

طراحی ساختارهایی شامل تک‌لایه MoS₂ با هدف کاهش جذب در ناحیه ترانز برای کاربری الکترو شفاف

انسبیه محبی، نرگس انصاری*

گروه فیزیک، دانشکده فیزیک و شیمی، دانشگاه الزهراء، تهران، ایران

دریافت: 1396/02/02 ویرایش نهایی: 1396/07/01 پذیرش: 1396/08/01

چکیده

بلور دو بعدی دی سولفات مولیبدن، MoS₂، در بازه فرکانسی ترانز به علت کاربردهای اپتوالکترونیکی و کاربری آن برای الکترو شفاف در حوزه نانو بسیار مورد توجه قرار گرفته است. در این مقاله، به طراحی ساختارهایی شامل تک لایه MoS₂ روی زیرلایه‌های مختلف و با قرارگیری در جایگاه‌های متفاوت این تک لایه در بلور فوتونی یک بعدی، IDPC، به منظور کاهش جذب و افزایش عبور پرداخته‌ایم. ضریب شکست MoS₂ را در ناحیه ترانز از رابطه درود محاسبه کرده‌ایم. طیف عبور و جذب این ساختارها در بازه فرکانسی ترانز از روش ماتریس انتقال، TMM، برای هر دو قطبش TE و TM به دست آمد. در ادامه نشان دادیم که طیف جذب با تغییر در مواد دی‌الکتریک و زاویه تابش در هر دو قطبش TE و TM تنظیم پذیر است. در نهایت در بهترین طراحی به جذب کمتر از تک لایه MoS₂ و طیف عبور نزدیک 100 درصد دست یافتیم. نتایج به دست آمده برای طراحی نانو سازه‌های متشکل از الکترو شفاف در فوتونیک و الکترونیک سودمند خواهند بود.

کلیدواژگان: الکترو شفاف، بلور فوتونی، ترانز، رابطه درود، روش ماتریس انتقال، دی سولفات مولیبدن

مقدمه

در بازه ترانز می‌باشد و در الکترو شفاف به دلیل اهمیت جذب کم و عبور بالا کاربری دارد. الکترو شفاف در محدوده طول موج ترانز دارای کاربردهای مهمی در آشکارسازهای ترانز، سلول‌های خورشیدی، دیودهای ساطع کننده و ... می‌باشد [3-6]. به عنوان مثال جذب کم تک‌لایه MoS₂ در ناحیه ترانز و اهمیت آن در الکترو شفاف توسط یونگ دنگ¹ و همکاران بررسی شده است [3]. تهیه تک لایه MoS₂ هنگامی که روی زیرلایه نباشد امکان پذیر نیست بدین منظور ویژگی‌های اپتیکی تک‌لایه MoS₂ را روی زیرلایه‌های مختلف بررسی می‌کنیم. حضور زیرلایه به علت افزایش بازتاب سبب کاهش طیف جذب و عبور در تک‌لایه MoS₂ می‌شود.

در سال‌های اخیر تک‌لایه MoS₂ به عنوان یک ماده دوبعدی نانومتری با گاف نواری مستقیم به علت ویژگی‌های اپتیکی و الکترونیکی ویژه در زمینه‌های گوناگون حوزه نانو از جمله فیزیک، شیمی، فوتونیک، الکترونیک و ... بسیار مورد اهمیت قرار گرفته است. کاربردهای اپتوالکترونیکی MoS₂ به علت وابستگی جذب، عبور و ... به ثابت دی‌الکتریک، به شدت وابسته به تعیین ویژگی‌های ثابت دی‌الکتریک می‌باشد [1]. وابستگی ثابت دی‌الکتریک MoS₂ به دما و ولتاژ باعث تنظیم پذیری ویژگی‌های اپتیکی این ماده با عوامل خارجی می‌شود [2]. تک لایه MoS₂ دارای طیف جذب کمتر از 0/007 درصد و طیف عبور بسیار بالایی

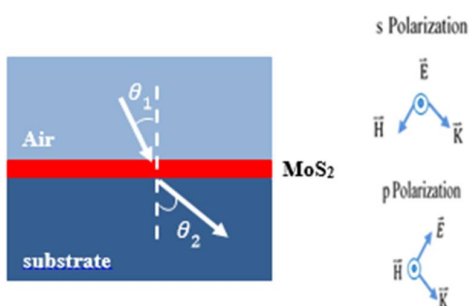
* نویسنده مسئول: n.ansari@alzahra.ac.ir

¹Yong Deng

در حدود 100 درصد نسبت به تک‌لایه MoS_2 دست یافته‌ایم که مناسب برای کاربری در الکتروُد شفاف می‌باشد.

