

## طراحی ساختارهایی شامل تک‌لایه MoS<sub>2</sub> 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، MoS<sub>2</sub>، 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 MoS<sub>2</sub> 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 MoS<sub>2</sub> 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 MoS<sub>2</sub> 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 MoS<sub>2</sub> در ناحیه ترانز و اهمیت آن در الکترو شفاف توسط یونگ دنگ<sup>1</sup> و همکاران بررسی شده است [3]. تهیه تک لایه MoS<sub>2</sub> هنگامی که روی زیرلایه نباشد امکان پذیر نیست بدین منظور ویژگی‌های اپتیکی تک‌لایه MoS<sub>2</sub> را روی زیرلایه‌های مختلف بررسی می‌کنیم. حضور زیرلایه به علت افزایش بازتاب سبب کاهش طیف جذب و عبور در تک‌لایه MoS<sub>2</sub> می‌شود.

در سال‌های اخیر تک‌لایه MoS<sub>2</sub> 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 MoS<sub>2</sub> به علت وابستگی جذب، عبور و ... به ثابت دی‌الکتریک، به شدت وابسته به تعیین ویژگی‌های ثابت دی‌الکتریک می‌باشد [1]. وابستگی ثابت دی‌الکتریک MoS<sub>2</sub> به دما و ولتاژ باعث تنظیم پذیری ویژگی‌های اپتیکی این ماده با عوامل خارجی می‌شود [2]. تک لایه MoS<sub>2</sub> دارای طیف جذب کمتر از 0/007 درصد و طیف عبور بسیار بالایی

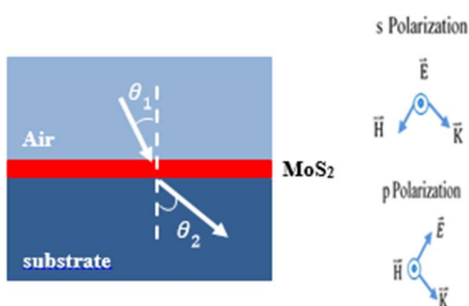
\* نویسنده مسئول: n.ansari@alzahra.ac.ir

<sup>1</sup>Yong Deng

در حدود 100 درصد نسبت به تک‌لایه  $\text{MoS}_2$  دست یافته‌ایم که مناسب برای کاربری در الکتروُد شفاف می‌باشد.

### مدل‌سازی

به‌منظور دستیابی به ساختار بهینه با جذب کمتر از تک‌لایه نانومتری  $\text{MoS}_2$ ، به بررسی اثر زیرلایه و بلور فوتونی بر جذب ساختار می‌پردازیم. برای بررسی اثر زیرلایه، ساختار به صورت هوا/تک‌لایه  $\text{MoS}_2$ /زیرلایه، می‌باشد که در شکل 1 نشان داده شده است. ماده زیرلایه با توجه به کارهای تجربی انجام شده یکی از مواد  $\text{SiO}_2$ ، PMMA، Si و انتخاب می‌شود [10، 11].



شکل 1- ساختار هوا/ تک‌لایه  $\text{MoS}_2$ / زیرلایه با جهت انتشار نور با زاویه فرود  $\theta_1$ . بردارهای میدان الکتریکی و مغناطیسی برای دو قطبش TE و TM در شکل نشان داده شده است.

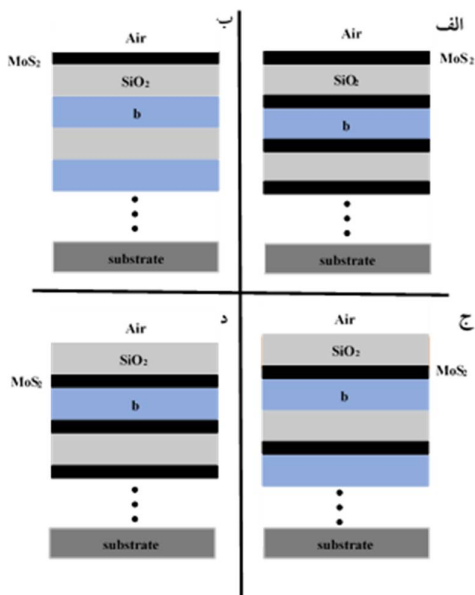
برای بررسی اثر بلور فوتونی، ساختار به صورت هوا/بلور فوتونی/ زیرلایه انتخاب می‌شود که در شکل 2 نشان داده شده است. به‌منظور دستیابی به جذب کم، 5 ساختار متفاوت بلور فوتونی همراه  $\text{MoS}_2$  به صورت  $D=(mab)^N$  شکل 2الف،  $A=m(ab)^N$  شکل 2ب،  $B=m^{10}(ab)^N$  شکل 2ج، و  $C=(amb)^N$  شکل 2د، در نظر گرفته شده است. در این ساختارها m و a به ترتیب  $\text{MoS}_2$  و  $\text{SiO}_2$  را نشان

