

МИНОБРНАУКИ РОССИИ

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ  
УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ПРОФЕССИОНАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ  
«САМАРСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ АЭРОКОСМИЧЕСКИЙ  
УНИВЕРСИТЕТ имени академика С.П. КОРОЛЕВА  
(национальный исследовательский университет)»

**Элементы и устройства интегральной  
оптоэлектроники**

Электронные методические указания  
к практическим занятиям

САМАРА

2012

УДК 621.3

П 180

Составители : **Паранин Вячеслав Дмитриевич,**  
**Матюнин Сергей Александрович**

Элементы и устройства интегральной оптоэлектроники [Электронный ресурс] : электрон. метод. указания к практич. занятиям / Минобрнауки России, Самар. гос. аэрокосм. ун-т им. С. П. Королева (нац. исслед. ун-т); сост. В. Д. Паранин, С. А. Матюнин. - Электрон. текстовые и граф. дан. (0,2 Мбайт). - Самара, 2012. - 1 эл. опт. диск (CD-R).

Режим доступа: <http://rtfmoodle.ssau.ru/course/view.php?id=66>

Методические указания к практическим занятиям предназначены бакалаврам радиотехнического факультета по направлению подготовки 210100.62 «Электроника и наноэлектроника», изучающих дисциплину «Элементная база интегральной оптоэлектроники» в 8 семестре.

Электронные методические указания разработаны на кафедре электронных систем и устройств.

© Самарский государственный  
аэрокосмический университет, 2012

## СОДЕРЖАНИЕ

	Стр.
1 ВВЕДЕНИЕ.....	4
2 Практическое занятие 1. «Принципы излучения света в полупроводниках».....	5
3 Практическое занятие 2. «Полупроводниковые лазеры на p-n переходах».....	5
4 Практическое занятие 3. «Лазеры с распределенной обратной связью».....	6
5 Практическое занятие 4. «Интегрально-оптические детекторы».....	7
6 Практическое занятие 5. «Проектирование диффузионных волноводов».....	8
7 Практическое занятие 6. «Проектирование эпитаксиальных волноводов».....	9
8 Практическое занятие 7. «Потери в волноводах».....	10
9 Практическое занятие 8. «Элементы связи для ввода и вывода излучения волноводов».....	11
10 Практическое занятие 9. «Элементы согласования излучения с волоконным световодом».....	12
11 Практическое занятие 10. «Электрооптические канальные модуляторы».....	12
12 Практическое занятие 11. «Электрооптические модуляторы дифракционного и отражательного типов».....	13
13 Практическое занятие 12 «Акустооптические планарные модуляторы».....	14
14 СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ.....	16

## ВВЕДЕНИЕ

Одним из наиболее интенсивно развивающихся направлений информационно-измерительной техники и техники связи является интегральная оптоэлектроника. Объединяя достижения физики твердого тела, интегральной и волоконной оптики, а в последнее время – нанотехнологий и нанофотоники, данное направление позволяет обеспечить создание и комплексную миниатюризацию функциональных элементов и устройств. Становится возможным существенное увеличение информационной емкости каналов связи, и, следовательно, повышение качества управления объектами, осуществление мониторинга сложных технологических процессов в реальном времени.

Применение интегральной оптоэлектроники в сочетании с волоконно-оптическими линиями связи позволяет создать мультисенсорные системы для эффективного управления авиационной и космической техникой, промышленными объектами различного назначения. Несомненными достоинствами таких систем являются пожаро- и взрывобезопасность, малые габариты и вес, химическая инертность (стойкость), гальваническая отвязка от токонесущих конструкций, возможность осуществления бесконтактных и дистанционных измерений, возможность осуществления мультиплексирования передаваемой информации.

В методических указаниях изучаются теоретические основы работы полупроводниковых источников и приемников излучения, основные параметры диффузионных и эпитаксиальных волноводов, элементов оптической связи с волноводами. Рассчитываются параметры и характеристики электрооптических модуляторов дифракционного, интерференционного, отражательного типов, а также акустооптических модуляторов Брэгга.

## **Практическое занятие 1**

### **«Принципы излучения света в полупроводниках»**

1 Изобразите зонную диаграмму для p-n перехода лазера при прямом напряжении смещения и поясните процесс излучения. Какие уровни энергии устанавливают коротковолновые и длинноволновые пределы спектра излучения лазера?

2 Назовите методы создания инверсной населенности в полупроводниковых лазерах. Что объединяет эти методы?

