



ДОНСКОЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ
УПРАВЛЕНИЕ ЦИФРОВЫХ ОБРАЗОВАТЕЛЬНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ

Кафедра «Радиоэлектроника»

Сборник задач
к проведению лабораторных занятий
по дисциплине

**«Радиоматериалы и
радиокомпоненты»**

Авторы
Сукиязов А. Г.,
Терновской Л. А.,
Докай А. Б.

Аннотация

Сборник содержит описания, методические указания и задания к лабораторным работам по дисциплине «Радиоматериалы и радиокомпоненты» и предназначен для студентов по направлениям: радиотехника (110301).

В составе лабораторных работ присутствуют работы выполняемые как в режиме имитационных исследований, так и в режиме натурального эксперимента. Методичка к лабораторной работе 1 в сборник не включена, т.к. рассчитана на изменчивое содержание уровня вводного лабораторного занятия.

Авторы

Профессор кафедры Радиоэлектроника Сукиязов А.Г.,

Студенты гр. СИТ-41

Терновской Л.А., Докай А.Б.





Оглавление

ВВЕДЕНИЕ.....	4
Таблица 1 Определение состава варианта	6
Блоки задач заданий контрольной работы.....	7
Блок 1: Электропроводность металлов и сплавов.....	7
Блок 2: температурная зависимость электропроводности металлов	7
Блок 3: Температурный коэффициент сопротивления металлов	8
Блок 4: Соединение сопротивлений	9
Блок 5: Электропроводность полупроводников	10
Блок 6: Полупроводниковые приборы	10
Блок 7: Контактные явления и термоэдс	11
Блок 8: Поляризация диэлектриков	12
Блок 9: Пробой диэлектриков	13
Указания к решению задач контрольной работы	14
Блок 1.....	14
Блок 2 (см. блок 1).....	18
Блок 3 (см. блок 1).....	18
Блок 4.....	18
Блок 5.....	19
Блок 6.....	22
Блок 7.....	24
Блок 8.....	26
Блок 9.....	27
Список литературы	29

ВВЕДЕНИЕ

Одним из видов занятий по курсу «Радиотехнические материалы и радиокомпоненты» для заочной формы обучения является выполнение контрольной работы. Предлагаемые в пособии задачи по основному материалу курса соответствуют программе государственного образовательного стандарта по направлению 11.03.01 «Радиотехника». При изучении курса студенты приобретают необходимые знания студентов в области современных радиокомпонентов, а также в области основных материалов, используемых при их изготовлении; основных методах расчета и физических процессах, с которыми приходится встречаться в электронике. В учебном плане дисциплины не предусмотрены практические занятия по решению задач на тему радиотехнические материалы. Поэтому задачи в контрольной работе выбраны предельно простыми. Если студент изучил теоретический материал по теории, то решить задачу не представляет сложности.

Целью контрольных работ является окончательная проверка усвоения студентами соответствующих разделов курса. Приступать к решению очередной задачи следует после изучения необходимого материала и решения достаточного количества задач из рекомендуемой литературы. При оформлении каждой задачи следует приводить графическое изложение содержания задачи с необходимым пояснением. Словами необходимо указать какие законы используются при решении задачи и пояснить исходную схему с принятыми буквенными обозначениями числами заданных величин. Все рисунки, схемы и графики должны быть выполнены аккуратно в масштабе. Графики желательно чертить на миллиметровой бумаге с помощью чертежных инструментов. **(Кривые рисунки от руки недопускаются!)** На осях координат должны быть указаны откладываемые ве-

личины и единицы их измерений. При оформлении контрольной работы нужно привести все необходимые расчетные формулы с их названием и пояснением. Искомая величина должна быть в общем виде выражена через заданные величины. Как правило, следует пользоваться единицами системы СИ. Исключением может быть только внесистемная единица энергии: электрон-вольт (эВ). Конечный результат должен быть выделен из общего текста как ответ в полной форме, например, «Температура накала лампы $t^{\circ} \approx 1200^{\circ} \text{C}$ ».

Решение задач не следует перегружать приведением всех алгебраических преобразований. Каждый этап решения должен иметь пояснение. Результаты вычислений рекомендуется записывать с точностью до третьей значащей цифры. Вывод формул и уравнений, имеющих в литературе, приводить в тексте контрольных работ не следует. На титульном листе контрольной работы должно быть указано наименование института и факультета, фамилия, инициалы и шифр студента. В конце работы необходимо привести список использованной литературы, поставить дату окончания работы и свою подпись.

Задание контрольной работы содержит 25 вариантов. В каждом варианте содержится 9 задач. Вариант определяется двумя последними цифрами шифра (номера зачетной книжки). Если две последние цифры шифра более 25, то для определения номера варианта необходимо вычесть 25. Если предпоследняя цифра шифра нуль, то студент выполняет вариант, определяемый последней цифрой своего шифра.

Проверенная преподавателем контрольная работа подлежит защите в установленные деканатом сроки.

Конкретный набор задач в данном варианте определяется с помощью таблицы 1.

