

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ
ФЕДЕРАЦИИ
Федеральное государственное автономное
образовательное учреждение высшего образования
«СЕВЕРО-КАВКАЗСКИЙ ФЕДЕРАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»

Методические указания
к лабораторным работам
по дисциплине «УСТРОЙСТВА СВЧ»
для студентов направления подготовки
11.03.04 Электроника и нанoeлектроника
Направленность (профиль)
«Интеллектуальные программируемые системы и устройства»

Ставрополь 2026 г.

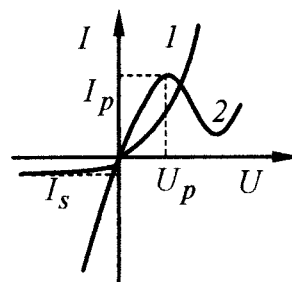
1. ИССЛЕДОВАНИЕ ДЕТЕКТОРНЫХ ДИОДОВ

Цель работы – исследование характеристик полупроводниковых детекторных диодов, предназначенных для преобразования модулированного высокочастотного сигнала в низкочастотный, изменяющийся с частотой модуляции, и устройств на их основе.

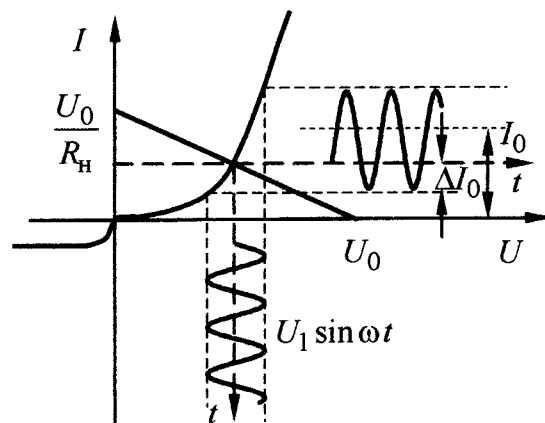
1.1. Основные теоретические положения

Детекторный диод – полупроводниковый диод, используемый для детектирования сигнала. При детектировании используется выпрямляющее свойство диода для выделения сигнала более низкой частоты из модулированных по амплитуде СВЧ-колебаний.

Для преобразования частоты обычно используются диоды с нелинейной вольтамперной характеристикой. Возникновение нелинейной ВАХ может быть связано с различными как объемными, так и контактными явлениями в полупроводниках. Наибольшее распространение в диапазоне СВЧ получили детекторные диоды, выполненные на основе структур с переходом *металл–полупроводник* или с односторонне вырожденным *p–n-переходом*. При общей схожести ВАХ таких диодов в области малых напряжений имеются различия.



На рис. 1.1 представлена ВАХ диода с барьером Шотки (ДБШ) – кривая 1 и ВАХ обращенного туннельного диода (ОТД) – кривая 2. Из сопоставления двух характеристик становится понятным термин «обращенный». Обратная ветвь ВАХ обращенного туннельного диода качественно подобна прямой ветви ВАХ диода с барьером Шотки. Рабочая точка диода выбирается таким образом, чтобы крутизна ВАХ до и после этого напряжения существенно различалась (рис. 1.2).



В этом случае при синусоидальном входном сигнале сигнал, снятый с диода, будет иметь не чисто синусоидальный вид, так как его амплитуда в отрицательный полупериод будет существенно меньше, чем в положительный. Именно по этой причине такое напряжение,

приложенное к некоторой емкости, будет приводить к ее заряду. Разряд конденсатора при правильном выборе величины емкости в отрицательный полупериод будет практически не заметен. Следовательно, подача на диод синусоидального СВЧ-сигнала приведет к возникновению постоянного напряжения на нагрузке.

Вне зависимости от конкретного вида ВАХ, при малой амплитуде тока временная зависимость высокочастотной составляющей тока $i(t)$, протекающего через диод, может быть представлена в виде ряда Тейлора:

$$i(t) = I(U_0 + U_{\sim}(t)) = I_0(U_0) + \frac{dI}{dU} U_{\sim}(t) + \frac{d^2 I}{dU^2} U_{\sim}^2(t) + \dots, \quad (1.1)$$

где U_0 – постоянное смещение, $U_{\sim}(t)$ – переменное напряжение, причем $|U_{\sim}(t)| \ll U_0$. Второй член ряда представляет собой *дифференциальную проводимость* $g = dI/dU$, третий – *кривизну* ВАХ $\alpha = d^2 I/dU^2$.

Если переменное напряжение изменяется по гармоническому закону $U_{\sim}(t) = U_1 \sin \omega t$, где U_1 – амплитуда, ω – циклическая частота, то из выражения (1.1) следует:

$$i(t) = I_0(U_0) + \frac{\alpha}{4} U_1^2 + g U_1 \sin \omega t - \frac{\alpha}{4} U_1^2 \cos 2\omega t + \dots \quad (1.2)$$

Из формулы (1.2) видно, что нелинейность ВАХ (крутизна α) приводит к преобразованию частоты как «вниз» (детектирование), так и «вверх» (возникновение высших гармоник). Величину детектирования определяет дополнительное второе слагаемое к величине постоянного тока, пропорциональное квадрату амплитуды переменного напряжения. Отметим, если кривизна α зависит от постоянного смещения U_0 , то и выпрямленный ток имеет такую же зависимость. Следовательно, для обеспечения более высокого значения α следует соответствующим образом подбирать режим питания диода.

Основными параметрами и характеристиками детекторных диодов являются: вольтамперная характеристика, полное сопротивление, граничная частота, токовая чувствительность, тангенциальная чувствительность и шумовое отношение.

