فصلنامه سرامیک ایران

رشد نانوساختارهای دی‌سولفیدمولیبدن روی فوم کربن به روش هیدروترمال

محمدعلی هدایتی، مهدی ملکی*، هاجر قنبری

دانشکده مهندسی مواد و متالورژی، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران، ایران



نویسنده مسئول:
دکتر مهدی ملکی
دانشگاه علم و صنعت ایران
Malekim@iust.ac.ir

نوع مقاله: پژوهشی
صفحه‌های: ۸۱ تا ۸۶
شاپا چاپی: ۳۳۵۱-۱۷۳۵
شاپا الکترونیکی: ۳۰۹۷-۲۷۸۳
زبان نشریه: فارسی
دسترس‌پذیر در نشانی:
www.JICERS.ir
تاریخ دریافت:
۱۴۰۰/۰۴/۱۴
تاریخ پذیرش:
۱۴۰۰/۰۶/۰۲
DOR: 20.1001.1.17353351.1400.17.1.5.6

چکیده: دی‌سولفیدمولیبدن با توجه به خواص نوری و الکتریکی مطلوب، یکی از مهم‌ترین ترکیبات دی‌کالکوژنیدهای فلزات انتقالی است. هدایت الکتریکی پایین، پایداری الکتروشیمیایی و سطح ویژه کم از چالش‌های استفاده از دی‌سولفیدمولیبدن است. در این پژوهش، برای حل این چالش‌ها کامپوزیتی از نانوذرات دی‌سولفیدمولیبدن/فوم کربن با استفاده از رسوب دی‌سولفیدمولیبدن به روش هیدروترمال روی فوم کربن انعطاف‌پذیر ساخته شد. فوم کربن انعطاف‌پذیر از پیرولیز فوم ملامین در دمای ۸۰۰°C سنتز شد و رسوب دی‌سولفیدمولیبدن روی فوم کربن، با استفاده از پیش‌ماده‌های سدیم‌مولیبدات آبدار و گوگرد و حرارت‌دهی در دماهای ۲۰۰، ۲۲۰ و ۲۴۰°C صورت گرفت. برای بررسی فازی، شناسایی محصولات و بررسی مورفولوژی، آنالیزهای پراش اشعه ایکس (XRD)، طیف‌سنجی رامان و تصویربرداری به کمک میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) صورت گرفت. نتایج به دست آمده از این پژوهش نشان‌دهنده تشکیل فاز بلوری 2H با ساختار بلوری هگزاگونال در تمامی نمونه‌هاست. در هر سه نمونه، دی‌سولفیدمولیبدن با مورفولوژی میکروکره‌های گل‌شکل تشکیل شده‌است. علاوه‌براین، مشاهده شد که در دماهای ۲۰۰، ۲۲۰ و ۲۴۰°C، ضخامت رشته‌های فوم به ترتیب برابر ۵-۳/۵، ۷-۵/۵ و ۸μm-۶/۵ است که نشان‌دهنده افزایش میزان رسوب دی‌سولفیدمولیبدن روی فوم کربن با افزایش دماست.

کلمات کلیدی: کامپوزیت دی‌سولفیدمولیبدن/فوم کربن، دی‌سولفیدمولیبدن، فوم ملامین، هیدروترمال.

۱- مقدمه

دی‌کالکوژنیدهای فلزات انتقالی با فرمول کلی MX_2 ("M" مربوط به فلز انتقالی مانند V، W، Ta، Mo و Ni و "X" مربوط به عنصر کالکوژن مانند Te، Se و S) به دلیل ویژگی‌های شیمیایی و فیزیکی منحصربه‌فرد خود مورد استقبال گسترده قرار گرفته‌اند [۱]. دی‌سولفیدمولیبدن یکی از ترکیبات گروه دی‌کالکوژنیدهای فلزات انتقالی است که در هر لایه آن، اتم‌های مولیبدن و گوگرد با پیوند یونی در کنار هم قرار گرفته‌اند. هرکدام از لایه‌ها، مشابه ساختار گرافن، به کمک پیوند واندروالسی ضعیف به یکدیگر متصل شده‌اند و فاصله این لایه‌ها از یکدیگر تقریباً برابر ۰/۶۵ nm است. از فازهای بلوری MoS_2 می‌توان به فازهای 1H، 1T، 2H و 3R اشاره کرد که به‌ترتیب دارای ساختارهای بلوری هگزاگونال، تری‌گونال، هگزاگونال و رومبوهدرال هستند [۱, ۲].

