

УДК 63.084.125

АСМ ИССЛЕДОВАНИЕ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ТОНКИХ ПЛЕНОК MoS₂, ПОЛУЧЕННЫХ МЕТОДОМ МАГНЕТРОННОГО РАСПЫЛЕНИЯ

Динь Куанг Ань ⁽¹⁾, До Тхи Ньян ⁽²⁾, Чжо Зин Пью, ⁽³⁾

Студент 3 курса бакалавриата⁽¹⁾, магистр 2 года обучения⁽²⁾, аспирант 4 года обучения⁽³⁾,

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

В последнее время дихалькогениды переходных металлов (ДПМ) и, в особенности, дисульфид молибдена (MoS₂), вызывают большой интерес в связи со своими уникальными физическими свойствами и возможными перспективами применения в качестве 2D-материала для нанoeлектроники, плазмоники, спинтроники и других направлений электронной техники. MoS₂ в форме одного молекулярного слоя является прямозонным полупроводником и имеет запрещенную зону шириной 1.8 эВ. Это свойство отличает его от графена, не имеющего запрещенной зоны, и это важно для изготовления таких устройств, как светодиоды, солнечные батареи, фотоприменики и т.д. Кроме того, подвижность носителей заряда в образце MoS₂ высока, в сравнении с другими 2D-материалами, и составляет от 200 до 500 см²·В⁻¹·с⁻¹.

На основании проведенного литературного обзора можно выделить следующие возможные методы получения тонких пленок MoS₂: метод химического осаждения из газовой фазы – CVD (Chemical Vapour Deposition), метод механического расщепления атомных плоскостей, химический пилинг, расслоение в жидкой среде, метод магнетронного распыления в вакууме и другие. Наиболее перспективным для промышленной реализации на крупноразмерных подложках является метод магнетронного нанесения пленок дисульфида молибдена. Этот метод обеспечивает высокое качество и контролируемость процесса формирования поликристаллических и текстурированных пленок MoS₂.

Особенности структуры тонкопленочных покрытий MoS₂ оказывают существенное влияние на их свойства. Таким образом, возникает задача исследования структурных особенностей очень тонких пленок MoS₂. Атомно-силовая микроскопия (АСМ) позволяет определить рельеф поверхности и для тонких пленок на гладкой поверхности выполнить анализ структурных особенностей с высоким атомным пространственным разрешением.

В работе представлены результаты обзора и анализа перспективных применений тонких пленок MoS₂ в области электроники, а также результаты АСМ-исследований структурных особенностей пленок MoS₂.

ПРИМЕНЕНИЕ ТОНКИХ ПЛЕНОК MoS₂ В ЭЛЕКТРОНИКЕ

Недавние эксперименты ученых из разных стран показывают возможности использования структур на основе MoS₂ в опытных устройствах, включая полевые транзисторы [1], низкоэнергетические переключатели, устройства спинтроники и

оптоэлектроники [2]. Далее приводятся некоторые примеры применения пленок MoS_2 в опытных образцах приборов электроники.

Полевые транзисторы на основе MoS_2 . Дисульфид молибдена обладает уникальными электронными свойствами, такими, как стабильность на воздухе, отсутствие эффекта короткого канала, отсутствие незавершенных связей и высокая подвижность носителей заряда, что делает его привлекательным в качестве идеального материала канала для полевых транзисторов. Самое раннее применение MoS_2 для полевых транзисторов было опубликовано еще в 2004 году, когда для 2D-кристаллов WSe_2 и MoS_2 была достигнута высокая подвижность носителей, сопоставимая со значениями, характерными для лучших полевых транзисторов на монокристаллическом кремнии (до $500 \text{ см}^2 \cdot \text{В}^{-1} \cdot \text{с}^{-1}$ для проводимости р-типа при комнатной температуре) [3].

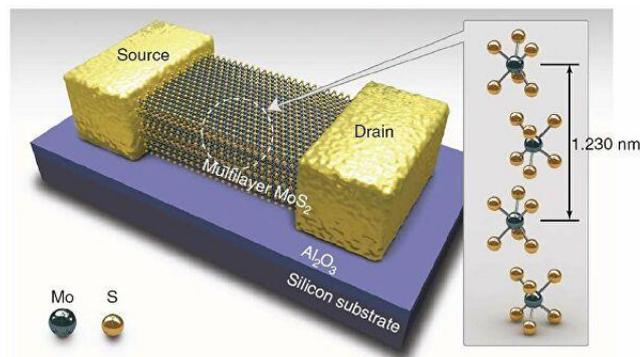


Рис. 1. Структура полевого транзистора на основе MoS_2 [4]

Поверхностное плазмонное усиление фотодетектирования. Поверхностный плазмон – это квант электромагнитных (ЭМ) колебаний, порождаемый вследствие коллективных колебаний свободных электронов вблизи поверхности в металлах и 2D-материалах, которые могут концентрировать ЭМ излучение в направлении распространения электрона с использованием субволны от поверхностных структур.