Физическими механизмами, определяющими форму ВАХ детекторных структур, являются перенос основных носителей заряда над потенциальным барьером контактного слоя и туннелирование сквозь барьер в случае сильнолегированного полупроводника. Туннелирование обеспечивает меньшую

инерционность по сравнению с невырожденным p - n -переходом. Теоретическая формула ВАХ диода с барьером Шоттки имеет вид:

$$I = I_s (\exp(qU/nKT) - 1) = AT^2 \exp(-qU_b/KT) (\exp(q(U - I_d R_s)/nKT) - 1), \quad (1.3)$$

где I – ток диода; I_s – ток насыщения при обратном смещении (тепловой ток); e – заряд электрона; U – напряжение смещения диода; n – коэффициент идеальности, отражающий влияние туннелирования и приконтактного диэлектрического слоя; K – постоянная Больцмана; T – абсолютная температура; A – постоянная Ричардсона; $U_b = \phi_c = 0,5 \dots 0,8$ В – контактная разность потенциалов, или встроенное напряжение. Для идеального диода коэффициент идеальности $n = 1$, для реального – $n > 1$.

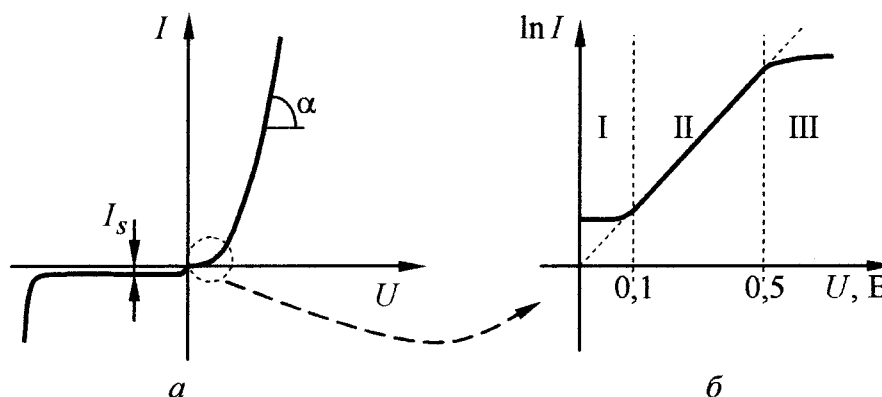


Рис. 1.3

Вольтамперная характеристика ДБШ имеет вид, характерный для любого выпрямляющего контакта, и представлена на рис. 1.3.

На графике ВАХ ДБШ (рис. 1.3, а) можно выделить ряд характерных участков. Рассмотрим отрицательную ветвь ВАХ. При малых обратных смещениях ток через диод практически неизменен и определяется током неосновных носителей заряда. Ток I_s создают неосновные носители, попавшие в область тянущего электрического поля из диффузионных областей перехода. Такой ток называют *тепловым* током. При больших обратных смещениях ток, протекающий через диод, резко возрастает. Это обусловлено тем, что здесь диод переходит в режим лавинного пробоя. Если диод длительное время работает в таком режиме, он может выйти из строя. Особый интерес представляет собой прямая ветвь ВАХ. Если построить ее начальный участок в логарифмическом масштабе (рис. 1.3, б), нетрудно заметить, что полученный график имеет три ярко выраженных участка.

Средний участок II характеризуется экспоненциальным ростом тока и хорошо согласуется с известными теоретическими соотношениями. Отклонение от экспоненциальной зависимости на участке I прямой ветви ВАХ диода обусловлено наличием токов утечки, не учитываемых при выводе теоретической формулы. В области больших прямых смещений (участок III) прямое напряжение на переходе таково, что он полностью открыт (для открытия перехода достаточно примерно 0,5 В). Отклонение реальной ВАХ от экспоненциального роста на этом участке определяется влиянием резистивных областей диода, что учитывается резистором R_s на эквивалентной схеме. Эта область получила название резистивной.

Для обращенного туннельного диода в области малых напряжений вольтамперная характеристика имеет вид:

$$I = I_p (U/U_p) \exp(1 - U/U_p), \quad (1.4)$$

где I_p и U_p – ток и напряжение, соответствующие максимуму начального участка вольтамперной характеристике ОТД.

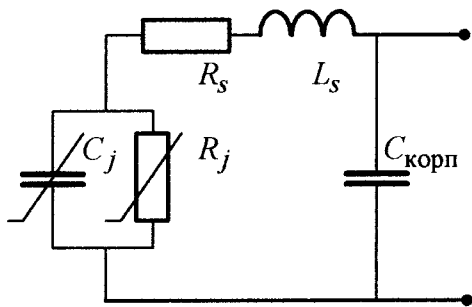


Рис. 1.4

Важными характеристиками СВЧ-диода являются полное комплексное сопротивление (импеданс) и граничная частота, которые можно вычислить, используя эквивалентную схему диода (рис. 1.4). Импеданс диода зависит как от сопротивления перехода R_j и емкости перехода C_j , меняющихся с вариацией

напряжения смещения, так и от паразитных параметров диода: сопротивления толщи полупроводника R_s , емкости корпуса $C_{\text{корп}}$ и индуктивности подводящих проводников L_s . Для обеспечения максимального напряжения на детектирующем контакте необходимо стремиться к высокому значению критической частоты $\omega_c = 1/(R_s C_j)$. Это условие предъявляет особые требования к электрофизическим параметрам полупроводника и конструкции диода, которые влияют на максимальную рабочую частоту прибора. Эта частота определяется постоянной времени RC-цепи, физически представляющей собой последовательное соединение резистивных областей диода и емкости его перехода. При положительном смещении, например в положительный полупериод СВЧ-колебаний, доминирующим фактором, влияющим

на работу прибора, является наличие сопротивления R_s . При отрицательном смещении из-за расширения области пространственного заряда емкость перехода C_j увеличивается и ее влияние начинает преобладать над влиянием сопротивления омических областей. Ввиду этого при отрицательной полярности напряжения, приложенного к диоду, принято пренебрегать резистором R_s , а при положительной – емкостью C_j .

