بیست و پنجمین کنفرانس اپتیک و
فوتونیک ایران و یازدهمین کنفرانس
مهندسی و فناوری فوتونیک ایران،
دانشگاه شیراز،
شیراز، ایران.
۹-۱۱ بهمن ۱۳۹۷

ساختار باند برحسب مرتبه های مختلف سری فیبوناچی در شبه بلور فوتونی یک بعدی حاوی تک لایه های مولیبدن دی سولفاید (MoS_2)

میثم شیری[۱] ، امیر مدنی[۱] و صمد روشن انتظار[۲]

[۱]گروه مهندسی اپتیک و لیزر، دانشگاه بناب، بناب، آذربایجان شرقی
[۲] دانشکده فیزیک، دانشگاه تبریز، تبریز، آذربایجان شرقی

چکیده –دراین مقاله ساختار باند و خواص تراگسیل شبه بلور فوتونی یک بعدی حاوی تک لایه های MoS_2 با آرایش شبه تناوبی برای مرتبه های مختلف سری فیبوناچی مورد مطالعه قرار گرفته است. ابتدا به معرفی سری فیبوناچی و نحوه آرایش لایه های دی الکتریک و نانو لایه های MoS_2 پرداخته شده است. در ادامه طیف تراگسیل ساختار با استفاده از روش ماتریس انتقال برای مرتبه های ۳، ۴ و ۵ سری فیبوناچی برای دو قطبش TE و TM مورد بررسی قرار گرفته است. در پایان ساختار باند و گاف فوتونی برای مرتبه های اشاره شده در ناحیه مرئی و فرا بنفش نزدیک بررسی شده است که حضور MoS_2 باعث ایجاد گاف شده است و همچنین با افزایش مرتبه سری فیبوناچی انتقال گاف به فرکانس های بالاتر رخ می دهد.

کلید واژه- ساختار باند گاف، طیف تراگسیل، رشته فیبوناچی، بلور فوتونی یک بعدی، مولیبدن دی سولفاید(MoS_2)

Band gap structure of a one-dimensional quasiperiodic structure containing MoS_2 mono-layers in terms of different orders of Fibonacci series

Meisam Shiri[1], Amir Madani[1], Samad Roshan Entezar[2]

[1]Department of Laser and Optical Engineering, University of Bonab, Bonab
[2]Faculty of Physics, University of Tabriz, Tabriz

E-Mails: meisamshiri1993@gmail.com (M.S.); a-madani@bonabu.ac.ir (A.M.); s-roshan@bonabu.ac.ir (S.R.E.)

Abstract- In this paper, the band gap structure and transmission properties of a one-dimensional Fibonacci quasiperiodic structure containing MoS_2 monolayers have been studied. At first, the Fibonacci series and the arrangement of dielectric layers and MoS_2 monolayers have been introduced. So, the transmission spectrum of the structure for 3, 4 and 5 orders of Fibonacci series have been studied for TE and TM polarizations, using the transfer matrix method. Finally, the photonic band gap structure of above-mentioned Fibonacci series orders has been investigated in the visible and UV region. The results show that, the presence of MoS_2 causes to appearance of new gaps. Also, as increasing the orders of Fibonacci series, the gaps occurs at higher frequencies.

Keywords: Band gap structure, Transmission properties, Fibonacci series, Quasiperiodic structure, MoS_2.

این مقاله در صورتی دارای اعتبار است که در سایت www.opsi.ir قابل دسترسی باشد.

[Downloaded from www.opsi.ir on 2025-11-10]

مقدمه

بلور های فوتونی ابزاری مناسب برای کنترل نور محسوب می شوند که با آرایش های مختلف تناوبی و شبه تناوبی و ... برای کاربرد های مختلف طراحی می شوند. بلور فوتونی را به طور ساده می توان یک محیط با خواص اپتیکی متناوب تعریف کرد. مهم ترین مشخصه این مواد وجود محدوده فرکانسی ممنوعه یا گاف فوتونی است [۱]. تا به حال در ساخت بلور های فوتونی از مواد گوناگونی، به عنوان مثال دی الکتریک ها، فلزات، نیم رساناها و ... استفاده شده است که در دهه گذشته تحقیقات و توجهات زیادی روی مواد دو بعدی از قبیل گرافن، MoS_2 و ترکیبات مشابه انجام شده است [۲].

