بیست و سومین کنفرانس اپتیک و فوتونیک و نهمین کنفرانس مهندسی و فناوری فوتونیک ایران
دانشگاه تربیت مدرس
۱۴-۱۲ بهمن ۱۳۹۵
23rd Iranian Conference on Optics and Photonics and 9th Conference on Photonics Engineering and Technology
Tarbiat Modares University, Tehran, Iran
January 31- February 2, 2017

گاف نواری بلورهای فوتونی یک بعدی ساخته شده از لایه‌های متناوب SiO_2/MoS_2 و $PMMA/MoS_2$ تحت تابش باریکه گاوسی

دیزجقربانی‌اقدم، حسین؛ اشرفی؛ سید محمود، ملک‌فر، رسول
گروه فیزیک اتمی و مولکولی، بخش فیزیک، دانشکده علوم پایه، دانشگاه تربیت مدرس، تهران

چکیده - در این مقاله، امکان به دست آوردن بلورهای فوتونی یک بعدی که شامل مواد کم هزینه و همیشه در دسترس دی اکسید سیلیکون (SiO_2) یا پلی متیل متاکریلات (PMMA) وتک لایه‌های دی سولفید مولیبیدیوم (MoS_2) است ارائه شده است. با اعمال ماتریس انتقال تحت باریکه گاوسی به بلورهای فوتونی با لایه های SiO_2/MoS_2 و $PMMA/MoS_2$ و بکارگیری ضرایب شکست وابسته به طول موج این لایه ها، طیف تراگسیل و ویژگی‌های گاف نواری فوتونی آنها مورد بررسی قرار گرفته است. با افزایش مختصه شعاعی r در باریکه گاوسی، مکان گاف نوارهای فوتونی به سمت فرکانس‌های پایین تر جابجا شدند. با افزایش ضخامت لایه‌های MoS_2 درهر یک از این بلورهای فوتونی، پهنای گاف نواری بطور قابل ملاحظه‌ای افزایش یافت و یک جابجایی به سمت فرکانس های پایین تر را نشان داد.

کلید واژه- باریکه گاوسی، بلورهای فوتونی SiO_2/MoS_2 و $PMMA/MoS_2$، گاف نواری، طیف تراگسیلی

One-dimensional photonic crystals band gap made by alternating SiO_2 or PMMA with MoS_2 monolayers under irradiation of Gaussian wave

Dizajghorbani Aghdam , Hossein; Ashrafi, Seyyed Mahmood; Malekfar, Rasoul

Atomic and Molecular Group, Department of Physics, Tarbiat Modares University, Tehran, I.R Iran.

Abstract

In this article, the possibility to synthesize one dimensional photonic crystals consisting of low-cost and easily available materials, as silicon dioxide (SiO_2) or poly methyl methacrylate (PMMA), and MoS_2 monolayers has been presented. By applying of transfer matrix to a periodic photonic crystal structure MoS2/SiO2 and MoS2/PMMA and employing the wavelength dependent refractive indexes of this layers, their transmission spectra and photonic band gaps properties were studied. By increasing of r (r is the radial coordinate) the photonics band gap is shifted toward the lower frequencies. By increasing the thickness of theMoS_2 layers in each of this photonic crystals, the width of band gap substantially increased and a shift toward lower frequencies revealed.

Keywords: Gaussian beam, MoS2/SiO2, MoS2/PMMA, Photonic crystals, band gap , Ttransmission spectrum.

مقدمه

از آنجا که دی سولفید مولیبیدیوم کاربردهای مختلفی در اپتیک و الکترونیک دارد در سالهای اخیر، تحقیق روی دی سولفید مولیبیدیوم نازک مورد توجه تعداد زیادی از محققان واقع شده است [۳-۱]. گزارش های مختلفی در مورد ویژگی‌های اپتیکی، تولید نور تفکیک شده زمانی و لومینسانس چند لایه‌های MoS_2 [۴] و تک لایه MoS_2 [۷-۵] وجود دارد. امروزه بلورهای فوتونی کاربردهای فراوانی در فوتونیک و نانو فوتونیک یافته اند. این بلور ها می توانند طول موج‌های خاص را مسدود کرده و طول موج‌های دیگر را از خود عبور دهند و نور را به شکلی دقیق دستکاری کنند. برای مثال، گاف نواری فوتونی را به منظور تنظیم آن می توان کوک کرده و لومینسانس تک لایه های MoS_2 را افزایش داد[۲]. بلورهای فوتونی آرایه‌هایی از مواد دی‌الکتریک هستند که ضریب شکست به صورت متناوب در یک، دو و یا سه بعد تکرار شده است. مشخصه‌ی اصلی یک بلور فوتونی گاف نواری است که هنگام عبور یک موج الکترومغناطیسی با دامنه و فرکانس معین از ساختار بلور فوتونی ظاهر می‌شود [۸ و۹]. روش ماتریس انتقال یکی از روش‌های متداول برای بررسی ویژگی‌های طیف تراگسیلی از یک بلور فوتونی یک بعدی می‌باشد [۱۰]. در این روش از یک موج تخت با توزیع شدت عرضی ثابت تحت تابش های عمودی و یا مایل با قطبش های مختلف استفاده

