

Программа утверждена на заседании
Ученого совета факультета наук о
материалах МГУ имени М.В.Ломоносова
Протокол № __ от _____ 2022 г.

Рабочая программа дисциплины (модуля)

1. Наименование дисциплины (модуля): **Технологии, материалы и диагностика тонкопленочных устройств.**

Краткая аннотация: Рабочая программа дисциплины разработаны на основе Образовательного стандарта, самостоятельно установленного МГУ имени М.В.Ломоносова (далее – ОС МГУ), утвержденного Приказом № 552 от 23.06.2014 г. по МГУ с учетом изменений в ОС МГУ, внесенных Приказом №831 по МГУ от 31.08.2015 г. (уровень аспирантуры).

2. Уровень высшего образования – подготовка научно-педагогических кадров в аспирантуре

3. Направление подготовки: 04.06.01 Химические науки. Направленности (профили): Неорганическая химия, Химия твердого тела, Электрохимия, Физическая химия, Химия/Физика твердого тела Аналитическая химия, Электродинамика.

4. Место дисциплины (модуля) в структуре ООП: вариативная часть ООП, блок 1 «Дисциплины (модули)».

1. Планируемые результаты обучения по дисциплине, соотнесенные с планируемыми результатами освоения образовательной программы (компетенциями выпускников). Соответствие результатов обучения по данному элементу аспирант ОПОП результатам освоения ОПОП (в форме компетенция – индикатор - ЗУВ) указано в Общей характеристике ОПОП.

Компетенция	Индикатор достижения	Планируемые результаты обучения по дисциплине (модулю)
УК-1 Способность к критическому анализу и оценке современных научных достижений, генерированию новых идей при решении исследовательских и практических задач, в том числе в междисциплинарных областях.	доклад на семинаре	31 (УК-1) Знать: основные современные научные достижения в областях связанных с разработкой и применением тонкопленочных устройств, продемонстрировать на семинарах критический анализ и умение оценивать современные научные достижения, выделять проблемы и понимать их происхождение. Научиться генерировать новые идеи при

		подготовке докладов и в процессе их защиты и дискуссии. У1 (УК-1) Уметь: находить наиболее весомые данные в опубликованных источниках и проводить их анализ, уметь соотнести и использовать эти данные в решении своей исследовательской (практической, образовательной) задачи. Уметь делать выбор в условиях недостатка данных. В1 (УК-1) Владеть: гибким подходом в решении задач, навыками оценки практической выполнимости и сопутствующих рисков в альтернативных путях решения технологической задачи.
ПК-1 Способность самостоятельно проводить научные исследования в области материаловедения тонких пленок и гетероструктур, применять полученные результаты для решения практических задач.	зачет	32 (ПК-1) Знать: основные законы, теоретические модели и современные методы исследований. У2 (ПК-1) Уметь: использовать полученные знания для анализа и сопоставления данных, а также представлять результаты в доступной форме. Уметь работать с современными программами анализа данных. В2 (ПК-1) Владеть: навыками извлекать самое важное из большого объема литературных данных.

УК-4 готовность использовать современные методы и технологии научной коммуникации на государственном и иностранном языках	доклад на семинаре	УЗ (УК-4) Уметь: придумывать, структурировать и представлять небольшие проекты, включая бюджетное планирование. ВЗ (УК-4) Владеть: навыками делать доклады, в том числе на английском языке.
--	--------------------	---

2. Общая трудоёмкость составляет 3 зачётные единицы, продолжительность **108** часов, из которых **48** часов составляет контактная работа студента с преподавателем (28 часов – лекции, 14 часов - семинарские занятия, 2 часа – индивидуальные консультации, 4 часа – финальный контроль успеваемости), **60** часов – самостоятельная работа студента.

3. Входные требования для освоения дисциплины (модуля), предварительные условия.

Дисциплина «Технологии, материалы и диагностика тонкопленочных устройств» базируется на материалах курсов бакалавриата базовая и вариативная часть (химический и физический естественнонаучные блоки) по дисциплинам:

1. модуля «Химия» (неорганическая химия, органическая химия, химия твердого тела);
2. модуля «Общая физика» (электродинамика, физика твердого тела);
3. курсов «Химия твердого тела», «Современные методы анализа неорганических веществ и материалов».

