

مدهای جای گزیده TM در فصل مشترک ساختارهای تناوبی دارای نقص ضریب شکست و محیط همگن معمولی و متاماده

زهرا عینی*

استادیار، فیزیک، دانشگاه پیام نور

تاریخ دریافت: 1395/11/18 تاریخ پذیرش: 1395/12/26

Study of Localized Modes Between Defective Multilayer Structures and Conventional or LH Material

Z. Eyni*

Assistant Professor, Physics, Payame Noor University

Received: 2017/02/06 Accepted: 2017/03/16

Abstract

In this paper, the TM localized waves produced at the interface of homogeneous media and defective photonic crystals has been studied. The considered homogeneous medium can be a left-handed or a conventional material. It was found that for the conventional medium, in case of defect in the refractive index of photonic crystal layer, two type's waves as surface and defect localized waves can be created. Where, for the case of LH medium, only defect waves can be formed. Moreover dependence of ATR spectrum of the TM localized waves on the defect position and refractive index of defective layer has been discussed.

Keywords

Photonic Crystals, Surface Waves, Metamaterials.

چکیده

در این مقاله امواج جای گزیده TM ایجاد شده در فصل مشترک میان ساختارهای تناوبی دارای نقص ضریب شکست و محیط همگن اعم از معمولی و متاماده بر اساس طیف ATR بررسی و نشان داده شده است در حالتی که محیط همگن هوا باشد، دو دره در طیف ATR ایجاد می شود که یکی نشانگر مد سطحی و دیگری مد جای گزیده نقص است. همچنین پیدایش این مدها هم به میزان تغییرات ضریب شکست لایه نقص بستگی دارد همین طور نشان داده شده است در حالتی که فصل مشترک ساختار تناوبی متاماده قرار بگیرد، فقط امکان تشکیل مد جای گزیده نقص وجود دارد. علاوه بر این وقتی متاماده به عنوان نقص در ساختار تناوبی قرار بگیرد، فقط یک دره در طیف ATR ایجاد می شود که بسته به مقدار تغییر ضریب شکست، یا مد سطحی و یا مد جای گزیده نقص خواهیم داشت.

واژگان کلیدی

بلور فوتونی، امواج سطحی، متاماده.

مقدمه

بلورهای فوتونی به عنوان ساختارهای دی الکتریک مصنوعی با مدولاسیون متناوب ضریب شکست، توانایی کنترل امواج الکترومغناطیسی را به روش‌های نوین عرضه می‌کنند. این مواد دارای کاربردهای متعددی نظیر آینه‌های دی‌لکتریک، موج‌برهای دی‌لکتریک و کاواک‌های لیزری هستند [2-4]. از طرفی متاموادها (موادی با ضریب شکست منفی) به دلیل خواص فیزیکی جالب و منحصر به فرد یکی از موضوعات مهم مورد علاقه پژوهشگران در دهه‌های گذشته است [5-7]. با توجه به اینکه در طراحی حسگرهای زیستی از امواج سطحی در بلورهای فوتونی استفاده می‌شود، به همین منظور مطالعه امواج سطحی تولید شده در فصل مشترک بلورهای فوتونی و محیط‌های همگن مورد توجه فراوان قرار گرفته است [8-14]. از آنجایی که ساخت بلورهای فوتونی ایده‌آل فرایند بسیار پیچیده‌ای است و به عوامل متعددی بستگی دارد، همواره امکان دارد به هر دلیلی این ساختارها از تناوب کامل منحرف شوند و به اصطلاح دچار نقص ساختاری شوند.

