



Physics and Technology of Chemical Vapor Deposition (CVD) of Two-Dimensional Heterostructures in Photodetector Applications

Mahboube Esmailpour¹, Yaser Abdi², Alireza Moshfegh^{1,3*}

¹ Center for Nanoscience and Nanotechnology, Institute for Convergence Science & Technology, Sharif University of Technology, Tehran 14588-89694, Iran

² Department of Physics, University of Tehran, Tehran, Iran

³ Department of Physics, Sharif University of Technology, Tehran, 11155-9161, Iran

Received: 2026-04-12

Revised: 2026-08-15

Accepted: 2026-06-09

Abstract: In this review article, recent advances in the synthesis and applications of two-dimensional (2D) materials are systematically examined, with a particular emphasis on chemical vapor deposition (CVD) techniques. First, the fundamental growth principles and key parameters governing the CVD process—including temperature, pressure, carrier gas flow rate, precursor type, and substrate characteristics—are discussed in detail. Subsequently, common CVD approaches such as APCVD, LPCVD, PECVD, MOCVD, and LECVD are compared in terms of growth capability, advantages, and inherent limitations. In the following section, strategies for achieving controlled growth of single-crystalline 2D materials are reviewed, along with the influence of critical factors such as grain size, layer number, morphology, crystal orientation, crystal phase, doping, and structural defects on crystallinity and optoelectronic properties. In addition, lateral and vertical heterostructures are highlighted, with particular attention to their role in band engineering and carrier transport modulation.

Another major part of this review focuses on 2D material-based photodetectors, where the fundamental detection mechanisms—including photoconductive, photovoltaic, photogating, and photothermal effects—are analyzed. Key performance metrics such as responsivity, quantum efficiency, response time, signal-to-noise ratio, and specific detectivity are also evaluated and compared across different device architectures. Finally, the main challenges in this field are discussed, including wafer-scale growth, defect control, infrared photodetection.

Keywords: Chemical Vapor Deposition (CVD), Two-Dimensional Materials, Heterostructures, Transition Metal Dichalcogenides (TMDs), Photodetectors.

Corresponding Author. Email: moshfegh@sharif.edu

How to Cite This Article:

Esmailpour M, Moshfegh A, Abdi Y. Physics and Technology of Chemical Vapor Deposition (CVD) of Two-Dimensional Heterostructures in Photodetector Applications. Nanomeghyas. 2026;():e738112 (In Persian). doi: 10.22034/ns.2026.2090755.1430



This is an open access article under the CC-BY license (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

فیزیک و فناوری رسوب‌دهی بخار شیمیایی (CVD) مواد دوبعدی با ساختارهای ناهمگون در کاربردهای آشکارسازی نوری

محبوبه اسماعیل پور^۱، یاسر عبدی^۲ و علیرضا مشفق^{۳*}

۱. پژوهشکده جامع علوم و فناوری‌های همگرا، دانشگاه صنعتی شریف، تهران

۲. دانشکده فیزیک، دانشگاه تهران، تهران

۳. دانشکده فیزیک، دانشگاه صنعتی شریف، تهران

تاریخ دریافت: ۱۴۰۵/۰۱/۲۳ تاریخ بازنگری: ۱۴۰۵/۰۲/۲۸ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۵/۰۳/۱۹

چکیده

در این مقاله مروری، پیشرفت‌های اخیر در سنتز و کاربرد مواد دوبعدی با تأکید بر روش رسوب شیمیایی از فاز بخار (CVD) بررسی شده است. ابتدا اصول رشد و پارامترهای کلیدی مؤثر بر فرایند CVD شامل دما، فشار، نرخ جریان گازهای حامل، نوع پیش‌ماده و ویژگی‌های زیرلایه مورد بحث قرار گرفته و سپس روش‌های متداول CVD شامل APCVD، LPCVD، PECVD، MOCVD و LECVD از نظر قابلیت رشد، مزایا و محدودیت‌ها مقایسه شده‌اند.

در ادامه، راهبردهای دستیابی به رشد کنترل‌شده مواد دوبعدی تک‌بلوری مرور شده و اثر عواملی نظیر اندازه دانه، تعداد لایه‌ها، ریخت‌شناسی، جهت‌گیری کریستالی، فاز کریستالی، آرایش و نقص‌های ساختاری بر کیفیت بلوری و خواص اپتوالکترونیکی بررسی شده است. همچنین، ساختارهای ناهمگون جانبی و عمودی و نقش آن‌ها در مهندسی نوار انرژی و انتقال حامل‌ها مورد توجه قرار گرفته‌اند. بخش دیگری از این مقاله به آشکارسازهای نوری مبتنی بر مواد دوبعدی اختصاص دارد که در آن سازوکارهای فوتورسانایی، فوتوولتائیک، فوتوگیت و فوتوترموالکتریک و نیز شاخص‌های عملکردی شامل پاسخ‌دهی، بازده کوانتومی، زمان پاسخ، نسبت سیگنال به نویز و آشکارسازی ویژه بررسی شده‌اند. در پایان، چالش‌های اصلی شامل رشد در مقیاس ویفر، کنترل نقص‌ها، آشکارسازی مادون‌قرمز مورد بحث و بررسی قرار خواهد گرفت.

واژه‌های کلیدی: رسوب‌دهی بخار شیمیایی، مواد دوبعدی، ساختارهای ناهمگون، دی‌کالکوژنیدهای فلزات واسطه، آشکارسازهای نوری

نویسنده مسئول: moshfegh@sharif.edu

نحوه استناد به این مقاله: اسماعیل پور محبوبه، مشفق علیرضا، عبدی یاسر. فیزیک و فناوری رسوب‌دهی بخار شیمیایی (CVD) مواد دوبعدی با ساختارهای ناهمگون در کاربردهای آشکارسازی نوری. Nanomeghyas. 1405;(0):e738112. doi: 10.22034/ns.2026.2090755.1430

این مقاله تحت مجوز دسترسی آزاد CC-BY منتشر شده است. (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>)



۱- مقدمه

مواد دوبعدی^۱ (2D) به دلیل ویژگی‌های منحصر به فرد خود در دهه‌های اخیر توجه زیادی را در دنیای علم و فناوری به خود جلب کرده‌اند [1], [2]. این مواد که در یکی از ابعاد خود مقیاس نانو دارند، ویژگی‌های فیزیکی متفاوتی نسبت به مواد بالک از خود نشان می‌دهند. از جمله این ویژگی‌ها می‌توان به رسانایی الکتریکی بالا، استحکام مکانیکی بی‌نظیر، و خواص نوری فوق‌العاده اشاره کرد [3], [4]. یکی از نمونه‌های برجسته این مواد، گرافن [5] است که به دلیل ترکیب منحصر به فردی از ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خود [6]، به عنوان یک ماده شاخص در دنیای مواد شناخته می‌شود و در کاربردهای مختلفی مانند اپتوالکترونیک [7]، حسگرها [8] و نمایشگرها [9] مورد توجه قرار دارد.

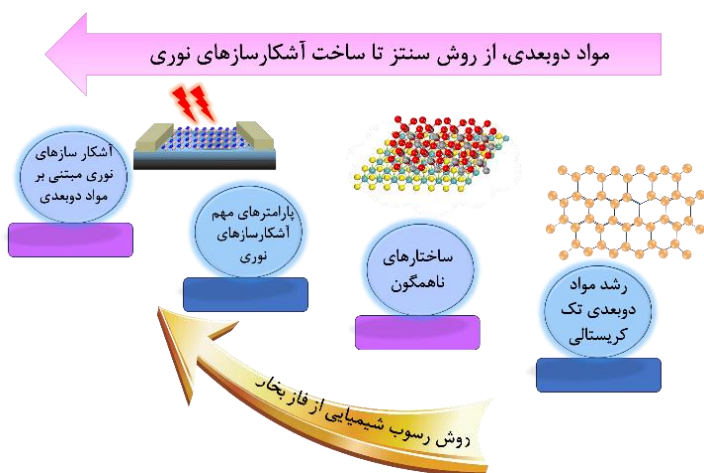
برای تولید این مواد با ویژگی‌های خاص، روش‌های مختلفی وجود دارد که یکی از محبوب‌ترین و موثرترین آنها، رسوب بخار شیمیایی^۲ (CVD) است [10]. در این فرایند، مواد اولیه ابتدا به صورت گونه‌های فعال در فاز گازی فراهم می‌شوند. این گونه‌ها ممکن است از گازهای پیش‌ماده، تبخیر مایعات آلی-فلزی یا تصعید پیش‌ماده‌های جامد حاصل شوند. سپس این گونه‌های گازی به سطح زیرلایه منتقل شده و با انجام واکنش‌های شیمیایی کنترل‌شده، لایه‌های نازک یا ساختارهای مورد نظر را تشکیل می‌دهند [11]. این روش به دلیل امکان کنترل دقیق شرایط رشد و قابلیت تولید مواد با کیفیت بالا، به عنوان

یکی از روش‌های اصلی برای تولید مواد دوبعدی در مقیاس وسیع شناخته می‌شود. با این حال، در فرآیند رشد مواد دوبعدی به روش CVD، چالش‌هایی نیز وجود دارند که می‌توانند بر ویژگی‌های نهایی این مواد تأثیر بگذارند [12].

یکی از این چالش‌ها، ناهمگونی‌های ساختاری است که ممکن است در لایه‌های تولیدی ایجاد شود. این ناهمگونی‌ها می‌توانند به صورت نقص‌های کریستالی، مرزهای دانه‌ای یا تغییرات فازی در مواد ظاهر شوند که تأثیر منفی بر عملکرد این مواد در کاربردهای مختلف می‌گذارد [13]. به‌ویژه در ادوات اپتوالکترونیکی که عملکرد دقیق و یکنواخت آن‌ها به کیفیت ساختار ماده وابسته است، وجود این ناهمگونی‌ها می‌تواند به افت بازده، کاهش

قابلیت تکرارپذیری و اختلال در عملکرد دستگاه منجر شود. بنابراین، دستیابی به رشد یکنواخت و به حداقل رساندن ناهمگونی‌های ساختاری، یکی از مهم‌ترین چالش‌های تولید مواد دوبعدی با کیفیت بلوری بالا محسوب می‌شود. [14]. در این مقاله، به بررسی فرآیند رشد مواد دوبعدی به روش CVD، انواع مختلف آن و چالش‌های مرتبط با ناهمگونی‌های ساختاری آن‌ها پرداخته می‌شود. همچنین، روش‌های نوینی که برای کنترل و کاهش این ناهمگونی‌ها به کار می‌روند، مورد بحث قرار خواهند گرفت. از جمله این روش‌ها می‌توان به کنترل دقیق پارامترهای فرآیند رشد از قبیل دما، فشار، نوع گازهای پیش‌ماده و فاصله پیش‌ماده تا زیرلایه اشاره کرد که می‌توانند بر کیفیت و یکنواختی لایه‌های تولیدی تأثیر بگذارند. علاوه بر این، استفاده از روش‌هایی همچون تزریق موضعی گازها برای ایجاد لایه‌های تک‌بلور و با کیفیت بالا نیز به‌طور گسترده در این زمینه مورد استفاده قرار گرفته است.

هدف از این مقاله، بررسی جامع روندهای فعلی در رشد مواد دوبعدی به روش CVD و چالش‌های مرتبط با ناهمگونی‌های ساختاری آن‌هاست. در ادامه، کاربردهای این مواد در زمینه‌های مختلف اپتوالکترونیک و روش‌های نوین برای بهبود کیفیت و عملکرد آنها به طور مفصل توضیح داده خواهد شد. همچنین، چالش‌ها و فرصت‌های پیش‌روی این مواد در مسیر توسعه فناوری‌های آینده مورد تحلیل قرار خواهند گرفت. این مقاله می‌تواند نقشی مؤثر در پیشبرد تحقیقات بنیادی از رشد مواد دوبعدی تک کریستالی، ساختارهای ناهمگون آن‌ها و توسعه کاربردهای عملی مواد دوبعدی در حوزه اپتوالکترونیک و آشکارسازهای نوری ایفا کند (شکل ۱).



شکل ۱- مروری بر ساختار کلی مقاله مروری پیش رو

¹ Two-Dimensional Materials (2D)

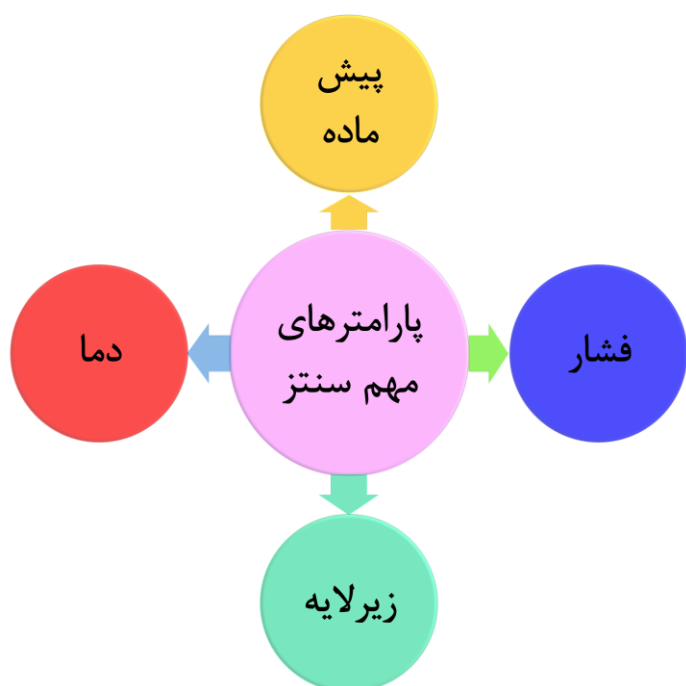
² Chemical Vapor Deposition (CVD)

می‌شود. همچنین راهکارهایی برای کنترل و بهینه‌سازی ناهمگونی‌های ساختاری معرفی شده و کاربردهای این مواد در حوزه‌هایی نظیر آشکارسازهای نوری، سلول‌های خورشیدی، و ادوات الکترونیکی قابل‌انعطاف مورد بحث قرار می‌گیرد. هدف این مطالعه، ارائه تصویری جامع از وضعیت کنونی، چالش‌ها، و مسیرهای آینده تحقیقات در این حوزه پویای علم است.

۲. پارامترهای مهم در روش رسوب شیمیایی از فاز بخار

CVD

خواص نهایی مواد دوبعدی، از جمله اندازه‌ی بلورها، ریخت شناسی سطح، فاز بلوری، یکنواختی لایه، و ویژگی‌های بین‌لایه‌ای^۳، به شدت تحت تأثیر شرایط رشد در فرآیند رسوب‌دهی شیمیایی از فاز بخار (CVD) هستند. این ویژگی‌ها نه تنها تعیین‌کننده‌ی کیفیت ماده‌ی نهایی‌اند، بلکه نقش مهمی در عملکرد نهایی این مواد در کاربردهایی مانند الکترونیک، فوتونیک و حسگرها دارند. دستیابی به خواص مطلوب نیازمند کنترل دقیق و طراحی مهندسی‌شده‌ی فرآیند رشد است، که این امر تنها با شناخت عمیق از پارامترهای کلیدی در سیستم CVD امکان‌پذیر خواهد بود.

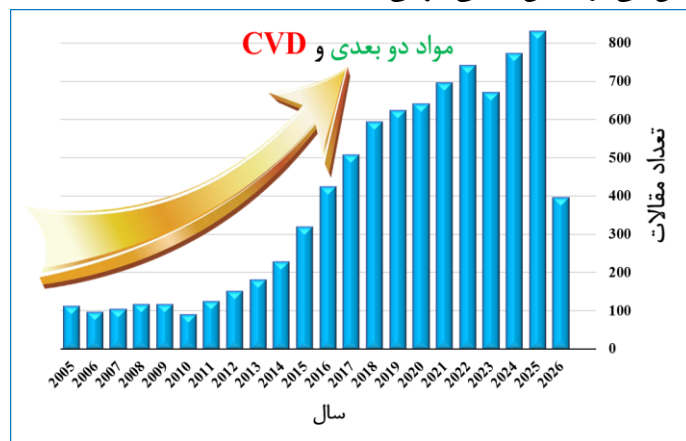


شکل ۳- پارامترهای مهم در سنتز مواد دوبعدی به روش رسوب شیمیایی بخار (CVD)

در این مطالعه، تمرکز اصلی بر بررسی روش رشد مواد دوبعدی به کمک (CVD) و تحلیل ناهمگونی‌های ساختاری این مواد در کاربردهای اپتوالکترونیکی است. با توجه به ویژگی‌های منحصر به فرد مواد دوبعدی نظیر رسانایی الکتریکی بالا، جذب نوری گسترده، استحکام مکانیکی قابل توجه و سطح ویژه زیاد، این دسته از مواد به یکی از محورهای اصلی تحقیقات در حوزه‌های فیزیک ماده چگال، نانوفناوری، و اپتوالکترونیک تبدیل شده‌اند.

فرآیند CVD به دلیل توانایی در تولید لایه‌هایی با کیفیت بالا و امکان مقیاس‌پذیری، به عنوان یکی از روش‌های پیشرو برای رشد کنترل‌شده این مواد شناخته می‌شود. با این حال، یکی از چالش‌های مهم در این حوزه، وجود ناهمگونی‌های ساختاری مانند مرزهای دانه‌ای، نقص‌های بلوری، ناپایداری فاز و تغییرات در تعداد لایه‌هاست که می‌تواند به شکل مستقیم بر عملکرد اپتوالکترونیکی این مواد تأثیر بگذارد و کارایی نهایی دستگاه‌های مبتنی بر آن‌ها را کاهش دهد.

بر اساس داده‌های استخراج‌شده از پایگاه اسکوپوس تا تاریخ 05 June 2026، تعداد مقالات علمی منتشرشده در حوزه رشد و مواد دوبعدی به روش رسوب شیمیایی بخار طی بازه زمانی ۲۰۰۵ تا ۲۰۲۶ رشدی پیوسته و چشمگیر داشته است (شکل ۲). این روند نه تنها گویای افزایش اهمیت این حوزه در تحقیقات بین‌رشته‌ای است، بلکه نشان‌دهنده نیاز روزافزون به توسعه فناوری‌های نوآورانه برای تولید مواد با کیفیت بالا و عملکرد قابل پیش‌بینی در مقیاس صنعتی نیز می‌باشد.



شکل ۲- روند چاپ مقالات بر حسب سال در زمینه رشد و مواد دوبعدی به روش رسوب بخار شیمیایی بر اساس داده‌های به دست آمده از پایگاه اطلاعاتی اسکوپوس در بازه زمانی سال‌های ۲۰۰۵ تا ۲۰۲۶ با کلید واژه‌های ("Two dimension*" OR "2D material") AND TITLE-ABS-KEY ("Chemical vapor deposition OR CVD") (تاریخ تهیه نمودار: 05 June 2026)

در این مقاله، ضمن مرور پیشرفت‌های اخیر در زمینه رشد مواد دوبعدی با روش CVD، و انواع مختلف آن به بررسی دقیق تأثیر عوامل مختلف رشد بر ساختار نهایی، و به تبع آن، بر خواص اپتوالکترونیکی این مواد پرداخته

³ Interfacial properties

۳. روش رسوب شیمیایی از فاز بخار و انواع مختلف آن

یکی از روش‌های پیشرفته و مؤثر برای تولید مواد دوبعدی، بهره‌گیری از واکنش‌های شیمیایی میان پیش‌ماده‌های مولکولی یا اتمی در شرایط خلأ یا فشار پایین است. در این روش، لایه‌های نازک از ماده مورد نظر روی یک زیرلایه^{۱۲} تشکیل می‌شوند، به گونه‌ای که کنترل دقیقی بر ضخامت، خلوص و یکنواختی آن‌ها در سطح وسیع فراهم می‌شود [15]. این ویژگی‌ها باعث شده‌اند تا این روش به‌ویژه برای تولید مواد دوبعدی با کیفیت بالا و ساختار منظم، بسیار مورد توجه قرار گیرد.

در میان روش‌های مبتنی بر خلأ، رسوب‌دهی بخار شیمیایی به‌عنوان یکی از رایج‌ترین و کارآمدترین فناوری‌ها برای رشد لایه‌های نازک شناخته می‌شود [16]. در این فرآیند، گازهای واکنش‌گر در تماس با سطح داغ زیرلایه، وارد واکنش شیمیایی می‌شوند و به‌صورت لایه‌هایی نازک و خالص روی آن رسوب می‌کنند. در مقایسه با روش‌های فیزیکی [17] مانند کندوپاش^{۱۳} یا پاشش یونی، روش CVD مزایایی چون امکان تنظیم نرخ رسوب‌دهی، پوشش‌دهی یکنواخت حتی در سطوح پیچیده، و دستیابی به موادی با خلوص بالا دارد. همین ویژگی‌ها باعث شده که این فناوری در صنایع مختلف مانند الکترونیک [18]، اپتوالکترونیک [19]، اصلاح سطوح و پزشکی کاربرد [19] گسترده‌ای پیدا کند.

با ظهور مواد کم‌بعد مانند نانولوله‌های کربنی [20]، گرافن و دی‌کالکوژنیدهای فلزات واسطه^{۱۴} (TMDs) [21]، نیاز به روش‌هایی با دقت و کنترل بالا بیش از گذشته احساس می‌شود. در این زمینه، CVD به‌خوبی توانسته نیازهای پژوهشگران را برآورده سازد، چرا که کنترل ساختار و خواص نهایی مواد را با دقت بالا امکان‌پذیر می‌سازد [22].

برای عملکرد مناسب یک سامانه رسوب‌دهی بخار شیمیایی، اجزای مختلف آن باید به‌صورت هماهنگ عمل کنند. این اجزا شامل سیستم دقیق تزریق گاز، محفظه واکنش ایزوله، سامانه خلأ، منبع تأمین انرژی حرارتی یا پلاسما، و واحد تصفیه گازهای خروجی است. علاوه بر این، به‌کارگیری سامانه‌های کنترل خودکار برای پایش و تنظیم پارامترهای کلیدی مانند دما، فشار و نرخ جریان گازها نقش مهمی در پایداری، تکرارپذیری و کنترل‌پذیری فرایند دارد.

در آرایش‌های پیشرفته CVD، به‌ویژه در سیستم‌های دارای دو ناحیه حرارتی، ایجاد و کنترل گرادیان دمایی بین ناحیه پیش‌ماده و ناحیه زیرلایه یکی از پارامترهای کلیدی فرایند محسوب می‌شود. این گرادیان دمایی، نقش تعیین‌کننده‌ای در تبخیر و انتقال پیش‌ماده، تنظیم غلظت گونه‌های واکنشی و در نهایت مکان و کیفیت رشد لایه‌های دوبعدی دارد.

در شکل ۴، نمای شماتیکی یک سیستم CVD با دو ناحیه حرارتی مجزا نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، اجزای اصلی شامل

از مهم‌ترین پارامترهای قابل تنظیم در فرآیند CVD (شکل ۳) می‌توان به موارد زیر اشاره کرد:

نوع و غلظت پیش‌ماده^۴: انتخاب ترکیب‌های شیمیایی مناسب برای تأمین عناصر مورد نیاز ماده دوبعدی، به همراه کنترل غلظت آن‌ها در فاز بخار، نقشی حیاتی در تعیین نرخ رشد، یکنواختی لایه و کنترل عنصرسنجی^۵ دارد. پیش‌ماده‌ها باید دارای ناپایداری حرارتی مناسبی باشند تا بتوانند در دمای مورد نظر تجزیه و به‌درستی با یکدیگر واکنش دهند.

ویژگی‌های زیرلایه^۶: جنس، ساختار سطح، انرژی سطحی، میزان ناپیوستگی و حتی زبری میکروسکوپی زیرلایه می‌تواند نحوه‌ی جوانه‌زنی^۷ و رشد لایه را به شدت تحت تأثیر قرار دهد. همچنین، برخی زیرلایه‌ها موجب رشد هم‌راستا^۸ می‌شوند که در نهایت به بلورهایی با کیفیت بالاتر می‌انجامد. **دمای رشد:** یکی از مهم‌ترین عوامل مؤثر بر پویایی رشد، دما است. دمای مناسب، شرایط لازم برای تجزیه‌ی پیش‌ماده‌ها، واکنش مؤثر بین آن‌ها، تحرک سطحی گونه‌ها^۹، و در نتیجه، رشد لایه‌ای و یکنواخت مواد دوبعدی را فراهم می‌آورد. دمای خیلی پایین منجر به تجزیه ناقص پیش‌ماده‌ها و رشد ناکامل می‌شود، در حالی که دمای بیش از حد ممکن است موجب تبخیر مجدد یا تشکیل فازهای ناخواسته گردد.

فشار محیط رشد: فشار کل در راکتور، که معمولاً در محدوده‌ای از چند میلی‌تور تا چند صد تور کنترل می‌شود، بر رفتار دینامیکی مولکول‌ها در فاز بخار، نرخ برخورد آن‌ها با سطح، و در نهایت ساختار نهایی تأثیر دارد. تغییر فشار می‌تواند مسیرهای واکنش را تغییر دهد و شرایط انتقال جرم را بهینه یا مختل کند.

از دیگر پارامترهای تأثیرگذار بر شرایط سنتز به روش رسوب شیمیایی بخار عبارتند از: سرعت جریان حامل گاز و نرخ جریان پیش‌ماده‌ها که این پارامترها تعیین‌کننده‌ی نرخ تأمین واکنش‌دهنده‌ها به سطح زیرلایه‌اند. کنترل دقیق آن‌ها به رشد یکنواخت در سراسر سطح و جلوگیری از نوسانات موضعی در ضخامت کمک می‌کند. زمان رشد که مدت زمان اعمال شرایط رشد مشخص، تعیین‌کننده‌ی ضخامت نهایی و تعداد لایه‌های تشکیل‌شده است. زمان بیش از حد می‌تواند منجر به رشد چندلایه و کاهش کیفیت شود.

در مجموع، تعامل پیچیده‌ی این پارامترها بر انتقال جرم^{۱۰}، انتقال حرارت^{۱۱}، واکنش‌های سطحی و بین‌سطحی، و جوانه‌زنی اولیه تأثیر مستقیم دارد. برای رسیدن به ماده‌ای دوبعدی با کیفیت بالا، ضروری است که این عوامل به صورت هم‌زمان و بهینه تنظیم شوند.

⁴ Precursors

⁵ Stoichiometry

⁶ Substrate

⁷ Nucleation

⁸ Epitaxial growth

⁹ Surface mobility

¹⁰ Mass transport

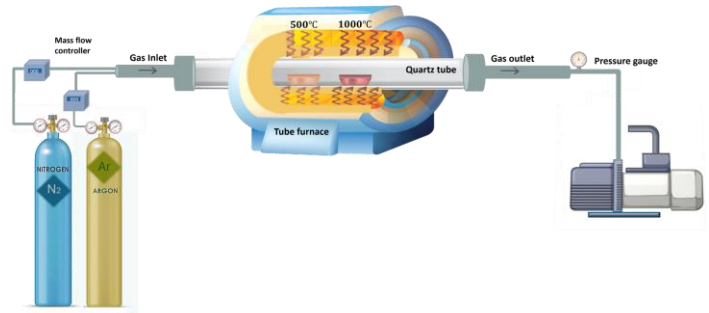
¹¹ Heat transfer

¹² Substrate

¹³ Sputtering Deposition

¹⁴ Transition metal dichalcogenide (TMD)

مسیر جریان گازها، موقعیت زیرلایه، محفظه واکنش و سیستم تخلیه گاز به طور مشخص بر چسب گذاری شده اند.



شکل ۴- تصویر شماتیک از سیستم CVD

در ادامه، انواع مختلف روش های CVD از جمله رسوب دهی شیمیایی از فاز بخار در فشار اتمسفری^{۱۵} (APCVD)، رسوب کم فشار شیمیایی بخار^{۱۶} (LPCVD)، رسوب دهی بخار شیمیایی تقویت شده با پلاسما^{۱۷} (PECVD)، رسوب دهی بخار شیمیایی با پیش ماده های فلزی-آلی^{۱۸} (MOCVD)، رسوب دهی شیمیایی بخار با کمک لیزر^{۱۹} (LECVD) (شکل ۵) بررسی خواهند شد.



شکل ۵- انواع مختلف روش های رسوب دهی شیمیایی از فاز بخار

۱.۳ رسوب کم فشار شیمیایی بخار (LPCVD)

رسوب دهی بخار شیمیایی در فشار پایین (LPCVD) یکی از روش های دقیق و کارآمد برای سنتز مواد دوبعدی با کیفیت بالا محسوب می شود. در

این روش، پمپ های خلأ^{۲۰} نقش اساسی دارند؛ آن ها پیش از آغاز فرآیند، محفظه واکنش را تخلیه کرده و محیطی با فشار بسیار پایین (معمولاً در بازه چند میلی تور تا چند تور) ایجاد می کنند و باعث کاهش گازهای پیشین، یا از پیش تصعید شده در محفظه و در نهایت کاهش نقص می باشند [3].

