

**Институт**

**Радиотехники и электроники им. В.А.**

**Котельникова**

**Направление подготовки**

**11.04.04 Электроника и наноэлектроника**

**Банк заданий по специальной части вступительного испытания в магистратуру**

**Базовая часть**

**Задание экзаменационного билета № 1 (40 баллов)**

**Тема: Твердотельная электроника**

**Вариант 1.1**

Задание 1. Приведите схематехническое изображение полупроводникового диода, отметьте анод и катод, отметьте р- и n-области – максимум 4 балла.

Задание 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.

Задание 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  $pn$ -перехода, дайте пояснения входящим в нее компонентам – максимум 8 баллов

Задание 4. Нарисуйте на том же графике вольт-амперную характеристику диода с учётом влияния сопротивления базы и генерационно-рекомбинационных токов, укажите влияние каждой составляющей, объясните причину этого влияния. Нарисуйте вольт-амперную характеристику диода в полупологарифмическом масштабе – отметьте ток насыщения и генерационно-рекомбинационный ток – максимум 10 баллов.

Задание 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.

**Вариант 1.2.**

Задание 1. Нарисуйте условно-графическое обозначение  $nprn$ -транзистора, отметьте контакт эмиттера, базы и коллектора, отметьте n- и p-области – максимум 4 балла.

Задание 2. Нарисуйте энергетическую диаграмму  $nprn$ -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  $nprn$ -транзистора в нормальном усилительном режиме при включении по схеме общая база – максимум 8 баллов.

Задание 3. Напишите выражение для коэффициента усиления тока базы, поясните, от каких составляющих он зависит и как повысить каждую составляющую, поясните что усиливает транзистор в схеме включения «общая база» и за счет чего – максимум 8 баллов.

Задание 4. Нарисуйте семейство входных и выходных вольт-амперных характеристик  $nprn$ -транзистора, включённого по схеме с общим эмиттером, 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 – максимум 10 баллов.

Задание 5. Нарисуйте нагрузочную кривую на том же семействе вольт-амперных характеристик, отметьте рабочие точки, соответствующие режиму насыщения (точка Н), режиму отсечки (точка ОТ), активному режиму (точка АУ) – максимум 10 баллов.

#### Вариант 1.3

Задание 1. Нарисуйте условно-графическое обозначение *рпр*-транзистора, отметьте контакт эмиттера, базы и коллектора, отметьте области р- и п-типа проводимости – максимум 4 балла.

Задание 2. Нарисуйте энергетическую диаграмму *рпр*-транзистора при нулевом смещении, подпишите энергетические уровни, отметьте области базы, эмиттера и коллектора; нарисуйте энергетическую диаграмму *рпр*-транзистора в нормальном усилительном режиме при включении по схеме общая база – максимум 8 баллов.

Задание 3. Напишите выражение для коэффициента усиления тока базы, поясните, от каких составляющих он зависит и как повысить каждую составляющую – максимум 8 баллов.

Задание 4. Нарисуйте семейство входных и выходных вольт-амперных характеристик *рпр*-транзистора, включённого по схеме с общим эмиттером, 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 и в режиме отсечки – точка ОТ – максимум 10 баллов.

Задание 5. Нарисуйте нагрузочную кривую на том же семействе вольт-амперных характеристик, отметьте рабочие точки, соответствующие режиму насыщения (точка Н), режиму отсечки (точка ОТ), активному режиму (точка АУ) – максимум 10 баллов.

#### Вариант 1.4

Задание 1. Нарисуйте условно-графическое обозначение динистора, отметьте контакты анода и катода – максимум 4 балла.

Задание 2. Нарисуйте энергетическую диаграмму динистора в режимах «закрыто» и «открыто», подпишите энергетические уровни, подпишите области анода, катода и баз – максимум 8 баллов.

Задание 3. Нарисуйте энергетическую диаграмму динистора (двухэлектродного тиристора) при нулевом смещении, подпишите энергетические уровни, подпишите области анода, катода и баз – максимум 8 баллов.

Задание 4. Нарисуйте вольт-амперную характеристику динистора, подпишите оси, отметьте ток и напряжение включения, ток удержания – максимум 10 баллов.

Задание 5. Поясните физические процессы, приводящие к переключению прибора из высокоомного состояния в низкоомное и обратно, как заставить прибор открываться при меньших напряжениях – максимум 10 баллов.

#### Вариант 1.5

Задание 1. Нарисуйте условно-графическое обозначение *n*-канального полевого транзистора с управляющим *pn*-переходом, отметьте контакты стока, истока, затвора, отметьте р- и п-области – максимум 4 балла.

Задание 2. Нарисуйте структуру *n*-канального полевого транзистора с управляющим *pn*-переходом, отметьте области истока и стока, затвор и канал, укажите типы проводимостей всех областей – максимум 8 баллов.

Задание 3. Нарисуйте семейство выходных вольт-амперных характеристик *n*-канального полевого транзистора с управляющим *pn*-переходом, включённого по схеме с общим истоком, подпишите оси, отметьте, чем различаются кривые в семействе – максимум 8 баллов.

Задание 4. Нарисуйте семейство передаточных характеристик *n*-канального полевого транзистора с управляющим *pn*-переходом, подпишите оси, укажите знаки напряжений,

отметьте напряжение отсечки и максимальный ток стока. Поясните, почему при напряжении  $U_{зи}=0$  изменяется сопротивление канала – максимум 10 баллов.

Задание 5. Нарисуйте нагрузочную кривую на том же семействе вольт-амперных характеристик, отметьте рабочие точки, соответствующие работе в пологой области и области крутых характеристик – максимум 10 баллов.

#### Вариант 1.6

Задание 1. Нарисуйте условно-графическое обозначение  $p$ -канального полевого транзистора с управляющим  $pn$ -переходом, отметьте контакты стока, истока, затвора, отметьте  $p$ - и  $n$ -области – максимум 4 балла.

Задание 2. Нарисуйте структуру  $p$ -канального полевого транзистора с управляющим  $pn$ -переходом, отметьте области истока и стока, затвор и канал, укажите типы проводимостей всех областей – максимум 8 баллов.

Задание 3. Нарисуйте семейство выходных вольт-амперных характеристик  $p$ -канального полевого транзистора с управляющим  $pn$ -переходом, включённого по схеме с общим истоком, подпишите оси, отметьте, чем различаются кривые в семействе – максимум 8 баллов.

Задание 4. Нарисуйте семейство передаточных характеристик  $n$ -канального полевого транзистора с управляющим  $pn$ -переходом, подпишите оси, укажите знаки напряжений, отметьте напряжение отсечки и максимальный ток стока. Поясните, почему при напряжении  $U_{зи}=0$  изменяется сопротивление канала – максимум 10 баллов.

Задание 5. Нарисуйте нагрузочную кривую на том же семействе вольт-амперных характеристик, отметьте рабочие точки, соответствующие работе в пологой области и области крутых характеристик – максимум 10 балла.

#### Вариант 1.7

Задание 1. Нарисуйте условно-графическое обозначение  $n$ -канального МДП-транзистора с изолированным затвором, отметьте контакты стока, истока, затвора и подложки – максимум 4 балла.

Задание 2. Нарисуйте структуру  $n$ -канального МДП-транзистора с изолированным затвором, отметьте области истока и стока, затвор и подзатворный диэлектрик, укажите типы проводимостей всех областей – максимум 8 баллов.

Задание 3. Нарисуйте семейство выходных вольт-амперных характеристик  $n$ -канального МДП-транзистора с изолированным затвором, включённого по схеме с общим истоком, подпишите оси, отметьте, чем различаются кривые в семействе – максимум 8 баллов.

Задание 4. Нарисуйте семейство передаточных характеристик  $n$ -канального МДП-транзистора с изолированным затвором, подпишите оси, укажите знаки напряжений, отметьте пороговое напряжение – максимум 10 баллов.

Задание 5. Нарисуйте нагрузочную кривую на том же семействе вольт-амперных характеристик, отметьте рабочие точки, соответствующие работе в пологой области и области крутых характеристик – максимум 10 баллов.

#### Вариант 1.8

Задание 1. Нарисуйте условно-графическое обозначение  $p$ -канального МДП-транзистора с изолированным затвором, отметьте контакты стока, истока, затвора и подложки – максимум 4 балла.

Задание 2. Нарисуйте структуру  $p$ -канального МДП-транзистора с изолированным затвором, отметьте области истока и стока, затвор и подзатворный диэлектрик, укажите типы проводимостей всех областей – максимум 8 баллов.

Задание 3. Нарисуйте семейство выходных вольт-амперных характеристик  $p$ -канального МДП-транзистора с изолированным затвором, включённого по схеме с общим истоком, подпишите оси, отметьте, чем различаются кривые в семействе – максимум 8 баллов.

Задание 4. Нарисуйте семейство передаточных характеристик  $p$ -канального МДП-транзистора с изолированным затвором, подпишите оси, укажите знаки напряжений, отметьте пороговое напряжение – максимум 10 баллов.

Задание 5. Нарисуйте нагрузочную кривую на том же семействе вольт-амперных характеристик, отметьте рабочие точки, соответствующие работе в пологой области и области крутых характеристик – максимум 10 баллов.

#### Вариант 1.9

Задание 1. Нарисуйте условно-графическое обозначение  $n$ -канального полевого транзистора с управляющим  $pn$ -переходом, отметьте контакты стока, истока, затвора, отметьте  $p$ - и  $n$ -области – максимум 4 балла.

Задание 2. Нарисуйте структуру  $n$ -канального полевого транзистора с управляющим  $pn$ -переходом, отметьте области истока и стока, затвор и канал, укажите типы проводимостей всех областей – максимум 8 баллов.

Задание 3. Нарисуйте передаточную характеристику  $n$ -канального полевого транзистора с управляющим  $pn$ -переходом, подпишите оси, укажите знаки напряжений, отметьте напряжение отсечки и максимальный ток стока – максимум 8 баллов.

Задание 4. Нарисуйте семейство выходных вольт-амперных характеристик  $n$ -канального полевого транзистора с управляющим  $pn$ -переходом, включённого по схеме с общим истоком, подпишите оси, отметьте, чем различаются кривые в семействе – максимум 10 баллов.

Задание 5. Нарисуйте нагрузочную кривую на том же семействе вольт-амперных характеристик, отметьте рабочие точки, соответствующие работе в пологой области и области крутых характеристик – максимум 10 баллов.

#### Вариант 1.10

Задание 1. Нарисуйте условно-графическое обозначение  $p$ -канального полевого транзистора с управляющим  $pn$ -переходом, отметьте контакты стока, истока, затвора, отметьте  $p$ - и  $n$ -области – максимум 4 балла.

Задание 2. Нарисуйте структуру  $p$ -канального полевого транзистора с управляющим  $pn$ -переходом, отметьте области истока и стока, затвор и канал, укажите типы проводимостей всех областей – максимум 8 баллов.

Задание 3. Нарисуйте передаточную характеристику  $p$ -канального полевого транзистора с управляющим  $pn$ -переходом, подпишите оси, укажите знаки напряжений, отметьте напряжение отсечки и максимальный ток стока – максимум 8 баллов.

Задание 4. Нарисуйте семейство выходных вольт-амперных характеристик  $p$ -канального полевого транзистора с управляющим  $pn$ -переходом, включённого по схеме с общим истоком, подпишите оси, отметьте, чем различаются кривые в семействе – максимум 10 баллов.

Задание 5. Нарисуйте нагрузочную кривую на том же семействе вольт-амперных характеристик, отметьте рабочие точки, соответствующие работе в пологой области и области крутых характеристик – максимум 10 баллов.

#### Пример выполнения варианта 1.4

Решение

Задание 1.

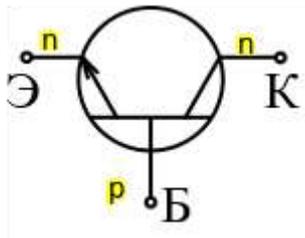


Рис. 1. Условно-графическое обозначение *npn*-транзистора

Задание 2.

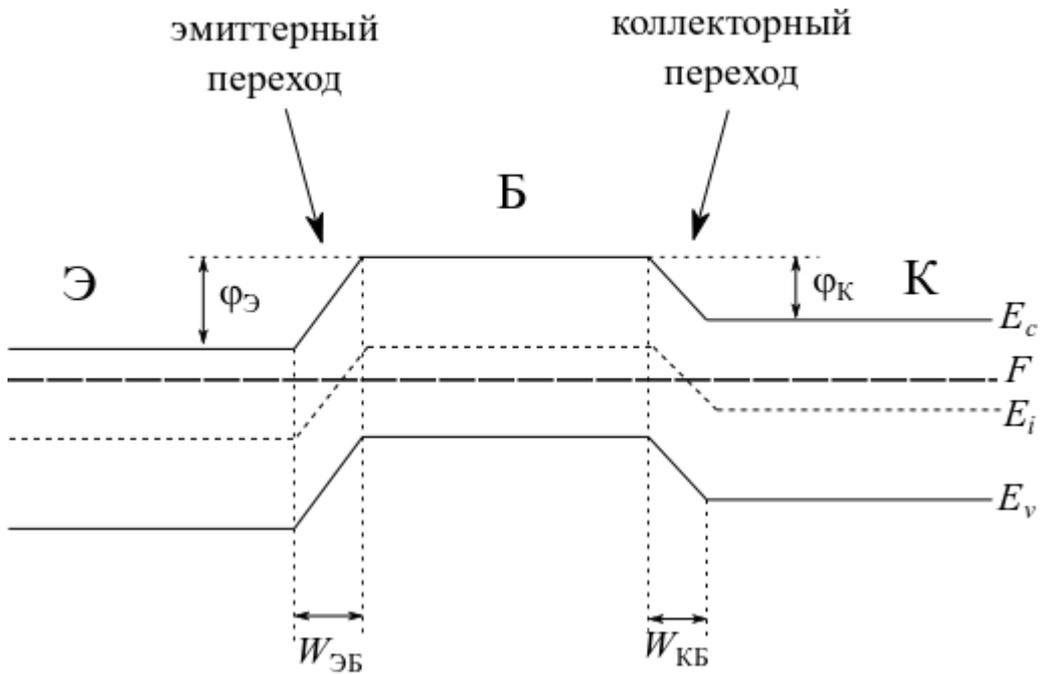


Рис. 2. Энергетическая диаграмма *npn*-транзистора

Задание 3.

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

$$\kappa = \text{ch}^{-1} \left( \frac{W_B}{L_n} \right), \text{ где } W_B -$$

экстрагироваться в коллектор. При этом коэффициент переноса толшина базы,  $L_n$  — диффузионная длина неосновных носителей заряда (электронов), возрастает и, как следствие, растёт коэффициент передачи тока эмиттера  $\alpha = \gamma \cdot \kappa$ , где  $\gamma$  — коэффициент инжекции.

Задание 4.

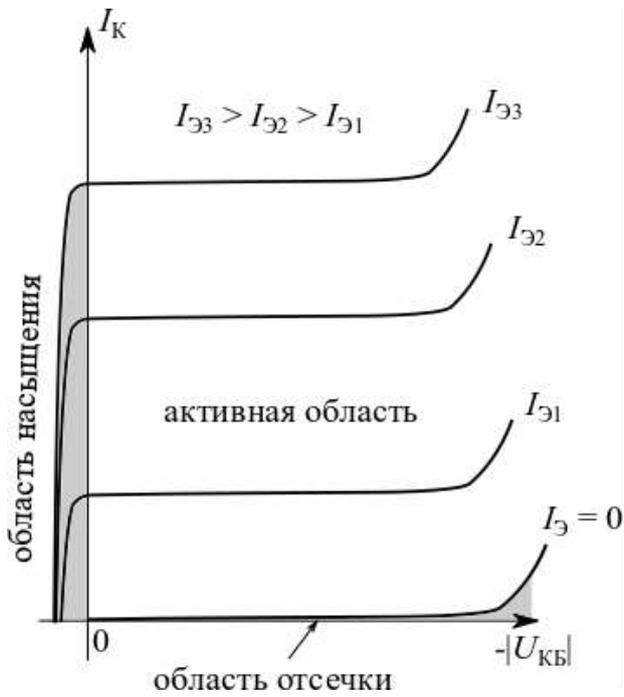


Рис. 3 Выходные вольт-амперные характеристики *n-p-n*-транзистора, включённого по схеме с общей базой

Задание 5.

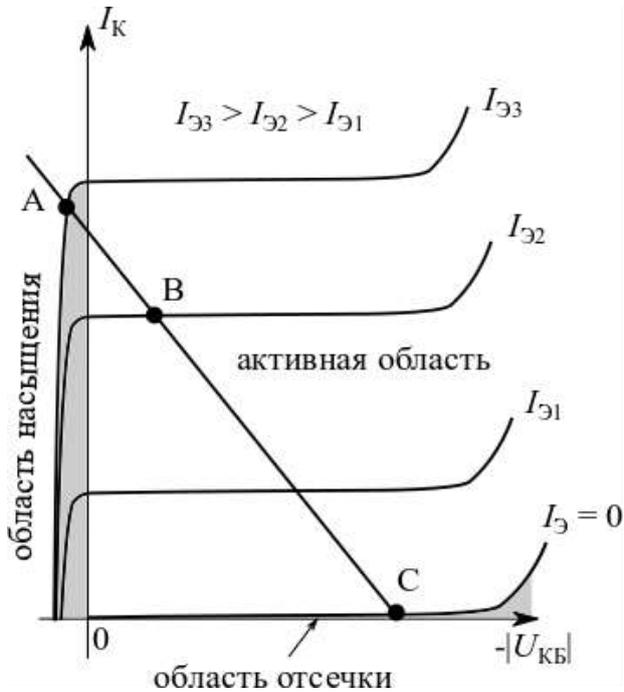
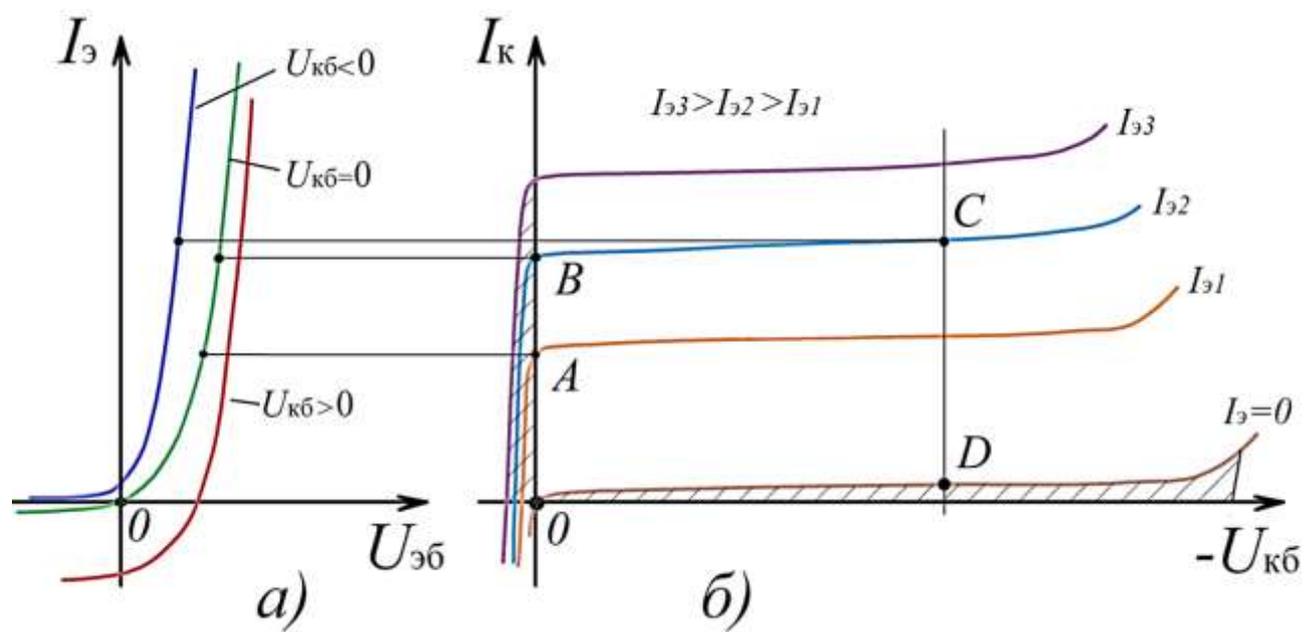


Рис. 4 Выходные вольт-амперные характеристики *n-p-n*-транзистора, включённого по схеме с общей базой, с нагрузочной кривой

Рабочая точка А соответствует работе транзистора в режиме насыщения, рабочая точка В – в активном режиме, рабочая точка С – в режиме отсечки.



