

Министерство образования и науки Российской Федерации
Федеральное агентство по образованию
Государственное образовательное учреждение
высшего профессионального образования
“РОСТОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ”

МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ

к выполнению специального лабораторного практикума

“ Твердотельная электроника СВЧ ”

(специальность 013800 , радиофизика и электроника)

Часть II

ДЕТЕКТОРНЫЙ СВЧ ДИОД

Ростов-на-Дону

2006

Лабораторная работа №2

Детекторный СВЧ диод

ЦЕЛЬ РАБОТЫ: Изучить физический принцип действия, устройство и характеристики полупроводникового СВЧ диода.

ПОДГОТОВКА К РАБОТЕ: Занести в рабочую тетрадь: название и цель лабораторной работы; основные положения, формулы и рисунки, необходимые при ответе на контрольные вопросы.

1 ОБЩИЕ ПОЛОЖЕНИЯ

Для детектирования и индикации колебаний в СВЧ диапазоне многие десятилетия широко применяются полупроводниковые детекторные диоды (видеодетекторы).

Детекторным СВЧ диодом называют электронный прибор с одним электрическим переходом и двумя выводами, предназначенный для преобразования модулированных высокочастотных колебаний. При этом СВЧ сигнал преобразуется в постоянный ток или ток низкой частоты.

Известны три конструктивно-технологические разновидности детекторных диодов: точечно-контактный (ТКД), с барьером Шоттки (ДБШ) и с р-n-переходом. Простейшую конструкцию имеют ТКД, обеспечивающие достаточно высокую чувствительность. ДБШ по сравнению с ТКД обладают более однородными электрическими параметрами и повышенной устойчивостью к электрическим перегрузкам. Диоды с р-n-переходами также обеспечивают высокую однородность электрических параметров, но уступают обоим типам диодов по предельной рабочей частоте. Всего известно более 500 типов детекторных диодов, имеющих различные конструкции и технические характеристики.

Инерционность электрических процессов в диоде зависит от постоянной времени $\tau = r_{\sigma} C_{\text{БАР}}$, поэтому для повышения частотного предела в большинстве

СВЧ диодов используют переходы с малыми поперечными размерами точечные, барьерная $C_{\text{БАР}}$ емкость которых не превышает десятых долей пикофарады, а последовательное сопротивление потерь Γ_6 – единиц ома.

2 ПЕРЕХОДЫ МЕТАЛЛ-ПРОВОДНИК

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

Выпрямляющие переходы образуются в месте контакта металла с полупроводником (их называют барьером Шоттки) или на границе раздела двух полупроводников различного типа электропроводности (их называют р-п-переходы). 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 1.

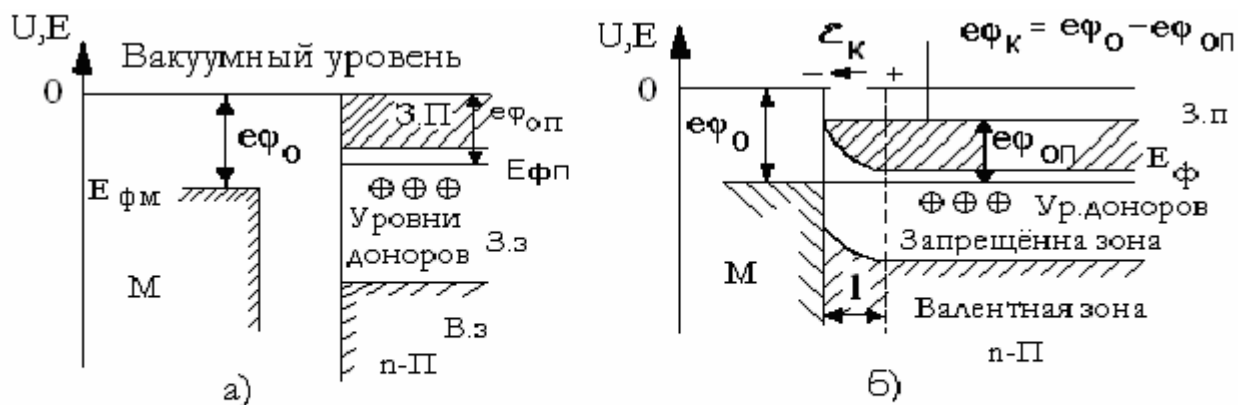


Рисунок 1 – Зонная диаграмма для металла и n-полупроводника до контакта (а) и в состоянии равновесия (б)

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, обеднённый основными носителями и несущий не скомпенсированный положительный заряд ионов-доноров. Образуется приконтактное поле \mathcal{E}_k , которое препятствует дальнейшему движению электронов в металл. Это поле отталкивает свободные электроны в области контакта и втягивает в приконтактную область дырки. При равновесии уровни Ферми металла и полупроводника выравниваются. Образовавшийся запирающий слой шириной l лежит в основном в толще полупроводника, так как его сопротивление значительно выше.

При подключении внешнего источника питания в прямом направлении (плюс на металле) потенциальный барьер снижается, сопротивление запирающего слоя уменьшается и через переход течёт ток, обязанный перемещению электронов в металл. При подключении обратного напряжения потенциальный барьер повышается, но под действием увеличивающегося поля на переходе возможно движение дырок в металл. Этот ток мал, так как концентрация неосновных носителей в n-полупроводнике невелика.

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 создаётся тонкий высоколегированный слой полупроводника того же типа проводимости, обычно с малой контактной разностью потенциалов в сторону как металлического вывода, так и полупроводника (структура М-n⁺-n или М-p⁺-p, где символ + означает высокую степень легирования).

3 ДИОДЫ С ПЕРЕХОДАМИ МЕТАЛЛ-ПОЛУПРОВОДНИК

Переходы металл-полупроводник (М-П) имеют точечно-кантактные (точечные) диоды и диоды с барьером Шоттки (ДБШ).

3.1 Точечно-контактный

диод

Переход М-П точечно-контактного диода образуется прижимом заострённой проволоочки из вольфрама (фосфоритной бронзы) к кристаллу кремния (германия, арсенида галлия) (рисунок 2).

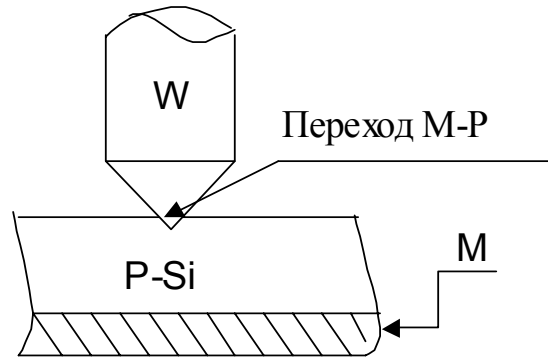


Рисунок 2– Точечный переход

Требуемой вольт-амперной характеристики (ВАХ) добиваются индивидуально подбором точки контакта и регулировкой силы прижима. Прижимной контакт даёт большой разброс параметров перехода, механически ненадёжен, диоды чувствительны к вибрациям и ударам. Значение обратного тока ТКД велико в соответствии с рисунком 6, а его электрическая прочность невысока.

3.2 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 – 0,9В. Обычно в качестве металлического электрода используется молибден, золото, алюминий и другие металлы, работа выхода которых для образования выпрямляющего контакта должна быть больше работы выхода кремния.

На пластину низкоомного кремния (n+область) наращивается тонкий (несколько микрон) эпитаксиальный слой более высокоомного кремния

с концентрацией примесей порядка 10^{16} см^{-3} (n-область) (рисунок 3). На поверхность этого слоя методом вакуумного испарения осаждается слой металла. Площадь перехода обычно очень мала (10– 20 мкм в диаметре) для диодов сантиметрового диапазона и уменьшается до нескольких микрометров для диодов миллиметрового диапазона и барьерная ёмкость не превышает 1 пФ.