در طول فرآیند رسوب دهی نیز پمپ خلأ با حفظ فشار پایین و تنظیم دقیق جریان گازهای واکنش گر به داخل و خارج محفظه، کنترل کامل بر شرایط رشد ماده را فراهم می کند. تنظیم دقیق سرعت پمپاژ و نرخ تزریق گازها به پژوهشگران این امکان را می دهد تا ضخامت، یکنواختی و ساختار بلوری ماده دوبعدی حاصل را مطابق نیاز تنظیم کنند. همچنین، واکنش های شیمیایی درون محفظه موجب تولید محصولات جانبی گازی می شوند که اگر به موقع و به طور مؤثر از محفظه خارج نشوند، می توانند در روند رسوب دهی اختلال ایجاد کرده و باعث آلودگی فیلم نهایی شوند. پمپ خلأ با حذف سریع این مواد ناخواسته، محیطی تمیز برای رشد مطلوب ماده دوبعدی فراهم می سازد [24], [23].

به طور کلی، کنترل دقیق فشار و جریان گازها در محیط LPCVD موجب کاهش شدید واکنش های نامطلوب در فاز گازی، افزایش یکنواختی لایه های رسوب داده شده، و بهبود خواص نهایی ماده دوبعدی می شود. بنابراین، پمپ خلأ به عنوان یکی از اجزای کلیدی سیستم LPCVD شناخته می شود که با ایجاد محیطی خلأ، تنظیم دقیق تزریق گازها، و حذف کارآمد محصولات جانبی، زمینه ساز سنتز موفق و کنترل شده مواد دوبعدی با کیفیت بالا است. برای نمونه، لی لین و همکارانش از LPCVD برای رشد گرافن بسیار تمیز و با کیفیت استفاده کردند [25]. در این پژوهش، از ترکیب فویل مسی و فوم مسی بهره گرفته شد. مس به دلیل حلالیت پایین کربن و فعالیت کاتالستی مناسب، یکی از متداول ترین بسترها برای رشد گرافن با کیفیت بالا محسوب می شود. در این ساختار، فوم مسی با تنظیم غلظت گونه های کربنی در نزدیکی سطح رشد، از تشکیل کربن آمورف و آلودگی های ناخواسته جلوگیری می کند. فرآیند رشد در فشار پایین (۲ تا ۲۱ میلی تور) و با کنترل دقیق نسبت گازهای هیدروژن و متان انجام شد که به بهبود خلوص و یکنواختی لایه های گرافنی کمک کرد. همان گونه که در شکل ۶ مشاهده می شود، این آرایش ویژه فویل-فوم مسی شرایط مناسبی برای رشد گرافن پیوسته و بسیار تمیز فراهم کرده و منجر به تولید نمونه هایی با کیفیت بلوری بالا و حداقل آلودگی سطحی شده است.

¹⁵ Atmospheric pressure CVD (APCVD)

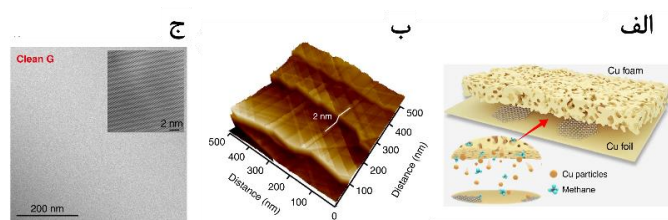
¹⁶ Low-Pressure CVD (LPCVD)

¹⁷ Plasma-Enhanced CVD (PECVD)

¹⁸ Metalorganic Chemical Vapor Deposition (MOCVD)

¹⁹ Laser-Enhanced Chemical Vapor Deposition (LECVD)

²⁰ Vacuum pump



شکل ۶- رشد گرافن بسیار تمیز (الف) شماتیکی از طراحی آزمایش، شامل ساختار لایه‌ای فویل مس و فوم مس، برای رشد گرافن فوق‌العاده تمیز. تصویر کوچک داخل شکل: نمایی از نحوه تعامل بین مس و متان در فضای بین فویل مس و فوم. (ب) تصویر میکروسکوپ نیروی اتمی (AFM) از گرافن تمیز تازه رشد یافته روی فویل مس. (ج) تصویر میکروسکوپ الکترونی عبوری (TEM) از غشای گرافن فوق‌العاده تمیز. تصویر کوچک: نمایی با بزرگ‌نمایی بالا (HRTEM) از شبکه بلوری گرافن [25].

۲.۳. رسوب‌دهی شیمیایی از فاز بخار در فشار اتمسفری (APCVD)

رسوب‌دهی شیمیایی از فاز بخار در فشار اتمسفری (APCVD) یکی از تکنیک‌های پرکاربرد برای ایجاد لایه‌های نازک از مواد مختلف است. این روش به دلیل سادگی، هزینه‌ی پایین و بهره‌وری بالا، انتخابی رایج در صنایع مختلف محسوب می‌شود. ویژگی بارز APCVD این است که در فشار اتمسفری کار می‌کند، و در نتیجه نیازی به تجهیزات گران‌قیمت خلأ ندارد. این موضوع باعث می‌شود که تجهیزات مورد نیاز آن در مقایسه با روش‌های دیگر CVD، بسیار ساده‌تر و کم‌هزینه‌تر باشند. سادگی تجهیزات و امکان تولید در مقیاس بالا، APCVD را به روشی اقتصادی و کارآمد تبدیل کرده است. البته در مقایسه با CVD کم‌فشار، ممکن است کنترل دقیق بر کیفیت ساختار دوبعدی، یکنواختی لایه، و پوشش‌دهی سطوح پیچیده تا حدودی کاهش یابد. همچنین، تنظیم دقیق ضخامت و ترکیب شیمیایی لایه‌های نازک در این روش چالشی‌تر است. رشد کنترل‌شده آلیاژ دوبعدی $\text{MoS}_{2(1-x)}\text{Se}_{2x}$ به روش APCVD در فشار اتمسفری و کاربرد آن در تولید الکتروکاتالیستی هیدروژن توسط یو و همکارانش [26] انجام شده است. اگرچه در سال‌های اخیر رشد کنترل‌شده آلیاژهای تک‌لایه‌ای مواد دوبعدی از خانواده‌ی دی‌کالکوژنیدهای فلزات واسطه محقق شده است، اما درک کامل از مکانیزم رشد آن‌ها به دلیل پیچیدگی فرآیند هسته‌زایی همچنان یک چالش مهم به شمار می‌آید.

در این راستا، یو و همکارانش با استفاده از روش (APCVD) موفق به سنتز مؤثر و کنترل‌شده آلیاژ سه‌تایی $\text{MoS}_{2(1-x)}\text{Se}_{2x}$ در ابعاد بزرگ شدند [26]. آن‌ها با ترکیب تحلیل‌های تجربی و نظریه تابعی چگالی^{۲۱} تأثیر مواد پیش‌ماده (مانند Se و S) را بر سرعت واکنش در رشد بررسی کردند. یافته‌ها نشان داد که افزودن عنصر سلیسیم (Se) نه تنها موجب

کاهش تعداد سایت‌های هسته‌زایی می‌شود، بلکه با کاهش انرژی نفوذ، رشد جانبی بلور را نیز تسهیل می‌کند. این موضوع با محاسبات نظری DFT پشتیبانی شد. از نظر کاربرد، این آلیاژ به‌ویژه در واکنش تکامل هیدروژن (HER) دارای عملکرد الکتروکاتالیستی بهتری بود. نتایج DFT نشان داد که جایگزینی گوگرد (S) با سلیسیم (Se) در لایه بلور^{۲۲} نسبت به ناحیه میانی (in-plane) باعث کاهش چشم‌گیر انرژی آزاد گیبس برای جذب اتم هیدروژن می‌شود. این به معنای افزایش بهره‌وری در تولید هیدروژن است. همان‌طور که در شکل ۷ نشان داده شده است، نویسندگان پارامترهای بهینه‌شده برای رشد آلیاژ را به کار گرفتند و موفق به تولید یک فیلم پیوسته با ابعاد سانتی‌متری شدند که از ادغام دانه‌های تک‌بلوری تشکیل شده است. در شکل ۷الف، تصویری نوری از فیلم بزرگ تولیدشده است. در این تصویر، مسیر جریان گاز آرگون مشخص است و نقاط a تا p با فواصل ۴۰۰ میکرومتر روی زیرلایه علامت‌گذاری شده‌اند که برای انجام طیف‌سنجی رامان مورد استفاده قرار گرفتند. شکل ۷ب، طیف‌های رامان مربوط به نقاط a تا p را نشان می‌دهد. جابجایی قرمز پیک $E_1^2g(\text{S-Mo})$ در نقاط مختلف، بیانگر تغییر غلظت سلیسیم و در نتیجه، تغییر ترکیب آلیاژ در طول مسیر جریان گاز است. شکل ۷ج، نقشه رامان از موقعیت پیک $E_1^2g(\text{S-Mo})$ را نشان می‌دهد که به صورت فضایی توزیع ترکیب آلیاژ را در مسیر مشخص می‌کند. این نقشه کمک می‌کند تا یکنواختی ترکیب بررسی شود. شکل ۷د، تصویر نوری بزرگ‌نمایی‌شده‌ای از بخشی از آلیاژ را نشان می‌دهد. شکل ۷ه، نقشه رامان برای ناحیه‌ای به ابعاد 250×250 میکرومتر است که موقعیت پیک E_1^2g را نشان می‌دهد. ثبات در موقعیت این پیک نشان‌دهنده ترکیب یکنواخت در این ناحیه است. شکل ۷و و ۷ز، طیف‌های رامان مربوط به نقاط مختلف (۱ تا ۶ و ۷ تا ۱۲) هستند که از روی نقشه رامان در شکل‌های قبلی گرفته شده‌اند. شکل ۷ز و ۷ط، دو نقشه‌ی رامان دیگر از نواحی مختلف نمونه هستند که همگی نشان‌دهنده بلورینگی^{۲۳} بالا و ترکیب یکنواخت در مقیاس 250×250 میکرومتر هستند. در مجموع، این داده‌ها نشان می‌دهند که آلیاژ $\text{MoS}_{2(1-x)}\text{Se}_{2x}$ در مقیاس بالا و با یکنواختی ترکیب و ساختار بلوری خوب رشد داده شده است. این ویژگی‌ها برای استفاده در کاتالیست الکتروشیمیایی و تولید هیدروژن اهمیت زیادی دارند.

²² Edge site

²³ Crystallinity

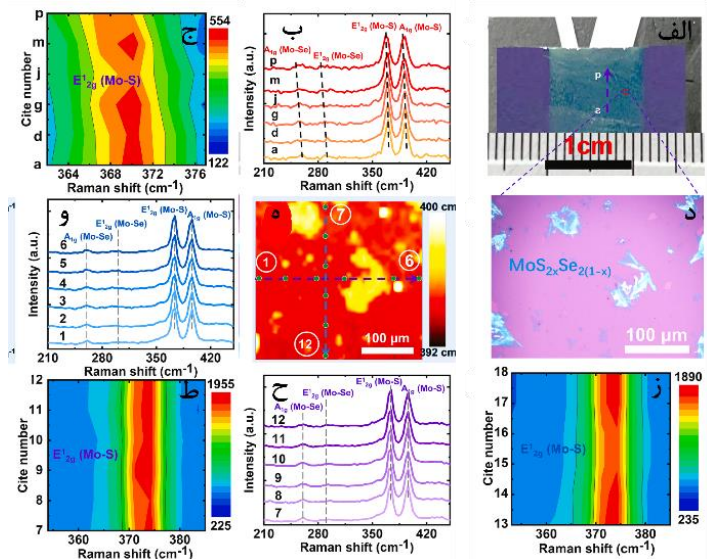
²¹ Density functional theory (DFT)

شکل و جنس متنوع انجام شود. این ویژگی باعث حذف مراحل پیچیده‌ی انتقال و آلودگی‌های احتمالی می‌شود.

یی و همکارانش در مطالعه‌ای، به بررسی دقیق روش PECVD برای سنتز مواد دوبعدی پرداختند و به نتایج مهمی در زمینه کنترل پذیری رشد این مواد دست یافتند [28]. همان‌طور که در شکل ۸ مقاله نشان داده شده است، فرایند PECVD به‌طور هم‌زمان شامل رسوب‌دهی^{۲۶} و زدایش^{۲۷} است. این ویژگی دوگانه‌ی فرایند، به پژوهشگران امکان می‌دهد تا با تنظیم شرایط رشد، ساختار نهایی ماده را به‌صورت دقیق کنترل کنند. در شکل ۶الف، تفاوت مکانیزم انرژی در PECVD نسبت به CVD به حرارتی به تصویر کشیده شده است. در حالی که CVD به تجزیه حرارتی پیش‌ماده‌ها وابسته است، در PECVD این کار توسط پلاسما انجام می‌شود. یون‌ها و الکترون‌های موجود در پلاسما به مولکول‌های گازی برخورد کرده و آن‌ها را به گونه‌های فعال تبدیل می‌کنند، که منجر به رشد ماده روی بستر می‌شود. در شکل ۸ب، چیدمان تجربی PECVD برای سنتز مواد دوبعدی نمایش داده شده است. در این روش، بسترهایی از جنس Si، SiO₂/Si، کوارتز یا یاقوت^{۲۸} داخل یک لوله کوارتزی قرار می‌گیرند و تا دمای مشخصی گرم می‌شوند. سپس پیش‌ماده‌های گازی تزریق شده و پلاسما با استفاده از منابع مختلف مانند پلاسما با فرکانس رادیویی (RF-PECVD) با فرکانس ۱۳٫۵۶ مگاهرتز، مایکروویو (MW-PECVD)، یا جریان مستقیم (DC-PECVD) در ناحیه بالادست تولید می‌شود. پژوهش مذکور عمدتاً از RF-PECVD به دلیل چگالی بالای پلاسما بهره برده است. در شکل ۸ج، اصل کلیدی موفقیت در PECVD یعنی تعادل بین رسوب‌دهی و زدایش نشان داده شده است. اگر دما پایین باشد، زدایش غالب شده و ماده‌ای تشکیل نمی‌شود. با افزایش دما، فرایند رشد آغاز می‌شود و تعادل بین دو فرآیند برقرار می‌گردد. این تعادل به صورت سه حالت متمایز دسته‌بندی می‌شود:

تعادل بحرانی^{۲۹}: بهترین شرایط برای رشد تک‌بلوری. در این حالت، زدایش ملایم نقص‌های مرزی را حذف کرده و رشد یکنواخت را ممکن می‌سازد.

نیمه‌تعادل^{۳۰}: دما کمی بالاتر از حالت تعادل بحرانی است و احتمال ایجاد نقص‌های جزئی وجود دارد که روی ریخت شناسی اثر می‌گذارد.



شکل ۷- الف) تصویری ماکروسکوپی از فیلم آلیازی پیوسته در مقیاس سانتی‌متری که به‌صورت مستقیم رشد یافته است. ب و ج) طیف‌های رامان و تصویر نقشه‌ی رامان مربوط به موقعیت پیک $E_1^2g(S-Mo)$ برای نقاط a تا p که در قسمت الف مشخص شده‌اند. د) تصویر نوری از آلیاز تک‌لایه $MoS_2(1-x)Se_2x$ که به روش CVD سنتز شده است. ه) نقشه‌ی رامان از موقعیت پیک $E_1^2g(S-Mo)$ که از تصویر (د) استخراج شده است. ز و ط، ح) طیف‌های رامان مربوط به نقاط ۱ تا ۶ و ۷ تا ۱۲ از آلیاز $MoS_2(1-x)Se_2x$ و نقشه‌ی رامان از موقعیت پیک $E_1^2g(S-Mo)$ در این نواحی؛ نقاط سبز رنگ مکان واقعی برداشت طیف‌ها را نشان می‌دهند [26].

۳.۳. رسوب‌دهی بخار شیمیایی تقویت‌شده با پلاسما

روش CVD حرارتی به دماهای بالا (حدود 1000 درجه سانتی‌گراد) و گاهی به استفاده از کاتالیست‌های فلزی نیاز دارد که باعث بروز آلودگی، نقص‌های ساختاری و مشکلاتی در فرایند انتقال^{۲۴} لایه‌های سنتز شده می‌شود. برای غلبه بر این چالش‌ها، روش PECVD یا رسوب‌دهی شیمیایی از فاز بخار با کمک پلاسما معرفی شده است. در این روش، برخلاف CVD حرارتی که از انرژی گرمایی برای تجزیه پیش‌ماده‌ها استفاده می‌کند، پلاسما انرژی لازم برای شکستن مولکول‌های پیش‌ماده را تأمین می‌کند [27]. این انرژی به صورت انرژی پتانسیل و انرژی جنبشی از طریق ذرات باردار مانند یون‌ها و رادیکال‌ها به مولکول‌های گاز منتقل می‌شود و باعث تولید گونه‌های شیمیایی فعال در دمای پایین (حتی دمای اتاق) می‌گردد. به دلیل راندمان بالای تجزیه، در این روش نیازی به استفاده از کاتالیست نیست و رشد ماده می‌تواند به صورت درجا^{۲۵} روی بسترهایی

²⁶ Deposition

²⁷ Etching

²⁸ Sapphire

²⁹ Critical Equilibrium - c-E

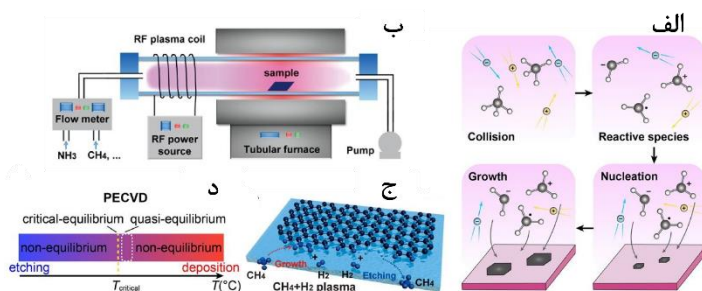
³⁰ Quasi-Equilibrium - q-E

²⁴ Transfer

²⁵ In situ

بی تعادلی^{۳۱}: در دماهای بالا، رسوبدهی غالب می‌شود و ماده با ریخت‌شناسی ناپایدار و نقص‌های زیاد تشکیل می‌شود.

در شکل ۸، تأثیر دمای رشد بر تعادل بین زدایش و رسوبدهی و نوع ماده دوبعدی نهایی به تصویر کشیده شده است. کنترل دقیق این پارامترها امکان رشد مواد متنوعی مانند گرافن خالص، گرافن دپ شده با نیتروژن، نقاط کوانتومی گرافن، دیواره‌های نانوبی گرافنی، h-BN و ساختارهای سه‌تایی BC_xN را فراهم کرده است.



شکل ۸- رشد مواد دوبعدی با استفاده از روش PECVD: (الف) مکانیزم رشد (ب) تجهیزات و ساختار دستگاه PECVD (ج) فرآیندهای رقابتی در محیط گاز CH₄/H₂ در PECVD (د) حالت‌های تعادلی مختلف در فرآیند PECVD [28]

مزایای متعدد روش PECVD از جمله دمای پایین، عدم نیاز به انتقال، سازگاری با صنعت، و کنترل دقیق مورفولوژی و ساختار، باعث شده است که این روش به گزینه‌ای برجسته برای سنتز مستقیم و تمیز مواد 2D روی بسترهای مختلف تبدیل شود. استفاده از این مواد در ساخت ترانزیستورهای با تحرک بالای حامل، حسگرهای فشار، سنسورهای زیستی، پوست الکترونیکی، تقویت سیگنال رامن، ماژول‌های لمسی برای خواندن بریل و دستکش‌های هوشمند برای ضبط زبان اشاره، گواهی بر کاربردی‌پذیری صنعتی و پیشرفته این فناوری است.

۳.۴. رسوبدهی بخار شیمیایی با پیش‌ماده‌های فلزی-آلی (MOCVD)

روش MOCVD یا رسوبدهی بخار شیمیایی با پیش‌ماده‌های فلزی-آلی یکی از روش‌های قدرتمند برای سنتز مواد دوبعدی با کیفیت بالا، به‌ویژه دی‌کالکوئیدهای فلزات واسطه است. در این روش، پیش‌ماده‌های فلزی-آلی که معمولاً ترکیبات فرار حاوی فلز هستند، به صورت بخار به درون محفظه واکنش وارد می‌شوند. این ترکیبات فلز لازم برای ساختار ماده دوبعدی را تأمین می‌کنند. همچنین پیش‌ماده‌هایی از عناصر گروه کالکوژن، مانند گوگرد یا سلنیم نیز به محفظه وارد می‌شوند. سپس واکنش بین این دو نوع پیش‌ماده روی سطح زیرلایه‌ای که گرم شده است انجام می‌شود.

محصولات این واکنش تجزیه شده و اتم‌های فلز و کالکوژن با هم ترکیب می‌شوند و لایه‌ای از ماده دوبعدی را تشکیل می‌دهند. این فرآیند معمولاً در دماهایی نسبتاً پایین‌تر از روش‌های سنتی CVD انجام می‌شود [29]. محصولات جانبی گازی که در حین واکنش تولید می‌شوند، با کمک سیستم خلأ از محفظه خارج شده تا محیط تمیز باقی بماند و از تشکیل ترکیبات ناخواسته که ممکن است کیفیت ماده را کاهش دهد جلوگیری شود. از جمله مزایای کلیدی روش MOCVD برای سنتز مواد دوبعدی عبارتند از: خلوص بالا، قابلیت رشد در مقیاس وسیع و یکنواخت، قابلیت تنظیم دقیق خواص ماده مانند ضخامت، مورفولوژی و ویژگی‌های الکترونیکی و دماهای پایین رشد که برای زیرلایه‌های حساس به گرما مناسب است. با این حال، استفاده از پیش‌ماده‌های فلزی-آلی ممکن است باعث وارد شدن اتم‌های کربن به ساختار شود که بر خواص الکترونیکی ماده تأثیر می‌گذارد. بنابراین کنترل دقیق روی فرآیند هسته‌زایی و رشد برای رسیدن به فیلم‌های دوبعدی یکنواخت و با کیفیت بالا بسیار مهم است. توسعه پیش‌ماده‌های جدید و بهینه یکی از حوزه‌های فعال پژوهش برای بهبود کیفیت رشد در MOCVD است.

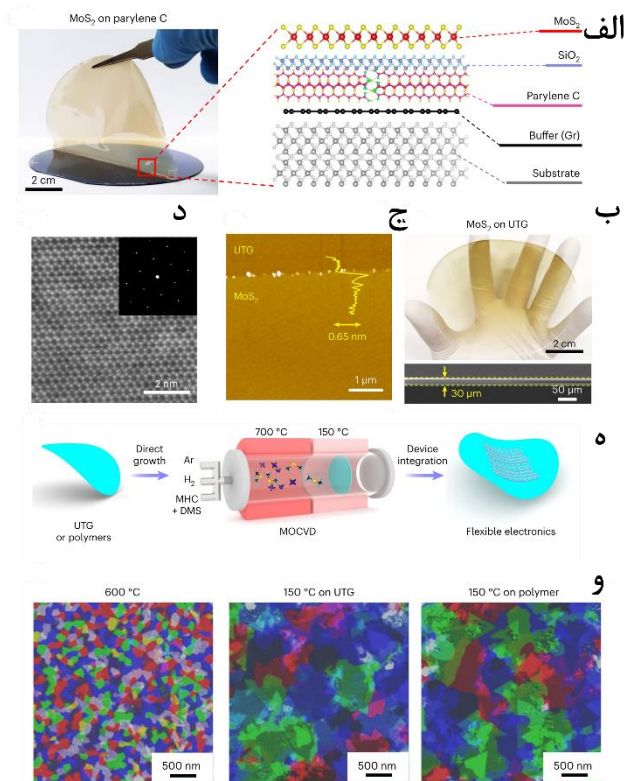
رشد مواد دوبعدی در MOCVD تحت تأثیر عوامل مختلفی از جمله شیمی پیش‌ماده‌ها، ویژگی‌های زیرلایه و شرایط رشد است. پیش‌ماده‌های فلزی-آلی مانند آلکیل‌فلزها یا کربونیل‌فلزها با رسیدن به زیرلایه گرم، تجزیه شده و اتم‌های فلز را آزاد می‌کنند. این اتم‌ها سپس با پیش‌ماده‌های کالکوژن واکنش می‌دهند. این واکنش‌ها شامل جذب سطحی، پخش شدن روی سطح و تشکیل پیوندهای شیمیایی است.

تشکیل هسته‌های پایدار اولیه روی سطح زیرلایه، مرحله‌ای کلیدی است. محل‌های هسته‌زایی ممکن است تحت تأثیر نقص‌های سطح، ناخالصی‌ها یا ویژگی‌های خاص سطحی قرار گیرند. در شرایط ایده‌آل، ماده دوبعدی به صورت لایه‌به‌لایه رشد می‌کند که برای دستیابی به فیلم‌هایی با کیفیت و یکنواختی بالا بسیار مطلوب است. با این حال، در برخی موارد، ممکن است رشد به صورت جزایر سه‌بعدی رخ دهد که باعث کاهش کیفیت نهایی می‌شود.

زیرلایه نقش مهمی در فرآیند رشد دارد. از جمله زیرلایه‌های رایج می‌توان به یاقوت کبود^{۳۲}، SiO₂/Si و فویل‌های فلزی مختلف اشاره کرد. آماده‌سازی سطح زیرلایه، مانند تمیزکاری یا پیش‌پردازش آن، نیز بر رشد مؤثر است.

دما نقش بسیار مهمی در کنترل تجزیه پیش‌ماده‌ها، سرعت واکنش‌ها و حرکت گونه‌ها روی سطح دارد. همچنین فشار در راکتور بر مسیر حرکت واکنش‌گرها و فاصله متوسط بین برخورد مولکول‌ها تأثیر دارد. نرخ جریان

بررسی‌های نوری نظیر طیف رامان و فلئورسانس نوری نیز کیفیت بالای لایه‌های رشد یافته را تأیید می‌کند.



شکل ۹- در مقیاس ویفر، سنتز MoS₂ روی پارایلین C و UTG در دمای پایین: الف) سمت چپ: تصویر واقعی از MoS₂ رشد یافته روی پارایلین C بر روی ویفر ۴ اینچی در حال جدا شدن از زیرلایه حامل. سمت راست: تصویر شمایک لایه‌های MoS₂ رشد یافته روی پارایلین C. در این تصویر، نشان‌دهنده گرافن است. ب) تصویر نوری (بالا) و تصویر مقطع عرضی حاصل از میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) (پایین) از MoS₂ رشد یافته روی UTG. ج) تصویر توپوگرافی از سطح MoS₂ روی UTG که با میکروسکوپ نیروی اتمی (AFM) گرفته شده است. د) تصویر میکروسکوپی به روش انتقال الکترونی با میدان تاریک حلقوی^{۳۹} به همراه الگوی پراش الکترونی ناحیه انتخابی^{۴۰} در داخل تصویر، که نشان‌دهنده کریستالینیتی خوب MoS₂ است. ه) تصویر شمایک از فرآیند سنتز و ساخت مستقیم^{۴۱} و تصاویر TEM با میدان تاریک^{۴۲} که اثر دمای رشد بر اندازه دانه‌های MoS₂ را نشان می‌دهد [30].

۳.۵. رسوب‌دهی شیمیایی بخار با کمک لیزر LECVD

روش رسوب‌دهی شیمیایی بخار با کمک لیزر، یکی از روش‌های نوین و مؤثر برای رشد مواد دوبعدی با کیفیت بالا مانند دی‌سولفید مولیبدن از خانواده TMDs است. در این روش، گازهای پیش‌ماده شامل ترکیبات

پیش‌ماده‌ها نیز مقدار تأمین واکنش‌گر به سطح زیرلایه و سرعت رشد و ترکیب نهایی ماده را تعیین می‌کند.

هوانگ^{۳۳} و همکارانش این مطالعه را با هدف بررسی امکان‌پذیری رشد MoS₂ در دمای پایین انجام دادند [30]. آن‌ها ابتدا این ماده را روی زیرلایه‌های پلیمری سنتز کردند تا عملکرد فرآیند رشد در دمای پایین را ارزیابی کنند. شکل ۹الف تصویر MoS₂ رشد یافته روی زیرلایه پارایلین C^{۳۴} را در حال جدا شدن از زیرلایه حامل و نیز شمایکی از ساختار مقطعی این زیرلایه را نشان می‌دهد. در این ساختار، لایه‌ای از SiO₂ به عنوان لایه‌ی غیرفعال کننده^{۳۵} برای کاهش آلودگی کربنی و زبری سطح به کار رفته است. همچنین، گرافن رشدیافته به روش CVD به عنوان لایه‌ی واسطه اضافه شده تا فرآیند جداسازی^{۳۶} آسان‌تر انجام شود، زیرا پس از رشد طولانی، چسبندگی بین پارایلین C و زیرلایه حامل افزایش می‌یابد. روش آن‌ها همچنین قابل تعمیم به سایر پلیمرهای با دمای ذوب نسبتاً بالا، مانند پلی‌ایمید^{۳۷} است. طیف‌های رامان و FTIR پارایلین C پیش و پس از رشد نشان داد که این زیرلایه در برابر شرایط رشد مقاوم بوده و کیفیت اولیه خود را حفظ کرده است. در شکل ۹ب، تصویر نوری و میکروسکوپی مقطعی از MoS₂ رشد یافته روی زیرلایه‌ی شیشه‌ی فوق‌نازک^{۳۸} (UTG) با ضخامت ۳۰ میکرومتر مشاهده می‌شود. نتایج تصاویر AFM در شکل ۹ج نشان داد که یک لایه‌ی یکنواخت و پیوسته از MoS₂ روی سطح تشکیل شده است. همچنین، شکل ۹د تصویر TEM تاریک‌میدان همراه با الگوی پراش الکترونی ناحیه‌ای را نشان می‌دهد که کریستالینیتی بالای MoS₂ رشد یافته در دمای ۱۵۰ درجه سانتی‌گراد را تأیید می‌کند.

