

**ORIGINAL ARTICLE**

# Fabry-Perot Filter Based on Doped Semiconductor Photonic Crystal

Robabeh Talebzadeh<sup>1\*</sup>

Assistant Professor, Department of physics, Tabriz Branch, Islamic Azad University, Tabriz, Iran.

**Correspondence**

Robabeh Talebzadeh

Email: [robab.talebzadeh@iaut.ac.ir](mailto:robab.talebzadeh@iaut.ac.ir)

**How to cite**

Talebzadeh, R. (2024). Fabry-Perot Filter Based on Doped Semiconductor Photonic Crystal, Optoelectronic, 7 (1), 59-65.

**ABSTRACT**

A one-dimensional doped semiconductor photonic crystal under an external static magnetic field is investigated. The considered photonic crystal has a structure of air/(AB)<sup>N</sup>/air, where A is a dielectric layer (quartz glass), B is a doped semiconductor (nGaAs), and N is the stack number. We show that the doped semiconductor behaves like single negative layer and the structure behaves as a multichannel filter under the external static magnetic field. So that, the transmission spectra of this filter appear as N-1 comb-like sharp resonance peaks for N>1. Also, numerical results show that the resonance frequencies can be tuned by varying the external magnetic field and the electron density of the semiconductor in such a way that the increase of the magnetic field and the electron density will cause the resonance frequencies to be red-shifted and blue-shifted, respectively. The proposed Fabry-Perot filter, in comparison to the usual multichannel filters based on photonic crystal, is a defect-free multilayer structure.

**KEYWORDS**

Photonic Crystal, Fabry-Perot, Filter, Semiconductor.

فصلنامه علمی  
اپتوالکترونیک

«مقاله پژوهشی»

## فیلتر فابری - پرو مبتنی بر بلور فوتونی نیمه هادی

ربابه طالب زاده<sup>\*1</sup>

استادیار، گروه فیزیک، واحد تبریز، دانشگاه آزاد  
اسلامی، تبریز، ایران.

### چکیده

در این مقاله بلورهای فوتونی نیمه هادی آلاییده با ساختار  $\text{Air}(AB)^N \text{Air}$  تحت یک میدان مغناطیسی خارجی مطالعه شده است. به طوری که لایه A دی الکتریک (شیشه کوارتز)، لایه B نیمه هادی آلاییده (گالیم آرسناید نوع n) و N تعداد تناوب لایه‌ها است. نشان دادیم که تحت میدان خارجی، نیمه هادی مانند لایه تک منفی و ساختار مانند فیلتر چندکاناله عمل می‌کند. طوری که در طیف تراگسیلی این فیلتر N-1 تا پیک تشدید تیز شانه-مانند به ازای  $N > 1$  ظاهر می‌شود. همچنین نتایج عددی نشان داد که فرکانس‌های تشدید با تغییر میدان مغناطیسی اعمالی و چگالی الکترونی می‌توانند قابل تنظیم شوند به این صورت که افزایش میدان مغناطیسی و چگالی الکترونی به ترتیب منجر به جابه‌جایی قرمز و آبی مدهای تشدید می‌شوند. فیلتر فابری پروی پیشنهادی در مقایسه با فیلترهای معمول چندکاناله مبتنی بر بلورهای فوتونی یک ساختار چند لایه‌ای بدون نقص است.

### واژه‌های کلیدی

بلور فوتونی، فابری پرو، فیلتر، نیمه هادی.

نویسنده مسئول:  
ربابه طالب زاده  
رایانامه: [robab.talebzadeh@iaut.ac.ir](mailto:robab.talebzadeh@iaut.ac.ir)

استناد به این مقاله:

ربابه طالب زاده (1403). فیلتر فابری - پرو مبتنی بر بلور فوتونی نیمه هادی. فصلنامه علمی اپتوالکترونیک، 7 (1)، 65-59.