На рис. 2 показано, что плазмонный резонанс в диапазонах длин волн видимого света и ближнего УФ наблюдается для наноразмерных структур MoS_2 , легированных литием методом электрохимического внедрения. Эти плазмонные резонансы активируются и задаются величиной легирования, вызываемого электрохимическими силами, приводящими к образованию полуметаллического Li_xMoS_2 [5].

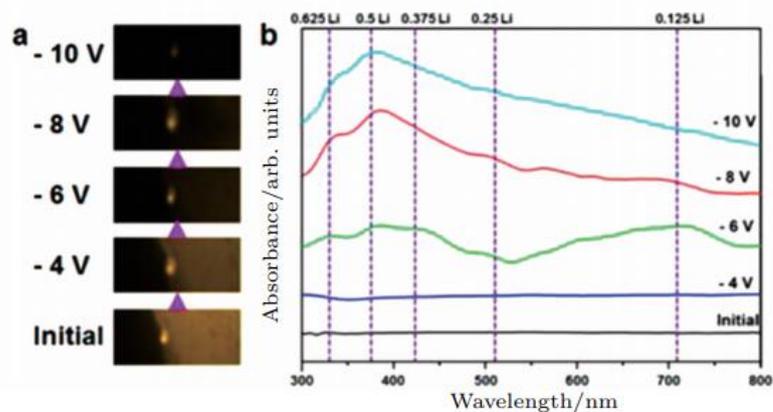


Рис. 2. Плазмонный резонанс высоколегированного MoS_2 [5]

Оптико-электронные устройства на основе 2D-материалов имеют перспективы применения благодаря их выдающимся электронным и уникальным оптическим свойствам. Плазмонные наноструктуры играют важную роль в приемниках оптических

сигналов для преобразования энергии фотонов (от диапазона ультрафиолетового и до ближнего инфракрасного излучения) в электрический ток.

Спин-вентильное устройство. Для спинтроники, использующей в качестве средства управления информацией спин электрона, 2D-материалы также представляют существенный интерес в плане создания новых элементов памяти и логических устройств. Таким примером, в котором в качестве проводящего управляемого канала используется слой пленки MoS₂ (толщиной шесть молекулярных плоскостей), является спин-вентильное устройство [6].

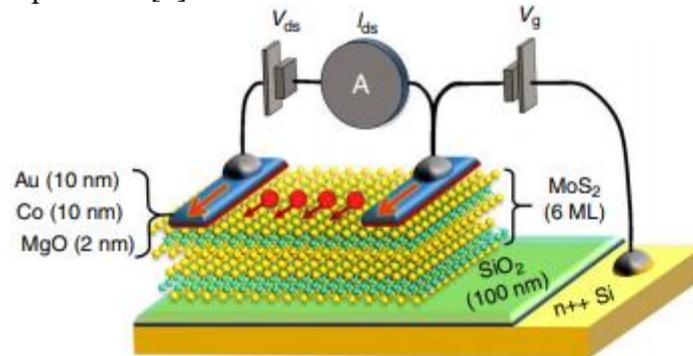


Рис. 3. Схема спин-вентильного устройства [6]

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

Для проведения АСМ-исследований в работе использовались 6 образцов тонких пленок MoS₂, полученных на вакуумной технологической установке кафедры МТ-11 «Электронные технологии в машиностроении» МГТУ имени Н.Э.Баумана. В качестве подложек использовались образцы кремниевых пластин с шероховатостью поверхности менее 3 нм. Нанесение пленок выполнялось методом магнетронного распыления мишени MoS₂ диаметром 75 мм и чистотой 99.9 % на режиме постоянного тока. Режимы нанесения тонких пленок приведены в таблице 1.

