

طراحی فیلتر تک کاناله متقارن و پادمتقارن کریستال فوتونیکی ناقص تک بعدی در محدوده مادون قرمز

مریم قشلاقی

پژوهشکده لیزر و اپتیک، پژوهشگاه علوم و فنون هسته ای
mgheshlaghi@aeoi.org.ir

سمیه داودی

پژوهشکده لیزر و اپتیک، پژوهشگاه علوم و فنون هسته ای
sdavodi@aeoi.org.ir

چکیده

در این مقاله به بررسی عملکرد فیلتر تک کاناله بلور فوتونیکی ناقص تک بعدی متقارن و پادمتقارن در محدوده ۶۰۰ تا ۱۸۰۰ نانومتر به روش ماتریس انتقال (TMM) پرداخته شد. با طراحی ساختار شماتیکی برای بلور فوتونیکی ناقص تک بعدی متقارن و پادمتقارن از جنس ژرمانیوم با ضریب شکست بالا و فلورید منیزیم با ضریب شکست پایین و انتخاب مد نقص فلورید منیزیم با طول موج مرکزی $\lambda_0 = 1060 \text{ nm}$ و تعداد تناوب ۵ در محدوده IR معلوم شد که با کاهش یا افزایش N ، تعداد تناوب در ساختار بلور فوتونیکی ناقص تک بعدی متقارن و پادمتقارن تعداد مدهای نقص تغییر نمی کند. ولی افزایش مقدار N ، باعث تیزی بیشتر طیف انعکاسی و کاهش آن باعث پهن شدن طیف انعکاسی می گردد. همچنین با افزایش ضخامت d ، پهنای شکاف باند فوتونیکی افزایش می یابد.

واژگان کلیدی: بلور فوتونیکی، فیلتر تک کاناله، مادون قرمز.

مقدمه

در دو دهه گذشته انگیزه تازه ای با هدف مهندسی به بررسی موادی که در آنها نور منتشر نشود یا فقط در طول موج و یا جهت معینی منتشر شود یا در نواحی ویژه ای جایگزیده گردد، پدید آمد. در این راستا بلورهای فوتونی^۱، ساختارهای مصنوعی با ثابت دی الکتریک متناوب فضایی، به طور گسترده ای مورد مطالعه قرار گرفته اند. مهمترین ویژگی این ساختارهای لایه ای وجود شکاف باند فوتونی (PBG)^۲ است (Yablonovitch, 1987). مشخصه دیگر بلورهای فوتونی، جایگزیده کردن نور حول نقص ایجاد شده در ساختار می باشد. نقص در ساختار با تغییر دادن ثابت دی الکتریک و یا ضخامت یکی از لایه ها ایجاد می گردد (John, 1987). این بلورهای فوتونی، معمولا ساختارهایی تکرار شونده و منظم از دی الکتریک هایی با ضرایب شکست بزرگ و کوچک هستند که اولین بار توسط رایلی در سال ۱۹۸۷ معرفی شد (Chen, 2009 & Li and Zhang, 2000). اگر این تکرار در یک، دو و یا سه بعد باشد، به ترتیب بلورهای فوتونی یک بعدی، دو بعدی و سه بعدی ایجاد می شود. از بلورهای فوتونی یک بعدی به دلیل ساختار ساده آنها در طراحی فیلترها استفاده می شود (Zhokovsky and Smirnov, 2011 & Waks and vuckovic, 2005). تحقیقات فراوانی در زمینه استفاده از بلورهای فوتونی برای طراحی میکروکاوکهای لیزری، فیلترها و کلیدهای نوری فوق سریع انجام شده است (Gansen et al, 2002 & Wang et al, 2014).

