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

بررسی دو پایداری اپتیکی در بلورهای فوتونی چپگرد ناهمسانگرد

الهام علی پور [۱]، پیمان تجلی [۱] و حبیب تجلی [۱و۲]
[۱]دانشگاه آزاد اسلامی واحد علوم و تحقیقات تبریز
[۲]مرکز تعالی فوتونیک،پژوهشکده فیزیک کاربردی و ستاره شناسی دانشگاه تبریز ، تبریز

چکیده – در این مقاله دوپایداری اپتیکی در بلورهای فوتونیکی یک بعدی حاوی مواد دی الکتریک ناهمسانگرد و متا ماده ناهمسانگرد با تک لایه نقص غیر خطی مطالعه شده است. با استفاده از روش ماتریس انتقال تاثیر عوامل موثر بر روی آستانه دوپایداری اپتیکی بررسی شده و نحوه توزیع میدان الکتریکی در داخل چنین ساختارهایی نشان داده شده است.

کلید واژه- دوپایداری اپتیکی، بلور فوتونی ناهمسانگرد، ماتریس انتقال

Investigation of optical bistability in anisotropic left-handed photonic crystals

Elham Alipour [1], Peyman Tajalli [1] and Habib Tajalli [1, 2]
[1]Department of Physics, Science and Research branch, Islamic Azad University, Tabriz
[2]Photonic excellence, Institute for applied physics and astronomy, University of Tabriz, Tabriz

Abstract- In this paper optical bistability in one-dimensional photonic crystals containing anisotropic dielectric materials and anisotropic metamaterials with a nonlinear defect layer has been studied. By using transfer matrix method, the impact of the effective factors on the optical bistability threshold has investigated and then distribution of the electric filed within this kind of structures has been shown

Keywords: optical bistability, anisotropic photonic crystal, transfer matrix.

[Downloaded from opsi.ir on 2026-02-02]

۱- مقدمه

وسلاگو در سال ۱۹۶۷ بصورت نظری به مطالعه موادی پرداخت که گذردهی الکتریکی و تراوایی مغناطیسی آنها به طور همزمان در بازه خاصی از فرکانس ها دارای مقادیر منفی باشد. او این مواد را مواد چپگرد نامید زیرا در چنین مـوادی بردار میدان الکتریکی، بردار میدان مغناطیسی و بردار موج یک دستگاه چپگرد سه گانه را تشکیل می دهند[۱]. این مواد به طور طبیعـی در طبیعـت وجـود ندارند و در سال ۲۰۰۰ اسمیت و همکارانش به صورت نظری امکان سـاخت این مواد را پیش بینی کردند[۲،۳] و در سال ۲۰۰۱ موفق به ساخت این مـواد شدند. تولید مواد چپگرد باعث جذب علاقه پژوهشگران فراوان از سراسر جهان شد تا به مطالعه در این زمینه بپردازند. همچنین، در چندین سال گذشته پاسخ های غیرخطی بلورهای فوتونیکی به خاطر کاربردهای فـوق العـاده ای کـه در ابزارهای کنترل فوتونی دارند بسیار مورد توجه واقع شده اسـت. از جملـه ایـن کاربردها دوپایداری نوری است. دوپایداری نـوری پدیـده ای اسـت کـه در آن سیستم اپتیکی دو حالت شدت خروجی پایدار برای یک شدت ورودی نمایش می دهد. این پدیده کاربردهای فراوان و بسیار مفیدی درحوزه مخابرات نوری و پردازش سیگنالهای نوری دارد. از جمله این کاربردها می توان عملکرد تقویـت کننده های تفاضلی،شکل دهی و احیای پالس، محدود کننـده هـای نـوری و کلید زنی فوق سریع را نام برد. در این مقاله ما به تجزیه و تحلیل رفتار لایه نقص غیر خطی در داخل یک بلور فوتونیکی یک بعدی متشکل از لایـه هـای دی الکتریک ناهمسانگرد و متا ماده ناهمسانگرد[۴،۵] خواهیم پرداخت.

