

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ  
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение  
высшего образования  
НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ «МЭИ»

	УТВЕРЖДАЮ
Директор ИРЭ	Директор ИЭТЭ
д-р техн. наук, доцент	к. техн. наук, доцент
_____ Куликов Р.С.	_____ Погребисский М.Я.
« ____ » _____ 20__ г.	« ____ » _____ 20__ г.

Банк заданий вступительного испытания в магистратуру  
института радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова (ИРЭ)  
и  
института электротехники и электрификации (ИЭТЭ)  
по направлению подготовки  
11.04.04 «Электроника и наноэлектроника»

Москва 2026

## СОДЕРЖАНИЕ

Б. Базовая часть.....	5
Структура базовой части билета.....	5
Б.1. Задания по теме «полупроводниковый диод».....	5
Б.2. Задания по теме «биполярный транзистор».....	6
Б.3. Задания по теме «динистор».....	8
Б.5. Задания по теме «полевой транзистор».....	8
Пример выполнения заданий базовой части.....	11
С. Специальная часть.....	15
С.ПЭ. Промышленная электроника и микропроцессорная техника.....	16
Структура специальной части билета.....	16
Задачи по теме «Автономные преобразователи».....	17
С.ПЭ.1.1.....	17
С.ПЭ.1.2.....	18
С.ПЭ.1.3.....	19
С.ПЭ.1.4.....	20
С.ПЭ.1.5.....	21
С.ПЭ.1.6.....	23
Пример выполнения задания С.ПЭ.1.6.....	25
Задачи по теме «Импульсная схемотехника».....	30
С.ПЭ.2.1.....	30
С.ПЭ.2.2.....	31
С.ПЭ.2.3.....	32
С.ПЭ.2.4.....	33
С.ПЭ.2.5.....	34
Пример выполнения задания С.ПЭ.2.5.....	36
С. Твердотельная микро- и наноэлектроника, лазерная и оптическая измерительная электроника.....	39
Структура специальной части модуля «Твердотельная микро- и	

наноэлектроника».....	39
С.ТМиН.1. Модуль «Твердотельная микро- и наноэлектроника». Тема «Комбинационная логика».....	40
С.ТМиН.2. Модуль «Твердотельная микро- и наноэлектроника». Тема «Последовательностная логика».....	41
Пример выполнения задания по модулю «Твердотельная микро- и наноэлектроника».....	42
С.ЛиОИЭ. Модуль Лазерная и оптическая измерительная электроника...	49
Структура специальной части модуля «Лазерная и оптическая измерительная электроника».....	49
С.ЛиОИЭ. Тестовые теоретические вопросы с выбором вариантов ответов .....	50
С.ЛиОИЭ. Тестовые теоретические вопросы на установление соответствия .....	61
С.ЛиОИЭ. Практические задачи средней сложности.....	83
С.ЛиОИЭ. Практические задачи повышенной сложности.....	84
Пример выполнения задания.....	88
С.ТиПС. Теоретическая и прикладная светотехника.....	95
Структура специальной части билета.....	95
С.ТиПС. Теоретические вопросы по основам светотехники.....	95
С.ТиПС. Задачи на расчёт параметров светодиодного устройства.....	96
Пример решения задачи на расчёт пар-ов светодиодного устройства №1..	98
С.ТиПС. Задачи по основам светотехники.....	98
Пример решения задачи по основам светотехники №1.....	101
Пример решения задачи по основам светотехники №7.....	101
С.ТиПС. Задачи на расчёт параметров сети электропитания.....	103
С.ТиПС. Задачи на расчёт координат цветности.....	105
Пример решения задачи на расчёт координат цветности №1.....	106
С.ПМиС. Полупроводниковые материалы и структуры.....	108

Структура специальной части билета.....	108
С.ПМиС. Простые теоретические вопросы по физике полупроводников.....	109
Пример ответа на простой теор. вопрос по физике полупроводников.....	109
С.ПМиС. Простые теоретические вопросы по физике диэлектриков.....	111
Пример ответа на простой теор. вопрос по физике диэлектриков.....	111
С.ПМиС. Простые теоретические вопросы по физике полупроводниковых приборов и интегральных схем.....	113
Пример ответа на простой теоретический вопрос физике полупроводниковых приборов и интегральных схем.....	113
С.ПМиС. Простые теоретические вопросы по технологии материалов электронной техники.....	115
Пример ответа на простой теоретический вопрос по технологии материалов электронной техники.....	116
С.ПМиС. Сложные теоретические вопросы по физике полупроводников.....	117
Пример ответа на сложный теоретический вопрос по физике полупроводников.....	117
С.ПМиС. Задачи по физике полупроводников.....	120
Пример решения задачи по физике полупроводников.....	121
С.ПМиС. Сложные теоретические вопросы по физике полупроводниковых приборов и интегральных схем.....	123
Пример ответа на теоретический вопрос по физике полупроводниковых приборов и интегральных схем.....	124
С.ПМиС. Задачи по физике полупроводниковых приборов и интегральных схем.....	126
Пример решения задачи по физике полупроводниковых приборов и интегральных схем.....	128

## Б. Базовая часть

Задания базовой части являются обязательными вне зависимости от выбранной образовательной программы магистратуры. Базовая часть экзаменационного билета содержит пять вопросов. Все вопросы билета посвящены свойствам и параметрам одного и того же полупроводникового прибора.

### Структура базовой части билета

№ п/п	Наименование задания	Максимальное количество баллов
1	Б.1. Условное графическое обозначение прибора	4
2	Б.2 Энергетическая диаграмма прибора	8
3	Б.3. Задание, специфичное для конкретной разновидности прибора (простое)	8
4	Б.4. Статические вольт-амперные характеристики прибора	10
5	Б.5. Задание, специфичное для конкретной разновидности прибора (сложное)	10
ИТОГО:		40

### Б.1. Задания по теме «полупроводниковый диод»

1. Приведите условное графическое обозначение полупроводникового диода, отметьте анод и катод, отметьте p- и n-области.

2. Нарисуйте энергетическую диаграмму pn-перехода при нулевом смещении, прямом и обратном смещениях, подпишите энергетические уровни, отметьте контактную разность потенциалов, отметьте ширину области пространственного заряда – максимум 8 баллов.

3. Нарисуйте вольт-амперную характеристику идеального pn-перехода, подпишите оси, отметьте контактную разность потенциалов и ток насыщения. Напишите формулу, объясняющую данную вольт-амперную

характеристику идеального рп–перехода, дайте пояснения входящим в нее компонентам – максимум 8 баллов

4. Нарисуйте вольт-амперную характеристику (ВАХ) идеального диода и с учётом влияния сопротивления базы и генерационно-рекомбинационных токов, укажите влияние каждой составляющей, объясните причину этого влияния. Нарисуйте вольт-амперные характеристики идеального и реального диода в полупологарифмическом масштабе – отметьте ток насыщения и генерационно-рекомбинационный ток – максимум 10 баллов.

5. Нарисуйте вольт-амперную характеристику диода при трёх различных температурах, подпишите оси, отметьте влияние температуры, объясните с помощью необходимых формул причины этого влияния – максимум 10 баллов.

## **Б.2. Задания по теме «биполярный транзистор»**

1. Нарисуйте условное графическое обозначение, отметьте контакт эмиттера, базы и коллектора, отметьте n- и p-области. Задание выполняется для одного из следующих вариантов:

1.1. транзистор рпн;

1.2. транзистор рпр.

2. Нарисуйте энергетическую диаграмму транзистора при нулевом смещении, подпишите энергетические уровни, отметьте области базы, эмиттера и коллектора, отметьте эмиттерный и коллекторный переходы, области пространственного заряда этих переходов и высоты потенциальных барьеров; нарисуйте энергетическую диаграмму транзистора в нормальном усилительном режиме. Задание выполняется для одного из следующих вариантов:

2.1. Транзистор рпн, включён по схеме «общая база».

2.2. Транзистор рпн, включён по схеме «общий эмиттер».

2.3. Транзистор  $pnp$ , включён по схеме «общая база».

2.4. Транзистор  $pnp$ , включён по схеме «общий эмиттер».

3. Из трёх возможных токов, а именно тока эмиттера, базы и коллектора, а также из трёх возможных разностей потенциалов, а именно эмиттер-база, база-коллектор и коллектор-эмиттер, укажите, какие токи и напряжения являются входными для усилителя, а какие выходными. Напишите выражение для коэффициента усиления по току, поясните, от каких двух составляющих зависит этот коэффициент, как повысить каждую составляющую. Приведите типовые значения для коэффициента усиления по току, укажите, происходит ли усиление по току. Происходит ли усиление по напряжению и по мощности? Если усиление происходит, то укажите по какой причине. Задание выполняется для одного из следующих вариантов:

3.1. Схема включения транзистора «общая база».

3.2. Схема включения транзистора «общий эмиттер».

4. Нарисуйте семейство входных и выходных вольт-амперных характеристик, подпишите оси, отметьте, чем различаются кривые в семействе. Проставьте точки на входных и выходных характеристиках, соответствующих друг другу для активного усилительного режима – точка АУ, в режиме насыщения – точка Н, в режиме отсечки – точка ОТ. Задание выполняется для одного из следующих вариантов:

4.1. Транзистор  $pnp$ , включён по схеме «общая база».

4.2. Транзистор  $pnp$ , включён по схеме «общий эмиттер».

4.3. Транзистор  $pnp$ , включён по схеме «общая база».

4.4. Транзистор  $pnp$ , включён по схеме «общий эмиттер».

5. Дополнительные задания по теме «биполярный транзистор»

5.1. Нарисуйте распределение концентрации неосновных носителей заряда в нормальном усилительном режиме, при инверсном включении, для

режима насыщения и в режиме отсечки. Обозначьте направление потоков неосновных носителей заряда.

5.2. Нарисуйте нагрузочную кривую на выходном семействе вольт-амперных характеристик. Поясните, чем определяется граница между активным режимом и режимом насыщения в заданном режиме включения транзистора. Построения нагрузочной кривой необходимо выполнить на рисунке, полученном в результате выполнения задания №4.

### **Б.3. Задания по теме «динистор»**

1. Нарисуйте условное графическое обозначение динистора (двухэлектродного тиристора), отметьте контакты анода и катода.

2. Нарисуйте энергетическую диаграмму динистора в режимах «закрото» и «открото», подпишите энергетические уровни, подпишите области анода, катода и баз.

3. Нарисуйте энергетическую диаграмму динистора при нулевом смещении, подпишите энергетические уровни, подпишите области анода, катода и баз.

4. Нарисуйте вольт-амперную характеристику динистора, подпишите оси, отметьте ток и напряжение включения, ток удержания.

5. Поясните физические процессы, приводящие к переключению прибора из высокоомного состояния в низкоомное и обратно, поясните, как заставить прибор открываться при меньших напряжениях.

### **Б.5. Задания по теме «полевой транзистор»**

1. Нарисуйте условное графическое обозначение полевого транзистора, отметьте контакты стока, истока, затвора, отметьте p- и n-области. Задание выполняется для одного из следующих вариантов:

- 1.1. n-канальный транзистор с управляющим рп–переходом.
- 1.2. р-канальный транзистор с управляющим рп–переходом.
- 1.3. n-канальный МДП-транзистор с наведённым (индуцированным) каналом.
- 1.4. р-канальный МДП-транзистор с наведённым (индуцированным) каналом.
- 1.5. n-канальный МДП-транзистор со встроенным каналом.
- 1.6. р-канальный МДП-транзистор со встроенным каналом.

2. Нарисуйте структуру полевого транзистора, отметьте области истока и стока, затвор и канал, укажите типы проводимостей всех областей. Для МДП-транзисторов также укажите подзатворный диэлектрик. Задание выполняется для одного из следующих вариантов:

- 2.1. n-канальный транзистор с управляющим рп–переходом.
- 2.2. р-канальный транзистор с управляющим рп–переходом.
- 2.3. n-канальный МДП-транзистор с наведённым (индуцированным) каналом.
- 2.4. р-канальный МДП-транзистор с наведённым (индуцированным) каналом.
- 2.5. n-канальный МДП-транзистор со встроенным каналом.
- 2.6. р-канальный МДП-транзистор со встроенным каналом.

3. Нарисуйте семейство передаточных характеристик полевого транзистора, подпишите оси, укажите знаки напряжений. Укажите напряжение отсечки и максимальный ток стока (в случае нормально открытого прибора) или пороговое напряжение (в случае нормально закрытого прибора). Отметьте, чем различаются кривые в семействе. Считать, что транзистор включён по схеме «общий исток». Задание выполняется для одного из следующих вариантов:

- 3.1. n-канальный транзистор с управляющим рп–переходом.
- 3.2. р-канальный транзистор с управляющим рп–переходом.
- 3.3. n-канальный МДП-транзистор с наведённым (индуцированным) каналом.
- 3.4. р-канальный МДП-транзистор с наведённым (индуцированным) каналом.
- 3.5. n-канальный МДП-транзистор со встроенным каналом.
- 3.6. р-канальный МДП-транзистор со встроенным каналом.

4. Нарисуйте семейство выходных вольт-амперных характеристик полевого транзистора, подпишите оси. Отметьте, чем различаются кривые в семействе. При каких условиях может изменяться сопротивление канала, если  $U_{зи}=0$ ? Считать, что транзистор включён по схеме «общий исток». Задание выполняется для одного из следующих вариантов:

- 4.1. n-канальный транзистор с управляющим рп–переходом.
- 4.2. р-канальный транзистор с управляющим рп–переходом.
- 4.3. n-канальный МДП-транзистор с наведённым (индуцированным) каналом.
- 4.4. р-канальный МДП-транзистор с наведённым (индуцированным) каналом.
- 4.5. n-канальный МДП-транзистор со встроенным каналом.
- 4.6. р-канальный МДП-транзистор со встроенным каналом.

5. Нарисуйте нагрузочную кривую на семействе выходных вольт-амперных характеристик, отметьте рабочие точки, соответствующие работе в пологой области и области крутых характеристик.

## Пример выполнения заданий базовой части

Б.1. Нарисуйте условное графическое обозначение **рпр-транзистора**, отметьте контакт эмиттера, базы и коллектора, отметьте n- и p-области.

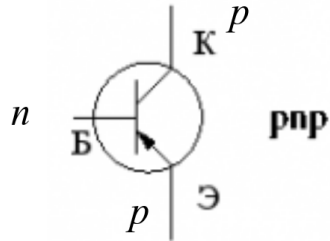


Рис. 1.1. условное графическое обозначение рпр-транзистора

Б.2. Нарисуйте энергетическую диаграмму **рпр-транзистора** при нулевом смещении, подпишите энергетические уровни, отметьте области базы, эмиттера и коллектора, отметьте эмиттерный и коллекторный переходы, области пространственного заряда этих переходов и высоты потенциальных барьеров; нарисуйте энергетическую диаграмму рпр-транзистора в нормальном усилительном режиме при включении по схеме «общая база» .

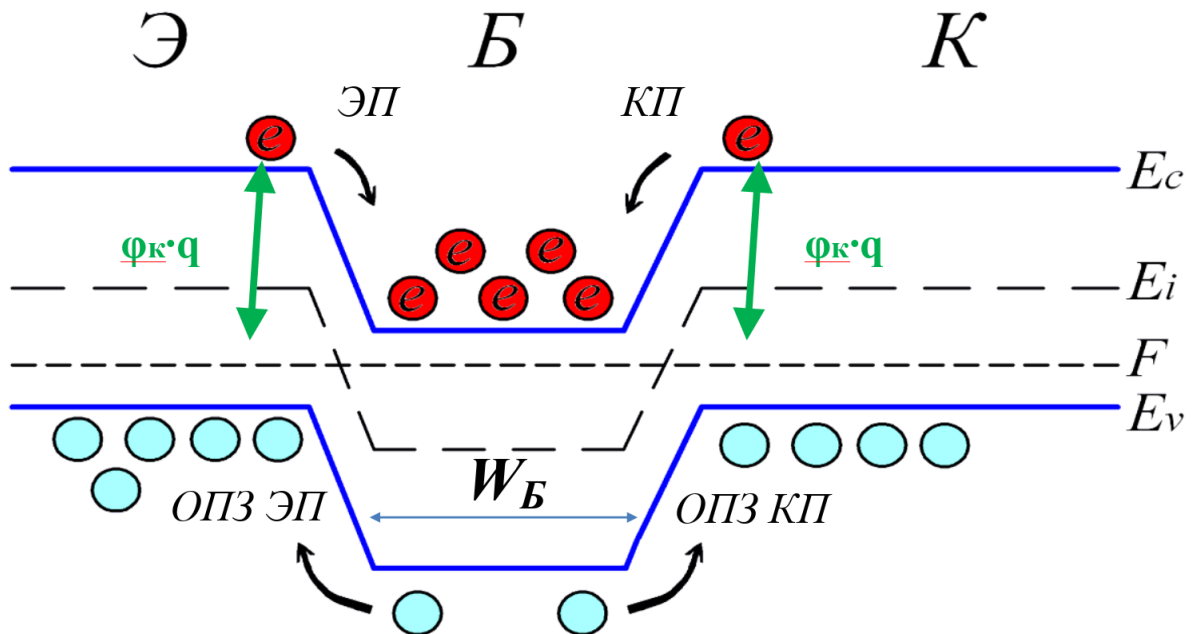


Рис. 1.2. Энергетическая диаграмма рпр-транзистора при нулевом смещении

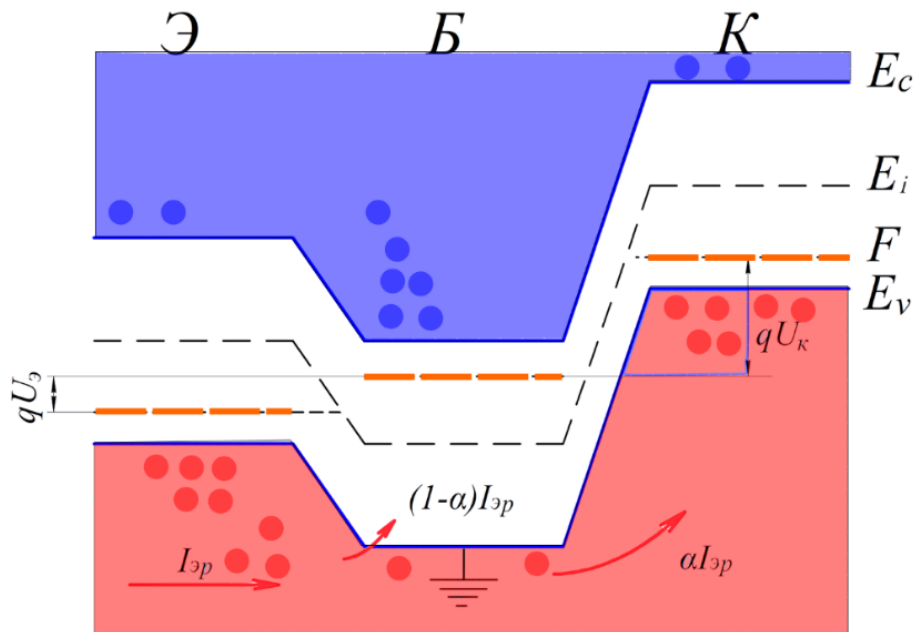


Рис. 1.3. Энергетическая диаграмма npn -транзистора в нормальном усилительном режиме общая база

Б.3. Напишите выражение для **коэффициента усиления тока эмиттера**, поясните, от каких двух составляющих зависит этот коэффициент, как повысить каждую составляющую, поясните что усиливает транзистор в схеме включения «общая база» и за счет чего.

Коэффициент усиления тока эмиттера:  $\alpha = I_K / I_{Э} = \gamma \cdot \kappa$ , где  $\gamma = I_{pЭ} / I_{Э}$  – коэффициент инжекции,  $\kappa = 1 / \text{ch} (W_B / L_{pБ})$  – коэффициент переноса, где  $W_B$  – толщина базы,  $L_p$  – диффузионная длина неосновных носителей заряда (дырок) в базе.

Для увеличения коэффициента инжекции следует сильно легировать эмиттер по отношению к базе, чтобы было преимущественная инжекция носителей заряда из эмиттера в базу, а не из базы в эмиттер.

С уменьшением ширины базовой области благодаря уменьшению рекомбинационных потерь возрастает количество неосновных носителей заряда, инжектированных из эмиттера, способных дойти до области пространственного заряда коллекторного перехода и экстрагироваться в коллектор, возрастает и, как следствие, растёт коэффициент передачи тока эмиттера.

Б.4. Нарисуйте семейство входных и выходных вольт-амперных характеристик **ррр-транзистора**, включённого по схеме с **общей базой**, подпишите оси, отметьте, чем различаются кривые в семействе. Проставьте точки на входных и выходных характеристиках, соответствующих друг другу для активного усилительного режима – точка АУ, в режиме насыщения – точка Н, в режиме отсечки – точка ОТ.

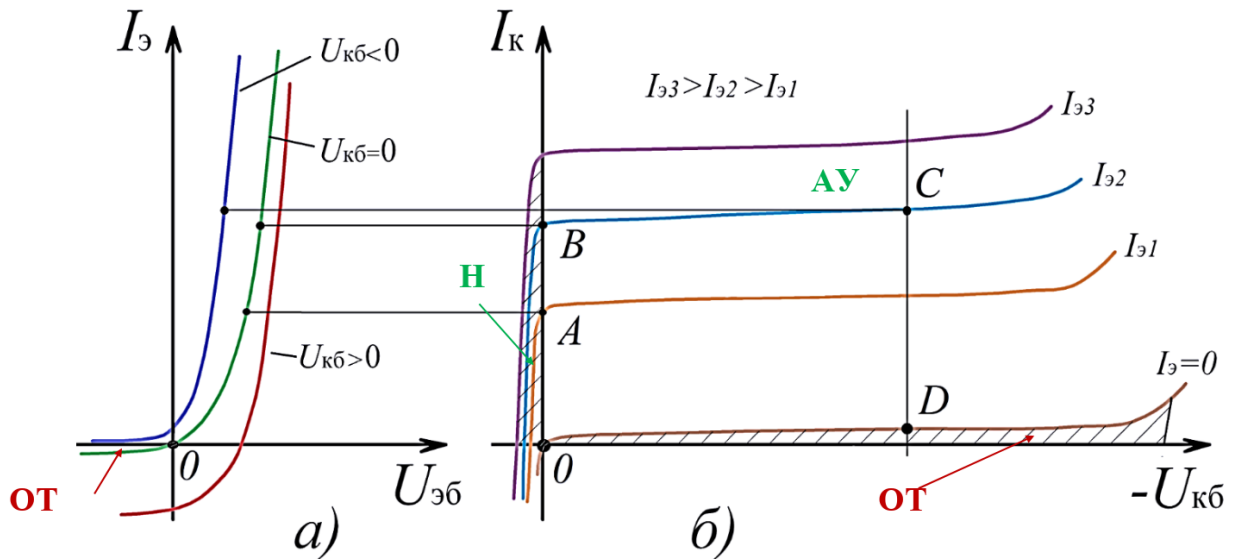


Рис. 1.4. Входные (а) и выходные (б) вольт-амперные характеристики ррр -транзистора в схеме ОБ

Б.5. Нарисуйте распределение концентрации неосновных носителей заряда в нормальном усилительном режиме, при инверсном включении, для режима насыщения и в режиме отсечки. Обозначьте направление потоков неосновных носителей заряда .

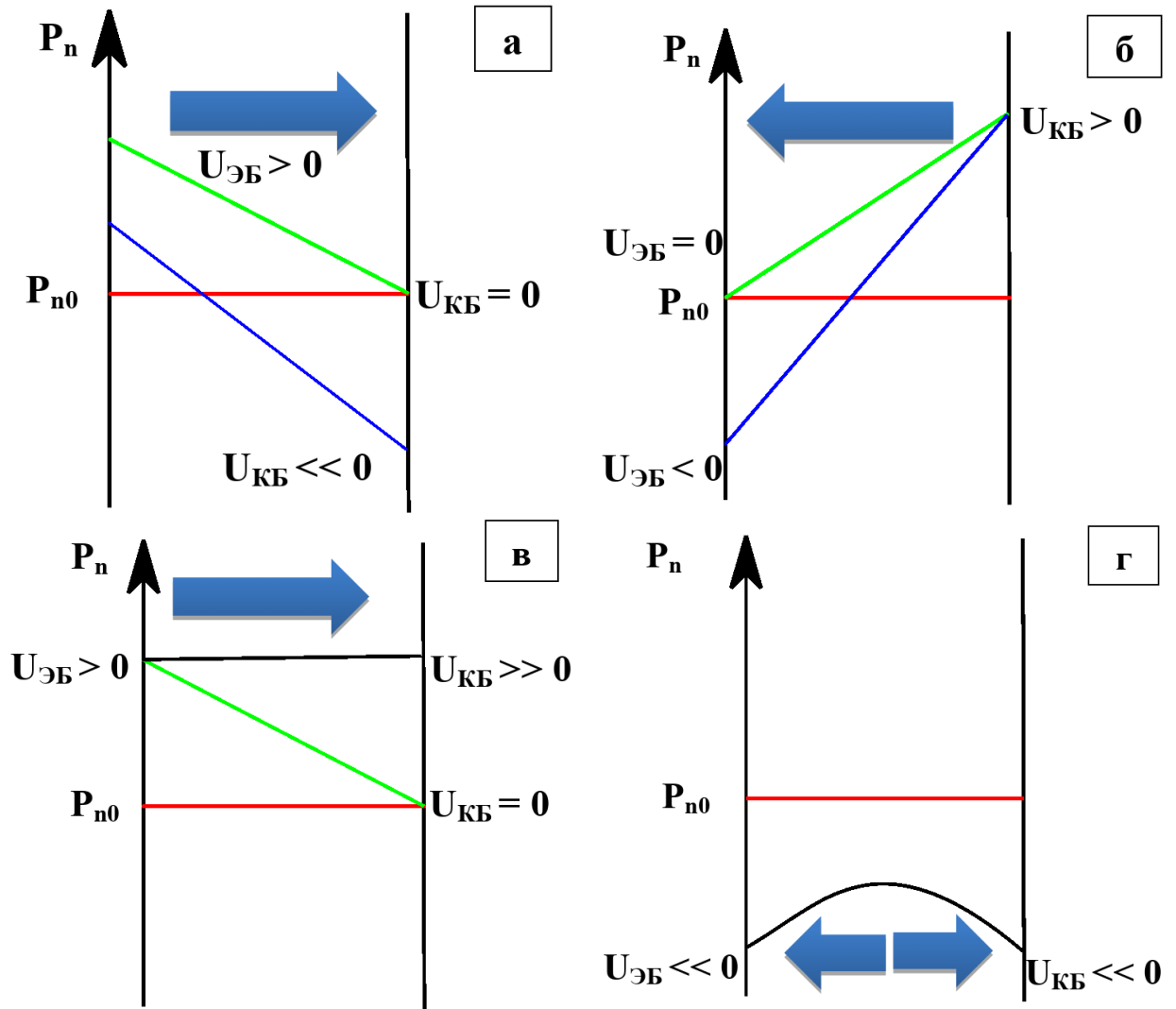


Рис. 1.5. Распределение неосновных носителей заряда в нормальном усилительном режиме (а), при инверсном включении (б), для режима насыщения (в) и в режиме отсечки (г)

## С. Специальная часть

Специальная часть вступительного испытания подразумевает выбор задания в соответствии с желаемой образовательной программой. Абитуриент может выполнить одну специальную часть или несколько по своему усмотрению. Могут быть выбраны следующие специальные части:

1. «Промышленная электроника и микропроцессорная техника» (кафедра промышленной электроники ИРЭ);

2. «Твердотельная микро- и наноэлектроника, лазерная и оптическая измерительная электроника» (кафедра микроэлектроники и физики им. Фабриканта В.А. ИРЭ);

3. «Теоретическая и прикладная светотехника» (кафедра светотехники ИРЭ);

4. «Полупроводниковые материалы и структуры» (кафедра ФТЭМК ИЭТЭ).

Программа «Твердотельная микро- и наноэлектроника, лазерная и оптическая измерительная электроника» подразумевает выбор содержания образовательной программы между лазерной оптической измерительной техникой и цифровой микроэлектроникой. В этой связи данная специальная часть содержит внутри себя два модуля: отдельно по лазерной технике и отдельно по цифровой схемотехнике. Абитуриент имеет право выполнить задание только по одному модулю. Каждый модуль оценивается как самостоятельная специальная часть. Если абитуриент выполнит задания по двум модулям, в зачёт специальной части будет проставлена наивысшая из двух оценок, баллы за модули не суммируются.

## **С.ПЭ. Промышленная электроника и микропроцессорная техника**

Специальная часть содержит два вопроса: задания по теме «Автономные преобразователи» и по теме «Импульсная схемотехника». Каждый вопрос содержит по пять заданий. Перечень заданий по теме «Автономные преобразователи» является типовым, отличаются только схемы преобразователей и номиналы компонентов этих схем. Задания по теме «Импульсная схемотехника» меняются в зависимости от используемой микросхемы.

### **Структура специальной части билета**

№ п/п	Наименование задания	Макс. количество баллов
С.ПЭ.1	Задание по теме «Автономные преобразователи»	
1	Схема преобразователя. Расчёт коэффициента трансформации.	6
2	Расчёт токов дросселя.	6
3	Временные диаграммы преобразователя.	6
4	Расчёт действующих токов и статических потерь транзистора.	6
5	Расчёт фильтра.	6
Итог по теме «Автономные преобразователи»:		30
С.ПЭ.2	Задание по теме «Импульсная схемотехника»	
1	Часть №1.	6
2	Часть №2.	6
3	Часть №3.	6
4	Часть №4.	6
5	Часть №5.	6
Итог по теме «Импульсная схемотехника»:		30
Итог по специальной части:		60

## Задачи по теме «Автономные преобразователи»

### С.ПЭ.1.1

**Дано:** схема – преобразователь постоянного напряжения 1-го рода (понижающий, прямоходовой) без трансформаторной развязки входа и выхода. Частота коммутации - 250 кГц; напряжение питания - 10 В; индуктивность дросселя - 2 мкГн.

Напряжение нагрузки равно 1,5 В при токе нагрузки 10 А. Размах пульсаций напряжения нагрузки равен 20 мВ (от максимума до минимума).