دی‌سولفیدمولیبدن، برخلاف گرافن که گاف انرژی برابر صفر دارد، دارای گاف انرژی بزرگتر از یک است که باعث ایجاد ویژگی‌های نوری و الکتریکی خاصی در این ماده شده‌است. دی‌سولفیدمولیبدن دارای گاف انرژی ۱/۸ eV است و با کاهش تعداد لایه‌های آن به تک‌لایه، گاف انرژی آن به ۱/۳ eV کاهش می‌یابد [۲].

هدایت الکتریکی و یونی پایین، سطح ویژه و پایداری الکتروشیمیایی کم دی‌سولفیدمولیبدن و تجمع ذرات آن در حین فرآیندهای کاربردی مانند فرآیندهای ذخیره‌سازی انرژی سبب ایجاد محدودیت در کاربردهای این ماده شده‌است که برای رفع چنین

[DOR: 20.1001.1.17353351.1400.17.1.5.6]
[Downloaded from jicers.ir on 2026-11-25]

چالش‌هایی باید از کامپوزیت کردن این ماده با مواد دیگر مانند مواد رسانا و یا مواد با سطح ویژه بالا بهره گرفت [۳]. کامپوزیت‌هایی مانند اکسیدتیتانیوم/دی‌سولفیدمولیبدن [۴]، کامپوزیت MoS_2/WS_2/گرافن [۵]، کامپوزیت‌های پایه کربنی دی‌سولفیدمولیبدن و ... برای رفع این چالش‌ها معرفی شده‌اند.

مواد پایه کربنی مانند نانولوله‌های کربنی [۶]، گرافن [۷] و منسوجات کربنی [۸] از جمله موادی هستند که برای کامپوزیت‌سازی با دی‌سولفیدمولیبدن مورد استفاده قرار گرفته‌اند و در کاربردهایی نظیر باتری لیتمی [۹]، واکنش‌های تکامل هیدورژن [۱۰]، ابرخازن‌ها [۱۱]، حسگرهای کرنشی [۱۲] و ... مورد استفاده قرار گرفته‌اند.

به عنوان مثال، هانگ و همکارانش [۱۳] به منظور افزایش رسانایی و جلوگیری از تجمع نانوورقه‌های دی‌سولفیدمولیبدن از کامپوزیت دی‌سولفیدمولیبدن/گرافن استفاده کرد. استفاده از کامپوزیت دی‌سولفیدمولیبدن در ابرخازن باعث افزایش طول عمر و افزایش ظرفیت آن می‌شود. افزون‌براین، مااو و همکارنش [۱۴]، کامپوزیت پارچه کربنی/دی‌سولفیدمولیبدن را برای استفاده به عنوان کاتالیزر در واکنش‌های تکامل هیدروژن سنتز کرد.

فوم‌های کربنی نیز از جمله مواد پایه کربنی هستند که به منظور بهبود ویژگی‌های دی‌سولفیدمولیبدن مورد استفاده قرار گرفته‌اند. استفاده از فوم‌های کربنی که قابلیت تولید در مقیاس بالا را داشته باشند و همچنین دارای صرفه اقتصادی باشند، می‌توانند به توسعه استفاده از این کامپوزیت‌ها کمک کند [۱۵, ۱۶]. فوم‌های کربنی انعطاف‌پذیر که از پیرولیز فوم ملامین تجاری به دست می‌آید، علاوه بر صرفه اقتصادی، دارای ساختار سه‌بعدی و بهم پیوسته، هدایت الکتریکی مطلوب، سطح ویژه بالا، ویژگی انعطاف‌پذیری، آب‌گریزی و رنگ مشکی هستند [۱۷, ۱۸]. مجموعه این ویژگی‌های فیزیکی، شیمیایی و مکانیکی مناسب، می توانند فوم‌های کربنی منعطف را به عنوان یک عامل کامپوزیت کننده مناسب با دی‌سولفیدمولیبدن مطرح نمایند. افزون‌براین، این دسته از فوم‌های کربنی به عنوان یک عامل کامپوزیت کننده با دی‌سولفیدمولیبدن، می‌تواند هدایت الکتریکی پایین و سطح ویژه کم MoS_2 را برطرف نمایند [۱۹].