۲- فرمولبندی مسئله و ساختار مورد استفاده:

ساختار مورد استفاده در این مقاله یک بلور فوتونیکی حـاوی لایـه نقـص غیـر خطی بصورت $(LR)^P D(RL)^P$ می باشد که لایه اول بـه ضـخامت d_L، یک متا ماده ناهمسانگرد و لایه دوم به ضخامت d_R، یک دی الکتریک ناهمسانگرد می باشد و گذردهی الکتریکی و تراوایی مغناطیسی لایه ها بصورت زیر است:

$$\begin{cases} \varepsilon_L = \begin{pmatrix} \varepsilon_{xL} & 0 & 0 \\ 0 & \varepsilon_{yL} & 0 \\ 0 & 0 & \varepsilon_{zL} \end{pmatrix} \\ \varepsilon_{xL} = \varepsilon_{yL} = 1 - \dfrac{\omega_{epx}^2}{\omega^2}, \varepsilon_{zL} = 1 - \dfrac{\omega_{epz}^2}{\omega^2} \end{cases} \quad (۱)$$

$$\begin{cases} \mu_L = \begin{pmatrix} \mu_{xL} & 0 & 0 \\ 0 & \mu_{yL} & 0 \\ 0 & 0 & \mu_{zL} \end{pmatrix} \\ \mu_{xL} = \mu_{yL} = 1 - \dfrac{\omega_{mpx}^2}{\omega^2}, \mu_{zL} = 1 - \dfrac{\omega_{mpz}^2}{\omega^2} \end{cases} \quad (۲)$$

$$\begin{cases} \varepsilon_R = \begin{pmatrix} \varepsilon_{xR} & 0 & 0 \\ 0 & \varepsilon_{yR} & 0 \\ 0 & 0 & \varepsilon_{zR} \end{pmatrix} \\ \varepsilon_{xR} = \varepsilon_{yR} \end{cases} \quad (۳)$$

$$\begin{cases} \mu_R = \begin{pmatrix} \mu_{xR} & 0 & 0 \\ 0 & \mu_{yR} & 0 \\ 0 & 0 & \mu_{zR} \end{pmatrix} \\ \mu_{xR} = \mu_{yR} \end{cases} \quad (۴)$$

$$\varepsilon_D = \varepsilon_D^{lin} + \alpha |E|^2 \quad , \mu_D = 1 \quad (۵)$$

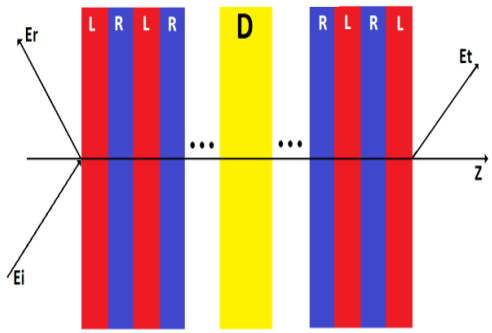
به طوریکه که در عبارات فوق ω_{mp}, ω_{ep} بـه ترتیـب فرکـانس پلاسـمای الکتریکی و فرکانس پلاسمای مغناطیسی می باشند و α ضریب غیرخطیت کر است. اگر $\omega \prec \{\omega_{mp}, \omega_{ep}\}$ باشد لایه اول دو منفـی خواهـد شـد. روش به کار رفته در این مسئله روش ماتریس انتقال است. در این روش میدان الکتریکی و میدان مغناطیسی در انتهای یک لایه توسط ماتریس هـای انتقـال زیر به میدان الکتریکی و میدان مغناطیسی در ابتدای لایه مربوط می شود:

$$m_L = \begin{pmatrix} \cos(k_{Lz} d_L) & -\dfrac{\mu_{xL}\omega}{k_{Lz} c} \sin(k_{Lz} d_L) \\ \dfrac{k_{Lz} c}{\mu_{xL}\omega} \sin(k_{Lz} d_L) & \cos(k_{Lz} d_L) \end{pmatrix} \quad (۶)$$

$$m_R = \begin{pmatrix} \cos(k_{Rz} d_R) & -\dfrac{\mu_{xR}\omega}{k_{Rz} c} \sin(k_{Rz} d_R) \\ \dfrac{k_{Rz} c}{\mu_{Rz}\omega} \sin(k_{Rz} d_R) & \cos(k_{Rz} d_R) \end{pmatrix} \quad (۷)$$

