌ی $LiNbO_3$ غیرخطی در نظر گرفته شده و مقدار پذیرفتاری غیرخطی مرتبه‌ی سوم آن برابر با $\chi^{(3)}=9.1\times10^{-7} esu$ است [۱۱]. برای اعمال ولتاژ و برقراری اتصالات الکتریکی از دولایه‌ی نقره استفاده شده‌است. نقره چون یک محیط فلزی است ضریب شکست آن وابسته به فرکانس بوده و از مدل درود تبعیت می‌کند. ولی چون ضخامت آن ۹ نانومتر و کمتر از عمق نفوذ فرض شده، می‌توان از پاشندگی آن صرف‌نظر کرد. ضریب شکست نقره در محدوده‌ی ۹۰۰-۵۰۰ نانومتر مقدار ثابت ۰/۱۳ می‌باشد [۱۲]. برای محاسبه‌ی تراگسیل ساختار در لایه‌های خطی از روش ماتریس انتقال خطی استفاده می‌شود[۱۳]. مطابق این روش ضریب عبور و تراگسیل ساختار از روابط زیر بدست می‌آیند:

$$t=\frac{2}{(m_{11}+m_{22})+(m_{12}+m_{21})},\quad T=|t|^2 \qquad (۲)$$

که در آن m_{ij}ها عناصر ماتریس انتقال کل ساختار هستند و از حاصل‌ضرب ماتریس انتقال تک تک لایه‌ها بدست می‌آید. در لایه‌ی غیرخطی از روش حل عددی معادله‌ی موج غیر-خطی هلمولتز که به شکل زیر است استفاده شده است[۸]:

$$\frac{d^2E}{dz^2}+\frac{\omega^2}{c^2}\mu(n_{e(V)}^2+\chi^{(3)}|E(z)|^2)E(z)=0 \qquad (۳)$$

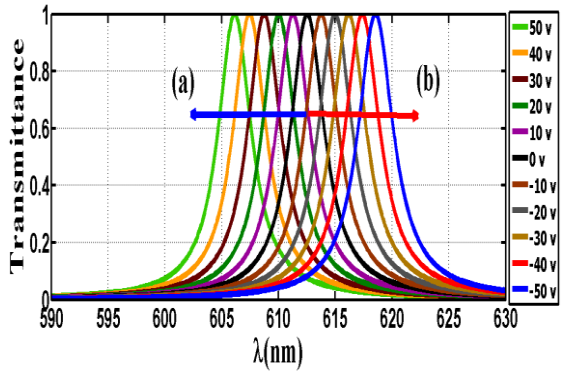
شکل ساده شده رابطه (۳) به صورت زیر خواهد بود:

$$E(z_0-\delta z)=2E(z_0)-E(z_0+\delta z) -\frac{\omega^2}{c^2}\mu[n_{e(V)}^2+\chi^{(3)}|E(z_0)|^2](\delta z)^2E(z_0) \qquad (۴)$$

در این روش به ازای هر میدان خروجی (E_{out}) و با اعمال شرایط مرزی بر روی مولفه‌های مماسی میدانها، می‌توان میدان الکتریکی در دو لایه‌ی مجاور و در نهایت میدان تابشی (E_{inc}) در ابتدای ساختار را محاسبه نمود.

۳- نتایج و بحث

شکل-۲ طیف تراگسیل خطی بر حسب طول موج را به ازای ولتاژهای خارجی اعمالی در بازه‌ی ۵۰ تا ۵۰- ولت نشان می‌دهد. هر رنگ بیانگر یک ولتاژ اعمالی مجزاست. مشاهده می‌شود که طول موج تراگسیل مد نقص به ولتاژ خارجی وابسته است. علت آن وابستگی ضریب شکست لایه-ی $LiNbO_3$ به ولتاژ خارجی است. هرگونه تغییر در اندازه ضریب شکست (یا در حالت کلی راه نوری) سبب تغییر شرط تداخل براگ و در نهایت سبب جابجایی طول موج مد نقص خواهد شد. در این بازه دو جابجایی طول موجی در مد نقص دیده می‌شود. با افزایش ولتاژ در بایاس مثبت(a)، مد نقص به سمت طول موج‌های کوتاه (جابجایی به آبی) و در بایاس منفی(b)، به سمت طول موج‌های بلند (جابجایی به قرمز) جابجا شده‌است. مقدار جابجایی در بازه ولتاژ اعمالی حدود ۱۳ نانومتر است. به عبارت دیگر، ساختار در بازه‌ی فوق به عنوان فیلتر نوری کنترل پذیر با پهنای ۱۳ نانومتر عمل خواهد کرد.

