

ИССЛЕДОВАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК УЛЬТРАТОНКИХ ПЛЁНОК MoS₂ ДЛЯ НАНОЭЛЕКТРОНИКИ

Ким Максим Евгеньевич⁽¹⁾, Арестакесян Сирануш Кареновна⁽²⁾,

*Студент 3 курса бакалавриата⁽¹⁾, магистр 1 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

Дисульфиды молибдена (MoS₂) и вольфрама (WS₂) относятся к группе дихалькогенидов переходных металлов (ДПМ), имеют подобную графиту слоистую структуру, обладают полупроводниковыми свойствами и в последние годы являются объектом интенсивных исследований.

Дисульфид молибдена является одним из наиболее изучаемых перспективных материалов для нанoeлектронных и оптоэлектронных устройств благодаря своим уникальным электронным, механическим, и оптическим свойствам. Объемный кристалл дисульфида молибдена является полупроводником с непрямой запрещенной зоной равной 1.24 эВ. Однако при уменьшении количества монослоев MoS₂ ширина запрещенной зоны увеличивается. Кроме того, подвижность носителей заряда в образце MoS₂ высока и составляет от 200 до 500 см²·В⁻¹·с⁻¹ [1].

В настоящее время тонкие пленки дисульфида молибдена используются в прототипах таких устройств, как: ячейки флеш-памяти, полевые транзисторы, преобразователи энергии и фотодетекторы.

ПРИМЕНЕНИЕ ТОНКИХ ПЛЕНОК MoS₂ В ЭЛЕКТРОНИКЕ

Полевые транзисторы на основе MoS₂. Двумерные полупроводниковые материалы обладают высокой подвижностью и высоким соотношением токов в открытом и закрытом состояниях по сравнению с кремнием, что делает их перспективными в качестве материала для полевых транзисторов.

Первая реализация полевого транзистора с верхним затвором и каналом на основе монослоя MoS₂ показана на рисунке 1. При использовании оксида гафния (HfO₂) в качестве подзатворного диэлектрика, подвижность носителей заряда в такой конструкции достигает 200 см²·В⁻¹·с⁻¹ при комнатной температуре, а соотношение токов в открытом и закрытом состояниях, составляет рекордное значение – 10¹⁰ [2].

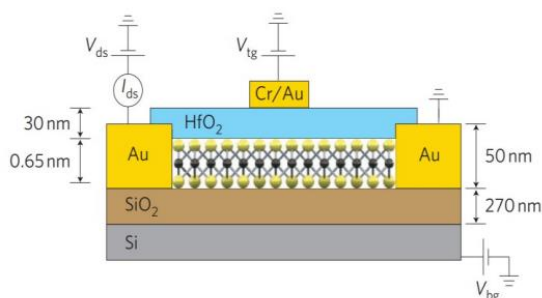


Рисунок 1 - Схематическая иллюстрация устройства полевого транзистора на основе монослоя MoS₂ с HfO₂ в качестве подзатворного диэлектрика

Фототранзисторы на основе MoS₂. Фототранзистор, изготовленный на однослойном MoS₂ (рисунок 2), показывает заметный фототок при падающем свете с длинами волн менее 670 нм или с энергией фотонов, превышающей ширину запрещенной зоны прямого перехода (1.83 эВ). Устройство имеет короткое время переключения ≈ 50 мс и высокую светочувствительность ≈ 1 мА / Вт [3].

Существенное влияние на оптическую ПЗЗ оказывает толщина пленки MoS₂, которая значительно увеличивается при достижении толщины монослоя.

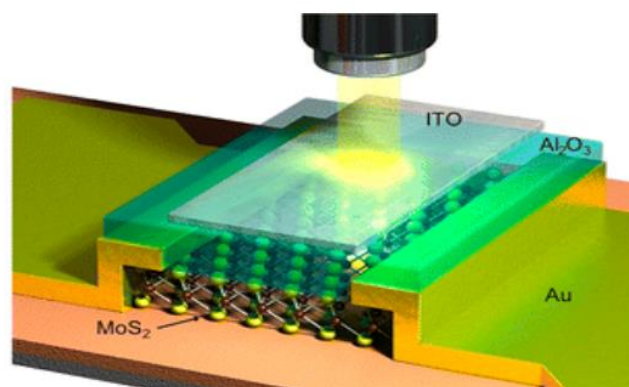


Рисунок 2 - Иллюстрация монослойного MoS₂-фототранзистора с высокоэффективным диэлектриком затвора Al₂O₃ и верхним затвором ITO

Устройства наноплазмоники на основе пленок WS₂. Одним из устройств биосенсорики на основе WS₂ являются устройства (рисунок 3) на эффекте поверхностного плазмонного резонанса SPR (Surface Plasmon Resonance).