مطالعاتی که در این زمینه صورت گرفته است، اغلب در مورد امواج TE است [11-14] و امواج قطبیده TM کمتر مورد بررسی قرار گرفته است. از این رو در این مقاله اثر نقص در ضریب شکست ساختار بلور فوتونی بر امواج جای‌گزیده TM ایجاد شده در فصل مشترک بلور فوتونی و محیط‌های همگن اعم از معمولی و متاماده بر اساس روش ATR، بررسی و نشان داده شده است که برای امواج TM وجود نقص در ضریب شکست ساختار بلور فوتونی امکان ایجاد دو نوع امواج جای‌گزیده دارد. در نوع اول امواج در سطح بلور فوتونی جای‌گزیده می‌شوند [11] و به آنها امواج سطحی گفته می‌شود. اما در نوع دوم که امواج جای‌گزیده نقص نامیده می‌شوند، امواج در نقص ساختاری جای‌گزیده می‌شوند. این در حالی است که برای امواج TM، وجود نقص در ضخامت ساختار بلور فوتونی امکان تشکیل امواج سطحی وجود ندارد [1].

تأثیر محیط همگن، مکان لایه نقص و همچنین مقدار تغییرات ضریب شکست لایه نقص و اینکه لایه نقص محیط معمولی یا متاماده باشد، بر روی طیف ATR امواج TM بررسی و نشان داده شده است در حالی که محیط همگن هوا باشد امکان تشکیل هردوی امواج سطحی و امواج جای‌گزیده نقص وجود دارد. در حالی که برای محیط همگن متاماده فقط امکان تشکیل مد جای‌گزیده نقص وجود دارد. علاوه بر این وقتی متاماده به عنوان نقص در ساختار تناوبی قرار بگیرد، فقط یک دره در طیف ATR ایجاد می‌شود که بسته به مقدار تغییر ضریب شکست، یا مد سطحی و یا مد جای‌گزیده نقص خواهیم داشت.

مدل بندی

برای مطالعه انتشار امواج جای‌گزیده در بلورهای فوتونی روش‌های مختلفی از جمله مدل فلوکت - بلاخ، نظریه موج جفت شده و روش ماتریس انتقال وجود دارد. در این مقاله با استفاده از روش ATR تأثیر نقص در ضریب شکست ساختار بلور فوتونی بر امواج جای‌گزیده TM تولید شده در فصل مشترک بلور فوتونی و محیط همگن اعم از معمولی و متاماده با ضریب شکست n_0 را بررسی می‌کنیم.

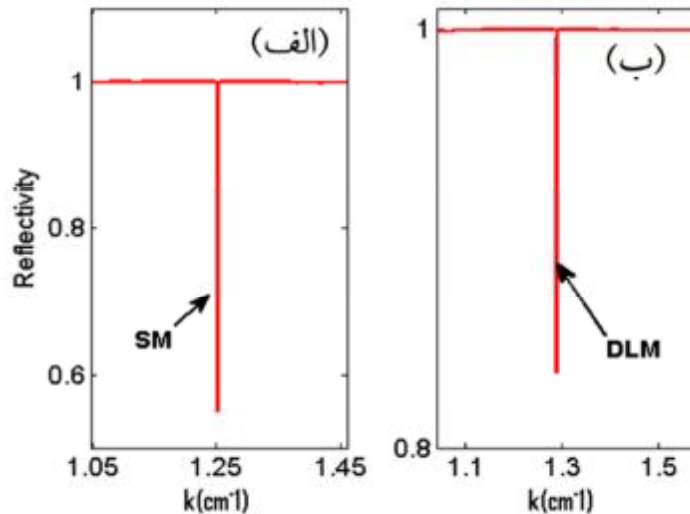
فرض می‌کنیم بلور فوتونی مورد نظر از لایه‌هایی با ضرایب شکست n_1 و n_2 و ضخامت‌های d_1 و d_2 ساخته شده است. لایه نخست از تناوب اول این بلور حاوی یک لایه موسوم به لایه کلاهدک با پهنای d_c و ضریب شکست از جنس لایه اول است. برای راحتی محاسبات این لایه به دو زیر لایه به پهنای d_s و d_t تقسیم می‌شود.

