



Semnan University

# Journal of Modeling in Engineering

Journal homepage: <https://modelling.semnan.ac.ir/>



## Research Article

# Synthesis of WS<sub>2</sub> nanometer monolayer by the chemical vapor deposition method

Maryam Nayeri<sup>1,\*</sup>, Hamed Taheri<sup>2</sup>, Fatemeh Ostovari<sup>3</sup>

1. Department of Electrical Engineering, Yazd Branch, Islamic Azad University, Yazd, Iran

2. Department of Electrical Engineering, Imam Ali Technical University, Technical University of Yazd, Yazd, Iran.

3. Physics Department, Faculty of Science, Yazd University, P.O. Box 89195-741, Yazd, Iran.

\*Corresponding Author: [nayeri@iauyazd.ac.ir](mailto:nayeri@iauyazd.ac.ir)

## PAPER INFO

### Paper history:

Received: 03 September 2022

Revised: 22 January 2023

Accepted: 29 January 2023

### Keywords:

monolayer,  
WS<sub>2</sub>,  
CVD method,  
Raman spectroscopy.

## ABSTRACT

Monolayer WS<sub>2</sub> offers great promise for use in optical devices due to its direct bandgap and high photoluminescence intensity. In this way, large-area and high quality materials are essential for implementation of technological applications. In this research, we Synthesize WS<sub>2</sub> monolayer under controlled temperature conditions and characterize the films using Fourier-transform infrared spectroscopy (FTIR), Raman, x-ray photoelectron spectroscopies, and scanning electron microscope (SEM). The results show that with the introduction of argon gas as a carrier, the quality of the layer improves and the growth level of WS<sub>2</sub> increases, and as a result, the films show an average coating thickness of 43 nm. By controlling the growth temperature and timely entry of argon-carrying gas, the WO<sub>3</sub> precursor is more effectively reduced and the oxidative etching of the synthesized monolayers is protected. The addition of hydrogen more effectively reduces the WO<sub>3</sub> precursor and protects against oxidative etching of the synthesized monolayers. The obtained results indicate the complete synthesis of a two-dimensional structure (2D) of a single layer with sheets consisting of a crystal size of about 26 nm with a thickness of about 43 nm.

© 2023 Published by Semnan University Press.

DOI: <https://doi.org/10.22075/jme.2023.28234.2327>

## How to cite this article:

Nayeri, M., Taheri, H., & Ostovari, F. (2023). Synthesis of WS<sub>2</sub> nanometer monolayer by the chemical vapor deposition method. *Journal of Modeling in Engineering*, 21(73), 63-69. doi: 10.22075/jme.2023.28234.2327

## سنتر تک لایه نانومتری WS<sub>2</sub> با روش رسوب بخار شیمیایی

مریم نیری<sup>۱\*</sup>، حامد طاهری<sup>۲</sup>، فاطمه استواری<sup>۳</sup>

اطلاعات مقاله	چکیده
<p>نوع مقاله: پژوهشی دریافت مقاله: ۱۴۰۱/۰۶/۱۲ بازنگری مقاله: ۱۴۰۱/۱۱/۰۲ پذیرش مقاله: ۱۴۰۱/۱۱/۰۹</p>	<p>تک لایه تنگستن دی سولفید (WS<sub>2</sub>) به دلیل دارا بودن شکاف نوار مستقیم و شدت نوردی بالا، نوید بخش بسیار خوبی برای استفاده در دستگاه‌های نوری می‌باشد. در این پژوهش، تک لایه WS<sub>2</sub> را در شرایط دمایی کنترل شده سنتز و فیلم‌های تولید شده را با استفاده از طیف سنجی مادون قرمز (FT-IR)، رامان، اشعه ایکس (XRD) و تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) مشخصه‌یابی کردیم. نتایج نشان می‌دهد که ورود گاز آرگون به عنوان حامل، باعث بهبود کیفیت لایه شده و سطح رشد WS<sub>2</sub> را افزایش می‌دهد و در نتیجه فیلم‌ها ضخامت پوششی متوسط ۴۳ نانومتری را نشان می‌دهند. با کنترل دمایی رشد و ورود به موقع گاز حامل آرگون به طور موثرتری پیش ساز WO<sub>3</sub> کاهش یافته و از اکسیداسیون تک لایه‌های سنتز شده محافظت می‌شود. نتایج بدست آمده حاکی از سنتز کامل ساختار دو بعدی تک لایه با صفحات متشکل از اندازه کریستالی حدود ۲۶ نانومتر با ضخامت در حدود ۴۳ نانومتر می‌باشد.</p>
<p><b>واژگان کلیدی:</b> تک لایه، تنگستن دی سولفید، روش CVD، طیف سنجی رامان.</p>	

