

**Министерство образования Республики Беларусь  
Учебно-методическое объединение  
по естественнонаучному образованию**

**УТВЕРЖДАЮ**

Первый заместитель Министра образования  
Республики Беларусь

 А.И. Жук

Регистрационный № ТД-\_\_\_/тип.

№ ТД - Г. 401/тип.

**КВАНТОВАЯ РАДИОФИЗИКА И ОПТОЭЛЕКТРОНИКА**

**Типовая учебная программа**

**для учреждений высшего образования по специальности:**

**1-31 04 03 Физическая электроника**

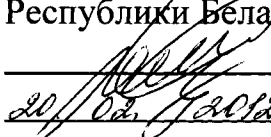
**СОГЛАСОВАНО**

Председатель учебно-методического  
объединения по естественнонаучному  
образованию

 А.И. Толстик

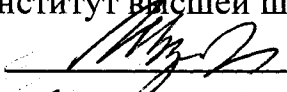
**СОГЛАСОВАНО**

Начальник Управления высшего и  
среднего специального образования  
Министерства образования  
Республики Беларусь

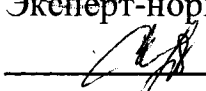
 Ю. И. Миксюк

**СОГЛАСОВАНО**

Проректор по учебной и  
воспитательной работе  
Государственного учреждения  
образования «Республиканский  
институт высшей школы»

 В. И. Шупляк

Эксперт-нормоконтролер

 С. М. Артемьева

26.01.2012



**СОСТАВИТЕЛИ:**

**А. А. Афоненко**, профессор кафедры квантовой радиофизики и оптоэлектроники Белорусского государственного университета, доктор физико-математических наук, доцент

**Е. Д. Карих**, доцент кафедры квантовой радиофизики и оптоэлектроники Белорусского государственного университета, кандидат физико-математических наук, доцент

**РЕЦЕНЗЕНТЫ:**

Кафедра лазерной техники и технологии Белорусского национального технического университета

**А. Л. Гурский**, заведующий кафедрой метрологии и стандартизации Учреждения образования «Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники», доктор физико-математических наук, профессор

**РЕКОМЕНДОВАНА К УТВЕРЖДЕНИЮ В КАЧЕСТВЕ ТИПОВОЙ:**

Кафедрой квантовой радиофизики и оптоэлектроники Белорусского государственного университета  
(протокол № 9 от 12 апреля 2011 года)

Научно-методическим советом Белорусского государственного университета  
(протокол № 4 от 31 мая 2011 г.)

Секцией по радиофизике и физической электронике научно-методического Совета по физике учебно-методического объединения вузов Республики Беларусь по естественнонаучному образованию  
(протокол № 2 от 31 мая 2011 г.)

Ответственный за редакцию: Е. Д. Карих

Ответственный за выпуск: Е. Д. Карих

## ПОЯСНИТЕЛЬНАЯ ЗАПИСКА

Типовая учебная программа «Квантовая радиофизика и оптоэлектроника» разработана для студентов специальности 1-31 04 03 «Физическая электроника» в соответствии с требованиями образовательного стандарта высшего образования по специальности 1-31 04 03 «Физическая электроника».

Дисциплина посвящена изучению физических явлений, лежащих в основе информационных операций с фотонными и электронными коллективами, изучению теоретических основ взаимодействия излучения с веществом, ознакомлению с основными принципами генерации и усиления электромагнитных колебаний в широком частотном диапазоне и практическому применению приборов квантовой и оптоэлектроники.

Целью изучения дисциплины является формирование систематизированных теоретических знаний и практических навыков, необходимых для специалистов в области квантовой радиофизики и оптоэлектроники.

Основные задачи дисциплины – формирование систематизированных теоретических знаний об основных явлениях, лежащих в основе методов генерации и приема оптического излучения, способах транспортировки, преобразования и модуляции световых пучков, принципах фотоэлектронного преобразования, основах методов оптической обработки информации, ее хранения и отображения; изучение фундаментальных принципов взаимодействия излучения и вещества, физики лазеров, нелинейной оптики; умение применять полученные знания для решения физических и прикладных задач в области оптической и квантовой электроники.