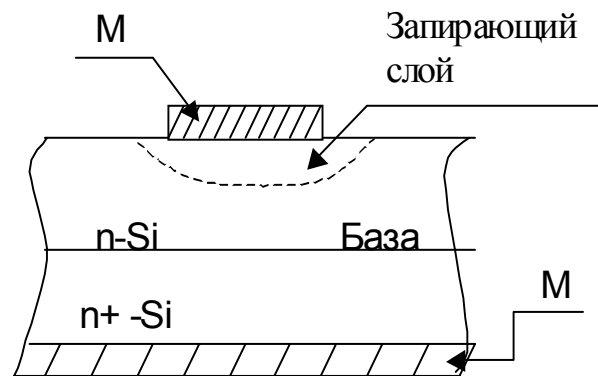


Рисунок 3 – Переход Шоттки

Благодаря малой толщине эпитаксиального n-слоя, образующего переход с металлом, сопротивление потерь перехода $r_{\text{пер}}$ меньше, а крутизна ВАХ в соответствии с рисунком 6 и электрическая прочность выше, чем у точечного перехода. Однако контактная разность потенциалов некоторых типов ДБШ большая, до 0,9В. Высокая повторяемость 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 объединения приконтактного слоя полупроводника основными носителями зарядов (в данном случае электронами). Поэтому при подключении прямого напряжения U (плюс на металле) прямой ток возникает в результате движения основных носителей зарядов (электронов) из полупроводника в металл через пониженный $(\phi_k - U)$ потенциальный барьер перехода. Таким образом, в базе диода ($n - Si$) не происходит накопления и рассеивания неосновных носителей. Основным фактором, влияющим на длительность переходных процессов, является процесс перезаряда барьерной емкости $C_{\text{бар}}$. Значение $C_{\text{бар}}$, как было указано выше, весьма мало (не более 1 пФ), очень малы

также и омические сопротивления электродов: металла и n^+ -*Si*. Вследствие этого время перезаряда емкости $C_{\text{БАР}}$, 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 300ГГц.

ВАХ ДБШ почти идеально описывается экспоненциальной зависимостью для идеализированного диода. Это обстоятельство позволяет с успехом использовать ДБШ в качестве логарифмирующих элементов.

4 ДИОДЫ С p-n-ПЕРЕХОДОМ

Одной из разновидностей диодов с p-n-переходом является обращённый диод.

4.1 Обращенный диод.

Если для прижимного контакта $M-n^+$ использовать металл с акцепторной присадкой и подвергнуть его электроформовке – пропустить через него электрические импульсы тока определённой энергии, то вследствие сильного нагрева приконтактной области под остриём иглы образуется тонкий слой p^+ -полупроводника, т.е. получается микросплавной точечный переход обращённого диода (ОД) структуры p^+-n^+ со стабильными параметрами (рисунок 4).

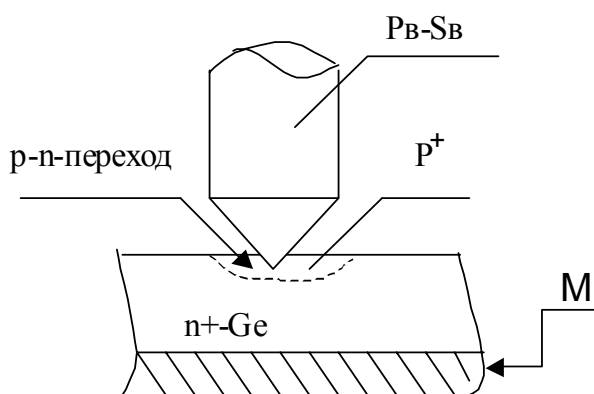


Рисунок 4– Обращённый диод

Обращённым называю диод на основе полупроводника с критической концентрацией примесей, в котором проводимость при обратном напряжении вследствие туннельного эффекта значительно больше, чем при прямом напряжении.

При концентрации примесей в р-п-областях диода, меньших, чем в туннельных диодах, но больших, чем в обычных выпрямительных диодах, можно получить диод, зонная

диаграмма которого показана на рисунке 5. Уровень Ферми при такой средней концентрации примесей может быть расположен на потолке валентной зоны р-

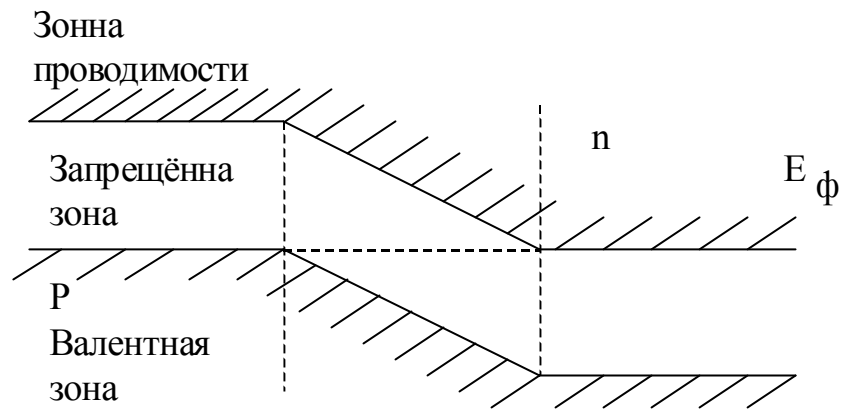


Рисунок 5– Зонная диаграмма р-п-перехода в равновесии

области и дне зоны проводимости n-области диода, т.е. потолок валентной зоны р-области и дно зоны проводимости n-области при нулевом смещении на диоде находятся на одной высоте по энергетической диаграмме.

Обратная ветвь ВАХ ОД в соответствии с рисунком 6 аналогична прямой ветви ВАХ туннельного диода (ТД), так как при обратных напряжениях происходит туннелирование электронов из валентной зоны р-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 пропускающее (проводящее) направление у них соответствует обратному включению, а запирающее (непроводящее) – прямому включению.

В отличие от ТД ОД имеют очень маленькую величину пикового тока I_{Π} на прямой ветви ВАХ и крутую обратную ветвь, которая используется в качестве рабочих.

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.

5 ВОЛЬТ-АМПЕРНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ДИОДОВ

Статическую ВАХ p-n-перехода аппроксимируют выражением

$$I = I_s (\exp eU/mkT - 1), \quad (1)$$

где I_s – ток насыщения при обратном смещении на диоде;

e – заряд электрона;

U – напряжение на диоде;

m – коэффициент неидеальности ВАХ близкий к двум;

k – постоянная Больцмана;

T – абсолютная температура.

Пробивное напряжение p-n-перехода достаточно велико благодаря высокой электрической прочности обеднённых слоёв полупроводника (ВАХ p-n на рисунке 6).

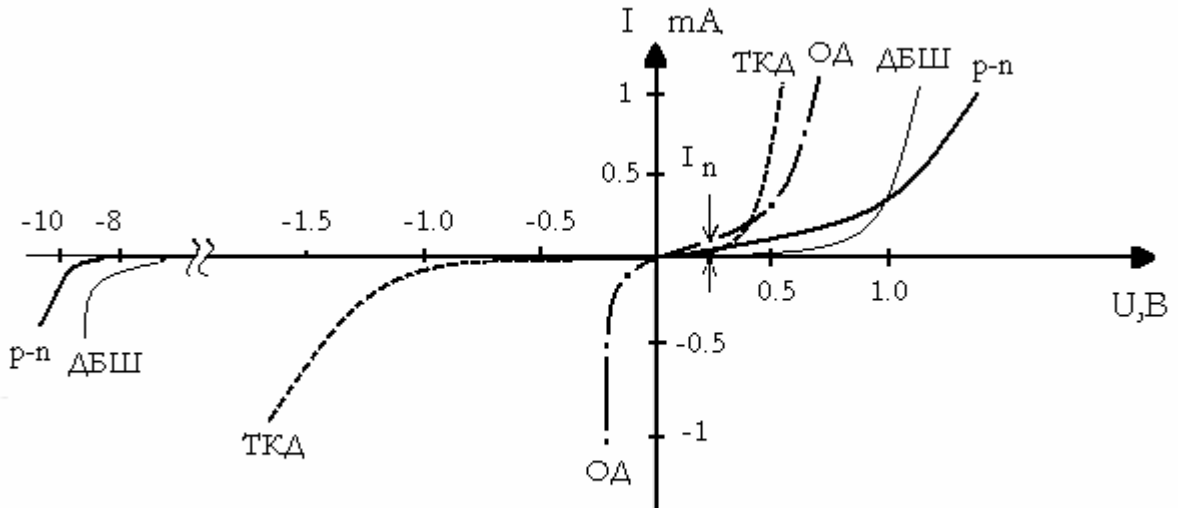


Рисунок 6– Вольт -Амперные характеристики диодов

Выражение (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, причём при $m \approx 1.05 - 1.5$ 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 чётко выраженного участка насыщения вследствие тонкости перехода и влияния поверхностного тока утечки.

6 НЕЛИНЕЙНЫЕ СВОЙСТВА ДИОДА

Свойства диода в основном определяются параметрами электрического пе-

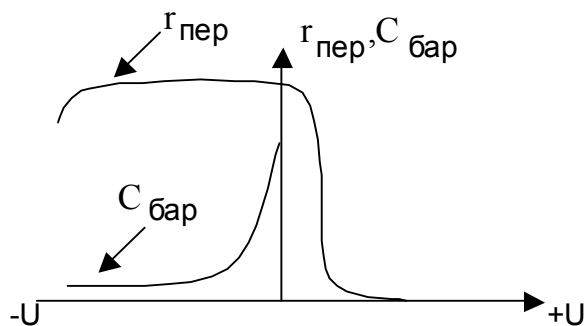


Рисунок 7– Нелинейные характеристики диода

рехода и его ВАХ. На рисунке 7 показана примерная зависимость параметров перехода $r_{пер}$ и $C_{бар}$ от напряжения смещения. В соответствии с типом диода и назначением используется нелинейная зависимость

сопротивления перехода $\Gamma_{\text{пер}}$ от прямого смещения или барьерная ёмкость $C_{\text{БАР}}$ от обратного смещения. В первом случае диод называют **варистором**, во втором – **варактором**.

