



بیستمین کنفرانس اپتیک و فوتونیک ایران
و ششمین کنفرانس مهندسی و فناوری فوتونیک ایران
۸ تا ۱۰ بهمن ماه ۱۳۹۲ - دانشگاه صنعتی شیراز



بررسی دو پایداری اپتیکی در بلورهای فوتونی چپگرد ناهمسانگرد

الهام علی پور^۱، پیمان تجلی^۱ و حبیب تجلی^۲

^۱دانشگاه آزاد اسلامی واحد علوم و تحقیقات تبریز

^۲مرکز تعالی فوتونیک، پژوهشکده فیزیک کاربردی و ستاره شناسی دانشگاه تبریز، تبریز

چکیده - در این مقاله دو پایداری 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 دو پایداری اپتیکی بررسی شده و نحوه توزیع میدان الکتریکی در داخل چنین ساختارهایی نشان داده شده است.

کلید واژه - دو پایداری اپتیکی، بلور فوتونی ناهمسانگرد، ماتریس انتقال

Investigation of optical bistability in anisotropic left-handed photonic crystals

Elham Alipour¹, Peyman Tajalli¹ and Habib Tajalli^{1,2}

¹Department of Physics, Science and Research branch, Islamic Azad University, Tabriz

²Photonic 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 field within this kind of structures has been shown

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

۱- مقدمه

وسلاگو در سال ۱۹۶۷ بصورت نظری به مطالعه موادی پرداخت که گذردهی الکتریکی و تروایی مغناطیسی آنها به طور همزمان در بازه خاصی از فرکانس ها دارای مقادیر منفی باشد و این مواد را مواد چپگرد نامید زیرا در چنین موادی بردار میدان الکتریکی، بردار میدان مغناطیسی و بردار موج یک دستگاه چپگرد سه گانه را تشکیل می دهند [۱]. این مواد به طور طبیعی در طبیعت وجود ندارند و در سال ۲۰۰۰ اسمیت و همکارانش به صورت نظری امکان ساخت این مواد را پیش بینی کردند [۲،۳] و در سال ۲۰۰۱ موفق به ساخت این مواد 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 پلخ های غیر خطی بلورهای فوتونیک به خاطر کاربردهای فوق العاده ای که در ابزارهای کنترل فوتونی دارند بسیار مورد توجه واقع شده است. از جمله این کاربردها دویابنداری نوری است. دویابنداری نوری پدیده ای است که در آن سیستم اپتیکی دو حالت شدت خروجی پایدار برای یک شدت ورودی نمایش می دهد. این پدیده کاربردهای فراوان و بسیار مفیدی در حوزه مخابرات نوری و پردازش سیگنالهای نوری دارد. از جمله این کاربردها می توان عملکرد تقویت کننده های تفاضلی، شکل دهی و احیای پالس، محدود کننده های نوری 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 فوتونیک یک بعدی متشکل از لایه های دی الکتریک ناهمسانگرد و متاماده ناهمسانگرد [۴،۵] خواهیم پرداخت.

۲- فرمولبندی مسئله و ساختار مورد استفاده:

ساختار مورد استفاده در این مقاله یک بلور فوتونیک حلوی لایه نقص غیر خطی بصورت $(LR)^P D (RL)^P$ می باشد که لایه اول به ضخامت d_L ، یک متاماده ناهمسانگرد و لایه دوم به ضخامت d_R ، یک دی الکتریک ناهمسانگرد می باشد و گذردهی الکتریکی و تروایی مغناطیسی لایه ها بصورت زیر است:

$$\left\{ \begin{array}{l} \epsilon_L = \begin{pmatrix} \epsilon_{xL} & 0 & 0 \\ 0 & \epsilon_{yL} & 0 \\ 0 & 0 & \epsilon_{zL} \end{pmatrix} \\ \epsilon_{xL} = \epsilon_{yL} = 1 - \frac{\omega_{epx}^2}{\omega^2}, \epsilon_{zL} = 1 - \frac{\omega_{epz}^2}{\omega^2} \end{array} \right. \quad (۱)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \mu_L = \begin{pmatrix} \mu_{xL} & 0 & 0 \\ 0 & \mu_{yL} & 0 \\ 0 & 0 & \mu_{zL} \end{pmatrix} \\ \mu_{xL} = \mu_{yL} = 1 - \frac{\omega_{mpx}^2}{\omega^2}, \mu_{zL} = 1 - \frac{\omega_{mpz}^2}{\omega^2} \end{array} \right. \quad (۲)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \epsilon_R = \begin{pmatrix} \epsilon_{xR} & 0 & 0 \\ 0 & \epsilon_{yR} & 0 \\ 0 & 0 & \epsilon_{zR} \end{pmatrix} \\ \epsilon_{xR} = \epsilon_{yR} \end{array} \right. \quad (۳)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \mu_R = \begin{pmatrix} \mu_{xR} & 0 & 0 \\ 0 & \mu_{yR} & 0 \\ 0 & 0 & \mu_{zR} \end{pmatrix} \\ \mu_{xR} = \mu_{yR} \end{array} \right. \quad (۴)$$