В качестве силового ключа используется полевой n-канальный МДП-транзистор с индуцированным каналом. Сопротивление открытого канала транзистора (в области насыщения) равно 10 мОм.

При расчетах другими потерями в элементах преобразователя пренебречь.

1. Нарисовать схему преобразователя. Найти коэффициент заполнения импульсов управления транзистором. При расчете коэффициента заполнения падением напряжения на транзисторе пренебречь.

2. Найти минимальный и максимальный на периоде токи дросселя. Преобразователь работает в режиме непрерывного тока или прерывистого тока? На сколько должна измениться индуктивность дросселя выходного фильтра, чтобы преобразователь перешел в другой режим работы?

3. Построить временные диаграммы тока дросселя, тока стока транзистора и напряжения сток-исток транзистора. При построении диаграмм переключение транзисторного ключа считать мгновенным. Отобразить на диаграммах как минимум один период работы преобразователя в установившемся режиме. Показать на схеме эти токи и напряжение и их положительное направление.

4. Найти средний и действующий токи транзистора. Найти статические потери в транзисторе.

5. Найти емкость конденсатора фильтра, исходя из заданной величины пульсаций в установившемся режиме работы преобразователя.

### С.ПЭ.1.2

**Дано:** схема – преобразователь постоянного напряжения 2-го рода (повышающий). Частота коммутации 45 кГц; напряжение питания 100 В; размах пульсаций тока дросселя - 7% от среднего тока дросселя (от минимума до максимума тока).

Коэффициент заполнения импульсов управления силовым ключом равен 0,7, ток нагрузки 8А. Размах пульсаций напряжения нагрузки равен 0,5В (от максимума до минимума).

В качестве силового ключа используется полевой n-канальный МДП-транзистор с индуцированным каналом. Параметры транзистора как силового ключа при переключении: время нарастания тока транзистора 5 нс; время спада тока транзистора 5 нс; время нарастания напряжения транзистора (при выключении) 60 нс; время спада напряжения на транзисторе (при включении) 50 нс; обратный динамический ток диода 10 А (амплитуда).

При расчетах потерями в элементах преобразователя, параметры которых не указаны, пренебречь.

1. Нарисовать схему преобразователя. Найти напряжение нагрузки.
2. Найти средний ток дросселя. Найти минимальный и максимальный на периоде токи дросселя. Преобразователь работает в режиме непрерывного тока или прерывистого тока? На сколько должен измениться ток нагрузки, чтобы преобразователь перешел в другой режим работы?
3. Построить временные диаграммы тока дросселя, тока стока транзистора и напряжения сток-исток транзистора. При построении диаграмм переключение транзисторного ключа считать мгновенным (только в этом пункте!). Отобразить на диаграммах как минимум один период работы

преобразователя в установившемся режиме. Показать на схеме эти токи и напряжение и их положительное направление.

4. Найти потери на переключение в транзисторе.

5. Найти емкость конденсатора выходного фильтра, исходя из заданной величины пульсаций в установившемся режиме работы преобразователя.

### С.ПЭ.1.3

**Дано:** схема – преобразователь постоянного напряжения 3-го рода (обратноходовой, инвертирующий). Без трансформаторной развязки входа и выхода. Частота коммутации 40 кГц; напряжение питания 120 В; размах пульсаций тока дросселя - 7% от среднего тока дросселя (от минимума до максимума тока).

Коэффициент заполнения импульсов управления силовым ключом равен 0,7, ток нагрузки 10А.

В качестве силового ключа используется полевой n-канальный МДП-транзистор с индуцированным каналом. Параметры транзистора как силового ключа при переключении: время нарастания тока транзистора 15 нс; время спада тока транзистора 15 нс; время нарастания напряжения транзистора (при выключении) 80 нс; время спада напряжения на транзисторе (при включении) 60 нс; обратный динамический ток диода 10 А (амплитуда).

При расчетах потерями в элементах преобразователя, параметры которых не указаны, пренебречь.

1. Нарисовать схему преобразователя. Найти напряжение нагрузки.

2. Найти средний ток дросселя. Найти минимальный и максимальный на периоде токи дросселя. Преобразователь работает в режиме непрерывного тока или прерывистого тока? На сколько должен измениться ток нагрузки, чтобы преобразователь перешел в другой режим работы?

3. Построить временные диаграммы тока дросселя, тока стока транзистора и напряжения сток-исток транзистора. При построении диаграмм переключение транзисторного ключа считать мгновенным (только в этом пункте!). Отобразить на диаграммах как минимум один период работы преобразователя в установившемся режиме. Показать на схеме эти токи и напряжение и их положительное направление.

4. Найти потери на переключение в транзисторе.

5. Найти индуктивность дросселя, исходя из заданной величины пульсаций тока в установившемся режиме работы преобразователя.

#### С.ПЭ.1.4

**Дано:** схема – двухтактный преобразователь постоянного напряжения, состоящий из мостового инвертора, трансформатора и выпрямителя, выполненного по схеме с выводом нулевой точки. На выходе выпрямителя установлен Г-образный LC-фильтр.

Частота коммутации силовых ключей инвертора 20 кГц; напряжение питания равно 380 В.

Ток нагрузки равен 10А. Напряжение нагрузки равно 100В. Длительность управляющих импульсов ключей инвертора равна  $0,3 \cdot T$ , где  $T$  – период следования этих импульсов.

Индуктивность дросселя выходного фильтра считать равна 700мкГн. Размах пульсаций напряжения нагрузки равен 0,5В (от максимума до минимума).

В качестве силовых ключей инвертора используются полевые n-канальные МДП-транзисторы с индуцированным каналом. Сопротивление открытого канала транзистора (в области насыщения) равно 40мОм.

При расчетах другими потерями в элементах преобразователя пренебречь. Ток намагничивания трансформатора считать пренебрежимо

малым. Индуктивность рассеяния трансформатора считать пренебрежимо малой.

1. Нарисовать схему преобразователя. Найти коэффициент трансформации трансформатора. При расчете коэффициента трансформации падением напряжения на транзисторе пренебречь.

2. Найти минимальный и максимальный на периоде токи дросселя. Преобразователь работает в режиме непрерывного тока или прерывистого тока? На сколько должна измениться индуктивность дросселя выходного фильтра, чтобы преобразователь перешел в другой режим работы?

3. Построить временные диаграммы тока дросселя, тока стока одного из транзисторов инвертора и напряжения сток-исток этого транзистора. При построении диаграмм переключение транзисторного ключа считать мгновенным. Отобразить на диаграммах как минимум один период работы преобразователя в установившемся режиме. Показать на схеме эти токи и напряжение и их положительное направление.

4. Найти действующий ток транзистора. Найти статические потери в транзисторе.

5. Найти емкость конденсатора фильтра, исходя из заданной величины пульсаций напряжения нагрузки в установившемся режиме работы преобразователя.

### С.ПЭ.1.5

**Дано:** схема – двухтактный преобразователь постоянного напряжения, состоящий из полумостового инвертора, трансформатора и выпрямителя, выполненного по схеме с выводом нулевой точки. На выходе выпрямителя установлен Г-образный LC-фильтр.

Частота коммутации силовых ключей инвертора 20 кГц; напряжение питания равно 600 В.

Ток нагрузки равен 10А. Напряжение нагрузки равно 100В. Длительность управляющих импульсов ключей инвертора равна  $0,4 \cdot T$ , где  $T$  – период следования этих импульсов.

Индуктивность дросселя выходного фильтра считать равна 700мкГн. Размах пульсаций напряжения нагрузки равен 0,5В (от максимума до минимума).

В качестве силовых ключей инвертора используются полевые n-канальные МДП-транзисторы с индуцированным каналом. Сопротивление открытого канала транзистора (в области насыщения) равно 25мОм.

При расчетах другими потерями в элементах преобразователя пренебречь. Ток намагничивания трансформатора считать пренебрежимо малым. Индуктивность рассеяния трансформатора считать пренебрежимо малой.

1. Нарисовать схему преобразователя. Найти коэффициент трансформации трансформатора. При расчете коэффициента трансформации падением напряжения на транзисторе пренебречь.

2. Найти минимальный и максимальный на периоде токи дросселя. Преобразователь работает в режиме непрерывного тока или прерывистого тока? На сколько должен измениться ток нагрузки, чтобы преобразователь перешел в другой режим работы?

3. Построить временные диаграммы тока дросселя, тока стока одного из транзисторов инвертора и напряжения сток-исток этого транзистора. При построении диаграмм переключение транзисторного ключа считать мгновенным. Отобразить на диаграммах как минимум один период работы преобразователя в установившемся режиме. Показать на схеме эти токи и напряжение и их положительное направление.

4. Найти действующий ток транзистора. Найти статические потери в транзисторе.

5. Найти емкость конденсатора фильтра, исходя из заданной величины пульсаций напряжения нагрузки в установившемся режиме работы преобразователя.

### С.ПЭ.1.6

**Дано:** схема – двухтактный преобразователь постоянного напряжения, состоящий из инвертора, построенного по схеме с нулевой точкой, трансформатора и выпрямителя, выполненного по мостовой схеме. На выходе выпрямителя установлен Г-образный LC-фильтр.

Частота коммутации силовых ключей инвертора 20 кГц; напряжение питания равно 72 В.

Ток нагрузки равен 4А. Напряжение нагрузки равно 300В. Длительность управляющих импульсов ключей инвертора равна  $0,4 \cdot T$ , где  $T$  – период следования этих импульсов.

Индуктивность дросселя выходного фильтра считать равна 1,5мГн. Размах пульсаций напряжения нагрузки равен 0,6 В (от максимума до минимума).

В качестве силовых ключей инвертора используются полевые n-канальные МДП-транзисторы с индуцированным каналом. Сопротивление открытого канала транзистора (в области насыщения) равно 18мОм.

При расчетах другими потерями в элементах преобразователя пренебречь. Ток намагничивания трансформатора считать пренебрежимо малым. Индуктивность рассеяния трансформатора считать пренебрежимо малой.

1. Нарисовать схему преобразователя. Найти коэффициент трансформации трансформатора. При расчете коэффициента трансформации падением напряжения на транзисторе пренебречь.

2. Найти минимальный и максимальный на периоде токи дросселя. Преобразователь работает в режиме непрерывного тока или прерывистого тока? На сколько должен измениться ток нагрузки, чтобы преобразователь перешел в другой режим работы?

3. Построить временные диаграммы тока дросселя, тока стока одного из транзисторов инвертора и напряжения сток-исток этого транзистора. При построении диаграмм переключение транзисторного ключа считать мгновенным. Отобразить на диаграммах как минимум один период работы преобразователя в установившемся режиме. Показать на схеме эти токи и напряжение и их положительное направление.

4. Найти действующий ток транзистора. Найти статические потери в транзисторе.

5. Найти емкость конденсатора фильтра, исходя из заданной величины пульсаций напряжения нагрузки в установившемся режиме работы преобразователя.

## Пример выполнения задания С.ПЭ.1.6

1. На рис. 2.1 показана принципиальная схема преобразователя.

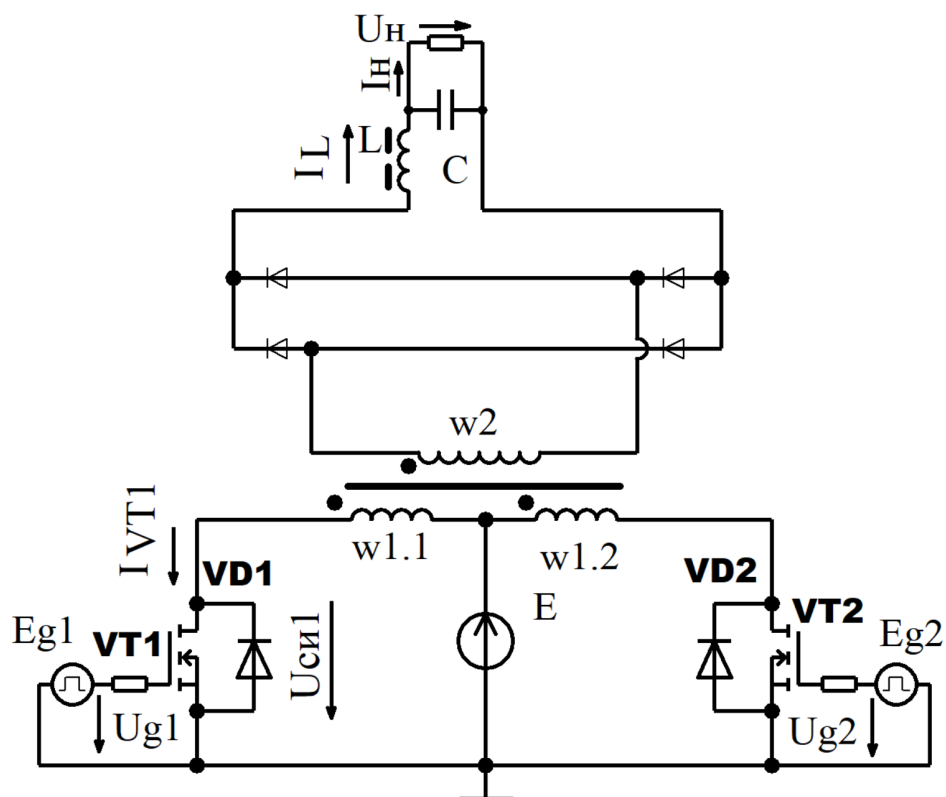


Рис. 2.1. Принципиальная схема преобразователя

Напряжение нагрузки (средняя величина этого напряжения) равно

$$U_n = K_{тр} \cdot E \cdot \gamma,$$

где  $K_{тр}$  – коэффициент трансформации,  $E$  – напряжение питания,  $\gamma$  – коэффициент заполнения.

Известно, что

$$\gamma = \frac{tu}{\frac{T}{2}}.$$

По данным задачи

$$tu = 0,4 \cdot T,$$

$$\gamma = \frac{0,4 \cdot T}{\frac{T}{2}} = 0,8.$$

Следовательно,

$$K_{mp} = \frac{U_H}{E \cdot \gamma} = \frac{300 \text{ В}}{72 \text{ В} \cdot 0,8} = 5,2.$$

2. В данном примере использован метод первой гармоники. По выбору абитуриента может быть использован другой корректный метод расчета.

Известно, что амплитуда пульсаций тока дросселя, приблизительно равная амплитуде первой гармоники, равна

$$I_{(1)m} = \frac{\frac{2}{\pi} \cdot K_{mp} \cdot E \cdot \sin(\gamma \cdot \pi)}{\omega \cdot L}.$$

Здесь  $L$  – индуктивность дросселя выходного фильтра;  $\omega$  – круговая (циклическая) частота пульсаций тока дросселя.

Учитывая, что преобразователь двухтактный, можно найти круговую частоту пульсаций

$$\omega = 2\pi \cdot 2 \cdot f = 2\pi \cdot 2 \cdot 20 \text{ кГц} = 251,2 \cdot 10^3 \frac{\text{рад}}{\text{с}},$$

$$I_{(1)m} = \frac{\frac{2}{\pi} \cdot 5,2 \cdot 72 \text{ В} \cdot \sin(0,8 \cdot \pi)}{251,2 \cdot 10^3 \frac{\text{рад}}{\text{с}} \cdot 1,5 \text{ мГн}} = 0,37 \text{ А}.$$

Средний ток дросселя равен току нагрузки

$$I_{LCP} = I_H = 4 \text{ А}.$$

Поэтому минимальный и максимальный токи дросселя равны

$$I_{min} = I_{LCP} - I_{(1)m} = 4 \text{ А} - 0,37 \text{ А} = 3,63 \text{ А},$$

$$I_{max} = I_{LCP} + I_{(1)m} = 4 \text{ А} + 0,37 \text{ А} = 4,37 \text{ А}.$$

Так как  $I_{min} > 0$ , преобразователь работает режиме непрерывного тока.

Чтобы преобразователь перешел в режим прерывистого тока, нужно, чтобы ток нагрузки был меньше граничного тока  $I_{нгр}$ .

Граничный режим работы достигается при  $I_{min} = 0$ , т.е. при

$$I_{LCP} - I_{(1)m} = 0,$$

$$I_{LCP} = I_{нгр} = I_{(1)m} = 0,37 \text{ А}.$$

Здесь  $I_{гр}=0,37 \text{ A}$  – граничный ток нагрузки.

Следовательно, преобразователь будет работать в режиме прерывистого тока, если

$$I_n < 0,37 \text{ A.}$$

3. Для данной схемы инвертора максимальное напряжение сток-исток транзистора  $U_{сiтaх}$  равно удвоенному напряжению питания, т.е.

$$U_{сiтaх} = 2 \cdot E = 2 \cdot 72 \text{ В} = 144 \text{ В.}$$

Минимальный и максимальный токи дросселя уже найдены

$$I_{min} = 3,63 \text{ A,}$$

$$I_{max} = 4,37 \text{ A.}$$

Ток транзистора имеет форму импульсов с длительностью

$$t_u = 0,4 \cdot T = 0,4 \cdot \frac{1}{f} = 20 \text{ мкс,}$$

Импульсы имеют форму трапеции с минимальным и максимальным ТОКОМ

$$I_{minVT} = I_{min} \cdot K_{mp} = 3,63 \text{ A} \cdot 5,2 = 18,9 \text{ A,}$$

$$I_{maxVT} = I_{max} \cdot K_{mp} = 4,37 \text{ A} \cdot 5,2 = 22,7 \text{ A.}$$

Приращение тока равно

$$\Delta I_{VT} = I_{maxVT} - I_{minVT} = 22,7 \text{ A} - 18,9 \text{ A} = 3,8 \text{ A.}$$

Средний на интервале проводимости транзистора ток равен

$$I_{VTcp} = I_n \cdot K_{mp} = 4 \text{ A} \cdot 5,2 = 20,8 \text{ A.}$$

На рис. 2.2 показаны требуемые временные диаграммы. На диаграммах  $U_{g1}$ ,  $U_{g2}$  – напряжения на выводах генераторов, подключенных к цепи затвора VT1, VT2 соответственно. В данном примере  $E_{g1}$ ,  $E_{g2}$  приведены, но их построение не является обязательным (в задании его нет).  $U_{сi1}$  – напряжение сток-исток VT1,  $I_L$  – ток дросселя L,  $I_{VT1}$  – ток стока транзистора VT1.

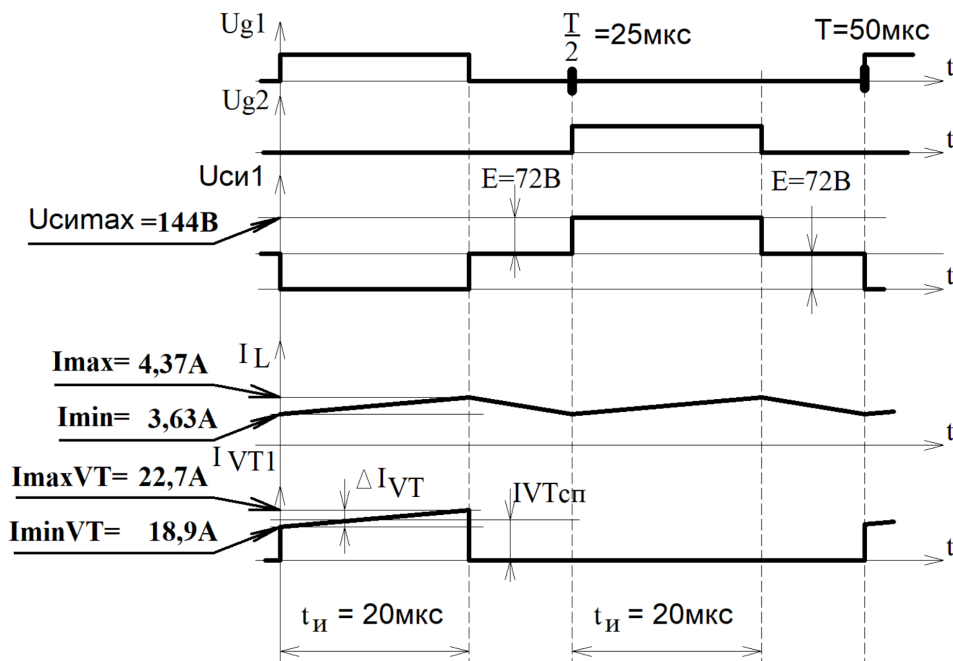


Рис. 2.2. Временные диаграммы

4. Ток транзистора имеет форму импульсов с длительностью

$$t_u = 0,4 \cdot T = 0,4 \cdot \frac{1}{f} = 20 \text{ мкс.}$$

Импульсы имеют форму трапеции с минимальным и максимальным  
ТОКОМ

$$I_{\min VT} = I_{\min} \cdot K_{mp} = 3,63 \text{ А} \cdot 5,2 = 18,9 \text{ А},$$

$$I_{\max VT} = I_{\max} \cdot K_{mp} = 4,37 \text{ А} \cdot 5,2 = 22,7 \text{ А}.$$

Приращение тока равно

$$\Delta I_{VT} = I_{\max VT} - I_{\min VT} = 22,7 \text{ А} - 18,9 \text{ А} = 3,8 \text{ А}.$$

Средний на интервале проводимости транзистора ток равен

$$I_{VTcp} = I_n \cdot K_{mp} = 4 \text{ А} \cdot 5,2 = 20,8 \text{ А}.$$

Известно, что действующая величина такой формы равна

$$I_{VT\theta} = \sqrt{\frac{t_u}{T}} \cdot \sqrt{I_{VTcp}^2 + \frac{\Delta I_{VT}^2}{12}} = \sqrt{\frac{0,4 \cdot T}{T}} \cdot \sqrt{(20,8 \text{ А})^2 + \frac{(3,8 \text{ А})^2}{12}} = 13,2 \text{ А}.$$

Статические в транзисторе потери фактически равны потерям  
проводимости

$$P_{VT} = I_{VT\theta}^2 \cdot R_{ON} = (13,2 \text{ А})^2 \cdot 0,018 \text{ Ом} = 3,1 \text{ Вт}.$$

5. Для расчета пульсаций в данном примере используется метод первой гармоники. По выбору сдающего экзамен, может быть использован другой корректный метод расчета. Требуемая величина коэффициента пульсации напряжения нагрузки

$$q_H = \frac{U_{(1)m}}{U_H},$$

где  $U_{(1)m}$  – амплитуда первой гармоники пульсаций напряжения нагрузки, удвоенная амплитуда равна размаху пульсаций

$$2 \cdot U_{(1)m} = 0,6 \text{ В},$$

$$U_{(1)m} = \frac{0,6 \text{ В}}{2} = 0,3 \text{ В},$$

$$q_H = \frac{U_{(1)m}}{U_H} = \frac{0,3 \text{ В}}{300 \text{ В}} = 0,1\%.$$

Для такого преобразователя известно, что коэффициент пульсации импульсного напряжения на входе фильтра имеет вид:

$$q_{вх} = \frac{\frac{2}{\pi} \cdot \sin(\gamma \cdot \pi)}{\gamma} = \frac{\frac{2}{\pi} \cdot \sin(0,8 \cdot \pi)}{0,8} = 46,9\%$$

Коэффициент сглаживания фильтра имеет вид:

$$S\phi = \frac{q_{вх}}{q_H} = \frac{46,9\%}{0,1\%} = 469.$$

С другой стороны,

$$S\phi = \omega^2 \cdot L \cdot C,$$

где  $C$  – емкость конденсатора фильтра.

Таким образом,

$$C = \frac{S\phi}{\omega^2 \cdot L} = \frac{469}{\left(251,2 \cdot 10^3 \frac{\text{рад}}{\text{с}}\right)^2 \cdot 1,5 \text{ мГн}} = 5 \text{ мкФ}.$$

## Задачи по теме «Импульсная схемотехника»

### С.ПЭ.2.1

#### Исходные данные:

1. транзистор T1 безинерционный;
2. диоды D1 и D2 идеальные;
3. напряжение источника питания:  $E=10\text{В}$ ;
4. нагрузка резистивная:  $R_H=1\text{кОм}$ ;
5. соотношение витков обмоток импульсного трансформатора TV1:  
 $w_1=w_2=w_3$ ;
6. индуктивность намагничивания импульсного трансформатора TV1:  $L_\mu=1\text{мГн}$ ;
7. амплитуда импульса положительного тока управления (тока базы):  $I_{B+}=1\text{мА}$ ;
8. длительность импульса тока управления:  $t_i=2\text{мкс}$ ;
9. пауза импульса тока управления:  $t_p=4\text{мкс}$ ;
10. коэффициент передачи тока базы:  $\beta=50$ .

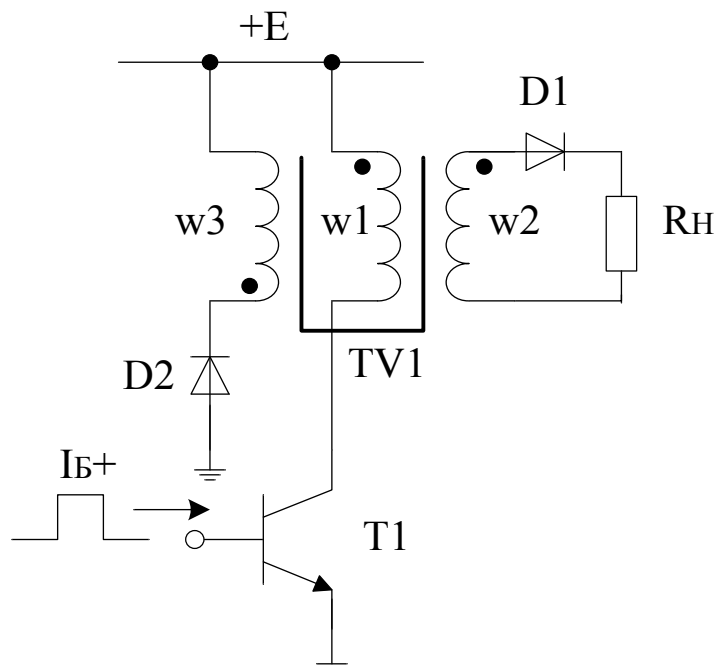


Рис. 2.3. Схема к расчёту задания 2.7

1. Определить значение максимального тока намагничивания трансформатора TV1.

2. Определить значение максимального тока коллектора транзистора T1 (максимум 6 баллов).

3. Определить максимальное напряжение на транзисторе T1 при его выключении (максимум 6 баллов).

4. Построить диаграмму тока коллектора транзистора T1 при его переключении, синхронизировав ее с импульсом тока управления (максимум 6 баллов).

5. Построить диаграмму напряжения на транзисторе T1 при его переключении, синхронизировав ее с импульсом тока управления (максимум 6 баллов).

### С.ПЭ.2.2

#### Исходные данные:

1. напряжение источника питания:  $E=10\text{В}$ ;
2. вывод управления (ножка 5 интегрального таймера) не используется и шунтирована конденсатором  $0,1\text{мкФ}$ ;
3. сопротивления резисторов времязадающей цепи мультивибратора:  $R1=5\text{кОм}$ ;  $R2=5\text{кОм}$ ;
4. емкость конденсатора времязадающей цепи мультивибратора:  $C1=2\text{нФ}$ .

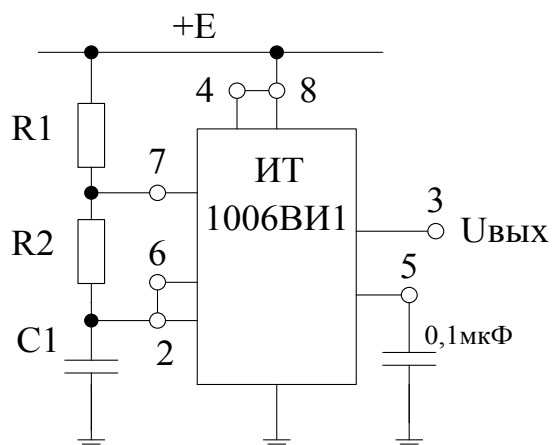


Рис. 2.4. Схема к расчёту задания 2.8

1. Определить длительность импульса  $t_{i0}$  мультивибратора при пуске (максимум 6 баллов).
2. Определить длительность импульса  $t_i$  мультивибратора в установившемся режиме работы (максимум 6 баллов).
3. Определить длительность паузы  $t_p$  мультивибратора в установившемся режиме работы (максимум 6 баллов).
4. Построить диаграмму напряжения на конденсаторе  $C_1$  времязадающей цепи (максимум 6 баллов).
5. Построить диаграмму выходного напряжения  $U_{\text{вых}}$  мультивибратора (максимум 6 баллов).

### С.ПЭ.2.3

#### Исходные данные:

1. операционный усилитель ОУ идеальный;
2. диод  $D_1$  идеальный;
3. напряжение источников питания ОУ:  $+E=15\text{В}$ ;  $-E=-15\text{В}$ ;
4. сопротивления резисторов одновибратора:  $R_1=1\text{кОм}$ ;  $R_2=3\text{кОм}$ ;  $R_3=3\text{кОм}$ ;
5. емкость конденсатора времязадающей цепи одновибратора:  $C_1=5\text{нФ}$ .

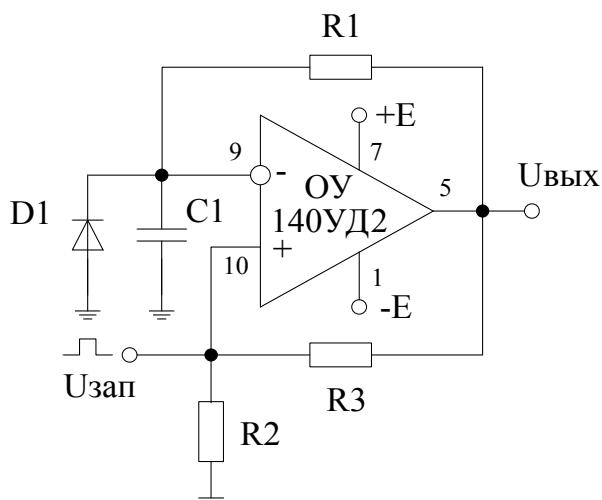


Рис. 2.5. Схема к расчёту задания 2.9

1. Определить устойчивое состояние выходной цепи одновибратора (максимум 6 баллов).
2. Определить длительность  $t_{и}$  формируемого импульса при запуске одновибратора (максимум 6 баллов).
3. Определить длительность времени восстановления  $t_{в}$  одновибратора (максимум 6 баллов).
4. Определить минимальную длительность периода запуска одновибратора (максимум 6 баллов).
5. Построить диаграмму напряжения  $U_{вых}$  на выходе ОУ (максимум 6 баллов).