### ۱- مقدمه

مواد دوبعدی رفتار متمایزی را نسبت به همتای سه بعدی خود به نمایش می‌گذارند. گرافن به عنوان اولین عضو خانواده مواد دوبعدی، دارای خواص بی نظیر شیمیایی، مکانیکی، حرارتی و الکترونیکی است، لیکن شکاف نوار صفر گرافن، استفاده از آن را در کاربرد ادوات الکترونیکی محدود می‌سازد [۱-۵]. اخیراً مواد دی‌کالکوژناید فلز واسطه<sup>۲</sup> (TMDCs)، از دیگر اعضای این خانواده، به دلیل کاربردشان در صنایع الکترونیک توجه محققان را به خود جلب نموده‌اند. مواد TMDC، غیرآلی و دارای فرمول شیمیایی MX<sub>2</sub> هستند که در آن M نشان‌دهنده فلز واسطه از گروه VB، VIB، IVB می‌باشد و X یک کالکوژن مانند S، Se و Te است. این مواد دارای ساختار ساندویچی هستند که در آن اتم‌های فلز در میان دولایه از اتم‌های کالکوژن قرار گرفته‌اند و با یکدیگر پیوند کووالانسی برقرار

نموده‌اند و در حالت سه بعدی ارتباط لایه‌های مجاور از طریق پیوند ضعیف واندروالسی برقرار است. محدوده خواص الکترونیکی این مواد از عایق نظیر HfS<sub>2</sub> به نیمه‌هادی (WS<sub>2</sub> و MoS<sub>2</sub>) تا فلز (NbS<sub>2</sub> و VS<sub>2</sub>) تغییر می‌کند. گذار از حالت سه بعدی به دوبعدی در این دسته از مواد نیمه‌هادی منجر به شکاف نوار غیرمستقیم به مستقیم با شکاف نوار قابل ملاحظه خواهد شد [۶ و ۷]. همین موضوع استفاده از آن‌ها را در ادوات الکترونیک نوری و ترانزیستورهای اثر میدان و الکترونیک انعطاف‌پذیر با عملکرد بالا نوید بخش می‌سازد. تک لایه مواد TMDC با استفاده از روش‌های مکانیکی، لایه‌برداری و شیمیایی از توده، استخراج می‌شوند. به عنوان نمونه، ورقه‌های<sup>۳</sup> نازک TMDC از بلورهای با منشأ توده‌ای، توسط لایه برداری میکرومکانیکی<sup>۴</sup> (MC) با روش نوار چسب، ایجاد می‌شوند [۸]. در این روش، ورقه‌های منفرد با خلوص بالا و به صورت

\* پست الکترونیک نویسنده مسئول: nayeri@iauyazd.ac.ir

۱- دانشیار، گروه مهندسی برق، واحد یزد، دانشگاه آزاد اسلامی، یزد، ایران

۲- دانشجوی دکتری، گروه مهندسی برق، آموزشکده فنی امام علی (ع)، دانشگاه

فنی و حرفه ای استان یزد، ایران

۳- استادیار، گروه حالت جامد، دانشکده فیزیک، دانشگاه یزد، یزد، ایران

<sup>2</sup> Transition Metal Dichalcogenides

<sup>3</sup> Flakes

<sup>4</sup> Micromechanical Cleavage

دمای بهینه و بهترین شرایط بر پوشش، تداوم و کیفیت تک لایه‌های  $WS_2$  سنتز شده به روش CVD با استفاده از مقالات و شرایط آزمایشگاه بررسی شده و بهترین حالت برای سنتز  $WS_2$  با بهترین کیفیت انتخاب و بررسی می‌شود. با بهینه‌سازی شرایط رشد، تک‌لایه  $WS_2$  با سطح بزرگ ( $\sim 8 \mu m$ ) با ویژگی‌های برتر را بدست می‌آوریم.

## ۲- روش تجربی

### ۲-۱- مواد مصرفی

در این تحقیق از پیش ماده‌های پودر اکسید تنگستن ( $WO_3$ ) و پودر گوگرد (S) خریداری شده از مرک بدون تصفیه استفاده گردیده است.

### ۲-۲- دستگاه‌های اندازه‌گیری

در این پژوهش، تعیین فاز و ساختار نمونه بدست آمده توسط پراش اشعه ایکس (XRD) (پراش سنج Philip X-ray Pert X'Pert با تابش مس دارای طول موج  $\lambda = 1.54184 \text{ \AA}$ )، تعیین مورفولوژی و اندازه ضخامت صفحات توسط میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) با دستگاه SEM HV: 15kV مورد بررسی قرار گرفت. همچنین آنالیز طیف سنجی مادون قرمز برای شناسایی پیوندهای شیمیایی تشکیلی از طیف سنجی مادون قرمز (FT-IR) در منطقه  $200 - 4000 \text{ cm}^{-1}$  بر روی دستگاه Shimadzu 470 FT-IR و از طیف سنجی رامان برای تشخیص پیوندهای درون مولکولی و نوری استفاده شد.