7 КОНСТРУКЦИЯ

Конструкция некоторых детекторных СВЧ-диодов, используемых в волноводных и коаксиальных линиях, показана на рисунке 8. Корпус диода патронной

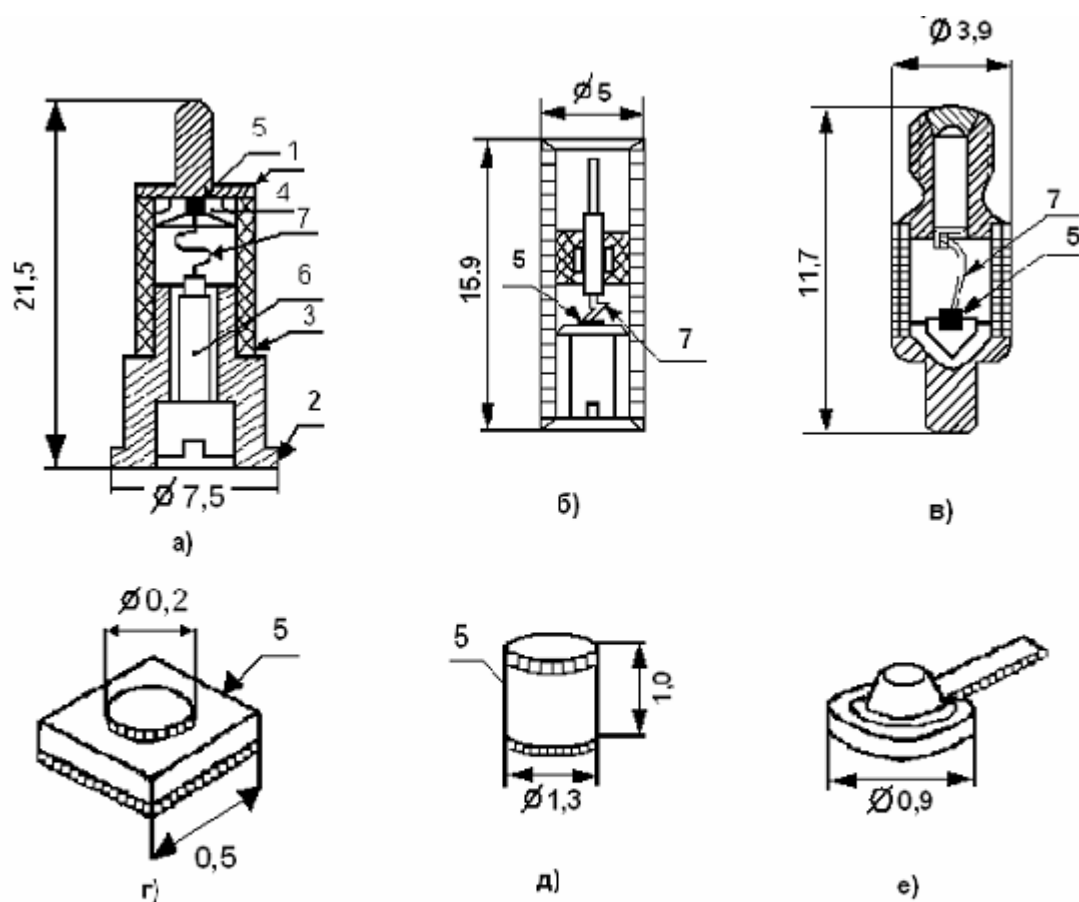


Рисунок 8— Конструкции корпусных (а, б, в) и бескорпусных (г, д, е) детекторных СВЧ диодов

конструкции (рисунок 8 а, б, в) состоит из двух металлических фланцев 1 и 2, разделённых 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 (рисунок 8 г,д,е).

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

8 ЭКВИВАЛЕНТНАЯ СХЕМА

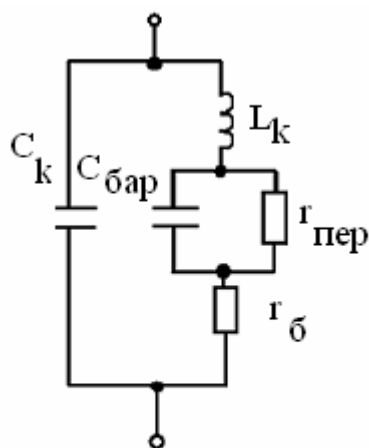


Рисунок 9— Эквивалентная схема

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 9. Здесь переход представлен дифференциальными параметрами сопротивлением перехода $r_{пер} = \partial u / \partial i$ и барьерной ёмкостью $C_{бар}$.

Потери в базе диода, омических переходах и выводах отображены последовательным сопротивлением

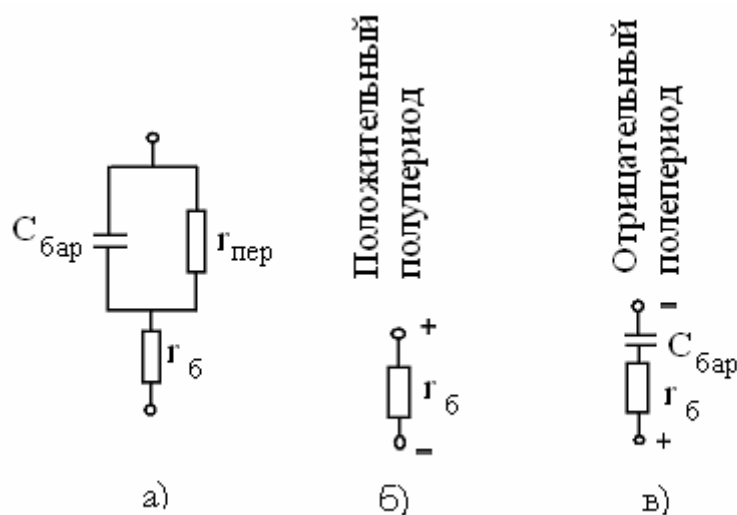
потерь r_b , индуктивность выводов и контактной пружинки – L_k , конструктивная ёмкость между выводами при отсутствии контакта с диодной структурой – C_k . Из-за падения напряжения на r_b и L_k приложенное к переходу напряжения оказывается меньше, чем подведённое к диоду, а ёмкость C_k шунтирует его. Эти параметры называют паразитными. Типичные значения L_k – десятые доли наногенри и C_k – десятые доли пикофарады, r_b – десятые доли или единицы ома. У бескор-

пусных диодов значения C_K и L_K меньше примерно на порядок, благодаря чему их эффективность выше. Значение дифференциального сопротивления $\Gamma_{пер}$ может изменяться в широких пределах в зависимости от положения рабочей точки ВАХ диодов, значение $C_{БАР}$ – десятые доли пикофарады.

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

9 ВЫПРЯМЛЯЮЩИЕ СВОЙСТВА

Переходя к упрощенной эквивалентной схеме (рисунок 10,а), рассмотрим различные режимы работы диода.



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

Рисунок 10 – Режим работы диода

При положительном полупериоде $\Gamma_{пер} \ll \Gamma_{б}$, а ёмкость перехода незначительна, поэтому прямое сопротивление $R_{пр} = \Gamma_{б}$ (рисунок 10,б) ($r_{пер} \gg 1 / \omega \cdot C_{БАР}$).

При отрицательном полупериоде сопротивление $\Gamma_{пер}$ велико, поэтому $r_{пер} \gg 1/\omega C_{БАР}$ и его влиянием можно пренебречь. Следовательно, обратное со-

противление $R_{ОБР} \approx \left| r_{\delta} + \frac{1}{j\omega \cdot C_{БАР}} \right|$ (рисунок 10,в). Ограничиваясь областью частот,

на которых $r_{\delta} \ll 1/\omega C_{БАР}$, получим

$$R_{ОБР} \approx \left| \frac{1}{j\omega \cdot C_{БАР}} \right|.$$

Выпрямляющие свойства диода оцениваются с помощью коэффициента выпрямления:

$$K_{ВЫПР} = \frac{I_{ПР}}{I_{ОБР}} = \frac{R_{ОБР}}{R_{ПР}} \gg 1, \text{ при } U = \pm 1B.$$

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

Таким образом

$$K_{ВЫПР} = \frac{R_{ОБР}}{R_{ПР}} \approx \frac{1}{\omega \cdot C_{БАР} r_{\delta}} \gg 1,$$

откуда условием эффективной работы диода является выполнение неравенства

$$\omega \cdot C_{БАР} r_{\delta} \ll 1.$$

Поэтому в СВЧ диодах стремятся уменьшить ёмкость $C_{БАР}$, используя для этого точечный переход. Для уменьшения r_{δ} берётся низкоомный полупроводниковый материал.

