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

بررسی اثر بهره بر روی آستانه‌ی دوپایداری بلورهای فوتونی یک بعدی شامل محیط-های غیرخطی

عباس قاسم‌پور اردکانی، طاهره کلانتری و حمید نادگران

شیراز، دانشگاه شیراز، دانشکده علوم، بخش فیزیک

چکیده – در این مقاله یک بلور فوتونی یک بعدی شامل دو لایه‌ی نقص که دارای بهره‌ی نوری می‌باشند در نظر گرفته می‌شود. بین دو لایه‌ی نقص، یک لایه با ضریب شکست غیرخطی قرار می‌دهیم. با استفاده از روش ماتریس انتقال بهبود یافته، اثر افزایش میزان بهره‌ی نوری، بر روی آستانه‌ی دوپایداری نوری در دوحالت تابش عمودی و مایل مطالعه می‌شود. محاسبات ما نشان می‌دهد که با افزایش بهره‌ی آستانه، دوپایداری کاهش می‌یابد. اما افزایش بیشتر بهره، از یک مقدار معین موجب افزایش آستانه‌ی دوپایداری می‌شود.

کلید واژه: بلور فوتونی، دوپایداری نوری، ماتریس انتقال

Investigation of gain effect on the bistability threshold in one-dimensional photonic crystals containing nonlinear media

Abbas Ghasempour Ardakani, Tahereh Kalantari and Hamid Nadgaran

Department of Physics, College of Science, Shiraz University, Shiraz 71454, Iran

Abstract- In this paper, a one-dimensional photonic crystal composed of two defect layers with optical gain is considered. We place a nonlinear layer between two defect layers. Using the modified transfer matrix method, the effect of increasing the optical gain on the bistablity threshold is studied in both normal and oblique incidences. Our calculations show that the threshold of bistability decreases with increasing the optical gain. However, increasing the optical gain above a particular value leads to the enhancement of bistability threshold.

Keywords: photonic crystal, optical bistability, transfer matrix

[Downloaded from opsi.ir on 2025-07-15]

۱-مقدمه

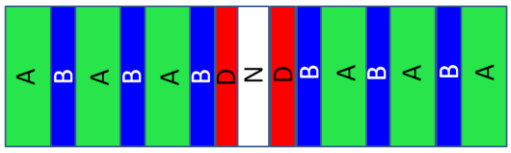
دو پایداری نوری در سال‌های اخیر توجه زیادی را به خود جلب کرده است. دلیل این امر، کاربردهای این پدیده در ذخیره‌سازی نوری، مدارهای منطقی نوری، سوئیچ‌های نوری و پردازش سیگنال است [۱و۲]. دوپایداری نوری پدیده‌ای است که شامل یک عنصر غیرخطی و یک پس خوران نوری است. بعضی از سامانه‌های نوری غیرخطی می‌توانند به ازای یک شدت ورودی، بیش از چند شدت خروجی داشته باشند. حالت دو پایداری نوری حالتی است که به ازای یک شدت ورودی، دو شدت خروجی و حالت چند پایداری نوری، حالتی است که به ازای یک شدت ورودی، چند شدت خروجی داشته باشد.

اثرات غیرخطی مانند مدولاسیون فاز و بهره‌ی متقابل در لیزرهای نیمه‌هادی، جذب دو فوتونی، جذب اشباع و اثر کر برای طراحی تراشه‌های دوپایدار مورد استفاده قرار می‌گیرند [۱]. در این مقاله فرض می‌شود که عنصر غیرخطی دارای اثر کر باشد. موادی مثل شیشه‌های چلکوجناید، سیلیکای آلائیده به اربیوم و یتربیوم، گرافین و نقره موادی هستند که پذیرفتاری مرتبه سوم بزرگی دارند. این مواد برای مشاهده‌ی اثر کر مناسب هستند.