MoS_2 به عنوان یک نیم رسانای دو بعدی با ضخامت اتمی است که یکی از معروف ترین اعضای خانواده مواد لایه ای واندروالسی اند. اگر از بالا به MoS_2 نگاه کنیم ساختاری لانه زنبوری را مشاهده می کنیم [۳]. مزایای دیگر تغییر گاف نواری از حالت غیر مستقیم ۱/۲ eV در چند لایه به حالت مستقیم ۱/۹ eV در تک لایه اشاره کرد. در کنار این ویژگی ها ضخامت هر لایه MoS_2، ۰/۶۵ nm است[۴].

در این مقاله با معرفی سری فیبوناچی و چگونگی تشکیل ساختار شبه تناوبی سعی شده است ابتدا با استفاده از روش ماتریس انتقال طیف تراگسیل برای مرتبه های ۳، ۴ و ۵ ساختار برای دو قطبش TE و TM در ناحیه فرکانسی مرئی و فرابنفش نزدیک پرداخته شود. در ادامه ساختار باند و گاف فوتونی نیز رسم شده است که تاثیر مرتبه های مختلف سری فیبوناچی بر گاف های ایجاد شده توسط MoS_2 مورد مقایسه و بررسی قرار گرفته است.

معرفی ساختار و محاسبات تئوری

ساختار معرفی شده شبه بلور فوتونی یک بعدی با آرایش فیبوناچی حاوی تک لایه های MoS_2 است که این لایه ها مابین لایه های دی الکتریک SiO_2 و PMMA قرار گرفته شده اند. در این ساختار آرایش سلولی دی الکتریک ها از سری فیبوناچی پیروی می کند به طوری که تک لایه های MoS_2 بین لایه های دی الکتریک قرار داده شده اند، به غیر از زمانی که دو لایه مشابه کنار هم قرار گرفته باشند. هر سلول دی الکتریک در داخل ساختار شبه تناوبی فیبوناچی از رابطه بازگشتی:

$$S_{j+1} = \{S_j, S_{j-1}\} \qquad (۱)$$

تبعیت میکنند. در رابطه (۱)، S_j مرتبه سری فیبوناچی می باشد. اگر فرض کنیم $S_0 = \{A\}$ و $S_1 = \{B\}$ باشد، چند مرتبه از سری به صورت:

$$\begin{cases} S_2 = \{BA\}, S_3 = \{BAB\}, S_4 = \{BABBA\} \\ S_5 = \{BABBABAB\} \end{cases} \qquad (۲)$$

محاسبه می شود. تراوایی مغناطیسی لایه ها برابر یک است و همچنین لایه ها در موازات صفحه (y-x) قرار گرفته اند ومحور z عمود بر لایه ها است (شکل۱)، که ضخامت لایه‌ها به صورت:

$$d_{MoS_2} = 0.65nm, d_{SiO_2} = 75nm, d_{PMMA} = 75nm$$

فرض شده اند. با توجه به مرجع [۶،۵] ضریب شکست وابسته به طول موج SiO_2 و PMMA به صورت رابطه:

$$\begin{cases} n_{SiO_2}(\lambda) = \left(1 + \frac{0.6962\lambda^2}{\lambda^2 - 0.0684^2} + \frac{0.4080\lambda^2}{\lambda^2 - 0.1162^2} + \frac{0.8975\lambda^2}{\lambda^2 - 9.8962^2}\right)^{1/2} \\ n_{PMMA}(\lambda) = \left(1 + \frac{0.99654\lambda^2}{\lambda^2 - 0.00787} + \frac{0.18964\lambda^2}{\lambda^2 - 0.02191} + \frac{0.00411\lambda^2}{\lambda^2 - 3.85727}\right)^{1/2} \end{cases} \qquad (۳)$$

بیان می‌شود. ضریب شکست MoS_2 بصورت رابطه:

$$n_{MoS_2}(\lambda) = \sqrt{\varepsilon_{MoS_2}} \qquad (۴)$$

محاسبه می‌شود. ثابت دی الکتریک وابسته به طول موج MoS_2 از مدل ارائه شده Hybrid Lorentz-Drude-Gaussian در مرجع [۷] استفاده شده است. فرض شده

این مقاله در صورتی دارای اعتبار است که در سایت www.opsi.ir قابل دسترسی باشد.

