



بیست و هشتمین کنفرانس اپتیک و
فوتونیک ایران و چهاردهمین کنفرانس
مهندسی و فناوری فوتونیک ایران،
دانشگاه شهید چمران اهواز،
خوزستان، ایران.
۱۴-۱۲ بهمن ۱۴۰۰



جاذب پهن باند مبتنی بر فراماده حاوی تک لایه دی سولفید مولیبدن به کمک پلاسمون سطحی

رضا جوی پور، مهدی خزاعی نژاد قره تکان

گروه فیزیک، دانشکده علوم، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران

rezajavypour@mail.um.ac.ir

khazaeinezhad@um.ac.ir

چکیده - به منظور تقویت جذب پهن باند نور مرئی در تک لایه های دی سولفید مولیبدن یک جاذب کامل نوری با ساختاری متشکل از یک سلول واحد نسبتاً ساده پیشنهاد شده است. میزان جذب این جاذب با استفاده از شبیه سازی FDTD بالای ۹۰٪ از طول موج ۶۵۰ تا ۸۵۰ نانومتر بدست آمده است.

کلید واژه- پلاسمون سطحی، تفاضل های محدود در حوزه زمان، تک لایه های دی سولفید مولیبدن، جذب پهن باند، نرم افزار لومریکال

Metamaterial-based broadband adsorbent containing molybdenum disulfide monolayer via surface plasmon

Reza Javy pour, Mehdi Khazaei Nezhad

Department of Physics, Faculty of Science, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran

rezajavypour@mail.um.ac.ir

khazaeinezhad@um.ac.ir

Abstract- In order to enhance the broadband absorption of visible light in molybdenum disulfide monolayers, a perfect light absorber with a structure consisting of a relatively simple unit cell has been proposed. Absorption of this absorber is achieved by using FDTD simulations above 90% of the wavelength of 650 to 850 nm.

Keywords: broadband light absorption, FDTD, Lumerical package, MoS₂ mono layers, surface plasmon

مقدمه

در چند سال اخیر، برهم‌کنش موثر نور و ماده، توجه گسترده‌ای را در نانوفوتونیک و اپتوالکترونیک به ویژه برای مواد دو بعدی (2D) با ضخامت اتمی مانند گرافن و فلزات واسطه دی کالکوژن (TMDCs) جلب کرده است [۱]. گرافن با گاف انرژی صفر می‌تواند با نور در یک طیف گسترده از ناحیه فرابنفش تا تراهرتز برهم‌کنش داشته باشد، در حالی که جذب نور در گرافن به دلیل ساختار نوار الکترونیکی مخروطی شکل فقط ۲/۳٪ است [۲].

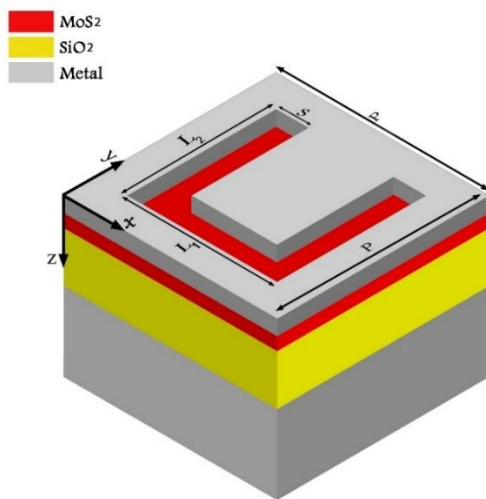
برخلاف گرافن با گاف انرژی صفر، فلزات واسطه دی کالکوژن (به عنوان مثال MoS_2 ، MoSe_2 ، WS_2 و WSe_2) وقتی که ضخامت آنها به یک لایه کاهش پیدا می‌کند به نیمه هادی‌هایی با گاف انرژی مستقیم تبدیل می‌شوند؛ مانند تک لایه دی سولفید مولیبدن (MoS_2) که دارای یک گاف انرژی مستقیم در حدود ۱/۹ eV است [۳]. به دلیل وجود گاف انرژی مستقیم و تقویت داخلی، فلزات واسطه دی کالکوژن تک‌لایه به عنوان مواد نازک اتمی در ترانزیستورهای اثر میدانی، آشکارسازهای نوری، فوتولومینسانس و ... در نظر گرفته می‌شوند. با وجود کاربردهای چشمگیر فوتونیک و الکترونیک، ضخامت ذاتی فلزات واسطه دی کالکوژن دو بعدی برای جذب نور کافی بسیار نازک است و چالش مهمی را برای برهم‌کنش ماده و نور ایجاد می‌کند، در نتیجه کاربردهای عملی آن را محدود می‌کند [۴]. بنابراین به منظور بهبود جذب نور در فلزات واسطه دی کالکوژن به ویژه تک لایه دی سولفید مولیبدن (MoS_2)، باید یک روش فیزیکی برای افزایش برهم‌کنش بین تک لایه MoS_2 و نور فرودی به کار ببریم. در سالهای اخیر اثبات شده است که ادغام MoS_2 با ساختارهای پلاسمون سطحی یک مسیر موثر برای ارتقاء خواص نوری تک لایه MoS_2 است.

