

Федеральное государственное учреждение  
«Федеральный научно-исследовательский центр  
«Кристаллография и фотоника»  
Российской академии наук»  
(ФНИЦ «Кристаллография и фотоника» РАН)

Принято на Ученом совете  
ИПЛИТ РАН – филиала ФНИЦ  
«Кристаллография и фотоника» РАН  
Протокол № 4/2020 от 24 сентября 2020 г.

«Утверждаю»

Директор



О.А. Алексеева

« 24 »

сентября

2020 г.

**ПРОГРАММА**  
**промежуточного (кандидатского) экзамена**  
**по дисциплине**  
**КВАНТОВАЯ ЭЛЕКТРОНИКА**

Направление подготовки: 11.06.01 Электроника, радиотехника и  
системы связи

Направленность: Квантовая электроника (05.27.03)

Шатура  
2020

## Введение

Программа промежуточного (кандидатского) экзамена по специальной дисциплине «Квантовая электроника» составлена на основе Программы-минимума кандидатского экзамена по специальности 05.27.03 «Квантовая электроника» по физико-математическим и техническим наукам, разработанной экспертным советом по электронике, измерительной технике, радиотехнике и связи Высшей аттестационной комиссии Минобрнауки России при участии Федерального государственного предприятия НИИ «Полус» имени М.Ф. Стельмаха и Московского физико-технического института (государственного университета) и утвержденной приказом Минобрнауки России от 8 октября 2007 г. № 274.

Программа составлена с учетом рабочей программы специальной дисциплины «Квантовая электроника», разработанной в Институте проблем лазерных и информационных технологий Российской академии наук – филиале Федерального государственного учреждения «Федеральный научно-исследовательский центр «Кристаллография и фотоника» Российской академии наук».

В основу программы положены следующие дисциплины: электродинамика; квантовая механика; физическая оптика; физика твердого тела; физика полупроводников и диэлектриков; квантовая электроника; оптоэлектроника; лазерная техника.

### 1. Предмет квантовой электроники

Предмет и краткая история развития квантовой электроники. Вклад отечественных ученых в разработку фундаментальных основ и принципов устройств квантовой электроники. Влияние квантовой электроники на развитие науки, техники и технологии.

### 2. Физические основы квантовой электроники

Оптические и безызлучательные переходы в квантовых системах. Спонтанное и вынужденное излучения. Энергетические состояния и квантовые переходы в атомных системах: атомные, молекулярные и ионные газы, ионы, центры окраски и красители в диэлектрических средах, оптические переходы в полупроводниках. Ширина и форма спектральных линий. Механизмы однородного и неоднородного уширения линий в газах и твердых телах, времена поперечной и продольной релаксаций. Инверсия населенностей энергетических состояний. Коэффициент усиления лазерной среды. Принципы создания инверсной населенности. Насыщение, поглощение и усиление света. Искажения контуров спектральных линий, эффект «выжигания дыр» в неоднородно уширенных линиях.

### 3. Квантовые усилители и генераторы (мазеры, лазеры)

Мазер на пучке молекул аммиака. Квантовый парамагнитный усилитель СВЧ. Газовые лазеры: газоразрядные (атомные, ионные, молекулярные, на парах металлов), фотодиссоционные, химические, газодинамические, электроионизационные, эксимерные. Особенности кольцевых газовых лазеров. Лазеры на твердых активных средах – стеклах, кристаллах, активированных волоконных материалах. Лазеры на кристаллах семейства гранатов с неодимом. Полупроводниковые инжекционные лазеры, лазеры на гетероструктурах, лазеры на квантово-размерных структурах. Лазерные усилители (бегущей волны, многопроходовые). Преобразователи частоты излучения и перестраиваемые лазеры: генераторы оптических гармоник, суммарных и разностных частот; лазеры на растворах органических соединений (красителей); комбинационные преобразователи и лазеры (на ВКР); параметрические усилители и генераторы света; перестраиваемые полупроводниковые лазеры; лазеры на  $F$ -центрах. Лазеры на свободных электронах.