## Задание экзаменационного билета № 2 (60 баллов)

*Тема: Промышленная электроника и микропроцессорная техника*

*Тема: Автономные преобразователи (30 баллов)*

### **Вариант 2.1.**

**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. (6 баллов)
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? (6 баллов)
3. Построить временные диаграммы тока дросселя, тока стока транзистора и напряжения сток-исток транзистора. При построении диаграмм переключение транзисторного ключа считать мгновенным. Отразить на диаграммах как минимум один период работы преобразователя в установившемся режиме. Показать на схеме эти токи и напряжение и их положительное направление. (6 баллов)
4. Найти средний и действующий токи транзистора. Найти статические потери в транзисторе. (6 баллов)
5. Найти емкость конденсатора фильтра, исходя из заданной величины пульсаций в установившемся режиме работы преобразователя. (6 баллов)

### **Вариант 2.2.**

**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. (6 баллов)
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? (6 баллов)
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!). Отразить на диаграммах как минимум один период работы преобразователя в установившемся режиме. Показать на схеме эти токи и напряжение и их положительное направление. (6 баллов)
4. Найти потери на переключение в транзисторе. (6 баллов)
5. Найти емкость конденсатора выходного фильтра, исходя из заданной величины пульсаций в установившемся режиме работы преобразователя. (6 баллов)

### **Вариант 2.3.**

**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. (6 баллов)
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? (6 баллов)
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!). Отразить на диаграммах как минимум один период работы преобразователя в установившемся режиме. Показать на схеме эти токи и напряжение и их положительное направление. (6 баллов)
4. Найти потери на переключение в транзисторе. (6 баллов)
5. Найти индуктивность дросселя, исходя из заданной величины пульсаций тока в установившемся режиме работы преобразователя. (6 баллов)

#### **Вариант 2.4.**

**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. (4 баллов)
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? (4 баллов)
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. Отообразить на диаграммах как минимум один период работы преобразователя в установившемся режиме. Показать на схеме эти токи и напряжение и их положительное направление. (4 баллов)
4. Найти действующий ток транзистора. Найти статические потери в транзисторе. (4 баллов)
5. Найти емкость конденсатора фильтра, исходя из заданной величины пульсаций напряжения нагрузки в установившемся режиме работы преобразователя. (4 баллов)

### **Вариант 2.5.**

**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. (6 баллов)

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? (6 баллов)
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. (6 баллов)
4. Найти действующий ток транзистора. Найти статические потери в транзисторе. (6 баллов)
5. Найти емкость конденсатора фильтра, исходя из заданной величины пульсаций напряжения нагрузки в установившемся режиме работы преобразователя. (6 баллов)

### **Вариант 2.6.**

**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. (6 баллов)
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? (6 баллов)

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. Отразить на диаграммах как минимум один период работы преобразователя в установившемся режиме. Показать на схеме эти токи и напряжение и их положительное направление. (6 баллов)

4. Найти действующий ток транзистора. Найти статические потери в транзисторе. (6 баллов)

5. Найти емкость конденсатора фильтра, исходя из заданной величины пульсаций напряжения нагрузки в установившемся режиме работы преобразователя. (6 баллов)

### Решение варианта 2.6:

1. На рис. 1 показана принципиальная схема преобразователя.

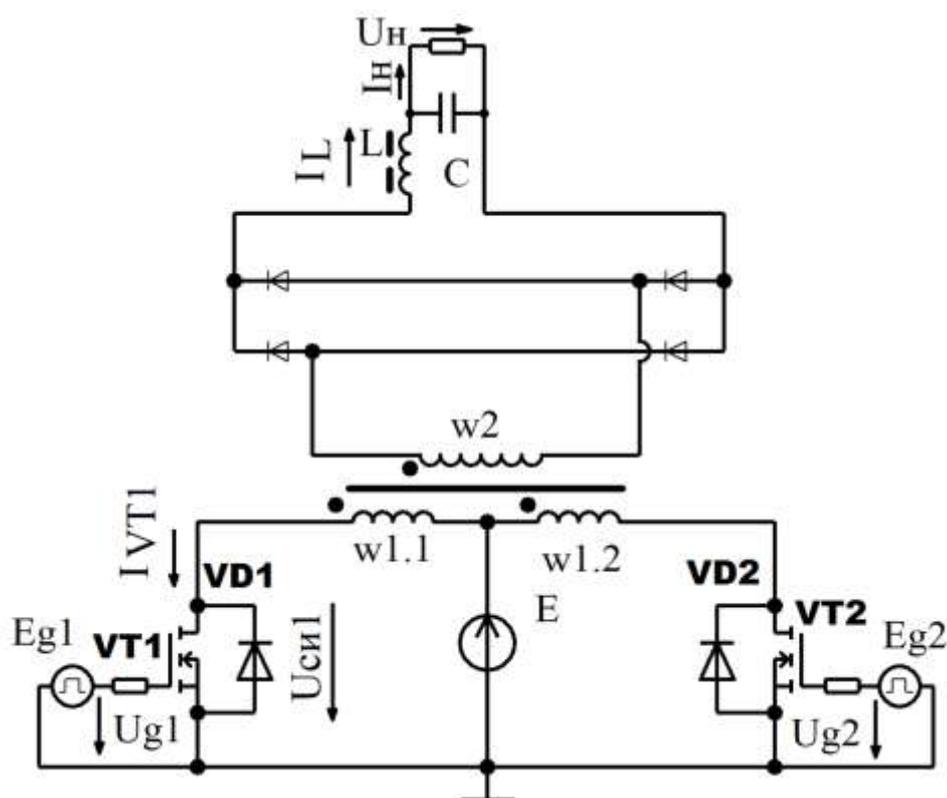


Рис. 1. Принципиальная схема преобразователя

Напряжение нагрузки (средняя величина этого напряжения) равно

$$U_H = K_{\text{тр}} \cdot E \cdot \gamma$$

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

Известно, что

$$\gamma = \frac{t_{и}}{\frac{T}{2}}$$

По данным задачи

$$t_{и} = 0,4 \cdot T$$

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

Следовательно,

$$K_{тр} = \frac{U_{н}}{E \cdot \gamma} = \frac{300В}{72В \cdot 0,8} = 5,2$$

2. В данном примере использован метод первой гармоники. По выбору сдающего экзамен, может быть использован другой корректный метод расчета. Известно, что амплитуда пульсаций тока дросселя, приблизительно равная амплитуде первой гармоники, равна

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

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

Учитывая, что преобразователь двухтактный, можно найти круговую частоту пульсаций

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

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

Средний ток дросселя равен току нагрузки

$$I_{LCP} = I_{н} = 4А$$

Поэтому минимальный и максимальный токи дросселя равны

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

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

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

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

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

Здесь  $I_{нгр} = 0,37А$  – граничный ток нагрузки.

Следовательно, преобразователь будет работать в режиме прерывистого тока, если

$$I_{н} < 0,37А$$

3.

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

$$U_{сиmax} = 2 \cdot E = 2 \cdot 72В = 144В$$

Минимальный и максимальный токи дросселя уже найдены

$$I_{min} = 3,63А$$

$$I_{max} = 4,37А$$

Ток транзистора имеет форму импульсов с длительностью

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

Импульсы имеют форму трапеции с минимальным и максимальным током

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

$$I_{maxVT} = I_{max} \cdot K_{тр} = 4,37\text{А} \cdot 5,2 = 22,7\text{А}$$

Приращение тока равно

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

Средний на интервале проводимости транзистора ток равен

$$I_{VTсп} = I_{н} \cdot K_{тр} = 4\text{А} \cdot 5,2 = 20,8\text{А}$$

На рис. 2 показаны требуемые временные диаграммы.

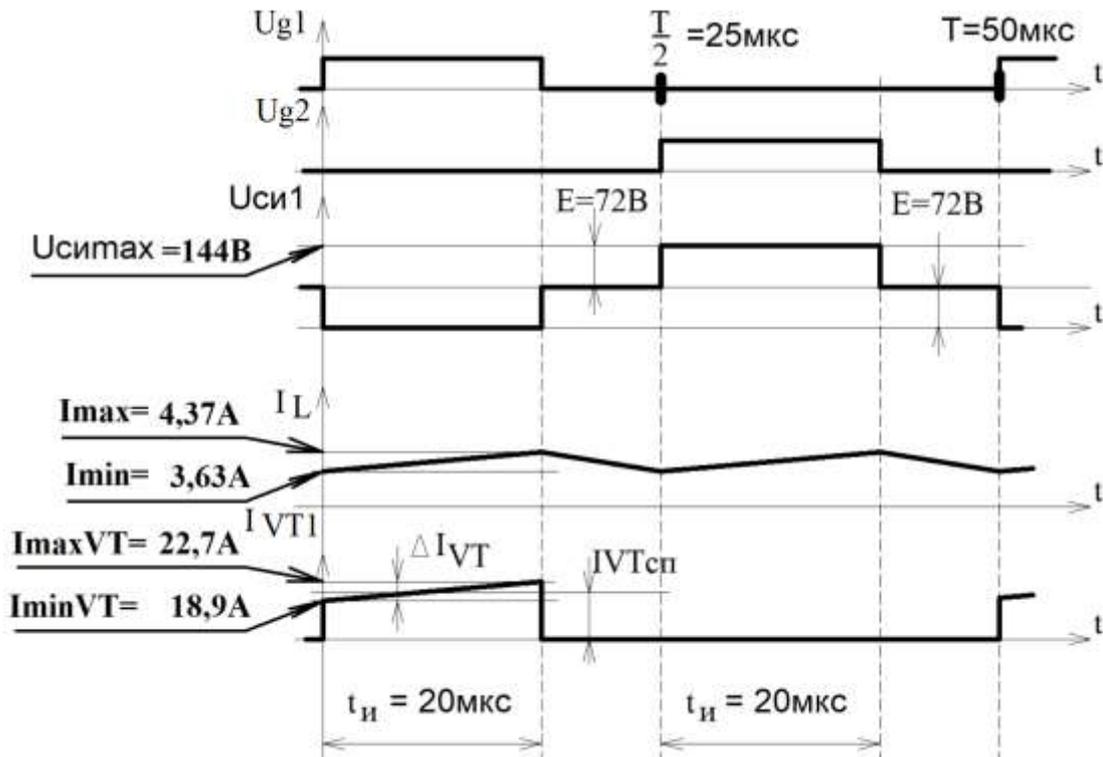


Рис. 2. Временные диаграммы

Здесь  $U_{g1}$ ,  $U_{g2}$  – 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).  $U_{си1}$  – напряжение сток-исток  $VT1$ ,  $I_L$  – ток дросселя  $L$ ,  $I_{VT1}$  – ток стока транзистора  $VT1$ .

4. Ток транзистора имеет форму импульсов с длительностью

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

Импульсы имеют форму трапеции с минимальным и максимальным током

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

$$I_{maxVT} = I_{max} \cdot K_{тр} = 4,37\text{А} \cdot 5,2 = 22,7\text{А}$$

Приращение тока равно

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

Средний на интервале проводимости транзистора ток равен

$$I_{VTсп} = I_{н} \cdot K_{тр} = 4\text{А} \cdot 5,2 = 20,8\text{А}$$

Известно, что действующая величина такой формы равна

$$IVT_D = \sqrt{\frac{t_{и}}{T}} \cdot \sqrt{IVT_{сп}^2 + \frac{\Delta I_{VT}^2}{12}} = \sqrt{\frac{0,4 \cdot T}{T}} \cdot \sqrt{(20,8A)^2 + \frac{(3,8A)^2}{12}} = 13,2A$$

Статические в транзисторе потери фактически равны потерям проводимости

$$P_{VT} = IVT_D^2 \cdot R_{ON} = (13,2A)^2 \cdot 0,0180\Omega = 3,1Вт$$

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

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

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

Удвоенная амплитуда равна размаху пульсаций

$$2 \cdot U_{(1)m} = 0,6В$$

$$U_{(1)m} = \frac{0,6В}{2} = 0,3В$$

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

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

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

Коэффициент сглаживания фильтра

$$S\Phi = \frac{q_{ВХ}}{q_H} = \frac{46,9\%}{0,1\%} = 469$$

С другой стороны,

$$S\Phi = \omega^2 \cdot L \cdot C$$

где  $C$  – емкость конденсатора фильтра.

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

### Тема: Импульсная схемотехника (30 баллов)

Вариант 2.7

#### Исходные данные:

транзистор Т1 – безинерционный;

диоды D1 и D2 – идеальные;

напряжение источника питания:  $E=10В$ ;

нагрузка резистивная:  $R_H=1кОм$ ;

соотношение витков обмоток импульсного трансформатора TV1:  $w_1=w_2=w_3$ ;

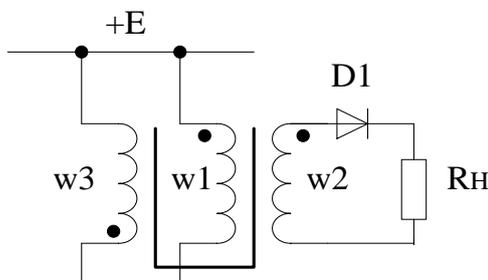
индуктивность намагничивания импульсного трансформатора TV1:  $L_\mu=1мГн$ ;

амплитуда импульса положительного тока управления (тока базы):  $I_{б+}=1мА$ ;

длительность импульса тока управления:  $t_{и}=2мкс$ ;

пауза импульса тока управления:  $t_{п}=4мкс$ ;

коэффициент передачи тока базы:  $\beta=50$ .



1. Определить значение максимального тока намагничивания трансформатора TV1 (максимум 4 балла).
2. Определить значение максимального тока коллектора транзистора T1 (максимум 4 балла).
3. Определить максимальное напряжение на транзисторе T1 при его выключении (максимум 4 балла).
4. Построить диаграмму тока коллектора транзистора T1 при его переключении, синхронизировав ее с импульсом тока управления (максимум 4 балла).
5. Построить диаграмму напряжения на транзисторе T1 при его переключении, синхронизировав ее с импульсом тока управления (максимум 4 балла).

### Вариант 2.8

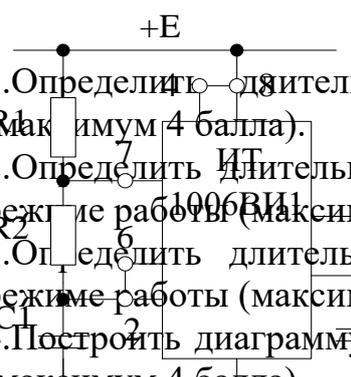
#### Исходные данные:

напряжение источника питания:  $E=10\text{В}$ ;

вывод управления (ножка 5 интегрального таймера) не используется и шунтирована конденсатором  $0,1\text{мкФ}$ ;

сопротивления резисторов времязадающей цепи мультивибратора:  $R1=5\text{кОм}$ ;  $R2=5\text{кОм}$ ;

емкость конденсатора времязадающей цепи мультивибратора:  $C1=2\text{нФ}$ .

- 
1. Определить длительность импульса  $t_{и0}$  мультивибратора при пуске (максимум 4 балла).
  2. Определить длительность импульса  $t_{и}$  мультивибратора в установившемся режиме работы (максимум 4 балла).
  3. Определить длительность паузы  $t_{п}$  мультивибратора в установившемся режиме работы (максимум 4 балла).
  4. Построить диаграмму напряжения на конденсаторе  $C1$  времязадающей цепи (максимум 4 балла).
  5. Построить диаграмму выходного напряжения  $U_{вых}$  мультивибратора (максимум 4 балла).

### Вариант 2.9

#### Исходные данные:

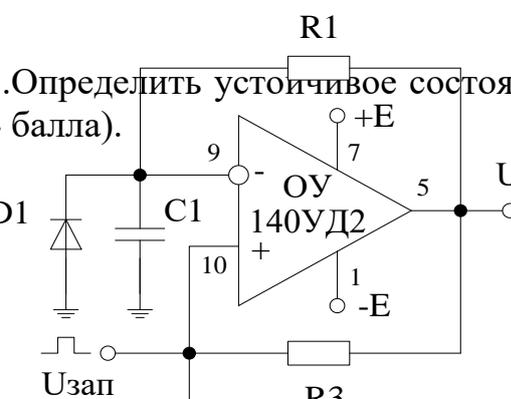
операционный усилитель ОУ – идеальный;

диод D1 – идеальный;

напряжение источников питания ОУ:  $+E=15\text{В}$ ;  $-E=-15\text{В}$ ;

сопротивления резисторов одновибратора:  $R1=1\text{кОм}$ ;  $R2=3\text{кОм}$ ;  $R3=3\text{кОм}$ ;

емкость конденсатора времязадающей цепи одновибратора:  $C1=5\text{нФ}$ .