Основными методами и технологиями обучения, отвечающими целям и задачам изучения дисциплины «Квантовая радиофизика и оптоэлектроника», являются:

- проблемное обучение (проблемное изложение, реализуемое на лекционных занятиях, частично-поисковый и исследовательский методы, реализуемые на лабораторных занятиях);

- преподавание с использованием мультимедийной техники и прикладных компьютерных программ.

Для контроля качества обучения используются следующие средства диагностики: опрос во время занятий, аудиторные тесты по отдельным разделам дисциплины, оценка решения типовых задач, зачет, устный экзамен.

Самостоятельная работа студентов направлена на закрепление и обобщение пройденного учебного материала, реализуется в виде изучения методической и научной литературы в библиотеке, выполнения конкретных нетиповых заданий, содержащих элементы научного поиска, доступа к сетевым источникам информации и работы в компьютерном классе во внеаудиторное время.

Дисциплина входит в цикл общепрофессиональных и специальных дисциплин. Материал рассчитан на студентов старших курсов и опирается на сведения, полученные ими ранее в курсах «Оптики», «Атомной и ядерной физики», «Электродинамики», «Квантовой механики», «Физики твердого тела», «Физики полупроводников», «Физики полупроводниковых приборов».

В результате изучения дисциплины студент должен:

**знать:**

- физические явления, лежащие в основе информационных операций с фотонными и электронными коллективами;
- функциональные возможности и элементную базу оптоэлектроники;
- теоретические основы взаимодействия излучения с веществом;
- основные физические процессы, связанные с генерацией и усилением электромагнитных колебаний в широком частотном диапазоне;
- принципы работы квантовых генераторов и усилителей;

**уметь:**

- разрабатывать и исследовать работу устройств оптоэлектроники;
- разрабатывать физические и математические модели квантовомеханических процессов и устройств генерации и усиления электромагнитного излучения;
- проводить теоретические и экспериментальные исследования физических процессов, связанных с генерацией и усилением электромагнитных колебаний в широком частотном диапазоне.

Программа рассчитана на объем 244 часа, из которых 136 являются аудиторными. Распределение аудиторных часов по видам занятий следующее: лекций – 80 часов, лабораторных работ – 56 часов.

### ПРИМЕРНЫЙ ТЕМАТИЧЕСКИЙ ПЛАН

| №<br>п/п | Наименование темы                                                  | Лекции | Лаб.<br>занятия | Всего |
|----------|--------------------------------------------------------------------|--------|-----------------|-------|
| 1.       | Введение                                                           | 1      |                 | 1     |
| 2.       | Оптическое излучение: классическое и квантовое представления       | 5      |                 | 5     |
| 3.       | Источники излучения в оптоэлектронике                              | 4      | 6               | 10    |
| 4.       | Методы приема оптического излучения и основные типы фотодетекторов | 6      | 8               | 14    |
| 5.       | Принципы волоконной и интегральной оптики                          | 8      | 6               | 14    |
| 6.       | Методы управления оптическим излучением                            | 6      | 8               | 14    |
| 7.       | Оптическая обработка, хранение и отображение информации            | 6      |                 | 6     |
| 8.       | Нелинейные оптические явления                                      | 4      |                 | 4     |
| 9.       | Физические основы взаимодействия излучения с веществом             | 6      |                 | 6     |
| 10.      | Квантовые генераторы и усилители микроволнового диапазона          | 4      |                 | 4     |

| №<br>п/п | Наименование темы                      | Лекции | Лаб.<br>занятия | Всего |
|----------|----------------------------------------|--------|-----------------|-------|
| 11.      | Энергетическая теория генерации        | 6      |                 | 6     |
| 12.      | Лазеры                                 | 10     | 22              | 32    |
| 13.      | Оптические резонаторы                  | 4      |                 | 4     |
| 14.      | Лэмбовская модель многомодового лазера | 2      |                 | 2     |
| 15.      | Динамика лазерной генерации            | 6      | 6               | 12    |
| 16.      | Флуктуационные явления в лазерах       | 2      |                 | 2     |
|          | Итого:                                 | 80     | 56              | 136   |

### СОДЕРЖАНИЕ УЧЕБНОГО МАТЕРИАЛА

1. *Введение.* Краткий очерк истории. Терминология.

