

УТВЕРЖДАЮ

Проректор ФГБОУ ВО

«НИУ МЭИ»

д.т.н. Драгунов В.К.



87

2019 г.

ОТЗЫВ ВЕДУЩЕЙ ОРГАНИЗАЦИИ

на диссертацию Аль Хайлани Хассан Исмаил Дамбос

«Влияние условий формирования на особенности атомного строения и оптических свойств широкозонных полупроводниковых микро- и наноструктур MoO_3 и MoS_2 », представленную на соискание учёной степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.10 – Физика полупроводников.

Многие трёхмерные (3D) оксиды и халькогениды переходных металлов были получены ещё в 1960-х годах и благодаря своим электронным свойствам уже тогда привлекли определенный многих исследователей. Однако синтез двумерных (2D) материалов этого класса, который начался в первом десятилетии XXI века, привел к взрывному характеру увеличения числа публикаций по этим объектам. На данный момент наиболее перспективными считаются 2D полупроводниковые соединения d-металлов с кислородом и халькогенами, среди которых самым исследуемым является дисульфид молибдена MoS_2 . Получение этих материалов обходится сравнительно недорого. В то же время они проявляют интересные многофункциональные свойства, в них возможны оптические переходы между долинами с изменением спина электронов, а фоточувствительные и каталитические свойства могут находить применение в электронных устройствах отображения, оптических запоминающих устройствах и газовых датчиках.

Именно этими обстоятельствами обусловлены **актуальность, теоретическое и практическое значение** выбранной темы диссертации Аль Хайлани Хассан Исмаил Дамбос, посвященной исследованию влияния технологических условий газотранспортного синтеза на особенности структуры и оптических свойств широкозонных полупроводниковых микро- и наноструктур MoO_3 и MoS_2 .

По результатам анализа диссертационной работы можно сделать вывод о том, что поставленная цель была достигнута, автору в значительной степени, удалось выявить особенности формирования микро- и наноструктурированных образцов триоксидов и дисульфидов молибдена с различными структурно-морфологическими формами и шириной запрещенной зоны.

Задачи исследования, необходимые для достижения поставленной цели решены в полном объеме, а именно:

1. Определены технологические условия и установлены температурные режимы синтеза и составы газотранспортной среды при осаждении из паровой фазы полупроводниковых соединений триоксида молибдена MoO_3 и дисульфида молибдена MoS_2 на различные подложки.
2. Определены механизмы влияния технологических условий газотранспортного осаждения на атомную структуру, морфологию и ширину запрещенной зоны микро- и нанокристаллов MoO_3 и MoS_2 .
3. Установлено влияние температурных режимов и составов газотраспортной среды при получении микрокристаллов MoO_3 , на устойчивость их кристаллической структуры к механическим воздействиям в виде растирания.
4. Исследовано влияние толщины слоев MoS_2 на их морфологию и оптические свойства, идентифицированы мономолекулярные 2D сструктуры методами оптической и рамановской спектроскопии.

Основные результаты работы заключаются в следующем:

- Показано, что при температуре синтеза 800°C состав газотранспортной среды определяет кристаллическую структуру и величину ширины запрещенной зоны микрокристаллов триоксида молибдена MoO_3 , либо основную

орторомбическую модификацию α - MoO_3 ($P6_3/m$) с $E_g = 2.85$ эВ при синтезе в аргон-кислородной среде, либо моноклинную фазу β - MoO_3 ($P2_1/n$) с $E_g=2.68$ эВ при добавлении паров воды к основному газу-носителю аргону.

- Установлена температура газотранспортного синтеза (1100°C), при которой образуются микрокристаллы α - MoO_3 только основной орторомбической модификации $P6_3/m$ даже при наличии паров воды H_2O или азота в газотранспортной среде, со значениями ширины запрещенной зоны 2.68 eV и 2.51 eV соответственно.

- Показано, что микрокристаллы MoO_3 , полученные при температуре 800°C , оказываются более устойчивыми к механическим воздействиям по сравнению с высокотемпературными, и после растирания сохраняют одну исходную однофазную структуру: орторомбическую α -фазу в случае аргон-кислородной газотранспортной среды или моноклинную β -фазу в случае добавления паров воды к основному газу-носителю аргону.

- Установлен интервал температур ($800^\circ\text{C} - 1000^\circ\text{C}$), при котором в процессе формирования сульфидов молибдена при газотранспортном переносе паров серы в горячую зону кварцевого реактора на пластинах молибдена образуются дисульфиды Mo различных модификаций/политипов: гексагональной $P6_3/mmc$ при 800°C и ромбоэдрической (тригональной) $R\bar{3}m$ при 1000°C .