Для увеличения граничной частоты, т. е. для расширения частотного диапазона прибора, необходимо прежде всего уменьшить емкость перехода. В связи с этим наибольшее распространение в качестве детекторных диодов получили диоды с барьером Шотки, в котором отсутствует диффузионная емкость. Зависимость величины барьерной емкости от смещения остается единственным фактором, формирующим емкость перехода в целом у такого диода. Инерционность детекторного ДБШ определяется следующими соображениями. При увеличении обратного смещения увеличивается глубина обеднения, а следовательно, и время пролета носителей заряда. Если время пролета носителей приближается к периоду СВЧ-колебаний, качество работы диода существенно снижается. Для того чтобы этого не происходило, следует уменьшать емкость перехода за счет уменьшения его площади (модель плоского конденсатора $C_j = \epsilon S/d$).

С другой стороны, величина сопротивления однородных областей структуры диода может быть рассчитана как $R_s = \rho l/S = l/(qN\mu_0 S)$. Естественно, что уменьшать это сопротивление за счет увеличения площади перехода нецелесообразно. Остается увеличивать уровень легирования и подвижность носителей заряда. Поэтому современные детекторные диоды создаются на основе арсенида галлия, обладающего высокой подвижностью. Увеличение уровня легирования полупроводника в целях уменьшения R_s связано с рядом ограничений. Пробивное напряжение полупроводников находится в пределах 150...200 В. При легировании порядка 10^{18} см^{-3} , ширине обедненного слоя 1 мкм и напряжении смещения 1 В напряженность поля в области перехода диода составит 100 кВ/см. Таким образом, современный детекторный диод представляет собой достаточно чувствительную структуру. Чтобы в процессе монтажа и эксплуатации не произошло электрического разрушения перехода, диод помещают в свинцовую капсулу. Принимают и другие меры предосторожности.

Функциональные свойства СВЧ-диода характеризуют токовая и тангенциальная чувствительности.

Токовая чувствительность является одним из основных параметров диода и представляет собой отношение приращение выпрямленного тока ΔI к приращению мощности СВЧ-сигнала, поступающего на диод ΔP :

$$\beta = \Delta I / \Delta P. \quad (1.5)$$

Из (1.5) следует, что токовая чувствительность зависит не только от кривизны ВАХ диода, но и от условий его согласования с СВЧ-трактом. Токовая чувствительность максимальна, когда вся падающая мощность полезного сигнала от генератора $P_{\text{ген}}$ рассеивается диодом. В общем случае, когда согласование в тракте неидеально, приращение СВЧ-мощности в формуле для токовой чувствительности будет определяться выражением

$$\Delta P = (1 - \Gamma^2) \Delta P_{\text{ген}},$$

где $\Gamma = (Z_d - Z_0) / (Z_d + Z_0)$ – коэффициент отражения по мощности, Z_d и Z_0 – импедансы диода и СВЧ-тракта. С другой стороны, коэффициент отражения связан с коэффициентом стоячей волны K_c известным выражением

$$\Gamma = (K_c - 1) / (K_c + 1).$$

Токовая чувствительность, выраженная через параметры эквивалентной схемы, определяется следующим выражением:

$$\beta = \frac{\alpha}{2g} \left[\left(1 + R_s / R_j \right) \left(1 + \omega / \omega_c \right) \right]^{-2}, \quad (1.6)$$

где g – дифференциальная проводимость в рабочей точке; ω_c – граничная частота диода; α – кривизна ВАХ в рабочей точке. Кривизна вычисляется:

для ДБШ – $\alpha / 2g = e / 2nKT$.

для ОТД – $\alpha / 2g = (2U_p - U) / (2U_p(U_p - U))$.

Сделаем выводы. Токовая чувствительность зависит от кривизны ВАХ, а также от условий согласования детекторного диода с СВЧ-трактом. Она максимальна, когда вся падающая мощность рассеивается диодом и отражения минимальны. Используя (1.6), можно показать, что для идеального диода при экспоненциальной зависимости ВАХ токовая чувствительность равна $q/2KT$. Таким образом, подставив численные значения, получим, что для любого детекторного диода при температуре 300 К существует принципи-

альное ограничение на величину токовой чувствительности равную 20 В^{-1} . Отметим, что в реальности детекторные диоды имеют $\beta = 2 \dots 4 \text{ В}^{-1}$.

Для описания понятия тангенциальной чувствительности рассмотрим обобщенную СВЧ-цепь (рис. 1.5). Мощность генератора $P_{\text{СВЧ}}$ поступает на детекторный диод. Пусть сигнал представляет собой промодулированные высокой частотой прямоугольные импульсы (меандр). Продетектированный сигнал усиливается усилителем высоких частот и отображается на экране осциллографа. В зависимости от уровня мощности, установленного на генераторе, возможны три

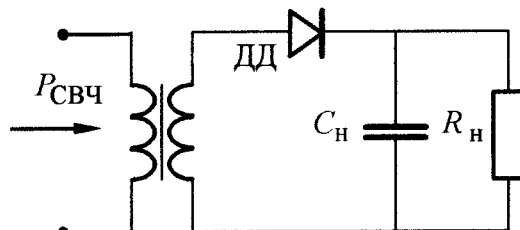


Рис. 1.5

характерных случая (рис. 1.6). В первом случае уровень входной мощности равен нулю, и мы можем наблюдать шум, присутствующий в схеме. Во втором случае уровень мощности достаточно велик, так что можно без труда выделить на фоне шумов полезный сигнал. Третий случай представляет особый интерес: верхняя граница полосы шумов при отсутствии сигнала совпадает с нижней границей полосы шумов при наличии сигнала. При дальней-