3 Изобразите спектры излучения полупроводникового светодиода и лазерного диода. Поясните механизмы усиления лазерного излучения в полупроводнике.

4 Каково влияние концентрации легирующей примеси на ширину спектра полупроводниковых источников света? В ответе следует учесть размывание энергических уровней примесей.

5 Изобразите конструкцию полупроводникового светодиода. Запишите выражения для внутренней и внешней квантовой эффективности полупроводниковых светодиодов. Каким образом можно улучшить данные показатели?

## **Практическое занятие 2**

### **«Полупроводниковые лазеры на p-n переходах»**

1 Изобразите конструкцию лазера на p-n переходе. Поясните процесс перехода от спонтанного излучения к стимулированному.

2 Изобразите схематично зависимость мощности выходного оптического излучения от тока накачки. Предложите методы снижения пороговой плотности накачки.

3 Изобразите схематично распределение интенсивности оптического излучения на выходе излучающего p-n перехода. Каким образом формируется данное распределение?

4 Легирование полупроводника акцепторной примесью привело к изменению ширины запрещенной зоны с 1,49 эВ до 1,45 эВ. Вычислите изменение длины волны максимума излучения.

5 Вычислите внутреннюю эффективность по мощности для лазерного диода, если светоизлучающий слой  $D=10$  мкм, толщина слоя с инверсной населенностью  $d=1$  мкм, коэффициент потерь  $\alpha=5$  см<sup>-1</sup>, коэффициент усиления  $g=40$  см<sup>-1</sup>.

6 Вычислите относительное снижение пороговой плотности тока для лазера на p-n переходе, если на торцы структуры нанесено зеркальное покрытие, увеличивающее коэффициент отражения  $R$  с 0,3 до 0,8.

### **Практическое занятие 3**

#### **«Лазеры с распределенной обратной связью»**

1 Изобразите полупроводниковый лазер с распределенной обратной связью на основе решетки Брэгга и поясните принцип его работы. Рассмотрите случаи горизонтального и вертикального излучения лазера. Приведите примеры технологий для формирования решеток Брэгга на поверхности полупроводников.

2 Вычислите период решеток Брэгга для случаев горизонтального и вертикального излучения лазера с распределенной обратной связью на длине волны  $\lambda_0=0,85$  мкм. Решетка сформирована на поверхности полупроводника с показателем преломления  $n_g=3,4$ .

3 Рассчитайте углы дифракции излучения с длиной волны  $\lambda_0=0,98$  мкм на брэгговской решетке 3-го порядка с периодом  $\Lambda=0,8$  мкм, если показатель преломления материала равен  $n_g=2,3$ .

4 Вычислите коэффициент отражения прямоугольно решетки Брэгга первого и третьего порядков, если длина волны излучения  $\lambda=0,85$  мкм, показатель преломления внешней среды  $n_1=1$ , волновода и решетки Брэгга  $n_2=3,4$ , толщина волновода  $t_g=1$  мкм, глубина штриха  $a=0,3$  мкм, длина решетки  $L=50$  мкм. Каким образом можно увеличить коэффициент отражения?

5 Назовите отличия спектров излучения полупроводникового лазера со сколотыми торцами, образующими резонатор Фабри-Перо, и лазера с распределенной обратной связью. Рассмотрите достоинства и недостатки конструкций излучающих модулей для спектрального уплотнения на основе нескольких лазеров названных типов. Выход модуля является волоконно-оптическим.

#### **Практическое занятие 4**

##### **«Интегрально-оптические детекторы»**

1 Изобразите энергетические зоны фотодиода на p-n переходе при обратном смещении напряжением  $V_{обр}$ . Чем определяется спектральная характеристика фотодиода? Какие факторы ограничивают рабочие характеристики фотодиода?

2 Изобразите конструкцию интегрального детектора с волноводным слоем. Назовите преимущества детекторов данного типа. Предложите меры повышения эффективности.

3 Запишите выражение для полного тока фотодиода. В чем заключается ограничения данной математической модели?

4 Рассчитайте длину  $L$  волноводного детектора, обеспечивающего коэффициент квантовой эффективности 0,95. Суммарный коэффициент поглощения  $\alpha=25 \text{ см}^{-1}$ .

5 Какие из перечисленных материалов подходят для создания фотодиодов на длину волны 0,85 мкм по критерию ширины запрещенной зоны? Si – 1,1 эВ, GaAs – 1,4 эВ, GaSb – 0,81 эВ, GaF – 2,3 эВ.