Таблица 1. Режимы проведения процессов осаждения пленок MoS₂

№ образца	Т _{подложки} , С°	Мощность на магнетроне, Вт	Давление, Па	Время нанесения, сек	Расстояние катод-подложка, мм	Ток, А
1	200	22	5×10^{-1}	20	100	0,05
2	200	22	5×10^{-1}	30	100	0,05
3	250	30	9×10^{-1}	60	50	0,10
4	200	30	4.5×10^{-1}	1800	50	0,10
5	250	30	1	2700	50	0,10
6	300	30	6×10^{-1}	3600	50	0,10

Для исследования полученных образцов использовался метод атомно-силовой микроскопии. Образцы устанавливались в металлический держатель, а затем для каждого образца была случайным образом выбрана и просканирована область поверхности пленки размером $5 \times 5 \text{ мкм}^2$ на частоте сканирования 0.5 Гц. С помощью программного обеспечения IA-P9 были получены статистические параметры шероховатости и структуры поверхности.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На рисунке 4 приведены АСМ-изображения поверхности исходной подложки кремния (а) и поверхности пленки MoS₂ образца №2, нанесенной за 30 секунд (б).

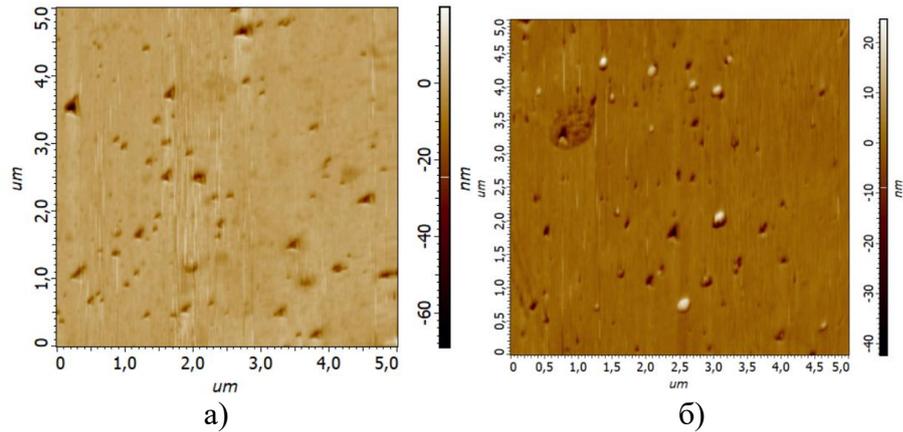
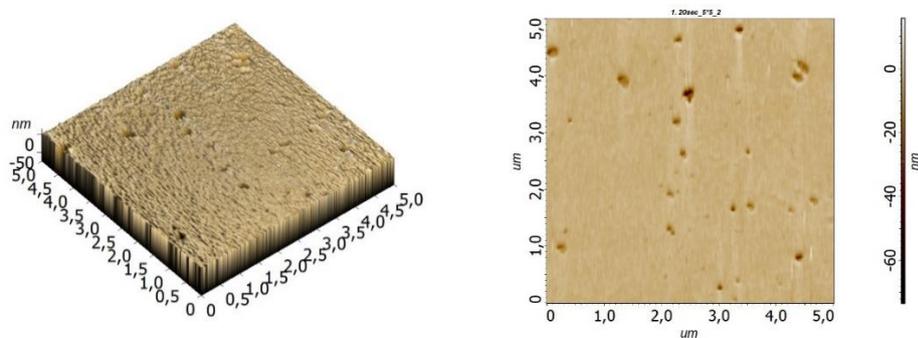


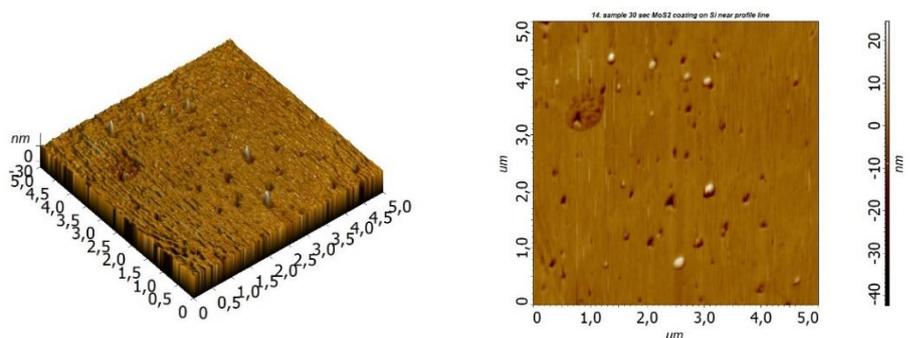
Рис. 4. Изображения топографии кремниевой подложки (а) и образца пленки MoS₂, полученной за 30 сек.

Изображения свидетельствуют о том, что пленка полностью повторяет рельеф подложки, и, в основном, пленка гладкая. На поверхности подложки присутствует большое число пор. Шероховатость подложки и пленки составляют, соответственно, 1.634 нм и 1.21 нм. Эти результаты и изображения топографии поверхностей образцов показывают заметное сглаживание поверхности после нанесения пленки.