### С.ПЭ.2.4

#### Исходные данные:

1. интегральный компаратор ИК идеальный;
2. диод D1 идеальный;
3. напряжение источника питания ИК:  $+E=10V$ ;
4. сопротивления резисторов одновибратора:  $R1=5k\Omega$ ;  $R2=5k\Omega$ ;  $R3=4k\Omega$ ;  $R4=1k\Omega$ ;
5. емкость конденсатора времязадающей цепи одновибратора:  $C1=3нФ$ .

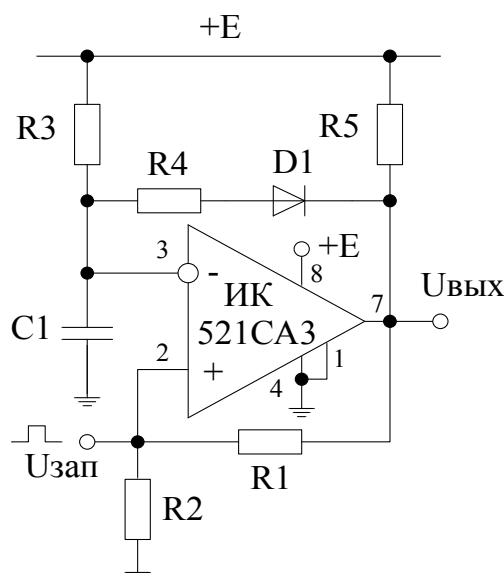


Рис. 2.6. Схема к расчёту задания 2.10

1. Определить устойчивое состояние выходной цепи одновибратора (максимум 6 баллов).
2. Определить длительность  $t_{и}$  формируемого импульса при запуске одновибратора (максимум 6 баллов).
3. Определить длительность времени восстановления  $t_{в}$  одновибратора (максимум 6 баллов).
4. Определить предельную частоту  $f_{пр.}$  запуска одновибратора (максимум 6 баллов).
5. Построить диаграмму напряжения  $U_c$  на конденсаторе  $C_1$  (максимум 6 баллов).

### С.ПЭ.2.5

#### Исходные данные:

1. операционный усилитель ОУ идеальный;
2. транзистор  $T_1$  цепи разряда безинерционный;
3. напряжение источников питания ОУ:  $+E=15В$ ;  $-E=-15В$ ;
4. сопротивления резисторов генератора:  $R_1=10кОм$ ;  $R_2=2кОм$ ;  $R_3=15кОм$ ;  $R_4=3кОм$ ;
5. емкость конденсатора  $C_1=1нФ$ ;
6. амплитуда импульса положительного тока управления (тока базы транзистора  $T_1$ ):  $I_{Б+}=0,1мА$ ;
7. длительность импульса тока управления:  $t_{и}=2мкс$ ;
8. пауза импульса тока управления:  $t_{п}=10мкс$ ;
9. коэффициент передачи тока базы транзистора  $T_1$ :  $\beta=60$ .

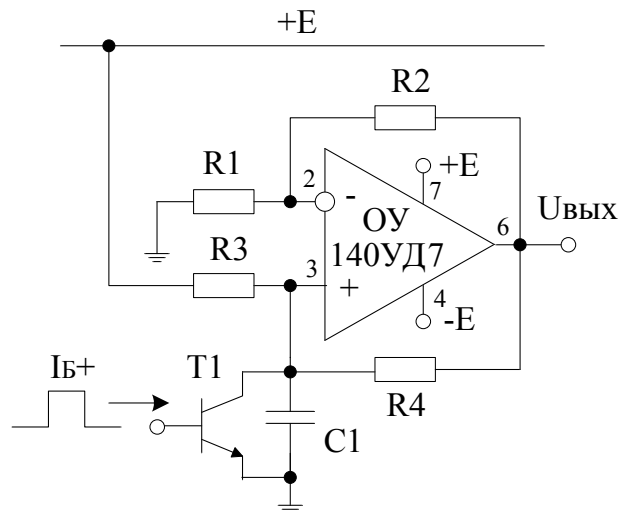


Рис. 2.7. Схема к расчёту задания 2.11

1. Определить условие заряда конденсатора  $C1$  постоянным током (максимум 6 баллов).
2. Определить максимально возможное напряжение линейного заряда конденсатора  $C1$  (максимум 6 баллов).
3. Определить напряжение на конденсаторе  $C1$  в конце длительности интервала прямого хода ГЛИН (максимум 6 баллов).
4. Определить длительность интервала обратного хода ГЛИН (максимум 6 баллов).
5. Построить диаграмму напряжения  $U_{\text{вых}}$  на выходе ОУ, синхронизировав ее с импульсом тока управления разрядного транзистора  $T1$  (максимум 6 баллов).

## Пример выполнения задания С.ПЭ.2.5

### Исходные данные:

1. интегральный компаратор ИК идеальный;
2. диод D1 идеальный;
3. напряжение источника питания ИК:  $+E=10\text{В}$ ;
4. сопротивления резисторов одновибратора:  $R1=5\text{кОм}$ ;  $R2=5\text{кОм}$ ;  $R3=4\text{кОм}$ ;  $R4=1\text{кОм}$ ;
5. емкость конденсатора времязадающей цепи одновибратора:  $C1=3\text{нФ}$ .

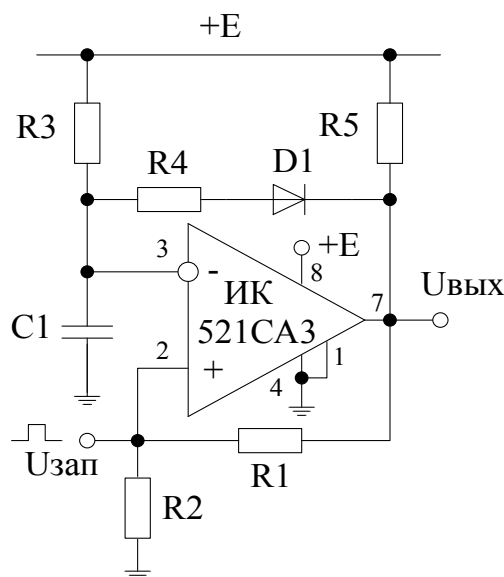


Рис. 2.8. Схема к расчёту задания 2.10

### 1. Определение устойчивого состояния выходной цепи одновибратора.

Предположим, что в исходном (устойчивом) состоянии схемы одновибратора выходной транзистор интегрального компаратора ИК насыщен и напряжение на выходе  $U_{\text{вых}}=0\text{В}$ . При этом напряжение на неинвертирующем входе ИК также равно нулю  $U_{+}=0\text{В}$ . Диод  $D_1$  находится в открытом состоянии. Если пренебречь падением напряжения на диоде  $D_1$  (диод  $D_1$  полагается идеальным), то напряжение на инвертирующем входе ИК задается делителем  $R_3$ - $R_4$  и равно  $U^{-}=ER_4/(R_3+R_4)=2\text{В}$ . Тогда

дифференциальное входное напряжение ИК (разность напряжений  $U^+$  и  $U^-$ ) меньше нуля, что подтверждает правильность начального предположения об исходном (устойчивом) состоянии схемы одновибратора.

## 2. Определение длительности $t_H$ формируемого импульса при запуске одновибратора.

При поступлении короткого сигнала запуска  $U_{зап}$  его положительный перепад повышает потенциал неинвертирующего входа ИК, что вызывает увеличение выходного напряжения  $U_{вых}$ . За счет цепи положительной обратной связи (резисторы  $R_1$  и  $R_2$ ) процесс развивается лавинообразно и на выходе одновибратора устанавливается напряжение  $U_{вых}=E=10В$ , а на инвертирующем входе ИК напряжение повышается до значения  $U^-=\gamma E=5В$ . Коэффициент деления равен  $\gamma=R_2/(R_1+R_2)=0,5$ . При этом диод  $D_1$  запирается и конденсатор  $C_1$  начинает заряжаться от источника питания  $+E$  через резистор  $R_3$ . Учитывая, что начальное напряжение на конденсаторе  $C_1$  равно  $U^-=ER_4/(R_3+R_4)=2В$ , уравнение заряда можно записать в следующем виде:

$$U_C^{зар}(t) = \left( \frac{ER_4}{R_3+R_4} \right) e^{\frac{-t}{C_1 R_3}} + E \left( 1 - e^{\frac{-t}{C_1 R_3}} \right).$$

Обратное опрокидывание наступает в момент равенства напряжений на входах ИК, что и определяет длительность формируемого положительного импульса  $t_H$  на выходе одновибратора. При этом  $U_C^{зар}=\gamma E$ . Откуда находится длительность импульса  $t_H$ :

$$t_H = C_1 R_3 \ln \frac{R_3}{(1-\gamma)(R_3+R_4)} = 5,64 \text{ мкс.}$$

## 3. Определение длительности времени восстановления $t_B$ одновибратора.

После обратного опрокидывания напряжения  $U_{вых}$  и  $U^+$  скачком уменьшаются до нулевого значения. При этом отпирается диод  $D_1$  и

конденсатор  $C_1$  начинает разряжаться по экспоненциальному закону от начального значения  $\gamma E$  до установившегося значения  $U = ER_4 / (R_3 + R_4)$  в соответствии с уравнением:

$$U_C^{\text{разр}}(t) = \gamma E e^{\frac{-t}{C_1(R_3 \vee R_4)}} + \left( \frac{ER_4}{R_3 + R_4} \right) \left( 1 - e^{\frac{-t}{C_1(R_3 \vee R_4)}} \right).$$

Тогда длительность времени восстановления  $t_B$  исходного состояния одновибратора можно оценить в три постоянных времени процесса разряда:

$$t_B = 3 C_1 (R_3 \vee R_4) = 7,2 \text{ мкс.}$$

#### 4. Определение предельной частоты $f_{\text{пр}}$ запуска одновибратора.

Определив длительности формируемого импульса  $t_{\text{и}}$  и времени восстановления  $t_B$ , предельную частоту  $f_{\text{пр}}$  запуска одновибратора можно рассчитать по формуле:

$$f_{\text{пр}} = \frac{1}{t_{\text{и}} + t_B} = 77,88 \text{ кГц.}$$

#### 5. Построение диаграммы напряжения $U_C$ на конденсаторе $C_1$ .

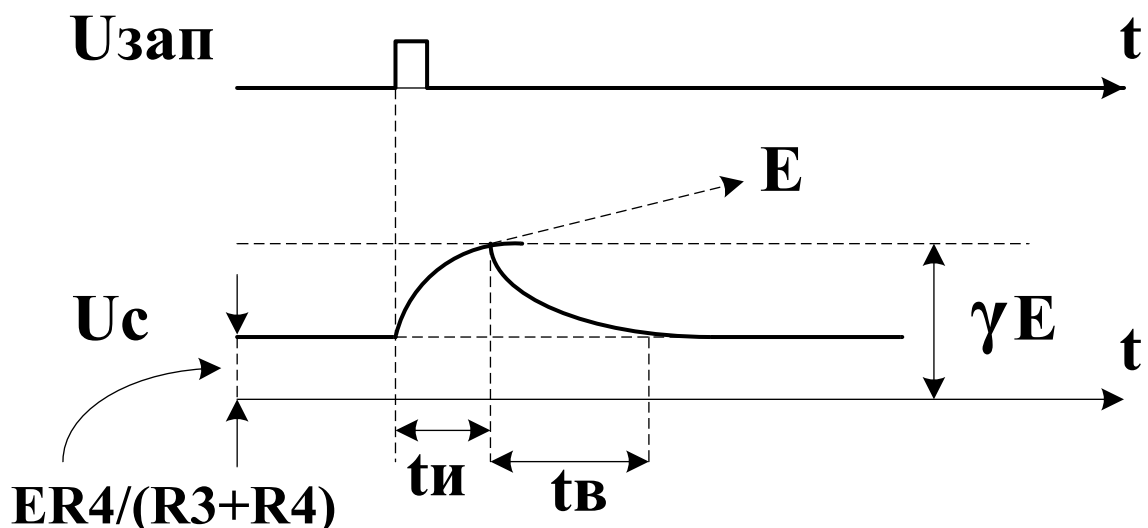


Рис. 2.9. Диаграмма напряжений к расчёту задания 2.10

## **С. Твердотельная микро- и наноэлектроника, лазерная и оптическая измерительная электроника**

Специальная часть содержит два модуля: «Твердотельная микро- и наноэлектроника» и «Лазерная и оптическая измерительная электроника».

Модуль «Твердотельная микро- и наноэлектроника» посвящён задачам цифровой схемотехники и языкам описания аппаратуры. Модуль содержит два раздела: «комбинационная логика» и «последовательностная логика».

Модуль «Лазерная и оптическая измерительная электроника» содержит задания по оптике.

### **Структура специальной части модуля «Твердотельная микро- и наноэлектроника»**

№ п/п	Наименование задания	Макс. количество баллов
С.ТМиН.1	Задание по теме «комбинационная логика»	
1	Условное графическое обозначение, таблица истинности, логическое выражение устройства.	6
2	Схема устройства на вентилях.	6
3	Расчёт критического пути устройства.	6
4	Поведенческое RTL-описание устройства.	6
5	Временная диаграмма работы устройства.	6
Итог по теме «комбинационная логика»:		30
С.ТМиН.2	Задание по теме «последовательностная логика»	
1	Условное графическое обозначение и таблица истинности триггера.	6
2	Временная диаграмма триггера.	6
3	Схема устройства на основе триггера.	6
4	Поведенческое RTL-описание устройства.	6
5	Временная диаграмма работы устройства.	6
Итог по теме «последовательностная логика»:		30
Итог по специальной части:		60

**С.ТМиН.1. Модуль «Твердотельная микро- и наноэлектроника». Тема  
«Комбинационная логика»**

1. Нарисуйте условное графическое обозначение устройства, приведите его таблицу истинности и логическое выражение для выходного сигнала.
2. Для сформированного логического выражения нарисуйте схему устройства, используя следующие логические вентили: инвертор, И, И-НЕ, ИЛИ и ИЛИ-НЕ.
3. Приведите предыдущую схему в базисе 2И-НЕ. Определите критический путь и рассчитайте максимальное время задержки формирования сигнала на выходе при условии, что элемент 2И-НЕ имеет время задержки распространения сигнала при переключении из 0 в 1 равное 2 нс, а при переключении из 1 в 0 — 1 нс.
4. Приведите поведенческое RTL-описание мультиплексора на любом языке описания аппаратуры (VHDL, Verilog, SystemVerilog).
5. Нарисуйте полную временную диаграмму, отображающую работу мультиплексора.

Задание выполняется для одного из следующих комбинационных устройств:

- С.ТМиН.1.1. Мультиплексор «из 4 в 1».
- С.ТМиН.1.2. Демультимплексора «из 1 в 4».
- С.ТМиН.1.3. Шифратор «из 4 в 2».
- С.ТМиН.1.4. Дешифратор «из 3 в 8».
- С.ТМиН.1.5. Одноразрядный комбинационный сумматор.

**С.ТМиН.2. Модуль «Твердотельная микро- и наноэлектроника». Тема  
«Последовательностная логика»**

1. Нарисуйте условное графическое обозначение динамического D-триггера, синхронизируемого по переднему фронту, с асинхронным сбросом, синхронизируемого по переднему фронту, с асинхронным сбросом; приведите его таблицу истинности.
2. Нарисуйте временную диаграмму, отображающую работу триггера.
3. Нарисуйте схему последовательностного устройства на основе этого триггера.
4. Приведите поведенческое RTL-описание последовательностного устройства из предыдущего пункта на любом языке описания аппаратуры (VHDL, Verilog, SystemVerilog).
5. Нарисуйте полную временную диаграмму, отображающую работу последовательностного устройства.

Задание выполняется для одного из следующих последовательностных устройств:

- С.ТМиН.2.1. Трёхразрядный реверсивный счётчик на базе.
- С.ТМиН.2.2. Четырёхразрядный суммирующий счётчик с коэффициентом (модулем) счёта 10.
- С.ТМиН.2.3. Четырёхразрядный регистр с параллельным вводом и параллельным выводом.
- С.ТМиН.2.4. Четырёхразрядный сдвиговый регистр (логический сдвиг вправо).
- С.ТМиН.2.5. Четырёхразрядный кольцевой регистр со сдвигом вправо и выводом направо

## Пример выполнения задания по модулю «Твердотельная микро- и наноэлектроника»

1. Нарисуйте условное графическое обозначение дешифратора «из 2 в 4», приведите его таблицу истинности и логические выражения для выходных сигналов.

Условное графическое обозначение дешифратора «из 2 в 4» приведено на рисунке 3.1.

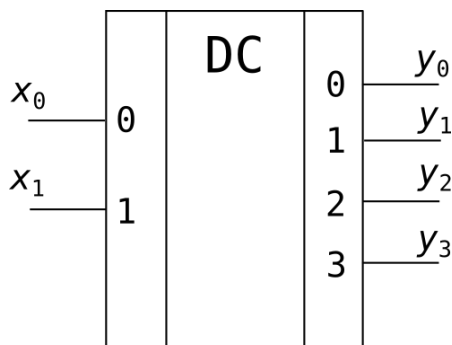


Рис. 3.1. условное графическое обозначение дешифратора «из 2 в 4»

Таблица истинности формируется на основе принципа работы дешифратора — на выходе формируется логическая «1» в той позиции, двоичный код которой определён входным сигналом в прямом двоичном коде. Таблица истинности приведена в таблице 3.1

Таблица 3.1 - Таблица истинности дешифратора «из 2 в 4»

$x_1$	$x_0$	$y_3$	$y_2$	$y_1$	$y_0$
0	0	0	0	0	1
0	1	0	0	1	0
1	0	0	1	0	0
1	1	1	0	0	0

Для получения логического выражения, описывающего работу дешифратора, можно сформировать совершенную дизъюнктивную нормальную форму и при помощи карты Карно её минимизировать. Для указанной таблицы истинности логические выражения для выходов будут следующими:

$$y_0 = \bar{x}_1 \cdot \bar{x}_0,$$

$$y_1 = \bar{x}_1 \cdot x_0,$$

$$y_2 = x_1 \cdot \bar{x}_0,$$

$$y_3 = x_1 \cdot x_0.$$

2. Для сформированных выражений нарисуйте устройство дешифратора на логических вентилях: инвертор, И, И-НЕ, ИЛИ и ИЛИ-НЕ.

На основе полученных выражений можно сформировать логическую схему дешифратора (рисунок 3.2).

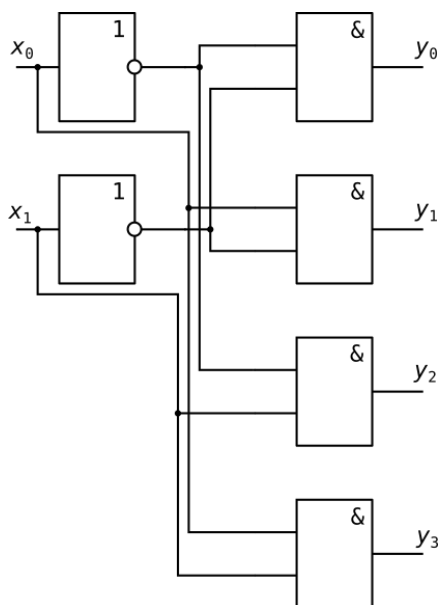


Рис. 3.2. Логическая схема дешифратора «из 2 в 4»

3. Приведите предыдущую схему в базисе 2И-НЕ. Определите критический путь и рассчитайте максимальное время задержки формирования сигнала на выходе при условии, что элемент 2И-НЕ имеет время задержки распространения сигнала при переключении из 0 в 1 равное 2 нс, а при переключении из 1 в 0 — 1 нс.

При формировании устройства дешифратора на элементах 2И-НЕ необходимо логические выражения для выходов переписать в указанном базисе:

$$y_0 = \bar{x}_1 \cdot \bar{x}_0 = \overline{\overline{\bar{x}_1} \cdot \overline{\bar{x}_0}},$$

$$y_1 = \bar{x}_1 \cdot x_0 = \overline{\overline{\bar{x}_1} \cdot \overline{x_0}},$$

$$y_2 = x_1 \cdot x_0 = \overline{\overline{x_1} \cdot \overline{x_0}},$$

$$y_3 = x_1 \cdot x_0 = \overline{\overline{x_1 \cdot x_0}}$$

Логическая схема в базисе 2И-НЕ приведена на рис. 3.3.

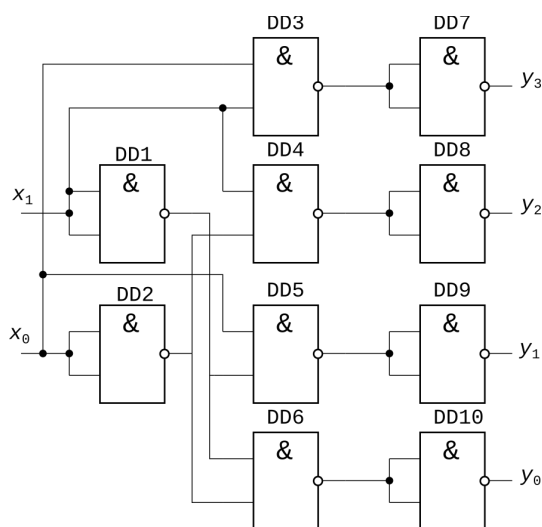


Рис. 3.3. Логическая схема дешифратора «из 2 в 4» в базисе 2И-НЕ

Критический путь определяется как путь прохождения сигнала через наибольшее число логических элементов от входного порта (пина) до выходного. Для указанной схемы на рисунке 3 очевидно, что такой путь занимает три подряд стоящие логических элемента. Таких путей несколько:  $x_1 - DD1 - DD5 - DD9 - y_1$ ,  $x_1 - DD1 - DD6 - DD10 - y_0$ ,  $x_0 - DD2 - DD4 - DD8 - y_2$ ,  $x_0 - DD2 - DD6 - DD10 - y_0$ .

Рассмотрим путь  $x_1 - DD1 - DD6 - DD10 - y_0$ . Элемент DD6 включён в качестве 2И-НЕ, в то время как элементы DD2 и DD10 – в качестве инверторов. Если на входе элемента DD6 сформирована комбинация  $\{DD1, DD2\} = \{00\}$  ( $x_1x_0 = 11$ ), то при изменении значения на одном из входов состояние выхода элемента не изменится. В случае, если на входе этого элемента комбинация  $\{DD1, DD2\} = \{01\}$  ( $x_1x_0 = 10$ ), то при изменении сигнала  $x_1$  с 1 на 0 состояние на выходе элемента DD6 изменится с 1 на 0, что приведёт к переключению элемента DD10 из 0 в 1. Аналогично будут переключаться все три элемента, если на входе элемента DD6 была комбинация  $\{11\}$ , которая при изменении состояния хотя бы на одном из

входов приведёт к переключению элемента из 0 в 1. Таким образом, для указанного пути возможны два варианта переключения:

1. DD1 – из 0 в 1, DD6 – из 1 в 0, а DD10 – из 0 в 1;
2. DD1 – из 1 в 0, DD6 – из 0 в 1, а DD10 – из 1 в 0.

С учётом того, что по условию задержка времени переключения из 0 в 1 составляет 2 нс, а из 1 в 0 - 1 нс, вариант 1 обеспечит наибольшую задержку распространения сигнала равную суммарному времени задержки формирования сигнала на выходах логических элементов, то есть  $t_{\max} = 2 + 1 + 2 = 5$  нс (для варианта 2  $t = 1 + 2 + 1 = 4$  нс). Таким образом,  $t_{\max} = 5$  нс.

4. Приведите поведенческое RTL-описание дешифратора на любом языке описания аппаратуры (VHDL, Verilog, SystemVerilog).

Ниже приведены листинги на трёх языках описания аппаратуры. При ответе на вопрос достаточно привести только один вариант.

Листинг 1 — Поведенческое RTL-описание на языке SystemVerilog

```
module decoder(x, y);  
input logic [1:0] x; //входные данные  
output logic [3:0] y; //выходные данные  
  
always_comb begin  
    case(x)  
        2'd0: y = 4'b0001;  
        2'd1: y = 4'b0010;  
        2'd2: y = 4'b0100;  
        2'd3: y = 4'b1000;  
        default: y = 4'b0000;  
    endcase  
end  
endmodule
```

Листинг 2 — Поведенческое RTL-описание на языке Verilog

```
module decoder(x, y);  
input wire [1:0] x; //входные данные  
output reg [3:0] y; //выходные данные  
  
always(*) begin  
    case(x)  
        2'd0: y = 4'b0001;  
        2'd1: y = 4'b0010;  
        2'd2: y = 4'b0100;  
        2'd3: y = 4'b1000;  
        default: y = 4'b0000;  
    endcase  
end  
endmodule
```

```
library IEEE;
use IEEE.std_logic_1164.all;

entity decoder is
    port( x : in std_logic_vector(1 downto 0);
          y : out std_logic_vector (3 downto 0)
        );
end decoder;

architecture behavioral of decoder is
begin
    with x select
        y <= «0001» when «00»,
            «0010» when «01»,
            «0100» when «10»,
            «1000» when «11»,
            «0000» when others;
end behavioral;
```

5. Нарисуйте временную диаграмму, отображающую работу дешифратора.

Временная диаграмма должна подтверждать таблицу истинности. Следовательно, необходимо перебрать все варианты входных сигналов:

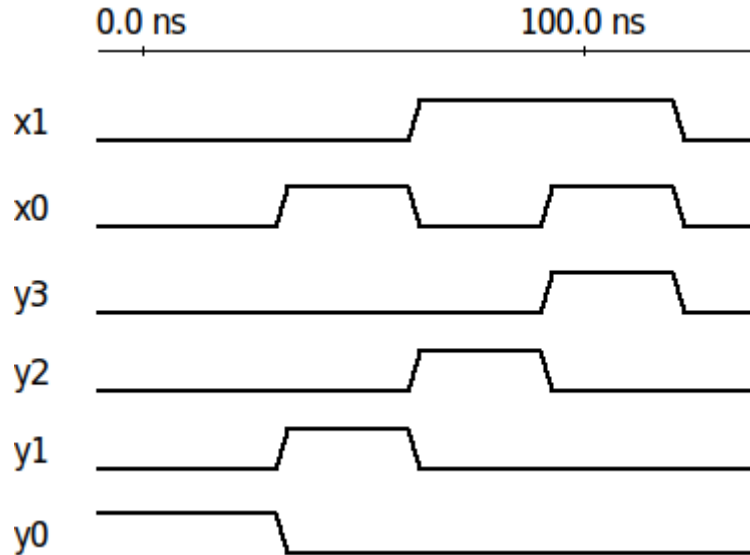


Рис. 3.4. Временная диаграмма работы дешифратора «из 2 в 4» (в виде отдельных сигналов)

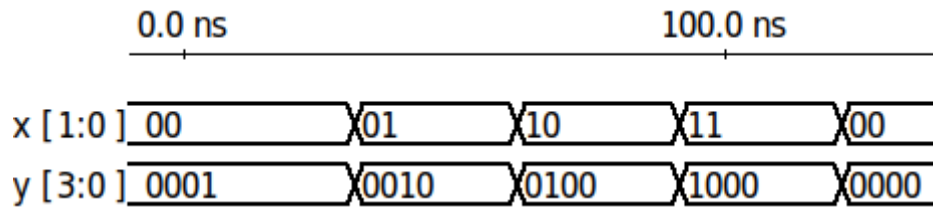


Рис. 3.5. Временная диаграмма работы дешифратора «из 2 в 4» (в виде входных и выходных шин данных)

## **С.ЛиОИЭ. Модуль Лазерная и оптическая измерительная электроника**

Вариант специальной части по данному модулю содержит пять заданий. Первые два задания содержат набор тестовых вопросов по теории оптики, каждое задание содержит пять тестовых вопросов. Тестовые вопросы выбираются случайным образом из категории вопросов «С.ЛиОИЭ. Тестовые теоретические вопросы на установление соответствия» или «С.ЛиОИЭ. Тестовые теоретические вопросы с выбором вариантов ответов». Завершающие три задания — это практические задачи, требующие численных расчётов. Среди них одно задание средней сложности и два задания повышенной сложности.