روش‌های مختلفی مانند روش رسوب شیمیایی فاز بخار، روش هیدروترمال و سولوترمال برای رسوب دی‌سولفیدمولیبدن روی ماده زمینه و کامپوزیت‌سازی آن با مواد پایه کربنی مورد بررسی قرار گرفته‌است. روش هیدروترمال روشی آسان برای سنتز MoS_2 است که قابلیت کامپوزیت سازی با مواد دیگر را نیز داراست [۲۰, ۲۱].

به این ترتیب، در این پژوهش برای رفع چالش‌های MoS_2، از فوم‌های منعطف کربنی با حفرات سه‌بعدی متصل به هم استفاده شد. با توجه به اثرگذاری ماده زمینه در شرایط رشد MoS_2، اثر دمای واکنش هیدورترمال بر نحوه رسوب‌دهی، مورفولوژی و فازهای بلوری در کامپوزیت دی‌سولفیدمولیبدن/فوم کربن مورد بررسی قرار گرفت. دی‌سولفیدمولیبدن رسوب داده شده روی فوم کربن منعطف به روش هیدروترمال دارای ساختار بلوری 2H و مورفولوژی میکروکره‌های گل‌شکل است.

۲- فعالیت‌های تجربی

۲-۱- مواد مورد استفاده

در این پژوهش از فوم ملامین تجاری با فرمول شیمیایی $C_3H_6N_6$، سدیم‌مولیبدات آبدار با فرمول شیمیایی $NaMoO_4.2H_2O$ (ساخت شرکت Merck و خلوص ۹۹/۵ درصد) و گوگرد با فرمول شیمیایی S (ساخت شرکت AppliChem و خلوص ۹۹ درصد) استفاده شده‌است.

۲-۲-سنتز کامپوزیت دی‌سولفیدمولیبدن/فوم کربن

۲-۲-۱- سنتز فوم کربن

به منظور سنتز کامپوزیت MoS_2/فوم کربن، ابتدا فوم کربن، به عنوان ماده زمینه، سنتز می‌شود و سپس روی آن، دی‌سولفیدمولیبدن به روش هیدروترمال رسوب داده می‌شود. فوم کربن از پیرولیز فوم ملامین تجاری سنتز شد. برای این منظور، فوم ملامین پس از شستشو با آب مقطر، در دمای $800^{\circ}C$ به مدت یک ساعت تحت اتمسفر نیتروژن در داخل کوره تیوبی حرارت داده شد تا فوم کربن حاصل گردد.

[Downloaded from jicers.ir on 2026-11-25]

[DOR: 20.1001.1.17353351.1400.17.1.5.6]

۲-۲-۲- رسوب دی‌سولفیدمولیبدن روی فوم کربن

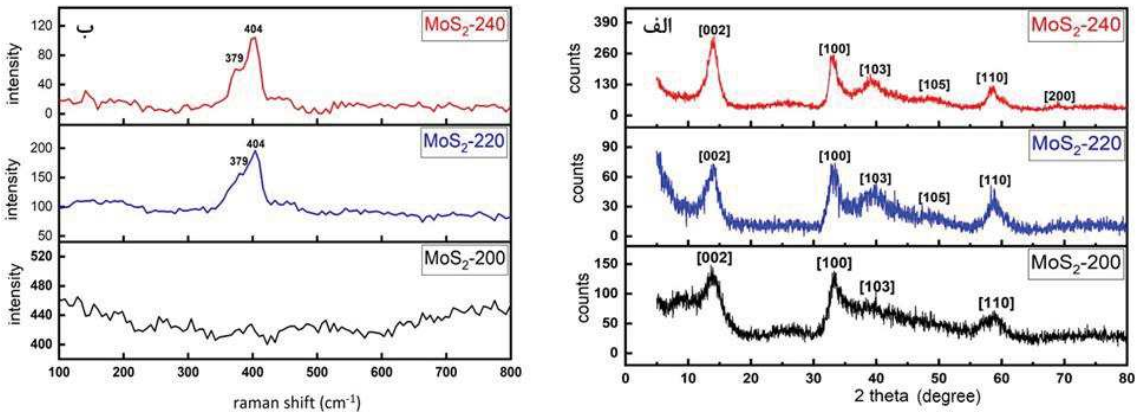
برای رسوب دی‌سولفیدمولیبدن روی فوم کربن، ابتدا پیش‌ماده‌های سدیم‌مولیبدات آبدار و گوگرد با نسبت مولی مولیبدن به گوگرد ۱:۴ توزین و در ml ۶۰ آب مقطر ریخته شد و به مدت ۱۰ دقیقه روی همزن مغناطیسی قرار گرفت و به همراه فوم کربن به داخل اتوکلاو از جنس استیل ضدزنگ و محفظه تفلونی با حجم ml ۸۰ منتقل شد. اتوکلاو به مدت ۱۲ ساعت در دماهای ۲۰۰، ۲۲۰ و ۲۴۰°C در داخل خشک‌کن تحت عملیات حرارتی قرار گرفت. فوم حاصل پس از خروج از اتوکلاو و شستشو با آب مقطر و اتانول، در داخل خشک‌کن و در دمای ۶۰°C خشک شد. فوم‌های به دست آمده در دماهای ۲۰۰، ۲۲۰ و ۲۴۰°C به ترتیب به نام‌های MoS_2-200، MoS_2-220 و MoS_2-240 نام‌گذاری شدند.