این مقاله به شرط در دسترس بودن در وبگاه www.opsi.ir معتبر است.

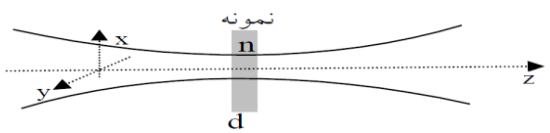
[Downloaded from www.opsi.ir on 2026-10-31]

می‌شود. ولی باریکه خروجی از اکثر منابع لیزری به صورت گاوسی است که دامنه و فاز آن در راستای عرضی ثابت نمی-باشد [۱۱]. ساختارهای چند لایه، مورد خاصی از بلورهای فوتونی یک بعدی هستند که به راحتی از روش های مختلفی ساخته می‌شوند [۱۲-۱۴] و می‌توانند کاربردهای مختلفی را در حسگرها[۱۵]، سوییچ‌های الکترو اپتیکی [۱۶] و لیزرها[۱۷] داشته باشند.

هدف این مقاله پیش بینی ساخت آزمایشی نوع جدیدی از بلورهای فوتونی با مواد کم هزینه با پردازش آسان برای برنامه های کاربردی انتشار فوتونی و نور بوده و مطالعه و بررسی وابستگی گاف نواری بلورهای فوتونی یک بعدی **SiO_2/ MoS_2** و **PMMA /MoS_2** به ضریب شکست وابسته به طول موج لایه ها، خواص فیزیکی لایه ها، تعداد لایه ها و مختصات باریکه گاوسی می باشد. تا به حال، مطالعه دقیقی روی خواص تراگسیلی بلورهای فوتونی چندلایه یک بعدی که لایه های نازکی از دی کالکوژن های فلزات واسطه نیمه هادی مختلف بکار گرفته شده درساختارهای تناوبی صورت نگرفته است.در این مقاله ، ابتدا بلورهای فوتونی یک بعدی که معمولا در ساخت این نوع بلورها از مواد دی اکسید سیلیکون (SiO_2) و پلی متیل متاکریلات ($PMMA$) استفاده می‌شود، به همراه دی کالکوژن فلز واسطه MoS_2 در نظر گرفته شد. با استفاده از روش ماتریس انتقال و اعمال ضریب شکست وابسته به طول موج مواد، طیف تراگسیلی این بلور فوتونی یک بعدی با ساختار متناوب تحت باریکه گاوسی شبیه سازی شده و گاف نواری فوتونی برای حالت های مختلف مورد بررسی قرار گرفت.

ماتریس انتقال از یک تیغه تحت تابش باریکه گاوسی

مطابق شکل-۱، تیغه‌ایی به ضخامت d و ضریب شکست n را در نظر می‌گیریم که باریکه گاوسی با قطبش میدان الکتریکی TE به طور عمودی به آن می‌تابد. محور z را راستای انتشار در نظر می گیریم (عمود بر صفحه تیغه) دراین صورت سطح تیغه در صفحه x-y قرار خواهد داشت.