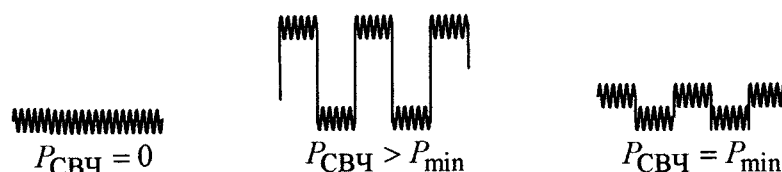


Рис. 1.6

шем уменьшении мощности полезного сигнала шумы начнут заглушать полезный сигнал. Такое минимальное значение мощности, рассеиваемой диодом, и есть *тангенциальная чувствительность*. Однако для удобства работы при определении тангенциальной чувствительности принято пользоваться выражением, в котором она измеряется в децибелах относительно 1 мВт – в дБм

$$P_{\text{tg}} = -10 \lg P_{\text{СВЧ}} . \quad (1.7)$$

1.2. Описание объекта исследования

На СВЧ используются детекторные диоды в основном двух типов: ДБШ и ОТД. Рассмотрим наиболее типичные конструкции детекторных диодов. Исторически первый вариант конструкции диода с барьером Шотки представлял собой структуру с контактом металл–полупроводник, созданным в

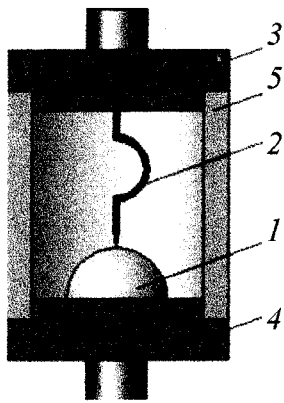


Рис. 1.7

точке соприкосновения металлической проволоки с поверхностью поликристаллической пластины кремния. Такая конструкция получила название точечного диода. Как показано на рис. 1.7, точечный диод состоит из поликристаллического образца кремния p -типа 1, в контакте с которым находится пружина из заостренной на конце вольфрамовой проволоки 2. Электроды 3 и 4 спаяны с керамическим корпусом 5. Острие пружины приваривается к полупроводнику пропусканием импульса тока. В месте сварки образуется барьер Шотки

весьма малой площади, что обуславливает малую емкость перехода и высокое значение R_s . Такая структура далека от совершенства, что приводит к отклонению его ВАХ от идеальной и появлению избыточных шумов.

Эти недостатки отсутствуют в планарных диодах — эпитаксиальных структурах с напыленной металлической пленкой (рис. 1.8). Такой ДБШ представляет собой мезаструктуру из арсенида галлия. Металлизация 1, нанесенная методом вакуумного испарения, образует с эпитаксиальной пленкой n -типа барьер Шотки 2, по своим свойствам близкий к идеальному.

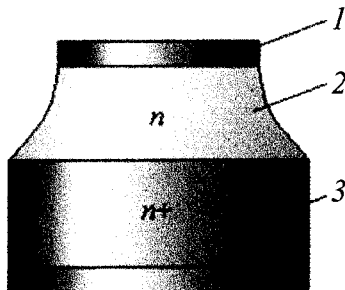


Рис. 1.8

Сильнолегированная n^+ -подложка 3 способствует малому сопротивлению R_s . Ввиду этого несмотря на большую по сравнению с точечным диодом емкость такой ДБШ имеет более высокую критическую частоту при меньшем уровне шумов.

Обращенные туннельные диоды содержат узкий p - n -переход, сформированный в полупроводнике (чаще в германии) методом диффузии или сплавления. Обычно такой переход создается в месте контакта германия p -типа с пружиной из сплава Pb—Sb. В отличие от обычных туннельных диодов, в ОТД вырожденной является только одна сторона p - n -перехода, вследствие чего ВАХ не имеет падающего участка на зависимости. Диоды такого типа имеют высокую токовую чувствительность, малые шумы и могут работать без постоянного смещения. К числу недостатков ОТД относится большая емкость p - n -перехода, для уменьшения которой стремятся к уменьшению площади, что в свою очередь сокращает допустимые уровни детектированной СВЧ-мощности.

1.3. Описание измерительной установки

Измерительная установка состоит из двух частей. Первая предназначена для снятия статических ВАХ и включает в себя плату с исследуемыми диодами разных типов, коммутирующий переключатель, источник питания и амперметр. Вторая часть используется для измерений на СВЧ и показана на рис. 1.9. В состав СВЧ-схемы входят генератор 1, подключенный через вентиль 2, измерительный аттенюатор 3 и измерительная линия 4, подключенная