مدل‌سازی

به‌منظور دستیابی به ساختار بهینه با جذب کمتر از تک‌لایه نانومتری MoS_2 ، به بررسی اثر زیرلایه و بلور فوتونی بر جذب ساختار می‌پردازیم. برای بررسی اثر زیرلایه، ساختار به صورت هوا/تک‌لایه MoS_2 /زیرلایه، می‌باشد که در شکل 1 نشان داده شده است. ماده زیرلایه با توجه به کارهای تجربی انجام شده یکی از مواد SiO_2 ، PMMA، Si و انتخاب می‌شود [10، 11].



شکل 1- ساختار هوا/ تک‌لایه MoS_2 / زیرلایه با جهت انتشار نور با زاویه فرود θ_1 . بردارهای میدان الکتریکی و مغناطیسی برای دو قطبش TE و TM در شکل نشان داده شده است.

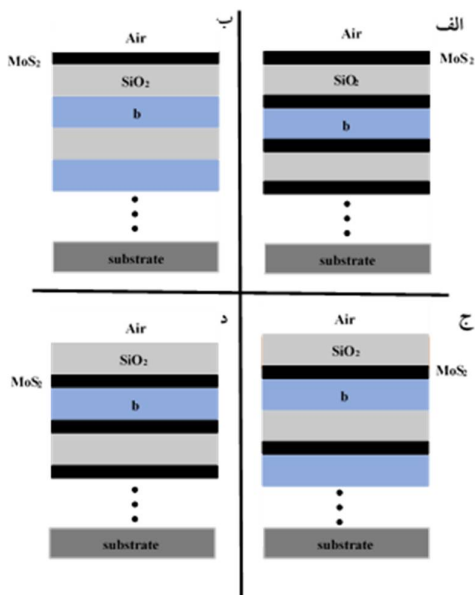
برای بررسی اثر بلور فوتونی، ساختار به صورت هوا/بلور فوتونی/ زیرلایه انتخاب می‌شود که در شکل 2 نشان داده شده است. به‌منظور دستیابی به جذب کم، 5 ساختار متفاوت بلور فوتونی همراه MoS_2 به صورت $D=(mab)^N$ شکل 2الف، $A=m(ab)^N$ شکل 2ب، $B=m^{10}(ab)^N$ شکل 2ج، و $C=(amb)^N$ شکل 2د، در نظر گرفته شده است. در این ساختارها m و a به ترتیب MoS_2 و SiO_2 را نشان

در سال‌های اخیر روش‌های مختلفی با هدف کاهش جذب بدون کاهش عبور در تک‌لایه MoS_2 مطالعه شده است. یکی از روش‌های کاهش جذب در تک‌لایه MoS_2 ، استفاده از بلور فوتونی می‌باشد. بلورهای فوتونی یک بعدی، ساختارهایی متشکل از لایه‌های دی‌الکتریک با ضریب شکست متناوب هستند که ضخامت این لایه‌ها در مقایسه با طول موج نور فرودی طراحی می‌شود. این تناوب باعث ایجاد گاف نواری می‌شود. امواج الکترومغناطیسی که فرکانس آنها در ناحیه گاف نواری قرار بگیرند، مجاز به انتشار نخواهند بود. این گاف‌ها معمولاً وابستگی شدیدی به زاویه تابش، قطبش نور فرودی و پارامترهای هندسی بلورهای فوتونی دارد [7]. قابلیت تنظیم خواص تراگسبلی و جذب بلور فوتونی با عوامل خارجی مانند ولتاژ، میدان الکتریکی، میدان مغناطیسی و ... باعث شده است محققین همواره به دنبال یافتن موادی با پارامترهای قابل تغییر در درون بلورهای فوتونی باشند [8]. تائو لیو¹ و همکاران با استفاده از بلور فوتونی یک بعدی دارای نقص، به بررسی کاهش جذب در ناحیه مرئی پرداخته‌اند و توانسته‌اند جذب را تا 30 برابر نسبت به تک‌لایه MoS_2 کاهش دهند در حالی که عبوری بالاتر از 98% داشته باشند [9].