2. *Оптическое излучение: классическое и квантовое представления.* Световые волны и фотонные коллективы. Волновое представление светового поля. Плотность состояний поля. Разложение поля на осцилляторы. Вторичное квантование: переход к фотонному представлению. Условие классичности. Когерентность волн и статистика фотонов. Излучение в квантовых системах. Спонтанное и вынужденное излучение. Коэффициенты Эйнштейна. Тепловое излучение. Люминесценция. Оптическое усиление и суперлюминесценция. Лазерная генерация.

3. *Источники излучения в оптоэлектронике.* Инжекционная люминесценция в полупроводниках. Правила отбора при оптических переходах, прямозонные и непрямозонные полупроводники. Инжекция в структуре с  $p$ - $n$ -переходом. Излучение в гомо- и гетероструктурах. Источники излучения в когерентной оптоэлектронике. РБО и РОС лазеры.

4. *Методы приема оптического излучения и основные типы фотодетекторов.* Методы приема оптического излучения. Прямое фотодетектирование. Когерентный прием излучения. Принципы фотоэлектронного преобразования. Классификация приемников оптического излучения. Явление фотопроводимости: фоторезистор. Фотогальванический эффект: фотодетектирование в структуре с  $p$ - $n$ -переходом. Основные типы твердотельных фотодетекторов.  $Pin$ -фотодиод. Гетерофотодиод. Фотодиод с барьером Шоттки. Лавинный фотодиод. Твердотельные детекторы изображений.

5. *Принципы волоконной и интегральной оптики.* Транспортировка оптического излучения. Распространение света в оптическом волокне. Теорема Лиувилля. Оптические потери и дисперсионные свойства волокна. Сенсорные свойства оптического волокна. Эффект Саньяка: волоконно-оптический гироскоп. Распространение света в плоском оптическом волноводе. Дисперсионное уравнение. Модовая структура излучения. Сдвиг Гуса-Хэнхена. Оптическое туннелирование. Принципы интегральной оптики. Полосковые волноводы. Возбуждение и вывод излучения из волноводов. Связь между волноводами. Преобразование световых пучков в интегральной оптике.

6. *Методы управления оптическим излучением.* Классификация операций управления. Явление фотоупругости. Акустооптический эффект: режимы дифракции Брегга и Рамана-Ната. Акустооптическая модуляция интенсивности и частоты. Акустооптическая фильтрация и отклонение света. Модуляция света на основе электрооптических эффектов. Эффект Франца-Келдыша. Модулятор интенсивности на эффекте Поккельса. Модулятор Маха-Цендера. Структура и свойства жидких кристаллов. Электрооптические эффекты в жидких кристаллах. Эффект динамического рассеяния. Твист-эффект. Эффект «гость-хозяин». Эффект деформации вертикально ориентированной фазы.

7. *Оптическая обработка, хранение и отображение информации.* Операции над картинами. Когерентный процессор: принцип распознавания образов. Оптические носители: запись и считывание информации. Психофизические характеристики зрения. Принципы построения систем визуального отображения информации.

8. *Нелинейные оптические явления.* Поляризация среды в мощных оптических полях. Основные нелинейно-оптические явления. Самофокусировка лазерного излучения. Генерация второй и высших гармоник. Генерация суммарных и разностных частот. Параметрическая генерация.

9. *Физические основы взаимодействия электромагнитного излучения с веществом.* Вероятности переходов. Равновесное и неравновесное распределение частиц по энергиям, отрицательная температура. Классическое и квантовомеханическое описание взаимодействия излучения и вещества. Гамильтониан электрона в электромагнитном поле. Вычисление вероятности перехода методом возмущения. Вероятность перехода в дискретном и непрерывном спектре. Вероятности переходов в квантованном электромагнитном поле. Механизмы уширения линии излучения. Спектрально-зависимые коэффициенты Эйнштейна. Закон Бугера. Коэффициент поглощения и коэффициент экстинкции.