### **Структура специальной части модуля «Лазерная и оптическая измерительная электроника»**

№ п/п	Наименование задания	Максимальное количество баллов
1	Теоретический блок №1	
1.1	Тестовое задание	2
1.2	Тестовое задание	2
1.3	Тестовое задание	2
1.4	Тестовое задание	2
1.5	Тестовое задание	2
Итог по теоретическому блоку №1:		10
2	Теоретический блок №2	
2.1	Тестовое задание	2
2.2	Тестовое задание	2
2.3	Тестовое задание	2
2.4	Тестовое задание	2
2.5	Тестовое задание	2
Итог по теоретическому блоку №2:		10
3	С.ЛиОИЭ. Практическое задание средней сложности	12
4	С.ЛиОИЭ. Практическое задание высокой сложности	14
5	С.ЛиОИЭ. Практическое задание высокой сложности	14
Итог по специальной части:		60

**С.ЛиОИЭ. Тестовые теоретические вопросы с выбором вариантов  
ответов**

1. Главные оси линейного поляризатора называются:			
а)	Быстрая ось	<input type="checkbox"/> Да	<input type="checkbox"/> Нет
б)	Ось поглощения	<input type="checkbox"/> Да	<input type="checkbox"/> Нет
в)	Медленная ось	<input type="checkbox"/> Да	<input type="checkbox"/> Нет
г)	Ось пропускания	<input type="checkbox"/> Да	<input type="checkbox"/> Нет
д)	Ось усиления	<input type="checkbox"/> Да	<input type="checkbox"/> Нет

2. Какие из перечисленных оптических элементов являются поляризационными?			
а)	Линза	<input type="checkbox"/> Да	<input type="checkbox"/> Нет
б)	Призма Рошона	<input type="checkbox"/> Да	<input type="checkbox"/> Нет
в)	Дисперсионная призма	<input type="checkbox"/> Да	<input type="checkbox"/> Нет
г)	Фазовая пластинка	<input type="checkbox"/> Да	<input type="checkbox"/> Нет
д)	Зеркало	<input type="checkbox"/> Да	<input type="checkbox"/> Нет

3. Изображение является стигматическим, если:			
а)	гомоцентрический пучок лучей после прохождения оптической системы остался гомоцентрическим	<input type="checkbox"/> Да	<input type="checkbox"/> Нет
б)	гомоцентрический пучок лучей после прохождения оптической системы перестал быть гомоцентрическим	<input type="checkbox"/> Да	<input type="checkbox"/> Нет
в)	каждой точке предмета соответствует только одна точка изображения	<input type="checkbox"/> Да	<input type="checkbox"/> Нет
г)	каждой точке предмета соответствует несколько точек изображения	<input type="checkbox"/> Да	<input type="checkbox"/> Нет
д)	каждой точке изображения соответствует несколько точек предмета	<input type="checkbox"/> Да	<input type="checkbox"/> Нет

4. Оптическая система называется центрированной, если:			
а)	все преломляющие и отражающие поверхности являются поверхностями вращения	<input type="checkbox"/> Да	<input type="checkbox"/> Нет
б)	все преломляющие и отражающие поверхности имеют общую ось вращения	<input type="checkbox"/> Да	<input type="checkbox"/> Нет
в)	преломляющие и отражающие поверхности могут иметь разные оси вращения	<input type="checkbox"/> Да	<input type="checkbox"/> Нет
г)	преломляющие и отражающие поверхности могут не являться поверхностями вращения	<input type="checkbox"/> Да	<input type="checkbox"/> Нет

5. К кардинальным элементам идеальной оптической системы относятся:			
а)	фокусы	<input type="checkbox"/> Да	<input type="checkbox"/> Нет
б)	главные точки	<input type="checkbox"/> Да	<input type="checkbox"/> Нет
в)	узловые точки	<input type="checkbox"/> Да	<input type="checkbox"/> Нет
г)	осевая точка предмета	<input type="checkbox"/> Да	<input type="checkbox"/> Нет
д)	осевая точка изображения	<input type="checkbox"/> Да	<input type="checkbox"/> Нет

6. Какие из перечисленных видов поляризации электромагнитного излучения существуют?			
а)	Квадратная	<input type="checkbox"/> существует	<input type="checkbox"/> не существует
б)	Круговая	<input type="checkbox"/> существует	<input type="checkbox"/> не существует
в)	Линейная	<input type="checkbox"/> существует	<input type="checkbox"/> не существует
г)	Эллиптическая	<input type="checkbox"/> существует	<input type="checkbox"/> не существует
д)	Треугольная	<input type="checkbox"/> существует	<input type="checkbox"/> не существует

7. Чтобы произошла интерференция двух волн, должны быть выполнены условия:			
а)	При интерференции у волн должны быть разные длины волн	<input type="checkbox"/> Да	<input type="checkbox"/> Нет
б)	Волны должны быть когерентны	<input type="checkbox"/> Да	<input type="checkbox"/> Нет

в)	Поляризация волн должна совпадать	<input type="checkbox"/> Да	<input type="checkbox"/> Нет
г)	Волны должны быть с одинаковой амплитудой	<input type="checkbox"/> Да	<input type="checkbox"/> Нет
д)	Волны должны иметь одинаковый фазовый фронт	<input type="checkbox"/> Да	<input type="checkbox"/> Нет
8. К кардинальным элементам идеальной оптической системы относятся:			
а)	фокальные плоскости	<input type="checkbox"/> Да	<input type="checkbox"/> Нет
б)	главные плоскости	<input type="checkbox"/> Да	<input type="checkbox"/> Нет
в)	узловые плоскости	<input type="checkbox"/> Да	<input type="checkbox"/> Нет
г)	плоскость предмета	<input type="checkbox"/> Да	<input type="checkbox"/> Нет
д)	плоскость изображения	<input type="checkbox"/> Да	<input type="checkbox"/> Нет

9. Выберите верные утверждения. Оптическая сила системы, состоящей из двух тонких положительных линз, расположенных на конечном расстоянии друг от друга,			
а)	всегда положительная	<input type="checkbox"/> Да	<input type="checkbox"/> Нет
б)	всегда отрицательная	<input type="checkbox"/> Да	<input type="checkbox"/> Нет
в)	зависит от положения предмета	<input type="checkbox"/> Да	<input type="checkbox"/> Нет
г)	зависит от расстояния между линзами	<input type="checkbox"/> Да	<input type="checkbox"/> Нет
д)	зависит от показателей преломления сред, которые разделены линзами	<input type="checkbox"/> Да	<input type="checkbox"/> Нет

10. Какие приближения дифракционного интеграла Кирхгофа существуют?			
а)	Приближение Ньютона	<input type="checkbox"/> существует	<input type="checkbox"/> не существует
б)	Приближение Френеля	<input type="checkbox"/> существует	<input type="checkbox"/> не существует
в)	Приближение Фраунгофера	<input type="checkbox"/> существует	<input type="checkbox"/> не существует
г)	Приближение Паскаля	<input type="checkbox"/> существует	<input type="checkbox"/> не существует
д)	Приближение Планка	<input type="checkbox"/> существует	<input type="checkbox"/> не существует

11. Фаза плоской электромагнитной волны включает в себя:			
а)	Циклическую частоту	<input type="checkbox"/> Да	<input type="checkbox"/> Нет
б)	Амплитуду колебаний	<input type="checkbox"/> Да	<input type="checkbox"/> Нет
в)	Волновое число	<input type="checkbox"/> Да	<input type="checkbox"/> Нет

г)	Мощность излучения	<input type="checkbox"/> Да	<input type="checkbox"/> Нет
д)	Интенсивность излучения	<input type="checkbox"/> Да	<input type="checkbox"/> Нет

12. К кардинальным элементам идеальной оптической системы **не** относятся

а)	фокальные плоскости	<input type="checkbox"/> Не относится	<input type="checkbox"/> Относится
б)	главные плоскости	<input type="checkbox"/> Не относится	<input type="checkbox"/> Относится
в)	узловые плоскости	<input type="checkbox"/> Не относится	<input type="checkbox"/> Относится
г)	плоскость предмета	<input type="checkbox"/> Не относится	<input type="checkbox"/> Относится
д)	плоскость изображения	<input type="checkbox"/> Не относится	<input type="checkbox"/> Относится

13. Предмет расположен на двойном фокусном расстоянии от тонкой положительной линзы. Выберите верные утверждения, описывающие свойства изображения

а)	Изображение действительное	<input type="checkbox"/> Да	<input type="checkbox"/> Нет
б)	Изображение мнимое	<input type="checkbox"/> Да	<input type="checkbox"/> Нет
в)	Изображение перевёрнутое	<input type="checkbox"/> Да	<input type="checkbox"/> Нет
г)	Изображение прямое	<input type="checkbox"/> Да	<input type="checkbox"/> Нет
д)	Модуль линейного увеличения равен 1	<input type="checkbox"/> Да	<input type="checkbox"/> Нет

14. Укажите, какие из приведённых ниже линз являются положительными (считать, что линза изготовлена из оптически прозрачного стекла и находится в воздухе)

а)	двояковыпуклая	<input type="checkbox"/> Положительная	<input type="checkbox"/> Отрицательная
б)	двояковогнутая	<input type="checkbox"/> Положительная	<input type="checkbox"/> Отрицательная
в)	плосковыпуклая	<input type="checkbox"/> Положительная	<input type="checkbox"/> Отрицательная
г)	плосковогнутая	<input type="checkbox"/> Положительная	<input type="checkbox"/> Отрицательная

15. В дисперсионных средах от частоты излучения зависит

а)	Фазовая скорость волны	<input type="checkbox"/> Да	<input type="checkbox"/> Нет
б)	Мощность излучения	<input type="checkbox"/> Да	<input type="checkbox"/> Нет
в)	Интенсивность излучения	<input type="checkbox"/> Да	<input type="checkbox"/> Нет

г)	Показатель преломления среды	<input type="checkbox"/> Да	<input type="checkbox"/> Нет
д)	Угол преломления волны	<input type="checkbox"/> Да	<input type="checkbox"/> Нет

16. От каких параметров зависит дифракционная расходимость излучения при дифракции на щели?

а)	От мощности излучения	<input type="checkbox"/> Да	<input type="checkbox"/> Нет
б)	От длины волны излучения	<input type="checkbox"/> Да	<input type="checkbox"/> Нет
в)	От интенсивности излучения	<input type="checkbox"/> Да	<input type="checkbox"/> Нет
г)	От размера щели	<input type="checkbox"/> Да	<input type="checkbox"/> Нет
д)	От амплитуды падающей волны	<input type="checkbox"/> Да	<input type="checkbox"/> Нет

17. К кардинальным элементам идеальной оптической системы **не** относятся:

а)	фокусы	<input type="checkbox"/> Не относится	<input type="checkbox"/> Относится
б)	главные точки	<input type="checkbox"/> Не относится	<input type="checkbox"/> Относится
в)	узловые точки	<input type="checkbox"/> Не относится	<input type="checkbox"/> Относится
г)	осевая точка предмета	<input type="checkbox"/> Не относится	<input type="checkbox"/> Относится
д)	осевая точка изображения	<input type="checkbox"/> Не относится	<input type="checkbox"/> Относится

18. Укажите, какие из приведённых ниже линз являются отрицательными (считать, что линза изготовлена из оптически прозрачного стекла и находится в воздухе).

а)	двойковыпуклая	<input type="checkbox"/> Да	<input type="checkbox"/> Нет
б)	двойковогнутая	<input type="checkbox"/> Да	<input type="checkbox"/> Нет
в)	плосковыпуклая	<input type="checkbox"/> Да	<input type="checkbox"/> Нет
г)	плосковогнутая	<input type="checkbox"/> Да	<input type="checkbox"/> Нет

19. На какие волны разделяется неполяризованное излучение, попадающее в анизотропную среду?

а)	Монохроматическая волна	<input type="checkbox"/> Да	<input type="checkbox"/> Нет
б)	Плоская волна	<input type="checkbox"/> Да	<input type="checkbox"/> Нет
в)	Сферическая волна	<input type="checkbox"/> Да	<input type="checkbox"/> Нет

г)	Обыкновенная волна	<input type="checkbox"/> Да	<input type="checkbox"/> Нет
д)	Необыкновенная волна	<input type="checkbox"/> Да	<input type="checkbox"/> Нет

20. Укажите верные утверждения. В случае реальной оптической системы...

а)	изображения осевой точки предмета, построенное лучами, идущими под разными углами к оптической оси, будут лежать в разных местах вдоль оптической оси	<input type="checkbox"/> Да	<input type="checkbox"/> Нет
б)	положение изображения осевой точки предмета, построенное лучами, идущими под разными углами к оптической оси, не зависит от угла	<input type="checkbox"/> Да	<input type="checkbox"/> Нет
в)	гомоцентрический пучок лучей, выходящий из осевой точки предмета, после прохождения сферической преломляющей поверхности теряет свою гомоцентричность	<input type="checkbox"/> Да	<input type="checkbox"/> Нет
г)	гомоцентрический пучок лучей, выходящий из осевой точки предмета, после прохождения сферической преломляющей поверхности остаётся гомоцентрическим	<input type="checkbox"/> Да	<input type="checkbox"/> Нет

21. Выберите верные утверждения. Первый и второй параосевые лучи

а)	являются фиктивными	<input type="checkbox"/> Да	<input type="checkbox"/> Нет
б)	являются действительными	<input type="checkbox"/> Да	<input type="checkbox"/> Нет
в)	преломляются на фиктивных главных плоскостях	<input type="checkbox"/> Да	<input type="checkbox"/> Нет
г)	преломляются на преломляющих плоскостях	<input type="checkbox"/> Да	<input type="checkbox"/> Нет

22. Выберите верные утверждения. Оптическая сила толстой линзы зависит от

а)	радиусов кривизны её преломляющих поверхностей	<input type="checkbox"/> Да	<input type="checkbox"/> Нет
б)	её толщины	<input type="checkbox"/> Да	<input type="checkbox"/> Нет
в)	показателей преломления сред, которые она разделяет	<input type="checkbox"/> Да	<input type="checkbox"/> Нет
г)	положения предмета	<input type="checkbox"/> Да	<input type="checkbox"/> Нет

23. Какие из указанных осей фазовой пластинки являются главными?			
а)	Быстрая ось	<input type="checkbox"/> Да	<input type="checkbox"/> Нет
б)	Ось поглощения	<input type="checkbox"/> Да	<input type="checkbox"/> Нет
в)	Медленная ось	<input type="checkbox"/> Да	<input type="checkbox"/> Нет
г)	Ось пропускания	<input type="checkbox"/> Да	<input type="checkbox"/> Нет
д)	Ось усиления	<input type="checkbox"/> Да	<input type="checkbox"/> Нет

24. Какие из перечисленных свойств присущи электромагнитным волнам?			
а)	Монохроматичность	<input type="checkbox"/> Да	<input type="checkbox"/> Нет
б)	Нагретость	<input type="checkbox"/> Да	<input type="checkbox"/> Нет
в)	Поляризация	<input type="checkbox"/> Да	<input type="checkbox"/> Нет
г)	Упругость	<input type="checkbox"/> Да	<input type="checkbox"/> Нет
д)	Когерентность	<input type="checkbox"/> Да	<input type="checkbox"/> Нет

25. Какие утверждения являются <b>неверными</b> ? Апертурная диафрагма ...			
а)	всегда располагается в пространстве предметов	<input type="checkbox"/> Неверно	<input type="checkbox"/> Верно
б)	всегда располагается в пространстве изображений	<input type="checkbox"/> Неверно	<input type="checkbox"/> Верно
в)	диафрагма, ограничивающая наибольшим образом пучок лучей, идущий из осевой точки предмета	<input type="checkbox"/> Неверно	<input type="checkbox"/> Верно
г)	располагается в плоскости предмета	<input type="checkbox"/> Неверно	<input type="checkbox"/> Верно

26. Выберите верные утверждения. Входной зрачок ...			
а)	всегда располагается в пространстве предметов	<input type="checkbox"/> Да	<input type="checkbox"/> Нет
б)	может находиться в пространстве изображений	<input type="checkbox"/> Да	<input type="checkbox"/> Нет
в)	совпадает с положением апертурной диафрагмы, если она располагается в пространстве предметов	<input type="checkbox"/> Да	<input type="checkbox"/> Нет

г)	совпадает с положением плоскости предмета	<input type="checkbox"/> Да	<input type="checkbox"/> Нет
----	---	-----------------------------	------------------------------

27. Выберите верные утверждения. Полевая диафрагма ...			
а)	может совпадать с положением предмета	<input type="checkbox"/> Да	<input type="checkbox"/> Нет
б)	может совпадать с положением изображения	<input type="checkbox"/> Да	<input type="checkbox"/> Нет
в)	приводит к перераспределению освещенности в плоскости изображения	<input type="checkbox"/> Да	<input type="checkbox"/> Нет
г)	может располагаться в любой плоскости, сопряженной с плоскостью предмета или плоскостью изображения	<input type="checkbox"/> Да	<input type="checkbox"/> Нет

28. С помощью формул Френеля можно определить:			
а)	Коэффициент усиления среды	<input type="checkbox"/> Да	<input type="checkbox"/> Нет
б)	Энергетический коэффициент отражения от границы раздела двух сред	<input type="checkbox"/> Да	<input type="checkbox"/> Нет
в)	Показатель преломления среды	<input type="checkbox"/> Да	<input type="checkbox"/> Нет
г)	Показатель поглощения среды	<input type="checkbox"/> Да	<input type="checkbox"/> Нет
д)	Энергетический коэффициент пропускания на границе раздела двух сред	<input type="checkbox"/> Да	<input type="checkbox"/> Нет

29. Какие из перечисленных интерферометров существуют?			
а)	Интерферометр Больцмана	<input type="checkbox"/> существует	<input type="checkbox"/> не существует
б)	Интерферометр Жамена	<input type="checkbox"/> существует	<input type="checkbox"/> не существует
в)	Интерферометр Майкельсона	<input type="checkbox"/> существует	<input type="checkbox"/> не существует
г)	Интерферометр Ньютона	<input type="checkbox"/> существует	<input type="checkbox"/> не существует
д)	Интерферометр Фабри-Перо	<input type="checkbox"/> существует	<input type="checkbox"/> не существует

30. Выберите верные утверждения. Телескопическая система...			
а)	это система, которая преобразует параллельный пучок, падающий на системы, в параллельный пучок, выходящий из системы	<input type="checkbox"/> Да	<input type="checkbox"/> Нет
б)	это система, которая не имеет действительных фокусов	<input type="checkbox"/> Да	<input type="checkbox"/> Нет

в)	состоит из объектива и окуляра	<input type="checkbox"/> Да	<input type="checkbox"/> Нет
г)	строит изображение близко расположенных предметов	<input type="checkbox"/> Да	<input type="checkbox"/> Нет
31. Выберите верные утверждения. Выходной зрачок ...			
а)	совпадает с положением плоскости изображения	<input type="checkbox"/> Да	<input type="checkbox"/> Нет
б)	совпадает с положением апертурной диафрагмы, если она располагается в пространстве изображений	<input type="checkbox"/> Да	<input type="checkbox"/> Нет
в)	всегда находится в пространстве изображений	<input type="checkbox"/> Да	<input type="checkbox"/> Нет
г)	может находиться в пространстве предметов	<input type="checkbox"/> Да	<input type="checkbox"/> Нет

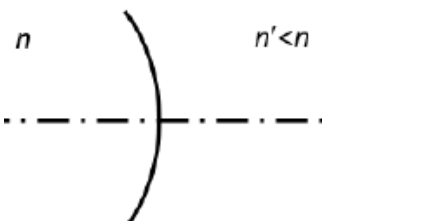
32. При габаритном расчете трубы Галилея задаются некоторые исходные величины. Установить соответствие между этими величинами и их обозначениями			
1) $L$ 2) $\Gamma_T$ 3) $D$ 4) $2\omega$			
а)	Видимое увеличение телескопической системы	<input type="checkbox"/> Да	<input type="checkbox"/> Нет
б)	Длина системы	<input type="checkbox"/> Да	<input type="checkbox"/> Нет
в)	Угловое поле пространства изображений	<input type="checkbox"/> Да	<input type="checkbox"/> Нет
г)	Диаметр входного зрачка	<input type="checkbox"/> Да	<input type="checkbox"/> Нет

33. Какие из перечисленных величин входят в закон Бугера-Ламберта-Бера?			
а)	Температура среды	<input type="checkbox"/> Да	<input type="checkbox"/> Нет
б)	Интенсивность падающего излучения	<input type="checkbox"/> Да	<input type="checkbox"/> Нет
в)	Показатель поглощения среды	<input type="checkbox"/> Да	<input type="checkbox"/> Нет
г)	Показатель преломления среды	<input type="checkbox"/> Да	<input type="checkbox"/> Нет
д)	Расстояние, прошедшее волной в поглощающей среде	<input type="checkbox"/> Да	<input type="checkbox"/> Нет

34. Какая разность фаз между компонентами вектора электрической напряженности $E_x$ и $E_y$ соответствует электромагнитной волне, поляризованной по левому или правому кругу?			
а)	$\pi/3$	<input type="checkbox"/> Да	<input type="checkbox"/> Нет
б)	0	<input type="checkbox"/> Да	<input type="checkbox"/> Нет
в)	$\pi/2$	<input type="checkbox"/> Да	<input type="checkbox"/> Нет

г)	$-\pi/2$	<input type="checkbox"/> Да	<input type="checkbox"/> Нет
д)	$\pi$	<input type="checkbox"/> Да	<input type="checkbox"/> Нет
35. Являются ли утверждения, приведённые ниже, верными?			
а)	При составлении матрицы оптической системы, вначале перемножаются все матрицы преломления, а потом все матрицы перемещения.	<input type="checkbox"/> Да	<input type="checkbox"/> Нет
б)	При составлении матрицы оптической системы, вначале перемножаются все матрицы перемещения, а потом все матрицы преломления	<input type="checkbox"/> Да	<input type="checkbox"/> Нет
в)	При составлении матрицы оптической системы матрицы берутся порядке, соответствующем следованию луча.	<input type="checkbox"/> Да	<input type="checkbox"/> Нет
г)	При составлении матрицы оптической системы матрицы берутся в порядке, обратном следованию луча.	<input type="checkbox"/> Да	<input type="checkbox"/> Нет

36. Укажите, в каких случаях преломляющая поверхность будет иметь положительную оптическую силу			
а)		<input type="checkbox"/> Положительная оптическая сила	<input type="checkbox"/> Отрицательная оптическая сила
б)		<input type="checkbox"/> Положительная оптическая сила	<input type="checkbox"/> Отрицательная оптическая сила
в)		<input type="checkbox"/> Положительная оптическая сила	<input type="checkbox"/> Отрицательная оптическая сила

г)		<input type="checkbox"/> Положительная оптическая сила	<input type="checkbox"/> Отрицательная оптическая сила
----	---	---	---

37. Какие из перечисленных систем излучают электромагнитные волны?			
а)	Заряд, движущийся равномерно	<input type="checkbox"/> Излучает	<input type="checkbox"/> Не излучает
б)	Заряд, движущийся ускоренно	<input type="checkbox"/> Излучает	<input type="checkbox"/> Не излучает
в)	Колеблющийся диполь	<input type="checkbox"/> Излучает	<input type="checkbox"/> Не излучает
г)	Покоящийся заряд	<input type="checkbox"/> Излучает	<input type="checkbox"/> Не излучает
д)	Покоящийся диполь	<input type="checkbox"/> Излучает	<input type="checkbox"/> Не излучает

38. Какие из перечисленных видов анизотропных кристаллов существуют?			
а)	Четырехосные	<input type="checkbox"/> существуют	<input type="checkbox"/> не существуют
б)	Пятиосные	<input type="checkbox"/> существуют	<input type="checkbox"/> не существуют
в)	Шестиосные	<input type="checkbox"/> существуют	<input type="checkbox"/> не существуют
г)	Одноосные	<input type="checkbox"/> существуют	<input type="checkbox"/> не существуют
д)	Двуосные	<input type="checkbox"/> существуют	<input type="checkbox"/> не существуют

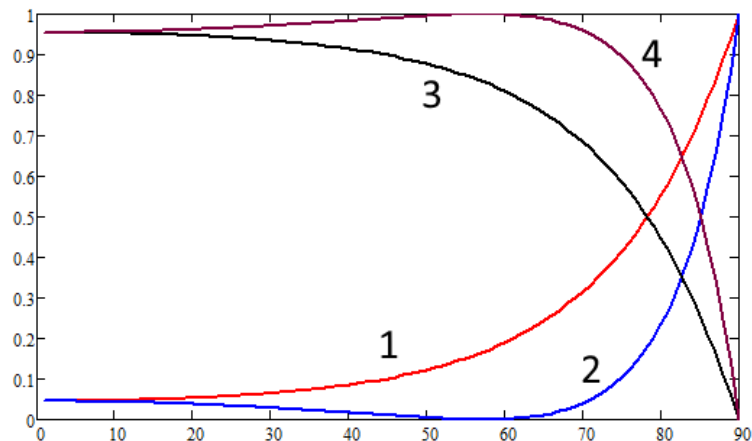
**С.ЛиОИЭ. Тестовые теоретические вопросы на установление  
соответствия**

1. Расположите значения разности хода двух волн в точке, где происходит их интерференция, в порядке возрастания результирующей интенсивности.

- 1)  $\lambda/2$ ;
- 2)  $3\lambda$ ;
- 3)  $3\lambda/5$ ;
- 4)  $3\lambda/7$ ;
- 5)  $\lambda/8$ .

а)	Наименьшая интенсивность	
б)	Интенсивность чуть выше минимальной	
в)	Интенсивность ещё выше	
г)	Интенсивность близка к наибольшей	
д)	Наибольшая интенсивность	

2. Установите соответствие между энергетическими коэффициентами отражения и пропускания s- и p-компонент поляризации и номерами графиков их зависимости от угла падения на границу раздела воздух-диэлектрик.



а)	Коэф. пропускания s-компоненты $\tau_s$	
б)	Коэф. пропускания p-компоненты $\tau_p$	
в)	Коэф. отражения s-компоненты $\rho_s$	
г)	Коэф. отражения p-компоненты $\rho_p$	

3. Установите соответствие между формулами и энергетическими коэффициентами отражения и пропускания на границе раздела воздух - изотропный диэлектрик.  $\alpha, \beta$  – углы падения и преломления соответственно.

$$1) \frac{\sin^2(\alpha - \beta)}{\sin^2(\alpha + \beta)}, \quad 2) \frac{\operatorname{tg}^2(\alpha - \beta)}{\operatorname{tg}^2(\alpha + \beta)}, \quad 3) 1 - \frac{\operatorname{tg}^2(\alpha - \beta)}{\operatorname{tg}^2(\alpha + \beta)}, \quad 4) 1 - \frac{\sin^2(\alpha - \beta)}{\sin^2(\alpha + \beta)}.$$

а)	Коэф. пропускания s-компоненты $\tau_s$	
б)	Коэф. пропускания p-компоненты $\tau_p$	
в)	Коэф. отражения s-компоненты $\rho_s$	
г)	Коэф. отражения p-компоненты $\rho_p$	

4. Установить соответствие между матрицами и элементами оптической системы, которые они описывают:

- 1) Матрица перемещения;
- 2) Матрица преломления;
- 3) Матрица тонкой линзы;
- 4) Матрица сложной оптической системы.

а)	$\begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -\frac{1}{f'} & 1 \end{bmatrix}$	
б)	$M = M_{n+1} \dots M_3 \cdot M_2 \cdot M_1$	
в)	$R = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ \frac{n_1 - n_2}{r} & 1 \end{bmatrix}$	
г)	$T = \begin{bmatrix} 1 & d/n \\ 0 & 1 \end{bmatrix}$	

5. Расположите цвета видимого спектра в порядке увеличения частоты колебаний электромагнитной волны.

- 1) Синий.
- 2) Оранжевый.
- 3) Красный.
- 4) Зеленый.
- 5) Фиолетовый.

а)	Наименьшая частота	
б)	Частота чуть выше минимальной	
в)	Частота ещё выше	
г)	Частота близка к наибольшей	
д)	Наибольшая частота	

6. Расположите цвета видимого спектра в порядке увеличения длины волны колебаний электромагнитной волны:

- 1) Синий
- 2) Оранжевый
- 3) Красный
- 4) Зеленый
- 5) Фиолетовый

а)	Наименьшая длина волны	
б)	Длина волны чуть выше минимальной	
в)	Длина волны ещё выше	
г)	Длина волны близка к наибольшей	
д)	Наибольшая длина волны	

7. Установите соответствие между формулами для идеальной оптической системы и их названием.

- 1)  $n \cdot y \cdot \operatorname{tg} \alpha = n' \cdot y' \cdot \operatorname{tg} \alpha'$
- 2)  $f/a + f'/a' = 1$
- 3)  $-f/f' = n/n'$
- 4)  $z \cdot z' = ff'$

а)	Уравнение (формула) Ньютона.	
б)	Задний фокальный отрезок $S'_f$ .	
в)	Переднее фокусное расстояние $f$ .	
г)	Заднее фокусное расстояние $f'$	

8. Установите соответствие между средами и характеризующими их матрицами диэлектрической проницаемости.

- 1) Изотропный диэлектрик.
- 2) Чистый вакуум.
- 3) Одноосный анизотропный кристалл.
- 4) Двуосный анизотропный кристалл.

а)	$\begin{pmatrix} \varepsilon_1 & 0 & 0 \\ 0 & \varepsilon_2 & 0 \\ 0 & 0 & \varepsilon_3 \end{pmatrix}$	
б)	$\begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$	
в)	$\begin{pmatrix} \varepsilon & 0 & 0 \\ 0 & \varepsilon & 0 \\ 0 & 0 & \varepsilon \end{pmatrix}$	
г)	$\begin{pmatrix} \varepsilon_1 & 0 & 0 \\ 0 & \varepsilon_1 & 0 \\ 0 & 0 & \varepsilon_2 \end{pmatrix}$	

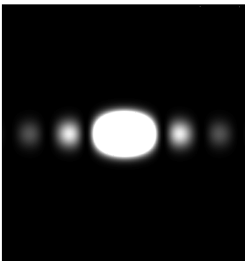
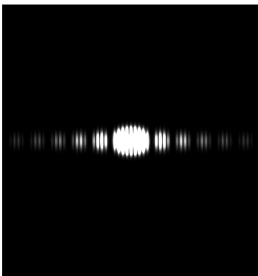
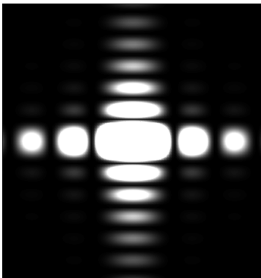
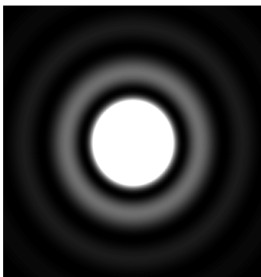
9. Установить соответствие между коэффициентами матрицы  $\begin{pmatrix} A & B \\ C & D \end{pmatrix}$  сложной оптической системы и кардинальными элементами оптической системы.

- 1)  $n_1/C$
- 2)  $-n_2/C$
- 3)  $Dn_1/C$
- 4)  $-(n_2A)/C$

а)	Передний фокальный отрезок $S_f$ .	
б)	Задний фокальный отрезок $S'_f$ .	
в)	Переднее фокусное расстояние $f$ .	
г)	Заднее фокусное расстояние $f'$	

10. Установите соответствие между дифракционной картиной в дальней зоне и формой отверстия, на котором произошла дифракция когерентного света.

- 1) Прямоугольное отверстие.
- 2) Щель.
- 3) Круглое отверстие.
- 4) Две щели.