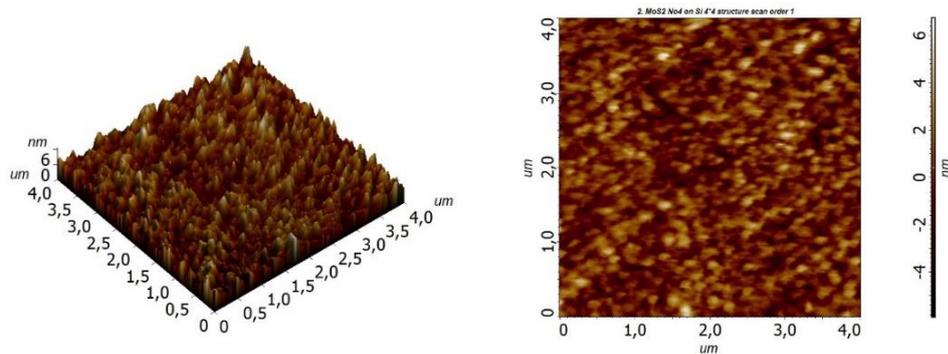
По результатам АСМ исследований различных участков поверхности шести образцов с пленками MoS₂ можно отметить следующие характерные особенности (рисунок 5): на поверхности образцов №1 и №2 (рисунки 5а,5б) формируется сплошная пленка, повторяющая контуры поверхности. Сканы образцов пленок, полученных при большем времени осаждения, и имеющих, соответственно, большую толщину представлены на рисунках 5в-5е. Поверхность пленок состоит из зерен различных размеров. Зерна вытянуты преимущественно в одном направлении. Для образца №4 зерна имеют почти округлую форму.



