اثر تغییرات توان تراگذار فراآوایی و زمان تابش امواج فراآوا بر ضخامت نانوپوستههای دو-بعدی دیسولفیدمولیبدن ساختهشده به روش آوافیزیک

نجمه السادات تقوى، رضا افضلزاده*

دانشکده فیزیک، دانشگاه صنعتی خواجهنصیرالدین طوسی

چکیدہ

در این پژوهش، نانو پوستههای دو-بعدی دیسولفیدمولیبدن به روش پوستهسازی در فاز مایع با استفاده از تراگذار فراآوایی تولید شدند. توان پروب و زمان تابش تغییر داده شد تا آثار این تغییرات بر ضخامت پوستههای حاصل مطالعه گردیـد. نتـایج حاصـل از طیـفسـنجی فرابنفش-مرئی و میکروسکوپ الکترونی (اِساییاِم) نشان میدهد که ضخامت کمینه برای نمونهها در تـوان ۶۵ وات حاصـل مـیشـود و مناسبترین مدت زمان تابش یک ساعت است.

کلیدواژهها: نانوپوستههای دیسولفیدمولیبدن، توان تراگذار فراآوایی، زمان تابش، گاف انرژی، ضخامت لایهها.

۱. مقدمه

هنگامی که مواد تحت تابش فراآوا قرار می گیرند، انتشار این امواج، منجر به ایجاد نواحی متناوب تراکم (پرفشار) و انبساط (کمفشار) در ماده میشود. این پدیده که كاواكزايي صوتي لناميده مي شود، به طور خلاصه، تشكيل، رشد تدریجی، نوسان و فروریزش حباب ها در یک مایع است. در اثر این پدیده، فشردهسازی گاز و فروریزش حباب بهطور مؤثری موجب تمرکز انرژی فراآوایی می شود و گرما و فشار موضعی زیادی (حدود ۵۰۰۰ کلوین و ۱۰۰۰ اتمسفر) با نرخ بسیار بالای گرم و سرد شدن (بیش از ۱۰٬۰ کلوین بر ثانیه) ایجاد میشود که امکان منحصربه فردی برای برهم کنش ماده و انرژی فراهم می کند. فرآیند کاواکزایی علاوه بر ایجاد فشار و دمای موضعی بالا، موجب تولید موج ضربهای ٔ نیـز مـیشـود. از انرژی این موج برای شکستن پیوندهای کووالانسی، انجام برخی واکنشهای شیمیایی، همگنسازی و سنتز نانو ذرات استفاده می شود [۱–۲]. ازجمله نانو موادى كه اخيراً بسيار مورد توجه قرار گرفتهاند، نانو ساختارهای دو-بعدی هستند. مبحث مواد

دو-بعدی با کشف گرافن در سال ۲۰۰۴ میلادی گشوده شد و اکنون با گسترش خانواده مواد دو-بعدی ازجمله دیکالکوژنایدهای فلزات واسطه (تی اِمدیسی)^۳، هر روز اخبار جدیدی از اکتشافات، نوآوری ها و کاربردهای گوناگون این مواد در حوزه های مختلف از جمله الکترونیک،

اپتوالکترونیک و مکانیک به گوش میرسد [۳-۴]. دیسولفیدمولیبدن (MoS) یکی از شناخته دهترین اعضای خانواده دیکالکوژنایدهای فلزات واسطه (تی[مدیسی) با فرمول شیمیایی عمومی ۲۸۳ است که M و X بهترتیب یک فلز واسطه و یک کالکوژن هستند. در هر ورقه از این مواد، اتمها پیوندهای نسبتاً قوی کووالانسی دارند، درحالی که نیروی بین صفحه های مجاور از نوع برهم کنشهای ضعیف واندروالس است. این ویژگی مهم به این مواد قابلیت ورقهورقه شدن و ایجاد پوسته های دو-برهم کنشهای ضعیف واندروالس است. این ویژگی مهم به ین مواد قابلیت ورقهورقه شدن و ایجاد پوسته های دو-یک گاف غیرمستقیم در حدود ۱/۲ الکترون ولت برای توده، به گاف مستقیم در حدود ۸/۱ الکترون ولت برای توده، به گاف مستقیم در حدود ۸/۱ الکترون ولت برای

