

УДК 53.084

АСМ ИССЛЕДОВАНИЕ ХАРАКТЕРНЫХ ОСОБЕННОСТЕЙ ТОНКИХ ПЛЕНОК MoS₂ НА НАЧАЛЬНЫХ СТАДИЯХ РОСТАДинь Куанг Ань ⁽¹⁾, Чжо Зин Пью ⁽²⁾*Студент 4 курса бакалавриата ⁽¹⁾, аспирант 4 года обучения ⁽²⁾,
кафедра «Электронные технологии в машиностроении»**Московский государственный технический университет им. Н. Э. Баумана**Научный руководитель: А.И. Беликов,**Кандидат технических наук, доцент кафедры «Электронные технологии в машиностроении»***ВВЕДЕНИЕ**

Тонкие пленки полупроводниковых двумерных материалов, таких, как дихалькогениды переходных металлов, в последние годы привлекают большое внимание благодаря своему потенциалу для оптоэлектронных и спинтронных устройств, а также других устройств на основе 2D-полупроводников. Однако, как графен и другие атомарно тонкие материалы, они теряют ключевые свойства при размещении на подложке, включая снижение фотолуминесценции и искажение кристаллической структуры, меняется морфология поверхности, растет шероховатость [1]. Исследование структурных особенностей тонких пленок MoS₂ на начальных стадиях роста при осаждении магнетронным методом на подложки кремния и сапфира позволит найти технологические решения для формирования предпочтительной структуры и свойств таких пленок.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

В работе тонкие пленки MoS₂ получали магнетронным распылением мишени MoS₂ чистоты 99,9% на вакуумной технологической установке кафедры МТ-11 «Электронные технологии в машиностроении» МГТУ им. Н. Э. Баумана. В качестве подложек использовали фрагменты полупроводниковых пластин монокристаллического кремния ориентации (111) и сапфира (0001) размером 15x15 мм². Режимы нанесения пленок приведены в таблице 1.

Таблица 1. Параметры режимов нанесения тонких пленок MoS₂

Параметр	Значение
Давление аргона	0,5 Па
Мощность на магнетроне	10 Вт
Время нанесения	10, 20, 30 с
Температура подложки	200 °С
Тип подложки	Кремний, Сапфир

Перед размещением подложек в технологической камере, выполнялась жидкостная очистка их поверхности от загрязнений в ультразвуковой ванне, последовательно в щелочном растворе и в этиловом спирте. На рисунке 1 показаны подложки Si и сапфира до размещения на технологической оснастке камеры.

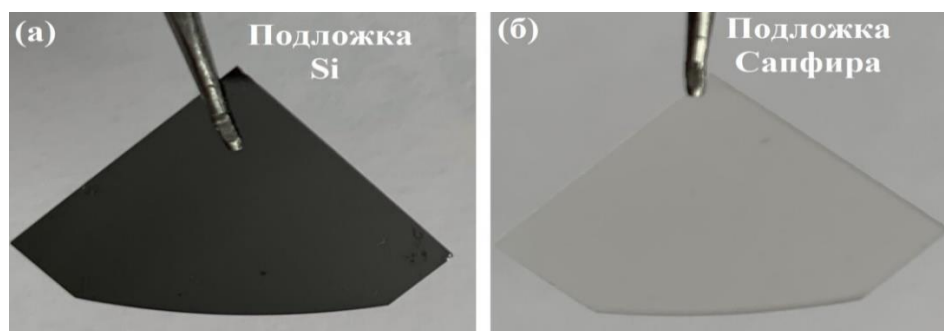


Рисунок 1. Внешний вид исходных подложек а) Si и б) сапфира

Для исследования полученных образцов использовался метод атомно-силовой микроскопии. Образцы устанавливались в металлический держатель, а затем для каждого образца была случайно выбрана и просканирована область поверхности на скорости сканирования 0,5 Гц. С помощью программного обеспечения Nova-Px были получены статистические параметры шероховатости и морфологии поверхности.