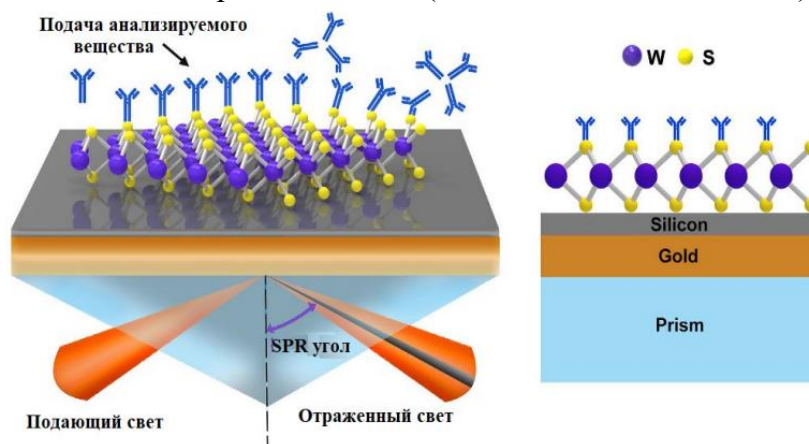


Рисунок 3 - Принципиальная схема биосенсора на поверхностном плазмонном резонансе, усиленном кремнием - WS₂ / нанолитами

В биосенсоре SPR предлагается использовать дисульфид молибдена в качестве основного элемента. Все параметры качества предлагаемого биосенсора SPR для моно и двухслойного MoS₂ выше по сравнению с сенсором на основе графена и традиционным биосенсором SPR. Чувствительность биосенсора MoS₂ сильно зависит от эффектов рассеяния на поверхности пленки и границах зерен плазмонного материала. Для повышения качества необходимо снижение шероховатости пленки, уменьшение отклонений по толщине [4].

Также эффект поверхностного плазмонного резонанса используется для улучшения различных источников света, например, наноразмерных источников света или однофотонных источников. Для однофотонных источников показано, что уменьшение среднегеометрической шероховатости пленки до значений меньше 0.5 нм

позволяет в разы повысить яркость устройства. Для данных устройств требуемая толщина пленок варьируется в диапазоне от 1-100 нм.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

Для исследования возможностей получения тонких пленок MoS_2 методом магнетронного нанесения в вакууме были подготовлены образцы пленок на подложках при разных температурах. В качестве подложек использовались фрагменты полупроводниковых пластин монокристаллического кремния ориентации (100) и (111) размером примерно $15 \times 15 \text{ мм}^2$ с шероховатостью поверхности менее 3 нм. Внешний вид подложек приведён на рисунке 4.

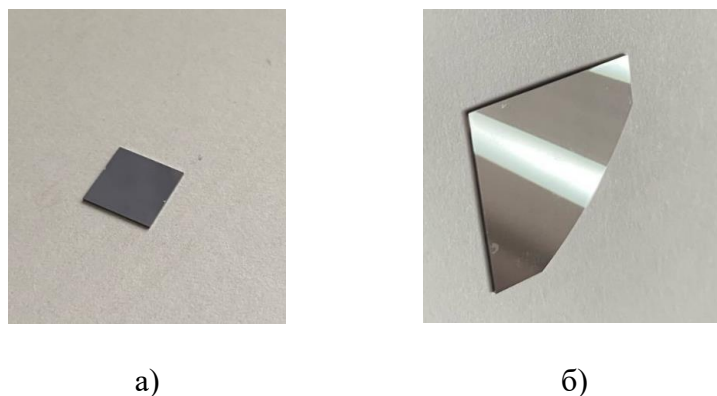


Рисунок 4 - Внешний вид исходных подложек: а) Si (100); б) Si (111)

Перед размещением подложек в технологической камере установки магнетронного нанесения тонких пленок, выполнялась жидкостная очистка их поверхности от загрязнений в ультразвуковой ванне последовательно в щелочном растворе и в этиловом спирте. На заключительной стадии жидкостной очистки подложек осуществлялась их промывка в ультразвуковой ванне (на частоте 22 кГц) в ацетоне ОСЧ 9-5 в течение 10 мин; затем в этиловом спирте в течение 10 мин.

