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

رشد کریستال دوبعدی مولیبدن دی سلناید به روش رسوب بخار شیمیایی برای کاربرد در آشکارسازهای نوری

فاطمه کریمی، علی اسفندیار*، سهیل قدس

*دانشکده فیزیک دانشگاه صنعتی شریف، تهران، ایران. esfandiar@physics.sharif.edu

چکیده – ویژگی های منحصر به فرد مواد دوبعدی، آن ها را به کاندیدای مناسبی برای آشکارسازهای با کارایی بالا تبدیل کرده است. اگرچه خواص الکترونیکی ویژه و ویژگی های کاتالیستی چندلایه‌های دوبعدی $MoSe_2$ توجه محققان را به‌خود جلب کرده است، اما چند لایه های دوبعدی $MoSe_2$ به دلیل جذب بسیار بالای نوری برای کاربرد در آشکارساز ها مناسب‌تر می‌باشند. پیش از این تهیه‌ی لایه‌های نازک $MoSe_2$ به روش رسوب بخار شیمیایی انجام شده است و روش پیشنهادی در این پژوهش، سبب رشد نانوپوسه های شش ضلعی $MoSe_2$ بر روی زیرلایه ای از Si/SiO_2 شده اند. نانوپوسه های رشد یافته مساحت‌های های نسبتا بزرگی به طول ۷۰ میکرون دارند. تمامی فرآیند رشد در فشار اتمسفر صورت گرفته و دیود نوری بر پایه این ماده‌ی نیمه رسانا ساخته شده است. مشخصه یابی رامان حاکی از کیفیت بسیار بالای این چند لایه‌ها می باشد و فاصله ی دو قله‌ی برجسته‌ی A^1_g و E^1_{2g} در پراکندگی رامان، ضخامت‌های دو تا سه لایه‌ی اتمی را برای نانوپوسه‌ها تصدیق می‌کند. اندازه گیری های اپتوالکترونیکی افزاره‌ی ساخته شده نشان دهنده‌ی کاربرد های وسیع $MoSe_2$ در زمینه ی نانوالکترونیک می باشد. همان طور که نتایج نشان می دهد تحت تابش فوتونی با طول موج های متفاوت ، پاسخ نوری بالا (۵ آمپر بر وات) و آشکارکنندگی ویژه قابل ملاحضه ($۴/۶\times۱۰^۹$) و زمان پاسخ سریع (۷ میلی ثانیه) مشاهده شده است. دیود نوری چند لایه ی $MoSe_2$عملکرد بسیار بالایی نشان داده است که با مهندسی مناسب این افزاره می‌توان این عملکرد را بهبود بخشید.

کلید واژه ها: مواد دوبعدی، دی کالکوژن فلز واسطه، رسوب دهی بخار شیمیایی، نانوپوسه‌های $MoSe_2$، آشکارساز نوری

CVD-grown of $MoSe_2$ 2D Crystals by Chemical Vapor Deposition as Photodetector

Fatemeh Karimi, Ali Esfandiar*, Soheil Ghods

* Department of Physics, Sharif University of Technology, Tehran ۱۱۱۵۵-۹۱۶۱, Iran. esfandiar@physics.sharif.edu

Abstract- A novel optoelectronic property of two-dimensional (2D) materials suggests them for high-performance photodetector design. There has been a lot of attention paid to MoS_2 and Despite its higher optical absorbance, $MoSe_2$ has received little attention. A chemical vapor deposition system was used to

[Downloaded from opsi.ir on 2026-11-05]

prepare atomically thin $MoSe_2$ films. Our research developed a method of preparing hexagon-shaped $MoSe_2$ photodiode on Si/SiO_2 substrates in atmospheric pressure with sawtooth edges, leading to large-scale $MoSe_2$ layers with the size of ~۷۰ μm. The Raman characterization of the grown flakes indicated that they possessed high quality few layers of $MoSe_2$ and the distance between the two leading peaks of E^1_{2g} and A_{1g} in Raman dispersion confirms the thickness of ۲ to ۳ atomic layers. There are many applications for $MoSe_2$ in the nanoelectronics field, as demonstrated by the optoelectronic measurements of the device. As shown by these results, under variety photon wavelength exposure, our $MoSe_2$ photodiode exhibited the high responsivity (۵ A/W), the noticeable specific detectivity (۴.۶×۱۰^۹ Jones), and the fast response time (۷ ms). A few-layer $MoSe_2$ photodiode has demonstrated excellent performance, suggesting that with appropriate device engineering, the performance can be further enhanced.