### ۲-۳- سنتز تک لایه

سنتز تک لایه  $WS_2$  در کوره لوله کوارتز مطابق با شکل ۱ انجام می‌شود. در مرکز کوره یک قایق کوارتز حاوی  $\sim 0.5$  گرم پودر  $WO_3$  قرار دارد. ویفر  $Si/SiO_2$  ( $300$  نانومتر) رو به پایین، مستقیماً بالای پیش ساز قرار گرفته است. گوگرد (به میزان  $0.1$  گرم) در بالا، خارج از منطقه گرمایش کوره قرار می‌گیرد. لازم به ذکر است که دقت زیادی برای قرار دادن پیش ماده  $WO_3$ ، بسترها و منبع گوگرد در موقعیت‌های یکسان برای هر رشد انجام می‌شود، زیرا موقعیت ممکن است بر رشد و کیفیت فیلم تأثیر بگذارد [۱۵ و ۱۶]. قبل از سنتز، از پمپ شستشو در لوله کوارتز برای ایجاد یک محیط اولیه یکنواخت که به تکرارپذیری کمک می‌کند، استفاده شد. برای داشتن بهترین نتیجه از

تمیز تولید می‌شوند که برای ساخت ادوات الکترونیکی مناسب است. لیکن این روش مقیاس‌پذیر نیست، زیرا ضخامت و اندازه ورقه را نمی‌توان به‌طور دقیق کنترل کرد. بکارگیری روش‌های پیشرفته برای سنتز لایه‌ها در سطوح و کمیت‌های بزرگ، به منظور کاربردهای وسیع این مواد در ادوات الکترونیک انعطاف‌پذیر و اپتوالکترونیک شفاف از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. در مورد گرافن نیز روش‌های سنتز پیشرفته جهت تولید در مقیاس‌های بزرگتر، روش رسوب توسط بخار شیمیایی<sup>۱</sup> (CVD) روی بسترهای فلزی [۹] و یا جداسازی کربن از سیلیسیم کرباید<sup>۲</sup> به همراه گرمادهی با دمای بالا است که می‌تواند باعث تولید گرافن شود [۱۰]. روشهای CVD برای رشد  $MoS_2$  لایه نازک به‌تازگی گزارش شده‌اند [۱۱]. در این روش‌ها از جامدات مختلف گرما داده شده در دمای بالا استفاده می‌شود. اخیراً،  $WS_2$  خواص نوری بهتری را در مقایسه با  $MoS_2$  نشان داده است [۱۲]. علاوه بر این،  $WS_2$  دارای جفت شدگی مداری بزرگتر است [۱۳]، که نشان می‌دهد  $WS_2$  ممکن است شکاف‌های چرخش لبه بزرگتر و اثرات میدان مغناطیسی قوی‌تری را برای عملکردهای اپتوالکترونیک و اسپینترونیک نشان دهد.

سنتز CVD مواد تک لایه TMDC [۱۴] را می‌توان در کوره لوله کوارتز تحت جریان گاز بی اثر برای سنتز  $WS_2$  با پیش‌سازهای  $WO_3$  و S انجام داد. بخار گوگرد تا حدی  $WO_3$  را در دماهای بالا کاهش می‌دهد و گونه‌ای فرار  $WO_{3-x}$  را تشکیل می‌دهد که روی بستر رشد جذب می‌شود، متعاقباً با گوگرد واکنش می‌دهد و  $WS_2$  تولید می‌کند.

