

Министерство образования и науки Российской Федерации
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования

**ТОМСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ СИСТЕМ
УПРАВЛЕНИЯ И РАДИОЭЛЕКТРОНИКИ**

Кафедра физической электроники (ФЭ)

Е. В. Саврук, В. В. Каранский

ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ЭЛЕКТРОНИКИ

Расчет параметров диода с резким p - n -переходом

**Методические указания
по выполнению лабораторной работы**

Томск 2017

Корректор: А. Н. Миронова

Саврук Е. В., Каранский В. В.

Физические основы электроники. Расчет параметров диода с резким p - n -переходом : методические указания по выполнению лабораторной работы / Е. В. Саврук, В. В. Каранский. – Томск : ФДО, ТУСУР, 2017. – 40 с.

© Саврук Е. В., Каранский В. В., 2017

© Оформление.

ФДО, ТУСУР, 2017

СОДЕРЖАНИЕ

1 Введение.....	4
2 Теоретическая часть.....	5
2.1 Общие сведения	5
2.2 Переходы металл – полупроводник	7
2.3 Диоды с переходами металл – полупроводник.....	9
2.4 Диоды с p - n -переходом	11
2.5 Вольт-амперные характеристики	14
2.6 Конструкция	15
2.7 Эквивалентная схема	16
2.8 Нелинейные свойства	17
2.9 Выпрямляющие свойства	18
2.10 Параметры и характеристики	19
3 Расчетная часть.....	25
3.1 Содержание задания	25
3.2 Порядок выполнения задания.....	25
3.3 Варианты заданий	32
4 Требования к отчету.....	34
4.1 Оформление отчета.....	34
4.2 Содержание отчета.....	34
5 Контрольные вопросы	35
6 Рекомендованная литература.....	36
Приложение А Физические параметры важнейших полупроводников	37
Приложение Б Эмпирическая формула для расчета подвижности носителей заряда в примесных полупроводниках.....	39
Приложение В График зависимости контактной разности потенциалов от концентрации легирующей примеси в базе.....	40

1 ВВЕДЕНИЕ

Целью настоящей работы является изучение параметров полупроводникового СВЧ-диода с резким p - n -переходом. В ходе выполнения данной работы необходимо рассчитать концентрацию основных и неосновных носителей в базе и эмиттере диода, подвижность основных и неосновных носителей в базе и эмиттере диода, коэффициенты диффузии для основных и неосновных носителей в базе и эмиттере диода, удельное сопротивление базы и эмиттера и контактную разность потенциалов, а также построить вольт-амперную характеристику диода при заданной температуре.

При выполнении работы у бакалавров формируются следующие компетенции:

- способность использовать основные законы естественнонаучных дисциплин в профессиональной деятельности, применять методы математического анализа и моделирования, теоретического и экспериментального исследования;
- способность выявлять естественно-научную сущность проблем, возникающих в ходе профессиональной деятельности, привлекать для их решения соответствующий физико-математический аппарат;
- готовность учитывать современные тенденции развития электроники, измерительной и вычислительной техники, информационных технологий в своей профессиональной деятельности;
- способность выполнять математическое моделирование объектов и процессов по типовым методикам, в том числе с использованием стандартных пакетов прикладных программ.

2 ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ

2.1 Общие сведения

Для детектирования и преобразования слабых СВЧ-сигналов в сигналы более низких частот или в постоянный ток обычно применяют выпрямительные высокочастотные (ВЧ) диоды – детекторный и смесительный, работающие как варисторы. Выпрямительные ВЧ-диоды используются в амплитудных и фазовых детекторах, ограничителях, в схемах нелинейных управляемых резисторов, смесителях и т. п. В их характеристиках и конструкциях много общего.

Статическими параметрами ВЧ-диодов являются те же параметры, что и у низкочастотных (НЧ) выпрямительных диодов. К динамическим параметрам относят граничную частоту $f_{гр}$, барьерную емкость перехода $C_{бар}$ при заданном напряжении смещения на диоде $U_{обр}$, сопротивление перехода $R_{пер}$. Предельно допустимые параметры диодов – это максимально допустимый прямой ток $I_{пр макс}$ и максимально допустимое обратное напряжение (любой формы и периодичности).

Конструкция детекторных и смесительных диодов патронного типа рассчитана на включение их в волноводной или коаксиальный тракт. Вследствие малой междуэлектродной емкости (меньше 1 пФ) эти диоды с успехом используют на частотах вплоть до десятков гигагерц, а в корпусах типа волноводной вставки – в устройствах миллиметрового диапазона длин волн. В гибридных интегральных схемах применяют бескорпусные диоды.

Известны три конструктивно-технологические разновидности детекторных и смесительных диодов: точечно-контактный (ТКД), с барьером Шоттки (ДБШ) и с p - n -переходом. Простейшую конструкцию имеют ТКД, обеспечивающие достаточно высокую чувствительность. ДБШ по сравнению с ТКД обладают более стабильными электрическими параметрами

и повышенной устойчивостью к электрическим перегрузкам. Диоды с *p-n*-переходами также обеспечивают высокую однородность электрических параметров, но уступают обоим типам диодов по предельной рабочей частоте.

Конструкции и технические характеристики этих диодов непрерывно совершенствуются в связи с потребностями освоения новых частотных диапазонов, а также с применением методов конструирования радиоэлектронной аппаратуры на основе СВЧ гибридных интегральных схем.

Эквивалентной схемой называется модель реального устройства, воспроизводящая основные его свойства. Она справедлива как для детекторных, так и для смесительных диодов. При работе на СВЧ значительную роль начинают играть такие параметры эквивалентной схемы, как сопротивление базы и выводов, сопротивление перехода и барьерная емкость.

Теперь перейдем к рассмотрению одного из преобразовательных диодов – детекторного СВЧ-диода.

Детекторный СВЧ-диод – это полупроводниковый прибор с одним переходом и двумя выводами, предназначенный для преобразования модулированных ВЧ колебаний в постоянный ток или ток низкой частоты.

В диапазоне СВЧ многие десятилетия для детектирования и индикации колебаний широко применяются полупроводниковые детекторные диоды (видеодетекторы). Всего известно в мире более 500 типов детекторных диодов, имеющих различные конструкции и технические характеристики.

В диапазоне СВЧ применяют диоды, у которых отсутствует инжекция неосновных носителей и барьерная емкость очень мала, а нелинейность вольт-амперной характеристики сохраняется на частотах сантиметрового и миллиметрового диапазонов длин волн. К ним относятся диоды с контактом металл – полупроводник и туннельные диоды.

2.2 Переходы металл – полупроводник

Основными элементами структуры полупроводниковых приборов являются переходы, которые могут быть выпрямляющими и невыпрямляющими (омическими).

Выпрямляющие переходы образуются в месте контакта металла с полупроводником (их называют барьером Шоттки). Для них подбирают материалы с различным значением работы выхода (потенциалом) электронов, вследствие чего на границе раздела возникает контактная разность потенциалов, или потенциальный барьер, способствующий протеканию тока в одном направлении и препятствующий – в другом. Благодаря этому переход обладает односторонней проводимостью.

Предположим, что контакт осуществляется между металлом и n -полупроводником, работа выхода которого меньше работы выхода электронов из металла $e\varphi_{0n} < e\varphi_0$. Энергетические диаграммы до контакта и в состоянии равновесия при контакте показаны на рисунке 2.1.

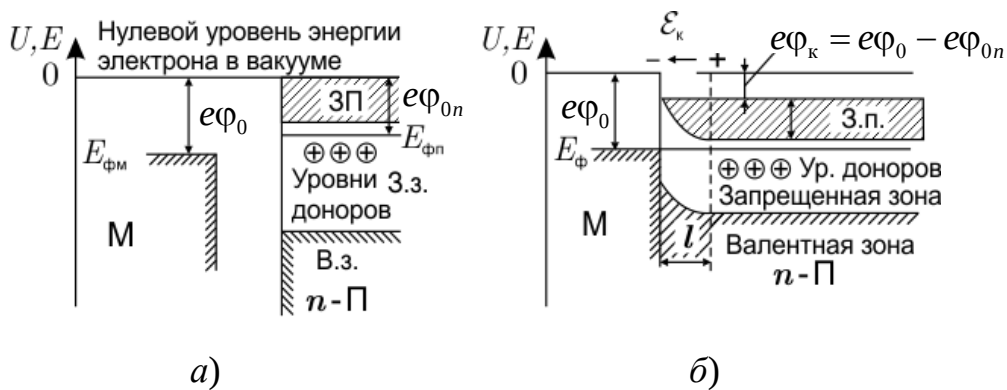


Рис. 2.1 – Зонная диаграмма уровней энергии электронов для металла и n -полупроводника до контакта (а) и в состоянии равновесия (б)

Поскольку $e\varphi_{0n} < e\varphi_0$, электроны при контакте из зоны проводимости n -полупроводника переходят в зону проводимости металла, заряжая его отрицательно. В приконтактной области n -полупроводника образуется

слой, обедненный основными носителями и несущий нескомпенсированный положительный заряд ионов-доноров. Образуется приконтактное поле E_k , которое препятствует дальнейшему движению электронов в металл. При равновесии уровни Ферми металла и полупроводника выравниваются. Образувавшийся запирающий слой шириной l лежит в основном в приконтактной области полупроводника, так как его сопротивление значительно выше, чем сопротивление металла.