## مقدمه

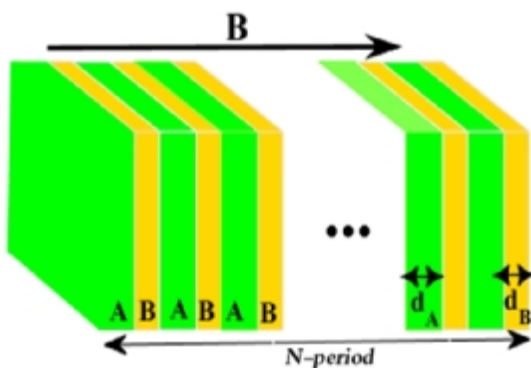
بررسی از روش ماتریس انتقال در یک محیط لایه‌ای برای محاسبه ضریب عبور ساختار لایه‌ای در حضور میدان مغناطیسی خارجی استفاده می‌کنیم و خواص فیلتری ساختار تناوبی مورد نظر را بحث و بررسی می‌کنیم.

## مدل تئوری و فرمول بندی مسئله

بلور فوتونی یک بعدی با ساختار  $Air / (AB)^N / Air$  را مطابق شکل 1 در نظر می‌گیریم که هر تناوب آن از دو لایه A، B که به ترتیب از مواد دی‌الکتریک و نیمه‌هادی آلاییده تشکیل شده‌اند و N تعداد تکرار تناوب‌ها است. ضریب شکست لایه نیمه رسانا n-GaAs به صورت  $\sqrt{\epsilon}$  است که، طبق مدل پلاسما در نیمه رساناها گذردهی الکتریکی آن به صورت زیر بیان می‌شود [21-22]:

$$\epsilon(\omega, \mathbf{B}) = \epsilon_{\infty} \left( 1 - \frac{w_{pe}^2 (\omega^2 - w_{pe}^2)}{\omega^2 (\omega^2 - w_{le}^2 - w_{pe}^2)} \right) \quad (1)$$

که  $\epsilon_{\infty}$  ثابت دی‌الکتریک فرکانس بالا،  $w_{pe}$  فرکانس پلاسمایی که با رابطه  $w_{pe} = \left( \frac{n_e e^2}{m_e \epsilon_0} \right)^{1/2}$  که در آن  $m_e$  جرم الکترونیکی ( $m_e = 0.067 \cdot 9.1 \cdot 10^{-31} \text{ Kg}$ )،  $n_e$  چگالی الکترون است. همچنین، فرکانس سیکلوترونی با رابطه  $w_c = \left( \frac{eB}{m_e} \right)$  بیان می‌شوند. فرض می‌کنیم یک موج الکترومغناطیسی عمود بر سطح ساختار شکل 1 فرود می‌آید.



شکل 1. ساختار تناوب بلور فوتونی یک بعدی تحت تابش میدان مغناطیسی خارجی

میان مولفه‌های مماسی میدان‌های الکتریکی و مغناطیسی در هر دو نقطه با مختصات  $z$  و  $z + D$  در داخل یک لایه مشخص رابطه زیر برقرار است.