Keywords: ۲D materials, TMDCs, chemical vapor deposition (CVD), $MoSe_2$, Photodetectors

مقدمه

آشکار سازها از مهم ترین اجزای ابزار اندازه گیری پارامترهای اپتوالکترونیکی افزاره‌های نوری هستند که تبدیل سیگنال نوری به سیگنال الکتریکی را تسهیل می‌کنند.یک سیگنال نوری که شامل طیف گسترده ای از طول موج‌ها از اشعه ایکس تا مادون قرمز می‌شود، حاوی اطلاعات بسیار ارزشمندی است که برای پردازش دیجیتالی نیازمند آشکارسازی سریع وکارآمد می‌باشد. امروزه ، فناوری ساخت آشکار سازهای‌های نوری به سطح‌یک فن آوری بالغ رسیده و چشم انداز درخشانی درتجارت و از جمله کاربردهایی مانند تصویربرداری، سنجش از دور، ارتباطات فیبر نوری و طیف سنجی در میان بسیاری دیگر از کاربردها رامتضمن می‌شود[۱].کارآیی‌یک آشکارساز نوری به فرآیند جذب نوری ، جداسازی و انتقال حامل‌های بار و استخراج حامل‌های بار به مدار الکتریکی خارجی بستگی دارد. طیف‌های متنوعی از نیمه‌هادی‌ها به عنوان مواد حساس به نور در آشکار سازهای نوری استفاده می‌شوند که هرکدام از آن‌ها از لحاظ پیچیدگی ساخت ،پایداری، عملکردشان مزایا و معایب مربوط به خود را دارند[۲]. مواد دو بعدی کالکوژن فلزهای واسطه به دلیل خواص شیمیایی و فیزیکی منحصر به فرد در زمینه‌ی آشکارسازی سیگنال نوری بسیار مورد توجه قرار گرفته اند. برای مثال به دلیل برهمکنش بسیار قوی با نور، از بهره وری جذب نوری بسیار بالایی برخوردارند. .سطوح شیمیایی بی اثرشان آن‌ها را در برابر تخریب شدن محافظت می‌کنند. مهم تر از همه شکاف نواری قابل تنظیم آن‌ها که معمولا از ۱ تا ۲/۵ ولت می‌باشد پاسخ نوری در رنج وسیعی را متضمن می‌شود. این مواد در مقایسه با همتایان توده ای خود، شکاف نواری وابسته به تعداد لایه‌هایشان بهره می‌برند و هم چنین در تک لایه‌های آنان شکاف نواری غیر مستقیم به مستقیم تبدیل می‌شود. مواد دوبعدی مختلف می‌توانند بدون محدودیت عدم تطابق شبکه، ساختارهای نامتجانس واندروالسی را تشکیل دهند و فراتر از این، موادی که دارای ثابت شبکه‌ی یکسانی می‌باشند، می‌توانند به صورت یکپارچه به هم بپیوندند و ساختار صفحه ای نامتجانسی را تشکیل دهند. شکاف نواری تنظیم شونده و اتصال اتمی‌تیزی در این مواد و ساختارهای نامتجانس آن‌ها پتانسیل بالایی برای به کارگیری در ابزاراپتوالکترونیکی دارند[۳]. روش‌های قابل اطمینان برای ساختن این مواد در مساحت‌های بالا همراه با کیفیت مطلوب، بی شک پایه‌های اساسی برای گرفتن کاربردهای وسیع از این مواد می‌باشد. ورقه سازی مکانیکی اولین روشی می‌باشد که برای تهیه این مواد پیشنهاد شد. با موفقیت در به دست آوردن گرافن از گرافیت با استفاده از ورقه سازی مکانیکی[۴]، مواد دوبعدی دیگری با بهره گیری از این روش از همتایان سه بعدی خود به دست آمدند. با این وجود مواد بدست آمده با این روش به دلیل کوچک بودن اندازه، غیر قابل کنترل بودن ضخامت آن‌ها و کیفیت پایینشان برای کاربردهای عملی مناسب نیستند. علاوه بر روش ورقه سازی

