

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации  
Федеральное государственное автономное образовательное учреждение  
высшего образования  
«Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»

ИНСТИТУТ ЛАЗЕРНЫХ И ПЛАЗМЕННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ  
КАФЕДРА ФИЗИКИ ТВЕРДОГО ТЕЛА И НАНОСИСТЕМ

ОДОБРЕНО УМС ЛАПЛАЗ

Протокол № 1/08-577

от 29.08.2024 г.

РАБОЧАЯ ПРОГРАММА УЧЕБНОЙ ДИСЦИПЛИНЫ  
ЛАЗЕРНЫЕ И МИКРО-ТЕХНОЛОГИИ

Направление подготовки  
(специальность)

[1] 03.04.01 Прикладные математика и физика

Семестр	Трудоемкость, кред.	Общий объем курса, час.	Лекции, час.	Практич. занятия, час.	Лаборат. работы, час.	В форме практической подготовки/ В	СРС, час.	КСР, час.	Форма(ы) контроля, экс./зач./КР/КП
3	3	108	16	16	0		40	0	Э
Итого	3	108	16	16	0	0	40	0	

## АННОТАЦИЯ

Целью курса является изучение физических основ современной лазерной технологии. Рассматриваются физические процессы взаимодействия лазерного излучения с металлами, полу-проводниками и другими непрозрачными средами, принципы построения лазерных технологиче-ских установок, устройство мощных лазеров. Обсуждаются проблемы и перспективы лазерных технологий в металловедении, микроэлектронике, лазерной химии, контроле технологических процессов и др.

### 1. ЦЕЛИ И ЗАДАЧИ ОСВОЕНИЯ УЧЕБНОЙ ДИСЦИПЛИНЫ

Курс введен в связи с постоянно развивающимся внедрением различных лазерных технологических процессов во все области промышленности и в научные исследования. Курс связывает теоретические знания, полученные студентами при изучении фундаментальных дисциплин, физики твердого тела и квантовой электроники с решением прикладных задач науки и техники. Знание курса обеспечивает глубокое понимание процессов взаимодействия лазерного излучения с веществом, позволяет правильно выбрать тот или иной лазер и сконструировать установку для проведения конкретной технологической операции, способствует скорейшему внедрению теоретических знаний, накопленных выпускниками кафедры в практику.

### 2. МЕСТО УЧЕБНОЙ ДИСЦИПЛИНЫ В СТРУКТУРЕ ООП ВО

Данная дисциплина относится к числу специализирующих и может читаться после курсов физики твердого тела и взаимодействия излучения с веществом, или подобных курсов.

### 3. ФОРМИРУЕМЫЕ КОМПЕТЕНЦИИ И ПЛАНИРУЕМЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ОБУЧЕНИЯ

Универсальные и(или) общепрофессиональные компетенции:

Код и наименование компетенции	Код и наименование индикатора достижения компетенции
--------------------------------	--

Профессиональные компетенции в соответствии с задачами и объектами (областями знаний) профессиональной деятельности:

Задача профессиональной деятельности (ЗПД)	Объект или область знания	Код и наименование профессиональной компетенции; Основание (профессиональный стандарт-ПС, анализ опыта)	Код и наименование индикатора достижения профессиональной компетенции
экспертно-аналитический			
Изучение и анализ научно-технической информации,	Научная и аналитическая информация,	ПК-20.2 [1] - Способен ориентироваться в современных	3-ПК-20.2[1] - последние теоретические и