روند اصلی سنتز این ماده در دمای پایین در شکل ۹ه نشان داده شده است. در این روش، ناحیه‌ی دوم کوره طوری طراحی شده تا دمای یکنواخت ۱۵۰ درجه حفظ شود و از تأثیر گرادیان دمایی جلوگیری گردد. این طراحی امکان رشد مستقیم MoS₂ روی زیرلایه‌های حساس به حرارت را فراهم کرده، بدون آنکه نیازی به فرآیند انتقال باشد.

در نهایت، شکل ۹و بیانگر آن است که کاهش دمای رشد باعث افزایش اندازه‌ی دانه‌های MoS₂ از حدود ۱۸۰ نانومتر به ۸۰۰ نانومتر شده است. این امر ناشی از نسبت بالای کالکژن به فلز در فرآیند رشد است. همچنین،

³³ Hoang

³⁴ Parylene C

³⁵ Passive layer

³⁶ lift-off

³⁷ Polyimide

³⁸ Ultrathin glass (UTG) substrates

³⁹ Annular Dark-Field STEM

⁴⁰ SAED

⁴¹ Direct Fabrication

⁴² Dark-Field

در این زمینه، استفاده از کریستال‌های تک‌بلوری^{۴۴} بسیار ارزشمند است، زیرا بستری ایده‌آل برای مطالعه‌ی اصول بنیادین مانند جوانه‌زنی و مکانیزم رشد فراهم می‌کند. همچنین، این بلورها امکان توسعه‌ی روش‌هایی برای کنترل ویژگی‌های نهایی ماده را فراهم می‌سازند.

در ادامه‌ی این بحث، بر اساس درک مکانیزم رشد مواد دوبعدی، به نظریه‌ها و راهکارهای عملی برای کنترل ویژگی‌های کلیدی بلورهای تک‌لایه پرداخته می‌شود. این ویژگی‌ها شامل اندازه بلور، تعداد لایه‌ها، جهت‌گیری بلوری، شکل ظاهری^{۴۵}، نوع فاز بلوری، ناخالصی‌های تزریق‌شده^{۴۶}، و نقص‌های ساختاری^{۴۷} هستند.

۴.۱. نظریه رشد مواد دوبعدی با روش CVD

در پژوهش‌های اولیه گزارش شده است که رشد مواد دوبعدی دی‌کالکونیدهای فلزات واسطه معمولاً از تبخیر اکسیدهای فلزی^{۴۸} و تشکیل گونه‌های زیراکسیدی^{۴۹} فرار در اثر فرایند احیا^{۵۰} ناشی می‌شود. این زیراکسیدها سپس با بخارهای کاهنده^{۵۱} (مانند گوگرد یا سلیسیم) واکنش می‌دهند و ماده TMD را روی یک زیرلایه تشکیل می‌دهند. نکته قابل توجه این است که تصور می‌شود یک گونه‌ی واسطه‌ای ناپایدار به شکل نانوذره با فرمول تقریبی Mo_xX_y (Mo: نماد شیمیایی مولیبدن^{۵۲})، که یکی از فلزات گروه ۶ جدول تناوبی است و در ساختار TMDs (مانند MoSe_2 ، MoS_2) به عنوان فلز مرکزی عمل می‌کند. X: نماد کلی برای عنصر هالوژن یا نا فلزی که با فلز (Mo) تشکیل ترکیب دی‌کلرید (MX_2) می‌دهد. در این متن، X معمولاً نشان‌دهنده گوگرد (S) یا سلیسیم (Se) است. Y: در این متن، Y به طور غیرمستقیم به عنوان بخشی از فرمول شیمیایی Mo_xX_y اشاره دارد که نشان‌دهنده تعداد اتم‌های اکسیژن (O) و اتم‌های X (S یا Se) در گونه میانی ناپایدار (Mo_xX_y) است) به عنوان منبع فلز و مکان اولیه جوانه‌زنی برای تشکیل لایه‌های TMD عمل می‌کند.

در رشد مواد دوبعدی به روش CVD، همانطور که پیش تر اشاره شد، پارامترهای متعددی مانند دمای رشد، نرخ جریان گاز، فشار، نوع زیرلایه و غیره بر فرایند جوانه‌زنی و رشد تأثیر می‌گذارند. تاکنون مدل‌های مختلفی

فلزی و کالکونیدی وارد محفظه‌ی واکنش می‌شوند و در حضور پرتوی لیزر تجزیه می‌گردند [31]. نقش لیزر در این فرایند بسیار کلیدی است: انرژی موضعی حاصل از پرتوی لیزر باعث فعال‌سازی واکنش‌های شیمیایی روی سطح زیرلایه شده و رشد ماده دوبعدی را تسهیل می‌کند [32]. لیزر می‌تواند به‌صورت متمرکز و موضعی گرما را به سطح وارد کند، بنابراین حتی در دمای کلی پایین محفظه، نواحی خاصی برای رشد فعال می‌شوند. این ویژگی باعث می‌شود که LECVD برای زیرلایه‌های حساس به دما مانند پلیمرها، شیشه‌های فوق‌نازک یا حتی فویل‌های فلزی مناسب باشد. همچنین، استفاده از لیزر این امکان را فراهم می‌کند که رشد ماده با دقت فضایی بالا کنترل شود و حتی برای ساخت الگوهای میکرو/نانومتری به کار رود.

مطالعات نشان داده‌اند که با انتخاب مناسب طول موج لیزر، توان تابشی، و شرایط گازهای واکنش‌گر، می‌توان کیفیت بلوری و یکنواختی لایه‌های TMDs رشد یافته را به‌طور چشمگیری افزایش داد. در برخی آزمایش‌ها، رشد تک‌لایه‌ای TMDs با کریستالینیتی بالا در دمای کمتر از ۳۰۰ درجه سانتی‌گراد با استفاده از LECVD گزارش شده است. همچنین، امکان کنترل اندازه دانه‌ها، کاهش نقص‌های ساختاری، و افزایش سرعت رشد از دیگر مزایای این روش محسوب می‌شوند.

در مجموع، LECVD به دلیل مزایای متعددی از جمله: رشد در دمای پایین، کنترل موضعی و دقیق رشد، حفظ کیفیت زیرلایه و پتانسیل بالا برای ادغام با فرایندهای ساخت مدارات نانو به عنوان یکی از روش‌های پیشرفته و قابل توسعه برای تولید انبوه مواد دوبعدی، به‌ویژه در صنعت الکترونیک انعطاف‌پذیر و اپتوالکترونیک، مورد توجه روزافزون قرار گرفته است.

۴.۲. رشد CVD مواد دوبعدی تک کریستالی

مطالعات اخیر نشان داده‌اند که روش (CVD) ابزار بسیار قدرتمندی برای سنتز مواد دوبعدی است [33]. با این حال، برای آنکه بتوان این مواد را در کاربردهای عملی مورد استفاده قرار داد، یکی از چالش‌های اصلی، افزایش قابلیت تکرارپذیری^{۴۳} در فرایند رشد است؛ به این معنا که بتوان در دفعات مختلف، مواد دوبعدی با ویژگی‌های یکسان تولید کرد. رسیدن به این هدف نیازمند درک عمیق و دقیق از مکانیزم رشد این مواد در شرایط CVD است. در همین راستا، ضروری است که ارتباط بین نظریه‌های رشد مواد دوبعدی و فرایندهای عملی در روش CVD به خوبی بررسی و تحلیل شود. این ارتباط به ما کمک می‌کند تا بفهمیم چگونه شرایط مختلف رشد، ساختار و خواص ماده نهایی را تعیین می‌کنند.

⁴⁴ single crystal

⁴⁵ Morphology

⁴⁶ Dopants

⁴⁷ Defects

⁴⁸ Metal oxide solid precursors

⁴⁹ Suboxides

⁵⁰ Reduction

⁵¹ Reducer vapors

⁵² Molybdenum

⁴³ Reproducibility

برای جوانه زنی و رشد مواد دوبعدی پیشنهاد شده‌اند [34]، از جمله:

- مدل لایه به لایه^{۵۳} (LBL)
- مدل لایه روی لایه^{۵۴} (LOL)
- مدل رشد ناشی از پیچش نواقص شبکه (SDD)^{۵۵}
- و مدل رشد شاخه‌ای یا دندریتی^{۵۶}

یکی از عوامل کلیدی در تعیین نوع این مدل‌های رشد، درجه‌ی فرااشباعی^{۵۷} واکنش‌دهنده‌هاست [35].

مدل LBL به‌طور معمول در فرآیند رشد گرافن و TMD ها مشاهده می‌شود. از آنجایی که جوانه‌زنی لایه‌های جدید نیاز به غلبه بر مانع انرژی بالایی دارد، معمولاً برای شروع این نوع رشد، شرایط با درجه‌ی فرااشباعی بالا لازم است تا نرخ رشد بلور قابل قبول شود. در این نوع رشد، کنترل دقیق غلظت پیش‌ماده‌ها می‌تواند منجر به کنترل دقیق تعداد لایه‌ها و حتی ساخت ساختارهای ناهمگون^{۵۸} با پشته‌بندی منظم شود.

مدل SDD ابتدا برای سنتز محلولی اکسیدها، هیدروکسیدها و نیتrideهای یک‌بعدی گزارش شده بود. اما تحقیقات جدید نشان می‌دهد که در شرایط فرااشباعی پایین در روش CVD نیز، مواد دوبعدی می‌توانند مطابق این مدل رشد کنند. در این مدل، لایه‌ی جدید از مرکز لایه‌ی اول آغاز شده و با سرعت بیشتری نسبت به لایه‌ی زیرین رشد می‌کند. زمانی که لایه‌ی بالایی به لایه‌ی پایینی برسد، رشد آن متوقف می‌شود. نتیجه‌ی این مدل رشد، ساختاری شبیه به هرم با پله‌ها و مارپیچ‌های داخلی است که ویژگی جالبی به نام رسانایی عمودی مستقل از ضخامت را از خود نشان می‌دهد [36]. این مدل رشد، امکان بالقوه‌ای را برای کنترل تعداد لایه‌ها یا حتی زاویه‌ی پشته‌بندی^{۵۹} در مواد دوبعدی فراهم می‌کند.

۲.۴. رشد کنترل‌شده‌ی مواد دوبعدی تک‌کریستالی

بر پایه‌ی نظریه‌های مطرح‌شده درباره‌ی جوانه‌زنی و رشد مواد دوبعدی در فرآیندهای CVD، در این بخش به بررسی رابطه‌ی بین ویژگی‌های مختلف بلورهای تک‌لایه‌ی دوبعدی و پارامترهای رشد در CVD می‌پردازیم و توضیح می‌دهیم که چگونه می‌توان با تغییر این پارامترها، خواص مورد نظر را کنترل کرد. به طور خاص، رشد کنترل‌شده‌ی مواد دوبعدی را می‌توان به هفت جنبه‌ی اصلی تقسیم کرد: (۱) اندازه دانه، (۲) تعداد لایه‌ها، (۳) جهت‌گیری کریستالی، (۴) ریخت شناسی، (۵) فاز کریستالی

⁵³ Layer-by-Layer, LBL

⁵⁴ Layer-over-Layer, LOL

⁵⁵ Screw-Dislocation-Driven, SDD

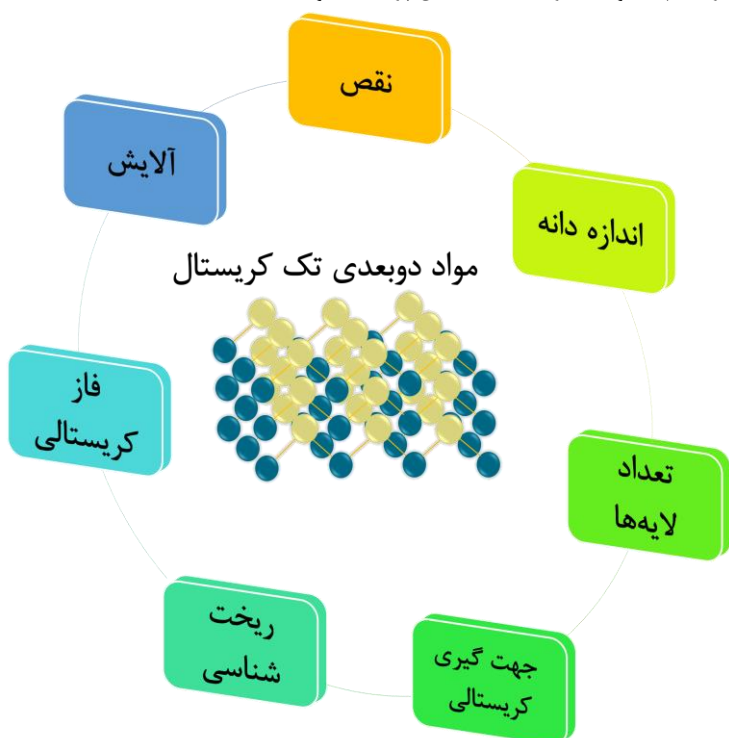
⁵⁶ Dendritic Growth

⁵⁷ Supersaturation

⁵⁸ Heterostructures

⁵⁹ Stacking rotation

۶، ناخالصی‌های افزوده‌شده (آلایش‌ها) و ۷) نقص‌ها و کیفیت ساختاری. این جنبه‌ها در شکل ۱۰ به‌صورت شماتیک نمایش داده شده‌اند و در ادامه نیز به هر کدام از موارد ذکر شده به تفصیل پرداخته خواهد شد.



شکل ۱۰- شماتیکی که چندین ویژگی کلیدی را که نیاز به کنترل در طول رشد CVD تک بلورهای دوبعدی دارند، نشان می‌دهد.

۴.۱.۲. اندازه دانه^{۶۰}

یکی از اولین مشاهدات از مرز دانه‌ها^{۶۱} در مواد دوبعدی MoS₂ رشد یافته با روش CVD، توسط نجماعی^{۶۲} و همکارانش گزارش شد [37]. این مرزهای دانه می‌توانند خواص الکترونیکی، مکانیکی و حرارتی مواد دوبعدی را تضعیف کنند. برای مثال، در مواد چندبلوری، تحرک حامل‌های بار به دلیل پراکندگی در مرزهای دانه به شدت کاهش می‌یابد، در حالی که این پراکندگی در بلورهای تک‌دانه یا تک کریستال وجود ندارد [38]. از طرفی، برای استفاده در فناوری‌های نیمه‌هادی مبتنی بر سیلیکون، وجود مواد دوبعدی با مساحت بزرگ مطلوب‌تر است [39]. همچنین، در مقایسه با نمونه‌های تک‌بلوری کوچک یا نمونه‌های چندبلوری بزرگ، بلورهای تک‌لایه با مساحت بزرگ می‌توانند سطح فعال بیشتری برای آشکارسازهای نوری فراهم کنند؛ که این موضوع به حساسیت بالا و زمان پاسخ کوتاه‌تر منجر می‌شود. بنابراین، مواد دوبعدی تک‌بلوری با اندازه‌ی بزرگ برای بسیاری از کاربردها مانند الکترونیک پیشرفته، اپتوالکترونیک، دستگاه‌های انعطاف‌پذیر و پوشیدنی، و مدیریت حرارتی ترجیح داده می‌شوند. به همین

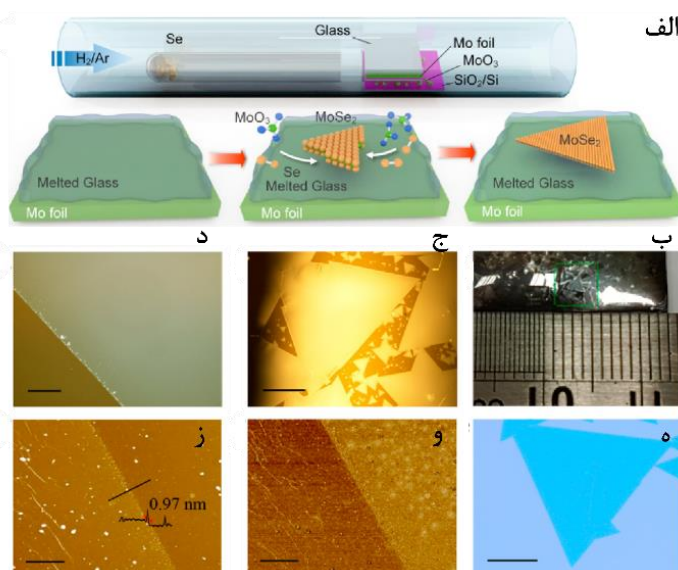
⁶⁰ Grain Size

⁶¹ Grain boundaries

⁶² Sina Najmaei

دلیل، توسعه روش‌هایی برای رشد بلورهای تک‌لایه‌ی بزرگ از خانواده‌ی TMD اهمیت زیادی دارد.

در سال‌های اخیر، تلاش‌های گسترده‌ای برای افزایش اندازه‌ی بلورهای مواد دوبعدی انجام شده و اندازه‌ی آن‌ها از زیرمیکرون به چند میکرون و در حال حاضر تا مقیاس میلی‌متری یا حتی سانتی‌متری افزایش یافته است. یکی از راهبردهای مؤثر برای رسیدن به این هدف، کاهش چگالی جوانه‌زنی^{۶۳} است. بر اساس این ایده، چن^{۶۴} و همکارانش با استفاده از بستر شیشه‌ی مذاب، موفق به رشد بلورهای تک‌لایه‌ی MoSe₂ تا اندازه حدود 2.5 میلی‌متر شدند (شکل ۱۱) [40]. سطح صاف شیشه‌ی مذاب در دمای بالا تعداد نقاط جوانه‌زنی را کاهش داده و در نتیجه، شرایط رشد بلورهای بزرگ فراهم شده است. آن‌ها توانستند در ترانزیستور ساخته‌شده از این ماده، تحرک حامل بار به میزان 95 سانتی‌متر مربع بر ولت بر ثانیه و نسبت جریان روشن/خاموش معادل 10⁷ را گزارش کنند که نشان‌دهنده‌ی کیفیت بالای بلور است. این روش استفاده از بسترهای مذاب (یا نیمه‌مایع) می‌تواند به رشد سایر مواد دوبعدی نیز کمک کند، البته به تحقیقات بیشتری برای یافتن بسترهای مناسب نیاز است.



شکل ۱۱- فرآیند سنتز و مورفولوژی تک‌لایه‌های MoSe₂ (الف) نموداری از فرآیند CVD برای سنتز بلورهای MoSe₂ روی شیشه مذاب نشان داده شده است. (ب) تصویری واقعی از بلورهای MoSe₂ رشد یافته روی شیشه مذاب. (ج، د) تصاویر اپتیکی از بلورهای MoSe₂ رشد یافته روی شیشه مذاب؛ در تصویر (ج) مقیاس ۵۰۰ میکرومتر و در تصویر (د) مقیاس ۱۰ میکرومتر است.

⁶³ Nucleation density
⁶⁴ Jianyi Chen

ه) تصویر اپتیکی از بلورهای MoSe₂ که به زیرلایه SiO₂/Si منتقل شده‌اند، با مقیاس ۵۰۰ میکرومتر. (و، ز) تصاویر فازی (و) و ارتفاعی (ز) حاصل از میکروسکوپ نیروی اتمی (AFM) از بلورهای MoSe₂ با مقیاس ۱ میکرومتر [40]

از سوی دیگر، افزودنی‌هایی که در فرآیند CVD وارد سیستم می‌شوند نیز می‌توانند چگالی جوانه‌زنی را کاهش دهند [41]. به عنوان مثال، با افزودن مقدار کمی اکسیژن به محفظه‌ی CVD، که باعث از بین رفتن جوانه‌های ناپایدار می‌شود، بلورهای تک‌لایه‌ی مثلثی شکل MoS₂ با اندازه‌هایی تا ۳۵۰ میکرومتر بر روی زیرلایه‌ی یاقوتی رشد داده شدند. نقش انرژی فعال‌سازی در رشد بلندمدت نیز بسیار مهم است. در واقع جنبه‌ی مهم دیگر در رشد بلورهای بزرگ، حفظ فعالیت واکنش^{۶۵} برای مدت طولانی است. یکی از راهکارهای مؤثر برای این منظور، کاهش انرژی فعال‌سازی واکنش‌ها است. برای مثال، گائو^{۶۶} و همکارانش موفق شدند با استفاده از مکانیسم رشد کاتالیست شده و خودمحدودشونده بر روی فویل طلا، بلورهای تک‌لایه و بزرگ WS₂ تا مقیاس میلی‌متری تولید کنند [42]. نقش طلای فلزی در این فرآیند آن است که می‌تواند مولکول S₂ را به دو اتم گوگرد شکسته و در نتیجه انرژی لازم برای سولفوریزه کردن پیش‌ماده WO₃ را کاهش دهد. نتیجه‌ی این انرژی کمتر، رشد بلورهایی با کیفیت بالا است. به روش مشابه، بلورهای MoS₂ با اندازه لبه تا ۸۰ میکرومتر و همچنین بلورهای WS₂ با اندازه تا ۱۳۵ میکرومتر بر روی زیرلایه یاقوتی رشد داده شده‌اند. با این حال، اندازه بلورهای TMD رشد یافته به روش CVD همچنان بسیار کوچکتر از بلورهای گرافن رشد یافته با همین روش است.

برای رسیدن به بلورهایی با اندازه در حد ویفر (سانتی‌متر یا اینچ)، نیاز به درک عمیق‌تری از فرآیندهای جوانه‌زنی و تشکیل مرزهای دانه داریم. همچنین کاهش چگالی جوانه‌زنی، افزایش نرخ رشد، و حفظ فعالیت رشد در بازه‌های زمانی طولانی، همگی نیازمند تحقیقات گسترده و دقیق‌تر در آینده هستند. این مسیر می‌تواند راه را برای کاربردهای صنعتی گسترده‌تر مواد دوبعدی هموار کند.

۴.۲.۲. تعداد لایه‌ها

یکی از ویژگی‌های شگفت‌انگیز مواد دوبعدی این است که می‌توان خواص آن‌ها را با کنترل تعداد لایه‌ها تنظیم کرد [43]. برای بیشتر ترکیبات TMDs، با افزایش تعداد لایه‌ها، شکاف باند کاهش می‌یابد. این تغییر خصوصاً در زمانی که تعداد کمی لایه وجود دارد، بسیار چشمگیرتر است. از این رو، مواد با تعداد لایه‌های قابل کنترل، برای کاربردهای گوناگون

⁶⁵ Maintaining the reaction activity
⁶⁶ Gao

تصویر AFM با وضوح بالا از مرز پله‌ای بین لایه اول و دوم، درون‌نمای تصویر (Inset) خطوط اسکن ارتفاع را نشان می‌دهد. d. d. (تصویر STEM-HAADF میکروسکوپ الکترونی عبوری با آشکارساز حلقه‌ای تاریک با زاویه بالا) از تک‌لایه MoSe_2 در، (د) ساختار شش‌ضلعی منظم آن را نمایش می‌دهد، و در، (ه) نمودار شدت مربوط به ناحیه خط‌چین‌شده در تصویر (نشان داده شده است. و) تصاویر STEM-HAADF از مرز بین تک‌لایه و دولایه که یک پله اتمی کاملاً تیز را نشان می‌دهد. (ز) نمودار شدت عبوری از مرز لایه اول و لایه دوم که از ناحیه مشخص شده با مستطیل خط‌چین در قسمت (و) استخراج شده است [44]

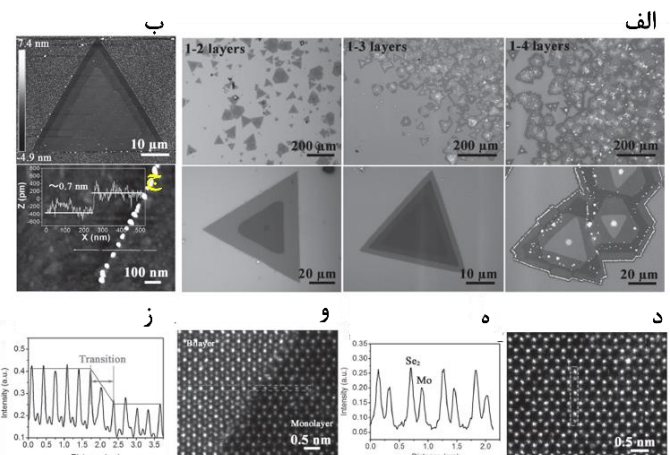
در روشی مشابه، تعداد لایه‌های WSe_2 نیز با افزایش دمای رشد افزایش می‌یابد. همچنین، با استفاده از مواد دوبعدی مختلف مانند TaS_2 ، SnS_2 و MoCl_5 می‌توان در دماهای پایین‌تر از ۵۰۰ درجه سانتی‌گراد در سیستم CVD با فشار پایین (LPCVD)، تعداد لایه‌های MoS_2 را از یک تا شش لایه کنترل کرد. در این ساختارها، به دلیل وابستگی ساختار نوارهای انرژی به تعداد لایه‌ها، مرز بین لایه‌های مجاور می‌تواند به‌عنوان پیوند نیمه‌رسانا برای ادوات پیشرفته عمل کند.

علاوه بر کنترل تعداد لایه‌ها، نحوه‌ی انباشت^{۶۷} لایه‌ها نیز می‌تواند خواص مواد و در نتیجه عملکرد آن‌ها در ادوات را تعیین کند. برای مثال، فاز ۲R از مواد TMD که انباشت نوع ABC دارد و فاقد مرکز تقارن است، در کاربردهای اسپینترونیک و ولترونیک مزایای خاصی دارد. مطالعات تئوریک وجود دو نوع ترتیب لایه‌ای مختلف را برای TMDها پیش‌بینی کرده‌اند: نظم AB با زاویه چرخش صفر درجه بین لایه‌ها و نظم AA' با زاویه ۶۰ درجه. شیا و همکارانش موفق شدند با استفاده از CVD، این دو نوع نظم را در بلورهای دولایه‌ای MoS_2 رشد دهند. این تفاوت‌ها از طریق تصاویر نوری و میکروسکوپ الکترونی عبوری با زاویه تاریک^{۶۸} قابل مشاهده‌اند.

اخیراً شیرر و همکارانش^{۶۹} نشان داده‌اند که ترتیب انباشت در WSe_2 توسط مدل رشد مبتنی بر ناپیوستگی‌های پیچی کنترل می‌شود. ترتیب انباشت متقارن یا نامتقارن با تعداد و چرخش مارپیچ‌های این ناپیوستگی‌ها (مثلاً، شش‌ضلعی یا ترکیبی) مرتبط است. مهم‌تر آن‌که، این مارپیچ‌ها را می‌توان با تغییر نسبت پیش‌ماده‌های Se و WO_3 در واکنش CVD تنظیم کرد. با وجود این پیشرفت‌ها، هنوز رابطه‌ی مشخص و دقیقی بین تعداد لایه‌ها، زاویه چرخش و پارامترهای رشد در CVD به‌خوبی شناخته نشده است. بیشتر روش‌های موجود مبتنی بر تجربه هستند و ممکن است برای مواد یا

اپتوالکترونیک بسیار مطلوب هستند. جالب‌تر آن‌که، زمانی که تعداد لایه‌های ترکیباتی مانند MoS_2 ، MoSe_2 ، WS_2 و WSe_2 به یک تک‌لایه می‌رسد، گذار از شکاف باند غیرمستقیم به شکاف باند مستقیم رخ می‌دهد. این ویژگی باعث می‌شود این مواد گزینه‌ای مناسب برای ساخت ادوات اپتوالکترونیک نظیر دیودهای نورافشان (LED)، دیودهای لیزری و سلول‌های خورشیدی باشند. علاوه بر اهمیت تعداد دقیق لایه‌ها برای کاربردهای اپتوالکترونیک، این موضوع در طراحی ساختارهای چندلایه و ناهمگن و اندروالسی نیز اهمیت دارد؛ ساختارهایی که می‌توانند خواص جدید و کاربردهای نوینی ایجاد کنند. تمام این فرصت‌ها از کنترل تعداد لایه‌ها ناشی می‌شوند، بنابراین توسعه‌ی روش‌هایی مؤثر برای کنترل دقیق این پارامتر بسیار حیاتی است.

برای دستیابی به کنترل تعداد لایه‌ها در TMDها، روش‌های گوناگونی معرفی شده است. به عنوان مثال، رشد MoS_2 تک تا سه‌لایه‌ای با استفاده از زیرلایه‌های تحت تیمار پلاسما-اکسیژن گزارش شده است [44]. همچنین، با کنترل دمای رشد در یک فرآیند CVD تک‌مرحله‌ای، می‌توان تعداد لایه‌های MoSe_2 را از یک تا چهار لایه تنظیم کرد. به طور خاص، رشد در دماهای ۷۵۰، ۸۲۵ و ۹۰۰ درجه سانتی‌گراد به ترتیب منجر به تشکیل تک‌لایه، دولایه و سه تا چهار لایه MoSe_2 می‌شود. افزایش دما باعث می‌شود پیش‌ماده‌هایی مانند Mo یا Se سریع‌تر تبخیر شوند و در غلظت بالاتری به زیرلایه برسند. این افزایش جریان ماده باعث می‌شود جوانه‌زنی و رشد لایه‌های جدید روی لایه‌ی قبلی راحت‌تر انجام شود (شکل ۱۲).