- Показано, что методом газотранспортного синтеза в интервале более низких температур $525 - 600^\circ\text{C}$ на подложке из слюды можно получить мономолекулярный слой MoS_2 , содержащий тригональные домены и обладающий шириной запрещенной зоны 1.84 эВ при прямозонном оптическом переходе с образованием экситонов при комнатной температуре.

- Впервые зарегистрировано в рамановских спектрах минимальное значение частоты моды внутрислойных колебаний E_{2g}^1 377.5 см^{-1} в многослойных образцах MoS_2 , обусловленное их фракталообразной морфологией и нецелочисленной размерностью.

Теоретическая и практическая значимость диссертационной работы заключаются в том, что результаты ее исследований не только расширяют

представления о физической природе процессов формирования микро- и наносистем в различных газотранспортных средах, но и могут быть использованы при разработках технологий и режимов формирования микрокристаллов и низкоразмерных структур, обладающих различной морфологией и регулируемой шириной запрещенной зоны.

Полученные результаты могут быть использованы в учебном процессе при изучении раздела «Физика полупроводников» при подготовке бакалавров, магистрантов, аспирантов и специалистов в области физики полупроводников и нанотехнологий.

Замечания

1. В литературном обзоре диссертации по специальности 01.04.10 - Физика полупроводников представление диаграмм состояния Mo-O и Mo-S , по нашему мнению, является избыточным.
2. Основной характеристикой полученных в разных технологических условиях полупроводниковых микро- и нанокристаллов является ширина запрещенной зоны, однако автор ни в одной из глав не указывает погрешность при определении этой величины у разных образцов MoO_3 и MoS_2 .
3. Выбор объектов исследования проведен вполне обоснованно, однако мотивация выбора подложек в виде металлической фольги молибдена или слюды отсутствует.
4. Недостаточное место занимает обсуждение механизмов уменьшения ширины запрещенной зоны в образцах триоксида молибдена MoO_3 , полученных в различных технологических условиях газотранспортного синтеза.

Заключение о соответствии диссертации требованиям Положения присуждении ученых степеней.

Несмотря на отмеченные недостатки, диссертационная работа Аль Хайлани Хассан Исмаил Дамбос соответствует пункту 9 Положения о присуждении ученых степеней (от 24 сентября 2013 года №842 с изменениями на 2 августа 2016 года), является самостоятельной научно-квалификационной

работой, в которой содержится решение научной задачи, направленной на исследование особенностей формирования структуры и оптических свойств широкозонных полупроводниковых микро- и наноструктур MoO_3 и MoS_2 , что представляет несомненный теоретический и практический интерес для физики полупроводников.

Представленные в диссертационной работе основные результаты и выводы обладают **научной новизной и практической значимостью**, подкреплены как полученными экспериментальными данными, так и сопоставимостью с результатами других работ, в частности, широко представленных самыми последними данными, опубликованными в ведущих зарубежных изданиях.

Работа содержит достаточное количество иллюстраций, что облегчает восприятие результатов по особенностям формирования структуры и оптических свойств широкозонных полупроводниковых микро- и наноструктур MoO_3 и MoS_2 и подтверждает сделанные выводы. Основные научные результаты диссертации были своевременно и в полном объеме опубликованы в 3-х статьях в рецензируемых научных журналах, в том числе в 2-х индексируемых в системах WoS и SCOPUS и докладывались на 3-х Всероссийских конференциях.

В целом, изложенный в диссертационной работе материал, представлен на достаточно хорошем научном уровне, имеет четко выраженную доказательность. Каждая глава завершается выводами, акцентирующими внимание на основных положениях, представленных к защите.


Диссертация представляет самостоятельный труд, дающий полное представление, как о состоянии проблемы физики микро- и наноструктур широкозонных полупроводников со слоистой структурой, так и о научных результатах, полученных автором работы. Структура, содержание и оформление диссертации и автореферата отвечают требованиям нормативных документов, а тема диссертации полностью соответствует выбранной научной специальности. Автореферат в полной мере отражает основное содержание

диссертации.

На основании вышеизложенного полагаем, что Аль Хайлани Хассан Исмаил Дамбос заслуживает присуждения ему ученой степени кандидата физико-математических наук по научной специальности 01.04.10 – Физика полупроводников.

Диссертация Аль Хайлани Хассан Исмаил Дамбос обсуждена на заседании кафедры Электроники и наноэлектроники «12» IV 2019 г. протокол № 10-2019.

Директор Института радиотехники и электроники НИУ «МЭИ»
зав. кафедрой Электроники и наноэлектроники, д.т.н., профессор



Мирошникова Ирина Николаевна

Ученый секретарь кафедры Электроники и нанoeлектроники,

К. Т. Н. ДОЦЕНТ

0041

Сарач Ольга Борисовна

Адрес: 111250, Россия, Москва, Е-250, Красноказарменная улица, дом 14

Тел.: +7 (495) 362-73-09. Эл. почта: universe@mpei.ac.ru