4. Содержание дисциплины, структурированное по темам (разделам) с указанием отведенного на них количества академических часов и виды учебных занятий:

4.1. Структура дисциплины по темам (разделам) с указанием отведенного на них количества академических часов и виды учебных занятий

Наименование и краткое содержание разделов дисциплины	Всего (часы)	В том числе	
		Контактная работа (работа во взаимодействии с преподавателем), часы из них	Самостоятельная работа обучающегося, часы из них

форма промежуточной аттестации по дисциплине		Занятия лекционного типа	Занятия семинарского типа, в т.ч., лабораторные и практические работы	Групповые консультации	Индивидуальные консультации	Учебные занятия, направленные на проведение текущего контроля успеваемости коллоквиумы, практические контрольные занятия и др.)*	Всего	Подготовка к лабораторным занятиям, миниконференциям и пр.	Подготовка докладов, рефератов и т.п.	Всего
Раздел 1. Материалы оптически прозрачных электродов и активных полупроводников	8	8					8			
Текущая аттестация в форме занятия семинарского типа	18		4				4	14		14
Раздел 2. Обзор методов нанесения тонких пленок и создания гетероструктур.	8	8					8			
Текущая аттестация в форме занятия семинарского типа	18		4				4	14		14
Раздел 3. Тонкопленочные устройства в оптоэлектронике (солнечные элементы, фотодиоды, транзисторы, фотодетекторы и др.) и методы их диагностики.	12	12					12			
Текущая аттестация в форме занятия семинарского типа	24		6				6	18		18

Конечная аттестация в форме коллоквиума	20			2		4	6	14		14
Итого	108	28	14	2	-	4	48	60	—	60

4.2. Содержание разделов (тем) дисциплины:

Раздел 1. Материалы оптически прозрачных электродов и активных полупроводников.

Тема 1. Полупроводники, элементы физики и химии твердого тела. Допирование, возникновение электронной и дырочной проводимости. Связь оптических и электрических свойств в полупроводниках. Моделирование свойств в программах свободного доступа. Обзор основных материалов, таких как ZnO, In₂O₃, ITO (indium-tin oxide), IZO (indium-zinc oxide), NiO_x, Cu₂O, Si, Cu(In,Ga)(S,Se)₂, TiO_x, SnO/SnO₂, гибридные перовскиты.

Тема 2. Обзор методов исследования полупроводниковых материалов и тонких пленок: электрические / оптические методы: UPS (УФ-фотоэлектронная спектроскопия) / XPS (рентгеновская фотоэлектронная спектроскопия), SEM (сканирующая электронная микроскопия) / EDX (рентгеноспектральный анализ) / EPMA (электронзондовый микроанализ) / EBSD (дифракция обратно рассеянных электронов) / EELS (спектроскопия характеристических потерь энергии электронами), XRD (методы рентгеновской дифракции), SIMS (масс-спектрометрия на вторичных ионах), рамановская спектроскопия и др.

Раздел 2. Обзор методов нанесения тонких пленок и создания гетероструктур.

Тема 1. Физические методы нанесения тонких пленок оксидов металлов. Общие принципы плазменного разряда и генерации напряжения. Рассмотрение реактивных и неактивных условий магнетронного распыления. Особые подходы: HIPIMS (High Power Impulse Magnetron Sputtering), GFS (Hollow Cathode Gas Flow Sputtering).

Тема 2. Влияние параметров нанесения на свойства пленок на примере TCO материалов. Рассматривается влияние энергии частиц плазмы на микроструктуру пленок. Среди прочего: соотношение плотности и кристалличности, влияние $p(\text{O}_2)$ на эффективность допирования, соотношение с электрическими свойствами.

Тема 3. (семинары) Обзор современных методов структурирования: литографии и печать (ink-jet: струйная, slot-die: печать с щелевой дюзой и др.).

Раздел 3. Тонкопленочные устройства в оптоэлектронике.

Тема 1. Общие сведения из электротехники о полупроводниковых устройствах, I-V (вольтамперометрическая) характеристика. Обзор различных тонкопленочных устройств (солнечные ячейки, светоизлучающие устройства, дисплеи, детекторы и т.д.). Факторы влияющие на эффективность преобразование фотонов в свободные электроны, квантовый выход.

Тема 2. История и обзор различных концепций и материалов солнечных элементов. Рассмотрение факторов влияющих на эффективность преобразования энергии (PCE: Power Conversion Efficiency). Специальные методы характеристики (измерение поверхностной фотоэдс (SPV), времяпролетная фотолюминесценция (TRPL), термография, тестирование деградации эффективности в атмосферной камере и др.) выявить потенциал увеличения PCE и стабильности. Тренировка моделирования структуры солнечной ячейки в программе SCAPS.