При подключении внешнего источника питания U в прямом направлении (плюс на металле) потенциальный барьер понижается, сопротивление запирающего слоя уменьшается, напряженность поля E_k снижается, и через переход течет ток, обязанный перемещению электронов в металл. При подключении обратного напряжения потенциальный барьер в полупроводнике повышается пропорционально $|U|$. Обратный ток образуется электронами, перемещающимися из металла в полупроводник, энергия которых достаточна для преодоления потенциального барьера. Поэтому обратный ток мал (порядка 10^{-9} А).

В результате разности сопротивлений перехода при подключении прямого и обратного напряжений такой переход, как видим, обладает выпрямляющими свойствами.

Внешние металлические выводы прибора должны иметь с полупроводником невыпрямляющий омический переход (контакт), для чего между металлом и полупроводником создается тонкий высоколегированный слой полупроводника того же типа проводимости, обычно с малой контактной разностью потенциалов в сторону как металлического вывода, так и полупроводника (структура $M-n^+-n$ или $M-p^+-p$, где символ «+» означает высокую степень легирования).

2.3 Диоды с переходами металл – полупроводник

На основе переходов металл – полупроводник (М–П) реализуются точечно-контактные диоды (ТКД) и диоды с барьером Шоттки (ДБШ).

Точечно-контактный диод. Переход М–П точечно-контактного диода образуется прижимом заостренной проволоочки из вольфрама или из фосфоритной бронзы к кристаллу кремния (германия, арсенида галлия) (рис. 2.2).

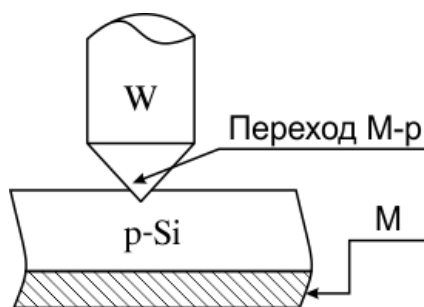


Рис. 2.2 – Точечно-контактный переход

Требуемой вольт-амперной характеристики (ВАХ) добиваются индивидуально подбором точки контакта и регулировкой силы прижима. Прижимной контакт дает большой разброс параметров перехода, механически ненадежен, диоды чувствительны к вибрациям и ударам. Значение обратного тока ТКД велико, а его электрическая прочность невысока. Однако ТКД имеют малую емкость в точке контакта, что обеспечивает хорошие параметры.

Диоды с барьером Шоттки. Переход М–П, получаемый вакуумным напылением металла на полупроводник, называют переходом с барьером Шоттки. ДБШ выполняются из кремния или арсенида галлия *n*-типа, высота потенциального барьера у которых составляет 0,27...0,9 эВ. Обычно в качестве металлического электрода используется молибден, золото, алюминий и другие металлы, работа выхода электрона из которых для образования выпрямляющего контакта должна быть больше работы выхода кремния.

На пластину низкоомного кремния (n^+ -область) наращивается тонкий (несколько микromетров) эпитаксиальный слой более высокоомного кремния с концентрацией примесей порядка 10^{16} см^{-3} (n -область) методом эпитаксии (рис. 2.3).

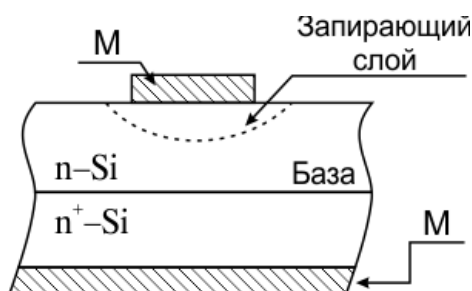


Рис. 2.3 – Структура диода с барьером Шоттки

Эпитаксией называется процесс наращивания монокристаллических слоев на подложку. При этом в наращиваемом слое сохраняется кристаллическая ориентация подложки.

Затем на поверхность эпитаксиального слоя методом вакуумного испарения осаждается слой металла. Площадь перехода обычно очень мала (10...20 мкм в диаметре) для диодов сантиметрового диапазона длин волн и уменьшается до нескольких микromетров для диодов миллиметрового диапазона длин волн, поэтому барьерная емкость не превышает 1 пФ.

Благодаря малой толщине эпитаксиального n -слоя, образующего переход с металлом, сопротивление потерь перехода $r_{\text{пер}}$ меньше, а крутизна ВАХ и электрическая прочность выше, чем у точечно-контактного перехода. Однако контактная разность потенциалов некоторых типов ДБШ большая, до 0,9 В. Высокая воспроизводимость параметров ДБШ и их стабильность в процессе эксплуатации обеспечивается современной эпитаксиальной технологией.

Особенности физических процессов в ДБШ заключаются в отсутствии инжекции неосновных носителей в базу (кремний). Запирающий

слой, как это было показано ранее, образуется в результате обеднения при-
 контактного слоя полупроводника основными носителями зарядов (в дан-
 ном случае электронами). Поэтому при подключении прямого напряжения
 U (плюс на металле) прямой ток возникает в результате движения основ-
 ных носителей зарядов (электронов) из полупроводника в металл через по-
 ниженный потенциальный барьер перехода. Таким образом, в базе диода
 $(n-Si)$ не происходит накапливания и рассасывания неосновных носителей.
 Основным фактором, влияющим на длительность переходных процессов,
 является процесс перезаряда барьерной емкости $C_{бар}$. Значение $C_{бар}$, как
 было указано выше, весьма мало (не более 1 пФ), очень малы также и оми-
 ческие сопротивления электродов: металла и (n^+-i) . Вследствие этого вре-
 мя перезаряда емкости $C_{бар}$, а следовательно и длительность переходных
 процессов также очень малы и составляют десятые доли наносекунды. Эти
 свойства позволяют использовать ДБШ в наносекундных переключающих
 схемах, а также на рабочих частотах вплоть до 300 ГГц.

ВАХ ДБШ почти идеально описывается экспоненциальной зависи-
 мостью для идеализированного диода.

2.4 Диоды с p - n -переходом

Выпрямляющий контакт у p - n -диодов образуется на границе раздела
 двух полупроводников различного типа электропроводности.

Электронно-дырочный переход (p - n -переход) у микросплавных дио-
 дов несколько больше по площади, чем у ТКД. Структуру p - n -перехода
 у сплавных диодов создают сплавлением в кристалл полупроводника n -
 типа сплава с акцепторной примесью, например, индия в германий, алю-
 миния в кремний и т. п. В кристалле полупроводника n -типа подвижность
 электронов в 2...2,5 раза больше чем дырок, в p -полупроводнике. Поэтому
 при одинаковой электропроводности полупроводников p - и n -типа концен-
 трацию доноров в кристалле-базе диода можно уменьшить и тем самым

повысить пробивное напряжение перехода. С этой точки зрения в диодах в качестве базы выбирают полупроводник с электронной проводимостью.

У диффузионных диодов p - n -переход изготавливают методом общей или локальной диффузии донорных или акцепторных примесей в кристалл полупроводника.

Эпитаксиальные (планарные, эпитаксиально-планарные) диоды изготавливают с использованием процесса эпитаксии и локальной диффузии.

Разновидностью диодов с p - n -переходом является обращенный диод.

Если для прижимного контакта M - n^+ использовать металл с акцепторной присадкой и подвергнуть его электроформовке – пропустить через него электрические импульсы тока определенной энергии, то вследствие сильного нагрева приконтактной области под острием иглы образуется тонкий слой p^+ -полупроводника, т.е. получается микросплавной точечный переход обращенного диода (ОД) структуры p^+ - n^+ со стабильными параметрами (рис. 2.4).

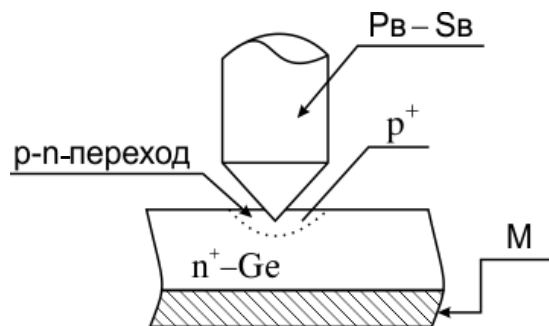


Рис. 2.4 – Структура обращенного диода

Обращенным называют диод на основе полупроводника с повышенной концентрацией примесей, в котором проводимость при обратном напряжении вследствие туннельного эффекта значительно больше, чем при прямом напряжении.

При концентрации примесей в p - n -областях диода, меньших, чем в туннельных диодах, но больших, чем в обычных выпрямительных диодах, можно получить диод, зонная диаграмма которого показана на рисунке 2.5.