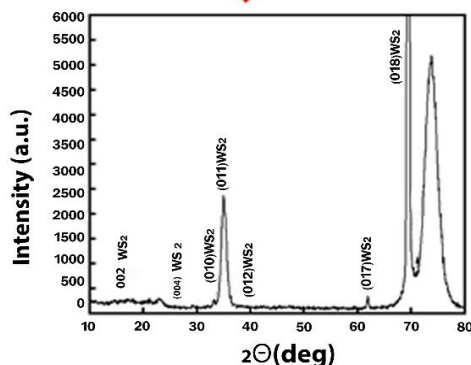
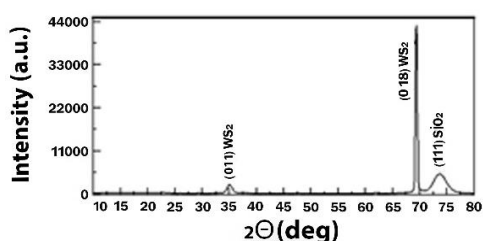
چند گروه تحقیقاتی، سنتز موفق  $WS_2$  را با استفاده از پیش‌سازهای  $WO_3$  و S گزارش کرده‌اند، ولی جزئیات خاص روش از جمله مقدار پیش ساز، بستر رشد، فشار رشد، دما، گازها، میزان جریان و غیره می‌تواند در آزمایشگاه به آزمایشگاه بسیار متفاوت باشد. برای بهبود کیفیت تک لایه  $WS_2$  سنتز شده با CVD، بررسی موادی که تحت شرایط مختلف در یک سیستم CVD به خوبی کنترل می‌شوند، مهم است.

در این تحقیق، شرایط کنترل از جمله محل قرار گیری پیش ماده‌ها، زمان ورود گاز حامل، زمان افزایش دما، کنترل

<sup>2</sup> Silicon Carbide

<sup>1</sup> Chemical Vapor Deposition

که به دلیل دمای مناسب انتخابی در حین تشکیل لایه می‌باشد [۱۷-۲۳]. برای ساختار 2H در میان تمام قله‌های پراش، صفحه (۰۱۸) و (۰۱۱) دارای بیشترین شدت بوده و بیانگر این است که این صفحات جهت رشد غالب برای تشکیل جهت ترجیحی کریستال‌های WS<sub>2</sub> تحت شرایط سنتز را نشان می‌دهد. سایز متوسط بلورکها با استفاده از فرمول شرر برای تک لایه WS<sub>2</sub> در حدود ۲۶ نانومتر به دست آمد. در جدول ۱ پارامترهای محاسبه شده از پراش پرتو ایکس تک لایه WS<sub>2</sub> آمده است. اندازه سایز بلورکها برای صفحات رشد ترجیحی برای (۰۱۸) در حدود ۱۹/۶ نانومتر و برای (۰۱۱) حدود ۳۴ نانومتر محاسبه شد.



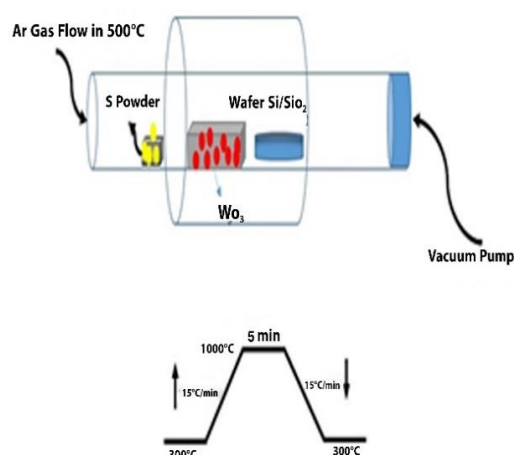
شکل ۲- نمودار پراش پرتو ایکس الف) تک لایه WS<sub>2</sub> و ب) بزرگنمایی از نمودار پراش پرتو ایکس تک لایه WS<sub>2</sub>

جدول ۱- پارامترهای بدست آمده از پراش پرتو ایکس تک لایه WS<sub>2</sub>

۳-۲- آنالیز دستگاه میکروسکوپ الکترونی روبشی

Height[cte]	Peak pos. [°2θ]=2θ	d-spacing [Å]	B obs. [°2θ]=FWHM	(hkl)	crystallite size [nm]	Mean crystallite size[nm]	Lattice strain[%]
۲۱۴۱	۱۰.۴۲۲	۸.۴۷۱۸۲	-۰.۵۹		۱۳.۵	۲۶.۱۷	۲.۸۲
۱۷.۷۲	۱۴.۵۲۲	۶.۰۹۴۵۴	-۰.۵۹	(۰۰۲)	۱۳.۶		۲.۰۲۱
۴۸.۹۹	۲۲.۰۸۱	۴.۸۵۰۲۱	-۰.۹۸۴		۸.۲		۲.۰۰۳
۴۹.۱۹	۲۹.۲۴۹	۳.۰۵۰۸۶	-۰.۲۵۵	(۰۰۴)	۲۷.۸		-۰.۴۹۳
۷۲.۷۹	۳۳.۱۶	۲.۶۹۹۴۷	-۰.۲۹۵	(۰۰۱)	۲۸.۱		-۰.۴۲۲
۱۹۰.۰۹	۳۴.۸۹	۲.۵۶۹۴۶	-۰.۲۴۶	(۰۰۱)	۲۳.۹		-۰.۲۴۲
۱۴۴۵.۷۸	۳۵.۴۱۴	۲.۵۲۴۶۲	-۰.۲۹۵	(۰۰۲)	۲۸.۲		-۰.۴۰۳
۲۲۱.۸۲	۶۱.۸۸۶	۱.۶۴۸۰۹	-۰.۱۹۷	(۰۰۱)	۴۷		-۰.۱۴۲
۴۲۰.۲۸۴۱	۶۹.۴۰۷	۱.۲۵۲۹۹	-۰.۴۹۲	(۰۰۱)	۱۹.۶		-۰.۳۱
۲۷۶۸.۸۷	۷۲.۹۱	۱.۲۶۲۹۹	-۰.۸۸۶	(۰۰۲)	۱۱.۱		-۰.۵۲۳
۲۷۶۸.۵۶	۷۲.۷۰۲	۱.۲۸۴۴	-۰.۴۹۲	(۱۰۰)SiO <sub>2</sub>	۲۰.۲		-۰.۲۸۶