ساختار بلوری

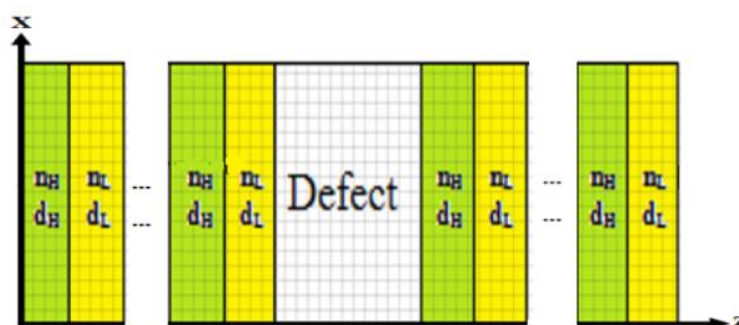
ساختار پیشنهادی برای طراحی فیلتر تک کاناله^۳ در محدوده مادون قرمز (IR)^۴ با طول موج ۶۰۰-۱۸۰۰ nm به دو صورت شماتیک زیر است.

$$air / (HL)^5 D (HL)^5 / air \quad (1)$$

$$air / (HL)^5 D (LH)^5 / air \quad (2)$$

لایه های H و L به ترتیب لایه هایی با ضریب شکست بالا و ضریب شکست پایین می باشد. N تعداد تناوب ساختار و D نشانگر لایه نقص در ساختار است.

ضخامت لایه ها به صورت $n_H d_H = n_L d_L = n_D d_D = \lambda_0 / 4$ و طول موج مرکزی $\lambda_0 = 1060 \text{ nm}$ می باشد. لایه ها به موازات صفحه xy بوده و محور z عمود بر لایه هاست. شکل ۱، مربوط به ساختار بلور فوتونی ناقص تک بعدی پاد متقارن و شکل ۲، مربوط به ساختار بلور فوتونی ناقص تک بعدی متقارن می باشد، این ساختارها به ازای تابش نرمال در محدوده IR ترسیم شده است.



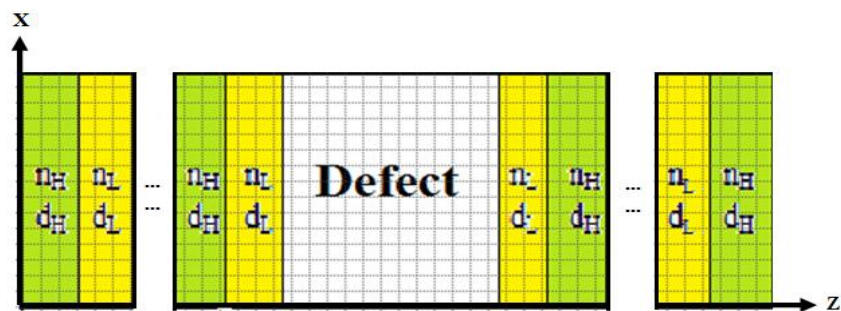
شکل ۱: ساختار بلور فوتونی تک بعدی با مد نقص برای سیستم پادمتقارن.

¹ Photonic Crystal

² Photonic Band Gap

³ Single- Channel Filter

⁴ Near infrared Range



شکل ۲: ساختار بلور فوتونی تک بعدی با مد نقص برای سیستم متقارن.

روش ماتریس انتقال (TMM)، یک روش ساده برای محاسبه و بررسی گاف باند بلورهای فوتونی یک بعدی است (Zak et al, 1900). با استفاده از این روش عملکرد فیلتر تک کاناله بلور فوتونی بررسی می شود.

$$M = \begin{bmatrix} M_{11} & M_{12} \\ M_{21} & M_{22} \end{bmatrix} \quad (3)$$

ماتریس انتقال برای ساختار متقارن و پادمتقارن به صورت زیر نوشته می شود:

$$M_{sym} = D_A^{-1} [D_H P_H D_H^{-1} D_L P_L D_L^{-1}]^N [D_D P_D D_D^{-1}] [D_L P_L D_L^{-1} D_H P_H D_H^{-1}]^N D_S \quad (4)$$

$$M_{asym} = D_A^{-1} [D_H P_H D_H^{-1} D_L P_L D_L^{-1}]^N [D_D P_D D_D^{-1}] [D_H P_H D_H^{-1} D_L P_L D_L^{-1}]^N D_S \quad (5)$$