در این مقاله به‌منظور رسیدن به جذب کم و عبور بالا در تک‌لایه MoS_2 ، اثر زیرلایه‌های مختلف و بلورهای فوتونی با لایه‌های دی‌الکتریک متفاوت در بازه طول موجی تراهرتز بررسی شده است و تأثیر زاویه تابش و تغییر مواد دی‌الکتریک در هر دو قطبش TE و TM برای طیف عبور و جذب نشان داده شده است. در ساختار تک‌لایه MoS_2 روی زیرلایه پلی‌متیل متاکریلات² (PMMA) و ساختار بلور فوتونی $\text{MoS}_2(\text{SiO}_2/\text{Si}_3\text{N}_4)$ ⁵ به کاهش طیف جذب با عبور

² polymethyl methacrylate

¹ Tao Lio



شکل 2 ساختارهای بلورهای فوتونی مورد مطالعه همراه با MoS_2 (الف) $(\text{MoS}_2/\text{SiO}_2/\text{MoS}_2/\text{b})^N$ (ب) $(\text{SiO}_2/\text{b})^N$ (ج) $(\text{SiO}_2/\text{MoS}_2/\text{b}/\text{MoS}_2)^N$ (د) تعداد تک‌لایه MoS_2 می‌باشد، (ح) برای $L=1$ و $L=10$ که L تعداد تک‌لایه MoS_2 می‌باشد، (ح)

نتایج و بحث

به‌منظور یافتن ساختار بهینه برای کاهش جذب در تک‌لایه MoS_2 لازم است در ابتدا طیف عبور و جذب تک‌لایه MoS_2 را به‌دست آوریم. در شکل 3 طیف جذب و عبور تک‌لایه MoS_2 برحسب فرکانس در بازه تراهرتز رسم شده است که با شکل 1 مرجع [3] مطابقت دارد. همان‌طور که در شکل 3 نشان داده شده است تک‌لایه MoS_2 به‌دلیل ضخامت کم دارای طیف جذب کمتر از 0,007 درصد و طیف عبور بالای 99 درصد در بازه فرکانسی تراهرتز می‌باشد.

می‌دهد و b مواد مختلفی از جمله Si ، PMMA و Si_3N_4 می‌باشد که در دسترس هستند و معمولاً در کارهای تجربی از این مواد استفاده می‌شود [10، 11]. زیر لایه در این ساختارها SiO_2 می‌باشد و N دوره تناوب است که با توجه به کارهای تئوری انجام شده 5 در نظر گرفته شده است [12]. ضریب شکست Si ، PMMA و Si_3N_4 در ناحیه تراهرتز به ترتیب برابر با 1/6، 2، 3/3 و 1/97 می‌باشد [13-15] و ضخامت آنها 37/5، 22/7، 46/8 و 38 میکرومتر در نظر گرفته شده است. ضخامت تک‌لایه MoS_2 0/65 نانومتر است و ضریب شکست آن از رابطه، $\mathcal{N} = \sqrt{\varepsilon}$ محاسبه می‌شود که ε ثابت گذردهی MoS_2 می‌باشد و در ناحیه تراهرتز از رابطه درود،

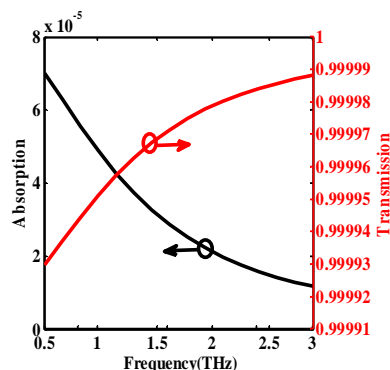
$$\varepsilon = \varepsilon_{\infty} - \frac{\omega_p^2}{\omega^2 + i\omega\Gamma}$$

محاسبه می‌شود که ε_{∞} ، Γ و ω_p به ترتیب ثابت دی‌الکتریک در فرکانس‌های زیاد، فرکانس برخورد الکترون و فرکانس پلاسما با مقادیر 11/55، 1/17، $2\pi \times 2/67$ تراهرتز می‌باشند [16]. امواج الکترومغناطیس با زاویه تابش θ_1 از هوا وارد ساختارها شده است و زوایا در لایه‌های دیگر با استفاده از رابطه اسنل به‌دست می‌آیند. طیف جذب و عبور برای هر دو قطبش TE و TM با استفاده از روش ماتریس انتقال، TMM¹ محاسبه شده است [17].