10 ПАРАМЕТРЫ И ХАРАКТЕРИСТИКИ

Чувствительность диода по току β_i . Она определяется отношением приращения выпрямленного тока $\Delta I_{КЗ}$ в режиме короткого замыкания выходной цепи детекторного диода по постоянному току к мощности входного сигнала $P_{ВХ} \leq 10 \text{ мкВт}$:

$$\beta_i = \frac{\Delta I_{КЗ}}{P_{ВХ}} = \frac{I_{КЗ} - I_H}{P_{ВХ}},$$

где I_H – ток в рабочей точке при наличии нагрузки при СВЧ сигнале;

$I_{КЗ}$ – ток через диод при коротком замыкании.

Для повышения чувствительности по току, которая зависит от выбора рабочей точки, иногда используют прямое смещение диода током $I_0 = 20\text{--}50 \text{ мкА}$ от внешнего источника (рисунок 11).

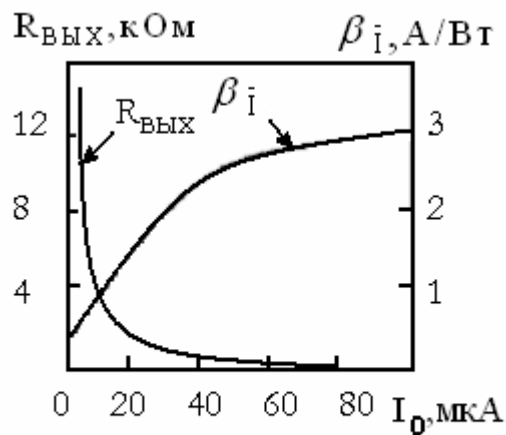


Рисунок 11 – Характеристики диода

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 ёмкости перехода, а именно, вызванное этим током падения напряжения на сопротивление r_6 уменьшает приложенное к

переходу напряжение. Поэтому чувствительность по току на СВЧ ниже $\beta_{i_{\max}}$ и имеет значение

$$\beta_i = 1-5 \text{ А/Вт для ТКД, } \beta_i = 3-10 \text{ А/Вт для ДБШ.}$$

Выходное сопротивление $R_{\text{ВЫХ}}$. По сопротивлению в рабочей точке или выходному сопротивлению диоды делятся на низко- и высокоомные. Выходное сопротивление низкоомных диодов составляет 0.2–0.4кОм, а высокоомных – 1–20кОм. Зависимость $R_{\text{ВЫХ}}$ от прямого тока смещения показана на рисунке 11. Как видим, при $I_0 \approx 20 \text{ мкА}$ имеет место приемлемое для согласования диода с усилителем значения $R_{\text{ВЫХ}}$ (примерно 1кОм).

Относительная температура шума $t_{\text{ш}}$. Качество работы детекторных СВЧ диодов характеризуют относительной температурой шума $t_{\text{ш}}$. Она равняется отношению мощности шумов данного диода в рабочем режиме к мощности шумов эквивалентного сопротивления при той же температуре и одинаковой полосе частот.

Минимальная мощность, которую можно обнаружить детекторным СВЧ диодом, составляет 10^{-8} – 10^{-9} 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

$$P_{\text{ш.норм}} = t_{\text{ш}} kT \Delta f ,$$

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

Δf – полоса частот усилителя;

k – постоянная Больцмана;

T – температура диода (в номинальном режиме $T=T_0=290^0\text{К}$ (+17⁰С)).

При воздействии на диод СВЧ мощности в нём наряду с появлением постоянной составляющей тока I возбуждается шумовой ток $i_{\text{ш}}$. Появление шумового

тока $i_{ш}$ 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

$$P_{ш}R = \kappa T_0 \Delta f ,$$

где T_0 – температура, при которой производится сравнение диода с эквивалентным сопротивлением.

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

$$t_{ш} \kappa T_0 \Delta t = \kappa T_1 \Delta t .$$

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

За стандартную температуру принято принимать $t_{ш} = 290\text{K}$. Обычно $t_{ш} = 2-3$. Зависимость $t_{ш}$ от I_0 приведена на рисунке 12.

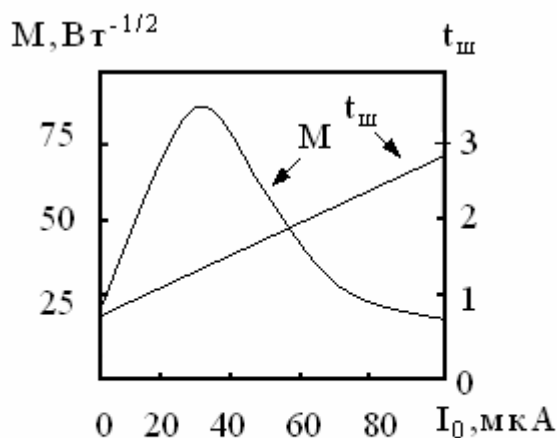


Рисунок 12– Характеристики диода

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

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

$$M = \frac{R_{ВЫХ} \beta_i}{\sqrt{R_{ВЫХ} t_{ш} + R_{ш}}}, \text{ Вт}^{-1/2}, \quad (2)$$

где $R_{ВЫХ}$ – сопротивление диода в рабочей точке,

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

На рисунке 12 показана типичная зависимость M от прямого тока смещения I_0 . Как видим, при $I_0 \approx 20 \text{ мкА}$ имеется максимум M .

Здесь также приведена зависимость $t_{ш}$ от I_0 .

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

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 $\rho = 1.3-2$. /См. Приложение А/.

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 $L = 10 \lg(P_{ВХ}/P_{ВЫХ}) = 10 \lg(I_1/I_2)$,

где I_1 и I_2 – выпрямленный ток детекторного диода, соответствующий мощности на входе и выходе устройства СВЧ. 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 $P_{ГР} \approx 50\text{--}200\text{ мкВт}$.

Электрическая прочность диодов в области отрицательных напряжений

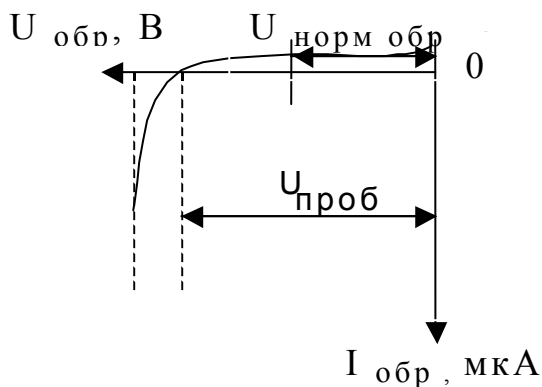


Рисунок 13 – Обратная ветвь ВАХ диода

характеризуется нормируемым обратным напряжением $U_{НОРМ.ОБР}$, (рисунок 13), при котором обратный ток достигает определенного значения, например, для ДБШ $I_{ОБР} = 10\text{ мкА}$. Для германиевого ТКД $U_{НОРМ.ОБР} \approx 1\text{--}3\text{ В}$, для ДБШ $U_{НОРМ.ОБР} \approx 3\text{--}10\text{ В}$, причём меньшие значения относятся к более высокочастотным диодам, у которых толщина эпитаксиального слоя меньше.

Электрическая прочность диодов в области прямых токов характеризуется энергией "выгорания" – той минимальной энергией $W_{ВЫГ}$ импульса длительностью не более 10^{-8} с , после воздействия которого параметры диода необратимо ухудшаются на заданное значение. Обычно $W_{ВЫГ} \approx 10^{-8}\text{--}10^{-7}\text{ Дж}$, 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.

Допустимая рассеиваемая СВЧ мощность $P_{РАС}$. При работе в непрерывном режиме допустимая рассеиваемая СВЧ мощность $P_{РАС}$ для германиевых ТКД составляет $P_{РАС} \approx 10\text{--}40\text{ мВт}$, для кремниевых ТКД и ДБШ $P_{РАС} \approx 10\text{--}100\text{ мВт}$. При де-

детектировании сигналов больших амплитуд детекторные диоды должны обладать более высоким значением напряжения пробоя, что несколько противоречит требованию уменьшения Γ_6 . В этих случаях используются преимущественно ДБШ.

11 УСЛОВНЫЕ ОБОЗНАЧЕНИЯ

Рассмотрим условное обозначение (маркировку) детекторного СВЧ диода 2А201БВП-2.