[Downloaded from www.opsi.ir on 2025-11-10]

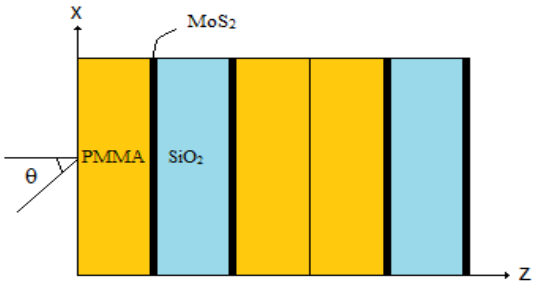
است موج تختی از هوا با زاویه θ نسبت به خط عمود بر سطح ساختار به بلور فوتونی تابیده شود، تراگسیل ساختار با استفاده از روش ماتریس انتقال به صورت:

$$T=\left|\frac{2q_0}{(q_0M_{11}+q_tM_{22})-(M_{21}+q_0q_tM_{12})}\right|^2 \qquad (۵)$$

محاسبه می‌شود [۸]. M_{11}، M_{12}، M_{21} و M_{22} مولفه های ماتریس انتقال کل ساختار، $M_{N\text{-}unitsell}=(M_P\times M_M\times M_S\times M_M\times M_p)^N$ برای مرتبه ۳ سری فیبوناچی است که N تعداد تکرار سلول واحد است. ماتریس های انتقال M_j، میدان های الکتریکی در دو نقطه z و z+dz در هر لایه را توسط رابطه:

$$M_j=\begin{pmatrix}\cos\left(k_{z_j}d_j\right) & \frac{i}{q_0}\sin\left(k_{z_j}d_j\right)\\ iq_j\sin\left(k_{z_j}\right) & \cos\left(k_{z_j}d_j\right)\end{pmatrix} \qquad (۶)$$

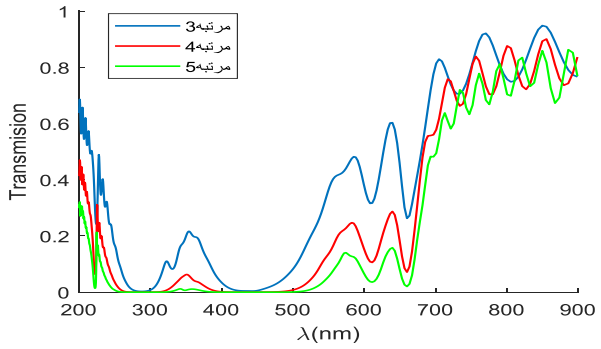
به هم مرتبط می کنند. در این روابط $j=0,t,S,M,P$ و برای قطبش TE و TM به ترتیب داریم: $q_j=k_{z_j}/\omega\mu_j\mu_0$ و $q_j=-k_{z_j}/\omega\varepsilon_j\varepsilon_0$



شکل ۱: طرح شماتیک ساختار یک بعدی شبه پریودیک فیبوناچی مرتبه چهارم شامل تک لایه های MoS_2.