- 
1. Определить устойчивое состояние выходной цепи одновибратора (максимум 4 балла).

2. Определить длительность  $t_i$  формируемого импульса при запуске одновибратора (максимум 4 балла).
3. Определить длительность времени восстановления  $t_v$  одновибратора (максимум 4 балла).
4. Определить минимальную длительность периода запуска одновибратора (максимум 4 балла).
5. Построить диаграмму напряжения  $U_{\text{вых}}$  на выходе ОУ (максимум 4 балла).

#### Вариант 2.10

##### Исходные данные:

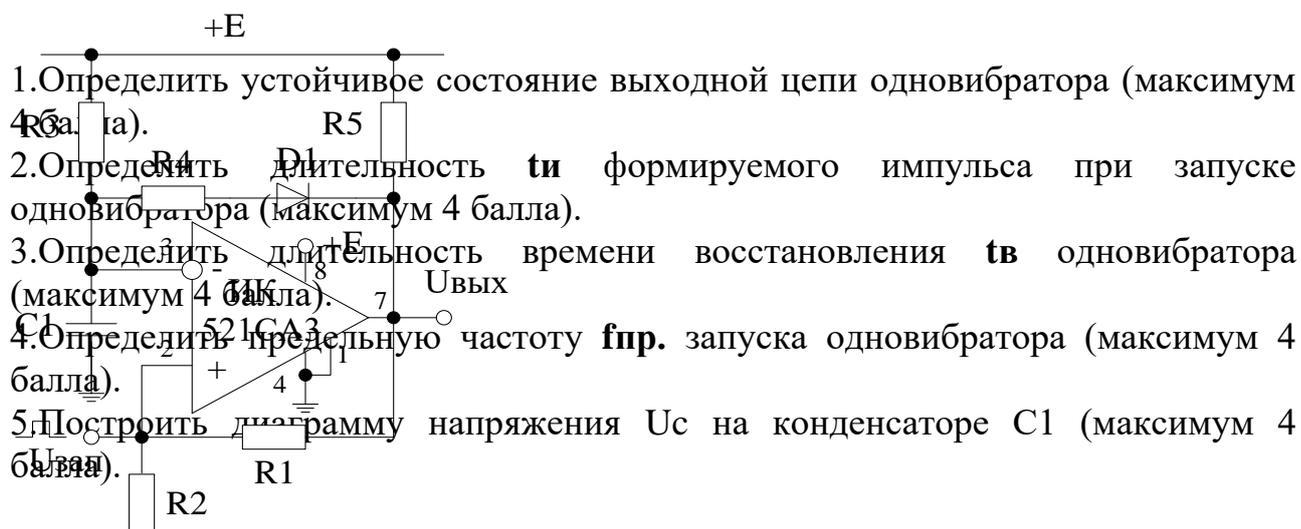
интегральный компаратор ИК – идеальный;

диод D1 – идеальный;

напряжение источника питания ИК:  $+E=10\text{В}$ ;

сопротивления резисторов одновибратора:  $R_1=5\text{кОм}$ ;  $R_2=5\text{кОм}$ ;  $R_3=4\text{кОм}$ ;  $R_4=1\text{кОм}$ ;

емкость конденсатора времязадающей цепи одновибратора:  $C_1=3\text{нФ}$ .



#### Вариант 2.11

##### Исходные данные:

операционный усилитель ОУ – идеальный;

транзистор T1 цепи разряда – безинерционный;

напряжение источников питания ОУ:  $+E=15\text{В}$ ;  $-E=-15\text{В}$ ;

сопротивления резисторов генератора:  $R_1=10\text{кОм}$ ;  $R_2=2\text{кОм}$ ;  $R_3=15\text{кОм}$ ;  $R_4=3\text{кОм}$ ;

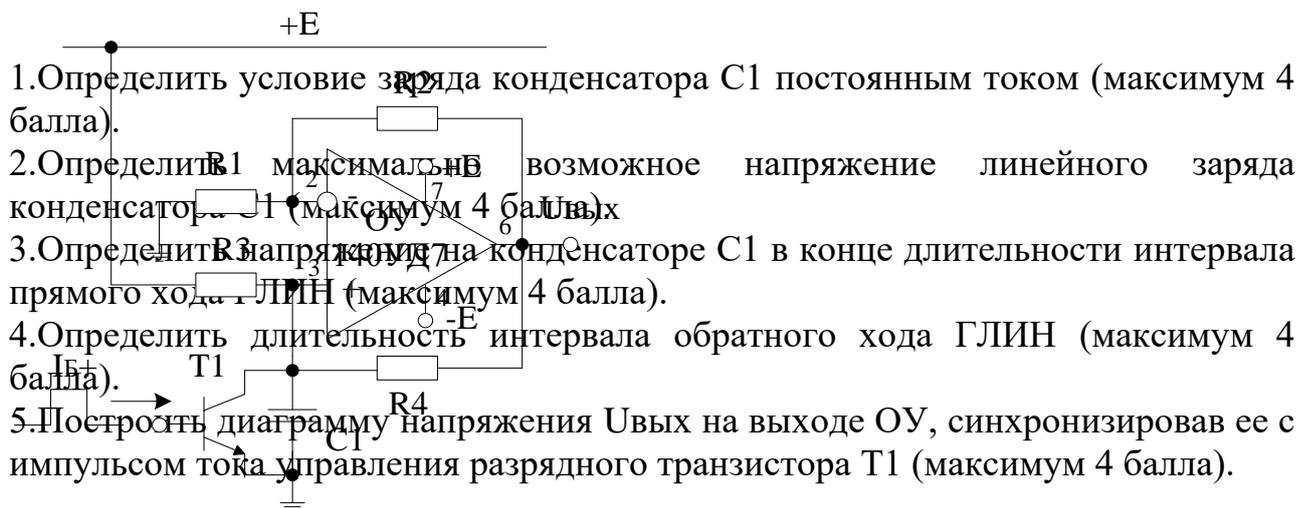
емкость конденсатора  $C_1=1\text{нФ}$ ;

амплитуда импульса положительного тока управления (тока базы транзистора T1):  $I_{\text{б+}}=0,1\text{мА}$ ;

длительность импульса тока управления:  $t_i=2\text{мкс}$ ;

пауза импульса тока управления:  $t_{\text{п}}=10\text{мкс}$ ;

коэффициент передачи тока базы транзистора T1:  $\beta=60$ .



1. Определить условие зряда конденсатора C1 постоянным током (максимум 4 балла).
2. Определить R1 максимальное возможное напряжение линейного заряда конденсатора (максимум 4 балла).
3. Определить V3 напряжение на конденсаторе C1 в конце длительности интервала прямого хода ГЛИН (максимум 4 балла).
4. Определить длительность интервала обратного хода ГЛИН (максимум 4 балла).
5. Построить диаграмму напряжения Uвых на выходе OУ, синхронизировав ее с импульсом тока управления разрядного транзистора T1 (максимум 4 балла).

### Пример выполнения задания

Вариант 2.10

#### Исходные данные:

интегральный компаратор ИК – идеальный;

диод D1 – идеальный;

напряжение источника питания ИК:  $+E=10\text{В}$ ;

сопротивления резисторов одновибратора:  $R1=5\text{кОм}$ ;  $R2=5\text{кОм}$ ;  $R3=4\text{кОм}$ ;  $R4=1\text{кОм}$ ;

емкость конденсатора времязадающей цепи одновибратора:  $C1=3\text{нФ}$ ;

#### 1. Определить устойчивое состояние 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 D1 находится в открытом состоянии. Если пренебречь падением напряжения на диоде D1 (диод D1 полагается идеальным), то напряжение на инвертирующем входе ИК задается делителем  $R3R4$  и равно  $U_-=ER4/(R3+R4)=2\text{В}$ . Тогда дифференциальное входное напряжение ИК (разность напряжений  $U_+$  и  $U_-$ ) меньше нуля, что подтверждает правильность начального предположения об исходном (устойчивом) состоянии схемы одновибратора.

#### 2. Определить длительность $t_i$ формируемого импульса при запуске одновибратора.

При поступлении короткого сигнала запуска  $U_{\text{зап}}$  его положительный перепад повышает потенциал неинвертирующего входа ИК, что вызывает увеличение выходного напряжения  $U_{\text{вых}}$ . За счет цепи положительной обратной связи (резисторы  $R1$  и  $R2$ ) процесс развивается лавинообразно и на выходе одновибратора устанавливается напряжение  $U_{\text{вых}}=E=10\text{В}$ , а на инвертирующем входе ИК напряжение повышается до значения  $U_-=\gamma E=5\text{В}$ . Коэффициент деления равен  $\gamma=R2/(R1+R2)=0,5$ . При этом диод D1 запирается и конденсатор C1 начинает заряжаться от источника питания +E через резистор

R3. Учитывая, что начальное напряжение на конденсаторе C1 равно  $U = ER_4/(R_3+R_4) = 2В$ , уравнение заряда можно записать в следующем виде:

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

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

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

### 3. Определить длительность времени восстановления $t_{в}$ одновибратора.

После обратного опрокидывания напряжения  $U_{вых}$  и  $U_+$  скачком уменьшаются до нулевого значения. При этом отпирается диод D1 и конденсатор C1 начинает разряжаться по экспоненциальному закону от начального значения  $\gamma E$  до установившегося значения  $U = ER_4/(R_3+R_4)$  в соответствии с уравнением:

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

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

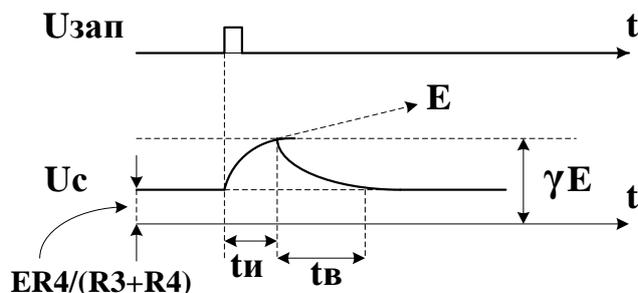
$$t_{в} = 3C_1(R_3 \vee R_4) = 7,2 \text{ мкс.}$$

### 4. Определить предельную частоту $f_{пр}$ запуска одновибратора.

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

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

### 5. Построить диаграмму напряжения $U_c$ на конденсаторе C1.



## Задание экзаменационного билета № 3 (60 баллов)

### *Тема: Твердотельная микро- и нанoeлектроника, лазерная и оптическая измерительная электроника*

#### Модуль: Твердотельная микро- и нанoeлектроника

##### Вариант 3.1.1

1. Нарисуйте условно-графическое обозначение мультиплексора «из 4 в 1», приведите его таблицу истинности и логическое выражение для выходного сигнала — максимум 10 баллов.
2. Для сформированного выражения нарисуйте устройство мультиплексора на логических вентилях: инвертор, И, И-НЕ, ИЛИ и ИЛИ-НЕ; приведите схему в базисе И-НЕ — максимум 10 баллов.
3. Приведите устройство мультиплексора, собранного только на элементах 2И-НЕ — максимум 10 баллов.
4. Приведите поведенческое RTL-описание мультиплексора на любом языке описания аппаратуры (VHDL, Verilog, SystemVerilog) — максимум 15 баллов.
5. Нарисуйте временную диаграмму, отображающую работу мультиплексора — максимум 15 баллов.

##### Вариант 3.1.2

1. Нарисуйте условно-графическое обозначение демультиплексора «из 1 в 4», приведите его таблицу истинности и логические выражения для выходных сигналов — максимум 10 баллов.
2. Для сформированного выражения нарисуйте устройство демультиплексора на логических вентилях: инвертор, И, И-НЕ, ИЛИ и ИЛИ-НЕ; приведите схему в базисе И-НЕ — максимум 10 баллов.
3. Приведите устройство демультиплексора, собранного только на элементах 2И-НЕ — максимум 10 баллов.
4. Приведите поведенческое RTL-описание мультиплексора на любом языке описания аппаратуры (VHDL, Verilog, SystemVerilog) — максимум 15 баллов.
5. Нарисуйте временную диаграмму, отображающую работу демультиплексора — максимум 15 баллов.

##### Вариант 3.1.3

1. Нарисуйте условно-графическое обозначение шифратора «из 4 в 2», приведите его таблицу истинности и логические выражения для выходных сигналов — максимум 10 баллов.
2. Для сформированных выражений нарисуйте устройство шифратора на логических вентилях: инвертор, И, И-НЕ, ИЛИ и ИЛИ-НЕ — максимум 10 баллов.
3. Приведите устройство шифратора, собранного на элементах 2И-НЕ — максимум 10 баллов.
4. Приведите поведенческое RTL-описание шифратора на любом языке описания аппаратуры (VHDL, Verilog, SystemVerilog) — максимум 15 баллов.
5. Нарисуйте временную диаграмму, отображающую работу шифратора — максимум 15 баллов.

#### Вариант 3.1.4

1. Нарисуйте условно-графическое обозначение дешифратора «из 2 в 4», приведите его таблицу истинности и логические выражения для выходных сигналов — максимум 10 баллов.
2. Для сформированных выражений нарисуйте устройство дешифратора на логических вентилях: инвертор, И, И-НЕ, ИЛИ и ИЛИ-НЕ — максимум 10 баллов.
3. Приведите устройство дешифратора, собранного на элементах 2И-НЕ – максимум 10 баллов.
4. Приведите поведенческое RTL-описание дешифратора на любом языке описания аппаратуры (VHDL, Verilog, SystemVerilog) — максимум 15 баллов.
5. Нарисуйте временную диаграмму, отображающую работу дешифратора — максимум 15 баллов.

#### Вариант 3.1.5

1. Нарисуйте условно-графическое обозначение одноразрядного полусумматора, приведите его таблицу истинности и логические выражения для выходных сигналов — максимум 10 баллов.
2. Для сформированных выражений нарисуйте устройство полусумматора на логических вентилях: инвертор, И, И-НЕ, ИЛИ и ИЛИ-НЕ — максимум 10 баллов.
3. Приведите устройство полусумматора, собранного на элементах 2И-НЕ – максимум 10 баллов.
4. Приведите поведенческое RTL-описание полусумматора на любом языке описания аппаратуры (VHDL, Verilog, SystemVerilog) — максимум 15 баллов.
5. Нарисуйте временную диаграмму, отображающую работу полусумматора — максимум 15 баллов.

#### Вариант 3.1.6

1. Нарисуйте условно-графическое обозначение динамического D-триггера, синхронизируемого по переднему фронту, с асинхронным сбросом; приведите его таблицу истинности — максимум 10 баллов.
2. Нарисуйте временную диаграмму, отображающую работу триггера — максимум 10 баллов.
3. Нарисуйте трёхразрядный суммирующий счётчик на основе этого триггера — максимум 10 баллов.
4. Приведите поведенческое RTL-описание трёхразрядного суммирующего счётчика из п. 3 на любом языке описания аппаратуры (VHDL, Verilog, SystemVerilog) — максимум 15 баллов.
5. Нарисуйте полную временную диаграмму, отображающую работу счётчика — максимум 15 баллов.

#### Вариант 3.1.7

1. Нарисуйте условно-графическое обозначение динамического D-триггера, синхронизируемого по переднему фронту, с асинхронным сбросом; приведите его таблицу истинности — максимум 10 баллов.
2. Нарисуйте временную диаграмму, отображающую работу триггера — максимум 10 баллов.

3. Нарисуйте трёхразрядный вычитающий счётчик на основе этого триггера — максимум 10 баллов.
4. Приведите поведенческое RTL-описание трёхразрядного вычитающего счётчика из п. 3 на любом языке описания аппаратуры (VHDL, Verilog, SystemVerilog) — максимум 15 баллов.
5. Нарисуйте полную временную диаграмму, отображающую работу счётчика — максимум 15 баллов.

#### Вариант 3.1.8

1. Нарисуйте условно-графическое обозначение динамического D-триггера, синхронизируемого по переднему фронту, с асинхронным сбросом; приведите его таблицу истинности — максимум 10 баллов.
2. Нарисуйте временную диаграмму, отображающую работу триггера — максимум 10 баллов.
3. Нарисуйте четырёхразрядный регистр с параллельным вводом и параллельным выводом на основе этого триггера — максимум 10 баллов.
4. Приведите поведенческое RTL-описание четырёхразрядного регистра из п. 3 на любом языке описания аппаратуры (VHDL, Verilog, SystemVerilog) — максимум 15 баллов.
5. Нарисуйте полную временную диаграмму, отображающую работу регистра — максимум 15 баллов.

#### Вариант 3.1.9

1. Нарисуйте условно-графическое обозначение динамического D-триггера, синхронизируемого по переднему фронту, с асинхронным сбросом; приведите его таблицу истинности — максимум 10 баллов.
2. Нарисуйте временную диаграмму, отображающую работу триггера — максимум 10 баллов.
3. Нарисуйте четырёхразрядный сдвиговый регистр (логический сдвиг вправо) на основе этого триггера — максимум 10 баллов.
4. Приведите поведенческое RTL-описание четырёхразрядного регистра из п. 3 на любом языке описания аппаратуры (VHDL, Verilog, SystemVerilog) — максимум 15 баллов.
5. Нарисуйте полную временную диаграмму, отображающую работу регистра — максимум 15 баллов.

#### Вариант 3.1.10

1. Нарисуйте условно-графическое обозначение динамического D-триггера, синхронизируемого по переднему фронту, с асинхронным сбросом; приведите его таблицу истинности — максимум 10 баллов.
2. Нарисуйте временную диаграмму, отображающую работу триггера — максимум 10 баллов.
3. Нарисуйте четырёхразрядный кольцевой регистр со сдвигом вправо и выводом направо на основе этого триггера — максимум 10 баллов.
4. Приведите поведенческое RTL-описание четырёхразрядного регистра из п. 3 на любом языке описания аппаратуры (VHDL, Verilog, SystemVerilog) — максимум 15 баллов.
5. Нарисуйте полную временную диаграмму, отображающую работу регистра — максимум 15 баллов.

### Пример выполнения варианта 3.1.4

#### Вариант 3.1.4

1. Нарисуйте условно-графическое обозначение дешифратора «из 2 в 4», приведите его таблицу истинности и логические выражения для выходных сигналов — максимум 10 баллов.
2. Для сформированных выражений нарисуйте устройство дешифратора на логических вентилях: инвертор, И, И-НЕ, ИЛИ и ИЛИ-НЕ — максимум 10 баллов.
3. Приведите устройство дешифратора, собранного на элементах 2И-НЕ – максимум 10 баллов.
4. Приведите поведенческое RTL-описание дешифратора на любом языке описания аппаратуры (VHDL, Verilog, SystemVerilog) — максимум 15 баллов.
5. Нарисуйте временную диаграмму, отображающую работу дешифратора — максимум 15 баллов.

