

Министерство образования и науки Российской Федерации

ТОМСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ И РАДИОЭЛЕКТРОНИКИ (ТУСУР)

Н. С. Легостаев, К. В. Четвергов

ТВЕРДОТЕЛЬНАЯ ЭЛЕКТРОНИКА

Методические указания по изучению дисциплины

Томск
«Эль Контент»
2012

УДК 621.382:539.2(075.8)

ББК 32.852я73

Л387

Рецензенты:

Смирнов С. В., докт. техн. наук, проф. кафедры физической электроники ТУСУРа;

Михальченко Г. Я., докт. техн. наук, проф., директор ООО «Компания промышленная электроника».

Легостаев Н. С.

Л387 Твердотельная электроника : методические указания по изучению дисциплины / Н. С. Легостаев, К. В. Четвергов. — Томск: Эль Контент, 2012. — 52 с.

ISBN 978-5-4332-0030-2

Представлены рекомендации по самостоятельному изучению теоретического материала, выполнению контрольных и лабораторных работ.

Для студентов, обучающихся по направлению 210100 «Электроника и нанoeлектроника» с профилем «Промышленная электроника» с использованием дистанционных образовательных технологий.

УДК 621.382:539.2(075.8)

ББК 32.852я73

ISBN 978-5-4332-0030-2

© Легостаев Н. С.,
Четвергов К. В., 2012

© Оформление.
ООО «Эль Контент», 2012

ОГЛАВЛЕНИЕ

Введение	4
1 Методические указания по изучению теоретического материала	5
1.1 Физические основы твердотельной электроники	5
1.2 Контактные явления	5
1.3 Полупроводниковые диоды	6
1.4 Биполярные транзисторы	6
1.5 Тиристоры	6
1.6 Полевые транзисторы	7
1.7 Оптоэлектронные полупроводниковые приборы	7
1.8 Полупроводниковые термоэлектрические и гальваномагнитные приборы	7
2 Методические указания по выполнению контрольных работ	8
2.1 Общие указания по решению задач	8
2.2 Примеры выполнения типовых заданий компьютерной контрольной работы	9
2.3 Примеры выполнения типовых заданий текстовой контрольной работы	32
3 Методические указания по выполнению лабораторных работ	39
Литература	40
Приложение А	41

ВВЕДЕНИЕ

Предметом дисциплины «Твердотельная электроника» являются твердотельные полупроводниковые приборы, а также физические процессы, определяющие их принцип действия.

Курс «Твердотельная электроника» является элементом модуля «Физические основы электроники», который входит в базовую часть профессионального цикла дисциплин образовательной программы подготовки бакалавров по направлению «Электроника и нанoeлектроника».

В результате изучения дисциплины студент должен

знать: физические основы твердотельной электроники; принцип действия, характеристики, параметры, математические модели полупроводниковых диодов, биполярных и полевых транзисторов, тиристоров, оптоэлектронных, термоэлектрических и гальваномагнитных полупроводниковых приборов;

уметь: рассчитывать основные параметры и характеристики, проводить экспериментальные исследования полупроводниковых приборов; выбирать полупроводниковые приборы различного функционального назначения с учетом технико-экономических показателей, допустимых нагрузок, влияния внешних факторов;

владеть: методами математического моделирования, методиками проведения эксперимента по исследованию характеристик полупроводниковых приборов; информацией о перспективах развития твердотельной электроники.

Дисциплина является предшествующей для следующих дисциплин профессионального цикла: «Квантовая и оптическая электроника», «Аналоговая электроника», «Схемотехника ключевых устройств», «Методы анализа и расчета электронных схем», «Схемотехника», «Основы проектирования электронной компонентной базы», «Основы преобразовательной техники», «Энергетическая электроника».

Соглашения, принятые в книге

Для улучшения восприятия материала в данной книге используются пиктограммы и специальное выделение важной информации.



.....
Эта пиктограмма означает внимание. Здесь выделена важная информация, требующая акцента на ней. Автор здесь может поделиться с читателем опытом, чтобы помочь избежать некоторых ошибок.
.....

Глава 1

МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ ПО ИЗУЧЕНИЮ ТЕОРЕТИЧЕСКОГО МАТЕРИАЛА

1.1 Физические основы твердотельной электроники

Необходимо знать механизм образования зонной структуры полупроводниковых материалов, особенности зонных диаграмм примесных полупроводников, отличие вырожденных полупроводников от невырожденных полупроводников. Необходимо четко представлять, что такое равновесная, неравновесная и избыточная концентрация носителей заряда, знать закон действующих масс и уметь его использовать для определения равновесных концентраций носителей заряда. Необходимо знать природу электропроводности полупроводников, выражения для дрейфовых и диффузионных составляющих токов в полупроводнике, физическую сущность и границы применения уравнений непрерывности, уравнений диффузии и уравнений заряда. Необходимо уяснить эффект поля, знать сущность дебаевской длины экранирования, иметь четкие представления о влиянии на свойства полупроводников поверхностных состояний.

1.2 Контактные явления

Физические процессы в электрических переходах определяют принцип действия большинства полупроводниковых приборов. Именно поэтому необходимо знать типы электрических переходов и их конструктивно-технологические различия, влияние электрофизических и конструктивно-технологических параметров на электрические свойства переходов. Важно уметь объяснять свойства переходов с использованием энергетических диаграмм, знать вольтамперные характеристики и уметь определять электрические параметры переходов. Необходимо знать ви-

ды и механизмы возникновения пробоев электронно-дырочных переходов. Особое внимание следует обратить на динамические свойства переходов. При изучении МДП-структур акцентировать внимание на вольт-фарадных характеристиках.

1.3 Полупроводниковые диоды

Необходимо знать классификацию полупроводниковых диодов по применению в устройствах электронной техники, условные графические обозначения, основные электрические и предельные эксплуатационные параметры. Рекомендуется особое внимание уделить овладению навыками формирования требований к выбору полупроводниковых диодов с учетом техникоэкономических показателей, допустимых нагрузок, влияния внешних факторов.

1.4 Биполярные транзисторы

Следует твердо уяснить принцип действия и режимы работы биполярного транзистора. Настоятельно рекомендуется усвоить связь токов и напряжений транзистора с режимами работы. Особое внимание следует обратить на физический смысл, условия определения, обозначения собственных параметров транзисторов и прежде всего коэффициентов передачи тока эмиттера и тока базы, а также параметров режима отсечки. Крайне важно знать основные схемы включения, входные и выходные статические характеристики схем включения. Настоятельно рекомендуется приобрести навыки в использовании модели Эберса-Молла для описания статических характеристик и определения режимов работы транзисторов. Следует знать физический смысл процессов модуляции толщины базы, накопления и рассасывания неосновных носителей заряда в базе, влияние этих процессов на характеристики и параметры биполярных транзисторов. Малосигнальная эквивалентная схема в h -параметрах, малосигнальная физическая Т-образная эквивалентная схема, соотношения параметров схем усиления электрических сигналов, влияние частоты на усилительные свойства транзисторов и режим усиления больших импульсных сигналов в схеме с общим эмиттером составляют минимально необходимую теоретическую основу для последующего изучения схемотехнических дисциплин.

1.5 Тиристоры

Необходимо изучить принцип действия, классификацию и условные графические обозначения тиристоров, вольт-амперные характеристики и основные параметры. При изучении принципа действия тиристоров полезно использовать двухтранзисторный аналог тиристора. Следует обратить внимание на способы управления тиристорами.

1.6 Полевые транзисторы

Необходимо твердо усвоить принцип действия и различия основных типов полевых транзисторов. Важно знать выходные и передаточные статические характеристики полевых транзисторов, физический смысл эффекта модуляции длины канала и влияние этого эффекта на характеристики и параметры. Особое внимание следует обратить на физический смысл и условия определения крутизны, дифференциального сопротивления канала, коэффициента усиления по напряжению, межэлектродных емкостей. Настоятельно рекомендуется приобрести навыки в применении уравнений вольт-амперных характеристик МДП-транзисторов с индуцированным каналом для определения крутизны, коэффициента усиления по напряжению, параметров импульсного режима работы. Схемы включения полевых транзисторов для усиления электрических сигналов, упрощенные малосигнальные эквивалентные схемы, соотношения параметров схем усиления, влияние частоты на усилительные свойства транзисторов и режим усиления больших импульсных сигналов в схеме с общим истоком составляют минимально необходимую теоретическую основу для последующего изучения схемотехнических дисциплин.

1.7 Оптоэлектронные полупроводниковые приборы

Изучение необходимо начать с явлений внутреннего и внешнего фотоэффектов, которые лежат в основе работы всех фотоэлектрических приборов. После этого необходимо изучить принцип работы и параметры биполярных и полевых фототранзисторов. Необходимо знать устройство, принцип действия, параметры и эквивалентную схему оптоэлектронных пар.

1.8 Полупроводниковые термоэлектрические и гальваномагнитные приборы

Прежде всего необходимо изучить эффекты Зеебека и Пельте, которые определяют принцип действия, характеристики и параметры полупроводниковых термоэлектрических приборов, а также эффект Холла и магниторезистивный эффект, которые лежат в основе гальваномагнитных приборов. Затем следует изучить назначение, характеристики и параметры терморезисторов, термоэлектрических генераторов, преобразователей Холла и магниторезисторов. Особое внимание рекомендуется обратить на преобразователи Холла, которые находят широкое применение в силовой электронике в качестве датчиков тока.

При изучении разделов по полупроводниковым диодам, биполярным и полевым транзисторам, тиристорам, термоэлектрическим и гальваномагнитным приборам настоятельно рекомендуется использовать в качестве дополнительной литературы электронные ресурсы Internet: архив журнала «Силовая электроника» (www.power-e.ru/archive.php); архив журнала «Компоненты и технологии» (www.compitech.ru/html.cgi/arhiv).

Глава 2

МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ ПО ВЫПОЛНЕНИЮ КОНТРОЛЬНЫХ РАБОТ

Рабочая программа по дисциплине предполагает выполнение одной компьютерной и одной текстовой контрольных работ.

Компьютерная контрольная работа включает 10 задач по всем разделам курса.

Текстовая контрольная работа посвящена расчету полевого транзистора либо с управляющим p - n -переходом, либо с изолированным затвором.

2.1 Общие указания по решению задач

Приступая к решению задачи, необходимо установить, какие физические закономерности лежат в основе. С помощью формул, выражающих эти закономерности, следует найти решение задачи. Следует стремиться к получению решения в аналитическом виде: сначала необходимо записать исходные формулы, сделать соответствующие преобразования, получить конечные формулы, а затем подставлять в эти формулы числовые значения. Конечные формулы должны выражать искомые величины через величины, заданные в условии задачи. Если решение задачи в общем виде связано с громоздкими преобразованиями, то его целесообразно проводить, применяя числовые вычисления на промежуточных этапах. С целью исключения ошибок рекомендуется все промежуточные вычисления проводить в системе СИ.

Полученное решение необходимо всегда стараться проверить каким-либо способом. Для аналитических решений необходимо выполнять проверку на соответствие размерностей.

При получении числового ответа следует обращать внимание на точность окончательного результата, которая не должна превышать точности исходных величин. Вычисления, как правило, достаточно делать с точностью до третьего знака, а в ряде случаев до второго.

Некоторые задачи можно решить несколькими методами. Очень полезно проверить различные методы решения. Помимо того, что это дает дополнительную тренировку, сопоставив решения, можно сделать вывод о том, какие методы решения являются наиболее рациональными. Всегда следует считать лучшим тот метод решения, который проще, то есть требует меньшего числа действий.

При возникновении затруднений в ходе решения задач следует ознакомиться с примерами выполнения типовых заданий по соответствующему разделу дисциплины.

2.2 Примеры выполнения типовых заданий компьютерной контрольной работы

Задание 1. Определить собственную концентрацию свободных носителей заряда в арсениде галлия $GaAs$ и антимониде индия $InSb$ при температуре $T = 300$ К.

Решение. Напомним, что в собственном полупроводнике одновременно возникают два вида носителей заряда — электроны и дырки, поэтому $n_i = p_i$.

Концентрация собственных носителей заряда определяется в основном температурой T и шириной запрещенной зоны ΔE_g полупроводника:

$$n_i = p_i = 2\sqrt{N_c N_v} \cdot \exp\left(-\frac{\Delta E_g}{2kT}\right),$$

где $k = 1,38 \cdot 10^{-23}$ Дж/К = $8,617 \cdot 10^{-5}$ эВ/К — постоянная Больцмана; N_c — эффективная плотность энергетических уровней электронов в зоне проводимости; N_v — эффективная плотность энергетических уровней дырок в валентной зоне.

Эффективная плотность энергетических уровней N_c электронов в зоне проводимости зависит от температуры T и эффективной массы m_n^* электрона в кристалле:

$$N_c = \left(\frac{m_n^* \cdot kT}{2\pi\hbar^2}\right)^{\frac{3}{2}},$$

где \hbar — постоянная Планка, деленная на 2π .

Эффективная плотность энергетических уровней N_v в валентной зоне также зависит от температуры T и эффективной массы m_p^* дырки:

$$N_v = \left(\frac{m_p^* \cdot kT}{2\pi\hbar^2}\right)^{\frac{3}{2}}.$$

В результате можно записать:

$$n_i = p_i = 2 \left(\frac{k}{2\pi \cdot \hbar^2}\right)^{\frac{3}{2}} \cdot (m_n^* \cdot m_p^*)^{\frac{3}{4}} \cdot T^{\frac{3}{2}} \cdot \exp\left(-\frac{\Delta E_g}{2kT}\right).$$

Величины ΔE_g , m_n^* , m_p^* приведены в приложении:

для арсенида галлия при температуре $T = 300$ К $\Delta E_g = 1,43$ эВ, $m_n^* = 0,068m_e$, $m_p^* = 0,45m_e$;

для антимонида индия при температуре $T = 300$ К $\Delta E_g = 0,18$ эВ, $m_n^* = 0,013m_e$, $m_p^* = 0,6m_e$, где $m_e = 9,1 \cdot 10^{-31}$ кг — масса покоя электрона.

Подставляя числовые значения, находим:

собственную концентрацию свободных носителей заряда в арсениде галлия $GaAs$ при температуре $T = 300$ К

$$\begin{aligned} n_{iGaAs} = p_{iGaAs} &= 2 \cdot \left(\frac{1,38 \cdot 10^{-23}}{2 \cdot 3,14 \cdot (1,05 \cdot 10^{-34})^2} \right)^{\frac{3}{2}} \times \\ &\times (0,68 \cdot 9,1 \cdot 10^{-31} \cdot 0,45 \cdot 9,1 \cdot 10^{-31})^{\frac{3}{4}} \cdot 300^{\frac{3}{2}} \cdot \exp\left(-\frac{1,43}{2 \cdot 8,617 \cdot 10^{-5} \cdot 300}\right) = \\ &= 1,016 \cdot 10^{13} \text{ м}^{-3} = 1,016 \cdot 10^7 \text{ см}^{-3} \end{aligned}$$

и собственную концентрацию свободных носителей заряда в антимониде индия $InSb$ при температуре $T = 300$ К

$$\begin{aligned} n_{iInSb} = p_{iInSb} &= 2 \cdot \left(\frac{1,38 \cdot 10^{-23}}{2 \cdot 3,14 \cdot (1,05 \cdot 10^{-34})^2} \right)^{\frac{3}{2}} \times \\ &\times (0,013 \cdot 9,1 \cdot 10^{-31} \cdot 0,6 \cdot 9,1 \cdot 10^{-31})^{\frac{3}{4}} \cdot 300^{\frac{3}{2}} \cdot \exp\left(-\frac{0,18}{2 \cdot 8,617 \cdot 10^{-5} \cdot 300}\right) = \\ &= 2,05 \cdot 10^{22} \text{ м}^{-3} = 2,05 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}. \end{aligned}$$

Задание 2. Найти концентрацию N_A легирующей акцепторной примеси для кремния Si , при которой примесный кремний становится вырожденным полупроводником при температуре $T = 300$ К.

Решение. Напомним, что вырожденный полупроводник — примесный полупроводник, у которого примеси вследствие значительной концентрации образуют примесные энергетические зоны, которые сливаются с ближайшими энергетическими зонами кристалла, в результате чего образуется зонная структура, близкая к зонной структуре металлов.

Концентрация дырок в собственном невырожденном полупроводнике определяется выражением:

$$p_0 = 2 \cdot \left(\frac{m_p^* \cdot kT}{2\pi\hbar^2} \right)^{\frac{3}{2}} \cdot \exp\left(-\frac{E_F - E_v}{kT}\right).$$

Для полупроводника с акцепторной примесью, когда все акцепторные атомы ионизированы, равновесная концентрация дырок $p_p = N_A$.

Вырождение в акцепторном полупроводнике наступает, когда $E_F - E_v = kT$.

$$\text{Тогда } N_A = 2 \cdot \left(\frac{m_p^* \cdot kT}{2\pi\hbar^2} \right)^{\frac{3}{2}} \cdot \exp\left(-\frac{kT}{kT}\right) = 2 \cdot \left(\frac{m_p^* \cdot kT}{2\pi\hbar^2} \right)^{\frac{3}{2}} \cdot e^{-1},$$

где $m_p^* = 0,56 \cdot m_e = 0,56 \cdot 9,1 \cdot 10^{-31}$ кг — эффективная масса дырки в кристалле кремния; $e = 2,718282 \approx 2,72$ — основание натурального логарифма.

Подставляя числовые значения, находим концентрацию N_A легирующей акцепторной примеси для кремния, при которой примесный кремний становится вырожденным полупроводником $T = 300$ К:

$$N_A = 2 \cdot \left(\frac{0,56 \cdot 9,1 \cdot 10^{-31} \cdot 1,38 \cdot 10^{-23} \cdot 300}{2 \cdot 3,14 \cdot (1,05 \cdot 10^{-34})^2} \right)^{\frac{3}{2}} \cdot 2,72^{-1} = 3,9 \cdot 10^{24} \text{ м}^{-3}.$$



.....
Отметим, что отдельные исследователи полагают, что вырождение в акцепторном полупроводнике наступает, когда $E_F - E_v = 2kT$.
.....

Тогда, концентрация N_A легирующей акцепторной примеси для кремния Si, при которой примесный кремний становится вырожденным полупроводником при температуре $T = 300 \text{ К}$:

$$N_A = 2 \cdot \left(\frac{0,56 \cdot 9,1 \cdot 10^{-31} \cdot 1,38 \cdot 10^{-23} \cdot 300}{2 \cdot 3,14 \cdot (1,05 \cdot 10^{-34})^2} \right)^{\frac{3}{2}} \cdot 2,72^{-2} = 1,43 \cdot 10^{24} \text{ м}^{-3}.$$

Задание 3. Найти положение уровня Ферми в собственном германии при температуре $T = 300 \text{ К}$, если известно, что ширина запрещенной зоны германия $\Delta E_g = 0,665 \text{ эВ}$, а эффективные массы для дырок валентной зоны и для электронов зоны проводимости соответственно равны $m_p^* = 0,338m_e$ и $m_n^* = 0,55m_e$, где $m_e = 9,1 \cdot 10^{-31} \text{ кг}$ — масса покоя электрона.

Решение. Положение уровня Ферми в собственном полупроводнике определяется выражением

$$E_F = \frac{E_c + E_v}{2} + \frac{kT}{2} \cdot \ln \left(\frac{N_v}{N_c} \right) = E_i + \frac{kT}{2} \cdot \ln \left(\frac{N_v}{N_c} \right),$$

где E_i — уровень энергии, соответствующий середине запрещенной зоны; E_c — энергия дна зоны проводимости; E_v — энергия потолка валентной зоны; $k = 1,38 \cdot 10^{-23} \text{ Дж/К} = 8,617 \cdot 10^{-5} \text{ эВ/К}$ — постоянная Больцмана; N_c — эффективная плотность энергетических уровней электронов в зоне проводимости; N_v — эффективная плотность энергетических уровней дырок в валентной зоне.