شکل-۱. طرحواره تابش باریکه گاوسی به یک تیغه به ضخامت d و ضریب شکست n، برای محاسبه ماتریس انتقال دامنه میدانها از آن

توزیع میدان الکتریکی موج گاوسی با رابطه زیر داده می‌شود [۱۱]:

$$E(r,z)=E_0\frac{W_0}{W(z)}e^{\frac{-r^2}{W^2(z)}}e^{-ikz}e^{i\eta(z)}e^{\frac{-ikr^2}{2R(z)}} \qquad (۱)$$

که در آن $W(z)$ پهنای باریکه، $R(z)$ شعاع انحناء و $\eta(z)$ فاز در فاصله‌ی z هستند و به صورت زیر تعریف می شوند [۱۱]:

$$R(z)=z+(\frac{z_0^2}{z}) \qquad W(z)=W_0\sqrt{1+(\frac{z}{z_0})^2} \qquad \eta(z)=\arctan(\frac{z}{z_0})$$

در روابط فوق، W_0 کمر باریکه و Z_0 طول رایلی است. در رابطه (۱) جمله آخر، جمله نمایی فازی است که به مختصات شعاعی r (عمود بر راستای انتشار) بستگی دارد. با فرض $Z_0 >> d$ (طول رایلی بزرگتر از ضخامت تیغه) با اعمال شرایط مرزی، پیوستگی مولفه‌های مماسی میدان های الکتریکی و مغناطیسی در دو صفحه جلویی و عقبی تیغه، که در مرجع [۲۱] برای موج تخت استفاده شده است، ماتریس انتقال از تیغه را به صورت زیر به دست می‌آوریم.

(۲)

$$\mathrm{M}(r,\lambda)=\begin{bmatrix} Cos[q(r,\lambda)\frac{\omega d}{c}] & \frac{1}{q(r)}Sin[q(r,\lambda)\frac{\omega d}{c}] \\ -q(r,\lambda)Sin[q(r)\frac{\omega d}{c}] & Cos[q(r,\lambda)\frac{\omega d}{c}] \end{bmatrix}$$

که در آن به صورت زیر تعریف می شود:

(۳)

$$q(r,\lambda)=(1+\frac{r^2}{2z_0})n(\lambda)$$

برای یک بلور فوتونی یک بعدی متناوب با N لایه، ماتریس انتقال نهایی از حاصل ضرب ماتریس انتقال تک تک لایه‌ها بدست آمده و با رابطه زیر داده می‌شود:

(۴)

$$M=(M_AM_B)^N=\begin{pmatrix} m_{11}(r,\lambda) & m_{12}(r,\lambda) \\ m_{21}(r,\lambda) & m_{22}(r,\lambda) \end{pmatrix}$$

همان‌طوری که مشاهده می‌شود، عناصر ماتریسی به مختصه شعاعی r و طول موج λ بستگی دارند. در صورتی که طول رایلی به سمت بی‌نهایت میل کند، باریکه گوسی به موج تخت تبدیل شده و رابطه (۲) به ماتریس انتقال رایج موج تخت تبدیل می‌شود. هم‌چنین مشاهده می‌شود که ماتریس انتقال موج تخت با صفر قرار دادن r نیز در رابطه فوق به دست می-آید. از روی این ماتریس، ضریب تراگسیل دامنه میدان با رابطه زیر داده می‌شود:

این مقاله به شرط در دسترس بودن در وبگاه www.opsi.ir معتبر است.

[Downloaded from www.opsi.ir on 2026-10-31]

$$t(r,\lambda)=\frac{2}{[m_{22}(r,\lambda)+m_{11}(r,\lambda)]-i[m_{12}(r,\lambda)-m_{21}(r,\lambda)]} \quad (۵)$$

ضریب تراگسیل شدت با رابطه‌ی $T(r,\lambda)=|t(r,\lambda)|^2$ داده می شود.

ضریب شکست وابسته به طول موج در مواد SiO_2، MoS_2 و $PMMA$

بلورهای فوتونی یک بعدی متناوب تشکیل شده ازمواد MoS_2/SiO_2 و $MoS_2/PMMA$ در نظر گرفته شد. ضریب شکست وابسته به طول موج SiO_2 به صورت زیر است[۱۸].

$$n_{SiO2}(\lambda)=(1+\frac{0.6962\lambda^2}{\lambda^2-0.0684^2}+\frac{0.4080\lambda^2}{\lambda^2-0.1162^2}+\frac{0.8975\lambda^2}{\lambda^2-9.8962^2})^{1/2} \quad (۶)$$

و همچنین ضریب شکست وابسته به طول موج $PMMA$ به صورت زیر است[۱۹].

$$n_{PMMA}(\lambda)=(1+\frac{0.99654\lambda^2}{\lambda^2-0.00787}+\frac{0.18964\lambda^2}{\lambda^2-0.02191}+\frac{0.00411\lambda^2}{\lambda^2-3.85727})^{1/2} \quad (۷)$$