## **Практическое занятие 5**

### **«Проектирование диффузионных волноводов»**

1 Назовите технологии изготовления градиентных волноводов. Отметьте достоинства и недостатки каждой из них.

2 Изобразите основные этапы процесса изготовления волноводов методом термической диффузии. Назовите применяемое оборудование и материалы, назовите типичные температуры и длительности процесса, размеры формируемых структур.

3 Вычислите профиль распределения титана в ниобате лития, если диффузии проводилась при температуре  $T=1073 \text{ К}$ . Конечным источником диффузии



являлась пленка титана толщиной 40 нм, температура активации  $T_0=2,5 \cdot 10^4$  К, коэффициент объемной диффузии  $D_0=2,5 \cdot 10^{-4}$  см<sup>2</sup>/с.

4 Вычислите профиль распределения титана в ниобате лития, если диффузия проводилась из бесконечного источника при температуре  $T=1073$  К в течение 5 часов. Температура активации равна  $T_0=2,5 \cdot 10^4$  К, коэффициент объемной диффузии  $D_0=2,5 \cdot 10^{-4}$  см<sup>2</sup>/с.

5 Назовите ограничения математических моделей, примененных в задачах 3, 4. Каким образом можно учесть данные явления?

## **Практическое занятие 6**

### **«Проектирование эпитаксиальных волноводов»**

1 Назовите виды эпитаксиальных волноводов. Изобразите основные этапы изготовления названных волноводов, опишите применяемое оборудование и материалы.

2 Необходимо изготовить планарный волновод с показателем преломления  $n_2=3,4$  для работы на основной моде  $\lambda=1,3$  мкм. Показатели преломления окружающей среды  $n_1$  (сверху) и  $n_3$  (снизу), причем  $n_2-n_1 \gg n_2-n_3$ . Вычислите диапазон значений разности  $n_2-n_3$ , если толщина волноводного слоя  $t_g=2,8$  мкм?

3 Имеется планарный волновод с показателем преломления  $n_2 = 1,98$ , окруженный материалами  $n_3=1,62$  (снизу) и  $n_1 = 1$  (сверху). Вычислите угол распространения моды нулевого порядка, если имеет место волноводная отсечка.

4 Плоский волновод получен путем нанесения слоя  $\text{TiO}_2$  ( $n_2=1,98$ ) толщиной 2,5 мкм на подложку из кварца ( $n_3 = 1,5$ ). Вычислите число мод, которые можно возбудить в этом волноводе при использовании его для излучения с длиной волны 0,85 мкм?

5 Покажите, что фазовый сдвиг Гуса-Хенхена стремится к нулю по мере того, как угол распространения волноводной моды приближается к углу отсечки.

### **Практическое занятие 7**

#### **«Потери в волноводах»**

1 Назовите виды оптических потерь в волноводах и предложите методы их снижения. В чем заключается влияние данных потерь на параметры интегрально-оптических элементов?

2 Назовите методы измерения оптических потерь в волноводах и отметьте их достоинства и недостатки.

3 Вычислите коэффициент  $K$  для перевода оптических потерь  $L$ , дБ/см, в коэффициент ослабления  $\alpha$ ,  $\text{см}^{-1}$ , согласно зависимости  $L = K\alpha$ .

4 Вычислите число отражений световой волны от границ волновода, если угол распространения  $\Theta = 4^\circ$ , длина пути  $L=1$  см, толщина волновода  $t_g=3$  мкм. Оцените френелевские потери, если показатель преломления волновода  $n_2=2,1$ , подложки  $n_3=1,5$ , а среды над волноводом  $n_1=1$ .

5 Вычислите коэффициент ослабления  $\alpha$ ,  $\text{см}^{-1}$ , в волноводе на основе n-GaAs, если концентрация носителей заряда  $N=10^{18}$   $\text{см}^{-3}$ ,  $\lambda_0=1,15$  мкм, эффективная масса  $m^*=0,08m_e$ , подвижность  $\mu=2000$   $\text{см}^2/(\text{В}\cdot\text{с})$ , показатель преломления

$n_2=3,4$ , относительная диэлектрическая проницаемость  $\epsilon_0=11$ . Каким образом можно уменьшить эти потери?

## Практическое занятие 8

### «Элементы связи для ввода и вывода излучения волноводов»

1 Перечислите элементы связи для оптического сопряжения «волновод - волновод» и «волновод – оптическое волокно». Поясните принцип действия данных элементов и используемые физические явления.

