ИССЛЕДОВАНИЕ ЗАКОНОМЕРНОСТЕЙ ПРОЦЕССА ХИМИЧЕСКОГО ОСАЖДЕНИЯ ДИСУЛЬФИДА МОЛИБДЕНА ИЗ ГАЗОВОЙ ФАЗЫ В СИСТЕМЕ МО(СО)₂-С₂H₂S₂

© 2022 Хаттаб Юссеф

Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, г. Санкт-Петербург, Россия

Статья поступила в редакцию 15.11.2022

В этой статье изучено влияние температуры и состава газа в реакторе на морфологию, структуру и состав тонких пленок, осаждаемых с использованием нового серосодержащего реагента $C_2H_6S_2$. Существование горизонтальных слоев и их деформация, подтвержденные дифракцией рентгеновских лучей и комбинационным рассеянием, позволяют предположить, что вертикальные дендриты растут из горизонтальных слоев, которые изгибаются из-за деформации, что очень похоже на рост вертикальных нанолепестков. Однако переход от вертикального роста дендритов при низкой температуре и высоких скоростях осаждения к росту вертикальных листов при высокой температуре или более низких скоростях осаждения позволяет предположить, что механизм образования может быть описан моделью агрегации, ограниченной диффузией. Результаты экспериментальных исследований показали, что вертикальные дендриты являются основной морфологии пленок, осаждаемых при низком давлении в реакторе, тогда как при относительно высоком давлении удается вырастить монослой за разумное время. Вероятность образования слоев, состоящих из дендритов или плоских фрагментов, сильно зависит как от температуры осаждения, так и от состава реакционной газовой смеси в реакторе.

Ключевые слова: нанолепестки, MoS_2 наноструктуры, наноструктурные элементы.

DOI: 10.37313/1990-5378-2022-24-6-51-64

ВВЕДЕНИЕ

В этой статье будет изучено влияние температуры и состава газа в реакторе на морфологию, структуру и состав тонких пленок, осаждаемых с использованием нового серосодержащего реагента $C_2H_6S_2$, что позволит более глубоко понять механизм их роста.

МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЙ

1 Исследование процесса осаждения вертикальных наноструктуров дисульфида молибдена при низком давлении 63 Па

Как видно из РЭМ-изображения (рис. 1) пленки, осажденной на подложку SiO₂/Si при температуре 350 °C, она состоит из дендритов со случайной ориентацией друг относительно друга. Вид поперечного сечения пленки отчетливо свидетельствует о росте вертикальных дендритов высотой около 650 нм.

Используя ПЭМ, можно получить более детальное изображение структуры пленки при более высоком разрешение. На рисунке 2 приведен вид пленки в наномасштабе, свидетельствующий об отчетливой структуре лепестков в форме «дерева» с «листьями» наноразмеров. «Листья» также имеют толщину в несколько нанометров, так как они прозрачны для электронного луча. Размеры «листьев» могут быть всего *Хаттаб Юссеф, аспирант. E-mail: zzz@ssau.ru*



Рис. 1. РЭМ– поперечное сечение вертикально стоящих дендритов MoS₂, осажденных при 350 °С и 63 Па. Боковая панель: вид на пленку сверху

20 нм, а толщина может достигать нескольких атомных слоев. Электронная дифрактограмма пленки, состоящая из колец, указывает на принадлежность их плоскостям 2H MoS₂.

Кристаллическую структуру пленки исследовали методами рентгеновской дифракции и спектроскопии комбинационного рассеяния. Как показано на рисунке За, все отражения на рентгеновских дифрактограммах могут быть отнесены к чистой гексагональной фазе MoS₂ с постоянными решетки а = 3,161 Å и с =12,299 Å



Рис. 2. ПЭМ – изображения наноструктур в форме дерева (осажденных на 350°С и 63 Па) с дифракцией электронов на них

в соответствии со стандартным файлом JCPDS № 37–1492. Интенсивная линия, отвечающая рефлексу (002), принадлежит горизонтальному слою дисульфида молибдена, а отражения (100) и (101) можно отнести к вертикальным нанолепесткам.