<p>отечественного и зарубежного опыта по тематике исследования, сбор и обработка научной и аналитической информации с использованием современных программ, средств и методов вычислительной математики, компьютерных и информационных технологий; сбор и обработка научной и аналитической информации с использованием современных программ, средств и методов вычислительной математики, компьютерных и информационных технологий; участие в обобщении полученных данных, формировании выводов, в подготовке научных и аналитических отчетов, публикаций и презентаций результатов научных и аналитических исследований; подготовка данных для составления обзоров, отчетов и научных публикаций, участие во внедрении результатов исследований и разработок.</p>	<p>отечественный и зарубежный опыт по тематике исследования; научные и аналитические отчеты, публикации и презентации по результатам исследований.</p>	<p>экспериментальных достижениях физики конденсированного состояния, в возможностях современных пучковых и лазерных технологий в применении к конкретным методам создания, обработки и исследования различных твердотельных материалов и наноструктур, основных экспериментальных фактах физики сверхпроводимости и техники низких температур, их применениях в экспериментальной технике и промышленности.</p> <p><i>Основание:</i> Профессиональный стандарт: 29.004</p>	<p>экспериментальные достижения физики конденсированного состояния, применения современных сверхпроводящих материалов, фазовых переходов в современных материалах, применения современных сверхпроводящих материалов, возможности современных пучковых и лазерных технологий в применении к конкретным методам создания, обработки и исследования различных твердотельных материалов и наноструктур; У-ПК-20.2[1] - уметь предложить и обосновать схему эксперимента по лазерной обработке материалов, лазерному напылению тонких пленок, исследованию поверхности, твердотельных материалов или наноструктур, для исследования фазовых переходов в современных материалах; В-ПК-20.2[1] - владеть современными экспериментальными данными в области физики взаимодействия излучения оптического диапазона с веществом в конденсированном состоянии, методов исследования структурных и электронных свойств твердых тел</p>
--	--	--	---

инновационный			
Сбор и анализ информационных источников и исходных данных для планирования и разработки исследовательских проектов; подготовка исходных данных для выбора и обоснования научно-технических и организационных решений на основе экономического анализа; участие в разработке и реализации проектов исследовательской и инновационной направленности в команде исполнителей.	Научно-технические и организационные решения.	<p>ПК-4 [1] - Способен находить оптимальные решения при создании продукции с учетом требований качества, стоимости, сроков исполнения, конкурентоспособности и безопасности жизнедеятельности</p> <p><i>Основание:</i> Профессиональный стандарт: 26.003</p>	<p>З-ПК-4[1] - Знать основные методы и принципы нахождения оптимальных решений при создании продукции с учетом требований качества, стоимости, сроков исполнения, конкурентоспособности и безопасности жизнедеятельности. ;</p> <p>У-ПК-4[1] - Уметь находить оптимальные решения при создании и освоении новой продукции и технологии, разрабатывать эффективную стратегию с учетом требований качества, стоимости, сроков исполнения, конкурентоспособности и безопасности жизнедеятельности. ;</p> <p>В-ПК-4[1] - Владеть навыками нахождения оптимальных решений для создания и освоения новой продукции с учетом требований качества, стоимости, сроков исполнения, конкурентоспособности и безопасности жизнедеятельности</p>
Сбор и анализ информационных источников и исходных данных для планирования и разработки исследовательских проектов; подготовка исходных данных для выбора и обоснования научно-технических и организационных решений на основе	Научно-технические и организационные решения.	<p>ПК-5 [1] - Способен применять физические методы теоретического и экспериментального исследования, методы математического анализа и моделирования для постановки задач по развитию, внедрению и коммерциализации новых наукоемких технологий</p> <p><i>Основание:</i></p>	<p>З-ПК-5[1] - Знать физические методы теоретического и экспериментального исследования, методы математического анализа и моделирования, принципы экспертизы продукции для постановки задач по развитию, внедрению и коммерциализации новых наукоемких технологий ;</p>