Эффективная плотность N_v энергетических уровней дырок в валентной зоне и эффективная плотность N_c энергетических уровней электронов в зоне проводимости определяются выражениями

$$N_v = \left(\frac{m_p^* \cdot kT}{2\pi\hbar^2} \right)^{\frac{3}{2}}, \quad N_c = \left(\frac{m_n^* \cdot kT}{2\pi\hbar^2} \right)^{\frac{3}{2}},$$

где $\hbar = 1,05 \cdot 10^{-34} \text{ Дж}\cdot\text{с}$ — постоянная Планка, деленная на 2π .

Подставляя числовые значения, находим:

$$N_v = \left(\frac{0,338 \cdot 9,1 \cdot 10^{-31} \cdot 1,38 \cdot 10^{-23} \cdot 300}{2 \cdot 3,14 \cdot (1,05 \cdot 10^{-34})^2} \right)^{\frac{3}{2}} = 3,068 \cdot 10^{24} \text{ м}^{-3},$$

$$N_c = \left(\frac{0,55 \cdot 9,1 \cdot 10^{-31} \cdot 1,38 \cdot 10^{-23} \cdot 300}{2 \cdot 3,14 \cdot (1,05 \cdot 10^{-34})^2} \right)^{\frac{3}{2}} = 5,177 \cdot 10^{24} \text{ м}^{-3}.$$

Тогда,

$$\begin{aligned} E_F - E_i &= \frac{kT}{2} \cdot \ln \left(\frac{N_v}{N_c} \right) = \frac{1,38 \cdot 10^{-23} \cdot 300}{2} \cdot \ln \left(\frac{3,068 \cdot 10^{24}}{5,177 \cdot 10^{24}} \right) = \\ &= -70,65 \cdot 10^{-23} \text{ Дж.} \end{aligned}$$

При определении уровня Ферми в эВ необходимо использовать значение постоянной Больцмана $k = 8,617 \cdot 10^{-5} \text{ эВ/К}$:

$$\begin{aligned} E_F - E_i &= \frac{kT}{2} \cdot \ln \left(\frac{N_v}{N_c} \right) = \frac{8,617 \cdot 10^{-5}}{2} \cdot \ln \left(\frac{3,068 \cdot 10^{24}}{5,177 \cdot 10^{24}} \right) = \\ &= -6,76 \cdot 10^{-3} \text{ эВ.} \end{aligned}$$

Таким образом, в собственном германии при температуре $T = 300 \text{ К}$ уровень Ферми расположен ниже середины запрещенной зоны на величину $6,76 \cdot 10^{-3} \text{ эВ}$.

Задание 4. Напряженность электрического поля в кристалле собственного кремния $E = 500 \text{ В/м}$, а подвижность электронов и дырок соответственно равны $\mu_n = 0,14 \text{ м}^2/\text{В} \cdot \text{с}$, $\mu_p = 0,05 \text{ м}^2/\text{В} \cdot \text{с}$. Концентрация собственных носителей заряда $n_i = 1,5 \cdot 10^{16} \text{ м}^{-3}$. Определить: а) скорость дрейфа электронов v_n и дырок v_p ; б) удельное сопротивление кремния ρ_i ; в) полный дрейфовый ток I , если площадь поперечного сечения $S = 3 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2$.

Решение. Скорость дрейфа электронов и скорость дрейфа дырок:

$$v_n = \mu_n E = 0,14 \cdot 500 = 70 \text{ м/с}, \quad v_p = \mu_p E = 0,05 \cdot 500 = 25 \text{ м/с}.$$

Удельное сопротивление собственного кремния:

$$\begin{aligned} \rho_i &= \frac{1}{\sigma_i} = \frac{1}{n_i q_e (\mu_n + \mu_p)} = \\ &= \frac{1}{1,5 \cdot 10^{16} \cdot 1,602 \cdot 10^{-19} \cdot (0,14 + 0,05)} = 2,2 \cdot 10^3 \text{ Ом} \cdot \text{м}. \end{aligned}$$

Полный дрейфовый ток в собственном полупроводнике:

$$I = n_i q_e E (\mu_n + \mu_p) S = 1,5 \cdot 10^{16} \cdot 1,6 \cdot 10^{-19} \cdot 500 \cdot 0,19 \cdot 3 \cdot 10^{-6} = 0,68 \cdot 10^{-6} \text{ А}.$$

Задание 5. Вычислить диффузионную длину электронов в арсениде галлия p -типа и дырок в арсениде галлия n -типа, если время жизни неосновных носителей заряда $\tau_n = \tau_p = 10^{-4} \text{ с}$, коэффициент диффузии для арсенида галлия p -типа $D_n = 220 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2/\text{с}$ и для арсенида галлия n -типа $D_p = 10 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2/\text{с}$.

Решение. Из выражения $D_n \tau_n = L_n^2$ находим диффузионную длину электронов $L_n = \sqrt{D_n \tau_n} = \sqrt{220 \cdot 10^{-4} \cdot 10^{-4}} = 1,48 \cdot 10^{-3} \text{ м}$.

Диффузионная длина дырок:

$$L_p = \sqrt{D_p \tau_p} = \sqrt{10 \cdot 10^{-4} \cdot 10^{-4}} = 0,32 \cdot 10^{-3} \text{ м}.$$

Задание 6. В образце кремния n -типа при температуре $T = 300$ К время жизни неосновных носителей заряда $\tau_p = 5$ мкс, а их подвижность $\mu_p = 0,04$ м²/В·с. Определить плотность тока, протекающего через грань образца, на которой поддерживается постоянная избыточная концентрация дырок $\Delta p(0) = 10^{19}$ м⁻³. На каком расстоянии от грани избыточная концентрация неосновных носителей заряда составит $\Delta p = 10^{18}$ м⁻³.

Решение. Электрический ток, обусловленный поддержанием избыточной концентрации неосновных носителей заряда, по физической природе является диффузионным током.

Используя соотношение Эйнштейна, определим коэффициент диффузии неосновных носителей заряда в образце полупроводника:

$$D_p = \frac{kT}{q_e} \mu_p = \frac{1,38 \cdot 10^{-23} \cdot 300}{1,6 \cdot 10^{-19}} \cdot 0,04 = 1,04 \cdot 10^{-3} \text{ м}^2/\text{с}.$$

Диффузионная длина неосновных носителей заряда:

$$L_p = \sqrt{D_p \tau_p} = \sqrt{1,04 \cdot 10^{-3} \cdot 5 \cdot 10^{-6}} = 7,21 \cdot 10^{-5} \text{ м}.$$

Распределение избыточной концентрации дырок в образце полупроводника определяется решением стационарного уравнения диффузии, которое при одномерной диффузии имеет вид:

$$\Delta p(x) = \Delta p(0) \exp\left(-\frac{x}{L_p}\right).$$

Плотность диффузионного тока:

$$j_p(x) = -q_e D_p \frac{dp(x)}{dx} = -q_e D_p \frac{d\Delta p(x)}{dx} = \frac{q_e D_p \Delta p(0)}{L_p} \exp\left(-\frac{x}{L_p}\right).$$

Плотность тока, протекающего через грань полупроводника, определяется выражением:

$$j_p = j_p(0) = \frac{q_e D_p \Delta p(0)}{L_p} = \frac{1,6 \cdot 10^{-19} \cdot 1,04 \cdot 10^{-3} \cdot 10^{19}}{7,21 \cdot 10^{-5}} = 23,07 \text{ А/м}^2.$$

Используя выражение для распределения избыточной концентрации неосновных носителей заряда, определим расстояние от грани полупроводникового образца, на котором избыточная концентрация неосновных носителей заряда составит $\Delta p = 10^{18}$ м⁻³:

$$x_p = L_p \ln\left(\frac{\Delta p(0)}{\Delta p}\right) = 7,21 \cdot 10^{-5} \cdot \ln\left(\frac{10^{19}}{10^{18}}\right) = 166 \cdot 10^{-6} \text{ м}.$$

Задание 7. Имеется сплавной арсенид-галлиевый p - n -переход с концентрацией атомов доноров $N_D = 10^3 \cdot N_A$, причем на каждые 10^8 атомов арсенида галлия приходится один атом акцепторной примеси. Определить контактную разность потенциалов при температуре $T = 300$ К. Концентрацию атомов арсенида галлия

принять равной $N = 4,4 \cdot 10^{28} \text{ м}^{-3}$, собственную концентрацию ионизированных атомов принять равной $n_i = 1,1 \cdot 10^{13} \text{ м}^{-3}$.

Решение. Контактная разность потенциалов:

$$\phi_k = \frac{kT}{q_e} \ln \frac{N_A N_D}{n_i^2},$$

где $k = 1,38 \cdot 10^{-23} \text{ Дж/К}$ — постоянная Больцмана; T — абсолютная температура; N_D — концентрация доноров; N_A — концентрация акцепторов; n_i — концентрация собственных носителей заряда; q_e — заряд электрона.

Определим концентрацию акцепторных атомов:

$$N_A = \frac{N}{10^8} = \frac{4,4 \cdot 10^{28}}{10^8} = 4,4 \cdot 10^{20} \text{ м}^{-3}.$$

Концентрация атомов доноров:

$$N_D = 10^3 \cdot N_A = 4,4 \cdot 10^{23} \text{ м}^{-3}.$$

Контактная разность потенциалов:

$$\phi_k = \frac{1,38 \cdot 10^{-23} \cdot 300}{1,6 \cdot 10^{-19}} \ln \frac{4,4 \cdot 10^{20} \cdot 4,4 \cdot 10^{23}}{(1,1 \cdot 10^{13})^2} = 1,085 \text{ В}.$$

Задание 8. Электронно-дырочный переход, имеющий обратный ток насыщения $I_0 = 25 \text{ мкА}$, работает при прямом напряжении $U = 0,1 \text{ В}$ и температуре $T = 300 \text{ К}$. Определить: а) сопротивление диода постоянному току R_0 ; б) дифференциальное сопротивление $r_{\text{диф}}$.

Решение. Найдем прямой ток p - n -перехода по формуле:

$$I = I_0 \left(e^{\frac{q_e U}{kT}} - 1 \right) = 25 \cdot 10^{-6} \left(e^{\frac{1,6 \cdot 10^{-19} \cdot 0,1}{1,38 \cdot 10^{-23} \cdot 300}} - 1 \right) = 1,17 \cdot 10^{-3} \text{ А}.$$

Тогда сопротивление p - n -перехода постоянному току:

$$R_0 = \frac{U}{I} = \frac{0,1}{1,17 \cdot 10^{-3}} = 85 \text{ Ом}.$$

Вычислим дифференциальное сопротивление

$$\frac{1}{r_{\text{диф}}} = \frac{dI}{dU} = I_0 \frac{q_e}{kT} e^{\frac{q_e U}{kT}} = 25 \cdot 10^{-6} \cdot \frac{1,6 \cdot 10^{-19}}{1,38 \cdot 10^{-23} \cdot 300} \cdot e^{\frac{1,6 \cdot 10^{-19} \cdot 0,1}{1,38 \cdot 10^{-23} \cdot 300}} = 46 \cdot 10^{-3} \text{ См},$$

откуда $r_{\text{диф}} = 1/46 \cdot 10^{-3} = 21,6 \text{ Ом}$ или приближенно, с учетом того, что $I \gg I_0$:

$$r_{\text{диф}} \approx \frac{kT}{q_e I} = \frac{1,38 \cdot 10^{-23} \cdot 300}{1,6 \cdot 10^{-19} \cdot 1,17 \cdot 10^{-3}} = 22 \text{ Ом}.$$

Задание 9. Барьерная емкость сплавного диода $C_6 = 200 \text{ пФ}$ при обратном напряжении $U_{\text{обр}} = 2 \text{ В}$. Какое требуется обратное напряжение, чтобы уменьшить барьерную емкость до $C_6 = 50 \text{ пФ}$, если контактная разность потенциалов $\phi_k = 0,82 \text{ В}$.

Решение. Допустим, что распределение концентрации легирующей примеси в областях сплавного диода соответствует модели ступенчатого p - n -перехода. Барьерная емкость ступенчатого p - n -перехода, смещенного в обратном направлении, определяется выражением:

$$C_6 = S \sqrt{\frac{q_e \epsilon \epsilon_0}{2} \left(\frac{N_A N_D}{N_A + N_D} \right) (\phi_k + |U|)^{-1}} = \frac{k_{\pi}}{\sqrt{\phi_k + U_{\text{обр}}}},$$

где $k_{\pi} = S \sqrt{\frac{q_e \epsilon \epsilon_0}{2} \left(\frac{N_A N_D}{N_A + N_D} \right)}$ — постоянный коэффициент, определяемый параметрами p - n -перехода.

Определим коэффициент k_{π} :

$$k_{\pi} = C_6 \sqrt{\phi_k + U_{\text{обр}}} = 200 \cdot 10^{-12} \sqrt{0,82 + 2} = 336 \cdot 10^{-12} \text{ Ф} \cdot \text{В}^{1/2}.$$

Найдем величину обратного напряжения, при которой $C_6 = 50$ пФ:

$$U_{\text{обр}} = \frac{k_{\pi}^2}{C_6^2} - \phi_k = \frac{(336 \cdot 10^{-12})^2}{(50 \cdot 10^{-12})^2} - 0,82 = 44,3 \text{ В}.$$

Задание 10. Ток насыщения некоторого диода Шоттки равен $I_S = 2$ мкА. Диод соединен последовательно с резистором и источником постоянного напряжения $E = 0,2$ В так, что диод смещен в прямом направлении. Определить сопротивление R резистора, если падение напряжения на резисторе $U_R = 0,1$ В при температуре $T = 300$ К.

Решение. Ток диода Шоттки определяется выражением

$$I = I_S \left(\exp \left(\frac{U}{\phi_T} \right) - 1 \right).$$

Падение напряжения на диоде согласно второму правилу Кирхгофа:

$$U = E - U_R = 0,2 - 0,1 = 0,1 \text{ В},$$

тогда

$$I = 2 \cdot 10^{-6} \left(\exp \left(\frac{1,6 \cdot 10^{-19} \cdot 0,1}{1,38 \cdot 10^{-23} \cdot 300} \right) - 1 \right) = 93 \cdot 10^{-6} \text{ А}.$$

Следовательно,

$$R = \frac{U}{I} = \frac{0,1}{93 \cdot 10^{-6}} = 1,08 \cdot 10^3 \text{ Ом}.$$

Задание 11. У полупроводникового диода $R_{\text{пр}} = 40$ Ом, $R_{\text{обр}} = 400$ кОм, $C = 80$ пФ. Определить: а) на какой частоте емкостное сопротивление X_c станет равно $R_{\text{обр}}$; б) на какой частоте емкостное сопротивление станет равно $R_{\text{пр}}$.

Решение. Емкостное сопротивление диода определяется выражением

$$X_c = \frac{1}{2\pi f C}.$$

Из условия $X_c = R_{обр}$ определим:

$$f = \frac{1}{2\pi R_{обр} C} = \frac{1}{2 \cdot 3,14 \cdot 400 \cdot 10^3 \cdot 80 \cdot 10^{-12}} = 4,98 \cdot 10^3 \text{ Гц.}$$

Из условия $X_c = R_{пр}$ определим частоту, на которой емкостное сопротивление диода становится равным $R_{пр}$:

$$f = \frac{1}{2\pi R_{пр} C} = \frac{1}{2 \cdot 3,14 \cdot 40 \cdot 80 \cdot 10^{-12}} = 49,8 \cdot 10^6 \text{ Гц.}$$

Задание 12. Для стабилизации напряжения на нагрузке используется полупроводниковый стабилитрон, напряжение стабилизации которого $U_{ст} = 10 \text{ В}$. Определить допустимые пределы изменения напряжения питания, если максимально допустимый ток стабилизации $I_{ст \max} = 30 \text{ мА}$, минимально допустимый ток стабилизации $I_{ст \min} = 1 \text{ мА}$, сопротивление нагрузки $R_n = 1 \text{ кОм}$ и сопротивление ограничительного резистора $R_{обр} = 0,5 \text{ кОм}$.

Решение. Используя первое и второе правила Кирхгофа, определим напряжение питания:

$$E = U_{ст} + R_{обр} (I_n + I_{ст}).$$

Ток нагрузки определим по формуле:

$$I_n = \frac{U_{ст}}{R_n}.$$

Тогда

$$E = U_{ст} \left(1 + \frac{R_{обр}}{R_n} \right) + I_{ст} R_{обр},$$

$$E_{\min} = U_{ст} \left(1 + \frac{R_{обр}}{R_n} \right) + I_{ст \min} R_{обр},$$

$$E_{\max} = U_{ст} \left(1 + \frac{R_{обр}}{R_n} \right) + I_{ст \max} R_{обр}.$$

Используя числовые значения исходных данных, найдем:

$$E_{\min} = 10 \cdot \left(1 + \frac{0,5 \cdot 10^3}{1 \cdot 10^3} \right) + 1 \cdot 10^{-3} \cdot 0,5 \cdot 10^3 = 15,5 \text{ В,}$$

$$E_{\max} = 10 \cdot \left(1 + \frac{0,5 \cdot 10^3}{1 \cdot 10^3} \right) + 30 \cdot 10^{-3} \cdot 0,5 \cdot 10^3 = 30 \text{ В.}$$

Задание 13. Кремниевый стабилитрон 2С516В используется в параметрическом стабилизаторе напряжения (рис. 2.1). Параметры стабилитрона: напряжение стабилизации $U_{ст} = 13 \text{ В}$, минимально допустимый ток стабилизации $I_{ст \min} = 3 \text{ мА}$, максимально допустимый ток стабилизации $I_{ст \max} = 24 \text{ мА}$. Сопротивление нагрузки $R_n = 2 \text{ кОм}$. Найти сопротивление ограничительного резистора, если напряжение питания изменяется от напряжения $E_{\min} = 17 \text{ В}$ до напряжения $E_{\max} = 20 \text{ В}$. Определить, будет ли обеспечена стабилизация во всем диапазоне изменения напряжения питания.

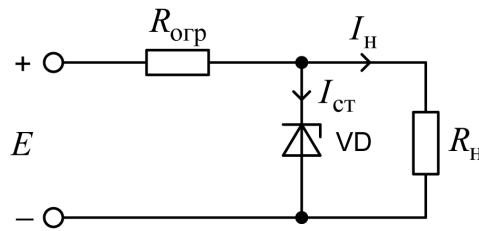


Рис. 2.1 – Параметрический стабилизатор напряжения

Решение. Для обеспечения положения рабочей точки стабилитрона на участке стабилизации ограничительное сопротивление должно удовлетворять условиям:

$$\frac{E_{\max} - U_{\text{ст}}}{I_{\text{ст. max}} + I_{\text{н. min}}} < R_{\text{огр}} < \frac{E_{\min} - U_{\text{ст}}}{I_{\text{ст. min}} + I_{\text{н. max}}},$$

где $I_{\text{н. max}}$, $I_{\text{н. min}}$ — максимальный и минимальный токи нагрузки.