#### 4. Резонаторы

Объемные резонаторы СВЧ. Оптические резонаторы; основные типы открытых резонаторов: плоскопараллельные, конфокальные, устойчивые, неустойчивые, кольцевые. Типы колебаний, собственные частоты, добротность оптических резонаторов. Методы селекций продольных и поперечных типов колебаний. Пространственные и угловые характеристики излучения лазеров.

#### 5. Динамика излучения лазеров

Активные среды с однородно-уширенной линией, кинетические уравнения, уравнения переноса. Анализ кинетики одномодового генератора. Взаимодействие различных типов колебаний. Роль насыщения и неоднородности накачки. Конкуренция мод, многомодовый режим. Пички в лазерах. Динамика полупроводниковых лазеров и газовых лазеров с доплеровской линией. Шумы излучения. Методы стабилизации интенсивности и частоты излучения лазеров.

#### 6. Генерация коротких и сверхкоротких импульсов и методы управления параметрами излучения лазеров

Модуляция добротности. Время нарастания и длительность импульса генерации. Электрооптические, магнитооптические, оптико-механические, акустооптические и другие модуляторы добротности. Просветляющиеся фильтры. Генерация серии импульсов. Метод синхронизации мод, полоса синхронизации и параметры импульсов. Управление параметрами импульсов, схемы модуляции добротности. Методы генерации сверхкоротких (фемтосекундных) импульсов света.

#### 7. Основные нелинейные эффекты в различных средах и их применение

Преобразование частоты лазерного излучения, генерация гармоник и комбинационных частот, параметрическое усиление и параметрическая генерация света. Вынужденные рассеяния: Манделъштама-Бриллюена (ВРМБ), комбинационное (рамановское, ВКР), Рэлеевское. Самофокусировка. Оптический пробой в газах и твердых телах. Оптическая прочность (поверхностная и объемная) элементов лазера. Обращение волнового фронта методами нелинейной оптики. Активная спектроскопия комбинационного рассеяния.

#### 8. Основные лазерные параметры и методы их измерения

Мощность (непрерывная, импульсная, средняя) лазерного излучения, энергия импульса излучения. Распределение излучения в ближней и дальней зонах, угловая расходимость. Когерентность (пространственная, временная). Поляризация, спектр мод резонатора (продольные и поперечные моды). Стабильность (кратковременная и долговременная, амплитудная и частотная). Шумы излучения, параметры модуляции лазеров. Методы измерения перечисленных параметров лазерного излучения.

#### 9. Устройства для управления параметрами лазерного излучения

Лазерные затворы. Дефлекторы и модуляторы лазерного излучения. Ячейки Керра, Погкельса, Фарадея, акустооптические. Принцип работы, методы расчета, синхронизация внешним сигналом. Пространственно-временные модуляторы света. Адаптивные зеркала. Оптические, в т.ч. управляемые фильтры.

#### 10. Источники накачки и питания лазеров различных типов

Источники питания твердотельных лазеров. Импульсные и непрерывные лампы накачки (типы, предельные и типовые мощности, методы поджига); разрядники (вакуумные, высокого

давления, воздушные); методы управления и синхронизации. Источники питания газоразрядных лазеров. Методы предионизации. Электроионизационный метод (принцип, требования к электронному пучку, системе питания). Электроразрядные сильноточные источники накачки (принцип работы, условия применимости). ВЧ-накачка газовых лазеров. Особенности источников питания инжекционных полупроводниковых лазеров. Накачка твердотельных лазеров световыми и лазерными полупроводниковыми диодами.

### **11. Основы технологии лазерных материалов**

Методы получения и обработки активных лазерных стекол и кристаллов. Методы выращивания и обработки нелинейно-оптических, электрооптических и акустооптических кристаллов. Технологические принципы создания сложных полупроводниковых и оптических структур (методы вакуумного напыления, эпитаксии, ионной имплантации и др.). Методы очистки газовых активных сред.