экономического анализа; участие в разработке и реализации проектов исследовательской и инновационной направленности в команде исполнителей.		Профессиональный стандарт: 26.003	У-ПК-5[1] - Уметь применять физические методы теоретического и экспериментального исследования, методы математического анализа и моделирования для постановки задач по развитию, внедрению и коммерциализации новых наукоемких технологий; В-ПК-5[1] - Владеть навыками теоретического и экспериментального исследования, математического анализа и моделирования для постановки задач по развитию, внедрению и коммерциализации новых наукоемких технологий
организационно-управленческий			
Разработка проектной и рабочей технической документации: плана работ, технического задания и научно-технического отчета; составление технической документации (графиков работ, инструкций, планов, смет, заявок на материалы, оборудование и т.п.), а также установленной отчетности по утвержденным формам; подготовка документации для создания системы менеджмента качества	Техническая документация по проекту, документация для системы менеджмента качества предприятия.	ПК-13 [1] - Способен применять на практике умения и навыки в организации исследовательских и проектных работ, самостоятельно организовывать и проводить научные исследования и внедрять их результаты в качестве члена или руководителя малого коллектива  <i>Основание:</i> Профессиональный стандарт: 26.003	З-ПК-13[1] - Знать основные цели и задачи планирования научно-исследовательской деятельности, основы анализа рисков проекта. ; У-ПК-13[1] - Уметь управлять проектами, планировать научно-исследовательскую деятельность, анализировать риски, управлять командой проекта в области прикладной математики и информационных технологий. ; В-ПК-13[1] - Владеть навыками организации исследовательских и проектных работ, самостоятельно организовывать и проводить научные

предприятия; контроль соответствия выполненных работ требованиям технического задания и соотношения получаемых результатов с известными мировыми разработками и образцами в данной области исследований.			исследования и внедрять их результаты в качестве члена или руководителя малого коллектива.
---	--	--	---

#### 4. СТРУКТУРА И СОДЕРЖАНИЕ УЧЕБНОЙ ДИСЦИПЛИНЫ

Разделы учебной дисциплины, их объем, сроки изучения и формы контроля:

№ п.п	Наименование раздела учебной дисциплины	Недели	Лекции/ Практ. (семинары )/ Лабораторные работы, час.	Обязат. текущий контроль (форма*, неделя)	Максимальный балл за раздел**	Аттестация раздела (форма*, неделя)	Индикаторы освоения компетенции
	<i>3 Семестр</i>						
1	Лазерные технологические процессы	1-8	8/8/0		25	КИ-8	3-ПК-20.2, У-ПК-20.2, В-ПК-20.2, 3-ПК-4, У-ПК-4, В-ПК-4, 3-ПК-5, У-ПК-5, В-ПК-5, 3-ПК-13, У-ПК-13, В-ПК-13
2	Лазерные технологические установки	9-16	8/8/0		25	КИ-16	3-ПК-20.2, У-ПК-20.2, В-ПК-20.2, 3-ПК-4, У-ПК-4, В-ПК-4, 3-ПК-5, У-ПК-5, В-ПК-5, 3-ПК-13, У-ПК-13,

							В-ПК-13
	<i>Итого за 3 Семестр</i>		16/16/0		50		
	<b>Контрольные мероприятия за 3 Семестр</b>				50	Э	3-ПК-4, У-ПК-4, В-ПК-4, 3-ПК-5, У-ПК-5, В-ПК-5, 3-ПК-13, У-ПК-13, В-ПК-13, 3-ПК-20.2, У-ПК-20.2, В-ПК-20.2

\* – сокращенное наименование формы контроля

\*\* – сумма максимальных баллов должна быть равна 100 за семестр, включая зачет и (или) экзамен

Сокращение наименований форм текущего контроля и аттестации разделов:

Обозначение	Полное наименование
КИ	Контроль по итогам
Э	Экзамен

### КАЛЕНДАРНЫЙ ПЛАН

Недели	Темы занятий / Содержание	Лек., час.	Пр./сем., час.	Лаб., час.
	<i>3 Семестр</i>	16	16	0
<b>1-8</b>	<b>Лазерные технологические процессы</b>	8	8	0
1	<b>Введение</b> Классификация лазерных технологических процессов	Всего аудиторных часов		
		1	1	0
		Онлайн		
		0	0	0
2	<b>Физические процессы передачи энергии лазерного излучения металлам при поглощении</b> Физические процессы передачи энергии лазерного излучения металлам при поглощении. Характерные времена энергетической релаксации при взаимодействии лазерного излучения с металлами.	Всего аудиторных часов		
		1	1	0
		Онлайн		
		0	0	0
3	<b>Механизмы поглощения лазерного излучения полупроводниковыми материалами</b> Механизмы поглощения лазерного излучения полупроводниковыми материалами	Всего аудиторных часов		
		1	1	0
		Онлайн		
		0	0	0
4	<b>Поглощающая и отражательная способности металлов</b> Пространственно-временные характеристики лазерного излучения, как источника тепла	Всего аудиторных часов		
		1	1	0
		Онлайн		
		0	0	0
5	<b>Дифференциальное уравнение теплопроводности</b> Дифференциальное уравнение теплопроводности	Всего аудиторных часов		
		1	1	0

	(постановка задачи, начальные и краевые условия для лазерного излучения, как источника тепла). Дифференциальное уравнение теплопроводности (решение в одномерном случае).	Онлайн		
		0	0	0
6	<b>Критические плотности мощности лазерного излучения</b> Характерные скорости нагрева металла при поглощении лазерного излучения. Характерные скорости охлаждения металла при поглощении лазерного излучения. Градиент температуры при нагреве металла лазерным излучением (для решения одномерной задачи). Нелинейные задачи нагрева металла при поглощении лазерного излучения.	Всего аудиторных часов		
		1	1	0
		Онлайн		
		0	0	0
7	<b>Физические свойства лазерной плазмы</b> Физические свойства лазерной плазмы	Всего аудиторных часов		
		1	1	0
		Онлайн		
		0	0	0
8	<b>Методы исследования</b> Физические методы исследования взаимодействия мощного лазерного излучения с веществом	Всего аудиторных часов		
		1	1	0
		Онлайн		
		0	0	0
9-16	<b>Лазерные технологические установки</b>	8	8	0
9	<b>Структурные схемы лазерных технологических установок</b> Структурные схемы лазерных технологических установок. Проблемы фокусировки мощного лазерного излучения. Проекционный способ обработки поверхности лазерным излучением. Оптические абберации. Оптические системы и оптические материалы лазерных технологических установок.	Всего аудиторных часов		
		1	1	0
		Онлайн		
		0	0	0
10	<b>Лазерные технологические установки на основе твердотельных лазеров</b> Лазерные технологические установки на основе твердотельных лазеров. Квантроны. Осветители. Активные элементы твердотельных лазерных технологических установок. Диодная накачка. Волоконные лазеры.	Всего аудиторных часов		
		1	1	0
		Онлайн		
		0	0	0
11	<b>Классификация мощных газовых лазеров</b> К.П.Д. мощных СО2 лазеров. Лазерные технологические установки на основе непрерывных СО2 лазеров с диффузионным охлаждением. Лазерные технологические установки на основе быстропоточных СО2 лазеров с продольной прокачкой. Лазерные технологические установки на основе быстропоточных СО2 лазеров с поперечной прокачкой. Лазерные технологические установки на основе импульсных и импульсно-периодических СО2 лазеров.	Всего аудиторных часов		
		1	1	0
		Онлайн		
		0	0	0
12 - 14	<b>Лазерная технология полупроводников</b> Классификация лазерных технологических процессов в микроэлектронике. Лазерные операции подготовительного уровня. Лазерная очистка поверхности, геттерирование, улучшение свойств поверхности. Лазерные операции основного уровня: получение силицидов, окисление,	Всего аудиторных часов		
		3	3	0
		Онлайн		
		0	0	0