در سال‌های اخیر روش‌های مختلفی با هدف کاهش جذب بدون کاهش عبور در تک‌لایه  $\text{MoS}_2$  مطالعه شده است. یکی از روش‌های کاهش جذب در تک‌لایه  $\text{MoS}_2$ ، 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 تراگسیلی 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 لیو<sup>1</sup> 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  $\text{MoS}_2$  کاهش دهند درحالی‌که عبوری بالاتر از 98% داشته باشند [9].

در این مقاله به‌منظور رسیدن به جذب کم و عبور بالا در تک‌لایه  $\text{MoS}_2$ ، 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  $\text{MoS}_2$  روی زیرلایه پلی‌متیل متاکریلات<sup>2</sup> (PMMA) و ساختار بلور فوتونی  $\text{MoS}_2(\text{SiO}_2/\text{Si}_3\text{N}_4)$ <sup>5</sup> به کاهش طیف جذب با عبور

<sup>2</sup> polymethyl methacrylate

<sup>1</sup> Tao Lio



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

## نتایج و بحث

به‌منظور یافتن ساختار بهینه برای کاهش جذب در تک لایه  $\text{MoS}_2$  لازم است در ابتدا طیف عبور و جذب تک لایه  $\text{MoS}_2$  را به‌دست آوریم. در شکل 3 طیف جذب و عبور تک لایه  $\text{MoS}_2$  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 تک لایه  $\text{MoS}_2$  به‌دلیل ضخامت کم دارای طیف جذب کمتر از 0,007 درصد و طیف عبور بالای 99 درصد در بازه فرکانسی تراهرتز می‌باشد.

می‌دهد و  $\text{b}$  مواد مختلفی از جمله  $\text{Si}$ ،  $\text{PMMA}$  و  $\text{Si}_3\text{N}_4$  می‌باشد که در دسترس هستند و معمولاً در کارهای تجربی از این مواد استفاده می‌شود [10، 11]. زیر لایه در این ساختارها  $\text{SiO}_2$  می‌باشد و  $N$  دوره تناوب است که با توجه به کارهای تئوری انجام شده 5 در نظر گرفته شده است [12]. ضریب شکست  $\text{Si}$ ،  $\text{PMMA}$  و  $\text{Si}_3\text{N}_4$  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 تک لایه  $\text{MoS}_2$  0/65 نانومتر است و ضریب شکست آن از رابطه  $\mathcal{N} = \sqrt{\varepsilon}$  محاسبه می‌شود که  $\varepsilon$  ثابت گذردهی  $\text{MoS}_2$  می‌باشد و در ناحیه تراهرتز از رابطه درود،

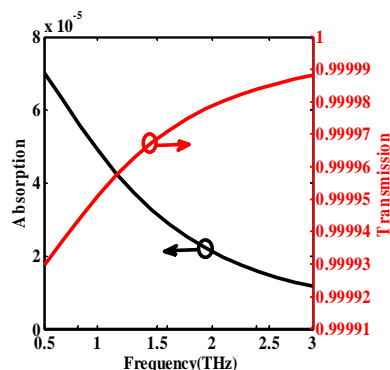
$$\varepsilon = \varepsilon_\infty - \frac{\omega_p^2}{\omega^2 + i\omega\Gamma}$$

محاسبه می‌شود که  $\varepsilon_\infty$ ،  $\Gamma$  و  $\omega_p$  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  $\theta_1$  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، TMM<sup>1</sup> محاسبه شده است [17].

