

ИНСТИТУТ ЛАЗЕРНЫХ И ПЛАЗМЕННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ  
КАФЕДРА ФИЗИКИ ТВЕРДОГО ТЕЛА И НАНОСИСТЕМ

ОДОБРЕНО

**РАБОЧАЯ ПРОГРАММА УЧЕБНОЙ ДИСЦИПЛИНЫ**  
ЛАЗЕРНЫЕ 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, экз./зач./КР/КП
3	3	108	16	16	0	40	0	Э
Итого	3	108	16	16	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 технологических 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
инновационный;			
сбор и анализ информационных источников и исходных данных	научно-технические и организационные решения	ПК-4 [1] - Способен находить оптимальные решения при создании продукции с учетом	3-ПК-4[1] - Знать основные методы и принципы нахождения оптимальных решений

<p>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.</p>		<p>требований качества, стоимости, сроков исполнения, конкурентоспособности и безопасности жизнедеятельности</p> <p><i>Основание:</i> Профессиональный стандарт: 06.022</p>	<p>при создании продукции с учетом требований качества, стоимости, сроков исполнения, конкурентоспособности и безопасности жизнедеятельности. ; 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. ; 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>
<p>проведение семинарских и лабораторных занятий со студентами по курсам из области физики конденсированного состояния вещества: физика твёрдого тела, физика полупроводников, наноструктур, низких температур, сверхпроводимости и взаимодействия излучения с веществом; проведение</p>	<p>педагогический</p> <p>занятия по профильным предметам в университете</p>	<p>ПК-22.1 [1] - Способен пользоваться основными теоретическими моделями физики конденсированного состояния вещества, экспериментальными методами исследования структурных и электронных свойств, современными достижениями физики полупроводников и гетероструктур</p> <p><i>Основание:</i> Профессиональный стандарт: 01.003</p>	<p>3-ПК-22.1[1] - знать основные теоретические модели физики конденсированного состояния вещества, современные достижения физики полупроводников и гетероструктур ; У-ПК-22.1[1] - уметь сформулировать теоретическую и математическую модель для задачи физики твердого тела; В-ПК-22.1[1] - владеть экспериментальными методами исследования структурных и</p>

<p>практикумов и лабораторных работ по учебным курсам, связанным с математическим моделированием в физике конденсированного состояния вещества; организация и проведение контрольных и самостоятельных работ, тестирований и других контрольных мероприятий по курсам из области физики конденсированного состояния вещества.</p>			<p>электронных свойств</p>
<p>научно-исследовательский</p>			
<p>проведение научных и аналитических исследований по отдельным разделам (этапам, заданиям) темы (проекта) в рамках предметной области по профилю специализации в соответствии с утвержденными планами и методиками исследований; участие в проведении наблюдений и измерений, выполнении эксперимента и обработке данных с использованием современных теоретических моделей, экспериментальных данных и компьютерных технологий; участие в проведении</p>	<p>запланированные этапы исследования; результаты наблюдений и измерений; физические, математические и компьютерные модели явления; компьютерные программы и алгоритмы для научно-исследовательских и прикладных целей.</p>	<p>ПК-22.2 [1] - Способен ориентироваться в последних теоретических и экспериментальных достижениях физики конденсированного состояния, в возможностях современных пучковых, плазменных и лазерных технологий в применении к конкретным методам создания, обработки и исследования различных твердотельных материалов и наноструктур</p> <p><i>Основание:</i> Профессиональный стандарт: 06.022</p>	<p>3-ПК-22.2[1] - знать последние теоретические и экспериментальные достижения физики конденсированного состояния, возможности современных пучковых, плазменных и лазерных технологий в применении к конкретным методам создания, обработки и исследования различных твердотельных материалов и наноструктур; У-ПК-22.2[1] - уметь предложить схему эксперимента для обработки или исследования твердотельных материалов и наноструктур, и сформулировать соответствующую математическую модель;</p>

<p>теоретических исследований, построении физических, математических и компьютерных моделей изучаемых процессов и явлений, в проведении аналитических исследований в предметной области по профилю специализации, выбор методов и подходов к решению поставленной научной проблемы, формулировка математической модели явления, аналитические и численные расчеты; участие в разработке новых алгоритмов и компьютерных программ для научно-исследовательских и прикладных целей.</p>			<p>В-ПК-22.2[1] - владеть теоретическими моделями взаимодействия излучения с веществом</p>
---	--	--	--

#### 4. СТРУКТУРА И СОДЕРЖАНИЕ УЧЕБНОЙ ДИСЦИПЛИНЫ

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

№ п.п	Наименование раздела учебной дисциплины	Недели	Лекции/ Практик. (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	З-ПК-4, У-ПК-4, В-ПК-4,