	травление. Лазерные операции основного уровня: импульсный лазерный отжиг, лазерное легирование. Физические модели импульсного лазерного отжига полупроводников. Лазерное напыление тонких пленок. Лазерные операции завершающего уровня: скрайбирование, подгонка. Применение лазеров в технологии монтажа печатных плат.			
15 - 16	<b>Лазерная химия</b> фотофизические и фотохимические процессы. Лазерное разделение изотопов. Разделение изотопов для атомной энергетики.	Всего аудиторных часов		
		2	2	0
		Онлайн		
		0	0	0

Сокращенные наименования онлайн опций:

Обозначение	Полное наименование
ЭК	Электронный курс
ПМ	Полнотекстовый материал
ПЛ	Полнотекстовые лекции
ВМ	Видео-материалы
АМ	Аудио-материалы
Прз	Презентации
Т	Тесты
ЭСМ	Электронные справочные материалы
ИС	Интерактивный сайт

## 5. ОБРАЗОВАТЕЛЬНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

При освоении данной дисциплины основную роль играют аудиторные занятия, а также самостоятельная работа студентов, заключающаяся в выполнении домашнего задания, изучении пройденного материала, подготовке к письменным тестам. Для того чтобы показать современное состояние дисциплины, предусмотрено широкое использование современных научных работ и публикаций по данной теме.

## 6. ФОНД ОЦЕНОЧНЫХ СРЕДСТВ

Фонд оценочных средств по дисциплине обеспечивает проверку освоения планируемых результатов обучения (компетенций и их индикаторов) посредством мероприятий текущего, рубежного и промежуточного контроля по дисциплине.

Связь между формируемыми компетенциями и формами контроля их освоения представлена в следующей таблице:

Компетенция	Индикаторы освоения	Аттестационное мероприятие (КП 1)
ПК-13	З-ПК-13	Э, КИ-8, КИ-16
	У-ПК-13	Э, КИ-8, КИ-16
	В-ПК-13	Э, КИ-8, КИ-16
ПК-20.2	З-ПК-20.2	Э, КИ-8, КИ-16
	У-ПК-20.2	Э, КИ-8, КИ-16
	В-ПК-20.2	Э, КИ-8, КИ-16

ПК-4	З-ПК-4	Э, КИ-8, КИ-16
	У-ПК-4	Э, КИ-8, КИ-16
	В-ПК-4	Э, КИ-8, КИ-16
ПК-5	З-ПК-5	Э, КИ-8, КИ-16
	У-ПК-5	Э, КИ-8, КИ-16
	В-ПК-5	Э, КИ-8, КИ-16

### Шкалы оценки образовательных достижений

Шкала каждого контрольного мероприятия лежит в пределах от 0 до установленного максимального балла включительно. Итоговая аттестация по дисциплине оценивается по 100-балльной шкале и представляет собой сумму баллов, заработанных студентом при выполнении заданий в рамках текущего и промежуточного контроля.

Итоговая оценка выставляется в соответствии со следующей шкалой:

Сумма баллов	Оценка по 4-х балльной шкале	Отметка о зачете	Оценка ECTS
90-100	5 – «отлично»	«Зачтено»	A
85-89	4 – «хорошо»		B
75-84			C
70-74			D
65-69	3 – «удовлетворительно»		E
60-64			
Ниже 60	2 – «неудовлетворительно»	«Не зачтено»	F

Оценка «отлично» соответствует глубокому и прочному освоению материала программы обучающимся, который последовательно, четко и логически стройно излагает свои ответы, умеет тесно увязывать теорию с практикой, использует в ответах материалы монографической литературы.

Оценка «хорошо» соответствует твердым знаниям материала обучающимся, который грамотно и, по существу, излагает свои ответы, не допуская существенных неточностей.

Оценка «удовлетворительно» соответствует базовому уровню освоения материала обучающимся, при котором освоен основной материал, но не усвоены его детали, в ответах присутствуют неточности, недостаточно правильные формулировки, нарушения логической последовательности.