Дальнейшая информация о кристаллической структуре была получена с помощью спектроскопии комбинационного рассеяния света, с помощью которой можно оценить количество S-Mo-S пакетов в слое, а также исследовать текстуру пленки. На рисунке 3б показан рамановский спектр пленки, содержащий две сильные характеристические рамановские моды E^1_{2g} и А¹,, наблюдаемые при 381,2 см⁻¹ и 405,5 см⁻¹. Эти моды соответствуют колебаниям в плоскости атомов молибдена и серы, и колебаниям вне плоскости атомы серы, соответственно. Разница частот между модами комбинационного рассеяния $E^{1}2_{g}$ и A^{1}_{g} составляет ~ 24 см⁻¹, что указывает на присутствие примерно четырех или более слоев S-Mo-S в наноструктурах, подтверждая результаты ПЭМ.

Для получения информации о составе, химическом состоянии и стехиометрии осажденных материалов использовалась РФЭС – спектрометрия и EDX анализ. В спектрах пленки присутствовали сигналы только от элементов Mo, S, C и O. Сигналы кислорода и углерода могут быть вызваны воздействием атмосферы. Стехиометрия пленки MoS₂ была отдельно подтверждена с помощью РФЭС анализа и рентгеновской спектроскопии (EDS), получено отношение S/Mo ~ 2,05 (рис. 4). Однако пленки, осажденные при температуре ниже 350 °С, имеют стехиометрический состав, характеризующийся меньшим отношением S/Mo (меньше 2), вероятнее всего, из-за каталитического механизма реакции между реагентами.

При повышении температуры осаждения морфология вертикальных лепестков изменяется, при этом древовидная форма наблюдается при 350 °C, а фрактальность структуры уменьшается при повышении температуры до осаждения вертикальных стенок при высокой температуре (950 °C) (рис. 5).

Дополнительная информация о морфологии была получена с помощью ПЭМ. На рисунке 6 представлены ПЭМ – изображения нанолепестков, осажденных при 750 °С и 350 °С.



Рис. 3. Рентгенограмма (а) и спектр комбинационного рассеяния (б) пленки, осажденной при 350°С и 63 Па на кремниевую подложку



Рис. 4. РФЭС обзорный спектр пленки, осажденной при 350°С и 63 Па на кремниевую подложку

Видно, что толщина лепестков меняется в зависимости от температуры, в то время как фрактальная форма изменяется на разветвленные листы. Поперечное расстояние между листами увеличивается с повышением температуры из-за уменьшения интенсивности зародышеобразования, а также увеличения размера горизонтальных плоских фрагментов.

Результаты рентгенофазового анализа пленок, представленные на рисунке 7, показывают, что пленки имеют только рефлексы (002, 004, 006, 008), принадлежащие плоскостям, параллельным подложке, или рефлексы (10.0) и (11.0) от плоскостей, перпендикулярных ей, что соответствует вертикальному росту нанолепестков из горизонтального слоя.

Из полученных рентгенограмм следует, что повышение температуры приводит к уменьшению постоянной решетки (С), значение которой для пленок, осажденных при высокой температуре осаждения, становится близким к значению, характерному для 3R фазы (рис. 8а).



Рис. 5. Влияние температуры осаждения на морфологию пленок, осажденных при 63 Па и различных температурах: (a) 350°C, (б) 550°C, (в) 750°C, (г) 950°C.



Рис. 6. ПЭМ– изображения нанолепестков, выращенных при 63 Па и разных температурах: 750 °С (вверху) и 350 °С (внизу).



Рис. 7. Рентгенограммы пленок MoS₂ с нанолистами, нанесенными при разной температуре на подложках из оксида кремния

Одновременно было установлено, что толщина горизонтальных тонких пленок MOS_2 , полученных при различных температурах, рассчитанная по формуле Шеррера для плоскости (002), увеличивается с 7 до 59 нм с увеличением температуры от 350 до 850 °C, со скачком около 750 °C (рис. 8б).

доминирующие моды: A_{g}^{1} (405,5 см⁻¹, 408 см⁻¹) и E_{2g} (381,3 см⁻¹, 382,3 см⁻¹), которые принадлежат MoS_{2} (рис. 9). Разница между положениями мод A_{g}^{1} и E_{2g} увеличивается с 23,7 см⁻¹ для пленок, полученных при температуре осаждения 350 °С и состоящих из вертикальных листов с 4 S-Mo-S пакетами, до 25,5 см⁻¹ для пленок, осажденных при 550 °C с 6 S-Mo-S пакетами. Количество пакетов S-Mo-S увеличивается до десяти или бо-

На рамановских спектрах пленок, осажденных при разных температурах, наблюдаются две



Рис. 8. Влияние температуры осаждения на постоянную решетки С (а) и зависимость минимальной толщины горизонтального слоя от температуры осаждения (б)

лее в слоях, осажденных при температуре 850 °С (рис. 10). Полученные результаты полностью согласуются с предыдущими результатами анализа ПЭМ–изображений нанолепестков.