در این مطالعه امتداد Z را عمود بر لایه‌های بلور فوتونی انتخاب و قطبش TM را بررسی می‌کنیم. فرض می‌شود که در یکی از تناوب‌ها، ضریب شکست یکی از لایه‌ها از مقدار پیش فرض خود منحرف شده است $(n_1 + n_d) \otimes n_1$. که در آن تغییرات در ضریب شکست لایه با ضریب شکست n_1 است. با توجه به

دستگاه مختصات انتخاب شده، میدانهای مغناطیسی و الکتریکی موج قطبیده TM عبارت است از:

$$\mathbf{H} = H_y(z) e^{i(k_0 b x - \omega t)} \hat{e}_y \quad (1)$$

$$a_p e^{ik_{1z}[z-(p-1)d]} + b_p e^{-ik_{1z}[z-(p-1)d]} ; \quad (2)$$



شکل 1. طیف ATR ساختار مورد مطالعه به ازای زاویه تابش $\theta = 23.2927^\circ$ و $p=2, n_{1d}=1.4741, n_{1s}^2=0.5 \text{ cm}^{-1}$ (الف): $n_{1d}=1, n_{1s}^2=1$ و (ب): مشخصات ساختار تناوبی عبارت است از: $n_1=2, n_2=1.5, n_3=1.7777, n_4=1.5, n_5=2.25, n_6=1.75 \text{ cm}^{-1}$

$$c_p e^{ik_{2z}[z-(p-1)d]} + d_p e^{-ik_{2z}[z-(p-1)d]} ;$$

$$\vec{E} = [E_x(z)\hat{e}_x + E_z(z)\hat{e}_z] e^{i(k_0 b x - \omega t)}$$

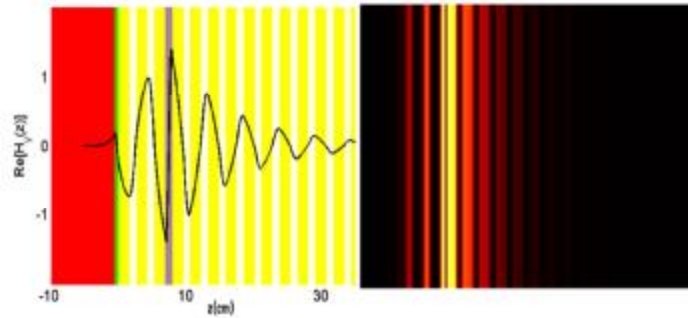
که در آن w فرکانس موج در خلا، b مؤلفه x بردار موج $(b = \frac{n_0 w}{c} \sin \theta)$ که θ_0 زاویه تابش نور فرودی از محیط همگن نسبت به عمود بر سطح بوده است و $H_y(z)$ معرف دامنه میدان مغناطیسی در نواحی مختلف ساختار مورد مطالعه عبارت است از:

$$e_p e^{ik_{1z}[z-(p-1)d]} + f_p e^{-ik_{1z}[z-(p-1)d]} ;$$

$$a_{p+1} e^{ik_{dz}[z-pd]} + b_{p+1} e^{-ik_{dz}[z-pd]} ;$$

$$b_p e^{q_0 z} \quad z \in [-d_s, 0]$$

که در آن $p=1, 2, \dots, n$ و n بیانگر تعداد کل سلولها قبل از لایه نقص است. $k_{dz}, k_{2z}, k_{1z}, q_{0z}$

