



بیست و هشتمین کنفرانس اپتیک و فوتونیک ایران و چهاردهمین کنفرانس مهندسی و فناوری فوتونیک ایران، دانشگاه شهید چمران اهواز، خوزستان، ایران.  
۱۴-۱۲ بهمن ۱۴۰۰



## مطالعه اثر پاکلز بر روی فیلترهای اپتیکی در یک ساختار لایه ای یک بعدی حاوی مواد کایرال شبه همسانگرد الایئده شده با نانوذرات فلزی

سیمین شیرین، امیر مدنی و صمد روشن **انتظار**

گروه مهندسی اپتیک و لیزر، دانشگاه بناب، بناب، آذربایجان شرقی

دانشکده فیزیک، دانشگاه تبریز، تبریز

siminshirin2000@gmail.com; a-madani@ubonab.ac.ir; s-roshan@tabriz.ac.ir

چکیده - در این مقاله انتشار امواج الکترومغناطیسی از یک بلور فوتونی یک بعدی حاوی مواد نانوکامپوزیت کایرال ساختاری شبه همسانگرد الکترواپتیکی در غیاب و همچنین در حضور میدان الکتریکی با فرکانس پایین بررسی شده است. در غیاب ولتاژ اعمال شده و نانوذرات فلزی، یک گاف باند فوتونی مستقل از قطبش دایروی در طیف عبور ایجاد می شود. در حضور ولتاژ اعمال شده، این گاف باند فوتونی به یک گاف باند فوتونی حساس به قطبش دایروی تبدیل می شود. همچنین نشان داده شده است که ولتاژ اعمال شده باعث افزایش عرض این گاف باند می شود. علاوه بر این، ولتاژ اعمال شده می تواند یک گاف باند فوتونی جدید را که مستقل از قطبش است، حتی زمانی که چنین گاف باندی در غیاب میدان الکتریکی با فرکانس پایین وجود ندارد، باز کند. همچنین ما اثر نانوذرات فلزی را نیز در طیف عبور این ساختار بررسی کردیم و نشان دادیم که یک گاف باند جدید مستقل از قطبش و ولتاژ در طیف عبور ساختار خلق می شود که ناشی از تحریک پلاسمون های سطحی بوده و موقعیت آن وابسته به جنس نانوذرات جایجا می شود.

کلید واژه- اثر پاکلز، شبه همسانگرد، فیلترهای اپتیکی، کایرال ساختاری، نانوکامپوزیت.

## Study of Pockels Effect on The Optical Filters in Chiral Materials Doped with Metal Nanoparticles

Simin Shirin<sup>۱</sup>, Amir Madani<sup>۱</sup>, and Samad Roshan Entezar<sup>۲</sup>

<sup>۱</sup>Department of Optics and Laser Engineering, Faculty of Engineering, Shahrokh Shahrivar University, Bonab, East Azarbaijan Province, Iran

<sup>۲</sup>Department of Physics, Faculty of Science, Tabriz University, Tabriz, Iran

Commented [WU۱]: اسم و فامیل طبق قالب بیاید

Commented [WU۲]: ایمیل ها یکسان و ساده بیایند

Commented [WU۳]: به ترتیب الفبا شود

Commented [WU۴]: حروف اول بزرگ شود- فونت طبق قالب شود

Siminshirin۲۰۰۰@gmail.com; a-madani @ ubonab.ac.ir; s-roshan@tabriz.ac.ir

**Abstract-** In this paper, the propagation of electromagnetic waves from a one-dimensional photonic crystal containing pseudo-isotropic nanocomposite structurally chiral materials in the absence and also in the presence of a low-frequency electric field is investigated. In the absence of applied voltage and metal nanoparticles, a photonic bandgap independent of circular polarization is created in the transmission spectra. In the presence of applied voltage, this photonic bandgap converted to a photonic bandgap sensitive to circular polarization. Also, it is shown that the applied voltage increases the width of this bandgap. In addition, it is observed that the applied voltage can even open a new photonic bandgap which is independent of the polarization when such a bandgap is not there in the absence of the low-frequency electric field. Also, due to the presence of metallic nanoparticles, this structure shows a new bandgap independent of polarization and voltage. Also, the effect of the material of metal nanoparticles on the transmission spectra of this structure is considered.