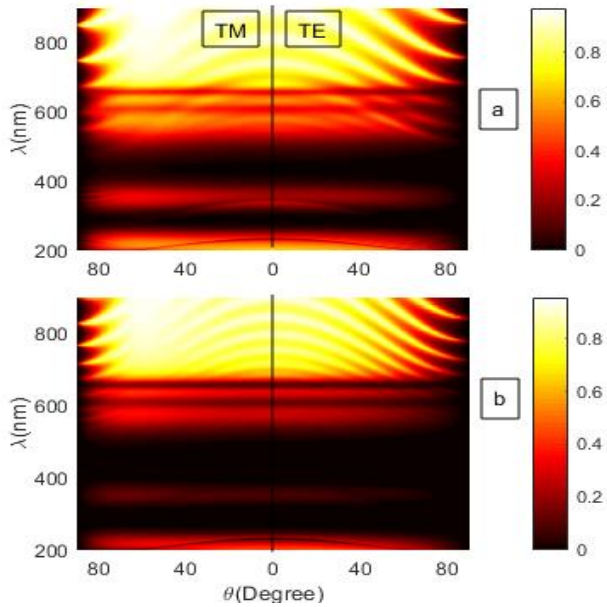
نتایج و بحث

محدوده فرکانسی مورد مطالعه و محاسبات عددی صورت گرفته در این مقاله در ناحیه مرئی و فرابنفش نزدیک است. ابتدا با در نظر گرفتن ثابت دی الکتریک های وابسته به طول موج مواد، طیف تراگسیل بلور فوتونی را برای مرتبه های ۳، ۴ و ۵ سری فیبوناچی برای N=۱۲ تکرار سلول تحت تابش θ=۳۰° رسم شده است. به دلیل اختلاف ناچیز ضریب شکست دی الکتریک ها گاف براگ (گاف ساختاری) تشکیل نمی شود. با توجه به شکل با افزایش مرتبه سری، گاف های تشکیل شده بزرگتر می شوند.



شکل ۲: طیف تراگسیل بلور فوتونی حاوی MoS_2 با آرایش فیبوناچی برای مرتبه ۳ (آبی)، مرتبه ۴ (قرمز) و مرتبه ۵ (سبز).

تراگسیل ساختار بر حسب زاویه تابش و طول موج برای قطبش TE و TM در زیر رسم شده است. در شکل ۳ پیداست که امکان دست یافتن به گاف فوتونی برای هر دو نوع قطبش وجود دارد. نواحی تاریک نشانگر گاف های فوتونی است که حضور MoS_2 باعث ایجاد دو گاف فوتونی در ناحیه مرئی و فرابنفش نزدیک شده است که وابستگی شدید به مرتبه‌های سری فیبوناچی از خود نشان می دهد.

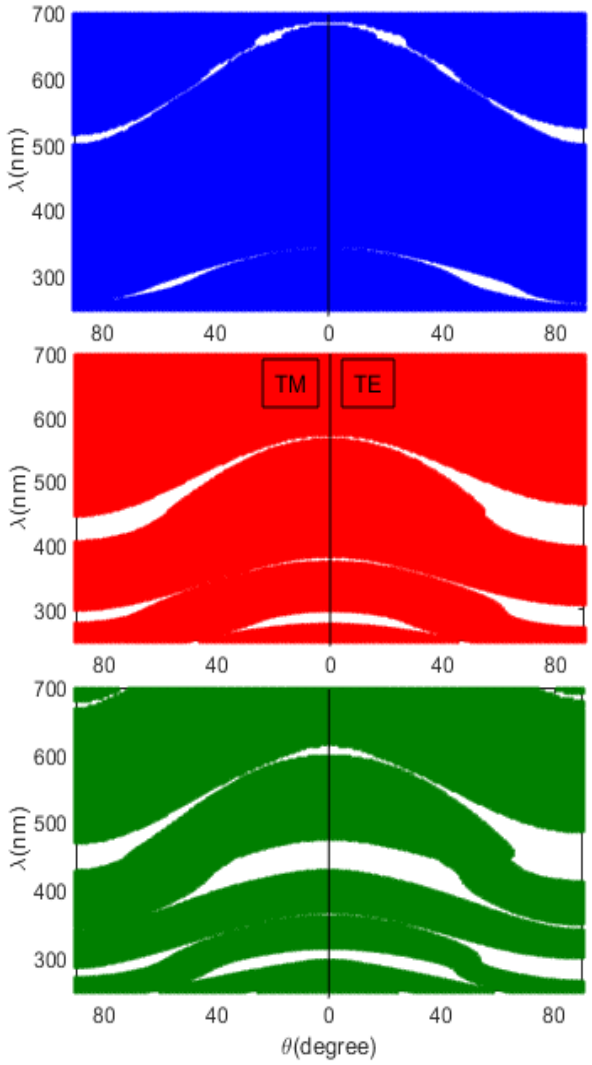


شکل ۳: تراگسیل بلور فوتونی شبه پریودیک فیبوناچی برحسب زاویه تابش و طول موج برای مرتبه ۳ (a) و مرتبه ۴ (b) برای دو قطبش TE و TM.