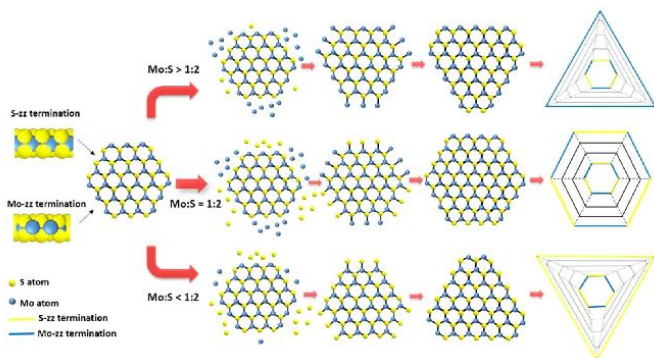


شکل ۱۲-مورفولوژی رشد در مقیاس بزرگ و با قابلیت کنترل تعداد لایه‌ها در فرآیند CVD برای MoSe_2 (الف) تصاویر اپتیکی از رشد CVD لایه‌های ۱ تا ۲، ۱ تا ۳، و ۱ تا ۴ MoSe_2 ، که نشان‌دهنده بازدهی بالای تولید چندلایه‌های MoSe_2 است (ب) مشخصه‌یابی به کمک میکروسکوپ نیروی اتمی (AFM) از یک نمونه سه‌لایه MoSe_2 (ج)

⁶⁷ Stacking

⁶⁸ High angle annular dark field scanning transmission electron microscope (HAADF-STEM)

⁶⁹ Shearer et al



شکل ۱۳ - تصویر شماتیکی از رابطه بین نسبت اتمی مولیبدن به گوگرد (Mo:S) و شکل دامنه (بلور). مدل‌های توپ و میله در بخش میانی، نمایی از ریزساختار بلور تک‌لایه MoS_2 را در شکل‌های مختلف از نمای بالا نشان می‌دهند. مدل‌های کروی در سمت چپ، دو نوع پایانه (لبه) متفاوت برای ساختار MoS_2 را نمایش می‌دهند. نمودار شماتیک در سمت راست، روند تغییر شکل دامنه را بر اساس نرخ رشد دو نوع پایانه مختلف توضیح می‌دهد [45]

چرا شکل بلورها متفاوت می‌شود؟ شکل بلورهای رشد یافته به میزان سختی حرکت اتم‌ها در لبه‌های بلور^{۷۲} (مانع انتشار لبه‌ای) بستگی دارد. وقتی این مانع زیاد باشد، اتم‌هایی که به لبه می‌رسند، نمی‌توانند به راحتی جای مناسب خود را پیدا کنند، در نتیجه شکل بلور نامنظم و پیچیده می‌شود، مثل ساختارهای شاخه‌ای. بر اساس محاسبات تئوری، می‌توان با تغییر نسبت اتم‌های Mo و S در محیط رشد، شکل و لبه‌های بلور MoS_2 را تغییر داد. این تغییرات می‌تواند خواص الکترونیکی و مغناطیسی ماده را تحت تأثیر قرار دهد.

عوامل تعیین‌کننده مورفولوژی عبارتند از: نسبت پیش‌ماده‌ها (Mo و S)، نوع بستر، سرعت جریان گاز و دما. همه‌ی این‌ها بر سینتیک رشد بلور تأثیر می‌گذارند و فرصت خوبی برای مطالعه‌ی دقیق‌تر سازوکار رشد بلورها فراهم می‌کنند. بر اساس نظریه‌ی رشد بلور، شکل بلور توسط سرعت رشد سطوح مختلف بلور تعیین می‌شود. به عنوان مثال، در یک مطالعه، پژوهشگران بررسی کرده‌اند که چطور نسبت جرم پیش‌ماده‌ها، دما، و جریان گاز روی شکل بلور MoS_2 تأثیر می‌گذارد.

با تغییر فاصله‌ی منبع Mo تا زیرلایه، می‌توان غلظت بخار MoO_3 را تغییر داد و در نتیجه نسبت Mo/S در واکنش را کنترل کرد. در این حالت، شکل MoS_2 از مثلث ناقص به مثلث کامل و سپس به اشکال دیگر مانند شش‌ضلعی‌های کوچک تغییر پیدا کرده است. دلیل این تغییرات، تفاوت در سرعت رشد لبه‌های مختلف بلور است. مثلاً لبه‌های «زیگزاگ سولفور» (S-) و «زیگزاگ مولیبدن» (Mo-zz) بر اساس نسبت نسبی این عناصر

سیستم‌های CVD دیگر به درستی عمل نکنند. به همین دلیل، مطالعه‌ی بیشتر برای درک عمیق‌تر از مکانیزم کنترل تعداد لایه‌ها در مواد دوبعدی ضروری است. به عنوان مثال، نشان داده شده است که غلظت پیش‌ماده‌ها تأثیر مهمی بر مکان جوانه‌زنی دارد (یعنی جوانه‌زنی در لبه‌ها یا بر سطح لایه‌های موجود). این موضوع می‌تواند برای کنترل دقیق رشد لایه‌ها در TMDها مفید باشد.

۳.۲.۴. ریخت‌شناسی^{۷۰}

کنترل مورفولوژی در مواد دوبعدی اهمیت زیادی دارد، چون به ما کمک می‌کند رابطه‌ی بین ساختار فیزیکی ماده و عملکرد آن را در کاربردهایی مثل کاتالیست، حسگرها، و سامانه‌های انرژی بهتر درک کنیم. برای مثال، در روش تولید هیدروژن الکتروشیمیایی (HER)، عملکرد کاتالیستی مواد TMD با تعداد لبه‌های فعال بلورها ارتباط مستقیم دارد؛ یعنی هر چه تعداد لبه‌های فعال بیشتر باشد، فعالیت کاتالیستی هم بهتر است. بنابراین شکل ظاهری بلور تأثیر مستقیمی روی عملکرد آن دارد.

از طرف دیگر، چون ساختار بلوری TMDها به طور طبیعی دارای تقارن شبکه سه‌گانه^{۷۱} است، بلورهایی که در فرایند CVD رشد می‌کنند معمولاً مثلثی هستند. تقارن سه‌گانه یعنی اگر بلور را به دور یک محور عمودی ۱۲۰ درجه بچرخانیم، شکل آن تغییری نمی‌کند. این تقارن، بیانگر آن است که بلور دارای سه بخش متقارن است که هر کدام نسبت به دیگری با زاویه‌ی ۱۲۰ درجه قرار گرفته‌اند. به زبان ساده‌تر، اگر یک بلور را سه بار بچرخانیم (هر بار ۱۲۰ درجه)، به همان شکل اولیه برمی‌گردد. این تقارن از ساختار شش‌ضلعی شبکه‌ی اتمی TMDها ناشی می‌شود. در این مواد: اتم‌های فلزی (مثل Mo یا W) در یک لایه میانی قرار دارند. دو لایه از اتم‌های غیر فلزی (مثل S یا Se) بالا و پایین آن را احاطه کرده‌اند. این سه لایه با هم ساختار لایه‌ای شش‌ضلعی ایجاد می‌کنند. به دلیل این تقارن، بلورها اغلب به صورت مثلثی یا شش‌ضلعی رشد می‌کنند [45] (شکل ۱۳). البته، مورفولوژی‌های متنوع دیگری هم مانند شاخه‌دار^{۷۲}، مثلث ناقص^{۷۳}، ستاره سه‌شاخه^{۷۴}، شش‌ضلعی^{۷۵} و ستاره شش‌پر^{۷۶} نیز مشاهده شده‌اند.

⁷⁰ Morphology

⁷¹ Threefold lattice symmetry

⁷² Dendritic

⁷³ Truncated triangles

⁷⁴ Three-pointed stars

⁷⁵ Hexagons

⁷⁶ Six-pointed stars

⁷⁷ Barrier for edge diffusion

تشکیل می‌شوند. در غلظت بالای Mo، لبه‌های S-zz به اتم‌های Mo متصل می‌شوند و ساختارهایی با لبه‌های Mo-zz ایجاد می‌کنند.

در رشد WSe_2 ، با افزایش دمای CVD، شکل بلورها از مثلث و مثلث بریده به شش‌ضلعی تغییر کرده است. همچنین رشد بلورهای شاخه‌ای MoS_2 نیز گزارش شده که عملکرد بسیار خوبی در واکنش HER نشان داده‌اند.

استراتژی‌های کنترل مورفولوژی که برای TMD ها استفاده شده، می‌تواند برای مواد دوبعدی دیگر مثل گرافن و Mo_2C نیز به کار گرفته شود.

۴.۲.۴. جهت‌گیری^{۷۸} کریستالی

کنترل جهت‌گیری بلورها برای مرتب‌سازی دامنه‌های مواد دوبعدی یکی از عوامل کلیدی در درک مکانیسم جوانه‌زنی و رشد آن‌هاست [46]. از یک طرف، زاویه نسبی بین دامنه‌های ۲ بعدی و زیرلایه اطلاعات مهمی درباره‌ی مدل جوانه‌زنی به ما می‌دهد و راهی نو برای بررسی چگونگی آغاز رشد آن‌هاست. از طرف دیگر، اگر بلورها با جهت‌گیری ناهم‌آهنگ^{۷۹} رشد کنند، در هنگام بهم‌پیوستن دامنه‌های مجاور، مرز دانه و عیوب^{۸۰} بلوری به وجود می‌آید که خواص الکتریکی، حرارتی و مکانیکی ماده را تضعیف می‌کند [47], [13].

در مورد گرافن گزارش شده است که اگر دامنه‌های شش‌ضلعی موازی (یعنی با زاویه چرخش ۶۰ درجه نسبت به هم) با هم ادغام شوند، امکان رشد کریستال‌های تک‌بلوری در ابعاد متری وجود دارد [48]. بنابراین منطقی است که برای مواد TMD (مانند MoS_2 یا WS_2) نیز، اگر دامنه‌های مثلثی هم‌راستا (با زاویه چرخش ۱۲۰ درجه) رشد یابند، بتوان آن‌ها را به یک تک‌بلور بزرگ تبدیل کرد.

کنترل جهت‌گیری دامنه‌ها برای رشد بلورهای تک‌دامنه‌ای در ابعاد ویفر^{۸۱} اهمیت بالایی دارد؛ زیرا باعث ساخت دستگاه‌های بزرگ و یکنواخت با مرزهای دانه کمتر و عملکرد بهتر می‌شود.

تحقیقات جدید نشان داده‌اند که زیرلایه نقش مهمی در کنترل جهت‌گیری شبکه بلورهای TMD دارد. عواملی مانند: نیروی واندروالسی قوی بین ماده و زیرلایه و میزان تطابق شبکه بلوری^{۸۲} تعیین می‌کنند که ماده رشد یافته در کدام جهت ترجیح می‌دهد رشد کند. یا قوت صفحه^{۸۳} C یک زیرلایه رایج

⁷⁸ Orientation

⁷⁹ Misoriented

⁸⁰ Defects

⁸¹ Wafer-scale

⁸² Lattice matching

⁸³ C-plane sapphire

است؛ چون بلور تک‌بلوری با تقارن شبکه مناسب دارد. با الهام از رشد جهت‌دار نانولوله‌های کربنی، روش رشد هدایت‌شده با لبه‌ی پله‌ای^{۸۴} برای رشد هم‌راستای WSe_2 روی یا قوت صفحه C معرفی شده است. در این روش، WSe_2 ترجیح می‌دهد در امتداد پله‌های اتمی روی سطح یا قوت جوانه بزند و در نتیجه، بلورهای منظم با لبه‌هایی موازی با این پله‌ها شکل می‌گیرند. این موضوع با تصاویر SEM و AFM تأیید شده است.

در رشد بلوری هم‌راستا^{۸۵} MoS_2 روی یا قوت c-plane، تنها چند جهت بلوری خاص (۰ و ۶۰ درجه به عنوان جهت‌های غالب، و ۳۰ و ۹۰ درجه به عنوان جهت‌های فرعی) مشاهده شده‌اند. این موضوع به تطابق شبکه بلوری MoS_2 با زیرلایه یا قوت نسبت داده شده است. همچنین، گرافیت با جهت‌گیری بالا^{۸۶} نیز می‌تواند به رشد منظم دامنه‌های MoS_2 کمک کند.

برای کنترل بهتر جهت‌گیری می‌توان کنترل جهت جریان گاز، تنظیم دمای رشد، و انتخاب زیرلایه‌ی مناسب را هم‌زمان به کار برد. در مقایسه با اندازه بلور و تعداد لایه‌ها، کنترل جهت‌گیری کمتر بررسی شده است. اما این موضوع در رشد مواد تک‌بلوری بسیار مهم است.

۴.۲.۵. فاز^{۸۷} کریستالی

مواد دوبعدی TMD به دلیل ساختار لایه‌ای خاص خود، می‌توانند در فازهای بلوری متفاوتی ظاهر شوند [49]. کنترل فاز یکی از جنبه‌های بسیار مهم در رشد این مواد به شمار می‌رود، چرا که فازهای مختلف خواص فیزیکی و الکترونیکی بسیار متفاوتی دارند. در ساختار کلی TMD ها با فرمول عمومی MX_2 ، سه لایه از اتم‌ها به صورت X-M-X (مثلاً S-W-S) قرار دارند. اگر این لایه‌ها با چینش ABA روی هم قرار گیرند، ساختار موسوم به فاز 2H شکل می‌گیرد که در آن اتم فلز در مرکز یک منشور سه‌گوش از کالکوزن‌ها قرار دارد. این فاز دارای خاصیت نیمه‌رسانایی است. در مقابل، اگر لایه‌ها با چینش ABC بر هم منطبق شوند، فاز 1T حاصل می‌شود که در آن فلز در یک محیط هشت‌وجهی قرار دارد و رفتار فلزی دارد. [50] همچنین، در بسیاری از فلزات گروه ۷، نسخه‌ای دگرگون‌شده از فاز 1T با ساختاری موج‌دار به نام فاز 1T' مشاهده می‌شود.

ویژگی مهم این فازها در آن است که بدون نیاز به افزودن یا حذف اتم‌ها، می‌توان با تغییر ساختار لایه‌ای، خواص ماده را تغییر داد. بنابراین، کنترل مستقیم فاز در حین رشد ماده، کاربرد آن را در حوزه‌های مختلف تسهیل می‌کند.

⁸⁴ Step-edge guided growth

⁸⁵ Epitaxial growth

⁸⁶ Highly oriented pyrolytic graphite (HOPG)

⁸⁷ Phase

مهندسی فاز در TMD ها باشد [55]. با توجه به پیشرفت‌های اخیر، این امید وجود دارد که رشد مستقیم بلورهای با کیفیت بالا و فازهای ناپایدار TMD، به‌ویژه با ترکیبات گوگرد و سلنیم، از طریق روش‌های کنترل‌شده CVD در آینده‌ای نزدیک به واقعیت تبدیل شود.

۴.۶.۲. آلایش^{۹۲}

یکی از روش‌های مؤثر برای بهبود و تنظیم خواص مواد دوبعدی، به‌ویژه TMD ها، استفاده از آلایش عنصری است. از آنجایی که برخی از این مواد ذاتاً دارای خواص الکترونیکی یا شیمیایی محدودی هستند، می‌توان با افزودن مقدار کمی از عناصر دیگر به ساختار آن‌ها، ویژگی‌های مورد نظر را به‌صورت هدفمند تغییر داد. به‌ویژه، آلایش به‌عنوان ابزاری برای تنظیم ساختار الکترونی مواد TMD و همچنین بهبود خواص فیزیکی و شیمیایی آن‌ها کاربرد گسترده‌ای پیدا کرده است. با توجه به شباهت‌های ساختاری در میان خانواده‌ی TMD، امکان ساخت ترکیبات سه‌تایی از طریق آلایش وجود دارد. برای نمونه، می‌توان فلز را آلایش کرد و موادی مانند $\text{Mo}_x\text{W}_{1-x}\text{S}_2$ به دست آورد که در آن بخشی از اتم‌های مولیبدن با تنگستن جایگزین شده‌اند. همچنین می‌توان با آلایش کالکوزن، ساختارهایی مانند $\text{WS}_2\text{xSe}_{2-2x}$ تولید کرد که در آن گوگرد و سلنیم به‌صورت جزئی جایگزین یکدیگر شده‌اند [56]. با این حال، آلایش فلزی معمولاً دشوارتر از آلایش کالکوزنی است، چرا که اتم‌های فلز در لایه‌ی میانی ساختار سه‌لایه‌ی TMD قرار گرفته‌اند، و دسترسی به آن‌ها حین فرآیند رشد سخت‌تر است. در مقابل، اتم‌های کالکوزن که در لایه‌های خارجی قرار دارند، آسان‌تر در دسترس بوده و فرایند آلایش آن‌ها نیز ساده‌تر است. از سوی دیگر، کنترل دقیق غلظت اتم‌های آلایند در حین رشد ماده نیز یکی از چالش‌های مهم و فعال در این حوزه به شمار می‌رود که هنوز نیاز به پژوهش‌های بیشتری دارد.

با این وجود، روش رشد شیمیایی از فاز بخار (CVD) یکی از شیوه‌های نویدبخش برای کنترل موقعیت و غلظت اتم‌های آلایند در مواد TMD به‌شمار می‌رود. در این روش، یکی از استراتژی‌های رایج برای تهیه مواد سه‌تایی آن است که در هنگام رشد ماده، پیش‌ماده‌ی عنصر آلایند نیز همراه با سایر پیش‌ماده‌ها وارد محفظه واکنش شود. به عنوان نمونه، در ساخت $\text{WS}_2\text{xSe}_{2-x}$ ، با قرار دادن هم‌زمان پیش‌ماده‌های گوگرد و سلنیم در سامانه‌ی CVD، می‌توان به ماده‌ای با ترکیب کنترل‌شده‌ی هر دو عنصر دست یافت [57].

در شرایط معمولی رشد شیمیایی از فاز بخار (CVD)، معمولاً فازهای پایدار مانند 2H به‌راحتی رشد می‌کنند، اما تولید مستقیم فازهای ناپایدار مانند 1T و 1T' به دلیل محدودیت‌های ترمودینامیکی چالش‌برانگیز است. مطالعات میکروسکوپی STEM درجا نشان داده‌اند که تبدیل فاز 2H به 1T در MoS_2 به‌صورت مرحله‌به‌مرحله و با جابه‌جایی اتم‌ها انجام می‌شود. در این فرایند، وجود یک فاز میانی (α -phase) با ساختار نواری و تابش پرتو الکترونی نقش کلیدی در تسهیل تبدیل فاز ایفا می‌کنند.

برای تولید فازهای ناپایدار، روش‌های مختلفی به کار گرفته می‌شود؛ از جمله درج یون‌های فلزات قلیایی^{۸۸} مانند لیتیوم در بین لایه‌ها [51] تابش پرتو الکترونی^{۸۹} [52]، پلاسما^{۹۰} [53]، یا حتی اعمال نیروی مکانیکی [54]، نمک‌های لیتیوم‌دار مانند n-butyl lithium در مهندسی فاز این مواد نقش پررنگی دارند. همچنین، استفاده از پیش‌ماده‌هایی مانند LiOH و $(\text{NH}_4)_2\text{MoS}_4$ در واکنش حرارتی منجر به درج یون لیتیوم در ساختار MoS_2 و تولید فاز 1T می‌شود. هرچند این فاز در حالت عادی ناپایدار است، اما با تبدیل لیتیوم به هیدرید لیتیوم می‌توان آن را در برابر هوا پایدار کرد.

هرچند گزارش‌های اندکی از رشد مستقیم فازهای ناپایدار از طریق واکنش CVD وجود دارد، اما برخی مطالعات موفق به این کار شده‌اند. برای مثال، با گوگردی کردن پتاسیم مولیبدات در CVD، موفق به تولید MoS_2 در فاز 1T شده‌اند، که در آن یون پتاسیم نقش پایداری فاز را بر عهده دارد. همچنین، رشد فاز 1T از WS_2 با روش سنتز کلوتیدی در حلال‌های غیرآبی نیز گزارش شده است. در این روش‌ها، کنترل واکنش‌پذیری پیش‌ماده‌ها و زمان واکنش، فاز نهایی را تعیین می‌کند.

در مطالعه‌ای جدید، محققان نشان دادند که می‌توان با تنظیم نرخ جریان گاز حامل و دمای واکنش، به کنترل پیوسته فازها در MoTe_2 دست یافت. به عنوان مثال، نرخ جریان گاز بالا و دمای پایین برای رشد فاز 1T' مناسب‌تر هستند. در مطالعه‌ای دیگر، با استفاده از آمونیوم هپتامولیبدات، تلوریم، و عامل کمکی سدیم کولات، موفق به رشد تک‌لایه‌ای فاز 1T' MoTe_2 با ساختار تک‌بلوری شدند. جالب‌تر آن که در همان فرایند CVD، با تغییر دمای رشد و سردسازی^{۹۱}، امکان رشد انتخابی هر سه فاز 1T، 2H و 1T' فراهم شده است.

این نتایج نشان می‌دهند که استفاده از یون‌های فعال‌کننده، تنظیم دقیق شرایط واکنش و انتخاب دقیق پیش‌ماده‌ها می‌تواند راهی مؤثر برای

⁸⁸ Alkali metal intercalation

⁸⁹ Electron beam irradiation

⁹⁰ Plasma treatment

⁹¹ Quenching

به طور کلی، آرایش عنصری ابزار بسیار مؤثری برای گسترش دامنه‌ی کاربردی مواد دوبعدی است و می‌تواند نقش کلیدی در توسعه‌ی نسل جدیدی از نانو ساختارهای الکترونیکی، نوری و شیمیایی ایفا کند.

۴.۷.۲.۴. نقص^{۹۳}

یکی از عوامل کلیدی در رشد موفق مواد TMD، کنترل کیفیت و نقص‌های ساختاری است. از یک سو، برای دستیابی به عملکرد بالا در کاربردهای الکترونیکی و اپتوالکترونیکی، به مواد TMD با کیفیت بسیار بالا نیاز داریم. اما متأسفانه، در روش‌های فعلی رشد این مواد، به‌ویژه روش رشد شیمیایی از فاز بخار (CVD)، ایجاد نقص‌ها و ناخالصی‌ها تقریباً اجتناب‌ناپذیر است. این نقص‌ها، مانند ناخالصی‌های باردار، تله‌های الکترونی و نواحی معیوب، می‌توانند به‌شدت تحرک حامل‌های بار را کاهش دهند. از سوی دیگر، اگر نوع و چگالی نقص‌ها به‌صورت کنترل‌شده باشد، این نقص‌ها می‌توانند برای برخی کاربردها مانند کاتالیز، ذخیره و تبدیل انرژی، حسگرها و... مفید باشند. به عنوان مثال، محاسبات نظری نشان داده‌اند که اگر در ماده MoS₂ یک ردیف از جای‌خالی‌های گوگرد (نقص‌های خطی) ایجاد شود، ساختار نواری آن می‌تواند از حالت نیمه‌رسانا به فلزی تغییر یابد [58]. همچنین، ایجاد جای‌خالی‌های سلنیوم در WSe₂ با استفاده از پلاسما باعث آرایش نوع n و افزایش هدایت الکتریکی آن شده است [59]. بنابراین، کنترل دقیق نوع و مقدار نقص‌ها یکی از موضوعات مهم و چالش‌برانگیز است. برای تحقق این هدف، باید ابتدا مکانیزم‌های تشکیل نقص‌ها به‌ویژه جای‌خالی‌ها (که رایج‌ترین نوع نقص‌ها هستند) به‌خوبی درک شوند. همچنین، روش‌ها و اصول کنترل این نقص‌ها در حین رشد CVD نیز باید بررسی شده و روش‌هایی مؤثر برای ترمیم یا بازیابی نقص‌ها توسعه یابد.

در بین انواع نقص‌ها، جای‌خالی کالکوزن‌ها (گوگرد، سلنیوم و تلوریوم) شایع‌ترین هستند، زیرا انرژی لازم برای تشکیل آن‌ها کم است. به عنوان نمونه، با استفاده از محاسبات نظری، مکانیزم تشکیل جای‌خالی گوگرد در MoS₂ بر اثر تابش الکترونی بررسی شده است. همچنین، بررسی‌ها نشان داده‌اند که تعداد جای‌خالی‌های گوگرد بر ویژگی‌هایی مانند تحرک الکترونی و شدت فوتولومینسانس^{۹۴} (نوردهی بر اثر تحریک نوری) تأثیر مستقیم دارد. این جای‌خالی‌ها می‌توانند مانند دهنده‌های الکترونی عمل کرده و حالت‌های موضعی در نوار گاف ایجاد کنند که بر انتقال بار اثر می‌گذارند.

علاوه بر کالکوزن‌ها، جای‌خالی فلزات نیز می‌توانند تأثیر قابل توجهی بر خواص کلی ماده داشته باشند. برخلاف جای‌خالی کالکوزن‌ها که معمولاً تله‌های سطحی ضعیف ایجاد می‌کنند، جای‌خالی فلزات معمولاً با تله‌های

عمیق همراه هستند و اثر شدیدتری بر تحرک الکترون‌ها و خواص نوری دارند. برای مثال، در یک مطالعه، رشد WS₂ تک‌لایه با استفاده از پیش‌ماده‌های خاص در CVD انجام شده که در آن هم جای‌خالی گوگرد و هم جای‌خالی تنگستن به‌صورت منظم و مثلثی شکل در ساختار نهایی دیده شده‌اند. این نقص‌ها با استفاده از تصاویر STEM و طیف‌سنجی نوری به‌خوبی شناسایی شدند. علت این نقص‌ها، تغییرات در غلظت تنگستن در شرایط خاص رشد بوده است.

برای ترمیم این نقص‌ها، روش‌های پس‌پردازش نیز توسعه یافته‌اند. به‌عنوان نمونه، یو و همکارانش^{۹۵} با استفاده از ترکیبی به نام مرکاپتو پروپیل تری متوکسی سیلان^{۹۶} موفق شدند جای‌خالی‌های گوگرد در MoS₂ را ترمیم کنند که نتیجه‌ی آن افزایش تحرک الکترونی به‌دلیل کاهش ناخالصی‌ها و تله‌ها بود [60]. همچنین، در مورد مواد سلنیومی، تیمی دیگر از اسیدهای هیدروهالیک^{۹۷} برای کاهش جای‌خالی سلنیوم استفاده کردند و توانستند شدت نوردهی (PL) را تا ۳۰ برابر افزایش دهند. در این موارد، رفتار زوج‌های الکترون-حفره قبل و بعد از ترمیم نیز با روش‌های نوری بررسی شده است [61].

روش‌های دیگر مانند استفاده از لیزر برای پر کردن جای‌خالی با اکسیژن نیز گزارش شده‌اند. برای مثال، لو و همکارانش^{۹۸} با استفاده از پرتوی لیزر در شرایط محیطی موفق شدند جای‌خالی‌های کالکوزن را با اکسیژن پر کنند [62]. نتایج این پژوهش‌ها نشان می‌دهد که استفاده از روش‌های شیمیایی مناسب می‌تواند نقص‌های نقطه‌ای را به‌خوبی حذف کرده و تله‌های موجود در TMD را کاهش دهد.

همچنین، افزودن برخی مواد به درون سامانه‌ی واکنش CVD در حین رشد ماده، ممکن است راهکار ساده‌ای برای جلوگیری از ایجاد نقص‌ها یا حتی ترمیم هم‌زمان آن‌ها باشد. برای مثال، ژو و همکارانش^{۹۹} در حین رشد MoTe₂ از ماده‌ای به نام الکالین مولکولی استفاده کردند که محصولات جانبی را جذب می‌کرد [63]. این روش نه تنها کیفیت رشد را افزایش داد بلکه زمینه را برای پر کردن نقص‌ها با افزودنی‌های خاص فراهم کرد.

در مواد دوبعدی خانواده دی‌کالکوزن‌های فلزات واسطه (TMDها)، نقص‌های ساختاری نقش بسیار مهمی در تعیین عملکرد نهایی دستگاه‌های اپتوالکترونیکی ایفا می‌کنند. این نقص‌ها، که عمدتاً شامل جای‌خالی‌های اتمی (به‌ویژه جای‌خالی کالکوزن‌ها مثل گوگرد و سلنیوم)، ناخالصی‌ها و

^{۹۵} Yu et al.

^{۹۶} 3-mercaptopropyl trimethoxysilane

^{۹۷} Hydrohalic acids

^{۹۸} Lu et al.

^{۹۹} Zhou et al

^{۹۳} Defect

^{۹۴} Photoluminescence

مراکز تله هستند، می‌توانند تأثیرات مثبت یا منفی بر خواص الکترونیکی و نوری ماده داشته باشند، بسته به نوع، چگالی و نحوه توزیع آن‌ها. بنابراین از منظر منفی، وجود نقص‌ها به‌ویژه مراکز تله، منجر به افزایش نرخ بازترکیب حامل‌های بار می‌شود، که این موضوع باعث کاهش بهره کوانتومی و حساسیت در ادواتی نظیر سلول‌های خورشیدی، فتودیودها و فوتودتکتورها می‌گردد. همچنین، نقص‌ها موجب پراکندگی و افت تحرک حامل‌های بار در ترانزیستورهای اثر میدانی می‌شوند و ناپایداری عملکرد، نویز بالا و کاهش سرعت سوئیچینگ را به دنبال دارند. در حسگرهای اپتوالکترونیکی نیز، هرچند برخی نقص‌های سطحی می‌توانند حساسیت را افزایش دهند، اما اگر کنترل نشده باشند باعث افزایش نویز و کاهش نسبت سیگنال به نویز خواهند شد.