#### Решение

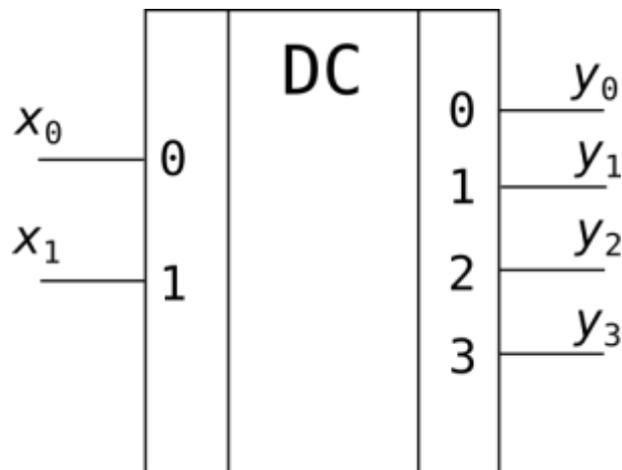


Рисунок 1 - Условно-графическое обозначение дешифратора «из 2 в 4»

Таблица истинности формируется на основе принципа работы дешифратора - на выходе формируется логическая 1 в той позиции, двоичный код которой определен входным сигналом в прямом двоичном коде.

Таблица 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:

$$y_0 = \overline{x_1} \cdot \overline{x_0},$$
$$y_1 = \overline{x_1} \cdot x_0,$$

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

$$y_3 = x_1 \cdot x_0.$$

На основе полученных выражений можно сформировать логическую схему дешифратора:

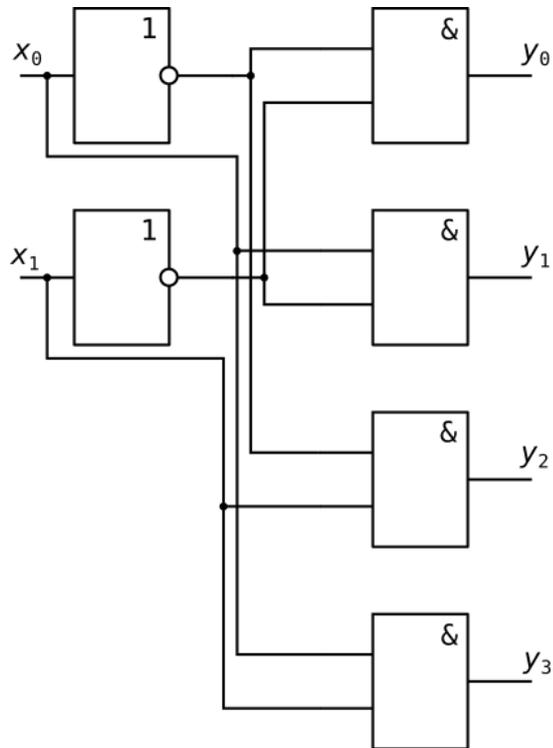


Рисунок 2 - Логическая схема дешифратора «из 2 в 4»

При формировании устройства дешифратора на элементах 2И-НЕ необходимо логические выражения для выходов переписать в указанном базисе с применением соответствующих законов булевой алгебры:

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

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

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

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

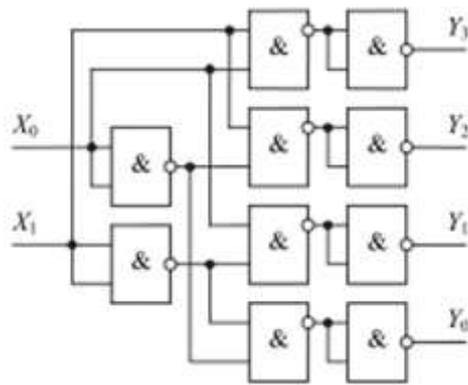


Рисунок 3 - Логическая схема дешифратора «из 2 в 4» в базе 2И-НЕ

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**

Листинг 3 — Поведенческое RTL-описание на языке VHDL

```
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;
```

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

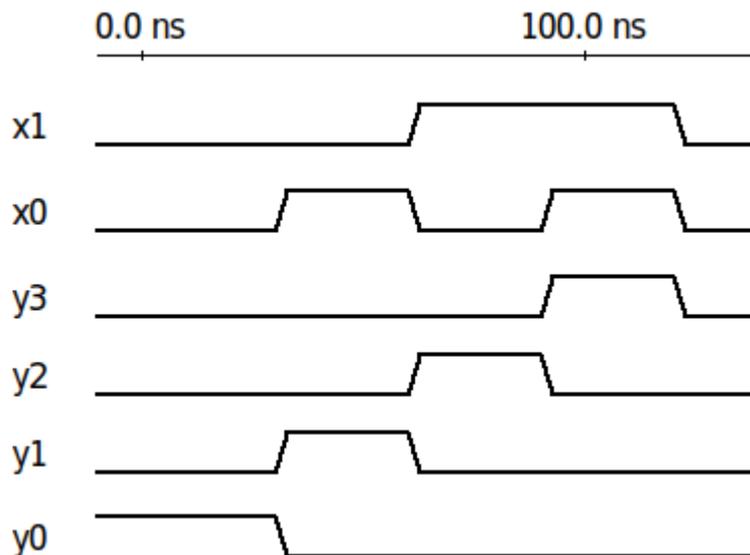


Рисунок 4 - Временная диаграмма работы дешифратора «из 2 в 4» (в виде отдельных сигналов)

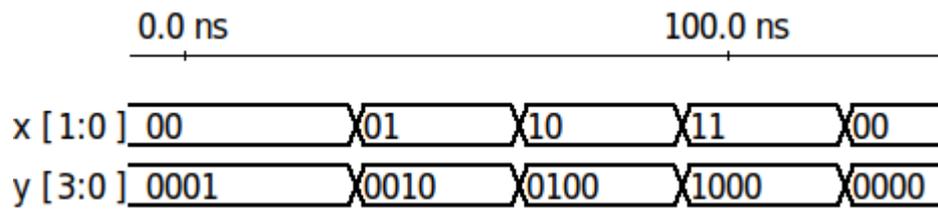


Рисунок 5 - Временная диаграмма работы дешифратора «из 2 в 4» (в виде входных и выходных шин данных)

## Модуль: Лазерная и оптическая измерительная электроника

### Задание 3.2.1

1. Выполните тестовые задания, указав верные ответы.

1. Главные оси линейного поляризатора называются:

- Быстрая ось
- Ось поглощения
- Медленная ось
- Ось пропускания
- Ось усиления

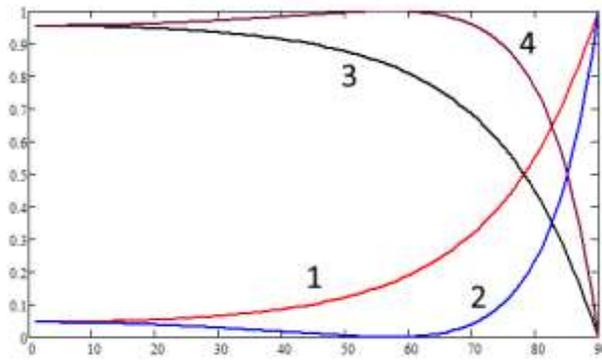
2. Какие из перечисленных оптических элементов являются поляризационными?

- Линза
- Призма Рошона
- Дисперсионная призма
- Фазовая пластинка
- Зеркало

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

- $\lambda/2$
- $3\lambda$
- $3\lambda/5$
- $3\lambda/7$
- $\lambda/8$

4. 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.



Коэф. пропускания s-компоненты $\tau_s$	
Коэф. пропускания p-компоненты $\tau_p$	
Коэф. отражения s-компоненты $\rho_s$	
Коэф. отражения p-компоненты $\rho_p$	

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

а.

Коэф. пропускания s-компоненты $\tau_s$	
Коэф. пропускания p-компоненты $\tau_p$	
Коэф. отражения s-компоненты $\rho_s$	
Коэф. отражения p-компоненты $\rho_p$	

2. Выполните тестовые задания, указав верные ответы.

1. Изображение является стигматическим, если:

- гомоцентрический пучок лучей после прохождения оптической системы остался гомоцентрическим
- гомоцентрический пучок лучей после прохождения оптической системы перестал быть гомоцентрическим
- каждой точке предмета соответствует только одна точка изображения
- каждой точке предмета соответствует несколько точек изображения
- каждой точке изображения соответствует несколько точек предмета

**2.** Оптическая система называется центрированной, если:

- все преломляющие и отражающие поверхности являются поверхностями вращения
- все преломляющие и отражающие поверхности имеют общую ось вращения
- преломляющие и отражающие поверхности могут иметь разные оси вращения
- преломляющие и отражающие поверхности могут не являться поверхностями вращения

**3.** К кардинальным элементам идеальной оптической системы относятся:

- фокусы
- главные точки
- узловые точки
- осевая точка предмета
- осевая точка изображения

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

Матрица перемещения	$\begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -\frac{1}{f'} & 1 \end{bmatrix}$
Матрица преломления	$M = M_{n+1} \dots \cdot M_3 \cdot M_2 \cdot M_1$
Матрица тонкой линзы	$R = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ \frac{n_1 - n_2}{r} & 1 \end{bmatrix}$
Матрица сложной оптической системы	$T = \begin{bmatrix} 1 & d/n \\ 0 & 1 \end{bmatrix}$

5. Установить соответствие между коэффициентами матрицы и свойствами оптической системы, которые они описывают:

Параллельный пучок, пройдя систему, остается параллельным	$A = 0$
Первая опорная плоскость совпадает с передним фокусом системы	$B = 0$
Вторая опорная плоскость совпадает с задним фокусом системы	$C = 0$
Положение опорных плоскостей совпадает с положением предмета и изображения	$D = 0$

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

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.

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?

### Задание 3.2.2

1. Выполните тестовые задания, указав верные ответы.

1. Какие из перечисленных видов поляризации электромагнитного излучения существуют?

- Квадратная
- Круговая
- Линейная
- Эллиптическая
- Треугольная

2. Чтобы произошла интерференция двух волн, должны быть выполнены условия:

- При интерференции у волн должны быть разные длины волн
- Волны должны быть когерентны
- Поляризация волн должна совпадать
- Волны должны быть с одинаковой амплитудой
- Волны должны иметь одинаковый фазовый фронт

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

- Синий
- Оранжевый

- Красный
- Зеленый
- Фиолетовый

4. Установите соответствие между средами и характеризующими их матрицами диэлектрической проницаемости:

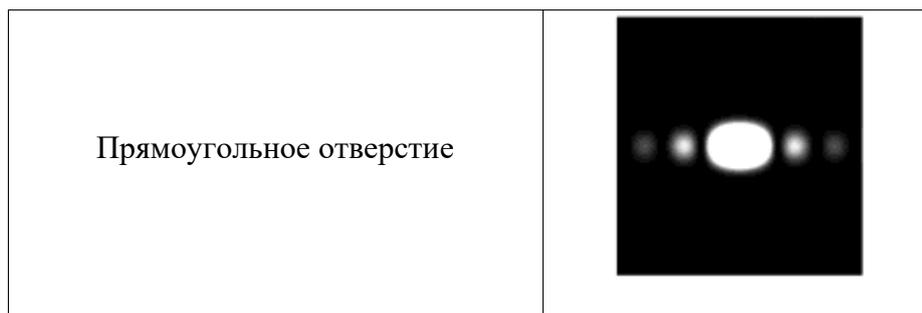
Изотропный диэлектрик	$\begin{pmatrix} \varepsilon_1 & 0 & 0 \\ 0 & \varepsilon_2 & 0 \\ 0 & 0 & \varepsilon_3 \end{pmatrix}$
-----------------------	---

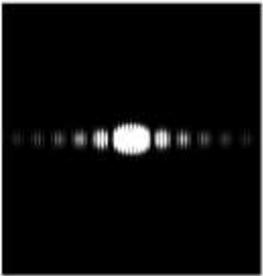
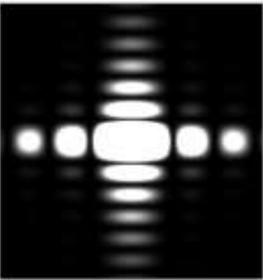
Чистый вакуум	$\begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$
---------------	---

Одноосный анизотропный кристалл	$\begin{pmatrix} \varepsilon & 0 & 0 \\ 0 & \varepsilon & 0 \\ 0 & 0 & \varepsilon \end{pmatrix}$
---------------------------------	---

Двуосный анизотропный кристалл	$\begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$
--------------------------------	---

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



Щель	
Круглое отверстие	
Две щели	

2. Выполните тестовые задания, указав верные ответы.

1. К кардинальным элементам идеальной оптической системы относятся:

- фокальные плоскости
- главные плоскости
- узловые плоскости
- плоскость предмета
- плоскость изображения

2. Выберите верные утверждения. Оптическая сила системы, состоящей из двух тонких положительных линз, расположенных на конечном расстоянии друг от друга,

- всегда положительная
- всегда отрицательная
- зависит от положения предмета
- зависит от расстояния между линзами
- зависит от показателей преломления сред, которые разделены линзами

3. Установить соответствие между коэффициентами матрицы сложной оптической системы и кардинальными элементами оптической системы.

Передний фокальный отрезок $S_f$	$n_1/C$
Задний фокальный отрезок $S'_f$	$-n_2/C$
Переднее фокусное расстояние $f$	$D n_1/C$
Заднее фокусное расстояние $f'$	$-(n_2 A)/C$

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

Уравнение (формула) Ньютона	$\square \cdot \square \cdot \square \square \square = \square' \cdot \square' \cdot \square \square \square'$
Уравнение (формула) Гаусса	$f/a + f'/a' = 1$
Инвариант Лагранжа-Гельмгольца для идеальной оптической системы	$-f/f' = n/n'$
Связь между фокусными расстояниями оптической системы и показателями преломления сред	$z \cdot z' = f \cdot f'$

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

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

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

Заднее фокусное расстояние толстой линзы	$d$
Задний фокальный отрезок	$f'$
Толщина линзы	$n_2$
Показатель преломления материала линзы	$n_1$
Показатель преломления среды, в которой располагается линза	$S'_{F'}$

3. 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  $0^\circ$ .
4. Определить заднее фокусное расстояние тонкого компонента (линзы) в воздухе, если расстояние между предметом и изображением  $L = 300 \text{ мм}$ , размер предмета  $y = 2 \text{ см}$ , изображения:  $y' = -1,2 \text{ см}$ . Привести графическое построение.
5. На очень тонкой клиновидной пластинке с показателем преломления  $n = 1,5$  в отраженном свете ( $\lambda = 633 \text{ нм}$ ) при нормальном падении наблюдаются интерференционные полосы с периодом  $\Delta = 0,5 \text{ мм}$ . Найти угол  $\alpha$  между гранями пластинки.

### Задание 3.2.3

1. Выполните тестовые задания, указав верные ответы.

1. Какие приближения дифракционного интеграла Кирхгофа существуют?

- Приближение Ньютона
- Приближение Френеля
- Приближение Фраунгофера

- Приближение Паскаля
- Приближение Планка

2. Фаза плоской электромагнитной волны включает в себя:

- Циклическую частоту
- Амплитуду колебаний
- Волновое число
- Мощность излучения
- Интенсивность излучения

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

4. Установите соответствие между названием явления и его определением:

<b>А) Двулучепреломление</b>	1. Перераспределение энергии электромагнитного поля при наложении двух и более когерентных волн
<b>Б) Дифракция</b>	2. Зависимость показателя преломления среды от частоты излучения
<b>В) Интерференция</b>	3. Огибание светом препятствия, отклонение траектории распространения

	излучения от законов геометрической оптики
<b>Г) Дисперсия</b>	4. Преломление под разными углами лучей с разной поляризацией после вхождения в анизотропную среду

5. Поставьте в соответствие друг другу физические величины и их физический смысл:

<b>А) Длина волны</b>	1. Характеризует отношение скорости света в вакууме к скорости света в рассматриваемой среде
<b>Б) Волновой вектор</b>	2. Характеризует направление распространения энергии электромагнитного излучения
<b>В) Вектор Умова-Пойтинга</b>	3. Характеризует направление распространения точки фазового фронта электромагнитной волны
<b>Г) Показатель преломления</b>	4. Характеризует расстояние, которое проходит электромагнитная волна за период колебаний

2. Выполните тестовые задания, указав верные ответы.

1. К кардинальным элементам идеальной оптической системы не относятся:

- фокальные плоскости
- главные плоскости
- узловые плоскости
- плоскость предмета
- плоскость изображения

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

- Изображение действительное
- Изображение мнимое
- Изображение перевернутое
- Изображение прямое
- Модуль линейного увеличения равен 1

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

- двояковыпуклая
- двояковогнутая
- плосковыпуклая
- плосковогнутая

**4.** Установите соответствие между обозначениями величин и самими величинами.

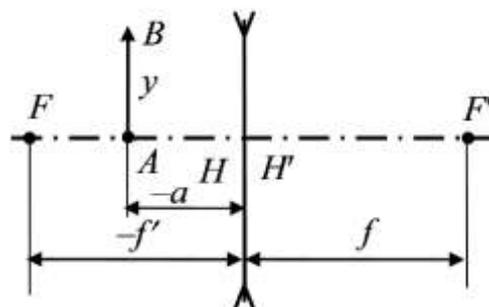
$S$	Расстояние от вершины последней преломляющей поверхности до изображения
-----	---

$S'$	Расстояние от вершины последней преломляющей поверхности до задней главной плоскости эквивалентной системы
$S_H$	Расстояние от вершины первой преломляющей поверхности до предмета
$S'_H$	Расстояние от вершины первой преломляющей поверхности до передней главной плоскости эквивалентной системы

5. Установите соответствие между обозначениями величин и самими величинами.

$z$	Расстояние от переднего фокуса до предмета
$z'$	Расстояние от задней главной плоскости до изображения
$a$	Расстояние от передней главной плоскости до предмета
$a'$	Расстояние от заднего фокуса до изображения

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  $\mathbf{E}$ , если смотреть навстречу лучу.
4. 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.



5. 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.

#### Задание 3.2.4

1. Выполните тестовые задания, указав верные ответы.

1. В дисперсионных средах от частоты излучения зависит

- Фазовая скорость волны
- Мощность излучения
- Интенсивность излучения
- Показатель преломления среды
- Угол преломления волны

2. От чего зависит дифракционная расходимость излучения при дифракции на щели?