Положения мод комбинационного рассеяния (рис.11) использовались для расчета деформации в тонких пленках. Из рисунка 12 видно, что деформация уменьшается с увеличением температуры осаждения, однако даже для пленок, осажденных при 850 °С, пленка все еще находится в напряженном состоянии.

2. Исследование закономерностей процесса осаждения монослоя и нанопирмид дисульфида молибдена при относительно высоком давлении 930 Па

При высоком давлении в реакторе (930 Па) и небольшом парциальном давлении Мо(CO)₆ в течение 30 минут на поверхности разных подложек образуются плоские фрагменты – моно-

слои дисульфида молибдена (рис. 13). Прямое осаждение на кремниевые подложки также возможно при этих параметрах осаждения (в отличие от того, что сообщалось ранее, что MoS₂ не может расти непосредственно на кремнии [1]), однако плоские фрагменты намного меньше по размеру.

Измерение толщины невозможно из-за вертикального ограничения микроскопа ACM [2], однако использование разности в положении мод на спектрах комбинационного рассеяния является надежным методом для оценки количества слоев. Величина разности в положении линий в 19 см⁻¹ подтверждает образование монослоя, однако обе моды показывают сдвиги на 3 см⁻¹ от характерных для монослоя значений, указывая на то, что монослой находится в напряженном состоянии и характеризуется деформацией (рис. 14). Результаты измерения ФЛ пленки, нанесенной на SiO₂, показаны на ри-



Рис. 9. Спектры комбинационного рассеяния нанолистов, осажденных при разной температуре. Пленки осаждены на подложки из оксида кремния



Рис. 10. Зависимость разницы между положением линий на рамановских спектрах как индикатор количества слоев в нанолепестках от температуры осаждения. Пленки осаждены на подложки из оксида кремния



Рис. 11. Положение А_{1g} и Е_{2g} пленок с вертикальной морфологией при разных температурах. Пленки осаждены на подложки из оксидов кремния



Рис. 12. Влияние температуры осаждения на деформацию лепестков, рассчитанную на основе рамановских спектров пленок. Пленки осаждены на подложки из оксида кремния



Рис. 13. Монослой, осажденный на подложки SiO2 (a) Si (b). осаждения при 650 °С и 930 Па

сунке 15. Наличие эмиссии с максимумом около 666,4 нм также подтверждает, что произошло образование монослоя.

Влияние температуры осаждения и состава газа в реакторе на плоские фрагменты показано на рисунках 16 и 17 соответственно. При низких температурах пленка плоская и сплошная, а плоские фрагменты, осажденные при 650°С, имеют треугольную форму. При повышении температуры осаждения до 750°С плоские фрагменты становятся гексагональными, а зародышеобразование значительно снижается [3]. Однако при







Рис. 15. Спектр фотолюминесценции монослоя, осаждённого при температуре 650 °C и давлении 930 Па



Рис. 16. Влияние температуры осаждения на формирование монослойных плоских фрагментов (°C): 450 (a), 650 (б), 750 (в), 450 (при низких концентрациях Мо(Co), (г)



Рис. 17. Влияние состава газа в реакторе на морфологию плоских фрагментов (соотношение S/Mo б > a). Осаждение при 650 °C и 930 Па



Рис. 18. АСМ изображение пленки, осажденной при при 650 °С и давлении 266 Па



Рис. 20. Рамановский спектр пленки, осажденной при 650 °С и давлении 266 Па

низкой температуре 450°С снижение парциального давления $Mo(CO)_6$ до очень низкого уровня 0,006 Па приводит к очень маленьким плоским фрагментам размером 50 нм (темные точки на рисунке). С другой стороны, при уменьшении отношения S/Mo поверхностная плотность треугольных плоских фрагментов уменьшается.

3. Исследование закономерностей процесса осаждения наночастиц дисульфида молибдена при давлении 266 Па

На рисунке 18 представлено АСМ изображение наночастиц, осажденных при 650°С и давлении 266 Па, со средним радиусом около 200 нм. Наночастицы аморфны или имеют очень плохую кристалличность, так как на их рентгенограммах не наблюдалось никаких отражений, связанных с MoS_2 (не показано), а интенсивности мод E_{2g} и A_{g1} на спректрах комбинационного рассеяния были очень слабыми (рис. 19). Однако, неожиданно эти частицы демонстрировали сильную фотолюминесценцию около 450 нм (рис. 20), что может быть связано с размерным эффектом.