ضرایب عبور و انعکاس هم با توجه به ساختار شکل های ۱ و ۲، از روابط زیر محاسبه می شوند:

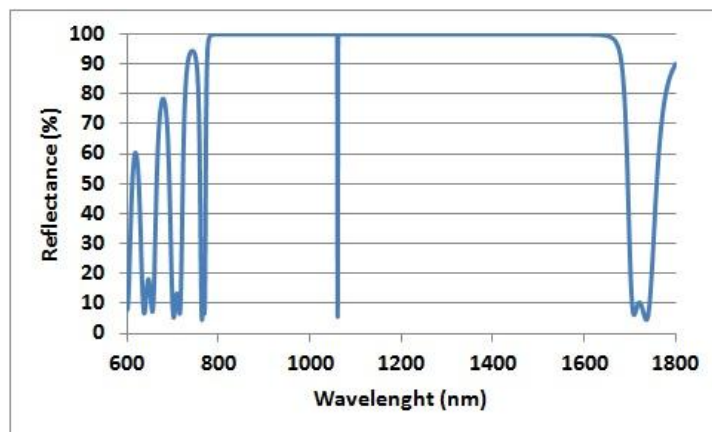
$$T = \frac{n_S \cos \theta_S}{n_A \cos \theta_A} |t|^2 = \frac{n_S \cos \theta_S}{n_A \cos \theta_A} \left| \frac{1}{M_{11}} \right|^2 \quad (6)$$

$$R = |r|^2 = |M_{21}/M_{11}|^2 \quad (7)$$

طراحی و نتایج

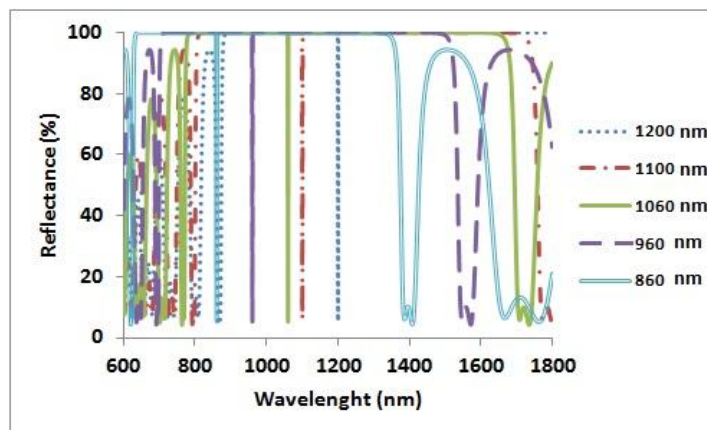
مرحله اول: ساختار پادمتقارن

رابطه (۱)، ساختار پادمتقارن بلور فوتونیک ناقص تک بعدی را نشان می دهد. با انتخاب، Ge به عنوان ماده با ضریب شکست بالا ($n_H = 4.2$) و MgF_2 به عنوان ماده با ضریب شکست پایین ($n_L = 1.38$) و مد نقص را MgF_2 (ماده با ضریب شکست پایین $n_D = 1.38$) و تعداد تناوب ساختار را ۵ و همچنین طول موج مرکزی را برای این محدوده $\lambda_0 = 1060 \text{ nm}$ در نظر گرفتیم. با قراردادن لایه ها و مد نقص، ساختار پادمتقارن به صورت: $(Ge/MgF_2)^5 MgF_2 (Ge/MgF_2)^5$ در می آید. طیف انعکاسی طراحی فیلتر این ساختار در تابش عمودی در شکل ۳ با داشتن مد نقص ترسیم شده است.