Отметка «зачтено» соответствует, как минимум, базовому уровню освоения материала программы, при котором обучающийся владеет необходимыми знаниями, умениями и навыками, умеет применять теоретические положения для решения типовых практических задач.

Оценку «неудовлетворительно» / отметку «не зачтено» получает обучающийся, который не знает значительной части материала программы, допускает в ответах существенные ошибки, не выполнил все обязательные задания, предусмотренные программой. Как правило, такие обучающиеся не могут продолжить обучение без дополнительных занятий.

## **7. УЧЕБНО-МЕТОДИЧЕСКОЕ И ИНФОРМАЦИОННОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ УЧЕБНОЙ ДИСЦИПЛИНЫ**

### **ОСНОВНАЯ ЛИТЕРАТУРА:**

1. ЭИ E91 Laser Processing of Engineering Materials: Principles, Procedure and Industrial Application : , Ceng , Fimmm John C. Ion , Eur. Ing. , : Elsevier, 2005
2. ЭИ S96 Principles of Lasers : , Svelto, Orazio. , Boston, MA: Springer US, 2010
3. 621.38 Л25 Квантовая электроника : курс лекций, Ларкин А.И., Москва: НИЯУ МИФИ, 2015
4. ЭИ Л25 Квантовая электроника : курс лекций, Ларкин А.И., Москва: НИЯУ МИФИ, 2015
5. ЭИ М50 Лазерная технология : , Менушенков А.П., Москва: МИФИ, 2008
6. ЭИ К43 Оптическое детектирование компонентов газовых технологических сред в реальном масштабе времени : монография, Шнырев С.Л., Киреев С.В., Москва: НИЯУ МИФИ, 2014
7. ЭИ О-75 Основы физических процессов в плазме и плазменных установках : учебное пособие для вузов, Жданов С.К. [и др.], Москва: МИФИ, 2007
8. 621.37 М50 Физические основы лазерной технологии : учебное пособие, Менушенков А.П., Неволин В.Н., Петровский В.Н., Москва: НИЯУ МИФИ, 2010
9. ЭИ М50 Физические основы лазерной технологии : учебное пособие для вузов, Менушенков А.П., Неволин В.Н., Петровский В.Н., Москва: НИЯУ МИФИ, 2010

### **ДОПОЛНИТЕЛЬНАЯ ЛИТЕРАТУРА:**

1. 535 М50 Лабораторная работа "Лазерная технология" : , Менушенков А.П., Жиряков Б.М., Петровский В.Н., М.: МИФИ, 2006
2. 533 О-75 Основы физических процессов в плазме и плазменных установках : учебное пособие для вузов, Жданов С.К. [и др.], Москва: МИФИ, 2007
3. 537 К31 Релаксационные колебания в лазерах : , Кащенко С.А., Григорьева Е.В., Москва: Либроком, 2013
4. 533 Ц93 Физические основы плазменной и лазерной технологий : Учеб. пособие, Цыбин А.С., Москва: МИФИ, 2002