[Downloaded from opsi.ir on 2026-11-05]

مکانیکی، این مواد از روش هیدروترمال نیز قابل تولید می‌باشند[۵]، اما در این روش نیز مشکلاتی از قبیل سطح بسیار کوچک و جهت کریستالی نامناسب وجود دارد. در کنار این روش‌ها، روش‌هایی همچون انتقال بخار فیزیکی و شیمیایی و رشد بخار شیمیایی به صورت گسترده برای دستیابی به این مواد مورد استفاده قرار گرفته است،که مزایایی همچون تولید در مقیاس‌های بزرگ و ضخامت‌های قابل کنترل بایکنواختی بسیار بالا را دارا می باشد. با استفاده از این روش‌ها سطح در دسترس تقریبا در حدود سانتی متر و ضخامت آن‌ها در حد یک یا چند لایه می‌باشد. علاوه بر این با استفاده از این روش‌ها چه به صورت تک مرحله ای یا چند مرحله ای ساختارهای نامتجانس عمودی و افقی قابل دستیابی می‌باشد.که این خود سبب افزایش دامنه‌ی کاربرد این مواد به خصوص برای کاربردی چون آشکارسازی با عملکرد بسیار بالاست. تا اکنون آشکارسازهای بر پایه این مواد دو بعدی و ساختارهای نامتجانس آن‌ها عملکرد بالایی چون سرعت پاسخ بالا، حساسیت و آشکارسازی بسیار بالا از خود نشان داده اند[۷-۶] . در فرآیندهای معمول رشد بخار شیمیایی پارامترهایی هم چون دما ، مقدار واکنش دهنده‌ها و گونه‌های پیش ماده‌ها اثرات قابل توجهی در ریخت شناسی و کیفیت نهایی مواد دو بعدی می‌گذارند. همچنین فاصله‌ی بین پیش ماده و زیرلایه و شار گاز ورودی تاثیر قطعی بر فشار بخار واکنش دهنده‌ها دارد.

روش کار

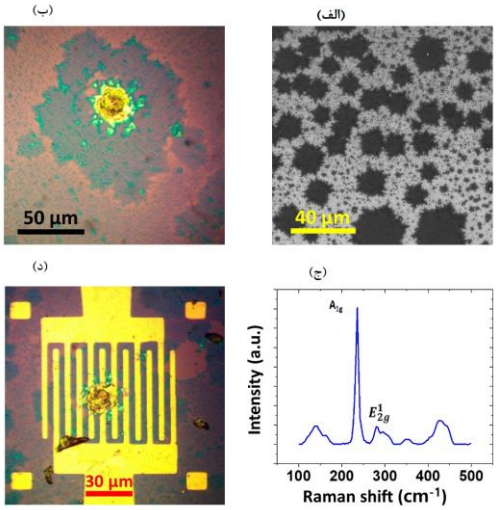
رشد کنترل شده‌ی نانوساختارهای لایه ای مولیبدن سلناید ($MoSe_2$) بر روی زیر لایه‌ی Si/SiO_2 توسط پیش ماده های پودری مولیبدن اکساید و سلنیوم با متوسط اندازه‌ی ذرات کمتر از ۱۰۰ نانومتر (شرکت سیگما آلدریچ (با خلوص ۹۹/۹۴%)) انجام شده است. جزییات فرآیند رشد به روش بخار شیمیایی به این ترتیب است که ۱میلی گرم از پودر MoO_3 در بوته ای از جنس کوارتز و پودر Se در قایقکی به جنس آلومینا قرار گرفته است. قایقک حاوی پیش ماده‌ی مولیبدن در مرکز کوره قرار می گیرد. زیر لایه‌ی Si/SiO_2 ابتدا به مدت ده دقیقه در استون و سپس در محلول ایزوپروپیل الکل سونیک می‌شود و سپس به وسیله تفنگ نیتروژنی خشک می شود. زیر لایه‌های تمیز شده در بالای قایقک کوارتز حاوی مولیبدن اکساید قرار داده می شوند. قایقک حاوی سلناید نیز در فاصله‌ی ۱۷ سانتی از مرکز کوره قرار می گیرد. برای انتقال بخار سلنیوم و مولیبدن اکساید به سمت زیرلایه از گاز ارگون و هیدروژن ۱۰٪ خالص استفاده شد. پس از آزمایش‌های مختلف دستورالعمل نهایی شامل : الف) تخلیه‌ی لوله‌ی کوارتز با قطر یک اینچ توسط پمپ خلا برای خروج مولکول‌های نامطلوب از سطح زیر لایه، لوله‌ی کوارتز و پیش ماده‌ها و سپس پر کردن لوله‌ی کوارتز با گاز ارگون خالص. ب) افزایش درجه حرارت محفظه تا ۷۷۰ درجه سانتی گراد با نرخ افزایشی ۲۵ درجه‌ی سانتی گراد بر دقیقه .پ) ورود قایقک سلناید به درون محفظه برای تبخیر آن. ت) هسته بندی و رشد نانوساختارهای لایه ای مولیبدن سلناید. (زمان رشد ۱۰ دقیقه می باشد.)