5. Учебно-методические материалы для самостоятельной работы по дисциплине (модулю): слайды лекций, рекомендованные книги и статьи в дигитальном (pdf- / djvu-) формате. Слушателям предоставляется программа курса, план занятий и задания для самостоятельной работы. В процессе самостоятельной работы обучающихся возможно использование таких программных средств, как Origin, Rig-VM, 2D-SCAPS.

6. Ресурсное обеспечение:

6.1. Перечень основной и дополнительной литературы:

Основная литература:

1. D. K. Schroder. *Semiconductor Material and Device Characterization*. John Wiley & Sons, Inc., New-York, 1998.
2. K. Mertens, *Photovoltaics: Fundamentals, Technology, and Practice*, Wiley, New-York 2018.
3. M. Ohring, *Materials Science of Thin Films: Deposition & Structure*, Academic Press, 2001.
4. А. Фаренбрух, Р. Бьюб, Солнечные элементы: Теория и эксперимент, Изд-во "Энергоатомиздат", Москва, 1987
5. R. Scheer, H.-W. Schock, *Chalcogenide Photovoltaics: Physics, Technologies, and Thin Film Devices*, Wiley-VCH Verlag GmbH & Co., 2011.
6. David S. Ginley, *Handbook of Transparent Conductors*, Springer, 2011.
7. K. Wasa, *Handbook of Sputter Deposition Technology*, Lehmanns-Media, 2012.
8. А. Я. Глиберман, А. К. Зайцева, Кремниевые солнечные батареи, Гос. Энергетическое Изд-во. Ленинград, 1961.
9. J. Zhu, X. Zhu, H. Liu, *Thin Film Physics and Devices: Fundamental Mechanism, Materials and Applications for Thin Films*, WSPC, 2021.

Дополнительная литература:

1. D. Depla, S. Mahieu, Reactive Sputter Deposition (Springer Series in Materials Science) 2008.
2. A. Palmero and N. Martin, Advanced Strategies in Thin Film Engineering by Magnetron Sputtering, MDPI, 2020.
3. Статьи Bernd Szyszka (TU Berlin), Andreas Klein (TU Darmstadt), Dieter Neher (University Potsdam), Steve Albrecht (HZB), Christian Kaufmann (HZB), Hideo Hosono (Tokyo Institute of Technology), Elvira Fortunato (University NOVA Lisbon), Henry Snaith (Oxford PV), Michael Grätzel (École Polytechnique Fédérale in Lausanne) и др.

6.2. Интернет-ресурсы

1. Доступ к основным мировым on-line библиотекам и базам данных (Web of Science, ScienceDirect, ResearchGate и др.).
 2. Доступ к on-line ресурсам и журналам издательства Elsevier, Springer, MDPI, и др.
 3. База данных ArXiv: <http://xxx.lanl.gov/archive/cond-mat>, поиск по базе: <https://arxiv.org/search/advanced>
 4. Ресурсы российских научных периодических журналов: Успехи физических наук, Письма в ЖЭТФ, ЖЭТФ.
- Со всех компьютеров МГУ организован доступ к полным текстам научных журналов и книг на русском и иностранных языках. Доступ открыт по IP-адресам, логин и пароль не требуются: <http://nbmgu.ru>

7 Материально-техническое обеспечение: специальных требований нет, занятия проводятся онлайн по Zoom или MS Teams.

8 Язык преподавания – русский, слайды на английском, доклады на семинарах будут проводиться так же частично на английском.

9 Лектор:

к.х.н. Муйдинов Руслан Юрьевич

e-mail: [ruslan.muydinov\(at\)tu-berlin.de](mailto:ruslan.muydinov(at)tu-berlin.de), [ruslan.muydinov\(at\)inam.berlin](mailto:ruslan.muydinov(at)inam.berlin)

тел.: +7 (980) 714-80-58

10 Фонд оценочных средств (ФОС, оценочные и методические материалы) для оценивания результатов обучения по дисциплине (модулю).

10.1. *Типовые контрольные задания или иные материалы для проведения текущего контроля успеваемости:*

Опросы по темам лекций.

Раздел 1.

