بیستمین کنفرانس اپتیک و فوتونیک ایران
و ششمین کنفرانس مهندسی و فناوری فوتونیک ایران
۸ تا ۱۰ بهمن ماه۱۳۹۲ - دانشگاه صنعتی شیراز

بررسی اثر حضور لایه‌های نقص در بلورهای فوتونی غیرخطی یک بعدی با استفاده از معادلات مد کوپل

محمد آقایی و داود حبری

گروه فیزیک دانشگاه تربیت معلم آذربایجان، تبریز، ایران

گروه فیزیک دانشگاه تحصیلات تکمیلی زنجان،زنجان، ایران

چکیده – در این مقاله با استفاده از مدل‌بندی ریاضی و شبیه سازی عددی به مطالعه تئوری انتشار نور همدوس در بلور فوتونی یک بعدی شامل لایه های نقص پرداخته شده است. برای این منظور معادلات مد کوپل برای ساختار نوری جدید بدست آمده و در حالت مانا حل شده است. با مدیریت لایه های نقص از نظر تعداد و مکان لایه ها در داخل ساختار نوری تناوبی تغییرات چشمگیری بر روی منحنی تراگسیل مشاهده شده است.

کلید واژه- بلور فوتونی غیر خطی یک بعدی، معادلات مد کوپل، لایه‌های نقص

Investigation on the effect of defect layers in 1D nonlinear photonic crystals by using coupled mode equations

Mohammad Aghaie, Davud Hebri

Department of Physics, Azarbaijan University of Tarbiat Moallem, Tabriz, Iran

Department of Physics, Institute for Advanced Studies in Basic Sciences, P. O. Box 45195-159, Zanjan 45195, Iran

Abstract- In this paper, by using mathematical modeling and detailed numerical simulations, we investigate the input-output transmission regimes in one-dimensional (1D) nonlinear photonic crystal including array defect layers. A coupled-mode system is derived from the Maxwell equations and analyzed for the stationary-transmission regime in the new proposed structure. By management in position and number of defects embedded into a periodic structure we see noticeable changes in transmission curves.

Keywords: 1D nonlinear photonic crystal, coupled mode equation, defect layers

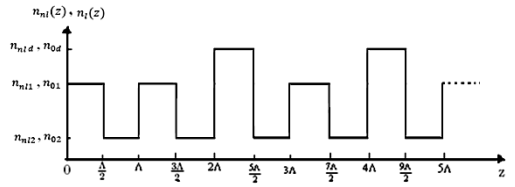
[Downloaded from opsi.ir on 2026-10-31]

۱- مقدمه

بلورهای فوتونی با ساختار تناوبی از دی الکتریک های با ضریب شکست های متفاوت و خواص جالب و منحصر به فردشان، توجه محققان زیادی را در چند دهه اخیر به خود جلب کرده است. محققین انتشار نور در ساختارهای نوری تناوبی غیر خطی یک بعدی را که دارای تغییرات تناوبی در ضریب شکست خطی و غیر خطی کر هستند را اغلب با استفاده از مجموعه معادلات غیر خطی مد کوپل (CMEs) [۱-۴] مورد مطالعه قرار می دهند. همچنین معرفی نقص‌ها در بلورهای فوتونی روشی برای کنترل مشخصه‌های نوری بلورهای فوتونی می باشد. در این مقاله اثر نقص‌ها روی خواص نوری بلور فوتونی یک بعدی با استفاده از مجموعه معادلات غیر خطی مد کوپل (CMEs) مورد بررسی قرار داده شده است که با اعمال لایه‌های نقص پدیده‌هایی از قبیل دوپایایی و چندپایایی نوری مشاهده شده است.

۲- مدل‌بندی ریاضی مسئله

در اینجا انتشار نور همدوس در راستای z ساختار نوری پیشنهاد شده مورد بررسی قرار می‌گیرد. ساختار نوری مرکب از لایه‌های یک در میان با ضریب شکست های خطی و غیر خطی کر متفاوت است که چندین لایه نقص با ضریب شکست‌های خطی و غیر خطی کر یکسان با فواصل مشخص از یکدیگر در داخل ساختار قرار دارد، شکل۱ پروفایل ضریب شکست ساختار نوری معرفی شده را نشان می‌دهد. ضریب شکست‌های خطی و غیر خطی کر مربوط به هر لایه با n_{02}, n_{01} و n_{nl2}, n_{nl1} و همچنین ضریب شکست خطی و غیرخطی کر در لایه‌های نقص با n_{nld}, n_{0d} نشان داده شده است.