سنتز WS<sub>2</sub> رشد اولیه با دمای ۳۰۰°C آغاز و دمای کوره به سرعت تا ۱۰۰۰°C با سرعت ۱۵°C در دقیقه افزایش می‌یابد و سپس ۵ دقیقه در ۱۰۰۰°C نگه داشته می‌شود. سپس در سیکل برگشت دمای کوره به سرعت از ۱۰۰۰°C با سرعت ۱۵°C در دقیقه کاهش می‌یابد و در دمای ۳۰۰°C نگه داشته می‌شود. نکته حائز اهمیت این است که در سیکل رفت در دمای ۵۰۰°C درجه سانتی گراد گاز آرگون تحت جریان مداوم آرگون ۱۰۰ sccm اعمال شده و نیز در سیکل برگشت در دمای ۴۵۰°C گاز آرگون قطع می‌شود.



شکل ۱- شماتیک از مراحل کنترلی سنتز WS<sub>2</sub>

۳- نتایج و بحث

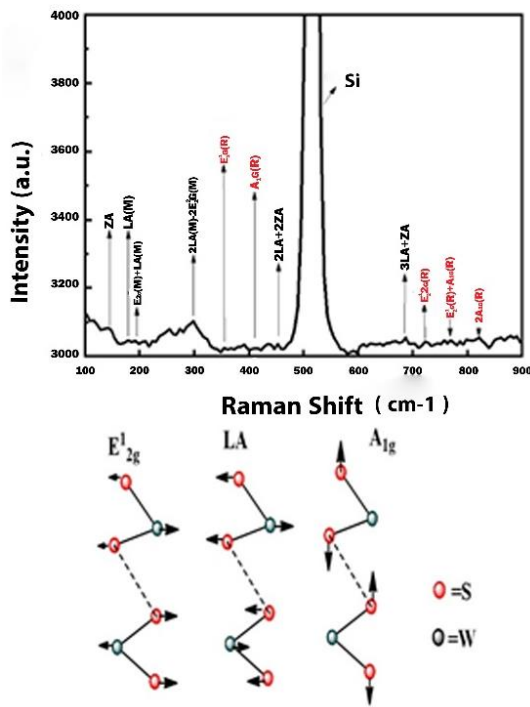
۳-۱- تجزیه و تحلیل پراش پرتو ایکس

الگوی پراش پرتو ایکس تک لایه WS<sub>2</sub> سنتز شده با روش CVD در دمای اتاق و در زوایای 2θ بین ۱۰ تا ۸۰ درجه در شکل (۲) نشان داده شده است. قله‌های پراش شدید که برای این تک لایه نمایش داده شده است ماهیت بلوری خوب نمونه را تأیید می‌کند.

قله‌های پراش اصلی تک لایه WS<sub>2</sub> برابر با ۱۴/۵۲، ۲۹/۲۴، ۳۳/۱۶، ۳۴/۸۹، ۳۵/۴۱، ۶۱/۸۸، ۶۹/۴۰، ۷۲/۹۱ درجه به ترتیب مربوط به صفحات (۰۰۲)، (۰۰۴)، (۰۱۰)، (۰۱۱)، (۰۱۱)، (۰۱۲)، (۰۱۷)، (۰۱۸) و (۰۲۳) مطابق با مرجع ۹۶-۵۹۱-۰۰۰۴ مربوط به ساختار هگزاگونال (2H) تنگستن دی سولفید می‌باشد. همچنین قله پراش مربوط به SiO<sub>2</sub> ویفر سیلیکونی در زاویه ۷۳/۷۰ با دسته صفحه (۱۰۴) مطابق با مرجع ۹۶-۱۰۱-۰۹۳۹ نیز مشاهده می‌شود. همانطور که مشاهده می‌شود هیچ اختلالی از انباشتگی ذاتی برای تشکیل ریمبوهدرال (3R) در سیستم مشاهده نمی‌شود و همگی ساختار 2H را نشان می‌دهند

محدوده  $610$  و  $514$   $\text{cm}^{-1}$  مربوط به پیوندهای W-S و ارتعاشات بانندی در محدوده بین  $460$   $\text{cm}^{-1}$  مربوط به پیوند S-S است [۱۷-۲۳].