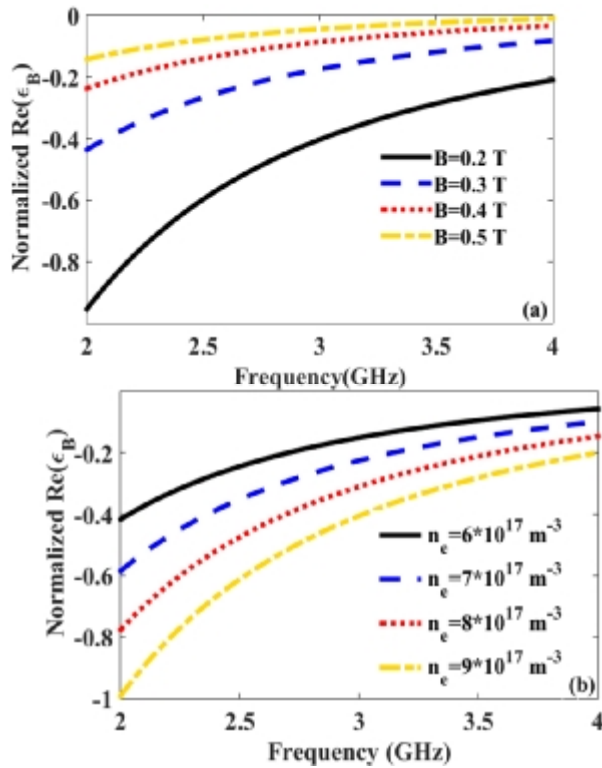
اخیراً بلورهای فوتونی به خاطر خواص جالبشان در کنترل و انتشار امواج الکترومغناطیسی مورد توجه زیادی قرار گرفته‌اند. به طوری که از آنها در ساخت قطعات فوتونی به خصوص در مدارات مجتمع نوری و فیلترهای نوری استفاده زیادی شده است [7-1]. بلورهای فوتونی ساختارهای منظم با ثابت دی‌الکتریک متناوب فضایی هستند که پارامتر شبکه‌ای آنها قابل مقایسه با طول موج امواج الکترومغناطیسی فرودی است [8]. این ویژگی منجر به ایجاد نوار ممنوعه فرکانسی در طیف تراگسیل بلور فوتونی می‌شود که به آن گاف باند فوتونی می‌گویند [9].

حال اگر طراحی بلور فوتونی به نحوی صورت گیرد که مدهای عبوری باریک در باند گاف بلور فوتونی ظاهر شود می‌توان از آن به عنوان فیلتر بهره گرفت [10-11]. یکی از روش‌های متداول برای مشاهده مد عبوری به منظور دستیابی به فیلترها ایجاد لایه نقص در ساختار بلور فوتونی است [12]. از سوی دیگر طراحی فیلترهای بلور فوتونی با بهره‌گیری از لایه‌هایی نیز می‌تواند انجام گیرد طوری که نیازی به وارد کردن هیچ گونه نقصی به بلور فوتونی نباشد. در این صورت، یکی از لایه‌های ساختار باید دارای گذردهی وابسته به فرکانس باشد و مهم‌تر از آن، بخش حقیقی تابع گذردهی باید منفی باشد. مواد با خواص فوق ممکن است فلزات، پلاسما و ابررساناها و نیمه رساناها باشند. امروزه به مطالعات این نوع فیلترها توجه شده است [13-15].

سال‌هاست که نیمه‌هادی‌ها از این نظر که رسانای الکتریکی هستند، دارای اهمیت هستند اما امروزه با توجه به کاربردهای اپتیکی آنها به منظور ارتقای کیفیت بلورهای فوتونی دوباره مورد توجه‌اند [16]. می‌دانیم که کنترل‌پذیر بودن یک سیستم تحت عامل خارجی، مشخصه مهم در طراحی یک سیستم به شمار می‌رود. همچنین تاثیرپذیری یک سیستم اپتیکی توسط یک عامل خارجی مانند میدان الکتریکی یا میدان مغناطیسی، برای کنترل خصوصیات اپتیکی آن می‌تواند در بسیاری از کاربردهای بلورهای فوتونی موثر واقع شود [17-18]. اخیراً بلورهای فوتونی نیمه هادی آلاییده شده به دلیل این واقعیت که خواص امواج الکترومغناطیسی آنها تابعی از چگالی پلاسمایی الکترون و میدان مغناطیسی خارجی است، توجه زیادی را به خود جلب کرده است [19-20].

در این مقاله ما فیلترهای چند کاناله با ساختار تناوب از مواد دی‌الکتریک و نیمه هادی آلاییده را بررسی می‌کنیم. ما یک بلور فوتونی یک بعدی شامل لایه‌های دی‌الکتریک و نیمه هادی آلاییده را بدون افزودن هیچ لایه نقصی در نظر می‌گیریم. در این