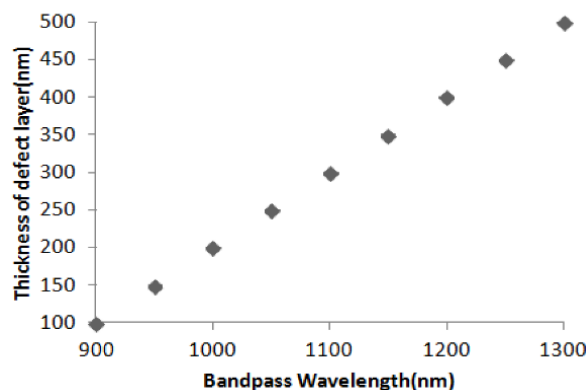
شکل ۳: طیف انعکاسی فیلتر طراحی شده ساختار پاد متقارن بلور فوتونیک فیلتر تک کاناله در 1060 nm .

چنانچه در شکل ۳ ملاحظه می شود مد نقص در شکاف باند فوتونیک (PBG) در ۱۰۶۰ nm ایجاد می گردد. با افزایش ضخامت dD، مد نقص به سمت طول موج های بلندتر شیفت پیدا می کند و همچنین با کاهش ضخامت نیز مد نقص به سمت طول موج های کوتاه تر می رود. با تغییر طول موج مرکزی، محل مد نقص نیز جابجا می شود. شکل ۴ طیف انعکاسی طراحی فیلتر این ساختار در تابش عمودی برای طول موج های مرکزی ۸۶۰ الی ۱۲۰۰ نانومتر را نشان می دهد.



شکل ۴: طیف انعکاسی فیلتر طراحی شده در ساختار بلور فوتونیک تک بعدی با تک مد نقص پادمتقارن برای تابش عمودی در طول موج های مرکزی مختلف.

N، تعداد تناوب ساختار نقش مهمی در پهنای طیف عبوری دارد. با کاهش یا افزایش N، تعداد تناوب در ساختار بلور فوتونیک تک بعدی پادمتقارن در محدوده ۶۰۰-۱۸۰۰ nm، تعداد مدهای نقص تغییر نمی کند، ولی افزایش مقدار N باعث تیزی بیشتر طیف عبوری و کاهش آن باعث پهن شدن طیف عبوری می گردد. همچنین با افزایش ضخامت dD، پهنای شکاف باند فوتونیک افزایش می یابد. در شکل ۵، افزایش پهنای شکاف باند فوتونیک با افزایش ضخامت مد نقص نشان داده شده است.

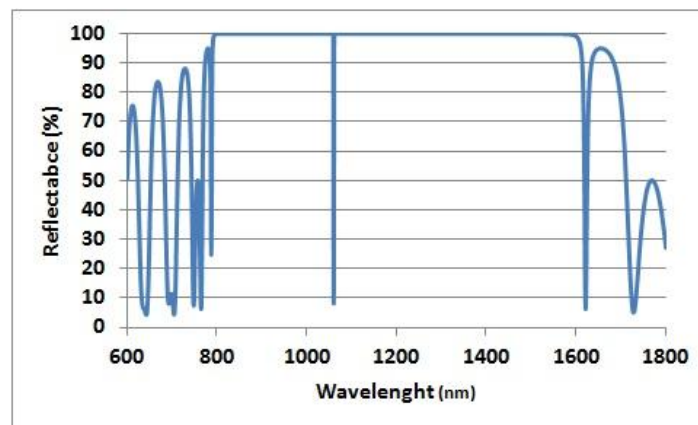


شکل ۵: تغییرات پهنای شکاف باند فوتونیک با ضخامت لایه نقص در ساختار پادمتقارن $Glass/(Ge/MgF_2)^5/MgF_2/(Ge/MgF_2)^5/Air$ بلور فوتونیک تک بعدی در تابش عمودی در محدوده مادون قرمز.