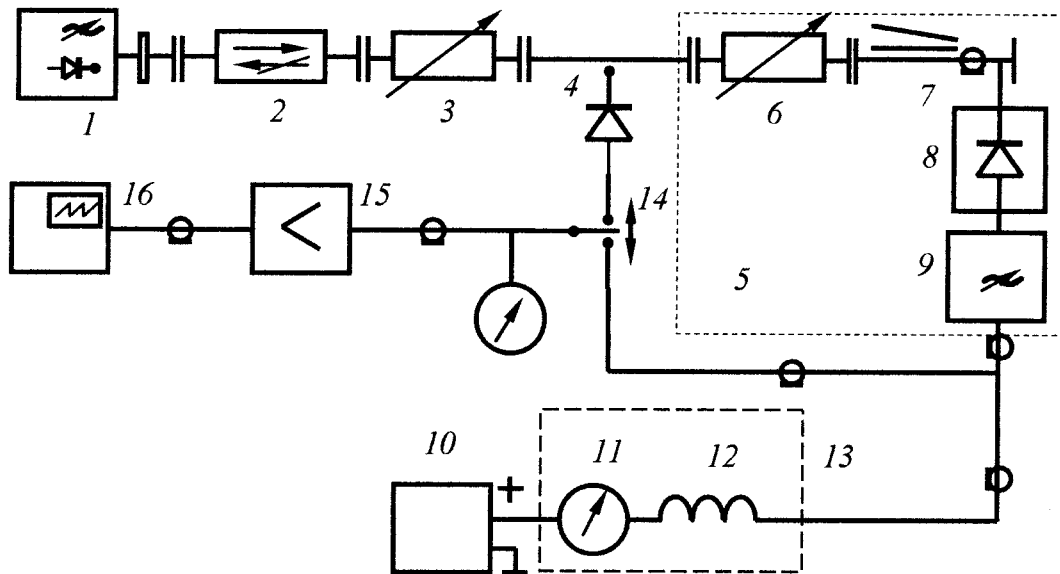


Рис. 1.9

к волноводной головке 5, содержащая встроенный аттенюатор 6, волноводный трансформатор 7, исследуемый детекторный диод 8 и фильтр нижних частот 9. Постоянное смещение от источника 10 подается на диод через мультиметр, использующийся как микроамперметр 11 и дроссель 12, служащий для развязки цепей сигнала и смещения. Для исключения паразитных наводок микроамперметр и дроссель помещены в ферромагнитный экран 13. Сигналы с измерительной линии и выхода детектора с помощью переключателя 14 подаются на вход усилителя 15, а затем на осциллограф 16. Для индикации сигналов с измерительной линии и с выводов исследуемого диода могут применяться отдельные приборы.

1.4. Предварительное задание

1. Изучить теоретическую часть работы. При необходимости обратиться к рекомендованной литературе.
2. Подготовить таблицы для снятия экспериментальных зависимостей.

1.5. Основное задание

1. Снять статические ВАХ для диодов предложенных типов.
2. Исследовать амплитудные характеристики детектора (зависимости тока диода от падающей мощности) при нескольких значениях напряжения смещения. Для изменения уровня мощности использовать аттенуатор 3.
3. Исследовать зависимость токовой чувствительности детектора от напряжения смещения и частоты сигнала.
4. Исследовать зависимость КСВ и полного сопротивления детекторной секции от напряжения смещения диода и частоты сигнала при помощи измерительной линии.
5. Исследовать зависимость тангенциальной чувствительности от частоты и напряжения смещения. Для этого перевести генератор в режим «амплитудная модуляция» для колебаний типа «меандр». Сигнал с выхода исследуемой детекторной секции через усилитель подать на осциллограф. Определить значение тангенциальной чувствительности по формуле (1.6).

1.6. Содержание отчета

1. Цель работы.
2. Схема измерительной установки.
3. Краткие сведения о типах детекторных диодов, физические принципы их действия, их основные характеристики.
4. Экспериментальные статические ВАХ диодов. Значения величин I_s , n , I_p , U_p из (1.3) и (1.4)) на основе измеренных данных.
5. Расчетные ВАХ с использованием данных п. 4
6. Зависимости амплитудных характеристик детектора (определить область «квадратичности», т. е. области, где эта зависимость линейна).
7. Зависимости токовой чувствительности детектора от напряжения смещения диода и частоты сигнала. При вычислении по (1.5) токовой чувствительности учесть наличие отражения от детекторной секции. Сравнить экспериментальные данные с результатами расчетов по формуле (1.6).
8. Зависимости КСВ и полного сопротивления детекторной секции от напряжения смещения и частоты СВЧ-сигнала.
9. Зависимости тангенциальной чувствительности от частоты и напряжения смещения с использованием (1.7).
10. Выводы по работе.

1.7. Контрольные вопросы

1. Каким требованиям должна удовлетворять ВАХ диода для получения эффекта детектирования?
2. Чем определяется значение критической частоты детекторного диода? Каковы пути ее увеличения?
3. Влияние СВЧ-тракта на токовую чувствительность.
4. Как измеряется тангенциальная чувствительность?

2. ИССЛЕДОВАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК ПЕРЕКЛЮЧАТЕЛЯ И ОГРАНИЧИТЕЛЯ НА $p-i-n$ -ДИОДАХ

Цель работы – ознакомление с принципами действия переключательных и ограничительных $p-i-n$ -диодов, а также схем включения и измерение основных характеристик этих устройств на СВЧ.

2.1. Основные теоретические положения

Для управления СВЧ-мощностью в линии передачи возможно применение полупроводниковых СВЧ-диодов. Управляющее действие таких диодов основано на изменении их сопротивления при изменениях приложенного напряжения смещения или уровня СВЧ-мощности в тракте. Различают управляемые и самоуправляемые устройства на основе СВЧ-диодов.

СВЧ $p-i-n$ -диоды широко используются для управления уровнем и фазой СВЧ-сигналов, для коммутации и стабилизации СВЧ-мощности в линиях передач, для защиты радиотехнической аппаратуры от случайных СВЧ-импульсов. Диоды, предназначенные для сантиметрового, дециметрового и метрового диапазонов, разделяются на переключательные и ограничительные. Первые применяются в переключательных устройствах, модуляторах, фазовращателях, аттенуаторах, вторые – в устройствах ограничения мощности и управления ею и для защиты входных приемников. Диоды могут использоваться для тех же целей в герметизированных гибридных модулях.

2.1.1. Переключатель на $p-i-n$ -диодах

Переключательными (управляющими) диодами называются диоды, изменяющие свое сопротивление под воздействием напряжения смещения (постоянного или переменного) и тем самым изменяющие условия распространения электромагнитных волн в СВЧ-тракте, в который они включены.

Принцип действия устройств на переключающих диодах легко понять на примере простейших схем, показанных на рис. 2.1.