هادی آلائیده به عنوان یک لایه فلزی (در گروه تمام مواد تک منفی) رفتار می کند [24-25]. قسمت الف از شکل 2 نشان می دهد که ضریب گذردهی الکتریکی به ازای مقدار معینی از چگالی الکترونی  $n_e = 6 \times 10^{17} m^{-3}$  با افزایش میدان مغناطیسی خارجی کاهش می یابد اما به ازای یک مقدار مشخصی از میدان مغناطیسی خارجی  $\bar{B} = 0.4 T$  روند افزایشی در مقدار گذردهی الکتریکی با افزایش چگالی الکترونی مطابق قسمت ب شکل 2 قابل مشاهده است. این رفتار مبتنی بر این واقعیت فیزیکی هست که ضریب گذردهی نیمه هادی با میدان مغناطیسی خارجی به علت اثرات مغناطی - پتیکی تغییر می کند.



شکل 2. الف) وابستگی فرکانسی قسمت حقیقی تابع گذردهی لایه نیمه هادی آلائیده بر حسب مقادیر مختلف الف) میدان مغناطیسی خارجی در  $\bar{B} = 0.4 T$  ب) چگالی الکترونی در  $n_e = 6 \times 10^{17} m^{-3}$

همچنین طیف تراگسیل ساختار متناوب مطالعه شده را مطابق شکل 3 به ازای تناوب های مختلف رسم کردیم. مشاهده کردیم که در طیف تراگسیل، ناحیه گذار باریکی موسوم به مد تشدید ظاهر می شود. در حالی که در ساختارهای لایه ای شامل نقص این رفتار قابل مشاهده است. در طیف تراگسیل ساختار لایه ای بدون نقص مطالعه شده، فرکانس مرکزی این ناحیه گذار مجاز می تواند به عنوان مد فیلتری استفاده شود.

$$\begin{pmatrix} \hat{e} E_x^{(j)}(z+Dz) \\ \hat{e} H_y^{(j)}(z+Dz) \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \dot{u} \\ \dot{u} \end{pmatrix} = M_j(Dz) \begin{pmatrix} \hat{e} E_x^{(j)}(z) \\ \hat{e} H_y^{(j)}(z) \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \dot{u} \\ \dot{u} \end{pmatrix} \quad (2)$$

که در آن ماتریس انتقال در لایه  $j$  ( $j = A, B$ ) عبارت است از:

$$M_j(Dz) = \begin{pmatrix} \hat{e} \cos(k_z^j Dz) & i \frac{\sin(k_z^j Dz)}{q_j} \\ \hat{e} q_j \sin(k_z^j Dz) & \cos(k_z^j Dz) \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \dot{u} \\ \dot{u} \end{pmatrix} \quad (3)$$

$$k_z^j = \frac{w}{c} \sqrt{\epsilon_j} \sqrt{m_j} \sqrt{1 - \frac{\sin^2(q_0)}{\epsilon_0 m_0}} \quad (4)$$

عدد موج لایه  $j$  و  $c$  سرعت نور در خلأ است. برای امواج قطبیده TE و TM به ترتیب داریم:

$$q_j = \frac{\sqrt{\epsilon_j}}{\sqrt{m_j}} \sqrt{1 - \frac{\sin^2(q_0)}{\epsilon_0 m_0}} \quad (5)$$

$$q_j = \frac{\sqrt{m_j}}{\sqrt{\epsilon_j}} \sqrt{1 - \frac{\sin^2(q_0)}{\epsilon_0 m_0}} \quad (6)$$

ماتریس انتقال برای یک تناوب از بلور عبارت است از:

$$X = M_B(d_B) M_A(d_A) \quad (7)$$

که در آن  $d_A$  و  $d_B$  ضخامت لایه ها هستند. ماتریس انتقال کل برای ساختاری با  $N$  تناوب  $M = X^N$  و ضریب تراگسیل آن عبارت است از [23]:

$$t = \frac{2}{m_{11} + m_{22} - m_{12} \cos(q_0) - \frac{m_{21}}{\cos(q_0)}} \quad (8)$$