^{*} نویسنده پاسخگو:afzalzadeh@email.kntu.ac.ir

¹ Acoustic cavitation ² Shock wave

³ TMDC; Transition Metal DiChalcogenides

برای تهیه مواد دو-بعدی روشهای گوناگونی آزموده و بهسازی شدهاند. امروزه بسیاری از پژوهشگران حوزههای فیزیک، شیمی و نانو فناوری از انواع مولدهای فراآوایی برای آغاز و پیشرفت بهینه آزمایشهای خود بهره می گیرند. استفاده از تراگذار فراآوایی در محیط مایع برای تولید صفحات دو-بعدی از مواد لایهای را اصطلاحاً پوستهسازی در فاز مایع (ال پایایی) مینامند. درصورتی که چیدمان آزمایش، طراحی ابزار و انتخاب مواد و شرایط آزمایش بهدرستی صورت گیرد، این روش می تواند فرایندی نسبتاً ساده، سریع و با هزینه و آلایندگی اندک باشد [۱۱–۱۹]. شبهسنجهای تراگذار فراآوایی در ضخامت ورقههای بهدست آمده نقش دارند [۱۱]. گروههای پژوهشی متعددی درباره تولید نانوپوسته از مواد لایهای مختلف به روش ال پی ایی و عوامل تأثیر گذار بر این فرایند و نیز شبه سنجهای مؤثر بر فرایند کاواکزایی تحقیق کردهاند. از جمله کلمن و همکارانش که مقالات متعددی درباره تهیه و مشخصه یابی نانو ورق های دو-بعدی از تی امدی سی ها ارائه کردهاند [۷، ۱۲] و هم چنین مقالاتی که اثر بسامد و توان فراآوا بر فرایند کاواکزایی [۲۰-۲۱]، اثر شدت كاواكزايي بر توليد دىسولفيدموليبدن بەوسيلە تراگذاری با توان اسمی ۹۰۰ وات در محلول ان-متیل-۲- ييروليدون (ان اميي)^۲ [۲۲]، اثر فاصله تراگذار فراآوايي از کف ظرف [۲۳]، اثر کشش سطحی محلول دو جزئی در فرايند ال پي ايي [۲۴]، اثر پي اچ محلول بر توليد هيبريد دىسولفيدموليبدن/ اكسيد گرافن[†] [۲۵] و اثر سانتريفيوژ بر توزیع اندازه پوستههای دیسولفیدمولیبدن [۲۶-۲۷] و غیرہ را بررسی کردہاند.

با استفاده از رهیافتهای گوناگونی می توان ضخامت یا تعداد لایههای مواد دو-بعدی را تعیین کرد. از جمله این روشهای مشخصهیابی، طیفسنجی فرابنفش-مرئی و تصویربرداری به کمک انواع میکروسکوپها است [۲۸-۳۰].

در این تحقیق، پوستههای دو-بعدی دیسولفیدمولیبدن از طریق تاباندن امواج فراآوا بر پودر دیسولفیدمولیبدن در

محلولی شامل آب و اتانول تهیه شدند. اثر تغییرات توان تراگذار فراآوایی و مدت زمان تابش فراآوا بر ضخامت لایهها بهکمک طیفسنجی پراش پرتو ایکس (ایکسسآردی)^۵، طیفسنجی فرابنفش-مرئی² و میکروسکوپ الکترونی (اِساییاِم)^۷ مورد مطالعه قرار گرفت.

۲. مواد و روشها

امواج فراآوا به کمک یک تراگذار تیتانیومی به قطر ۱۴ میلیمتر (اِفاریپیاِیاِن ۴۰۰آر، ۲۳ کیلوهرتز، ۴۰۰ وات)^۸ بر نمونهها تابانده شدند. برای تهیه هر نمونه، ۱٫۰ گرم پودر دیسولفیدمولیبدن به ۶۰ سیسی محلول شامل آب و اتانول اضافه شد. برای جلوگیری از گرمشدن و تبخیر محلول، بِشر مورداستفاده در حمام آب- یخ قرار داده شد؛ همچنین بهمنظور پیشگیری از آسیبهای احتمالی وارد بر تراگذار فراآوایی در تابشهای طولانی مدت، به جای حالت پیوسته از حالت تپی دستگاه استفاده گردید.