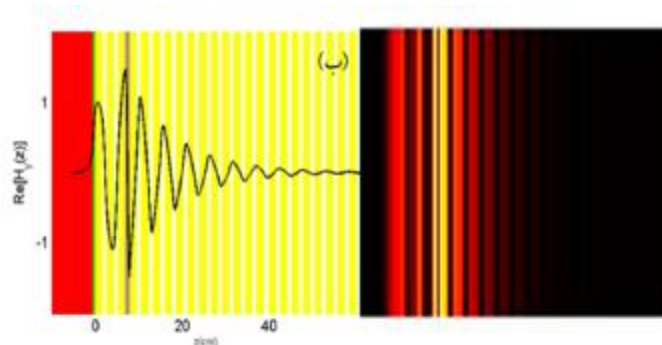
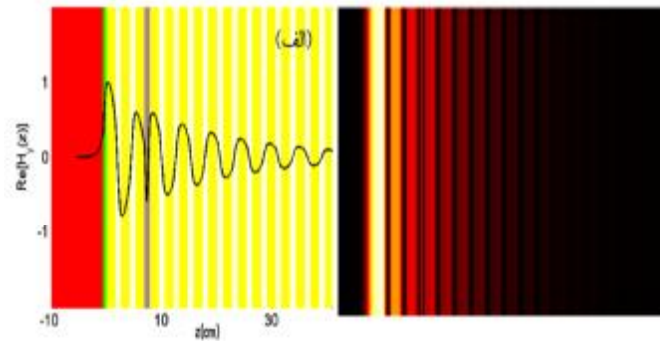


شکل 2. نیم‌رخ عرضی میدان مغناطیسی و شدت میدان امواج TM حاصل از شکل (1) (ب) به ازای $k_1 - 1.242$ مد جای‌گزیده نقص. بقیه پارامترها همانند شکل 1 است.

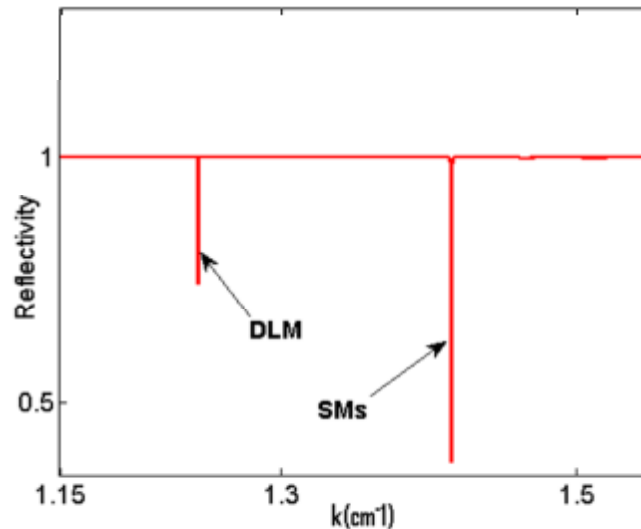
در این مقاله با استفاده از روش ATR امواج جای‌گزیده منتشر شده در داخل باند ممنوعه بلور فوتونی را به دست می‌آوریم [15]. در این ساختار محیط همگن با ضریب شکست و پهنای به عنوان شکاف میان محیط با ضریب شکست بالا و ساختار بلور فوتونی است. همان طور که می‌دانیم به ازای زوایای فرود بزرگ‌تر

نیز مؤلفه‌های z بردارهای موج k_d, k_2, k_1, q_0 است. معادلات ماکسول برای امواج قطبیده TM عبارت‌اند از:

$$\begin{aligned} ik_0 D_x(z) &= \frac{\partial H}{\partial z} \\ -k_0 D_z(z) &= k_0 b H_y \\ ik_0 m H_y(z) + ik_0 b E_z(z) &= \frac{\partial E_x}{\partial z} \end{aligned} \quad (3)$$



شکل 3. (الف): نیم‌رخ عرضی میدان مغناطیسی و شدت میدان امواج TM حاصل از شکل (الف) به ازای الف): $k_1 - 1.427$ مد سطحی و (ب): $k_1 - 1.221$ مد جای‌گزیده نقص. بقیه پارامترها همانند شکل (1) است



شکل 4. طیف ATR ساختار مورد مطالعه به ازای $\theta = 23.2927^\circ$ ، $n_1 = 1.47$ ، $n_2 = 1.4766$ ، $n_3 = 1.5$ مکان دره طیف مد جای گزیده نقص $k = 1.244$ و مد سطحی $k = 1.415$.