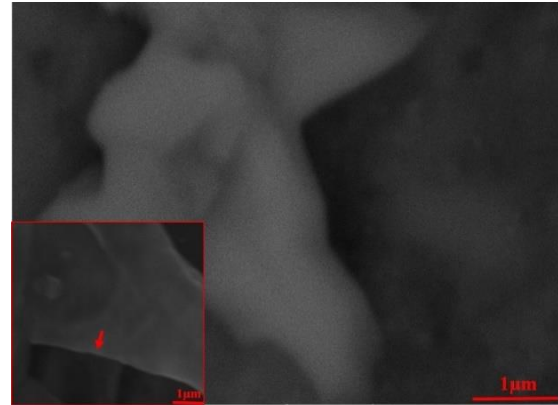
نتایج طیف سنجی رامان (شکل ۵-الف) حالت‌های فونون درون صفحه و خارج از صفحه،  $E_{2g}^1$  و  $A_{1g}$  را به ترتیب در  $355$   $\text{cm}^{-1}$  و  $416$   $\text{cm}^{-1}$  نشان می‌دهد. علاوه بر این، حالت صوتی طولی در نقطه M، LA (M) در جایگاه‌های مختلف همانطور که در شکل روی نمودار مشخص شده، مشهود می‌باشد و شانه‌ای با تعداد کم در قله  $E_{2g}^1$  را تشکیل می‌دهد. پیک تفکیک ( $\Delta k$ ) بین  $E_{2g}^1$  و  $A_{1g}$  معمولاً برای شناسایی شماره لایه  $WS_2$  استفاده می‌شود. مقادیر  $\Delta k$  در حدود  $62$  برای تک لایه و  $64$   $\text{cm}^{-1}$  برای دو لایه در نظر گرفته می‌شود [۱۶-۲۲]. در پژوهش حاضر، جداسازی پیک  $61$   $\text{cm}^{-1}$  اندازه‌گیری شد که سنتز  $WS_2$  تک لایه را تأیید می‌کند.



شکل ۵-الف) نمودار طیف رامان و (ب) شماتیک‌های از مدهای فعال مرتبه اول رامان از تک لایه  $WS_2$

مطابق با مقالات اثر دمایی کنترلی، دمایی رشد برای سنتز  $WS_2$  بسیار مهم است. با افزایش و کنترل دمایی رشد، جزایر  $WS_2$  حاصله افزایش متوسطی در اندازه جانبی از خود نشان می‌دهند و شکل نامنظم‌تر و دارای بلورینگی واحدی است. علاوه بر این، قله‌های غالب در طیف رامان  $E_{2g}^1$  و  $A_{1g}$  در محدوده قبلی خود باقی می‌ماند و یک تک‌لایه

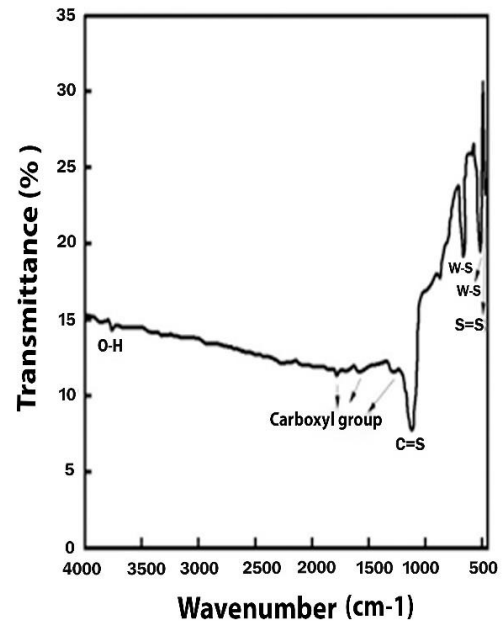
در شکل (۳) تصاویری از میکروسکوپ الکترونی روبشی از تک لایه  $WS_2$  را مشاهده می‌کنید. لایه تک صفحه‌ای با حداکثر ضخامت لایه در حدود بین  $50$  -  $43$  nm و پهنا عرضی حدود  $5 \mu\text{m}$  مشاهده می‌شود.