پس از پایان زمان تابش، نمونهها در دو مرحله، بار اول با سرعت ۳۰۰۰ دوربردقیقه در مدت ۴۵ دقیقه و بار دوم با سرعت ۳۶۰۰ دوربردقیقه در مدت ۳۰ دقیقه سانتریفیوژ شدند.

برای تعیین توان مصرفی و نیز توان بهینه دستگاههای فراآوایی رهیافتهای فیزیکی و شیمیایی متعددی وجود دارد. به این منظور، ابتدا نمودار توان برقی مصرفی تراگذار برحسب درصد توان بیشینه بهدست آمد (شکل ۱) و سپس با روش دوزیمتری بهوسیله یدید پتاسیم، توان بهینه تراگذار تخمین زده شد.



شکل ۱ توان برقی مصرفی دستگاه برحسب درصد توان بیشینه.

⁷ SEM; Scanning Electron Microscopy

¹ LPE; Liquid Phase Exfoliation

² NMP; N-Methyl-2-Pyrrolidone

³ PH

⁴ MoS₂/Graphene oxide

⁵ XRD; X-Ray Diffraction

UV-Visible

⁸ FAPAN400R, 23kHz, 400W

برای ارزیابی بازده فرآیند کاواکزایی از طریق دوزیمتری به وسیله یدید پتاسیم، محلول یدید پتاسیم در معرض تابش امواج فراآوا قرار داده می شود (روابط ۱). در نتیجه: $K I \rightarrow K^+ + I^-$

$$I^{-} + I^{-} \rightarrow I_{\gamma}$$

 $I^{-} + I_{\gamma} \rightarrow I_{\gamma}^{-}$
 $I^{-} + I_{\gamma} \rightarrow I_{\gamma}^{-}$

با اندازه گیری میزان جذب یونهای با از طریق طیفسنجی فرابنفش- مرئی در طول موج ۳۵۰ نانومتر، می توان غلظت یونهای با آزادشده پس از زمان کافی تابش امواج فراآوا را تخمین زد [۳۱–۳۳]. نمودار نرخ افزایش غلظت یونهای با در درصدهای توان بیشینه افزایش علظت یونهای با در درصدی انشان میدهد که بیش ترین بازده فرآیند کاواکزایی در حوالی ۶۰ درصد توان بیشینه تراگذار اتفاق افتاده است (شکل ۲).



شکل ۲ نرخ افزایش غلظت یونهای آ در هر درصد توان.

برای مطالعه اثر توان تراگذار فراآوایی در ساخت نمونهها از تــوانهـای ۸۴٫۸۵، ۵۶٫۳۲، ۵۶٫۳۲ و ۸۴٫۹۵ وات استفاده شد و برای بررسی اثر مدت زمان تابش فراآوا، در توان ثابت ۶۵ وات، مدت زمان تابش امواج فراآوا ۳۰، ۶۰، ۱۲۰ و ۱۸۰ دقیقه در نظر گرفته شد. ۱۲۰ مر نمونه، طیف جذب تابش با (پرکین- المِر لامبدا ۲۵)^۱ بهدست آمد و پس از لایهنشانی به روش دراپ کوتینـگ^۲ روی لام، از نمونهها به کمک میکروسکوپ الکترونی (فیلیپز ایکسال ۳۰)^۳ تصویربرداری شد. طرح پراش پرتو ایکس از نمونه بهینه (با توان و زمان بهینه) با (ایکسپرت پیآراً اِمپیدی پیاِینالیتیکال)^۴ تهیه شد.

DOR: 20.1001.1.23455748.1398.7.1.5.3

Downloaded from joasi.ir on 2025-07-12

۳. نتايج

طیف جذب مشخصـه حاصـل از طیـفسـنجی فـرابنفش-مرئـی در بـازه طـولمـوجی ۴۰۰-۸۰۰ نـانومتر بـرای دیسولفیدمولیبدن در شکل ۳ نشان داده شده است.