Первая цифра означает материал, из которого изготовлен диод: 1 – германий, 2 – кремний, 3 – арсенид галлия (соответственно буквы Г, К, А). Следующая после цифры буква А означает: диод СВЧ. Третий элемент – цифра, указывающая классификационную группу: 1 – смесительный, 2 – детекторный, 4 – параметрический, 5 – регулирующий (переключательный или ограничительный), 6 – умножительный или настроенный, 7 – генераторный. Последующие две цифры указывают номер разработки. Следующая за ним буква А, Б или В означает модификацию по электрическим параметрам. Последняя цифра указывает конструкцию выводов. Например, 2 означает, что выводы ленточные.

12 ПОЛУПРОВОДНИКОВЫЕ ДИОДЫ В КАЧЕСТВЕ ДЕТЕКТОРОВ СЛАБЫХ СИГНАЛОВ

Полупроводниковые диоды успешно используются для индикации слабых сигналов. Детектирование осуществляется благодаря нелинейности ВАХ электронного прибора. В полупроводниковых интегральных схемах детектирование осуществляется на СВЧ транзисторах. В тех случаях, когда детекторный диод используется в качестве детектора слабых сигналов, его выходные зажимы соединяются с прибором постоянного тока или входом усилителя низкой частоты или видеоусилителя в зависимости от вида применяемой модуляции. С точки зрения

основных характеристик совершенно безразлично, какой индикаторный прибор используется после детектора. Для простоты рассуждений представим себе схему, состоящую из сопротивления нагрузки и прибора постоянного тока, включённых последовательно с детектором. Под действием СВЧ сигнала в цепи нагрузки появляется постоянный ток, величина которого будет зависеть от ВАХ детектора, полного сопротивления источника высокой частоты и сопротивления нагрузки по постоянному току. Если смотреть со стороны выходных зажимов, то детектор действует как генератор тока с определённым сопротивлением.

Различают диодные индикаторы поля трёх видов:

- с непосредственным отсчётом;
- с усиление детектированного сигнала;
- с гетеродинированием.

Рассмотрим первые два вида.

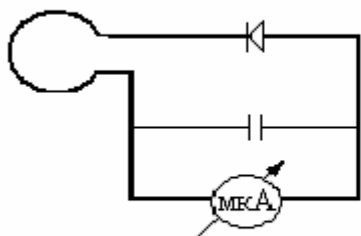


Рисунок 14 - Диодный индикатор

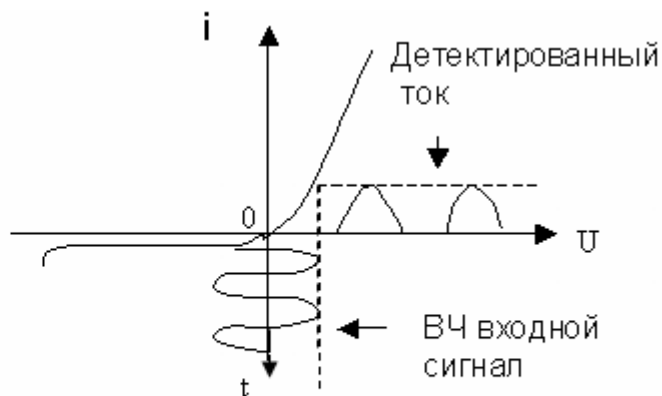


Рисунок 15 - Процесс детектирования

Наиболее простым, хотя и мало чувствительным, является диодный индикатор с непосредственным отсчетом (рисунок 14). Электромагнитное поле наводит в петле, ориентированной соответствующим образом, высокочастотный ток. Этот ток детектируется (рисунок 15) и подаётся на чувствительный прибор, зашунтированный конденсатором C . Размеры петли не должны превосходить половину длины волны. Для повышения чувствительности индикаторов целесообразно усиливать сигнал, получаемый с детекторного диода. Просто и надёжно это можно

сделать, если промодулировать амплитуду напряжённости высокочастотного поля. В измерительных схемах часто применяется импульсная модуляция со скважностью 2 (режим меандра) и с периодом порядка 1мс. Сигналы с детекторного диода, имеющие вид прямоугольных импульсов, подаются на усилитель. К выходу усилителя присоединяется индикаторный прибор, показания которого зависят от напряжённости исследуемого поля.

Определим минимальную мощность, которую можно обнаружить, используя схему с прямым усилением детекторного сигнала. Предположим, что детекторный диод работает на квадратичном участке ВАХ, что оправдывается, если токи, проходящие через диод, не превышают 20мкА.

На рисунке 16 дана эквивалентная схема детектора слабых сигналов.

Детектор представлен в виде генератора постоянного тока с внутренним динамическим сопротивлением $R_{ВЫХ}$. Ток сигнала i , создаваемый детекторным диодом, определяется выражением

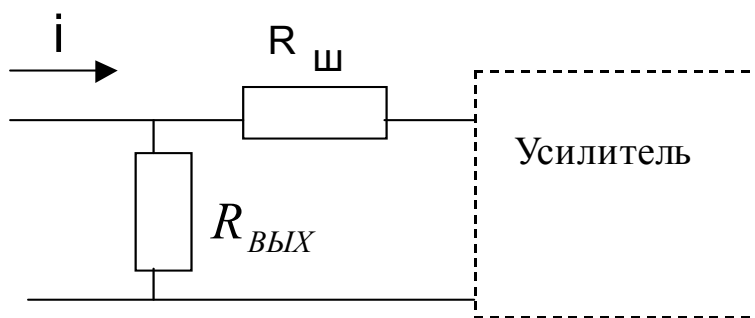


Рисунок 16 – Эквивалентная схема

$$i = \beta_i P, \tag{3}$$

где P – мощность СВЧ-сигнала, подаваемая на диод.

Напряжение сигнала

$$U_C = \beta_i P R_{ВЫХ}, \tag{4}$$

а напряжение шумов, создаваемое комбинацией эквивалентного сопротивления шумов усилителя $R_{ш}$ и сопротивления $R_{ВЫХ}$, определяется зависимостью

$$U_{ш} = \sqrt{4kT\Delta f * (R_{ш} + R_{ВЫХ})}. \tag{5}$$

Запишем отношения указанных напряжений:

$$\frac{U_C}{U_{Ш}} = \frac{\beta_i P R_{ВЫХ}}{\sqrt{4kT\Delta f * (R_{Ш} + R_{ВЫХ})}} = \frac{P}{\sqrt{4kT\Delta f}} M, \quad (6)$$

$$\text{где } M = \frac{\beta_i R_{ВЫХ}}{\sqrt{R_{Ш} + R_{ВЫХ}}}. \quad (7)$$

Последнее выражение аналогично формуле (2) при $t_{Ш}=1$.

Минимальный уровень мощности, который можно обнаружить по такой схеме, определяется из условия:

$$U_C = U_{Ш}. \quad (8)$$

Если положить $\Delta f = 1 \text{ МГц}$, $M = 50 \text{ Вт}^{-1/2}$, $4kT = 1,6 * 10^{-20} \text{ Дж}$, то расчёт по формуле (6) даёт минимально различимую мощность $P_{РАЗ.МИН} = 2,5 * 10^{-8} \text{ Вт}$.

При подключении к усилителю осциллографа или самописца можно наблюдать огибающую амплитудно-модулированных и частотно-модулированных сигналов.

13 АМПЛИТУДНЫЙ ДЕТЕКТОР

Для включения в СВЧ тракт детекторный диод помещают в высокочастотный держатель – детекторную секцию или детектор. Детектор может быть амплитудным или фазовым. Амплитудным детектором называют устройство, предназначенное для преобразования СВЧ-сигналов в сигналы постоянного тока, т.е. для выделения огибающей колебаний СВЧ. Они являются составной частью фазовых и частотных демодуляторов СВЧ, используются в устройствах контроля и автоматического регулирования уровня мощности, частоты, контроля формы сигналов, а также в широкополосных детекторных приемниках.

Детектор состоит из элемента связи с СВЧ-трактом (согласующего устройства), диода, фильтра нижних частот (ФНЧ) и вывода сигнала на НЧ (рисунок 17).

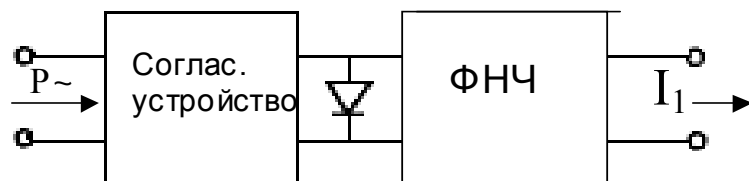


Рисунок 17– Амплитудный детектор

Детектор обеспечивает трансформацию высокочастотного сопротивления диода в сопротивление, равное волновому сопротивлению входной передающей линии. Это необходимо, чтобы избежать нежелательных отражений.

Детекторная секция должна обеспечивать поглощение СВЧ мощности без просачивания её при этом на выходные зажимы.