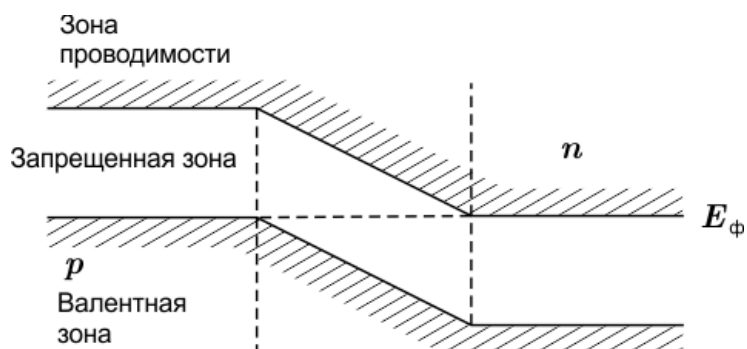


Рис. 2.5 – Зонная диаграмма уровней энергии электронов p - n -перехода в равновесии

Уровень Ферми при такой средней концентрации примесей может быть расположен вблизи потолка валентной зоны p -области и дна зоны проводимости n -области диода, т. е. потолок валентной зоны p -области и дно зоны проводимости n -области при нулевом смещении на диоде находятся на одной высоте по энергетической диаграмме.

Обратная ветвь ВАХ ОД аналогична прямой ветви ВАХ туннельного диода (ТД), так как при обратных напряжениях из-за малой толщины происходит туннелирование электронов из валентной зоны p -области в зону проводимости n -области. Поэтому обратные токи в ОД оказываются большими при ничтожно малых обратных напряжениях (десятки милливольт).

Прямая ветвь ВАХ ОД аналогична прямой ветви ВАХ обычного выпрямительного диода, так как при прямых напряжениях на ОД прямой ток может быть образован только в результате инжекции носителей заряда через потенциальный барьер электронно-дырочного перехода. Но заметная инжекция может наблюдаться только при напряжениях в несколько десятых долей вольта. При меньших напряжениях прямые токи в ОД оказываются меньше обратных. Таким образом, ОД обладают выпрямляющим эффектом, но пропускное (проводящее) направление у них соответствует обратному включению, а запирающее (непроводящее) – прямому включению.

В отличие от ТД ОД имеют крутую обратную ветвь, которая используется в качестве рабочей.

Из принципа действия ОД ясно, что они, во-первых, способны работать на очень малых сигналах. Во-вторых, должны обладать хорошими

частотными свойствами, так как туннелирование – процесс малоинерционный, а эффекта накопления неосновных носителей при малых прямых напряжениях практически нет. Поэтому ОД можно использовать на СВЧ. В-третьих, из-за относительно большой концентрации примесей в прилегающих к электронно-дырочному переходу областях ОД оказываются мало чувствительными к воздействиям проникающей радиации.

2.5 Вольт-амперные характеристики

Статическую ВАХ p - n -перехода аппроксимируют выражением

$$I = I_s \left(\exp\left(\frac{eU}{mkT}\right) - 1 \right), \quad (2.1)$$

где I_s – ток насыщения при обратном смещении на диоде;

e – заряд электрона;

U – напряжение на диоде;

m – коэффициент неидеальности ВАХ;

k – постоянная Больцмана;

T – абсолютная температура.

Пробивное напряжение обычного p - n -перехода достаточно велико благодаря высокой электрической прочности обедненных слоев полупроводника (ВАХ p - n на рис. 2.6).

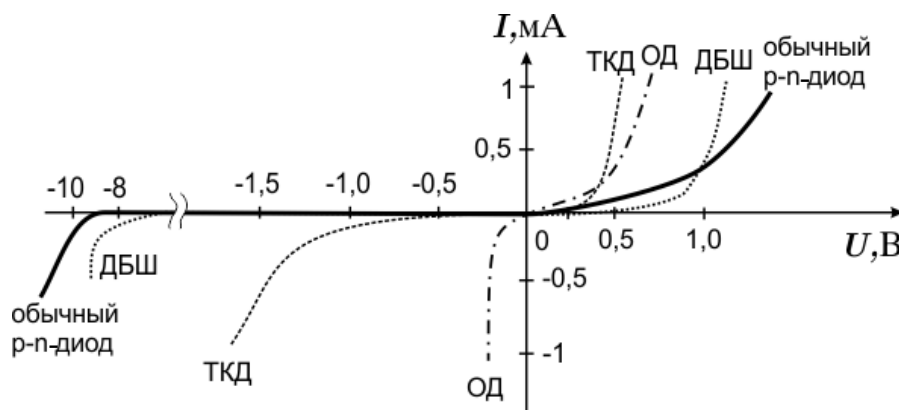


Рис. 2.6 – Вольт-амперные характеристики диодов

Выражение (2.1) достаточно точно описывает прямую ветвь ВАХ диодов с переходом М–П при токе насыщения порядка 10^{-9} А для ДБШ и 10^{-6} А для ТКД, причем $m \approx 1,05...1,5$ для ДБШ и $m \approx 1,7...2$ для ТКД. В отличие от p - n -перехода, обратная ветвь ВАХ ТКД и ДБШ наклонна, не имеет четко выраженного участка насыщения вследствие тонкости перехода и влияния поверхностного тока утечки.

2.6 Конструкция

Конструкция некоторых детекторных СВЧ-диодов, используемых в волноводных, коаксиальных и микрополосковых линиях передачи, показана на рисунке 2.7.

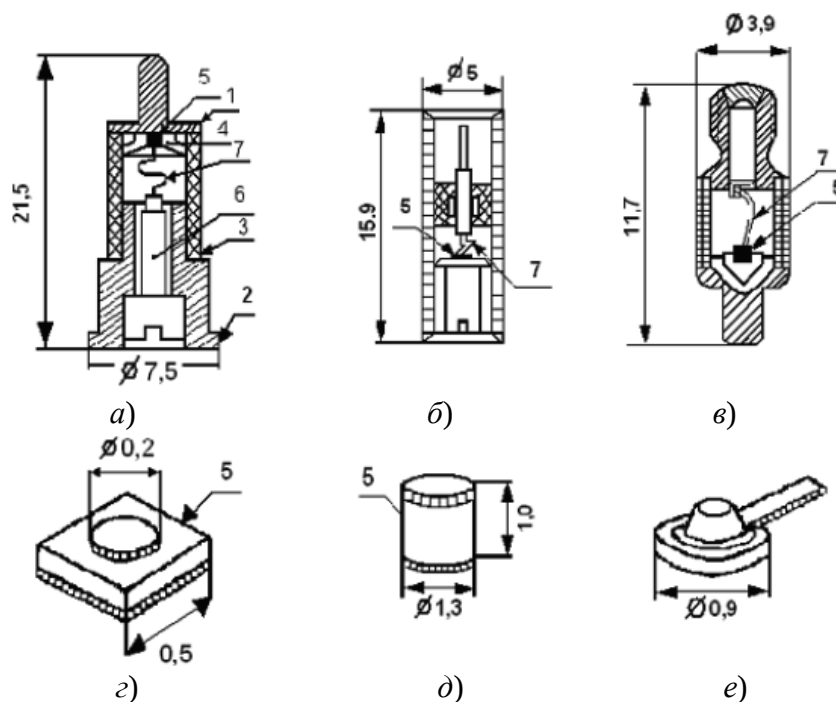


Рис. 2.7 – Конструкция корпусных (а, б, в) и бескорпусных (г, д, е) детекторных СВЧ-диодов

Корпус диода патронной конструкции (рис. 2.7, а, б, в) состоит из двух металлических фланцев 1 и 2, разделенных керамической втулкой 3.

На верхнем фланце крепится кристаллодержатель 4 с полупроводниковым кристаллом 5, а в нижнем – настроечный штифт 6 с вольфрамовой контактной пружинкой 7, которая имеет изгибы в обе стороны от оси. Двухсторонний симметричный изгиб уменьшает тангенциальную составляющую силы давления в точке контакта и предотвращает скольжение пружинки по кристаллу. Для повышения поверхностной проводимости, улучшения контакта и коррозионной стойкости металлические фланцы серебруют или золотят.

Для работы в микрополосковых линиях применяют бескорпусные диоды (рис. 2.7, *г, д, е*).

Современные детекторные диоды изготавливают в основном из кремния (Si) и арсенида галлия (GaAs).

2.7 Эквивалентная схема

Представить диод в виде системы с сосредоточенными параметрами можно, если линейные размеры его (длина корпуса, толщина перехода) малы по сравнению с длиной волны.

Эквивалентная схема детекторного СВЧ-диода показана на рисунке 2.8.

