بیست و ششمین کنفرانس اپتیک و
فوتونیک ایران و دوازدهمین کنفرانس
مهندسی و فناوری فوتونیک ایران،
دانشگاه خوارزمی،
تهران، ایران.
۱۵-۱۶ بهمن ۱۳۹۸

افزایش جذب ساختار شبه بلورفوتونی رودین شاپیرو شامل تک‌لایه‌ی MoS_2 در بازه‌ی طول موج مرئی

نرگس انصاری، انسیه محبی و کیمیا فلاح

گروه فیزیک، دانشکده فیزیک شیمی، دانشگاه الزهرا، تهران، ایران.

n.ansari@alzahra.ac.ir, e.mohebi@student.alzahra.ac.ir, k.fallah@student.alzahra.ac.ir

چکیده – امروزه مولیبدیم دی سولفات، MoS_2، قابلیت چشمگیری برای استفاده در ابزارهای اپتوالکترونیکی نشان داده‌است که طراحی این ابزارها در بازه‌ی گسترده‌ی اپتیکی در مورد بحث و گفت‌وگو می‌باشد. در این مقاله در راستای افزایش پهنای باند و طیف جذب، از شبه بلورهای فوتونی رودین شاپیرو با لایه‌های دی‌الکتریک متشکل از Si_3N_4 و SiO_2 همراه با تک‌لایه‌ی MoS_2 استفاده شده است. ویژگی اپتیکی ساختارها با روش ماتریس انتقال در ناحیه‌ی طول موج مرئی به صورت نظری مورد بررسی قرار گرفته است که ضریب شکست تک‌لایه‌ی MoS_2 در ناحیه‌ی طول موج مرئی از روش لورنتس محاسبه می‌شود. جذب در این ساختارها به بالای ۷۰٪ در بازه‌ی طول موج مرئی رسیده است.

کلید واژه- روش ماتریس انتقال، روش لورنتس ، شبه بلور رودین شاپیرو، طیف جذب، مولبیدیم دی سولفات.

Increasing Absorption of Rudin-Shapiro Quasi-Photonic Crystals Including MoS_2 in Visible Range

Narges Ansari, Ensiyeh Mohebbi, and Kimya Fallah

Department of Physics, Alzahra University, Tehran, 1993893973, Iran.
n.ansari@alzahra.ac.ir, e.mohebi@student.alzahra.ac.ir, k.fallah@student.alzahra.ac.ir.

Abstract-Nowadays Molybdenum Disulfides (MoS_2) have represented potential applications in optoelectronic devices which design of these devices is under debate in a wide optical range. In this paper, we design Rudin-Shapiro quasi-photonic crystals (quasi-PCs) based on Si_3N_4, SiO_2 layers and MoS_2 monolayers for increasing broadband and absorption spectra. Optical property of structures is calculated by Transfer matrix method teoretically which refractive index of the MoS_2 monolayer was determined based on the Lorentz model. Absorption of this structure is achieved higher than 70% in visible range.

Keywords: Transfer Matrix Methods, Lorentz Model, Rudin-Shapiro Quasi-Photonic Crystals, Absorption Spectra, Molybdenum Disulfides.

[Downloaded from opsi.ir on 2025-12-07]

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

مقدمه

مواد تک‌لایه دوبعدی، مواد نوینی هستند که به عنوان لایه های فعال در دستگاه‌های با جذب کنندگی بالا مورد استفاده قرار می‌گیرند [۱]. از نانوساختارهای دوبعدی، تک لایه‌ی مولبیدیم دی سولفات، MoS_2، می‌باشد که با توجه به ضخامت نانومتری‌اش، میزان جذب قابل توجهی به علت گاف‌های نواری مستقیم در ناحیه‌ی طول موج مرئی دارد [۲] و افق جدیدی را درکاربری‌های اپتوالکترونیکی مانند ترانزیستورها، آشکارگرها، سلول‌ها خورشیدی و ... باز کرده است. گاف نواری مستقیم تک‌لایه‌ی MoS_2 در سه طول موج ۴۳۳، ۶۱۸ و ۶۶۴ نانومتر به ترتیب با قله‌های جذب ۳۸٪، ۱۵٪ و ۱۳٪ می‌باشد [۳]. برای عملکرد بهتر دستگاه-های اپتوالکترونیکی شامل تک‌لایه‌ی MoS_2، جذب بالاتر با پهنای بیشتر لازم است. در سال‌های اخیر روش‌های تئوری و تجربی مختلفی همانند بلورهای فوتونی و ساختارهای لایه‌ای برای افزایش جذب در پهنای گسترده از طول موج در ساختارهای یک بعدی به دلیل سادگی در طراحی و ساخت پیشنهاد شده است [۴ و ۵].