در ساخت سامانه‌های دوپایدار نوری، کم کردن آستانه‌ی دو پایداری از اهمیت خاصی برخوردار است. در سال‌های اخیر، روش‌های مختلفی برای کم کردن آستانه‌ی دوپایداری انجام شده است. یکی از راه‌های پیشنهاد شده، استفاده از ترکیب پس‌خوران توزیع شده و کاواک فابری پرو به همراه لایه‌های منطبق فاز است [۲]. اما در اینجا تعداد لایه‌های مورد نیاز بسیار زیاد بود. راه دیگر کم کردن آستانه، وارد کردن نقص در یک بلور فوتونی بود [۳]. در اینجا دوپایداری با استفاده از جابجایی مدهای نقص بدست می‌آید. در سال ۲۰۰۳ برای اولین بار دوپایداری در بلورهای فوتونی دارای نقص، به صورت تجربی مشاهده شد [۴]. در سال‌های اخیر بلورهای فوتونی برای تولید دوپایداری نوری به شدت مورد توجه قرار گرفته‌اند [۵و۶]. ما در این مقاله، لایه‌ی نقص را به صورت یک محیط فعال نوری دارای بهره در نظر می‌گیریم و لایه‌ی غیرخطی را بین دو لایه‌ی نقص قرار می‌دهیم. هدف از استفاده از لایه‌ی فعال، کم کردن آستانه‌ی دوپایداری است. بنابراین در این جا اثرات بهره، بر روی خواص دوپایداری بررسی خواهد شد.

۲-روش تئوری

در شکل ۱، طرح‌واره‌ای از ساختار طراحی شده در این مقاله نشان داده شده است. این ساختار شامل دو بلور فوتونی یک بعدی است که در آن لایه با ضریب شکست بیشتر با A و لایه با ضریب شکست کمتر با B نشان داده شده است. ضخامت این لایه‌ها به ترتیب $d_A = \frac{\lambda_0}{4n_A}$ و $d_B = \frac{\lambda_0}{4n_B}$ در نظر گرفته می‌شود که n_A و n_B به ترتیب ضریب شکست لایه‌های A و B است. در این ساختار، لایه‌ی D، نشان دهنده‌ی لایه‌ی فعال (تقویت کننده‌ی نوری) است. ثابت دی‌الکتریک لایه‌ی D، با $\varepsilon_D = \varepsilon_r - i\varepsilon_i$ نمایش داده می‌شود که قسمت موهومی آن معرف بهره‌ی نوری است. در اینجا از اثرات اشباع بهره صرف نظر شده است و تابعیت فرکانسی بهره در نظر گرفته نمی‌شود. ضخامت لایه‌ی D برابر با $d_D = \frac{\lambda_0}{2n_B}$ است. لایه‌ی N، معرف لایه‌ی غیرخطی است که ضریب شکست آن به صورت $n_N = n_1 + \chi E^2$ می‌باشد و n_1 و χE^2 به ترتیب بخش‌های خطی و غیرخطی ضریب شکست هستند. در نتیجه ضریب شکست لایه‌ی N، به شدت نور در محل لایه بستگی دارد. در اینجا ضخامت لایه‌ی N، برابر با ۲۰ nm است. بنابراین ساختار دارای دوپایداری نوری در نظر گرفته شده در اینجا به صورت $(AB)^n DND(BA)^n$ است که مقدار n، ۱۰ می‌باشد.



شکل ۱: طرح‌واره‌ای از ساختار دارای دوپایداری نوری.

برای بررسی اثر دوپایداری، از روش ماتریس انتقال استفاده می‌کنیم. اما باید توجه کرد که با توجه به غیرخطی بودن معادله‌ی موج، نمی‌توان از ماتریس انتقال معمولی استفاده کرد و باید از ماتریس انتقال بهبود یافته استفاده کنیم. در روش ماتریس انتقال بهبود یافته، لایه‌ی خطی به تعداد زیادی زیرلایه تقسیم شده و از روش تکرار

[Downloaded from opsi.ir on 2025-07-15]

برای محاسبه‌ی ضریب شکست غیرخطی استفاده می‌شود. برای تابش مایل با زاویه‌ی θ نسبت به خط عمود، ماتریس انتقال به صورت زیر است:

$$M_i = \begin{pmatrix} \cos(k_{zi}d_i) & -\frac{i}{\eta_i}\sin(k_{zi}d_i) \\ -i\eta_i \sin(k_{zi}d_i) & \cos(k_{zi}d_i) \end{pmatrix} \qquad (1)$$