К амплитудным детекторам предъявляются следующие требования:

- высокая чувствительность и ее равномерность в рабочей полосе частот;
- квадратичность характеристики преобразования (при контроле мощности) или линейность (при контроле формы сигналов);
- хорошее согласование по входу ($\rho \leq 1,3 - 2$);
- надежность конструкции и удобство в эксплуатации;
- малые габаритные размеры и масса.

На рисунке 18 представлен коаксиальный вариант амплитудного детектора.

Диод 1 ввинчивается в держатель 2, заканчивающийся НЧ разъемом 3.

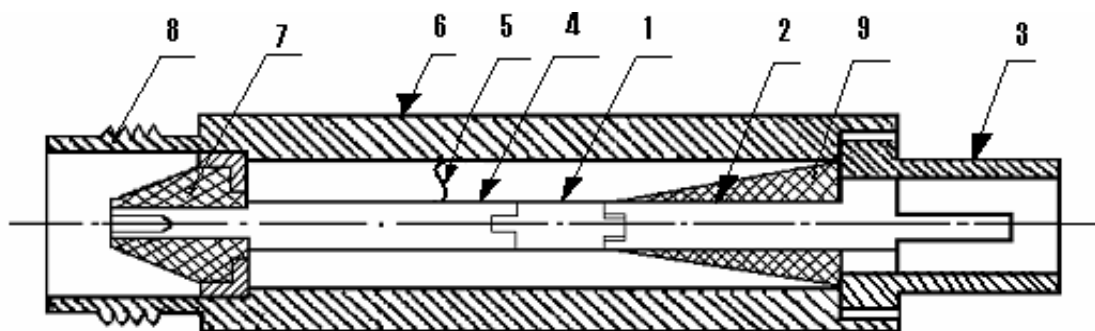


Рисунок 18 - Коаксиальный амплитудный детектор

Другим фланцем диод входит в цапгу центрального проводника 4 коаксиала, который закорочен провололочкой 5 на корпус секции 6. Таким образом, замыкается цепь диода по постоянному току, для СВЧ же сигнала провололочка 5 представляет собой большое индуктивное сопротивление. Диэлектрическая шайба 7 СВЧ разъема 8 центрирует проводник 4. Поглощающая диэлектрическая вставка 9 препятствует просачиванию СВЧ мощности на НЧ выход 3. Таким образом, диод является нагрузкой СВЧ тракта и поглощает СВЧ мощность, преобразуя её в постоянный ток.

Ранее в детекторах использовались точечно-контактные диоды, выпускаемые и ныне для измерительной аппаратуры; в новых разработках применяются ДБШ.

14 ФАЗОВЫЙ ДЕТЕКТОР

Назначение фазового детектора (ФД) состоит в получении постоянного тока, пропорционального разности фаз φ двух когерентных колебаний СВЧ. Они применяются в фазовых демодуляторах, фазометрах, цепях фазовой синхронизации систем фазовой автоматической подстройки частоты (ФАПЧ) и т. п.

Рассмотрим принцип действия ФД. Пусть входные колебания $U_1(t) = U_1 \sin(\omega t + \varphi)$ и $U_2(t) = U_2 \sin \omega t$ имеют неизменные амплитуды, причем $U_2 \geq U_1$. Обычно, $U_2(t)$ называют опорным напряжением, $U_1(t)$ – напряжением сигнала. В ФД используется зависимость амплитуды суммы $U_{\Sigma}(t) = U_1(t) + U_2(t)$ когерентных колебаний от разности фаз φ между ними:

$$U_{\Sigma} = U_1^2 + U_2^2 + 2U_1U_2 \cos \varphi .$$

Поэтому фазовые детекторы состоят из сумматора Σ (схемы сложения) входных колебаний и амплитудного детектора (АД), а общие требования к ним аналогичны требованиям к АД.

Основная характеристика фазового детектора – нормированная амплитудно-фазовая характеристика (АФХ)

$$U_{\text{ВЫХ}} / U_{\text{ВЫХ max}} = F(\varphi), \text{ рад,}$$

крутизна и линейность которой зависят от соотношения амплитуд колебаний, режима работы амплитудного детектора и схемы фазового детектора.

Простейшая небалансная (однотактная) схема ФД с сумматором Σ на синфазном кольцевом делителе мощности приведена на рисунке 19.

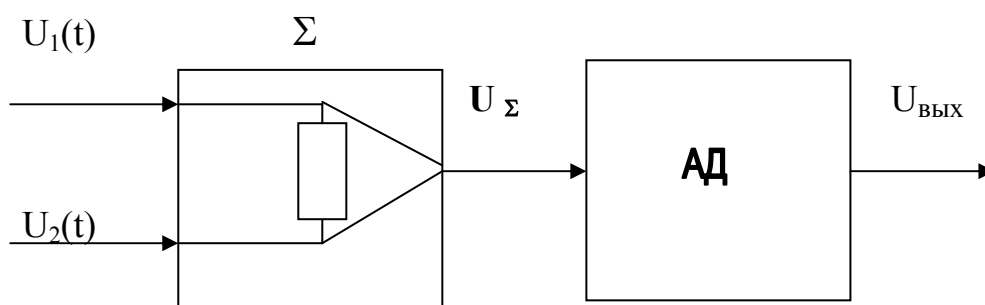


Рисунок 19 - Структурная схема небалансного фазового детектора

АФХ такого ФД изображена на рисунке 20. В режиме квадратичного детектирования АД ($U_{\text{ВЫХ}} \sim U_{\Sigma}^2$ при $U_{\Sigma} \leq 0,2..0,3 \text{ В}$) АФХ представляет собой косинусоиду 1 (для случая $U_1 < U_2$) и косинусоиду 2 (для случая $U_1 = U_2$).

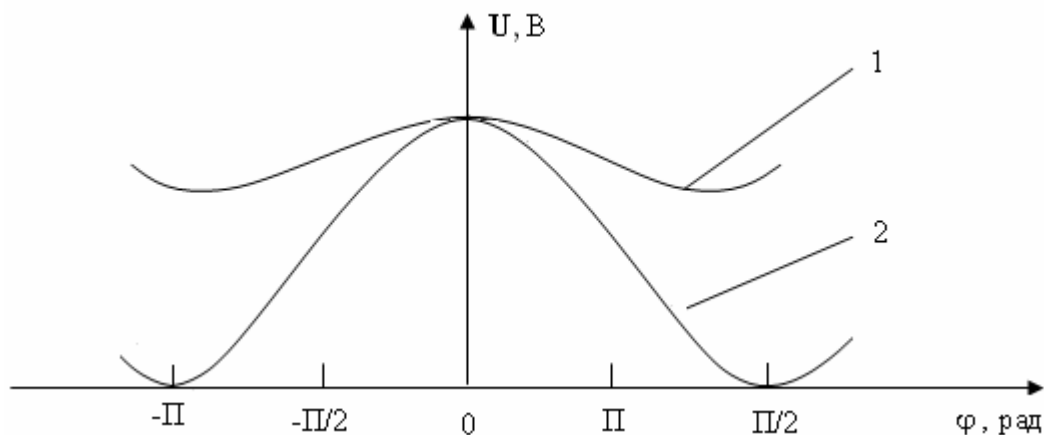


Рисунок 20 - АФХ фазового детектора

15 ИЗУЧАЕМАЯ КОНСТРУКЦИЯ

15.1 Конструкция детекторного СВЧ диода

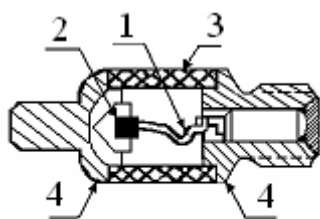


Рисунок 21 – Диод

Изучаемый диод является серийным диодом Д403Б, имеет конструкцию, рассчитанную на включение в волноводный тракт. На рисунке 21 показан разрез детекторного диода: 1 –металлическая игла; 2 – кристалл полупроводника; 3 –керамический корпус; 4 – металлические фланцы –

выводы. Вследствие малой междуэлектродной емкости такой диод может с успехом использоваться на частотах вплоть до десятков гигагерц.