Рис. 19. Спектры фотолюминесценции пленки, осажденной при 650 °С и давлении 266 Па

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

1 Исследование процесса осаждения вертикальных наноструктуров дисульфида молибдена при низком давлении 63 Па

Результаты исследования методом EDX влияния температуры осаждения на состав пленок, представленные в таблице 1, показали, что по мере увеличения температуры осаждения в пленках увеличивается содержание серы.

Концентрация Мо(СО)₆ и отношение S/Мо в газовой фазе являются важными параметрами в процессах химического осаждения дисульфида молибдена из газовой фазы. На рисунке 21 показаны РЭМ изображения поверхности пленок, осажденных при давлении 62 Па, температуре 750 °С и парциальных давлениях Мо(СО), от 0.06 до 0.66 Па. Как видно из представленных данных, уменьшение давления Мо(СО), приводит к значительному снижению плотности вертикальных нанолепестков (рис. 21 а). Установлено, что увеличение парциального давления Мо(СО), приводит к сближению нанолистов друг с другом [4-6] и появлению ветвлений (рис. 21 б,в). При дальнейшем увеличении концентрации Мо(СО), в газовой фазе вертикальные нанолепестки начинают заменяться на фрактальные (рис. 21 в,г,д). При очень высоких концентрациях Мо(CO)₆ морфология меняется кардинально, так как прекращается рост лепестков, и образуются наночастицы (рис. 21 е).

Появление разветвлений и образование дендритов с ростом давления Mo(CO)₆, вероятнее всего, связано с увеличением скорости осаждения, когда при самых высоких скоростях осаждения пленки состояли из вертикальных разветвленных лепестков. Уменьшение пространства между лепестками при увеличении давление

Температура осаждения (°С)	Отношение (S/Mo)
350	2.05
450	2.08
550	2.19
650	2.2
750	2.2
850	2.38
950	2.25

Таблица 1. Влияние температуры осаждения на отношение S/Mo в пленках



Рис. 21. Влияние парциального давления Mo(CO)₆ на морфологию осаждаемых пленок. Парциальное давление Mo(CO)₆ увеличивается от а до е. Пленки наносились на подложки из оксида кремния при 750 °C и давлении 63 Па

Мо(СО)₆ можно объяснить увеличением интенсивности зародышеобразования на начальной стадии роста. Большее количество Мо(СО)₆ приводит к интенсификации гомогенных реакций, приводящих к зарождению кластеров в газовой фазе и, впоследствии, к осаждению пленок, состоящих из наночастиц.

Эффект влияния отношения S/Mo на морфологию осаждаемых слоев можно проследить по данным, представленным на рисунке 22. При уменьшении отношения S/Mo вертикальные нанолисты начинают изгибаться, а разветвления становятся намного меньше [7, 8]. Это связано с тем, что лепестки горизонтального слоя могут иметь много форм, изменяющихся от тригональной до гексагональной, вероятнее всего, в зависимости от соотношения S/Mo, однако, характер влияния соотношения S/Mo на разветвление пока еще остается не вполне ясным.



Рис. 22. Влияние отношения S/Mo на морфологию нанолепестков. Отношение S/Mo увеличивается справа налево. Пленки на подложки из оксида кремния осаждались при 750 °C и давлении 63 Па





Эффект влияния отношения S/Mo на состав осаждаемых пленок исследовался с помощью рамановской спектроскопии. Результаты, представленные на рисунке 23, показали, что увеличение отношения приводит к большему загрязнению пленки углеродом (область в близи 1350 см⁻¹).

2. Исследование закономерностей процесса осаждения монослоя и нанопирмид дисульфида молибдена при относительно высоком давлении 930 Па

Экспериментально установлено, что по мере увеличения продолжительности процесса осаждения на поверхности подложек начинают появляться нанопирамиды, как показано на рисунке 24, причем они могут образовываться и на кремнии, и на SiO₂.