Поскольку по условию задачи нагрузка является постоянной:

$$I_{\text{н. min}} = I_{\text{н. max}} = I_{\text{н}} = \frac{U_{\text{ст}}}{R_{\text{н}}} = \frac{13}{2 \cdot 10^3} = 6,5 \cdot 10^{-3} \text{ А.}$$

Тогда

$$\frac{20 - 13}{24 \cdot 10^{-3} + 6,5 \cdot 10^{-3}} < R_{\text{огр}} < \frac{17 - 13}{3 \cdot 10^{-3} + 6,5 \cdot 10^{-3}}$$

или

$$230 \text{ Ом} < R_{\text{огр}} < 421 \text{ Ом.}$$

Номинальное сопротивление ограничительного резистора, удовлетворяющее неравенствам $230 \text{ Ом} < R_{\text{огр}} < 421 \text{ Ом}$, выбираем из ряда номинальных сопротивлений Е6 (один из рядов предпочтительных значений сопротивлений для резисторов): $R_{\text{огр}} = 330 \text{ Ом}$. Для ряда Е6 допускаемые отклонения сопротивлений составляют $\pm 20\%$, тогда

$$R_{\text{огр}}^{-20\%} = 330 \cdot 0,8 = 264 \text{ Ом} > 230 \text{ Ом},$$

$$R_{\text{огр}}^{+20\%} = 330 \cdot 1,2 = 396 \text{ Ом} < 421 \text{ Ом.}$$

Принимая наихудшие сочетания параметров, определим диапазон изменения напряжения питания, в котором обеспечивается стабилизация напряжения на нагрузке:

$$E'_{\min} = U_{\text{ст}} + (I_{\text{ст. min}} + I_{\text{н}}) R_{\text{огр}}^{+20\%} = 13 + (3 \cdot 10^{-3} + 6,5 \cdot 10^{-3}) \cdot 396 = 16,8 \text{ В},$$

$$E'_{\max} = U_{\text{ст}} + (I_{\text{ст. max}} + I_{\text{н}}) R_{\text{огр}}^{-20\%} = 13 + (24 \cdot 10^{-3} + 6,5 \cdot 10^{-3}) \cdot 264 = 24,1 \text{ В.}$$

Поскольку $E_{\min} > E'_{\min}$ и $E_{\max} < E'_{\max}$, стабилизация напряжения на нагрузке обеспечивается во всем диапазоне изменения напряжения питания.

Задание 14. Рассчитать сплавной выпрямительный диод, удовлетворяющий техническим требованиям: геометрия кристалла — параллелепипед с квадратным основанием и толщиной области базы $w_b = 250 \text{ мкм}$; прямое падение напряжения $U_{\text{пр}} \leq 0,8 \text{ В}$; максимально допустимое обратное напряжение $U_{\text{обр. max}} = 100 \text{ В}$; максимально допустимый прямой ток диода $I_{\text{пр. ср.}} = 5 \text{ А}$; диапазон рабочих температур окружающей среды $(-60 \div 125)^\circ \text{ С}$.

Решение. Расчет диода предполагает определение или выбор: исходного полупроводникового материала; концентрации примесей в p - n -областях N_A и N_D ; равновесной концентрации основных p_{p0} , n_{n0} и неосновных p_{n0} , n_{p0} носителей заряда; геометрических размеров кристалла; ширины области пространственного заряда при $U = U_{\text{обр. max}}$; вольт-амперной характеристики.

Верхний предел диапазона рабочих температур германиевых диодов составляет $(70-80)^\circ \text{C}$, кремниевых диодов — $(120-150)^\circ \text{C}$, диодов из арсенида галлия — до 250°C . Принимая во внимание, что диоды из германия не обеспечивают работу при температуре 125°C , а диоды из арсенида галлия уступают диодам на основе кремния по стоимостным показателям, в качестве полупроводникового материала для изготовления диода выбираем кремний.

Концентрацию примеси в слаболегированной области базы определяем по напряжению пробоя $U_{\text{проб}}$, которое для обеспечения надежной работы диода должно в 1,5–2 раза превышать максимально допустимое обратное напряжение: $U_{\text{проб}} = 2U_{\text{обр. max}} = 200 \text{ В}$. По графику $U_{\text{проб}} = f(N)$ находим $N = 1,8 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}$. Сплавные переходы из кремния обычно получают вплавлением алюминия как акцепторной примеси. Поэтому область базы и соответственно исходная пластина кремния должна иметь электропроводность n -типа. При концентрации донорной примеси $N_D = 1,8 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}$ удельное сопротивление области базы $\rho_n = 2,5 \text{ Ом}\cdot\text{см}$. Таким образом, для изготовления диода будем использовать кремний марки 1 А КЭФ 2,5/0,1 с удельным сопротивлением $\rho_n = 2,5 \text{ Ом}\cdot\text{см}$ и диффузионной длиной $L_p = 0,01 \text{ см}$. Концентрация примеси в p^+ -области определяется по кривой предельной растворимости алюминия в кремнии. Для температуры вплавления 700°C концентрация акцепторов $N_A = 9 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$. Удельное сопротивление p^+ -области $\rho_p = 0,012 \text{ Ом}\cdot\text{см}$. Используя закон действующих масс и зависимость собственной концентрации носителей заряда от температуры, определяем концентрации неосновных носителей заряда:

$$p_{n0} = \frac{n_i^2}{n_{n0}} \approx \frac{n_i^2}{N_D} = \frac{(1,6 \cdot 10^{10})^2}{1,8 \cdot 10^{15}} = 1,4 \cdot 10^5 \text{ см}^{-3},$$

$$n_{p0} = \frac{n_i^2}{p_{p0}} \approx \frac{n_i^2}{N_A} = \frac{(1,6 \cdot 10^{10})^2}{9 \cdot 10^{18}} = 2,8 \cdot 10^5 \text{ см}^{-3}.$$

Коэффициенты диффузии дырок и электронов в кремнии: $D_p = 13 \text{ см}^2/\text{с}$, $D_n = 34 \text{ см}^2/\text{с}$. Находим время жизни неосновных носителей заряда в области базы $\tau_p = L_p^2/D_p = (0,01)^2/13 = 7,7 \cdot 10^{-6} \text{ с}$. Примем время жизни неосновных носителей в областях эмиттера $\tau_n = \tau_p$. Тогда диффузионная длина электронов $L_n = \sqrt{D_n \tau_n} = \sqrt{34 \cdot 7,7 \cdot 10^{-6}} = 0,016 \text{ см}$. Подвижности электронов и дырок определим, используя соотношения Эйнштейна:

$$\mu_n = \frac{q_e D_n}{kT} = \frac{1,6 \cdot 10^{-19} \cdot 34}{1,38 \cdot 10^{-23} \cdot 300} = 1314 \text{ см}^2/\text{В} \cdot \text{с},$$

$$\mu_p = \frac{q_e D_p}{kT} = \frac{1,6 \cdot 10^{-19} \cdot 13}{1,38 \cdot 10^{-23} \cdot 300} = 502 \text{ см}^2/\text{В} \cdot \text{с}.$$

Площадь кристалла можно определить исходя из допустимой плотности тока либо из максимальной емкости диода. Проведем расчет площади из допустимой

плотности тока $j_{\text{доп}} = 100 \text{ А/см}^2$:

$$S = \frac{I_{\text{пр. ср.}}}{j_{\text{доп}}} = \frac{5}{100} = 5 \cdot 10^{-2} \text{ см}^2.$$

Контактная разность потенциалов:

$$\phi_k = \frac{kT}{q_e} \ln \frac{p_{p0} n_{n0}}{n_i^2} = \frac{1,38 \cdot 10^{-23} \cdot 300}{1,6 \cdot 10^{-19}} \ln \frac{1,8 \cdot 10^{15} \cdot 9 \cdot 10^{18}}{(1,6 \cdot 10^{10})^2} = 0,82 \text{ В.}$$

Ширина области пространственного заряда резкого p - n -перехода определяется по формуле

$$\delta = \sqrt{\frac{2\epsilon\epsilon_0}{q_e} \left(\frac{1}{N_A} + \frac{1}{N_D} \right) (\phi_k + |U_{\text{обр}}|)}.$$

Поскольку $N_A/N_D = 5 \cdot 10^3 \gg 1$ и $\phi_k \ll U_{\text{обр. max}}$, находим

$$\delta = \sqrt{\frac{2\epsilon\epsilon_0}{q_e N_D} U_{\text{обр. max}}} = \sqrt{\frac{2 \cdot 12 \cdot 8,85 \cdot 10^{-14} \cdot 100}{1,6 \cdot 10^{-19} \cdot 1,8 \cdot 10^{15}}} = 8,6 \cdot 10^{-4} \text{ см.}$$

Плотность тока насыщения диода

$$j_0 = q_e \left[\frac{L_n n_{p0}}{\tau_n} + \frac{L_p p_{n0}}{\tau_p} \right] = \frac{1,6 \cdot 10^{-19}}{7,7 \cdot 10^{-6}} (0,016 \cdot 2,8 \cdot 10 + 0,01 \cdot 1,4 \cdot 10^5) = 2,9 \cdot 10^{-11} \text{ А/см}^2.$$

Ток насыщения $I_0 = S j_0 = 5 \cdot 10^{-2} \cdot 2,9 \cdot 10^{-11} = 14,5 \cdot 10^{-12} \text{ А.}$

В полупроводниках с малой собственной концентрацией свободных носителей заряда, то есть с достаточно большой шириной запрещенной зоны, в частности в кремниевых переходах, существенную роль играет ток генерации:

$$I_{\text{ген}} = q_e S \delta \frac{n_i}{\tau} = 1,6 \cdot 10^{-19} \cdot 5 \cdot 10^{-2} \cdot 8,6 \cdot 10^{-4} \cdot \frac{1,6 \cdot 10^{10}}{7,7 \cdot 10^{-6}} = 14,3 \cdot 10^{-9} \text{ А.}$$

Так как $I_{\text{ген}} \gg I_0$, то обратный ток определяется током генерации и растет с увеличением обратного напряжения из-за увеличения ширины области пространственного заряда по закону:

$$I_{\text{обр}} = I_{\text{ген}} \frac{\delta(U_{\text{обр}})}{\delta(U_{\text{обр. max}})} = I_{\text{ген}} \sqrt{\frac{U_{\text{обр}}}{U_{\text{обр. max}}}}.$$

В реальном p - n -переходе полный прямой ток складывается из тока инжекции и тока рекомбинации. Доля тока рекомбинации в полном прямом токе перехода растет с увеличением ширины запрещенной зоны полупроводника и уменьшением температуры.

При увеличении прямого напряжения доля тока рекомбинации в полном прямом токе перехода снижается. Таким образом, ток рекомбинации является основной составляющей прямого тока при малых прямых напряжениях в полупроводниках с широкой запрещенной зоной (кремний, арсенид галлия). При $U < \phi_k$

для тока рекомбинации справедливо выражение $I_{\text{рек}} = \frac{q_e S \delta(U) \phi_T n_i}{(\phi_k - U) \tau} \exp\left(\frac{U}{2\phi_T}\right)$,

где $\delta(U) = \sqrt{\frac{2\epsilon\epsilon_0}{q_e N_D} (\phi_k - U)}$.

В результате вольт-амперная характеристика диода определяется выражением

$$I = \begin{cases} -I_{\text{ген}} \sqrt{\frac{|U|}{U_{\text{обр. max}}}}, & U < 0 \\ I_0 \left[\exp\left(\frac{U}{\phi_T}\right) - 1 \right] + \frac{S n_i}{\tau} \sqrt{\frac{2q_e \epsilon \epsilon_0}{N_D (\phi_k - U)}} \exp\left(\frac{U}{2\phi_T}\right), & 0 < U < \phi_k \\ I_0 \exp\left(\frac{U}{\phi_T}\right), & U > \phi_k \end{cases}$$

и представлена на рис. 2.2.

Из вольт-амперной характеристики следует, что $I_{\text{пр. ср}} = 5$ А достигается при $U_{\text{пр}} = 0,69$ В < 0,8 В, что удовлетворяет требованию технического задания.

Мощность, выделяемая в p - n -переходе

$$P_{\text{max}} = I_{\text{пр. ср}} U_{\text{пр}} = 5 \cdot 0,69 = 3,45 \text{ Вт.}$$

Максимальная температура p - n -перехода кремниевых полупроводниковых приборов $T_{\text{max}} = 150^\circ \text{C}$, максимальная температура окружающей среды задана $T_{\text{окр}} = 125^\circ \text{C}$. Тогда конструктивное исполнение диода должно иметь тепловое сопротивление

$$R_T \leq \frac{T_{\text{max}} - T_{\text{окр}}}{P_{\text{max}}} = \frac{150 - 125}{3,45} = 7,25 \text{ К/Вт.}$$

Задание 15. Прямой ток эмиттера n - p - n -транзистора составляет $I_3 = 2$ мА, коллекторная цепь разорвана. Определить: а) напряжение на эмиттерном и коллекторном переходах; б) напряжение коллектор — эмиттер, полагая $I_{\text{кб0}} = 2$ мкА, $I_{\text{эб0}} = 1,6$ мкА, $\alpha = 0,98$; в) режим работы транзистора. Температурный потенциал принять $\phi_T = 26$ мВ.

Решение. Из модели Эберса-Молла для n - p - n -транзистора следует:

$$I_3 = I_{\text{эб0}} \left(\exp\left(\frac{U_{\text{э3}}}{\phi_T}\right) - 1 \right) + \alpha I_K, \quad I_K = \alpha I_3 - I_{\text{кб0}} \left(\exp\left(\frac{U_{\text{бк}}}{\phi_T}\right) - 1 \right).$$

Так как по условию задания коллекторная цепь транзистора разорвана, то $I_K = 0$. Тогда из выражения для тока эмиттера находим:

$$U_{\text{э3}} = \phi_T \ln \left(1 + \frac{I_3}{I_{\text{эб0}}} \right) = 26 \cdot 10^{-3} \cdot \ln \left(1 + \frac{2 \cdot 10^{-3}}{1,6 \cdot 10^{-6}} \right) = 0,185 \text{ В.}$$

Из выражения для тока коллектора находим:

$$U_{\text{бк}} = \phi_T \ln \left(1 + \frac{\alpha I_3}{I_{\text{кб0}}} \right) = 26 \cdot 10^{-3} \cdot \ln \left(1 + \frac{0,98 \cdot 2 \cdot 10^{-3}}{2 \cdot 10^{-6}} \right) = 0,179 \text{ В.}$$

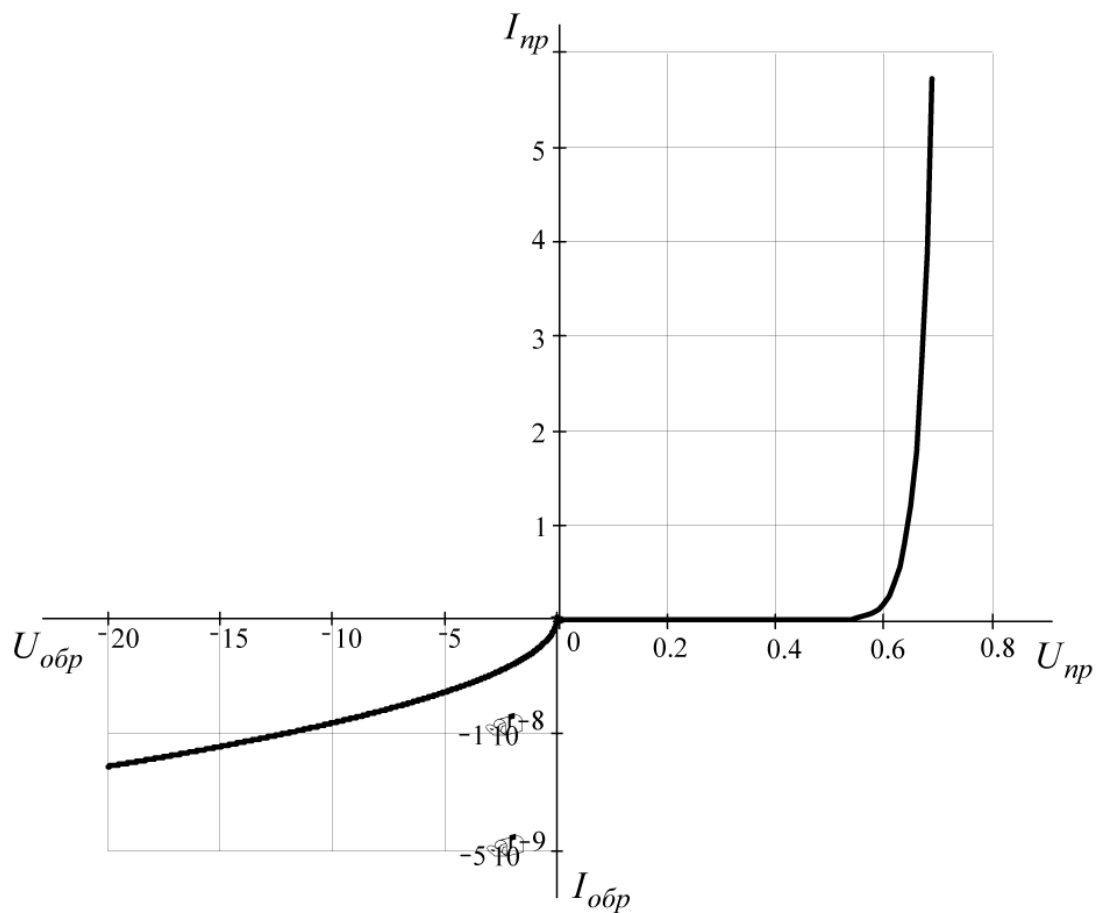


Рис. 2.2 – Вольт-амперная характеристика диода

Транзистор работает в режиме насыщения, поскольку $U_{бэ} > 0$ и $U_{бк} > 0$. Напряжение коллектор — эмиттер:

$$U_{кэ} = U_{бэ} - U_{бк} = 0,185 - 0,179 = 0,006 \text{ В.}$$

Задание 16. Транзистор n - p - n -типа работает в нормальном активном режиме, причем $U_{бэ} = 0,62 \text{ В}$, $U_{бк} = -5 \text{ В}$. Определить $U_{кэ}$, $I_э$, $I_к$, $I_б$, если $\alpha = 0,995$; $\alpha_I = 0,1$; $I_{эбк} = 10^{-14} \text{ А}$; $I_{кбк} = 10^{-13} \text{ А}$.

Решение. Напряжение коллектор — эмиттер:

$$U_{кэ} = U_{бэ} - U_{бк} = 0,62 - (-5) = 5,62 \text{ В.}$$

Из модели Эберса-Молла следует:

$$\begin{aligned} I_к &= -I_{кбк} \left(\exp \left(\frac{U_{бк}}{\Phi_T} \right) - 1 \right) + \alpha I_{эбк} \left(\exp \left(\frac{U_{бэ}}{\Phi_T} \right) - 1 \right) = \\ &= -10^{-13} \left(\exp \left(\frac{-5}{26 \cdot 10^{-3}} \right) - 1 \right) + 0,995 \cdot 10^{-14} \left(\exp \left(\frac{0,62}{26 \cdot 10^{-3}} \right) - 1 \right) = \\ &= 0,226 \cdot 10^{-3} \text{ А,} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 I_3 &= I_{36к} \left(\exp \left(\frac{U_{63}}{\phi_T} \right) - 1 \right) - \alpha_I I_{к6к} \left(\exp \left(\frac{U_{6к}}{\phi_T} \right) - 1 \right) = \\
 &= 10^{-14} \left(\exp \left(\frac{0,62}{26 \cdot 10^{-3}} \right) - 1 \right) - 0,1 \cdot 10^{-13} \left(\exp \left(\frac{-5}{26 \cdot 10^{-3}} \right) - 1 \right) = \\
 &= 0,227 \cdot 10^{-3} \text{ А},
 \end{aligned}$$

Используя соотношение между токами биполярного транзистора, определим:

$$I_6 = I_3 - I_к = 0,227 \cdot 10^{-3} - 0,226 \cdot 10^{-3} = 1 \cdot 10^{-6} \text{ А}.$$

Задание 17. Определить ток коллектора биполярного транзистора с оборванной базой, если известно, что коэффициент передачи тока эмиттера $\alpha = 0,98$ и обратный ток коллекторного перехода $I_{к60} = 10 \text{ мкА}$.