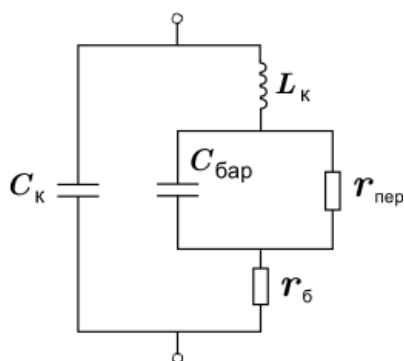


Рис. 2.8 – Эквивалентная схема

Здесь переход представлен дифференциальными параметрами: сопротивлением перехода $r_{\text{пер}} = \partial u / \partial i$ и барьерной емкостью $C_{\text{бар}}$. Потери

в базе диода, омических переходах и выводах отображены последовательным сопротивлением потерь r_6 , индуктивность выводов и контактной пружинки – L_k , конструктивная емкость между выводами при отсутствии контакта с диодной структурой – C_k . Из-за падения напряжения на r_6 и L_k приложенное к переходу напряжения оказывается меньше, чем подведенное к диоду, а емкость C_k шунтирует его. Эти параметры называют паразитными. Типичные значения L_k – десятые доли наногенри и C_k – десятые доли пикофарады, r_6 – десятые доли или единицы ома. У бескорпусных диодов значения C_k и L_k меньше примерно на порядок, благодаря чему их эффективность выше. Значение дифференциального сопротивления $r_{\text{пер}}$ может изменяться в широких пределах в зависимости от положения рабочей точки ВАХ диодов, значение $C_{\text{бар}}$ – десятые доли пикофарады.

Инерционность электрических процессов в диоде зависит от постоянной времени $\tau = r_6 C_{\text{бар}}$, поэтому для повышения частотного предела в большинстве СВЧ-диодов используют переходы с малыми поперечными размерами, барьерная емкость $C_{\text{бар}}$ которых не превышает десятых долей пикофарады, а последовательное сопротивление потерь r_6 – единиц Ома.

Параметры схемы можно определить путем измерений на низких частотах или приближенно на основе процесса выпрямления. Эквивалентная схема используется для расчета характеристик детекторного диода на высоких частотах.

2.8 Нелинейные свойства

Свойства диода в основном определяются параметрами электрического перехода и его ВАХ. На рисунке 2.9 показана примерная зависимость параметров перехода $r_{\text{пер}}$ и $C_{\text{бар}}$ от напряжения смещения.

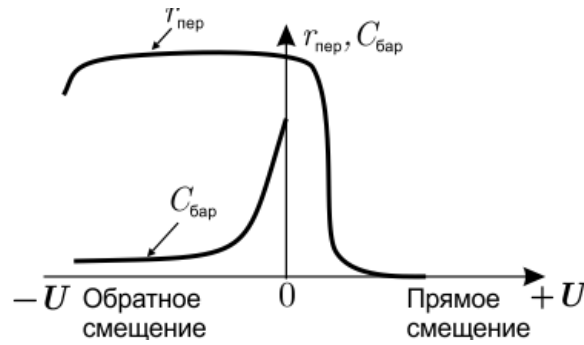


Рис. 2.9 – Нелинейные характеристики диодов

В соответствии с типом диода и назначением используется нелинейная зависимость сопротивления перехода $r_{\text{пер}}$ от прямого смещения или барьерная емкость $C_{\text{бар}}$ от обратного смещения. В первом случае диод называют варистором, во втором – варактором.

2.9 Выпрямляющие свойства

Переходя к упрощенной эквивалентной схеме (рис. 2.10, а), рассмотрим различные режимы работы диода.

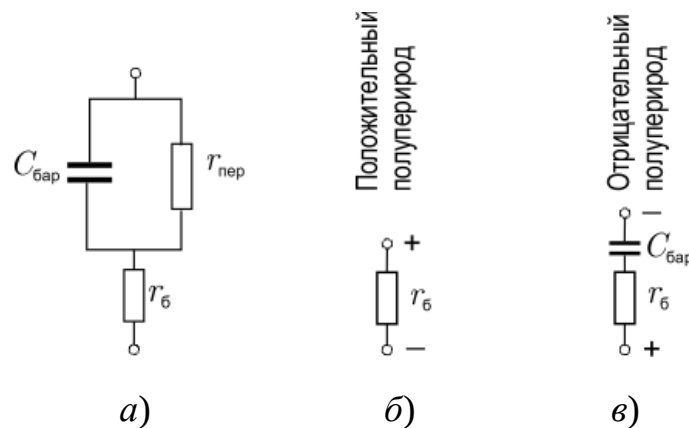


Рис. 2.10 – Режимы работы диода:

а – упрощенная эквивалентная схема; б – прямое сопротивление;
в – обратное сопротивление

При положительном полупериоде $r_{\text{пер}} \ll r_{\text{б}}$, а емкость перехода незначительна $r_{\text{пер}} \ll 1/\omega C_{\text{бар}}$, поэтому прямое сопротивление $r_{\text{пр}} = r_{\text{б}}$ (рис. 2.10, б).

При отрицательном полупериоде сопротивление $r_{\text{пер}}$ велико, поэтому $r_{\text{пер}} \gg 1 / \omega C_{\text{бар}}$ и его влиянием можно пренебречь. Следовательно, обратное сопротивление (рис. 2.10, в):

$$R_{\text{обр}} = \left| r_{\text{б}} + \frac{1}{j\omega C_{\text{бар}}} \right|.$$

Ограничиваясь областью частот, на которых $r_{\text{б}} \ll 1 / \omega C_{\text{бар}}$, получим

$$R_{\text{обр}} \approx \left| \frac{1}{j\omega C_{\text{бар}}} \right|.$$

Выпрямляющие свойства диода оцениваются с помощью коэффициента выпрямления:

$$K_{\text{выпр}} = \frac{I_{\text{пр}}}{I_{\text{обр}}} = \frac{R_{\text{обр}}}{R_{\text{пр}}} \ll 1 \text{ при } U = \pm 1 \text{ В.}$$

Под U можно понимать амплитудное значение напряжения ВЧ колебания, приложенного к диоду в режиме, когда отсутствует сопротивление нагрузки. Таким образом

$$K_{\text{выпр}} = \frac{R_{\text{обр}}}{R_{\text{пр}}} \approx \frac{1}{\omega C_{\text{бар}} r_{\text{б}}} \ll 1,$$

откуда условием эффективной работы диода является выполнение неравенства

$$\omega C_{\text{бар}} r_{\text{б}} \ll 1.$$

Поэтому в СВЧ-диодах стремятся уменьшить емкость $C_{\text{бар}}$, используя для этого точечный переход. Для уменьшения $r_{\text{б}}$ берется низкоомный полупроводниковый материал.

2.10 Параметры и характеристики

1. **Чувствительность диода по току β_i .** Она определяется отношением приращения выпрямленного тока $\Delta I_{\text{кз}}$ в режиме короткого замыкания

выходной цепи детекторного диода по постоянному току к мощности входного сигнала $P_{\text{вх}} \leq 10$ мкВт:

$$\beta_i = \frac{\Delta I_{\text{кз}}}{P_{\text{вх}}} = \frac{I_{\text{кз}} - I_{\text{н}}}{P_{\text{вх}}},$$

где $I_{\text{н}}$ – ток в рабочей точке при наличии нагрузки при СВЧ-сигнале;

$I_{\text{кз}}$ – ток через диод при коротком замыкании.

Для повышения чувствительности по току, которая зависит от выбора рабочей точки, иногда используют прямое смещение диода током $I_0 = 20 \dots 50$ мкА от внешнего источника (рис. 2.11).

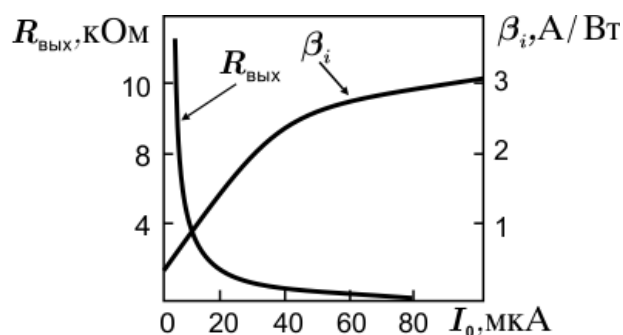


Рис. 2.11 – Зависимость чувствительности и выходного сопротивления от тока диода

На частотах до сотен мегагерц максимальную чувствительность по току $\beta_{i \text{ max}}$ можно определить по параметрам статической ВАХ диода. На СВЧ сказывается вредное влияние тока барьерной емкости перехода, а именно, вызванное этим током падения напряжения на сопротивление r_b уменьшает приложенное к переходу напряжение. Поэтому чувствительность по току на СВЧ ниже $\beta_{i \text{ max}}$ и имеет значение $\beta_i = 1 \dots 5$ А/Вт для ТКД, $\beta_i = 3 \dots 10$ А/Вт для ДБШ.

2. Выходное сопротивление $R_{\text{вых}}$. По сопротивлению в рабочей точке или выходному сопротивлению диоды делятся на низко- и высокоомные. Выходное сопротивление низкоомных диодов составляет $0,2 \dots 0,4$ кОм, а высокоомных – $1 \dots 20$ кОм. Зависимость $R_{\text{вых}}$ от прямого тока смещения показана

на рисунке 2.11. Как видим, при $I_0 \approx 20$ мкА имеет место приемлемое для согласования диода с усилителем значения $R_{\text{вых}}$ (примерно 1 кОм).