Таблица 1 Определение состава варианта

Вариант	Блок 1	Блок 2	Блок 3	Блок 4	Блок 5	Блок 6	Блок 7	Блок 8	Блок 9
1	1	2	3	4	1	2	3	4	1
2	2	3	4	1	2	3	4	1	2
3	3	4	1	2	3	4	1	2	3
4	4	1	2	3	4	1	2	3	4
5	1	1	2	2	3	3	4	4	1
6	2	2	3	3	4	4	1	1	2
7	3	3	4	4	1	1	2	2	3
8	4	4	1	1	2	2	3	3	4
9	1	1	1	2	2	2	3	3	3
10	4	4	4	1	1	1	2	2	2
11	1	3	2	4	3	1	4	1	1
12	2	4	3	1	1	2	3	2	2
13	3	1	4	2	4	3	2	3	3
14	4	2	1	3	2	4	1	4	4
15	1	3	2	4	3	1	2	1	1
16	2	4	3	1	4	2	3	2	2
17	3	1	4	2	1	3	4	3	3
18	4	2	1	3	2	1	3	4	4
19	1	3	2	4	3	2	4	1	2
20	2	4	3	1	4	3	1	2	3
21	3	3	4	2	3	4	2	3	4
22	4	2	1	3	1	3	1	4	1
23	1	3	2	4	2	2	2	2	2
24	2	4	3	3	3	4	3	3	3
25	3	2	4	1	4	1	4	4	4

Тексты задач скомпонованы в блоки по четыре задачи.

БЛОКИ ЗАДАЧ ЗАДАНИЙ КОНТРОЛЬНОЙ РАБОТЫ

Блок 1: Электропроводность металлов и сплавов

- 1 В медном проводнике под действием электрического поля проходит электрический ток плотностью 1 А/мм^2 . Определить скорость дрейфа электронов и отношения ее к средней суммарной скорости электронов при 300 К . $n_0 = 8,5 \cdot 10^{28} \frac{1}{\text{м}^3}$.
- 2 При включении в электрическую цепь проводника диаметром $0,5 \text{ мм}$ и длиной 43 мм разность потенциалов на концах проводника составила $2,4 \text{ В}$ при токе 2 А . Определить удельное сопротивление материала проводника.
- 3 В металлическом проводнике площадью поперечного сечения 10^{-2} мм^2 и сопротивлением 10 Ом концентрация свободных электронов равна $8,5 \cdot 10^{28} \text{ 1/м}^3$ Определить среднюю скорость дрейфа электронов при напряжении $0,1 \text{ В}$.
- 4 К медной проволоке длиной 6 метров и диаметром $0,56 \text{ мм}$ приложено напряжение $0,1 \text{ В}$. Сколько электронов пройдет через поперечное сечение проводника за 10 с , если удельное сопротивление меди равно $0,017 \text{ мкОм}\cdot\text{м}$?

Блок 2: температурная зависимость электропроводности металлов

- 1 Удельное сопротивление чистой меди при 20 и 100°С равно соответственно $0,0168$ и $0,0226 \text{ мкОм}\cdot\text{м}$. Пользуясь линейной ап-проксимацией зависимо-

сти $\rho(t)$ определить температурный коэффициент удельного сопротивления при 0°C .

2 200 витков медного провода диаметром 0,1 мм намотаны на цилиндрический каркас диаметром 20 мм. Во сколько раз изменится сопротивление катушки при ее охлаждении до 10°C ?

3 После протягивания проволоки через волочильный станок длина ее увеличилась в 4 раза. Каким стало сопротивление этой проволоки, если до обработки ее сопротивление $R = 20 \text{ Ом}$?

4 При температуре 20 градусов Цельсия сопротивление обмотки электродвигателя, выполненной из медной проволоки, равно 0,15 Ом. В процессе работы сопротивление обмотки увеличилось до 0,17 Ом. Определить до какой температуры нагрелась обмотка, если температурный коэффициент сопротивления равен $0,0043 \text{ 1/K}$.

Блок 3: Температурный коэффициент сопротивления металлов

1 Из никелевой пластины шириной 1 см и толщиной 1 мм необходимо изготовить шунт сопротивлением 0,4 Ом. Какой длины должна быть никелевая лента, если удельное сопротивление никеля $0,068 \text{ мкОм}\cdot\text{м}$?

2 В цепь включены последовательно медная и нихромовая проволоки равной длины и диаметра. Найти отношение количества теплоты, выделяющихся в этих проводниках и отношение падений напряжения на проводах. Удельное сопротивление меди и нихрома равно соответственно 0,017 и $1 \text{ мкОм}\cdot\text{м}$.

3 Сопротивление провода из константана при

20°C равно 500 Ом. Определить сопротивление этого провода при 450°C, если температурный коэффициент сопротивления константана равен $(-15 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1})$.

4 Сопротивление вольфрамовой нити электрической лампочки при 20 °С равно 35 Ом. Определить температуру нити лампочки, если известно, что при включении в сеть напряжением 220 В в установившемся режиме по нити проходит ток 0,6 А. Температурный коэффициент удельного сопротивления вольфрама можно принять равным $5 \cdot 10^{-3} \text{ K}^{-1}$.