С использованием АСМ были предварительно определены параметры исходной поверхности подложек до нанесения пленок. Поверхность подложки сапфира имела шероховатость $Ra \approx 0,88$ нм. Для подложки Si это значение составило $\approx 3,2$ нм.

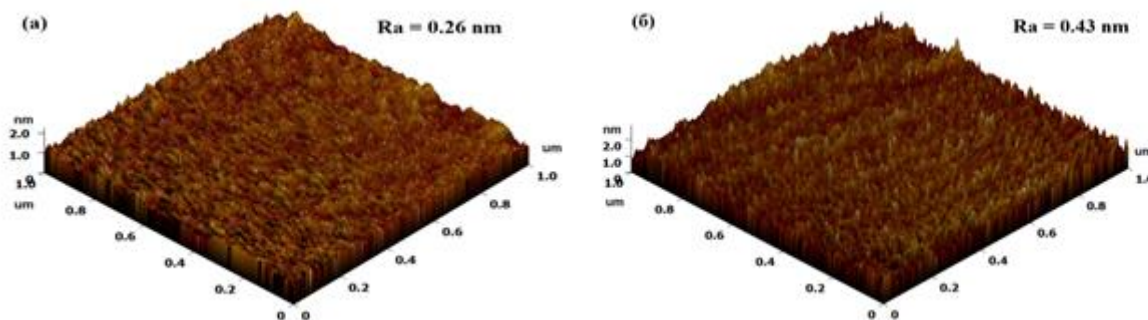
РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Характеристики пленок, полученных на различных стадиях осаждения (при времени нанесения 10, 20 и 30 с) представлены в таблице 2.

Таблица 2. Режимы осаждения и характеристики ультратонких пленок MoS₂

№	Подложка	Время осаждения, с	Скорость роста, нм/с	Толщина, нм		Средний размер зёрен, нм	Шероховатость, нм	
				Средняя	Среднее квадратическое отклонение		Ra	Rq
1	Si	10	0,35	3,51	0,04	141	0,26	0,35
2	Si	20	0,25	5,09	0,06	125	0,56	0,67
3	Si	30	0,38	11,52	0,07	134	0,61	0,73
4	Сапфир	10	0,35	3,51	0,03	53	0,43	0,53
5	Сапфир	20	0,25	5,00	0,05	54	0,62	0,73
6	Сапфир	30	0,34	10,20	0,06	46	0,75	0,88

На рисунках 2, 3, 4 приведены АСМ-изображения пленок MoS₂ на подложках кремния (а) и сапфира (б), нанесенных за 10, 20 и 30 секунд.

Рисунок 2. АСМ-изображения пленок MoS₂ на подложках кремния (а) и сапфира (б), нанесенных за 10 секунд.