а)		
б)		
в)		
г)		

11. При расчете кардинальных элементов толстой линзы в среде используется формула:

$$S'_{F'} = f' \left[ 1 - \frac{d(n_2 - n_1)}{n_2 r_1} \right]$$

- 1)  $d$
- 2)  $f'$
- 3)  $n_2$
- 4)  $n_1$
- 5)  $S_f$

а)	Заднее фокусное расстояние толстой линзы	
б)	Задний фокальный отрезок	
в)	Толщина линзы	
г)	Показатель преломления материала линзы	
д)	Показатель преломления среды, в которой располагается линза	

12. Две плоские монохроматические волны встречаются и интерферируют в некоторой области пространства. Расположите значения отношения амплитуд этих волн  $A_1/A_2$  в порядке увеличения **видности** образовавшейся интерференционной картины.

- 1) 1.
- 2) 2.
- 3) 0,3.
- 4) 0,4.
- 5) 1,5.

а)	Наименьшая видность	
б)	Видность чуть выше минимальной	
в)	Видность ещё выше	
г)	Видность близка к наибольшей	
д)	Наибольшая видность	

13. Установите соответствие между названием явления и его определением:

- 1) Перераспределение энергии электромагнитного поля при наложении двух и более когерентных волн.
- 2) Зависимость показателя преломления среды от частоты излучения.
- 3) Огибание светом препятствия, отклонение траектории распространения излучения от законов геометрической оптики.
- 4) Преломление под разными углами лучей с разной поляризацией после вхождения в анизотропную среду.

а)	Двулучепреломление	
б)	Дифракция	
в)	Интерференция	
г)	Дисперсия	

14. Установите соответствие между названием явления и его определением:

- 1) Характеризует отношение скорости света в вакууме к скорости света в рассматриваемой среде.
- 2) Характеризует направление распространения энергии электромагнитного излучения.
- 3) Характеризует направление распространения точки фазового фронта электромагнитной волны.
- 4) Характеризует расстояние, которое проходит электромагнитная волна за период колебаний.

а)	Длина волны	
б)	Волновой вектор	
в)	Вектор Умова-Пойтинга	
г)	Показатель преломления	

15. Установите соответствие между обозначениями величин и самими величинами.

- 1)  $S$
- 2)  $S'$
- 3)  $S_H$
- 4)  $S'_H$

а)	Расстояние от вершины последней преломляющей поверхности до изображения	
б)	Расстояние от вершины последней преломляющей поверхности до задней главной плоскости эквивалентной системы	
в)	Расстояние от вершины первой преломляющей поверхности до предмета	
г)	Расстояние от вершины первой преломляющей поверхности до передней главной плоскости эквивалентной системы	

16. Установите соответствие между обозначениями величин и самими величинами.

- 1)  $z$
- 2)  $z'$
- 3)  $a$
- 4)  $a'$

а)	Расстояние от переднего фокуса до предмета	
б)	Расстояние от задней главной плоскости до изображения	
в)	Расстояние от передней главной плоскости до предмета	
г)	Расстояние от заднего фокуса до изображения	

17. Излучение нормально падает на границу раздела воздух-диэлектрик. Расположите значения **относительного** показателя преломления диэлектрика в порядке увеличения соответствующего **энергетического коэффициента отражения** от границы раздела.

- 1) 1,44.
- 2) 0,54.
- 3) 1,34.
- 4) 0,78.
- 5) 1,54.

а)	Наименьший энергетический коэффициент отражения	
б)	Коэффициент отражения чуть выше минимального	
в)	Коэффициент отражения ещё выше	
г)	Коэффициент отражения близок к наибольшему	
д)	Наибольший энергетический коэффициент отражения	

18. Установите в соответствие между оптическими элементами и их назначением.

- 1) Преобразование состояния поляризации излучения.
- 2) Пространственное разделение проходящего излучения на спектральные составляющие.
- 3) Разделение излучения на две ортогонально поляризованные компоненты.
- 4) Селективное отражение или пропускание излучения с определенной длиной волны.

а)	Интерференционное покрытие	
б)	Анизотропный кристалл	
в)	Фазовая пластинка	
г)	Дисперсионная призма	

19. Установите соответствие между видом поляризации и значением угла эллиптичности.

- 1) Правая круговая.
- 2) Левая эллиптическая.
- 3) Линейная.
- 4) Правая эллиптическая.

а)	0	
б)	$\pi/4$	
в)	$-\pi/7$	
г)	$\pi/6$	

20. Расположите значения разности фаз двух волн в точке, где происходит их интерференция, в порядке возрастания результирующей интенсивности:

- 1) 0.
- 2)  $3\pi/4$ .
- 3)  $\pi/3$ .
- 4)  $5\pi/6$ .
- 5)  $\pi/2$ .

а)	Наименьшая интенсивность	
б)	Интенсивность чуть выше минимальной	
в)	Интенсивность ещё выше	
г)	Интенсивность близка к наибольшей	
д)	Наибольшая интенсивность	

21. Укажите оптические элементы, принцип работы которых основан на соответствующих эффектах.

- 1) Различный фазовый набег для ортогональных состояний поляризации.
- 2) Разложение излучения на различные спектральные составляющие.
- 3) Двулучепреломление в анизотропном кристалле.
- 4) Преломление излучения и преобразование его фазового фронта.

а)	Фазовая пластинка	
б)	Поляризационная призма	
в)	Линза	
г)	Дисперсионная призма	

22. Установите соответствие между вектором Джонса и видом поляризации.

$$1) \begin{pmatrix} 1 \\ -j \end{pmatrix}. \quad 2) \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \end{pmatrix}. \quad 3) \begin{pmatrix} 1 \\ 1 \end{pmatrix}. \quad 4) \begin{pmatrix} 1 \\ j \end{pmatrix}. \quad 5) \begin{pmatrix} 1 \\ 1+j \end{pmatrix}.$$

а)	Линейная горизонтальная	
б)	Линейная с азимутом $45^\circ$	
в)	Правая эллиптическая	
г)	Левая круговая	
д)	Правая круговая	

23. Установите соответствие между увеличениями оптической системы и их обозначениями.

- 1)  $\alpha_0$   
 2)  $\gamma_0$   
 3)  $\Gamma$   
 4)  $\beta_0$

а)	Поперечное увеличение идеальной оптической системы	
б)	Угловое увеличение идеальной оптической системы	
в)	Продольное увеличение идеальной оптической системы	
г)	Видимое увеличение оптической системы	

24. Расположите в порядке убывания фазовой скорости необыкновенной волны в анизотропном положительном кристалле соответствующие значения угла  $\varphi$  между волновым вектором  $\mathbf{k}$  и оптической осью кристалла.

- 1)  $20^\circ$ .  
 2)  $30^\circ$ .  
 3)  $0^\circ$ .  
 4)  $45^\circ$ .  
 5)  $90^\circ$ .

а)	Наибольшая фазовая скорость	
б)	Фазовая скорость чуть ниже максимальной	
в)	Фазовая скорость ещё ниже	
г)	Фазовая скорость близка к наименьшей	
д)	Наименьшая фазовая скорость	

25. Установите соответствие между углами в оптической системе и их обозначениями.

- 1)  $\varepsilon$
- 2)  $\sigma'$
- 3)  $\sigma$
- 4)  $\varepsilon'$

а)	Угол между лучом, падающим на оптическую систему, и оптической осью	
б)	Угол между лучом, прошедшим оптическую систему, и оптической осью	
в)	Угол падения на оптический элемент	
г)	Угол преломления на оптическом элементе	

26. Установите соответствие между углами в оптической системе и их обозначениями.

- 1)  $\alpha_1$
- 2)  $\alpha'_k$
- 3)  $\beta_1$
- 4)  $\beta'_k$

а)	Угол между вторым параксиальным лучом в пространстве предметов и оптической осью	
б)	Угол между первым параксиальным лучом в пространстве изображений и оптической осью	
в)	Угол между первым параксиальным лучом в пространстве предметов и оптической осью	
г)	Угол между вторым параксиальным лучом в пространстве изображений и оптической осью	

27. Установите соответствие между величинами и их определением.		
1) Величина, характеризующая степень затухания энергии излучения по мере его распространения в среде.		
2) Доля энергии поляризованной части излучения в его общей энергии.		
3) Величина, характеризующая скорость распространения волнового пакета в среде.		
4) Разность оптических путей, которые прошли два луча до места их встречи.		
а)	Степень поляризации	
б)	Оптическая разность хода	
в)	Показатель поглощения	
г)	Групповая скорость	

28. Установите соответствие между величинами и их описанием.		
1) Угол, тангенс модуля которого равен отношению малой и большой осей поляризационного эллипса, а знак определяет направление вращения электрического вектора $E$ .		
2) Угол между большой полуосью поляризационного эллипса и горизонтальной осью $Ox$ .		
3) Величина, значение которой определяет зону дифракции и тип приближения при расчете дифракционного интеграла.		
4) Величина, характеризующая контрастность интерференционной картины через различие яркостей светлых и темных полос.		
а)	Видность интерференционной картины	
б)	Угол эллиптичности $\gamma$	
в)	Азимут поляризации $\theta$	
г)	Число Френеля	

29. Установить соответствие между названиями диафрагм и свойствами, которые они описывают:

- 1) Выходной зрачок
- 2) Виньетирующая диафрагма
- 3) Апертурная диафрагма
- 4) Полевая диафрагма
- 5) Входной зрачок

а)	Наибольшим образом ограничивает пучок лучей, идущий от осевой точки предмета	
б)	Диафрагма, расположенная в плоскости предмета или плоскости изображения, и ограничивающая линейное поле пространства изображений	
в)	Параксиальное изображение апертурной диафрагмы частью системы, расположенной до диафрагмы	
г)	Параксиальное изображение апертурной диафрагмы частью системы, расположенной после диафрагмы	
д)	Любая диафрагма кроме апертурной и полевой, приводящая к перераспределению освещенности изображения	

30. При габаритном расчете трубы Кеплера задаются некоторые исходные величины. Установить соответствие между этими величинами и их обозначениями.

- 1)  $L$
- 2)  $\Gamma_T$
- 3)  $D'$
- 4)  $2\omega$

а)	Видимое увеличение телескопической системы	
б)	Длина системы	
в)	Угловое поле пространства предметов	
г)	Диаметр выходного зрачка	

31. Расположите значения ширины спектральной линии излучения в порядке увеличения степени монохроматичности.

- 1) 30 МГц
- 2) 10 кГц
- 3) 20 ГГц
- 4) 400 ГГц
- 5) 15 ТГц

а)	Наименьшая ширина спектральной линии	
б)	Ширина спектральной линии чуть выше минимальной	
в)	Ширина спектральной линии ещё выше	
г)	Ширина спектральной линии близка к наибольшей	
д)	Наибольшая ширина спектральной линии	

32. Установите соответствие между вектором Джонса и значением угла эллиптичности.

$$1) \begin{pmatrix} 1 \\ -j \end{pmatrix}. \quad 2) \begin{pmatrix} 1 \\ 2 \end{pmatrix}. \quad 3) \begin{pmatrix} 1 \\ 0,4j \end{pmatrix}. \quad 4) \begin{pmatrix} 1 \\ j \end{pmatrix}. \quad 5) \begin{pmatrix} 1 \\ -2j \end{pmatrix}.$$

а)	45°	
б)	-45°	
в)	0°	
г)	10,9°	
д)	-26,6°	

33. Установите соответствие между поляризационными параметрами и диапазоном их допустимых значений.

- 1) от -90° до +90°
- 2) от 0 до +∞
- 3) от 0 до 1
- 4) от -45° до +45°

а)	Угол эллиптичности	
б)	Азимут поляризации	
в)	Число Френеля	
г)	Степень поляризации	

34. При расчете параметров микроскопа используется формула:	
$2y = -2l_0 \operatorname{tg} \omega' / \Gamma_M$	
Установить соответствие между величинами, входящими в формулу, и их обозначениями	
1) $2y$ 2) $2\omega'$ 3) $l_0$ 4) $\Gamma_M$	
а)	Видимое увеличение микроскопа
б)	Расстояние наилучшего зрения
в)	Угловое поле пространства изображений
г)	Линейное поле микроскопа

35. Установите соответствие между формулами и величинами увеличений идеальной оптической системы.	
1) $\alpha = dz' / dz$ 2) $\beta_0 = \alpha_0 \gamma_0$ 3) $\gamma = \operatorname{tg} \alpha' / \operatorname{tg} \alpha$ 4) $\beta = y' / y$	
а)	Линейное (поперечное) увеличение
б)	Угловое увеличение
в)	Продольное увеличение
г)	Связь между увеличениями

36. Излучение нормально падает на границу раздела воздух-диэлектрик. Расположите значения **относительного показателя преломления** диэлектрика в порядке **увеличения** соответствующего **энергетического коэффициента пропускания** на границе раздела.

- 1) 0,2
- 2) 0,5
- 3) 1,7
- 4) 1,0
- 5) 1,4

а)	Наименьший энергетический коэфф. пропускания	
б)	Коэффициент пропускания чуть выше минимального	
в)	Коэффициент пропускания ещё выше	
г)	Коэффициент пропускания близок к наибольшему	
д)	Наибольший энергетический коэфф. пропускания	

37. Установите соответствие между матрицей Джонса и оптическим элементом.

$$1) \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & \exp\left(j\frac{\pi}{2}\right) \end{pmatrix}, \quad 2) \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 0 \end{pmatrix}, \quad 3) \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & \exp(-j\pi) \end{pmatrix}, \quad 4) \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & \exp\left(-j\frac{\pi}{2}\right) \end{pmatrix}.$$

а)	Идеальный линейный поляризатор, ось пропускания которого ориентирована вдоль оси $Ox$	
б)	Четвертьволновая фазовая пластинка, быстрая ось которой ориентирована вдоль оси $Oy$	
в)	Четвертьволновая фазовая пластинка, быстрая ось которой ориентирована вдоль оси $Ox$	
г)	Полуволновая фазовая пластинка, быстрая ось которой ориентирована вдоль оси $Ox$	

38. Установите соответствие между значением длины волны и диапазоном электромагнитных волн.

- 1) Радио
- 2) Видимый
- 3) Ультрафиолетовый
- 4) Инфракрасный

а)	$\lambda = 90 \text{ нм}$	
б)	$\lambda = 10,6 \text{ мкм}$	
в)	$\lambda = 2 \text{ км}$	
г)	$\lambda = 633 \text{ нм}$	

39. При расчете одного из параметров толстой линзы в среде используется формула:

$$f' = \frac{n_3 n_2 r_1 r_2}{d(n_3 - n_2)(n_2 - n_1) - n_2 r_2 (n_2 - n_1) - n_2 r_1 (n_3 - n_2)}$$

Установить соответствие между величинами, входящими в формулу, и их обозначениями

- 1)  $r_1$  и  $n_1$
- 2)  $r_2$
- 3)  $d$
- 4)  $n_2$  и  $n_3$

а)	Заднее фокусное расстояние толстой линзы	
б)	Радиус кривизны первой преломляющей поверхности	
в)	Радиус кривизны второй преломляющей поверхности	
г)	Толщина толстой линзы	
д)	Показатель преломления материала линзы	

40. Установите соответствие между обозначениями величин и самими величинами.

- 1) Расстояние от заднего фокуса последнего компонента до заднего фокуса эквивалентной системы.
- 2) Расстояние от переднего фокуса первого компонента до переднего фокуса эквивалентной системы.
- 3) Расстояние от заднего фокуса последнего компонента до задней главной плоскости эквивалентной системы.
- 4) Расстояние от переднего фокуса первого компонента до передней главной плоскости эквивалентной системы.

а)	$Z_F$	
б)	$Z'_H$	
в)	$Z_H$	
г)	$Z'_{F'}$	

41. Укажите соответствие между оптическими элементами и явлениями, которые имеют место при использовании данных элементов:

1. Двулучепреломление в анизотропном кристалле.
2. Разложение излучения на различные спектральные составляющие.
3. Различное поглощение для двух ортогональных проекций вектора  $E$ .
4. Преломление излучения и преобразование его фазового фронта.

а)	Поляроидная пленка	
б)	Поляризационная призма	
в)	Линза	
г)	Дифракционная решетка	

42. Установить соответствие между коэффициентами матрицы  $\begin{pmatrix} A & B \\ C & D \end{pmatrix}$  и свойствами оптической системы, которые они описывают:

- 1)  $A = 0$ ; 2)  $B = 0$ ; 3)  $C = 0$ ; 4)  $D = 0$ .

а)	Параллельный пучок, пройдя систему, остается параллельным	
б)	Первая опорная плоскость совпадает с передним фокусом системы	
в)	Вторая опорная плоскость совпадает с задним фокусом системы	
г)	Положение опорных плоскостей совпадает с положением предмета и изображения	

43. Излучение нормально падает на границу раздела воздух-диэлектрик. Расположите значения **относительного** показателя преломления диэлектрика в порядке убывания **соответствующего энергетического коэффициента** отражения от границы раздела.

- 1) 1,44.
- 2) 0,54.
- 3) 1,34.
- 4) 0,78.
- 5) 1,54.

а)	Наибольший энергетический коэфф. отражения	
б)	Коэффициент отражения чуть меньше максимального	
в)	Коэффициент отражения ещё ниже	
г)	Коэффициент отражения близок к наименьшему	
д)	Наименьший энергетический коэфф. отражения	

44. Установить соответствие между коэффициентами матрицы  $\begin{pmatrix} A & B \\ C & D \end{pmatrix}$  и свойствами оптической системы, которые они описывают:

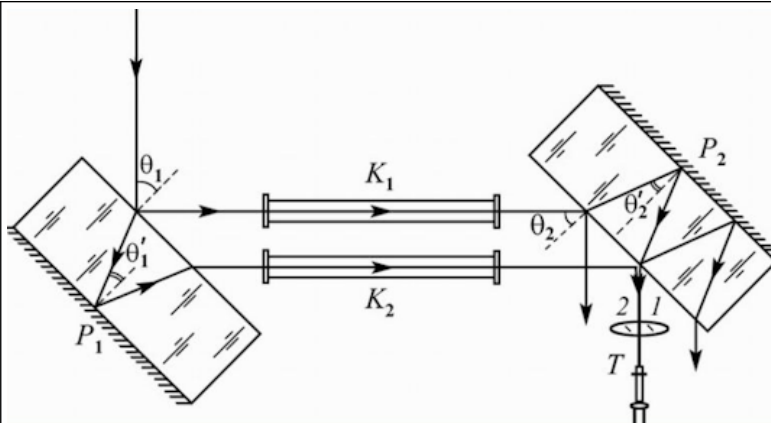
- 1) Параллельный пучок, пройдя систему, остается параллельным.
- 2) Первая опорная плоскость совпадает с передним фокусом системы.
- 3) Вторая опорная плоскость совпадает с задним фокусом системы.
- 4) Положение опорных плоскостей совпадает с положением предмета и изображения.

а)	$A = 0.$	
б)	$B = 0.$	
в)	$C = 0.$	
г)	$D = 0.$	

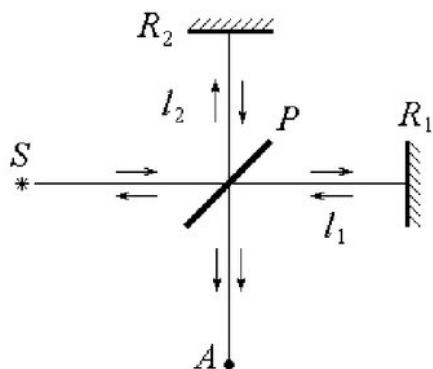
45. Установите соответствие между схемой интерферометра и его названием.

- 1) Интерферометр Фабри-Перо.
- 2) Интерферометр Жамена.
- 3) Интерферометр Рэлея.
- 4) Интерферометр Майкельсона.

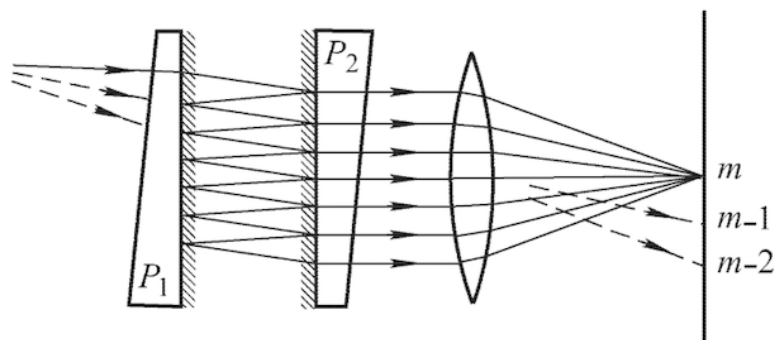
а)



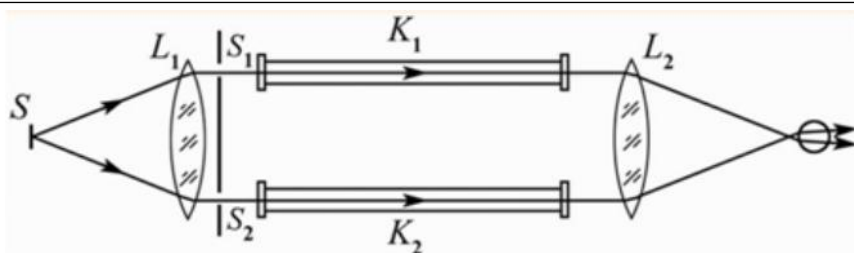
б)



в)



г)



46. Установите соответствие между углами в оптической системе и их обозначениями.

- 1) Видимое увеличение телескопической системы.
- 2) Длина системы.
- 3) Угловое поле пространства предметов.
- 4) Диаметр выходного зрачка.

а)	$L$	
б)	$\Gamma_T$	
в)	$D'$	
г)	$2\omega$	

### С.ЛиОИЭ. Практические задачи средней сложности

1. Определить разность фаз ортогональных компонент светового вектора  $E$ , если угол эллиптичности  $\varepsilon$  равен  $15^\circ$ , а отношение амплитуд  $A_y/A_x = 2,5$ . Определить величину отношения большой оси эллипса к малой.
2. Найти вектор Джонса, если соответствующая ему поляризационная переменная  $\Gamma = -2 + 5j$ , а суммарная интенсивность излучения равна  $5 \text{ мВт/м}^2$ . Начальную фазу  $x$ -компоненты вектора Джонса принять равной  $0^\circ$ .
3. Через четвертьволновую фазовую пластинку проходит линейно поляризованная волна, колебания которой ориентированы под углом  $25^\circ$  к быстрой оси. Определить угол эллиптичности прошедшей через пластинку волны и направление вращения вектора  $E$ , если смотреть навстречу лучу.
4. Линейно поляризованная монохроматическая волна ( $\lambda = 514 \text{ нм}$ ) падает на четвертьволновую пластинку, изготовленную из кристаллического кварца. Построить графики изменения эллиптичности прошедшего света при изменении азимута падающей волны в пределах от  $0$  до  $360^\circ$ .
5. Определить разность фаз ортогональных компонент светового вектора  $E$ , если азимут поляризации  $\theta$  равен  $15^\circ$ , а отношение амплитуд  $A_y/A_x = 2,5$ . Определить величину отношения большой оси эллипса к малой.
6. Найти интенсивность первого луча, прошедшего через стеклянную плоскопараллельную пластинку, которая облучается естественным светом под углом  $25^\circ$ . Показатель преломления стекла  $n = 1,43$ . Интенсивность падающего света  $1 \text{ Вт/м}^2$ .
7. Найти вектор Джонса, если соответствующая ему поляризационная переменная  $\Gamma = 1 - 3j$ , а суммарная интенсивность излучения равна  $5 \text{ мВт/м}^2$ . Начальную фазу  $x$ -компоненты вектора Джонса принять равной  $0^\circ$ .
8. Через четвертьволновую фазовую пластинку проходит линейно поляризованная волна, колебания которой ориентированы под углом  $25^\circ$  к

медленной оси. Определить угол эллиптичности прошедшей через пластинку волны и направление вращения вектора  $\mathbf{E}$ , если смотреть навстречу лучу.

9. Линейно поляризованная монохроматическая волна проходит через фазовую пластинку  $\lambda/6$ , изготовленную из кристаллического кварца. Построить графики изменения угла эллиптичности прошедшего света при изменении азимута падающей волны в пределах от 0 до  $360^\circ$ .

### **С.ЛиОИЭ. Практические задачи повышенной сложности**

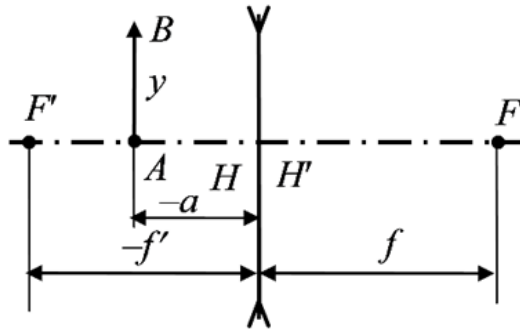
1. Определить фокусное расстояние положительного тонкого компонента (линзы) в воздухе, если расстояние от переднего фокуса до предмета  $z = -200$  мм, а от тонкого компонента до изображения  $a' = 100$  мм. Найти линейное  $\beta_0$ , угловое  $\alpha_0$  и продольное  $\gamma_0$  увеличения. Привести графическое построение.

2. На пути двух параллельных пучков когерентного света с длиной волны излучения  $\lambda = 632,8$  нм и поперечным размером 1 мм установлена тонкая линза. Оси пучков расположены на расстоянии 10 мм друг от друга. Посередине между осями пучков располагается параллельная им оптическая ось линзы. Каково должно быть фокусное расстояние линзы, чтобы в фокальной плоскости наблюдалась бы интерференционная картина с периодом 0,1 мм?

3. Определить заднее фокусное расстояние тонкого компонента (линзы) в воздухе, если расстояние между предметом и изображением  $L = 300$  мм, размер предмета  $y = 2$  см, изображения:  $y' = -1,2$  см. Привести графическое построение.

4. На очень тонкой клиновидной пластинке с показателем преломления  $n = 1,5$  в отраженном свете ( $\lambda = 633$  нм) при нормальном падении наблюдаются интерференционные полосы с периодом  $\Lambda = 0,5$  мм. Найти угол  $\alpha$  между гранями пластинки.

5. Графическим построением найти положение и размер построенного рассеивающей линзой изображения предмета  $AB$  в случае, показанном на рисунке. Дать пояснения к построению. Найдите расстояние между линзой и изображением, если  $a = -10$  см,  $f = 15$  см.



6. На стекло с показателем преломления  $n_1 = 1,5$  нанесен слой вещества с показателем преломления  $n_2 = 2,0$ . Рассчитать толщину слоя, который давал бы максимум и минимум отражения для света длины волны  $\lambda = 632,8$  нм при нормальном и под углом  $30^\circ$  падении света.

7. Предмет высотой  $y = 20$  мм находится слева на расстоянии  $z = -30$  мм от переднего фокуса тонкого компонента (линзы), расположенного в воздухе. Найти положение изображения, если известно, что высота изображения  $y' = -10$  мм. Привести графическое построение.

8. Когерентный точечный источник света расположен на расстоянии 500 мм от экрана с круглым отверстием диаметром 0,5 мм. Найти расстояние между отверстием и плоскостью наблюдения дифракционной картины, при котором в её центре будет наблюдаться наиболее яркий максимум интенсивности. Считать длину волны излучения  $\lambda = 500$  нм.

9. Определить переднее фокусное расстояние тонкого компонента (линзы) в воздухе, если расстояние между предметом и изображением  $L = 15$  мм, размер предмета  $y = 2$  см, изображения:  $y' = 3$  см. Привести графическое построение.



фокусным расстоянием  $f = 200$  мм расположена за отверстием. Какова линейная ширина центрального дифракционного максимума, наблюдаемого в фокальной плоскости линзы?

15. Определить фокусное расстояние положительного тонкого компонента (линзы) в воздухе, если расстояние от переднего фокуса до предмета  $z = 20$  мм, а от тонкого компонента до изображения  $a' = -10$  мм. Найти линейное  $\beta_0$ , угловое  $\alpha_0$  и продольное  $\gamma_0$  увеличение. Привести графическое построение.

16. Когерентный точечный источник света расположен на расстоянии 100 мм от экрана с круглым отверстием диаметром 1 мм. Найти расстояние между отверстием и плоскостью наблюдения дифракционной картины, при котором в её центре будет наблюдаться наиболее яркий максимум интенсивности. Считать длину волны излучения  $\lambda = 500$  нм.

17. Определить фокусное расстояние оптической системы, состоящей из двух тонких компонентов (линз) с фокусными расстояниями  $f_1' = 100$  мм,  $f_2' = 150$  мм, расположенных в воздухе на расстоянии  $d = 200$  мм. Привести графическое построение.

18. На очень тонкой клиновидной пластинке с показателем преломления  $n = 1,4$  в прошедшем свете ( $\lambda = 550$  нм) при нормальном падении наблюдаются интерференционные полосы с периодом  $\Lambda = 0,5$  мм. Найти угол  $\alpha$  между гранями пластинки.

## Пример выполнения задания

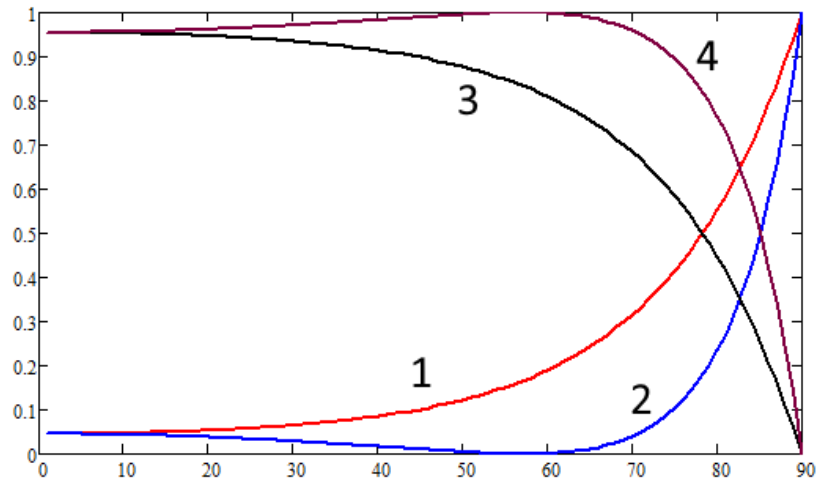
1. Выполните тестовые задания, указав верные ответы.