Чтобы пролить свет на причины их образования, были выращены в одинаковых условиях три пленки на разных подложках (кремний, SiO, и монокристаллический кварц), и изучена их морфология с помощью АСМ. Как следует из полученных результатов (рис. 25), нанопирамиды образуются на монокристаллических подложках, причем плотность их образования достаточно высокая, возможно, из-за рассогласования параметров решетки подложек и дисульфида молибдена. На подложках из аморфной пленки SiO₂, характеризующейся гладкой поверхностью, плотность образования нанопирамид существенно более низкая. Зависимость роста от типа подложки и отсутствие напряжения, позволяет предположить, что образование нанопирамид происходит по механизму Странски-Крастанова, однако выяснение детального механизма роста требует более тщательного исследования.

Результаты выполненных экспериментальных исследований показали, что в исследованном диапазоне температур от 350 до 950 °С и давлений от 63 до 930 Па, формируются слои, характеризующиеся четырьмя типами морфологии (рис. 26): вертикальные дендриты, вертикальные нанолисты, агрегированные наночастицы и тонкие пленки с сильно текстурированной осью *с* (монослой).

Зависимость морфологии как от температуры и от давления показана на графике (рис. 27).

При низком давлении (63 Па или меньше) морфология слоев изменяется от вертикальной структуры дендритов, формируемых при низких температурах (<450 °C) до вертикальных нанолистов, осаждаемых при более высоких температурах (>750 °C). При промежуточном давлении (266 до 500 Па) морфология меняется на наночастицы (в диапазоне температур от 250 до 850 °C). И, наконец, при более высоком давлении (Р>800 Па) на поверхности подложки образуются монослои при высокой температуре, и эта температура перехода уменьшается с увеличением давления.

Эту зависимость можно объяснить, принимая во внимание тот факт, что при повышении общего давления в реакционной камере растут



Рис. 24. РЭМ-изображения пирамид, осажденных на Si и кварце при 650 °С и давлении 930 Па за 60 минут



Рис. 25. Нанопирмиды, осажденные при 650 °С и 930 Па на кварц (а) кремний (б), SiO₂ (в)

парциальные давления реагентов, увеличивается их время пребывания в реакционной зоне и, соответственно, растет вероятность протекания гомогенных реакций образования синтезируемого вещества.

Из существующих диаграмм ясно, что концентрация Mo(CO)₆ и температура осаждения являются основными параметрами, определяющими морфологию образующихся слоев. Дендриты могут быть более четкими при всех температурах при использовании органического серосодержащего реагента [9-11], однако природа серосодержащего реагента может также влиять на состав пленок. Например, результаты рамановской спектроскопии, используемой для обнаружения углеродных загрязнений в пленках, осажденных при 750 °С при схожих условиях, но использовании разных типов серосодержащего реагента (рис. 28), показали, что в случае применения реагента органической природы вероятность загрязнения продукта углеродом растет, о чем свидетельствует наличие отчетливой углеродной моды при ~ 1333 см⁻¹ в спектре пленки, осажденной при использовании органического реагента, в то время как эта мода не проявляется в спектре пленки, полученной с использование H₂S.

ВЫВОДЫ И ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, существование горизонтальных слоев и их деформация, подтвержденные дифракцией рентгеновских лучей и комбинационным рассеянием, позволяют пред-



Рис. 26. Четыре типа морфологии, полученные в этой работе:

вертикальные наноструктуры дендритов слева вверх, вертикальные нанолисты справа вверх, слева вниз, слой за слоем, выращенная пленка, справа вниз – агрегированные наночастицы



Рис. 27. Влияние давления и температуры на морфологию пленок MoS₂

положить, что вертикальные дендриты растут из горизонтальных слоев, которые изгибаются из-за деформации, что очень похоже на рост вертикальных нанолепестков. Однако переход от вертикального роста дендритов при низкой температуре и высоких скоростях осаждения к росту вертикальных листов при высокой температуре или более низких скоростях осаждения позволяет предположить, что механизм образования может быть описан моделью агрегации, ограниченной диффузией. Существование горизонтальных слоев и их деформация, подтвержденные дифракцией рентгеновских лучей и комбинационным рассеянием, позволяют предположить, что вертикальные дендриты растут из горизонтальных слоев, которые изгибаются из-за деформации, что очень похоже на рост вертикальных нанолепестков. Однако переход от вертикального роста дендритов при низкой температуре и высоких скоростях осаждения к росту вертикальных листов при высокой температуре или более низких



Рис. 28. Рамановские спектры двух пленок, осажденных при использовании разных серосодержащих реагентов (оранжевый) С₂H₆S₂, (синий) H₂S. Пленки на подложках из оксида кремния при 750°С и 63 Па

скоростях осаждения позволяет предположить, что механизм образования может быть описан моделью агрегации, ограниченной диффузией.