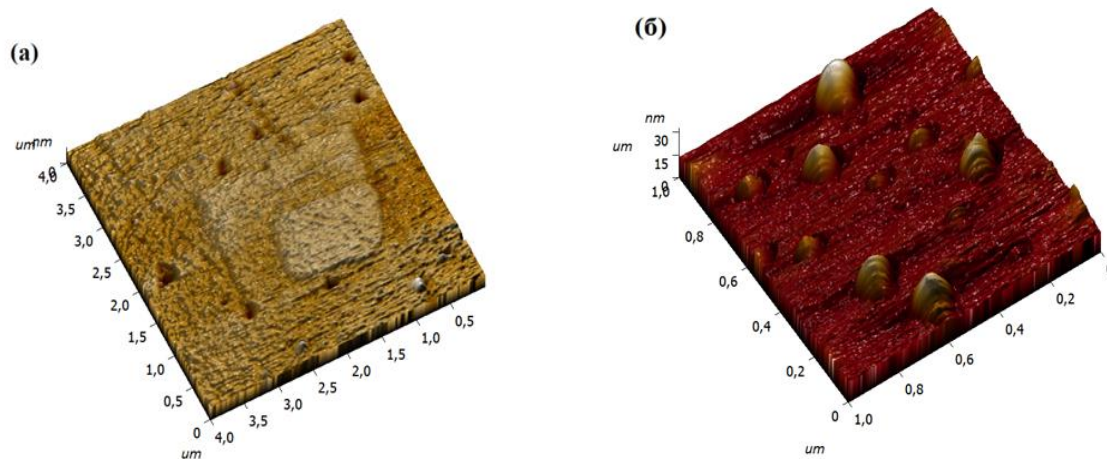


Рисунок 3. АСМ-изображения пленок MoS_2 на подложках кремния (а) и сапфира (б), нанесенных за 20 секунд.

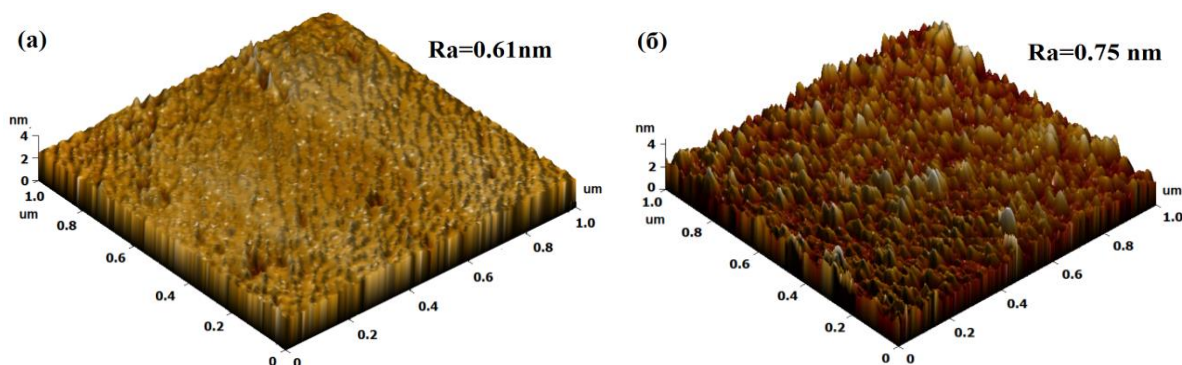


Рисунок 4. АСМ-изображения пленок MoS_2 на подложках кремния (а) и сапфира (б), нанесенных за 30 секунд.

Для пленок, нанесенных за 10 секунд (рисунок 2), наблюдаются высокая однородность поверхности и низкая шероховатость. Но шероховатость у пленки MoS_2 на сапфире ($Ra = 0,43$ нм) существенно выше, чем на кремнии ($Ra = 0,26$ нм).

По истечении 20 секунд нанесения (рисунок 3), поверхность пленок MoS_2 на кремнии имеет высокую планарность, а на поверхности пленки на сапфире наблюдаются крупные островковые образования, что, вероятно, характеризует островковую стадию по модели послойно-островкового роста. На рисунке 3 видно, что островковые образования имеют слоистую структуру с перпендикулярной к поверхности подложки ориентацией слоев MoS_2 , что характерно для ориентации (100). На рисунке 5 показана геометрия поперечного сечения крупного островкового образования на поверхности пленки MoS_2 на сапфире.