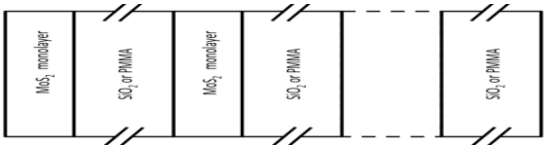
با در نظر گرفتن این نکته که ضریب شکست MoS_2 بصورت زیر به دست می‌آید.

$$n_{MoS_2}=\sqrt{\varepsilon_{MoS_2}} \quad (۸)$$

که در این رابطه، تابع دی الکتریک وابسته به طول موج MoS_2(قسمت های موهومی و حقیقی) را می توان به دست آورد. [۲۰]

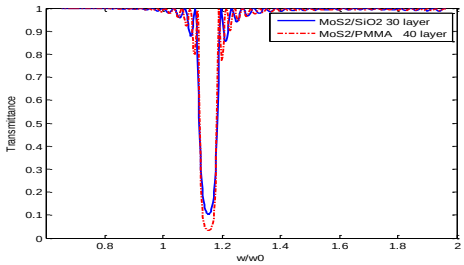
نتایج تحلیل عددی

طیف تراگسیلی بلورهای فوتونی متناوب که دارای لایه های SiO_2 و یا $PMMA$ که با تک لایه های MoS_2 جایگزین شده است، شبیه سازی شد. در شکل- ۲ طرحی از این بلور فوتونی یک بعدی نشان داده شده است.



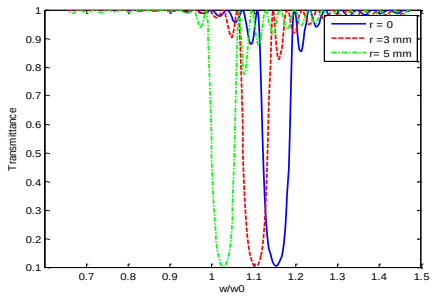
شکل-۲. طرحی ازبلورهای فوتونی ساخته شده از لایه های متناوب SiO_2/MoS_2 و $MoS_2/PMMA$

شکل-۳ نمودار ضریب تراگسیل شدت از بلورهای فوتونی با ساختار متناوب متشکل از لایه های MoS_2/SiO_2 و $MoS_2/PMMA$ را نشان می دهد، که تحت تابش موج تخت قرار گرفته و هر کدام از این بلورهای فوتونی دارای مشخصات زیر می باشند. در بلور فوتونی MoS_2/SiO_2 لایه های MoS_2 و SiO_2 به ترتیب، دارای ضریب شکست های $n_{mos_2}(\lambda)$ و $n_{sio_2}(\lambda)$ وضخامت های $d_{mos_2}=0.65nm$ و $d_{sio_2}=250nm$ بوده و تعداد تناوب لایه‌ها $N=30$ (۶۰ لایه) ، می‌باشد و در بلور فوتونی $MoS_2/PMMA$ لایه‌های MoS_2 و $PMMA$ به‌ترتیب، دارای ضرایب‌شکست $n_{mos_2}(\lambda)$ و $n_{PMMA}(\lambda)$ و ضخامت های $d_{mos_2}=0.65nm$ و $d_{sio_2}=250nm$ بوده و تعداد تناوب لایه ها، $N=40$ (۸۰ لایه) می باشد.



شکل-۳ . طیف های تراگسیل شدت برای بلورهای فوتونی MoS_2/SiO_2 متشکل از ۳۰ لایه متناوب و $MoS_2/PMMA$ متشکل از ۴۰لایه متناوب تحت تابش موج تخت

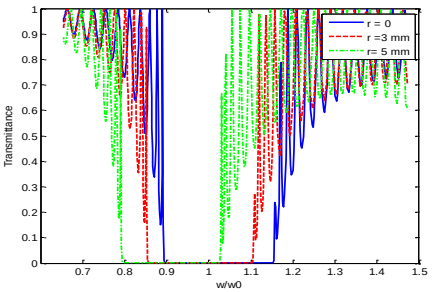
شکل-۴ نمودار ضریب تراگسیل شدت از بلورهای فوتونی با ساختار متناوب متشکل از لایه های MoS_2/SiO_2 را نشان می دهد، که تحت تابش باریکه گاوسی‌با طول رایلی $Z_0=10\ mm$ و بر حسب فرکانس موج تابشی و مختصه شعاعی شعاعی r قرار گرفته شده است.در اینجا طول موج فرودی $\lambda_0=589nm$ در نظر گرفته شده است. با افزایش مختصه شعاعی باریکه گاوسی از $r=0mm$, (که معادل با موج تخت می باشد) تا شعاع های بزرگتر ($r=0mm,3mm,5mm$) مشاهده می شود که گاف نواری به سمت فرکانس‌های کوچکتر جابجا شده است.