3. Относительная температура шума $t_{\text{ш}}$. Качество работы детекторных СВЧ-диодов характеризуют относительной температурой шума $t_{\text{ш}}$.

Минимальная мощность, которую можно обнаружить детекторным СВЧ-диодом, составляет $10^{-9} \dots 10^{-8}$ Вт. Этот предел определяется шумовыми характеристиками диода и шумами последующего низкочастотного усилителя. Шумы диода состоят из теплового (белого) шума, мощность которого не зависит от частоты, а также частотно-зависимой составляющей, называемой обычно фликкер-шумом. Мощность белого шума

$$P_{\text{ш.ном}} = t_{\text{ш}} k T \Delta f,$$

где $t_{\text{ш}}$ – относительная температура шума;

Δf – полоса частот усилителя.

При воздействии на диод СВЧ мощности в нем наряду с появлением постоянной составляющей тока I возбуждается шумовой ток $i_{\text{ш}}$. Появление шумового тока $i_{\text{ш}}$ связано с тепловыми флуктуациями сопротивления, а также с флуктуациями электронного тока I в диоде.

Собственные шумы диода превосходят шумы чисто активного линейного сопротивления того же значения. Мощность флуктуационных шумов активного сопротивления в диапазоне частот Δf определяется соотношением

$$P_{\text{шR}} = k T_1 \Delta f,$$

где T_1 – температура, при которой производится сравнение шумов диода и эквивалентного сопротивления.

При некоторой более высокой температуре T_1 шумы эквивалентного сопротивления становятся равными шумам диода (имеется в виду диод в рабочем режиме):

$$t_{\text{ш}} k T_0 \Delta f = k T_1 \Delta f.$$

Отношение этих температур и принято называть относительной температурой шума: $t_{ш} = T_1 / T_0$.

За стандартную температуру принято принимать $T_0 = 290$ К. Обычно $t_{ш} = 2 \dots 3$. Зависимость $t_{ш}$ от I_0 приведена на рисунке 2.12.

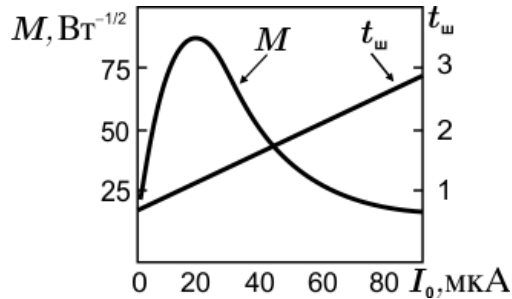


Рис. 2.12 – Зависимость относительной температуры шума и коэффициента качества от тока диода

Параметр относительная температура шума $t_{ш}$ не имеет размерности и название «температура» является в определенной степени условным.

4. Коэффициент качества M . Основным параметром одного из видов СВЧ-диода – видеодетектора является коэффициент качества диода:

$$M = \frac{R_{\text{вых}} \beta_i}{\sqrt{R_{\text{вых}} t_{ш} + R_{ш}}},$$

где $R_{\text{вых}}$ – сопротивление диода в рабочей точке;

$R_{ш}$ – эквивалентное шумовое сопротивление на входе видеоусилителя (обычно 1 кОм).

На рисунке 2.12 показана типичная зависимость от прямого тока смещения I_0 . Как видим, при $I_0 = 20$ мкА имеется максимум M .

Коэффициент качества лучших типов детекторных диодов лежит в пределах от 50 до 100 $\text{Вт}^{-1/2}$.

5. Коэффициент стоячей волны напряжения (КСВН) – ρ . Зависимость сопротивления диодов от выпрямленного и постоянного тока, а также от сопротивления по постоянному току нагрузки, затрудняет их согласование

с СВЧ-трактом. Особенно трудно добиться согласования в широком диапазоне частот, так как диод представляет собой комплексное сопротивление, сложно зависящее от частоты. Поэтому важным параметром диода является коэффициент стоячей волны напряжения ρ , характеризующий согласование диода с СВЧ-трактом, нагрузкой которого является детекторная секция. Характерное значение $\rho = 1,3 \dots 2$.

6. Граничная мощность $P_{гр}$. Детекторные диоды, используемые для измерительных целей, должны иметь широкий диапазон изменения входной мощности, при котором сохраняется квадратичное детектирование. В этом случае не требуется калибровать детекторный диод для измерения коэффициента передачи L (ослабления или усиления) устройств СВЧ, поскольку

$$L = 10 \lg \frac{P_{вх}}{P_{вых}} = 10 \lg \frac{I_1}{I_2},$$

где I_1 и I_2 – токи, соответствующие мощности на входе и выходе устройства.

Входная мощность, выше которой нарушается квадратичная зависимость тока от мощности, называется граничной $P_{гр}$. Обычно отклонение характеристики диода от квадратичной в зависимости от типа диода наступает при мощности $P_{гр} \approx 50 \dots 200$ мкВт.

7. Электрическая прочность диодов в области отрицательных напряжений характеризуется нормируемым обратным напряжением $U_{норм.обр}$, (рис. 2.13), при котором обратный ток достигает определенного значения, например, $I_{обр} = 10$ мкА.

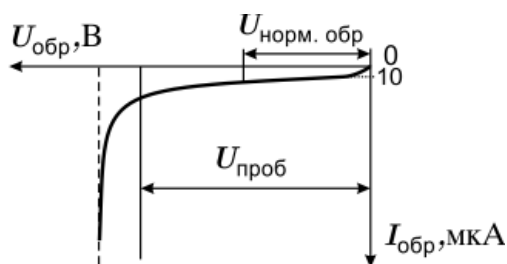


Рис. 2.13 – Обратная ветвь ВАХ диода

Для германиевого ТКД $U_{\text{норм.обр}} \approx 1 \dots 3$ В, для ДБШ $U_{\text{норм.обр}} \approx 3 \dots 10$ В, причем меньшие значения относятся к более ВЧ-диодам, у которых толщина эпитаксиального слоя меньше.

8. Электрическая прочность диодов в области прямых токов характеризуется энергией «выгорания» – той минимальной энергией $W_{\text{выг}}$ импульса длительностью не более 10^{-8} с, после воздействия которого параметры диода необратимо ухудшаются на заданное значение. Обычно $W_{\text{выг}} \approx 10^{-8} \dots 10^{-7}$ Дж, поэтому диоды необходимо защищать от перегрузок, а перед их сменой следует обязательно коснуться рукой корпуса аппаратуры для снятия с тела статического заряда, энергии которого обычно достаточно для вывода перехода из строя в случае разряда через диод.

9. Допустимая рассеиваемая СВЧ мощность $P_{\text{рас}}$. При работе в непрерывном режиме допустимая рассеиваемая СВЧ мощность $P_{\text{рас}}$ для германиевых ТКД составляет $P_{\text{рас}} \approx 10 \dots 40$ мВт, для кремниевых ТКД и ДБШ $P_{\text{рас}} \approx 10 \dots 100$ мВт. При детектировании сигналов больших амплитуд детекторные диоды должны обладать более высоким значением напряжения пробоя, что несколько противоречит требованию уменьшения r_6 . В этих случаях используются преимущественно ДБШ.

3 РАСЧЕТНАЯ ЧАСТЬ

3.1 Содержание задания

Для диода с резким p - n -переходом рассчитать:

- 1) концентрацию основных и неосновных носителей в базе диода;
- 2) подвижность основных и неосновных носителей в базе диода;
- 3) коэффициенты диффузии для основных и неосновных носителей в базе диода;
- 4) удельное сопротивление базы;
- 5) контактную разность потенциалов;
- 6) концентрацию основных и неосновных носителей в эмиттере диода;
- 7) подвижность основных и неосновных носителей в эмиттере диода;
- 8) коэффициенты диффузии для основных и неосновных носителей в эмиттере диода;
- 9) удельное сопротивление эмиттера.

Построить вольт-амперную характеристику диода.

Варианты заданий на лабораторную работу представлены в п. 3.3 указаний.

3.2 Порядок выполнения задания

В таблице 3.1 приведены исходные данные к примеру выполнения лабораторной работы.

Таблица 3.1 – Исходные данные к примеру выполнения лабораторной работы

Параметр	Обозначение	Значение	Единицы измерения
Материал	Si	Кремний	
Ширина запрещенной зоны	ΔE	1,12	эВ
Собственная концентрация	n_i	10^{10}	см^{-3}
Время жизни	τ_i	10^{-3}	с

Окончание табл. 3.1

Параметр	Обозначение	Значение	Единицы измерения
Диэлектрическая проницаемость среды	ϵ	12	
Тип диода		$n^+ - p$	
Площадь р-п-перехода	S	10^{-3}	см^2
Обратное допустимое напряжение	$U_{\text{обр. доп.}}$	400	В
Плотность тока, при которой начинается высокий уровень инжекции	j_H	0,1	А/см^2
Температура	T	300	К

В приложении А приведены основные физические параметры важнейших полупроводников.