کـــه در آنهـــا $k_{L,Rz}^2 = \varepsilon_{yL,R}\mu_{xL,R}\dfrac{\omega^2}{c^2} - \dfrac{\mu_{xL,R}}{\mu_{zL,R}} k_x^2$ و $k_x = \dfrac{\omega}{c}\sin(\theta)$ است که $k_{L,Rz}$ نشان دهنده مولفه عمودی بردار موج و θ بیانگر زاویه فرود می باشد. ماتریس انتقال کل برای کل بلور بصورت $M = \prod_{j=1}^{N} m_j$ می باشد که در اینجا N نشان دهنده تعداد کل لایـه های تشکیل دهنده بلور است.

[Downloaded from opsi.ir on 2026-02-02]



شکل ۱: طرح شماتیکی از ساختار مورد بررسی که بصورت $(LR)^P D(RL)^P$ می باشد.

۳- محاسبات عددی و بررسی نتایج بدست آمده:

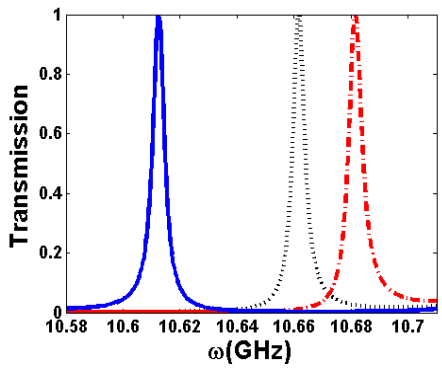
برای انجام محاسبات عددی $d_L = 40\mu m, d_R = 50\mu m$ و $d = d_L + d_R, \alpha = 0.01,\ P = 32,$ انتخاب شده و همچنین

$$\begin{cases}\omega_{mpx} = 2\pi\times\sqrt{6}\\ \omega_{mpz} = 2\pi\times\sqrt{4}\end{cases},\quad \begin{cases}\omega_{epx} = 2\pi\times\sqrt{12}GHz\\ \omega_{epz} = 2\pi\times\sqrt{8}GHz\end{cases}$$

و

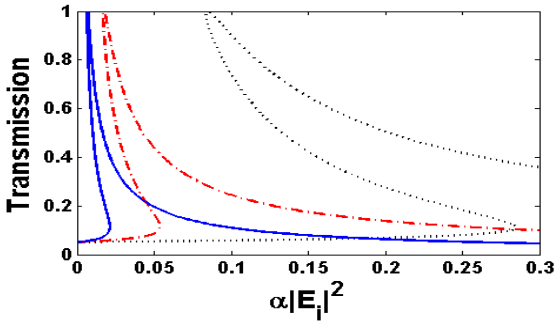
$$\begin{cases}\varepsilon_{xR} = 2.25,\ \varepsilon_{zR} = 2.89\\ \mu_{xR} = \mu_{yR} = \mu_{zR} = 1\end{cases}$$

است در $L = (2Pd + d_D)$، ادامه ابتدا عبوردهی خطی ($\alpha = 0$) ساختار مورد نظر به ازای ضخامت های مختلف لایه غیر خطی بر حسب فرکانس زاویه ای رسم شده است.