داشت. در مورد محیط همگن هوا دو دره در طیف ATR ایجاد می‌شود که یکی نشانگر مد سطحی و دیگری مد جای گزیده نقص است (شکل 1 الف). این در حالی است که در مورد محیط همگن متاماده فقط یک دره در طیف ایجاد می‌شود (شکل 1 ب).

همان طور که از شکل (1 - الف) مشاهده می‌گردد، به ازای یک زاویه تابش معین، مد با عدد موج 1.427 در سطح بلور جای گزیده شده که نشانگر مد سطحی بوده است؛ در حالی که به ازای همان زاویه تابش مد با عدد موج 1.221 در سطح نقص جای گزیده می‌شود که نشانگر مد جای گزیده نقص است. این در حالی است که برای مورد محیط همگن متاماده فقط یک مد ایجاد می‌شود که در سطح نقص جای گزیده می‌شود (شکل‌های 2 و 3).

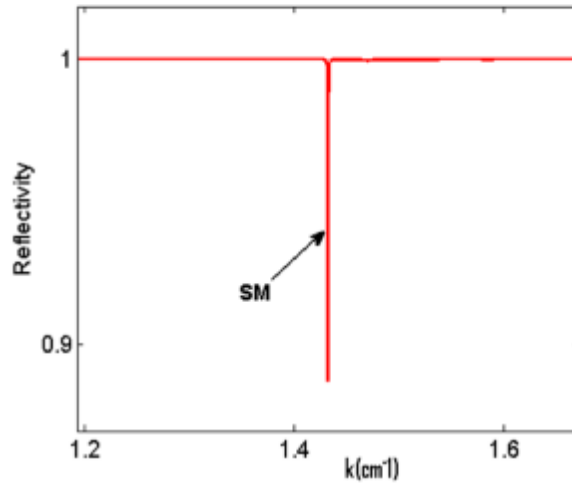
همچنین مطالعات ما نشان داد که با دور شدن لایه نقص از سطح بلور، امواج سطحی به سمت فرکانس‌های پایین و امواج جای گزیده نقص به سمت فرکانس‌های بالا جابه‌جا می‌شوند (شکل 4).

از زاویه بحرانی، بازتاب داخلی کلی اتفاق می‌افتد و امواج الکترومغناطیسی فرودی از محیط با ضریب شکست بزرگ‌تر به داخل شکاف به صورت امواج میرا نفوذ می‌کنند که این امواج با مدهای جای گزیده میرا می‌توانند اندرکنش کنند.

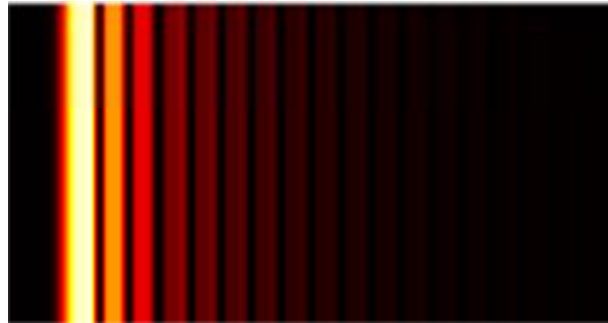
در این مقاله با استفاده از نظریه الکترومغناطیسی کلاسیکی، طیف ATR ساختار مورد نظر را محاسبه کردیم $(r = \frac{M(2,1)}{M(1,1)})$ که در آن r ضریب بازتاب از ساختار مورد مطالعه و M ماتریس انتقال کل ساختار است.

بحث و نتایج

در شکل (1) طیف ATR امواج TM در باند ممنوعه ساختار تناوبی ناقص در تماس با دو نوع محیط همگن هوا و متاماده به ازای زاویه تابش معین نشان داده شده است. مطالعه ما نشان داد که بر حسب اینکه محیط همگن هوا یا متاماده باشد، جواب‌های متفاوتی خواهیم



شکل 5. تأثیر تغییرات ضریب شکست لایه نقص روی طیف ATR ساختار مورد مطالعه به ازای:
 $n_0 = 1.1, n_G = 0.3, \theta = 23.2927^\circ, p = 2$
 بقیه پارامترها همانند شکل (1) است.