با این حال، در شرایطی که نقص‌ها به‌طور هدفمند و کنترل شده ایجاد شوند، می‌توانند به عنوان ابزار مهندسی خواص ماده مورد استفاده قرار گیرند. برای مثال، ایجاد جای‌خالی‌های گوگرد در MoS_2 می‌تواند منجر به تغییر ساختار نواری ماده از نیمه‌رسانا به فلز شود که برای برخی کاربردهای الکترونیکی و کاتالیستوری مفید است. همچنین، ایجاد جای‌خالی‌های سلنیوم در WSe_2 به روش‌هایی نظیر تیمار پلاسما، می‌تواند ماده را به‌صورت مؤثر آلایش n کرده و رسانایی آن را افزایش دهد.

نقص‌های کالکوزن معمولاً به‌دلیل انرژی تشکیل پایین، رایج‌ترین نوع نقص در TMDها هستند. این نقص‌ها باعث ایجاد ترازهای انرژی موضعی در ناحیه نوار ممنوعه می‌شوند که می‌توانند نقش دهنده الکترون داشته و روی رفتار نوری و الکتریکی ماده اثر بگذارند. به‌عنوان مثال، در MoS_2 ، این نقص‌ها منجر به فرآیند رسانش از نوع جهش همسایه‌نزدیک یا جهش با برد متغیر می‌شوند.

برای بهره‌برداری بهتر از خواص اپتوالکترونیکی مواد TMD و کاهش اثرات منفی نقص‌ها، شناخت دقیق مکانیزم‌های ایجاد و تأثیر آن‌ها بر ساختار باند و دینامیک حامل‌های بار ضروری است. همچنین، توسعه روش‌های ترمیم مانند تیمار شیمیایی با ترکیبات گوگرددار، استفاده از اسیدهای خاص برای حذف جای‌خالی‌های سلنیوم، یا استفاده از پرتو لیزر برای پر کردن نقص‌ها با اکسیژن، می‌تواند نقش مؤثری در بهبود عملکرد نهایی دستگاه‌های اپتوالکترونیکی داشته باشد.

در نهایت، مهندسی نقص در TMDها، نه تنها چالشی برای افزایش کیفیت، بلکه ابزاری قدرتمند برای تنظیم خواص اپتوالکترونیکی این مواد در کاربردهای متنوع نسل جدید فناوری‌های نوری و الکترونیکی محسوب می‌شود.

۵. ساختار ناهمگون^{۱۰۰}

ساختارهای ناهمگون در واقع ترکیبی هدفمند از دو یا چند ماده‌ی متفاوت هستند که با کنار هم قرار گرفتن، خواص جدید و گاه شگفت‌انگیزی ایجاد می‌کنند. مواد دوبعدی مانند گرافن، فسفرین، نیتريد بور (h-BN) و

دی‌کالکوزنیدهای فلزات واسطه به دلیل ضخامت بسیار کم‌شان، رفتارهای منحصر به فردی در حوزه‌های فیزیکی و مهندسی از خود نشان می‌دهند. وقتی این مواد دوبعدی مختلف در کنار هم چیده می‌شوند مانند لایه‌های یک ساندویچ یا قطعات یک پازل دقیق خواصی به وجود می‌آید که در هیچ‌یک از آن‌ها به‌تنهایی دیده نمی‌شود. این ترکیب‌ها می‌توانند ویژگی‌های الکترونیکی، نوری و مکانیکی مواد را به شکل چشمگیری دگرگون کنند. برای نمونه، برخی از این ساختارهای ترکیبی می‌توانند رسانایی الکتریکی را افزایش دهند یا توانایی جذب نور را بهبود ببخشند.

با انتخاب آگاهانه‌ی نوع مواد و نحوه‌ی چیدمان آن‌ها، می‌توان ویژگی‌های این ساختارها را به گونه‌ای تنظیم کرد که برای کاربردهای خاص، مانند اپتوالکترونیک پیشرفته یا فوتونیک، کاملاً بهینه باشند. پژوهشگران تاکنون موفق شده‌اند ساختارهای ناهمگون دوبعدی متنوعی را در دو پیکربندی اصلی تولید کنند: افقی^{۱۰۱} (جانبی) و عمودی^{۱۰۲}.

این ساختارها شامل ترکیب‌های فلز/عایق، نیمه‌هادی/نیمه‌هادی و نیمه‌هادی/فلز هستند. انعطاف‌پذیری بالا در چیدمان لایه‌ها و انتخاب نوع اتصال بین آن‌ها، امکان طراحی مواد با ویژگی‌های الکترونیکی، نوری و مکانیکی کاملاً سفارشی را فراهم کرده است.

در بسیاری از فناوری‌های پیشرفته امروزی نظیر تراشه‌های الکترونیکی پرسرعت، حسگرهای دقیق، سلول‌های خورشیدی نسل جدید، و حتی حوزه نوپای «الکترونیک پیچشی^{۱۰۳}» که با چرخاندن زاویه‌ای لایه‌ها خواص الکترونیکی را کنترل می‌کند—نیاز به موادی با عملکرد سریع، بهره‌وری بالا و قابلیت تنظیم دقیق وجود دارد. ساختارهای ناهمگون مبتنی بر مواد دوبعدی، پاسخ مناسبی به این نیازهای پیچیده و رو به رشد هستند. به طور کلی، ساختارهای ناهمگون دوبعدی به دو دسته‌ی اصلی تقسیم می‌شوند (شکل ۱۴):

ساختارهای ناهمگون عمودی: در این حالت، لایه‌های مختلف از مواد دوبعدی به‌صورت عمودی روی هم چیده می‌شوند، مانند یک ساندویچ چندلایه.

ساختارهای ناهمگون جانبی: در این نوع، مواد مختلف در یک سطح مشترک و به‌صورت کنار هم قرار می‌گیرند، مشابه تکه‌های موزاییک.

¹⁰¹ Lateral

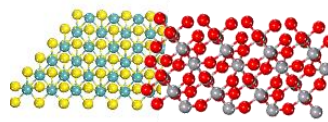
¹⁰² Vertical

¹⁰³ Twistronics

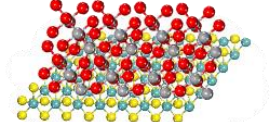
¹⁰⁰ Heterostructure

ساختارهای ناهمگون

(ب) افقی



(الف) عمودی



شکل ۱۴- انواع ساختارهای ناهمگون (الف) ساختار ناهمگون عمودی (ب) ساختار ناهمگون افقی

هر یک از این دو نوع ساختار، بسته به هدف طراحی، مزایا و چالش‌های خاص خود را دارند و انتخاب میان آن‌ها به نوع کاربرد نهایی وابسته است. در ادامه هر دو نوع ساختار را مورد بررسی قرار خواهیم داد.

۱.۵. ساختارهای ناهمگون عمودی

همانطور که پیش‌تر بیان کردیم در ساختارهای ناهمگون عمودی، لایه‌های مواد دوبعدی به‌صورت عمودی روی یکدیگر قرار می‌گیرند. برخلاف ساختارهای جانبی که در آن‌ها مواد مختلف در یک صفحه‌ی افقی مشترک به هم متصل می‌شوند، ساختارهای عمودی از لایه‌هایی تشکیل شده‌اند که مانند صفحات کتاب روی هم چیده شده‌اند. به لطف نیروهای واندروالس بین این لایه‌ها و نبود نیاز به تطابق دقیق شبکه بلوری بین مواد مختلف، این ساختارها انعطاف‌پذیری بالایی در طراحی ترکیب‌های گوناگون مواد فراهم می‌کنند. این ویژگی منحصر به فرد امکان ایجاد خواص نوظهور در ساختارهای ناهمگون را فراهم کرده و زمینه‌ی ترکیب موادی با ویژگی‌های الکترونیکی، نوری و مکانیکی گوناگون را مهیا می‌سازد.

یکی از روش‌های مهم برای رشد لایه‌به‌لایه‌ی این ساختارها، سولفورهای سولنایدی کردن لایه‌های نازک فلزی است. در این روش، ابتدا یک لایه‌ی نازک فلز روی زیرلایه نشانده می‌شود و سپس با انجام فرآیند سولفور یا سولناید کردن به ترکیبات TMD تبدیل می‌شود مطابق شکل ۱۵الف تا ۱۵ج این فرآیند را می‌توان چندین بار تکرار کرد تا ساختارهایی چندلایه با ضخامت‌های دقیق و کنترل‌شده به‌دست آورد [64]. با استفاده از این روش، امکان تولید ساختارهایی با دو، سه، چهار یا حتی پنج لایه‌ی متفاوت وجود دارد. برای جلوگیری از آلیاژی شدن یا تخریب لایه‌ها در دمای بالا، توالی رشد باید با دقت رعایت شود و از دمای بالا به پایین پیش رود.

زمانی که دو یا چند لایه از مواد دوبعدی با زاویه‌های متفاوت یا ناسازگاری شبکه‌ای جزئی روی هم قرار می‌گیرند، الگوهای تناوبی به نام ابرشبکه‌های موآره^{۱۰۴} شکل می‌گیرند مانند شکل ۱۵د. این الگوها تأثیر چشمگیری بر خواص الکترونیکی و نوری مواد دارند و در برخی موارد، پدیده‌هایی مانند

¹⁰⁴ Moiré Superlattices

ابرسازی نامتعارف^{۱۰۵} را به‌وجود می‌آورند. اصطلاح زاویه جادویی^{۱۰۶} به حالتی اطلاق می‌شود که در آن، دو لایه از یک ماده دوبعدی (مثلاً گرافن) در زاویه‌ای خاص نسبت به هم قرار می‌گیرند و خواص الکترونیکی آن‌ها به‌شدت تغییر می‌کند. این زاویه برای گرافن حدود ۱.۱ درجه است.

برای مثال، در شکل ۱۵ه، یک ابرشبکه موآره با اندازه‌ی ۳.۶۳ نانومتر در ساختار SnS₂/WSe₂ مشاهده می‌شود. شکل ۱۵و الگوی مشابهی را در جفت‌لایه CrSe₂/WSe₂ نشان می‌دهد و در شکل ۱۵ز، ابرشبکه‌ای بزرگ‌تر با اندازه‌ی ۱۴.۷ نانومتر در VSe₂/WSe₂ دیده می‌شود. یکی از ویژگی‌های مهم ابرشبکه‌های موآره آن است که می‌توان اندازه‌ی آن‌ها را در بازه‌ی ۱۰ تا ۴۵ نانومتر با تنظیم ترکیب شیمیایی، مانند تغییر نسبت گوگرد به سلیسیم در WS_xSe_{2-x}، تغییر داد.

ژنگ و همکاران^{۱۰۷} نشان دادند که ابرشبکه‌های موآره در ساختارهای واندروالس پیچ‌خورده^{۱۰۸} بستری مؤثر برای مطالعه‌ی برهم‌کنش بین نور و ماده هستند. نتایج آن‌ها مسیر جدیدی برای بررسی تأثیر کوپلینگ قوی بین لایه‌ها بر پتانسیل موآره باز کرده و پایه‌گذار پیشرفت‌های حوزه Twistronics^{۱۰۹} است. آن‌ها موفق شدند جفت‌لایه‌هایی از WSe₂ با زاویه‌های پیچش مختلف را به کمک روش رشد بخار شیمیایی و با استفاده از اتم‌های ناخالصی^{۱۰۹} بسازند.

شو و همکاران^{۱۱۰} نیز روشی جدید برای سنتز مستقیم جفت‌لایه‌های پیچ‌خورده^{۱۱۱} از TMD ها با استفاده از CVD معرفی کردند که فراتر از گرافن پیچ‌خورده است. روش آن‌ها امکان تولید ساختارهایی با طیف وسیعی از زوایای پیچش، از ۰ تا ۱۲۰ درجه را فراهم کرده است. این رویکرد جدید با به حداقل رساندن انرژی چرخشی بین لایه‌ها، امکان تنظیم دقیق زاویه‌ی پیچش را مهیا می‌کند. همان‌طور که در شکل‌های ۱۵ح و ۱۵ط دیده می‌شود، این روش امکان رشد جفت‌لایه‌هایی از MoS₂ را با زوایای مختلف بین ۰ تا ۱۲۰ درجه فراهم می‌سازد. همچنین در شکل ۱۵ی شواهد مستقیمی از تغییرات ساختاری ناشی از زاویه‌ی پیچش ارائه شده است.

ژائو و همکاران رشد مواد لایه‌ای دارای مارپیچ‌های ناشی از ناپیوستگی پیچشی^{۱۱۲} را روی سطوح غیراقلیدسی^{۱۱۳} (اگر سطح پایه غیراقلیدسی باشد) (مثلاً خمیده، ناصاف، یا دارای ناپیوستگی)، ماده‌ای که روی آن رشد می‌کند، در حین رشد دچار پیچ‌خوردگی یا چرخش تدریجی می‌شود. این باعث می‌شود که ساختارهای پیچ‌خورده^{۱۱۴} و در نتیجه ابرشبکه‌های موآره‌ی پیچیده شکل بگیرند) بررسی کردند و نشان دادند که این رویکرد منجر به تشکیل ساختارهای ناهمگون پیچ‌خورده‌ی پیوسته می‌شود. مدل نظری آن‌ها

¹⁰⁵ unconventional superconductivity

¹⁰⁶ Magic Angle

¹⁰⁷ Zheng et al

¹⁰⁸ Twisted van der Waals

¹⁰⁹ Heteroatoms

¹¹⁰ Zhao et al

¹¹¹ Twisted Bilayer

¹¹² Screw-Dislocation Spirals

¹¹³ Non-Euclidean

¹¹⁴ Twisted

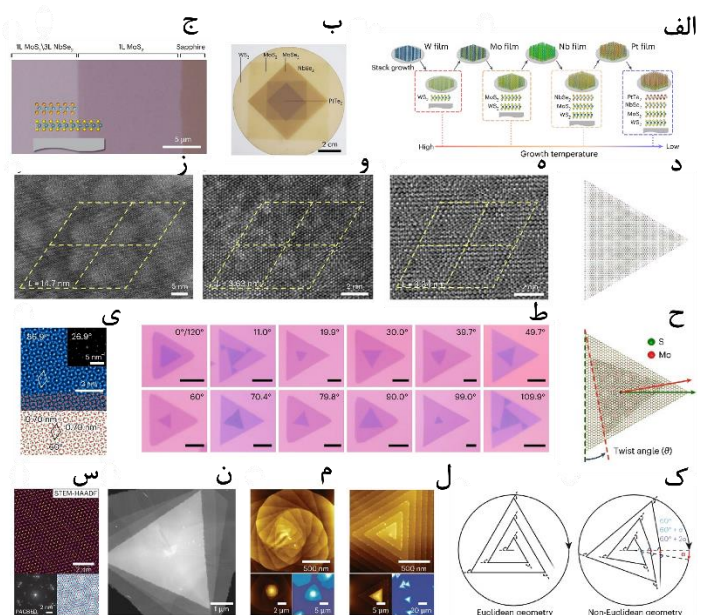
موآره 2×2 را مشخص می‌کنند (ج). مدل اتمی از ساختار دولایه‌ی پیچ‌خورده (Twisted Bilayer) از جنس MoS_2 (ط) تصاویر میکروسکوپ نوری از ساختارهای MoS_2 دولایه‌ی رشد یافته با زوایای چرخش مختلف از ۰ تا ۱۲۰ درجه. مقیاس: ۱۰ میکرومتر، (ی) تصویر میکروسکوپ الکترونی عبوری روبشی با میدان تاریک حلقوی زاویه‌بالا (HAADF-STEM) که یک ابر شبکه موآره‌ی سازگار را نشان می‌دهد (بالا)، همراه با مدل‌های ساختار اتمی از دولایه MoS_2 با زاویه چرخش ۸۶٫۹ درجه (پایین). تصویر کوچکی در گوشه نیز الگوی تبدیل فوریه (FFT) متناظر را نشان می‌دهد که لوزی سفید در آن دوره تناوب موآره‌ی ۰٫۷ نانومتر را مشخص می‌کند (ک). نموداری که هندسه اقلیدسی و غیر اقلیدسی را مقایسه می‌کند: پنل چپ یک مارپیچ مثلی روی سطح اقلیدسی را نشان می‌دهد که در آن هر رأس زاویه‌ی لبه را ۱۲۰ درجه تغییر می‌دهد، و پس از سه رأس، مجموع چرخش به ۳۶۰ درجه می‌رسد و جهت اولیه بازمی‌گردد. پنل راست همین مارپیچ را روی یک سطح مخروطی غیر عبور می‌کند و برای حفظ هم‌راستایی، نیاز به چرخش اضافی دارد، (ل) تصاویر میکروسکوپ نیروی اتمی (AFM) در بالا و چپ پایین، به همراه تصویر میکروسکوپ نوری در پایین راست، که مارپیچ‌های منظم WS_2 را روی زیرلایه‌ی مسطح SiO_2/Si نمایش می‌دهند، (م) تصاویر AFM (بالا و چپ پایین) و میکروسکوپ نوری (پایین راست) که مارپیچ‌های فوق‌پیچ‌خورده‌ی WS_2 با زوایای پیچ متفاوت را نشان می‌دهند. این ساختارها پیرامون ذرات WO_x روی زیرلایه SiO_2/Si شکل گرفته‌اند، (ن) تصویر HAADF-STEM از یک ورقه‌ی WS_2 فوق‌پیچ‌خورده که در آن لبه‌های لایه‌های مختلف با سایه‌روشن‌های متفاوت مشخص شده‌اند، (س) تصاویر با وضوح بالا از HAADF-STEM و پراش الکترونی ناحیه‌ای انتخاب‌شده (SAED) مربوط به ناحیه سه‌لایه‌ای در پنل ن [64]

۲.۵. ساختارهای ناهمگون جانبی

در ساختارهای ناهمگون جانبی، مواد دوبعدی مستقیماً در امتداد یک مرز مشترک به یکدیگر متصل می‌شوند؛ مشابه دو رنگ متفاوت که در کنار هم روی یک بوم قرار گرفته‌اند. این نوع اتصال، پیوندی قوی‌تر بین دو ماده ایجاد می‌کند و به همین دلیل فرآیند ساخت آن نیازمند دقت بسیار بالا است. چراکه مرز بین مواد باید کاملاً تمیز، منظم و دقیق تعریف شده باشد. یکی از شرایط اساسی برای ایجاد این ساختارها، تطابق بلوری دقیق بین دو ماده در ناحیه اتصال است؛ عاملی که در پایداری ساختاری و عملکرد مطلوب دستگاه‌های مبتنی بر این مواد نقش مهمی دارد.

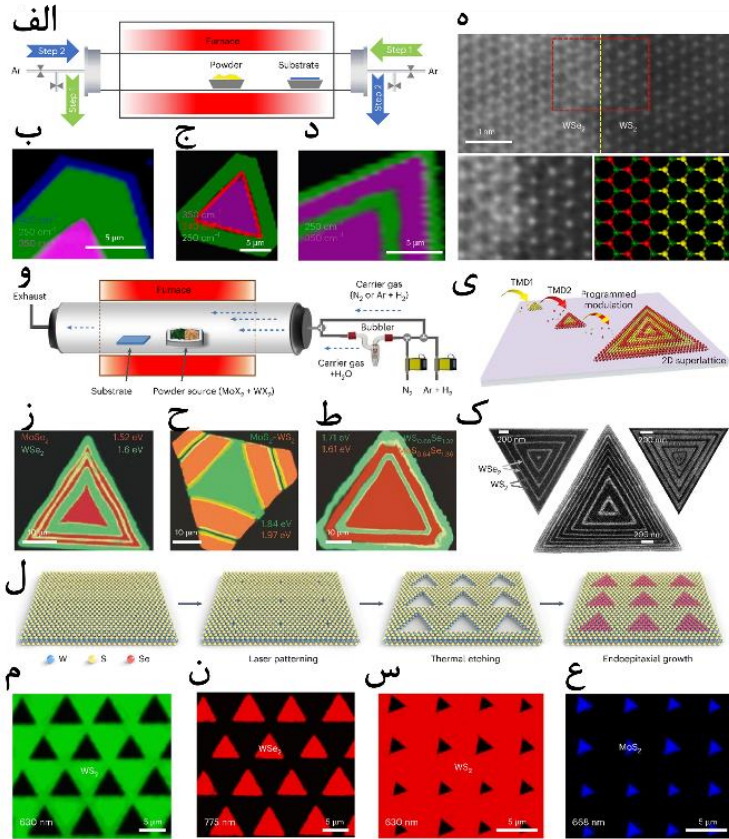
از آنجا که مواد دوبعدی معمولاً ساختارهای بلوری مشابهی دارند و اختلاف شبکه‌ای کمی میان آن‌ها وجود دارد، می‌توان این ساختارها را با روش رشد اپیتاکسی جانبی ایجاد کرد. یکی از روش‌های رایج، فرآیند CVD دومرحله‌ای است که در آن منبع بخار شیمیایی در داخل راکتور (بدون

با ساخت مارپیچ‌های پیچ‌خورده‌ی فوق‌العاده از WS_2 و WSe_2 به صورت تجربی تأیید شد؛ این مارپیچ‌ها حول نانوذراتی که در مرکز مارپیچ قرار داشتند رشد کردند. همان‌طور که در شکل ۱۵ نشان داده شده، زمانی که رشد روی سطح اقلیدسی انجام می‌شود، لایه‌ها به شکل ساختارهای مثلی منظم و بدون پیچش رشد می‌کنند مانند شکل ۱۵ک سمت چپ و شکل ۱۵ل اما روی سطوح غیراقلیدسی، خمیدگی سطح باعث چرخش تدریجی در هر چرخه‌ی رشد شده و ساختارهایی مارپیچ و پیچ‌خورده ایجاد می‌کند مانند شکل ۱۵ک سمت راست و شکل ۱۵م علاوه بر این، شکل‌های ۱۵ن و ۱۵س نشان می‌دهند که این تکنیک امکان تولید ابر شبکه‌های موآره با ویژگی‌های ساختاری قابل تنظیم را فراهم می‌سازد.



شکل ۱۵- ساخت ساختارهای ناهمگون عمودی دوبعدی و ابر شبکه‌های موآره‌ی آن‌ها (الف) تصویر مفهومی از روش انباشتن لایه‌به‌لایه برای سنتز ساختارهای ناهمگون واندروالسی چندلایه (vdWHs) با استفاده از یک روش مبتنی بر گرادیان دمایی؛ به این صورت که رشد از دماهای بالا به سمت دماهای پایین انجام می‌شود (تصاویر میکروسکوپ نوری از یک ساختار ناهمگون واندروالسی پنج‌لایه با ابعاد بزرگ، که شامل لایه‌هایی از مواد $PtTe_2$ ، $NbSe_2$ ، $MoSe_2$ ، MoS_2 و WS_2 است (ج) تصویر میکروسکوپی از یک ساختار ناهمگون واندروالسی دولایه که روی زیرلایه یاقوت (sapphire) قرار گرفته است؛ در این ساختار، یک تک‌لایه (1L) از MoS_2 در زیر یک سه‌لایه (3L) از $NbSe_2$ قرار دارد. تصویر کوچک در گوشه، چیدمان اتمی این ساختار را نشان می‌دهد. (د) نمای شماتیک از یک ابر شبکه موآره که از انباشتن لایه‌های اتمی نازک با ناسازگاری شبکه‌ای به وجود آمده است (ه-ز) تصاویر ابر شبکه‌های موآره که از انباشتن لایه‌های دوتایی واندروالسی حاصل شده‌اند، شامل: SnS_2/WSe_2 با پریود موآره ۳٫۳۴ نانومتر، $CrSe_2/WSe_2$ (ه) با پریود ۳٫۶۳ نانومتر، و VSe_2/WSe_2 با پریود بزرگ‌تر ۱۴٫۷ نانومتر، (ز) خطوط زرد چین‌دار در تصاویر ه تا ز، تناوب

کنترل شده، سوراخ‌هایی مثلی با لبه‌های تمیز و اتمی شکل می‌گیرند. این لبه‌ها به عنوان نقاط مشخصی برای رشد داخلی ماده دوم عمل می‌کنند. به این ترتیب، می‌توان آرایه‌هایی از ساختارهای ناهمگون جانبی موزاییکی مانند WS_2-WSe_2 ، MoS_2-WS_2 و MoS_2-WSe_2 با مرزهای کاملاً دقیق و اتمی ساخت (شکل‌های ۱۶ تا ۱۷ع).



شکل ۱۶- مراحل مختلف ساخت ساختارهای ناهمگون جانبی دوبعدی به تصویر کشیده شده‌اند. ابتدا در بخش الف) یک سامانه CVD اصلاح شده نمایش داده شده که امکان رشد اپیتاکسی کنترل شده را فراهم می‌کند. تصاویر ب تا د نقشه‌های رامان از ساختارهایی مانند WS_2-WSe_2 و MoS_2 و مدهای ارتعاشی خاص هر ماده مرتبطانند و تشکیل موفق مرزهای اتمی را تأیید می‌کنند. در تصویر (ه)، تصاویر STEM با وضوح بالا از مرز WS_2-WSe_2 ارائه شده و تطابق ساختار اتمی در ناحیه اتصال را نمایش می‌دهد. در ادامه، در تصویر (و)، شماتیکی از روش CVD تک مرحله‌ای برای ساخت ابر شبکه‌های جانبی دیده می‌شود. نقشه‌های فوتولومینسانس (ز تا ط) نیز نشان می‌دهند که چگونه ترکیب‌های مختلف مانند $MoSe_2-WSe_2$ و آلیاژی مثل $MoS_{0.64}Se_{1.36}$ می‌توانند در این روش ساخته شده و گاف‌های نواری مختلفی ایجاد کنند. در تصاویر (ی) و (ک)، رشد ابر شبکه به روش MOCVD و تصاویر SEM از ساختار WS_2-WSe_2 به نمایش درآمده است. نهایتاً در (ل تا ع)، روشی مبتنی بر رشد اپیتاکسی داخلی برای ساخت آرایه‌های موزاییکی از مواد دوبعدی معرفی شده که به کمک آن مرزهای اتمی بسیار تمیز و دقیقی بین

مواجهه نمونه با هوا) تغییر داده می‌شود. برای مثال، در تولید ساختار ناهمگون WS_2-WSe_2 ، ابتدا WS_2 بر روی زیر لایه SiO_2 رشد می‌یابد و سپس منبع شیمیایی به WSe_2 تغییر می‌کند تا ادامه رشد از لبه‌ها و در جهت جانبی انجام شود (شکل ۱۶ الف) [65]. با توجه به اینکه این مواد از لایه‌هایی به ضخامت چند اتم تشکیل شده‌اند، نسبت به تغییرات دمایی و شرایط محیطی بسیار حساس‌اند. تعویض مکرر پیش ماده‌ها ممکن است منجر به تخریب حرارتی یا حذف کامل لایه‌ها شود. ژانگ و همکارانش^{۱۱۵} برای رفع این مشکل، راکتوری با جریان گاز معکوس طراحی کردند تا از تخریب و هسته‌زایی ناخواسته جلوگیری شود [66]. کنترل دقیق شرایط در این روش، امکان حفظ ساختارهای تک لایه‌ای و ایجاد مرزهای اتمی بسیار تمیز در ابر شبکه‌های جانبی را فراهم می‌کند (شکل‌های ۱۶ ب تا ۱۶ ه).

ساهو و همکاران^{۱۱۶} روشی نوین به نام رشد تک مرحله‌ای^{۱۱۷} معرفی کردند که در آن دیگر نیازی به تعویض منبع ماده یا تغییر شرایط راکتور وجود ندارد. آن‌ها از یک منبع جامد ترکیبی شامل MoX_2 و WX_2 استفاده کردند و با تنظیم گاز حامل، رشد انتخابی هر ماده را کنترل نمودند [66]. مخلوط N_2/H_2O موجب رشد MoX_2 می‌شود، در حالی که ترکیب Ar/H_2 رشد WX_2 را تقویت کرده و هم‌زمان رشد MoX_2 را مهار می‌کند (شکل‌های ۱۶ تا ۱۶ ط).

در مدل ساخت ساختارهای ناهمگون با MOCVD شیه و همکارانش^{۱۱۸} با استفاده از روش MOCVD موفق به رشد دقیق ساختار WS_2-WSe_2 شدند [67]. این روش امکان کنترل دقیق بر ورود چندین پیش ماده و تعویض سریع آن‌ها را فراهم می‌سازد و در نتیجه، تنظیم نواحی مختلف ابر شبکه با دقت نانومتری ممکن می‌شود (شکل‌های ۱۶ ی و ۱۶ ک).