لو و همکاران یک جاذب کامل نوری پهن باند مبتنی بر تک لایه MoS_2 را در ناحیه مرئی پیشنهاد داده اند. جذب این جاذب کننده مبتنی بر MoS_2 با استفاده از شبیه سازی FDTD بالای ۹۴٪ از طول موج ۵۹۴ تا ۸۰۹ نانومتر گزارش شده است [۵].

در این کار در ادامه کار انجام شده در مرجع [۵] یک سلول واحد نسبتاً ساده‌تر و قابل حصول‌تر در آزمایشگاه را پیشنهاد و بررسی می‌کنیم و به تقویت جذب پهن باند در تک‌لایه‌های دی سولفید مولیبدن در ناحیه مرئی خواهیم پرداخت.

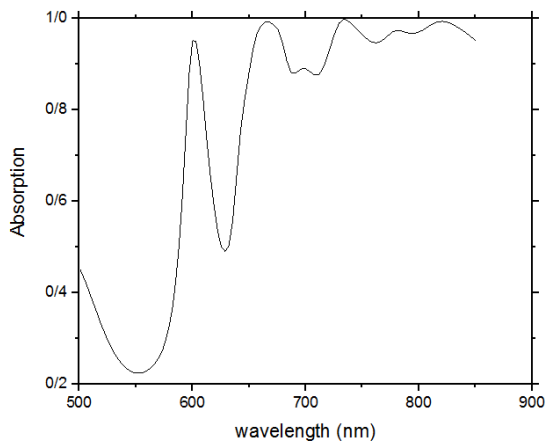
ساختار و روش

همانطور که در شکل ۱ نشان داده شده است شماتیک سلول واحد جذب کننده پیشنهادی متشکل از یک فیلم طلا که در آن شکاف U شکل قرار گرفته و بر روی یک لایه سیلیس (SiO_2) است که با تک لایه MoS_2 پوشانده شده و توسط یک بستر طلای مسطح پشتیبانی می‌شود.



شکل ۱: شماتیک سلول واحد جاذب پهن باند مبتنی بر MoS_2 با ابعاد مشخص شده

شبیه‌سازی‌ها در این کار توسط نرم افزار لومریکال که بر اساس گسسته‌سازی معادلات ماکسول در حوزه زمان و مکان مبتنی بر روش تفاضل‌های محدود در حوزه زمان (FDTD)



شکل ۲: نمودار طیف جذب پهن باند ساختار پیشنهادی تحت تحریک نوری با قطبش y

در ادامه، مکانیسم های فیزیکی جذب کننده پیشنهادی را بررسی می کنیم. به طور کلی دو مکانیسم تشدید متفاوت اما همزمان برای این جذب کننده وجود دارد. اولین مورد تشدید پلاریتون پلاسمون سطحی (SPP) است که به دلیل آرایش دوره ای ساختار است و این حالت به طور قابل توجهی تحت تاثیر خواص آرایش و ضخامت لایه میانی SiO_2 در این ساختار قرار دارد. بنابراین انتظار داریم که این حالت بیشتر در نزدیکی لایه SiO_2 ایجاد شود. مورد دوم تشدید پلاسمون سطحی جایگزیده (LSPR) است که بیشتر به اندازه و شکل هندسه فیلم طلا و شکاف U شکل بستگی دارد. در جاذب پهن باند پیشنهادی، که مبتنی بر چند لایه فلز، دی الکتریک و فلز است، لایه طلایی پایین به عنوان یک آینه نوری برای جلوگیری از عبور نور عمل می کند، در حالی که لایه طلایی بالایی نور فرودی را پراکنده می کند و حالت های تشدید پلاسمون سطحی را تحریک می کند.