که برای حالت TE، $k_{zi} = k_i \cos\theta_i$، $\eta_i^2 = (\varepsilon_0/\mu_0)\varepsilon_i/\cos^2\theta_i$ و $k_i = n_i \frac{\omega}{c}$ است. میدان‌ها در لایه‌های مجاور، توسط ماتریس انتقال، به هم ربط داده می‌شوند:

$$\begin{pmatrix} E_{i+1} \\ H_{i+1} \end{pmatrix} = M_i \begin{pmatrix} E_i \\ H_i \end{pmatrix} \qquad (۲)$$

ماتریس انتقال کل سیستم، از حاصلضرب ماتریس انتقال تک تک لایه‌ها به‌دست می‌آید:

$$M = M_1 M_2 M_3 .... M_{NL} = \begin{pmatrix} M_{11} & M_{12} \\ M_{21} & M_{22} \end{pmatrix} \qquad (۳)$$

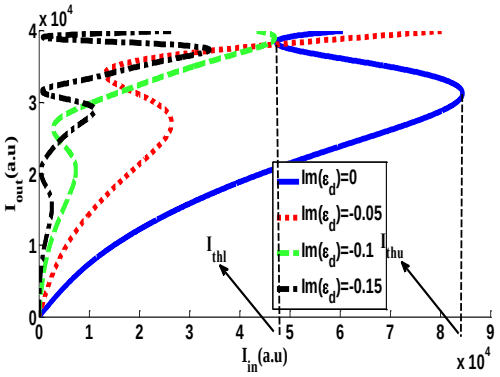
که M_{ij} درایه‌های ماتریس M هستند. ضریب $t(\omega)$ به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$t(\omega) = \frac{2\eta_0}{M_{11}\eta_0 + M_{12}\eta_0\eta_{NL+1} + M_{21} + M_{22}\eta_{NL+1}} \qquad (۴)$$

ضریب عبور برابر با $T(\omega) = |t(\omega)|^2 = \frac{I_{out}}{I_{in}}$ بوده و I_{out} و I_{in} به ترتیب شدت خروجی و ورودی به بلور فوتونی هستند.

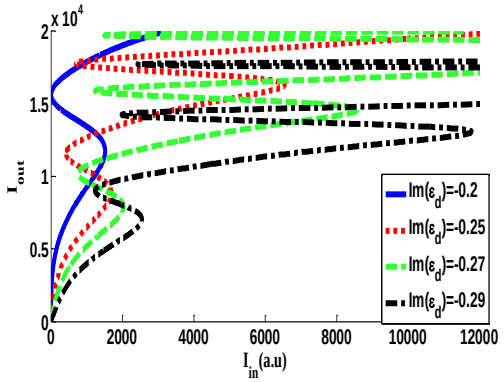
۳-نتایج محاسبات و بحث

مقادیر پارامترهای لازم برای انجام محاسبات به صورت λ_0=۱۰۶۴ nm، χ=۱/۵×۱۰$^{-۱۳}$ $\frac{m^2}{V^2}$، n_1=۲/۰۶، n_A=۱/۴، n_B=۱ و ε_r=۱/۸۲ در نظر گرفته می‌شود[۲-۶]. در ابتدا برای حالت تابش عمودی، نمودار شدت خروجی بر حسب شدت ورودی را به ازای مقادیر مختلف قسمت موهومی ثابت دی‌الکتریک لایه‌ی D محاسبه می‌کنیم. شکل ۲ نتیجه‌ی محاسبات را برای حالت ۰<ε_i<۰/۱۵ نشان می‌دهد. همان گونه که می‌دانیم ضریب بهره، متناسب با قسمت موهومی ثابت دی‌الکتریک است. برای افزایش قسمت موهومی ثابت دی‌الکتریک محیط فعال، کافی است که میزان آهنگ پمپاژ افزایش یابد.



شکل ۲: منحنی شدت خروجی بلور فوتونی بر حسب شدت ورودی برای میزان بهره‌ی متفاوت $-0.15 < \mathrm{Im}(\varepsilon_d) < 0$ در حالت $\theta = 0$.