### **ПРОГРАММНОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ:**

Специальное программное обеспечение не требуется

### **LMS И ИНТЕРНЕТ-РЕСУРСЫ:**

<https://online.mephi.ru/>

<http://library.mephi.ru/>

## **8. МАТЕРИАЛЬНО-ТЕХНИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ УЧЕБНОЙ ДИСЦИПЛИНЫ**

Специальное материально-техническое обеспечение не требуется

## **9. УЧЕБНО-МЕТОДИЧЕСКИЕ РЕКОМЕНДАЦИИ ДЛЯ СТУДЕНТОВ**

Курс состоит из двух взаимосвязанных частей. Первая часть посвящена изучению физических процессов взаимодействия мощного лазерного излучения с металлами, полупроводниками и другими непрозрачными средами. В этой части студент получает новые знания на базе ранее изученных курсов теоретической физики, квантовой электроники и физики твердого тела. При изучении этой части курса необходимо твердо усвоить основные понятия, характеризующие свойства лазерного излучения: расходимость, когерентность, монохроматичность, временные характеристики, возможность достижения высоких плотностей мощности. Необходимо глубоко понимать процессы передачи энергии от лазерного излучения металлам, полупроводникам и диэлектрикам. Следует досконально разобраться в ограничениях, которые накладывает запрет Паули на взаимодействие свободных электронов в металлах с фотонами, легко оценивать соотношения между характерными энергетическими параметрами, определяющими взаимодействие лазерного излучения с металлами: энергией кванта  $h\nu$ , энергией Ферми  $E_F$  и температурой  $kT$ . Знать характерные частоты электрон-фотонного взаимодействия, электрон-электронной, электрон-фононной и фонон-фононной релаксации. Важно разобраться в типах механизмов поглощения лазерного излучения полупроводниковыми материалами, понимать причины смены механизмов поглощения в полупроводниках под действием лазерного излучения. Следует хорошо изучить постановку задачи уравнения теплопроводности при нагреве металла лазерным излучением в линейном случае, понимать особенности лазерного излучения, как источника тепла, понимать, какие изменения в аналитическое решение задачи вносит учет нелинейностей различных типов. Знать принципиальные схемы установок для экспериментального изучения физических процессов взаимодействия лазерного излучения с веществом.

Вторая часть курса посвящена обсуждению лазерного технологического оборудования и описанию технологических процессов в микроэлектронике и в лазерной химии. Здесь необходимо ознакомиться с основными принципиальными схемами устройства лазерных технологических установок, принципами фокусировки мощного лазерного излучения, методами обработки поверхности в фокальной плоскости и в плоскости изображения, принципами построения проекционных лазерных систем, типами линзовых аббераций. Следует изучить особенности работы мощных лазеров на твердом теле, хорошо понимать отличия лазерных активных элементов с тремя и четырьмя рабочими уровнями причины возникновения эффекта «тепловой линзы». Знать преимущества и недостатки ламповой и диодной накачки, принципы работы волоконного лазера. Необходимо иметь представление об устройстве мощных лазеров на углекислом газе, знать физические причины ограничения мощности лазеров с диффузионным охлаждением и быстропрокачных лазеров. Следует изучить возможности применения лазерного излучения в полу-проводниковой технологии. Необходимо понимать физику таких процессов, как лазерная очистка поверхности, геттерирование, получение силицидов, импульсный лазерный отжиг после ионной имплантации, лазерное легирование, лазерное напыление тонких пленок.

Необходимо глубоко понимать процессы резонансного возбуждения атомов и молекул лазерным излучением. Важно разобраться в механизмах фотохимического и фотофизического процессов лазерного разделения изотопов. Следует понимать, на какой ступени процесса происходит селекция нужного изотопа. Нужно знать, какие из методов лазерного разделения изотопов перспективны для промышленного масштабирования. Необходимо хорошо понимать физические причины преодоления нарушения эквидистантности колебательных уровней вследствие ангармонизма при процессе многофотонной диссоциации молекул. Следует разобраться, какой из методов наиболее подходит для разделения изотопов в атомной энергетике. Нужно понимать, почему метод многофотонной диссоциации молекул, имеющий промышленное значение для разделения изотопов серы неэффективен для разделения изотопов урана. Нужно уметь обосновать энергетическое преимущество лазерного разделения изотопов урана в сравнении с традиционными методами. Следует понимать, как с помощью лазерного излучения можно синтезировать новые соединения и получать особо чистые вещества. Следует иметь представление о развитии направлений использования лазерного излучения в технологических целях