مشخصه‌یابی

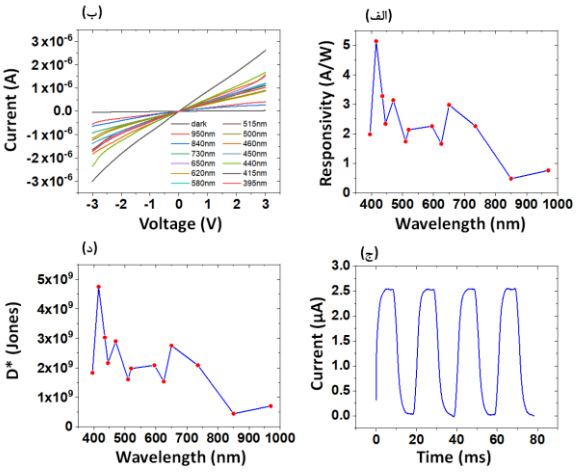
ساختار لایه‌های رشدیافته بر بستر Si/SiO_2 با میکروسکوپ الکترونی روبشی مدل (FE-SEM:MIRA^3, T-Scan) و طیف‌های رامان توسط سیستم (Explora, conformal Raman microscope, Horiba) با طول موج تحریک ۵۳۲ نانومتر آنالیز شده اند. همچنین، اندازه گیری پارامتر های الکترونیکی توسط منبع ولتاژ- نانوآمپرمتر (KEITHLEY ۶۴۸۷) انجام شده است. برای اندازه گیری زمان پاسخ نیز، افزاره‌ی ساخته شده در مدار تبدیل جریان به ولتاژ قرار گرفته و با بهره گیری از اسیلسکوپ (GWINSTEK GDS-

[Downloaded from opsi.ir on 2026-11-05]

U-۱۰۵۲) خروجی مدار رسم شده است. در طول اندازه-گیری پارامترهای اپتوالکترونیکی، ۱۳ ال ای دی با طول موج‌های فرو سرخ، مریی، فرابنفش مورد استفاده قرار گرفته است.



شکل۱.الف: تصویر میکروسکوپ اپتیکی کریستال رشد یافته بر زیر لایه‌ی Si/SiO_2 .ب: تصویر FESEM کریستال های شش ضلعی دندانه تیز $MoSe_2$. ج: طیف رامان از نمونه. د)افزاره‌ی ساخته شده از انتقال کریستال رشد یافته بر الکترودهای طلا.