- От мощности излучения
- От длины волны излучения
- От интенсивности излучения
- От размера щели
- От амплитуды падающей волны

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

- 1,44

- 0,54
- 1,34
- 0,78
- 1,54

4. Установите в соответствие между оптическими элементами и их назначением:

<b>А) Интерференционное покрытие</b>	1. Преобразование состояния поляризации излучения
<b>Б) Анизотропный кристалл</b>	2. Пространственное разделение проходящего излучения на спектральные составляющие
<b>В) Фазовая пластинка</b>	3. Разделение излучения на две ортогонально поляризованные компоненты
<b>Г) Дисперсионная призма</b>	4. Селективное отражение или пропускание излучения с определенной длиной волны

5. Установите соответствие между видом поляризации и значением угла эллиптичности

<b>А) <math>\pi</math></b>	1. Правая круговая
<b>Б) <math>\pi/4</math></b>	2. Левая эллиптическая
<b>В) <math>-\pi/7</math></b>	3. Линейная
<b>Г) <math>\pi/6</math></b>	4. Правая эллиптическая

2. Выполните тестовые задания, указав верные ответы.

1. К кардинальным элементам идеальной оптической системы не относятся:

- фокусы
- главные точки
- узловые точки
- осевая точка предмета
- осевая точка изображения

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

- двояковыпуклая
- двояковогнутая
- плосковыпуклая
- плосковогнутая

3. Укажите верные утверждения. В случае реальной оптической системы

- изображения осевой точки предмета, построенное лучами, идущими под разными углами к оптической оси, будут лежать в разных местах вдоль оптической оси
- положение изображения осевой точки предмета, построенное лучами, идущими под разными углами к оптической оси, не зависит от угла
- гомоцентрический пучок лучей, выходящий из осевой точки предмета, после прохождения сферической преломляющей поверхности теряет свою гомоцентричность
- гомоцентрический пучок лучей, выходящий из осевой точки предмета, после прохождения сферической преломляющей поверхности остаётся гомоцентрическим

4. Установите соответствие между обозначениями величин и самими величинами.

$Z_F$	Расстояние от заднего фокуса последнего компонента до заднего фокуса эквивалентной системы
-------	--

$Z'H'$	Расстояние от переднего фокуса первого компонента до переднего фокуса эквивалентной системы
$Z_H$	Расстояние от заднего фокуса последнего компонента до задней главной плоскости эквивалентной системы
$Z'F'$	Расстояние от переднего фокуса первого компонента до передней главной плоскости эквивалентной системы

5. Установите соответствие между обозначениями величин и самими величинами.

$a_F$	Расстояние от задней главной плоскости последнего компонента до заднего фокуса эквивалентной системы
$a'H'$	Расстояние от задней главной плоскости последнего компонента до задней главной плоскости эквивалентной системы
$a_H$	Расстояние от передней главной плоскости первого компонента до переднего фокуса эквивалентной системы
$a'F'$	Расстояние от передней главной плоскости первого компонента до передней главной плоскости эквивалентной системы

3. Найти степень поляризации света, прошедшего через стеклянную плоскопараллельную пластинку под углом  $45^\circ$ . Показатель преломления стекла  $n = 1,53$ . Падающий свет – естественный.
4. Определить фокусное расстояние оптической системы, состоящей из двух тонких компонентов (линз) с фокусными расстояниями  $f_1 = 100$  мм,  $f_2 = 120$  мм, расположенных в воздухе на расстоянии  $d = 20$  мм. Привести графическое построение.

5. Параллельный пучок монохроматического света ( $\lambda = 633$  нм) падает нормально на щель  $b = 0,5$  мм. Линза с фокусным расстоянием  $f = 200$  мм расположена за щелью. Какова линейная ширина центрального дифракционного максимума, наблюдаемого в фокальной плоскости линзы?

Задание 3.2.5

1. Выполните тестовые задания, указав верные ответы.

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

- Монохроматическая волна
- Плоская волна
- Сферическая волна
- Обыкновенная волна
- Необыкновенная волна

2. Какие из перечисленных оптических элементов являются поляризационными?

- Линза
- Призма Рошона
- Дисперсионная призма
- Фазовая пластинка
- Зеркало

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

0,  $3\pi/2$ ,  $\pi/3$ ,  $5\pi/6$ ,  $\pi/2$

4. Установите соответствие между величинами и их определением

<b>А) Степень поляризации</b>	1. Величина, характеризующая степень затухания энергии излучения по мере его распространения в среде
<b>Б) Оптическая разность хода</b>	2. Доля энергии поляризованной части излучения в его общей энергии
<b>В) Показатель поглощения</b>	3. Величина, характеризующая скорость распространения волнового пакета в среде
<b>Г) Групповая скорость</b>	4. Разность оптических путей, которые прошли два луча до места их встречи

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

<b>А) Фазовая пластинка</b>	1. Различный фазовый набег для ортогональных состояний поляризации
<b>Б) Поляризационная призма</b>	2. Разложение излучения на различные спектральные составляющие
<b>В) Линза</b>	3. Двулучепреломление в анизотропном кристалле
<b>Г) Дисперсионная призма</b>	4. Преломление излучения и преобразование его

	фазового фронта
--	-----------------

2. Выполните тестовые задания, указав верные ответы.

1. Выберите верные утверждения. Первый и второй параксиальные лучи

- являются фиктивными
- являются действительными
- преломляются на фиктивных главных плоскостях
- преломляются на преломляющих плоскостях

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

- радиусов кривизны её преломляющих поверхностей
- её толщины
- показателей преломления сред, которые она разделяет
- положения предмета

3. Установите соответствие между увеличениями оптической системы и их обозначениями

Поперечное увеличение идеальной оптической системы	$\alpha_0$
Угловое увеличение идеальной оптической системы	$\gamma_0$
Продольное увеличение идеальной оптической системы	$\Gamma$
Видимое увеличение оптической системы	$\beta_0$

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

Угол между лучом, падающим на оптическую	$\varepsilon$
--	---------------

систему, и оптической осью	
Угол между лучом, прошедшим оптическую систему, и оптической осью	$\sigma'$
Угол падения на оптический элемент	$\sigma$
Угол преломления на оптическом элементе	$\varepsilon'$

**5. Установите соответствие между углами в оптической системе и их обозначениями**

Угол между вторым параксиальным лучом в пространстве предметов и оптической осью	$\alpha_1$
Угол между первым параксиальным лучом в пространстве изображений и оптической осью	$\alpha'_k$
Угол между первым параксиальным лучом в пространстве предметов и оптической осью	$\beta_1$
Угол между вторым параксиальным лучом в пространстве изображений и оптической осью	$\beta'_k$

- 3.** Линейно поляризованная монохроматическая волна ( $\lambda = 514$  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°.
- 4.** 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  $y_k = -10$  мм. Привести графическое построение.
- 5.** 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.

Задание 3.2.6

- 1.** Выполните тестовые задания, указав верные ответы.

**1. Главные оси фазовой пластинки называются:**

- Быстрая ось
- Ось поглощения
- Медленная ось
- Ось пропускания
- Ось усиления

**2. Какие из перечисленных свойств присущи электромагнитным волнам?**

- Монохроматичность
- Нагретость
- Поляризация
- Упругость
- Когерентность

**3. 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**

- $20^\circ$
- $30^\circ$
- $0^\circ$
- $45^\circ$
- $90^\circ$

**4. Установите соответствие между вектором Джонса и видом поляризации.**

Линейная горизонтальная	
-------------------------	--

Линейная с азимутом $45^\circ$	
Правая эллиптическая	
Левая круговая	
Правая круговая	

5. Установите соответствие между величинами и их описанием.

Угол, тангенс модуля которого равен отношению малой и большой осей поляризационного эллипса, а знак определяет направление вращения электрического вектора <b>E</b>	Видность интерференционной картины
Угол между большой полуосью поляризационного эллипса и горизонтальной осью $Ox$	Угол эллиптичности $\gamma$
Величина, значение которой определяет зону дифракции и тип приближения при расчете дифракционного интеграла	Азимут поляризации $\theta$
Величина, характеризующая контрастность интерференционной картины через различие яркостей светлых и темных полос	Число Френеля

2. Выполните тестовые задания, указав верные ответы.

1. Какие утверждения являются **неверными**? Апертурная диафрагма ...

- всегда располагается в пространстве предметов
- всегда располагается в пространстве изображений
- диафрагма, ограничивающая наибольшим образом пучок лучей, идущий из осевой точки предмета
- располагается в плоскости предмета

2. Выберите верные утверждения. Входной зрачок ...

- всегда располагается в пространстве предметов
- может находиться в пространстве изображений
- совпадает с положением апертурной диафрагмы, если она располагается в пространстве предметов
- совпадает с положением плоскости предмета

3. Выберите верные утверждения. Полевая диафрагма ...

- может совпадать с положением предмета
- может совпадать с положением изображения
- приводит к перераспределению освещенности в плоскости изображения
- может располагаться в любой плоскости, сопряженной с плоскостью предмета или плоскостью изображения

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

Наибольшим образом ограничивает пучок лучей, идущий от осевой точки предмета	Выходной зрачок
Диафрагма, расположенная в плоскости предмета или плоскости изображения, и ограничивающая линейное поле пространства изображений	Виньетирующая диафрагма
Параксиальное изображение апертурной диафрагмы частью системы, расположенной до диафрагмы	Апертурная диафрагма
Параксиальное изображение апертурной диафрагмы частью системы, расположенной после диафрагмы	Полевая диафрагма
Любая диафрагма кроме апертурной и полевой, приводящая к перераспределению	Входной зрачок

освещенности изображения	
--------------------------	--

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

Видимое увеличение телескопической системы	$L$
Длина системы	$\Gamma_T$
Угловое поле пространства предметов	$D'$
Диаметр выходного зрачка	$2\omega$

3. Определить разность фаз ортогональных компонент светового вектора  $\mathbf{E}$ , если азимут поляризации  $\theta$  равен  $15^\circ$ , а отношение амплитуд  $A_y/A_x = 2,5$ . Определить величину отношения большой оси эллипса к малой.
4. 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.
5. На стекло с показателем преломления  $n_1 = 1,5$  нанесен слой вещества с показателем преломления  $n_2 = 1,2$ . Рассчитать толщину слоя, который давал бы максимум и минимум отражения для света длины волны  $\lambda = 550$  нм при нормальном и под углом  $30^\circ$  падении света.

### Задание 3.2.7

1. Выполните тестовые задания, указав верные ответы.

1. С помощью формул Френеля можно определить:

- Коэффициент усиления среды
- Энергетический коэффициент отражения от границы раздела двух сред
- Показатель преломления среды
- Показатель поглощения среды

- Энергетический коэффициент пропускания на границе раздела двух сред

**2. Какие из перечисленных интерферометров существуют?**

- Интерферометр Больцмана
- Интерферометр Жамена
- Интерферометр Майкельсона
- Интерферометр Ньютона
- Интерферометр Фабри-Перо

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

- 30 МГц
- 10 кГц
- 20 ГГц
- 400 ГГц
- 15 ТГц

**4. Установите соответствие между вектором Джонса и значением угла эллиптичности.**

	$45^\circ$
	$-45^\circ$
	$0^\circ$
	$10,9^\circ$
	$-26,6^\circ$

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

Угол эллиптичности	от $-90^\circ$ до $+90^\circ$
Азимут поляризации	от 0 до $+\infty$
Число Френеля	от 0 до 1
Степень поляризации	от $-45^\circ$ до $+45^\circ$

2. Выполните тестовые задания, указав верные ответы.

1. Выберите верные утверждения. Телескопическая система...

- это система, которая преобразует параллельный пучок, падающий на системы, в параллельный пучок, выходящий из системы
- это система, которая не имеет действительных фокусов
- состоит из объектива и окуляра
- строит изображение близко расположенных предметов

2. Выберите верные утверждения. Выходной зрачок ...

- совпадает с положением плоскости изображения
- совпадает с положением апертурной диафрагмы, если она располагается в пространстве изображений
- всегда находится в пространстве изображений
- может находиться в пространстве предметов

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

Видимое увеличение телескопической системы	$L$
Длина системы	$\Gamma_T$
Угловое поле пространства изображений	$D$
Диаметр входного зрачка	$2\omega'$

4. При расчете параметров микроскопа используется формула:

$$2y = -2l_0 \operatorname{tg} \omega' / \Gamma_M$$

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

Видимое увеличение микроскопа	$2y$
Расстояние наилучшего зрения	$2\omega'$
Угловое поле пространства изображений	$l_0$
Линейное поле микроскопа	$\Gamma_M$

5. Установите соответствие между формулами и величинами увеличений идеальной оптической системы.

Линейное (поперечное) увеличение	$\alpha = dz' / dz$
Угловое увеличение	$\beta_0 = \alpha_0 \cdot \gamma_0$
Продольное увеличение	$\gamma = \operatorname{tg} \alpha' / \operatorname{tg} \alpha$

Связь между увеличениями	$\beta = y' / y$
--------------------------	------------------

3. 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  $1 \text{ Вт/м}^2$ .
4. Предмет высотой  $y = 5 \text{ мм}$  находится слева на расстоянии  $z = -30 \text{ мм}$  от переднего фокуса тонкого компонента (линзы), расположенного в воздухе. Найти положение изображения, если известно, что высота изображения  $y' = 10 \text{ мм}$ . Привести графическое построение.
5. На пути двух параллельных пучков когерентного света с поперечным размером  $1 \text{ мм}$  установлена тонкая линза. Оси пучков расположены на расстоянии  $5 \text{ мм}$  друг от друга. Посередине между осями пучков располагается параллельная им оптическая ось линзы. Определите длину волны излучения, если при фокусном расстоянии  $150 \text{ мм}$  в фокальной плоскости линзы образовалась интерференционная картина с периодом  $0,1 \text{ мм}$ .

### Задание 3.2.8

1. Выполните тестовые задания, указав верные ответы.

1. Какие из перечисленных величин входят в закон Бугера-Ламберта-Бера?

- Температура среды
- Интенсивность падающего излучения
- Показатель поглощения среды
- Показатель преломления среды
- Расстояние, прошедшее волной в поглощающей среде

2. Какая разность фаз между компонентами вектора электрической напряженности  $E_x$  и  $E_y$  соответствует электромагнитной волне, поляризованной по левому или правому кругу?

- $\pi/3$
- 0
- $\pi/2$
- $-\pi/2$
- $\pi$

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

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

4. Установите соответствие между матрицей Джонса и оптическим элементом.

Идеальный линейный поляризатор, ось пропускания которого ориентирована вдоль оси $Ox$	
Четвертьволновая фазовая пластинка, быстрая ось которой ориентирована вдоль оси $Oy$	
Четвертьволновая фазовая пластинка, быстрая ось которой ориентирована вдоль оси $Ox$	
Полуволновая фазовая пластинка, быстрая ось которой ориентирована	

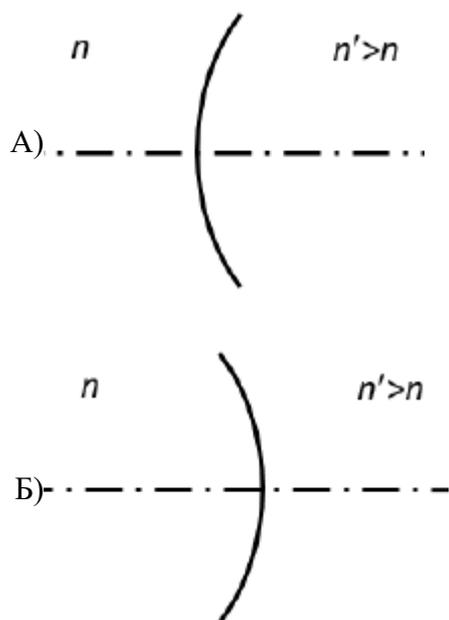
вдоль оси $Ox$	
----------------	--

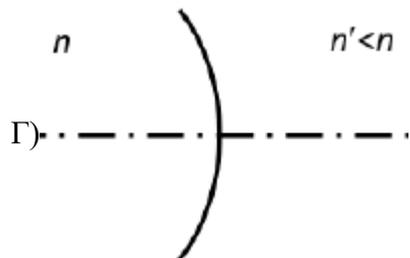
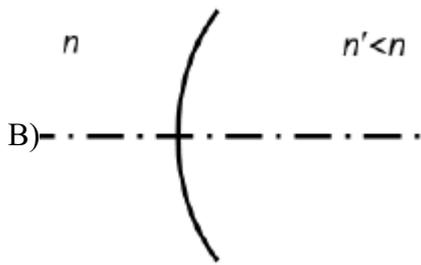
5. Установите соответствие между значением длины волны и диапазоном электромагнитных волн

$\lambda = 90$ нм	Радио
$\lambda = 10,6$ мкм	Видимый
$\lambda = 2$ км	Ультрафиолетовый
$\lambda = 633$ нм	Инфракрасный

2. Выполните тестовые задания, указав верные ответы.

1. Укажите, в каких случаях преломляющая поверхность будет иметь положительную оптическую силу.





**2. Какие утверждения являются неверными?**

- При составлении матрицы оптической системы, вначале перемножаются все матрицы преломления, а потом все матрицы перемещения.
- При составлении матрицы оптической системы, вначале перемножаются все матрицы перемещения, а потом все матрицы преломления
- При составлении матрицы оптической системы матрицы берутся порядке, соответствующем следованию луча.
- При составлении матрицы оптической системы матрицы берутся в порядке, обратном следованию луча.

**3. Выберите верные утверждения. Оптическая сила системы, состоящей из двух тонких положительных линз, расположенных на конечном расстоянии друг от друга,**

- всегда положительная
- всегда отрицательная
- зависит от положения предмета
- зависит от расстояния между линзами
- зависит от показателей преломления сред, которые разделены линзами

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

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

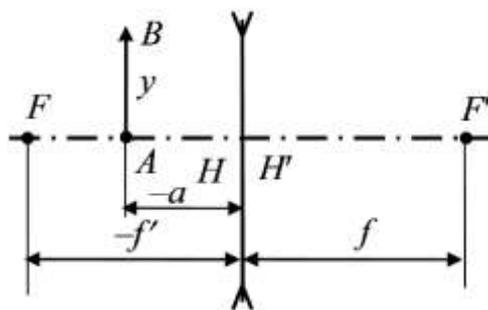
Установить соответствие между величинами, входящими в формулу, и их обозначениями

- |   |         |
|---|---------|
|   | • $r_1$ |
| • Заднее фокусное расстояние толстой линзы        | • $n_1$ |
| • Радиус кривизны первой преломляющей поверхности | • $f'$  |
| • Радиус кривизны второй преломляющей поверхности | • $r_2$ |
| • Толщина толстой линзы                           | • $d$   |
| • Показатель преломления материала линзы          | • $n_2$ |
|   | • $n_3$ |

5. Установите соответствие между обозначениями величин и самими величинами.