15.2 Конструкция волноводного амплитудного детектора

Волноводный амплитудный детектор (рисунок 22) представляет собой отрезок волновода 1 с фланцем 2, дающий возможность присоединить детектор к волноводному тракту, торцевой стенки 3, двух втулок 4, припаянных к широким стенкам волновода и устройством для крепления диода. Втулка 4 имеет резьбу, что даёт возможность фиксировать положение пробки 5 при завинчивании

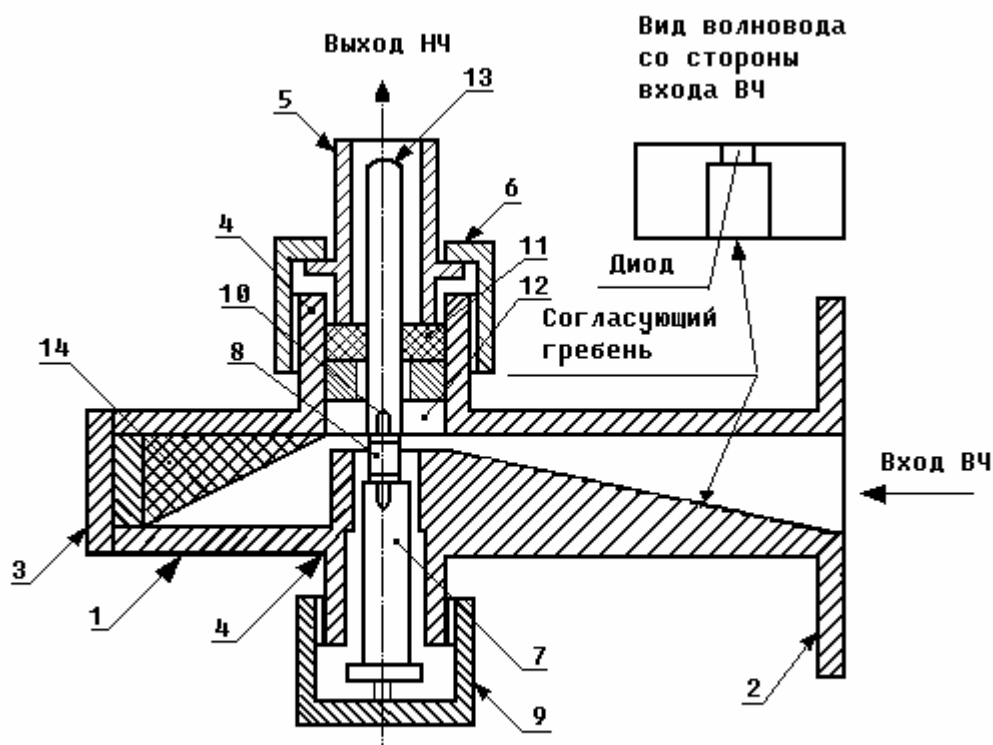


Рисунок 22 – Волноводный амплитудный детектор

гайки 6. Пробка 7 удерживает резьбой диод 8, прижата гайкой 9 и обеспечивает электрический контакт между диодом и массой волновода. Второй фланец диода входит в цангу 10, которая изолирована от волновода шайбой 11 и 12. Гнездо 13 служит для соединения детекторной секции с прибором (индикатором). 14 – поглотитель просачивающейся за диод мощности.

Таким образом, детекторный СВЧ диод устанавливают параллельно узкой стенке волновода вдоль электрических силовых линий в максимуме электрического поля.

Согласование детекторной секции с внешним трактом достигается подбором положения диода относительно торцевой стенки (или поршня). Так, при перемещении диода в поперечном сечении волновода меняется активная составляющая проводимости, вносимой диодом, а при перемещении задней стенки меняется реактивная составляющая. Расстояние между диодом и торцевой стенкой

подбирается так, что реактивности диода и торцевой стенки компенсируют друг друга. Поскольку реактивная составляющая проводимости, вносимой диодом, мала, то это расстояние близко к $\lambda_g/4$.

16 ОПИСАНИЕ УСТАНОВКИ

Для экспериментального изучения физического принципа действия детекторного диода и его характеристик используется лабораторная установка, структурная схема которой приведена на рисунке 23.

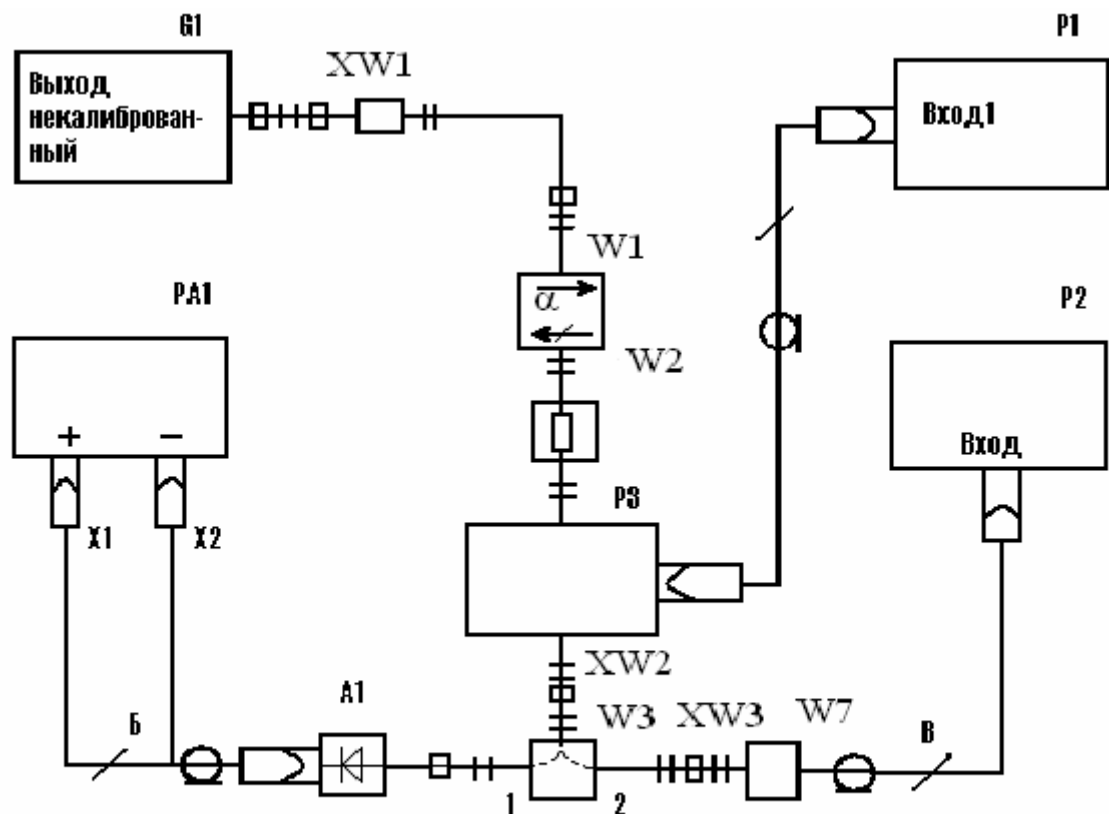


Рисунок 23 – Структурная схема лабораторной установки

На этом рисунке обозначены:

G1 – генератор сигналов высокочастотный Г4-114;

P1 – измеритель отношений напряжения В8-6;

P2 – блок индикаторный Я2М-69 ваттметра М3-42;

РЗ – линия измерительная Р4-29;
РА1 – измерительный прибор М82;
А1 – изучаемый волноводный детектор;
W1 – вентиль ферритовый Э6-45;
W2 – аттенюатор волноводный постоянный 10дБ;
W3 – переключатель волноводный;
W4 – полупроводниковый преобразователь ПП-03 ваттметра МЗ-42;
XW1 – переход волноводный с сечением $11 \times 5,5$ мм на 16×8 мм;
XW2 – волновод прямоугольный сечением 17×8 мм;
XW3 – переход волноводный с сечения 17×8 мм на сечение 16×8 мм;
X1, X2 – штекеры;
А, В – кабели соединительные;
Б – провода соединительные.

Сигнал от генератора G1 поступает через ферритовый вентиль W1, обеспечивающий необходимую развязку между СВЧ трактом и генератором, в измерительную линию РЗ. Измерительная линия используется для измерения КСВН, характеризующего степень согласования детекторной секции А1 с основным трактом. Поскольку сигнал, поступающий с зонда измерительной линии, мал, используется селективный измерительный усилитель Р1. Измерения КСВН проводятся в режиме амплитудной модуляции генератора СВЧ. При работе с измерительной линией усилитель должен быть настроен на частоту модуляции СВЧ-сигнала.

С помощью волноводного переключателя W3 сигнал, идущий от генератора, может поступать либо в ваттметр Р2 (положение 1), либо в детекторную секцию А1 (положение 2). Индикатором детектора служит стрелочный прибор РА1. Мощность измеряется ваттметром Р2 в режиме непрерывной генерации.

Аттенюатор W2 понижает уровень мощности в тракте, чтобы обеспечить квадратичный режим работы детекторного диода.

18 УКАЗАНИЕ МЕР БЕЗОПАСНОСТИ


ВНИМАНИЕ!

При подготовке рабочего места и выполнении работы необходимо руководствоваться правилами, изложенными в «Инструкции по технике безопасности для студентов при работе в учебной лаборатории».

Изучить раздел «Указание мер безопасности» в «Техническом описании и инструкции по эксплуатации » (ТО и ИЭ) к каждому прибору, входящему в установку, и руководствоваться им при работе.