**Keywords:** Pockels effect, pseudo-isotropic, optical filters, structurally chiral, nanocomposite.

Commented [WUo]: حروف اول بزرگ شود- تا پایان کیبورد به

صفحه اول منتقل شود

(۱). لایه اول، یک ماده دی‌الکتریک با مشخصات  $\epsilon_A = 5$  و ضخامت  $d_A = 0.2 \times p$  و لایه‌ی دیگر یک NSCM با ضخامت  $d_B = 2 \times p$  می‌باشد که گام ساختار  $p = 270 \text{ nm}$  است. تعداد لایه‌های بلور فوتونی  $N=10$  است. جهت  $x$  را جهت دوره‌ای و ناهمگنی ساختار در نظر گرفته‌ایم. تانسور دی‌الکتریک ماده کایرال تحت تاثیر میدان الکتریکی خارجی به صورت زیر بدست می‌آید.

$$\vec{\epsilon} = \begin{pmatrix} \epsilon_1^{(0)} & -r_{63}\epsilon_1^{(0)2}E_3^{dc} & -r_{41}\epsilon_1^{(0)}E_3^{dc} \\ -r_{63}\epsilon_1^{(0)2}E_3^{dc} & \epsilon_1^{(0)} & -r_{41}\epsilon_1^{(0)}E_3^{dc} \\ -r_{41}\epsilon_1^{(0)}E_3^{dc} & -r_{41}\epsilon_1^{(0)}E_3^{dc} & \epsilon_3^{(0)} \end{pmatrix} \quad (1)$$

در اینجا  $E_k^{dc}$  ( $k=1,2,3$ ) مولفه‌های اصلی میدان الکتریکی dc،  $\epsilon_1^{(0)} = \epsilon_3^{(0)}$  و  $\epsilon_3^{(0)}$  گذردهی‌های اصلی در ناحیه اپتیکی و  $r_{JK}$  ضرایب الکترواپتیکی با  $1 \leq l \leq 6$  و  $1 \leq k \leq 3$  هستند. به طور خاص، در اینجا SCM یک محیط تک محوی دارای تقارن گروه نقطه‌ای  $\bar{4}2m$  است که تنها ضرایب الکترواپتیکی  $r_{32}, r_{41}, r_{52}$  غیر صفر می‌باشند و  $r_{32} = r_{41}$  است. پیکربندی خاص میدان الکتریکی به صورت  $E_1^{dc} = E_2^{dc} = 0, E_3^{dc} = \frac{V_{dc}}{L}$  در نظر گرفته شده‌است. شکل ماتریسی معادلات ماکسول در محیط غیرمغناطیسی NSCM با تعریف چهار مولفه  $\psi(x) = (e_y, e_z, h_y, h_z)$  به فرم زیر است:

$$\frac{\partial \psi(x)}{\partial x} = ik_0 A(x) \psi_0(x) \quad (2)$$

که در آن ماتریس  $A(x)$  عبارت است از

### مقدمه

اخیراً، محیط‌های نانوکامپوزیت کایرال ساختاری (NSCM) توجه بسیاری را به خود جلب کرده‌اند. این ساختارها از یک محیط کایرال ساختاری (SCM) ساخته شده‌اند که نانوذرات فلزی به طور تصادفی در داخل آنها پراکنده شده‌است [۱]. یک محیط SCM، مانند بلورهای مایع کلستریک، الاستومرهای کایرال، یا یک لایه نازک مجسمه سازی شده کایرال (CSTF) [۲-۳] دارای یک ناهمگنی دوره‌ای است که از چرخش مداوم خواص دی‌الکتریک ناهمسانگرد با سرعت یکنواخت در امتداد یک محور خاص ایجاد می‌شود. SCM‌های شبه همسانگرد نیز نوع خاصی از این مواد هستند که در غیاب میدان الکتریکی، علاوه بر وجود ناهمگنی و ناهمسانگردی، شبیه به یک محیط همسانگرد و همگن رفتار می‌کنند و قادر به ایجاد تمایز بین امواج قطبیده دایروی راستگرد و چپگرد نمی‌باشند [۴]. از کاربردهای بسیار مهم این مواد می‌توان به طراحی و ساخت فیلترها قطبش دایروی اشاره کرد [۱]. هدف ما در این مقاله کنترل الکتریکی خواص اپتیکی بلورهای فوتونی یک بعدی حاوی مواد NSCM شبه همسانگرد می‌باشد.