ترکیب لیتوگرافی و رشد اپیتاکسی جانبی: ژانگ و همکاران^{۱۱۹} رویکردی ترکیبی از الگونگاری نوری و رشد اپیتاکسی جانبی پیشنهاد دادند تا بتوان آرایه‌هایی منظم از ساختارهای ناهمگون جانبی برای کاربردهای الکترونیکی و اپتیکی تولید کرد [66]. اما بزرگ‌ترین چالش، ساخت الگوهای با مرزهای دقیق در مقیاس اتمی است. لیتوگرافی‌های معمول اغلب مرزهایی ناهموار ایجاد می‌کنند و باعث ورود ناخالصی می‌شوند که منجر به هسته‌زایی ناخواسته می‌گردد. برای حل این مشکل، آن‌ها روشی ترکیبی از الگونگاری لیزری و اچ حرارتی جهت‌دار (غیرهمسانگرد) توسعه دادند. ابتدا با تابش لیزر، نقص‌هایی در تک لایه‌های TMD ایجاد می‌شود و سپس با اچ حرارتی

¹¹⁵ Zhang et al

¹¹⁶ K. Sahoo et.al.

¹¹⁷ One-pot growth

¹¹⁸ Xie et al.

¹¹⁹ Zhang et al.

موادی مانند WS_2 ، MoS_2 و WSe_2 به دست آمده‌اند. این نتایج، پتانسیل بالای این روش‌ها برای کاربردهای نانوالکترونیک و اپتوالکترونیک را نشان می‌دهند [65].

۶. آشکارسازهای نوری

آشکارسازهای نوری^{۱۲۰} (PDs) ابزارهایی هستند که نور را به سیگنال‌های الکتریکی تبدیل می‌کنند و از اجزای کلیدی فناوری‌های پیشرفته و چندمنظوره به شمار می‌روند. این آشکارسازها در کاربردهای متنوعی از جمله تصویربرداری و دوربین‌های دیجیتال، بررسی سلول‌ها با استفاده از نور فرابنفش، تصویربرداری پزشکی با پرتو ایکس، دید در شب، پایش محیط زیست، ارتباطات نوری و طیف‌سنجی برای ارزیابی کیفیت مواد مورد استفاده قرار می‌گیرند. عملکرد این دستگاه‌ها بر اساس شاخص‌هایی مانند بهره نوری، بازده کوانتومی، قابلیت آشکارسازی^{۱۲۱} و پاسخ‌دهی^{۱۲۲} سنجیده می‌شود. برای مقایسه عملکرد دستگاه‌های مختلف، اغلب از پاسخ‌دهی (بر حسب آمپر بر وات) و قابلیت آشکارسازی (بر حسب Jones) استفاده می‌شود که تأثیر شرایط آزمایش و ساختار آشکارساز را نیز در نظر می‌گیرند.

در سال‌های اخیر، مواد دوبعدی و ساختارهای ترکیبی آن‌ها مورد توجه گسترده‌ای در حوزه آشکارسازی نوری قرار گرفته‌اند [68]. این مواد به دلیل ویژگی‌های منحصر به فرد الکترونیکی و نوری، از جمله پاسخ نوری فوق‌سریع، حساسیت بالا، گستره وسیع پاسخ‌دهی طیفی و قدرت جذب بالا، گزینه‌های بسیار مناسبی برای طراحی آشکارسازهای پیشرفته هستند. مواد دوبعدی از لایه‌هایی با ضخامت اتمی تشکیل شده‌اند که درون هر لایه پیوندهای قوی کووالانسی یا یونی و بین لایه‌ها برهم‌کنش‌های ضعیف واندروالسی وجود دارد. این ساختار اجازه می‌دهد تا بلورهای حجیم را به آسانی به لایه‌های نازک و قابل استفاده در مقیاس نانو تبدیل کرد. موادی مانند دی‌کالکوژناید‌های فلزات واسطه، فسفر سیاه و گرافن به دلیل انعطاف‌پذیری مکانیکی بالا و شفافیت نوری، برای تولید آشکارسازهای انعطاف‌پذیر و منطبق با سطوح خمیده بسیار مناسب هستند.

یکی از روش‌های مهم در بهینه‌سازی خواص مواد دوبعدی، مهندسی کرنش^{۱۲۳} است. با اعمال کرنش مکانیکی می‌توان ویژگی‌های الکتریکی و نوری این مواد را به طور مؤثری تنظیم کرد. برای مثال، در WS_2 دولایه، اعمال کرنش باعث تبدیل گاف انرژی از غیرمستقیم به مستقیم شده و شدت تابش نور (فوتولومینسانس) را به طور قابل توجهی افزایش می‌دهد. این در حالی است که در مواد نیمه‌هادی حجیم، حداکثر کرنش قابل تحمل حدود ۱٪

¹²⁰ Photodetectors

¹²¹ Detectivity

¹²² Responsivity

¹²³ Strain Engineering

است، ولی در مواد دوبعدی، این مقدار تا ۲۰٪ نیز قابل افزایش است که امکان دست‌کاری گسترده ویژگی‌های فیزیکی را فراهم می‌کند.

هنگامی که TMDها به تک‌لایه تبدیل می‌شوند، اثر کوانتومی باعث تغییر گاف انرژی از غیرمستقیم به مستقیم می‌شود که برای جذب نور مؤثرتر است. این تک‌لایه‌ها دارای برهم‌کنش قوی با نور، تحرک الکترونی مناسب (بین ۱۰۰ تا ۵۰۰ سانتی‌متر مربع بر ولت‌ثانیه) و در گرافن حتی تا ۱۰,۰۰۰ سانتی‌متر مربع بر ولت‌ثانیه هستند. از دیگر مزایای این مواد می‌توان به نبود پیوندهای سطحی آزاد اشاره کرد که امکان استقرار بی‌نقص آن‌ها را بر روی انواع زیرلایه‌ها (انعطاف‌پذیر، سخت، بلوری یا آمورف) فراهم می‌کند. همچنین امکان تولید در مقیاس وسیع و با هزینه پایین، مسیر تجاری‌سازی آن‌ها را هموار کرده است.

با وجود این مزایا، مواد دوبعدی نیز با چالش‌هایی روبه‌رو هستند. گرافن با اینکه پاسخ‌دهی بسیار سریع و پهنای باند بالایی دارد (تا ۴۰ گیگاهرتز)، به دلیل نداشتن گاف انرژی، توان جذب نور و بازده کوانتومی آن پایین است. برای حل این مشکل، راهکارهایی مانند بریدن گرافن به نانوریبون‌ها یا ساخت ساختارهای نقطه کوانتومی پیشنهاد شده‌اند. از سوی دیگر، TMDها دارای گاف انرژی قابل تنظیم هستند اما ممکن است به دلیل به دام افتادن حامل‌های نوری، سرعت پاسخ‌دهی آن‌ها کاهش یابد. ترکیب مواد دوبعدی با هم در قالب ساختارهای هیبریدی (مانند گرافن، نقاط کوانتومی، MXenes و پروسکایت‌ها) می‌تواند باعث بهبود عملکرد آشکارسازهای نوری شود.

در مجموع، مواد دوبعدی به‌ویژه TMDها، پتانسیل بالایی برای غلبه بر محدودیت‌های آشکارسازهای نوری امروزی در شرایط محیطی دارند. با ترکیب این مواد با یکدیگر و توسعه ساختارهای ترکیبی، می‌توان دستگاه‌هایی با کارایی بالا و متعادل طراحی کرد. در ادامه به انواع مختلف دسته بندی آشکارسازهای نوری مبتنی بر مواد دوبعدی می‌پردازیم.

۶.۱. دسته بندی آشکارسازهای نوری بر پایه مواد دوبعدی

همانطور که میدانیم، تبدیل سیگنال نوری به سیگنال الکتریکی، اساس عملکرد آشکارسازهای نوری است [69]. برای درک بهتر نحوه عملکرد این دستگاه‌ها، ابتدا به معرفی سازوکارهای فیزیکی مختلف در فناوری آشکارسازی نور می‌پردازیم. این سازوکارها شامل موارد زیر هستند:

• اثر فوتورسانا^{۱۲۴}

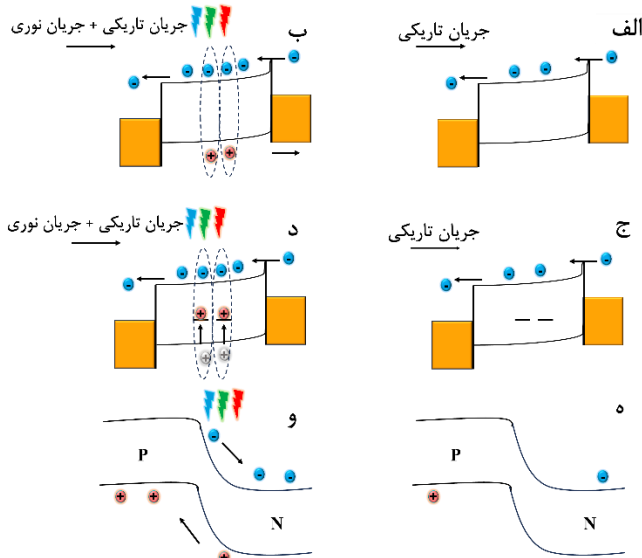
• اثر فوتولتائیک^{۱۲۵}

• اثر فوتوگیت^{۱۲۶}

¹²⁴ Photoconductive Effect

¹²⁵ Photovoltaic Effect

• اثر فوتوترموالکتریک^{۱۲۷}



در شکل ۱۷ (قسمت الف و ب) در این دو تصویر، ساختار پایه‌ای آشکارساز نوری شامل فلز/نیمه‌رسانا/فلز نشان داده شده است. در تصویر ۱۷ الف، دستگاه در حالت تاریکی قرار دارد و چون هیچ نوری وجود ندارد، حامل‌های بار برانگیخته نمی‌شوند و جریانی نیز برقرار نمی‌شود. اما در تصویر ۱۷ ب، وقتی که نور لیزر به دستگاه تابیده می‌شود، الکترون‌ها و حفره‌هایی در ماده نیمه‌رسانا تولید شده و به دلیل میدان داخلی بین دو الکتروفلزی، این حامل‌ها از هم جدا شده و جریان نوری تولید می‌شود. این پدیده همان اثر فوتورسانا است.

در شکل ۱۷ (قسمت ج و د) در این تصاویر، مکانیزم اثر فوتوگیت نمایش داده شده است. در تصویر ج، دستگاه در حالت تاریکی است و هیچ برهم‌کنشی وجود ندارد. اما در تصویر ۱۷ د، وقتی نور به دستگاه تابیده می‌شود، برخی از حامل‌های بار مانند الکترون‌ها به دام افتاده و در ناحیه خاصی از ماده باقی می‌مانند. این حامل‌های به دام افتاده باعث ایجاد یک میدان الکتریکی محلی می‌شوند که مانند یک گیت (دروازه) ثانویه عمل می‌کند و باعث تغییر در جریان اصلی دستگاه می‌شود. این اثر می‌تواند حساسیت دستگاه را به طور قابل توجهی افزایش دهد.

در شکل ۱۷ (قسمت ه، و) در این دو تصویر، ساختار باند انرژی در یک پیوند p-n نمایش داده شده است. در تصویر ۱۷ ه، که دستگاه در حالت بدون نور است، باندها در حالت تعادل هستند و حامل‌های آزاد چندانی وجود ندارد. در تصویر ۱۷ و، وقتی نور به این پیوند تابیده می‌شود، انرژی فوتون‌ها باعث تحریک الکترون‌ها شده و زوج الکترون-حفره تولید می‌شود. میدان الکتریکی داخلی موجود در ناحیه پیوند این حامل‌ها را از یکدیگر جدا کرده و جریان نوری تولید می‌شود. این مکانیزم یکی از پرکاربردترین روش‌ها برای آشکارسازی نور در دستگاه‌های نوری است.

شکل ۱۷- الف، ب) طرح شماتیک اثر فوتورسانایی از یک ساختار فلز/نیمه‌هادی/فلز به ترتیب بدون و با تابش نور لیزر. ج، د) نمودار شماتیک باند انرژی اثر فوتوگیتینگ از یک ساختار فلز/نیمه‌هادی/فلز به ترتیب تحت حالت تاریکی و تابش نور. ه، و) نمودار شماتیک باند یک پیوند p-n به ترتیب بدون و با تابش نور.

در ادامه، به بررسی این سازوکارها و پارامترهای کلیدی برای ارزیابی عملکرد این نوع از آشکارسازهای نوری می‌پردازیم.

۱.۱.۶. اثر فوتورسانا

آشکارسازهای نوری رسانا، یا به‌طور تخصصی‌تر «فوتوکنداکتورها»، یکی از رایج‌ترین و قدیمی‌ترین انواع آشکارسازهای نوری هستند. در این نوع آشکارسازها، رسانایی الکتریکی ماده تحت تابش نور تغییر می‌کند، و این تغییر به‌عنوان سیگنال نوری قابل تشخیص است.

زمانی که نور به سطح ماده نیمه‌رسانای آشکارساز تابیده می‌شود، فوتون‌های نور توسط ماده جذب شده و انرژی آن‌ها صرف تولید جفت‌های الکترون-حفره^{۱۲۸} می‌شود. این جفت‌های حامل بار اگر انرژی کافی داشته باشند، به حالت آزاد تبدیل شده و می‌توانند در حضور ولتاژ بایاس خارجی به سمت الکترودهای مثبت و منفی حرکت کنند. این جریان حامل‌های نوری منجر به تولید فوتوجریان می‌شود که به‌طور مستقیم با شدت تابش نور متناسب است.

$$I_{ph} = I_{illumination} - I_{dark} \quad (1)$$

در فوتوکنداکتورها یک پدیده‌ی جالب به نام بهره‌ی فوتوکنداکتیو^{۱۲۹} مشاهده می‌شود. این بهره به این معناست که ممکن است هر فوتون جذب‌شده باعث تولید چندین الکترون در مدار شود، نه فقط یکی. این موضوع به این خاطر اتفاق می‌افتد که در بسیاری از موارد، یکی از نوع‌های

¹²⁸ exciton

¹²⁹ Photoconductive Gain

¹²⁶ Photogating Effect

¹²⁷ Photo-Thermoelectric Effect

حامل بار (مثلاً حفره) در تله‌های انرژی^{۱۳۰} گیر می‌افتد و برای مدت زمان زیادی در ماده باقی می‌ماند. این گیرانداختگی باعث می‌شود که حامل مقابل (مثلاً الکترون) آزادانه چندین بار بین الکترودها حرکت کند تا زمانی که بالاخره با حفره ترکیب شود. فرمول کلی بهره را می‌توان به شکل زیر در نظر گرفت:

$$\text{Gain} = \tau_{\text{lifetime}} / \tau_{\text{transit}} \quad (2)$$

- τ_{lifetime} زمان ماندگاری حامل بار در ماده (مثلاً مدت زمانی که حفره در تله گیر کرده است)
- τ_{transit} زمانی که الکترون برای طی کردن مسیر بین دو الکترودها نیاز دارد

اگر زمان ماندگاری نسبت به زمان عبور زیاد باشد، بهره‌ی فوتوکاندکتیو بزرگ می‌شود، که این یعنی حساسیت دستگاه بالا می‌رود. اما این ویژگی یک نقطه ضعف هم دارد. هرچه عمر حامل‌ها طولانی‌تر باشد، زمان پاسخ دستگاه هم کندتر خواهد بود. به بیان دیگر، چنین آشکارسازهایی ممکن است در پاسخ به تغییرات سریع شدت نور، دچار تأخیر شوند. بنابراین، در طراحی فوتوکاندکتورها همیشه یک موازنه میان حساسیت و سرعت پاسخ‌دهی وجود دارد که باید بر اساس کاربرد مشخص تنظیم شود. از آنجایی که مواد دوبعدی مانند TMD ها (مثلاً WS_2 یا MoS_2) دارای ساختار بسیار نازک، ترازهای انرژی ویژه، و تعداد زیادی تله‌ی سطحی و داخلی هستند، در ساخت فوتوکاندکتورها بسیار مورد توجه قرار گرفته‌اند. این مواد می‌توانند بهره‌ی نوری بالا را فراهم کنند، به‌ویژه اگر تحت مهندسی نقص^{۱۳۱} یا تیمار با پلاسما یا کرنش^{۱۳۲} قرار بگیرند. در مجموع، فوتوکاندکتورها به دلیل ساختار ساده، حساسیت بالا، و سازگاری با مواد دوبعدی، گزینه‌ای جذاب برای کاربردهایی همچون تصویربرداری نوری، سنسورهای نوری، و سیستم‌های تشخیص نور کم هستند، البته با در نظر گرفتن محدودیت‌هایی در سرعت پاسخ‌دهی.

۲-۱-۶- اثر فوتولتائیک

اثر فوتولتائیک پدیده‌ای است که در آن نور تابیده‌شده به یک ماده نیمه‌رسانا، منجر به تولید جریان الکتریکی می‌شود، بدون اینکه نیازی به اعمال ولتاژ خارجی باشد. این اثر یکی از اصلی‌ترین پایه‌های عملکرد سلول‌های خورشیدی و آشکارسازهای نوری خودتغذیه^{۱۳۳} محسوب می‌شود. برای درک بهتر این پدیده، به ساختار یک پیوند p-n توجه می‌کنیم. در این ساختار، یک طرف ماده نیمه‌رسانا از نوع p (دارای حفره‌های بیشتر) و طرف

دیگر از نوع n (دارای الکترون‌های آزاد بیشتر) است. در مرز بین این دو ناحیه، به دلیل تفاوت در تراکم حامل‌های بار، یک میدان الکتریکی داخلی به صورت طبیعی ایجاد می‌شود که از حرکت آزاد الکترون‌ها و حفره‌ها جلوگیری می‌کند و آن‌ها را در دو طرف جدا نگه می‌دارد. وقتی نور با انرژی مناسب به این پیوند تابیده می‌شود، فوتون‌های نور باعث ایجاد جفت‌های الکترون-حفره در ناحیه پیوند می‌شوند. میدان الکتریکی داخلی این جفت‌ها را از یکدیگر جدا می‌کند: الکترون‌ها به سمت ناحیه n و حفره‌ها به سمت ناحیه p حرکت می‌کنند. این جداسازی منجر به ایجاد یک جریان الکتریکی در مدار خارجی می‌شود که بدون نیاز به اعمال هیچ ولتاژی اتفاق می‌افتد. این ویژگی، به دستگاه توانایی کارکرد در حالت خودتغذیه را می‌دهد.

در نمودار مشخصه جریان-ولتاژ (I-V) این نوع آشکارسازهای نوری، حتی در حالت ولتاژ صفر نیز جریان قابل توجهی مشاهده می‌شود. دو پارامتر کلیدی در این منحنی عبارت‌اند از: ولتاژ مدار باز^{۱۳۴} (V_{oc}) که بیانگر بیشترین ولتاژ تولیدشده در حالت قطع بودن مدار است، و جریان مدار کوتاه^{۱۳۵} (I_{sc}) که بیشترین جریانی است که در حالت اتصال کوتاه تولید می‌شود. این دو پارامتر برای ارزیابی عملکرد و بهره‌وری دستگاه‌های فوتولتائیک بسیار مهم هستند.

در مجموع، اثر فوتولتائیک امکان تبدیل مستقیم انرژی نور به انرژی الکتریکی را فراهم می‌کند و نقش مهمی در توسعه‌ی دستگاه‌های نوری کم‌مصرف، سنسورهای زیستی، سیستم‌های پوشیدنی، و سلول‌های خورشیدی دارد. این روش به‌ویژه در مواردی که نیاز به منبع تغذیه خارجی وجود ندارد، بسیار کاربردی و مؤثر است.

۳-۱-۶- اثر فوتوگیت

اثر فوتوگیت یکی از مکانیزم‌های کلیدی در عملکرد آشکارسازهای نوری، به‌ویژه در مواد نانومقیاس و دوبعدی، محسوب می‌شود. این اثر در اصل زیرمجموعه‌ای خاص از اثر فوتورسانایی است، با این تفاوت مهم که نقش تله‌های سطحی و نقص‌های ساختاری در آن پررنگ‌تر است. زمانی که نور به سطح یک نیمه‌رسانا تابیده می‌شود، جفت‌های الکترون-حفره در ماده ایجاد می‌شوند. اما برخلاف اثر فوتورسانایی ساده که در آن این حامل‌ها آزادانه در کانال حرکت کرده و موجب افزایش رسانایی می‌شوند، در اثر فوتوگیت یکی از این حامل‌ها (معمولاً حفره یا الکترون) در تله‌های سطحی یا نقص‌های موجود در ساختار ماده گیر می‌افتد.

گیر افتادن این حامل در تله‌ها باعث ایجاد یک بار موضعی پایدار در ناحیه‌ای از کانال می‌شود که مانند یک گیت الکتریکی محلی عمل کرده و رسانایی کانال را به صورت غیرمستقیم کنترل می‌کند. این بار محلی نقش نوعی "فوتوگیت" را بازی می‌کند که با تأثیرگذاری بر تراکم بارهای آزاد، هدایت الکتریکی ماده را تنظیم می‌نماید. بنابراین حتی پس از توقف تابش نور، اثر این بار باقی می‌ماند و پاسخ نوری سیستم برای مدت طولانی‌تری حفظ

¹³⁰ Trap states

¹³¹ Defect Engineering

¹³² Strain

¹³³ Self-Powered photodetectors

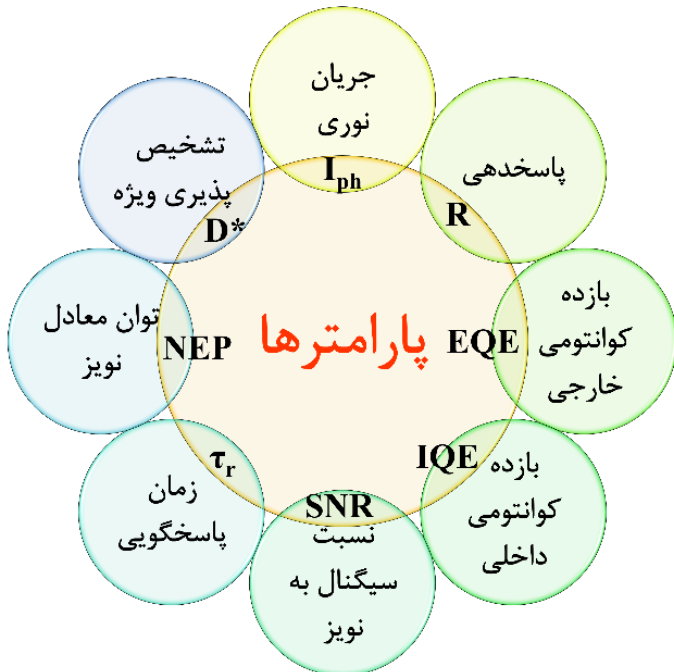
¹³⁴ Open Circuit Voltage

¹³⁵ Short Circuit Current

نور، از اثر فوتوتروموالکتريک به عنوان یک روش غیرفعال^{۱۳۷} و خودتغذیه استفاده می‌شود. مزیت مهم این اثر در استفاده از ویژگی‌های حرارتی ذاتی مواد نانومقیاس است که امکان آشکارسازی نوری با مصرف انرژی پایین، بدون اعمال ولتاژ خارجی، و حتی با نور کم را فراهم می‌کند.

۷. پارامترهای موثر در آشکار ساز نوری

در سال‌های اخیر، آشکارسازی نور به یکی از اجزای حیاتی در حوزه‌هایی نظیر ارتباطات پیشرفته، سیستم‌های نظامی و پایش محیط‌زیست تبدیل شده است. فرآیند تبدیل نور به سیگنال الکتریکی در این سامانه‌ها بر پایه سه مرحله‌ی کلیدی انجام می‌شود: جذب فوتون‌ها، جداسازی زوج‌های الکترون-حفره (اکسیژن‌ها) و انتقال مؤثر حامل‌ها. مواد دوبعدی، به دلیل ساختار لایه‌ای منحصربه‌فرد و تماس مستقیم بین لایه‌ها، ویژگی‌های نوری و الکتریکی خاصی از جمله تحرک بالای حامل‌ها را از خود نشان می‌دهند[70]. برای بررسی و مقایسه عملکرد این مواد در ساختارهای آشکارساز نوری، مجموعه‌ای از پارامترهای کلیدی تعریف شده‌اند که هر یک، ابعادی از کارایی دستگاه را بازتاب می‌دهند (شکل ۱۸). در ادامه، به معرفی این شاخص‌ها خواهیم پرداخت تا بستری برای تحلیل دقیق‌تر عملکرد آشکارسازهای نوری مبتنی بر مواد دوبعدی فراهم گردد.



شکل ۱۸- پارامترهای آشکار ساز نوری مبتنی بر مواد دوبعدی

۱.۷. جریان نوری

یکی از مهم‌ترین شاخص‌های عملکرد فوتودتکتورها، جریان نوری (I_{ph}) است. این جریان در واقع تفاوت بین جریان دستگاه در حالت تابش نور و حالت تاریکی است. به بیان ساده، زمانی که نور (مثلاً نور لیزر) به ماده نیم‌رسانا تابیده می‌شود، الکترون‌ها و حفره‌هایی در داخل آن تولید می‌شوند

می‌شود. این ویژگی باعث می‌شود فوتوگیت برای آشکارسازی نورهای ضعیف یا شرایطی که به پاسخ نوری تقویت‌شده نیاز است، بسیار مناسب باشد.

در نمودارهای انتقال (مثل منحنی جریان برحسب ولتاژ گیت در یک ترانزیستور)، تحت تابش نور، منحنی به سمت چپ جابه‌جا می‌شود. این جابه‌جایی افقی که با ΔV_g نمایش داده می‌شود، نشان‌دهنده‌ی کنترل‌پذیری رسانایی کانال از طریق فوتوگیت است. به‌طور کلی، اثر فوتوگیت به دلیل توانایی در حفظ اثر نور حتی پس از قطع آن، و قابلیت تقویت پاسخ نوری، یکی از مهم‌ترین سازوکارهای مورد استفاده در آشکارسازهای نوری مبتنی بر مواد دوبعدی مانند MoS_2 و WS_2 و گرافن به شمار می‌رود.

۱.۶. اثر فوتوتروموالکتريک

اثر فوتوتروموالکتريک یکی از پدیده‌های جالب در آشکارسازی نور است که بر پایه‌ی تفاوت دما بین دو نقطه از یک ماده حساس به نور کار می‌کند. وقتی نور لیزر یا منبع نوری متمرکزی به سطح یک نیم‌رسانا یا ماده دوبعدی مانند MoS_2 یا گرافن تابیده می‌شود، ناحیه‌ای از ماده که نور بیشتری جذب می‌کند، گرم‌تر از سایر قسمت‌ها می‌شود. این گرادیان دمایی یا تفاوت دما باعث ایجاد ولتاژ ترموالکتريک در طول ماده می‌گردد.

در واقع، افزایش دمای موضعی ناشی از تابش نور باعث حرکت حامل‌های بار (الکترون‌ها و حفره‌ها) از ناحیه‌ی گرم‌تر به سردتر می‌شود. این جابه‌جایی حامل‌ها باعث تولید یک ولتاژ به نام ولتاژ ترموالکتريک (ΔV) می‌شود. شدت این ولتاژ به میزان تفاوت دما (ΔT) و یک ویژگی ذاتی ماده به نام ضریب سبیک^{۱۳۶} بستگی دارد. این رابطه با فرمول زیر بیان می‌شود:

$$\Delta V = S \times \Delta T \quad (3)$$

که در آن:

- ΔV ولتاژ فوتوتروموالکتريک ایجادشده است،
- S ضریب سبیک است که به نوع ماده بستگی دارد،
- ΔT اختلاف دمای دو ناحیه است.

اگر نور به صورت موضعی تابیده شود (مثلاً با یک لیزر نقطه‌ای)، گرمایش در همان ناحیه باعث ایجاد ΔT موضعی می‌شود. اما حتی در شرایطی که نور به‌طور کلی به ماده تابیده شود، اگر نواحی مختلف ماده ضریب جذب نوری متفاوتی داشته باشند، باز هم اختلاف دما ایجاد می‌شود و این اثر فعال می‌گردد.

این مکانیزم برخلاف اثر فوتورسانایی یا فوتوولتائیک نیازی به اعمال ولتاژ خارجی ندارد، و می‌تواند در شرایط بدون ولتاژ نیز ولتاژ قابل اندازه‌گیری تولید کند. به همین دلیل، در برخی حسگرهای نوری و سیستم‌های تولید انرژی از

نکته مهم است که مساحت مؤثر A ، نقش مهمی در تعیین مقدار پاسخ‌دهی دارد؛ زیرا در شرایطی که نور تنها بخشی از دستگاه را روشن می‌کند، محاسبه دقیق آن ضروری است. این پارامتر در مقایسه عملکرد انواع مختلف آشکارسازها، به‌ویژه در سامانه‌های نانومقیاس و مبتنی بر مواد دوبعدی، اهمیت زیادی دارد.