همان گونه که در شکل ۲ مشاهده می‌شود، با افزایش میزان ε_i، آستانه‌ی بالا و پایین دو پایداری کاهش می‌یابد. دلیل این امر، تقویت میدان توسط لایه‌ی فعال است که این امر موجب بیشتر شدن قسمت غیرخطی ضریب شکست محیط غیرخطی N می‌شود. در نتیجه دوپایداری، به ازای شدت‌های ورودی کمتر قابل مشاهده است. در شکل ۳، نمودار شدت خروجی بر حسب شدت ورودی برای مقدار بهره در محدوده‌ی ۰/۲<ε_i<۰/۲۹ و زاویه‌ی ورودی صفر ترسیم شده است.



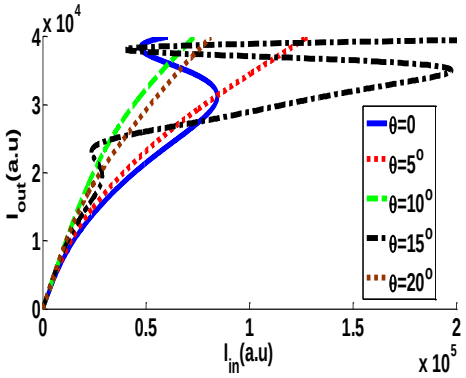
شکل۳: منحنی شدت خروجی بلور فوتونی بر حسب شدت ورودی برای میزان بهره‌ی متفاوت $-0.29 < \mathrm{Im}(\varepsilon_d) < -0.2$ در حالت $\theta = 0$.

مشاهده می‌شود که با افزایش میزان بهره، آستانه‌ی دوپایداری افزایش می‌یابد. این امر به دلیل تغییر یافتن فرکانس مد تشدید سامانه‌ی دوپایداری نوری و زیاد شدن فاصله‌ی آن با طول موج نور ورودی است.

شکل ۴ نمودار شدت خروجی بر حسب شدت ورودی در زاویه‌های مختلف فرود نور و برای مقدار بهره‌ی صفر را نشان می‌دهد. همان طور که ملاحظه می‌شود در زاویه‌ی ورودی صفر درجه، شاهد دوپایداری نوری هستیم اما با

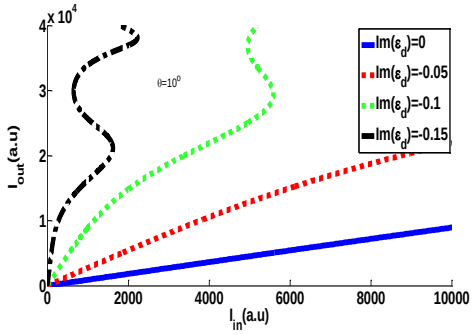
[Downloaded from opsi.ir on 2025-07-15]

افزایش زاویه ورودی تا زاویه‌ی $\theta=10^\circ$، دوپایداری نوری از بین می‌رود. این رویداد به دلیل تغییر یافتن فرکانس مد تشدید، اتفاق می‌افتد. سپس با افزایش دوباره، در زاویه‌ی ۱۵ درجه، دوپایداری به‌وجود می‌آید و آستانه‌ی دو پایداری آن کمتر از حالت فرود عمودی است. در نهایت با افزایش مجدد، در زاویه‌ی ۲۰ درجه دوپایداری نوری از بین می‌رود. باید توجه شود که برای ۱۵ درجه حد پایین آستانه نسبت به حالت صفر درجه پایین‌تر است در حالیکه برای ۱۵ درجه شدت داخل بلور کمتر از صفر درجه است. دلیل این اثر می‌تواند وابستگی مد نقص و دوپایداری به شدت در محل لایه نقص باشد. بررسی دقیق علت فیزیکی این اثر در حال بررسی است و در آینده منتشر خواهد شد.