مرحله دوم: ساختار متقارن

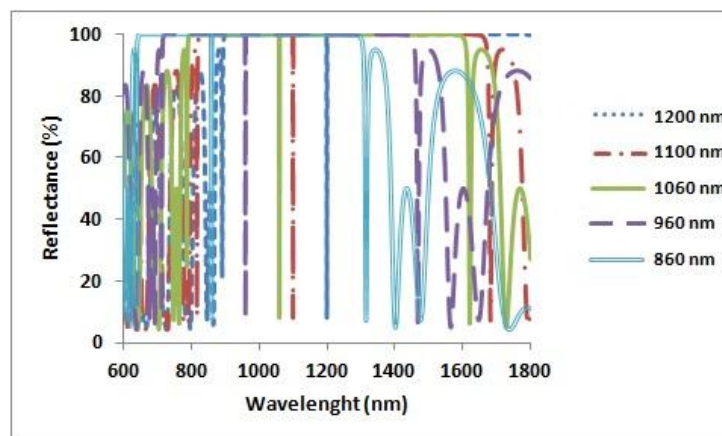
ساختار متقارن بلور فوتونیک تک بعدی محدوده IR در رابطه ۲، مشابه ساختار پادمتقارن در رابطه ۱، یک تک مد نقص را به ما نمی دهد. برای هماهنگی بین این دو ساختار و حفظ تغییرات ارائه شده در ساختار پادمتقارن، ضریب m را به مد نقص اضافه

می کنیم، یعنی مد نقص را به صورت mD ($m = 2,4,..$) در نظر میگیریم. به این ترتیب تغییر ساختار تکمیل شده به صورت $(MgF_2/Ge)^5 mMgF_2 (MgF_2/Ge)^5$ است. در این طراحی ما با اضافه کردن ضریب $m = 2$ به مد نقص در این محدوده با تابش عمودی توانستیم طیف انعکاسی آن را رسم کنیم. لازم به ذکر است که به ازای ضرایب m زوج در این محدوده تنها یک تک مد نقص بوجود می آید. شکل ۶ طیف انعکاسی فیلتر طراحی شده ساختار متقارن را در طول موج ۱۰۶۰ نانومتر نشان می دهد.



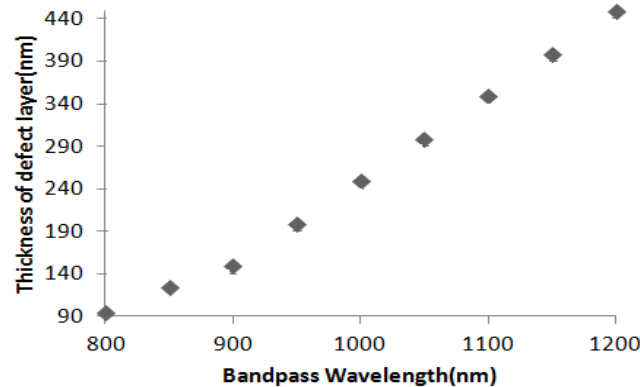
شکل ۶: طیف انعکاسی فیلتر طراحی شده ساختار متقارن بلور فوتونیک فیلتر تک کاناله در ۱۰۶۰ nm.

با بررسی طیف انعکاسی ساختار متقارن بلور فوتونیک فیلتر تک کاناله می توان اینگونه بیان داشت که تک مد نقص در محدوده ۸۰۰-۱۶۰۰ nm و در طول موج یکسانی نسبت به ساختار نامتقارن قرار گرفته ولی پهنای شکاف باند فوتونیک (PBG) کمتری دارد. در این ساختار همانند ساختار پادمتقارن با کاهش یا افزایش N تعداد مد نقص در محدوده ۶۰۰-۱۸۰۰ nm تغییر نمی کند. با تغییر طول موج مرکزی، محل مد نقص نیز جابجا می شود. در شکل ۷ طیف انعکاسی طراحی فیلتر این ساختار در تابش عمودی برای طول موج های مرکزی ۸۶۰ الی ۱۲۰۰ نانومتر نشان داده شده است.



شکل ۷: طیف انعکاسی فیلتر طراحی شده در ساختار بلور فوتونیک تک بعدی با تک مد نقص متقارن برای تابش عمودی در طول موج های مرکزی مختلف.