Блок 4: Соединение сопротивлений

Рассчитать величину сопротивления батареи резисторов, изображенных на схеме:

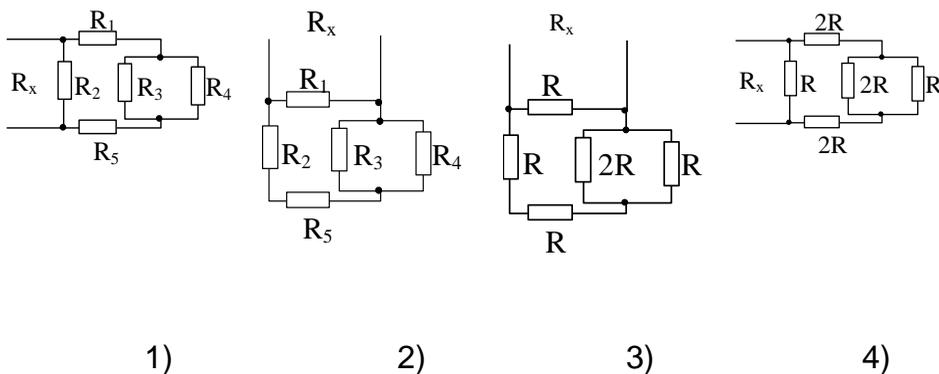


Рисунок 1. Варианты схем

Для всех вариантов батарея сопротивлений подключена к генератору напряжения 10 В. Найти, величину силы тока в каждом сопротивлении.

Блок 5: Электропроводность полупроводников

1 Оценить тепловую и дрейфовую скорости электронов при 300 К в германии n-типа с концентрацией доноров $N_d=10^{22} \text{ м}^{-3}$, если плотность тока через образец $j=10^4 \text{ А/м}^2$, а эффективная масса электронов проводимости $m_n=0,12 m_0$. ($m_0 = 8.31 \cdot 10^{-31} \text{ кг}$)

2 Определить, во сколько раз дрейфовая скорость электронов в германии n-типа с $N_d=10^{22} \text{ м}^{-3}$ отличается от дрейфовой скорости электронов в меди при пропускании через них электрического тока одинаковой плотности тока. Объясните причину различия скоростей.

3 Определить удельное сопротивление полупроводника n-типа, если концентрация электронов проводимости в нем равна 10^{22} м^{-3} , а их подвижность $\mu_n=0,5 \text{ м}^2/(\text{В}\cdot\text{с})$.

4 Определите собственную удельную проводимость германия (при комнатной температуре), используя значение концентрации и подвижностей носителей заряда из условий предыдущей задачи.

Блок 6: Полупроводниковые приборы

1 Рассчитать токи через кремниевый *p-n* переход при температурах 20 и 50° С и при напряжении 0,55 В. Принять, что тепловой ток при температуре 25° С равен 10^{-10} А .

2 Рассчитать напряжения на кремниевом *p-n* переходе при температурах 25 и 75° С и при токе 10 мА. Принять, что тепловой ток при температуре 25° С со-

ставляет 10^{-12} А.

3 Рассчитать дифференциальные сопротивления кремниевого $p-n$ перехода при температурах 0 и 50°C и при нулевом приложенном напряжении. Принять, что тепловой ток при температуре 25°C составляет 10^{-11} А.

4 Рассчитать дифференциальные сопротивления $p-n$ перехода при температурах 10 и 60°C и при токе через переход в прямом направлении 10 мА. Принять тепловой ток равным 10^{-12} А. Приложенное напряжение равно нулю.

Блок 7: Контактные явления и термоэдс

1 Определить внутреннюю контактную разность потенциалов, возникающую при соприкосновении при комнатной температуре двух металлов с концентрацией свободных электронов $n_1=5\cdot 10^{28}\text{ м}^{-3}$ и $n_2=1\cdot 10^{29}\text{ м}^{-3}$.

2 Ток в цепи, состоящей из термопары сопротивлением 5 Ом и гальванометра сопротивлением 8 Ом, равен 0,5 мА в случае, когда спай термопары помещен в сосуд с кипящей водой. Чему равна удельная термо-э.д.с термопары при температуре окружающей среды 20°C ?

3 Оценить значение абсолютной удельной термо-э.д.с. при температуре 300 К для металла с концентрацией свободных электронов $n=6\cdot 10^{28}\text{ м}^{-3}$

4 Один спай термопары помещен в печь с температурой 200°C , другой находится при температуре 20°C . Вольтметр показывает при этом термо-э.д.с. 1,8 мВ. Чему будет равна термо-э.д.с. если второй спай термопары поместить в сосуд: а) с тающим льдом; б) с

кипящей водой? Относительную удельную термоЭДС во всем температурном диапазоне 0-200 °С считать постоянной.

Блок 8: Поляризация диэлектриков

1 Площадь пластин плоского конденсатора $S=0,01\text{ м}^2$, расстояние между ними $d=1$ см. К пластинам приложена разность потенциалов $U=300\text{ В}$. В пространстве между пластинами находится плоскопараллельная пластинка из стекла $d_1=0,5$ см и плоскопараллельная пластинка парафина толщиной $d_2=0,5$ см. . Найти напряженность электрического поля в каждом диэлектрике (Диэлектрические проницаемости считать известными $\varepsilon_1=3$, $\varepsilon_2=2$.)

2 В результате электризации плоского диэлектрика на нем получена поверхностная плотность связанных зарядов 10^{-4} Кл/м². Чему равна поверхностная плотность свободных зарядов на электродах, если диэлектрическая проницаемость диэлектрика равна 7?