شکل۱: پروفایل ضریب شکست خطی و غیرخطی کر ساختار نوری

ما معادله موج ماکسول غیرخطی یک بعدی را برای میدان الکتریکی داخل ساختار غیر خطی تناوبی که بوسیلهٔ لایه های نقص اشغال شده است را مطالعه می کنیم[۵]،

$$\frac{\partial^2 E}{\partial z^2} - \frac{n^2(z,|E|^2)}{c^2}\frac{\partial^2 E}{\partial t^2} = 0 \qquad (۱)$$

که در آن فرض شده است،

$$\left\| n^2(z,|E|^2)\frac{\partial^2 E}{\partial t^2} \right\| >> \left\| 2\frac{\partial E}{\partial t}\frac{\partial n^2}{\partial t} + E\frac{\partial^2 n^2}{\partial t^2} \right\|$$

برای فرمول‌بندی ریاضی ساختار نوری لایه‌های نقص، بلور فوتونی غیرخطی یک-بعدی در حالت بدون نقص در نظر گرفته شده و سپس جملات اختلالی $\Delta^l(z)$ و $\Delta^{nl}(z)$ به آن اضافه شده است، هر دوی جملات غیر تناوبی هستند و در واقع مولفه‌های خطی و غیرخطی اختلال می باشند. جملات اختلالی به صورت روابط (۲) معرفی می شوند،

$$\Delta^l(z) = \sum_{n=1}^{ND} \Delta^0 \exp[-k^2(z-d_n)^2] \qquad (۲)$$

$$\Delta^{nl}(z) = \sum_{n=1}^{ND} \Delta^{nl} \exp[-k^2(z-d_n)^2]$$

که ND و d_n به ترتیب تعداد نقص‌ها و فاصله هر نقص از مرکز ساختار می‌باشند. عدد صحیح n شماره لایه نقص را مشخص می‌کند. بنابراین ضریب شکست برای ساختار نوری تناوب مختل شده، به صورت زیر بدست می آید،

$$n(z,|E|^2) = n_{\ln} + 2n_{0k}\cos kz + n_{nl}|E|^2 + 2n_{2k}|E|^2\cos kz$$
$$+ \sum_{n=1}^{ND}(\Delta^0 + \Delta^{nl}|E|^2)\exp[-k^2(z-d_n)^2] \qquad (۳)$$

که در آن

$$n_{\ln} = \frac{n_{01}+n_{02}}{2} \quad , \quad n_{nl} = \frac{n_{nl1}+n_{nl2}}{2} \qquad (۴)$$

$$n_{0k} = \frac{n_{01}-n_{02}}{\pi} \quad , \quad n_{2k} = \frac{n_{nl1}-n_{nl2}}{\pi}$$

و $k = 2\pi/\Lambda$ عدد موج و Λ طول پریود فضایی ساختار تناوبی می باشد. از اینرو طول کل ساختار $l = N\Lambda$ است. از طرفی نیز می توان E(z, t) را به صورت زیر نوشت،

$$E(z,t) = A_+(z,t)\exp[i(k_0 z - \omega_0 t)]$$
$$+ A_-(z,t)\exp[-i(k_0 z + \omega_0 t)] \qquad (۵)$$

که A_+ و A_- پوش تغییرات آرام امواجی هستند که به ترتیب به سمت جلو و عقب در راستای z حرکت می کنند و $\omega_0 = ck_0/|n_{\ln}|$ فرکانس نور فرودی می باشد که داخل باند ممنوعه قرار دارد و $k_0 = 2\pi|n_{\ln}|/\lambda$ عدد موج نور است. هنگامی که تغییرات فضایی ساختار پریودیک برای ضریب شکست خطی و غیر خطی کر در مقایسه با متوسط ضریب شکست کوچک باشد یعنی، $|n_{0k}|, |n_{nl}||E|^2, |n_{2k}||E|^2 << |n_{\ln}|$ معادلهٔ موج ماکسول ساده می شود. از طرفی نیز اگر $\lambda = 2|n_{\ln}|\Lambda$، با استفاده

[Downloaded from opsi.ir on 2026-10-31]