### **12. Принципы конструкции лазеров**

Выбор оптической схемы, типа резонатора, оптических развязок, материалов (пропускание, однородность, оптическая плотность, точность обработки), элементов управления. Выбор источников накачки и параметров системы питания. Обеспечение вибро- и удароустойчивости. Конструктивные принципы стабилизации основных параметров и обеспечения работы лазера в широком диапазоне температур. Системы теплоотвода и охлаждения активных элементов.

### **13. Основы физики газового разряда и его применение в лазерной технике**

Плазма. ВАХ и типы разряда. Элементарные процессы в газовом разряде. Методы получения однородного газового разряда в большом объеме.

### **14. Основные применения приборов квантовой электроники в науке и технике**

Оптические методы записи, воспроизведения, хранения и обработки информации. Оптическая, в т.ч. волоконная, связь. Оптическая локация и лазерная дальнометрия. Дистанционное зондирование окружающей среды. Голография, интерферометрия. Спектроскопия. Лазерная гироскопия. Стандарты частоты. Управляемый лазерный термоядерный синтез. Метрология, измерительная техника. Лазерная медицина. Лазерная химия. Сверхкритические флюидные технологии. Аддитивные лазерные технологии.

### **15. Лазерные технологии: физические основы, методы, эффективность**

Физические основы термических лазерных технологий. Лазерная сварка металлов. Лазерная резка металлов. Аддитивные технологии спекания порошков. Влияние параметров лазерного излучения на эффективность лазерных технологий. Проблемы фундаментальных исследований и прикладных разработок лазерных технологий. Физические основы метода импульсного лазерного осаждения. Импульсное лазерное осаждение тонких пленок металлов, оксидов металлов, полупроводников. Лазерные методы создания наноматериалов и наноструктур. Квантовые ямы, спиновые вентили, мемристоры.

### **Основная литература**

1. Херман Й., Вильгельм Б. Лазеры сверхкоротких световых импульсов. М.: Мир, 1986.
2. Физика полупроводниковых лазеров / Под ред. Х. Тукумы. М.: Мир, 1989.
3. Звелто О. Принципы лазеров. М.: Мир, 1990. 558 с.
4. Ананьев Ю.А. Оптические резонаторы и лазерные пучки. М.: Наука, 1990.
5. Технологические лазеры: Справочник: В 2-х т. / Под ред. Г.А. Абильсиитова. М.,

- Машиностроение, 1991.
6. Коротеев Н.И., Шумай И.Л. Физика мощного лазерного излучения. М.: Наука, 1991.
  7. Быков В.П., Силичев О.О. Лазерные резонаторы, М.: ФИЗМАТЛИТ, 2003 г., 319 с.
  8. Тарасов Л.В. Физические основы квантовой электроники: оптический диапазон. М.: URSS, 2010.
  9. Шен И.Р. Принципы нелинейной оптики. М.: Наука, 1989.
  10. Тарасов Л.В. Физика лазера. М.: URSS, 2017.
  11. Григорьянц А.Г., Шиганов И.Н., Мисюров А.И. Технологические процессы лазерной обработки. М.: Изд. МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2006, 664 с.
  12. Промышленное применение лазеров: Пер. с англ. / Ред. Кебнера Г. М.: Машиностроение, 1988.
  13. Современные лазерно-информационные и лазерные технологии: сб. трудов ИПЛИТ РАН. / Под ред. В.Я. Панченко, В.С. Голубева. М.: Интерконтакт Наука. 2005.
  14. Лазерные технологии обработки материалов: современные проблемы фундаментальных исследований и прикладных разработок / Под ред. В.Я. Панченко. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2009.
  15. Глубокое каналирование и филаментация мощного лазерного излучения в веществе / Под ред. В.Я. Панченко. М.: Интерконтакт Наука. 2009.
  16. Современные лазерно-информационные технологии. Коллективная монография под ред. ак. В.Я. Панченко и проф. Ф.В. Лебедева. М.: Интерконтакт Наука, 2015. 959 с.
  17. Григорьянц А.Г., Васильцов В.В., Низьев В.Г. Основы лазерной селективной технологии: Учебное пособие. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2002.
  18. Васильцов В.В., Низьев В.Г. Лазерные системы для проведения операций по трансмиокардиальной реваскуляризации миокарда: Учеб. пособие. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана. 2002.