<sup>1</sup>Transfer Matrix Method (TMM)

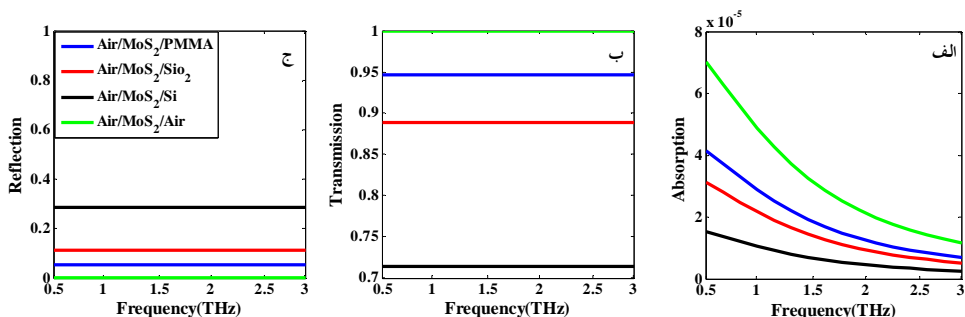
زیرلایه PMMA بیشتر از حالت‌هایی است که زیرلایه Si یا  $\text{SiO}_2$  می‌باشد و طیف بازتاب آن کمترین مقدار را دارد. هرگاه تک‌لایه  $\text{MoS}_2$  روی زیرلایه  $\text{Si}_3\text{N}_4$  قرار گیرد به دلیل نزدیک بودن ضریب شکست  $\text{Si}_3\text{N}_4$  به  $\text{SiO}_2$  رفتاری تقریباً مشابه به  $\text{SiO}_2$  را نشان می‌دهد. به این ترتیب تک‌لایه  $\text{MoS}_2$  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  $\text{MoS}_2$  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  $\text{MoS}_2$  به منظور دستیابی به ساختار بهینه پرداخته‌ایم.



شکل 3. نمودار طیف جذب و طیف عبور تک‌لایه  $\text{MoS}_2$  [3].

با قرار گرفتن تک‌لایه  $\text{MoS}_2$  بر روی زیرلایه، طیف بازتاب افزایش و جذب ساختار نسبت به تک‌لایه کمتر می‌شود [18]. در شکل 4 طیف جذب، عبور و بازتاب تک‌لایه  $\text{MoS}_2$  روی زیرلایه‌های PMMA،  $\text{SiO}_2$  و Si نشان داده شده است. همان‌طور که در شکل 4 دیده می‌شود طیف جذب و عبور تک‌لایه  $\text{MoS}_2$  روی



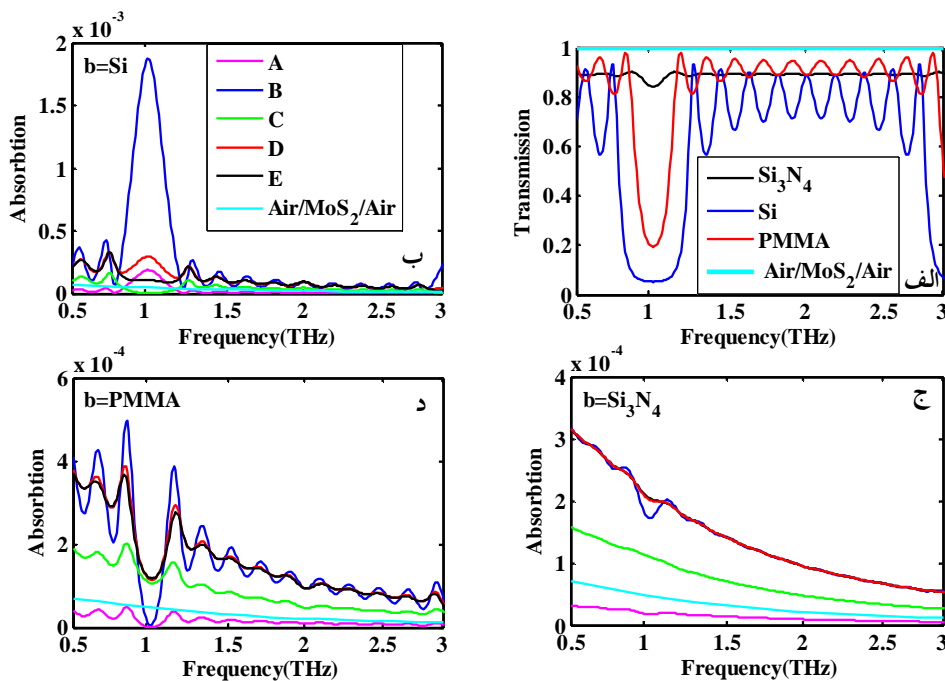
شکل 4. نمودار اثر زیرلایه‌های PMMA،  $\text{SiO}_2$  و Si بر روی الف) طیف جذب، ب) طیف عبور، ج) طیف بازتاب تک‌لایه  $\text{MoS}_2$ .