طيفسنجي فرابنفش-مرئي.

قلّه اول این نمودار که با A مشخص شده است، مربوط به گذار اکسایتونی از لبه بالاترین تراز شکافته شده نوار ظرفیت به پائین ترین بخش نوار رسانش در نقطه X در منطقه بریلوئن دی سولفیدمولیبدن دو- بعدی است. با استفاده از قلّه A و جای گذاری مقدار طول موج مربوط به آن در رابطه پلانک برای انرژی، مقدار گاف انرژی هر نمونه به دست آمد.

۳-۱. تغییر توان تابش

با تغییر توان دستگاه، در تپ و زمان تابش یکسان، طول موج جذب برای هر نمونه بهدست آمد و مقدار گاف انـرژی برای هر نمونه محاسبه شد.



شکل ۴ نمودار تغییرات گاف انرژی برحسب توان برقی تراگذار.

بهترتیبی که در شکل ۴ مشاهده میشود، مقدار گاف نواری نمونهها ابتدا افزایش و سپس با شیب کمتری کاهش مییابند. تصاویر تهیهشده با استفاده از اِساییاِم

¹ Perkin-Elmer Lambda 25

² Drop coating

 ³ Philips XL30
⁴ X'Pert PRO MPD PANalytical

که در شکل ۵ مشاهده می شود نیز این ویژگیها را تأیید می کنند.





شکل ۵ تصاویر اِس ایی اِم بهدست آمده از نمونه های ساخته شده به تر تیب با توان های (الف) ۶۵٫۵۶ و (ب) ۸۴٫۱۵ وات.

۳-۲. مدت زمان تابش

با افزایش مدت زمان تابش، مقدار محاسبه شده برای گاف انرژی نمونه ها به تر تیبی که در شکل ۶ مشاهده می شود، ابتدا افزایش می یابد، اما پس از ۶۰ دقیقه، افزایش بیش تر زمان، موجب افزایش بیش تر گاف انرژی نمی شود.



شکل ۶ نمودار تغییرات گاف انرژی برحسب مدتزمان تابش فراآوا.

در تصاویر اِس ایی اِم تهیه شده از این نمونه ها (شکل ۷) می توان مشاهده کرد که زمان های طولانی تابش، موجب انباشتگی یا اصطلاحاً اگلومره شدن پوسته ها شبت می ماند. درنتیجه مقدار متوسط گاف انرژی پوسته ها ثابت می ماند.





(ب)

شکل ۷ تصاویر بهدستآمده به کمک میکروسکوپ الکترونی روبشی (اِساییاِم) از نمونههای ساختهشده، بهترتیب با زمانهای (الف) ۶۰ دقیقه و (ب) ۱۲۰ دقیقه.

آزمایش پراش پرتو ایکس و طیف ایکس آردی بهدست آمده از نمونه بهینه (ساختهشده با توان و زمان بهینه که در بخشهای پیشین مشخص شدند)، نشان داد که نمونهها ساختار بلوری هگزاگونال (H) با گروه فضایی P97 /mmc و گروه نقطهای مام C دارند و دو مولکول دیسولفیدمولیبدن در هر یاخته واحد وجود دارد. همانطور که در شکل ۸ قابل مشاهده است، مقایسه با کارت استاندارد ۲۴۱۶ - ۰۸۷ - ۲۱ تأیید می کند که در این الگو تمام قلّههای استاندارد دی سولفیدمولیبدن حضور دارند.



شکل ۸ طرح الگوی ایکسآردی از پوستههای دیسولفیدمولیبدن.

۴. بحث

با توجه به نتیجه بررسی اثر توان اعمال شده می توان گفت

ابتدا با افزایش توان دستگاه، انرژی لازم برای غلبه بر نیروی واندروالس بین لایهها بهتر فراهم میشود و تکلایههای بیشتری تولید میشوند. اما افزایش توان به بیش از حدود ۶۵ وات، موجب افزایش احتمال انباشتگی پوستهها میشود.