این مقاله در صورتی دارای اعتبار است که در سایت www.opsi.ir قابل دسترسی باشد.

[Downloaded from www.opsi.ir on 2025-11-10]

در پایان ساختار باند فوتونی را برای تحلیل بهتر تاثیر آرایش فیبوناچی در تشکیل گاف با صرف نظر از جذب ساختار برای قطبش های TE و TM مورد بررسی قرار گرفته است. با توجه به شکل ۴ برای مرتبه های ۳، ۴ و ۵ سری فیبوناچی به ترتیب ۲، ۳ و ۴ گاف فوتونی تشکیل شده است که وابستگی شدیدی به زاویه تابش دارند. با افزایش یک واحد سری فیبوناچی افزایش یک گاف فوتونی در بازه ۰ تا ۴۵ درجه و شیفت گاف ها به طول موج های بالاتر رخ می دهد. در شکل ۴ تاثیر آرایش شبه پریودیک فیبوناچی به خوبی قابل مشاهده است.



شکل ۴: ساختار باند بلور فوتونی شبه پریودیک فیبوناچی برحسب زاویه تابش و طول موج برای مرتبه ۳ (آبی)، مرتبه ۴ (قرمز) و مرتبه ۵ (سبز) برای دو قطبش TE و TM.

نتیجه گیری

در این مقاله طیف تراگسیل و ساختار باند شبه بلور فوتونی حاوی MoS_2 با آرایش فیبوناچی مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج تشکیل دو گاف فوتونی در ناحیه مرئی و فرابنفش نزدیک را نشان می دهد که وابستگی شدیدی به مرتبه سری فیبوناچی و زاویه تابش دارند. با افزایش مرتبه، گاف ایجاد شده توسط MoS_2 پهنتر می شود. همچنین ساختار باند، تاثیر آرایش فیبوناچی را به خوبی نشان داده است که این نوع چیدمان نقش مهمی در تشکیل گاف ایفا می کند.

مرجع‌ها

[1] J. D. Joannapoulos, S. G. Johnson, J. N. Winn, and R. D. Meude, "Photonic crystals: modeling the flow of light," *Princeton university press, USA* (2011).

[2] A. Madani, S. Roshan Entezar, "Optical properties of one-dimensional photonic crystals containing graphene sheets," *Physica B*, **431** (2013) 1–5.

[3] Xiao, D., et al., "Coupled spin and valley physics in monolayers of MoS2 and other group-VI dichalcogenides," *Phys. Rev. Lett.***108** (19) 196802 (2012) 1–5.

[4] C. Qin, Y. Gao, Z. Qiao, prof. L. Xiao, prof. S. Jia, "Atomic-layered MoS2 as a tunable optical platform," *Adv. Optical mater*. **4**(2016) 1429-1456.

[5] I.H. Malitson, "Interspecimen comparison of the refractive index of fused silica", *J. Opt. Soc. Am.***55** (1965) 1205–1208.

[6] M.N. Polyanskiy. Refractive Index Database <http://refractiveindex.info>.

[7] B. Mukherjee, F. Tseng, D. Gunlycke, K.K. Amara, G. Eda, E. Simsek, "Complex electrical permittivity of the monolayer molybdenum disulfide (MoS2) in near UV and visible, " *Opt. Mater. Express.* **5** (2015) 447-455.

[8] P. Yeh, P.A. Yariv, and C-S Hong, "Electromagnetic Propagation in periodic stratified media. I. General theory", Optical Society of America 67, No. 4(1997) 423-438.

این مقاله در صورتی دارای اعتبار است که در سایت www.opsi.ir قابل دسترسی باشد.

[Downloaded from www.opsi.ir on 2025-11-10]