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،  $\text{Si}_3\text{N}_4$  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  $\text{Si}_3\text{N}_4$  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  $\text{MoS}_2$  دارد ولی بقیه ساختارها دارای جذب بالاتر از تک‌لایه می‌باشند. طیف جذب ساختارها زمانی که  $b$ ،  $\text{PMMA}$  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  $\text{MoS}_2$  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  $\text{MoS}_2$  با زیرلایه  $\text{PMMA}$  و ساختار A هنگامی که  $b$ ،  $\text{Si}_3\text{N}_4$  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  $\text{MoS}_2$  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  $b$ ،  $\text{Si}_3\text{N}_4$  می‌باشد رسم شده و نشان داده شده است که ساختار A در تمامی بازه فرکانسی جذبی کمتر



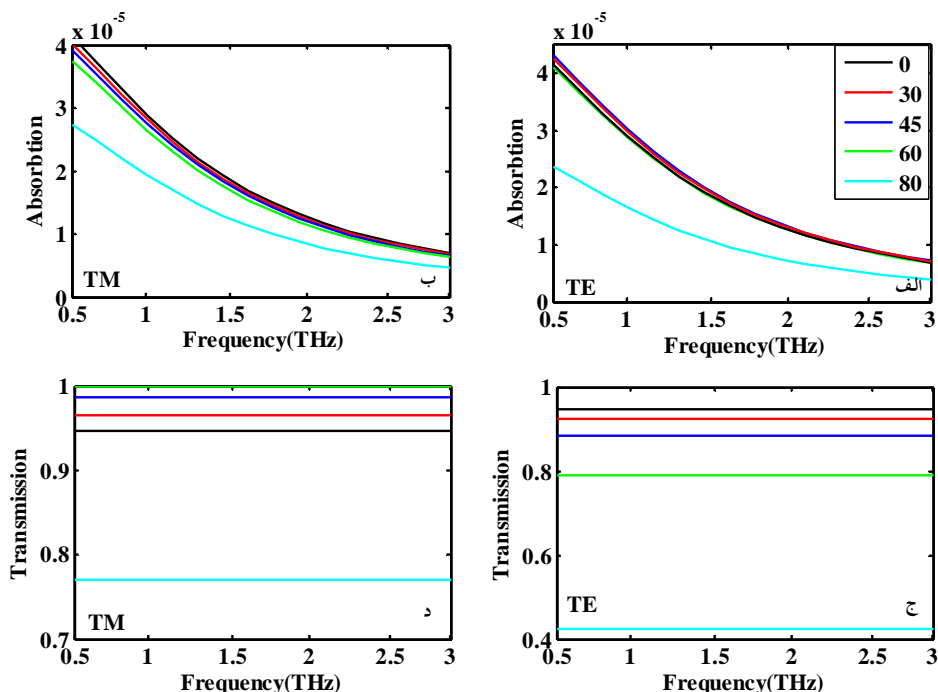
شکل 5. نمودارالف: طیف عبور ساختارها با دی‌الکتریک  $b$  متفاوت. طیف جذب پنج ساختار A, B, C, D و E زمانی که  $b = \text{Si}$ ؛ ج:  $b = \text{PMMA}$  و د:  $b = \text{Si}_3\text{N}_4$  می‌باشد.