Решение. У транзистора с оборванной базой $I_6 = 0$, поэтому $I_3 = I_к$. В этом случае из модели Эберса-Молла следует

$$U_{36} = \phi_T \ln \left(1 + \frac{I_3 (1 - \alpha_I)}{I_{360}} \right) > 0, \quad U_{к6} = \phi_T \ln \left(1 - \frac{I_к (1 - \alpha)}{I_{к60}} \right) < 0,$$

следовательно, транзистор работает в нормальном активном режиме и для тока коллектора справедливо соотношение $I_к = \alpha I_3 + I_{к60}$, откуда

$$I_к = \frac{I_{к60}}{1 - \alpha} = \frac{10}{1 - 0,98} = 500 \text{ мкА}.$$



.....
 Полученное выражение для тока коллектора показывает, что *ток коллектора транзистора с оборванной базой фактически представляет собой ток $I_{к60}$ — ток коллектора транзистора, включенного по схеме с общим эмиттером, когда коллекторный переход находится под обратным напряжением, а ток базы равен нулю.*

Задание 18. Определить, являются ли совместимыми значения параметров некоторого транзистора: $h_{116} = 30 \text{ Ом}$; $h_{126} = 4 \cdot 10^{-3}$; $h_{216} = -0,97$; $h_{226} = 1 \cdot 10^{-6} \text{ См}$.

Решение. Поскольку все h -параметры транзистора определяются для выбранной рабочей точки, числовые значения h -параметров определенным образом соотносятся друг с другом.

Проверку совместимости значений h -параметров производят, определяя значения параметров физической малосигнальной Т-образной эквивалентной схемы. Критерием совместимости является положение о том, что все сопротивления физической малосигнальной Т-образной эквивалентной схемы должны быть положительны.

Учитывая, что статические параметры биполярного транзистора удовлетворяют условиям $r_6 \ll r_к$, $\mu_{3к} \approx 0$, справедливы выражения

$$h_{116} \approx r_3 + (1 - \alpha) r_6, \quad h_{126} \approx \frac{r_6}{r_к}, \quad h_{216} \approx -\alpha, \quad h_{226} \approx \frac{1}{r_к},$$

откуда следует:

$$\alpha = -h_{216} = 0,97; \quad r_6 \approx \frac{h_{126}}{h_{226}} = \frac{4 \cdot 10^{-3}}{1 \cdot 10^{-6}} = 4 \cdot 10^3 \text{ Ом};$$

$$r_3 \approx h_{116} - h_{126} = \frac{1 + h_{216}}{h_{226}} = 30 - 4 \cdot 10^{-3} \cdot \frac{1 - 0,97}{1 \cdot 10^{-6}} = -90 \text{ Ом};$$

$$r_k \approx \frac{1}{h_{226}} = \frac{1}{10^{-6}} = 10^6 \text{ Ом}.$$

Поскольку значение параметра r_3 получилось отрицательным, приведенные в условии задачи значения h -параметров являются несовместимыми. Отрицательное значение сопротивления r_3 обусловлено слишком большим значением r_6 , а последнее — большим значением параметра h_{126} .

Задание 19. Определить коэффициент усиления по напряжению для схемы усиления электрических сигналов с общей базой (рис. 2.3), если $R_3 = 1 \text{ кОм}$, $R_H = 10 \text{ кОм}$, $h_{116} = 20 \text{ Ом}$, $h_{126} \approx 0$, $h_{216} = -0,98$, $h_{226} = 1,5 \cdot 10^{-6} \text{ См}$.

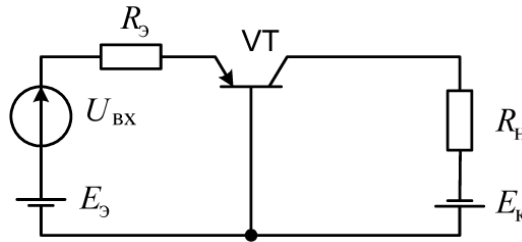


Рис. 2.3 – Схема усиления электрических сигналов с общей базой

Решение. Выходное напряжение $U_{\text{ВЫХ}} = R_H I_{K\sim}$.

Поскольку $1/h_{226} \gg R_H$, то $I_{K\sim} \approx -h_{216} I_{3\sim}$.

$$I_{3\sim} = \frac{U_{\text{ВХ}} - U_{36\sim}}{R_3} = \frac{U_{\text{ВХ}} - (h_{116} I_{3\sim} + h_{126} U_{K6\sim})}{R_3} = \frac{U_{\text{ВХ}} - h_{116} I_{3\sim}}{R_3},$$

откуда находим $I_{3\sim} = \frac{U_{\text{ВХ}}}{R_3 + h_{116}}$. Тогда $U_{\text{ВЫХ}} = -\frac{h_{216} R_H}{R_3 + h_{116}} U_{\text{ВХ}}$ и

$$k_U = \frac{U_{\text{ВЫХ}}}{U_{\text{ВХ}}} = -\frac{h_{216} R_H}{R_3 + h_{116}} = -\frac{(-0,98) \cdot 10 \cdot 10^3}{1 \cdot 10^3 + 20} = 9,6.$$

Задание 20. Определить ток коллектора транзистора в схеме на рис. 2.4, если $E_3 = 2 \text{ В}$; $R_3 = 1,8 \text{ кОм}$; $R_6 = 15 \text{ кОм}$; $E_6 = 3 \text{ В}$; $R_H = 3,9 \text{ кОм}$; $E_K = 16 \text{ В}$; $\alpha = 0,98$; $I_{K60} = 10 \text{ мкА}$; $U_{36} \approx 0,7 \text{ В}$.

Решение. Используя второе правила Кирхгофа, запишем уравнение равновесия для входной цепи:

$$I_3 R_3 + I_6 R_6 = E_3 + E_6 - U_{36}.$$

Полярности и значения ЭДС источников E_3 и E_6 обеспечивают смещение эмиттерного перехода в прямом направлении. В зависимости от значений параметров E_K , E_6 , R_H , R_6 выходной цепи транзистор может работать либо в нормальном активном режиме, либо в режиме насыщения.

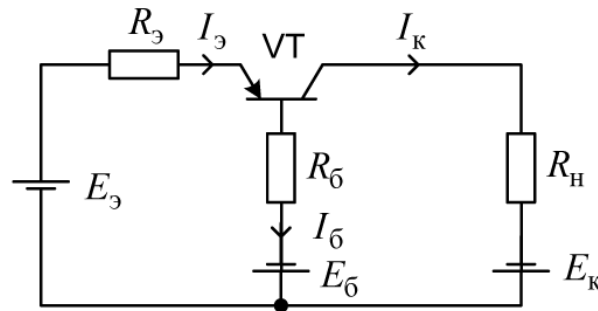


Рис. 2.4 – Схема включения транзистора с общей базой

Предположим, что транзистор работает в нормальном активном режиме. Используя соотношения для токов биполярного транзистора, определим $I_б = I_э - I_к = I_э(1 - \alpha) - I_{кб0}$.

Тогда

$$I_э = \frac{E_э + E_б - U_{эб} + I_{кб0}R_б}{R_э + R_б(1 - \alpha)} =$$

$$= \frac{2 + 3 - 0,7 + 10 \cdot 10^{-6} \cdot 15 \cdot 10^3}{1,8 \cdot 10^3 + 15 \cdot 10^3 \cdot (1 - 0,98)} = 2,12 \cdot 10^{-3} \text{ A},$$

$$I_к = \alpha I_э + I_{кб0} = 0,98 \cdot 2,12 \cdot 10^{-3} + 10 \cdot 10^{-6} = 2,08 \cdot 10^{-3} \text{ A}.$$

Для подтверждения предположения о режиме работы транзистора определим напряжение на коллекторном переходе:

$$U_{кб} = E_б - E_к - R_б I_б + R_н I_к =$$

$$= 3 - 16 - 15 \cdot 10^3 \cdot 0,04 \cdot 10^{-3} + 3,9 \cdot 10^3 \cdot 2,08 \cdot 10^{-3} = -5,49 \text{ V}.$$

Так как $U_{кб} < 0$, то коллекторный переход смещен в обратном направлении и допущение о режиме работы транзистора сделано верно.

Задание 21. Определить выходное напряжение $U_{\text{вых}}$ в схеме на рис. 2.5, если $E_э = 2 \text{ В}$; $R_э = 1,8 \text{ кОм}$; $R_б = 15 \text{ кОм}$; $R_н = 3,9 \text{ кОм}$; $E_к = 16 \text{ В}$; $\alpha = 0,98$; $I_{кб0} = 10 \text{ мкА}$; $U_{эб} \approx 0,7 \text{ В}$.

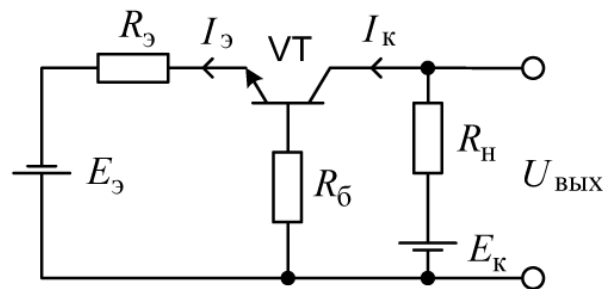


Рис. 2.5 – Схема включения транзистора с общей базой

Ответ: $U_{\text{вых}} = E_к - R_н \left(\alpha \frac{E_э - U_{эб} + I_{кб0}R_б}{R_э + R_б(1 - \alpha)} + I_{кб0} \right).$

Задание 22. Определить напряжение коллектор-эмиттер транзистора в схеме рис. 2.6 при разомкнутом и замкнутом ключе, если $\beta = 50$, $I_{кб0} = 10 \text{ мкА}$, $R_{б} = 10 \text{ кОм}$, $E_{б} = 1 \text{ В}$, $R_{к} = 5 \text{ кОм}$, $E_{к} = 20 \text{ В}$.

Решение. При разомкнутом ключе $I_{б} = 0$, поэтому транзистор работает в нормальном активном режиме. Тогда:

$$I_{к} = \beta I_{б} + I_{кб0} (\beta + 1) = I_{кб0} (\beta + 1) = 10 \cdot 10^{-6} (50 + 1) = 0,51 \cdot 10^{-3} \text{ А},$$

$$U_{кэ} = E_{к} - I_{к} R_{к} = 20 - 0,51 \cdot 10^{-3} \cdot 5 \cdot 10^3 = 17,5 \text{ В}.$$

При замкнутом ключе ЭДС $E_{б}$ обеспечивает смещение эмиттерного перехода в прямом направлении. В зависимости от значений параметров $E_{к}$, $R_{к}$ выходной цепи транзистор может работать либо в нормальном активном режиме, либо в режиме насыщения.

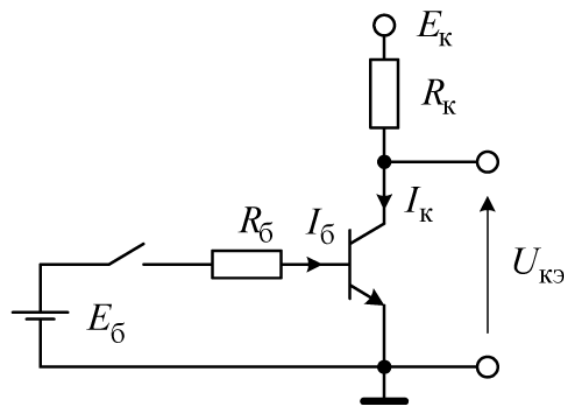


Рис. 2.6 – Схема включения транзистора с общим эмиттером

На границе насыщения выполняется соотношение $I_{б} = I_{б. \text{нас}}$, где

$$I_{б. \text{нас}} = \frac{I_{к. \text{нас}}}{\beta} = \frac{E_{к} - U_{кэ. \text{нас}}}{\beta R_{к}} \approx \frac{E_{к}}{\beta R_{к}} = \frac{20}{50 \cdot 5 \cdot 10^3} = 0,08 \cdot 10^{-3} \text{ А}.$$

Напряжение на эмиттерном переходе биполярного транзистора, смещенном в прямом направлении, при расчетах с инженерным уровнем точности можно принимать постоянным. Для кремниевых транзисторов $U_{бэ} \approx 0,7 \text{ В}$.

$$\text{Тогда } I_{б} = \frac{E_{б} - U_{бэ}}{R_{б}} = \frac{1 - 0,7}{10 \cdot 10^3} = 0,03 \cdot 10^{-3} \text{ А}.$$

Так как $I_{б} < I_{б. \text{нас}}$, то транзистор работает в нормальном активном режиме. Тогда

$$I_{к} = \beta I_{б} + I_{кб0} (1 + \beta) = 50 \cdot 0,03 \cdot 10^{-3} + 10 \cdot 10^{-6} \cdot (1 + 50) = 2,01 \cdot 10^{-3} \text{ А},$$

$$U_{кэ} = E_{к} - I_{к} R_{к} = 20 - 2,01 \cdot 10^{-3} \cdot 5 \cdot 10^3 = 9,95 \text{ В}.$$

Задание 23. Определить минимальное входное напряжение в схеме рис. 2.7, при котором транзистор будет работать в режиме насыщения, если $E_{к} = -27 \text{ В}$, $R_{б} = 15 \text{ кОм}$, $R_{с} = 1 \text{ кОм}$, $R_{н} = 2 \text{ кОм}$, $\beta = 9$.

Решение. На границе режима насыщения выполняется условие $I_{\bar{б}} = I_{\bar{б}, \text{нас}} = I_{\text{к}, \text{нас}}/\beta$, можно принять $U_{\bar{б}\bar{э}} \approx 0,7$ В, $U_{\text{к}\bar{э}, \text{нас}} \approx 0,3$ В, и тогда $I_{\bar{э}} = I_{\bar{б}, \text{нас}} + I_{\text{к}, \text{нас}} = I_{\bar{б}, \text{нас}}(1 + \beta)$.

Уравнение равновесия выходной цепи схемы:

$$E_{\text{к}} = U_{\text{к}\bar{э}, \text{нас}} + R_{\text{н}}I_{\text{к}, \text{нас}} + R_{\bar{э}}I_{\bar{э}} = U_{\text{к}\bar{э}, \text{нас}} + R_{\text{н}}\beta I_{\bar{б}, \text{нас}} + R_{\bar{э}}(1 + \beta)I_{\bar{б}, \text{нас}},$$

откуда

$$I_{\bar{б}, \text{нас}} = \frac{E_{\text{к}} - U_{\text{к}\bar{э}, \text{нас}}}{R_{\text{н}}\beta + R_{\bar{э}}(1 + \beta)} = \frac{27 - 0,3}{2 \cdot 10^3 \cdot 50 + 1 \cdot 10^3 \cdot (1 + 50)} = 0,177 \cdot 10^{-3} \text{ А.}$$

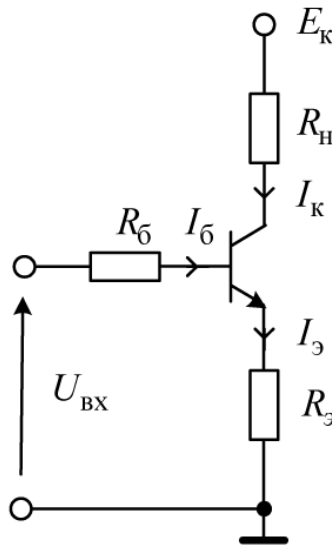


Рис. 2.7 – Схема включения транзистора с общим эмиттером

Входное напряжение определим, составив уравнение равновесия для входной цепи:

$$\begin{aligned} U_{\text{вх}} &= U_{\bar{б}\bar{э}} + R_{\bar{б}}I_{\bar{б}, \text{нас}} + R_{\bar{э}}I_{\bar{э}} = U_{\bar{б}\bar{э}} + R_{\bar{б}}I_{\bar{б}, \text{нас}} + R_{\bar{э}}I_{\bar{б}, \text{нас}}(1 + \beta) = \\ &= U_{\bar{б}\bar{э}} + (R_{\bar{б}} + R_{\bar{э}}(1 + \beta))I_{\bar{б}, \text{нас}} = \\ &= 0,7 + (15 \cdot 10^3 + 1 \cdot 10^3(1 + 50)) \cdot 0,177 \cdot 10^{-3} = 12,38 \text{ В.} \end{aligned}$$

Задание 24. Определить минимальное входное напряжение в схеме рис. 2.8, при котором транзистор работает в режиме насыщения, если $\alpha = 0,99$, $I_{\text{кб}0} = 10$ мкА, $E_{\text{к}} = 20$ В, $R_{\bar{э}} = 3$ кОм, $R_{\text{н}} = 2$ кОм.

Решение. На границе режима насыщения $U_{\text{кб}} = 0$. Из уравнения равновесия для выходной цепи:

$$I_{\text{к}} = \frac{E_{\text{к}} + U_{\text{кб}}}{R_{\text{н}}} = \frac{20}{2 \cdot 10^3} = 10 \cdot 10^{-3} \text{ А.}$$

Поскольку на границе режима насыщения остается справедливым соотношение $I_{\text{к}} = \alpha I_{\bar{э}} + I_{\text{кб}0}$ между токами транзистора, найдем:

$$I_{\bar{э}} = \frac{I_{\text{к}} - I_{\text{кб}0}}{\alpha} = \frac{10 \cdot 10^{-3} - 10 \cdot 10^{-6}}{0,99} = 10,09 \cdot 10^{-3} \text{ А.}$$

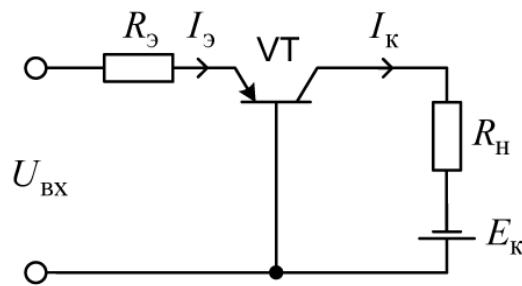


Рис. 2.8 – Схема включения транзистора с общей базой

Принимая $U_{бэ} \approx 0,7$ В, определим входное напряжение из уравнения равновесия для входной цепи:

$$U_{вх} = I_э R_э + U_{бэ} = 10,09 \cdot 10^{-3} \cdot 3 \cdot 10^3 + 0,7 = 30,97 \text{ В.}$$

Задание 25. Определить напряжение коллектор — эмиттер биполярного транзистора в схеме на рис. 2.9, если $\beta = 19$, $E_к = 24$ В, $R_б = 50$ кОм, $R_к = 10$ кОм, $U_{бэ} = 0,7$ В, $I_{кб0} = 10$ мкА.