¹Transfer Matrix Method (TMM)

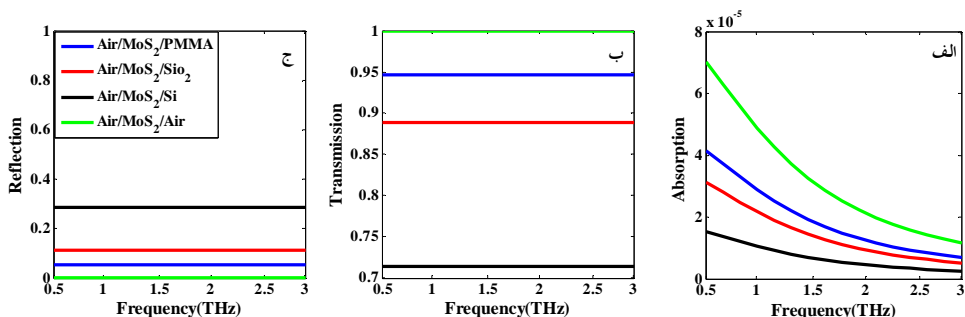
زیرلایه PMMA بیشتر از حالت‌هایی است که زیرلایه Si یا SiO_2 می‌باشد و طیف بازتاب آن کمترین مقدار را دارد. هرگاه تک‌لایه MoS_2 روی زیرلایه Si_3N_4 قرار گیرد به دلیل نزدیک بودن ضریب شکست Si_3N_4 به SiO_2 رفتاری تقریباً مشابه به SiO_2 را نشان می‌دهد. به این ترتیب تک‌لایه MoS_2 روی زیرلایه PMMA با طیف جذب کمتر از تک‌لایه و عبور بالاتر نسبت به ساختارهای دیگر می‌تواند برای طراحی الکتروود شفاف مناسب باشد.

با توجه به اثر زیر لایه بر روی طیف جذب تک‌لایه MoS_2 که علاوه بر کاهش جذب، عبور نیز کاهش می‌یابد و اهمیت طیف جذب کم و عبور بالا در الکتروود شفاف، به بررسی ساختارهایی شامل بلور فوتونی همراه با تک‌لایه MoS_2 به منظور دستیابی به ساختار بهینه پرداخته‌ایم.



شکل 3. نمودار طیف جذب و طیف عبور تک‌لایه MoS_2 [3].

با قرار گرفتن تک‌لایه MoS_2 بر روی زیرلایه، طیف بازتاب افزایش و جذب ساختار نسبت به تک‌لایه کمتر می‌شود [18]. در شکل 4 طیف جذب، عبور و بازتاب تک‌لایه MoS_2 روی زیرلایه‌های PMMA، SiO_2 و Si نشان داده شده است. همان‌طور که در شکل 4 دیده می‌شود طیف جذب و عبور تک‌لایه MoS_2 روی



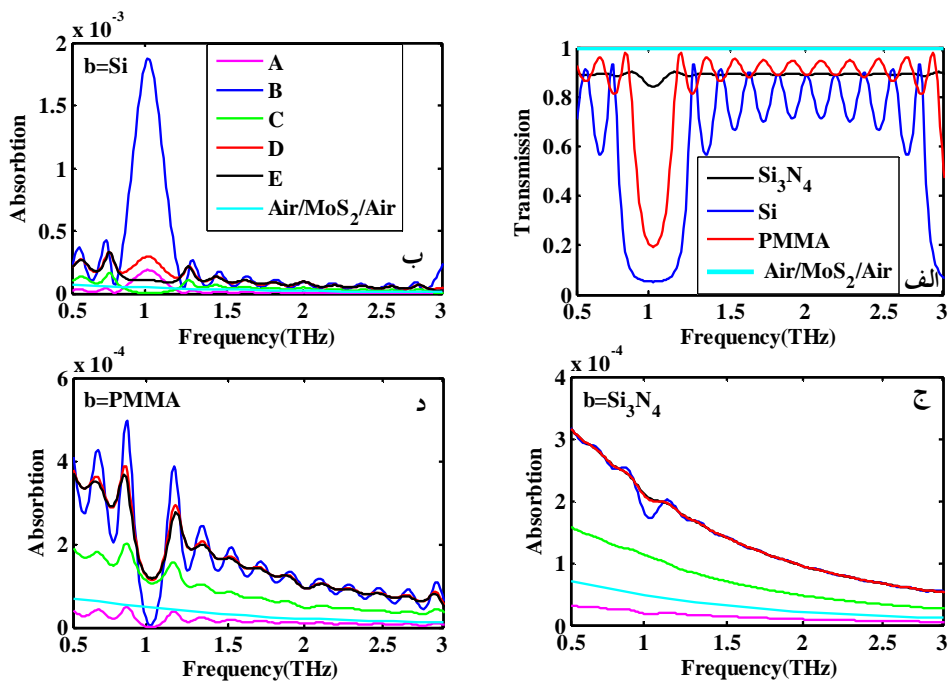
شکل 4. نمودار اثر زیرلایه‌های PMMA، SiO_2 و Si بر روی الف) طیف جذب، ب) طیف عبور، ج) طیف بازتاب تک‌لایه MoS_2 .