شکل ۳- تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی از تک لایه  $WS_2$

### ۳-۳ آنالیز طیف سنجی FT-IR

برای تعیین گروه عاملی و پیوندهای شیمیایی تشکیل‌دهنده برای تک لایه  $WS_2$  ایجاد شده روی ویفر سیلیکونی، طیف FT-IR در محدوده  $400$  تا  $4000$   $\text{cm}^{-1}$  گرفته شد. طیف FT-IR از این تک لایه در شکل (۴) نشان داده شده است.



شکل ۴- نمودار طیف سنجی مادون قرمز از تک لایه  $WS_2$

همانطور که مشاهده می‌شود، ارتعاشات در محدوده بین  $3400$  تا  $3650$   $\text{cm}^{-1}$  مربوط به آب با پیوند O-H می‌باشد. ارتعاشات بانندی در محدوده  $1520$  تا  $1700$   $\text{cm}^{-1}$  مربوط به مدهای ارتعاشی گروه کربوکسیل و پیکها در

تفاوت در سطوح یا فشار دوپینگ الکترونیکی است.

#### ۴- نتیجه گیری

در این پژوهش، نانوصفحات تک لایه WS<sub>2</sub> با کیفیت بالا بر اساس روش بهینه و کنترلی CVD سنتز شد. نانو صفحات WS<sub>2</sub> به طور مساوی روی بستر پخش می شوند و یک فیلم WS<sub>2</sub> ایجاد می کند که می تواند ورق های WS<sub>2</sub> را به طور کامل برای کاربردهایی همچون تنظیم لیزر مناسب سازد. از جنبه های دوام و صرفه اقتصادی، ماده WS<sub>2</sub> نشان دهنده آینده برنامه های کاربردی در زمینه لیزر، تشخیص نوری، دستگاه الکترونیکی انعطاف پذیر و سنجش شیمیایی است.

می سازد. همچنین اگر رشد در دماهای بالاتر از ۱۰۰۰°C در جریان گاز آرگون صورت گیرد، به طور چشمگیری رشد WS<sub>2</sub> کاهش یافته و در نتیجه پوشش بستر بسیار کمی ایجاد می شود. تک لایه های تشکیلی با وجود دو قله رامان (A<sub>1g</sub> و E<sub>2g</sub><sup>1</sup>) روی سطح بستر ویفری Si/SiO<sub>2</sub> در انرژی بالا دارای شدت لومینسانس بالای هستند و دارای کارایی بازدهی کوانتومی نوری عالی نسبت به دیگر مواد TMD می باشند. شدت نسبی موقعیت E<sub>2g</sub><sup>1</sup> و A<sub>1g</sub> با کنترل دمایی بهینه در این مطالعه، تقریباً یکسان می باشد و تغییرات بسیار زیاد در شدت نسبی بین این دو قله نشان دهنده