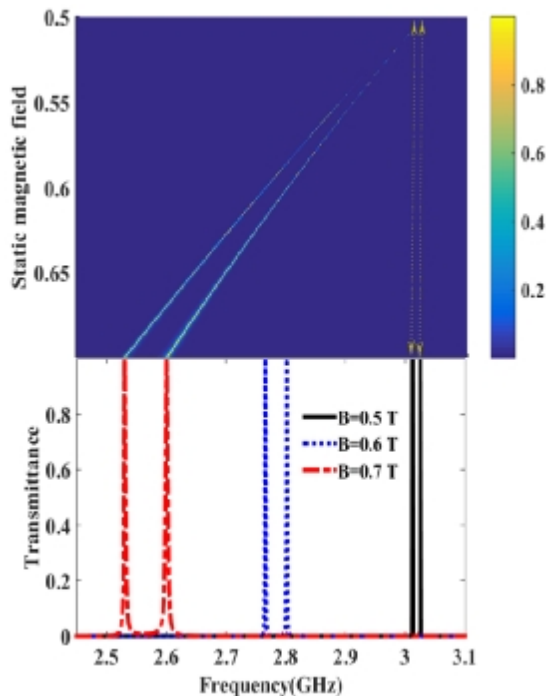
که در آن  $m_{ij}$  ها درایه های ماتریس  $M$  هستند.

### بحث و نتایج عددی

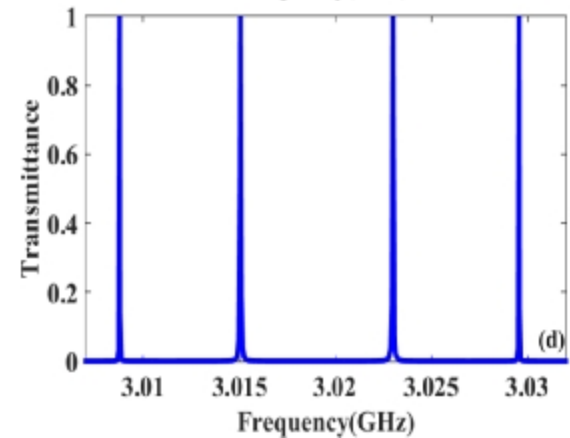
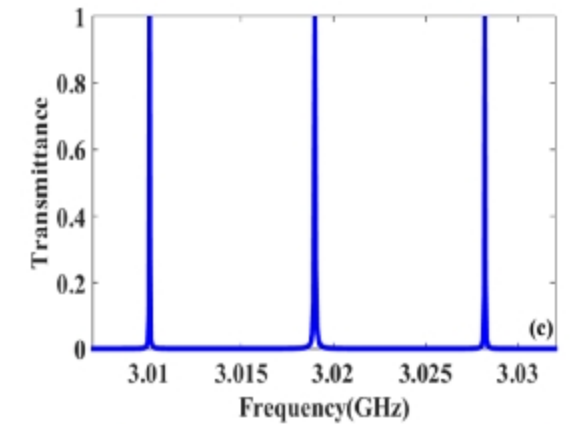
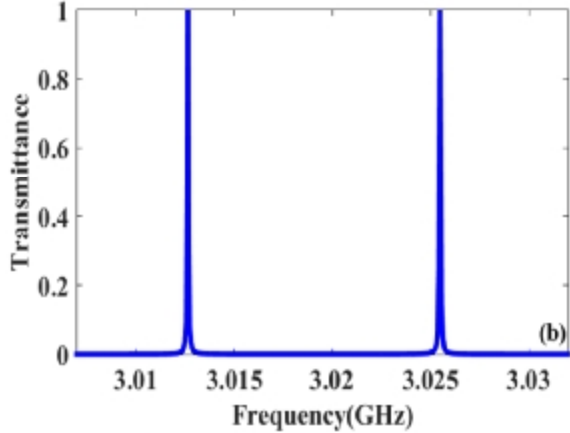
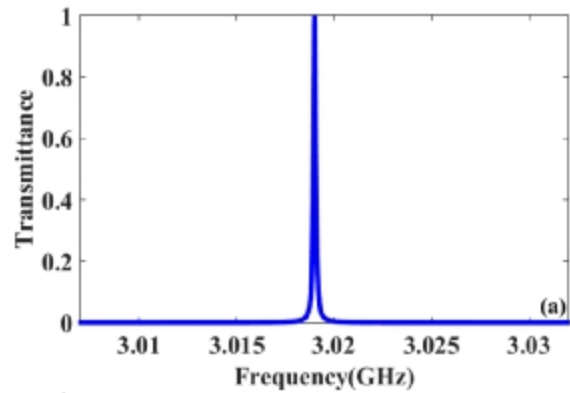
در ساختار لایه ای یک بعدی مطالعه شده، لایه  $A$  را از جنس کوارتز با ضخامت  $d_A = 17 mm$  و ضریب شکست  $n_A = 2$  و همچنین لایه  $B$  از جنس گالیم آرسناید نوع  $n$  با ضخامت  $d_B = 19 mm$  و  $\epsilon_p = 10.9$  انتخاب می کنیم [18-19]. همچنین تعداد تناوب لایه ها را به منظور دستیابی به رفتار فیلتری ساختار مطالعه شده از 2 تا 5 در نظر می گیریم.