1. Определение параметров полупроводникового материала:

Одним из основных параметров материала является концентрация носителей (основных и неосновных).

Напряжение пробоя связано с допустимым обратным напряжением эмпирическим соотношением

$$U_{\text{пр}} = \frac{U_{\text{доп.обр.}}}{0,7} = \frac{400}{0,7} = 571,4 \text{ В.}$$

Из соотношения для напряжения лавинного пробоя найдем **концентрацию легирующей примеси в базе диода:**

$$U_{\text{пр}} = 60 \left(\frac{\Delta E}{1,1} \right)^{3/2} \left(\frac{10^{16}}{N_6} \right)^{3/4},$$

где ΔE – ширина запрещенной зоны полупроводника, для Si $\Delta E = 1,12$ эВ;

N_6 – концентрация легирующей примеси в базе диода, так как база имеет р-тип проводимости, то $N_6 = p_{p0}$.

Тогда

$$p_{p0} = 10^{16} \left(\frac{60}{U_{\text{пр}}} \right)^{4/3} \left(\frac{\Delta E}{1,1} \right)^2 = 10^{16} \left(\frac{60}{571,4} \right)^{4/3} \left(\frac{1,12}{1,1} \right)^2 = 5,14 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-3}.$$

По закону действующих масс найдем концентрацию неосновных носителей в базе диода. Запишем закон действующих масс для полупроводника p -типа:

$$n_{p0} p_{p0} = n_i^2,$$

где n_i – собственная концентрация, для Si $n_i = 10^{10} \text{ см}^{-3}$.

Концентрация неосновных носителей в базе диода будет равна:

$$n_{p0} = \frac{n_i^2}{p_{p0}} = \frac{(10^{10})^2}{5,14 \cdot 10^{14}} = 1,95 \cdot 10^5 \text{ см}^{-3}.$$

Найдем подвижности и коэффициенты диффузии для основных и неосновных носителей в базе диода.

Подвижность основных носителей в базе диода найдем по полуэмпирической формуле:

$$\mu_p = \mu_{p1} + \frac{\mu_{p2}}{1 + \left(\frac{p_{p0}}{N_p} \right)^{\alpha_p}}.$$

Из приложения Б для Si запишем:

$$\mu_{p1} = 48 \frac{\text{см}^2}{\text{В} \cdot \text{с}}; \mu_{p2} = 447 \frac{\text{см}^2}{\text{В} \cdot \text{с}}; N_p = 6,3 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}; \alpha = 0,76.$$

$$\mu_p = 48 + \frac{447}{1 + \left(\frac{5,14 \cdot 10^{14}}{6,3 \cdot 10^{16}} \right)^{0,76}} = 483,73 \frac{\text{см}^2}{\text{В} \cdot \text{с}}.$$

Подвижность неосновных носителей в базе диода также найдем по полуэмпирической формуле:

$$\mu_n = \mu_{n1} + \frac{\mu_{n2}}{1 + \left(\frac{p_{p0}}{N_n} \right)^{\alpha_n}}.$$

Из приложения Б для Si запишем:

$$\mu_{n1} = 65 \frac{\text{см}^2}{\text{В} \cdot \text{с}}; \mu_{n2} = 1265 \frac{\text{см}^2}{\text{В} \cdot \text{с}}; N_n = 8,5 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}; \alpha = 0,72.$$

$$\mu_n = 65 + \frac{1265}{1 + \left(\frac{5,14 \cdot 10^{14}}{8,5 \cdot 10^{16}} \right)^{0,72}} = 1298,8 \frac{\text{см}^2}{\text{В} \cdot \text{с}}.$$

По соотношению Эйнштейна найдем **коэффициенты диффузии для основных и неосновных носителей в базе диода:**

$$D_p = \frac{kT}{q} \mu_p = \frac{1,38 \cdot 10^{-23} \cdot 300}{1,6 \cdot 10^{-19}} \cdot 483,73 = 12,52 \frac{\text{см}^2}{\text{с}};$$

$$D_n = \frac{kT}{q} \mu_n = \frac{1,38 \cdot 10^{-23} \cdot 300}{1,6 \cdot 10^{-19}} \cdot 1298,8 = 33,61 \frac{\text{см}^2}{\text{с}}.$$

Найдем **удельное сопротивление базы** через значение удельной проводимости:

$$\rho_{\delta} = \frac{1}{\sigma_{\delta}} = \frac{1}{q \mu_p p_{p0}} = \frac{1}{1,6 \cdot 10^{-19} \cdot 483,73 \cdot 5,14 \cdot 10^{14}} = 25,14 \text{ Ом} \cdot \text{см}.$$

Из графика зависимости контактной разности потенциалов от концентрации легирующей примеси в базе (приложение В) найдем **контактную разность потенциалов:**

$$\phi_k^0 = 0,86 \text{ В}.$$

Найдем **концентрацию легирующей примеси в эмиттере диода** из соотношения:

$$\phi_k^0 = \frac{kT}{q} \ln \left(\frac{p_{p0} \cdot n_{n0}}{n_i^2} \right),$$

где n_{n0} – концентрация легирующей примеси в эмиттере диода.

Выразим n_{n0} :

$$n_{n0} = \frac{n_i^2}{p_{p0}} \exp \left(\frac{\phi_k^0 \cdot q}{kT} \right) = \frac{10^{20}}{5,14 \cdot 10^{14}} \exp \left(\frac{0,86 \cdot 1,6 \cdot 10^{-19}}{1,38 \cdot 10^{-23} \cdot 300} \right) = 5,3 \cdot 10^{19} \text{ см}^{-3}.$$

По закону действующих масс найдем **концентрацию неосновных носителей заряда в эмиттере диода:**

$$n_{n0} \cdot p_{n0} = n_i^2,$$

$$p_{n0} = \frac{n_i^2}{n_{n0}} = \frac{10^{20}}{5,3 \cdot 10^{19}} = 1,89 \text{ см}^{-3}.$$

Найдем подвижности и коэффициенты диффузии для основных и неосновных носителей в эмиттере диода.

Подвижность основных и неосновных носителей в эмиттере диода найдем по формуле:

$$\mu_n = \mu_{n1} + \frac{\mu_{n2}}{1 + \left(\frac{n_{n0}}{N_n}\right)^{\alpha_n}} = 65 + \frac{1265}{1 + \left(\frac{5,3 \cdot 10^{19}}{8,5 \cdot 10^{16}}\right)^{0,72}} = 77,18 \frac{\text{см}^2}{\text{В} \cdot \text{с}};$$

$$\mu_p = \mu_{p1} + \frac{\mu_{p2}}{1 + \left(\frac{n_{n0}}{N_p}\right)^{\alpha_p}} = 48 + \frac{447}{1 + \left(\frac{5,3 \cdot 10^{19}}{6,3 \cdot 10^{16}}\right)^{0,76}} = 50,66 \frac{\text{см}^2}{\text{В} \cdot \text{с}}.$$

По соотношению Эйнштейна найдем коэффициенты диффузии для основных и неосновных носителей в эмиттере диода:

$$D_n = \frac{kT}{q} \mu_n = \frac{1,38 \cdot 10^{-23} \cdot 300}{1,6 \cdot 10^{-19}} \cdot 77,18 = 2 \frac{\text{см}^2}{\text{с}};$$

$$D_p = \frac{kT}{q} \mu_p = \frac{1,38 \cdot 10^{-23} \cdot 300}{1,6 \cdot 10^{-19}} \cdot 50,66 = 1,47 \frac{\text{см}^2}{\text{с}};$$

$$D_p = \frac{kT}{q} \mu_p = \frac{1,38 \cdot 10^{-23} \cdot 300}{1,6 \cdot 10^{-19}} \cdot 50,66 = 1,47 \frac{\text{см}^2}{\text{с}}.$$

По соотношению удельного сопротивления с удельной электропроводностью, найдем **удельное сопротивление эмиттера:**

$$\rho_3 = \frac{1}{\sigma_3} = \frac{1}{q \mu_n n_{n0}} = \frac{1}{1,6 \cdot 10^{-19} \cdot 77,18 \cdot 5,3 \cdot 10^{19}} = 1,52 \cdot 10^{-3} \text{ Ом} \cdot \text{см}.$$

2. Расчет и построение вольт-амперной характеристики (ВАХ) диода:

Прямая ветвь ВАХ при низком уровне инжекции изменяется по следующему закону:

$$I = I_s \left(\exp \left(\frac{qU}{kT} \right) - 1 \right).$$

Рассчитаем ток насыщения при низком уровне инжекции:

$$I_s = S \frac{qD_n n_{p0}}{W},$$

где W – толщина базы.

