

УДК 539.23, 621.382

СВОЙСТВА, ПРИМЕНЕНИЕ И МЕТОДЫ ПОЛУЧЕНИЯ ПЛЕНОК 2D-MoS₂

Ли Луяо

*Магистр 1 года,**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»*

По мере приближения квантово-размерных эффектов к физическому пределу масштабирования кремниевой КМОП-технологии на первый план выходят фундаментальные ограничения: прямое туннелирование носителей в ультракоротких каналах, флуктуации легирования в атомном масштабе и рассеяние на оборванных связях интерфейса. Это стимулирует поиск альтернативных материалов для реализации парадигм «more than Moore» и «beyond CMOS».

Двумерные полупроводники, удерживающие носителей заряда в канале толщиной менее 1 нм, обеспечивают высокую степень электростатического контроля со стороны затвора и минимизацию нежелательных эффектов короткого канала. Среди них дисульфид молибдена (MoS₂) из семейства дихалькогенидов переходных металлов выделяется как модельная система благодаря контролируемому переходу к прямой запрещенной зоне в монослое, высокой энергии связи экситонов и потенциальной совместимости с существующей полупроводниковой инфраструктурой.

Цель работы — систематизированный анализ физических свойств 2D-MoS₂ в корреляции с методами синтеза, а также оценка стратегий управления его характеристиками для создания функциональных устройств.

Фундаментальные физические свойства и фазовое разнообразие

Электронная структура MoS₂ демонстрирует выраженную зависимость от размерности. Объемный 2H-MoS₂ является полупроводником с непрямой запрещенной зоной ($E_g \approx 1.2$ эВ). При уменьшении толщины до монослоя квантовое ограничение и нарушение межслоевой гибридизации формируют прямую запрещенную зону в К-точке ($E_g \approx 1.8\text{--}2.1$ эВ) [1]. Это индуцирует рост квантовой эффективности фотолюминесценции более чем на четыре порядка, что принципиально для оптоэлектронных применений.

Кристаллическая структура MoS₂ существует в двух основных полиморфных модификациях. Термодинамически стабильная тригонально-призматическая 2H-фаза является полупроводниковой. Октаэдрическая 1T-фаза проявляет металлический характер проводимости [2]. Возможность фазового перехода 2H→1T' открывает перспективу создания омических контактов путем фазовой инженерии.

В кристаллической системе 2D-MoS₂ из-за ослабленного диэлектрического экранирования в двумерном пределе кулоновское взаимодействие резко усиливается, формируя экситоны Ванье-Мотта с аномально высокой энергией связи (сотни мэВ). Это обуславливает доминирование экситонных пиков А и В в оптических спектрах даже при комнатной температуре. Помимо нейтральных экситонов, в спектрах наблюдаются заряженные трионы [1].

Методы синтеза и корреляция с качеством материала

Метод механического отслаивания является простым решением для получения бездефектных монокристаллических монослоев с подвижностью электронов,

приближающейся к теоретическому пределу. Однако его низкая масштабируемость ограничивает применение фундаментальными исследованиями.

Химическое осаждение из газовой фазы (CVD) представляется как устойчивый подход для масштабируемого синтеза. Процесс основан на термическом разложении прекурсоров Mo и S и их поверхностной реакции на подложке. Современные CVD-процессы позволяют получать сплошные монослойные пленки MoS₂ с контролируемой ориентацией на сапфировых пластинах диаметром до 4 дюймов, демонстрируя подвижность до 30–50 см²·В⁻¹·с⁻¹ [3].

Физическое осаждение из газовой фазы (PVD), в частности магнетронное распыление, является альтернативным CVD подходом. К преимуществам относятся: низкие температуры процесса, высокая управляемость и скорости осаждения, совместимость со стандартным оборудованием, контроль стехиометрии. Однако осажденные пленки требуют высокотемпературного отжига в парах серы для рекристаллизации и перехода в полупроводниковую 2H-фазу [4].

Методы управления характеристиками и проблемы интеграции

Электростатическое легирование через затвор из ионной жидкости позволяет индуцировать высокую плотность заряда, смещая уровень Ферми и модулируя экситонные резонансы [4]. Химическое легирование используется для изменения типа проводимости и снижения контактного сопротивления.

Одним из препятствий остается проблема формирования низкоомных омических контактов. Из-за сильного закрепления уровня Ферми дефектами интерфейса контактное сопротивление традиционных металлов с MoS₂ остается высоким. Перспективные стратегии включают: использование полуметаллов (Bi) с низкой плотностью состояний на уровне Ферми; фазовую инженерию контактной области — локальное превращение 2H-фазы в металлическую 1T'-фазу [4]; использование графена в качестве буферного слоя.

Таким образом, двумерный MoS₂ обладает уникальным набором свойств — от фазового полиморфизма до проявляемых экситонных эффектов, — что позиционирует его, как ключевой материал для пост-кремниевой электроники и гибкой оптоэлектроники. Дальнейший прогресс связан с совершенствованием масштабируемых методов синтеза (CVD, магнетронное распыление) и инженерией интерфейсов для снижения контактного сопротивления [3].

Литература

1. Ли Ваньин. Получение ультратонких устройств на основе двумерных слоистых материалов и исследование их характеристик: дис. ... канд. техн. наук. – Хунаньский университет, 2023.
2. Чжан Янкунь. Эпитаксиальный рост пленок дисульфида молибдена большой площади на сапфировой подложке: дис. ... канд. физ.-мат. наук. – Университет Китайской академии наук, 2025.
3. Ли Лу, Чжан Янкунь, Ши Дунся, Чжан Гуаньюй. Получение монослоя дисульфида молибдена и исследование его применения в устройствах // Acta Physica Sinica. – 2022. – Т. 71, № 2.
4. Чжо Зин Пью. Формирование пленок дисульфида молибдена для электроники методом магнетронного распыления стехиометрических мишеней: дис. ... канд. техн. наук. – Москва, 2021.