

УДК 539.23, 621.382

**ИЗУЧЕНИЕ СТРОЕНИЯ И ИССЛЕДОВАНИЕ СВОЙСТВ ТОНКИХ ПЛЕНОК
MoS₂**

Тайгужинова Айша Нурлановна
Студент 1 курса,
кафедра «Электронные технологии в машиностроении»
Московский государственный технический университет

Научный руководитель: А. И. Беликов,
Кандидат наук, доцент кафедры "Электронные технологии в машиностроении"

Дисульфид молибдена (MoS₂) является слоистым материалом класса переходных дихалькогенидов, обладающим выраженной анизотропией физических и химических свойств. Актуальность исследования тонких плёнок MoS₂ обусловлена их применением в условиях вакуума, где традиционные смазочные материалы теряют эффективность вследствие испарения и химической нестабильности. Благодаря слабым ван-дер-ваальсовым взаимодействиям и ковалентный характером между слоями обеспечивается лёгкость сдвига, что приводит к низкому коэффициенту трения и высокой износостойкости [1]. В последние годы интерес к MoS₂ возрос в связи с развитием нанoeлектроники и сенсорных систем. MoS₂ обладает запрещённой зоной, что позволяет использовать его в качестве активного элемента в транзисторах и фоточувствительных устройствах [2]. Основные задачи исследований связаны с контролем структуры, фазового состава, дефектности и стабильности свойств плёнок.

Кристаллическая структура MoS₂ представляет собой слоистые пакеты типа S–Mo–S, в которых атом молибдена находится в тригонально-призматической координации. Наиболее устойчивой является гексагональная 2H-фаза с полупроводниковыми свойствами, тогда как 1T-фаза характеризуется металлической проводимостью [3]. Электронная структура зависит от толщины: в объёмном состоянии MoS₂ является непрямозонным полупроводником, а при уменьшении числа слоёв наблюдается переход к прямозонному состоянию с шириной запрещённой зоны около 1,8 эВ [2]. Существенное влияние на свойства оказывают дефекты структуры и ориентация слоёв.

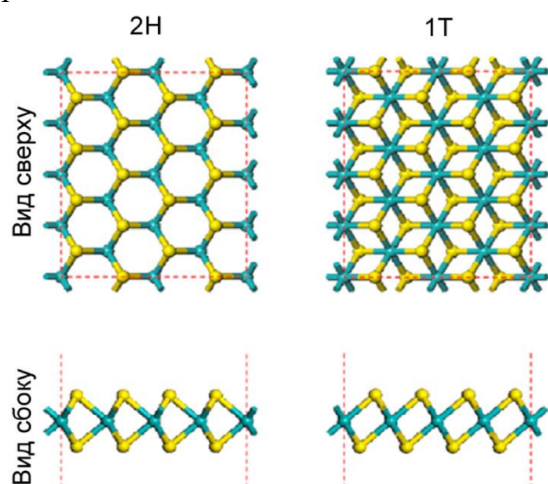


Рис. 1. Структура слоя MoS₂ гексагональная 2H-фаза и октаэдрическая 1T-фаза [4]

Получение тонких плёнок MoS₂ осуществляется физическими и химическими методами: PVD (Physical Vapor Deposition), CVD (Chemical Vapor Deposition) и ALD (Atomic Layer Deposition). Тонкие плёнки с полупроводниковыми электронными свойствами получают преимущественно методом магнетронного распыления (PVD), обеспечивающим контроль состава и толщины покрытия. Осаждение проводится в атмосфере инертного газа (Ar) при давлении порядка 0,3–1 Па, мощности разряда 50–150 Вт и температуре подложки 300–500 °С; время осаждения составляет 30–90 мин, что позволяет формировать плёнки толщиной десятки–сотни нанометров [1]. Метод CVD реализуется при температурах 650–900 °С за счёт взаимодействия прекурсоров молибдена и серы, обеспечивая формирование более кристаллических слоёв с упорядоченной структурой [2]. Метод ALD основан на чередующихся самоограничивающихся реакциях и применяется при температурах 200–400 °С, позволяя получать ультратонкие плёнки с высокой однородностью и контролем толщины на уровне отдельных слоёв [5].

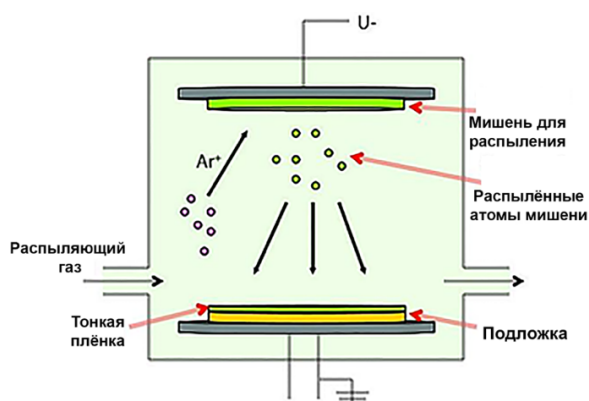


Рис. 2. Схема PVD-процессов на основе ионного распыления мишени. [6]

Измерение электрического сопротивления плёнок проводится четырёхзондовым методом, позволяющим исключить влияние контактного сопротивления. В данной методике ток пропускается через крайние зонды, а падение напряжения регистрируется на внутренних, что обеспечивает более точное определение удельного сопротивления. Исследуемые плёнки MoS₂, полученные методом магнетронного распыления (рис. 2) на подложках Si/SiO₂ при температуре около 400 °С и давлении аргона ~0,5 Па, имели толщину порядка 100 нм. Измерения показали, что удельное сопротивление плёнок находится в диапазоне 10⁻²–10⁰ Ом·см, что характерно для полупроводникового состояния [5]. Уменьшение сопротивления при повышении температуры осаждения связано с ростом кристалличности и уменьшением концентрации дефектов.

Литература

1. *Spalvins T.* Lubrication with sputtered MoS₂ films // Journal of Vacuum Science & Technology A.—1987.
2. *Radisavljevic B.* et al. Single-layer MoS₂ transistors // Nat. Nanotechnol. — 2011.
3. *Voiry D.* et al. Phase engineering of transition metal dichalcogenides // Chem. Soc. Rev. — 2015.
4. *Головешкин А.С.* Слоистые соединения дисульфида молибдена с азотсодержащими органическими молекулами: строение и электрокаталитические свойства. Дисс. — 2020.
5. *Chhowalla M.* et al. Chemistry of two-dimensional layered transition metal dichalcogenides // Nat. Chem. — 2013.
6. *Critchley L.* Nano Thin Film Deposition – How Does it Work? // SERNIA. — 2020.