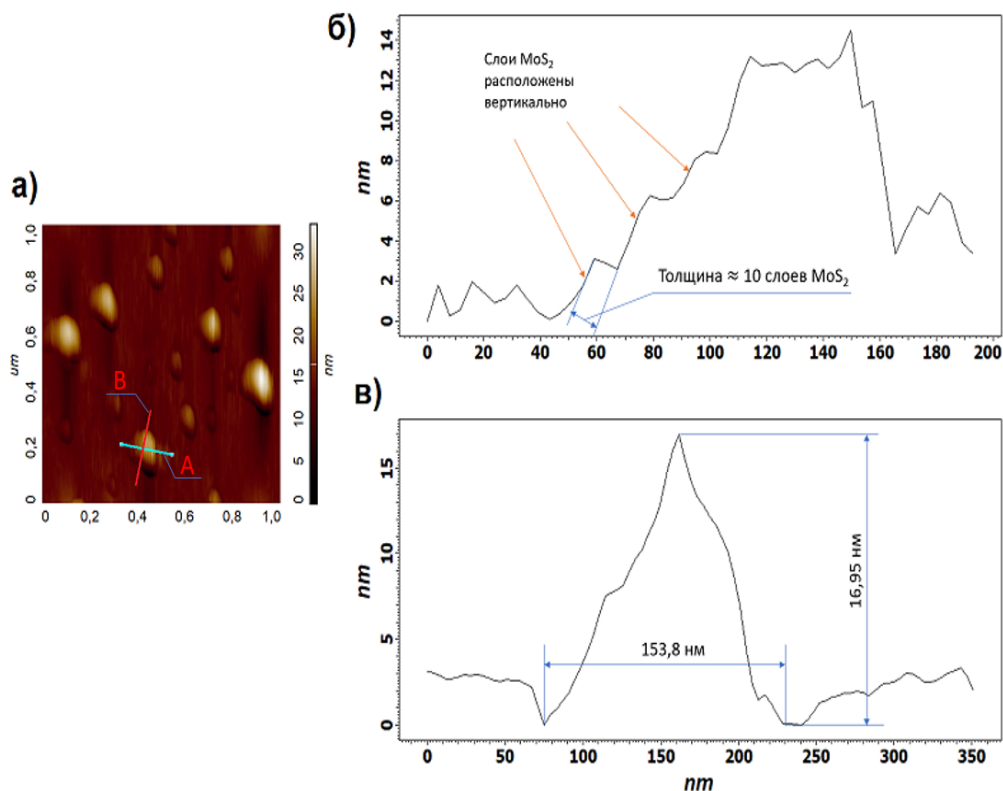


Рисунок 5. Островки на поверхности пленки MoS₂ на сапфире: (а) АСМ-изображение пленки, нанесенной за 20 секунд (линия А – поперечное сечение островка, линия В – продольное сечение островка), (б) профиль поперечного сечения, (в) профиль продольного сечения

Полученные сканы участков образца пленки на сапфире свидетельствуют о наличии плоской планарной базы пленки с низкой шероховатостью, на которой образовались островки с несколькими слоями MoS₂ (рисунок 5б), имеющие близкую к треугольной форму с вершиной наверху (рисунок 5в). Это характерно для вертикального роста островков с ориентацией слоев MoS₂ перпендикулярно поверхности подложки.