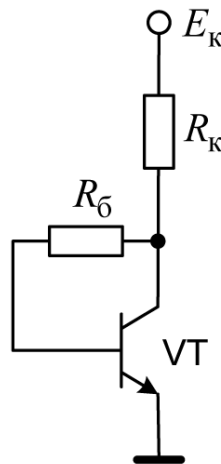


Рис. 2.9 – Цепь смещения биполярного транзистора с параллельной обратной связью по напряжению

Решение. Полярность падения напряжения на резисторе $R_б$ от протекания тока базы обеспечивает смещение коллекторного перехода в обратном направлении. Эмиттерный переход смещен в прямом направлении. Таким образом, транзистор работает в нормальном активном режиме, поэтому

$$I_к = \beta I_б + (1 + \beta) I_{кб0} \quad \text{и} \quad I_э = I_к + I_б = (1 + \beta) (I_б + I_{кб0}).$$

Напряжение коллектор — эмиттер определяется выражением:

$$\begin{aligned} U_{кэ} &= E_к - R_к I_к = E_к - R_к (I_к + I_б) = E_к - R_к I_э = \\ &= E_к - R_к (1 + \beta) (I_б + I_{кб0}), \end{aligned}$$

где $I_б = U_{кэ} - U_{бэ} / R_б$.

Используя выражения для напряжения $U_{кэ}$ и тока $I_{б}$, получим:

$$U_{кэ} = \frac{E_k R_{б} - (1 + \beta) R_k (R_{б} I_{кб0} - U_{бэ})}{R_{б} + (1 + \beta) R_k} =$$

$$= \frac{24 \cdot 50 \cdot 10^3 - (1 + 19) \cdot 10 \cdot 10^3 \cdot (50 \cdot 10^3 \cdot 10 \cdot 10^{-6} - 0,7)}{50 \cdot 10^3 + (1 + 19) \cdot 10 \cdot 10^3} = 4,96 \text{ В.}$$

Задание 26. Определить напряжение $U_{кэ}$ при температуре $T = 50^\circ \text{С}$ транзистора в схеме рис. 2.10, если $E_k = 20 \text{ В}$, $R_{б} = 200 \text{ кОм}$, $R_k = 2 \text{ кОм}$, $\beta = 49$, $I_{кб0}(T) = I_{кб0}(T_0) \exp(0,08 \cdot (T - T_0))$, $I_{кб0}(T_0) = 10 \text{ кОм}$, $T_0 = 25^\circ \text{С}$.

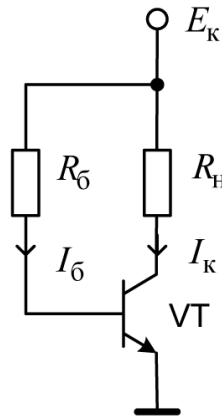


Рис. 2.10 – Цепь смещения биполярного транзистора с фиксированным током базы

Решение. Для транзистора в режиме насыщения можно принять $U_{бэ} \approx 0,7 \text{ В}$, $U_{кэ, \text{нас}} \approx 0,3 \text{ В}$. Тогда ток базы на границе насыщения:

$$I_{б, \text{нас}} = \frac{I_{к, \text{нас}}}{\beta} = \frac{E_k - U_{кэ, \text{нас}}}{\beta R_k} = \frac{20 - 0,3}{49 \cdot 2 \cdot 10^3} = 0,2 \cdot 10^{-3} \text{ А.}$$

Ток базы транзистора в схеме рис. 2.10:

$$I_{б} = \frac{E_k - U_{бэ}}{R_{б}} = \frac{20 - 0,7}{200 \cdot 10^3} = 0,096 \cdot 10^{-3} \text{ А.}$$

Поскольку $I_{б} < I_{б, \text{нас}}$, транзистор работает в нормальном активном режиме и ток коллектора определяется выражением:

$$I_k = \beta I_{б} + (1 + \beta) I_{кб0}(T) = \beta I_{б} + (1 + \beta) I_{кб0}(T_0) \exp(0,08 \cdot (T - T_0)) =$$

$$= 49 \cdot 0,096 \cdot 10^{-3} + (1 + 49) \cdot 10 \cdot 10^{-6} \cdot \exp(0,08 \cdot (50 - 25)) = 8,4 \cdot 10^{-3} \text{ А.}$$

Напряжение коллектор-эмиттер:

$$U_{кэ} = E_k - R_k I_k = 20 - 2 \cdot 10^3 \cdot 8,4 \cdot 10^{-3} = 3,2 \text{ В.}$$

Задание 27. Определить частоту, на которой модуль коэффициента усиления $|k_U|$ уменьшится в два раза за счет влияния емкости C_k , если транзистор работает в схеме с общей базой, $r_э = 40 \text{ Ом}$, $r_{б} = 200 \text{ Ом}$, $r_k = 200 \text{ кОм}$, $C_k = 20 \text{ пФ}$, $R_k = 2 \text{ кОм}$.

Решение. Влияние емкости C_k коллекторного перехода проявляется в зависимости параметра h_{226} от частоты.

В результате операторное изображение коэффициента усиления по напряжению принимает вид

$$k_{U.OB}(p) \approx -\frac{h_{216}R_H}{h_{116}} \cdot \frac{1}{1 + R_H h_{226}(p)},$$

где $h_{226}(p) = 1/(r_6 + z_k(p)) \approx 1/z_k(p) = 1/r_k + pC_k$; $h_{216} \approx \alpha$; $h_{116} \approx r_3 + r_6(1 - \alpha)$.

Таким образом,

$$k_{U.OB}(p) \approx \frac{\alpha R_H}{(r_3 + r_6(1 - \alpha)) \left(1 + \frac{R_H}{r_k}\right)} \cdot \frac{1}{1 + pC_k \frac{R_H r_k}{R_H + r_k}} = \frac{k_{U.OB}}{1 + p\tau_k},$$

где $k_{U.OB} = \alpha R_H / (r_3 + r_6(1 - \alpha)) (1 + R_H / r_k)$ — коэффициент усиления на низких частотах; $\tau_k = C_k R_H r_k / (R_H + r_k)$ — постоянная времени.

Модуль коэффициента усиления определяется выражением:

$$|k_{U.OB}(\omega)| \approx \frac{k_{U.OB}}{\sqrt{1 + \omega^2 \tau_k^2}}.$$

Из условия $|k_{U.OB}(\omega)| = k_{U.OB}/2$ находим $\sqrt{1 + \omega^2 \tau_k^2} = 2$, поэтому

$$\omega = \frac{\sqrt{3}}{\tau_k} = \frac{\sqrt{3}}{C_k} \left(\frac{1}{r_k} + \frac{1}{R_H} \right) = \frac{\sqrt{3}}{20 \cdot 10^{-12}} \cdot \left(\frac{1}{200 \cdot 10^3} + \frac{1}{2 \cdot 10^3} \right) = 43,7 \cdot 10^6 \text{ рад/с.}$$

$$\text{Тогда } f = \frac{\omega}{2\pi} = \frac{43,7 \cdot 10^6}{2 \cdot 3,14} = 6,96 \cdot 10^6 \text{ Гц.}$$

Задание 28. Определить модуль коэффициента передачи тока эмиттера $|h_{216}|$ на частоте 10 МГц и частоту, на которой модуль коэффициента передачи тока эмиттера уменьшается до 0,6, если коэффициент передачи тока эмиттера на низких частотах $h_{2160} = -0,96$, а его предельная частота $f_{h216} = 5 \text{ МГц}$.

Решение. Амплитудно-частотная характеристика коэффициента передачи тока эмиттера определяется выражением

$$|h_{216}(f)| = \frac{|h_{2160}|}{\sqrt{1 + \left(\frac{f}{f_{h216}}\right)^2}},$$

откуда:

$$|h_{216}| = \frac{|-0,96|}{\sqrt{1 + \left(\frac{10 \cdot 10^6}{5 \cdot 10^6}\right)^2}} = 0,43,$$

$$f = f_{h216} \sqrt{\left|\frac{h_{2160}}{h_{216}}\right|^2 - 1} = 5 \cdot 10^6 \cdot \sqrt{\left|\frac{0,96}{0,6}\right|^2 - 1} = 6,24 \cdot 10^6 \text{ Гц.}$$

Задание 29. Определить напряжение отсечки полевого транзистора с управляющим p - n -переходом и каналом n -типа, а также напряжение затвор-исток, при котором сопротивление сток-исток $R_{си} = 200$ Ом. Удельная проводимость канала $\sigma = 20,9$ См/м, конструктивная толщина канала $w = 6$ мкм, подвижность электронов $\mu_n = 0,13$ м²/В·с, относительная диэлектрическая проницаемость материала канала $\epsilon = 12$, сопротивление сток-исток $R_{си0} = 50$ Ом при напряжении $U_{зи} = 0$.

Решение. Из выражения для удельной проводимости канала n -типа $\sigma = q_e \mu_n N_D$ определим концентрацию донорной примеси:

$$N_D = \frac{\sigma}{q_e \mu_n} = \frac{20,9}{1,6 \cdot 10^{-19} \cdot 0,13} = 10^{21} \text{ м}^{-3}.$$

Тогда напряжение отсечки:

$$U_{отс} = \frac{q_e N_D w^2}{2 \epsilon \epsilon_0} = \frac{1,6 \cdot 10^{-19} \cdot 10^{21} \cdot (6,0 \cdot 10^{-6})^2}{2 \cdot 12 \cdot 8,85 \cdot 10^{-12}} = 10 \text{ В}.$$

Величина сопротивления $R_{си} = 200$ Ом свидетельствует о работе транзистора в крутой области выходных характеристик. В этой области полевой транзистор с управляющим p - n -переходом можно представить резистором, сопротивление которого определяется выражением:

$$R_{си} = \frac{R_{си0}}{1 - \sqrt{\frac{|U_{зи}|}{U_{отс}}}},$$

откуда

$$|U_{зи}| = U_{отс} \left(1 - \frac{R_{си0}}{R_{си}} \right)^2 = 10 \cdot \left(1 - \frac{50}{200} \right)^2 = 5,63 \text{ В}.$$

Поскольку рассматривается полевой транзистор с каналом n -типа, то

$$U_{зи} = -5,63 \text{ В}.$$

Задание 30. Определить коэффициент усиления по напряжению схемы усиления электрических сигналов с общим истоком, если используется полевой транзистор с управляющим p - n -переходом, $I_{с.нач} = 2$ мА, $S_{нач} = 2$ мА/В, $R_H = 10$ кОм, $U_{зи} = \{-1 \text{ В}; -0,5 \text{ В}; 0 \text{ В}\}$.

Решение. Найдем напряжение отсечки

$$U_{зи.отс} = \frac{2I_{с.нач}}{S_{нач}} = \frac{2 \cdot 2 \cdot 10^{-3}}{2 \cdot 10^{-3}} = 2 \text{ В}.$$

При $U_{зи} = -1$ В:

$$S = S_{нач} \left(1 - \frac{|U_{зи}|}{U_{зи.отс}} \right) = 2 \cdot 10^{-3} \cdot \left(1 - \frac{1}{2} \right) = 1 \cdot 10^{-3} \text{ А/В},$$

$$|k_U| = SR_H = 1 \cdot 10^{-3} \cdot 10 \cdot 10^3 = 10.$$

При $U_{зи} = -0,5$ В:

$$S = S_{нач} \left(1 - \frac{|U_{зи}|}{U_{зи.отс}} \right) = 2 \cdot 10^{-3} \cdot \left(1 - \frac{0,5}{2} \right) = 1,5 \cdot 10^{-3} \text{ А/В},$$

$$|k_U| = SR_H = 1,5 \cdot 10^{-3} \cdot 10 \cdot 10^3 = 15.$$

При $U_{зи} = 0$ В:

$$S = S_{нач} \left(1 - \frac{|U_{зи}|}{U_{зи.отс}} \right) = 2 \cdot 10^{-3} \cdot \left(1 - \frac{0}{2} \right) = 2 \cdot 10^{-3} \text{ А/В},$$

$$|k_U| = SR_H = 2 \cdot 10^{-3} \cdot 10 \cdot 10^3 = 20.$$

Задание 31. Определить ток стока, крутизну и начальную крутизну полевого транзистора с управляющим p - n -переходом и каналом n -типа, если $I_{с.нач} = 1$ мА, $U_{зи.отс} = 4$ В, $U_{зи} = -2$ В.

Решение. Ток стока определяется выражением:

$$I_c = I_{с.нач} \left(1 - \frac{|U_{зи}|}{U_{зи.отс}} \right)^2 = 1 \cdot 10^{-3} \cdot \left(1 - \frac{2}{4} \right)^2 = 0,25 \cdot 10^{-3} \text{ А}.$$

Начальная крутизна полевого транзистора:

$$S_{нач} = \frac{2I_{с.нач}}{U_{зи.отс}} = \frac{2 \cdot 1 \cdot 10^{-3}}{4} = 0,5 \cdot 10^{-3} \text{ А/В}.$$

Тогда крутизна полевого транзистора:

$$S = S_{нач} \left(1 - \frac{|U_{зи}|}{U_{зи.отс}} \right) = 0,5 \cdot 10^{-3} \cdot \left(1 - \frac{2}{4} \right) = 0,25 \cdot 10^{-3} \text{ А/В}.$$

Задание 32. Определить крутизну МДП-транзистора с каналом n -типа в режиме насыщения, если ширина затвора $Z = 0,8$ мм, длина канала $L = 5$ мкм, толщина подзатворного диэлектрика $d_d = 150$ нм, подвижность электронов в канале $\mu_n = 0,02$ м²/В·с, относительная диэлектрическая проницаемость подзатворного диэлектрика $\epsilon = 3,7$, $U_{си.нас} = 8$ В.

Решение. В режиме насыщения передаточная характеристика МДП-транзистора с каналом n -типа:

$$I_c = \frac{k}{2} (U_{зи} - U_{пор})^2,$$

$k = Z\mu_n C_d / L$ — удельная крутизна транзистора; $C_d = \epsilon_0 \epsilon / d_d$ — удельная емкость затвора.

Тогда:

$$\begin{aligned} S &= \frac{\partial I_c}{\partial U_{зи}} = k (U_{зи} - U_{пор}) = k U_{си.нас} = \frac{Z\mu_n \epsilon_0 \epsilon}{L d_d} U_{си.нас} = \\ &= \frac{0,8 \cdot 10^{-3} \cdot 0,02 \cdot 8,85 \cdot 10^{-12} \cdot 3,7}{5 \cdot 10^{-6} \cdot 150 \cdot 10^{-9}} \cdot 8 = 5,6 \cdot 10^{-3} \text{ А/В}. \end{aligned}$$

Задание 33. Определить сопротивление термистора из собственного кремния при температуре $T = 325$ К, если при температуре $T = 300$ К сопротивление термистора $R_1 = 600$ Ом.

Решение. Температурная характеристика термистора определяется выражением: $R = R_{\infty} \exp(B/T)$, где B — коэффициент температурной чувствительности; R_{∞} — коэффициент, который зависит от материала и размеров термистора.

В первом приближении для коэффициента температурной чувствительности справедлива аппроксимация:

$$B = \frac{\Delta E_g}{2k},$$

где ΔE_g — ширина запрещенной зоны полупроводника; k — постоянная Больцмана. Тогда

$$\begin{aligned} R_2 &= R_1 \exp\left(\frac{\Delta E_g}{2k} \left(\frac{1}{T_2} - \frac{1}{T_1}\right)\right) = \\ &= 600 \cdot \exp\left(\frac{1,12 \cdot 1,6 \cdot 10^{-19}}{2 \cdot 1,38 \cdot 10^{-23}} \cdot \left(\frac{1}{325} - \frac{1}{300}\right)\right) = 113,5 \text{ Ом}. \end{aligned}$$

Задание 34. Определить подвижность носителей заряда в образце полупроводника p -типа длиной $l = 30$ мм, шириной $a = 5$ мм и толщиной $b = 1$ мм, если сопротивление образца $R = 500$ Ом, сила тока $I = 10$ мА, индукция магнитного поля $B = 0,5$ Тл, ЭДС Холла $U_X = 5$ мВ. Силовые линии магнитного поля направлены перпендикулярно плоскости пластины полупроводника.

Решение. Подвижность носителей заряда в полупроводнике p -типа определяется выражением:

$$\mu_p = \frac{\sigma}{q_e p},$$

где p — концентрация дырок.

Удельная проводимость образца полупроводника:

$$\sigma = \frac{l}{Rab} = \frac{30 \cdot 10^{-3}}{500 \cdot 5 \cdot 10^{-3} \cdot 1 \cdot 10^{-3}} = 12 \frac{1}{\text{Ом} \cdot \text{м}}.$$

Знаменатель выражения для определения подвижности найдем, используя соотношения для коэффициента Холла:

$$X = \frac{1}{q_e \cdot p} = \frac{U_X \cdot b}{I \cdot B}.$$

Таким образом,

$$\mu_p = \sigma X = \sigma \frac{U_X \cdot b}{I \cdot B} = 12 \frac{5 \cdot 10^{-3} \cdot 1 \cdot 10^{-3}}{10 \cdot 10^{-3} \cdot 0,5} = 12 \cdot 10^{-3} \text{ м}^2/\text{В} \cdot \text{с}.$$

2.3 Примеры выполнения типовых заданий текстовой контрольной работы

Расчет полевого транзистора с управляющим p - n -переходом

Технические требования: материал — кремний; канал n -типа электропроводности; количество затворов — 2; толщина канала $a = 1$ мкм, ширина канала $Z = 500$ мкм, длина канала $L = 25$ мкм; концентрация донорной примеси в канале $N_D = 6 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}$, концентрация акцепторной примеси в p -областях затворов $N_A = 1 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$; рабочая температура $T = 300$ К.

Расчет транзистора предполагает определение сопротивления открытого канала $R_{си0}$, напряжения отсечки $U_{зи.отс}$, емкости затвора $C_{зи}$, максимальной рабочей частоты f_{max} , начального тока стока $I_{с.нач}$, напряжения насыщения $U_{си.нас}$, крутизны передаточной характеристики S и построение статических вольт-амперных характеристик. Структура транзистора представлена на рис. 2.11.