از تقریب تغییرات آرام پوش یعنی $\left|\frac{\partial A_{\pm}}{\partial z}\right|,\left|\frac{\partial A_{\pm}}{\partial t}\right| << |A_{\pm}|$ در نزدیک تشدید، معادلات موج مد کوپل که از معادلات (۱) – (5) بدست آمده است به راحتی توسط دامنهٔ $A_{\pm}$ برآورد می کند[۵-۶]،

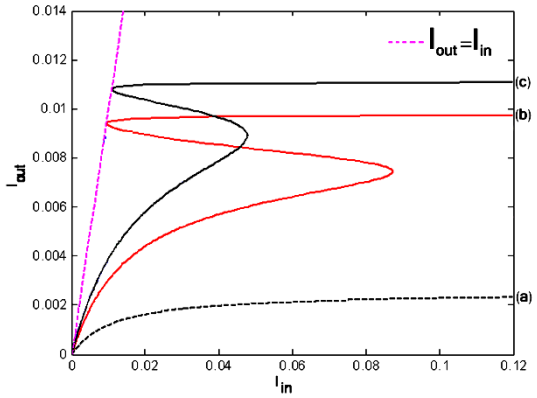
$$i(\frac{\partial A_+}{\partial Z}+\frac{\partial A_+}{\partial T})+n_{0k}A_-+\Delta^0 A_+\sum_{n=1}^{ND}\exp[-\pi^2(Z-D_n)^2]$$
$$+(n_{nl}+\Delta^{nl}\sum_{n=1}^{ND}\exp[-\pi^2(Z-D_n)^2])(|A_+|^2+2|A_-|^2)A_+$$
$$+n_{2k}[(2|A_+|^2+|A_-|^2)A_-+A_+^2A_-^*]=0, \quad (۶)$$

$$-i(\frac{\partial A_-}{\partial Z}-\frac{\partial A_-}{\partial T})+n_{0k}A_++\Delta^0 A_-\sum_{n=1}^{ND}\exp[-\pi^2(Z-D_n)^2]$$
$$+(n_{nl}+\Delta^{nl}\sum_{n=1}^{ND}\exp[-\pi^2(Z-D_n)^2])(2|A_+|^2+|A_-|^2)A_+$$
$$+n_{2k}[(|A_+|^2+2|A_-|^2)A_++A_+^*A_-^2]=0,$$

که $Z=\omega_0 z/c$ و $T=\omega_0 t/|n_{ln}|$ مختصات زمان و مکان نرمالیزه شده هستند و D_n نیز نرمالیزه شده d_n و به صورت $D_n=\omega_0 d_n/c$ است. در اینجا با استفاده از روش تفاضل محدود، معادلات موج مد کوپل را برای باریکه موج پیوسته که از سمت چپ بر روی ساختار فرود می آید در حالت مانا ($\partial A_{\pm}/\partial T=0$) حل شده است و منحنی‌های تراگسیل نور فرودی برای ساختار نوری پیشنهاد شده بدست می‌آید.

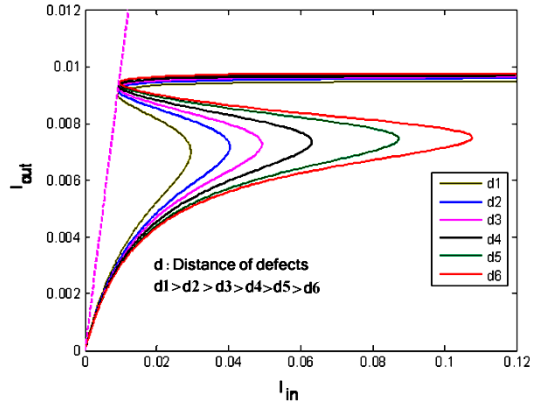
۳- محاسبات عددی و نتایج

در اینجا به بررسی نتایج شبیه سازی آرایش‌های گوناگون لایه‌های نقص در بلور فوتونی غیر خطی یک بعدی پرداخته می‌شود. منحنی‌های تراگسیل در حالت‌های بدون حضور و در حضور لایه‌های نقص شبیه سازی شده است و با یکدیگر مقایسه شده‌اند. شکل۲ اثر تعداد لایه‌های نقص در ساختار نوری را نشان می‌دهد که منجر به ظهور دوپایایی نوری در منحنی تراگسیل شده است و نشان می‌دهد که با تغییر تعداد نقص‌ها، ویژگی‌های دوپایایی منحنی تراگسیل مانند آستانه کلیدزنی و میزان محدود کنندگی شدت تابش تراگسیل شده قابل تغییر و کنترل خواهد بود. منحنی تراگسیل برای ساختار نوری پیشنهاد شده با مقدار پارامترهای $n_{0k}=-0.02, n_{nl}=0, n_{2k}=1$, $N=35$, $\Delta^{nl}=1$, $\Delta^0=0.99$ محاسبه شده است.