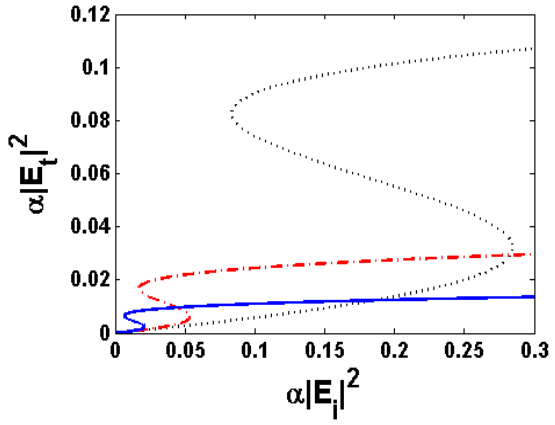
شکل ۲: قابلیت عبوردهی خطی کل بلور فوتونی $(LR)^{32}D(RL)^{32}$ به ازای $d_D = d/2$ (منحنی خط نقطه)، $d_D = d$ (منحنی نقطه چین)، $d_D = 3d/2$ (منحنی توپر)، بر حسب فرکانس زاویه ای.

با توجه به شکل ۲ کاملا واضح است که در چنین ساختارهای نا همسانگردی، مکان مد نقص شدیدا به ضخامت لایه غیر خطی وابسته است و با افزایش ضخامت لایه نقص، مکان مد نقص به سمت لبه های گاف باند جابجا می شود که این جابجایی به سمت فرکانس های نزدیک فرکانس لبه گاف با عث کاهش آستانه دوپایداری اپتیکی می شود. شکل ۳ که در آن قابلیت عبوردهی ساختار بر حسب شدت فرودی نرمالیزه ($\alpha|E_i|^2$) رسم شده است این موضوع را روشن می سازد.



شکل ۳: قابلیت عبوردهی ساختار بر حسب شدت فرودی نرمالیزه ($\alpha|E_i|^2$) متناظر با شکل ۲.

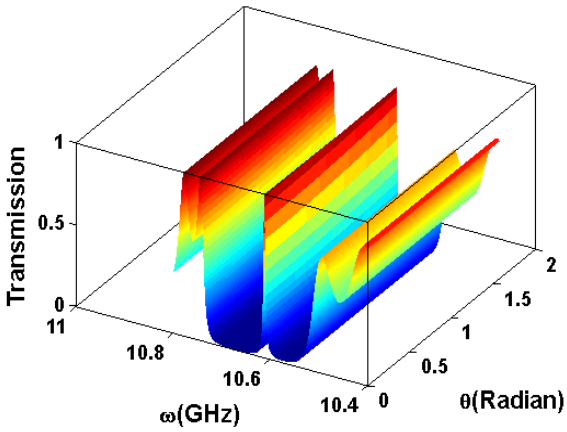
شکل ۴ نیز شدت خروجی نرمالیزه ($\alpha|E_t|^2$) را بر حسب شدت فرودی نرمالیزه ($\alpha|E_i|^2$) نشان می دهد. واضح است که با افزایش ضخامت لایه نقص نه تنها آستانه کلید زنی پایین می آید، بلکه اختلاف شدت های کلید زنی نیز به شدت کاهش می یابد که نشان دهنده حساسیت این ساختارهای نا همسانگرد نسبت به تغییرات ضخامت لایه نقص می باشد.



شکل ۴: منحنی شدت خروجی نرمالیزه ($\alpha|E_t|^2$) بر حسب شدت ورودی نرمالیزه ($\alpha|E_i|^2$) متناظر با شکل ۲.

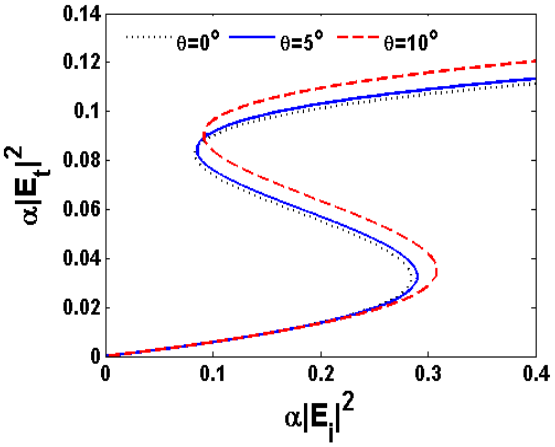
شکل ۵ قابلیت عبوردهی کل ساختار را بر حسب تغییرات زاویه و فرکانس زاویه ای نشان می دهد.