Толщину базы W рассчитаем через значение плотности тока, при которой начинается высокий уровень инжекции:

$$j_H = \frac{4qD_n p_{p0}}{W},$$

$$W = \frac{4qD_n p_{p0}}{j_H},$$

где j_H – плотность тока, при которой начинается высокий уровень инжекции, по заданию $j_H = 0,1 \text{ А/см}^2$.

$$W = \frac{4 \cdot 1,6 \cdot 10^{-19} \cdot 33,61 \cdot 5,14 \cdot 10^{14}}{0,1} = 0,11 \text{ см.}$$

Тогда

$$I_s = 10^{-3} \frac{1,6 \cdot 10^{-19} \cdot 33,61 \cdot 1,95 \cdot 10^5}{0,11} = 9,53 \cdot 10^{-15} \text{ А.}$$

На рисунке 3.1 показана прямая ветвь ВАХ диода, которая изменяется в диапазоне U от 0 до $\phi_k^0 = 0,86 \text{ В}$.

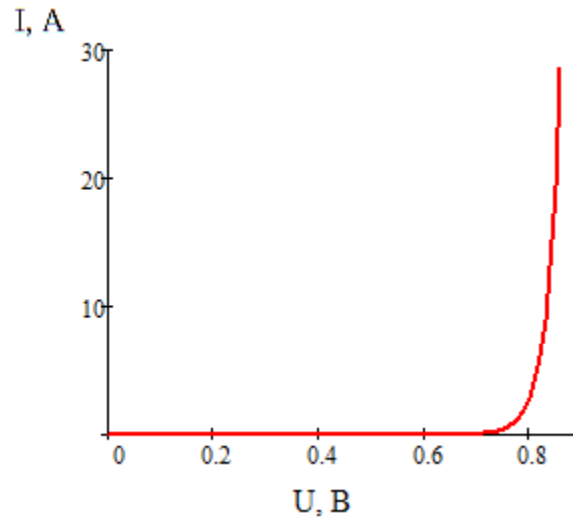


Рис. 3.1 – Прямая ветвь ВАХ диода

При обратном смещении в кремниевом диоде преобладающей является генерационная составляющая тока:

$$I_{\text{ген}} = S \frac{qn_i d(U)}{\tau_i},$$

где $d(U)$ – толщина базы, равная:

$$d(U) = \sqrt{\frac{2\epsilon\epsilon_0}{qp_{p0}}(\phi_k^0 + U_{\text{обр.доп}})} = \sqrt{\frac{2 \cdot 12 \cdot 8,85 \cdot 10^{-14}}{1,6 \cdot 10^{-19} \cdot 5,14 \cdot 10^{14}}(0,86 + 400)} = 3,2 \cdot 10^{-3} \text{ см.}$$

Тогда

$$I_{\text{ген}} = 10^{-3} \frac{1,6 \cdot 10^{-19} \cdot 10^{10} \cdot 3,2 \cdot 10^{-3}}{10^{-3}} = 5,15 \cdot 10^{-12} \text{ А.}$$

Обратная ветвь ВАХ диода изменяется по следующему закону:

$$I_{\text{обр}} = I_{\text{ген}} \left(\exp\left(\frac{qU}{2kT}\right) - 1 \right).$$

На рисунке 3.2 показана обратная ветвь ВАХ диода, которая изменяется в диапазоне U от -1 до 0 В.

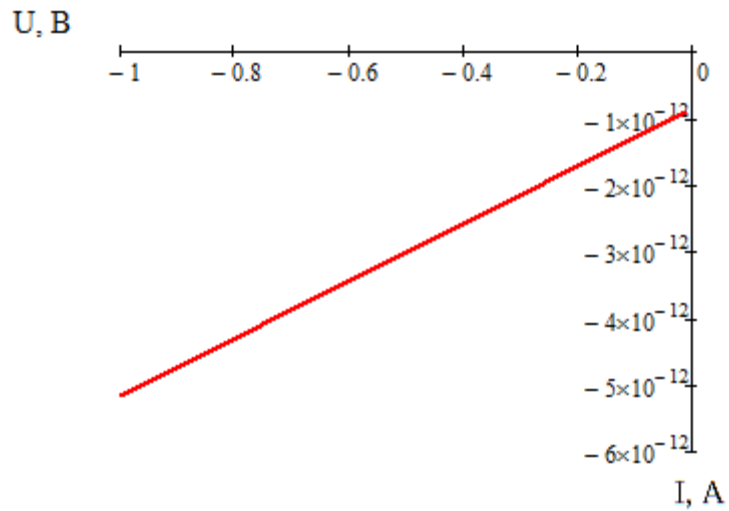


Рис. 3.2 – Обратная ветвь ВАХ диода

На рисунке 3.3 показана полная ВАХ диода.

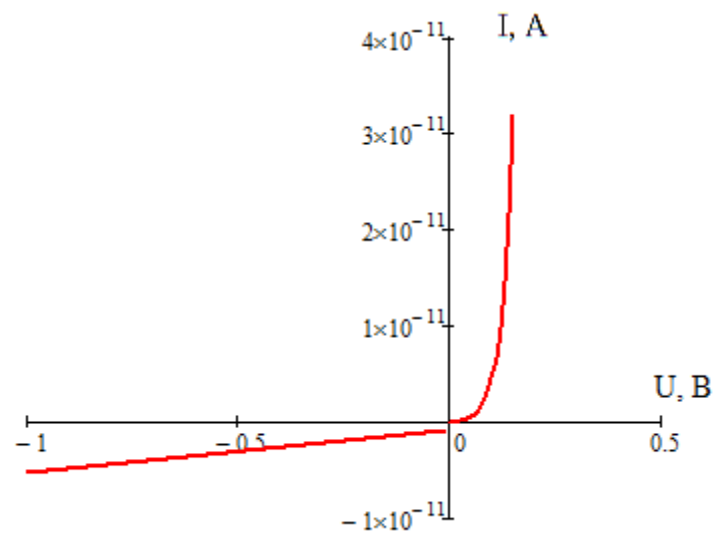


Рис. 3.3 – Полная ВАХ диода

3.3 Варианты заданий

В таблице 3.2 приведены варианты заданий и параметры, необходимые для выполнения лабораторной работы.

Таблица 3.2 – Варианты заданий на лабораторную работу

Вариант	Материал	Тип	T , К	$U_{\text{обр.доп}}$, В	j_H , А/см ²	S , см ²
1	Si	n^+-p	300	150	0,1	10^{-3}
2	Si	p^+-n	305	170	0,12	$1,5 \cdot 10^{-3}$
3	Si	n^+-p	310	190	0,15	$2 \cdot 10^{-3}$
4	Si	p^+-n	315	210	0,1	$2,5 \cdot 10^{-3}$
5	Si	n^+-p	320	230	0,12	$3 \cdot 10^{-3}$
6	Si	p^+-n	325	250	0,15	$3,5 \cdot 10^{-3}$
7	Si	n^+-p	330	270	0,1	$4 \cdot 10^{-3}$
8	Si	p^+-n	335	290	0,12	$4,5 \cdot 10^{-3}$
9	Si	n^+-p	340	310	0,15	$5 \cdot 10^{-3}$
10	Si	p^+-n	345	330	0,1	$5,5 \cdot 10^{-3}$
11	Si	n^+-p	350	350	0,12	$6 \cdot 10^{-3}$
12	Si	p^+-n	355	370	0,15	$6,5 \cdot 10^{-3}$
13	Si	n^+-p	360	390	0,1	$7 \cdot 10^{-3}$
14	Si	p^+-n	365	410	0,12	$7,5 \cdot 10^{-3}$
15	Si	n^+-p	370	430	0,15	$8 \cdot 10^{-3}$
16	Si	p^+-n	375	450	0,1	$8,5 \cdot 10^{-3}$
17	Si	n^+-p	380	470	0,12	$9 \cdot 10^{-3}$
18	Si	p^+-n	385	490	0,15	$9,5 \cdot 10^{-3}$
19	Si	n^+-p	390	510	0,1	$10 \cdot 10^{-3}$
20	Si	p^+-n	395	530	0,12	10^{-3}
21	Ge	n^+-p	300	100	0,1	10^{-3}
22	Ge	p^+-n	305	110	0,12	$1,5 \cdot 10^{-3}$
23	Ge	n^+-p	310	120	0,15	$2 \cdot 10^{-3}$
24	Ge	p^+-n	315	130	0,1	$2,5 \cdot 10^{-3}$
25	Ge	n^+-p	320	140	0,12	$3 \cdot 10^{-3}$
26	Ge	p^+-n	325	150	0,15	$3,5 \cdot 10^{-3}$
27	Ge	n^+-p	330	160	0,1	$4 \cdot 10^{-3}$
28	Ge	p^+-n	335	170	0,12	$4,5 \cdot 10^{-3}$
29	Ge	n^+-p	340	180	0,15	$5 \cdot 10^{-3}$
30	Ge	p^+-n	345	190	0,1	$5,5 \cdot 10^{-3}$
31	Ge	n^+-p	350	200	0,12	$6 \cdot 10^{-3}$
32	Ge	p^+-n	355	210	0,15	$6,5 \cdot 10^{-3}$
33	Ge	n^+-p	360	220	0,1	$7 \cdot 10^{-3}$
34	Ge	p^+-n	365	230	0,12	$7,5 \cdot 10^{-3}$
35	Ge	n^+-p	370	240	0,15	$8 \cdot 10^{-3}$
36	Ge	p^+-n	375	250	0,1	$8,5 \cdot 10^{-3}$
37	Ge	n^+-p	380	260	0,12	$9 \cdot 10^{-3}$
38	Ge	p^+-n	385	270	0,15	$9,5 \cdot 10^{-3}$
39	Ge	n^+-p	390	280	0,1	$10 \cdot 10^{-3}$
40	Ge	p^+-n	395	290	0,12	10^{-3}

4 ТРЕБОВАНИЯ К ОТЧЕТУ

4.1 Оформление отчета

Отчет по лабораторной работе оформляется в электронном виде согласно требованиям ОС ТУСУР 01–2013 «Работы студенческие по направлениям подготовки и специальностям технического профиля. Общие требования и правила оформления» (<https://regulations.tusur.ru/documents/70>).