۲-۳- تجهیزات و آزمون‌های صورت گرفته

به منظور بررسی فازهای تشکیل شده در نمونه، آنالیز پراش اشعه ایکس به کمک دستگاه XRD ساخت شرکتBRUKER آلمان مدل D8 ADVANCE صورت گرفت و به منظور انجام آنالیز طیف‌سنجی رامان از دستگاه رامان مدلTakram ساخت شرکتTeksan با طول موج لیزر nm^{-1} ۵۲۳ و بازه رامان شیفت ۱۰۰ تا cm^{-1} ۴۶۰۰ استفاده شد. برای انجام آنالیز میکروسکوپ الکترونی برای بررسی مورفولوژی نمونه‌ها، از دستگاه SEM مدل TESCAN VEGA//XMU استفاده شد. همچنین دستگاه کندوپاش طلا مجهز به سه‌کاتد مدل DSR1 برای پوشش‌دهی نمونه‌ها استفاده شد.

۳- نتایج و بحث

الگوی XRD نمونه‌های MoS_2-200، MoS_2-220 و MoS_2-240 در شکل ۱-الف نمایش داده شده‌است. در هر سه نمونه پیک‌هایی در حوالی زوایای °۱۴، °۳۳، °۳۹ و °۵۸/۵ تشکیل شده‌است که با توجه به پیک‌های استاندارد می‌توان آن‌ها را به ترتیب به صفحات بلوری (۰۰۲)، (۱۰۰)، (۱۰۳) و (۱۱۰) در ساختار دی‌سولفیدمولیبدن هگزاگونال (JCPDS card no. 65-1951) نسبت داد. علاوه‌براین، پیکی در حوالی زاویه °۴۸/۵ در نمونه‌های MoS_2-220 و MoS_2-240 و در زاویه °۷۰ در نمونه MoS_2-240 تشکیل شده‌است که به ترتیب مربوط به صفحات (۱۰۵) و (۲۰۰) در دی‌سولفیدمولیبدن هگزاگونال است [۲۲].



شکل ۱- (الف) الگوهای XRD و (ب) طیف‌های رامان نمونه‌های MoS_2-200، MoS_2-220 و MoS_2-240 (از پایین به بالا).

افزون‌براین، در نمونه MoS_2-200 پیکی اضافی در زاویه °۹/۹۵ تشکیل شده‌است. ظهور این پیک، افزایش فاصله بین صفحات (۰۰۲) دی‌سولفیدمولیبدن را نسبت به نمونه مرجع که پیک (۰۰۲) آن در زاویه °۱۴/۴ تشکیل شده‌است، نشان می‌دهد. تشکیل این پیک توسط سایر پژوهشگران نیز مشاهده شده‌است که علت آن، قرار گرفتن یون‌ها و ملکول‌ها در بین صفحات دی سولفیدمولیبدن است [۲۱].

در نمونه‌های MoS_2-200 و MoS_2-240، علاوه‌بر پیک‌های مربوط به دی‌سولفیدمولیبدن، یک شانه در حدود °۲۶ تشکیل شده‌است که این شانه پهن مربوط به کربن به عنوان ماده زمینه است.