شکل۲: اثر تعداد لایه های نقص در منحنی تراگسیل a) بدون لایه نقص b) با پنج لایه نقص c) با شش لایه نقص.

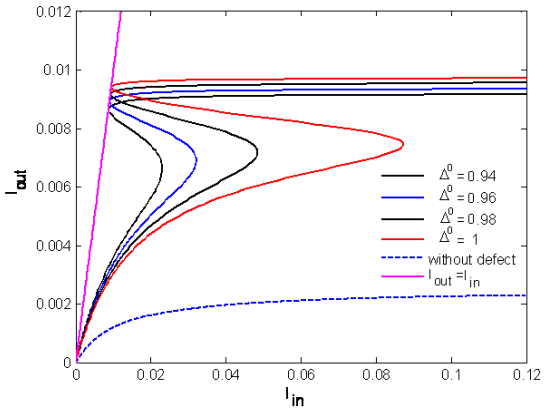
شکل۳ اثر فاصله بین لایه‌های نقص در ساختار نوری معرفی شده با ۵ لایه نقص را نشان می‌دهد. بطوریکه با تغییر فاصلهٔ بین لایه‌های نقص، آستانه کلیدزنی دوپایایی نوری قابل تغییر و کنترل می باشد. هر یک از منحنی‌های تراگسیل در شکل۳ برای ساختار با ۵ نقص با مقادیر پارامترهای مربوط به شکل۲ رسم شده است. در شکل (۳) مشاهده می شود که با کاهش فاصله بین لایه‌های نقص، مقدار آستانهٔ دوپایایی نوری افزایش می یابد.



شکل۳: اثر فاصله بین لایه‌های نقص در ساختار نوری شامل ۵ نقص.

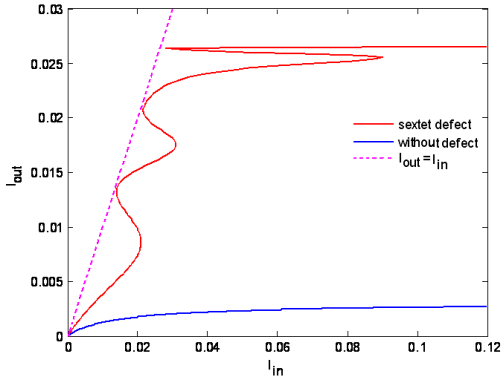
شکل۴ اثر تغییر ضریب شکست خطی لایه‌های نقص روی منحنی تراگسیل را نشان می‌دهد. در این شکل از پنج لایه نقص با فواصل $D=4$ در داخل ساختار نوری استفاده شده است. منحنی تراگسیل با مقدار پارامترهای $N=35$, $n_{nl}=0, n_{2k}=1, n_{0k}=0.02$ محاسبه شده است. مطابق شکل با تغییر ضریب شکست خطی لایه‌های نقص، آستانه کلیدزنی دوپایایی نوری در منحنی تراگسیل قابل تغییر و تنظیم می باشد.

[Downloaded from opsi.ir on 2026-10-31]



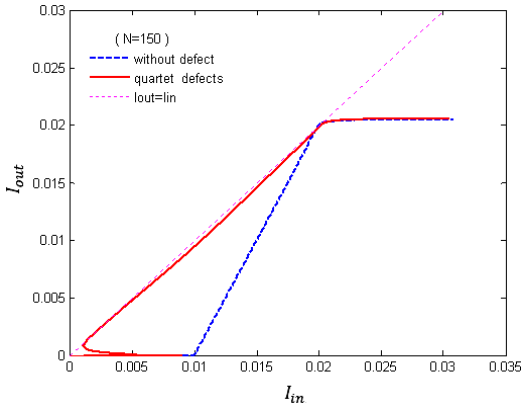
شکل۴: اثر ضریب شکست خطی لایه‌های نقص در منحنی تراگسیل.