شکل۲.الف : جریان اندازه‌گیری شده در حالت تاریک و تابش فوتونی با طول موج‌های مختلف. ب: نمودار پاسخ دهی نوری برحسب طول موج فوتون ورودی،طول موج ۱۰۰۰نانومتر بیانگر اندازه گیری در حالت تاریک است. ج: نمودار پله ای افزاره ی ساخته شده با روشن و خاموش کردن پالس نوری و اندازه‌گیری جریان بر حسب زمان. د: آشکارکنندگی ویژه بر حسب طول موج.

نتیجه‌گیری

در این پژوهش، رشد نانوپوسه‌های افقی $MoSe_2$ به روش رسوب بخار شیمیایی به طور مستقیم و دریک فرآیند تک مرحله ای با استفاده از پیش ماده‌های پودری مولیبدن اکساید و سلناید در محیطی حاوی گازهای آرگون و هیدروژن بر روی زیر لایه‌های Si/SiO_2 گزارش شده است. در این مطالعه، مراحل رشد نانوساختارهای مولیبدن سلناید از مرحله‌ی جوانه زنی تا شکل گیری رشد افقی و متراکم مورد بررسی قرار گرفته اند. همچنین شرایط رشد نانوساختار بهینه سازی شده است. دو قله‌ی برجسته‌ی A^1_g و E^1_{2g} در پراکندگی رامان مشاهده شد که فاصله‌ی آن‌ها نشان دهنده‌ی ضخامت ۲ تا ۳ لایه‌ی اتمی برای پوسه‌ها است. اندازه گیری پارامترهای اپتوالکترونیکی نشان دهنده ی کارایی قابل قیاس افزاره‌ی ساخته شده با سایر نمونه های ارایه شده در مقالات می‌باشد.

مرجع‌ها

[۱] P. Cambou, J.-L. Jaffard, “CMOS Image Sensors - Status of the CMOS Image Sensor Industry report," Yole Developpment, ۲۰۱۵. M. Lundstrom, *Fundamentals of Carrier Transport*, p. ٤٤, Cambridge University Press, ۲۰۰۰.

[۲] A. Nathan, A. Ahnood, M. T. Cole, Y. Suzuki, P. Hiralal,F.Bonaccorso,T. Hasan, L. Garcia-Gancedo, A. Dyadyusha, S. Haque, P. Andrew, S. Hofmann, J. Moultrie, A. J. Flewitt, A. C. Ferrari, M. J. Kelly, J.Robertson,G. A. J. Amaratunga, and W. I. Milne, “Flexible Electronics:The Next biquitous Platform," *Proceedings of the IEEE*,vol.۱۰۰, pp. ۱٤۸٦-۱٥۱۷, ۲۰۱۲.

[۳] Ye, T.; Li, J. Z.; Li, D. H. Charge-accumulation effect in transition metal dichalcogenide heterobilayers. *Small* ۲۰۱۹, *15*, ۱۹۰۲٤۲٤

[٤] K. S. Novoselov, A. K. Geim, S. V. Morozov, D. Jiang, Y. Zhang, S. V. Dubonos, I. V. Grigorieva, A. A. Firsov, *Science* ۲۰۰٤, *306*, ٦٦٦.

[٥] Y. Peng, Z. Meng, C. Zhong, J. Lu, W. Yu, Y. Jia, Y. Qian, *Chem.Lett.* ۲۰۰۱, *30*, ۷۷۲.

[٦] Luo, H.; Wang, B. L.; Wang, E. Z.; Wang, X. W.; Sun, Y. F.; Li, Q. Q.; Fan, S. S.; Cheng, C.; Liu, K. Phase-transitionmodulated, high-performance dualmode photodetectors based on WSe_2/VO_2 heterojunctions. *Appl. Phys. Rev.* ۲۰۱۹, *6*, ۰٤۱٤۰۷

[Downloaded from opsi.ir on 2026-11-05]

[۷] Luo, H.; Wang, B. L.; Wang, E. Z.; Wang, X. W.; Sun, Y. F.; Liu, K. High-responsivity photovoltaic photodetectors based on $MoTe_2$/$MoSe_2$ van der Waals heterojunctions. *Crystals* ۲۰۱۹, ۹, ۳۱۵.

[Downloaded from opsi.ir on 2026-11-05]