شکل-۴ . نمودار طیف تراگسیل شدت برای بلور فوتونی MoS_2/SiO_2 متشکل از ۳۰ لایه متناوب تحت تابش باریکه گاوسی برای r های مختلف

این مقاله به شرط در دسترس بودن در وبگاه www.opsi.ir معتبر است.

[Downloaded from www.opsi.ir on 2026-10-31]



شکل-۵. نمودار طیف تراگسیل شدت از بلور فوتونی SiO_2/MoS_2 با ۳۰ لایه متناوب و ۸ برابر کردن ضخامت لایه های MoS_2 تحت تابش باریکه گاوسی برای r های مختلف

با افزایش ضخامت لایه های MoS_2 در بلور فوتونی SiO_2/MoS_2 علاوه بر اینکه گاف نواری به سمت فرکانس های کوچکتر جابجا می شود پهنای گاف نواری نیز افزایش پیدا می کند. شکل-۵ نحوه افزایش پهنا و جابجایی فرکانسی گاف نواری را با ۸ برابر کردن ضخامت لایه های MoS_2 (قرار دادن ۸ لایه روی هم و جایگزین کردن این لایه ضخیم در بین لایه‌های SiO_2) در بلور فوتونی SiO_2/MoS_2 را نشان می‌دهد.

نتیجه‌گیری

بلورهای فوتونی با لایه های متناوب SiO_2/MoS_2 و $MoS_2/PMMA$ تحت تابش باریکه گاوسی شبیه سازی شدند و طیف تراگسیل آن به کمک ماتریس انتقالی که مقدار آن به ضریب شکست وابسته به طول موج لایه ها و مختصه شعاعی r باریکه گاوسی بستگی داشت، به دست آمد. با افزایش مختصه شعاعی r باریکه گاوسی گاف نواری به سمت فرکانس های کوچکتر جابجا شد. پهنای کم گاف نواری مشاهده شده که به علت کوچک بودن ضخامت لایه‌های MoS_2 ($d_{mos_2}=0.65nm$) بود با افزایش ضخامت لایه های MoS_2، افزایش یافت و همچنین یک جابجایی به سمت فرکانس های کوچکتر نیز دیده شد. گاف نواری بلورهای فوتونی SiO_2/MoS_2 و $MoS_2/PMMA$ به فاصله شعاعی از محور انتشار r و ضریب شکست وابسته به طول موج لایه های (SiO_2 , MoS_2 و $PMMA$) بلور فوتونی، بستگی داشت. این بستگی از وجود جمله نمایی وابسته r در میدان موج گاوسی و ضریب شکست وابسته به طول موج لایه های فوتونی حاصل می شود. انتشار مورب اشعه های بیرونی نسبت به اشعه مرکزی در باریکه گاوسی و وابستگی ضریب شکست لایه های فوتونی به طول موج توجیه کننده این تغییرات در گاف نواری بلورهای فوتونی SiO_2/MoS_2 و $MoS_2/PMMA$ می باشد.

مراجع

[۱] Q.H. Wang, K. Kalantar-Zadeh, A. Kis, J.N. Coleman, M.S. Strano, Electronics and optoelectronics of two-dimensional transition metal dichalcogenides, Nat. Nanotechnol. 7 (2012) 699–712. doi:10.1038/nnano.2012.193.

[۲] R. Lv, J.A. Robinson, R.E. Schaak, D. Sun, Y. Sun, T.E. Mallouk, et al., Transition Metal Dichalcogenides and Beyond: Synthesis, Properties, and Applications of Single- and Few-Layer Nanosheets, Acc. Chem. Res. 48 (2015) 56–64. doi:10.1021/ar5002846.

[۳] F. Xia, H. Wang, D. Xiao, M. Dubey, A. Ramasubramaniam, Two-dimensional material nanophotonics, Nat. Photonics. 8 (2014) 899–907. doi:10.1038/nphoton.2014.271.