#### مراجع

- [1] F. Akbar, M. Kolahdouz, S. Larimian, B. Radfar, and H.H. Radamson, "Graphene synthesis, characterization and its applications in nanophotonics, nanoelectronics, and nanosensing", *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*, Vol.26, No.7, 2015, pp.4347-4379.
- [2] M. Nayeri, P. Keshavarzian, M. Nayeri, "A Novel Design of Quaternary Inverter Gate Based on GNR/FET", *International Journal of Nanoscience and Nanotechnology*, Vol.15, No.3, 2019, pp.211-217.
- [3] S. Fotoohi, "Design and Atomic Modeling of Multimode Sliding Electromechanical Switch Based on Bilayer Armchair  $\alpha$ -Graphyne Nanoribbons", *Journal of Modeling in Engineering*, Vol.18, No.62, 2020, pp. 71-82.
- [4] M. Nayeri, M. Nayeri, "Design and simulation of Penternary adder based on GNR/FET", *Journal of Modeling in Engineering*, Vol.18, No.63, 2021, pp. 41-50.
- [5] S. Fotoohi, S. Haji-nasiri, "Design of seamless graphene inverter together with its transfer matrix modeling", *Journal of Modeling in Engineering*, Vol.18, No.61, 2020, pp. 121-137.
- [6] Y. Yuchen, J. Chen, Y. Zhang, S. Ding, F. Zhao, Y. Wang, D. Zhang et al. "Two-dimensional high-quality monolayered triangular WS<sub>2</sub> flakes for field-effect transistors", *ACS applied materials & interfaces* 10, No.26, 2018, pp.22435-22444.
- [7] M. Nayeri, M. Fathipour, "A numerical analysis of electronic and optical properties of the zigzag MoS<sub>2</sub> nanoribbon under uniaxial strain", *IEEE Transactions on Electron Devices*, Vol.65, No.5, 2018, pp.1988-1994.
- [8] J. P. Wu, L. Wang, L. Y. Zhang, "Rapid and nondestructive layer number identification of two-dimensional layered transition metal dichalcogenides", *Rare Metals*, Vol.36, No.9, 2017, pp.698-703.
- [9] X.Li, et al, "Large-area synthesis of high-quality and uniform graphene films on copper foils", *Science* 324, 2009, pp.1312-1314.
- [10] Y.Wu, et al, "High-frequency, scaled graphene transistors on diamond-like carbon", *Nature* 472, 2011, pp.74-78.
- [11] N.Kumar, R.Tomar, N.Wadehra, M.M.Devi, B. Prakash, S.Chakraverty, "Growth of highly crystalline and large scale monolayer MoS<sub>2</sub> by CVD: the role of substrate position", *Crystal Research and Technology*, Vol.53, No.6, 2018, p.1800002.
- [12] J.Qian, Z. Peng, P. Wang, X. Fu, "Bulk fabrication of WS<sub>2</sub> nanoplates: investigation on the morphology evolution and electrochemical performance", *ACS applied materials & interfaces*, Vol 8, No.26, 2016, pp.16876-16884.
- [13] W. Yang, J. Wang, C. Si, Z. Peng, J. Frenzel, G. Eggeler, Z. Zhang, "[001] preferentially-oriented 2D tungsten disulfide nanosheets as anode materials for superior lithium storage", *Journal of Materials Chemistry*, Vol.A3, No.34, 2015, pp. 17811-17819.
- [14] Y. Y. Yeh, W. H. Chiang, W. R Liu, "Synthesis of few-layer WS<sub>2</sub> by jet cavitation as anode material for lithium ion batteries", *Journal of Alloys and Compounds* 775, 2019, pp.1251-1258.

- [15] A.R. Tenne, L. Margulis, M. E. Genut, G.Hodes, "Polyhedral and cylindrical structures of tungsten disulphide", Nature 360(6403), 1992 , pp.444-446.
- [16] C. Altavilla, M. Sarno, P. Ciambelli, "A Novel Wet Chemistry Approach for the Synthesis of Hybrid 2D Free-Floating Single or Multilayer Nanosheets of MS<sub>2</sub>@ oleylamine (M□ Mo, W)", Chemistry of Materials, Vol.23, No.17, 2011, pp. 3879-3885.
- [17] J. Bradford, M. Shafiei, J. MacLeod, N. Motta, "Synthesis and characterization of WS<sub>2</sub>/graphene/SiC van der Waals heterostructures via WO<sub>3-x</sub> thin film sulfurization", Scientific reports, Vol.10, No.1, 2020, pp.1-10.
- [18] F. offredo, L. Tamaro, T. Di Luccio, C. Borriello, F. Villani, S. De Vito, J. A Kornfield, "Effect of tungsten disulfide nanotubes on crystallization of polylactide under uniaxial deformation and annealing", Functional Composite Materials, Vol. 2, No.1, 2021, pp. 1-11.
- [19] J. Hou, G. Zhao, Y. Wu, J. He, X. Hao, "Femtosecond solid-state laser based on tungsten disulfide saturable absorber", Optics express, Vol. 23, No.21, 2015, pp.27292-27298.
- [20] J. Cheng, C. Wang, X. Zou, L.Liao, "Recent advances in optoelectronic devices based on 2D materials and their heterostructures", Advanced Optical Materials, Vol.7, No.1, 2019, p.1800441.
- [21] P. Sharma, A. Kumar, S. Bankuru, J. Chakraborty, S. Puravankara, "Large-scale surfactant-free synthesis of WS<sub>2</sub> nanosheets: an investigation into the detailed reaction chemistry of colloidal precipitation and their application as an anode material for lithium-ion and sodium-ion batteries", New Journal of Chemistry, Vol.44, No.4, 2020, pp.1594-1608.
- [22] K. M. McCreary, A. T. Hanbicki, G. G Jernigan, J. C. Culbertson, B. T. Jonker, "Synthesis of large-area WS<sub>2</sub> monolayers with exceptional photoluminescence", Scientific reports, Vol.6, No.1, 2016, pp.1-7.
- [23] S. S. Gqoba, R. Rodrigues, S. L. Mphahlele Z. Ndala, M. Airo, P. O. Fadojutimi, N. Moloto, "Hierarchical Nanoflowers of Colloidal WS<sub>2</sub> and Their Potential Gas Sensing Properties for Room Temperature Detection of Ammonia", Processes, Vol.9, No.9, 2021, p.1491.