3 Площадь пластин плоского конденсатора $S=0,005\text{ м}^2$, расстояние между ними $d=1$ см. К пластинам приложена разность потенциалов $U=500\text{ В}$. В пространстве между пластинами находится плоскопараллельная пластинка из стекла $d_1=0,4$ см и плоскопараллельная пластинка парафина толщиной $d_2=0,6$ см. Найти падение потенциала на каждом слое. (Диэлектрические проницаемости считать известными $\varepsilon_1=3$, $\varepsilon_2=2$).

4 Расстояние между пластинами плоского конденсатора $d=0,5$ см. и заполнено изолятором с диэлектрической проницаемости $\varepsilon=5$. К пластинам конденсатора приложено напряжение 500 В. Найти,

поверхностную плотность свободного заряда на пластинах и связанного заряда на диэлектрике.

Блок 9: Пробой диэлектриков

1 Пленка поливинилхлорида при электрическом пробое разрушается при напряжении 1,5 кВ. Определить толщину пленки, если ее электрическая прочность равна 50 МВ/м.

2 При каком напряжении может работать слюдяной конденсатор емкостью 1000 пФ с площадью сечения обкладок $6 \cdot 10^{-4}$ м², если он должен иметь четырехкратный запас по электрической прочности. Диэлектрическая проницаемость слюды $\epsilon=7$, ее электрическая прочность 100 МВ/м. Какова толщина слюдяной пластинки.

3 При тепловом пробое в равномерном поле диэлектрик однородной структуры толщиной 2 мм, расположенной между электродами площадью 2 см² пробивается при напряжении 15 кВ. При каком напряжении пробьется тот же диэлектрик, если его расположить между электродами площадью 3 см² ?

4 Известно, что при тепловом пробое диэлектрик толщиной 4 мм пробивается при напряжении 15 кВ на частоте 100 Гц. При каком значении промышленной частоты пробьется такой же диэлектрик толщиной 2мм?

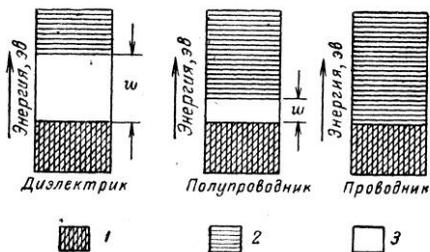
Указания к решению задач контрольной работы

Блок 1

Металлы являются твердыми проводниками, в которых носителями заряда являются свободные электроны. Металлические материалы могут быть разделены на материалы высокой проводимости и материалы высокого сопротивления.

Металлические проводники являются основным типом проводниковых материалов, применяемых в электротехнике и радиоэлектронике. Процесс электропроводности связан с изменением энергии электронов под действием электрического поля (разгон).

Наиболее строгой теорией электропроводности твердых тел (металлов, диэлектриков и полупроводников) является зонная теория, основывающаяся на законах квантовой механики. Слово «зона» относится к интервалу разрешенных квантовой механикой значению энергии электрона. При нуле Кельвин все электроны кристалла находятся валентной зоне, которая является полностью заполненной. Эти электроны не могут разгоняться электрическим полем, т.к. нет разрешенных энергетических состояний. Электроны могли бы свободно разгоняться в другой разрешенной зоне, которая называется «свободной» или «зоной



Энергетическое отличие металлических проводников от полупроводников и диэлектриков с точки зрения зонной теории твердого тела.
 1 — заполненная электронами зона; 2 — зона свободных энергетических уровней; 3 — запрещенная зона (w).

Рисунок 2

проводимости». В общем случае валентная зона и зона проводимости разделены достаточно большим интервалом энергии, которую преодолеть за счет электрического поля электроны не могут.

У металлических проводников полностью свободная валентная зона прилегает или даже перекрывается свободной зоной. Благодаря этому электроны в металле могут свободно переходить с уровней валентной зоны в зону проводимости даже под действием слабого электрического поля. На рисунке 2 показано расположение энергетических зон в диэлектрике, полупроводнике и металле (в задачах блока 5 можно воспользоваться этой схемой).

К основным характеристикам проводниковых материалов относятся:

- 1) удельная электропроводность или обратная ей величина – удельное электросопротивление;
- 2) температурный коэффициент удельного сопротивления (ТКС);
- 3) коэффициент теплопроводности;
- 4) контактная разность потенциалов и термоэлектродвижущая сила (термо-э.д.с.);
- 5) Предел прочности при растяжении и относительное удлинение при разрыве.

В таблице 2 приведены усредненные физические характеристики основных металлов.

Таблица 2

ОСНОВНЫЕ ФОРМУЛЫ И СООТНОШЕНИЯ.

• Величина тока в проводнике

$$I = n_0 S e v_{cp}, \quad (1)$$

где n_0 - концентрация электронов; v_{cp} - средняя скорость направленного движения электронов под

действием электрического поля E ; S поперечное сечение проводника, e - заряд электрона.

- Плотность тока j

$$j = \frac{I}{S}, \quad (2)$$

- Подвижность электронов μ

$$\mu = \frac{v}{E}; \text{ или } v = \mu E. \quad (3)$$

- Закон Ома

- ◆ Закон Ома в дифференциальной форме

$j = \gamma \cdot E$, где γ - удельная проводимость.