$Z_F$	Расстояние от заднего фокуса последнего компонента до заднего фокуса эквивалентной системы
$Z'_H$	Расстояние от переднего фокуса первого компонента до переднего фокуса эквивалентной системы
$Z_H$	Расстояние от заднего фокуса последнего компонента до задней главной плоскости эквивалентной системы
$Z'_F$	Расстояние от переднего фокуса первого компонента до передней главной плоскости эквивалентной системы

3. 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  $0^\circ$ .
4. 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  $a = -5 \text{ см}$ ,  $f = 9 \text{ см}$ .



5. Параллельный пучок монохроматического света ( $\lambda = 550 \text{ нм}$ ) падает нормально на круглое отверстие диаметром  $D = 0,5 \text{ мм}$ . Линза с фокусным расстоянием  $f = 200 \text{ мм}$  расположена за отверстием. Какова линейная ширина центрального дифракционного максимума, наблюдаемого в фокальной плоскости линзы?

### Задание 3.2.9

1. Выполните тестовые задания, указав верные ответы.

1. Какие из перечисленных систем излучают электромагнитные волны?

- Заряд, движущийся равномерно
- Заряд, движущийся ускоренно
- Колеблющийся диполь
- Покоящийся заряд
- Покоящийся диполь

1. Какие из перечисленных видов анизотропных кристаллов существуют?

- Четырехосные
- Пятиосные
- Шестиосные
- Одноосные
- Двuosные

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

- Синий
- Оранжевый
- Красный
- Зеленый
- Фиолетовый

4. Установите соответствие между вектором Джонса и видом поляризации.

Линейная вертикальная	
Линейная с азимутом $30^\circ$	
Левая эллиптическая	
Правая круговая	
Левая круговая	

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

<b>А) Поляроидная пленка</b>	1. Двухлучепреломление в анизотропном кристалле
<b>Б) Поляризационная</b>	2. Разложение излучения

<b>призма</b>	на различные спектральные составляющие
<b>В) Линза</b>	3. Различное поглощение для двух ортогональных проекций вектора <b>E</b>
<b>Г) Дифракционная решетка</b>	4. Преломление излучения и преобразование его фазового фронта

2. Выполните тестовые задания, указав верные ответы.

1. Изображение является стигматическим, если:

- гомоцентрический пучок лучей после прохождения оптической системы остался гомоцентрическим
- гомоцентрический пучок лучей после прохождения оптической системы перестал быть гомоцентрическим
- каждой точке предмета соответствует только одна точка изображения
- каждой точке предмета соответствует несколько точек изображения
- каждой точке изображения соответствует несколько точек предмета

2. Выберите верные утверждения. Оптическая сила системы, состоящей из двух тонких положительных линз, расположенных на конечном расстоянии друг от друга,

- всегда положительная
- всегда отрицательная
- зависит от положения предмета
- зависит от расстояния между линзами
- зависит от показателей преломления сред, которые разделены линзами

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

- двояковыпуклая
- двояковогнутая
- плосковыпуклая
- плосковогнутая

4. Установите соответствие между обозначениями величин и самими величинами.

$Z_F$	Расстояние от заднего фокуса последнего компонента до заднего фокуса эквивалентной системы
$Z'H'$	Расстояние от переднего фокуса первого компонента до переднего фокуса эквивалентной системы
$Z_H$	Расстояние от заднего фокуса последнего компонента до задней главной плоскости эквивалентной системы
$Z'F'$	Расстояние от переднего фокуса первого компонента до передней главной плоскости эквивалентной системы

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

Угол между вторым параксиальным лучом в пространстве предметов и оптической осью	$\alpha_1$
Угол между первым параксиальным лучом в пространстве изображений и оптической осью	$\alpha'_k$
Угол между первым параксиальным лучом в пространстве предметов и оптической осью	$\beta_1$
Угол между вторым параксиальным лучом в	$\beta'_k$

3. 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.
4. 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.
5. 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.

#### Задание 3.2.10

1. Выполните тестовые задания, указав верные ответы.

1. Какие из перечисленных видов поляризации электромагнитного излучения существуют?

- Сферическая
- Круговая
- Треугольная
- Эллиптическая
- Линейная

2. Фаза плоской электромагнитной волны включает в себя:

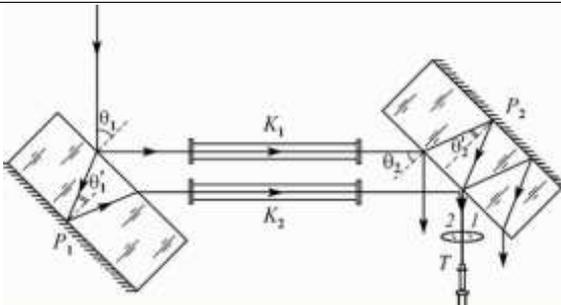
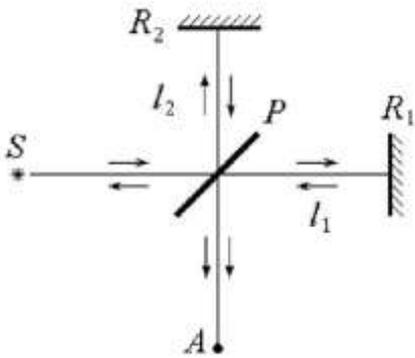
- Волновое число
- Циклическую частоту

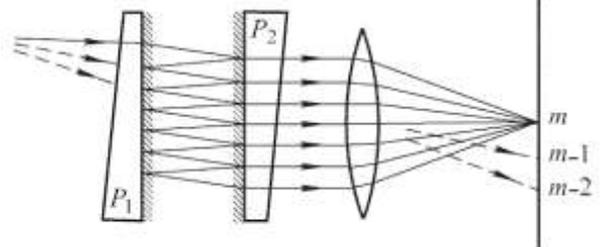
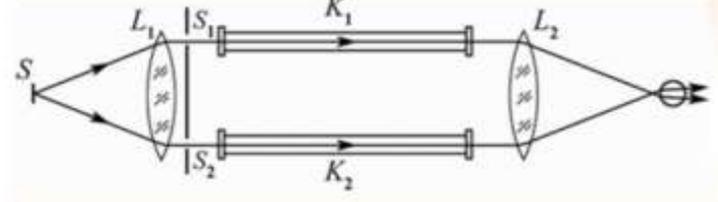
- Мощность излучения
- Интенсивность излучения
- Амплитуду колебаний

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

- 1,44
- 0,54
- 1,34
- 0,78
- 1,54

4. Установите соответствие между схемой интерферометра и его названием.

<p>Интерферометр Фабри-Перо</p>	
<p>Интерферометр Жамена</p>	

Интерферометр Рэлея	
Интерферометр Майкельсона	

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

А) $\pi$	1. Левая круговая
Б) $-\pi/4$	2. Правая эллиптическая
В) $\pi/7$	3. Линейная
Г) $-\pi/6$	4. Левая эллиптическая

2. Выполните тестовые задания, указав верные ответы.

1. К кардинальным элементам идеальной оптической системы не относятся:

- фокальные плоскости
- главные плоскости
- узловые плоскости
- плоскость предмета
- плоскость изображения

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

- двояковыпуклая
- двояковогнутая
- плосковыпуклая
- плосковогнутая

3. Установите соответствие между увеличениями оптической системы и их обозначениями

Поперечное увеличение идеальной оптической системы	$\alpha_0$
Угловое увеличение идеальной оптической системы	$\gamma_0$
Продольное увеличение идеальной оптической системы	$\Gamma$
Видимое увеличение оптической системы	$\beta_0$

4. Установить соответствие между коэффициентами матрицы и свойствами оптической системы, которые они описывают:

Параллельный пучок, пройдя систему, остается параллельным	$A = 0$
Первая опорная плоскость совпадает с передним фокусом системы	$B = 0$
Вторая опорная плоскость совпадает с задним фокусом системы	$C = 0$
Положение опорных плоскостей совпадает с положением предмета и изображения	$D = 0$

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

Видимое увеличение телескопической системы	$L$
Длина системы	$\Gamma_T$
Угловое поле пространства предметов	$D'$
Диаметр выходного зрачка	$2\omega$

3. 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  $360^\circ$ .
4. 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.
5. 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  $\Delta = 0,5$  мм. Найти угол  $\alpha$  между гранями пластинки.

### Пример выполнения задания 7.1

#### Решение первого задания

1. Главные оси линейного поляризатора называются:

- Быстрая ось
- **Ось поглощения**
- Медленная ось
- **Ось пропускания**
- Ось усиления

2. Какие из перечисленных оптических элементов являются поляризационными?

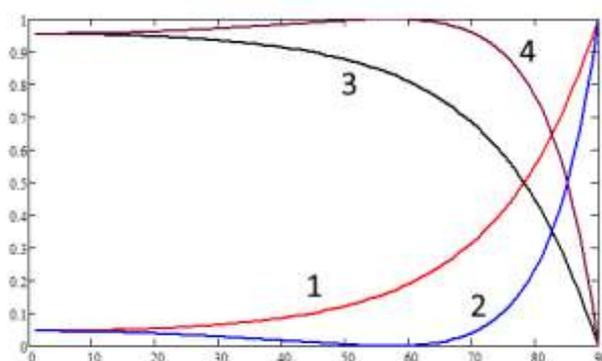
- Линза
- **Призма Рошона**
- Дисперсионная призма
- **Фазовая пластинка**
- Зеркало

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

- $\lambda/2$
- $3\lambda$
- $3\lambda/5$
- $3\lambda/7$
- $\lambda/8$

Ответ:  $\lambda/2, 3\lambda/7, 3\lambda/5, \lambda/8, 3\lambda$

4. 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.



Коэф. пропускания s-компоненты $\tau_s$	3
Коэф. пропускания p-компоненты $\tau_p$	4

Коэф. отражения s-компоненты $\rho_s$	1
Коэф. отражения p-компоненты $\rho_p$	2

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

а.

Коэф. пропускания s-компоненты $\tau_s$	d)
Коэф. пропускания p-компоненты $\tau_p$	c)
Коэф. отражения s-компоненты $\rho_s$	a)
Коэф. отражения p-компоненты $\rho_p$	b)

Решение второго задания

1. Изображение является стигматическим, если:

- **гомоцентрический пучок лучей после прохождения оптической системы остался гомоцентрическим**
- гомоцентрический пучок лучей после прохождения оптической системы перестал быть гомоцентрическим
- **каждой точке предмета соответствует только одна точка изображения**
- каждой точке предмета соответствует несколько точек изображения
- каждой точке изображения соответствует несколько точек предмета

2. Оптическая система называется центрированной, если:

- **все преломляющие и отражающие поверхности являются поверхностями вращения**
- **все преломляющие и отражающие поверхности имеют общую ось вращения**
- преломляющие и отражающие поверхности могут иметь разные оси вращения
- преломляющие и отражающие поверхности могут не являться поверхностями вращения

**3.** К кардинальным элементам идеальной оптической системы относятся:

- **фокусы**
- **главные точки**
- **узловые точки**
- осевая точка предмета
- осевая точка изображения

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

Матрица перемещения	$T = \begin{bmatrix} 1 & d/n \\ 0 & 1 \end{bmatrix}$
Матрица преломления	$R = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ \frac{n_1 - n_2}{r} & 1 \end{bmatrix}$
Матрица тонкой линзы	$\begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -\frac{1}{f'} & 1 \end{bmatrix}$

Матрица сложной оптической системы	$M = M_{n+1} \dots \cdot M_3 \cdot M_2 \cdot M_1$
------------------------------------	---

5. Установить соответствие между коэффициентами матрицы и свойствами оптической системы, которые они описывают:

Вторая опорная плоскость совпадает с задним фокусом системы	$A = 0$
Положение опорных плоскостей совпадает с положением предмета и изображения	$B = 0$
Параллельный пучок, пройдя систему, остается параллельным	$C = 0$
Первая опорная плоскость совпадает с передним фокусом системы	$D = 0$

Решение третьего задания

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

где  $\delta_{y-x}$  – разность фаз соответствующих проекций поля.

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

Решение четвертого задания

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

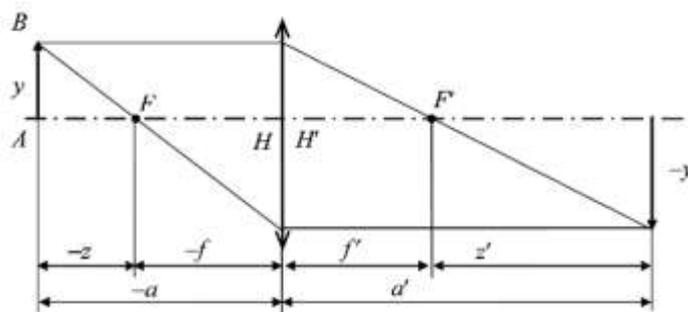
$$z \cdot (a' - f') = -f'^2 \text{ или } f'^2 - zf' + za' = 0.$$

Решение этого квадратного уравнения имеет вид

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

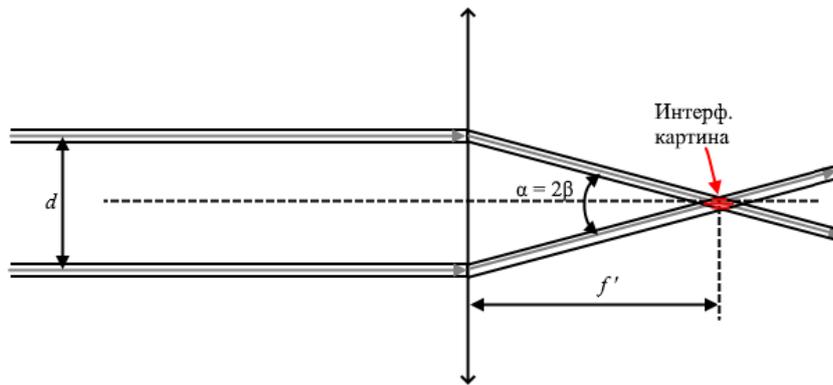
Для системы в воздухе связь между увеличениями выглядит следующим образом:

. Тогда .



Решение пятого задания

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:

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

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  $f \approx d\Lambda/\lambda = 1,58$  м.

## Задание экзаменационного билета № 4 (60 баллов)

### Тема: Теоретическая и прикладная светотехника

#### Задание №1 – теоретический вопрос (10 баллов)

- 1.1. 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
- 1.2. 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.
- 1.3. Нормируемые количественные и качественные показатели освещения. Перечислить показатели, которые нормируются для различных типов помещения с примерами объектов для каждого показателя.
- 1.4. Методы измерения светового потока. Для каждого метода привести схему измерения, указать измерительные приборы и расчетные формулы для определения светового потока косвенным методом
- 1.5. 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
- 1.6. 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  $K_{пор}$ .

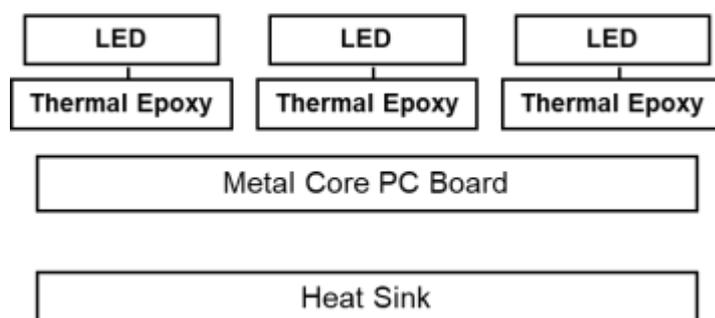
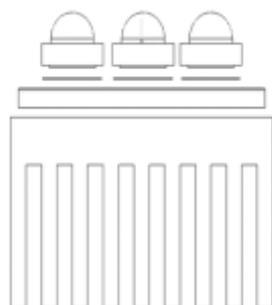
#### Пример выполнения Задания 2.1

##### Содержание ответа:

Привести определение и основные формулы. Представить классификацию с графиками для каждого типа КСС. Привести примеры типовых осветительных приборов для каждого типа КСС. Описать оптические схемы для создания различных типов КСС.

#### Задание №2 – задача (10 баллов)

- 2.1. Используя тепловую модель светодиодного устройства найти значение его максимальной допустимой рабочей мощности при комнатной температуре ( $25\text{ }^{\circ}\text{C}$ ). Какой будет при этом рабочий ток светодиода? Максимальная температура p-n перехода  $T_{j, \max} = 125\text{ }^{\circ}\text{C}$ , тепловые сопротивления:  $R_{\theta \text{ LED}} = 15\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{Вт}$ ,  $R_{\theta \text{ Thermal Epoxy}} = 5\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{Вт}$ ,  $R_{\theta \text{ MC PCB}} = 0,1\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{Вт}$ ,  $R_{\theta \text{ Heat Sink}} = 9,9\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{Вт}$ , рабочее напряжение  $U_{f \text{ LED}} = 3,2\text{ В}$ .



- 2.2. 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.
- 2.3. 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.
- 2.4. 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.
- 2.5. 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  $n_0=p_0=2 \times 10^6 \text{ см}^{-3}$
- 2.6. Определить линейный температурный коэффициент прямого напряжения СД на основе GaAs при комнатной температуре ( $T = 295$  К). Каким будет падение напряжения 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 выполнения Задания 3.1.

#### Решение:

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

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

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  $P_{\text{LED max}} = 2$  Вт.  $P_{\text{LED max}} = I_{f \text{ LED max}} \cdot U_{f \text{ LED}}$ ,  
т.е.  $2 \text{ Вт} = I_{f \text{ LED max}} \cdot 3,2 \text{ В}$ , значит  $I_{f \text{ LED max}} = 0,625 \text{ А} = 625 \text{ мА}$ .

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

### Задание №3 – задача (15 баллов)

- 3.1. Световой поток, излучаемый точечным равноярким полушаром

( $L_v^{oc} = L_v^{cf}$ ), равен  $1000 \text{ лм}$ . Определите горизонтальную и вертикальную освещенности (пл. Р) в т. Б. При расчете принять:  $H=3.00 \text{ м}$ ,  $a=5.00 \text{ м}$ ,  $b=2.50 \text{ м}$ ; длина волны излучения основания полушара  $0.425 \text{ мкм}$ ; длина волны излучения сферической поверхности полушара  $0.525 \text{ мкм}$ . Основание полушара параллельно горизонтальной плоскости. Сферическая часть полушара направлена вверх.

- 3.2.