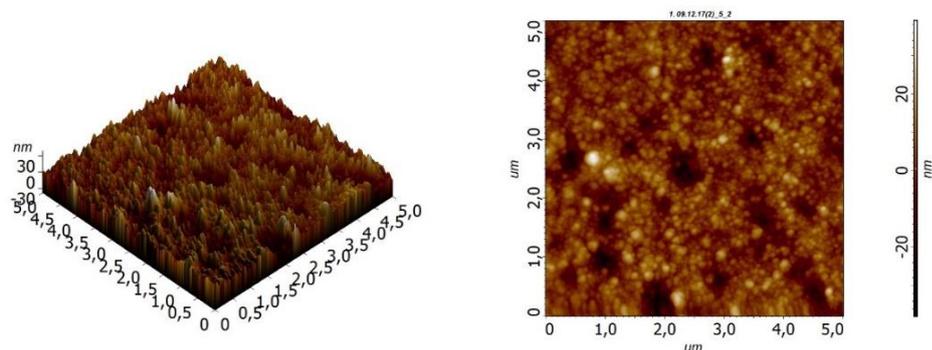
а) №1, MoS₂ on Si, толщина 7 нм



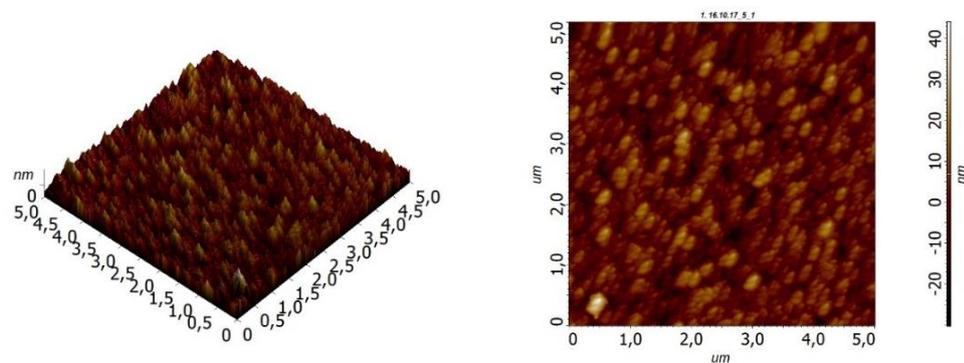
б) №2, MoS₂ on Si, толщина 13 нм



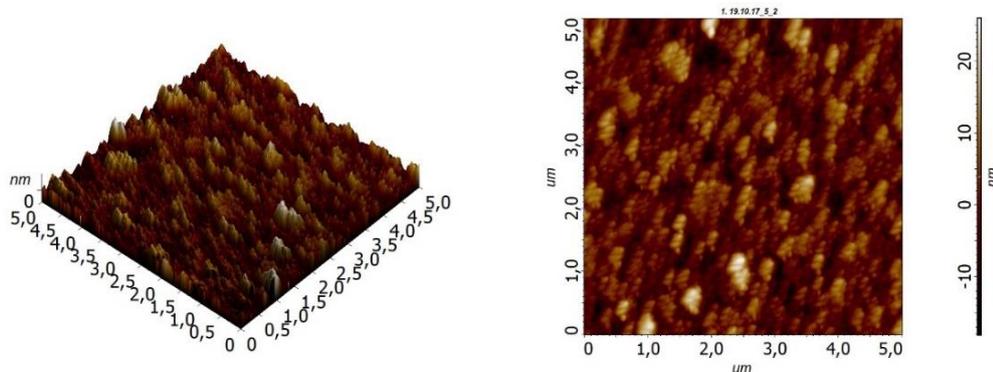
в) №3, MoS₂ on Si, толщина 72 нм



г) №4, MoS₂ on Si, толщина 333 нм



д) №5, MoS₂ on Si, толщина 485 нм



е) №6, MoS₂ on Si, толщина 510 нм

Рис. 5. АСМ-изображения участков поверхности (площадью 5×5 мкм²) пленок MoS₂ различной толщины

Шероховатость поверхности и средний размер зерен пленок MoS₂ различной толщины представлены в таблице 2.

Таблица 2. Шероховатость поверхности и средний размер зерен тонких пленок MoS₂

Образец	Время осаждения, сек	Толщина, нм	Средняя арифметическая шероховатость, Ra, нм	Средний размер зерна, нм	Коэффициент асимметрии Rsk
1	20	7	1.099	46.7	-7.278
2	30	13	1.210	47.7	-2.805
3	60	72	1.360	70	0.123
4	1800	333	6.338	126	-0.321
5	2700	485	5.992	103	0.294
6	3600	510	4.615	128	0.491

На поверхностях тонких пленок (№1, №2, №3) не наблюдается значительной шероховатости. При увеличении времени нанесения, для более толстых пленок (толщиной более 300 нм), шероховатость существенно возрастает.

Наименьшее значение наиболее вероятного размера зерен (~50 нм) имеют пленки MoS₂, нанесенные в течение 20-30 секунд (образцы №1, №2). При повышении времени нанесения размер зерен увеличивается (~100 нм), и также увеличивается шероховатость поверхности, обусловленная наличием крупных агломератов зерен.

Как известно, образование пленки MoS₂ на поверхности подложки начинается с процесса образования зародышей. На начальных стадиях роста пленки MoS₂ образуются отдельные «островки», далее происходит образование непрерывного слоя.

Поскольку коэффициент асимметрии структуры Rsk отличается от нуля, то можно говорить о неравномерном распределении кристаллитов относительно центра исследуемого участка. Стоит отметить, что для образцов пленок №1 и 2 характерны достаточно резкие изменения коэффициента асимметрии, что свидетельствует о значительной разнице в распределении кристаллитов. А для образцов более толстых пленок наблюдается почти равномерное распределение кристаллитов.

На основании проведенного анализа можно сделать вывод о перспективности использования дисульфида молибдена в наноэлектронике, плазмонике, спинтронике и др. Как показали результаты работы, структурные особенности пленок зависят от времени нанесения. С увеличением времени нанесения толщина, шероховатость и средний размер зерен пленок MoS₂ на кремнии увеличивается.

Литература

1. Eugene S. Kadantsev, Pawel Hawrylakb. Electronic structure of a single MoS₂ monolayer// Solid State Communications, 2012. Vol.152, pp.909-913.
2. Qing Hua Wang, Kourosh Kalantar-Zadeh, Electronics and optoelectronics of two-dimensional transition metal dichalcogenides //Nat. Nanotechnol.Vol.7, pp.699712.
3. А.И.Беликов, Ч.З.Пьо. Перспективы применения тонких пленок MoS₂ в области наноэлектроники // INTERMATIC – 2016, часть 2.
4. Sunkook Kim, Aniruddha Konar. High-mobility and low-power thin-film transistors based on multilayer MoS₂ crystals //Nature communications, 2012
5. Yu Li, Ziwei Li, Cheng Chi. Plasmonics of 2D Nanomaterials: Properties and Applications// Advanced science, Volume 4, Issue 8, August 2017, 1600430.
6. Shiheng Liang, Huaiwen Yang. Electrical spin injection and detection in molybdenum disulfide multilayer channel //Nature communications 8, 14947 (2017).