- ◆ Закон Ома в интегральной форме

$I = \frac{U}{R}$, где U - падение напряжения между

концами проводника, R сопротивление проводника;

- ◆ $R = \rho \frac{l}{S}$ или $R = \frac{l}{\gamma S}$, где l - длина про-

Главнейшие усредненные физические характеристики основных электротехнических металлов при 20° С

Металл	Плотность ρ , г/см ³	Температура плавления $t_{пл}$, °С	Удельная теплоемкость c , кал/г·град	Коэффициент теплопроводности λ , кал/см·сек·град	Температурный коэффициент линейного расширения $\alpha_t \cdot 10^6$, град ⁻¹	Твердость по Бринеллю H_B , кг/мм ²	Удельное электросопротивление ρ , ом·мм ² /м	Температурный коэффициент удельного электросопротивления α_p , град ⁻¹	Работа выхода электронов, эВ
Медь	8,9	1083	0,092	0,93	16,5	35 ± 38	0,0172	0,0043	4,35
Алюминий . .	2,7	657	0,220	0,5	24	25	0,028	0,0042	4,30
Железо . . .	7,8	1535	0,108	0,16	11	65	0,098	0,006	4,5
Никель . . .	8,9	1455	0,106	0,18	13	73	0,073	0,0065	5
Платина . . .	21,4	1770	0,032	0,17	9	50	0,105	0,0039	6
Золото . . .	19,3	1063	0,030	0,7	14,2	18,5	0,024	0,0038	4,8
Серебро . . .	10,5	961	0,056	0,99	19,3	25	0,016	0,004	4,45
Вольфрам . .	19,3	3380	0,033	0,4	4,4	350	0,055	0,0046	4,5
Молибден . .	10,2	2620	0,063	0,36	5,1	160	0,057	0,0046	4,2
Олово	7,3	232	0,054	0,155	23	5	0,12	0,0044	4,4
Свинец . . .	11,4	327	0,031	0,083	29	4	0,21	0,0037	—
Цинк	7,1	420	0,093	0,265	31	33	0,059	0,004	4,4
Кадмий . . .	8,65	321	0,055	0,222	30	20	0,076	0,0042	—
Ртуть	13,6	—39	0,033	0,024	61	—	0,958	0,0009	4,5
Индий	7,3	157	0,058	0,06	24,8	—	0,09	0,0047	—
Висмут . . .	9,8	271	0,03	0,019	13,4	—	1,16	0,0042	—
Тантал . . .	16,6	2977	0,034	0,13	6,5	—	0,135	0,0038	—

водника.

(4)

Ток через металлический проводник зависит от температуры, так как нагревание приводит к увеличению удельного сопротивления. Для металлов концентрация электронов не зависит от температуры. Нагревание сопровождается возрастанием рассеяния электронов на дефектах (в том числе на тепловых колебаниях атомов).

В узких диапазонах температуры допустима прямолинейная аппроксимация зависимости. ρ_t Температура измеряется в °С. Общепринята следующая формула

$$\rho_t = \rho_0(1 + \alpha \cdot t), \quad (5)$$

где ρ_0 - значение удельного сопротивления при нуле градусов Цельсия, α - ТКС.

Значения α для чистых металлов равны друг другу (см. табл.2), и, поэтому, приближенно можно

считать $\alpha \approx \frac{1}{273} \approx 0,004 \text{ град}^{-1}$.

Пример решения задачи:

Условие: Определить среднюю скорость дрейфа электродов при напряжении 0,5 В в некотором металлическом проводнике площадью поперечного сечения $3 \cdot 10^{-2} \text{ мм}^2$ и сопротивлением 10 Ом, если концентрация свободных электронов равна $8,5 \cdot 10^{28} \text{ 1/м}^3$

Решение

$$\begin{array}{l}
 U = 0,5 \text{ В,} \\
 S = 3 \cdot 10^{-2} \\
 \text{мм}^2 = 3 \cdot 10^{-8} \text{ м}^2 \\
 R = 10 \text{ Ом,} \\
 n_0 = 8,5 \cdot 10^{28} \text{ 1/м}^3 \\
 \hline
 v_{\text{cp}} \text{ - ?} \\
 v_{\text{cp}}
 \end{array}$$

Известно, что сила тока в проводнике находится по формуле $I = n_0 S e v_{\text{cp}}$, где n_0 - концентрация электронов; v_{cp} - средняя скорость направленного дви-

жения электронов под действием электрического поля E ; S поперечное сечение проводника.

Откуда находим

$$v_{cp} = \frac{I}{n_0 S e}, \text{ где } e = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ Кл} - \text{ заряд электрона}$$

Сила тока I найдется из закона Ома $I = \frac{U}{R}$.

Окончательно ответ примет вид:

$$v_{cp} = \frac{U}{n_0 S e R}$$

Расчет:

$$v_{cp} = \frac{0,5}{8,5 \cdot 10^{28} \cdot 3 \cdot 10^{-8} \cdot 1,610^{-19} \cdot 10} \approx 0,012 \text{ (м/с)}$$

Ответ: Средняя скорость дрейфа электронов

равна $v_{cp} = \frac{U}{n_0 S e R} \approx 0,012 \text{ м/с}$

Блок 2 (см. блок 1)

Блок 3 (см. блок 1)

Блок 4

При необходимости отдельные сопротивления соединяются в батареи: последовательное, параллельное и смешанное.