Если сопротивление диода много меньше сопротивления линии, то реализуется режим пропускания (ослабление мало) для последовательного включения или режим отражения мощности (ослабление велико) для параллельного включения. Если сопротивление диода много больше сопротив-

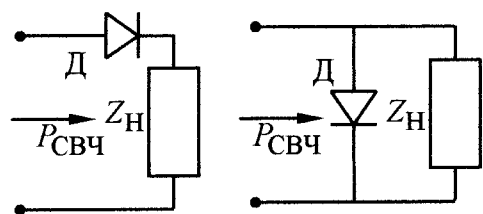


Рис. 2.1

ления линии, то реализуется режим запирающего (ослабление велико) для последовательного включения или режим пропускания (ослабление мало) для параллельного включения. Отметим, что большое ослабление связано с от-

ражением большей части мощности от диода. Устройство, в котором достигаются разные значения ослабления сигнала при изменении управляющего напряжения, носит название полупроводникового СВЧ-переключателя.

Обычно переключающее устройство представляет собой линию передачи с волновым сопротивлением Z_0 , в которую параллельно включен диод (линия предполагается согласованной с нагрузкой, т. е. $Z_0 = Z_H$). Если на диод подано обратное напряжение смещения, то, в соответствии с вольтамперной характеристикой, его сопротивление велико и он не нарушает условия распространения волн в линии передач. Волна со входа переключателя практически без ослабления проходит на выход (в нагрузку). При прямом смещении сопротивление диода близко к нулю и волна почти полностью отражается от диода (линия закорочена диодом). На выход переключателя просачивается лишь незначительная доля входной мощности.

Поглощаемая диодом мощность может быть много меньше падающей, поэтому с помощью сравнительно маломощного диода можно управлять значительными сигналами. Предельная коммутируемая мощность переключателя зависит от параметров диода, а именно от предельно допустимой мощности, рассеиваемой диодом, пробивного напряжения диода и способа его включения. Ослабление сигнала переключателем в режимах пропускания и запирающего определяется также в значительной степени параметрами диода. При этом необходимо учитывать потери как в сопротивлении полупроводниковой структуры, так и за счет паразитных параметров корпуса и элементов крепления диода. В СВЧ-диапазоне эквивалентное сопротивление, отражающее параметры корпуса, оказывается соизмеримым с сопротивлением диода и линии.

Следовательно, использование полупроводникового диода в качестве переключательного элемента в СВЧ-цепях основано на различии характеристик диода при прямом и обратном смещениях. Поэтому в качестве переключательных приборов могут применяться диоды с p - n -переходом, диоды с барьером Шотки, а также структуры МДП. Однако для переключения больших мощностей наибольшее применение нашли специально сконструированные, так называемые p - i - n -диоды. Они состоят из сильнолегированных p - и n -областей, разделенных слоем сравнительно чистого высокоомного материала с концентрацией примеси порядка $10^{12} \dots 10^{13} \text{ см}^{-3}$, близкого по свойствам к собственному i -полупроводнику. Для приборов различной мощности и быстродействия толщина высокоомной области может составлять от нескольких микрон до 450 мкм. Емкость таких структур определяется в основном толщиной слоя собственного полупроводника. Ввиду того, что толщина высокоомного слоя относительно велика, удельная емкость p - i - n -структур значительно меньше, чем у p - n -переходов. Это позволяет увеличивать площадь структур, а значит, и повышать предельно допустимую рассеиваемую мощность прибора. По этой же причине величина пробивное напряжение p - i - n -структур может достигать от сотни вольт до единицы киловольт.

ВАХ переключательных диодов в целом аналогична ВАХ детекторных диодов (рис. 2.2). В первом приближении при теоретическом рассмотрении для ВАХ p - i - n -диодов справедливы соотношения, применяемые для детекторных диодов. Однако для переключающих диодов существует ряд характерных особенностей. Общий вид ВАХ управляющего диода приведен на рис. 2.2. Для сравнения представлена

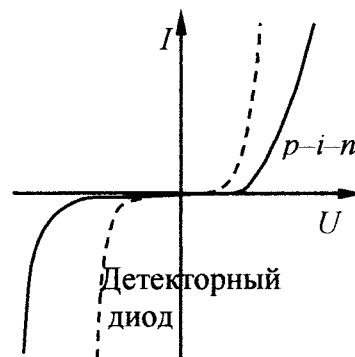


Рис. 2.2

построенная в тех же осях ВАХ детекторного диода. Как видно из рисунка, основным отличием ВАХ управляющего диода является более резистивный характер прямой ветви, что вполне логично ввиду наличия низколегированной i -области. По этой же причине увеличение прямого тока начинается при больших напряжениях, а пробой наступает позже.

Управление сигналом в СВЧ-схемах характеризуется потерями пропускания $L_{\text{пр}}$ (переключатель в состоянии пропускания) и потерями запирания $L_{\text{зап}}$ (переключатель в состоянии запирания):

$$\begin{aligned} L_{\text{пр}} &= 10 \lg(P_{\text{вх}}/P_{\text{вых}})_{\text{пр}}, \\ L_{\text{зап}} &= 10 \lg(P_{\text{вх}}/P_{\text{вых}})_{\text{зап}}, \end{aligned} \quad (2.1)$$

где $P_{\text{вх}}$ и $P_{\text{вых}}$ – входная и выходная мощности сигнала соответственно. Потери пропускания и запираения выражаются в децибелах. Очевидно, что в схеме параллельного включения переключателя состояние пропускания обеспечивается режимом «диод закрыт», а состояние запираения – режимом «диод открыт». Для схемы последовательного включения соответствующие режимы работы диода обратные. Чем меньше потери пропускания и больше потери запираения, тем совершеннее переключательный диод. Эффективность переключательного устройства характеризуется коэффициентом качества, определяемым по формуле:

$$K = \frac{\sqrt{P_{\text{пр}} - 1}}{\sqrt{P_{\text{зап}} - 1}}, \quad (2.2)$$

где $P_{(\text{пр, зап})} = (P_{\text{вх}}/P_{\text{вых}})_{(\text{пр, зап})}$ – отношение мощностей в относительных единицах при пропускании и запираении соответственно.