زاویه فرودی تنها در این ساختارها نشان داده می‌شود. در شکل 6 طیف جذب و عبور تک‌لایه  $\text{MoS}_2$  روی زیرلایه  $\text{PMMA}$  برای هر دو قطبش TE و TM رسم

با توجه به اینکه در ساختار A  $b = \text{Si}_3\text{N}_4$  و تک‌لایه  $\text{MoS}_2$  روی زیرلایه  $\text{PMMA}$ ، 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



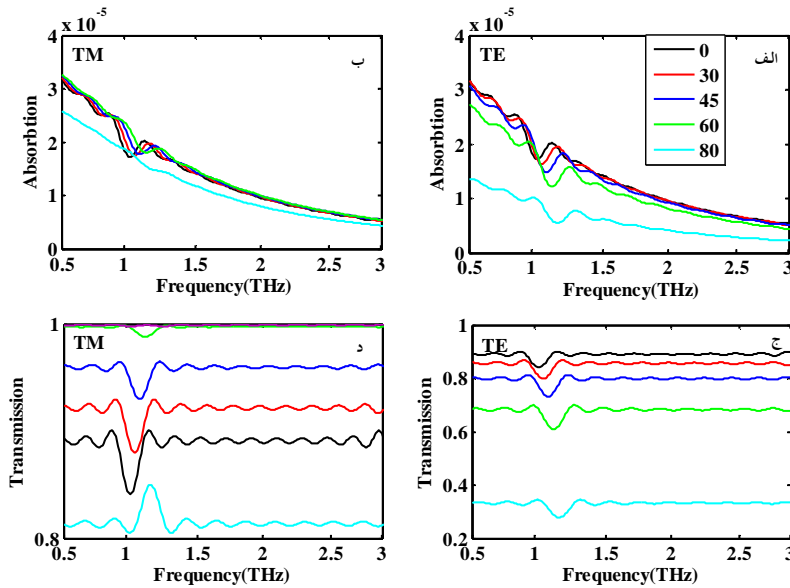
شکل 6. نمودار طیف جذب تک‌لایه MoS<sub>2</sub> با زیرلایه PMMA الف: در قطبش TE و ب: قطبش TM. ج: طیف عبور تک‌لایه MoS<sub>2</sub> با زیرلایه PMMA در قطبش TE و د: قطبش TM.

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 Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> 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  $\text{MoS}_2$  و عبور نزدیک 100 درصد می‌باشند.

می‌یابد. به این ترتیب برای قطبش TM در زاویه 60 درجه تک‌لایه  $\text{MoS}_2$  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  $\text{Si}_3\text{N}_4$  الف: در قطبش TE و ب: قطبش TM. ج: طیف عبور ساختار A با  $\text{Si}_3\text{N}_4$  در قطبش TE و د: قطبش TM.

جذب 2/2 برابر کمتر از تک لایه  $\text{MoS}_2$  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  $\text{MoS}_2$  Layers, *American Chemical Society* **7** (2013) 10741-10746.
- [2] Z. Li, S.W.Chang, C.C. Chen, Enhanced photocurrent and photoluminescence spectra in  $\text{MoS}_2$  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  $\text{MoS}_2$ , *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  $\text{MoS}_2$  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  $\text{MoS}_2$  روی زیرلایه‌های مختلف و پنج ساختار بلور فوتونی همراه با  $\text{MoS}_2$  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  $\text{MoS}_2$  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  $\text{MoS}_2$  می‌باشد و ساختار A با  $\text{Si}_3\text{N}_4$  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 MoS<sub>2</sub> 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: MoS<sub>2</sub>, MoSe<sub>2</sub>, WS<sub>2</sub> and WSe<sub>2</sub>, *Physics review B* **90** (2014) 205422-205428.
- [19] ن. انصاری، م. مرادی، بررسی انتشار امواج تراهرتز در MoS<sub>2</sub> 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 MoS<sub>2</sub> 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 MoS<sub>2</sub> 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 (MoS<sub>2</sub>) 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 MoS<sub>2</sub> 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.