شکل نشان داده شده است طیف عبور در ناحیه گاف نواری در بازه حدود 0/85-1/1 تراهرتز زمانی که b، PMMA و Si است خیلی کم و در بقیه نواحی طیف عبور PMMA بالای 80 درصد و بیشتر از Si می‌باشد. طیف عبور زمانی که b، Si_3N_4 می‌باشد در تمامی بازه فرکانسی بالای 85 درصد می‌باشد. در شکل 5 ب) طیف جذب تمامی ساختارها هنگامی که b، Si می‌باشد رسم شده است. همان‌طور که در شکل نشان داده شده است

در شکل 5 طیف عبور و جذب برای تابش عمود برای هر 5 ساختار بلور فوتونی A, B, C, D و E با انتخاب ماده‌های Si، PMMA و Si_3N_4 به عنوان لایه b، رسم شده است. در شکل 5 الف طیف عبور برای تمامی ساختارهای شامل بلور فوتونی رسم شده است و از آنجایی که طیف عبور با ثابت ماندن ماده b با تغییر ساختار بلور فوتونی تغییر نمی‌کند طیف عبور هر 5 ساختار روی هم قرار گرفته است. همان‌طور که در

از تک‌لایه MoS_2 دارد ولی بقیه ساختارها دارای جذب بالاتر از تک‌لایه می‌باشند. طیف جذب ساختارها زمانی که b ، PMMA باشد در شکل 5 نشان داده شده است. با توجه به شکل در ناحیه گاف نواری در اطراف 1 تراهرتز طیف جذب در ساختارهای A و B کمتر از تک‌لایه MoS_2 می‌باشد این در حالی است که بقیه ساختارها در این ناحیه جذبی بالاتر از تک‌لایه دارند و در دیگر نواحی هم ساختار A جذبی کمتر از تک‌لایه را دارا می‌باشد. باتوجه به نتایج حاصل از شکل 4 و 5 ساختار تک‌لایه MoS_2 با زیرلایه PMMA و ساختار A هنگامی که b ، Si_3N_4 می‌باشد دارای جذب کم و عبور بالا و مناسب برای طراحی الکتروود شفاف است.

طیف جذب در ناحیه گاف نواری (1/2-0/79 تراهرتز) به دلیل بازتاب زیاد و عبور کم برای تمامی ساختارها به جز ساختار C بالاتر از جذب تک‌لایه MoS_2 می‌باشد و در بقیه نواحی ساختار A طیف جذبی کمتر از تک‌لایه را دارا می‌باشد. ناحیه گاف نواری برای کاربری در هدف‌هایی با طیف بازتاب زیاد و جذب کم مناسب می‌باشد. طیف جذب ساختار C هم در طول موج مرئی و هم تراهرتز نسبت به ساختارهای دیگر کمتر می‌باشد و ساختارهای D و E در هر دو ناحیه طول موجی جذب بالایی دارند [12]. در شکل 5 ج طیف جذب ساختارها زمانی که b ، Si_3N_4 می‌باشد رسم شده و نشان داده شده است که ساختار A در تمامی بازه فرکانسی جذبی کمتر