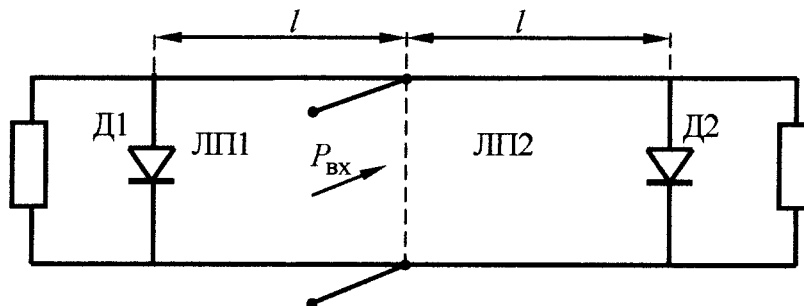


Рис. 2.3

На рис. 2.3 приведен упрощенный вариант исследуемой в работе схемы переключателя с двумя параллельно включенными диодами. Расстояния между каждым диодом и входом выбираются равными $l = \lambda_g/4$, где λ_g – рабочая длина волны в линии, на которой обеспечивается наилучший коэффициент качества переключателя. Это связано с тем, что указанное условие позволяет сфазировать в одном из плеч, работающем в режиме пропускания, сигнал, идущий в него непосредственно со входа, с сигналом, отраженным от второго плеча, работающего в режиме запираения. Учитывая, что на практике примерно 10 % мощности отраженного сигнала поступает снова на вход, потери пропускания и запираения для рассматриваемой схемы на основании выражения (2.1) определяются следующим образом:

$$L_{\text{пр1}} = 10 \lg \frac{P_{\text{вх}}}{P_{\text{вых1пр}}} = 10 \lg \frac{1,1(P_{\text{вых1пр}} + P_{\text{вых2зап}})}{P_{\text{вых1пр}}}, \quad (2.3)$$

где $P_{\text{вых1пр}}$ – выходная мощность в правом плече, работающем в режиме пропускания (правый диод без напряжения); $P_{\text{вых2зап}}$ – выходная мощность в левом плече, работающем в режиме запирания (левый диод под напряжением);

$$L_{\text{зап1}} = 10 \lg \frac{P_{\text{вх}}}{P_{\text{вых1зап}}} = 10 \lg \frac{1,1(P_{\text{вых1зап}} + P_{\text{вых2пр}})}{P_{\text{вых1зап}}}, \quad (2.4)$$

где $P_{\text{вых1зап}}$ – выходная мощность в правом плече, работающем в режиме запирания (правый диод под напряжением); $P_{\text{вых2пр}}$ – выходная мощность в левом плече, работающем в режиме пропускания (левый диод без напряжения).

В качестве переключающих СВЧ-диодов используются в основном $p-i-n$ -структуры. Диоды с большой толщиной i -слоя на СВЧ не являются выпрямителями, но могут быть использованы для управления СВЧ-мощностью в качестве переключающих диодов как при малых уровнях мощности, так и на больших мощностях, достигающих сотен ватт в непрерывном режиме и сотен киловатт в импульсе. При этом мощность управления диодом может быть значительно меньше мощности СВЧ-колебаний в линии передачи, особенно когда нет необходимости в высоком быстродействии переключения режимов работы, так как в переключателях на основе $p-i-n$ -диодов используется принцип отражения мощности, а не ее поглощения.

В самом диоде поглощается очень небольшая часть мощности, что и позволяет даже маломощному прибору управлять относительно большими уровнями мощностями, значительно превышающими допустимую для него мощность рассеяния.

Одна из наиболее распространенных структур $p-i-n$ -диода показана на рис. 2.4. Основной ее особенностью является наличие между p - и n -областями полупроводника 1 и

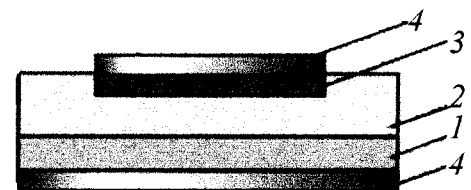


Рис. 2.4

3 с контактами 4 высокоомной области чистого кремния (или германия) 2 с предельно низкой концентрацией примесей (полупроводник с собственной проводимостью i -типа). Однако полупроводник действительно i -типа, как бы тщательно он не очищался, получить практически невозможно. Поэтому реально $p-i-n$ -структуры – это структуры, в которых i -область имеет слабую

дырочную проводимость в случае Si (обозначается p^+-n-n^+) и слабую электронную проводимость в случае Ge (обозначается p^+-v-n^+). Для изготовления $p-i-n$ -диодов чаще используется кремний p -типа. Концентрация акцепторов в нем очень мала и составляет $10^{12} \dots 10^{13} \text{ см}^{-3}$, в то время как концентрации доноров в n -области и акцепторов в p -области может превышать 10^{18} см^{-3} . Площадь i -области находится в пределах от долей до единиц квадратного миллиметра при толщине 60...400 мкм. Диоды могут помещаться в корпус, наиболее подходящий включению диода в тот или иной тракт СВЧ, но могут быть и безкорпусными. Рассмотрим кратко физику процессов, происходящих в $p-i-n$ -диode при переключении.