۳.۷. بازده کوانتومی خارجی^{۱۳۹}

بازده کوانتومی خارجی یا یکی از شاخص‌های کلیدی برای سنجش عملکرد آشکارسازهای نوری به شمار می‌رود. این پارامتر نشان می‌دهد چه نسبتی از فوتون‌های تابیده‌شده به دستگاه، موفق به تولید جفت الکترون-حفره و در نهایت ایجاد جریان الکتریکی می‌شوند. به عبارت دیگر، EQE بیانگر توانایی دستگاه در تبدیل فوتون‌های ورودی به حامل‌های بار مؤثر است [72]. این مقدار از نسبت تعداد الکترون-حفره‌های تولیدکننده جریان در واحد زمان به تعداد فوتون‌های تابشی در همان بازه زمانی به دست می‌آید. رابطه ریاضی آن به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$EQE = I_{ph} h\nu / P_{in} q \quad (7)$$

که در آن q بار الکترون، h ثابت پلانک و ν فرکانس نور تابشی است. در این فرمول، صورت کسر نشان‌دهنده نرخ تولید حامل‌های بار (الکترون یا حفره) و مخرج نشان‌دهنده نرخ ورود فوتون‌ها است. مقدار EQE معمولاً به صورت درصدی بیان می‌شود و هرچه بیشتر باشد، نشان‌دهنده کارایی بالاتر آشکارساز در تبدیل انرژی نوری به سیگنال الکتریکی است. این ویژگی به‌ویژه در طراحی و ارزیابی عملکرد آشکارسازهای نوری مبتنی بر مواد دوبعدی، اهمیت ویژه‌ای دارد.

۴.۷. بازده کوانتومی داخلی

بازده کوانتومی داخلی^{۱۴۰} یا یکی از شاخص‌های بنیادی در ارزیابی عملکرد آشکارسازهای نوری است. این پارامتر نشان می‌دهد چه نسبتی از فوتون‌هایی که واقعاً توسط ماده جذب شده‌اند، منجر به تولید جفت‌های الکترون-حفره و در نتیجه ایجاد جریان الکتریکی می‌شوند [73].

فرمول IQE به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$IQE = I_{ph} h\nu / A_{ab} P_{in} q \quad (8)$$

در این رابطه A_{ab} کسری از توان نوری ورودی است که واقعاً توسط ماده جذب شده است. برخلاف بازده کوانتومی خارجی (EQE) که تمام

که باعث افزایش جریان الکتریکی می‌گردند. این تفاوت جریان که به دلیل وجود نور ایجاد می‌شود، جریان نوری نام دارد و به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$I_{ph} = I_{illumination} - I_{dark} \quad (4)$$

در این رابطه، $I_{illumination}$ جریان دستگاه در هنگام تابش نور و I_{dark} جریان دستگاه در حالت تاریکی است. مقدار جریان نوری به عوامل متعددی وابسته است و رابطه‌ی دقیق‌تری نیز برای آن وجود دارد که به صورت زیر بیان می‌شود:

$$I_{ph} = (\eta \times \mu \times E \times \tau \times P_{in}) / (h\nu L) \quad (5)$$

در این فرمول، η بازده کوانتومی است که نشان می‌دهد چند حامل بار (الکترون یا حفره) به ازای هر فوتون جذب‌شده تولید شده‌اند μ بیانگر تحرک الکترون‌هاست و مشخص می‌کند که الکترون‌ها چقدر سریع تحت تأثیر میدان الکتریکی حرکت می‌کنند E شدت میدان الکتریکی بین الکترودهای منبع و درین را نشان می‌دهد، و τ مدت‌زمانی است که حامل‌های نوری (الکترون‌ها و حفره‌ها) قبل از ترکیب، باقی می‌مانند P_{in} توان نور تابیده‌شده است، h ثابت پلانک و ν فرکانس نور و L فاصله بین الکترودهای منبع و درین است.

به طور کلی، هرچه قدرت نور ورودی، بازده کوانتومی، تحرک الکترون‌ها و شدت میدان الکتریکی بیشتر باشد، جریان نوری نیز افزایش می‌یابد و عملکرد فوتودتکتور بهبود پیدا می‌کند. این شاخص کمک می‌کند تا میزان پاسخ‌دهی دستگاه نسبت به تابش نور را بهتر ارزیابی کنیم.

۲.۷. پاسخ‌دهی^{۱۳۸}

پاسخ‌دهی یا یکی از مهم‌ترین شاخص‌های عملکردی آشکارسازهای نوری است که میزان توانایی یک دستگاه را در تبدیل سیگنال نوری به سیگنال الکتریکی نشان می‌دهد [71]. این پارامتر به صورت نسبت جریان (R_i) یا ولتاژ (R_v) تولیدشده به توان نوری تابیده‌شده بر واحد سطح تعریف می‌شود. به بیان ساده‌تر، هرچه پاسخ‌دهی یک آشکارساز بیشتر باشد، یعنی با نور ورودی یکسان، سیگنال الکتریکی قوی‌تری تولید می‌کند. رابطه ریاضی آن به صورت زیر بیان می‌شود:

$$R_i = I_{ph} / P_{in} \cdot A \quad \text{یا} \quad R_v = V_{ph} / P_{in} \cdot A \quad (6)$$

که در آن I_{ph} جریان نوری (فوتوجریان)، V_{ph} ولتاژ نوری، P_{in} توان نور تابشی، و A مساحت مؤثر ناحیه‌ی روشن‌شده‌ی دستگاه است. توجه به این

¹³⁹ External Quantum Efficiency (EQE)

¹⁴⁰ Internal Quantum Efficiency (IQE)

¹³⁸ Responsivity (R)

۷.۷. توان معادل نویز^{۱۴۵}

توان معادل نویز (NEP) یکی از پارامترهای مهم برای سنجش توانایی آشکارسازهای نوری در تشخیص سیگنال‌های ضعیف است. NEP مقدار حداقلی از توان نوری است که آشکارساز می‌تواند تشخیص دهد، به گونه‌ای که سیگنال آن برابر با سطح نویز دستگاه باشد [76]. فرمول NEP به صورت زیر است:

$$NEP = V_n / R \quad (10)$$

$$NEP = I_n / R \quad (11)$$

که در آن I_n جریان نویز متوسط مربع است (مقدار میانگین توان نویز جریان)؛ V_n ولتاژ نویز متوسط مربع است (مقدار میانگین توان نویز ولتاژ)؛ R حساسیت یا پاسخ‌دهی آشکارساز است. این مقادیر در باند فرکانسی ۱ هرتز و در حالت تاریکی اندازه‌گیری می‌شوند و واحدهایشان به ترتیب $A \cdot Hz^{-1/2}$ برای جریان و $V \cdot Hz^{-1/2}$ برای ولتاژ است. هرچه مقدار NEP کمتر باشد، یعنی آشکارساز می‌تواند سیگنال‌های نوری ضعیف‌تر را با دقت بیشتری تشخیص دهد و در نتیجه عملکرد بهتری دارد.

۸.۷. آشکارسازی ویژه^{۱۴۶}

آشکارسازی ویژه (D^*) یکی از پارامترهای مهم برای ارزیابی عملکرد آشکارسازهای نوری است. این پارامتر نشان می‌دهد که یک آشکارساز چقدر می‌تواند سیگنال‌های نوری بسیار ضعیف را با دقت بالا تشخیص دهد [77]. فرمول D^* به صورت زیر است:

$$D^* = (A \times BW)^{-1/2} / NEP \quad (12)$$

که در آن A مساحت ناحیه حساس به نور آشکارساز است؛ BW پهنای باند فرکانسی مورد بررسی است؛ NEP توان معادل نویز است که قبلاً توضیح داده شد. هرچه مقدار D^* بزرگ‌تر باشد، عملکرد آشکارساز بهتر است، یعنی آشکارساز می‌تواند سیگنال‌های ضعیف‌تر را با دقت بالاتری شناسایی کند. بنابراین، داشتن آشکارسازهایی با مقدار D^* بالا نشانه کیفیت و حساسیت بیشتر آنهاست.

۸. آشکارسازهای نوری مبتنی بر مواد دوبعدی

آشکارسازهای نوری مبتنی بر مواد دوبعدی به دسته‌های مختلفی تقسیم می‌شوند. یکی از روش‌های دسته‌بندی، بر اساس طول موج پاسخ نوری آنهاست؛ به این ترتیب، مواد دوبعدی معمولاً به سه گروه حساس به نور

فوتون‌های تابیده‌شده را در نظر می‌گیرد، IQE فقط به فوتون‌هایی توجه دارد که درون ماده جذب شده‌اند. بنابراین IQE معیاری دقیق‌تر از کارایی ذاتی ماده یا ساختار فعال دستگاه در تبدیل نور جذب‌شده به حامل‌های بار الکتریکی است. این پارامتر به‌ویژه در طراحی و بهینه‌سازی آشکارسازهایی که جذب نوری ضعیفی دارند، اهمیت زیادی دارد.

۵.۷. نسبت سیگنال به نویز^{۱۴۱}

نسبت سیگنال به نویز یا یکی از پارامترهای کلیدی در ارزیابی دقت عملکرد آشکارسازهای نوری است [74]. در هر سیستم آشکارسازی، نویز (اختلالات ناخواسته الکتریکی یا نوری) به صورت طبیعی وجود دارد و می‌تواند باعث کاهش دقت اندازه‌گیری شود. نسبت سیگنال به نویز به صورت نسبت توان سیگنال (P_s) به توان نویز (P_n) تعریف می‌شود:

$$SNR = P_s / P_n \quad (9)$$

هرچه این نسبت بزرگ‌تر باشد، یعنی سیگنال مفید نسبت به نویز قوی‌تر است و بنابراین عملکرد آشکارساز بهتر و قابل‌اعتمادتر خواهد بود. به طور کلی، SNR بالا نشانه‌ای از کیفیت بالای آشکارسازی و دقت بیشتر در تشخیص نور است، به‌ویژه در کاربردهایی که سیگنال‌های نوری ضعیف یا نویز محیطی بالا وجود دارد.

۶.۷. زمان پاسخ‌گویی^{۱۴۲}

زمان پاسخ‌گویی یکی از ویژگی‌های مهم عملکرد آشکارسازهای نوری است که نشان می‌دهد دستگاه با چه سرعتی می‌تواند به روشن یا خاموش شدن منبع نور (مثلاً لیزر) واکنش نشان دهد [75]. این زمان معمولاً با نماد τ_{res} نشان داده می‌شود و به دو بخش تقسیم می‌گردد:

- زمان صعود^{۱۴۳} (τ_r): مدت زمانی که جریان خروجی از ۱۰٪ مقدار نهایی به ۹۰٪ آن افزایش پیدا می‌کند.
- زمان افت^{۱۴۴} (τ_d): مدت زمانی که جریان از ۹۰٪ مقدار نهایی به ۱۰٪ کاهش می‌یابد.

این دو مقدار به کمک تحلیل تغییرات جریان الکتریکی در هنگام روشن و خاموش شدن نور به دست می‌آیند. به طور کلی، هرچه زمان پاسخ‌گویی کوتاه‌تر باشد، آشکارساز می‌تواند تغییرات نور را سریع‌تر دنبال کند و برای کاربردهای سریع یا حساس، مناسب‌تر خواهد بود.

¹⁴¹ Signal to Noise Ratio (SNR)

¹⁴² Response Time

¹⁴³ Rise time

¹⁴⁴ Decay time

¹⁴⁵ Noise Equivalent Power (NEP)

¹⁴⁶ Specific Detectivity (D^*)

فرابنفش [78] (UV)، نور مرئی [79] و نور مادون قرمز [80] (IR) تقسیم می‌شوند.

روش دیگر طبقه‌بندی، بر اساس ویژگی‌های ساختاری آن‌هاست. از این منظر، مواد دوبعدی به دو دسته تقسیم می‌شوند: مواد لایه‌ای که در آن‌ها لایه‌ها توسط برهم‌کنش‌های ضعیف واندروالسی به هم متصل‌اند؛ مواد غیرلایه‌ای که پیوندهای آن‌ها عمدتاً از نوع کووالانسی (محکم‌تر) است. این مواد به دلیل ساختار منحصربه‌فرد، پایداری محیطی بالا و ویژگی‌های اپتوالکترونیکی برجسته، نقش مهمی در توسعه‌ی دستگاه‌های الکترونیکی و اپتوالکترونیکی پیدا کرده‌اند. تا به امروز، طیف گسترده‌ای از این مواد دوبعدی از مرحله‌ی ساخت تا کاربردهای عملی، به صورت سیستماتیک مورد مطالعه قرار گرفته‌اند.

شکل ۱۹ به خوبی مزایای کلیدی مواد دوبعدی (2D) را نسبت به مواد سنتی در ساخت فوتودتکتورها نشان می‌دهد [77].

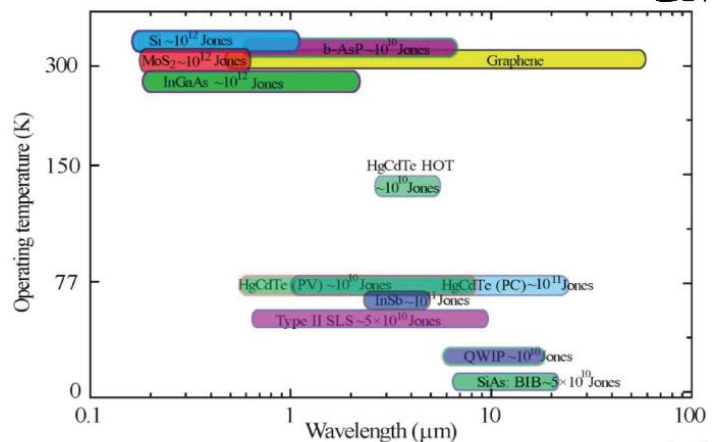
InSb یا HgCdTe برای عملکرد مناسب در ناحیه مادون قرمز باید در دماهای بسیار پایین (مثلاً دمای نیتروژن مایع یا هلیوم مایع) کار کنند. در مقابل، بسیاری از فوتودتکتورهای مبتنی بر مواد دوبعدی می‌توانند در دمای اتاق کار کرده و همچنان پاسخ‌دهی خوبی در بازه‌های طیفی وسیع (از فرابنفش تا مادون قرمز یا حتی تراهرتز) ارائه دهند. (ب) در نمودار، مقدار گاف انرژی برای مواد دوبعدی مختلف نمایش داده شده و در کنار آن محدوده‌ی طیفی که هر ماده می‌تواند در آن نور را شناسایی کند نشان داده شده است. به عبارت دیگر، این نمودار به شما می‌گوید که با انتخاب ماده‌ای با گاف انرژی خاص، می‌توان فوتودتکتوری طراحی کرد که در بخشی مشخص از طیف الکترومغناطیسی (مثلاً نور مرئی یا مادون قرمز) حساس باشد. برای مثال، MoS_2 به دلیل داشتن گاف انرژی مناسب، برای تشخیص نور مرئی ایده‌آل است، در حالی که مواد دیگری مانند PdSe_2 برای نواحی مادون قرمز مناسب‌ترند [77].

در ادامه‌ی این بخش، نگاهی خواهیم داشت به جدیدترین پژوهش‌هایی که در سال‌های اخیر بر روی آشکارسازهای نوری مبتنی بر مواد دوبعدی [81] منفرد، چه لایه‌ای و چه غیرلایه‌ای، انجام شده‌اند.

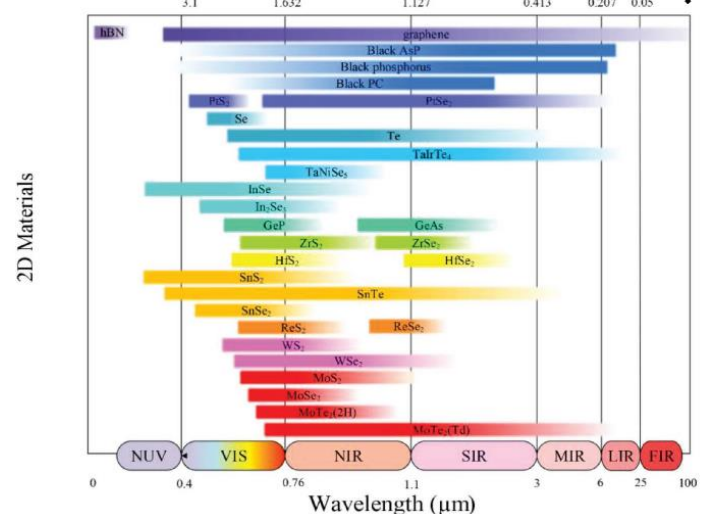
جی و همکارانش^{۱۴۷} گزارش کرده‌اند که استفاده از یک لایه نازک گادولینیوم آهن گارنت^{۱۴۸} ($\text{Gd}_3\text{Fe}_5\text{O}_{12}$) یا به اختصار GdIG در ساختار آشکارساز نوری بر پایه پیوند شاتکی گرافن/سیلیکون، عملکرد دستگاه را به طور قابل توجهی بهبود می‌دهد. این در حالی است که لایه گرافن به روش CVD سنتز شده است [82]. ساختار پیشنهادی آن‌ها که برای نخستین بار معرفی شده، شامل گرافن به عنوان لایه بالایی شفاف و جمع‌آورنده حامل‌ها، سیلیکون نوع n به عنوان نیم‌رسانای پایه، و یک لایه میانی نازک از GdIG است که نقش کنترل جریان و بهبود مشخصه‌های الکتریکی پیوند شاتکی را بر عهده دارد. این لایه با استفاده از فناوری اسپاترینگ^{۱۴۹} روی سطح سیلیکون نشاندۀ شده و به دلیل ویژگی‌های الکترونیکی و ساختاری خاص خود، موجب افزایش ارتفاع سد شاتکی و کاهش چشمگیر جریان تاریکی می‌شود (شکل ۲۰). نتایج تجربی نشان می‌دهد که درج لایه GdIG منجر به کاهش جریان تاریکی تا 54 برابر در بایاس معکوس 2- ولت می‌شود و عملکرد نوری در حالت بدون تغذیه خارجی^{۱۵۰} بهبود قابل توجهی می‌یابد.

به طور خاص، نسبت جریان در حالت نوردهی به جریان تاریکی به 8.6×10^6 می‌رسد، یعنی این ساختار جدید دارای نسبت جریان الکتریکی در حضور نور به جریان در تاریکی برابر با 8.2 میلیون است. آشکارسازی ویژه

الف



ب



شکل ۱۹-الف-در نمودار محدوده دمای کاری و گستره طیفی فوتودتکتورهای مبتنی بر مواد دوبعدی با فوتودتکتورهای سنتی تجاری مقایسه شده‌اند. این مقایسه نشان می‌دهد که: فوتودتکتورهای سنتی مانند

¹⁴⁷ Peirui Ji et.al.

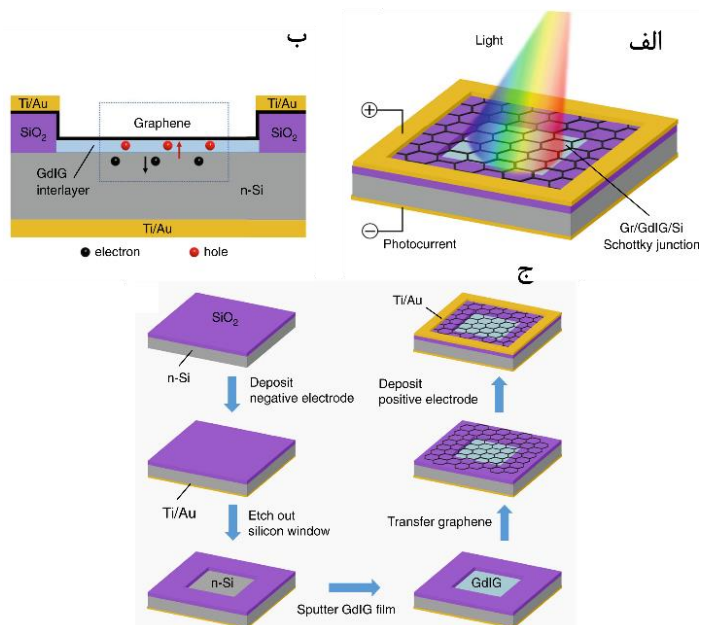
¹⁴⁸ Gadolinium iron garnet

¹⁴⁹ RF magnetron sputtering

¹⁵⁰ Self-powered

(D^*) برابر با 1.35×10^{13} Jones در طول موج 633 نانومتر گزارش شده، و زمان پاسخ‌دهی بسیار سریع 0.15 میلی‌ثانیه به ثبت رسیده است. همچنین، این ساختار در برابر آزمون‌های پایداری نوری و محیطی، از جمله 500 چرخه کاری و چندین ماه نگهداری در هوا، مقاومت خوبی نشان داده است. آن‌ها نشان داده‌اند که لایه GdIG باعث افزایش ارتفاع سد شاتکی از 0.81 الکترون‌ولت به 0.87 الکترون‌ولت می‌شود و جریان اشباع معکوس از 6.5×10^{-9} آمپر به 7.2×10^{-10} آمپر کاهش می‌یابد. این تغییرات موجب نزدیک‌تر شدن رفتار دیود به مشخصات ایده‌آل می‌شود.

از منظر مکانیزم فیزیکی، ساختار گرافن/سیلیکون معمولی به دلیل وجود پیوندهای ناقص و حالات سطحی زیاد، جریان تاریکی بالایی دارد، اما افزودن لایه نازک GdIG این مشکلات را برطرف می‌کند. این لایه نه تنها باعث جدایی فضایی گرافن و سیلیکون و جلوگیری از عبور حامل‌های حرارتی می‌شود، بلکه با کاهش تله‌های سطحی، نرخ بازترکیب حامل‌ها را کاهش می‌دهد.



شکل ۲۰- مدل و فرآیند ساخت دستگاه: (الف) نمای سه‌بعدی شماتیک: این تصویر، نمای کلی سه‌بعدی از ساختار فوتودیتکتور پیشنهادی را نشان می‌دهد که در آن، لایه‌های گرافن (Gr)، گادولینیوم آهن گارنت (GdIG) و سیلیکون (Si) به صورت لایه‌های متوالی روی یکدیگر قرار گرفته‌اند. (ب) نمای مقطع عرضی: در این تصویر، برش عرضی فوتودیتکتور نمایش داده شده تا جزئیات داخلی ساختار دستگاه مشخص باشد؛ مانند ضخامت لایه‌ها، محل اتصال‌ها و ترتیب قرارگیری مواد مختلف. (پ) نمایش شماتیک مراحل ساخت: در این قسمت، مراحل ساخت فوتودیتکتور Gr/GdIG/Si به صورت گام‌به‌گام و شماتیک به تصویر کشیده شده است. این فرآیند شامل آماده‌سازی بستر سیلیکونی، رسوب‌دهی لایه GdIG، انتقال لایه گرافن و ایجاد الکترودهای بالا و پایین است [82]

در حین تابش نور، میدان الکتریکی داخلی پیوند شاتکی، حامل‌های نوری تولیدشده را جدا کرده و جریان فوتوالکتریک ایجاد می‌کند. همچنین، لایه GdIG امکان تونل‌زنی حفره‌ها به سمت گرافن را فراهم می‌کند و پدیده یونش ضربه‌ای ناشی از این فرآیند منجر به تقویت جریان نوری می‌شود. در نهایت، اعمال بایاس معکوس موجب افزایش تعداد حالات انرژی در گرافن برای پذیرش حامل‌ها می‌شود که این نیز به افزایش جریان نوری کمک می‌کند.

در مجموع، این مطالعه نقش مؤثر لایه‌های میانی مانند GdIG را در طراحی فوتودیتکتورهای با کارایی بالا برجسته کرده و راهکاری نوین برای کاهش نویز و افزایش حساسیت دستگاه‌های نوری ارائه می‌دهد.

در یک مطالعه جامع، لیو و همکارانشان^{۱۵۱} آشکارساز نوری مبتنی بر نانولایه‌های WS_2 را با روش تبخیر شیمیایی از فاز بخار (CVD) و بدون استفاده از بذر^{۱۵۲} ساختند (شکل ۲۱) [83]. این نانولایه‌ها با حدود ۵ تا ۱۰ نانومتر و ساختار مثلی شکل، با کیفیت بلوری بالا و کمترین نقص رشد یافته بودند. ویژگی‌های عملکردی این آشکارساز نوری بسیار چشمگیر بود. برای مثال، پیک حساسیت طیفی آن در حدود 0.5 آمپر بر وات در طول موج حدود 650 نانومتر گزارش شده است که نسبت به آشکارسازهای مشابه مبتنی بر مواد دیگر، بهبود قابل توجهی نشان می‌دهد. همچنین، زمان پاسخ‌دهی این آشکارساز کمتر از ۱۰ میلی‌ثانیه بود که برای کاربردهای سریع و دینامیک بسیار مناسب است. از نظر نسبت سیگنال به نویز (SNR)، مقدار بیش از 60 دسی‌بل به دست آمد که نشان‌دهنده حساسیت بالا و عملکرد پایدار دستگاه است. این مقدار SNR باعث می‌شود آشکارساز بتواند سیگنال‌های نوری ضعیف را به‌خوبی تشخیص دهد و در شرایط محیطی مختلف عملکرد قابل اطمینانی داشته باشد. یکی دیگر از پارامترهای مهم که در این مطالعه به آن پرداخته شد، پهنای باند طیفی آشکارساز بود؛ محدوده پاسخ طیفی از ۴۰۰ نانومتر تا ۸۰۰ نانومتر اندازه‌گیری شد که شامل نور مرئی و بخشی از نزدیک مادون قرمز است. این گستره وسیع، کاربردهای این آشکارساز را در زمینه‌هایی مثل تصویربرداری، ارتباطات نوری و حسگرهای زیستی گسترده می‌کند. در نهایت، با بهینه‌سازی شرایط رشد CVD مانند دما (حدود ۷۰۰ درجه سانتیگراد)، فشار و زمان رشد (بین ۱۰ تا ۲۰ دقیقه)، ساختار و کیفیت نانولایه‌ها بهینه شده و منجر به افزایش نسبت سیگنال به نویز و کاهش زمان پاسخ‌دهی شده است. این بهبودها نشان‌دهنده این است که کنترل دقیق پارامترهای فرآیند رشد

¹⁵¹ Huawei Liu et.al.

¹⁵² Seedless

۹. چالش‌های پیش‌رو

در مقایسه با آشکارسازهای نوری مرسوم مبتنی بر فیلم‌های حجیم، فناوری تشخیص نور با استفاده از مواد دوبعدی عملکردهایی بسیار چشمگیر و امیدوارکننده از خود نشان داده است، از جمله حساسیت بسیار بالا، تشخیص در گستره وسیع طول موج‌ها^{۱۵۳}، سرعت پاسخ‌دهی فوق‌العاده بالا، و نیز مقادیر بالای D^* ، که بیانگر نسبت سیگنال به نویز دستگاه است. این ویژگی‌های برتر، پتانسیل بالای این مواد را برای ادغام در سامانه‌های اپتوالکترونیکی و ارتباطات نوری نشان می‌دهند.

با این حال، علی‌رغم موفقیت‌های حاصل‌شده، فناوری تشخیص نور مبتنی بر مواد دوبعدی هنوز با چالش‌های متعددی مواجه است و برای پیشرفت بیشتر نیاز به توسعه‌هایی جدی دارد؛ از جمله تهیه مواد با بلورینگی بالا، بهینه‌سازی فرآیند انتقال و لایه‌نشانی، طراحی ساختارهای نوین، و افزودن مکانیزم‌های مدولاسیون خارجی مانند کرنش یا قطبش فروالکتریک.

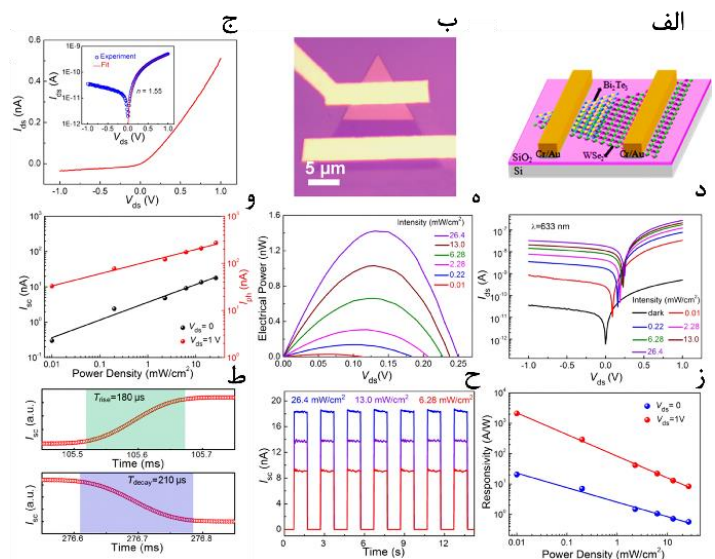
ساخت مواد دوبعدی و ساختارهای ناهمگون آن با کیفیت بلوری بالا و تراز باند مناسب، می‌تواند منجر به تولید دستگاه‌هایی با عملکرد الکترونیکی و اپتوالکترونیکی بسیار بهینه شود. چنین دستگاه‌هایی می‌توانند در حوزه‌های گسترده‌ای از جمله پایش دما، امنیت خانگی، تصویربرداری حرارتی، سامانه‌های ارتباط نوری و موارد مشابه به کار روند. این گستردگی کاربرد، نشان‌دهنده آن است که مواد دوبعدی نه تنها بخشی جدایی‌ناپذیر از سیستم‌های نیمه‌رسانای مدرن شده‌اند، بلکه بستری قدرتمند برای پیشرفت‌های آینده نیز فراهم می‌آورند. با وجود پیشرفت‌های قابل توجه، این فناوری هنوز به سطحی نرسیده است که جایگزین کامل آشکارسازهای نوری تجاری شود. برای استفاده روزمره و تجاری‌سازی، همچنان نیاز به بهبود پیکربندی دستگاه‌ها و تقویت قابلیت‌های کاربردی آن‌ها وجود دارد.