Для последовательного соединения общее сопротивление всегда больше наибольшего:

$$R = R_1 + R_2 + R_3 + R_4 + \dots \quad (6)$$

Для параллельного соединения складываются

проводимости (величины обратные сопротивлению):

$$\frac{1}{R} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3} + \dots \quad (7)$$

Величина результирующего сопротивления выражается математически:

$$R = \frac{1}{\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3} + \dots} \quad (8)$$

В случае смешенного соединения схему разделяют на группы последовательно и параллельного соединений. Затем по очереди находят сопротивление групп. Операцию повторяют, пока не будет найдено окончательное сопротивление.

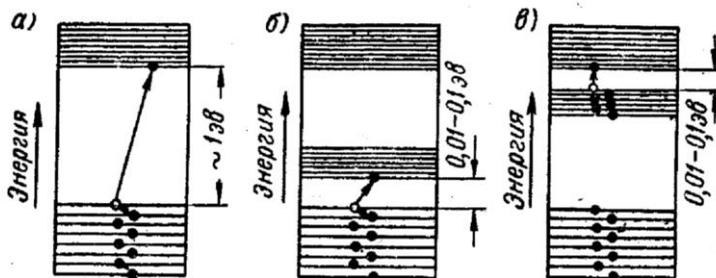
Блок 5

Электрические свойства полупроводников значительно богаче, чем у металлов благодаря наличию двух типов носителей заряда (электроны и дырки) и зависимости их концентрации от температуры. При пояснении решения задачи, необходимо использовать диаграммы зонной теории (см. методические указания блока 1). Зонная диаграмма полупроводников содержит запрещенную зону. Для наиболее используемых полупроводников она составляет величину $1 \div 2$ эВ. При отсутствии в полупроводнике свободных электронов ($T=0$) приложенная к нему разность электрических потенциалов не вызовет тока. Если извне будет подведена энергия, достаточная для перевода электрона через запрещенную зону (рисунок 3 а), то появляется два носителя заряда – электрон в зоне проводимости и дырка в валентной зоне. Полупроводник будет проводить ток. Полупроводники, у которых концентрация электронов равна концентрации дырок, называются

собственными. Обычно собственная проводимость наблюдается у чистых полупроводников без искажения кристаллической решетки и без примесей.

Примеси влияют на энергетическую диаграмму (рисунок 3 б и в). Примеси могут быть двух типов «акцепторы» и «доноры».

Акцепторные примеси создают в полупроводнике дополнительные свободные энергетические



Влияние примесей на энергетическую диаграмму полупроводников.

● — электрон; ○ — дырка; а — основной полупроводник; б — полупроводник с акцепторной примесью типа р. Электропроводность — дырочная; в — полупроводник с донорной примесью типа л. Электропроводность — электронная.

Рисунок 3

уровни, на которые могут переходить электроны из валентной зоны. При этом в полупроводнике появляются дырки (р-тип проводимости), а электронов нет. Такой полупроводник обладает проводимостью р-типа. Дырки в нем называются основными носителями заряда, а электроны — неосновными.

Донорные примеси поставляют в свободную зону электроны. Дырок при этом не возникает. Такой полупроводник обладает проводимостью n-типа. Электроны в нем называются основными носителями заряда, а дырки — неосновными.

Энергия, необходимая для возникновения электронной (или дырочной) проводимости называется

ся энергией активации.

Скорость, которую приобретают носители заряда во внешнем электрическом поле, называется дрейфовой. Она находится как и для металлов (см. блок 1). Различие будет только в концентрации.

Температурная зависимость проводимости полупроводников гораздо сильнее, чем у металлов и имеет другой знак. При нагревании сопротивление полупроводника уменьшается. С точки зрения физики это обусловлено тем, что при нагревании увеличивается концентрация носителей заряда.

При решении задач Блока 5 можно воспользоваться формулами:

- зависимость удельного сопротивления ρ от температуры T (здесь температура в градусах Кельвина ($T = 273 + t^\circ$))

$$\rho = Ae^{\frac{W_g}{2kT}} \quad (9)$$

Эта формула соответствует собственной проводимости полупроводников, когда концентрация дырок равна концентрации электронов, а дефекты кристаллической решетки отсутствуют. Здесь W_g ширина запрещенной зоны (измеряется в электрон-вольтах (эВ)), k – постоянная Больцмана $k = 1.38 \cdot 10^{-23}$ Дж/К = $8,62 \cdot 10^{-5}$ эВ/К

- зависимость удельной проводимости σ от температуры

$$\sigma = Ae^{-\frac{W_g}{2kT}}, \quad (10)$$

- в случае примесной проводимости для основных носителей можно воспользоваться следующей формулой

$$\rho = Ae^{kT}, \quad \sigma = Ae^{-\frac{w}{kT}}, \quad (11)$$

где W - соответствующая энергия активации примеси (эВ)

Блок 6

Наличие двух типов носителей заряда и высокая зависимость электропроводности полупроводника от внешних факторов, позволяет на их основе создавать полупроводниковые приборы, выполняющие определенные функции в электронных схемах.

Наиболее простым прибором является полупроводниковый диод, представляющий собой контакт двух областей кристалла с различным типом проводимости. Часто такой контакт называют р-п-переходом. Конструкция р-п-перехода показана на рисунке 4а. Физические моменты образования и его работы здесь рассматривать не будем.

Отличительной чертой р-п-перехода является зависимость его сопротивления от полярности приложенного напряжения. Если к р-области приложен (+), а к п-области – (-), ток электрический создается основными носителями в каждой области, т.е. будет большим. Противоположная полярность допускает в образовании тока только неосновные носители в каждой области, их мало и ток будет небольшим. Ток основных носителей называется прямым, а ток неосновных носителей – обратным.