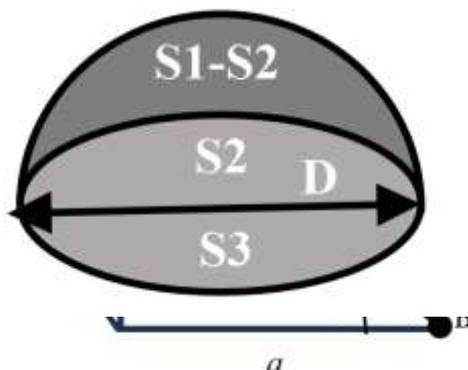
$= L_{p \text{ сф}})$  полушара равен  $10^{20} \text{ 1/с}$ . Определите  $\lambda$  и световой поток сферической части полушара,  $=0.1 \text{ м}$ .

- 3.3.

зает на диск плоская монохроматическая волна в  $\lambda$  на поверхность диффузно отражающего диска,  $=0.7$ . Максимальное значение напряженности  $E_{\text{max}} = 5.0 \text{ В/м}$ .

- 3.4.

металлический шар, поверхность которого имеет температуру спутника на орбите, при его



освещении Солнцем. Считать Солнце черным телом, излучающим с  $\lambda_{max} = 483$  нм.

Принять: радиус Солнца равным  $R_C = 6.95 \cdot 10^8$  м, расстояние от Земли до Солнца  $R_{CЗ} = 1.49 \cdot 10^{11}$  м.

3.5. Лазерный луч имеет  $s$  поляризацию и падает из воздуха на фильтр толщиной  $d$  под углом  $i$ . Показатель ослабления материала фильтра  $\mu_{10}$  и показатель преломления  $n$  известны. Найти зависимость коэффициента пропускания  $\tau(i)$  фильтра от угла падения излучения  $i$ . При расчете учесть многократные отражения излучения внутри фильтра.

3.6. Сила света равнояркого ( $L_{v\text{ос}} = L_{v\text{бок}}$ ) цилиндра в направлении  $\alpha = 75^\circ$  от оси цилиндра, равна  $100$  кд. Определите фотонную яркость оснований цилиндра и энергетическую яркость боковой поверхности цилиндра, если:  $\lambda_{oc} = 0.455$  мкм,  $\lambda_{бок} = 0.65$  мкм,  $D = 0.1$  м,  $H = 0.2$  м.

### Пример выполнения задания 3.1.

#### Решение:

Горизонтальную освещенность в точке Б определим по закону квадрата расстояния:

$$E_v^{ГБ} = \frac{I_v(\alpha)}{l^2} \cos(\theta)$$

Из геометрии рисунка 1 следует, что  $\alpha = \theta$  и:

$$l = \sqrt{H^2 + a^2 + b^2}$$

$$\cos(\theta) = \frac{H}{l}$$

Вертикальную облученность в плоскости Р в точке Б определим аналогично:

$$E_e^{ББ} = \frac{I_e(\alpha)}{l^2} \cos(\beta)$$

$$\cos(\beta) = \frac{a}{l}$$

Поскольку в световой системе полушар является равноярким источником с яркостью  $L_v$ , то из определения яркости получаем:

$$I_v(\alpha) = L_v S_{mi\perp}(\alpha)$$

$$S_{mi\perp}(\alpha) = (S_1 - S_2) + (S_2 + S_3)$$

$$S_{mi\perp}(\alpha) = S_{сф\perp}(\alpha) + S_{oc\perp}(\alpha)$$

$$S_{mi\perp}(\alpha) = \underbrace{\frac{\pi D^2}{8} - \frac{\pi D^2}{8} \cos(\alpha)}_{S_{сф\perp}(\alpha)} + \underbrace{\frac{\pi D^2}{4} \cos(\alpha)}_{S_{oc\perp}(\alpha)}$$

$$S_{mi\perp}(\alpha) = \frac{\pi D^2}{8} (1 + \cos(\alpha))$$

$$I_v(\alpha) = L_v D^2 \frac{\pi}{8} (1 + \cos(\alpha))$$

Для равнояркого источника  $M_v = \pi L_v$ , поэтому:

$$I_v(\alpha) = M_v D^2 \frac{(1 + \cos(\alpha))}{8}$$

Для определения  $M_v D^2$  воспользуемся связью заданного в условии задачи светового потока  $\Phi_v$  с  $M_v$ :

$$\left. \begin{aligned} \Phi_v &= M_v (S_{oc} + S_{cf}) \\ \Phi_v &= M_v \left( \frac{\pi D^2}{4} + \frac{\pi D^2}{2} \right) \\ \Phi_v &= \frac{3\pi}{4} M_v D^2 \end{aligned} \right\}$$

$$M_v D^2 = \frac{4\Phi_v}{3\pi}$$

$$E_v^{GB} = \Phi_v \frac{(1 + \cos(\alpha)) \cos(\alpha)}{6\pi l^2}$$

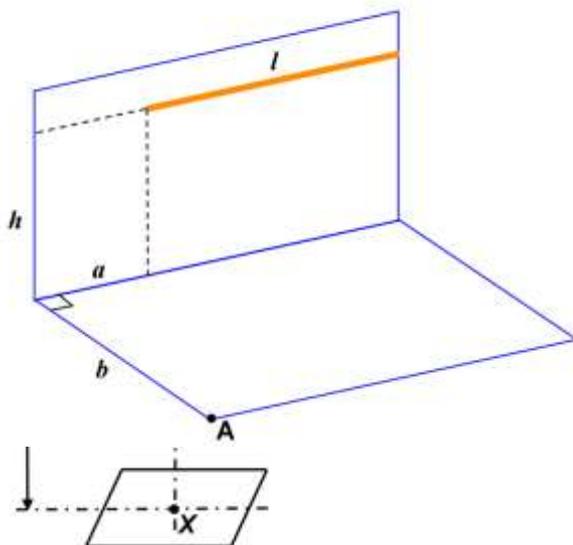
$$E_v^{BB} = \Phi_v \frac{(1 + \cos(\alpha)) \cos(\beta)}{6\pi l^2}$$

**Ответ:**  $E_v^{GB} = 9.18$  лк;  $E_v^{BB} = 15.3$  лк

**Задание №4 – задача (15 баллов)**

4.1. Равнорядкая светящая линия длиной  $l = 2$  м со световым потоком  $\Phi = 12000$  лм, расположенная, как показано на рисунке. Расстояния  $h = 3$  м,  $a = 1,5$  м,  $b = 2,5$  м.

4.2.



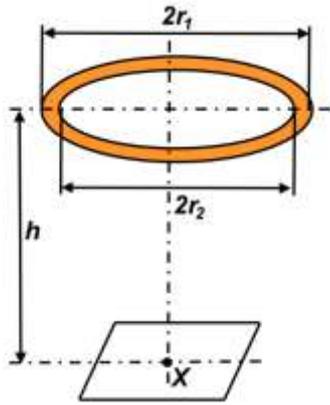
в А.

в точке X от равнорядкого диска, к).

= 4 м. Световой поток 6000 лм.

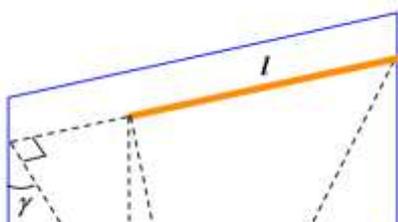
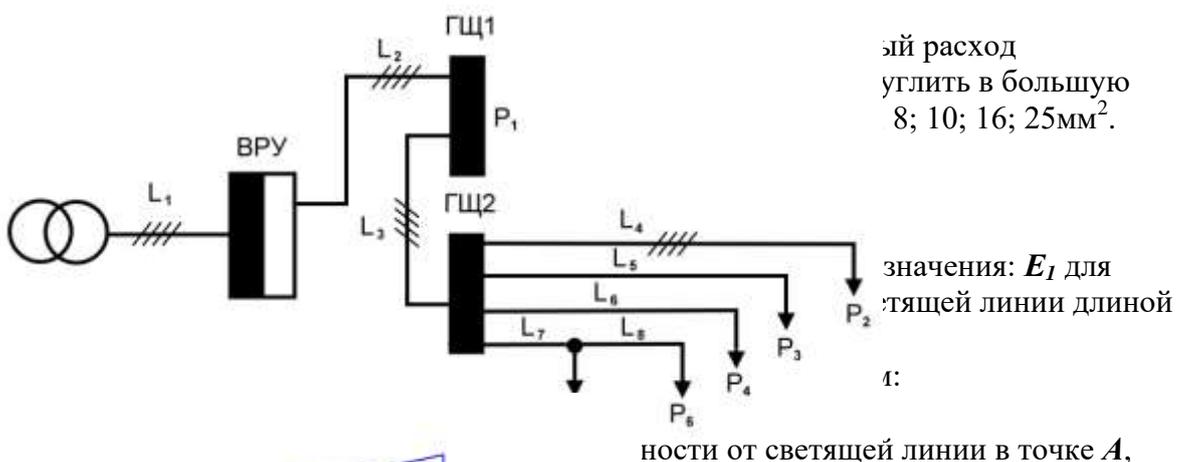
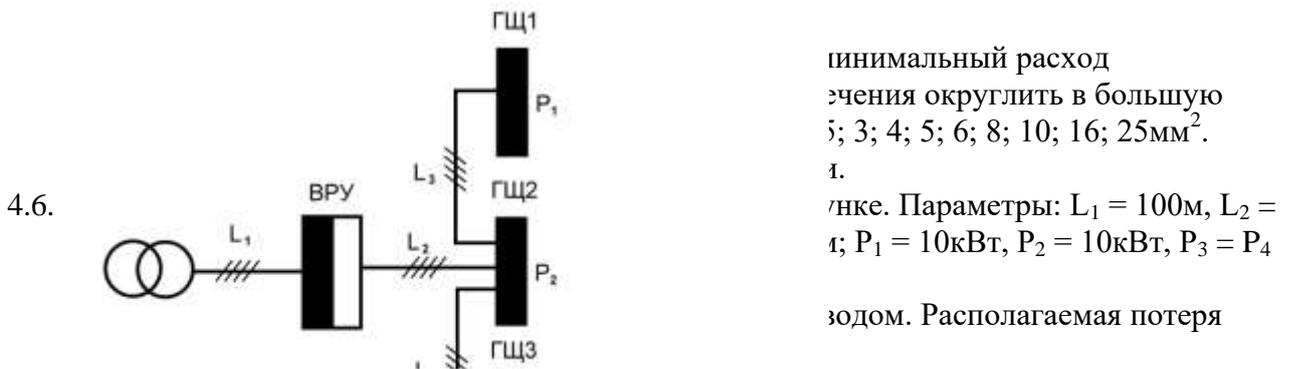
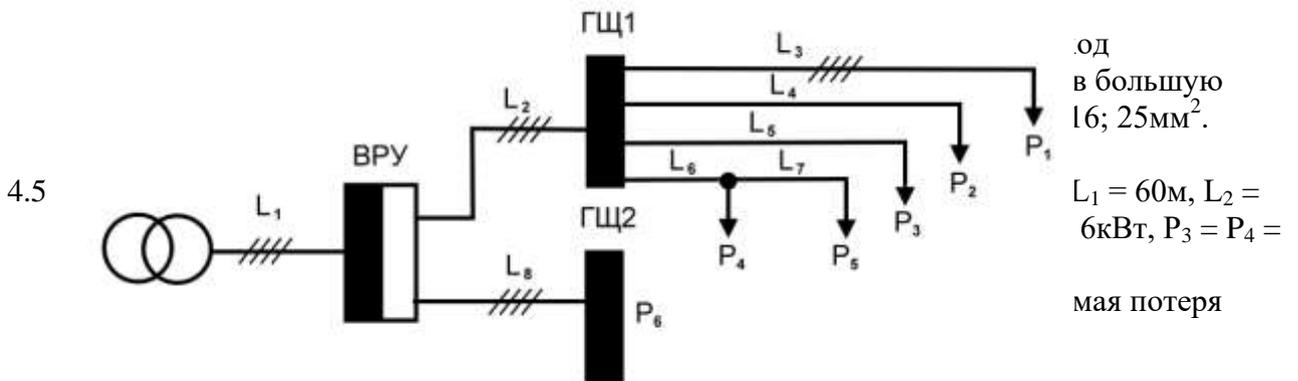
4.3. Определите горизонтальную освещённость в точке X от равнорядкого кольца, расположенного горизонтально (см. рисунок).

Внешний радиус кольца  $r_1 = 3$  м, внутренний радиус  $r_2 = 2,5$  м, расстояние до него  $h = 5$  м. Яркость  $1500$  кд/м<sup>2</sup>.



4.4. 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  $\Delta U_c = 4\%$ .



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

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

$$f_1(\gamma) = 1$$

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

$$\varphi_1 = \arctg\left(\frac{l+a}{\sqrt{b^2+h^2}}\right) = \arctg\left(\frac{2+1,5}{\sqrt{2,5^2+3^2}}\right) = 0,23$$

$$\varphi_2 = \arctg\left(\frac{a}{\sqrt{b^2+h^2}}\right) = \arctg\left(\frac{1,5}{\sqrt{2,5^2+3^2}}\right) = 0,10$$

Таким образом,

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

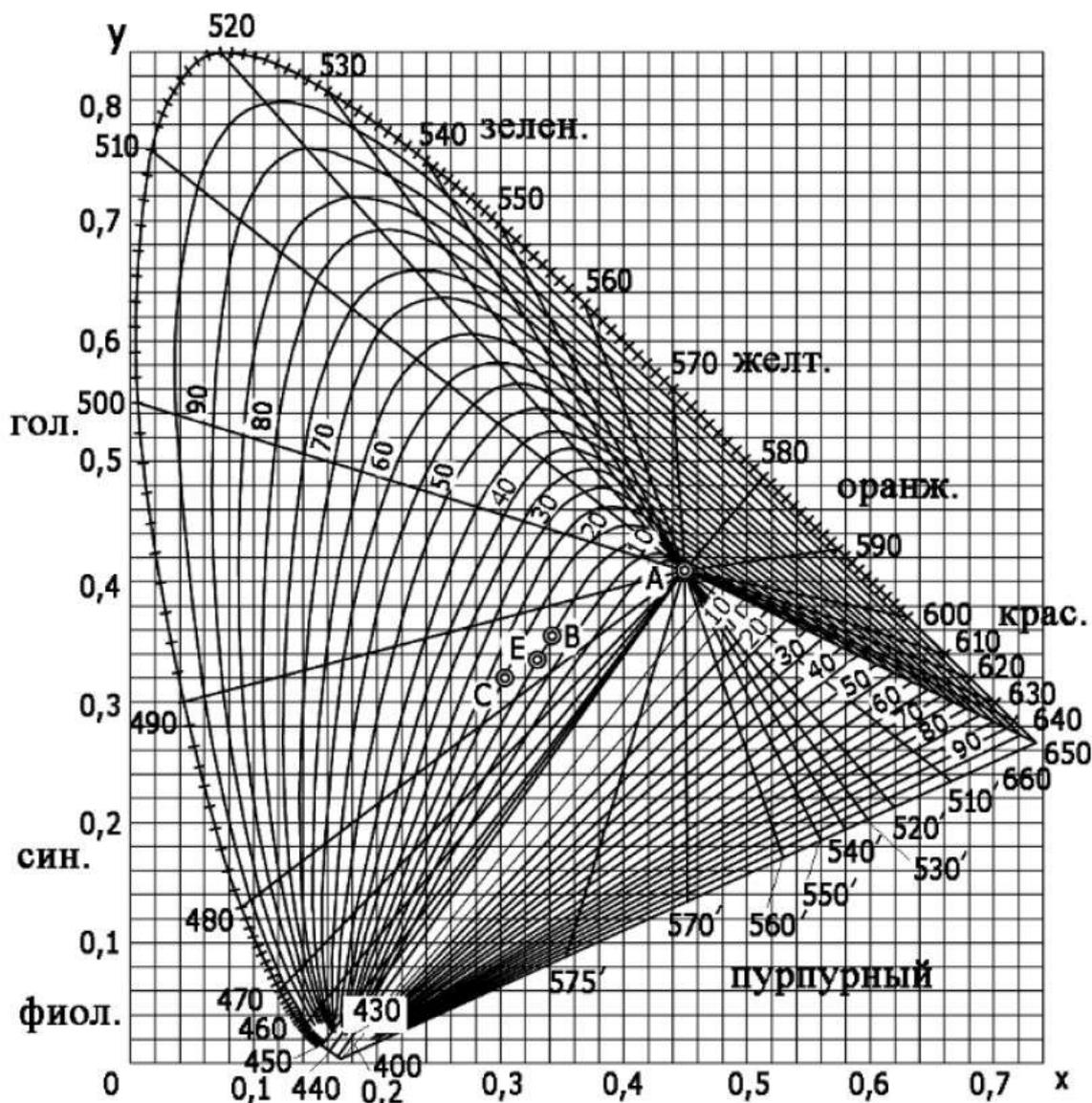
$$E_2 = \frac{607,54 \cdot 0,41^2}{2 \cdot 3} \cdot \left( 0,10 + \frac{0,20}{2} \right) = 3,41 \text{ лк}$$

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

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

**Задание №5 – задача (10 баллов)**

Приложение для задания 5.



- 5.1. 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  $xu$ , определить доминирующую длину волны и чистоту цвета.
- 5.2. 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  $xu$ , определить цветовой тон и чистоту цвета. Показать графическое решение задачи.
- 5.3. 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  $xu$ , определить цветовой тон и чистоту цвета.
- 5.4. 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  $x$ ,  $y$  и яркость. Отметьте на диаграмме цветности  $XU$  точку данного излучения, определите цветовой тон и чистоту цвета.
- 5.5. 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.

- 5.6. 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 выполнения задания 5.1.**

**Решение:**

Координаты цвета смеси излучений рассчитываются по формуле:

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

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 определяем  $\lambda=485$  нм,  $P=50\%$ .

## **Задание экзаменационного билета № 5 (60 баллов)**

### **Тема: Полупроводниковые материалы и структуры**

#### **1. Задание. Раздел 1. «Физика полупроводников» (5 баллов)**

- 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. (ОТВЕТ)
- 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.

#### **2. Задание. Раздел 1. «Физика диэлектриков» (5 баллов)**

- 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. (ОТВЕТ)
- 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.

#### **3. Задание. Раздел 1. «Физика полупроводниковых приборов и интегральных схем» (5 баллов)**

- 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. (ОТВЕТ)
- 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.

#### 4. Задание. Раздел 1. «Основы технологии материалов электронной техники» (5 баллов)

- 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. (ОТВЕТ)
- 9 Классификация дефектов в кристаллах. Макро- и микродефекты.
- 10 Точечные дефекты. Линейные дефекты. Объемные дефекты. Дефекты эпитаксиальных пленок

#### 5. Задание. Раздел 2. «Физика полупроводников» (10 баллов)

- 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.  
Распределение Ферми-Дирака. Концентрация электронов и дырок в зонах. (ОТВЕТ)
- 6 Диффузия неравновесных носителей в полупроводниках.
- 7 Различные типы процессов рекомбинации. Время жизни при излучательной рекомбинации.
- 8 Магнитные эффекты в полупроводниках. Эффект Холла.
- 9 Край собственного поглощения полупроводников. Причины прозрачности и непрозрачности в видимой области спектра диэлектриков и полупроводников соответственно.
- 10 Зонная структура кремния, германия и арсенида галлия и их особенности.