[DOR: 20.1001.1.17353351.1400.17.1.5.6]
[Downloaded from jicers.ir on 2026-11-25]

اندازه بلورک نمونه‌ها به کمک رابطه دبای‌شرر اندازه‌گیری شد [۲۳]. اندازه بلورک نمونه‌های MoS_2-200، MoS_2-220 و MoS_2-240 به ترتیب برابر ۱۳، ۱۵ و ۶۰ nm است که افزایش اندازه بلورک را با افزایش دمای انجام واکنش از ۲۲۰ به ۲۴۰°C نشان می‌دهد، در حالی که اندازه بلورک از ۲۰۰ تا ۲۲۰°C تفاوت معناداری نیافته‌است.

نسبت شدت پیک صفحه (۰۰۲) به شدت پیک صفحه (۱۰۰) در نمونه‌های MoS_2-200 و MoS_2-220 تغییر محسوسی نکرده‌است؛ اگرچه در نمونه MoS_2-240 این نسبت افزایش پیدا کرده‌است که این امر به دلیل رشد ترجیحی صفحه (۰۰۲) با افزایش دمای انجام واکنش است (نسبت شدت پیک (۰۰۲) به شدت پیک (۱۰۰) یا $I_{(002)}/I_{(100)}$ در نمونه MoS_2-240 برابر ۱/۳، در نمونه‌های MoS_2-220 و MoS_2-200 برابر ۱ است).

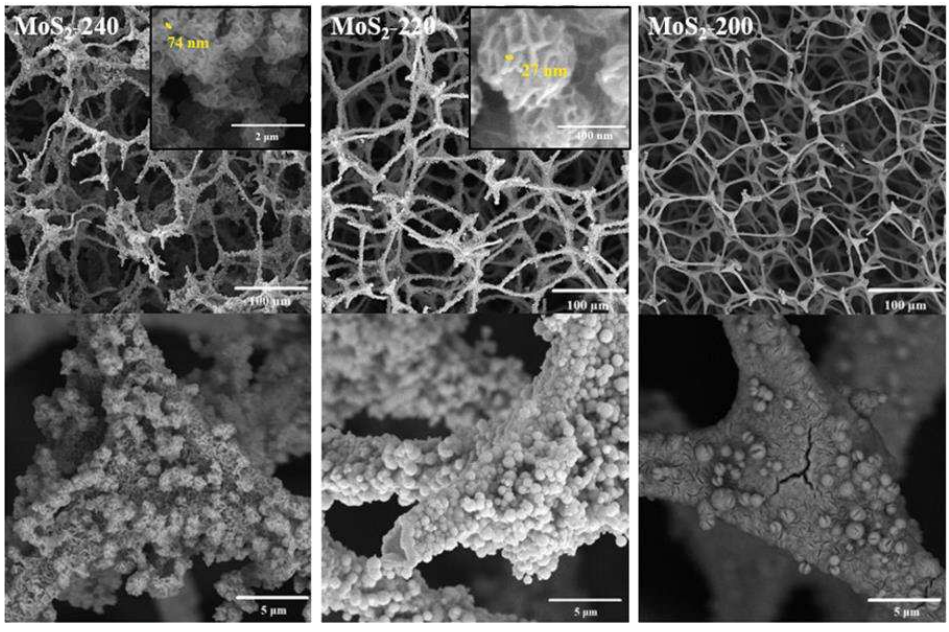
شکل ۱-ب طیف‌های رامان نمونه‌های MoS_2-200، MoS_2-220 و MoS_2-240 را نشان می‌دهد. در طیف رامان نمونه MoS_2-200، پیک‌های مربوط به دی‌سولفیدمولیبدن مشاهده نمی‌شود. ظاهر شدن پیک در ۳۷۹ و cm^{-1} ۴۰۴ در نمونه‌های MoS_2-220 و MoS_2-240 نشان‌دهنده تشکیل MoS_2 با فاز بلوری 2H روی فوم کربنی است. این پیک‌ها را می‌توان به ترتیب به حالات E^1_{2g} و A_{1g} نسبت داد. پیک E^1_{2g} مربوط به ارتعاشات اتم‌ها در داخل صفحات دی‌سولفیدمولیبدن و نیروی برشی بین اتم‌های مولیبدن و گوگرد و پیک A_{1g} مربوط به نیروی فشاری بین اتم‌های گوگرد در امتداد محور c است [۲۰].