در شکل ۳ توزیع میدان مغناطیسی مربوط به ساختار پیشنهادی در دو طول موج مختلف نشان داده شده است. در قله جذب $\lambda_1 = 600 \text{ nm}$ همانطور که در قسمت (a) نشان داده شده است میدان مغناطیسی بین فیلم طلا و لایه SiO_2 بیشتر جمع شده و تقویت می شود؛ در واقع چنین ویژگی های میدان مغناطیسی با تشدید حالت SPP مطابقت دارد. در قسمت (b) در اوج جذب $\lambda_2 = 732 \text{ nm}$ میدان

کار می کند، انجام می شود. پارامترهای مورد استفاده در شبیه سازی در جدول ۱ آورده شده اند. منبع نوری مورد استفاده، یک پرتو معمولی با قطبش y می باشد. شرایط مرزی جاذب کاملاً همسان (PML) در جهت z اعمال می شود و شرایط مرزی دوره ای در جهت های x و y به کار می روند. مش بندی غیریکنواخت به کار برده می شود؛ حداقل اندازه مش در داخل تک لایه MoS_2 برابر با 0.2 نانومتر است و به تدریج در خارج از تک لایه MoS_2 افزایش می یابد تا در فضای ذخیره سازی و زمان محاسبه صرفه جویی شود.

جدول ۱: پارامترهای ساختار

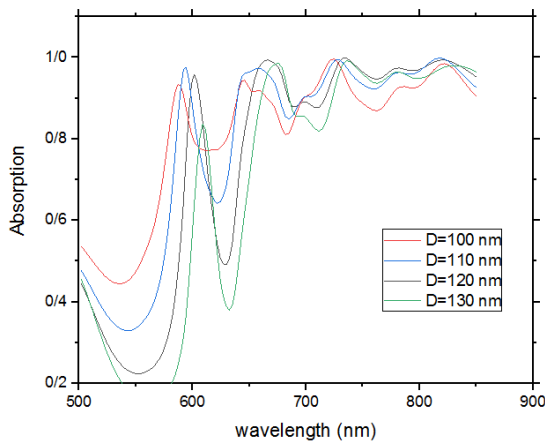
پارامتر	مقدار استفاده شده
دوره تناوب در جهت x و y	$P=400 \text{ nm}$
ضخامت (در جهت z) فیلم طلا	20 nm
ضخامت تک لایه MoS_2	0.615 nm
ضخامت لایه سیلیس	$D=120 \text{ nm}$
ضخامت بستر طلا	400 nm
پارامترهای شکاف U شکل	$L_1=330 \text{ nm}$ $L_2=270 \text{ nm}$ $S=110 \text{ nm}$

نتایج و بحث

از آنجا که ضخامت بستر طلا خیلی بیشتر از عمق نفوذ امواج الکترومغناطیسی است، عبور از ساختار پیشنهادی بسیار نزدیک به صفر است ($T=0$)؛ پس جذب این جاذب پیشنهادی را می توان با $A = 1 - R$ توصیف کرد که در آن R ضریب بازتاب از ساختار پیشنهادی است.

همانطور که در شکل ۲ مشاهده می شود هنگامی که یک پرتو با قطبش y به ساختار تابیده می شود جذب این جاذب کننده با استفاده از شبیه سازی FDTD بالای 90% از طول موج 650 تا 850 نانومتر حاصل می شود. علاوه بر این در طول موج 600 نانومتر نیز یک پیک مشاهده می شود. بنابراین، یک اثر قابل توجه جذب پهن باند در این جاذب پیشنهادی تحقق یافته است.

می‌شود با تغییر ضخامت D نمودار طیف جذب بیشتر در طول موج‌های کوتاه‌تر جابجا شده است.