Результаты экспериментальных исследований показали, что вертикальные дендриты являются основной морфологии пленок, осаждаемых при низком давлении в реакторе, тогда как при относительно высоком давлении удается вырастить монослой за разумное время. Вероятность образования слоев, состоящих из дендритов или плоских фрагментов, сильно зависит как от температуры осаждения, так и от состава реакционной газовой смеси в реакторе.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Liu K.K., Zhang W., Lee Y.H. Growth of Large-Area and Highly Crystalline MoS₂ Thin Layers on Insulating Substrates // Nano Letters. 2012. V. 12. P. 1538-1544.
- Superior stability and high capacity of restacked molybdenum disulfide as anode material for lithium ion batteries / *G. Du, Z. Guo, S. Wang, R. Zeng, Z. Chen, and H. Liu //* Chemical Communications. 2010. V. 46. P.1106-1108.
- Hwang H., Kim H., Cho J. MoS₂ nanoplates consisting of disordered graphene-like layers for high rate lithium battery anode materials // Nano Letters. 2011. V. 11. P. 4826-4830.
- High-mobility and low-power thin-film transistors based on multilayer MoS₂ crystals / S. Kim, A. Konar, W. S. Hwang, J. H. Lee, J. Lee, J. Yang // Nature Communications. 2012. V. 3. P. 1011.
- Fuhrer High mobility ambipolar MoS₂ field-effect transistors: Substrate and dielectric effects / W. Bao, X. Cai, D. Kim, K. Sridhara, M. S. Fuhrer // Applied Physics Letters. 2013.V.102. P. 042104.
- High-mobility and low-power thin-film transistors based on multilayer MoS₂ crystals / *S. Kim, et al.* // Nature Communications. 2012. Vol. 3. p. 1011.
- High performance multilayer MoS₂ transistors with scandium contacts / S. Das, H.Y. Chen, A. V. Penumatcha, and J. Appenzeller // Nano Letters. 2012. V.13. P. 100- 105.
- Control of valley polarization in monolayer MoS₂ by optical helicity / K. F. Mak, K. L. He, J. Shan, T. F. Heinz // Nature Nanotechnology. 2012. V. 7. P. 494-498.
- Valley polarization in MoS₂ monolayers by optical pumping / H. L. Zeng, J. F. Dai, W. Yao, D. Xiao, X. D. Cui // Nature Nanotechnology. 2012. V. 7. P. 490-493.
- Splendiani A., Sun L., Zhang Y. Emerging Photoluminescence in Monolayer MoS₂ // Nano Lett. 2010. V. 10. P. 1271-1275.
- Atomically Thin MoS₂: A New Direct-Gap Semiconductor / K. F. Mak, C. Lee, J. Hone, J. Shan, T. F. Heinz // Phys. Rev. Lett. 2010. V. 105. 136805.

STUDY OF THE REGULARITIES OF THE PROCESS OF CHEMICAL DEPOSITION OF MOLYBDENUM DISULFIDE FROM THE GAS PHASE IN THE MO(CO)₆-C₂H₆S₂ SYSTEM

© 2022 Khattab Youssef

Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, St. Petersburg, Russia

In this article, the influence of the temperature and composition of the gas in the reactor on the morphology, structure, and composition of thin films deposited using the new sulfur-containing reagent C2H6S2 was studied. The existence of horizontal layers and their deformation, confirmed by X-ray diffraction and Raman scattering, suggest that vertical dendrites grow from horizontal layers that bend due to deformation, which is very similar to the growth of vertical nanoleaves. However, the transition from vertical dendritic growth at low temperature and high deposition rates to vertical sheet growth at high temperature or lower deposition rates suggests that the formation mechanism can be described by a diffusion-limited aggregation model. The results of experimental studies have shown that vertical dendrites are the main morphology of films deposited at low pressure in the reactor, while at a relatively high pressure it is possible to grow a monolayer in a reasonable time. The probability of formation of layers consisting of dendrites or flat fragments strongly depends on both the deposition temperature and the composition of the reaction gas mixture in the reactor.

Keywords nano petals, MoS, nanostructures, nano structural elements.

DOI: 10.37313/1990-5378-2022-24-6-51-64

Khattab Youssef, Postgraduate Student. E-mail: zzz@ssau.ru