نسبت شدت پیک A_{1g} به شدت پیک E^1_{2g}، در نمونه MoS_2-240 بیشتر از نمونه MoS_2-220 است. این نسبت برای نمونه MoS_2-220 تقریباً برابر ۱/۲۵ و برای نمونه MoS_2-240 تقریبا برابر ۱/۳۳ است. افزایش نسبت شدت پیک A_{1g} به شدت پیک E^1_{2g} در طیف‌سنجی رامان برای دی‌سولفیدمولیبدن نشان‌دهنده افزایش چگالی عیوب در ساختار است [۷]. به‌این ترتیب، با افزایش دمای انجام واکنش از ۲۲۰ به ۲۴۰°C، چگالی عیوب در ساختار افزایش یافت.

نتایج مربوط به SEM نمونه‌های MoS_2-200، MoS_2-220 و MoS_2-240 در شکل ۲ آورده شده‌است که نشان‌دهنده ساختار سه‌بعدی و بهم پیوسته کامپوزیت سنتز شده و رسوب یکنواخت دی‌سولفیدمولیبدن روی فوم کربن است. دی‌سولفیدمولیبدن در هر سه نمونه متشکل از میکروکره‌های گل‌شکل است [۲۱].

توزیع اندازه حفرات فوم به صورت نامنظم و برابر ۲۰ تا ۲۰۰ µm است که این امر به علت تجاری بودن فوم ملامینی مورد استفاده برای سنتز فوم کربن به عنوان ماده زمینه است.

با افزایش دمای انجام واکنش، میزان دی‌سولفیدمولیبدن تشکیل شده روی رشته‌های فوم افزایش می‌یابد، بدین شکل که ضخامت میانگین رشته‌های فوم در نمونه MoS_2-200 برابر ۵- ۳/۵ µm، در نمونه MoS_2-220 برابر ۷-۵/۵ µm و در نمونه MoS_2-240 برابر ۸-۶/۵ µm اندازه‌گیری شد.



شکل ۲- نتایج SEM به ترتیب از راست به چپ برای نمونه‌های MoS_2-200، MoS_2-220 و MoS_2-240.

[Downloaded from jicers.ir on 2026-11-25]

[DOR: 20.1001.1.17353351.1400.17.1.5.6]

ضخامت دیواره‌های دی‌سولفیدمولیبدن برای نمونه‌های MoS_2-220 و MoS_2-240 به کمک نرم‌افزار، اندازه‌گیری و روی تصاویر SEM در شکل ۲ مشخص شد. ضخامت دیواره‌های دی‌سولفیدمولیبدن برای نمونه‌های سنتز شده در دماهای ۲۲۰ و ^{o}C ۲۴۰ حدودا به ترتیب برابر ۱۰±۳۰ و ۱۰±۷۰nm است. با توجه به اعداد به دست آمده از ضخامت دیواره‌های دی‌سولفیدمولیبدن، می‌توان بیان کرد که نانوساختارهای گل‌شکل MoS_2 روی فوم کربن رسوب کرده‌است. همچنین، مشاهده شد که با افزایش دمای انجام واکنش، ضخامت دیواره‌های MoS_2 افزایش یافته‌است.

۴- نتیجه‌گیری

در این پژوهش، دی‌سولفیدمولیبدن روی فوم کربن انعطاف‌پذیر به روش هیدروترمال با پیش‌ماده‌های سدیم‌مولیبدات آبدار و گوگرد در دماهای ۲۰۰، ۲۲۰ و ^{o}C ۲۴۰ رسوب داده شد. نتایج حاصل از بررسی الگوهای پراش اشعه X و طیف‌های رامان سه نمونه سنتز شده در دماهای ۲۰۰، ۲۲۰ و ^{o}C ۲۴۰، بیان می‌کند که دی‌سولفیدمولیبدن سنتز شده دارای فاز بلوری 2H- MoS_2 است و با توجه به تصاویر به دست آمده از SEM می‌توان بیان کرد که مورفولوژی در همه نمونه‌ها میکروکره‌های گل‌شکل است. افزون‌براین، مشاهده شد با افزایش دمای انجام واکنش، میزان دی‌سولفیدمولیبدن رسوب کرده روی فوم کربن افزایش می‌یابد.