همچنین شکل ۵ نشان میدهد که مساحت و کیفیت پوستههای دو-بعدی در توان حدود ۶۵ وات بهمراتب بیشتر از توان ۸۴ وات است. در توان ۶۵ وات، پوستهها بزرگتر هستند و تراکم آنها بیشتر است. از طرفی، مساحت صفحات بیشتر است و به حدود ۱۵ × ۸ میکرومترمربع هم میرسد. اما در توان ۸۴ وات، مشاهده میشود که پوستهها به سبب اگلومره شدن کیفیت خود را از دست داده اند.

بهنظر میرسد رخدادن این پدیده در توانهای بالا بهسبب فروریزش حبابها در پایان هر فرایند کاواکزایی است. در اثر فروریزش و انفجار پیدرپی حبابها که منجر به پدیدآمدن امواج ضربهای میشود، احتمال و شدت برخورد پوستهها با یکدیگر بیشتر میشود. در چنین شرایطی، امکان اگلومرهشدن لایهها فراهم شده، آنها در اثر انباشتهشدن دوباره به یکدیگر می چسبند (شکل ۹)؛ لذا امواج ضربهای بازده عمل پوستهسازی را به میزان قابل ملاحظهای کاهش میدهند.



توبیدهشان ناتوصفحات به یکدیگر و ایجاد امواج ضربه ای انفجار و فروریزش انباشته شدن آنها در اثر موج ضربه ای شکل ۹ طرحواره ای از تأثیر امواج ضربه ای در انباشتگی نانوصفحات دو – بعدی.

بررسی اثر تغییر زمان تابش نیز نشان میدهد که با افزایش زمان تابش، امکان ساخته شدن پوسته های دو-بعدی کم لایه بیش تر می شود. اما پس از ۶۰ دقیقه، در اثر رقابت بین زمان (عامل افزایش دهنده گاف انرژی) و تمایل پوسته ها به انباشته شدن (عامل کاهش دهنده گاف انرژی) و رسیدن به نوعی موازنه، روند افزایشی متوقف می شود. در طیف جذب فرابنفش - مرئی حاصل از پوسته های دی سولفید مولیبدن، دو قلّه کم انرژی تر، یعنی A و B،

ناشی از جذب فوتونهای برخوردکننده در گذارهای اکسایتونی مستقیم در نقطه K منطقه بریلوئن است. قلّه C مربوط به گذار مستقیم از عمیق ترین بخش نوار ظرفیت به نوار رسانش است.

حضور قلّههای A و B در طیف جذب فرابنفش-مرئی نشان می دهند که پوستهسازی در مایع و تبدیل دی سولفیدمولیبدن به نانو ورق ها (نانوپوسته های کم لایه) با موفقیت صورت گرفته است. در واقع، این قلّه ها به منزله اثر انگشت دی سولفیدمولیبدن هستند. موقعیت قلّه A (به طور غیرمستقیم)، مقیاسی از ضخامت پوسته ها (تعداد لایه ها) است [11، ۱۴–۱۹، ۲۵].

در طیف مشخصه نشان داده شده در شکل ۳ که از بهترین نمونه (نمونه با توان بهینه و زمان بهینه) بهدست آمده است، دو قلّه اکسایتونی A و B، بهترتیب در ۶۶۹ نانومتر و ۶۰۹ نانومتر مشاهده شدهاند. پس از محاسبه گاف انرژی برای بهترین نمونه، عدد ۱٬۸۵ الکترونولت حاصل می شود که با توجه به شکل ۱۰، مربوط به تکلایه است.



شکل ۱۰ گاف انرژی پوستههای دیسولفیدمولیبدن برحسب تعداد لایهها (۲۸، ۳۴].

با توجه به طرح الگوی پراش پرتو ایکس که از پوستههای دیسولفیدمولیبدن حاصل شده و در شکل ۸ نمایش داده شده است، شاخصترین قلّه این نمودار، یعنی قلّه مربوط به صفحه بلوری (۰۰۲) در زاویه [°] ۱۴٬۴۳۶ = ۲۵، نشاندهنده وجود ابر شبکه در ساختار بلوری دیسولفیدمولیبدن است.