شکل 6. شدت میدان مد متناظر با شکل (5)

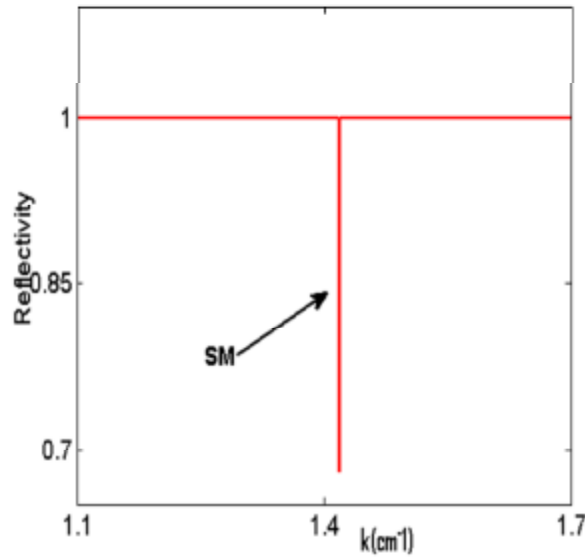
با مقایسه شکل‌های (1) و (5) مشاهده می‌گردد که در حالت افزایش ضریب شکست لایه نقص از مقدار پیش فرض خود امکان ایجاد هر دو نوع امواج سطحی و جای‌گزیده نقص وجود دارد (شکل 3). در حالی که در حالت کاهش مقدار ضریب شکست از مقدار پیش‌فرض خود $n_d = -3.7$ ، فقط امکان تشکیل مدهای سطحی وجود دارد (شکل 6).

همچنین نحوه پیدایش امواج سطحی و امواج جای‌گزیده نقص به میزان تغییرات ضریب شکست لایه نقص بستگی دارد.

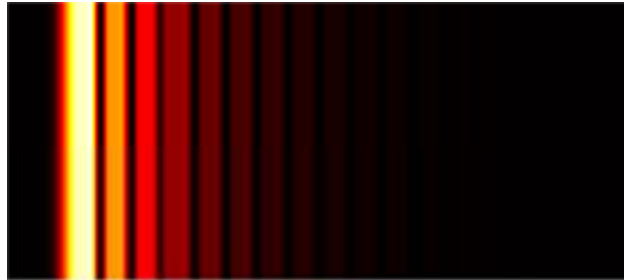
به همین منظور حالت

$$n_d = -0.3 (n_1 \otimes n_1 + n_d)$$

را در نظر می‌گیریم (شکل 5).



شکل 7. طیف ATR ساختار مورد مطالعه به ازای $n_1 = 1.5$ ، زاویه تابش 23.2927° و $n_2 = 1.4$ ، $n_3 = 1.3$ ، $n_4 = 1.2$ ، $n_5 = 1.1$ ، $n_6 = 1.0$ ، بقیه پارامترها همانند شکل (1) است.



شکل 8. شدت میدان مد متناظر با شکل (7).

مشاهده گردید در حالی که محیط همگن هوا باشد، امکان تشکیل هر دو مد جای گزیده سطحی و جای گزیده نقص وجود دارد. همچنین فرکانس مدهای مورد نظر به مکان لایه نقص بستگی دارد که با دور شدن لایه نقص فرکانس مدهای سطحی و مدهای نقص به ترتیب به سمت فرکانس‌های پایین‌تر و بالاتر جابه‌جا می‌شوند. در مورد محیط همگن متماده فقط امکان تشکیل امواج جای گزیده نقص وجود دارد. همچنین مطالعات ما نشان داد که پیدایش مدهای سطحی و یا جای گزیده به مقدار تغییرات ضریب شکست لایه نقص و نوع لایه نقص (معمولی و یا متماده) بستگی دارد.