1.1. Главные оси линейного поляризатора называются:			
а)	Быстрая ось	<input type="checkbox"/> Да	<input checked="" type="checkbox"/> Нет
б)	Ось поглощения	<input checked="" type="checkbox"/> Да	<input type="checkbox"/> Нет
в)	Медленная ось	<input type="checkbox"/> Да	<input checked="" type="checkbox"/> Нет
г)	Ось пропускания	<input checked="" type="checkbox"/> Да	<input type="checkbox"/> Нет
д)	Ось усиления	<input type="checkbox"/> Да	<input checked="" type="checkbox"/> Нет

1.2. Какие из перечисленных оптических элементов являются поляризационными?			
а)	Линза	<input type="checkbox"/> Да	<input checked="" type="checkbox"/> Нет
б)	Призма Рошона	<input checked="" type="checkbox"/> Да	<input type="checkbox"/> Нет
в)	Дисперсионная призма	<input type="checkbox"/> Да	<input checked="" type="checkbox"/> Нет
г)	Фазовая пластинка	<input checked="" type="checkbox"/> Да	<input type="checkbox"/> Нет
д)	Зеркало	<input type="checkbox"/> Да	<input checked="" type="checkbox"/> Нет

1.3. Расположите значения разности хода двух волн в точке, где происходит их интерференция, в порядке возрастания результирующей интенсивности.		
1) $\lambda/2$ ; 2) $3\lambda$ ; 3) $3\lambda/5$ ; 4) $3\lambda/7$ ; 5) $\lambda/8$ .		
а)	Наименьшая интенсивность	1) $\lambda/2$
б)	Интенсивность чуть выше минимальной	4) $3\lambda/7$
в)	Интенсивность ещё выше	3) $3\lambda/5$
г)	Интенсивность близка к наибольшей	5) $\lambda/8$
д)	Наибольшая интенсивность	2) $3\lambda$

1.4. Установите соответствие между энергетическими коэффициентами отражения и пропускания s- и р-компонент поляризации и номерами графиков их зависимости от угла падения на границу раздела воздух-диэлектрик.



а)	Коэф. пропускания s-компоненты $\tau_s$	3
б)	Коэф. пропускания p-компоненты $\tau_p$	4
в)	Коэф. отражения s-компоненты $\rho_s$	1
г)	Коэф. отражения p-компоненты $\rho_p$	2

1.5. Установите соответствие между формулами и энергетическими коэффициентами отражения и пропускания на границе раздела воздух - изотропный диэлектрик.  $\alpha, \beta$  – углы падения и преломления соответственно.

$$1) \frac{\sin^2(\alpha - \beta)}{\sin^2(\alpha + \beta)}, \quad 2) \frac{\operatorname{tg}^2(\alpha - \beta)}{\operatorname{tg}^2(\alpha + \beta)}, \quad 3) 1 - \frac{\operatorname{tg}^2(\alpha - \beta)}{\operatorname{tg}^2(\alpha + \beta)}, \quad 4) 1 - \frac{\sin^2(\alpha - \beta)}{\sin^2(\alpha + \beta)}.$$

а)	Коэф. пропускания s-компоненты $\tau_s$	4
б)	Коэф. пропускания p-компоненты $\tau_p$	3
в)	Коэф. отражения s-компоненты $\rho_s$	1
г)	Коэф. отражения p-компоненты $\rho_p$	2

2. Выполните тестовые задания, указав верные ответы.

2.1. Изображение является стигматическим, если:			
а)	гомоцентрический пучок лучей после прохождения оптической системы остался гомоцентрическим	<input checked="" type="checkbox"/> Да	<input type="checkbox"/> Нет
б)	гомоцентрический пучок лучей после прохождения оптической системы перестал быть гомоцентрическим	<input type="checkbox"/> Да	<input checked="" type="checkbox"/> Нет
в)	каждой точке предмета соответствует только одна точка изображения	<input checked="" type="checkbox"/> Да	<input type="checkbox"/> Нет
г)	каждой точке предмета соответствует несколько точек изображения	<input type="checkbox"/> Да	<input checked="" type="checkbox"/> Нет
д)	каждой точке изображения соответствует несколько точек предмета	<input type="checkbox"/> Да	<input checked="" type="checkbox"/> Нет

2.2. Оптическая система называется центрированной, если:			
а)	все преломляющие и отражающие поверхности являются поверхностями вращения	<input checked="" type="checkbox"/> Да	<input type="checkbox"/> Нет
б)	все преломляющие и отражающие поверхности имеют общую ось вращения	<input checked="" type="checkbox"/> Да	<input type="checkbox"/> Нет
в)	преломляющие и отражающие поверхности могут иметь разные оси вращения	<input type="checkbox"/> Да	<input checked="" type="checkbox"/> Нет
г)	преломляющие и отражающие поверхности могут не являться поверхностями вращения	<input type="checkbox"/> Да	<input checked="" type="checkbox"/> Нет

2.3. К кардинальным элементам идеальной оптической системы относятся:			
а)	фокусы	<input checked="" type="checkbox"/> Да	<input type="checkbox"/> Нет
б)	главные точки	<input checked="" type="checkbox"/> Да	<input type="checkbox"/> Нет
в)	узловые точки	<input checked="" type="checkbox"/> Да	<input type="checkbox"/> Нет
г)	осевая точка предмета	<input type="checkbox"/> Да	<input checked="" type="checkbox"/> Нет
д)	осевая точка изображения	<input type="checkbox"/> Да	<input checked="" type="checkbox"/> Нет

2.4. Установить соответствие между матрицами и элементами оптической системы, которые они описывают:

- 1) Матрица перемещения;
- 2) Матрица преломления;
- 3) Матрица тонкой линзы;
- 4) Матрица сложной оптической системы.

а)	$\begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -\frac{1}{f'} & 1 \end{bmatrix}$	3
б)	$M = M_{n+1} \dots \cdot M_3 \cdot M_2 \cdot M_1$	4
в)	$R = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ \frac{n_1 - n_2}{r} & 1 \end{bmatrix}$	2
г)	$T = \begin{bmatrix} 1 & d/n \\ 0 & 1 \end{bmatrix}$	1

2.5. Установить соответствие между коэффициентами матрицы  $\begin{pmatrix} A & B \\ C & D \end{pmatrix}$  и свойствами оптической системы, которые они описывают:

1)  $A = 0$ ; 2)  $B = 0$ ; 3)  $C = 0$ ; 4)  $D = 0$ .

а)	Параллельный пучок, пройдя систему, остается параллельным	3) $C = 0$
б)	Первая опорная плоскость совпадает с передним фокусом системы	4) $D = 0$
в)	Вторая опорная плоскость совпадает с задним фокусом системы	1) $A = 0$
г)	Положение опорных плоскостей совпадает с положением предмета и изображения	2) $B = 0$

3. Определить разность фаз ортогональных компонент светового вектора  $E$ , если угол эллиптичности  $\varepsilon$  равен  $15^\circ$ , а отношение амплитуд  $A_y/A_x = 2,5$ . Определить величину отношения большой оси эллипса к малой.

Определим угол эллиптичности  $\varepsilon$  через поляризационную переменную  $\Gamma$ :

$$\sin(2\varepsilon) = \frac{2 \operatorname{Im}[\Gamma]}{1+|\Gamma|^2} = \frac{2 \frac{A_y}{A_x} \sin(\delta_{y-x})}{1 + \left(\frac{A_y}{A_x}\right)^2},$$

где  $\Gamma = \frac{A_y}{A_x} \exp(j\delta_{y-x})$ ;  $\delta_{y-x}$  – разность фаз соответствующих проекций поля.

$$\sin(\delta_{y-x}) = \sin(2\varepsilon) \cdot \frac{1 + \left(\frac{A_y}{A_x}\right)^2}{2 \frac{A_y}{A_x}} = 0,5 \cdot \frac{7,25}{5} = 0,725 \Rightarrow \delta_{y-x} = 46,5^\circ$$

Отношение большой оси поляризационного эллипса  $a$  к малой  $b$ :

$$a/b = \operatorname{tg}^{-1}(\varepsilon) \approx 3,7$$

4. Определить фокусное расстояние положительного тонкого компонента (линзы) в воздухе, если расстояние от переднего фокуса до предмета  $z = -200$  мм, а от тонкого компонента до изображения  $a' = 100$  мм. Найти линейное  $\beta_0$ , угловое  $\alpha_0$  и продольное  $\gamma_0$  увеличения. Привести графическое построение.

Так как тонкий компонент расположен в воздухе, то

$$-f = f'.$$

Формула Ньютона примет вид

$$z \cdot z' = -f'^2, \text{ где } z' = a' - f'^2.$$

Тогда

$$z \cdot (a' - f') = -f'^2 \text{ или } f'^2 - zf' + za' = 0.$$

Решение этого квадратного уравнения имеет вид

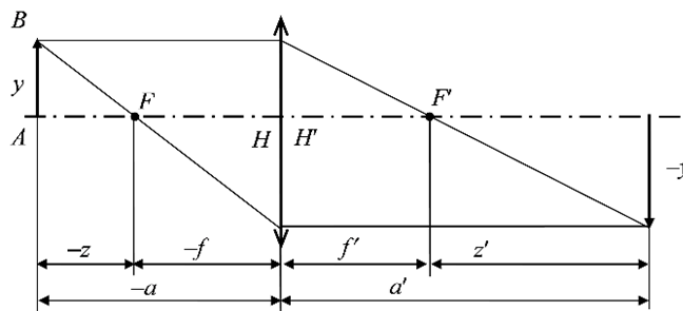
$$f' = z/2 \pm \sqrt{z^2/4 - za'}$$

Подставляя числовые значения и учитывая, что компонент положительный ( $f' > 0$ ), окончательно получаем  $f' = 70$  мм. Для определения линейного увеличения воспользуемся формулой

$$\beta_0 = -f/z = 70/(-200) = -0,35.$$

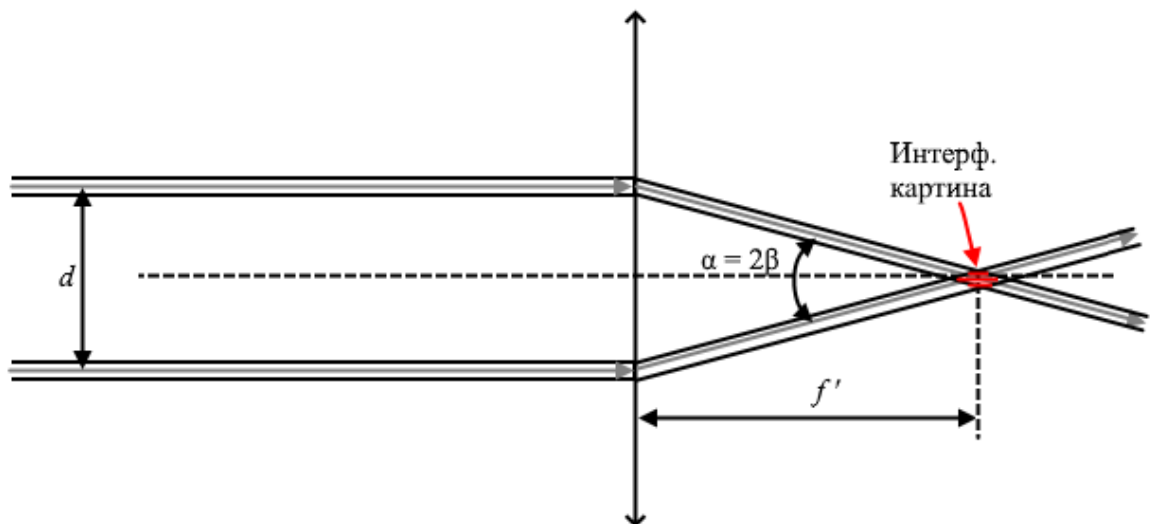
Для системы в воздухе связь между увеличениями выглядит следующим образом:

$$\gamma_0 = 1/\beta_0; \alpha_0 = \beta_0^2. \text{ Тогда } \gamma_0 = 1/(-0,35) = -2,8; \alpha_0 = 0,12.$$



5. На пути двух параллельных пучков когерентного света с длиной волны излучения  $\lambda = 632,8$  нм и поперечным размером 1 мм установлена тонкая линза. Оси пучков расположены на расстоянии 10 мм друг от друга. Посередине между осями пучков располагается параллельная им оптическая ось линзы. Каково должно быть фокусное расстояние линзы, чтобы в фокальной плоскости наблюдалась бы интерференционная картина с периодом 0,1 мм?

Для получения ответа на этот вопрос необходимо определить угол сведения пучков после преломления линзой. Из геометрических соображений получаем, что угол наклона каждого из пучков к оптической оси будет равен  $\beta = \arctg(l/f)$ , где  $l = d/2$  – расстояние между оптическими осями линзы и пучка,  $f'$  – фокусное расстояние линзы.



Угол сведения пучков в этом случае будет равен  $\alpha = 2\beta = 2\arctg(d/2f')$ .

Требуемый угол сведения определим из условия:

$$\Lambda = \frac{\lambda}{2 \sin(\alpha/2)},$$

$$\alpha = 2 \cdot \arcsin(\lambda/2\Lambda),$$

где  $\lambda$  – длина волны излучения,  $\Lambda$  – период интерференционной картины.

Поскольку  $\lambda \ll \Lambda$ , угол  $\alpha$  получается малым. С учетом выполнения соотношения  $\alpha \sim \arcsin \alpha \sim \arctg \alpha$ , можем приближенно записать  $f \approx d\Lambda/\lambda = 1,58 \text{ м}$ .

## **С.ТиПС. Теоретическая и прикладная светотехника**

Специальная часть содержит широкий спектр задач и теоретических вопросов по основам светотехники, параметрам светодиодных устройств, моделей описания цвета видимого излучения.

### **Структура специальной части билета**

№ п/п	Наименование задания	Максимальное количество баллов
1	С.ТиПС. Теоретический вопрос по основам светотехники.	10
2	С.ТиПС. Расчёт параметров светодиодного устройства.	10
3	С.ТиПС. Задача по основам светотехники.	15
4	С.ТиПС. Задача по основам светотехники или расчёт параметров сети электропитания.	15
5	С.ТиПС. Расчёт координат цветности.	10
Итог по специальной части:		60

### **С.ТиПС. Теоретические вопросы по основам светотехники**

1. Определение кривой силы света. Классификацию кривых сил света. Для каждого типа КСС привести пример осветительного прибора (описание), тип оптической системы для получения данного типа КСС и вида освещения, для которого используются осветительные приборы с таким типом КСС.

2. Виды классификаций осветительных приборов: по степени защиты от пыли и влаги, по степени защиты от ударов, по электробезопасности, по типу светораспределения, по способу монтажа, по климатическому исполнению, по области применения.

3. Нормируемые количественные и качественные показатели освещения. Перечислить показатели, которые нормируются для различных типов помещения с примерами объектов для каждого показателя.

4. Методы измерения светового потока. Для каждого метода привести схему измерения, указать измерительные приборы и расчетные формулы для определения светового потока косвенным методом.

5. Методы измерения силы света и кривой силы света. Для каждого метода привести схему измерения, указать измерительные приборы и расчетные формулы для определения силы света косвенным методом.

6. Определение абсолютной световой чувствительности. Что означает термин «абсолютная»? Объяснить зависимость  $L_{пор}$  от углового размера объекта. Привести и пояснить аппроксимацию Муна – Спенсер. Что такое контрастная чувствительность и от чего она зависит? Привести примеры из светотехнической практики, где необходимы знание  $L_{пор}$ ,  $\Delta L_{пор}$  и  $k_{пор}$ .

### С.ТиПС. Задачи на расчёт параметров светодиодного устройства

1. Используя тепловую модель светодиодного устройства найти значение его максимальной допустимой рабочей мощности при комнатной температуре ( $25^{\circ}\text{C}$ ). Какой будет при этом рабочий ток светодиода? Максимальная температура р-п перехода  $T_{jmax} = 125^{\circ}\text{C}$ , тепловые сопротивления:  $R_{\Theta LED} = 15^{\circ}\text{C}/\text{Вт}$ ,  $R_{\Theta Thermal\_Epoxy} = 5^{\circ}\text{C}/\text{Вт}$ ,  $R_{\Theta MC\_PCB} = 0,1^{\circ}\text{C}/\text{Вт}$ ,  $R_{\Theta Heat\_Sink} = 9,9^{\circ}\text{C}/\text{Вт}$ , рабочее напряжение  $U_{f\_LED} = 3,2\text{ В}$ .

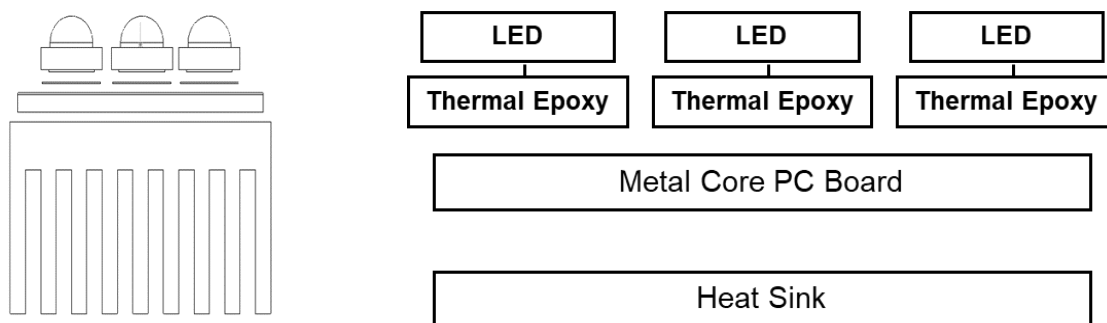


Рис. 4.1. Структура светодиодного устройства к задаче 1

2. Рассчитать критические углы полного внутреннего отражения для светодиодов на основе GaAs, GaN и полимерного материала, показатели преломления соответственно равны 3,4; 2,5 и 1,5. Определить долю света, выходящего за пределы кристаллов указанных материалов. Отражением света на границе полимер-воздух пренебречь.

3. Оценить, как изменится доля выходящего света по сравнению с выводом в воздух (показатель преломления равен 1), если кристалл GaAs с показателем преломления 3,4 поместить в корпус, герметизированный полимерным оптическим гелем с показателем преломления 1,5. Отражением света на границе пренебречь.

4. Используя формулу Варшни найти значения концентрации In синего ( $\lambda = 455$  нм) и зеленого ( $\lambda = 535$  нм) светодиодов на основе гетероструктур InXGa1-XN. Излучательным переходом считать переход «зона-зона» в активной области,  $E_g(\text{InN}) = 1,95$  эВ,  $E_g(\text{GaN}) = 3,40$  эВ.

5. Определить время жизни неосновных носителей в GaAs p-типа при концентрациях легирующих примесей  $10^{15} \text{ см}^{-3}$  и  $10^{18} \text{ см}^{-3}$ . Коэффициент бимолекулярной рекомбинации  $B=10^{-10} \text{ см}^3/\text{с}$ . Оценить время жизни носителей в беспримесном GaAs, если концентрация носителей составляет  $n_0=p_0=2 \times 10^6 \text{ см}^{-3}$ .

6. Определить линейный температурный коэффициент прямого напряжения СД на основе GaAs при комнатной температуре ( $T = 295$  К). Каким будет падение напряжение на светодиоде при увеличении температуры на  $20^\circ\text{C}$ ? Внутренним нагревом светодиода пренебречь. Считать, что:

$$N_A = N_D = 2 \times 10^{17} \text{ см}^{-3}; N_c = 4,4 \times 10^{17} \text{ см}^{-3}; N_v = 7,7 \times 10^{18} \text{ см}^{-3}; \alpha = 5,41 \times 10^{-4} \frac{\text{эВ}}{\text{К}}; \beta = 204 \text{ К}$$

## Пример решения задачи на расчёт пар-ов светодиодного устройства №1

$$T_{\text{junction}} = T_A + (P_{\text{LED}}) \cdot (R_{\Theta\text{LED}}) + (P_{\text{LEDs}}) \cdot (R_{\Theta\text{Heatsink}}),$$

$$T_{\text{jmax}} = T_A + P_{\text{LED max}} \cdot (R_{\Theta\text{LED}} + R_{\Theta\text{Thermal Epoxy}}) + 3 P_{\text{LED max}} \cdot (R_{\Theta\text{MC PCB}} + R_{\Theta\text{Heat Sink}}),$$

т. е.

$$125^\circ\text{C} = 25^\circ\text{C} + P_{\text{LED max}} \cdot (15^\circ\text{C}/\text{Вт} + 5^\circ\text{C}/\text{Вт}) + 3 P_{\text{LED max}} \cdot (0,1^\circ\text{C}/\text{Вт} + 9,9^\circ\text{C}/\text{Вт})$$

или

$$100^\circ\text{C} = P_{\text{LED max}} \cdot 50^\circ\text{C}/\text{Вт},$$

отсюда

$$P_{\text{LED max}} = 2 \text{ Вт}. P_{\text{LED max}} = I_{\text{fLED max}} \cdot U_{\text{fLED}},$$

т.е.

$$2 \text{ Вт} = I_{\text{fLED max}} \cdot 3,2 \text{ В},$$

значит

$$I_{\text{fLED max}} = 0,625 \text{ А} = 625 \text{ мА}.$$

Ответ:  $I_{\text{fLED max}} = 0,625 \text{ А} = 625 \text{ мА}$ .

### С.ТиПС. Задачи по основам светотехники

1. Определите разность потенциалов, полностью задерживающую электроны, эмитируемые с поверхности лития под действием излучения с длиной волны = 300 нм.

2. При каких значениях температуры черного тела ( $T_c$ ,  $T_k$ ) максимальные значения спектральной плотности его энергетической светимости приходятся на границы видимого диапазона спектра?

3. Пучок лучей естественного света падает на поверхность льда под углом  $i = 40^\circ$ . Определите степень поляризации пучка лучей, отраженного от поверхности льда. Показатель преломления льда  $n = 1,31$ .

4. Световой поток, излучаемый равноярким полушаром ( $L_v^{oc} = L_v^{c\phi}$ ), равен  $1,92E+04$  лм. Определите горизонтальную облученность и вертикальную освещенность (пл. Р) в т. Б. При расчете принять:  $H=3,50$  м,  $a=4,00$  м,  $b=6,50$  м; длина волны излучения основания полушара  $0,496$  мкм; длина волны излучения сферической поверхности полушара  $0,533$  мкм. Основание полушара параллельно горизонтальной плоскости. Сферическая часть полушара направлена вверх.

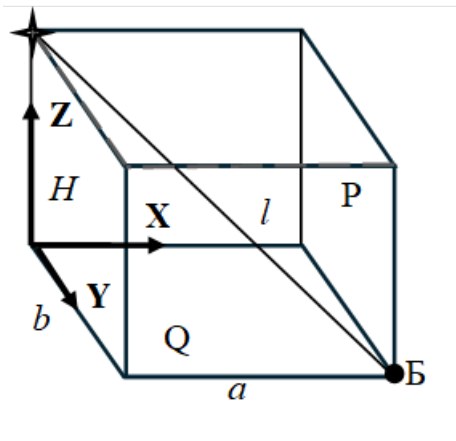


Рис. 4.2. Иллюстрация к задаче 4

5. Определите световой поток, падающий на симметрично расположенное по отношению к источнику излучения кольцо, а также среднюю облученность кольца, если  $H=4$  м,  $R_1=3,2$  м,  $R_2=6$  м. Равнояркий источник излучения: цилиндр, ( $D=0,272$  м;  $H=0,071$  м;  $L_e=1960$  Вт/ср/м<sup>2</sup>); длина волны излучения основания  $0,468$  мкм; длина волны излучения боковой поверхности  $0,57$  мкм. Плоскость основания источника параллельна плоскости кольца.

6. Сила света равнояркого ( $L_v^u = L_v^s$ ) двустороннего диска в направлении  $31,8$  градусов от вертикали равна  $1128$  кд. Определите яркость нижней стороны диска и энергетическую яркость верхней стороны диска, если:  $\lambda_n=0,468$  мкм,  $\lambda_s=0,472$  мкм,  $D=0,21$  м. Основание источника расположено горизонтально.

7. Равнояркая светящая линия длиной  $l = 2$  м со световым потоком  $\Phi$

= 12000 лм, расположенная, как показано на рисунке. Расстояния  $h = 3\text{ м}$ ,  $a = 1,5\text{ м}$ ,  $b = 2,5\text{ м}$ . Найти горизонтальную освещённость в точке А.

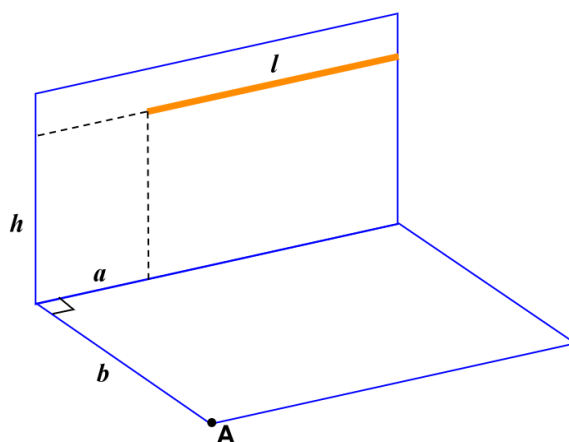


Рис. 4.3. Иллюстрация к задаче 7

8. Определите горизонтальную освещённость в точке X от равномерного диска, расположенного горизонтально. Радиус диска  $r = 1,6\text{ м}$ , расстояние до него  $h = 4\text{ м}$ . Световой поток 6000 лм.

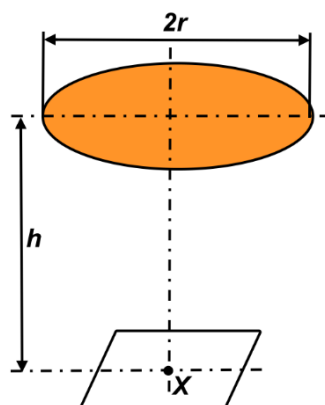


Рис. 4.4. Иллюстрация к задаче 8

9. Определите горизонтальную освещённость в точке X от равномерного кольца, расположенного горизонтально. Внешний радиус кольца  $r_1 = 3\text{ м}$ , внутренний радиус  $r_2 = 2,5\text{ м}$ , расстояние до него  $h = 5\text{ м}$ . Яркость 1500 кд/м<sup>2</sup>.

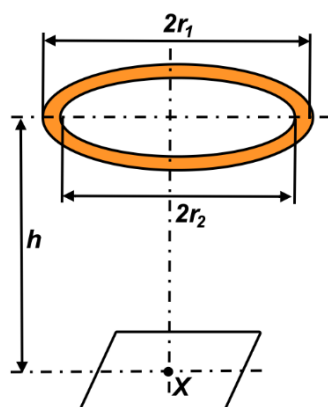


Рис. 4.5. Иллюстрация к задаче 9

### Пример решения задачи по основам светотехники №1

Из формулы Эйнштейна следует выражение для максимальной кинетической энергии вылетающих электронов:

$$\frac{mv_{\max}^2}{2} = \frac{hc}{\lambda} - A_{\text{ВЫХ}} \quad (1)$$

Поскольку вся кинетическая энергия электронов затрачивается на преодоление потенциального барьера  $eU_{\text{зад}}$ , то из (1) следует:

$$\left. \begin{aligned} eU_{\text{зад}} &= \frac{hc}{\lambda} - A_{\text{ВЫХ}} \\ U_{\text{зад}} &= \frac{1}{e} \left( \frac{hc}{\lambda} - A_{\text{ВЫХ}} \right) \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

Ответ:  $U_{\text{зад}} = 1,756 \text{ В}$ .

### Пример решения задачи по основам светотехники №7

Для определения горизонтальной освещённости рассчитаем два значения:  $E_1$  для фиктивной светящей линии длиной  $(l+a)$  и  $E_2$  для фиктивной светящей линии длиной  $a$ , и вычтем из первого второе.

Для проведения расчётов достроим исходное изображение задачи как показано на рис. 4.5.

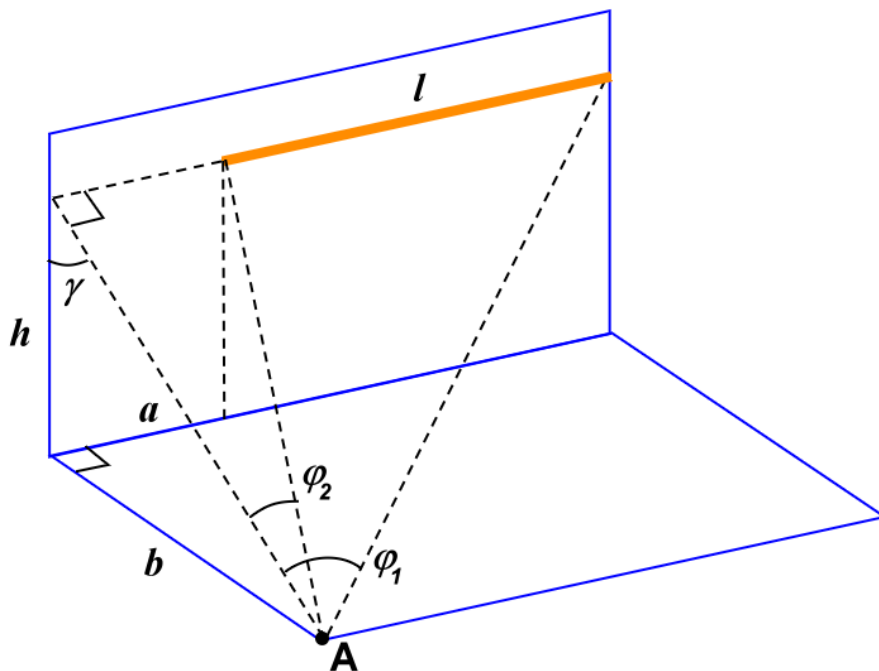


Рис. 4.5. Иллюстрация к решению задачи №7

Воспользуемся формулой для расчёта освещённости от светящей линии в точке А, проекция которой на плоскость, содержащую линию, совпадает с проекцией начала линии на расчётную плоскость:

$$E_1 = \frac{I_{\gamma 0}^* \cdot f_1(\gamma) \cdot \cos^2 \gamma}{2h} \cdot \left( \varphi_1 + \frac{\sin 2\varphi_1}{2} \right)$$

$$E_2 = \frac{I_{\gamma 0}^* \cdot f_1(\gamma) \cdot \cos^2 \gamma}{2h} \cdot \left( \varphi_2 + \frac{\sin 2\varphi_2}{2} \right)$$

где

$$I_{\gamma 0}^* = \frac{I_{\gamma 0}}{1} = \frac{\Phi}{\pi^2 \cdot 1} = \frac{12000}{3,14^2 \cdot 2} = 608,54 \text{ кд/м.}$$

Далее:

$$f_1(g) = 1$$

$$g = \text{arctg}\left(\frac{h}{b}\right) = \text{arctg}\left(\frac{3}{2,5}\right) = 50,19^\circ$$

$$j_1 = \text{arctg}\left(\frac{l+a}{\sqrt{b^2+h^2}}\right) = \text{arctg}\left(\frac{2+1,5}{\sqrt{2,5^2+3^2}}\right) = 0,23$$

$$j_2 = \arctg\left(\frac{a}{\sqrt{b^2 + h^2}}\right) = \arctg\left(\frac{1,5}{\sqrt{2,5^2 + 3^2}}\right) = 0,10$$

Таким образом,

$$E_1 = \frac{608,54 \cdot 0,41^2}{2 \cdot 3} \cdot \left(0,23 + \frac{0,44}{2}\right) = 7,67 \text{лк}$$

$$E_2 = \frac{607,54 \cdot 0,41^2}{2 \cdot 3} \cdot \left(0,10 + \frac{0,20}{2}\right) = 3,41 \text{лк}$$

$$E_A = E_1 - E_2 = 7,67 - 3,41 = 4,26 \text{лк}$$

Ответ: горизонтальная освещённость в точке *A* составит 4,26лк.