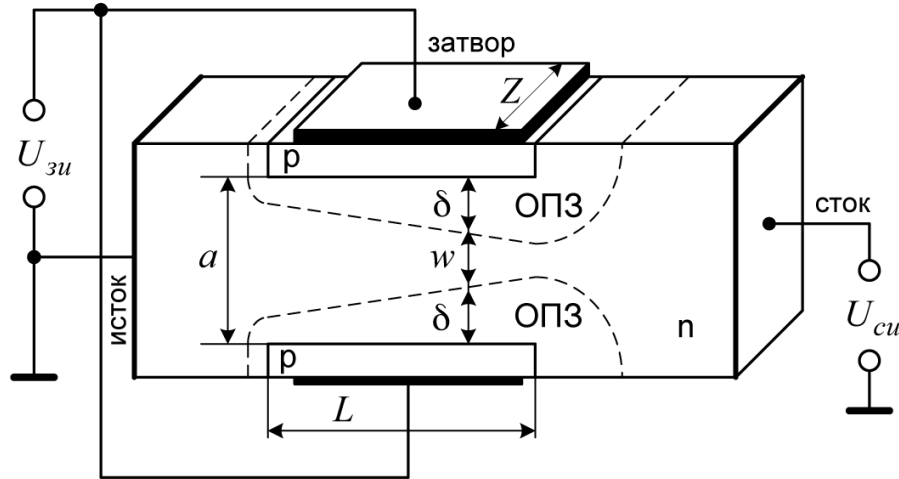


Рис. 2.11 – Структура полевого транзистора с управляющим p - n -переходом и двумя затворами

По графику (рис. А.5) находим удельное сопротивление канала $\rho_n = 1$ Ом·см. Тогда сопротивление открытого канала определяется выражением

$$R_{си0} = \frac{1 \cdot 10^{-2} \cdot 25 \cdot 10^{-6}}{1 \cdot 10^{-6} \cdot 500 \cdot 10^{-6}} = 500 \text{ Ом.}$$

Контактная разность потенциалов управляющего p - n -перехода

$$\phi_k = \frac{kT}{q_e} \ln \frac{N_D N_A}{n_i^2} = \frac{1,38 \cdot 10^{-23} \cdot 300}{1,6 \cdot 10^{-19}} \ln \frac{6 \cdot 10^{15} \cdot 1 \cdot 10^{18}}{(1,6 \cdot 10^{10})^2} = 0,8 \text{ В.}$$

Из-за наличия двух управляющих переходов напряжение отсечки находится по формуле

$$U_{зк.отс} = \frac{q_e N_D a^2}{8 \epsilon \epsilon_0} - \phi_k = \frac{1,6 \cdot 10^{-19} \cdot 6 \cdot 10^{15} (1 \cdot 10^{-4})^2}{8 \cdot 12 \cdot 8,85 \cdot 10^{-14}} - 0,8 = 1,5 \text{ В.}$$

Емкость затвора рассчитаем как барьерную емкость резкого p - n -перехода при напряжении на затворе $U_{зи} = 0$:

$$\begin{aligned} C_{зи} &= S \sqrt{\frac{q_e \epsilon \epsilon_0 N_D}{2 \phi_k}} = ZL \sqrt{\frac{q_e \epsilon \epsilon_0 N_D}{2 \phi_k}} = \\ &= 500 \cdot 10^{-4} \cdot 25 \cdot 10^{-4} \cdot \sqrt{\frac{1,6 \cdot 10^{-19} \cdot 12 \cdot 8,85 \cdot 10^{-14} \cdot 6 \cdot 10^{15}}{2 \cdot 0,8}} = 3,15 \text{ пФ.} \end{aligned}$$

Использование выражения для резкого перехода допустимо в случае сплавной технологии образования затвора или в случае неглубокой диффузии, когда велик градиент концентрации примеси в p - n -переходе.

Максимальная рабочая частота

$$f_{\max} = \frac{1}{2\pi C_{\text{зи}} R_{\text{си}0}} = \frac{1}{2 \cdot 3,14 \cdot 500 \cdot 3,15 \cdot 10^{-12}} = 1 \cdot 10^8 \text{ Гц.}$$

Начальный ток стока:

$$I_{\text{с. нач}} = \frac{U_{\text{зи. отс}}}{3R_{\text{си}0}} = \frac{1,5}{3 \cdot 500} = 1 \cdot 10^{-3} \text{ А.}$$

Крутизну полевого транзистора вычисляем по формуле:

$$S = \frac{1}{R_{\text{си}0}} \left(1 - \sqrt{\frac{|U_{\text{зи}}|}{U_{\text{зи. отс}}}} \right).$$

Начальная крутизна

$$S_{\text{нач}} = S|_{U_{\text{зи}}=0} = \frac{1}{R_{\text{си}0}} = \frac{1}{500} = 2 \cdot 10^{-3} \text{ А/В.}$$

Семейство передаточных статических характеристик (рис. 2.12) определяется выражением

$$I_{\text{с}} = \begin{cases} \frac{1}{R_{\text{си}0}} \left[U_{\text{си}} + \frac{2}{3} \cdot \frac{|U_{\text{зи}}|^{3/2} - (|U_{\text{зи}}| + U_{\text{си}})^{3/2}}{U_{\text{зи. отс}}^{1/2}} \right], & U_{\text{си}} \leq U_{\text{си. нас}}, \\ \frac{1}{R_{\text{си}0}} \left[\frac{1}{3} U_{\text{зи. отс}} - |U_{\text{зи}}| \left(1 - \frac{2}{3} \sqrt{\frac{|U_{\text{зи}}|}{U_{\text{зи. отс}}}} \right) \right], & U_{\text{си}} > U_{\text{си. нас}}. \end{cases}$$

Семейство выходных статических характеристик (рис. 2.13) определяется выражением

$$I_{\text{с}} = \begin{cases} \frac{1}{R_{\text{си}0}} \left[U_{\text{си}} + \frac{2}{3} \frac{|U_{\text{зи}}|^{3/2} - (|U_{\text{зи}}| + U_{\text{си}})^{3/2}}{U_{\text{зи. отс}}^{1/2}} \right], & U_{\text{си}} \leq U_{\text{си. нас}}, \\ \frac{1}{R_{\text{си}0} (U_{\text{зи}}, U_{\text{си}})} \left[U_{\text{си. нас}} + \frac{2}{3} \frac{|U_{\text{зи}}|^{3/2} - (U_{\text{зи. отс}})^{3/2}}{U_{\text{зи. отс}}^{1/2}} \right], & U_{\text{си}} > U_{\text{си. нас}}, \end{cases}$$

$$\text{где } R_{\text{си}0} (U_{\text{зи}}, U_{\text{си}}) = R_{\text{си}0} \left(1 - \frac{1}{L} \sqrt{\frac{2\varepsilon\varepsilon_0}{q_e N_{\text{д}}}} (U_{\text{си}} - U_{\text{си. нас}}) \right).$$

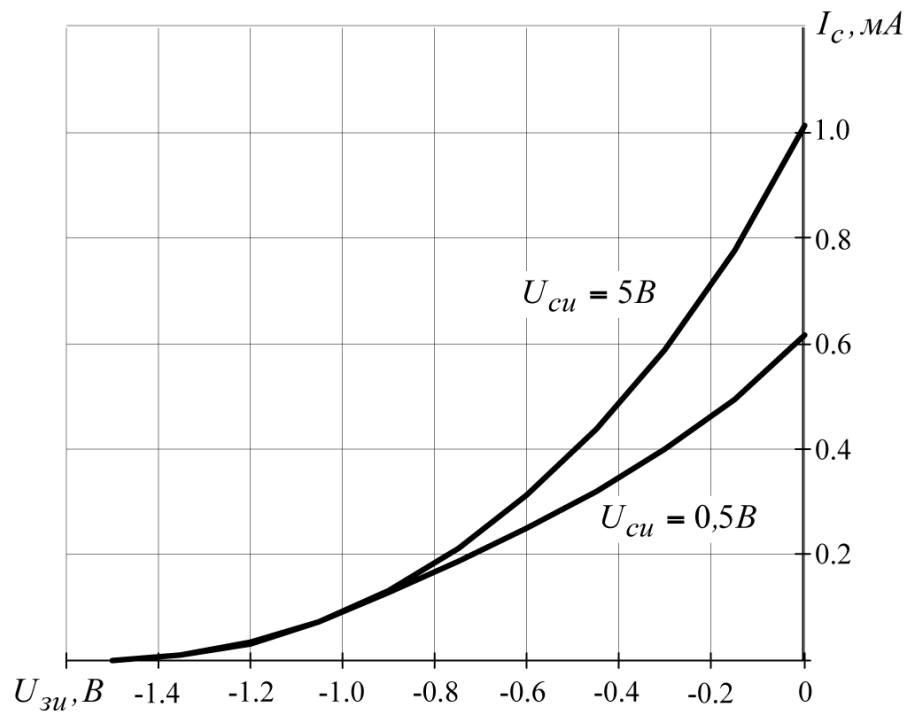


Рис. 2.12 – Семейство передаточных характеристик

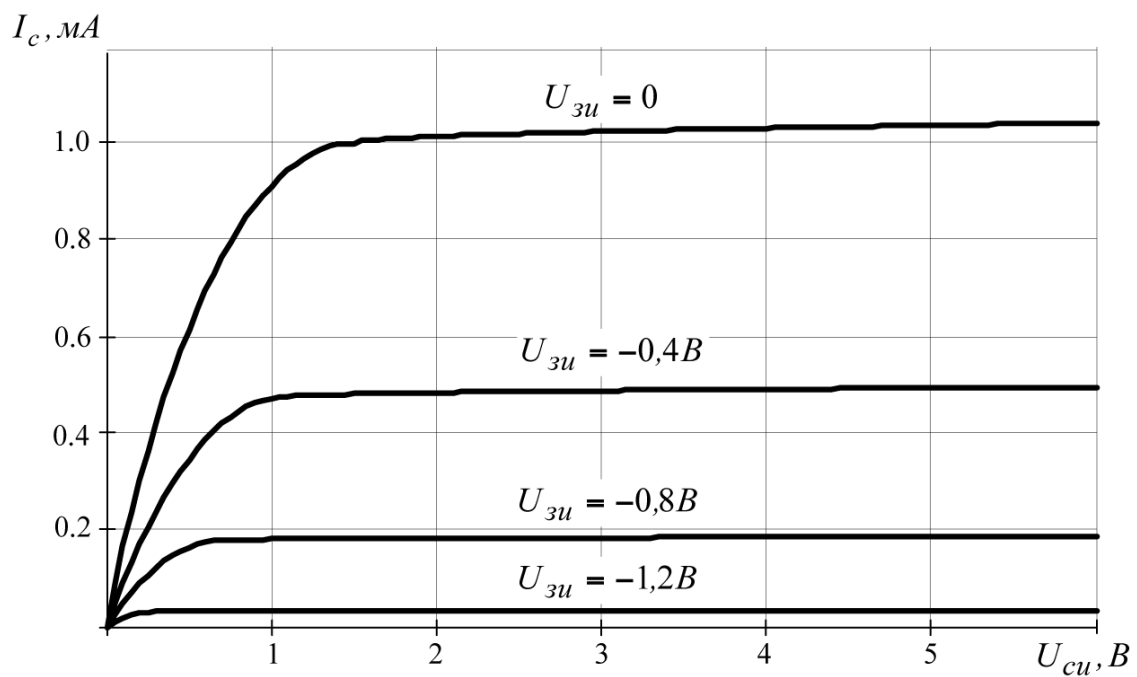


Рис. 2.13 – Семейство выходных характеристик

Расчет полевого транзистора с изолированным затвором.

Технические требования: полупроводник — кремний; материал затвора — алюминий; подзатворный диэлектрик — диоксид кремния; канал индуцированный p -типа электропроводности; толщина подзатворного диэлектрика $d = 0,1$ мкм, ширина канала $Z = 500$ мкм, длина канала $L = 5$ мкм; концентрация акцепторной примеси $N_A = 3 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$, плотность поверхностных зарядов $N_{\text{пов}} = 2 \cdot 10^{11} \text{ см}^{-2}$, подвижность электронов в канале $\mu_n = 600 \text{ см}^2/\text{В} \cdot \text{с}$, контактная разность потенциалов МДП-структуры $\phi_{\text{МДП}} = -0,95 \text{ В}$, относительная диэлектрическая проницаемость диоксида кремния $\epsilon_d = 4$; рабочая температура $T = 300 \text{ К}$.

Расчет транзистора предполагает определение порогового напряжения $U_{\text{пор}}$, емкости затвор-канал $C_{\text{зк}}$; построение статической передаточной характеристики и определение ее крутизны в области насыщения; построение семейства статических выходных характеристик; определение максимальной рабочей частоты f_{max} .

Структура транзистора представлена на рис. 2.14.

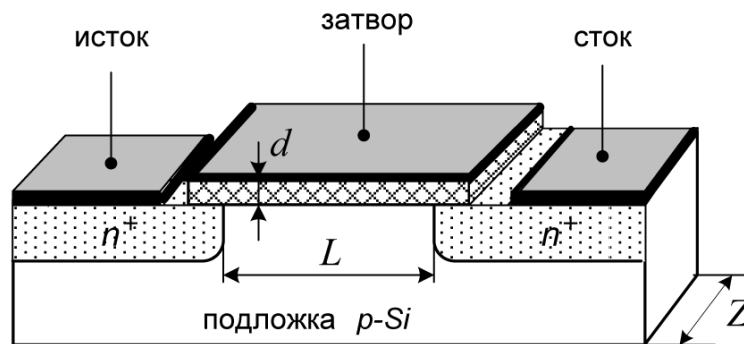


Рис. 2.14 – Структура МДП-транзистора с индуцированным каналом n -типа

Удельная емкость между затвором и подложкой определяется по формуле

$$C_D = \frac{\epsilon_0 \epsilon_d}{d} = \frac{8,85 \cdot 10^{-12} \cdot 4}{0,1 \cdot 10^{-6}} = 3,54 \cdot 10^{-4} \text{ Ф/м}^2 = 3,54 \cdot 10^{-8} \text{ Ф/см}^2.$$

Находим равновесный удельный поверхностный заряд:

$$\sigma_s = q_e N_{\text{пов}} = 1,6 \cdot 10^{-19} \cdot 2 \cdot 10^{11} = 3,2 \cdot 10^{-8} \text{ Кл/см}^2.$$

Напряжение спрямления энергетических зон (напряжение на затворе, при котором приповерхностный слой полупроводниковой подложки находится в состоянии плоских зон):

$$U_{\text{спр}} = \phi_k - \frac{\sigma_s}{C_D} = -0,95 - \frac{3,2 \cdot 10^{-8}}{3,54 \cdot 10^{-8}} = -1,85 \text{ В}.$$

Потенциал уровня Ферми относительно середины запрещенной зоны (потенциал Ферми) с учетом зависимости собственной концентрации носителей заряда от температуры:

$$\phi_v = \frac{kT}{q_e} \ln \frac{N_A}{n_i} = \frac{1,38 \cdot 10^{-23} \cdot 300}{1,6 \cdot 10^{-19}} \ln \frac{3 \cdot 10^{16}}{1,6 \cdot 10^{10}} = 0,36 \text{ В}.$$

Определяем пороговое напряжение

$$U_{\text{пор}} = U_{\text{спр}} + 2\phi_v + \frac{\sqrt{2q\epsilon\epsilon_0\epsilon_{\text{п}}N_A}}{C_d}\sqrt{2\phi_v} =$$

$$= -1,85 + 2 \cdot 0,36 + \frac{\sqrt{2 \cdot 1,6 \cdot 10^{-19} \cdot 8,85 \cdot 10^{-14} \cdot 4 \cdot 3 \cdot 10^{16} \cdot 2 \cdot 0,36}}{3,54 \cdot 10^{-8}} = 1,3 \text{ В.}$$

Удельная крутизна:

$$k = \frac{Z\mu_n C_d}{L} = \frac{500 \cdot 10^{-4} \cdot 600 \cdot 3,54 \cdot 10^{-8}}{5 \cdot 10^{-4}} = 2,12 \cdot 10^{-3} \text{ А/В}^2.$$

Статические вольт-амперные характеристики (рис. 2.15, 2.16) рассчитаем, используя соотношения

$$I = \begin{cases} 0, & U_{\text{зи}} < U_{\text{пор}}, \\ k \left[(U_{\text{зи}} - U_{\text{пор}}) U_{\text{си}} - \frac{U_{\text{си}}^2}{2} \right], & U_{\text{зи}} \geq U_{\text{пор}}, U_{\text{си}} < U_{\text{си.нас}}, \\ \frac{k}{2} [U_{\text{зи}} - U_{\text{пор}}]^2, & U_{\text{зи}} \geq U_{\text{пор}}, U_{\text{си}} \geq U_{\text{си.нас}}, \end{cases}$$

где $k = Z\mu_n C_d / L$ — удельная крутизна МДП-транзистора; $U_{\text{си.нас}} = U_{\text{зи}} - U_{\text{пор}}$ — напряжение насыщения.

Емкость затвор-канала рассчитывается по формуле:

$$C_{\text{зк}} = \frac{\epsilon_0 \epsilon_d ZL}{d} = C_d ZL = 3,54 \cdot 10^{-8} \cdot 500 \cdot 10^{-4} \cdot 5 \cdot 10^{-4} \approx 8,8 \cdot 10^{-13} \text{ Ф.}$$

Крутизну МДП-транзистора в области насыщения определяем по формуле:

$$S = k (U_{\text{зи}} - U_{\text{пор}}).$$

При $U_{\text{зи}} = 2U_{\text{пор}} : S = 2,12 \cdot 10^{-3} \cdot 1,3 = 2,76 \cdot 10^{-3} \text{ А/В.}$

Максимальную рабочую частоту определяем по формуле:

$$f_{\text{max}} = \frac{S}{2\pi C_{\text{зк}}} = \frac{2,76 \cdot 10^{-3}}{2 \cdot 3,14 \cdot 8,8 \cdot 10^{-13}} = 5 \cdot 10^8 \text{ Гц.}$$

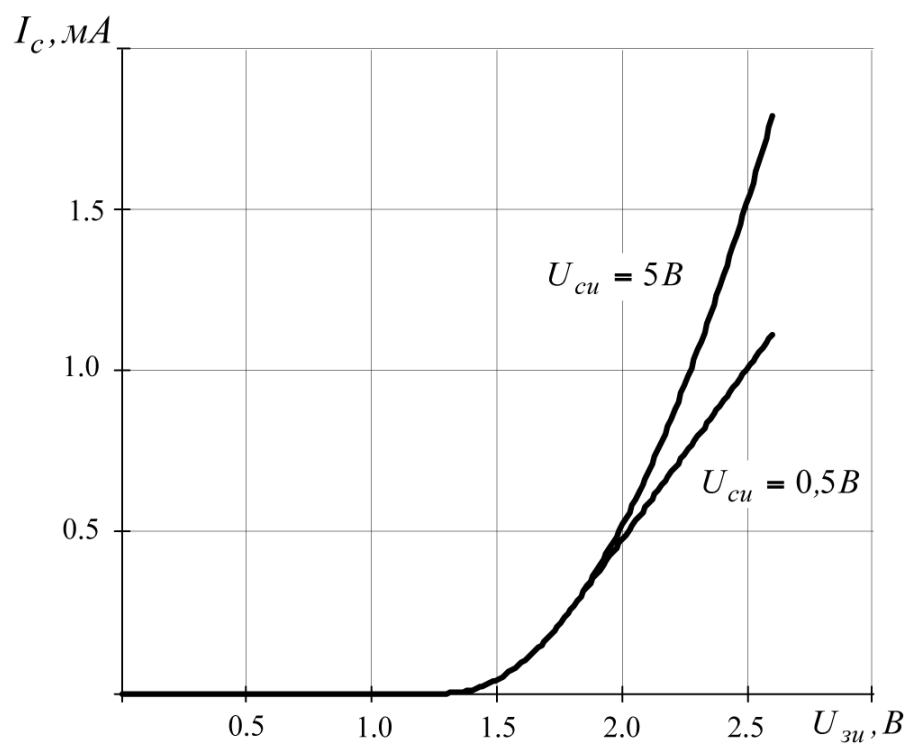


Рис. 2.15 – Семейство передаточных характеристик МДП-транзистора с индуцированным каналом n -типа

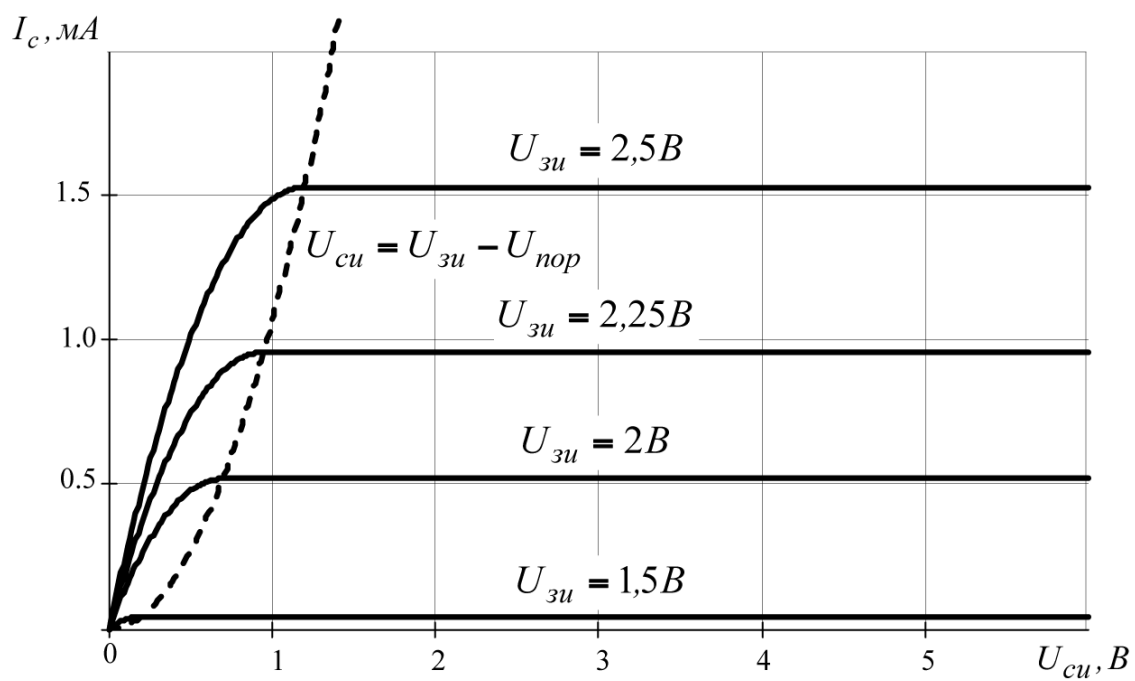


Рис. 2.16 – Семейство выходных характеристик МДП-транзистора с индуцированным каналом n -типа

Глава 3

МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ ПО ВЫПОЛНЕНИЮ ЛАБОРАТОРНЫХ РАБОТ

Рабочая программа по дисциплине предполагает выполнение двух виртуальных лабораторных работ.