در ابتدا تابع گذردهی لایه نیمه هادی آلائیده را بر حسب فرکانس (همان طور که در معادله 1 تعریف شده است) به ازای مقادیر مختلف میدان مغناطیسی خارجی و چگالی الکترون رسم کردیم. مطابق قسمت های الف) و ب) از شکل 2 مشاهده کردیم که در محدوده فرکانس 2 تا 4 گیگاهرتز لایه نیمه هادی آلائیده به عنوان یک لایه با گذردهی منفی عمل می کند. بنابراین؛ نتیجه می گیریم که در این گستره فرکانسی، لایه نیمه

مشاهده می‌شود با افزایش تناوب لایه‌ها، تعداد مدهای تشدیدی نیز افزایش می‌یابد، در واقع تعداد مدهای تشدیدی ایجاد شده برای ساختار با  $N$  تناوب برابر با  $N-1$  است در حالی که با افزایش تناوب، ارتفاع مدهای تشدیدی تغییر چندانی نمی‌کند. پیدایش  $N-1$  مد شانه-مانند در طیف تراگسیل می‌تواند ناشی از این حقیقت باشد که این ساختار می‌تواند به عنوان مشدد فابری پرو عمل کند. به عنوان مثال به ازای تعداد تناوب  $N=2$  در ساختار، یک مد مرکزی با فرکانس  $f = 3.019\text{GHz}$  ظاهر می‌شود که، با توجه به این که ساختار ABAB است، چون لایه  $B$  به عنوان یک فلز عمل می‌کند بنابراین؛ با نادیده گرفتن لایه  $A$  در ابتدای ساختار، ساختار به صورت BAB است که یک ساختار متداول مشدد فابری پرو است. وقتی تعداد تناوب  $N=3$  در نظر گرفته شود ساختار ABABAB را می‌توان متناظر با ساختار  $BA(B/2)$  در نظر گرفت که معادل دو مشدد فابری-پرو است که، به دلیل جفت‌شدگی، منجر به ظهور دو مد تشدیدی در طیف تراگسیلی آن ساختار می‌شوند. به ازای تناوب‌های بالاتر این استدلال را می‌توان بسط داد [19]. همچنین، با افزایش تعداد تناوب‌های زوج بلور فوتونی مد تشدیدی مرکزی جایگزیده می‌شود.



شکل 4. طیف تراگسیل ساختار  $(AB)^3$  تحت تاثیر میدان مغناطیسی خارجی به ازای  $n_e = 6 \times 10^{17} m^{-3}$



شکل 3. قابلیت عبوردهی بر حسب فرکانس برای بلور فوتونی  $(AB)^N$  با پرودهای مختلف الف)  $N=2$ ، ب)  $N=3$ ، ج)  $N=4$  و د)  $N=5$