### С.ТиПС. Задачи на расчёт параметров сети электропитания

1. Разветвлённая электрическая сеть, показанная на рисунке. Параметры:  $L_1 = 50\text{м}$ ,  $L_2 = 10\text{м}$ ,  $L_3 = L_4 = L_5 = 5\text{м}$ ,  $L_6 = 2\text{м}$ ,  $L_7 = 3\text{м}$ ,  $L_8 = 15\text{м}$ ;  $P_1 = 4\text{кВт}$ ,  $P_2 = P_3 = 2\text{кВт}$ ,  $P_4 = P_5 = 1\text{кВт}$ ,  $P_6 = 10\text{кВт}$ . Сеть напряжением 230/400В, выполнена медным проводом. Располагаемая потеря напряжения  $\Delta U_c = 4\%$ .

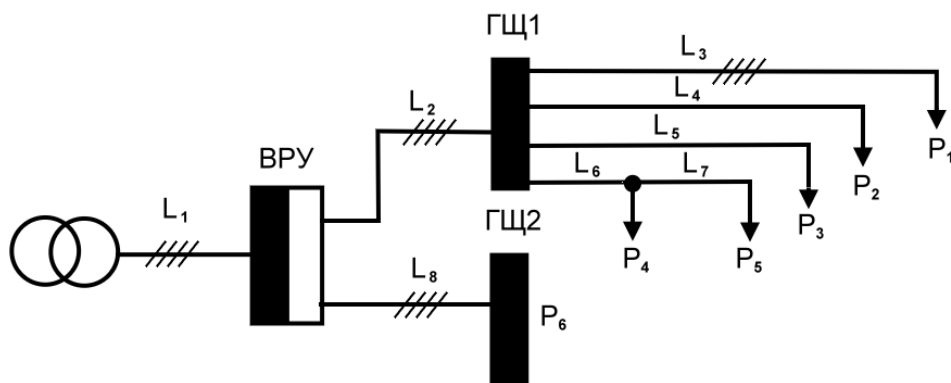


Рис. 4.6. Иллюстрация к задаче 1

Найти сечения всех участков сети, обеспечивающие минимальный расход проводникового материала на сеть. При расчёте все сечения округлить в большую сторону до ближайших стандартных из ряда 1,5; 2; 2,5; 3; 4; 5; 6; 8; 10; 16; 25мм<sup>2</sup>. Сечения всех групповых линий принять

однородными.

2. Разветвлённая электрическая сеть, показанная на рисунке. Параметры:  $L_1 = 60\text{м}$ ,  $L_2 = 20\text{м}$ ,  $L_3 = 10\text{м}$ ,  $L_4 = 15\text{м}$ ,  $L_5 = L_6 = 10\text{м}$ ,  $L_7 = 6\text{м}$ ,  $L_8 = 4\text{м}$ ;  $P_1 = 20\text{кВт}$ ,  $P_2 = 6\text{кВт}$ ,  $P_3 = P_4 = 5\text{кВт}$ ,  $P_5 = 2\text{кВт}$ ,  $P_6 = 3\text{кВт}$ . Сеть напряжением 230/400В, выполнена медным проводом. Располагаемая потеря напряжения  $\Delta U_{\text{с}} = 3,5\%$ .

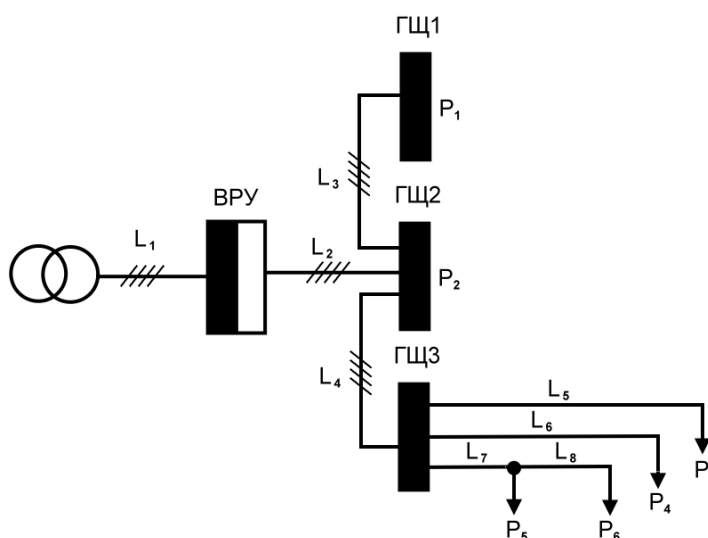


Рис. 4.7. Иллюстрация к задаче 2

3. Разветвлённая электрическая сеть, показанная на рисунке. Параметры:  $L_1 = 100\text{м}$ ,  $L_2 = 30\text{м}$ ,  $L_3 = 20\text{м}$ ,  $L_4 = 15\text{м}$ ,  $L_5 = L_6 = 10\text{м}$ ,  $L_7 = 6\text{м}$ ,  $L_8 = 4\text{м}$ ;  $P_1 = 10\text{кВт}$ ,  $P_2 = 10\text{кВт}$ ,  $P_3 = P_4 = 5\text{кВт}$ ,  $P_5 = 4\text{кВт}$ ,  $P_6 = 3\text{кВт}$ . Сеть напряжением 230/400В, выполнена медным проводом. Располагаемая потеря напряжения  $\Delta U_{\text{с}} = 3,5\%$ .

Найти сечения всех участков сети, обеспечивающие минимальный расход проводникового материала на сеть. При расчёте все сечения округлить в большую сторону до ближайших стандартных из ряда 1,5; 2; 2,5; 3; 4; 5; 6; 8; 10; 16; 25мм<sup>2</sup>. Сечения всех групповых линий принять однородными.

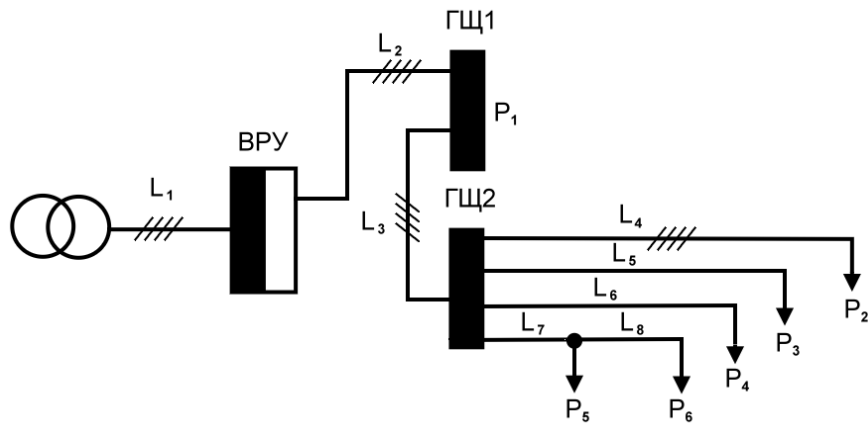


Рис. 4.8. Иллюстрация к задаче 3

### С.ТиПС. Задачи на расчёт координат цветности

1. Определите координаты цветности смеси двух монохроматических излучений  $\lambda_1=450$  нм,  $\lambda_2=550$  нм, смешанных в равной пропорции. Энергетический поток смешанного излучения равен 600 Вт. Отметить координаты цветности на диаграмме цветности ху, определить доминирующую длину волны и чистоту цвета.

2. Определите координаты цветности смеси двух излучений, если их координаты цветности и яркости соответственно равны  $x_1=0,25$ ,  $y_1=0,3$  и  $L_1=2732$  кд/м<sup>2</sup> и  $x_2=0,4$ ,  $y_2=0,55$  и  $L_2=1366$  кд/м<sup>2</sup>. Отметить координаты цветности на диаграмме цветности ху, определить цветовой тон и чистоту цвета. Показать графическое решение задачи.

3. Определите координаты цветности смеси двух монохроматических излучений  $\lambda_1=510$  нм,  $\lambda_2=680$  нм, смешанных в пропорции 1:6, энергетический поток смеси равен 1400 Вт. Отметить координаты цветности на диаграмме цветности ху, определить цветовой тон и чистоту цвета.

4. Два излучения описаны уравнениями  $\Phi_1=0,5X+0,45Y+0,05Z$  и  $\Phi_2=0,1X+0,4Y+0,5Z$ . Запишите уравнение смеси этих излучения. Определите координаты цветности излучения х, у и яркость. Отметьте на диаграмме

цветности XY точку данного излучения, определите цветовой тон и чистоту цвета.

5. Диффузно отражающая свет белая пластинка имеет коэффициент отражения  $\rho=0,8$ . Пластинка отражает неселективно в видимой части спектра. Цвет излучения света, освещающего пластинку, описывается цветовым уравнением  $\Phi=4X+6Y+6Z$ . Запишите цветовое уравнение отраженного от пластинки излучения в системе XYZ. Отметьте на диаграмме цветности XY точку отраженного излучения, определите цветовой тон и чистоту цвета.

6. На поверхность со спектральным коэффициентом отражения  $\rho_1=0,5$  и  $\rho_2=0,7$  направлен свет, состоящий из смеси двух монохроматических излучений  $\lambda_1=700$  нм,  $\lambda_2=500$  нм. Определить координаты цветности отраженного излучения, если энергетические облученности соответственно равны  $\Phi_1=0,5$  Вт/м<sup>2</sup>,  $\Phi_2=0,2$  Вт/м<sup>2</sup>. Отметьте на диаграмме цветности XY точку отраженного излучения, определите цветовой тон и чистоту цвета.

### Пример решения задачи на расчёт координат цветности №1

Координаты цвета смеси излучений рассчитываются по формуле:

$$X = \frac{1}{2} \cdot \Phi_e \cdot (\bar{x}_1 + \bar{x}_2); Y = \frac{1}{2} \cdot \Phi_e \cdot (\bar{y}_1 + \bar{y}_2); Z = \frac{1}{2} \cdot \Phi_e \cdot (z_1 + \bar{z}_2)$$

Значение удельных координат  $\bar{x}, \bar{y}, \bar{z}$  определяется по таблице для соответствующих длин волн.

Координаты цветности смеси:

$$\bar{x} = \frac{X}{X+Y+Z} = 0,21; \bar{y} = \frac{Y}{X+Y+Z} = 0,29;$$

Ответ: по диаграмме цветности (рис. 4.9) определяем  $\lambda=485$  нм,  $P=50\%$ .

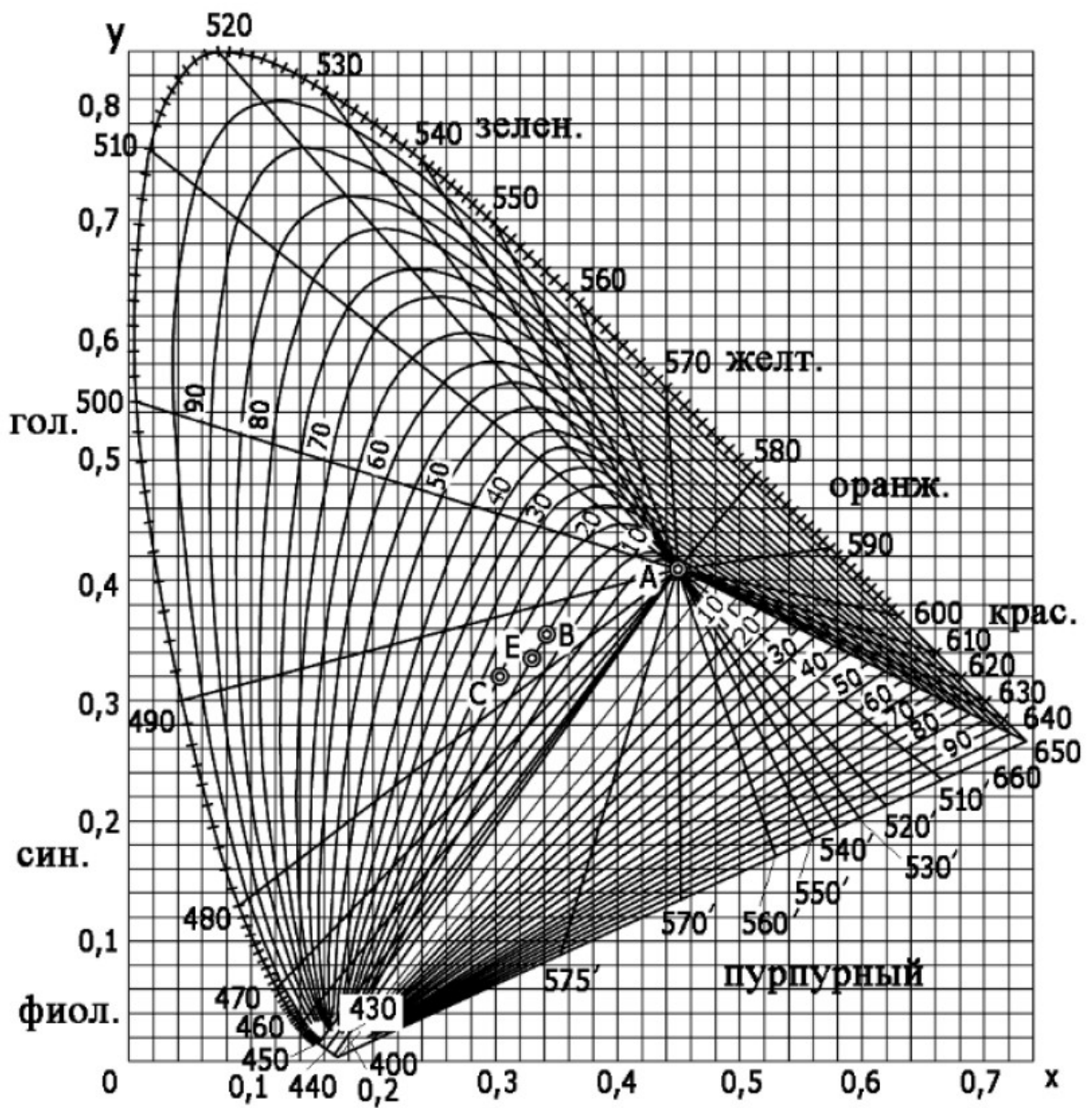


Рис. 4.9. Приложение для задач на расчёт координат цветности

## С.ПМиС. Полупроводниковые материалы и структуры

Специальная часть предназначена для студентов поступающих на ИЭТЭ. Специальная часть предполагает наличие у абитуриентов знаний из области материаловедения в части полупроводниковых материалов и диэлектриков.

### Структура специальной части билета

№ п/п	Наименование задания	Максимальное количество баллов
1	С.ПМиС. Простой теоретический вопрос по физике полупроводников.	5
2	С.ПМиС. Простой теоретический вопрос по физике диэлектриков.	5
3	С.ПМиС. Простой теоретический вопрос по физике полупроводниковых приборов и интегральных схем.	5
4	С.ПМиС. Простой теоретический вопрос по основам технологии материалов электронной техники.	5
5	С.ПМиС. Сложный теоретический вопрос по физике полупроводников.	10
6	С.ПМиС. Задача по физике полупроводников.	10
7	С.ПМиС. Сложный теоретический вопрос по физике полупроводниковых приборов и интегральных схем.	10
8	С.ПМиС. Задача по физике полупроводниковых приборов и интегральных схем.	10
Итого по специальной части:		60

## С.ПМиС. Простые теоретические вопросы по физике полупроводников

1. Объясните образование энергетических зон в твердых кристаллических телах.
2. Объясните образование примесных энергетических уровней в кристалле.
3. Уровень Ферми в собственном полупроводнике. Как это понятие используется в физике полупроводников для определения собственных концентраций носителей заряда.
4. Объясните температурную зависимость концентрации носителей в собственном полупроводнике.
5. Объясните, что такое эффективная плотность электронных состояний в зоне проводимости и валентной зоне полупроводника.
6. Что такое невырожденный полупроводник?
7. Донорные и акцепторные примеси в полупроводниках.
8. Собственные и примесные полупроводники.
9. Рекомбинации носителей заряда в полупроводниках.
10. Объясните, что такое подвижность носителей заряда.

### Пример ответа на простой теор. вопрос по физике полупроводников

**Вопрос.** Уровень Ферми в собственном полупроводнике. Как это понятие используется в физике полупроводников для определения собственных концентраций носителей заряда.

**Ответ.** Для случая невырожденного полупроводника соотношение для локальной концентрации электронов:

$$n = N_c \exp\left(\frac{-E_c - E_f}{kT}\right) = N_c \exp\left(\frac{-\zeta}{\varphi_T}\right)$$

где  $N_C$  – эффективная плотность состояний в зоне проводимости ( $\sim 10^{19}$  см<sup>-3</sup> в кремнии);  $E_F$  – энергия уровня Ферми,  $E_C$  – энергия дна зоны проводимости,  $\varphi_T = \frac{kT}{q}$  – тепловой потенциал,  $\zeta$  – химический потенциал.

Роль уровня Ферми удобно проиллюстрировать на зонной диаграмме равновесного p-n-перехода (рис. 5.1), где химический  $\zeta$  и электрический потенциал  $\varphi$  по толщине перехода меняется, но электрохимический потенциал  $\mu$  остается постоянным:

$$\frac{\mu}{q} = \varphi + \zeta = \varphi + \varphi_T \ln \left( \frac{N_C}{n} \right) = const$$

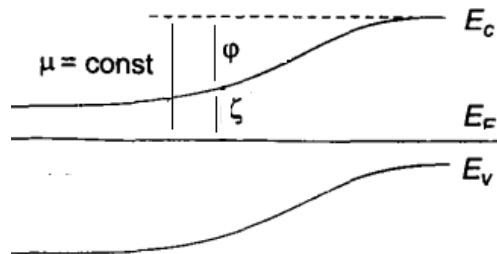


Рис. 5.1. Иллюстрация к ответу на теоретический вопрос по физике полупроводников

Химический потенциал электрически заряженных частиц называют электрохимическим потенциалом.

Химический потенциал в общем имеет смысл изменения энергии термодинамической системы при изменении её массы на одну единицу или изменение энергии при добавлении одной частицы в систему без совершения работы. Переход электрона из зоны валентной в зону проводимости как раз и описывается химическим  $\zeta$  потенциалом, а если этот электрон вовсе перешел из n области в p область, то в этом процессе участвовал и электрический потенциал  $\varphi$ . Экспонента в формуле для концентрации  $n$  определяет вероятность этих переходов

Практически разделение электрохимического потенциала на две части оказывается хорошим приближением в случае заряженных частиц малой массы.

Разность электрических потенциалов в равновесном p-n-переходе составляет величину барьера ( $\sim 0,7 - 0,9$  В).

### **С.ПМиС. Простые теоретические вопросы по физике диэлектриков**

1. Классификация механизмов поляризации диэлектриков.
2. Объясните понятие тангенса угла диэлектрических потерь.
3. Зависимости диэлектрической проницаемости и тангенса угла диэлектрических потерь от температуры и частоты электрического поля.
4. Охарактеризуйте диэлектрические потери в твердых диэлектриках.
5. Электропроводность твердых диэлектриков на переменном токе.
6. Зависимость электропроводности твердых диэлектриков от температуры.
7. Приведите частотные зависимости тангенса угла диэлектрических потерь для полярных диэлектриков.
8. Сегнетоэлектрики и их характерные свойства. Диэлектрический гистерезис.
9. Электрическая прочность диэлектриков. Виды пробоев диэлектриков.
10. Электрический и электротепловой пробой твердых диэлектриков.

### **Пример ответа на простой теор. вопрос по физике диэлектриков**

**Вопрос.** Охарактеризуйте диэлектрические потери в твердых диэлектриках.

**Ответ.** Твердые неполярные диэлектрики, не содержащие примесей, обладают ничтожно малыми диэлектрическими потерями. К таким диэлектрикам относятся полимеры – полиэтилен, политетрафторэтилен

(фторопласт), полистирол и другие. Твердые диэлектрики, состоящие из полярных молекул, представляют собой в основном органические вещества: полярные полимеры – ПВХ, эпоксидные, кремнийорганические и фенолформальдегидные и др. смолы, композиционные материалы: текстолит и гетинакс и др. Все они, благодаря дипольно-релаксационному механизму поляризации, имеют большие потери, особенно на радиочастотах, т.е. выше сотен кГц. В веществах с кристаллической структурой и плотной упаковкой ионов, например в чистом оксиде алюминия (сапфир), диэлектрические потери весьма малы и сравнимы с потерями неполярных диэлектриков. Однако при повышении температуры в оксидах проявляются потери на электропроводность. Оксиды кремния, алюминия и кальция входят в состав различных керамических диэлектрических материалов: фарфоров и ультрафарфоров, работающих на высоких частотах. Ионные примеси в керамических диэлектрических материалах, приводящие к возникновению поляризационных токов, резко увеличивают диэлектрические потери. Диэлектрические потери в веществах с ионной структурой и, в особенности, в неорганических стеклах – могут быть значительными. В стеклах, имеющих аморфную структуру, многочисленные слабосвязанные ионы могут совершать перескоки из одной кристаллографической позиции в другую, что может приводить к возникновению не только поляризационных токов, но и токов сквозной проводимости. Релаксационные потери в стеклах определяются широким набором времен релаксации, что является причиной расширения и сглаживания максимумов в температурной и частотной зависимостях тангенса угла диэлектрических потерь.

## **С.ПМиС. Простые теоретические вопросы по физике полупроводниковых приборов и интегральных схем**

1. Объясните понятие эффективной массы электронов и дырок в полупроводниках.
2. Чем определяется длина свободного пробега носителей заряда в полупроводниках.
3. Объясните работу электронно-дырочного перехода.
4. Изобразите распределение примеси, потенциала, электрического поля, контактной разности потенциалов и объемного заряда резкого несимметричного p – n перехода.
5. Зависимость положения уровня Ферми и концентрации носителей заряда в примесных полупроводниках от температуры.
6. Вольт-амперная характеристика p – n перехода.
7. Неравновесные и равновесные носители заряда в полупроводниках.
8. Полупроводник с примесью одного типа, доноры и акцепторы.
9. Функция распределения Ферми-Дирака. Концентрация электронов и дырок в полупроводниках.
10. Время жизни и рекомбинация носителей заряда в полупроводниках.

### **Пример ответа на простой теоретический вопрос физике полупроводниковых приборов и интегральных схем**

**Вопрос.** Изобразите распределение примеси, потенциала, поля, контактной разности потенциалов и объемного заряда резкого несимметричного p – n перехода.

**Ответ.** В несимметричном p-n переходе (в данном случае p-область более легирована, чем n-область) основные носители зарядов стремятся уравновесить концентрацию друг друга и ионизированных примесей с обеих сторон p – n перехода. В результате диффузии часть дырок из p-области переходит в n-область. Эти дырки начинают рекомбинировать с электронами, что приводит к уменьшению концентрации электронов вблизи раздела областей, аналогично из n-области электроны диффундируют в p-область и рекомбинируют с дырками, снижая их концентрацию, см. рис.

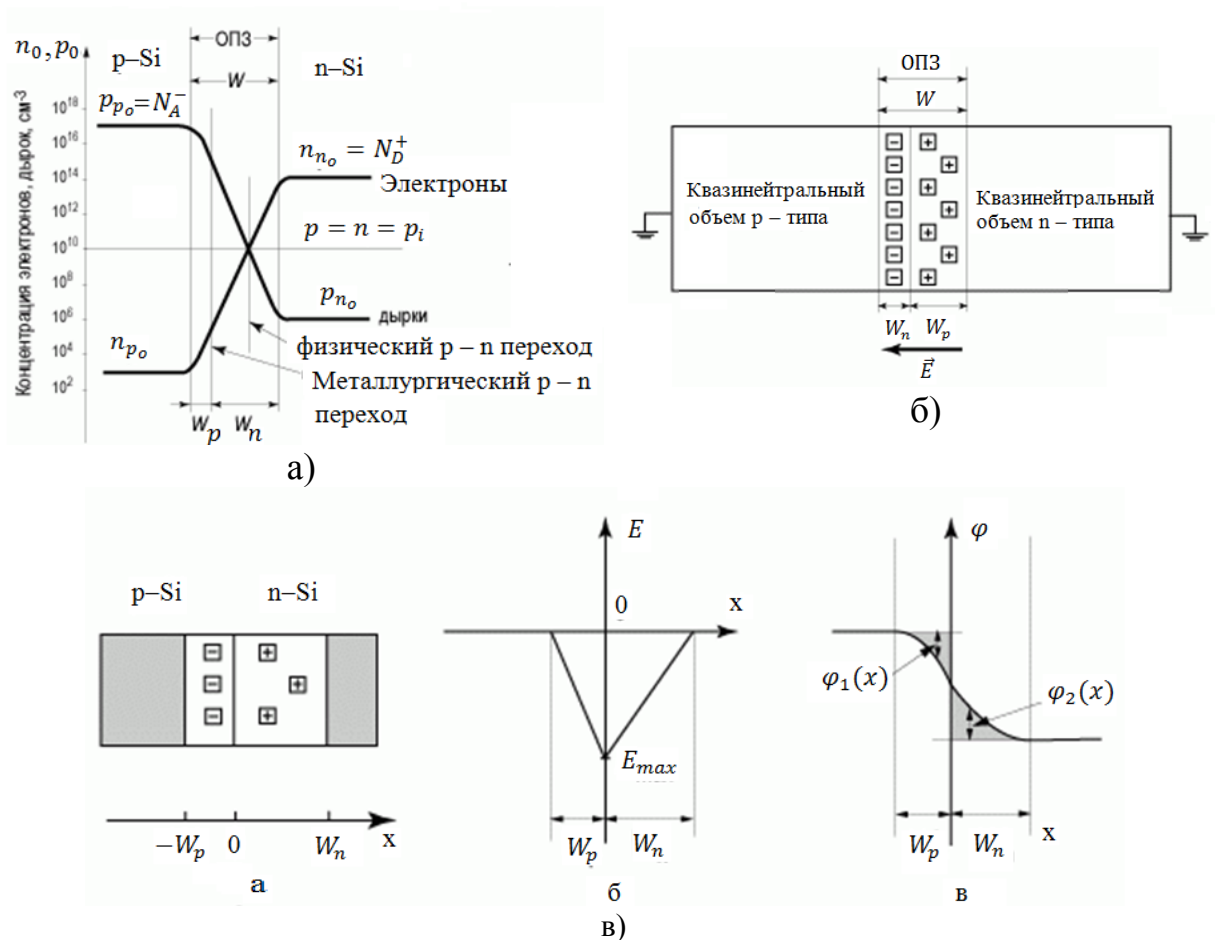


Рис. 5.2. Иллюстрация к ответу на теоретический вопрос по физике полупроводниковых приборов и интегральных схем

Существует точка, в которой концентрация дырок и электронов равны, эта точка называется физическим p–n переходом, он смещён в сторону менее легированного полупроводника относительно металлургического p–n перехода (место фактического соединения 2-х полупроводников или 2-х

областей, где концентрации доноров и акцепторов равны). После рекомбинации в обедненных областях остаются заряженные ионы примеси, в n-области положительные донорные ионы, в p-области отрицательные акцепторные ионы. Эти ионы образуют область пространственного заряда. Из-за меньшей концентрации в n-области ионов донорной примеси, эта область более протяженная, чем обедненная p-область. Между положительными и отрицательными ионами образуется разность потенциалов, называемая, контактной разностью потенциалов, она препятствует диффузии основных носителей, но способствует переходу не основных. Значение контактной разности потенциалов зависит от уровня Ферми в p и n-областях или от концентрации доноров и акцепторов.

$$U_k = \varphi_T \cdot \ln(n_n p_p / n_i^2)$$

Если взять производную по координате x, то мы получим напряжённость поля в p-n переходе. Это поле действует только в области обедненной носителями заряда.

### **С.ПМиС. Простые теоретические вопросы по технологии материалов электронной техники**

1. Методы выращивания кристаллов из жидкой фазы.
2. Методы роста кристаллов из расплавов.
3. Тигельные методы выращивания монокристаллов. Методы Чохральского.
4. Бестигельные методы выращивания монокристаллов. Методы Вернейля, зонной плавки, гарнисажа.
5. Методы выращивания монокристаллических пленок. Термовакuumное испарение.
6. Эпитаксиальное выращивание пленок. Задачи, решаемые эпитаксиальной технологией.

7. Общее представление о зарождении и росте кристаллов. Движущая сила кристаллизации.
8. Методы эпитаксиального выращивания слоев кремния.
9. Классификация дефектов в кристаллах. Макро- и микродефекты.
10. Точечные дефекты. Линейные дефекты. Объемные дефекты. Дефекты эпитаксиальных пленок.