							3-ПК-22.1, У-ПК-22.1, В-ПК-22.1, 3-ПК-22.2, У-ПК-22.2, В-ПК-22.2
2	Лазерные технологические установки	9-16	8/8/0		25	КИ-16	3-ПК-4, У-ПК-4, В-ПК-4, 3-ПК-22.1, У-ПК-22.1, В-ПК-22.1, 3-ПК-22.2, У-ПК-22.2, В-ПК-22.2
	<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-22.1, У-ПК-22.1, В-ПК-

							22.1, 3-ПК- 22.2, У- ПК- 22.2, В- ПК- 22.2
--	--	--	--	--	--	--	--

\* – 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 (постановка задачи, начальные и краевые условия для лазерного излучения, как источника тепла). Дифференциальное уравнение теплопроводности (решение в одномерном случае).	Всего аудиторных часов		
		1	1	0
		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 быстропротеочных СО2 лазеров с продольной прокачкой. Лазерные технологические установки на основе быстропротеочных 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, травление. Лазерные операции основного уровня: импульсный лазерный отжиг, лазерное легирование. Физические модели импульсного лазерного отжига полупроводников. Лазерное напыление тонких пленок. Лазерные операции завершающего уровня:	Всего аудиторных часов		
		3	3	0
		Онлайн		
		0	0	0



	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-22.1	З-ПК-22.1	Э, КИ-8, КИ-16
	У-ПК-22.1	Э, КИ-8, КИ-16
	В-ПК-22.1	Э, КИ-8, КИ-16
ПК-22.2	З-ПК-22.2	Э, КИ-8, КИ-16
	У-ПК-22.2	Э, КИ-8, КИ-16
	В-ПК-22.2	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

## 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-ех балльной шкале	Оценка ECTS	Требования к уровню освоению учебной дисциплины
90-100	5 – «отлично»	A	Оценка «отлично» выставляется студенту, если он глубоко и прочно усвоил программный материал, исчерпывающе, последовательно, четко и логически стройно его излагает, умеет тесно увязывать теорию с практикой, использует в ответе материал монографической литературы.
85-89	4 – «хорошо»	B	Оценка «хорошо» выставляется студенту, если он твёрдо знает материал, грамотно и по существу излагает его, не допуская существенных неточностей в ответе на вопрос.
75-84		C	
70-74		D	
65-69	3 – «удовлетворительно»	E	Оценка «удовлетворительно» выставляется студенту, если он имеет знания только основного материала, но не усвоил его деталей, допускает неточности, недостаточно правильные формулировки, нарушения логической последовательности в изложении программного материала.
60-64			
Ниже 60	2 – «неудовлетворительно»	F	Оценка «неудовлетворительно» выставляется студенту, который не знает значительной части программного материала, допускает существенные ошибки. Как правило, оценка «неудовлетворительно» ставится студентам, которые не могут продолжить обучение без дополнительных занятий по соответствующей дисциплине.

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

ОСНОВНАЯ ЛИТЕРАТУРА:

1. ЭИ E91 Laser Processing of Engineering Materials: Principles, Procedure and Industrial Application : , : Elsevier, 2005

2. ЭИ S96 Principles of Lasers : , Boston, MA: Springer US, 2010
3. 621.38 Л25 Квантовая электроника : курс лекций, Москва: НИЯУ МИФИ, 2015
4. ЭИ Л25 Квантовая электроника : курс лекций, Москва: НИЯУ МИФИ, 2015
5. ЭИ К43 Оптическое детектирование компонентов газовых технологических сред в реальном масштабе времени : монография, Москва: НИЯУ МИФИ, 2014
6. ЭИ М50 Лазерная технология : , А. П. Менушенков, Москва: МИФИ, 2008
7. 621.37 М50 Физические основы лазерной технологии : учебное пособие, А. П. Менушенков, В. Н. Неволин, В. Н. Петровский, Москва: НИЯУ МИФИ, 2010
8. ЭИ М50 Физические основы лазерной технологии : учебное пособие для вузов, А. П. Менушенков, В. Н. Неволин, В. Н. Петровский, Москва: НИЯУ МИФИ, 2010
9. ЭИ О-75 Основы физических процессов в плазме и плазменных установках : учебное пособие для вузов, С. К. Жданов [и др.], Москва: МИФИ, 2007

#### ДОПОЛНИТЕЛЬНАЯ ЛИТЕРАТУРА:

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

#### 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 aberrаций. 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