[۴] T. Borzda, C. Gadermaier, N. Vujicic, P. Topolovsek, M. Borovsak, T. Mertelj, et al., Charge Photogeneration in Few-Layer MoS2, Adv. Funct. Mater. 25 (2015) 3351–3358. doi:10.1002/adfm.201500709.

[۵] A.K.M. Newaz, D. Prasai, J.I. Ziegler, D. Caudel, S. Robinson, R.F. Haglund Jr., et al., Electrical control of optical properties of monolayer MoS2, Solid State Commun. 155 (201 49–52. doi:10.1016/j.ssc.2012.11.010.

[۶] K.F. Mak, C. Lee, J. Hone, J. Shan, T.F. Heinz, Atomically Thin MoS2 : A New Direct-G Semiconductor, Phys. Rev. Lett. 105 (2010).

[۷] A. Splendiani, L. Sun, Y. Zhang, T. Li, J. Kim, C.-Y. Chim, et al., Emerging Photoluminescence in Monolayer MoS2, Nano Lett. 10 (2010) 1271–1275. doi:10.1021/nl903868w.

[۸] C.M. Soukoulis; "Photonic Band Gaps and Localization"; Plenum, New York, 1993.

[۹] J. D. Joannopoulos; "Photonic Crystals, Molding the Flow of Light"; 2nd Ed., Princeton University Press (2008).

[۱۰] Nian-hua Liu, Shi-Yao Zhu, Hong Chen, and Xiang Wu; "Superluminal pulse propagation through one-dimensional photonic crystals with a dispersive defect"; Physical Review E, 65, 046607 (2002).

[۱۱] A. Yariv; "Quantum Electronics"; 3rd Ed., John Wiley & Sons (1989).

[۱۲] L.D. Bonifacio, B.V. Lotsch, D.P. Puzzo, F. Scotognella, G.A. Ozin, Stacking the Nanochemistry Deck: Structural and Compositional Diversity in One-Dimensional Photonic Crystals, Adv. Mater. 21 (2009) 1641–1646. doi:10.1002/adma.200802348.

[۱۳] S. Valligatla, A. Chiasera, S. Varas, N. Bazzanella, D.N. Rao, G.C. Righini, et al., High quality factor 1-D Er3+-activated dielectric microcavity fabricated by RF-sputtering, Opt. E x p re ss. 20 (2012) 21214–21222. doi:10.1364/OE.20.021214.

[۱۴] K.D. Singer, T. Kazmierczak, J. Lott, H. Song, Y. Wu, J. Andrew polymer distributed Bragg reflector laser, Opt. Express. 16 (2008) doi:10.1364/OE.16.010358.

[۱۵] I. Pavlichenko, A.T. Exner, M. Guehl, P. Lugli, G. Scarpa, B.V. Lotsch, Humidity-Enhanced Thermally Tunable TiO2/SiO2 Bragg Stacks, J. Phys. Chem. C. 116 (2011) 298–305. doi:10.1021/jp208733t.

[۱۶] L. Criante, F. Scotognella, Low-Voltage Tuning in a Nanoparticle/Liquid Crystal Photonic Structure, J. Phys. Chem. C. 116 (2012) 21572–21576. doi:10.1021/jp309061r.

[۱۷] T. Komikado, S. Yoshida, S. Umegaki, Surface-emitting distributed-feedback dye laser of a polymeric multilayer fabricated by spin coating, Appl. Phys. Lett. 89 (2006) 061123. doi:10.1063/1.2336740.

[۱۸] I.H. Malitson, Interspecimen Comparison of the Refractive Index of Fused Silica, J. Opt. Soc. Am. 55 (1965) 1205–1208. doi:10.1364/JOSA.55.001205.

[۱۹] M. N. Polyanskiy. Refractive index database. Available at http://refractiveindex.info.

[۲۰] 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. doi:10.1364/OME.5.000447

[۲۱] Nian-hua Liu, Shi-Yao Zhu, Hong Chen, and Xiang Wu; "Superluminal pulse propagation through one-dimensional photonic crystals with a dispersive defect"; Physical Review E, 65, 046607 (2002).

این مقاله به شرط در دسترس بودن در وبگاه www.opsi.ir معتبر است.

[Downloaded from www.opsi.ir on 2026-10-31]