Для выполнения лабораторных работ к конфигурации компьютерной техники предъявляются следующие системные требования:

- минимальные: процессор Pentium 2 — 333 MHz, ОЗУ 32 MB, видеокарта с 8 MB памяти, 10 MB свободного места на HDD, операционная система Windows98\2000\XP, монитор диагональю 15 дюймов с разрешением 1024×768 или 800×600;
- рекомендуемые: процессор Pentium 3 — 500 MHz, ОЗУ 128 MB, видеокарта с 32 MB памяти, 10 MB свободного места на HDD, операционная система Windows98\2000\XP, монитор диагональю 17 дюймов с разрешением 1024×768.

Лабораторная работа №1 предусматривает исследование статических характеристик биполярного транзистора в схемах с общей базой и общим эмиттером и определение статических коэффициентов передачи тока эмиттера и тока базы.

Лабораторная работа №2 предусматривает исследование статических характеристик полевого транзистора с управляющим *p-n*-переходом и определение крутизны.

Описание виртуального лабораторного комплекса, программа работ и требования к оформлению отчета приведены в виртуальной среде выполнения лабораторных работ.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Бурбаева Н. В. Сборник задач по полупроводниковой электронике / Н. В. Бурбаева, Т. С. Днепровская. — М. : ФИЗМАТЛИТ, 2004. — 168 с. — ISBN 5-9221-0402-0.
- [2] Воронков Э. Н. Твердотельная электроника. Практикум : учеб. пособие для студ. высш. учеб. заведений / Э. Н. Воронков. — М. : Издательский центр «Академия», 2010. — 128 с. ISBN 978-5-7695-4218-3.
- [3] Гуртов В. А. Твердотельная электроника : учеб. пособие / В. А. Гуртов. — М. : Техносфера, 2008. — 512 с. ISBN 978-5-94836-187-1.
- [4] Легостаев Н. С. Твердотельная электроника : учеб. пособие / Н. С. Легостаев, К. В. Четвергов. — Томск : Факультет дистанционного обучения, ТУСУР, 2011. — 268 с.
- [5] Терехов В. В. Задачник по электронным приборам : учеб. пособие / В. В. Терехов. — : 3-е изд. перераб. и доп. — М. : Лань, 2003. — 280 с. — ISBN 5-8114-0503-0.

ПРИЛОЖЕНИЕ А

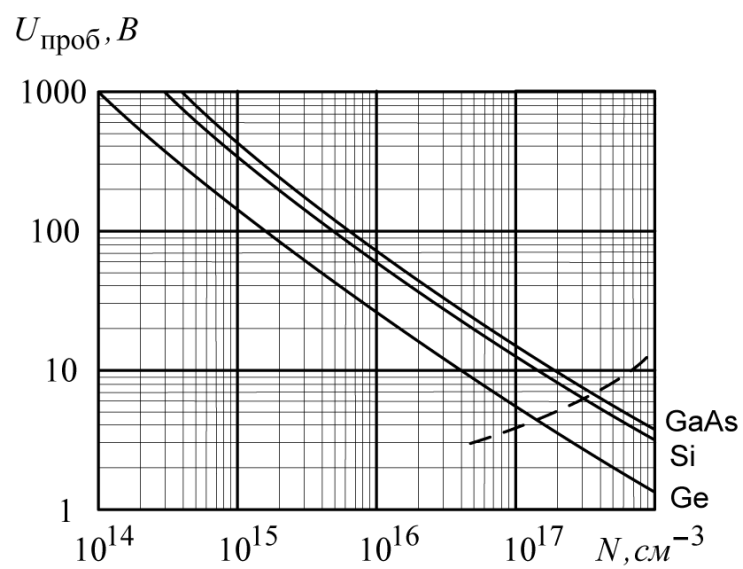


Рис. А.1 – Зависимость напряжения лавинного пробоя от концентрации примесей для резких p - n -переходов при температуре 300 К

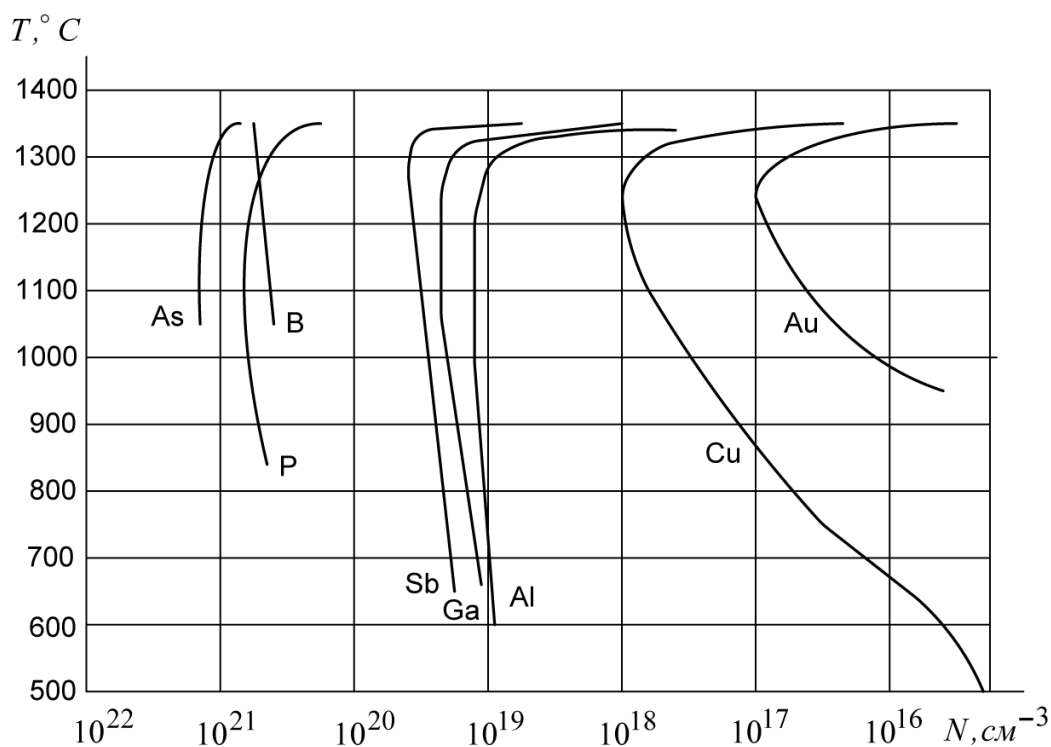


Рис. А.2 – Зависимость предельной растворимости примесных элементов в кремнии от температуры

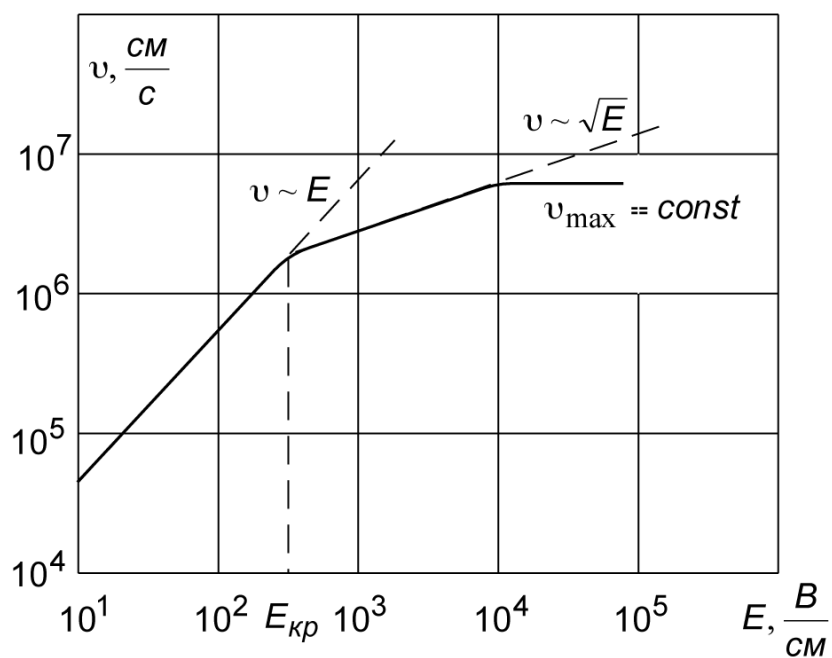


Рис. А.3 – Зависимость дрейфовой скорости носителей заряда от напряженности электрического поля

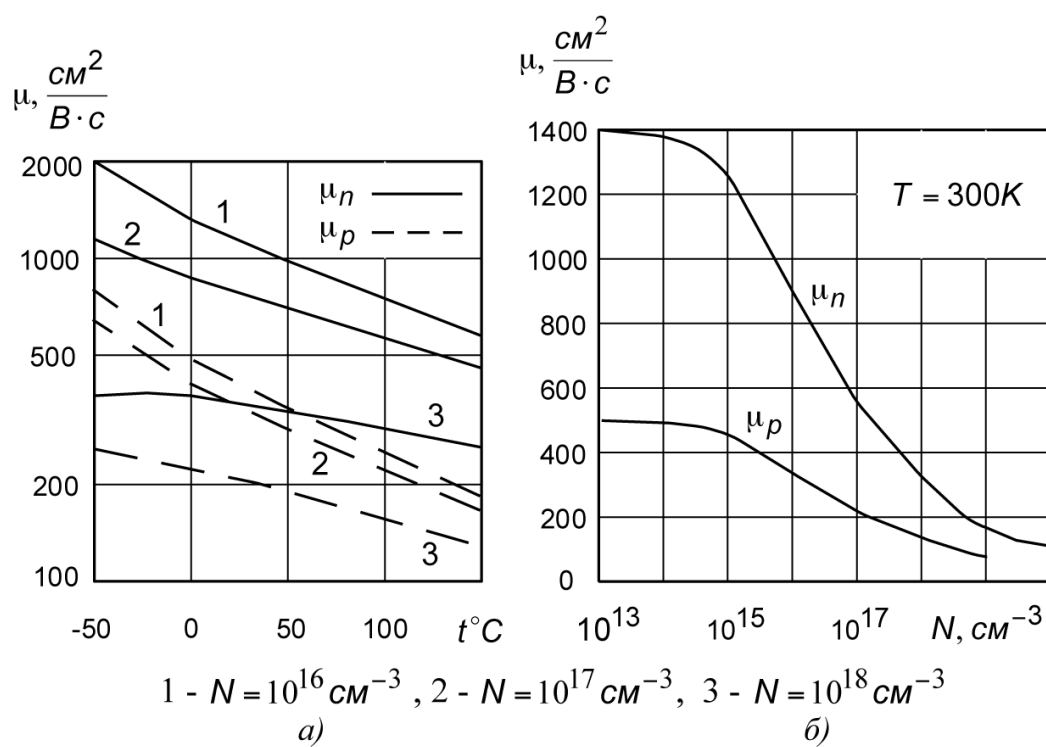


Рис. А.4 – Зависимость подвижности носителей заряда в кремнии от температуры при разных концентрациях примеси (а) и от концентрации примеси при $T = 300 \text{ K}$ (б)

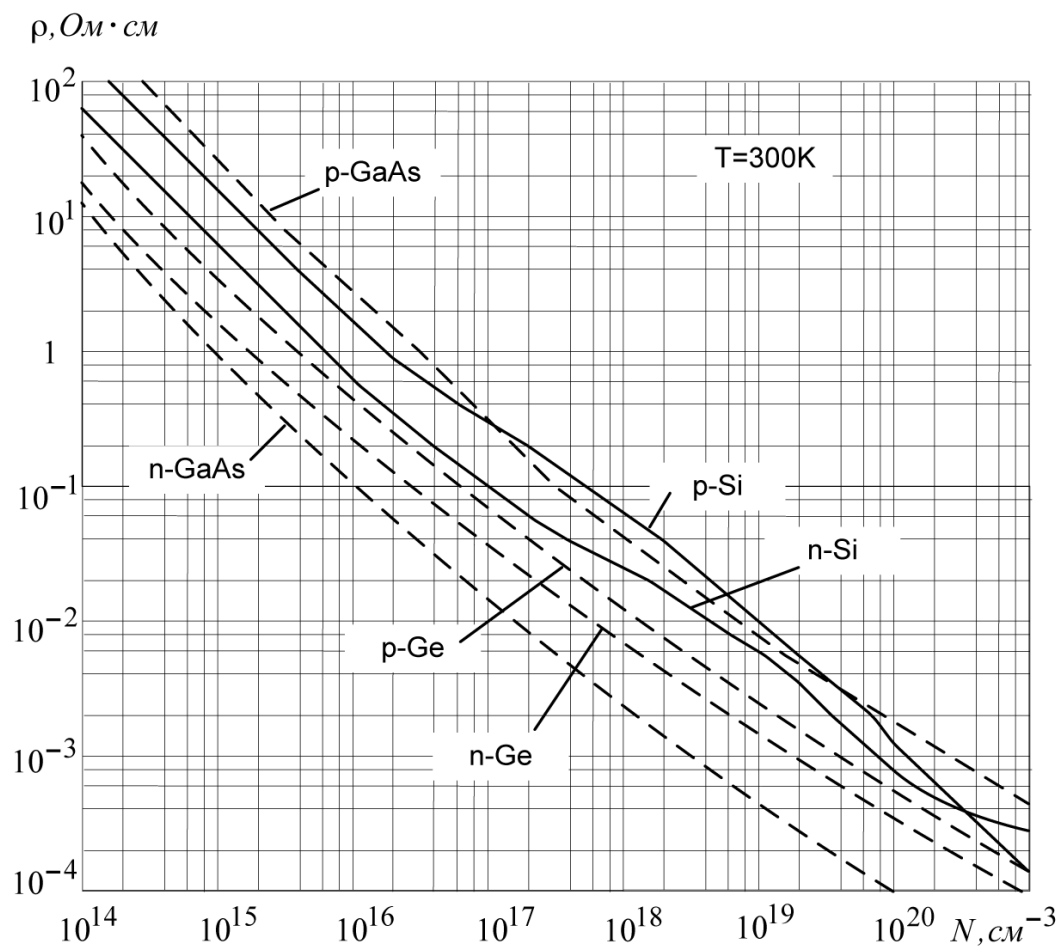


Рис. А.5 – Зависимость удельного сопротивления от концентрации примеси

Таблица А.1 – Физические параметры важнейших полупроводников

Параметр		Обозн.	Si	Ge	GaAs	InSb	4H-SiC	GaN
Ширина запрещенной зоны, эВ	300 К	ΔE_g	1,12	0,66	1,43	0,18	3,0	3,44
	0 К		1,21	0,80	1,56	0,23	3,1	3,50
Подвижность при 300 К, $\text{см}^2 \cdot \text{В}^{-1} \cdot \text{с}^{-1}$	электронов	μ_n	1500	3900	8500	78000	650	8500
		$T=77 \text{ К}$				$2,0 \cdot 10^5$		
	дырок	μ_p	600	1900	400	1700	300	400
		$T=77 \text{ К}$				5000		
Эффективная масса, m^*/m_0	электронов	m_n^*	1,08	0,56	0,068	0,013	0,60	0,19
	дырок	m_p^*	0,56	0,35	0,45	0,6	1,0	0,60
Эффективная плотность состояний в зоне проводимости, см^{-3}	$T=300 \text{ К}$	N_c	$2,8 \cdot 10^{19}$	$1,04 \cdot 10^{19}$	$4,7 \cdot 10^{17}$	$3,7 \cdot 10^{16}$	$1,2 \cdot 10^{19}$	$2,2 \cdot 10^{18}$
	$T=77 \text{ К}$		$3,6 \cdot 10^{18}$	$1,4 \cdot 10^{18}$	$5,8 \cdot 10^{16}$	$5,1 \cdot 10^{15}$	$1,5 \cdot 10^{18}$	$2,7 \cdot 10^{17}$
Эффективная плотность состояний в валентной зоне, см^{-3}	$T=300 \text{ К}$	N_v	$1,02 \cdot 10^{19}$	$6,11 \cdot 10^{17}$	$7,0 \cdot 10^{18}$	$1,16 \cdot 10^{19}$	$2,5 \cdot 10^{19}$	$1,2 \cdot 10^{19}$
	$T=77 \text{ К}$		$1,4 \cdot 10^{18}$	$6,9 \cdot 10^{18}$	$9,8 \cdot 10^{17}$	$1,5 \cdot 10^{18}$	$3,3 \cdot 10^{18}$	$1,5 \cdot 10^{18}$
Диэлектрическая постоянная		ϵ	11,8	16,0	13,2	17,7	10,2	12,2
Электронное сродство		χ	4,05	4,0	4,07	4,60	4,1	4,2
Собственная концентрация носителей, см^{-3}	$T=300 \text{ К}$	n_i	$1,6 \cdot 10^{10}$	$2,5 \cdot 10^{13}$	$1,1 \cdot 10^7$	$2,0 \cdot 10^{16}$	$1,1 \cdot 10^{-4}$	$9,2 \cdot 10^{-10}$
	$T=77 \text{ К}$		$3,0 \cdot 10^{-20}$	$1,4 \cdot 10^{-7}$	$2,8 \cdot 10^{-33}$	$1,2 \cdot 10^{10}$	$9,7 \cdot 10^{-84}$	$2,1 \cdot 10^{-95}$
Время жизни носителей, с		τ	$2,5 \cdot 10^{-3}$	$1,0 \cdot 10^{-3}$	$1,0 \cdot 10^{-4}$	$1,0 \cdot 10^{-8}$		
Постоянная решетки		a, b, c	5,43	5,65	5,65	6,48	0,308	0,318