18 ПОДГОТОВКА К ИЗМЕРЕНИЯМ

Ознакомиться с прибором по «ТО и ИЭ». Включить приборы в сеть и подготовить их к работе согласно инструкциям.

Генератор должен работать сначала в режиме внутренней модуляции, т.е. переключатель РЕЖИМ ГЕНЕРАТОРА необходимо поставить в положение  ВНУТР. МОД.

19 ПРОВЕДЕНИЕ ИЗМЕРЕНИЙ

ВНИМАНИЕ! Следите, чтобы в процессе измерений стрелка прибора М82 не выходила за пределы шкалы. Пользуйтесь переключателем пределов.

Убедиться, что переключатель прибора М82 стоит в положении 0,15мА, ручка УСТАНОВКА ЧАСТОТЫ находится в крайнем левом положении, что соответствует частоте 16,48ГГц. Измерительная линия настроена на эту же частоту.

Для того чтобы провести измерения, необходимо проделать следующее:

- нажать кнопку НГ РЕЖИМА ГЕНЕРАТОРА;
- поставить переключатель УСТАНОВКА ГЕНЕРАЦИИ в положение;

- поставить волноводный переключатель W3 в положение1;
- установить на генераторе максимальную выходную мощность, выставив деление 45 ручкой МОЩНОСТЬ;
- настроить генератор по ваттметру на максимальную выходную мощность ручкой УСТАНОВКА ГЕНЕРАЦИИ ПЛАВНО;
- измерить уровень мощности, поступающей в ваттметр (порядка 300 мкВт);
- нажать кнопку $\square\square\square$ ВНУТР;
- измерить КСВН В тракте, нагруженном на ваттметр;
- поставить волноводный переключатель W3 в положение2;
- измерить КСВН в тракте, нагруженном на детекторную секцию;
- нажать кнопку НГ;
- настроить генератор ручкой УСТАНОВКА ГЕНЕРАЦИИ ПЛАВНО на максимальную мощность;
- измерить зависимость тока диода от мощности сигнала, подавая последовательно с помощью волноводного переключателя сигнал, то на детекторную секцию, то на ваттметр;
- выключить приборы по окончании работы.

20 УКАЗАНИЯ К ОФОРМЛЕНИЮ РЕЗУЛЬТАТОВ

При оформлении результатов необходимо выполнить следующее:

- а) Рассчитать по формуле (6) минимальный уровень мощности, который можно обнаружить детекторным диодом, для схемы с прямым усилением для параметров, взятых из таблицы (номер указывает преподаватель).

Таблица 1 Данные для расчета минимального уровня мощности

Номер задания	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$\Delta f, \text{МГц}$	1,20	1,15	1,10	1,05	1,00	0,95	0,90	0,85	0,80	0,75
$M, \text{Вт}^{-\frac{1}{2}}$	50	52	54	56	58	60	62	64	66	68
$4kT \cdot 10^{-20},$ <i>Дж</i>	1,40	1,44	1,48	1,52	1,56	1,60	1,64	1,68	1,72	1,76

б) Вычислить полную мощность, отдаваемую в тракт генератором, с учетом КСВН в тракте

$$P_{ГЕН} = P_{ВЫД} (\rho + 1)^2 / (4\rho),$$

где $P_{ГЕН}$ – мощность падающей (от генератора) волны;

$P_{ВЫД}$ – мощность, выделяемая в потребляющем устройстве (ваттметре);

ρ – КСВН в тракте, нагруженном на ваттметр.

в) Вычислить величину мощности, поступающей на детекторный диод, с учетом КСВН в тракте

$$P'_{ВЫД} = P_{ГЕН} (4\rho') / (\rho' + 1)^2,$$

где $P_{ГЕН}$ определяется по предыдущей формуле,

ρ' – КСВН в тракте, нагруженном на детекторную секцию.

г) Построить график зависимости тока диода от мощности, поступающей на диод:

$$I, \text{мкА} = f(P'_{ВЫД}), \text{мВт}.$$

д) Рассчитать максимальную токовую чувствительность (отношение тока детектора к мощности, вызвавшего этот ток) в [А/Вт].

21 УКАЗАНИЯ К ОТЧЕТУ

Отчет должен содержать:

- а) все пункты задания;
- б) структурную схему лабораторной установки;
- в) результаты работы, представленные в виде таблиц, графиков и расчетов;
- г) выводы по работе и оценку полученных результатов (письменно).

21 КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Для чего предназначается детекторный диод?
2. Какие диоды используются для детектирования?
3. Какие физические процессы происходят на границе металла с полупроводником?
4. Вольт-амперные характеристики различных типов диодов?
5. В чём выражаются нелинейные свойства диодов?
6. В каком случае можно представить диод в виде эквивалентной схемы с сосредоточенными параметрами?
7. Как оцениваются выпрямляющие свойства диода?
8. Условие эффективной работы диода.
9. Основные параметры детекторного диода.
10. Схема индикации слабых сигналов.
11. Условие минимально различимой мощности.
12. Что такое амплитудный детектор?
13. Какова конструкция изучаемого диода и детекторной секции?
14. В чём заключается методика измерений?
15. Объясните график и результаты расчёта.
16. Объясните принцип работы измерительных приборов, входящих в установку.

Приложение А

Коэффициент стоячей волны напряжения

При распространении энергии от генератора к нагрузке часть энергии отражается от нагрузки. Результирующее распределение напряжения вдоль линии получается при суммировании высокочастотного напряжения падающей ($U_{\text{ПАД}}$) и отражённой ($U_{\text{ОТР}}$) волн. В линии устанавливается режим стоячей волны. Отношение максимального значения напряжения стоячей волны $U_{\text{МАКС}}$ к минимальному напряжению $U_{\text{МИН}}$, называется коэффициентом стоячей волны по напряжению (КСВН) и обозначается ρ :

$$\rho = \frac{U_{\text{МАКС}}}{U_{\text{МИН}}} = \frac{|\dot{U}_{\text{ПАД}}| + |\dot{U}_{\text{ОТР}}|}{|\dot{U}_{\text{ПАД}}| - |\dot{U}_{\text{ОТР}}|}.$$

КСВН является доступным для измерения параметром и может быть непосредственно определён, например, с помощью измерительной линии. $U_{\text{МАКС}}$ и $U_{\text{МИН}}$ – показания индикаторного прибора, соответственно при положениях зонда в максимуме и минимуме напряжения стоячей волны в линии.

Учитывая, что характеристика детекторного диода при малых токах (порядка 100мкА и менее) является квадратичной, практически следует пользоваться формулой $\rho = \sqrt{U_{\text{МАКС}} / U_{\text{МИН}}}$.

Величина КСВН связана с величиной коэффициента отражения Γ следующим образом

$$\rho = (1 + |\Gamma|) / (1 - |\Gamma|).$$

Пределами изменения КСВН является 1 и ∞ , поскольку величина $|\Gamma|$ может изменяться в пределах от 0 до 1. Полному отражению от нагрузки соответствует бесконечно большая величина КСВН. Режим идеального согласования с нагрузкой характеризуется величиной КСВН, равной 1.

Обеспечение согласования в линиях передачи является одной из наиболее распространенных и важных задач в технике СВЧ.

ЛИТЕРАТУРА

1. Гинзтон Э.Л. Измерения на сантиметровых волнах /Под ред. Г.А.Ремеза, - М.:Издательство иностранной литературы, 1960. -620 с.
2. Тишер Ф. Техника измерений на сверхвысоких частотах: Справочное руководство. – М.:Государственное издательство физико-математической литературы, 1963.-367 с.
3. Пасынков В.В., Чиркин Л.К., Шинков А.Д. Полупроводниковые приборы: Учебник для вузов, 3-е изд., перераб. и допол. -М.: Высшая школа, 1981.- 431 с.
4. Милованов О.С., Собенин Н.П. Техника сверхвысоких частот: Учебное пособие для вузов- М.: Атомиздат, 1980.- 464 с.
5. Дулин В.Н. Электронные приборы: Учебник для студентов, обучающихся по специальности «Радиотехника». - М.: Энергия, 1977.- 464 с.
6. Кукарин С.В. Электронные СВЧ приборы: Характеристики, применение, тенденции развития. – М.: Радио и связь, 1981.- 272 с.
7. Специальный физический практикум, ч.3. – М.:Издательство Московского университета, 1977. – 272 с.
8. Электронные приборы СВЧ: Учебное пособие для вузов по специальности «Электронные приборы» /Березин В.М., Буряк В.С., Гутцайт Э.М., Марин В.П. – М.: Высшая школа, 1985. –296 с.
9. Твердотельные устройства СВЧ в технике связи / Л.Г.Гассанов, А.А.Липатов, В.В.Марков, Н.А.Могильченко. – М.: Радио и связь, 1988. – 288 с.