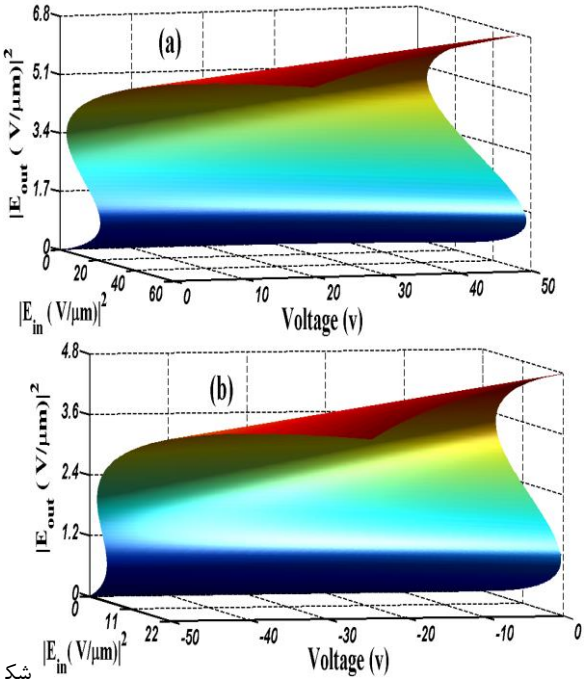


شکل ۲: طیف تراگسیل خطی بر حسب طول موج به ازای ولتاژهای خارجی اعمالی با رنگهای متفاوت. افزایش ولتاژ در بایاس مثبت و منفی به ترتیب سبب جابجایی مد نقص به سمت طول موجهای کوتاه و بلند می‌شود.

حال با در نظر گرفتن پاسخ غیرخطی لایه‌ی لیتیم نیوبات رفتار دوپایایی نوری از ساختار را بررسی می‌کنیم. در این حالت ضریب شکست لایه‌ی نقص علاوه بر ولتاژ خارجی به شدت میدان تابشی نیز وابسته خواهد بود. به عبارتی، علاوه بر جابجایی الکتریکی که ناشی از اعمال ولتاژ خارجی است، با افزایش شدت میدان تابشی طول موج مد نقص جابجایی دینامیکی به سمت طول موج‌های بلند خواهد داشت. شکل-۳ رفتار دوپایایی نوری را به ازای ولتاژهای مثبت (a) و منفی (b) متفاوت نشان می‌دهد. همان طور که مشاهده می-شود یا افزایش ولتاژ در بایاس مثبت و کاهش ضریب شکست لایه‌ی $LiNbO_3$، شدت آستانه‌های کلیدزنی رو به بالا و پایین بتدریج افزایش می‌یابند (نمودار(a)) ولی در بایاس منفی به علت افزایش اندازه‌ی ضریب شکست، مقادیر شدت آستانه‌های کلیدزنی رو به بالا و پایین بتدریج کاهش می-یابند (نمودار(b)).

این مقاله به شرط در دسترس بودن در وبگاه www.opsi.ir معتبر است.

[Downloaded from www.opsi.ir on 2026-11-03]

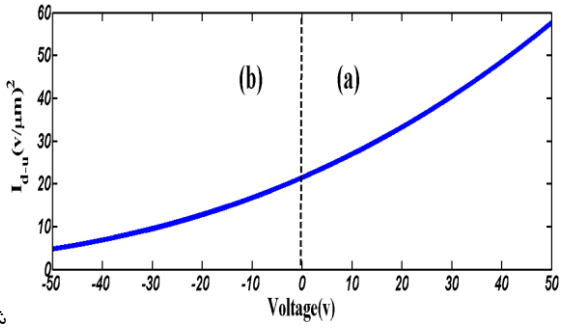


شکل ۳: نمودارهای سه بعدی رفتار دوپایایی نوری (شدت خروجی بر حسب شدت ورودی) به ازای ولتاژهای مثبت (a) و منفی (b).

اندازه‌ی شدت آستانه‌ی کلیدزنی به بالا(I_{d-u}) نقش بسزایی در کنترل رفتار دوپایایی نوری دارد. به گونه‌ای که هر چقدر مقدار آن کمتر باشد دوپایایی نوری در شدت تابشی کمتری اتفاق می‌افتد. شکل-۴ روند تغییرات اندازه شدت آستانه‌ی کلیدزنی به بالا را به ازای ولتاژهای مختلف در بازه‌ی ۵۰ تا ۵۰- ولت نشان می‌دهد. با افزایش ولتاژ در بایاس مثبت (a)، اندازه‌ی شدت آستانه‌ی کلید به بالا به علت کاهش اندازه‌ی ضریب شکست افزایش یافته و دوپایایی نوری در شدت‌های بالایی دیده می‌شود ولی در بایاس منفی(b)، با افزایش ولتاژ و به تبع آن افزایش اندازه‌ی ضریب شکست، اندازه‌ی شدت آستانه‌ی کلید به بالا کاهش یافته و دوپایایی نوری در شدت‌های کمتری دیده می‌شود. چنین ساختاری به عنوان کلید نوری کنترل پذیر در ابزارهای نوری عمل خواهد کرد.