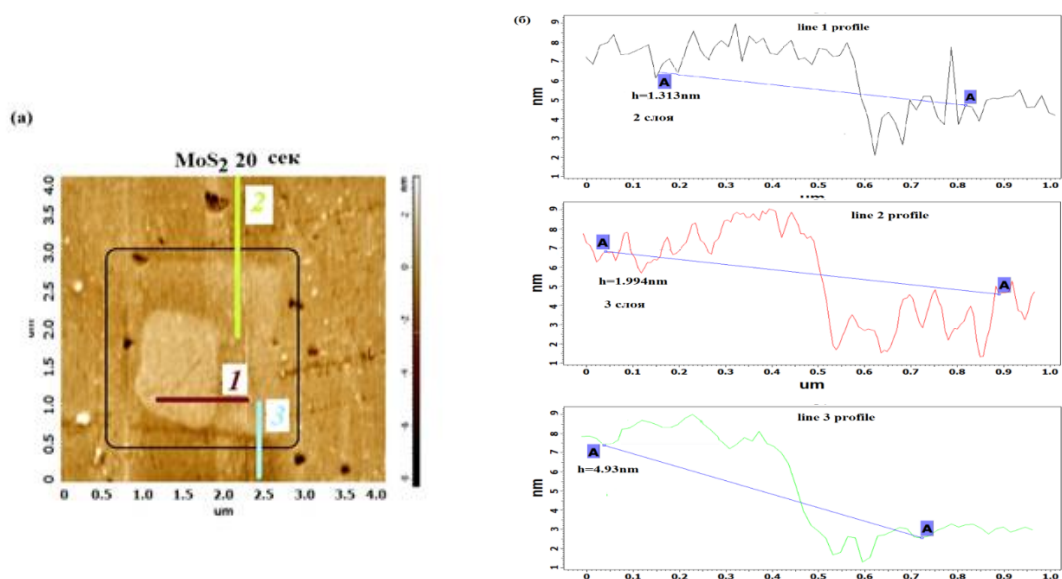


Рисунок 6. АСМ-изображение поверхности пленок MoS₂ на подложке кремния (20 сек) (а) и профили сечений по линиям отрезков 1-3 с указанием величины перепада высот (б)

На рисунке 6 представлено АСМ-изображение поверхности пленки MoS_2 на подложке кремния, нанесенной за 20 секунд. Видно, что на поверхности сплошной пленки располагается крупный островок ($2 \times 2 \text{ мкм}^2$) толщиной, примерно, 2 нм, измеренной по АСМ-профилю (на рисунке 6, линия №2), на котором, в свою очередь, располагается островок меньшего размера (около $1 \times 1 \text{ мкм}^2$) толщиной 1,31 нм – линия по АСМ-профилю (на рисунке 6, линия №1). Полученные толщины хорошо согласуются с кратными значениями толщины монослоя MoS_2 ($\sim 0,65 \text{ нм}$), и можно оценить количество монослоев в островках, имеющих высокую планарность: для крупного она составляет 3 слоя, а для расположенного на нем – 2 слоя.

На рисунке 4 видно, что при нанесении за 30 секунд существует небольшая разница в шероховатости образцов пленок, но пленка на кремнии имеет более высокую планарность поверхности, чем на сапфире. Вклад в увеличение шероховатости пленок MoS_2 на кремнии вносят имеющиеся на поверхности подложки кремния треугольные лунки – следы травления, оставшиеся от процедуры определения кристаллографической ориентации, и попавшие в область скана. Таким образом, фактическая шероховатость пленок на кремнии еще ниже.

Среднее значение размера зерен пленок MoS_2 на подложках кремния в 2,5 раза выше, чем у пленок на сапфире (таблица 2), что также свидетельствует о преобладании механизма послойного роста для случая подложки кремния с более высокой поверхностной энергией. Наличие такого эффекта может свидетельствовать о различиях в механизмах роста на начальной стадии, для случая кремниевых подложек реализуется двумерное разрастание зародышей с преимущественным заполнением изломов поверхности, ступеней роста, а для сапфира – трехмерное разрастание с вертикальной ориентацией слоев структуры.

ВЫВОДЫ

Таким образом, на основании полученных результатов выявляется следующая картина роста пленок MoS_2 на начальной стадии, под влиянием подложки. На первом этапе (10 с) до толщины, примерно 3,5 нм, формируется планарная пленка низкой шероховатости. На следующей стадии (20 с), на подложках Si происходит формирование плоских островков и их послойное разрастание, а на подложках сапфира формируются трехмерные треугольные островки с вертикальным направлением роста. На третьей стадии (30 с) происходит увеличение количества и укрупнение островков, вплоть до их объединения в сплошную пленку.

Дальнейшее увеличение толщины пленок при их формировании при невысоких температурах подложек приводит к возникновению начального этапа колончатого роста на образовавшейся укрупненной структуре.

Литература

1. T.H. Choudhury [et al.]. Epitaxial growth of two dimensional layered transition metal dichalcogenides // Annual review of materials research. 2020. № 50. P. 155–177.