در شکل۵ منحنی تراگسیل برای ساختار نوری، با مقدار پارامترهای $\Delta^0 = 2, n_{nl} = 1 \quad , n_{2k} = 1 \quad , n_{0k} = 0.02$, $N = 35$ $\Delta^{nl} = 2$ با شش لایه نقص محاسبه شده است. اثر وجود شش لایه نقص در ساختار نوری منجر به ظهور چندپایایی نوری در منحنی تراگسیل می‌شود.



شکل۵: اثر حضور ۶ نقص در ساختار نوری و ظهور چند پایایی نوری در منحنی تراگسیل.

شکل۶ اثر افزایش طول ساختار تا $N = 150$ بر منحنی تراگسیل در حضور یک آرایه نقص چهارتایی را نشان می‌دهد. منحنی تراگسیل برای ساختار نوری پیشنهاد شده با مقدار پارامترهای $n_{0k} = -0.02 \quad , n_{2k} = 1 , n_{nl} = 0$, $\Delta^{nl} = 2$ $\Delta^0 = 0.4$, محاسبه شده است. مطابق شکل۶ منحنی تراگسیل در حالت بدون نقص به شکل ساده *الگوی دو* پله‌ای بین مقادیر تراگسیل پایین ($I_{out} = 0$) و تراگسیل بالای محدود به یک مقدار حدی ($I_{out} = I_{\lim}$) در آمده است، در حالیکه با اعمال چهار لایه نقص مشاهده می‌شود که الگوی منحنی تراگسیل به شکل مفیدتری تغییر می‌کند. در منحنی تراگسیل جدید خاصیت کلید-زنی بین مقادیر تراگسیل پایین ($I_{out} = 0$) و حالت شفاف ساختار نوری ($I_{out} = I_{in}$) ایجاد می‌شود، بطوریکه با تغییر طول ساختار ومدیریت مکان لایه‌های نقص در ساختار نوری آستانه کلیدزنی قابل تغییر و تنظیم خواهد بود و در نهایت تابش تراگسیل شده را به یک مقدار حدی ($I_{out} = I_{\lim}$) محدود می‌کند.



شکل۶: اثر افزایش طول ساختار تا را بر منحنی تراگسیل.

۴- نتیجه‌گیری

در این مقاله با استفاده از معادله ماکسول غیرخطی، معادلات مد کوپل حاکم بر انتشار نور در ساختار نوری پریودیک یک بعدی با لایه‌های نقص بدست آمده است. با حل عددی معادلات موج مد کوپل در حالت مانا، منحنی-های تراگسیل در حضور آرایش‌های مختلف لایه‌های نقص به دست آمده است. نتایج شبیه سازی حاکی از تغییرات چشمگیر و مناسب برای منحنی تراگسیل با کمک لایه های نقص می باشد. از جمله نتایج قابل ملاحظه می توان به ایجاد و کنترل حالتهای دوپایا و چندپایا در منحنی‌های تراگسیل اشاره کرد.

مـراجع

[1] S. Radic, N. George, and G. P. Agrawal, " Theory of Low-threshold optical switching in nonlinear phase-shifted periodic structures,'' **J. Opt. Soc. Am. B 12**, 671–680 (1995).

[2] M. D. Tocci, M. J. Bloemer, M. Scalora, J. P. Dowling, and C. M. Bowden ''Thin-film nonlinear optical diode,'' **Appl. Phys. Lett. 66**, 2324–2326 (1995).

[3] C. M. de Sterke and J. E. Sipe, "Gap solitons," **Progress in Optics,** Vol. 33, E. Wolf, eds. (North-Holland, Amsterdam, 1994), Vol. 33 pp. 203-260.

[4] W. Samir, S.J. Garth, and C. Past, "Interplay of grating and nonlinearity in mode coupling" , **J. Opt. Soc. Am. B** 11, 64-71 (1994).

[5] D. Pelinovsky, L. Brzozowski, J. Sears, and E. H. Sargent, "Stable All-Optical Limiting in Nonlinear Periodic Structures. I. Analysis" **J. Opt. Soc. Am. B 19**, 43-53 (2002).

[6] D. Pelinovsky and E. H. Sargent, "Stable all-optical limiting in nonlinear periodic structures. II. Computations," **J. OptSoc. Am. B** 19, 1873–1889 (2002).

[Downloaded from opsi.ir on 2026-10-31]