۶. فهرست منابع

- N. Pokhrel, P. Kiran Vabbina, N. Pala, "Sonochemistry: Science and engineering," Ultrasonics Sonochemistry, vol. 29, pp. 104–128, 2016.
- [2] J.H. Bang, K.S. Suslick, "Applications of ultrasound to the synthesis of nanostructured materials," Advanced Materials, vol. 22, no. 10, pp. 1039–1059, 2010.
- [3] K.S. Novoselov, "Graphene: materials in the flatland (Nobel lecture)," Review of Modern Physics, vol. 50, no. 31, 2011.
- [4] X. Li, H. Zhu, "Two-dimensional MoS₂: Properties, preparation, and applications," Journal of Materiomics, vol. 1, no. 1, pp. 33-44, 2015.
- [5] S.A. Han, R. Bhatia, S-W. Kim, "Synthesis, properties and potential applications of twodimensional transition metal dichalcogenides," Nano Convergence, vol. 2, no. 17, 2015.
- [6] O.V. Yazyev, A. Kis "MoS₂ and semiconductors in the flatland," Materials Today, vol. 18, no. 1, pp. 20-30, 2015.
- J.N. Coleman, M. Lotya, A. O'Neill, S.D. [7] Bergin, P.J. King, U. Khan, K. Young, A. Smith, I.V. Gaucher, S. De, R.J. Shvets, S.K. Arora, G. Stanton, H.Y. Kim, K. Lee, G.T. Kim, G.S. Duesberg, T. Hallam, J.J. Boland, J.J. Wang, J.F. Donegan, J.C. Grunlan, G. Moriarty, A. Shmeliov, R.J. Nicholls, J.M. Perkins, E.M. Theuwissen, D.W. Grieveson, K. McComb, P.D. Nellist, V. Nicolosi, "Two-Dimensional Nanosheets Produced by Liquid Exfoliation of Layered Materials," Science, vol. 331, pp. 568-571, 2011.
- [8] P. Miro', M. Audiffred, T. Heine, "An atlas of two-dimensional materials," Chemical Society Reviews, vol. 43, pp. 6537-6554, 2014.
- [9] K.F. Mak, C. Lee, J. Shan, T.F. Heinz, "Atomically thin MoS₂: A new direct-gap semiconductor," Physics Reviews Letter, vol. 105, no. 13, 2010.
- [10] T.P. Nguyen, W. Sohn, J. Hyeon Oh, H.W. Jang, S.Y. Kim, "Size-dependent properties of two-dimensional MoS₂ and WS₂," The Journal of Physical Chemistry C, vol. 120, pp. 10078–10085, 2016.
- [11] C. Backes, D. Hanlon, B.M. Szydlowska, A. Harvey, R.J. Smith, T.M. Higgins, J.N. Coleman, "Preparation of liquid –exfoliation transition metal dichalcogenide nanosheets with controlled size and thickness: A state of the art protocol," Journal of Visualized

فاصله صفحات اتمی نانو ورق های دی سولفیدمولیبدن با استفاده از رابطه براگ (رابطه ۱) و اطلاعات موجود در الگوی ایکس آردی حاصل از بهترین نمونه (نمونه با توان و زمان بهینه) بهدست آمده است:

 $\tau d\sin\theta = n\lambda \tag{(1)}$

که b فاصله صفحات اتمی، θ زاویه پراکندگی براگ، n مرتبه پراش و λ طول موج پرتو ایکس مورد استفاده برای تهیه طرح پراش از نمونه است. با استفاده از رابطه ۲ و نتایج ایکسآردی، فاصله بین صفحات اتمی (برای اندیسهای میلر (۲۰۰۱)) برای بهترین نمونه، ۶٬۱۴۵ انگستروم محاسبه شده است که باید از فاصله مشابه برای توده دی سولفیدمولیبدن بیش تر باشد. محاسبه این فاصله با توجه به نتیجه آزمون ایکسآردی که از پودر دی سولفیدمولیبدن پیش از تابش فراآوا تهیه شده، منجر به $^{\circ}$ مجدداً تأیید می شود [۳۵].