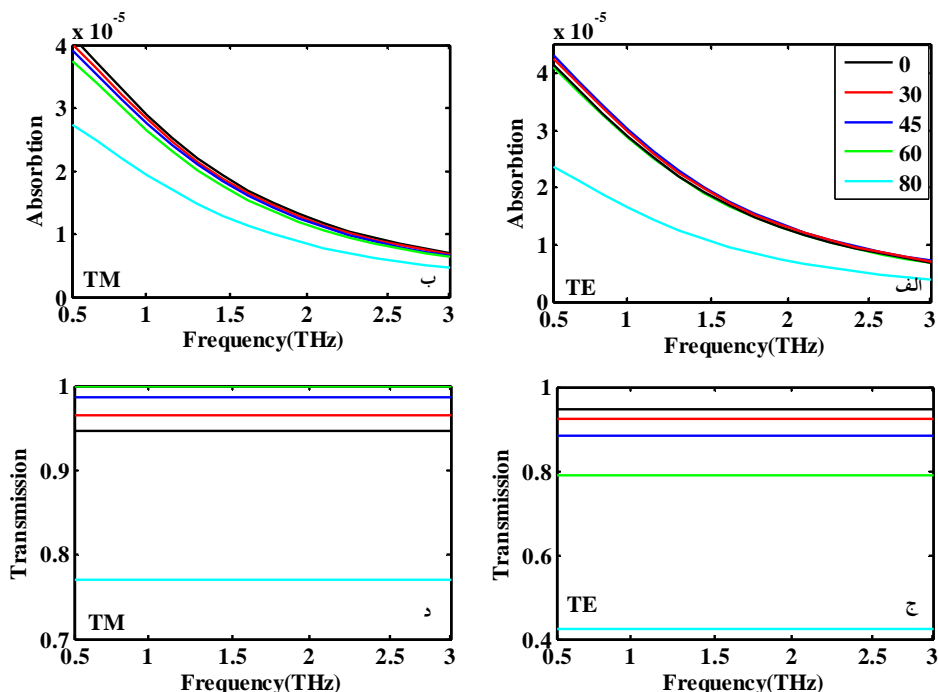
شکل 5. نمودارالف: طیف عبور ساختارها با دی‌الکتریک b متفاوت. طیف جذب پنج ساختار A, B, C, D و E زمانی که $b = \text{Si}$ ؛ ج: $b = \text{PMMA}$ و د: $b = \text{Si}_3\text{N}_4$ می‌باشد.

زاویه فرودی تنها در این ساختارها نشان داده می‌شود. در شکل 6 طیف جذب و عبور تک‌لایه MoS_2 روی زیرلایه PMMA برای هر دو قطبش TE و TM رسم

با توجه به اینکه در ساختار A برای $b = \text{Si}_3\text{N}_4$ و تک‌لایه MoS_2 روی زیرلایه PMMA ، کمینه جذب و بیشینه عبور نسبت به بقیه ساختارها وجود دارد، تأثیر

درجه به زاویه شبه بروستر ساختار می‌باشد [19] که در شکل 6ب و 6د نشان داده شده است. در قطبش TM زاویه‌ای که بازتاب در آن صفر است را زاویه بروستر می‌نامیم که از رابطه $\tan^{-1} \frac{n_2}{n_1}$ به دست می‌آید. حال اگر ضریب شکست ماده دارای قسمت موهومی باشد بازتاب به کمترین مقدار خود (نه صفر) می‌رسد در این صورت زاویه بروستر تبدیل به شبه‌بروستر می‌شود. در نزدیکی زاویه شبه‌بروستر (60 درجه)، عبور تقریباً 100 درصد است.

شده است. هنگامی که نور از هوا وارد ساختار شود، به دلیل بازتاب خارجی زاویه حد وجود ندارد. برای قطبش TE که در شکل 6الف و 6ج دیده می‌شود با افزایش زاویه تابش تا زاویه 60 درجه تغییر قابل مشاهده‌ای در طیف جذب مشاهده نمی‌شود ولی طیف عبور کاهش یافته است. در قطبش TM با افزایش زاویه تابش از عمود تا زاویه 60 درجه، تغییر قابل مشاهده‌ای در طیف جذب مشاهده نمی‌شود ولی طیف عبور افزایش یافته است و بالای 60 درجه کاهش در جذب و عبور مشاهده می‌شود که به دلیل نزدیکی زاویه 60