بررسی ها نشان داده میزان جذب با استفاده از ساختارهای شبه بلور فوتونی نیز افزایش می‌یابد. شبه بلورهای فوتونی نوعی بلور فوتونی هستند که هرکدام از آنها برای چیدمان لایه های خود از توابع خاصی پیروی می‌کنند. استفاده از تک‌لایه MoS_2 در لایه‌های متناوب شبه بلور فوتونی فیبوناچی و تومورس، جذب را در پهنای وسیعی به بالای ۹۰٪ در نواحی طول موجی متفاوت رسانده‌اند [۶ و ۷].

در این مقاله به منظور افزایش جذب با پهنای جذب بالا از شبه بلور فوتونی رودین شاپیرو با لایه‌های دی الکتریک متشکل از Si_3N_4 و SiO_2 همراه با تک لایه‌ی MoS_2 استفاده شده است که به پهنای وسیعی با جذب بالای ۷۰٪ در نواحی طول موجی متفاوت دست یافته‌ایم. این ساختارهای جاذب افق جدیدی را برای کاربردهای اپتوالکترونیکی گشوده‌است.

تئوری

در این مقاله به منظور افزایش میزان جذب با پهنای طول موجی وسیع، از شبه بلور رودین شاپیرو استفاده شده است. در شبه بلور رودین شاپیرو، لایه‌ی S_0 و S_1 به ترتیب A و AA در نظر گرفته شده است. با استفاده از روابط $AA \rightarrow AAAB$ و $AB \rightarrow AABA$ و $BA \rightarrow BBAB$ و $BB \rightarrow BBBA$ میتوانیم سایر جملات این شبه بلور فوتونی را بنویسیم که به ترتیب به صورت: $S_2 = AAAB$ ، $S_3 = AAABAABA,$ و $S_4 = AAABAABAAAABBBAB$ می‌باشند که A=ma و B=mb می‌باشند و a، b و m به ترتیب SiO_2، Si_3N_4 و تک‌لایه‌ی MoS_2 انتخاب شده اند.

برای بدست آوردن مشخصات اپتیکی، نور از هوا عمود به ساختار، هوا/ $(S_n)^N$ / زیرلایه، تابیده می‌شود که در تابش عمود قطبش الکتریکی عرضی (TE) و مغناطیسی عرضی (TM) یکسان است. زیر لایه از جنس SiO_2 می‌باشد و N تعداد دوره تناوب را نشان می‌دهد. طیف جذب ساختار با استفاده از روش ماتریس انتقال، محاسبه می‌شود [۸]. در این روش ضریب شکست مختلط و ضخامت مواد مورد نیاز است.

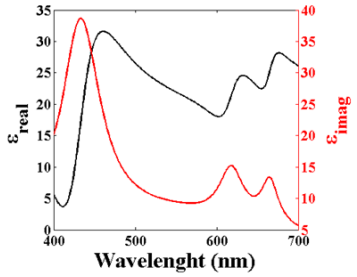
در بازه‌ی طول موج مرئی وابستگی ضریب شکست SiO_2 و Si_3N_4 به طول موج از مراجع [۹، ۱۰] گرفته شده است. ضریب شکست مختلط و ثابت گذردهی تک لایه‌ی تک لایه‌ی MoS_2 با استفاده از روش لورنتس از مرجع [۱۱] گرفته شده است که قسمت حقیقی و موهومی ضریب گذردهی MoS_2، ε_{real} و ε_{image}، در شکل۱ رسم شده است.

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

[Downloaded from opsi.ir on 2025-12-07]

با توجه به شکل ۱، قله جذب دقیقا بر روی قله ε_{image} قرار می‌گیرد به همین علت سه قله ε_{image} تک لایه‌ی MoS_2 که به ترتیب طول موج تشدید λ_{1res} ، λ_{2res} و λ_{3res} نامیده می‌شوند از اهمیت ویژه‌ای برخوردارند.