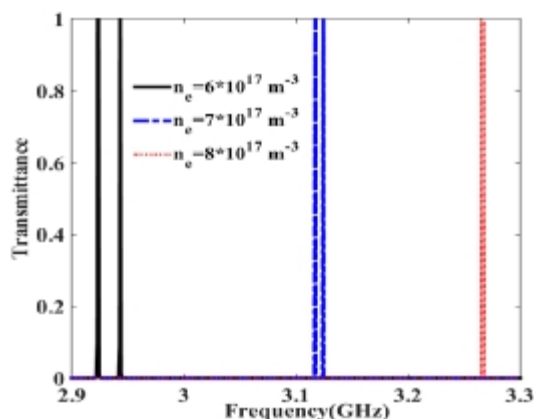
که با افزایش میدان مغناطیسی، مد تشدیدی جابه‌جایی قرمز (به سمت طول موج‌های بلندتر) از خود نشان می‌دهد.

### نتیجه‌گیری

در این مقاله رفتار فیلتری مد تشدیدی در ساختار لایه‌ای یک بعدی شامل نیمه رسانای آلاییده را با استفاده از روش ماتریس انتقال بررسی کردیم. نشان دادیم اثرات مغناطیسی اپتیکی منجر به تغییر ضریب گذردهی لایه نیمه رسانای آلاییده می‌شود طوری که ضریب گذردهی لایه تابعی کاهشی با میدان مغناطیسی و نیز تابعی افزایشی با چگالی الکترونی است. همچنین، نتایج نشان داد که بر خلاف ساختارهای متداول تناوبی بی‌نقص، حضور لایه نیمه رسانای آلاییده در ساختارهای لایه‌ای می‌تواند منجر به حضور مد تشدید در طیف تراگسیلی چنین ساختارهای متناوبی همانند ساختارهای دارای لایه نقص باشد که می‌توان به کمک رفتار مشدد فابری پرو آن را توجیه کرد. از طرفی با توجه به برقراری شرط براگ در فرکانس‌های دیگر با تغییرات چگالی الکترونی نیمه هادی و میدان مغناطیسی خارجی، می‌توان به مدهای تشدید قابل تنظیم دست یافت.

### References

- [1] M. Renilkumar, Rrita Nair, "Properties of defect in geometrically chirped one-dimensional photonic crystal," *Opt. Mater.* 33 (2011)
- [2] W. Belhadj, A. N. Al-Ahmadi, Tunable Narrowband Terahertz Multichannel Filter Based on One dimensional Graphene-Dielectric Photonic Crystal. *Opt. Quantum Electron*, 53(2021) 27
- [3] V. A. Ilinykh, L. B. Matyushkin, Sol-gel Fabrication of One-dimensional Photonic Crystals with Predicted Transmission Spectra. *J. Phys. Conf. Ser.*, 741(2016) 012008
- [4] M. Upadhyay, S. K. Awasthi, L. Shiveshwari, S. N. Shukla, S. P. Ojha, Temperature-dependent Tuning of Photonic Band Gaps for Wavelength-selective Switching Applications. *Indian J. Phys* 90(2015) 353
- [5] A. Panda, P. D. Pukhrambam and G. Keiser, "Realization of sucrose sensor using 1D photonic crystal structure vis-à-vis band gap analysis," *Microsyst. Technol* 27 (2021) 833
- [6] M. Upadhyay, S. K. Awasthi, L. Shiveshwari, S. N. Shukla and S. P. Ojha, "Two channel thermally tunable band-stop filter for wavelength selective switching applications by using 1D ternary superconductor photonic crystal," *J. Supercond. Novel Magn* 28 (2015) 1937.
- [7] Pei-Lin Wang, Li-Ming Zhao, and Yun-Song Zhou, "Controllable propagation of waveguide



شکل 5. طیف تراگسیل ساختار<sup>3</sup>(AB) به ازای مقادیر مختلف چگالی الکترونی تحت تاثیر میدان مغناطیسی خارجی  $B = 0.4T$