4.2 Содержание отчета

- 1) титульный лист;
- 2) введение;
- 3) задание, вариант и параметры, необходимые для выполнения лабораторной работы (из табл. 3.2);
- 4) рассчитанные значения концентраций основных и неосновных носителей в базе и эмиттере диода;
- 5) рассчитанные значения подвижностей основных и неосновных носителей в базе и эмиттере диода;
- 6) рассчитанные значения коэффициентов диффузии для основных и неосновных носителей в базе и эмиттере диода;
- 7) рассчитанные значения удельного сопротивления базы и эмиттера;
- 8) рассчитанное значение контактной разности потенциалов;
- 9) графическое представление вольт-амперной характеристики диода;
- 10) выводы по работе;
- 11) ответы на контрольные вопросы (студент на свое усмотрение выбирает пять вопросов из п. 5);
- 12) список использованных источников.

5 КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Нарисуйте зонную диаграмму выпрямляющего контакта металла с полупроводником n -типа.
2. Что такое металлургическая граница?
3. Чем определяется величина потенциального барьера p - n -перехода?
4. Поясните влияние обратного напряжения на величину потенциального барьера.
5. Нарисуйте ВАХ идеализированного p - n -перехода.
6. В чем отличие диффузионной емкости от барьерной?
7. Почему диод на основе p - n -перехода не выпрямляет малые сигналы?
8. На каком участке ВАХ туннельного диода наблюдаются квантовые эффекты?
9. Как зависит напряжение стабилизации от легирования базы стабилитрона?
10. Как можно изменить функциональную зависимость емкости в ватикапах?
11. Чем ограничен обратный ток диода в случае переключения приложенного напряжения с прямого на обратное?
12. Почему для коммутации СВЧ-сигналов используют именно $p^{++}n$ -диоды, а не диоды с p - n -переходом?
13. Что называется полупроводниковым диодом?
14. Какая область полупроводникового диода называется эмиттером?
15. Какая область полупроводникового диода называется базой?
16. Какие процессы происходят в базе диода в импульсном режиме работы?
17. Что такое стабилитрон?
18. Что такое туннельный диод?
19. Что такое обращенный диод?
20. Перечислите и объясните отличия в свойствах и параметрах кремниевых и германиевых выпрямительных диодов.

6 РЕКОМЕНДОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

1. Троян П. Е. Твердотельная электроника : учеб. пособие / П. Е. Троян. – Томск : ТУСУР, 2006. – 321 с.
2. Пасынков В. В. Полупроводниковые приборы : учебник для вузов / В. В. Пасынков, Л. К. Чиркин. – СПб. : Лань, 2006. – 480 с.
3. Протасов Ю. С. Твердотельная электроника / Ю. С. Протасов, С. Н. Чувашев. – М. : Изд. МГТУ им. Баумана, 2003. – 189 с.
4. Гуртов В. А. Твердотельная электроника : учеб. пособие / В. А. Гуртов. – М. : Техносфера, 2005. – 408 с.

ПРИЛОЖЕНИЕ А

Физические параметры важнейших полупроводников

Параметр			Обозначение	Si	Ge	GaAs	InSb	4H-SiC	GaN
Ширина запрещен- ной зоны, эВ	300 K		ΔE	1,12	0,66	1,43	0,18	3,0	3,44
	0 K			1,21	0,80	1,56	0,23		3,50
Подвижность, $\text{см}^2 \cdot \text{В}^{-1} \cdot \text{с}^{-1}$	электронов	300 K	μ_n	1500	3900	8500	78000	650	8500
		77 K				10^5			
	дырок	300 K	μ_p	600	1900	400	1700		
		77 K				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 плот- ность состояний в зоне проводимости, см^{-3}	300 K		N_C	$2,8 \cdot 10^{19}$	$1,04 \cdot 10^{19}$	$4,7 \cdot 10^{17}$	$3,7 \cdot 10^{16}$		
	77 K			$3,6 \cdot 10^{18}$	$1,4 \cdot 10^{18}$	$5,8 \cdot 10^{16}$	$5,1 \cdot 10^{15}$		
Эффективная плот- ность состояний в валентной зоне, см^{-3}	300 K		N_V	$1,02 \cdot 10^{19}$	$6,11 \cdot 10^{18}$	$7,0 \cdot 10^{18}$	$1,16 \cdot 10^{19}$		
	77 K			$1,4 \cdot 10^{18}$	$6,9 \cdot 10^{17}$	$9,8 \cdot 10^{17}$	$1,5 \cdot 10^{18}$		
Диэлектрическая постоянная			ϵ	11,8	16,0	13,2	17,7	10,2	12,2
Электронное сродство			χ	4,05	4,00	4,07	4,60		
Собственная кон- центрация носите- лей, см^{-3}	300 K		n_i	$1,6 \cdot 10^{10}$	$2,5 \cdot 10^{13}$	$1,1 \cdot 10^7$	$2,0 \cdot 10^{16}$	$1,1 \cdot 10^{-4}$	$9,2 \cdot 10^{-10}$
	77 K			$3 \cdot 10^{-20}$	$1,4 \cdot 10^{-7}$	$2,8 \cdot 10^{-33}$	$1,2 \cdot 10^{10}$		
Время жизни носителей, с			τ	$2,5 \cdot 10^{-3}$	10^{-3}	10^{-8}	10^{-8}		
Дебаевская длина, мкм			L_d	24	0,68	2250			
Показатель преломления			n	3,44	4,0	3,4	3,75	2,6	2,4
Температурный коэффициент			α	$2,4 \cdot 10^{-6}$	$5,8 \cdot 10^{-6}$	$5,8 \cdot 10^{-6}$	$5,1 \cdot 10^{-6}$	$4,0 \cdot 10^{-6}$	$5,59 \cdot 10^{-6}$
Постоянная решетки, нм			a, b, c	5,43	5,65	5,65	6,48	0,308 (a) 1,511 (c)	0,318 (a) 0,5166 (c)
Температура плавления, °C			T	1415	936	1238	525	2830	2530

Универсальные физические постоянные

Заряд электрона	$q = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ Кл}$
Масса покоя электрона	$m_0 = 9,11 \cdot 10^{-31} \text{ кг}$
Постоянная Планка	$h = 6,62 \cdot 10^{-34} \text{ Дж} \cdot \text{с} = 4,5 \cdot 10^{-15} \text{ эВ} \cdot \text{с}$
Постоянная Дирака	$\hbar = h / 2\pi = 1,054 \cdot 10^{-34} \text{ Дж} \cdot \text{с} = 7,1 \cdot 10^{-16} \text{ эВ} \cdot \text{с}$
Постоянная Больцмана	$k = 1,38 \cdot 10^{-23} \text{ Дж/К} = 8,62 \cdot 10^{-5} \text{ эВ/К}$
Диэлектрическая постоянная	$\epsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12} \text{ Ф/м} = 8,85 \cdot 10^{-14} \text{ Ф/см}$

ПРИЛОЖЕНИЕ Б

Эмпирическая формула для расчета подвижности носителей заряда в примесных полупроводниках

Так как подвижность носителей с ростом концентрации уменьшается из-за рассеяния на ионизованных примесях, то ее можно рассчитать по эмпирической формуле:

$$\mu = \mu_1 + \frac{\mu_2}{1 + \left(\frac{N^+}{N} \right)^\alpha},$$

где N^+ – концентрация рассеивающих центров, см^{-3} , а значения остальных параметров для кремния и германия представлены в таблице.

Параметры для расчета подвижности носителей

Материал	Параметры			
	μ_1 , см ² /В·с	μ_2 , см ² /В·с	N^0 , см ⁻³	α
Кремний: электроны дырки	65	1265	$8,5 \cdot 10^{16}$	0,72
	48	447	$6,3 \cdot 10^{16}$	0,76
Германий: электроны дырки	50	3850	$8,1 \cdot 10^{16}$	0,48
	42	1860	$1,4 \cdot 10^{17}$	0,43

ПРИЛОЖЕНИЕ В

График зависимости контактной разности потенциалов от концентрации легирующей примеси в базе

Контактная разность потенциалов для несимметричных резких переходов в Ge, Si и GaAs как функция концентрации примеси в слаболегированной области переходов.