در ساختار متقارن نیز مانند ساختار پادمتقارن با افزایش ضخامت d ، مد نقص به سمت طول موج های بلندتر شیفت پیدا می کند و همچنین با کاهش ضخامت نیز مد نقص به سمت طول موج های کوتاه تر می رود. در شکل ۸، افزایش پهنای شکاف باند فوتونیک با افزایش ضخامت مد نقص نشان داده شده است.



شکل ۸: تغییرات پهنای شکاف باند فوتونیک با ضخامت لایه نقص در ساختار پادمتقارن $Glass/(Ge/MgF_2)^5 2MgF_2 (MgF_2/Ge)^5 /Air$ بلور فوتونیک تک بعدی در تابش عمودی در محدوده مادون قرمز

نتیجه گیری

ساختار پادمتقارن و متقارن بلور فوتونیک ناقص تک بعدی به ترتیب به شکل های $(Ge/MgF_2)^5 MgF_2 (Ge/MgF_2)^5$ و $(Ge/MgF_2)^5 2MgF_2 (MgF_2/Ge)^5$ توسط برنامه شبیه سازی TF-Calc طراحی شد. در هر یک از ساختارهای فوق مد نقص در طول موج مرکزی ایجاد می گردد و با تغییر طول موج مرکزی می توان محل مد نقص را تغییر دهیم. در هر یک از ساختارهای فوق تغییرات پهنای شکاف باند فوتونیک، با تغییر ضخامت لایه نقص به طور خطی ملاحظه گشت. همچنین پهنای شکاف باند فوتونیک در ساختار متقارن کمتر از ساختار نامتقارن می باشد.

منابع

- Chen Y. (2009). Effect of Mn doping on the physical properties of misfit-layered, Appl. Phys. 42 (2009) 3727.
- Gansen J., Jarasiunas K. and Smirl L. (2002). Femtosecond all-optical polarization switching based on the virtual excitation of spin-polarized excitons in quantum wells, Appl. Phys. Lett. 6 (2002) 11.
- John S., (1987). Strong localization of photons in certain disordered dielectric superlattices, Phys. Rev. Lett. 58 (1987) 2486.
- Li Z. Y. and Zhang Z. Q. (2000). Fragility of photonic band gaps in inverse-opal photonic crystals, Phys. Rev. B 62 (2000) 1516–1519.
- Waks E., and vuckovic J. (2005). Coupled mode theory for photonic crystal cavity-waveguide interaction, Optics Express 13 (2005). 5064.
- Wang L., Shen Z., Fan B. and Wang Z. (2010). High transmittance of connected resonant modes, Opt. Commun. 283 (2010). 2155–2159.
- Yablonovitch E., (1987). Inhibited spontaneous emission in solid-state physics and electronics, Phys. Rev. Lett. 58 (1987) 2059.
- Zak J., Moog E. R., Liu C. and Bader S. D. (1990). Fundamental magneto-optics, J. Appl. Phys. 68 (1990). 4203-4207.
- Zhokovsky S. V. and Smirnov A. G. (2011). All-optical diode action in asymmetric nonlinear photonic multilayers with perfect transmission resonances, Phys, Rev. A 83 (2011). 023818.

Design of channel filter symmetric and asymmetric one-dimensional defective photonic crystal in infrared (IR) range

Maryam Gheshlaghi* and Somayh Davodi

Laser and optics research school, Nuclear Science and Technology Research Institute (NSTRL), Tehran, Iran.

Abstract

In this paper, the performance symmetric and asymmetric filters for single-channel one-dimensional photonic crystal defects was studied in the range of 600 to 1800 nm transmission matrix method (TMM). By designing prototypes for symmetric and asymmetric one-dimensional photonic crystal partially made of germanium and magnesium fluoride with high refractive index and low refractive index respectively and magnesium fluoride as defect mode with the center wavelength of $\lambda_0=1060\text{nm}$ and 5 frequency number in the IR range was found that the number of defect modes do not changed. However increasing the amount of N is led to more sharp in the reflective spectrum and decreasing the amount of N is made to increase the reflective spectrum bandwidth. Also, the photonic band gap width is increased by increasing the thickness dD .