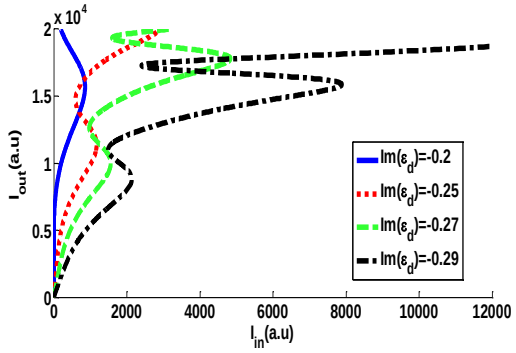
شکل ۴: منحنی شدت خروجی بلور فوتونی بر حسب شدت ورودی برای زاویه‌های فرودی مختلف $\mathrm{Im}(\varepsilon_G)=0$.

در شکل ۵ منحنی شدت خروجی بلور فوتونی بر حسب شدت ورودی، برای میزان بهره‌ی متفاوت $-0.15<\mathrm{Im}(\varepsilon_G)<0$ در حالت $\theta=10^\circ$ ترسیم شده است.



شکل ۵: منحنی شدت خروجی بلور فوتونی بر حسب شدت ورودی برای میزان بهره‌ی متفاوت $-0.15<\mathrm{Im}(\varepsilon_d)<0$ در حالت $\theta=10^\circ$.

ملاحظه می‌شود که ابتدا با افزایش مقدار بهره، دوپایداری مشاهده می‌شود و با افزایش دوباره‌ی بهره، آستانه‌ی دوپایداری کم می‌شود. این کاهش آستانه به دلیل افزایش میدان در لایه‌ی غیرخطی است. شکل ۶ منحنی شدت خروجی بلور فوتونی بر حسب شدت ورودی برای میزان بهره‌ی $-0.29<\mathrm{Im}(\varepsilon_d)<-0.2$ در حالت $\theta=10^\circ$ را نشان می‌دهد. در این حالت با افزایش میزان بهره، آستانه‌ی دوپایداری کاهش می‌یابد که دلیل فیزیکی این اثر در بالا توضیح داده شد.



شکل ۶: منحنی شدت خروجی بلور فوتونی بر حسب شدت ورودی برای میزان بهره‌ی متفاوت $-0.29<\mathrm{Im}(\varepsilon_d)<-0.2$ در حالت $\theta=10^\circ$.

۴-نتیجه‌گیری

در این‌جا یک سامانه‌ی دوپایدار نوری، بر اساس یک بلور فوتونی شامل دو لایه‌ی فعال نوری و یک لایه‌ی غیرخطی به عنوان نقص طراحی شد. اثر افزایش ضریب بهره بر روی آستانه‌ی دوپایداری، در دو حالت تابش عمودی و مایل را بررسی کردیم. نتایج نشان داد که با افزایش بهره تا یک مقدار معین، آستانه‌ی بالا و پایین دوپایداری کاهش می‌یابد. اما افزایش بیشتر بهره، منجر به افزایش آستانه‌ی دو پایداری خواهد شد.

مراجع

[1] Tofighi S, Safari Farshem S, Sajjad B, Shahshahani F, Bahrampour A.R, *Optical bistability in fiber ring resonator containing an erbium doped fiber amplifier and quantum dot doped fiber saturable absorber*, **Appl. Optics** 51 (2012) 7016-7024.

[2] He J., Cada M., *Combined distributed feedback and Fabry–Perot structures with a phase-matching layer for optical bistable devices*, **Appl.Phys. Lett** 61 (1992) 2150–2150.

[3] Lidorikis E., Busch K., Li Q., Chan C. T., Soukoulis C. M., *Optical nonlinear response of a single nonlinear dielectric layer sandwiched between two linear dielectric structures*, **Phys. Rev. B**, 56 (1997) 15090–15099.

[4] Inouye H., Kanemitsu Y., *Direct observation of nonlinear effects in a one-dimensional photonic crystal*, **Appl. Phys. Lett.** 82 (2003) 1155–1157.

[5] Vladimir R.T., Prosvirnin S.L., *Bistability, ultistability, and nonreciprocity in a chiral photonic bandgap structure with nonlinear defect*, **JOSA B** 28 (2011) 1002-1008.

[6] Noskov R.E., Zharov A.A, *optical bistability of planar metal/dielectric nonlinear nanostructures*, **opto-electronics review** 14(3) (2006) 217-223.

[Downloaded from opsi.ir on 2025-07-15]