Тема 1. Ориентироваться в зонной теории неорганических кристаллических полупроводников в сравнении с органическими молекулами. Представление об образовании свободных электронов в полупроводниках, умение рассчитывать эффективность допирования. Описать

механизмы рассеяния электронов в твердом теле. Понятие о излучении абсолютно черного тела. Солнечный спектр. Отличия аморфного кремния от кристаллического. Примеры классических неорганических и органических полупроводников. Особенности гибридных перовскитов (стабильность, допирование, влияние на коэффициент абсорбции и ширину запрещенной зоны). Наиболее распространенные прозрачные электроды (допированные оксид цинка и оксид индия), особенности аморфных материалов. Что такое энергетически эффективное покрытие? Чем отличается идеальная и реальная защита от излучения солнца? Какие бывают материалы поглощающие свет? Какие свойства должны иметь эти материалы для обеспечения наиболее эффективной конверсии энергии?

Тема 2. Понятие об электронном газе в твердом теле. Описать модель осциллятора Лорентца (Lorentz) и Друдэ (Drude), релаксатора Друдэ. Измерение электрических свойств и их связь с оптическими свойствами. Что такое Урбах-край (Urbach edge) и сдвиг Бурштайн-Мосса (Burstein-Moss). Основные принципы оптической спектроскопии и эллипсометрии в диапазоне от УФ до ближнего ИК (UV-Vis-NIR). Оптические методы измерения рассеяния светового пучка. Иметь представление об основных методах характеристики тонких пленок (электронная микроскопия, рентгеновская дифракция / рефлектометрия, фотоэлектронная спектроскопия и др.).

Раздел 2.

Тема 1. Насколько тонка тонкая пленка? В чем принципиальная разница между физическими и химическими методами осаждения?

Режимы светящегося разряда в газах. Для чего был разработан принцип магнетронного распыления, перечислить основные преимущества? Какие виды мишеней существуют? Что такое выход процесса распыления, от чего он зависит? Особенности реактивного распыления. Общие принципы модели Торнтона (Thornton) описывающей рост пленок. При каких условиях получают пористые, а при каких – плотные пленки, как это связано с кристалличностью? Как устроены окна с защитой от облучения?

Тема 2. Взаимодействие плазмы с поверхностью вещества. Почему прозрачные электроды могут повреждаться плазмой во время нанесения (plasma damage)? Какие существуют методы избежать или использовать повреждение плазмой? Какие бывают методы анализа плазмы? Какие частицы и с какой энергией бывают в плазме? Представление об импульсной генерации напряжения, преимущества, отличия между однополярными и дипольными режимами.

Раздел 3.

Тема 1. В чем состоят преимущества оксидной электроники? Какие физические явления протекают при функционировании светоизлучающих устройств (LED)? Какие параметры определяют их эффективность и как их измерить? В чем состоят принципы работы следующих технологий дисплеев: с электронно-лучевой трубкой (CRT), жидкокристаллические (LCD), тонкопленочные транзисторы (TFT), органические светоизлучающие устройства (OLED), светоизлучающие устройства с активной матрицей (AMOLED), плазменные панели (PDP)? Описать принципы работы этих технологий. Общие сведения о плазмонике. Принципы фотокатализа, материалы, применение и проблемы.

Тема 2. Почему необходимо находить альтернативные источники энергии и разрабатывать энергосберегающие технологии? Какие есть концепции использования солнечного света в таких технологиях (назвать три-четыре)? Почему имеет смысл разрабатывать

тонкопленочные солнечные панели? Перечислить основные этапы производства тонкопленочных солнечных модулей. Описать физические процессы протекающие в солнечной ячейке. Как измерить скорость рекомбинации электрон-дырочной пары? Что такое экситон? Что такое квантовый выход, как он измеряется, как его можно увеличить? Перечислить факторы определяющие теоретическую эффективность солнечных ячеек с одним и двумя $p-n$ переходами. Представить на примерах. Что такое деградация кремниевых солнечных ячеек по Штеблеру-Вронски?

Для чего текстурируют поверхность прозрачных электродов в тонкопленочных солнечных ячейках? Какие еще поверхности можно и нужно текстурировать и какими методами?

Как определить дефектные области по площади солнечной ячейки?

Благодаря каким технологиям были достигнуты рекордные значения эффективности в tandemных кремниевых-перовскитных и халькогенидно-перовскитных солнечных ячейках?

10.2. Типовые контрольные задания или иные материалы для проведения промежуточной аттестации по дисциплине (модулю)

Темы к семинарам:

Блок 1.

Обзор материалов дырочных проводников. Проблема низкой подвижности свободных зарядов.

Материалы прозрачных электродов с наивысшей подвижностью электронов.

Влияние эпитаксии или текстуры на электрические свойства TCOs.