10. *Квантовые генераторы и усилители микроволнового диапазона.* Мазеры на молекулярных и атомных пучках. Устройство мазера на пучке молекул аммиака. Структура и энергетический спектр молекулы аммиака. Принцип сортировки частиц по энергетическим состояниям. Стартовый поток и выходная мощность. Стабильность мазера. Затягивание частоты. Ширина линии генерации. Твердотельные мазеры. Шумы мазеров.

11. *Энергетическая теория генерации.* Безызлучательная релаксация. Матрица плотности. Расчет населенностей уровней вероятностным методом. Закон Бугера и его нарушение. Модели активных сред (2-х, 3-х и 4-х уровневые системы). Структурная схема лазера. Фазовое условие генерации. Пороговое условие генерации. Мощность генерации. Оптимальные параметры лазера. Предельное значение мощности. Классификация лазеров.

12. *Лазеры.* Газовые лазеры (атомные и ионные). Конструктивные особенности газовых лазеров. Электрический разряд в газах. Классификация электронных конфигураций. Атомарные лазеры: гелий-неоновый лазер. Ионные лазеры: лазер на аргоне. Лазеры на парах металлов: гелий-кадмиевый лазер, лазер на парах меди. Газовые лазеры (молекулярные). Лазер на углекислом газе ( $\text{CO}_2$  лазер). Лазер на азоте. Эксимерные лазеры. Лазеры с использованием фотодис-

социации молекул. Химические лазеры. Классификация электронных конфигураций. Оптическая накачка. Твердотельные лазеры. Рубиновый лазер. Лазеры на ионах редкоземельных элементов: неодимовый лазер на алюмо-иттриевом гранате, неодимовый лазер на гадолиний-скандий-галлиевом гранате. Переключаемые лазеры: лазер на александрите, титан-сапфировый лазер. Волоконные лазеры и усилители. Жидкостные лазеры. Лазеры других типов.

Полупроводниковые лазеры. Энергетические состояния в полупроводниках, статистические свойства. Плотность состояний в зонах. Условие инверсии. Методы получения инверсных состояний. Конструкции инжекционных лазеров и светодиодов на гомо- и гетеропереходах. Использование твердых растворов для модификации зонных диаграмм и управления длиной волны генерации. Квантоворазмерные эффекты. Управление плотностью состояний в структурах типа “квантовая яма” и “квантовая проволока”. Лазеры на квантовых точках. Лазеры с вертикальным резонатором. Квантовокаскадные лазеры.

13. *Оптические резонаторы.* Добротность резонатора. Потери на зеркалах. Дифракционные потери. Число Френеля. Потери при разъюстировке. Спектр частот открытого резонатора. Устойчивость резонатора. Расчет полей на зеркалах резонатора. Метод Фокса и Ли. Методы селекции мод. Селекция мод в связанных резонаторах. Резонаторы с дисперсионными элементами. Резонаторы на основе Брэгговских отражателей в волоконных лазерах.

14. *Лэмбовская модель многомодового лазера.* Электромагнитное поле в активном резонаторе. Уравнения самосогласованности. Макроскопическая поляризация среды. Доплеровское уширение линии генерации в газовых лазерах. Провал Лэмба.

15. *Динамика лазерной генерации.* Классификация режимов генерации. Скоростные уравнения одномодового лазера. Переходный процесс в лазере. Пиковый режим многомодового лазера. Режим стационарной генерации. Генерация гигантских импульсов. Методы модуляции добротности. Синхронизация мод в лазерах. Генерация коротких импульсов в режиме синхронизации мод. Методы активной синхронизации. Пассивная синхронизация мод. Самосинхронизация мод.