۴- نتیجه‌گیری

برای کنترل رفتار کلیدزنی نوری از ساختاری شامل لایه‌ی نقص لیتیم نیوبات با پاسخ غیرخطی استفاده شد. نتایج نشان دادند که در طیف تراگسیل خطی مد نقصی وابسته به ولتاژ خارجی وجود داشت طوری که افزایش ولتاژ سبب جابجایی مد نقص می‌شود. علاوه بر آن برای شدت میدان فرودی بزرگ (در حدی که پاسخ غیرخطی در لایه لیتیم نیوبات ایجاد شود) علاوه بر جابجایی الکتریکی، جابجایی دینامیکی نیز اتفاق می‌افتد. جایجایی طول موج مد نقص و کنترل پذیری آستانه‌ی کلیدزنی دوپایایی نوری با اعمال ولتاژ خارجی نمایش داده شد.



شکل ۴: اندازه‌ی شدت آستانه کلید زنی به بالا به ازای ولتاژهای اعمالی متفاوت در بازه ۵۰ تا ۵۰- ولت.

مراجع

[1] E. Yablonovitch, “Inhibited spontaneous emission in solid-state physics physics and electronics”, Phys. Rev. Lett, 58, 20, 2059- 2062, 1987 and S. John, “Strong localization of photons in certain disordered dielectric superlattices”, Phys. Rev. Lett, 58, 23, 2486- 2489, 1987.

[2] S. Fan, P.R. Villeneuve, J. D. Joanopulos, and H. A. Haus, “Channel Drop Tunneling through Localized States,” Phys. Rev. Lett. 80, 5, 960-963, 1998.

[3] W. J. Firth, “Optical memory and spatial chaos,” Phys. Rev. Lett, 61, 3, 329-339, 1988.

[4] M. D. Tocci, M.J. Bloemer, M. Scalora, J. P. Dowling, and C.M. Bowden, “Thin film nonlinear optical diode,” Appl. Phys. Lett, 66, 18, 2324-2326, 1996.

[5] K. Jamshidi-Ghaleh and F. Bayat, "Generating frequency dependent twisted beam shapes using 1DPC nanostructure with graded-index defect layer," Opt. Lett, 39, 13, 3802-3805, 2014.

[6] N. C. Panoiu, M. Bahl, and R. M. Osgood, “All-optical tunability of a nonlinear photonic crystal channel drop filter,” Opt. Express, 12, 8, 1605- 1610, 2004.

[7] H. Jafarzadeh, M. Sahrai, K. Jamshidi-Ghaleh, “Controlling the optical bistability via quantum interference of incoherent pump in a four-level atomic system,” Optik, 126, 5, 530- 535, 2015.

[8] R. Wang, J. Dong, D. Y. Xing, “Dispersive optical bistability in one-dimensional doped photonic band gap structures”, Phys. Rew E, 55, 5, 6301- 6304, 1997.

[9] F. Moslemi and K. Jamshidi-Ghaleh, “Electrically tunable optical bistability based on one- dimensional photonic crystals with nonlinear nanocomposite materials,” J. Appl. Phys, 119, 093101, 2016.

[10] A. Yariv, *Quantum Electronics*, p 298, John Wily & Sons, 1989.

[11] W. Qu- Quan, S. Jing, Y. Bai-Feng, L. Hai-Lin, X. Gui-Guang, G. Qi-Huang, and X. Qi-Kun, “A Z-Scan Study of LiNbO3 Thin Films,” Chin. Phys. Lett, 19, 5, 677-679, 2002.

[12] A. D. Rakić, A. B. Djurišić, J. M. Elazar, and M. L. Majewski, “Optical properties of metallic films for vertical-cavity optoelectronic devices,” Appl. Opt, 37, 22, 5271-5283, 1998.

[13] P. Yeh, “*Optical waves in layered media*”, John Wiley& Sons, New York, 2005.

این مقاله به شرط در دسترس بودن در وبگاه www.opsi.ir معتبر است.

[Downloaded from www.opsi.ir on 2026-11-03]