Таблица А.2 – Варианты текстовой контрольной работы

Вариант	Тип транзистора*	Материал	Концентрация примеси, см ⁻³		Диэлектрик затвора	Толщина диэлектрика, мкм	Металл затвора	Канал				
			доноров	акцепторов				Подвижность, (μ · 10 ⁻²) см ² /В·с	Поверхностный заряд, см ⁻²	Длина, мкм	Ширина, мкм	Толщина, мкм
1	У	<i>n-Si</i>	1 · 10 ¹⁵	9 · 10 ¹⁸	—	—	—	—	—	10	32	1,0
2	У	<i>p-Si</i>	2 · 10 ¹⁵	7 · 10 ¹⁸	—	—	—	—	—	12	40	1,2
3	У	<i>n-Si</i>	4 · 10 ¹⁵	5 · 10 ¹⁸	—	—	—	—	—	14	42	1,4
4	У	<i>p-Si</i>	5 · 10 ¹⁵	3 · 10 ¹⁸	—	—	—	—	—	16	48	1,6
5	У	<i>n-Si</i>	8 · 10 ¹⁵	2 · 10 ¹⁸	—	—	—	—	—	18	50	1,8
6	У	<i>p-Si</i>	1 · 10 ¹⁶	1 · 10 ¹⁸	—	—	—	—	—	20	55	1,1
7	У	<i>n-Si</i>	2 · 10 ¹⁶	1 · 10 ¹⁹	—	—	—	—	—	22	75	2,0
8	У	<i>p-Si</i>	4 · 10 ¹⁶	2 · 10 ¹⁹	—	—	—	—	—	24	78	0,8
9	У	<i>n-GaAs</i>	5 · 10 ¹⁶	3 · 10 ¹⁹	—	—	—	—	—	25	80	1,0
10	У	<i>p-GaAs</i>	8 · 10 ¹⁶	5 · 10 ¹⁸	—	—	—	—	—	26	120	1,2
11	У	<i>n-GaAs</i>	1 · 10 ¹⁷	2 · 10 ¹⁹	—	—	—	—	—	10	240	1,4
12	У	<i>p-GaAs</i>	2 · 10 ¹⁷	1 · 10 ¹⁹	—	—	—	—	—	12	250	1,6
13	У	<i>n-GaAs</i>	1 · 10 ¹⁵	9 · 10 ¹⁸	—	—	—	—	—	14	300	1,8
14	У	<i>p-GaAs</i>	2 · 10 ¹⁵	7 · 10 ¹⁸	—	—	—	—	—	16	360	1,1
15	У	<i>n-GaAs</i>	4 · 10 ¹⁵	5 · 10 ¹⁸	—	—	—	—	—	18	400	2,0
16	У	<i>p-GaAs</i>	5 · 10 ¹⁵	3 · 10 ¹⁸	—	—	—	—	—	20	480	0,8
17	У	<i>n-InSb</i>	8 · 10 ¹⁵	2 · 10 ¹⁸	—	—	—	—	—	22	500	1,0
18	У	<i>p-InSb</i>	1 · 10 ¹⁶	1 · 10 ¹⁸	—	—	—	—	—	24	600	1,2
19	У	<i>n-InSb</i>	2 · 10 ¹⁶	1 · 10 ¹⁹	—	—	—	—	—	25	720	1,4
20	У	<i>p-InSb</i>	4 · 10 ¹⁶	2 · 10 ¹⁹	—	—	—	—	—	26	240	1,6
21	У	<i>n-InSb</i>	5 · 10 ¹⁶	3 · 10 ¹⁹	—	—	—	—	—	10	250	1,8
22	У	<i>p-InSb</i>	8 · 10 ¹⁶	2 · 10 ¹⁸	—	—	—	—	—	12	300	1,1
продолжение на следующей странице												

Таблица А.2 – Варианты текстовой контрольной работы. Продолжение

Вариант	Тип транзистора*	Материал	Концентрация примеси, см ⁻³		Диэлектрик затвора	Толщина диэлектрика, мкм	Металл затвора	Канал				
			доноров	акцепторов				Подвижность, (μ · 10 ⁻²) см ² /В·с	Поверхностный заряд, см ⁻²	длина, мкм	ширина, мкм	толщина, мкм
23	У	n-InSb	1 · 10 ¹⁷	2 · 10 ¹⁹	—	—	—	—	—	14	360	2,0
24	У	p-InSb	2 · 10 ¹⁷	1 · 10 ¹⁹	—	—	—	—	—	16	400	0,8
25	У	n-InAs	1 · 10 ¹⁵	9 · 10 ¹⁸	—	—	—	—	—	18	480	1,0
26	У	p-InAs	2 · 10 ¹⁵	7 · 10 ¹⁸	—	—	—	—	—	20	500	1,2
27	У	n-InAs	4 · 10 ¹⁵	5 · 10 ¹⁸	—	—	—	—	—	22	600	1,4
28	У	p-InAs	5 · 10 ¹⁵	3 · 10 ¹⁸	—	—	—	—	—	24	720	1,6
29	У	n-InAs	8 · 10 ¹⁵	2 · 10 ¹⁸	—	—	—	—	—	25	32	1,8
30	У	p-InAs	1 · 10 ¹⁶	1 · 10 ¹⁸	—	—	—	—	—	26	40	1,1
31	У	n-InAs	2 · 10 ¹⁶	1 · 10 ¹⁹	—	—	—	—	—	10	42	2,0
32	У	p-InAs	4 · 10 ¹⁶	2 · 10 ¹⁹	—	—	—	—	—	12	48	0,8
33	У	n-InP	5 · 10 ¹⁶	3 · 10 ¹⁹	—	—	—	—	—	14	50	1,0
34	У	p-InP	8 · 10 ¹⁶	2 · 10 ¹⁸	—	—	—	—	—	16	55	1,2
35	У	n-InP	1 · 10 ¹⁷	2 · 10 ¹⁹	—	—	—	—	—	18	75	1,4
36	У	p-InP	2 · 10 ¹⁷	1 · 10 ¹⁹	—	—	—	—	—	20	78	1,6
37	У	n-InP	1 · 10 ¹⁵	7 · 10 ¹⁸	—	—	—	—	—	22	80	1,8
38	У	p-InP	2 · 10 ¹⁵	5 · 10 ¹⁸	—	—	—	—	—	24	120	1,1
39	У	n-InP	4 · 10 ¹⁵	3 · 10 ¹⁸	—	—	—	—	—	25	500	2,0
40	У	p-InP	5 · 10 ¹⁵	2 · 10 ¹⁸	—	—	—	—	—	26	600	0,8
41	И	n-Si	1 · 10 ¹⁵		SiO ₂	0,1	Al	1,9	5 · 10 ¹¹	5	20	—
42	И	p-Si	2 · 10 ¹⁵		SiO ₂	0,12	Au	4,5	2 · 10 ¹¹	6	30	—
43	И	n-Si	4 · 10 ¹⁵		SiO ₂	0,14	Al	2,4	1 · 10 ¹¹	8	36	—
44	И	p-Si	5 · 10 ¹⁵		SiO ₂	0,15	Au	6,0	9 · 10 ¹⁰	9	50	—
продолжение на следующей странице												

Таблица А.2 – Варианты текстовой контрольной работы. Продолжение

Вариант	Тип транзистора*	Материал	Концентрация примеси, см ⁻³		Диэлектрик затвора	Толщина диэлектрика, мкм	Металл затвора	Канал				
			доноров	акцепторов				Подвижность, (μ · 10 ⁻²) см ² /В·с	Поверхностный заряд, см ⁻²	длина, мкм	ширина, мкм	толщина, мкм
45	И	<i>n-Si</i>	8 · 10 ¹⁵		<i>Al₂O₃</i>	0,1	<i>Al</i>	1,9	8 · 10 ¹¹	10	100	—
46	И	<i>p-Si</i>	1 · 10 ¹⁶		<i>Al₂O₃</i>	0,12	<i>Au</i>	4,5	8 · 10 ¹⁰	12	160	—
47	И	<i>n-Si</i>	2 · 10 ¹⁶		<i>Al₂O₃</i>	0,14	<i>Al</i>	2,4	5 · 10 ¹⁰	15	180	—
48	И	<i>p-Si</i>	4 · 10 ¹⁶		<i>Al₂O₃</i>	0,15	<i>Au</i>	6,0	9 · 10 ¹¹	20	200	—
49	И	<i>n-GaAs</i>	5 · 10 ¹⁶		<i>Si₃N₄</i>	0,1	<i>Al</i>	1,9	1 · 10 ¹²	5	240	—
50	И	<i>p-GaAs</i>	8 · 10 ¹⁶		<i>Si₃N₄</i>	0,12	<i>Au</i>	3,9	2 · 10 ¹²	6	300	—
51	И	<i>n-GaAs</i>	1 · 10 ¹⁷		<i>Si₃N₄</i>	0,14	<i>Al</i>	2,1	3 · 10 ¹²	8	360	—
52	И	<i>p-GaAs</i>	2 · 10 ¹⁷		<i>Si₃N₄</i>	0,15	<i>Au</i>	4,8	4 · 10 ¹²	9	400	—
53	И	<i>n-GaAs</i>	1 · 10 ¹⁵		<i>SiO₂</i>	0,1	<i>Al</i>	1,9	5 · 10 ¹²	10	20	—
54	И	<i>p-GaAs</i>	2 · 10 ¹⁵		<i>SiO₂</i>	0,12	<i>Au</i>	3,9	1 · 10 ¹²	12	30	—
55	И	<i>n-GaAs</i>	4 · 10 ¹⁵		<i>SiO₂</i>	0,14	<i>Al</i>	2,1	2 · 10 ¹²	15	36	—
56	И	<i>p-GaAs</i>	5 · 10 ¹⁵		<i>SiO₂</i>	0,15	<i>Au</i>	4,8	5 · 10 ¹¹	20	50	—
57	И	<i>n-InSb</i>	8 · 10 ¹⁵		<i>Al₂O₃</i>	0,1	<i>Al</i>	16	2 · 10 ¹¹	5	100	—
58	И	<i>p-InSb</i>	1 · 10 ¹⁶		<i>Al₂O₃</i>	0,12	<i>Au</i>	16	1 · 10 ¹¹	6	160	—
59	И	<i>n-InSb</i>	2 · 10 ¹⁶		<i>Al₂O₃</i>	0,14	<i>Al</i>	19	9 · 10 ¹⁰	8	180	—
60	И	<i>p-InSb</i>	4 · 10 ¹⁶		<i>Al₂O₃</i>	0,15	<i>Au</i>	19	8 · 10 ¹¹	9	200	—
61	И	<i>n-InSb</i>	5 · 10 ¹⁶		<i>Si₃N₄</i>	0,1	<i>Al</i>	16	8 · 10 ¹⁰	10	240	—
62	И	<i>p-InSb</i>	8 · 10 ¹⁶		<i>Si₃N₄</i>	0,12	<i>Au</i>	16	5 · 10 ¹⁰	12	300	—
63	И	<i>n-InSb</i>	1 · 10 ¹⁷		<i>Si₃N₄</i>	0,14	<i>Al</i>	19	9 · 10 ¹¹	15	360	—
64	И	<i>p-InSb</i>	2 · 10 ¹⁷		<i>Si₃N₄</i>	0,15	<i>Au</i>	19	1 · 10 ¹²	20	400	—
65	И	<i>n-InAs</i>	1 · 10 ¹⁵		<i>SiO₂</i>	0,1	<i>Al</i>	1,1	2 · 10 ¹²	5	20	—
66	И	<i>p-InAs</i>	2 · 10 ¹⁵		<i>SiO₂</i>	0,12	<i>Au</i>	1,1	3 · 10 ¹²	6	30	—
продолжение на следующей странице												

Таблица А.2 – Варианты текстовой контрольной работы. Продолжение

Вариант	Тип транзистора*	Материал	Концентрация примеси, см ⁻³		Диэлектрик затвора	Толщина диэлектрика, мкм	Металл затвора	Канал				
			доноров	акцепторов				Подвижность, (μ · 10 ⁻²) см ² /В·с	Поверхностный заряд, см ⁻²	длина, мкм	ширина, мкм	толщина, мкм
67	И	<i>n-InAs</i>	4 · 10 ¹⁵		<i>SiO₂</i>	0,14	<i>Al</i>	1,2	4 · 10 ¹²	8	36	—
68	И	<i>p-InAs</i>	5 · 10 ¹⁵		<i>SiO₂</i>	0,15	<i>Au</i>	1,2	5 · 10 ¹¹	9	50	—
69	И	<i>n-InAs</i>	8 · 10 ¹⁵		<i>Al₂O₃</i>	0,1	<i>Al</i>	1,1	9 · 10 ¹⁰	10	100	—
70	И	<i>p-InAs</i>	1 · 10 ¹⁶		<i>Al₂O₃</i>	0,12	<i>Au</i>	1,1	5 · 10 ¹¹	12	160	—
71	И	<i>n-InAs</i>	2 · 10 ¹⁶		<i>Al₂O₃</i>	0,14	<i>Al</i>	1,2	2 · 10 ¹¹	15	180	—
72	И	<i>p-InAs</i>	4 · 10 ¹⁶		<i>Al₂O₃</i>	0,15	<i>Au</i>	1,2	1 · 10 ¹¹	20	200	—
73	И	<i>n-InP</i>	5 · 10 ¹⁶		<i>Si₃N₄</i>	0,1	<i>Al</i>	2,2	9 · 10 ¹⁰	5	240	—
74	И	<i>p-InP</i>	8 · 10 ¹⁶		<i>Si₃N₄</i>	0,12	<i>Au</i>	19	8 · 10 ¹¹	6	300	—
75	И	<i>n-InP</i>	1 · 10 ¹⁷		<i>Si₃N₄</i>	0,14	<i>Al</i>	1,9	5 · 10 ¹⁰	8	360	—
76	И	<i>p-InP</i>	2 · 10 ¹⁷		<i>Si₃N₄</i>	0,15	<i>Au</i>	21	5 · 10 ¹⁰	9	400	—
77	И	<i>n-InP</i>	1 · 10 ¹⁵		<i>SiO₂</i>	0,1	<i>Al</i>	2,2	9 · 10 ¹¹	10	20	—
78	И	<i>p-InP</i>	2 · 10 ¹⁵		<i>SiO₂</i>	0,12	<i>Au</i>	19	1 · 10 ¹²	12	30	—
79	И	<i>n-InP</i>	4 · 10 ¹⁵		<i>SiO₂</i>	0,14	<i>Al</i>	1,9	2 · 10 ¹²	15	36	—
80	И	<i>p-InP</i>	5 · 10 ¹⁵		<i>SiO₂</i>	0,15	<i>Au</i>	21	3 · 10 ¹²	20	50	—
81	И	<i>n-Si</i>	1 · 10 ¹⁵		<i>Al₂O₃</i>	0,1	<i>Al</i>	1,9	4 · 10 ¹²	5	100	—
82	И	<i>p-Si</i>	2 · 10 ¹⁵		<i>Al₂O₃</i>	0,12	<i>Au</i>	4,5	5 · 10 ¹²	6	160	—
83	И	<i>n-Si</i>	4 · 10 ¹⁵		<i>Al₂O₃</i>	0,14	<i>Al</i>	2,4	5 · 10 ¹¹	8	180	—
84	И	<i>p-Si</i>	5 · 10 ¹⁵		<i>Al₂O₃</i>	0,15	<i>Au</i>	6,0	2 · 10 ¹¹	9	200	—
85	И	<i>n-Si</i>	8 · 10 ¹⁵		<i>Si₃N₄</i>	0,1	<i>Al</i>	1,9	1 · 10 ¹¹	10	240	—
86	И	<i>p-Si</i>	1 · 10 ¹⁶		<i>Si₃N₄</i>	0,12	<i>Au</i>	4,5	9 · 10 ¹⁰	12	300	—
87	И	<i>n-Si</i>	2 · 10 ¹⁶		<i>Si₃N₄</i>	0,14	<i>Al</i>	2,4	8 · 10 ¹¹	15	360	—
88	И	<i>p-Si</i>	4 · 10 ¹⁶		<i>Si₃N₄</i>	0,15	<i>Au</i>	6,0	8 · 10 ¹⁰	20	400	—
продолжение на следующей странице												

Таблица А.2 – Варианты текстовой контрольной работы. Продолжение

Вариант	Тип транзистора*	Материал	Концентрация примеси, см ⁻³		Диэлектрик затвора	Толщина диэлектрика, мкм	Металл затвора	Канал				
			доноров	акцепторов				Подвижность, (μ · 10 ⁻²) см ² /В·с	Поверхностный заряд, см ⁻²	длина, мкм	ширина, мкм	толщина, мкм
89	И	<i>n-GaAs</i>	$5 \cdot 10^{16}$		<i>SiO₂</i>	0,1	<i>Al</i>	1,9	$5 \cdot 10^{10}$	5	20	—
90	И	<i>p-GaAs</i>	$8 \cdot 10^{16}$		<i>SiO₂</i>	0,12	<i>Au</i>	3,9	$9 \cdot 10^{11}$	6	30	—
91	И	<i>n-GaAs</i>	$1 \cdot 10^{17}$		<i>SiO₂</i>	0,14	<i>Al</i>	2,1	$1 \cdot 10^{12}$	8	36	—
92	И	<i>p-GaAs</i>	$2 \cdot 10^{17}$		<i>SiO₂</i>	0,15	<i>Au</i>	4,8	$2 \cdot 10^{12}$	9	50	—
93	И	<i>n-GaAs</i>	$1 \cdot 10^{15}$		<i>Al₂O₃</i>	0,1	<i>Al</i>	1,9	$3 \cdot 10^{12}$	10	100	—
94	И	<i>p-GaAs</i>	$2 \cdot 10^{15}$		<i>Al₂O₃</i>	0,12	<i>Au</i>	3,9	$4 \cdot 10^{12}$	12	160	—
95	И	<i>n-GaAs</i>	$4 \cdot 10^{15}$		<i>Al₂O₃</i>	0,14	<i>Al</i>	2,1	$5 \cdot 10^{12}$	15	180	—
96	И	<i>p-GaAs</i>	$5 \cdot 10^{15}$		<i>Al₂O₃</i>	0,15	<i>Au</i>	4,8	$8 \cdot 10^{11}$	20	200	—
97	И	<i>n-InSb</i>	$8 \cdot 10^{15}$		<i>Si₃N₄</i>	0,1	<i>Al</i>	16	$8 \cdot 10^{10}$	5	240	—
98	И	<i>p-InSb</i>	$1 \cdot 10^{16}$		<i>Si₃N₄</i>	0,12	<i>Au</i>	16	$5 \cdot 10^{10}$	6	300	—
99	И	<i>n-InSb</i>	$2 \cdot 10^{16}$		<i>Si₃N₄</i>	0,14	<i>Al</i>	19	$9 \cdot 10^{11}$	8	360	—
100	И	<i>p-InSb</i>	$4 \cdot 10^{16}$		<i>Si₃N₄</i>	0,15	<i>Au</i>	19	$1 \cdot 10^{12}$	9	400	—

* В таблице А.2 тип транзистора: У — с управляющим *p-n*-переходом; И — с изолированным затвором и индуцированным каналом.

Учебное издание

Легостаев Николай Степанович
Четвергов Константин Владимирович

ТВЕРДОТЕЛЬНАЯ ЭЛЕКТРОНИКА

Методические указания по изучению дисциплины

Корректор Осипова Е. А.
Компьютерная верстка Хомич С. Л.

Подписано в печать 02.04.12. Формат 60х84/8.
Усл. печ. л. 6,05. Тираж 300 экз. Заказ

Издано в ООО «Эль Контент»
634029, г. Томск, ул. Кузнецова д. 11 оф. 17
Отпечатано в Томском государственном университете
систем управления и радиоэлектроники.
634050, г. Томск, пр. Ленина, 40
Тел. (3822) 533018.