ضخامت تک لایه‌ی MoS_2 برابر با ۰/۶۱ نانومتر و ضخامت SiO_2 و Si_3N_4 از رابطه‌ی $d = \frac{\lambda_{res}}{4\times n(\lambda_{res})}$ بدست می آید که λ_{res} طول موج تشدید تک‌لایه‌های MoS_2 و $n(\lambda_{res})$ ضریب شکست SiO_2 وSi_3N_4 در λ_{res} می‌باشد.



شکل ۱: قسمت حقیقی و موهومی ضریب گذردهی تک‌لایه‌ی MoS_2.

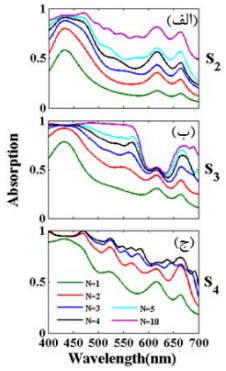
جدول۱: ضخامت لایه‌های SiO_2 و Si_3N_4 در سه طول موج تشدید برای تک لایه‌ی MoS_2.

ضخامت SiO_2 (نانومتر)	ضخامت Si_3N_4 (نانومتر)	ساختار	طول موج تشدید
۷۲	۵۲/۴	I	λ_{1res}=۴۳۳
۱۰۲/۸	۷۶/۲	II	λ_{2res}=۶۱۸
۱۱۰/۶	۸۲/۲	III	λ_{3res}=۶۶۴

با توجه به داشتن سه طول موج تشدید برای MoS_2، سه ضخامت متفاوت برای SiO_2 وSi_3N_4 بدست می آید که در جدول ۱ ذکر شده است. ساختار I، II و III به ترتیب به ازای ضخامت لایه‌ها در λ_{1res} ، λ_{2res} و λ_{3res} برای تک لایه‌ی MoS_2 طراحی شده است.

بحث و نتیجه گیری

مرتبه‌های مختلف رودین شاپیرو و دوره‌ی تناوب از عوامل موثر در جذب ساختار می‌باشند. به منظور دستیابی به بازه‌ی وسیعی از طول موج با جذب بالا، اثر دوره‌ی تناوب بر روی جذب رودین شاپیرو S_2، S_3 و S_4 برای سه ساختار I، II و III به ترتیب در شکل ۲ تا ۴ نمایش داده شده است.

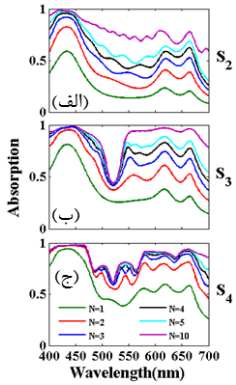


شکل۲: اثر دوره‌ی تناوب بر روی جذب S_2، S_3 و S_4 در ساختار I.

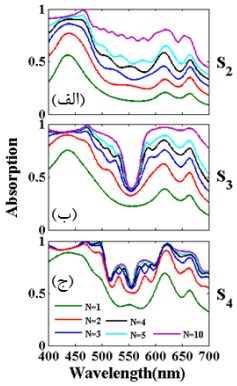
در شکل ۲ برای ساختار I، با افزایش N، میزان جذب افزایش می‌یابد و با افزایش تناوب از N بیش از ۱۰، تغییر قابل ملاحظه‌ای در میزان جذب دیده نمی‌شود. نمودارهای S_2، S_3 وS_4 با تعداد تقریبی ۸۰ لایه در بازه ۴۰۰-۵۷۳ نانومتر به ترتیب دارای جذب بالای ۷۲٪،۸۱٪ و ۷۶٪ هستند. برای انتخاب بهترین ساختار، مشخصه میزان جذب بالاتر با پهنای بیشتر در نظر گرفته می‌شود که S_3 در بازه ی ۴۰۰-۵۷۳ نانومتر بهترین انتخاب در ساختار I می‌باشد. شاخصه های مورد نظر مشابه ساختار I در ساختار II و III به ترتیب در شکل ۳ و ۴ بررسی شده است که برای S_2، S_3 وS_4 با تعداد تقریبی ۸۰ لایه در ساختار II در بازه ی ۵۴۷-۶۸۰ نانومتر به ترتیب دارای جذب بالای ۶۰٪، ۷۰٪و ۶۸٪ و برای ساختار III در بازه ی ۴۰۰- ۵۲۰ نانومتر به ترتیب دارای جذب بالای ۷۸٪، ۷۸٪ و ۶۱٪ می‌باشند.