### مدل ساختار و تئوری

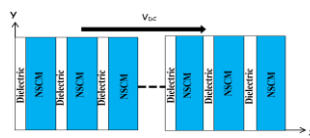
ساختار مورد مطالعه یک بلور فوتونی یک بعدی با آرایش  $(AB)^N$  است که در محیط آزاد قرار گرفته‌است (شکل

عبوری با قطبش راستگرد و نماد  $L$  برای قطبش چپگرد است. همچنین  $t_{RR}$  و  $t_{LL}$  ضرایب تراگسیل نور هم قطبش و  $t_{LR}$  و  $t_{RL}$  ضرایب تراگسیلی نور با قطبش متقاطع هستند. برای نور بازتابی نیز به روش مشابه نمادگذاری می شود.

### نتایج عددی و بحث

در محاسبات عددی، SCM الکترواپتیکی با  $\epsilon_1 = \epsilon_2 = 2.7$  و  $p = 270 \text{ nm}$ ،  $r_{63} = 3r_{41}$ ،  $r_{41} = 9 \times 10^{-12} \text{ mV}^{-1}$ ،  $\epsilon_3 = 3.2$ ، نانوذرات نقره با  $\omega_p = 1.367 \times 10^{16} \text{ Hz}$ ،  $\epsilon_0 = 5$  و  $\gamma = 3.03 \times 10^{13} \text{ Hz}$  و نانوذرات طلا با  $\epsilon_0 = 3.559$ ،  $\gamma = 5.71 \times 10^{13} \text{ Hz}$  و  $\omega_p = 1.338 \times 10^{16} \text{ Hz}$  دیگر با  $n_{\text{dielectric}} = 2.24$  در نظر گرفته ایم. در شکل ۲، به ترتیب الف) طیف عبور و ب) بازتاب امواج هم قطبش و پادقطبش دایروی را به صورت تابعی از طول موج تحت تابش قائم و در غیاب نانوذرات فلزی برای دو مقدار ولتاژ اعمال شده،  $V = 0$  (خط ممتد) و  $V = 2 \text{ kV}$  (خط چین) رسم کرده ایم. از این شکل مشخص است که در غیاب ولتاژ خارجی علی رغم وجود ناهمگنی و ناهمسانگردی در ساختار، محیط شبیه به یک محیط همسانگرد و همگن عمل می کند و نمی تواند بین امواج قطبیده دایروی راستگرد و چپگرد تمایزی قائل شود. به طوری که ما مشاهده می کنیم  $T_{RL} = T_{LR}$ ،  $T_{RR} = T_{LL}$  در این شرایط تحت بازتاب تبدیل قطبش رخ می دهد و یک گاف باند فوتونی مستقل از قطبش در طیف عبور مشاهده می شود. در حضور ولتاژ خارجی وضعیت کاملاً تغییر می کند. به طوری که ما شاهد دو گاف باند فوتونی وابسته به قطبش در طیف عبور امواج هم قطبش راستگرد هستیم که تنها از عبور امواج هم قطبش راستگرد ممانعت می کنند. همچنین در طیف بازتاب ساختار نیز شاهد دو باند توقف برای امواج هم قطبش راستگرد می باشیم که موبد عدم تبدیل قطبش تحت بازتاب در حضور میدان الکتریکی هست. برای بررسی اثر نانوذرات فلزی در