Зависимость тока через р-п-переход от приложенного напряжения называется вольт-амперной характеристикой. Ее вид в обобщенном виде с основными параметрами представлен на рисунке 4б.

Вольт-амперная характеристика (ВАХ) р-п-перехода описывается уравнением

$$I = I_0 \left(\exp \frac{eU}{kT} - 1 \right), \quad (12)$$

где e – заряд электрона; k – постоянная Больцмана; U – приложенное напряжение; T – абсолютная температура; I_0 – тепловой ток.

Тепловой ток зависит от температуры и определяется свойствами полупроводникового материала, из которого изготовлен p - n переход:

$$I_0 = S \left(\frac{eD_p p_{n0}}{L_p} + \frac{eD_n n_{p0}}{L_n} \right), \quad (13)$$

где S – площадь перехода; $D_{p,n}$ – коэффициенты диффузии неосновных носителей заряда – соответственно дырок в n -области перехода и электронов в p -области перехода; p_{n0} и n_{p0} – концентрации неосновных носителей заряда; $L_{p,n}$ – диффузионные длины неосновных носителей заряда.

Диффузионная длина и коэффициент диффузии связаны соотношением:

$$L_{p,n} = \sqrt{D_{p,n} \tau_{p,n}}, \quad (14)$$

где $\tau_{p,n}$ – время жизни соответственно дырок и

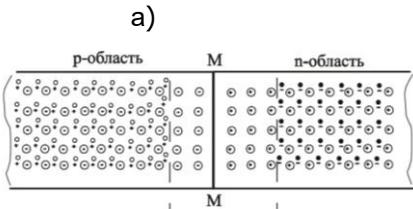
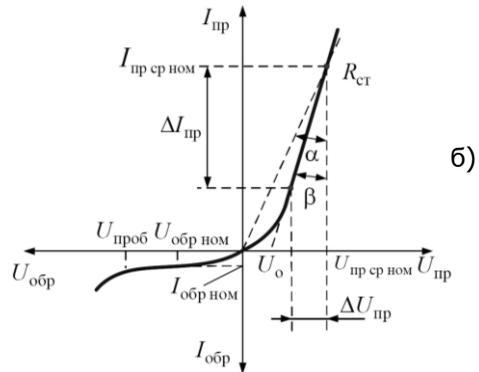


Рисунок 4



электронов.

Согласно соотношению Эйнштейна, коэффициенты диффузии связаны с подвижностью носителей заряда

$$D_{p,n} = \frac{kT}{e} \mu_{p,n}, \quad (15)$$

где $\mu_{p,n}$ – подвижность дырок и электронов соответственно.

Величина n_i является одной из важнейших характеристик полупроводникового материала, она определяет концентрацию свободных носителей заряда (электронов и дырок) в собственном (беспримесном) полупроводнике. Обычно значения n_i приводятся в справочных данных для полупроводниковых материалов (как правило, при $T=300$ К).

Блок 7

При соприкосновении различных металлов между ними возникает разность потенциалов. Причина контактной разности потенциалов заключаются в различных значениях работы выхода электронов из металлов (см. таблицу 2), а также в том, что число свободных электронов, а следовательно и давление электронного газа у разных металлов и сплавов могут быть неодинаковым.

Если рассмотреть контакт двух различных металлов А и В (рисунок 5), то можно что возникают две разности потенциалов:

- первая U_1 возникает на границе контакта и связана с различием концентраций носителей заряда. Она называется внутренней.

- вторая U_2 возникает в пространстве вокруг контактирующих металлов и определяется работами выхода металлов. Она называется внешней.

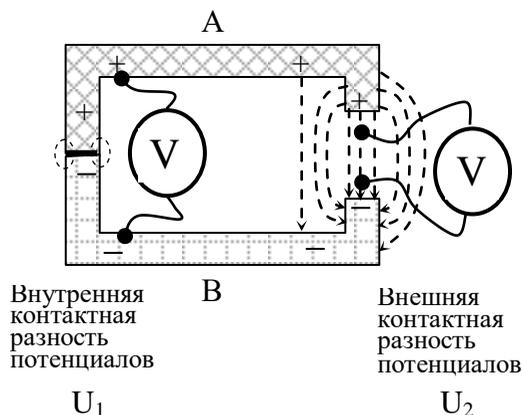


Рисунок 5 – Возникновение внутренней и внешней разности потенциалов

Основные формулы

Внутренняя контактная разность потенциалов:

$$U_1 = \frac{kT}{e} \ln\left(\frac{n_{0A}}{n_{0B}}\right), \quad (16)$$

где $\frac{n_{0A}}{n_{0B}}$ - отношение концентрации свободных

носителей в контактирующих металлах; k – постоянная Больцмана $k = 8,62 \cdot 10^{-5}$ эВ/К; T – температура контакта в Кельвинах; e – заряд электрона (если постоянная Больцмана выражается в эВ/К, то заряд электрона принимается равным 1).

Внешняя контактная разность потенциалов:

$$U_2 = \frac{A_2 - A_1}{e}, \quad (17)$$

где A_1 и A_2 работы выхода контактирующих металлов; e – заряд электрона (если работа выхода выражается в эВ, то заряд электрона принимается равным 1).