## **10. УЧЕБНО-МЕТОДИЧЕСКИЕ РЕКОМЕНДАЦИИ ДЛЯ ПРЕПОДАВАТЕЛЕЙ**

В первой части курса, посвященной изучению физических процессов взаимодействия мощного лазерного излучения с металлами, полупроводниками и другими непрозрачными средами следует опираться на знания студентов, полученные на базе ранее изученных курсов теоретической физики, квантовой электроники и физики твердого тела. При преподавании этой части курса необходимо дать основные понятия, характеризующие свойства лазерного излучения: расходимость, когерентность, монохроматичность, временные характеристики, возможность достижения высоких плотностей мощности. Необходимо глубоко разъяснить процессы передачи энергии от лазерного излучения металлам, полупроводникам и диэлектрикам. Следует подчеркнуть ограничения, которые накладывает запрет Паули на взаимодействие свободных электронов в металлах с фотонами, дать соотношения между характерными энергетическими параметрами, определяющими взаимодействие лазерного излучения с металлами: энергией кванта  $h\nu$ , энергией Ферми  $E_F$  и температурой  $kT$ , дать определение характерных частот электрон-фотонного взаимодействия, электрон-электронной, электрон-фононной и фонон-фононной релаксации. Важно объяснить студентам отличия различных типов механизмов поглощения лазерного излучения полупроводниковыми материалами, причины смены механизмов поглощения в полупроводниках под действием лазерного излучения. Следует подробно объяснить постановку задачи уравнения теплопроводности при нагреве металла лазерным излучением в линейном случае, особенности лазерного излучения, как источника тепла, изменения в аналитическое решение задачи за счет нелинейностей различных типов. Привести принципиальные схемы установок для экспериментального изучения физических процессов взаимодействия лазерного излучения с веществом.

Во второй части курса основное время посвятить обсуждению лазерного технологического оборудования и описанию технологических процессов в микроэлектронике и в лазерной химии. Здесь необходимо познакомить студентов с основными принципиальными схемами устройства лазерных технологических установок, принципами фокусировки мощного лазерного излучения, методами обработки поверхности в фокальной плоскости и в плоскости

изображения, принципами построения проекционных лазерных систем, типами линзовых аббераций. Следует изложить особенности работы мощных лазеров на твердом теле, отличия лазерных активных элементов с тремя и четырьмя рабочими уровнями причины возникновения эффекта «тепловой линзы», преимущества и недостатки ламповой и диодной накачки, принципы работы волоконного лазера. Необходимо дать представление об устройстве мощных лазеров на углекислом газе, обсудить физические причины ограничения мощности лазеров с диффузионным охлаждением и быстропрокачных лазеров. Следует подробно представить возможности применения лазерного излучения в полупроводниковой технологии. Необходимо подчеркнуть физические особенности таких процессов, как лазерная очистка поверхности, геттерирование, получение силицидов, импульсный лазерный отжиг после ионной имплантации, лазерное легирование, лазерное напыление тонких пленок.

Необходимо понятно изложить процессы резонансного возбуждения атомов и молекул лазерным излучением. Важно подчеркнуть преимущества и недостатки механизмов фотохимического и фотофизического процессов лазерного разделения изотопов. Следует дополнительно обсудить, на какой ступени процесса происходит селекция нужного изотопа, какие из методов лазерного разделения изотопов перспективны для промышленного масштабирования. Необходимо подробно остановиться на физических причинах преодоления нарушения эквидистантности колебательных уровней вследствие ангармонизма при процессе многофотонной диссоциации молекул. Следует дать сравнительный анализ методов и показать, какой из методов наиболее подходит для разделения изотопов в атомной энергетике. Нужно объяснить, почему метод многофотонной диссоциации молекул, имеющий промышленное значение для разделения изотопов серы неэффективен для разделения изотопов урана. Следует обосновать энергетическое преимущество лазерного разделения изотопов урана в сравнении с традиционными методами. Следует продемонстрировать, как с помощью лазерного излучения можно синтезировать новые соединения и получать особо чистые вещества. В завершение курса необходимо дать представление о развитии направлений использования лазерного излучения в технологических целях.

Автор(ы):

Менушенков Алексей Павлович, д.ф.-м.н.,  
профессор