۵. نتیجهگیری

در این مطالعه، اثر تغییر توان و مدت زمان تابش امواج فراآوایی بر ضخامت پوستههای دو-بعدی دیسولفیدمولیبدن بررسی شد. نتایج طیفسنجی فرابنفش – مرئی نشان میدهند که با افزایش توان تا حدود ۵۹ وات، انرژی لازم برای تولید کملایهها بیشتر فراهم میشود. درنتیجه طولموج جذب نمونهها کاهش و بنابراین گاف انرژی مربوط به آنها افزایش مییابد و به گاف انرژی تکلایه نزدیکتر میشود. اما در توانهای بیشتر از ۶۵ وات، از آنجا که احتمال انباشتگی یا اگلومرهشدن پوستهها زیاد می شود، کاهش گاف انرژی مشاهده می گردد. تصاویر اس ایی ام نیز کیفیت بهتر پوستهها را در میانه بازه تأیید میکند.

همچنین افزایش مدت زمان تابش نیز ابتدا موجب افزایش گاف انرژی میشود. اما پس از یک ساعت تابش، افزایش انرژی گاف متوقف میشود و افزایش زمان، اثر چندانی بر مقدار آن ندارد. تصاویر اساییام نیز نشان میدهند که پس از ۶۰ دقیقه تابش، لایههای دیسولفیدمولیبدن اگلومره میشوند و روند کاهش ضخامت لایهها را با اشکال مواجه میسازد.

Downloaded from joasi.ir on 2025-07-12

no. 3, pp. 815-819, 2013.

- [22] W. Qiao, S. Yan, X. He, X. Song, Z. Li, X. Zhang, W. Zhong, Y. Du, "Effects of ultrasonic cavitation intensity on the efficient liquid-exfoliation of MoS₂ nanosheets," RSC Advances, vol. 4, no. 92, pp. 50981-50987, 2014.
- [23] J.T. Han, J.I. Jang, H. Kim, J.Y. Hwang, H.K. Yoo, J.S. Woo, S. Choi, H.Y. Kim, H. Jeong, S.Y. Jeong, K.J. Baeg, K. Cho, G.W. Lee, "Extremely efficient liquid exfoliation and dispersion of layered materials by unusual acoustic cavitation," Scientific Reports 4, no. 5133,2014.
- [24] J. Shen, Y. He, J. Wu, C. Gao, K. Keyshar, X. Zhang, Y. Yang, M. Ye, R. Vajtai, J. Lou, P.M. Ajayan, "Liquid phase exfoliation of two-dimensional materials by directly probing and matching surface tension components," Nano Letters, vol. 15, no. 8, pp. 5449–5454, 2015.
- [25] J. Peng, J. Weng, "One-pot solution-phase preparation of a MoS₂/graphene oxide hybrid," Carbon, vol. 94, pp. 568–576, 2015.
- [26] U. Khan, A. O'Neill, H. Porwal, P. May, K. Nawaz, J.N. Coleman, "Size selection of dispersed, exfoliated graphene flakes by controlled centrifugation," Carbon, vol. 50, no. 2, pp. 470–475, 2012.
- [27] M. Kajbafvala, M. Farbod, "Effective size selection of MoS₂ nanosheets by a novel liquid cascade centrifugation: Influence of the flakes dimensions on electrochemical and photoelectrochemical applications," Journal of Colloid and Interface Science vol. 527, pp. 159-171, 2018.
- [28] Z.M. Wang, "MoS₂- Materials, Physics, and Devices (Lecture Notes in Nanoscale Science and Technology-Vol. 21)," Springer International Publishing Switzerland, 2014.
- [29] X.Fan,P. Xu, D.Zhou, Y.Sun, Y.C. Li, M.A. Nguyen, M. Terrones, T.E. Mallouk, "Fast and efficient preparation of exfoliated 2h mos₂ nanosheets by sonication-assisted lithium intercalation and infrared laserinduced 1t to 2h phase reversion," Nano Letter, vol. 15, no. 15, pp. 5956–5960, 2015.
- [30] F. Ghasemi, S. Mohajerzadeh, "A sequential solvent exchange method for controlled exfoliation of MoS₂ suitable for phototransistor fabrication," ACS Applied Materials and Interfaces, vol. 8, no. 45, pp. 31179-31191, 2016.
- [31] R. Tamura, M. Miyata (Editors), "Advances in Organic Crystal Chemistry," Comperehensive Reviews, Springer, pp. 20-21, 2015
- [32] A. Ebrahiminia, M. Mokhtari-Dizaji, T.