Конечной стадией очистки, после установки образцов в технологической камере, являлась обработка их поверхности потоком ионов из автономного источника ионов с холодным катодом перед операцией нанесения покрытия с целью распыления легких элементов, сорбированных газов, а также активации поверхности.

Образцы были подготовлены на вакуумной технологической установке «BALZERS 350G-MT11» кафедры МТ-11 «Электронные технологии в машиностроении» МГТУ имени Н.Э.Баумана. Данная лабораторная установка предназначена для нанесения тонких пленок методами магнетронного распыления мишени MoS_2 при различных режимах. В таблице 1 приведены режимы проведения процессов нанесения.

Таблица 1. Режимы проведения процессов нанесения пленок MoS_2

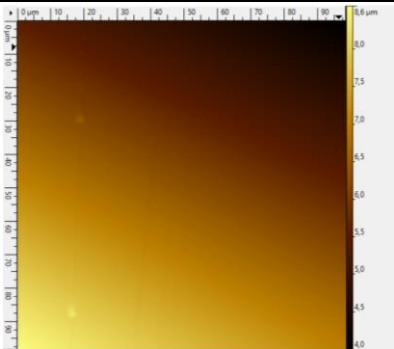
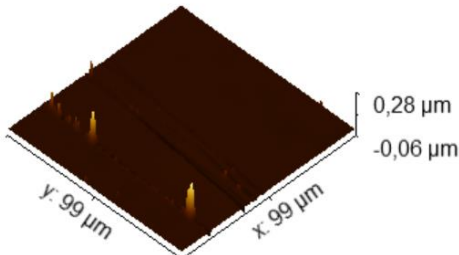
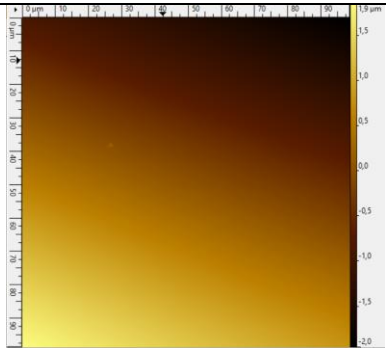
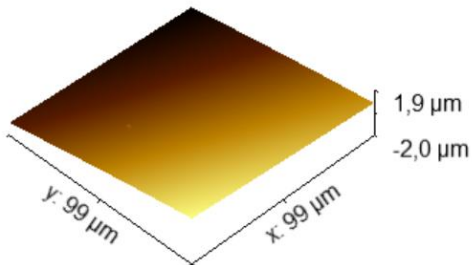
№ образца	Тип подложки	$T_{\text{подложки}}, \text{C}^\circ$	Мощность на магнетроне, Вт	Давление, Па	Время нанесения, сек	Расстояние катод-подложка, мм	Ток, А
1	Si(100)	0	20	5×10^{-1}	10	110	0,05
2	Si(100)	220	20	5×10^{-1}	20	110	0,05
3	Si(111)	0	20	5×10^{-1}	10	110	0,05
4	Si(111)	220	20	5×10^{-1}	20	110	0,05

Для анализа поверхности полученных образцов пленок 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 $20 \times 20 \text{ мкм}^2$ на частоте 0.5 Гц в полуконтактном режиме сканирования. Исследование шероховатости ультратонких пленок проводилось на атомно-силовом микроскопе Aist-NT SmartSPM™-1000. С помощью программного обеспечения были получены статистические параметры шероховатости и морфологии поверхности.