#### 6. Задание. Раздел 2. «Физика полупроводников» задача (10 баллов)

- 1 Вычислить положение уровня Ферми при  $T = 300 \text{ K}$  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  $E_F + 0,1 \text{ эВ}$  и  $E_F - 0,1 \text{ эВ}$  при температуре  $300 \text{ K}$ . 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  $300 \text{ K}$ , 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:  $m_p = 0,388 m_0$ ,  $m_n = 0,55 m_0$ , 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)
- 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. ( $n_i(300)=0,7 \cdot 10^{10} \text{ [см}^{-3}\text{]}, q=1,6 \cdot 10^{-19} \text{ [Кл]}, k=1,38 \cdot 10^{-23} \text{ [Дж/К]}$ ).
- 5 Определить положение уровня Ферми при  $T=300 \text{ К}$  в кристаллах германия, легированных мышьяком до концентрации  $10^{23} \text{ м}^{-3}$ . ( $N_C(300)=1,021 \cdot 10^{25} \text{ [м}^{-3}\text{]}, q=1,6 \cdot 10^{-19} \text{ [Кл]}, k=1,38 \cdot 10^{-23} \text{ [Дж/К]}$ ).
- 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. ( $N_V(300)=6,051 \cdot 10^{24} \text{ [м}^{-3}\text{]}, N_C(300)=1,021 \cdot 10^{25} \text{ [м}^{-3}\text{]}, q=1,6 \cdot 10^{-19} \text{ [Кл]}, k=1,38 \cdot 10^{-23} \text{ [Дж/К]}$ ).
- 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  $m_C=1,05m_0, m_V=0,56m_0$ . ( $q=1,6 \cdot 10^{-19} \text{ [Кл]}, k=1,38 \cdot 10^{-23} \text{ [Дж/К]}$ ).

## 7. Раздел 2. «Физика полупроводниковых приборов и интегральных схем» (10 баллов)

- 1 Объясните физические принципы работы униполярных приборов
- 2 Полупроводниковые структуры, содержащие два и более p-n 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 p – n перехода в равновесном состоянии. Математическая модель p – n перехода.
- 7 Объясните температурную зависимость положения уровня Ферми в примесном полупроводнике. (ОТВЕТ)
- 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:

**8. Раздел 2. «Физика полупроводниковых приборов и интегральных схем» (10 баллов)**  
**задача**

- 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]). (ОТВЕТ)
- 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]. ( $N_V(300)=6,051 \cdot 10^{24}$  [ $m^{-3}$ ],  $N_C(300)=1,021 \cdot 10^{25}$  [ $m^{-3}$ ],  $k=1,38 \cdot 10^{-23}$  [Дж/К]).
- 3 Кремний Si легирован донорной примесью до концентрации  $N_D = 10^{17}$  [ $cm^{-3}$ ]. Считая примесь полностью ионизованной, найти концентрацию основных и неосновных носителей заряда при температуре  $T=300$  К ( $n_i = 1,01 \cdot 10^{10}$   $cm^{-3}$ )
- 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. ( $\mu_p=0,19$  [ $m^2/V \cdot c$ ],  $n_i=2,3710^{13}$  [ $cm^{-3}$ ],  $q=1,6 \cdot 10^{-19}$  [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. ( $\mu_n=0,13$  [ $m^2/V \cdot c$ ],  $n_i=1,40^{10}$  [ $cm^{-3}$ ],  $q=1,6 \cdot 10^{-19}$  [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  $N_A = 10^{16}$   $cm^{-3}$  соответственно при комнатной температуре. ( $\mu_n=0,13$  [ $m^2/V \cdot c$ ],  $\mu_p=0,05$  [ $m^2/V \cdot c$ ],  $n_i=1,40^{10}$  [ $cm^{-3}$ ],  $q=1,6 \cdot 10^{-19}$  [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  $1$   $cm^3$ , удельную плотность, если известно, что атомная масса кремния равна 28, а плотность равна  $2,4$  [ $г \cdot cm^{-3}$ ], 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  $1$   $cm^3$ , удельную плотность, если известно, что атомная масса германия равна 73 а плотность равна  $5,33$  [ $г \cdot cm^{-3}$ ], число Авогадро  $6,02 \cdot 10^{23}$  моль $^{-1}$ .

**Примеры ответов на задания.**

## 1. Раздел «Физика полупроводников». Простое задание.

**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 р-п-перехода (рис. 1), где химический  $\zeta$  и электрический потенциал  $\varphi$  по толщине перехода меняется, но электрохимический потенциал  $\mu$  остается постоянным:

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

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 р-п-переходе составляет величину барьера ( $\sim 0,7 - 0,9$  В).

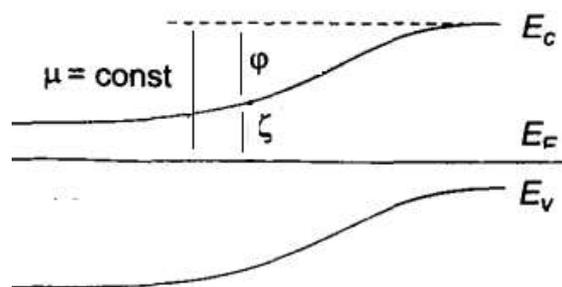


Рис. 1. Зонная диаграмма равновесного р-п-перехода

## 2. Раздел «Физика диэлектриков». Простое задание.

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

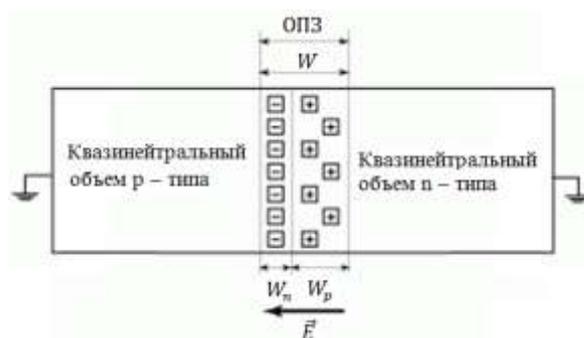
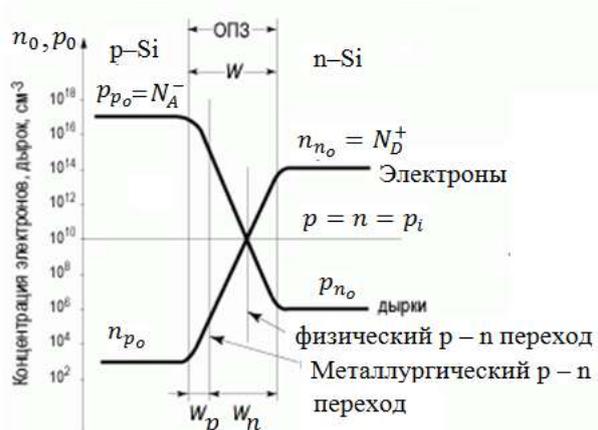
**Ответ.** Твердые неполярные диэлектрики, не содержащие примесей, обладают ничтожно малыми диэлектрическими потерями. К таким диэлектрикам относятся полимеры – полиэтилен, политетрафторэтилен (фторопласт), полистирол и другие. Твердые

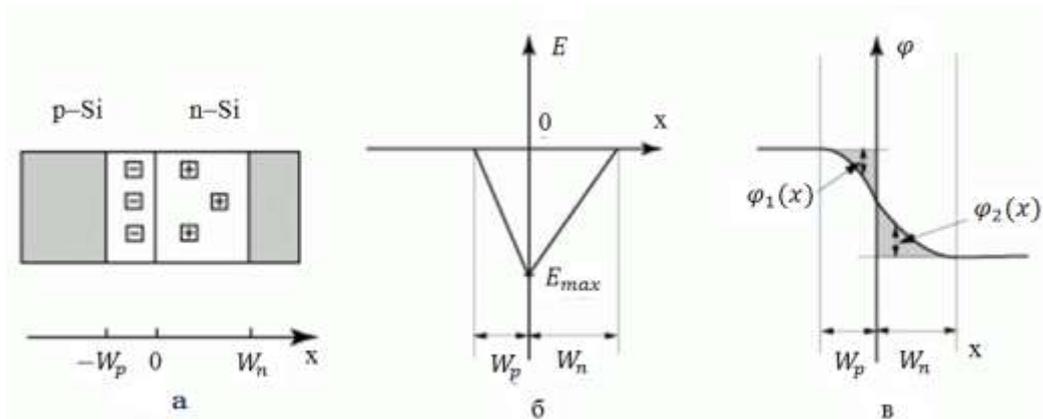
диэлектрики, состоящие из полярных молекул, представляют собой в основном органические вещества: полярные полимеры – ПВХ, эпоксидные, кремнийорганические и фенолформальдегидные и др. смолы, композиционные материалы: текстолит и гетинакс и др. Все они, благодаря дипольно-релаксационному механизму поляризации, 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.

### 3. Раздел «Физика полупроводниковых приборов и интегральных схем». Простое задание.

**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.





Существует точка, в которой концентрация дырок и электронов равны, эта точка называется физическим р–n переходом, он смещён в сторону менее легированного полупроводника относительно металлургического р–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 р-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 р-область. Между положительными и отрицательными ионами образуется разность потенциалов, называемая, контактной разностью потенциалов, она препятствует диффузии основных носителей, но способствует переходу не основных, рис.а, б, в. Значение контактной разности потенциалов зависит от уровня Ферми в р и n областях или от концентрации доноров и акцепторов.

$$U_k = \varphi_T \cdot \ln(n_{n_0} p_{p_0} / n_i^2)$$

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

#### 4. Раздел «Основы технологии материалов электронной техники». Простое задание.

**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 Si. При таких условиях возможно протекание химических реакций типа  $\text{SiCl}_4 + 2\text{H}_2 = \text{Si}_{\text{тв}} + 4\text{HCl}$ .

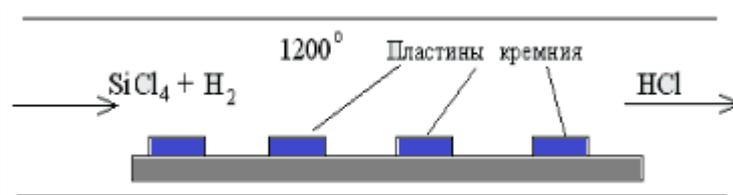


Схема реактора для эпитаксии из парогазовой смеси.

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".

### 5. Раздел «Физика полупроводников». Сложное задание.

**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. 1.б). 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  $\sqrt{E}$

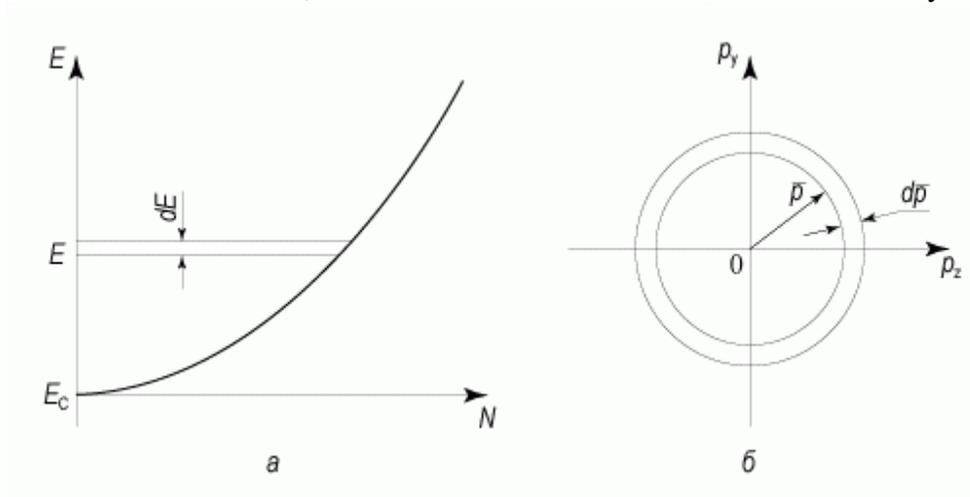


Рис. 1.3. Диаграмма для расчета плотности квантовых состояний:  
а - распределение электронов по энергии в зоне проводимости;  
б - зона Бриллюэна для расчета плотности состояний

#### 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 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

## 6. Раздел «Физика полупроводников» задача (10 баллов)

**Вопрос.** 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  $m_0=9,1 \cdot 10^{-31}$  [кг] — масса свободного электрона. Можно воспользоваться тем, что плотности состояний  $N_v(300)=6,051 \cdot 10^{24}$  [м<sup>-3</sup>],  $N_c(300)=1,021 \cdot 10^{25}$  [м<sup>-3</sup>],  $q=1,6 \cdot 10^{-19}$  [Кл],  $k=1,38 \cdot 10^{-23}$  [Дж/К].

**Ответ.**

Если известны плотности состояний, то:

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

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

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

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

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

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

$$\varphi_T(T) := \frac{k \cdot T}{q} \quad ,[\text{эВ}]$$

Тепловой потенциал  $\varphi_T(300) = 0.026$  [эВ]

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

Формула для расчета:  
Зависимость уровня Ферми от температуры

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

Ответ: отклонение положения уровня ферми от середины запрещенной зоны

[эВ]

Задача решена

Если воспользоваться значениями эффективных масс:

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

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

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

Постоянная Больцмана

Масса электрона

Постоянная Планка

$$E_{g\_Ge} := 0.665 \quad \text{эВ}$$

Ширина запрещенной зоны в германии

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

Эффективная масса электронов в германии

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

Эффективная масса дырок в германии

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

Эффективная плотность состояний в зоне проводимости

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

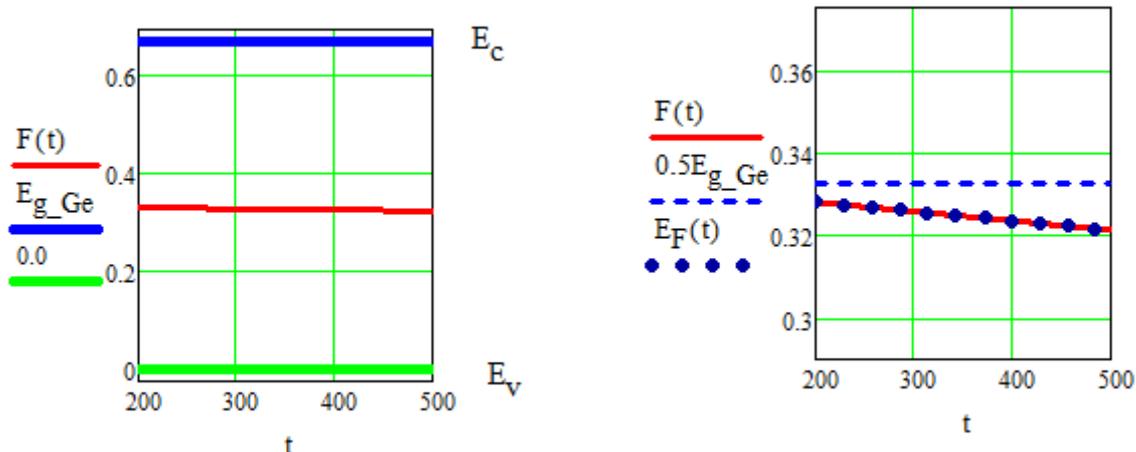
Эффективная плотность состояний в валентной зоне

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

Формула для расчета:  
Зависимость уровня Ферми от температуры

$$F(T) := \frac{E_{g\_Ge}}{2} + \frac{3k \cdot T}{4 \cdot q} \cdot \ln\left[\frac{(0.388)}{(0.55)}\right] \quad F(300) = 0.326$$

Преобразованная формула для расчета:  
Зависимость уровня Ферми от температуры

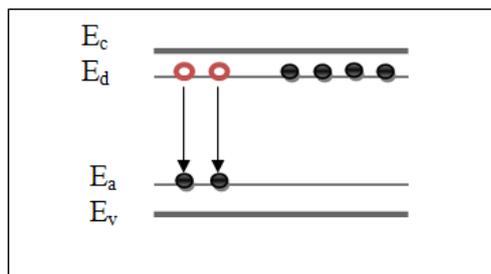


Зависимость уровня Ферми от Температуры в разных масштабах энергии:

**7. Раздел «Физика полупроводниковых приборов и интегральных схем» (10 баллов)**

**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.



При не нулевой температуре ( $T > 0K$ ) условие электронейтральности

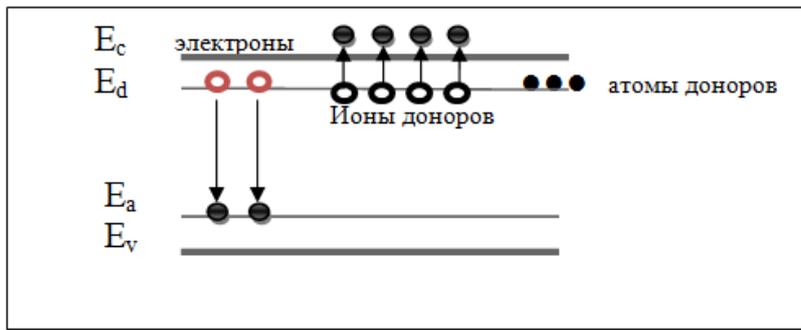
$$(n_0 + n_d) - (p_0 - p_a) = N_d - N_a.$$

$n_0$  – 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.



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.

$$n = n_d = N_d^+$$

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.



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

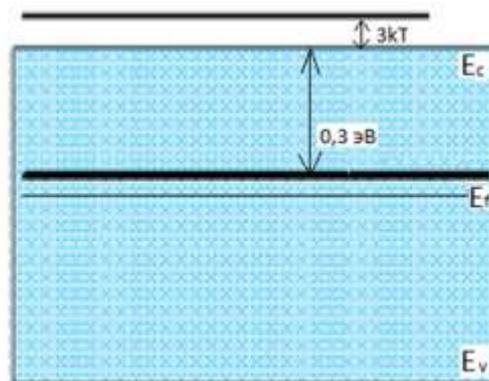
Уровень Ферми с повышением температуры сначала смещается к зоне проводимости, а затем - к валентной зоне (см. рисунок).

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

**8. Раздел «Физика полупроводниковых приборов и интегральных схем» (10 баллов)**  
задача

**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.**



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

Ответ  $f(300) = 4.59 \times 10^{-7}$

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  $3kT/q$ .