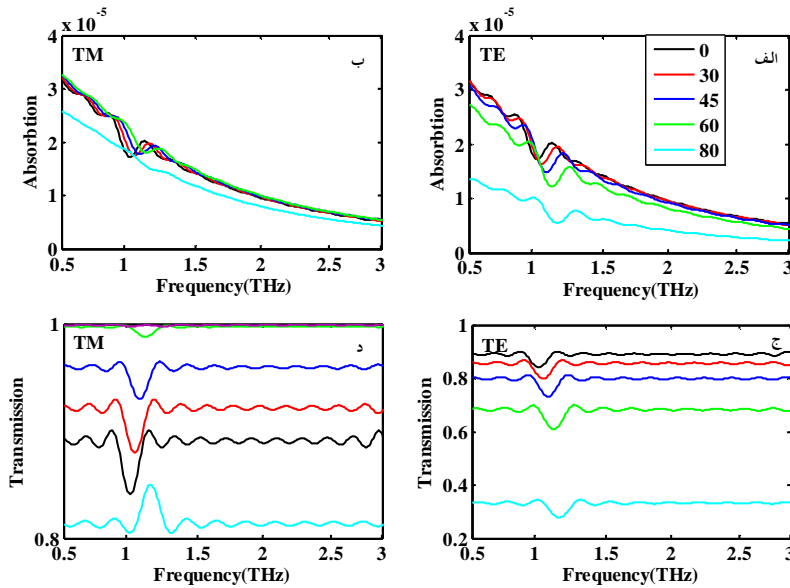
شکل 6. نمودار طیف جذب تک‌لایه MoS₂ با زیرلایه PMMA الف: در قطبش TE و ب: قطبش TM. ج: طیف عبور تک‌لایه MoS₂ با زیرلایه PMMA در قطبش TE و د: قطبش TM.

60 درجه تغییر قابل مشاهده‌ای در طیف جذب مشاهده نمی‌شود اما با افزایش زاویه از زاویه شبه بروستر، جذب کاهش می‌یابد و طیف عبور نیز با افزایش زاویه از تابش عمود تا زاویه 60 درجه (نزدیک به زاویه شبه‌بروستر ساختار) افزایش یافته به طوری که در 60 درجه عبور تقریباً 100 درصد است و سپس کاهش

در شکل 7 طیف جذب و عبور ساختار A هنگامی که Si₃N₄ باشد برای هر دو قطبش TE و TM رسم شده است. همان‌طور که در شکل 7الف و 7ج نشان داده شده است در قطبش TE با افزایش زاویه تابش طیف جذب و عبور کاهش می‌یابد. در قطبش TM نیز با توجه به شکل 7ب و 7د، با افزایش زاویه تابش تا زاویه

کمتر از تک لایه MoS_2 و عبور نزدیک 100 درصد می‌باشند.

می‌یابد. به این ترتیب برای قطبش TM در زاویه 60 درجه تک‌لایه MoS_2 با زیرلایه PMMA و ساختار A با $\text{Si}_3\text{N}_4 = b$ به ترتیب دارای جذب 2/2 و 1/9 برابر



شکل 7. نمودار: طیف جذب A با Si_3N_4 الف: در قطبش TE و ب: قطبش TM. ج: طیف عبور ساختار A با Si_3N_4 در قطبش TE و د: قطبش TM.

جذب 2/2 برابر کمتر از تک لایه MoS_2 و عبور حدود 100 درصد است که مناسب برای طراحی الکترونود شفاف می‌باشند.

مرجع‌ها

- [1] E.J.G. Santos, E. Kaxiras, Electrically Driven Tuning of the Dielectric Constant in MoS_2 Layers, *American Chemical Society* **7** (2013) 10741-10746.
- [2] Z. Li, S.W.Chang, C.C. Chen, Enhanced photocurrent and photoluminescence spectra in MoS_2 under ionic liquid getting, *Nano RESEARCH* **7** (2014) 973-980.
- [3] X. Yong Deng, X. Hua Deng, F. Hai Su, N. Hua Liu, J-Tao Liu, Broadband ultra-high transmission of terahertz radiation through monolayer MoS_2 , *Applied Physics* **118** (2015).
- [4] C.S. Yang, T.T. Tang, P.H. Chen, R.P. Pan, P. Yu, C.-L. Pan, Voltage-controlled liquid-crystal terahertz phase shifter with indiumtinc