در ادامه تأثیر لایه متماده به عنوان لایه نقص در ساختار تناوبی را بررسی کردیم. مطالعات ما نشان داد که در این حالت یک دره در طیف ATR ظاهر می‌شود که نشانگر مد سطحی هست (شکل‌های 7 و 8).

نتیجه گیری

در این مقاله مدهای جای گزیده TM در فصل مشترک ساختار تناوبی دارای نقص ضریب شکست و محیط‌های همگن متفاوت اعم از معمولی و متماده از طریق روش ATR بررسی شد.

منابع

- [1] عینی، زهرا و میلانچیان کریم. مقاله نامه اولین همایش ملی فیزیک دانشگاه آزاد اسلامی. دانشگاه آزاد تبریز، تابستان 1395.
- [2] J. D. Joannopoulos, P. R. Villeneuve, and S. Fan, (1997). "Photonic crystals: putting a new twist on light" *Nature* (London) 386, 143-149 .
- [3] P. Lodahl, A. Floris van Driel, I. S. Nikolaev, A. Irman, K. Overgaag, D. Vanmaekelbergh, and W. L. Vos, (2004). "Controlling the dynamics of spontaneous emission from quantum dots by photonic crystals," *Nature* (London) 430, 654-657
- [4] J. D. Joannopoulos, R. D. Meade, and J. N. Winn, *Photonic Crystals: Molding the Flow of Light* (Princeton University Press,
- [5] R. A. Shelby, D. R. Smith, and S. Schultz, (2001). "Experimental verification of a negative index of refraction," *Science* 292, 77-79
- [6] U. K. Chettiar, A. V. Kildishev, H. K. Yuan, W. Cai, S. Xiao, V. P. Drachev, and V. M. Shalaev, (2007). "Dual-band negative index metamaterial: Double negative at 813nm and single negative at 772 nm," *Opt. Lett.*, Vol. 32, 1671
- [7] A. Boltasseva and V. M. Shalaev, (2008). "Fabrication of optical negative-index metamaterials: Recent advances and outlook," *Metamaterials* 2, 1-17
- [8] P. Yeh, A. Yariv, and A. Cho, (1978). "Optical surface waves in periodic layered media," *Appl. Phys. Lett.* 32, 104-105
- [9] F. Michelotti and E. Descrovi, (2011). "Temperature stability of Bloch surface wave biosensors," *Appl. Phys. Lett.* 99, 231107
- [10] M. Shinn and W. Robertson, (2005). "Surface plasmon-like sensor based on surface electromagnetic waves in a photonic band-gap material," *Sens. Actuators B* 105, 360-364
- [11] Z. Eyni, A. Namdar, S. Roshan Entezar and H. Tajalli, "Dispersion properties of nonlinear surface waves in one-dimensional photonic crystals with a nonlinear self-defocusing cap layer of left-handed
- [12] A. Namdar, S. Roshan Entezar and H. Tajalli and Z. Eyni, (2008). "Backward nonlinear surface Tamm states in left-handed metamaterials" *Opt. Express* 16, 10543-10548
- [13] Z. Eyni, S. Roshan Entezar, A. Namdar, and H. Tajalli, (2010). "Tamm states of a nonlinear slab sandwiched between a uniform medium and a one-dimensional photonic crystal" *PIERL* 18, 115-124
- [14] S. Roshan Entezar A. Namdar, Z. Eyni and H. Tajalli, (2008). "Nonlinear surface waves in one-dimensional photonic crystals containing left-handed metamaterials" *Phys. Rev. A* 78, 023816
- [15] A. Namdar, I. V. Shadrivov, and Y. S. Kivshar, (2007). "Excitation of backward Tamm states at an interface between a periodic photonic crystal and a left-handed metamaterial," *Phys. Rev. A*, Vol. 75, 053812.