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

[Downloaded from opsi.ir on 2025-12-07]



شکل۳ : اثر N بر روی جذب S2، S3 وS4 در ساختار II.



شکل۴: اثر N بر روی جذب S2، S3 و S4 در ساختار III.

با مقایسه سه ساختار I، II و III دیده می‌شود که در ساختار I با تعداد لایه‌های برابر، S_3 در بازه‌ی محدودتری جذب بالای ۸۱٪ و برای S_2 دارای جذب ۶۱٪ در بازه‌ی وسیع‌تری از طول موج، ۴۰۰ تا ۶۷۵ نانومتر می‌باشد.

نتیجه‌گیری

با هدف دست یابی به بازه‌ی وسیعی از طول موج با جذب بالا، از شبه بلور فوتونی رودین شاپیرو با لایه‌های دی-الکتریک متشکل از Si_3N_4 و SiO_2 همراه با تک‌لایه‌های MoS_2 استفاده شده است. با بررسی ویژگی‌های اپتیکی در سه ساختار دریافته‌ایم که S_3 در ساختار I برای بازه‌ی ۴۰۰-۵۷۳ نانو.متر جذب بالای ۸۱٪ و برای S_2 دارای جذب ۶۱٪ در بازه‌ی وسیع‌تری از طول موج، ۴۰۰ تا ۶۷۵ نانومتر می‌باشد که برای کاربردهای اپتوالکترونیکی پیشنهاد می-شود.

مرجع‌ها

[1] H. Song, S. Jiang, D. Ji, X. Zeng, N. Zhang, K. Liu, Ch. Wang, Y. Xu and Q. Gan, "Nanocavity absorption enhancement for two-dimensional material monolayer systems," Opt. Express. Vol. **23,** pp. 7120-7130 ,2015.

[2] O. Lopez-Sanchez, D. Lembke, M. Kayci, A. Radenovic, A. Kis,"Ultrasensitive photodetectors based on monolayer MoS_2," Nat. Nanotech. Vol. **8**, pp. 497-501 ,2013.

[3] B. Mukherjee, F. Tseng, D. Gunlycke, K. Amara, G. Eda, E. Simsek, " Complex electrical permittivity of the monolayer molybdenum disulfide (MoS_2) in near UV and visible,"Opt. Mater. Express. VOL.5, pp. 447-455 ,2015.

[4] N. Ansari, M. Moradi, "Optical absorption in air/monolayer MoS_2/S (S=SiO_2 or Si) trilayer stacks at oblique incidence," Superlattices and Microstructures. VOL. **104**, pp. 104-111 2017.

[5] N. Ansari, E. Mohebbi, "Increasing optical absorption in one-dimensional photonic crystals including MoS_2 monolayer for photovoltaics applications," Opt. Mater. VOL. **62**, pp 152-158 2016.

[6] N. Ansari, E. Mohebbi. "Broadband and high absorption in Fibonacci photonic crystal including MoS_2 monolayer in the visible range."Journal of Physics D: Appl. Phys. VOL 51; pp. 115101. 2018.

[7] N. Ansari, E. Mohebbi, K. Fallah, submitted.

[8] Liu JT, Liu NH, Li J, Jing Li X, Huang JH. "Enhanced absorption of graphene with one-dimensional photonic crystal. " Appl. Phys. Lett. VOL 101; pp. 052104. 2012.

[9] Ghosh G. "Dispersion-equation coefficients for the refractive index and birefringence of calcite and quartz crystals. " Opt. Commun.; VOL 163: pp. 95-102. 1999.

[10] Khanna A, Subramanian AZ, Häyrinen M, Selvaraja S, Verheyen P, Van Thourhout D, Honkanen S, Lipsanen H, Baets R. "Impact of ALD grown passivation layers on silicon nitride based integrated optic devices for very-near-infrared wavelengths. " Opt. exp.; VOL 22: pp. 5684-92. 2014.

[11] Ansari N, Ghorbani F. "Light absorption optimization in two-dimensional transition metal dichalcogenide van der Waals heterostructures. " JOSA B.; VOL 35: pp. 1179-85. 2018.

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

[Downloaded from opsi.ir on 2025-12-07]