۵- مراجع

[1] Li, X., Zhu, H., "Two-dimensional MoS_2: Properties, Preparation, and Applications", Journal of Materiomics, Vol. 1, No. 1, (2015), 33-44. https://doi.org/10.1016/j.jmat.2015.03.003

[2] Wang, H., Li, C., Fang, P., Zhang, Z., Zhang, J. Z., "Synthesis, Properties, and Optoelectronic Applications of Two-dimensional MoS_2 and MoS_2-based Heterostructures", Chemical Society Reviews, Vol. 47, No. 16, (2018), 6101-6127. https://doi.org/10.1039/C8CS00314A

[3] Park, S.-K., Chung, D. Y., Ko, D., Sung, Y.-E., Piao, Y., "Three-dimensional Carbon Foam/N-doped Graphene@MoS_2 Hybrid Nanostructures as Effective Electrocatalysts for The Hydrogen Evolution Reaction", Journal of Materials Chemistry A, Vol. 4, No. 33, (2016), 12720-12725. https://doi.org/10.1039/C6TA03458F

[4] He, S., Zhang, Y., Ren, J., Wang, B., Zhang, Z., Zhang, M., "Facile Synthesis of TiO_2@MoS_2 Hollow Microtubes for Removal of Organic Pollutants in Water Treatment", Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects, Vol. 600, No. 2, (2020), 124900. https://doi.org/10.1016/j.colsurfa.2020.124900

[5] Lonkar, S. P., Pillai, V. V., Alhassan, S. M., "Three Dimensional (3D) Nanostructured Assembly of MoS_2-WS_2/Graphene as High Performance Electrocatalysts", International Journal of Hydrogen Energy, Vol. 45, No. 17, (2020), 10475-10485 https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2019.03.195

[6] Yuan, H., Li, J., Yuan, C., He, Z., "Facile Synthesis of MoS_2@CNT as An Effective Catalyst for Hydrogen Production in Microbial Electrolysis Cells", ChemElectroChem, Vol. 1, No. 11, (2014), 1828-1833. https://doi.org/10.1002/celc.201402150

[7] Naz, R., Imtiaz, M., Liu, Q., Yao, L., Abbas, W., Li, T., Zada, I., Yuan, Y., Chen, W., Gu, J., "Highly Defective 1T-MoS_2 Nanosheets on 3D Reduced Graphene Oxide Networks for Supercapacitors", Carbon, Vol. 152, No. 2, (2019), 697-703. https://doi.org/10.1016/j.carbon.2019.06.009

[8] Wang, L., Chenhui, Z., "1T-Phase MoS_2 with Large Layer Spacing Supported on Carbon Cloth for High-performance Na^+ Storage", Journal of Colloid and Interface Science, Vol. 116, No. 2, (2017), 285-294. https://doi.org/10.1016/j.jcis.2020.09.055

[9] Ren, J., Ren, R.-P., Lv, Y.-K., "A Flexible 3D Graphene@CNT@MoS_2 Hybrid Foam Anode for High-performance Lithium-ion Battery", Chemical Engineering Journal, Vol. 353, No. 2, (2018), 419-424. https://doi.org/10.1016/j.cej.2018.07.139

[10] Huang, J., Chen, M., Zhang, X., Liu, W., Liu, Y., "P-doped 3D Graphene Network Supporting Uniformly Vertical MoS_2 Nanosheets for Enhanced Hydrogen Evolution Reaction", International Journal of Hydrogen Energy, Vol. 45, No. 7, (2020), 4043-4053. https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2019.12.014

[11] Masikhwa, T.M., Madito, M.J., Bello, A., Dangbegnon,J.K., "High Performance Asymmetric Supercapacitor Based on Molybdenum Disulphide/graphene Foam and Activated Carbon from Expanded Graphite", Journal of Colloid and Interface Science, Vol. 488, No. 2, (2017), 155-165. https://doi.org/10.1016/j.jcis.2016.10.095

[12] Kim, S. J., Mondal, S., Min, B. K., Choi, C.-G., "Highly Sensitive and Flexible Strain–pressure Sensors with Cracked Paddy-shaped MoS_2/Graphene Foam/Ecoflex Hybrid Nanostructures", ACS Applied Materials & Interfaces, Vol. 10, No. 42, (2018), 36377-36384. https://doi.org/10.1021/acsami.8b11233

[13] Huang, K.-J., Wang, L., Liu, Y.-J., Liu, Y.-M., Wang, H.-B., Gan, T., Wang, L.-L., "Layered MoS_2–Graphene Composites for Supercapacitor Applications with Enhanced Capacitive Performance", International Journal of Hydrogen Energy, Vol. 38, No. 32, (2013), 14027-14034.