شکل ۵: نمودار طیف جذب با ضخامت‌های مختلف لایه SiO_2

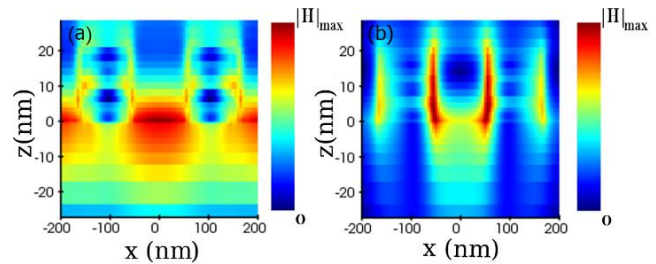
نتیجه‌گیری

با پیشنهاد یک سلول واحد نسبتاً ساده یک اثر قابل توجه جذب پهن باند در این جاذب پیشنهادی تحقق یافته است. با استفاده از شبیه‌سازی FDTD که توسط نرم افزار لومریکال انجام می‌شود جذب این جذب کننده بالای ۹۰٪ از طول موج ۶۵۰ تا ۸۵۰ نانومتر حاصل می‌شود.

مرجع‌ها

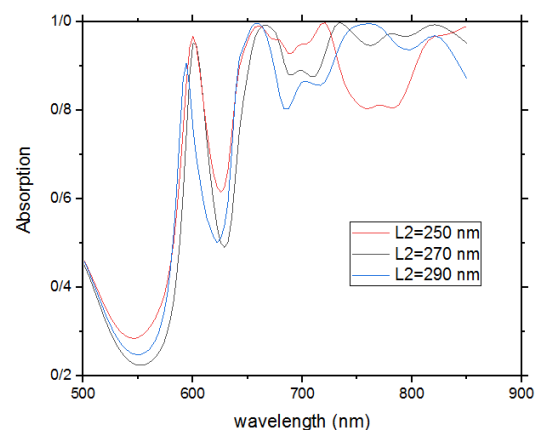
- [1] X. Luo, X. Zhai, L. Wang, and Q. Lin, "Enhanced dual-band absorption of molybdenum disulfide using a plasmonic perfect absorber", Opt. Express 26(9), 11658–11666, 2018.
- [2] F. Bonaccorso, Z. Sun, T. Hasan, and A. C. Ferrari, "Graphene photonics and optoelectronics", Nat. Photonics 4(9), 611–622, 2010.
- [3] Y. Yang, R. Pan, S. Tian, C. Gu, and J. Li, "Plasmonic Hybrids of MoS_2 and 10-nm Nanogap Arrays for Photoluminescence Enhancement", Micromachines, 11, 1109, 2020.
- [4] H. Li, M. Qin, L. Wang, X. Zhai, R. Ren, and J. Hu, "Total absorption of light in monolayer transition-metal dichalcogenides by critical coupling", Opt. Express 25, 31612–31621, 2017.
- [5] X. Luo, Z. Liu, Z. Cheng, J. Liu, Q. Lin, and L. Wang, "Polarization insensitive and wide-angle broadband absorption enhancement of molybdenum disulfide in the visible regime", Opt. Express 26, 33918–33929, 2018.

مغناطیسی بین شکاف U شکل و فیلم طلا جمع شده است که به عنوان حالت LSPR در اطراف تک لایه MoS_2 جایگزیده شده است. نکته قابل توجه این است که مکانیسم‌های تشدید غالب با افزایش طول موج از حالت SPP به حالت LSPR تغییر می‌کنند.



شکل ۳: توزیع میدان مغناطیسی در طول موج‌های $\lambda_1 = 600 \text{ nm}$ (a) و $\lambda_2 = 732 \text{ nm}$ (b)

در ادامه تاثیر تغییر دو پارامتر هندسی ساختار در جذب نوری را بررسی می‌کنیم. از آنجا که حالت LSPR بیشتر به اندازه و شکل هندسی شکاف U شکل بستگی دارد، طول موج‌های این حالت در جاذب را می‌توان با طول L_2 تغییر داد و انتظار داریم بیشتر در طول موج‌های بلندتر این تغییرات را داشته باشیم. همانطور که در شکل ۴ مشاهده می‌شود با تغییر L_2 نمودار طیف جذب در طول موج‌های بلندتر بیشتر جابجا شده است.



شکل ۴: نمودار طیف جذب با طول‌های مختلف L_2

طول موج‌های مربوط به حالت SPP را می‌توان با ضخامت D لایه SiO_2 تغییر داد که بیشتر تاثیر آن باید در طول موج‌های کوتاه اتفاق افتد. همانطور که در شکل ۵ مشاهده