16. *Флуктуационные явления в лазерах.* Источники шумов в лазерах: волновые и квантовые шумы. Уравнение электромагнитного осциллятора в присутствии шумового возмущения. Амплитудные и фазовые флуктуации. Ширина лазерной моды. Влияние амплитудно-фазовой связи на ширину линии генерации в полупроводниковых лазерах.

## ИНФОРМАЦИОННО-МЕТОДИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ

### Основная литература

1. *Карих, Е. Д.* Оптоэлектроника / Е. Д. Карих. Мн.: БГУ, 2000. 263 с.
2. *Верещагин, И. К.* Введение в оптоэлектронику / И. К. Верещагин, Л. А. Косяченко, С. М. Кокин. М.: Высш. школа, 1991. 191 с.
3. *Пихтин, А. Н.* Оптическая и квантовая электроника / А. Н. Пихтин. М.: Высшая школа, 2001. 573 с.
4. *Карих, Е. Д.* Оптоэлектроника: практикум / Е. Д. Карих, А. А. Афоненко. Мн.: БГУ, 2005. 120 с.

5. Манак И. С. Квантовая радиофизика / И. С. Манак, Е. Д. Карих. Мн.: БГУ, 2009. 383 с.
6. Бородин, П. М. Квантовая радиофизика: Учебное пособие / П. М. Бородин. СПб: Изд-во С.-Петербур. ун-та, 2004. 688 с.
7. Карлов Н. В. Лекции по квантовой электронике / Н. В. Карлов. М.: Наука, 1988. 336 с.
8. Звелто, О. Принципы лазеров / О. Звелто. М.: Мир, 1990. 520 с.
9. Карих Е. Д. Полупроводниковые лазеры / Е. Д. Карих, И. С. Манак. Мн.: БГУ, 1999. 199 с.
10. Грибковский В. П. Полупроводниковые лазеры / В. П. Грибковский, Университетское, 1988. 304 с.
11. Манак И. С. Квантовая радиофизика: практикум / И. С. Манак, Е. Д. Карих, В. В. Жуковский. Мн.: БГУ, 2007. 175 с.

### **Дополнительная литература**

1. Носов, Ю.Р. Оптоэлектроника / Ю. Р. Носов. М.: Радио и связь, 1989. 360 с.
2. Волноводная оптоэлектроника. М.: Мир, 1991. 575 с.
3. Основы оптоэлектроники. М.: Мир, 1988. 288 с.
4. Мэйтлэнд, А. Введение в физику лазеров / А. Мэйтлэнд, М. Данн. М.: Наука, 1978. 408 с.
5. Ярив, А. Квантовая электроника / А. Ярив. М.: Советское радио, 1980. 488 с.
6. Качмарек, Ф. Введение в физику лазеров / Ф. Качмарек. М.: Мир, 1980. 540 с.
7. Елисеев В. П. Введение в физику полупроводниковых лазеров / П. Г. Елисеев. Мн.: Наука, 1983. 295 с.
8. Афоненко, А. А. Теория полупроводниковых лазеров / А. А. Афоненко, В. К. Кононенко, И. С. Манак. Минск: БГУ, 1995. 108 с.
9. Дмитриев, В. Г. Прикладная нелинейная оптика / В. Г. Дмитриев, Л. В. Тарасов. М.: Физико-математическая литература, 2004.

### **Примерный перечень лабораторных работ**

1. Изучение свойств лазерного излучения.
2. Фотодетектирование в структуре с  $p$ - $n$ -переходом: исследование сигнальных и шумовых характеристик лавинного фотодиода.
3. Исследование электрооптического модулятора света на основе эффекта Поккельса.
4. Изучение модовой структуры и дисперсии оптических волноводов.
5. Рубиновый лазер.
6. Генерация второй гармоники в импульсно-периодическом лазере на алюмо-иттриевом гранате.
7. Изучение лазеров на органических красителях.
8. Лазер на смеси газов гелия и неона.
9. Исследование межмодовых биений в газовом лазере.
10. Определение времени жизни неравновесных носителей заряда в инжекционном лазере
11. Синхронизация мод газового лазера.