2 Вычислите эффективность торцевого сопряжения встык для излучающего р-п перехода и плоского волновода на  $TE_0$ -моде ( $m=0$ ), если показатель преломления волновода  $n_2=2,3$ , р-п перехода  $n_1=3,4$ , толщина волновода  $t_g=2,5$  мкм, р-п перехода  $t_L=5$  мкм.

3 Изобразите по 4 - 5 точкам зависимость относительной эффективности оптического сопряжения встык для плоского волновода и излучающего р-п перехода, если  $t_g=2$  мкм,  $t_L=6$  мкм. Поперечное смещение  $X$  изменяется в пределах  $0..2$  мкм.

4 Назовите особенности эффективности сопряжения с зазором для плоского волновода и излучающего р-п перехода при продольной юстировке. Какое влияние это оказывает на процесс излучения полупроводникового источника?

5 Прямоугольная призма из рутила с  $n_p = 2,5$  используется в качестве элемента связи с волноводом  $Ta_2O_5$  с  $n_2=2,1$  на длине волны  $\lambda_0=0,85$  мкм. Входная поверхность призмы образует с поверхностью волновода угол  $45^\circ$ . Величина  $\beta$  для моды низшего порядка в волноводе составляет  $1,5 \cdot 10^5 \text{ см}^{-1}$ . Вычислите угол

между входящим лучом и поверхностью волновода для получения связи на моде низшего порядка.

## **Практическое занятие 9**

### **«Элементы согласования излучения с волоконным световодом»**

1 Перечислите методы согласования оптического волокна и волновода. Отметьте достоинства и недостатки каждого из методов. Назовите используемые материалы и оснастку (оборудование).

2 Перечислите механизмы потерь согласования оптического волокна с волноводом. Предложите методы, улучшающие согласование.

3 Предложите методы создания фокусирующих микролинз на торце кварцевого оптического волокна с диаметром сердцевины  $d_c=9$  мкм и оболочки  $d_{об}=125$  мкм, предназначенных для ввода излучения в волновод.

4 Изобразите двухлинзовую систему для согласования излучения оптических волокон с апертурой  $NA_1=0,2$  (источник) и  $NA_2=0,2$  (приемник). Установите пределы изменений фокусных расстояний линз. Как изменятся фокусные расстояния, если использовать одинаковые волокна и волокна различных диаметров?

5 Планарный волновод с числовой апертурой 0,18 и толщиной  $5\lambda$  заканчивается клином. При какой толщине клина мода низшего порядка становится излучательной модой? Изменение фазы при отражении не учитывать.

## **Практическое занятие 10**

### **«Электрооптические каналные модуляторы»**

1 Перечислите виды электрооптических планарных модуляторов и назовите их основные характеристики. Какие технологии используются при создании модуляторов?

2 Перечислите схемы преобразования фазовой электрооптической модуляции в модуляцию по интенсивности. Какие физические явления лежат в основе данных схем?

3 Постройте статическую модуляционную характеристику идеального модулятора Маха-Цандера в символьных координатах. Можно ли использовать модулятор как элемент спектральной фильтрации?

4 В чем заключается влияние рассогласования длин плеч электрооптического модулятора Маха-Цандера? Проанализируйте влияние различных рабочих температур модулятора и предложите методы стабилизации его характеристик.

5 Вычислите длину двухканального электрооптического модулятора с волноводами  $2,5 \times 2,5$  мкм, работающего на моде низшего порядка  $\lambda_0 = 0,85$  мкм. Коэффициент связи примите равным  $k=1$ , напряжение  $U=20$  В, электрооптический коэффициент  $r=4 \cdot 10^{-12}$  м/В, причем все напряжение падает на волноводе.

## **Практическое занятие 11**

### **«Электрооптические модуляторы дифракционного и отражательного типов»**

1 Изобразите конструкцию и поясните принцип действия дифракционного электрооптического модулятора Брэгга. Можно ли использовать названный модулятор в качестве управляемого спектрального фильтра?

2 Изобразите конструкцию и поясните принцип действия отражательного типа. Каким образом можно повысить чувствительность модулятора к управляющему напряжению?

3 Вычислите полуволновое напряжение  $U$  электрооптического модулятора Брэгга на основе ниобата лития, если длина электродов  $L=5$  мм, расстояние между электродами  $d=3$  мкм, а изменение показателя преломления приблизительно равно  $\Delta n = n_0^3 r_{13} U / 2d$ , где  $n_0=2,3$ ,  $r_{13}=10^{-11}$  м/В,  $\lambda_0=0,85$  мкм.