Термо-э.д.с.

$$E = \alpha(T_2 - T_1), \quad (18)$$

где α - коэффициент термо-э.д.с.

Блок 8

Диэлектрики это материалы, которые не проводят электрический ток. Это означает, что в них отсутствуют свободные заряды, но заряды, из которых состоят атомы, остаются. Заряды, привязанные к атомам и не имеющие возможность отделиться от них, называются связанными.

Если диэлектрик поместить в электрическое поле, то заряды в диэлектрике под действием этого поля смещаются так, что на противоположных торцах диэлектрика появляются связанные поляризационные заряды противоположного знака (полюса). Этот процесс называется поляризацией. Поляризационные заряды возникают благодаря смещению связанных зарядов в пределах размера атомом (или молекул).

Свободные заряды при поляризации диэлектриков располагаются на металлических электродах, создающих электрическое поле.

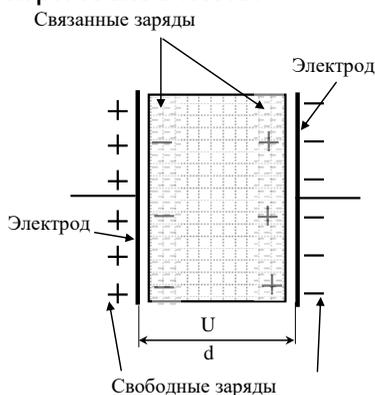


Рисунок 6– Поляризация диэлектрика

Как видно из рисунка 6 наличие свободных и связанных зарядов одновременно уменьшает

напряженность электрического поля между электродами за счет поляризации.

Величина, характеризующая кратность уменьшения электрического поля в диэлектрике называется диэлектрической проницаемостью ε .

Обычно поляризационные заряды характеризуются поверхностной плотностью (Кл/м²):

Поверхностная плотность связанных зарядов

$$\sigma_{\text{связ}} = \frac{Q_{\text{связ}}}{S} = (\varepsilon - 1)\varepsilon_0 E \quad (19)$$

Поверхностная плотность свободных зарядов

$$\sigma_{\text{своб}} = \frac{Q_{\text{своб}}}{S} = \varepsilon\varepsilon_0 E \quad (20)$$

где $\sigma = \frac{Q}{S}$ - поверхностная плотность заряда;

S – площадь электродов;

ε_0 - электрическая постоянная;

$\varepsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12}$ Ф/м;

$E = \frac{U}{d}$ - напряженность электрического поля между электродами.

Блок 9

Каждый диэлектрик, помещенный в электрическое поле, теряет свойства изоляционного материала, если напряженность поля превысит некоторое критическое значение. Это явление носит название пробоя диэлектриков, или нарушения его электрической прочности.

Значение напряжения, при котором происходит пробой диэлектрика, называется пробивным напряжением, а соответствующее значение напряженности поля – пробивной напряженностью.

Пробивное напряжение обозначается $U_{\text{пр}}$ и измеряется чаще всего в кВ. Пробивная напряженность определяется величиной пробивного напряжения, отнесенного к толщине диэлектрика в точке пробоя:

$$E_{\text{пр}} = \frac{U_{\text{пр}}}{h}, \quad (21)$$

где h – толщина диэлектрика, см или мм.

Соответственно пробивная напряженность выражается в кВ/см или кВ/мм.

Пробой твердых тел может вызываться как электрическими, так и тепловыми процессами, возникающими под действием поля и приводящие к внезапному резкому местному возрастанию плотности электрического тока к моменту пробоя.

Тепловой пробой является следствием уменьшения активного сопротивления диэлектрика под влиянием нагрева в электрическом поле и возникает в том случае, когда количества тепла, выделяющегося в диэлектрике за счет диэлектрических потерь, превышает количество тепла, которое может рассеиваться в данных условиях.

Диэлектрические потери зависят от частоты ω переменного поля и характеризуются $tg\delta$. Тепловой пробой резко развивается при достижении локальной температуры критического значения $t_{\text{кр}}$.

Для теплового пробоя расчеты проводятся по следующим формулам.

Допустимое рабочее напряжение

$$U_{\text{раб}} = \sqrt{\frac{\sigma S (t_1 - t_0)}{\omega C \cdot tg\delta_1}} \quad (22)$$

где $tg\delta_1$ соответствует $tg\delta$ при $t_{\text{раб}} = t_1$.

Пробивное напряжение

$$U_{\text{пр}} = \sqrt{\frac{\sigma S (t_2 - t_0)}{\omega C \cdot \text{tg} \delta_2}} \quad (23)$$

где $\text{tg} \delta_2$ соответствует $\text{tg} \delta$ при критической температуре $t_{\text{кр}} = t_2$.

В этих формулах принято обозначение:

U – напряжение, в;

C – емкость изолятора, Ф;

σ – коэффициент теплоотдачи, $\text{Вт}/\text{см}^2 \cdot \text{град}$;

S – поверхность изолятора, см^2 ;

t_0 и $t_{\text{раб}}$ – температуры окружающей среды и поверхности изолятора.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1.- Перельман Б.Л. Полупроводниковые приборы: Справочник. –М.: «Солон», «МИКРОТЕХ», 1996. – 176 с.

2. Антипов Б.Л., Сорокин В.С., Терехов В.А. Материалы электронной техники. Задачи и вопросы. – М.: Высш. шк., 1990. – 208 с.