نتیجه‌گیری

جذب کم و عبور بالای تک لایه MoS_2 با ابعاد نانومتر در ناحیه تراهرتز و اهمیت آن در الکترونود شفاف سبب شد تا طیف عبور و جذب و تأثیر زاویه فرودی در هر دو قطبش TE و TM برای تک لایه MoS_2 روی زیرلایه‌های مختلف و پنج ساختار بلور فوتونی همراه با MoS_2 مورد بررسی قرار گیرد. مشاهده شد طیف جذب و عبور با تغییر در مواد دی‌الکتریک در ساختارها و زاویه تابش، تنظیم‌پذیر می‌باشند. نتایج نشان می‌دهد که تک‌لایه MoS_2 با زیرلایه PMMA در قطبش TM با زاویه 60 درجه دارای طیف عبور نزدیک 100 درصد و طیف جذب 1/9 برابر کمتر از تک لایه MoS_2 می‌باشد و ساختار A با Si_3N_4 در قطبش TM با زاویه 60 درجه با طیف

- [15] K. Saito, T. Tanabe, Y. Oyama, THz-wave generation via difference frequency mixing in strained silicon based waveguide utilizing its second order susceptibility $\chi(2)$, *OPTICS EXPRESS* **22** (2014) 1660-1668.
- [16] X. Yan, L. Zhu, Y. Zhou, L. Wang, and X. Xu, Dielectric Property of MoS₂ Crystal in Terahertz and Visible Region, *Applied Optics* **54** (2015) 6732.
- [17] J.T. Liu, N.H. Liu, J. Li, X.J. Li, J.H. Huang, Enhanced absorption of graphene with one-dimensional photonic crystal, *Applied Physics* **101** (2012).
- [18] Y. Li, A. Chernikov, X. Zhang, A. Rigosi, H.M. Hill, A.M. Van der zand, D.A. Chenest, E. Shih, j. Hone. T.F. Heinz, Measurement of the optical dielectric function of monolayer transition-metal dichalcogenides: MoS₂, MoSe₂, WS₂ and WSe₂, *Physics review B* **90** (2014) 205422-205428.
- [19] ن. انصاری، م. مرادی، بررسی انتشار امواج تراهرتز در MoS₂ در مرز بین دو دی الکتریک، مجله پژوهش سیستم‌های بس‌ذره‌ای، **6** (1395) ص 7-12.
- [19] N. Ansari, M. Moradi, Investigation of THz waves propagation in MoS₂ monolayer between two dielectric media, *Journal of Research Systems* **6** (1395) 7-12.
- oxide nano whiskers as transparent electrodes, *Optics Letters* **39** (2014) 2511–2513.
- [5] L. Yun-Shik, ed, *Principles of Terahertz Science and Technology* (2009).
- [6] K. Ellmer, Past achievements and future challenges in the development of optically transparent electrodes, *Nature Photonics* **6** (2012) 809–817.
- [7] N. Ansari, M.M Tehranchi, Influence of filling fraction on the defect mode and gap closing of a one-dimensional photonic crystal: An analytical approach, *Physica B* **405** (2010)2900-2906.
- [8] N. Ansari, S.I. Khartsev, A.M. Grishin, Multicolor filter all-garnet magneto-optical photonic crystals, *Optics letters* **37** (2012) 3552-3554.
- [9] F. Fang Yang, Y. Long Huang, W. bo Xiao, J. Tao Liu, N. Hua Liu, “Control of absorption of monolayer MoS₂ thin-film transistor in one-dimensional defective photonic crystal, *Europhysics Letters* **112** (2015).
- [10] B. Mukherjee, F. Tseng, D. Gunlycke, K. Amara, G. Eda, E. Simsek, Complex electrical permittivity of the monolayer molybdenum disulfide (MoS₂) in near UV and visible, *OPTICS Material EXPRESS* **447** (2015) 447-455.
- [11] Xi. Liu, T. Galfsky, Z. Sun, F. Xia, E. Lin, Y. Lee, S. Kéna-Cohen, V.M. Menon, Strong light–matter coupling in two-dimensional atomic crystals, *Nature Photonics* **9** (2014)30-34.
- [12] N. Ansari, E. Mohebbi, Increasing optical absorption in one-dimensional photonic crystals including MoS₂ monolayer for photovoltaics applications, *Optical Materials* **62** (2016) 152-158.
- [13] H. Hajian, A. Soltani-Vala, M. Kalafi, Optimizing terahertz surface plasmons of a monolayer graphene and a graphene parallel plate waveguide using one-dimensional photonic crystal, *Applied Physics* **114** (2013) 033102.
- [14] F. Fan, X. Zhang, S. Li, D. Deng, N. Wang, H. Zhang, S. Chang, Terahertz transmission and sensing properties of micro structured PMMA tube waveguide, *OPTICS EXPRESS* (2015) 27204.