Experiments, vol. 118, 2016.

- [12] C. Backes, T.M. Higgins, A. Kelly, C. Boland, A. Harvey, D. Hanlon, J.N. Coleman, "Guidelines for exfoliation, characterization and processing of layered materials produced by liquid exfoliation," Chemistry of Materials, vol. 29, no. 1, pp. 243–255, 2017.
- [13] F. Bonaccorso, A. Lombardo, T. Hasan, Z. Sun, L. Colombo, A.C. Ferrari, "Production and processing of graphene and 2d crystals," Materials Today, vol. 15, no. 12, pp. 564-589, 2012.
- [14] V. Forsberg, R. Zhang, J. Bäckström, C. Dahlström, B. Andres, M. Norgren, M. Andersson, M. Hummelgård, H. Olin, "Exfoliated MoS₂ in water without additives," Plos One, vol. 11, no. 4, 2016.
- [15] A. Jawaid, D. Nepal, K. Park, M. Jespersen, A. Qualley, P. Mirau, L.F. Drummy, R.A. Vaia, "Mechanism for liquid phase exfoliation of MoS₂," Chemistry of Materials, vol. 28, no. 1, pp. 337–348, 2016.
- [16] E.D. Grayfer, M.N. Kozlova, V.E. Fedorov, "Colloidal 2D nanosheets of MoS₂ and other transition metal dichalcogenides through liquid-phase exfoliation," Advances in Colloid and Interface Science, vol. 245, pp. 40–61, 2017.
- [17] M. Samadi, N. Sarikhani, M. Zirak, H. Zhang, H-L. Zhang, A.Z. Moshfegh, "Group 6 transition metal dichalcogenide nanomaterials: synthesis, applications and future perspectives," Nanoscale Horizons, vol. 3, pp. 90–204, 2018.
- [18] Y. Hong, X. Liu, L. Ma, P. Gong, Z. Yang, H. Wang, S. Yang, "High efficiency shear exfoliation for producing high-quality, fewlayered MoS₂ nanosheets in a green ethanol/water system," RSC Advances, vol. 6, no. 86, pp. 82763–82773, 2016.
- [19] E.P. Nguyen, B.J. Carey, T. Daeneke, J. Zhen Ou, K. Ltham, S. Zhuiykov, K. Kalantar Zadeh, "Investigation of twosolvent grinding-assisted liquid phase exfoliation of layered MoS₂," Chemistry of Materials, vol. 27, no. 1, pp. 53- 59, 2015.
- [20] A. Brotchie, F. Grieser, M. Ashokkumar, "Effect of power and frequency on bubblesize distributions in acoustic cavitation," Physics Reviews Letter, vol. 102, no. 8, 2009.
- [21] S. Merouani, O. Hamdaoui, Y. Rezgui, M. Guemini, "Effects of ultrasound frequency and acoustic amplitude on the size of sonochemically active bubbles-theoretical study," Ultrasonics Sonochemistry, vol. 20,

Toliyat, "Correlation between iodide dosimetry and terephthalic acid dosimetry to evaluate the reactive radical production due to the acoustic cavitation activity," Ultrasonic Sonochemistry, vol. 20, no. 1, pp. 366-372, 2013.

- [33] A. Hajnorouzi, R. Afzalzadeh, F. Ghanati, "Studies on the regularity of wave intensity in ultrasonic bath and spherical reactor," Journal of Acoustical Engineering Society of Iran, vol. 1, no. 2, pp. 32-39, 2014.
- [34] T. Li, G. Galli "Electronic properties of MoS₂ nanoparticles," The Journal of Physical Chemistry C, vol. 111, pp. 16192– 16196, 2007.
- [35] L. Yang, X. Cui, J. Zhang, K. Wang, M. Shen, S.Zeng, S.A. Dayeh, L. Feng, B. Xiang, "Lattice strain effects on the optical properties of MoS₂ nanosheets," Scientific Reports, vol. 4, pp. 1-7, 2014.