$$A(x) = \begin{pmatrix} \frac{k_x \epsilon_{xx}(x)}{k_0 \epsilon_{xx}(x)} & -\frac{k_y \epsilon_{xy}(x)}{k_0 \epsilon_{xx}(x)} & 0 & -\frac{k_z^2 \epsilon_{zz}(x)}{k_0^2 \epsilon_{xx}(x)} \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{k_y \epsilon_{xy}(x)}{k_0^2 \epsilon_{xx}(x)} & \frac{k_x^2 \epsilon_{xx}(x)}{k_0^2 \epsilon_{xx}(x)} - \epsilon_{zz}(x) & 0 & \frac{k_x \epsilon_{xz}(x)}{k_0 \epsilon_{xx}(x)} \\ \frac{k_x \epsilon_{xz}(x)}{k_0 \epsilon_{xx}(x)} & 0 & 0 & -\frac{k_x \epsilon_{zz}(x)}{k_0 \epsilon_{xx}(x)} \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & -1 & 0 \\ \frac{\epsilon_{zx}(x)\epsilon_{zy}(x)}{\epsilon_{xx}(x)} & \frac{\epsilon_{zz}(x)\epsilon_{zy}(x)}{\epsilon_{xx}(x)} & 0 & 0 \\ \frac{\epsilon_{zx}(x)\epsilon_{zy}(x)}{\epsilon_{xx}(x)} & \frac{\epsilon_{zz}(x)\epsilon_{zy}(x)}{\epsilon_{xx}(x)} & 0 & 0 \\ -\frac{\epsilon_{zx}(x)\epsilon_{zy}(x)}{\epsilon_{xx}(x)} & -\frac{\epsilon_{zz}(x)\epsilon_{zy}(x)}{\epsilon_{xx}(x)} & 0 & 0 \end{pmatrix} \quad (3)$$



شکل ۱: بلور فوتونی یک بعدی حاوی NSCM در حضور میدان الکتریکی با فرکانس پایین

در این رابطه  $\epsilon_{i,j}(x)$  عناصر تانسور دی الکتریک محیط نانوکامپوزیتی و  $q = 2\pi/p$  است. دو گذردهی موثر برای محیط نانوکامپوزیتی با اعمال معادله ماکسول گارنت تعمیم یافته [۵] عبارت است از

$$\epsilon'_i(\omega) = \epsilon_i \left[ 1 + \frac{f}{\epsilon_i / (\epsilon_m(\omega) - \epsilon_i) + (1-f)/3} \right], \quad \epsilon''_i(\omega) = \epsilon_i \left[ 1 + \frac{f}{\epsilon_i / (\epsilon_m(\omega) - \epsilon_i) + (1-f)/3} \right] \quad (4)$$

که  $\epsilon_m = \epsilon_0 - \frac{\omega_p^2}{\omega(\omega + i\gamma)}$  گذردهی ذرات فلزی است که از مدل درود تبعیت می کند و  $f$  فاکتور پرشوندگی نانوذرات می باشد. با استفاده از روش ماتریس انتقال [۶] می توان ضرایب بازتاب و عبور ساختار را بدست آورد. ماتریس انتقال یک تک سلول شامل NSCM الکترواپتیکی و دی الکتریک  $M = M_{\text{NSCM}} \cdot M_{\text{dielectric}}$  است. ضرایب بازتاب و تراگسیل برای یک موج تخت قطبیده دایروی فرودی با فرم ماتریسی زیر بدست آمده است:

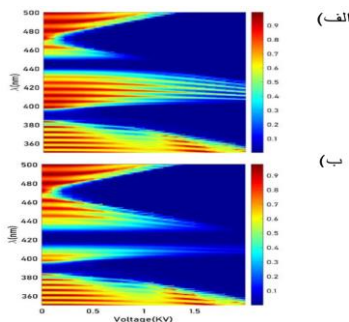
$$\begin{pmatrix} t_R \\ t_L \\ r_R \\ r_L \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} t_{RR} & t_{RL} \\ t_{LR} & t_{LL} \\ r_{RR} & r_{RL} \\ r_{LR} & r_{LL} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} a_R \\ a_L \end{pmatrix} \quad (5)$$