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

به طوریکه که در عبارات فوق ω_{mp} ، ω_{ep} به ترتیب فرکانس پلاسما الکتریکی و فرکانس پلاسما مغناطیسی می باشند و α ضریب غیرخطیت کر است. اگر $\omega \prec \{\omega_{mp}, \omega_{ep}\}$ باشد لایه اول دو منفی خواهد شد. 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 های انتقال زیر به میدان الکتریکی و میدان مغناطیسی در ابتدای لایه مربوط می شود:

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

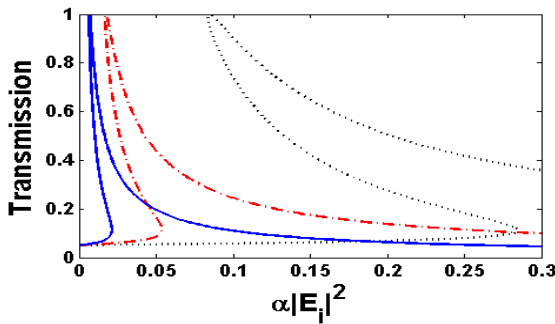
$$m_R = \begin{pmatrix} \cos(k_{Rz} d_R) & -\frac{\mu_{xR} \omega}{k_{Rz} c} \sin(k_{Rz} d_R) \\ \frac{k_{Rz} c}{\mu_{Rz} \omega} \sin(k_{Rz} d_R) & \cos(k_{Rz} d_R) \end{pmatrix} \quad (۷)$$

$$\text{که در آنها } k_{L,Rz}^2 = \epsilon_{yL,R} \mu_{xL,R} \frac{\omega^2}{c^2} - \frac{\mu_{xL,R}}{\mu_{zL,R}} k_x^2$$

و $k_x = \frac{\omega}{c} \sin(\theta)$ است که $k_{L,Rz}$ نشان دهنده مولفه عمودی بردار موج و θ بیلگر زاویه فرود می باشد. ماتریس انتقال کل برای کل بلور بصورت

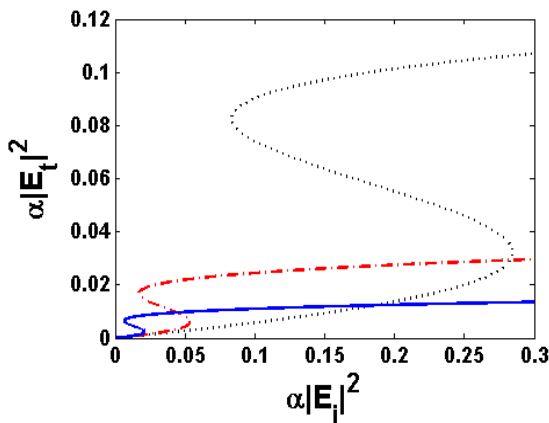
$$M = \prod_{j=1}^N m_j \quad \text{می باشد که در اینجا } N \text{ نشان دهنده تعداد کل لایه های تشکیل دهنده بلور است}$$

که این جابجایی به سمت فرکانس های نزدیک فرکانس لبه گاف باعث کاهش آستانه دوپانداری 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



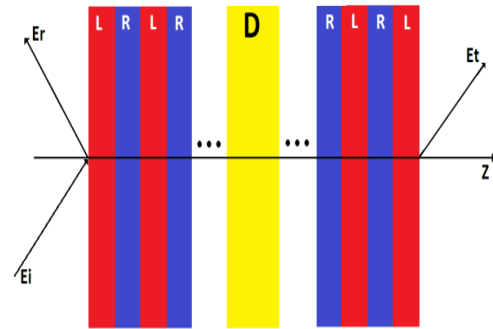
شکل ۳: قابلیت عبوردهی ساختار بر حسب شدت فرودی نرمالیزه $(\alpha|E_i|^2)$ متناظر با شکل ۲.

شکل ۴ 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



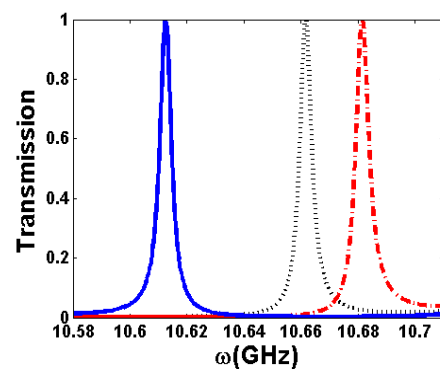
شکل ۵: طرح شماتیکی از ساختار مورد بررسی که بصورت $(LR)^p D (RL)^p$ می باشد

۳- محاسبات عددی و بررسی نتایج بدست آمده:

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

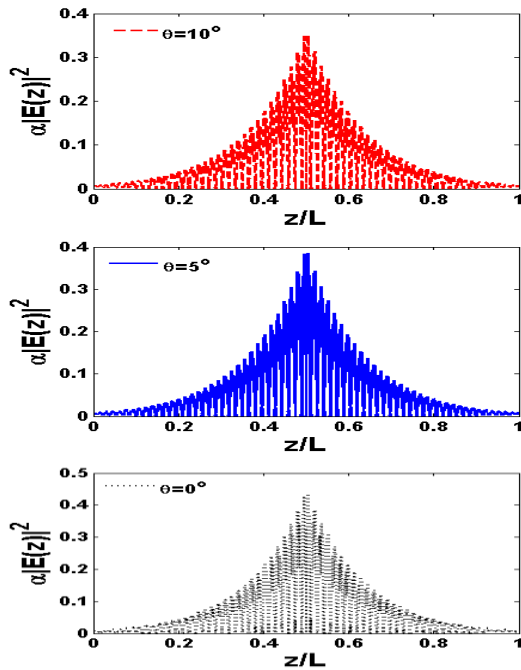
$$\left\{ \begin{array}{l} \omega_{mpx} = 2\pi \times \sqrt{6} \\ \omega_{mpz} = 2\pi \times \sqrt{4} \end{array} \right\} \left\{ \begin{array}{l} \omega_{epx} = 2\pi \times \sqrt{12} \text{ GHz} \\ \omega_{epz} = 2\pi \times \sqrt{8} \text{ GHz} \end{array} \right.$$

و $\left\{ \begin{array}{l} \epsilon_{Rz} = 2.25, \epsilon_{Ry} = 2.89 \\ \mu_{Rz} = \mu_{Ry} = \mu_R = 1 \end{array} \right.$ است در 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 ۶: 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 کاملاً واضح است که در چنین ساختارهای نا همسانگردی، مکان مد نقص شدیداً به ضخامت لایه غیر خطی وابسته است و با افزایش ضخامت لایه نقص، مکان مد نقص به سمت لبه های گاف بلند جابجایی می شود



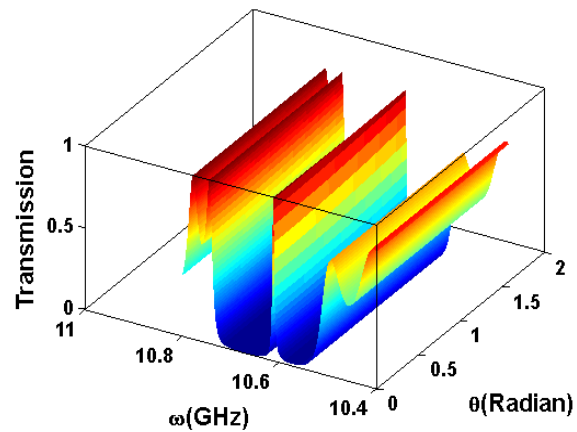
شکل ۶: توزیع میدان الکتریکی در داخل ساختار متناظر با شکل ۶

۴- نتیجه گیری:

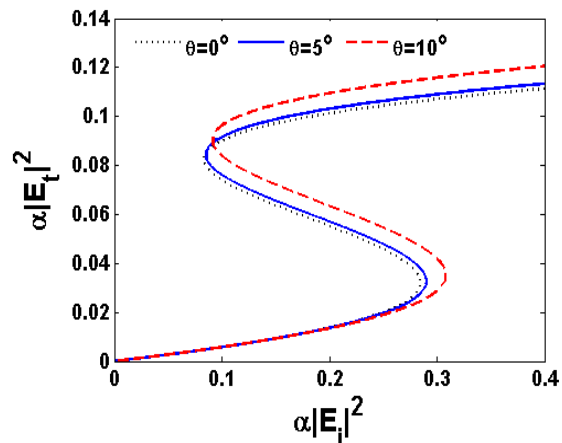
در این مقاله تغییرات آستانه دویایداری اپتیکی در بلور های فوتونی چپگرد نا همسلگرد بررسی شده و نشان داده شده است که این تغییرات آستانه دویایداری با تغییرات زاویه تابش و تغییرات ضخامت لایه نقص نسبت عکس دارد و همچنین مشاهده شد وابستگی آستانه دویایداری در ساختارهای ناهمسلگرد به این پارامترها شدیدتر از ساختار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



شکل ۷: نمودار تغییرات قابلیت عبوردهی ساختار بر حسب تغییرات فرکانس زاویه ای و تغییرات زاویه
در شکل ۶ نیز تغییرات آستانه دویایداری اپتیکی به ازای تغییرات زاویه تابش نشان داده شده است



شکل ۸: نمودار تغییرات شدت خروجی نرمالیزه $(\alpha|E_i|^2)$ 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 دویایداری 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