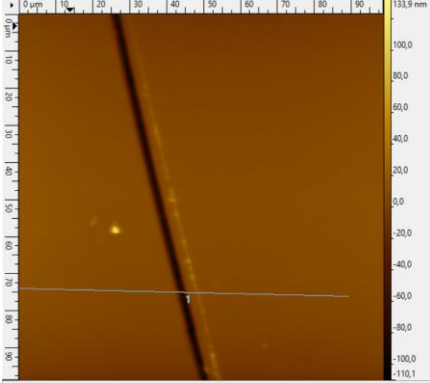
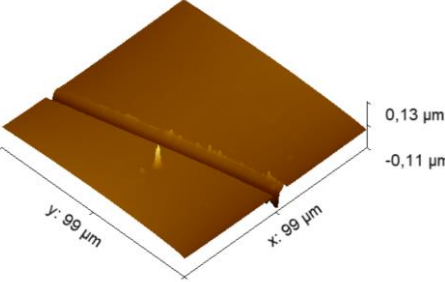
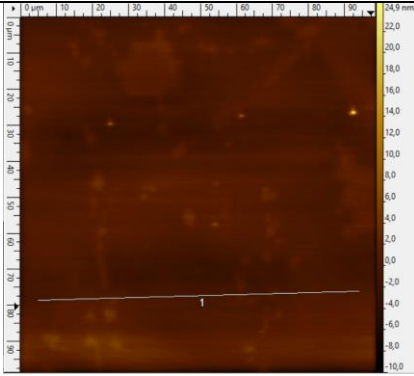
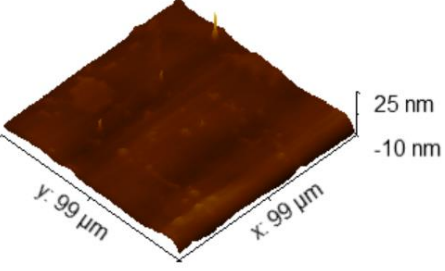
РЕЗУЛЬТАТЫ И ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В таблице 2 приведены результаты АСМ-сканирования поверхности образцов.

Таблица 2 – Результаты исследования образцов.

Образец №1	
АСМ-скан	3D-модель поверхности
	
<p>Средняя шероховатость: 0,12 нм Среднеквадратичная шероховатость: 0,15 нм Максимальная высота шероховатости: 1,0138 нм Максимальная глубина впадины шероховатости: 0,48 нм</p>	
Образец №2	
АСМ-скан	3D-модель поверхности
	
<p>Средняя шероховатость: 0,75 нм Среднеквадратичная шероховатость: 1,12 нм Максимальная высота шероховатости: 12,62 нм Максимальная глубина впадины шероховатости: 5,91 нм</p>	

Продолжение таблицы 2.

Образец №3	
АСМ-скан	3D-модель поверхности
	
<p>Средняя шероховатость: 0,18 нм Среднеквадратичная шероховатость: 0,25 нм Максимальная высота шероховатости: 2,053 нм Максимальная глубина впадины шероховатости: 0,74 нм</p>	
Образец №4	
АСМ-скан	3D-модель поверхности
	
<p>Средняя шероховатость: 0,18 нм Среднеквадратичная шероховатость: 0,25 нм Максимальная высота шероховатости: 1,608 нм Максимальная глубина впадины шероховатости: 0,68 нм</p>	

По результатам проведенных исследований можно сделать следующие выводы: пленки MoS₂ на подложках кремния обладают высокой равномерностью. На 1 и 3 образцах присутствуют небольшие пики, которые могут быть связаны с принесенными загрязнениями. Шероховатость пленок дисульфида молибдена мало отличается от шероховатости самой подложки. На кремниевой подложке ориентации (100) при увеличении времени осаждения существенно увеличивается шероховатость пленки. На образце №4 наблюдаются небольшие выступающие зерна или островки на поверхности, что, вероятно, свидетельствует о возможном влиянии кристаллографической ориентации подложки на механизм роста пленки MoS₂.

На основании проведенного анализа можно сделать вывод о перспективности использования тонких пленок дисульфида молибдена в наноэлектронике, наноплазмонике и других применениях. Как показали результаты работы, структурные особенности пленок зависят от времени нанесения и кристаллографической ориентации подложки. С увеличением времени нанесения шероховатость пленок MoS₂ на кремнии увеличивается.

Литература

1. А.И.Беликов, Ч.З.Пьо. Перспективы применения тонких пленок MoS₂ в области наноэлектроники // INTERMATIC – 2016, часть 1.
2. Single layer MoS₂ transistors / B. Radisavljevic [et al.] // Nature nanotech. 2011. № 6. P.147–150.
3. MoS₂ nanosheet phototransistors with thickness modulated optical energy gap / H. S. Lee [et al.] // Nano letters. 2012. № 12. P. 3695–3700
4. Maurya J. B., Prajapati Y. K., Tripathi R. Effect of molybdenum disulfide layer on surface plasmon resonance biosensor for the detection of bacteria // Silicon. 2018. № 10. P. 245–25