[Downloaded from opsi.ir on 2026-02-02]



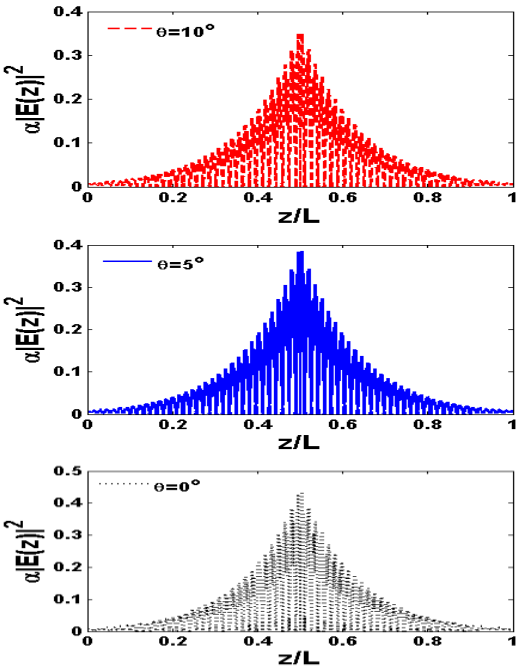
شکل۵: نمودار تغییرات قابلیت عبوردهی ساختار بر حسب تغییرات فرکانس زاویه ای و تغییرات زاویه

در شکل۶ نیز تغییرات آستانه دوپایداری اپتیکی به ازای تغییرات زاویه تابش نشان داده شده است.



شکل۶: نمودار تغییرات شدت خروجی نرمالیزه ($\alpha|E_t|^2$) بر حسب شدت ورودی نرمالیزه ($\alpha|E_i|^2$) به ازای زوایای مختلف در حالت $d_D = d/2$.

ملاحظه می شود که هر چقدر از حالت تابش عمود منحرف می شویم آستانه دوپایداری اپتیکی افزایش می یابد و هر چقدر این انحراف از حالت عمودی بیشتر می شود آستانه با سرعت بیشتری افزایش پیدا می کند. در ادامه توزیع عرضی میدان الکتریکی ترسیم شده است که نشان دهنده چگونگی رفتار میدان الکتریکی در داخل چنین ساختار هایی است. مشخص است که با دور شدن از حالت تابش عمود میدان در داخل ساختار تضعیف می شود.



شکل۷:توزیع میدان الکتریکی در داخل ساختار متناظر با شکل۶

۴- نتیجه‌گیری:

در این مقاله تغییرات آستانه دوپایداری اپتیکی در بلور های فوتونی چپگرد نا همسانگرد بررسی شده و نشان داده شده است که این تغییرات آستانه دوپایداری با تغییرات زاویه تابش و تغییرات ضخامت لایه نقص نسبت عکس دارد و همچنین مشاهده شد وابستگی آستانه دوپایداری در ساختارهای ناهمسانگرد به این پارامترها شدیدتر از ساختار های همسانگرد است.

مراجع

[1] V. G. Veselago, "The electrodynamics of substances with simultaneously negative values of ε and μ" *Sov. Phys. Usp.* **10**, (1968), 509-514.

[2] D. R. Smith, W. J. Padilla, D. C. Vier, S. C. Nemat-Nasser, and S. Schultz, "Composite medium with simultaneously negative permeability and permittivity" *Phys. Rev. Lett.* **84**, (2000), 4184-4187.

[3] R. A. Shelby, D. R. Smith and S.Schultz, "Experimental verification of a negative index of refraction" *Science* **292**, (2001), 77-79.

[4] S. Wang, L. Gao "Omnidirectional reflection from the one-dimensional photonic crystal containing anisotropic left-handed material" *Euro. Phys. J B*,**48**, (2005), 29-36.

[5] S. Ya. Vetrov, A. V. Shabanov "Localized electromagnetic modes and the transmission spectrum of a one-dimensional photonic crystal with lattice defects" *J. Exp. Theor.phys.* **93**, (2001), 977-984.

[Downloaded from opsi.ir on 2026-02-02]