که  $a_R$ ،  $r_R$  و  $t_R$  به ترتیب دامنه های نور تابشی، بازتابی و

[T1] Commented: همتراز شود

[WUV] Commented: تمامی حروف متن فارسی با ممیز شود

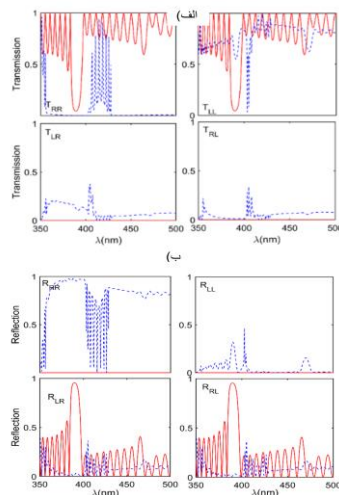
در غیاب میدان الکتریکی تنها یک فیلتر باریک مستقل از قطبش دایروی در طیف عبور ساختار مشاهده می‌شود. همچنین در حضور نانوذرات ساختار یک فیلتر مستقل از قطبش، ولتاژ اعمالی و وابسته به جنس نانوذرات خلق می‌شود.



شکل ۳: طیف عبور امواج هم‌قطبش راستگرد به صورت تابعی از طول موج و ولتاژ الف) در حضور نانوذرات نقره، ب) در حضور نانوذرات طلا با  $f=0.00005$ .

### مرجع‌ها

- [۱] J. Mendoza, J. Reyes, and C. Avendaño, "Optical band gap in a nanocomposite structurally chiral medium," *Phys. Rev. A.*, Vol. ۹۴, No. ۵, pp. ۰۵۳۸۳۹-۲۰۱۶.
- [۲] J. Reyes, and A. Lakhtakia, "Electrically controlled optical bandgap in a structurally chiral material," *Opt. Commun.*, Vol. ۲۵۹, No. ۱, pp. ۱۶۴-۱۷۳, ۲۰۰۶.
- [۳] M. Warner and E. M. Terentjev, "Liquid Crystal Elastomers," Clarendon, ۲۰۰۳.
- [۴] A. Lakhtakia, "Pseudo-isotropic and maximum-bandwidth points for axially excited chiral sculptured thin films," *Microw. Opt. Technol. Lett.*, Vol. ۳۴, No. ۵, pp. ۳۶۷-۳۷۱, ۲۰۰۲.
- [۵] A. Lakhtakia, B. Michel, and W. S. Weiglhofer, *J. Phys. D., Appl. Phys.* Vol. ۳۰, pp. ۲۳۰, ۱۹۹۷.
- [۶] D.W. Berreman, "Optics in smoothly varying anisotropic planar structures: application to liquid-crystal twist cells," *J. Opt. Soc. Am.* Vol. ۶۳, pp. ۱۳۷۴-۱۳۸۰, ۱۹۷۳.



شکل ۴: الف) طیف عبور و ب) بازتاب امواج هم‌قطبش و پادقطبش دایروی به صورت تابعی از طول موج در  $f=0$  و تحت تابش قائم.

شکل‌های ۳ الف) و ب) به ترتیب طیف عبور هم‌قطبش راستگرد را به صورت تابعی از ولتاژ و طول موج در حضور نانوذرات نقره و نانوذرات طلا تحت تابش قائم رسم کرده‌ایم. نتایج نشان می‌دهد که در حضور نانوذرات یک گاف باند جذبی ناشی از تشدید پلاسمونی نانوذرات ایجاد می‌شود که در نزدیکی طول موج تشدید پلاسمونی نانوذرات رخ می‌دهد و وابسته به جنس نانوذرات امکان جابجایی آن وجود دارد. این گاف جذبی مستقل از ولتاژ می‌باشد. همچنین دو گاف باند فوتونی وابسته به قطبش و ولتاژ مشاهده می‌شود که با افزایش ولتاژ به سمت طول موج‌های کوتاه‌تر جابجا شده و با افزایش ولتاژ عریض‌تر می‌شوند.

### نتیجه گیری

در این مقاله اثر پالکرز در فیلترهای اپتیکی یک ساختار لایه‌ای یک بعدی حاوی NSCM شبه همسانگرد بررسی شد. نتایج نشان داد که اعمال میدان الکتریکی منجر به ایجاد دو فیلتر حساس به قطبش دایروی می‌شود در حالیکه

Commented [WUA]: تیترا طبق قالب شود