در همین راستا، مقاله مسیریایی برای توسعه آینده پیشنهاد می‌دهد:

یکی از چالش‌ها، جذب نوری پایین مواد دوبعدی تک‌اتمی نظیر گرافن و TMDها مانند MoS_2 و WS_2 است. از آنجا که این مواد نازک هستند، اثرات جذب کمتر و بازترکیب بیشتر جفت‌های الکترون-حفره (اکسیتون) دارند که کارایی کوانتومی^{۱۵۴} را کاهش می‌دهد.

به همین دلیل، نیاز به کشف موادی با طول پخش بالا برای حامل‌های نوری و انرژی پیوندی اکسیتون پایین بیشتر احساس می‌شود. برای مثال، پروسکایت‌های دوبعدی از جمله گزینه‌های نویدبخش هستند.

می‌تواند عملکرد آشکارسازهای نوری مبتنی بر مواد دوبعدی را به صورت چشمگیری ارتقا دهد.



شکل ۲۱-الف) شماتیک دستگاه، ساختارهای ناهمگون عمودی بین دو نیمه‌رسانای WSe_2 نوع p و Bi_2Te_3 نوع n را نشان می‌دهد که یک اتصال p-n را تشکیل داده‌اند. تصویر نوری از دستگاه ساخته‌شده، نمای فیزیکی اتصال و الکترونها را به‌وضوح نمایش می‌دهد. نمودار جریان-ولتاژ در شرایط تاریکی نشان می‌دهد که دستگاه بدون نور چه رفتار الکتریکی پایه‌ای دارد. پاسخ جریان-ولتاژ در شرایط نوری (تابش 633 nm با شدت‌های مختلف) مقایسه شده با حالت تاریکی، افزایش جریان نوری را نشان می‌دهد. نمودار توان الکتریکی تولیدشده در برابر شدت‌های مختلف نور ورودی (633 nm) نشان می‌دهد که دستگاه توانایی تبدیل انرژی نوری به الکتریکی را دارد، و فوتوجریان تولیدشده بر حسب شدت نور، در دو حالت ولتاژ صفر و یک ولت، نشان‌دهنده حساسیت دستگاه به نور در شرایط بایاس مختلف است. (ز) پاسخ‌دهی نوری در شدت‌های گوناگون نور ولتاژهای مختلف، کارایی نوری دستگاه را مشخص می‌کند. عملکرد سوئیچ‌زنی نوری با روشن و خاموش شدن متناوب نور 633 nm بررسی شده و نشان داده که دستگاه به‌سرعت به تغییرات نور واکنش نشان می‌دهد. (ط) در نهایت، سرعت پاسخ‌دهی دستگاه به نور (زمان روشن و خاموش شدن جریان) اندازه‌گیری شده و نشان می‌دهد که دستگاه عملکرد سریع و مناسبی دارد [83].

بنابراین، مطالعه‌ی Liu و همکاران نشان داد که استفاده از نانولایه‌های WS_2 با رشد کنترل شده می‌تواند منجر به ساخت آشکارسازهای نوری با حساسیت بالا، زمان پاسخ سریع و پایداری عملکردی مناسب شود که برای کاربردهای پیشرفته در حوزه‌ی فوتونیک و حسگرها بسیار امیدوارکننده است.

¹⁵³ Broadband detection

¹⁵⁴ Quantum efficiency

همچنین، مواد دوبعدی سنتی غیربلوری مانند نیمه‌هادی‌های III-V و II-VI مانند GaAs یا CdSe با تحرک حامل بالا و جذب نوری مناسب نیز نیازمند مطالعه بیشتر هستند، به‌ویژه از نظر توسعه روش‌های ارزان و محلولی برای تولید آن‌ها.

در کنار این موضوعات، نیاز به مواد دوبعدی با گاف باند باریک و پایدار برای تشخیص در محدوده مادون قرمز میانی (mid-IR) و دور (far-IR) نیز بسیار بالاست. موادی مانند فسفر سیاه (BP) یا آرسنید-فسفید (AsP) دارای این ویژگی‌ها هستند، ولی از نظر پایداری دچار مشکل‌اند.

یکی دیگر از رویکردهای رایج، استفاده از فوتوترانزیستورهای ترکیبی یا دیودهای نوری^{۱۵۵} برای افزایش کارایی آشکارسازهاست. اما دستیابی هم‌زمان به کارایی کوانتومی بالا و پاسخدهی سریع، همچنان چالشی جدی است. بنابراین، نیاز به طراحی هتروساختارهای نوین برای پاسخ به این نیاز دوگانه همچنان باقی است.

همچنین، توسعه روش‌های اقتصادی برای ساخت فیلم‌های تک‌بلوری بزرگ‌مقیاس و یکنواخت، مسئله‌ای جذاب و حیاتی است. به علاوه، انعطاف‌پذیری مکانیکی مواد دوبعدی این امکان را فراهم می‌کند که در دستگاه‌های اپتوالکترونیکی پوشیدنی و منعطف در مقیاس بزرگ استفاده شوند.

از سوی دیگر، یکی از موانع بزرگ در ادغام مواد اپتوالکترونیکی سنتی با مدارهای مجتمع CMOS، ناسازگاری شبکه بلوری و گرمایی است. این در حالی است که مواد دوبعدی به دلیل اتصال ضعیف و اندروالس، سازگاری بالایی با زیرلایه‌ها دارند و می‌توانند با فناوری CMOS به‌خوبی ترکیب شوند. در نهایت، توسعه فناوری تصویربرداری کم‌هزینه بر پایه مواد اپتوالکترونیکی دوبعدی نیز یکی از اهداف مهم آینده محسوب می‌شود.

۱۰. نتیجه‌گیری

در مجموع، این مقاله مروری به بررسی پیشرفت‌های اخیر در زمینه آشکارسازهای نوری مبتنی بر مواد دوبعدی و ساختارهای نا همگون آن پرداخته است. در این بررسی، ابتدا به روش‌های سنتز مواد دوبعدی به‌طور خاص به روش رسوب شیمیایی فاز بخار و انواع آن پرداختیم سپس در مورد ساختارهای نا همگون مواد دوبعدی و انواع آن صحبت کردیم و در ادامه آشکارسازهای نوری مبتنی بر مواد دوبعدی و پارامترهای مهم در آنها را مورد بررسی قرار دادیم و مکانیسم‌های عملکرد آشکارسازهای نوری و سپس به

روش‌های بهینه‌سازی آن‌ها برای دستیابی به عملکرد بالا پرداخته شد. تمرکز اصلی مقاله روی سه محور بوده است:

۱. روش رسوب شیمیایی بخار و انواع آن
۲. رشد کنترل‌شده‌ی مواد دوبعدی تک‌کریستالی
۳. ساختارهای نا همگون و انواع آن
۴. آشکارسازهای نوری مبتنی بر ماده دوبعدی و پارامترهای مهم در آنها
۵. آشکارسازهای نوری مبتنی بر ساختارهای نا همگون، و روش‌های بهبود عملکرد این آشکارسازها

مراجع

- [1] Y. Abdi, M. Taleb, M. Black, S. Hajibaba, M. Moayedi, and N. Talebi, "2D Borophene: In-Plane Hyperbolic Polaritons in the Visible Spectral Range," *Adv. Funct. Mater.*, p. e13016, 2025.
- [2] Y. Ma *et al.*, "Two-dimensional layered material photodetectors: what could be the upcoming downstream applications beyond prototype devices?," *Nanoscale Horizons*, vol. 9, no. 10, pp. 1599–1629, 2024.
- [3] N. K. Perkgöz, "CVD growth and characterization of 2D transition metal dichalcogenides, MoS2 and WS2," *Anadolu Univ. J. Sci. Technol. A-Applied Sci. Eng.*, vol. 18, no. 2, pp. 375–387, 2017.
- [4] M. Faraji *et al.*, "Two-dimensional materials in semiconductor photoelectrocatalytic systems for water splitting," *Energy Environ. Sci.*, vol. 12, no. 1, pp. 59–95, 2019.
- [5] G. Ansaripour and a. Al-Jadiri, "تحرک الکترونی،" *Nanomeghyas*, vol. 12, no. 1, pp. 1–10, 2025, doi: 10.22034/ns.2025.722233. [in Persian]
- [6] S. K. Behura, C. Wang, Y. Wen, and V.

- 10.3390/ma16114007.
- [16] M. Xu *et al.*, "Reconfiguring nucleation for CVD growth of twisted bilayer MoS₂ with a wide range of twist angles," *Nat. Commun.*, vol. 15, no. 1, p. 562, 2024.
- [17] J. Colligon and V. Vishnyakov, "Thin films: sputtering, PVD methods, and Applications," *Surf. Interface Sci. Vol. 9 Appl. Surf. Sci. I*, vol. 9, pp. 1–55, 2020.
- [18] A. K. Katiyar *et al.*, "2D materials in flexible electronics: recent advances and future prospectives," *Chem. Rev.*, vol. 124, no. 2, pp. 318–419, 2023.
- [19] S. Sen, A. Khan, A. Gupta, and A. Chowdhury, "Two-Dimensional Materials: Revolutionizing Electronics and Optoelectronics," in *Handbook of Electronic Devices and Materials*, Springer, 2026, pp. 1–11.
- [20] L. Sun, Y. Li, Y. He, and G. Wu, "Supercritical fluid-assisted CVD method: Moderate-temperature conversion from methane to CNTs," *J. Taiwan Inst. Chem. Eng.*, vol. 185, p. 106661, 2026.
- [21] N. Ansari, E. Mohebbi, and F. Gholami, "تاثیر WSe₂ سیلیکا به عنوان لایه میانی بر روی جذب ساختار شامل در حضور اثر پلاسمونیک," *Nanomeghyas*, vol. 6, no. 3, pp. 73–77, 2019, [Online]. Available: https://nanomeghyas.ir/article_46436.html [in Persian]
- [22] M. Khan *et al.*, "Tailoring Band Gap, Structural, and Optical Properties of CVD-Grown Few-Layer MoS₂ via Swift Heavy-Ion Irradiation," *Vacuum*, p. 115151, 2026.
- [23] J. Yang *et al.*, "Operando Scanning Electron Microscopy Study of Support Interactions and Mechanisms of Salt-Assisted WS₂ Growth," *Chem. Mater.*, vol. 37, no. 3, pp. 989–1000, Feb. 2025, doi: 10.1021/acs.chemmater.4c02603.
- [24] E. E. Anthonio *et al.*, "Seed-Assisted Substitutional Doping of the Late 3d-Transition Metals in Transition Metal Dichalcogenides," *Adv. Funct. Mater.*, p. Berry, "Graphene–semiconductor heterojunction sheds light on emerging photovoltaics," *Nat. Photonics*, vol. 13, no. 5, pp. 312–318, 2019.
- [7] K. Jiang *et al.*, "Molybdenum-sulfide-based optoelectronic device for multivalued logic," *Cell Reports Phys. Sci.*, vol. 6, no. 4, 2025.
- [8] N. Hassani, M. Ghorbani-Asl, B. Radha, M. Drndic, A. V Krashenninnikov, and M. Neek-Amal, "Gas permeability and selectivity of a porous WS₂ monolayer," *J. Phys. Chem. C*, vol. 125, no. 45, pp. 25055–25066, 2021.
- [9] M. Kim, K. Y. Ma, H. Kim, Y. Lee, J. H. Park, and H. S. Shin, "2D materials in the display industry: status and prospects," *Adv. Mater.*, vol. 35, no. 43, p. 2205520, 2023.
- [10] A. Mazaheri, M. Javadi, and Y. Abdi, "Chemical vapor deposition of two-dimensional boron sheets by thermal decomposition of diborane," *ACS Appl. Mater. Interfaces*, vol. 13, no. 7, pp. 8844–8850, 2021.
- [11] L. Sun *et al.*, "Chemical vapour deposition," *Nat. Rev. Methods Prim.*, vol. 1, no. 1, p. 5, 2021, doi: 10.1038/s43586-020-00005-y.
- [12] M. Samadi, N. Sarikhani, M. Zirak, H. Zhang, H.-L. Zhang, and A. Z. Moshfegh, "Group 6 transition metal dichalcogenide nanomaterials: synthesis, applications and future perspectives," *Nanoscale Horizons*, vol. 3, no. 2, pp. 90–204, 2018.
- [13] H. I. Rasool, C. Ophus, and A. Zettl, "Atomic defects in two dimensional materials," *Adv. Mater.*, vol. 27, no. 38, pp. 5771–5777, 2015.
- [14] Y. Sun, W. He, C. Jiang, J. Li, J. Liu, and M. Liu, "Wearable Biodevices Based on Two-Dimensional Materials: From Flexible Sensors to Smart Integrated Systems," Dec. 2025, *Springer Science and Business Media B.V.* doi: 10.1007/s40820-024-01597-w.
- [15] D. M. Sedlovets, "N-Doped Graphene-like Film/Silicon Structures as Micro-Capacitor Electrodes," 2023. doi:

- NiFeO_x H_y for Energy-Saving Hydrogen Evolution via Urea Oxidation Reaction-Assisted Water Splitting,” *ACS Appl. Nano Mater.*, vol. 6, no. 23, pp. 21556–21570, 2023.
- [34] S. Jin, M. J. Bierman, and S. A. Morin, “A new twist on nanowire formation: Screw-dislocation-driven growth of nanowires and nanotubes,” *J. Phys. Chem. Lett.*, vol. 1, no. 9, pp. 1472–1480, 2010.
- [35] L. Chen *et al.*, “Screw-dislocation-driven growth of two-dimensional few-layer and pyramid-like WSe₂ by sulfur-assisted chemical vapor deposition,” *ACS Nano*, vol. 8, no. 11, pp. 11543–11551, 2014.
- [36] T. H. Ly, J. Zhao, H. Kim, G. H. Han, H. Nam, and Y. H. Lee, “Vertically conductive MoS₂ spiral pyramid,” *Adv. Mater.*, vol. 28, no. 35, pp. 7723–7728, 2016.
- [37] S. Najmaei *et al.*, “Vapour phase growth and grain boundary structure of molybdenum disulphide atomic layers,” *Nat. Mater.*, vol. 12, no. 8, pp. 754–759, 2013.
- [38] W. Yao, B. Wu, and Y. Liu, “Growth and grain boundaries in 2D materials,” *ACS Nano*, vol. 14, no. 8, pp. 9320–9346, 2020.
- [39] Q. Fu and X. Bao, “Surface chemistry and catalysis confined under two-dimensional materials,” *Chem. Soc. Rev.*, vol. 46, no. 7, pp. 1842–1874, 2017.
- [40] J. Chen *et al.*, “Chemical vapor deposition of large-size monolayer MoSe₂ crystals on molten glass,” *J. Am. Chem. Soc.*, vol. 139, no. 3, pp. 1073–1076, 2017.
- [41] O. J. Burton, V. Babenko, V.-P. Veigang-Radulescu, B. Brennan, A. J. Pollard, and S. Hofmann, “The role and control of residual bulk oxygen in the catalytic growth of 2D materials,” *J. Phys. Chem. C*, vol. 123, no. 26, pp. 16257–16267, 2019.
- [42] Y. Gao *et al.*, “Large-area synthesis of high-quality and uniform monolayer WS₂ on reusable Au foils,” *Nat. Commun.*, vol. 6, no. 1, p. 8569, 2015.
- e31464, 2026.
- [25] L. Lin *et al.*, “Towards super-clean graphene,” *Nat. Commun.*, vol. 10, no. 1, p. 1912, 2019.
- [26] J. Yu *et al.*, “Exploring kinetic control for the growth of layered MoS₂ (1-x) Se_{2x} alloy and its electrocatalytic activity in hydrogen evolution reaction,” *Appl. Surf. Sci.*, vol. 646, p. 158860, 2024.
- [27] S. Marinov, I. Ivanov, G. Popov, M. Abrashev, and Z. Kiss’ovski, “Vertical carbon nanostructures deposited by microwave PECVD at low and atmospheric pressure,” in *Journal of Physics: Conference Series*, IOP Publishing, 2026, p. 12003.
- [28] K. Yi *et al.*, “Plasma-enhanced chemical vapor deposition of two-dimensional materials for applications,” *Acc. Chem. Res.*, vol. 54, no. 4, pp. 1011–1022, 2021.
- [29] A. Stoffel, A. Kovacs, W. Kronast, and B. Müller, “LPCVD against PECVD for micromechanical applications,” *J. Micromechanics Microengineering*, vol. 6, no. 1, pp. 1–13, 1996.
- [30] A. T. Hoang *et al.*, “Low-temperature growth of MoS₂ on polymer and thin glass substrates for flexible electronics,” *Nat. Nanotechnol.*, vol. 18, no. 12, pp. 1439–1447, 2023.
- [31] A. Odusanya, I. Rahaman, P. K. Sarkar, A. Zkria, K. Ghosh, and A. Haque, “Laser-Assisted Growth of Carbon-Based Materials by Chemical Vapor Deposition,” *C*, vol. 8, no. 2, p. 24, 2022.
- [32] T. Fidanova *et al.*, “Single and multilayer graphene grown by CVD technique: Characterization for electro-optical applications,” in *10th Jubilee International Conference of the Balkan Physical Union*, 2019, p. 20017.
- [33] M. Kajbafvala, K. Rahimi, B. Eshqi, O. Moradlou, N. Sarikhani, and A. Z. Moshfegh, “MoS₂–MoO₂/Ni₃S₂/Nickel Foam Electrocatalysts Decorated with

- [51] Q. Huang *et al.*, "The mechanistic insights into the 2H-1T phase transition of MoS₂ upon alkali metal intercalation: from the study of dynamic sodiation processes of MoS₂ nanosheets," *Adv. Mater. Interfaces*, vol. 4, no. 15, p. 1700171, 2017.
- [52] S. Kretschmer, H.-P. Komsa, P. Bøggild, and A. V. Krasheninnikov, "Structural transformations in two-dimensional transition-metal dichalcogenide MoS₂ under an electron beam: insights from first-principles calculations," *J. Phys. Chem. Lett.*, vol. 8, no. 13, pp. 3061–3067, 2017.
- [53] J. Zhu *et al.*, "Argon plasma induced phase transition in monolayer MoS₂," *J. Am. Chem. Soc.*, vol. 139, no. 30, pp. 10216–10219, 2017.
- [54] S. Song, D. H. Keum, S. Cho, D. Perello, Y. Kim, and Y. H. Lee, "Room temperature semiconductor–metal transition of MoTe₂ thin films engineered by strain," *Nano Lett.*, vol. 16, no. 1, pp. 188–193, 2016.
- [55] W. Zhai *et al.*, "Phase engineering of nanomaterials: transition metal dichalcogenides," *Chem. Rev.*, vol. 124, no. 7, pp. 4479–4539, 2024.
- [56] A. Shahmanesh *et al.*, "2D Monolayer of the 1T' phase of alloyed WSe₂ from colloidal synthesis," *J. Phys. Chem. C*, vol. 125, no. 20, pp. 11058–11065, 2021.
- [57] C. Erandes *et al.*, "Indirect to direct band gap crossover in two-dimensional WS₂ (1–x) Se_{2x} alloys," *npj 2D Mater. Appl.*, vol. 5, no. 1, p. 7, 2021.
- [58] S. Wang, G.-D. Lee, S. Lee, E. Yoon, and J. H. Warner, "Detailed atomic reconstruction of extended line defects in monolayer MoS₂," *ACS Nano*, vol. 10, no. 5, pp. 5419–5430, 2016.
- [59] M. Tosun *et al.*, "Air-stable n-doping of WSe₂ by anion vacancy formation with mild plasma treatment," *ACS Nano*, vol. 10, no. 7, pp. 6853–6860, 2016.
- [60] Z. Yu *et al.*, "Towards intrinsic charge
- [43] Y. Xiao, W. Zheng, B. Yuan, C. Wen, and M. Lanza, "Highly accurate thickness determination of 2D materials," *Cryst. Res. Technol.*, vol. 56, no. 6, p. 2100056, 2021.
- [44] G. Kladnik *et al.*, "Engineering 2D spin networks by on-surface encapsulation of azafullerene radicals in nanotemplates," *Nat. Commun.*, vol. 16, no. 1, p. 193, 2025.
- [45] S. Wang *et al.*, "Shape evolution of monolayer MoS₂ crystals grown by chemical vapor deposition," *Chem. Mater.*, vol. 26, no. 22, pp. 6371–6379, 2014.
- [46] G. M. Maragkakis *et al.*, "Imaging the crystal orientation of 2D transition metal dichalcogenides using polarization-resolved second-harmonic generation," *Opto-Electronic Adv.*, vol. 2, no. 11, pp. 190021–190026, 2019.
- [47] J. H. Choi, M. J. Ha, D. G. Kim, J. M. Lee, and J. H. Ahn, "Low-Temperature Growth of 2D-MoS₂ Thin Films by Plasma-Enhanced Atomic Layer Deposition Using a New Molybdenum Precursor and Applicability to Gas Sensors," *ACS Appl. Nano Mater.*, vol. 6, no. 13, pp. 12132–12139, Jul. 2023, doi: 10.1021/acsanm.3c01887.
- [48] X. Xu *et al.*, "Ultrafast epitaxial growth of metre-sized single-crystal graphene on industrial Cu foil," *Sci. Bull.*, vol. 62, no. 15, pp. 1074–1080, 2017.
- [49] D. Kim *et al.*, "1. Ma, Y., et al., Two-dimensional layered material photodetectors: what could be the upcoming downstream applications beyond prototype devices? Nanoscale Horizons, 2024. 2. Perkgöz, N.K., CVD growth and characterization of 2D transition metal dichalcogen," *Chem. Rev.*, vol. 123, no. 19, pp. 11230–11268, 2023.
- [50] Y.-C. Lin, D. O. Dumcenco, Y.-S. Huang, and K. Suenaga, "Atomic mechanism of the semiconducting-to-metallic phase transition in single-layered MoS₂," *Nat. Nanotechnol.*, vol. 9, no. 5, pp. 391–396, 2014.

- photodetectors based on 2D materials,” *Adv. Opt. Mater.*, vol. 7, no. 15, p. 1900410, 2019.
- [71] Z. Chen *et al.*, “High responsivity, broadband, and fast graphene/silicon photodetector in photoconductor mode,” *Adv. Opt. Mater.*, vol. 3, no. 9, pp. 1207–1214, 2015.
- [72] L. Guo, J. Han, and J. Wang, “Recent advances in enhancing the photodetector performance of 2D materials by combining them with organic thin films,” *J. Mater. Chem. C*, vol. 12, no. 4, pp. 1233–1267, 2024.
- [73] N. Huo and G. Konstantatos, “Recent progress and future prospects of 2D-based photodetectors,” *Adv. Mater.*, vol. 30, no. 51, p. 1801164, 2018.
- [74] J. Zha *et al.*, “Infrared photodetectors based on 2D materials and nanophotonics,” *Adv. Funct. Mater.*, vol. 32, no. 15, p. 2111970, 2022.
- [75] J. Wang, J. Han, X. Chen, and X. Wang, “Design strategies for two-dimensional material photodetectors to enhance device performance,” *InfoMat*, vol. 1, no. 1, pp. 33–53, 2019.
- [76] S. Kaushik and R. Singh, “2D layered materials for ultraviolet photodetection: a review,” *Adv. Opt. Mater.*, vol. 9, no. 11, p. 2002214, 2021.
- [77] M. Long, P. Wang, H. Fang, and W. Hu, “Progress, challenges, and opportunities for 2D material based photodetectors,” *Adv. Funct. Mater.*, vol. 29, no. 19, p. 1803807, 2019.
- [78] Q. Qiu and Z. Huang, “Photodetectors of 2D materials from ultraviolet to terahertz waves,” *Adv. Mater.*, vol. 33, no. 15, p. 2008126, 2021.
- [79] D. B. Velusamy *et al.*, “2D organic–inorganic hybrid thin films for flexible UV–visible photodetectors,” *Adv. Funct. Mater.*, vol. 27, no. 15, p. 1605554, 2017.
- transport in monolayer molybdenum disulfide by defect and interface engineering,” *Nat. Commun.*, vol. 5, no. 1, p. 5290, 2014.
- [61] H.-V. Han *et al.*, “Photoluminescence enhancement and structure repairing of monolayer MoSe₂ by hydrohalic acid treatment,” *ACS Nano*, vol. 10, no. 1, pp. 1454–1461, 2016.
- [62] J. Lu *et al.*, “Atomic healing of defects in transition metal dichalcogenides,” *Nano Lett.*, vol. 15, no. 5, pp. 3524–3532, 2015.
- [63] L. Zhou *et al.*, “Role of Molecular sieves in the CVD synthesis of large-area 2D MoTe₂,” *Adv. Funct. Mater.*, vol. 27, no. 3, p. 1603491, 2017.
- [64] Y. Zhao *et al.*, “Supertwisted spirals of layered materials enabled by growth on non-Euclidean surfaces,” *Science (80-.)*, vol. 370, no. 6515, pp. 442–445, 2020.
- [65] J. Li, X. Yang, Z. Zhang, W. Yang, X. Duan, and X. Duan, “Towards the scalable synthesis of two-dimensional heterostructures and superlattices beyond exfoliation and restacking,” *Nat. Mater.*, vol. 23, no. 10, pp. 1326–1338, 2024.
- [66] Z. Zhang *et al.*, “Endoeptaxial growth of monolayer mosaic heterostructures,” *Nat. Nanotechnol.*, vol. 17, no. 5, pp. 493–499, 2022.
- [67] S. Xie *et al.*, “Coherent, atomically thin transition-metal dichalcogenide superlattices with engineered strain,” *Science (80-.)*, vol. 359, no. 6380, pp. 1131–1136, 2018.
- [68] D. Akinwande, N. Petrone, and J. Hone, “Two-dimensional flexible nanoelectronics,” *Nat. Commun.*, vol. 5, no. 1, p. 5678, 2014.
- [69] W. Ahmad *et al.*, “Interface engineering in van der Waals heterostructures: enhancing photodetector efficiency through structural and functional modifications,” *Adv. Funct. Mater.*, vol. 36, no. 24, p. e16893, 2026.
- [70] G. Cao, Y. An, Q. Bao, and X. Li, “Physics and optoelectronic simulation of

- [80] Z. Cheng, T. Zhao, and H. Zeng, "2D material-based photodetectors for infrared imaging," *Small Sci.*, vol. 2, no. 1, p. 2100051, 2022.
- [81] M. Esmailpour, Y. Abdi, and A. Z. Moshfegh, "Single step dual-morphological CVD growth of 2D WS₂-WO₃ for fast-response broadband photodetection," *Available SSRN 5782674*.
- [82] P. Ji *et al.*, "High-performance photodetector based on an interface engineering-assisted graphene/silicon Schottky junction," *Microsystems Nanoeng.*, vol. 8, no. 1, p. 9, 2022.
- [83] H. Liu *et al.*, "Self-powered broad-band photodetectors based on vertically stacked WSe₂/Bi₂Te₃ p-n heterojunctions," *ACS Nano*, vol. 13, no. 11, pp. 13573–13580, 2019.



Physics and Technology of Chemical Vapor Deposition (CVD) of Two-Dimensional Heterostructures in Photodetector Applications

Mahboube Esmailpour¹, Yaser Abdi², Alireza Moshfegh^{1,3*}

¹ Center for Nanoscience and Nanotechnology, Institute for Convergence Science & Technology, Sharif University of Technology, Tehran 14588-89694, Iran

² Department of Physics, University of Tehran, Tehran, Iran

³ Department of Physics, Sharif University of Technology, Tehran, 11155-9161, Iran

Received: 2026-04-12

Revised: 2026-08-15

Accepted: 2026-06-09

Abstract: In this review article, recent advances in the synthesis and applications of two-dimensional (2D) materials are systematically examined, with a particular emphasis on chemical vapor deposition (CVD) techniques. First, the fundamental growth principles and key parameters governing the CVD process—including temperature, pressure, carrier gas flow rate, precursor type, and substrate characteristics—are discussed in detail. Subsequently, common CVD approaches such as APCVD, LPCVD, PECVD, MOCVD, and LECVD are compared in terms of growth capability, advantages, and inherent limitations. In the following section, strategies for achieving controlled growth of single-crystalline 2D materials are reviewed, along with the influence of critical factors such as grain size, layer number, morphology, crystal orientation, crystal phase, doping, and structural defects on crystallinity and optoelectronic properties. In addition, lateral and vertical heterostructures are highlighted, with particular attention to their role in band engineering and carrier transport modulation.

Another major part of this review focuses on 2D material-based photodetectors, where the fundamental detection mechanisms—including photoconductive, photovoltaic, photogating, and photothermal effects—are analyzed. Key performance metrics such as responsivity, quantum efficiency, response time, signal-to-noise ratio, and specific detectivity are also evaluated and compared across different device architectures. Finally, the main challenges in this field are discussed, including wafer-scale growth, defect control, infrared photodetection.

Keywords: Chemical Vapor Deposition (CVD), Two-Dimensional Materials, Heterostructures, Transition Metal Dichalcogenides (TMDs), Photodetectors.

Corresponding Author. Email: moshfegh@sharif.edu

How to Cite This Article:

Esmailpour M, Moshfegh A, Abdi Y. Physics and Technology of Chemical Vapor Deposition (CVD) of Two-Dimensional Heterostructures in Photodetector Applications. Nanomeghyas. 2026;():e738112 (In Persian). doi: 10.22034/ns.2026.2090755.1430



This is an open access article under the CC-BY license (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).