#### Дополнительная литература

1. Ярив А. Введение в оптическую электронику. М.: Высшая школа, 1983.
2. Лазеры на алюмоиттриевом гранате с неодимом /Под ред. Зверева Г.М. М.: Радио и связь, 1985.
3. Инжекционные лазеры и их применение / Под ред. Глисеева П.Г. М.: Наука, 1992.
4. Измерение параметров приемников оптического излучения. М.: Радио и связь, 1983.
5. Пихтин А.Н. Оптическая и квантовая электроника. Учебник. М.: Высш. шк., 2001.
6. Тарасов Л.В. Четырнадцать лекций о лазерах. М.: URSS, 2011.
7. Лазерная техника и технология. В 7 кн. Кн. 1. Физические основы технологических лазеров: Учеб. пособие для вузов / В.С. Голубев, Ф.В. Лебедев; Под ред. А.Г. Григорьянца. М.: Высш. шк., 1987.
8. Лазерная техника и технология. В 7 кн. Кн. 2. Инженерные основы создания технологических лазеров: Учеб. пособие для вузов / В.С. Голубев, Ф.В. Лебедев; Под ред. А.Г. Григорьянца. М.: Высш. шк., 1988.
9. Лазерная техника и технология. В 7 кн. Кн. 3. Методы поверхностной лазерной обработки: Учеб. пособие для вузов / А.Г. Григорьянц, А.П. Сафонов; Под ред. А.Г. Григорьянца. М.: Высш. шк., 1987.
10. Лазерная техника и технология. В 7 кн. Кн. 4. Лазерная обработка неметаллических материалов: Учеб. пособие для вузов / А.Г. Григорьянц, А.А. Соколов; Под ред. Л.Г. Григорьянца. М.: Высш. шк., 1988.
11. Лазерная техника и технология. В 7 кн. Кн. 5. Лазерная сварка металлов: Учеб. пособие для вузов / А.Г. Григорьянц, И.Н. Шиганов; Под ред. А.Г. Григорьянца. М.: Высш. шк., 1988.
12. Лазерная техника и технология. В 7 кн. Кн. 6. Основы лазерного термоупрочнения сплавов: Учеб. пособие для вузов / А.Г. Григорьянц, А.Н. Сафонов; Под ред. А.Г. Григорьянца. М.: Высш. шк., 1988.
13. Лазерная техника и технология. В 7 кн. Кн. 7. Лазерная резка металлов: Учеб. пособие для вузов / А.Г. Григорьянц, А.А. Соколов; Под ред. А.Г. Григорьянца. М.: Высш. шк., 1988.

14. Справочник по лазерам. В 2 т. / Под ред. А.М. Прохорова. М.: Сов. радио, 1978.
15. Исламов Р.Ш. Нелинейная оптика: Учеб. пособ. М.: Изд-во МИИГАиК. 2008.
16. Исламов Р.Ш. Генерация гармоник в нелинейных средах: Учеб. пособ. М.: МИИГАиК, 2015. 94 с.
17. Пути ученого. Е.П. Велихов. Под общей редакцией академика РАН В.П. Смирнова. М.: РНЦ «Курчатовский институт», 2007.
18. Лазерная инженерия хряща / Под ред. Баграташвили В.П., Соболя Э.Н. Шехтера А.Б. М.: Физматлит, 2006.
19. Тучин В.В. Лазеры и волоконная оптика в биомедицинских исследованиях. 2-е издание. М.: Физматлит, 2010.
20. Karu T.I. Ten Lectures on Basic Science of Laser Phototherapy. Prima Books AB. Grangesberg (Sweden). 2007.