Общее представление и возможности расчетов на основе Теории Функционала Плотности (DFT calculations) в применении к прозрачным проводящим оксидным (TCO) материалам.

Общие параметры взаимодействия излучения с веществом.

Примеры методов определения элементного состава мультислоев в срезе.

Блок 2.

Способы неdestructивного определения плотности и толщины тонких пленок.

Обзор альтернативных методов получения пленок (на выбор: CVD: химическое осаждение из паровой фазы, thermal/e-beam evaporation: испарение-осаждение термическое / электронным пучком, ALD: нанесение атомарных слоев, spin-coating: нанесение на вращающуюся подложку, ink-jet printing: струйная печать, slot-die coating: нанесение с помощью щелевой дюзы, casting: нанесение под давлением, spray pyrolysis: нанесение методом термического разложения аэрозолей, sol-gel: растворные золь-гель методы, electroplating: электролитическое нанесение и др.).

Специальные методы плазменного напыления (HIPIMS: магнетронное напыление с использованием импульсов высокой мощности, GFS: газопоточное напыление с полым катодом, atmospheric plasma: виды плазменных процессов при атмосферном давлении).

Блок 3.

Технологии текстурирования пленок (classical/e-beam/EUV lithography, laser patterning).
 Транзисторы, принцип работы, применение, история.
 Новые направления технологий передачи сигнала.
 Применение графена в тонкопленочных устройствах.
 Обзор современного развития 2D материалов.
 Применение самоорганизующихся слоев в тонкопленочных устройствах.
 Подходы к увеличению стабильности гибридных перовскитов.
 Особенности применения гибридных перовскитов в детекторах и в светоизлучающих устройствах.

11 Методические материалы для проведения процедур оценивания результатов обучения

Шкала оценивания знаний, умений и навыков является единой для всех дисциплин (приведена в таблице ниже)

ШКАЛА И КРИТЕРИИ ОЦЕНИВАНИЯ РЕЗУЛЬТАТА ОБУЧЕНИЯ по дисциплине (модулю)				
Оценка Результат	незачёт	зачёт	зачёт	зачёт
Знания	Отсутствие базовых знаний	Фрагментарные знания	Общие, но не структурированные знания	Сформированные систематические знания
Умения	Отсутствие умения	В целом успешное, но не систематическое умение	В целом успешное, но содержащее отдельные пробелы умение (допускает неточности непринципиального характера)	Успешное и систематическое умение
Навыки (владения)	Отсутствие навыков	Наличие отдельных навыков	В целом, сформированные навыки, но не в активной форме	Сформированные навыки, применяемые при решении задач

РЕЗУЛЬТАТ ОБУЧЕНИЯ по дисциплине (модулю)	ФОРМА ОЦЕНИВАНИЯ
Знать: В результате изучения дисциплины должно сформироваться представление об особенностях электронных, оптических и электрических свойств полупроводников. Приобретается знание об основных классах светопоглощающих и прозрачных материалов	мероприятия текущего контроля успеваемости, устный опрос на зачете

применяемых в тонкопленочных устройствах. Изучаются методы нанесения, текстурирования и другие технологии применяемые в производстве. Иметь общее представления о методах плазменного напыления. Расширяются знания по разнообразным методам анализа тонких пленок. Дается представление о процессах лежащих в основе работы солнечных ячеек и факторах влияющих на эффективность и стабильность преобразования энергии. Приобретается знание о различных тонкопленочных устройствах и единстве физических явлений лежащих в основе их функционирования.	
Уметь: применять теоретические модели для оценки функциональности и сравнения полупроводниковых материалов. Оценивать применимость того или иного материала по результатам опубликованных или собственных экспериментальных данных. Уметь создавать концепцию экспериментальное исследование для достижения заданной функциональности устройства. Уметь использовать соответствующие программы находящиеся в свободном доступе. Научится находить и видеть наиболее важную информацию в опубликованной литературе, а так же представлять ее в докладе как на русском, так и на английском языках.	мероприятия текущего контроля успеваемости, устный опрос на зачете
Владеть: общим понятийным аппаратом физики и материаловедения тонкопленочных устройств а также сведениями о совместимости материала и метода нанесения соответствующего покрытия. Ориентироваться в многообразии полупроводниковых технологий и понимать проблематику современных технологических исследований. Владеть навыками использования физических моделей описывающих связь между оптическими и электрическими свойствами а также влияние микроструктуры и состава на эти свойства.	мероприятия текущего контроля успеваемости, устный опрос на зачете