4 Постройте зависимость критического угла отражения  $\Theta_c$  от параметра  $V/d$  для отражающего X-модулятора, если показатель преломления  $n_1=2,3$ , а электрооптический коэффициент  $r_{33}=31 \cdot 10^{-12}$  м/В.

5 Вычислите полуволновое напряжение  $U$  отражающего X-модулятора на основе ниобата лития, если расстояние между электродами  $d=5$  мкм, показатель преломления  $n_0=2,3$  угол падения излучения  $\Theta_i = 1^\circ$ , электрооптический коэффициент  $r_{33}=31 \cdot 10^{-12}$  м/В, длина волны  $\lambda_0=0,63$  мкм.

## **Практическое занятие 12**

### **«Акустооптические планарные модуляторы»**

1 Изобразите конструкции акустооптических модуляторов и опишите принцип их работы. Назовите физические явления, лежащие в основе работы модуляторов.

2 Назовите отличия диаграммы направленности в акустооптических модуляторах Брэгга и Рамана-Ната. Использование какого модулятора является энергетически более выгодным с позиции принимаемой оптической мощности?

3 Вычислите изменение показателя преломления в волноводе из кварца толщиной 2,5 мкм и шириной 100 мкм под действием акустической волны с мощностью 2 Вт.

4 Акустооптический модулятор Брэгга выполнен на основе волновода из ниобата лития, поддерживающем моду низшего порядка с  $\lambda_0=0,63$  мкм, которой соответствует  $\beta=2,2 \cdot 10^5$  см<sup>-1</sup>. Показатель преломления  $n_1=2,3$ , длина волны акустического излучения 2,5 мкм, а длина взаимодействия 2 мм. Вычислите угол падения света, обеспечивающий максимально эффективную дифракцию. Каково угловое расхождение выходного излучения по уровню 0,5?

5 Имеется модулятор Брэгга с  $l=50$  мкм, скорость звука в материале которого равна 250 м/с. Можно ли его использовать для модуляции оптического излучения с  $\lambda_0=0,63$  мкм сигналом с полосой 100 МГц? Предложите методы повышения частоты модуляции.

## СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Ермаков, О. Н. Прикладная оптоэлектроника [Текст] / О. Ермаков. - М. : Техносфера, 2004. - 414 с. - (Мир электроники). - ISBN 5-94836-023-7.
2. Розеншер, Э. Оптоэлектроника [Текст] : пер. с фр. / Э. Розеншер, Б. Винтер ; под ред. О. Н. Ермакова. - [2-е испр. изд]. - М. : Техносфера, 2006. - 589 с. - (Мир электроники ; VII-04). - ISBN 5-94836-031-8.
3. Фрайден, Дж. Современные датчики [Текст] : справочник / Дж. Фрайден ; пер. с англ. Ю. А. Заболотной под ред. Е. Л. Свинцова. - М. : Техносфера, 2006. - 588 с. - (Мир электроники ; VII-09). - ISBN 5-94836-050-4.
4. Янг, Матт. Оптика и лазеры, включая волоконную оптику и оптические волноводы [Текст] : [учебник] / Матт Янг ; пер. с англ. Н. А. Липуновой [и др.]; под ред. В. В. Михайлина. - М. : Мир, 2005. - 541 с. - ISBN 5-03-003457-9 : 501.00 р., 518.92 р., 1002.00 р. – 12 экз.
5. Волноводная оптоэлектроника [Текст] / [Т. Тамир и др.] ; под ред. Т. Тамира ; пер. с англ. А. П. Горобца и др. ; под ред. В. И. Аникина. - М. : Мир, 1991. - 574 с. - ISBN 5-03-001903-0 : 100.00 р., 200.00 р., 85.00 р. – 5 экз.
6. Ярив, А. Оптические волны в кристаллах: пер. с англ. [Текст] / А.Ярив, П.Юх. – М.: Мир, 1987. – 616 с.
7. Хансперджер, Р. Интегральная оптика: теория и технология, пер. с англ. [Текст] / Р.Хансперджер. – М.: Мир, 1985. – 384 с.
8. Семенов, А.С. Интегральная оптика [Текст] / А.С.Семенов, В.Л.Смирнов, А.В.Шмалько. – М.: Радио и связь, 1990. – 224 с.