### Пример ответа на простой теоретический вопрос по технологии материалов электронной техники

**Вопрос.** Методы эпитаксиального выращивания слоев кремния.

**Ответ.** Эпитаксиальное выращивание слоев кремния из парогазовой фазы обычно проводят в цилиндрическом, горизонтально расположенном реакторе, из стеклообразного кварца, на помещенной внутри него подложке. Подложка находится на держателе. Выращивание кремния проводится в непрерывном потоке парогазовой смеси при высоких температурах. По существу – это газотранспортная химическая реакция.

Для выращивания эпитаксиального кремния можно использовать один из четырех кремнесодержащих веществ-реагентов (тетрахлорид кремния -  $\text{SiCl}_4$ , трихлорсилан -  $\text{SiHCl}_3$ , дихлорсилан -  $\text{SiH}_2\text{Cl}_2$  и силан -  $\text{SiH}_4$ ) и водород, как газ – восстанавливающий перечисленные газы до кремния  $\text{Si}$ . При таких условиях возможно протекание химических реакций типа  $\text{SiCl}_4 + 2\text{H}_2 = \text{Si}_{\text{ТВ}} + 4\text{HCl}$ .

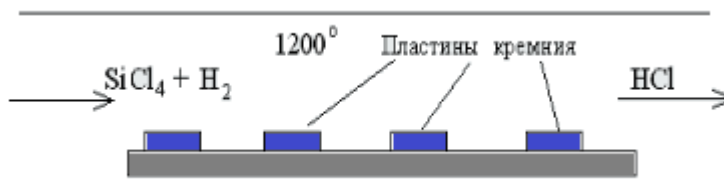


Рис. 5.3. Схема реактора для эпитаксии из парогазовой смеси.

Газ разлагается на поверхности пластины и на нее осаждаются атомы кремния. Все вещества, поступающие в реактор, являются газами, отсюда происходит название «химическое осаждение из газовой фазы».

### **С.ПМиС. Сложные теоретические вопросы по физике полупроводников**

1. Объясните температурную зависимость положения уровня Ферми в примесном полупроводнике.
2. Пробой p – n перехода. Анализ туннельного пробоя.
3. Методы определения проводимости полупроводниковых материалов.
4. Типы полупроводников. Элементарные полупроводники. Бинарные соединения.
5. Распределение квантовых состояний в зонах.
6. Распределение Ферми-Дирака. Концентрация электронов и дырок в зонах.
7. Диффузия неравновесных носителей в полупроводниках.
8. Различные типы процессов рекомбинации. Время жизни при излучательной рекомбинации.
9. Магнитные эффекты в полупроводниках. Эффект Холла.
10. Край собственного поглощения полупроводников. Причины прозрачности и непрозрачности в видимой области спектра диэлектриков и полупроводников соответственно.
11. Зонная структура кремния, германия и арсенида галлия и их особенности.

### **Пример ответа на сложный теоретический вопрос по физике полупроводников**

**Вопрос.** Распределение квантовых состояний в зонах. Распределение Ферми-Дирака. Концентрация электронов и дырок в зонах.

**Ответ.** Стационарные состояния электрона в идеальном кристалле характеризуются квазиимпульсом  $p$ . Для расчета концентраций носителей заряда выделим внутри кристалла единичный объем  $dV = 1 \text{ см}^3$ . Тогда, согласно квантовой механике, получим  $dp \leq h^3$ . Это означает, внутри объема  $dp = h^3$  в зоне Бриллюэна может иметь место только одно квантовое состояние, которое размыто по всему этому объему.  $h^3$  - это объем, в который можно поместить только два электрона с разными спинами. Поэтому число квантовых состояний на единицу объема кристалла равно  $dp/h^3$ . Согласно принципу Паули, не может быть два электрона с одним импульсом, если у них одинаковые спины. При заполнении зоны проводимости электронами заполняются вначале самые нижние уровни. Заполнение зоны Бриллюэна начинается с самых малых значений квазиимпульса  $p$ . Поэтому  $dp$  - элемент объема, заключенный между двумя очень близкими изоэнергетическими поверхностями (см. рис. 5.4).

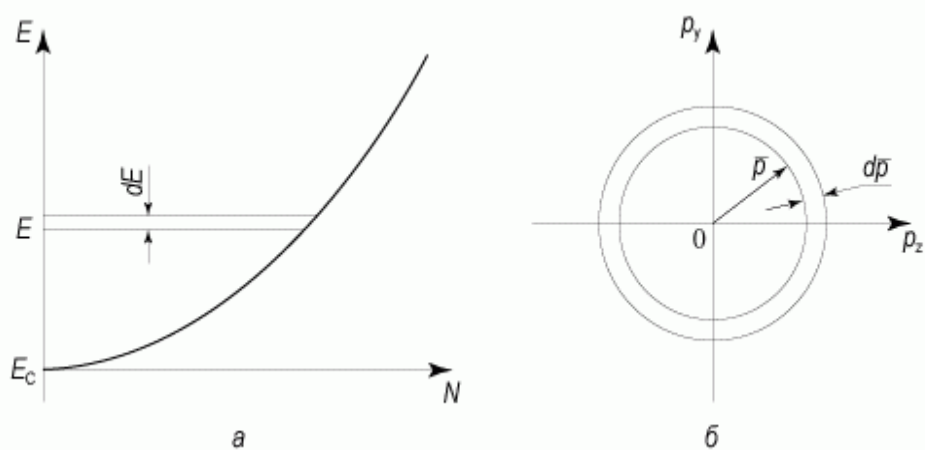


Рис. 5.4. Диаграмма для расчета плотности квантовых состояний:  
а - распределение электронов по энергии в зоне проводимости;  
б - зона Бриллюэна для расчета плотности состояний

Внутри этого тонкого шарового слоя радиусом  $p$  и толщиной  $dp$  число квантовых состояний будет равно:

$$dN = \frac{4\pi p^2 dp}{h^3}.$$

Можно показать, что плотность состояний подчиняется закону  $\sqrt{E}$

### Распределение Ферми-Дирака.

Электроны, как частицы, обладающие полуцелым спином, подчиняются статистике Ферми-Дирака. Вероятность того, что электрон будет находиться в квантовом состоянии с энергией  $E$ , выражается функцией Ферми-Дирака:

$$f(E, T) = \frac{1}{1 + \exp\left(\frac{E - F}{kT}\right)}.$$

Здесь  $F$  - электрохимический потенциал, или уровень Ферми. Из последней формулы видно, что уровень Ферми можно определить как энергию такого квантового состояния, вероятность заполнения которого равна  $1/2$ .

### Концентрация электронов и дырок в зонах.

Концентрация электронов в зоне проводимости равна:

$$n = 2 \cdot \int_{E_c}^{\infty} N_c(E) f(E, T) dE.$$

Здесь множитель «2» появляется из-за спина электрона. Можно показать, что

$$n = N_c \exp\left(-\frac{E_c - F}{kT}\right),$$

а концентрация дырок в валентной зоне

$$p = N_v \exp\left(-\frac{F - E_v}{kT}\right),$$

где  $E_v$  - энергия, соответствующая потолку валентной зоны, а  $E_c$  - энергия, соответствующая дну зоны проводимости.

## С.ПМиС. Задачи по физике полупроводников

1. Вычислить положение уровня Ферми при  $T = 300$  К в кристаллах кремния, содержащих  $2 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$  атомов мышьяка и  $10^{16} \text{ см}^{-3}$  атомов галлия и покажите их положение на энергетической диаграмме. Известно, что  $N_C(300) = 2,8 \cdot 10^{19} [\text{см}^{-3}]$ ,  $q = 1,6 \cdot 10^{-19} [\text{Кл}]$ ,  $k = 1,38 \cdot 10^{-23} [\text{Дж/К}]$ .

2. Вычислите вероятность нахождения электронов в собственном кремнии на уровнях  $E_F + 0,1$  эВ и  $E_F - 0,1$  эВ при температуре 300К. Ответ можно представить в общем виде. ( $q = 1,6 \cdot 10^{-19} [\text{Кл}]$ ,  $k = 1,38 \cdot 10^{-23} [\text{Дж/К}]$ )

3. Найти положение уровня Ферми в собственном германии при 300 К, если известно, что ширина его запрещенной зоны  $E_g = 0,665$  [эВ], а эффективные массы для дырок валентной зоны и для электронов зоны проводимости соответственно равны:  $m_p = 0,388m_0$ ,  $m_n = 0,55m_0$ , где  $m_0 = 9,1 \cdot 10^{-31} [\text{кг}]$  — масса свободного электрона. Можно воспользоваться тем, что плотности состояний  $N_v(300) = 6,051 \cdot 10^{24} [\text{м}^{-3}]$ ,  $N_c(300) = 1,021 \cdot 10^{25} [\text{м}^{-3}]$ ,  $q = 1,6 \cdot 10^{-19} [\text{Кл}]$ ,  $k = 1,38 \cdot 10^{-23} [\text{Дж/К}]$ .

4. Р и n области кремниевого диода с резким переходом имеют удельное сопротивление 0,013 и 44,5 [Ом·см] соответственно. Изобразите схематически энергетическую диаграмму такой структуры. ( $n_i(300) = 0,7 \cdot 10^{10} [\text{см}^{-3}]$ ,  $q = 1,6 \cdot 10^{-19} [\text{Кл}]$ ,  $k = 1,38 \cdot 10^{-23} [\text{Дж/К}]$ ).

5. Определить положение уровня Ферми при  $T = 300$  К в кристаллах германия, легированных мышьяком до концентрации  $10^{23} \text{ м}^{-3}$ . ( $N_C(300) = 1,021 \cdot 10^{25} [\text{м}^{-3}]$ ,  $q = 1,6 \cdot 10^{-19} [\text{Кл}]$ ,  $k = 1,38 \cdot 10^{-23} [\text{Дж/К}]$ ).

6. В собственном германии ширина запрещенной зоны при температуре 300 К равна 0,665 эВ. На сколько надо повысить температуру, чтобы число электронов в зоне проводимости увеличилось в два раза? Температурным изменением эффективной плотности состояний для электронов и дырок при расчете пренебречь. ( $N_v(300) = 6,051 \cdot 10^{24} [\text{м}^{-3}]$ ,  $N_c(300) = 1,021 \cdot 10^{25} [\text{м}^{-3}]$ ,  $q = 1,6 \cdot 10^{-19} [\text{Кл}]$ ,  $k = 1,38 \cdot 10^{-23} [\text{Дж/К}]$ ).

7. Найти концентрацию собственных носителей заряда в полупроводниках: Si, Ge, GaAs. Как влияет температура на положение этого уровня? Для германия:  $N_v(300)=6,051 \cdot 10^{24} \text{ [м}^{-3}\text{]}$ ,  $N_c(300)=1,021 \cdot 10^{25} \text{ [м}^{-3}\text{]}$ , для кремния  $N_v(300)=1,0 \cdot 10^{24} \text{ [м}^{-3}\text{]}$ ,  $N_c(300)=2,8 \cdot 10^{24} \text{ [м}^{-3}\text{]}$ , Для GaAs  $N_v(300)=9,8 \cdot 10^{23} \text{ [м}^{-3}\text{]}$ ,  $N_c(300)=5,8 \cdot 10^{22} \text{ [м}^{-3}\text{]}$   $q=1,6 \cdot 10^{-19} \text{ [Кл]}$ ,  $k=1,38 \cdot 10^{-23} \text{ [Дж/К]}$ .

8. Определить вероятность заполнения электронами энергетического уровня, расположенного на 10 кТ выше уровня Ферми.

9. Определить, на сколько различаются вероятности заполнения электронами нижнего уровня зоны проводимости в собственном германии и собственном кремнии: при 300 К. Ширина запрещенной зоны при температуре 300 К германия равна 0,665 эВ, кремния –1,12 эВ.

10. Вычислить собственную концентрацию носителей заряда в кремнии при  $T=300 \text{ К}$ , если ширина его запрещенной зоны  $\Delta W=1,12 \text{ эВ}$ , а эффективные массы  $m_c=1,05m_0$ ,  $m_v=0,56m_0$ . ( $q=1,6 \cdot 10^{-19} \text{ [Кл]}$ ,  $k=1,38 \cdot 10^{-23} \text{ [Дж/К]}$ ).

### Пример решения задачи по физике полупроводников

**Вопрос.** Найти положение уровня Ферми в собственном германии при 300 К, если известно, что ширина его запрещенной зоны  $E_g=0,665 \text{ [эВ]}$ , а эффективные массы для дырок валентной зоны и для электронов зоны проводимости соответственно равны:  $m_p=0,388m_0$ ,  $m_n=0,55m_0$ , где  $m_0=9,1 \cdot 10^{-31} \text{ [кг]}$  — масса свободного электрона. Можно воспользоваться тем, что плотности состояний  $N_v(300)=6,051 \cdot 10^{24} \text{ [м}^{-3}\text{]}$ ,  $N_c(300)=1,021 \cdot 10^{25} \text{ [м}^{-3}\text{]}$ ,  $q=1,6 \cdot 10^{-19} \text{ [Кл]}$ ,  $k=1,38 \cdot 10^{-23} \text{ [Дж/К]}$ .

**Ответ.**

$$N_c(300) = 1.021 \times 10^{25} \text{ м}^{-3}$$

$$N_c(300) \cdot 10^{-6} = 1.021 \times 10^{19} \text{ см}^{-3}$$

$$N_v(300) = 6.051 \times 10^{24} \text{ м}^{-3}$$

$$N_v(300) \cdot 10^{-6} = 6.051 \times 10^{18} \text{ см}^{-3}$$

$$\varphi_T(T) := \frac{k \cdot T}{q}$$

$$E_F(T) := \frac{E_{g\_Ge}}{2} + \frac{\varphi_T(T)}{2} \cdot \ln \left( \frac{N_v(T)}{N_c(T)} \right)$$

$$\frac{\varphi_T(300)}{2} \cdot \ln \left( \frac{N_v(300)}{N_c(300)} \right) = -6.771 \times 10^{-3}$$

Эффективная плотность состояний в зоне проводимости при комнатной температуре (300 К)

Эффективная плотность состояний в валентной зоне при комнатной температуре (300 К)

Тепловой потенциал, при комнатной температуре 0,025 [эВ].

Формула для расчета:  
Зависимость уровня Ферми от температуры

Ответ: отклонение положения уровня ферми от середины запрещенной зоны

Если воспользоваться значениями эффективных масс:

$$k = 1,38 \cdot 10^{-23} \text{ Дж/К}$$

$$m_0 = 9,1 \cdot 10^{-31} \text{ кг}$$

$$h = 6,626 \cdot 10^{-34} \text{ Дж/с}$$

$$E_{g\_Ge} := 0.665 \text{ эВ}$$

$$m_{n\_Ge} := 0.55 \text{ относ\_ед}$$

$$m_{p\_Ge} := 0.388 \text{ относ\_ед}$$

Постоянная Больцмана

Масса электрона

Постоянная Планка

Ширина запрещенной зоны в германии

Эффективная масса

электронов в германии

Эффективная масса дырок в германии

$$N_c(T) := 2 \cdot \left( \frac{2 \cdot \pi \cdot m_{n\_Ge} \cdot m_e \cdot k \cdot T}{h^2} \right)^{\frac{3}{2}}$$

$$N_v(T) := 2 \cdot \left( \frac{2 \cdot \pi \cdot m_{p\_Ge} \cdot m_e \cdot k \cdot T}{h^2} \right)^{\frac{3}{2}}$$

Эффективная плотность состояний в зоне проводимости

Эффективная плотность состояний в валентной зоне

$$E_F(T) := \frac{E_{g\_Ge}}{2} + \frac{\varphi_T(T)}{2} \cdot \ln\left(\frac{N_V(T)}{N_C(T)}\right)$$

Формула для расчета:  
Зависимость уровня Ферми от температуры

$$F(T) := \frac{E_{g\_Ge}}{2} + \frac{3k \cdot T}{4 \cdot q} \cdot \ln\left[\frac{(0.388)}{(0.55)}\right]$$

Зависимость уровня Ферми от температуры

Ответ:  $F(300K) = 0,326$  [эВ]

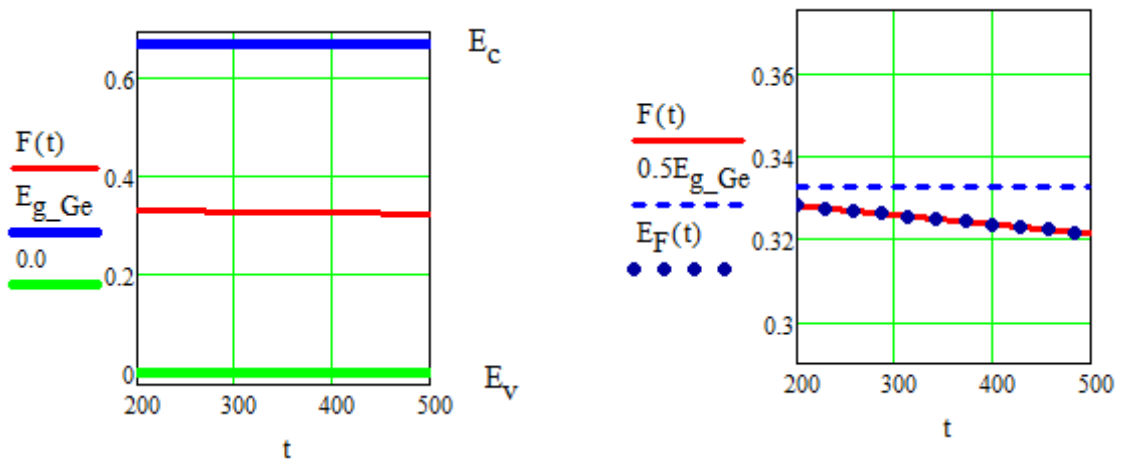


Рис. 5.5. Зависимость уровня Ферми от Температуры в разных масштабах энергии

### С.ПМиС. Сложные теоретические вопросы по физике полупроводниковых приборов и интегральных схем

1. Объясните физические принципы работы униполярных приборов.
2. Полупроводниковые структуры, содержащие два и более р-п переходов. Физические явления в них, энергетические диаграммы, характеристики, свойства.
3. Объясните понятие «невырожденные полупроводники».
4. Контактные явления. Работа выхода, термоэлектронная эмиссия, контактная разность потенциалов, контакт металл-металл.
5. Охарактеризуйте диффузию и дрейф неравновесных носителей в полупроводниках.
6. Анализ р – n перехода в равновесном состоянии. Математическая модель р – n перехода.

7. Объясните температурную зависимость положения уровня Ферми в примесном полупроводнике.
8. Объясните процессы рекомбинации носителей заряда в полупроводниках.
9. Модели биполярных транзисторов. Модель Эберса-Мола.
10. Анализ идеальной МДП-структуры. Физические принципы работы униполярных приборов.

### Пример ответа на теоретический вопрос по физике полупроводниковых приборов и интегральных схем

**Вопрос.** Объясните температурную зависимость положения уровня Ферми в примесном полупроводнике.

**Ответ.** Положение уровня Ферми в легированных или примесных полупроводниках может быть найдено из условия электронейтральности кристалла. Если полупроводник донорный, то при наличии малого количества акцепторных примесей, поскольку полупроводник никогда нельзя очистить полностью от малого количества любых примесей  $N_d \gg N_a$ . Для донорного полупроводника это условие при температуре 0 К приводит к заполнению акцепторных уровней электронами, перешедшими с донорных уровней. Количество электронов на донорных уровнях равно  $N_d - N_a$ . Остальные донорные атомы не ионизированы.

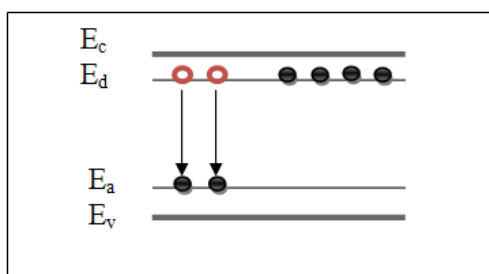


Рис. 5.6. Иллюстрация ионизации уровней примеси

При не нулевой температуре ( $T > 0\text{K}$ ) условие электронейтральности

$$(n_0 + n_d) - (p_0 - p_a) = N_d - N_a.$$

Здесь  $n_0$  — концентрация электронов в зоне проводимости, обусловленная переходами электронов из валентной зоны, эти переходы не показаны;  $p_0$  — концентрация дырок в валентной зоне, обусловленная переходами электронов из валентной зоны, эти переходы не показаны;  $n_d$  — концентрация электронов в зоне проводимости, перешедших с донорных уровней;  $p_a$  — концентрация дырок в валентной зоне, перешедших с акцепторных уровней.

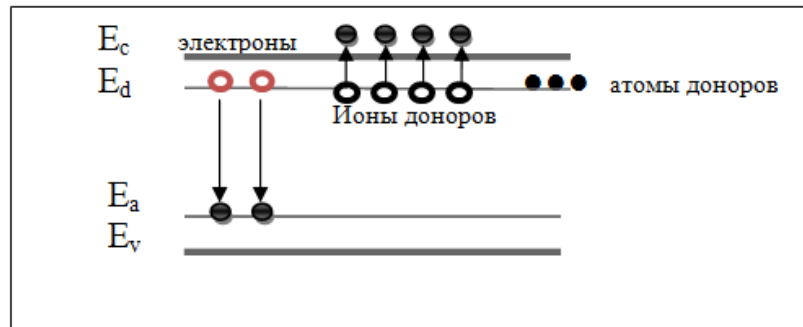


Рис. 5.7. Иллюстрация ионизации уровней примеси

Условие  $N_d \gg N_a$  упрощает расчеты, можно принять, что  $N_a = 0$ , тогда при достаточно низких температурах только донорные атомы передадут электроны в зону проводимости и  $n = n_d = N_d^+$

Концентрация электронов на уровне донорной примеси (неионизированных атомов доноров) определяется с помощью распределения Ферми-Дирака, количество положительных ионов донорной примеси дополняет это значение до общего количества атомов донорной примеси.

При полной ионизации атомов донорной примеси  $N_d^{+N_d}$ , т.е. при более высокой температуре  $(n_0 + n_d) - (p_0) = N_d$

Концентрации  $n_0$  и  $p_0$  выражаются через плотности состояний  $N_c$  и  $N_v$ .

Подстановка в условие электронейтральности концентраций электронов и дырок, а также концентрации электронов на донорных уровнях приводит к уравнению относительно положения уровня Ферми  $E_F$ .

Уравнение ввиду его сложности обычно в общем виде не решают, а ограничиваются рассмотрением частных случаев. Общий вид зависимости уровня Ферми  $E_F$  от температуры представлен на рисунке 5.8.

Из уравнения следует, что при абсолютном нуле температуры энергия Ферми донорного полупроводника находится строго посередине между дном зоны проводимости и донорными уровнями.

Уровень Ферми с повышением температуры сначала смещается к зоне проводимости, а затем - к валентной зоне.

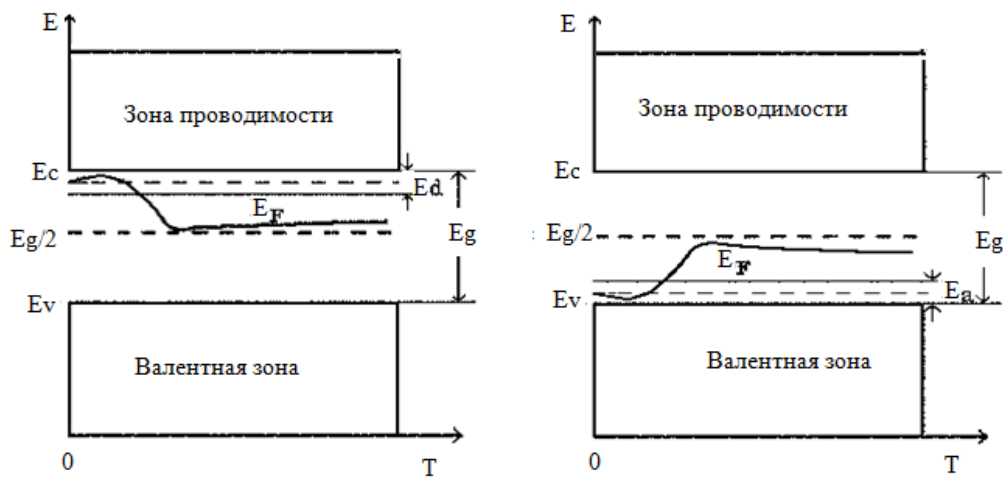


Рис. 5.8. Общий вид зависимости уровня Ферми от температуры

Аналогично можно получить выражение для температурной зависимости уровня Ферми в акцепторном полупроводнике.

### С.ПМиС. Задачи по физике полупроводниковых приборов и интегральных схем

1. Уровень Ферми в полупроводнике находится на 0,3 эВ ниже дна зоны проводимости. Какова вероятность того, что при комнатной температуре энергетические уровни, расположенные на  $3kT$  выше зоны проводимости, заняты электронами? ( $q=1,6 \cdot 10^{-19}$  [Кл],  $k=1,38 \cdot 10^{-23}$  [Дж/К]).

2. Найти, чему равна собственная концентрация свободных носителей заряда в кремнии Si при комнатной температуре  $T=300$  К,

$q=1,6 \cdot 10^{-19}$  [Кл]. ( $N_v(300)=6,051 \cdot 10^{24}$  [ $\text{м}^{-3}$ ] ,  $N_C(300)=1,021 \cdot 10^{25}$  [ $\text{м}^{-3}$ ] ,  $k=1,38 \cdot 10^{-23}$  [Дж/К]).

3. Кремний Si легирован донорной примесью до концентрации  $N_D = 10^{17}$  [ $\text{см}^{-3}$ ]. Считая примесь полностью ионизованной, найти концентрацию основных и неосновных носителей заряда при температуре  $T=300$  К.

4. Рассчитать положение уровня Ферми  $\phi_0$  относительно середины запрещенной зоны  $\phi_i$  в кремнии собственной проводимости при температурах  $T_1 = 300$  К и  $T_2 = 200$  К с учетом различия эффективных масс электронов и дырок. ( $m_n^*=1,08m_0$ ,  $m_p^*=0,56m_0$ ,  $q=1,6 \cdot 10^{-19}$  [Кл],  $k=1,38 \cdot 10^{-23}$  [Дж/К]).

5. Найти положение уровня Ферми  $\phi_0$  в германии Ge p – типа с удельной электропроводностью  $\rho=10$  [Ом·см] при температуре  $T=300$  К. ( $\mu_p=0,19$  [ $\text{м}^2/\text{В} \cdot \text{с}$ ],  $n_i=2,37 \cdot 10^{13}$  [ $\text{см}^{-3}$ ],  $q=1,6 \cdot 10^{-19}$  [Кл],  $k=1,38 \cdot 10^{-23}$  [Дж/К].)

6. Рассчитать положение уровня Ферми  $\phi_0$  в приближении полностью ионизованной примеси в кремнии n – типа с удельной электропроводностью  $\rho=4,5$  [Ом·см] при температуре  $T_1 = 300$  К. ( $\mu_n=0,13$  [ $\text{м}^2/\text{В} \cdot \text{с}$ ],  $n_i=1,40 \cdot 10^{10}$  [ $\text{см}^{-3}$ ],  $q=1,6 \cdot 10^{-19}$  [Кл],  $k=1,38 \cdot 10^{-23}$  [Дж/К].)

7. Найти удельное сопротивление  $\rho$  электронного и дырочного кремния Si с легирующей примесью  $N_D$  или  $N_A = 10^{16}$   $\text{см}^{-3}$  соответственно при комнатной температуре. ( $\mu_n=0,13$  [ $\text{м}^2/\text{В} \cdot \text{с}$ ],  $\mu_p=0,05$  [ $\text{м}^2/\text{В} \cdot \text{с}$ ],  $n_i=1,40 \cdot 10^{10}$  [ $\text{см}^{-3}$ ],  $q=1,6 \cdot 10^{-19}$  [Кл],  $k=1,38 \cdot 10^{-23}$  [Дж/К].)

8. Основываясь на характеристиках кристаллической структуры типа алмаза, рассчитайте для кремния число атомов в элементарной ячейке, число атомов в  $1 \text{ см}^3$ , удельную плотность, если известно, что атомная масса кремния равна 28, а плотность равна  $2,4$  [ $\text{г} \cdot \text{см}^{-3}$ ], число Авогадро  $6,02 \cdot 10^{23}$  моль $^{-1}$ .

9. На сколько надо повысить температуру кремния Si от нормальных условий, чтобы концентрация собственных носителей в нем увеличилась в два раза. Температурным изменением эффективной плотности

состояний для электронов и дырок при расчете пренебречь. Ответ можно дать в общей форме.

10. Основываясь на характеристиках кристаллической структуры типа алмаза, рассчитайте для германия число атомов в элементарной ячейке, число атомов в  $1 \text{ см}^3$ , удельную плотность, если известно, что атомная масса германия равна 73 а плотность равна  $5,33 \text{ [Г}\cdot\text{см}^{-3}]$ , число Авогадро  $6,02 \cdot 10^{23} \text{ моль}^{-1}$ .

### Пример решения задачи по физике полупроводниковых приборов и интегральных схем

**Вопрос.** Уровень Ферми в полупроводнике находится на 0,3 эВ ниже дна зоны проводимости. Какова вероятность того, что при комнатной температуре энергетические уровни, расположенные на  $3kT$  выше зоны проводимости, заняты электронами?

**Ответ.** Вероятность того, что электрон будет находиться в квантовом состоянии с энергией  $E$ , выражается функцией Ферми-Дирака:

$$f(E, T) = \frac{1}{1 + \exp\left(\frac{E - E_f}{\frac{kT}{q}}\right)}$$

Искомый уровень выше дна зоны проводимости, поэтому складываем 0,3 эВ и  $3kT/q$ :

$$f(T) := \frac{1}{1 + e^{\frac{0.3 + k \cdot \frac{3T}{q}}{k \cdot \frac{T}{q}}}}$$

Ответ:  $F(300\text{K}) = 4,59\text{E-}7 \text{ [эВ]}$