همان طور که در شکل 2 مشاهده کردیم ضریب گذردهی نیمه هادی آلاییده شده تابعی کاهشی از میدان مغناطیسی خارجی و تابعی افزایشی از چگالی الکترونی نیمه هادی است. بنابراین؛ بر اساس قانون براگ، انتظار داریم تغییرات این دو پارامتر موقعیت مد تشدیدی را تحت تاثیر قرار دهد. اثر تغییر چگالی الکترونی و میدان مغناطیسی اعمالی روی مدهای تشدیدی در طیف تراگسیل ساختار به ترتیب در شکل‌های 4 و 5 نشان داده شده است. همان طور که مشاهده می‌شود با افزایش چگالی الکترونی، مد تشدیدی جابه‌جایی آبی (به سمت طول موج‌های کوتاه‌تر) از خود نشان می‌دهد، در حالی

### منابع

- mode in multi-channel photonic crystal waveguide," *J. Opt. Soc. Am. B* 41 (2024) 1622
- [8] E. Yablonovitch, "Inhibited spontaneous emission in solid state physics and electronics," *Physical Review Letters*, 58 (1987) 2059–2062
- [9] S. John, "Strong localization of photons in certain disordered dielectric superlattices," *Phys. Rev. Lett.* 58 2486 (1987).
- [10] W. Belhadj, A. N. Al-Ahmadi, "Tunable narrowband terahertz multichannel filter based on one-dimensional graphene-dielectric photonic crystal," *Opt Quant Electron* 53, 27 (2021).
- [11] C. Hu, J. Ji, T. Zhou, et al. "A Tunable Multichannel Filter Based on Photonic Crystal," *Silicon* 15 (2023) 2137
- [12] C. Malek, et al, "Employing the defective photonic crystal composed of nanocomposite superconducting material in detection of cancerous brain tumors biosensor: Computational study," *Crystals* 12 (2022) 540.
- [13] C.-Z. Li, S.-B. Liu, X.-K. Kong, H.-F. Zhang, B.-R. Bian, and X.-Y. Zhang, "A novel comb-like plasma photonic crystal filter in the presence of evanescent wave," *IEEE Trans. Plasma Sci.* 39 (2011) 27155–27166.
- [14] W.-H. Lin, C.-J. Wu, T.-J. Yang, and S.-J. Chang, "Terahertz multichanneled filter in a superconducting photonic crystal," *Opt. Express*

- 18 (2010).
- [15] T. C. King, C. C. Yang, P. H. Hish, T. W. Chang and C. J. Wu; "Analysis of tunable photonic band structures in an extrinsic plasma photonic crystal"; *Phys. E* 67 (2015) 7-11
- [16] H. Wang, K. Zhang, "Photonic crystal structures with tunable structure color as colorimetric sensors," *Sensors*, 13(4) (2013) 4192-4213.
- [17] X. Wang, Z. L. Wang, "Photonic Crystals and Devices". Springer New York, (2007) 281-305,
- [18] S. Mostafa, N. Rafat, El-naggar, "One dimensional metallic-dielectric (Ag/sio<sub>2</sub>) photonic crystal filter for thermo photovoltaic applications", *Renew Energy*, (2012) 245-250
- [19] W. Ch. Tsung, R. Ch. Jia, J. W. Chien, Magnetic field tunable multichannel filter in a plasma photonic crystal at microwave frequencies *Applied Optics*. 55 (2016) 943-946
- [20] Y H Chang, M D Ou, C J Wu, Analysis of tunable transmission properties in photonic crystals containing doped semiconductor optic communications (2014) 321167-171
- [21] C. Nayak, A. Saha, A. Aghajamali, Periodic multilayer magnetized cold plasma containing a doped semiconductor *Indian J Phys* 92 (2018) 911-917
- [22] C. R. Pidgeon *Handbook on Semiconductors* Amsterdam: North-Holland (1980)
- [23] P Yeh, *Optical Waves in Layered Media* Wiley New York, (1988) Chap. 6
- [24] C. Kittel, *Introduction to Solid State Physics* eighth ed, Wiley, New York (1996) 397
- [25] S. Adachi, *Properties of Aluminium Gallium Arsenide* INSPEC Publication (1993)