[Downloaded from jicers.ir on 2026-11-25]

[DOR: 20.1001.1.17353351.1400.17.1.5.6]

https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2013.08.112
[14] Mao, B., Wang, B., Yu, F., Zhang, K., Zhang, Z., Hao, J., Zhong, J., Liu, Y., Shi, W., "Hierarchical MoS_2 Nanoflowers on Carbon Cloth as An Efficient Cathode Electrode for Hydrogen Evolution Under All pH Values", International Journal of Hydrogen Energy, Vol. 43, No. 24, (2018), 11038-11046. https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2018.04.226
[15] Li, W., Chen, J.-w., Xiao, Z.-l., Xing, J.-b., Yang, C., Qi, X.-p., "MoS_2/Graphene/Carbonized Melamine Foam Composite Catalysts for The Hydrogen Evolution Reaction", New Carbon Materials, Vol. 35, No. 5, (2020), 540-546. https://doi.org/10.1016/S1872-5805(20)60507-8
[16] Ma, H., Du, S., Tao, H., Li, T., Zhang, Y., "Three-dimensionally Integrated Carbon Tubes/MoS_2 with Reduced Graphene Oxide Foam as a Binder-free Anode for Lithium Ion Battery", Journal of Electroanalytical Chemistry, Vol. 823, No. 2, (2018), 307-314. https://doi.org/10.1016/j.jelechem.2018.06.033
[17] Chen, S., He, G., Hu, H., Jin, S., Zhou, Y., He, Y., He, S., Zhao, F., Hou, H., "Elastic Carbon Foam via Direct Carbonization of Polymer Foam for Flexible Electrodes And Organic Chemical Absorption", Energy & Environmental Science, Vol. 6, No. 8, (2013), 2435-2439. https://doi.org/10.1039/C3EE41436A
[18] Maleki M., Imani, A., Ahmadi, R., Banna Motejadded Emrooz, H., Beitollahi, A., "Low-cost Carbon Foam as A Practical Support for Organic Phase Change Materials in Thermal Management", Applied Energy, Vol. 258, No. 2, (2020), 114108. https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2019.114108
[19] Zhao, H., Wu, J., Li, J., Wu, H., Zhang, Y., Liu, H., "A Flexible Three-dimensional MoS_2/Carbon Architecture Derived From Melamine Foam as Free-standing Anode For High Performance Lithium-ion Batteries", Applied Surface Science, Vol. 462, No. 2, (2018), 337-343. https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2018.08.110
[20] Lei, Z., Zhan, J., Tang, L., Zhang, Y., Wang, Y., "Recent Development of Metallic (1T) Phase of Molybdenum Disulfide for Energy Conversion and Storage", Advanced Energy Materials, Vol. 8, No. 2, (2018), 1703482. https://doi.org/10.1002/aenm.201703482
[21] Miao, H., Hu, X., Sun, Q., Hao, Y., Wu, H., Zhang, D., Bai, J., Liu, E., Fan, J., Hou, X., "Hydrothermal Synthesis of MoS_2 Nanosheets Films: Microstructure and Formation Mechanism Research", Materials Letters, Vol. 166, No. 2, (2016), 121-124. https://doi.org/10.1016/j.matlet.2015.12.010
[22] Zhang, X., Tang, H., Xue, M., Li, C., "Facile Synthesis and Characterization of Ultrathin MoS_2 Nanosheets", Materials Letters, Vol. 130, No. 2, (2014), 83-86. https://doi.org/10.1016/j.matlet.2014.05.078
[23] Yi, M,. Zhang, C., "The Synthesis of MoS_2 Particles with Different Morphologies for Tribological Applications", Tribology International, Vol. 116, No. 2, (2017), 285-294. https://doi.org/10.1016/j.triboint.2017.06.045

[Downloaded from jicers.ir on 2026-11-25]

[DOR: 20.1001.1.17353351.1400.17.1.5.6]