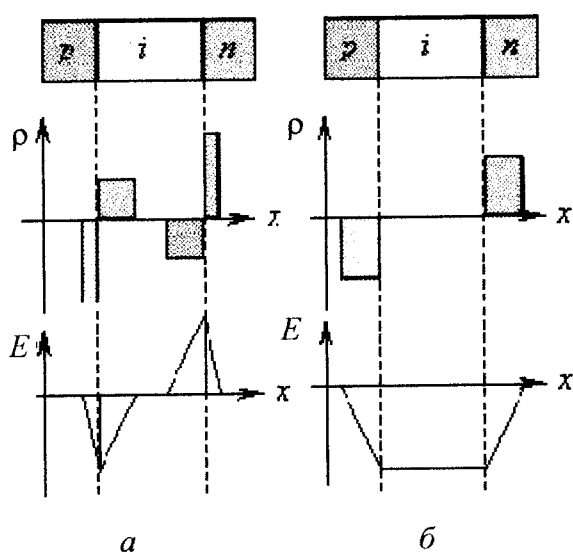


Рис. 2.5

При отсутствии напряжения смещения на границах $p-i$ и $i-n$ -областей образуются слои пространственного заряда. Распределение заряда и электрического поля для этого случая показано на рис. 2.5, а. При подаче запирающего напряжения запирающий слой на границе $i-n$ -области расширяется, пока весь i -слой не освободится от подвижных носителей, и при некотором напряжении, называемом напряжением

смыкания (прокола), не соединится с запирающим слоем на границе раздела $i-p$ -области. Распределение плотности заряда и поля в диоде для этого случая показано на рис. 2.5, б. Поскольку i -область слаболегированная, то для ее освобождения от подвижных носителей заряда достаточно небольшого обратного (иногда нулевого) смещения. Таким образом, в режиме смыкания $p-i-n$ -диод эквивалентен обычному диоду с очень широким запирающим слоем. Моделью такого диода является конденсатор, в котором диэлектриком служит вся i -область с прилегающими участками из p - и n -областей, и такая емкость не зависит от напряжения большего, чем напряжение смыкания. При подаче прямого смещения i -область заполняется дырками и электронами, инжектированными из p - и n -областей, и в ней происходит накопление заряда и возникает твердотельная плазма с высокой проводимостью. Поскольку время жизни носителей в i -области достаточно велико из-за малой концентрации

рекомбинационных центров, эффект накопления заряда становится причиной такого нежелательного явления, как увеличение времени, необходимого для переключения $p-i-n$ -диода из одного режима в другой, что и ограничивает скорость их переключения. Сказанное иллюстрируется рис. 2.6, на котором приведен пример работы переключателя на $p-i-n$ -диоде при его переключениях.

Пусть напряжение смещения на $p-i-n$ -диоде, включенном в цепь СВЧ-генератора, в некоторый момент времени меняется с обратного на прямое. На рис. 2.6 приведены графики изменения напряжения смещения и связанные с ним изменения тока через диод. При обратном напряжении смещения ток диода равен тепловому. Сопротивление диода велико, и он незначительно влияет на уровень СВЧ-мощности. В момент переключения в цепи диода начнет протекать прямой ток $I_{пр}$, так как в i -область диода будут инжектироваться дырки и электроны. Конечное сопротивление приведет к отражению части мощности. После обратного переключения все подвижные дырки и электроны придут в движение и либо рекомбинируют, либо уйдут соответственно в p - и n -области. В течение всего этого процесса в цепи диода будет протекать ток $I_{обр}$ в обратном направлении. Время $t_{вкл}$ от момента переключения до момента достижения прямым током установившегося значения называют временем включения или временем запаздывания. Время $t_{вос}$

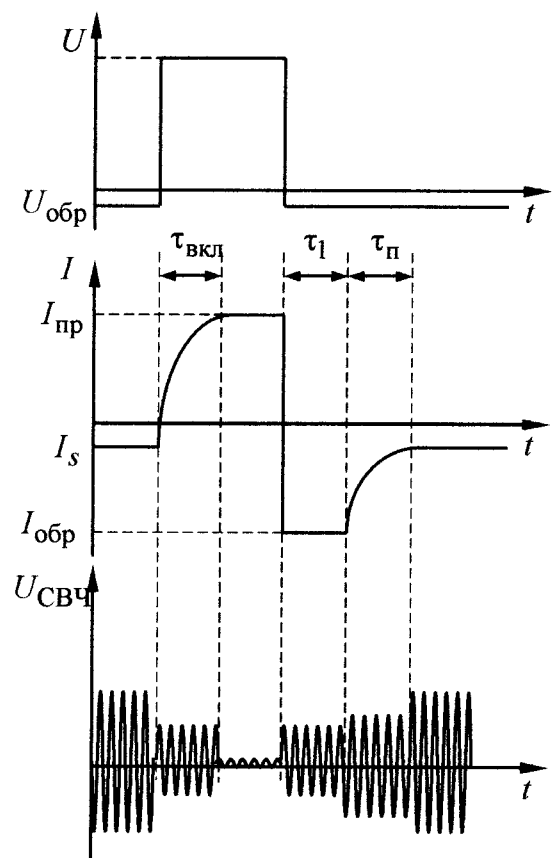


Рис. 2.6

от момента переключения до момента достижения обратным током установившегося значения называют временем восстановления или временем рассасывания. Очевидно, что переключение СВЧ-сигнала происходит с запаздыванием по отношению к моменту переключения напряжения смещения. Эффект накопления заряда при переключении напряжения смещения с обратного на прямое, характеризуется временем установления прямого напряжения $t_{вкл}$, которое тем больше, чем толще i -область. Для $p-i-n$ -диодов с толщиной i -области 100...200 мкм время переключения составляет 1...2 мкс,

а у мощных диодов с толщиной i -области до 400 мкм оно может достигать десятков микросекунд. Для увеличения скорости срабатывания целесообразно использовать диоды с барьером Шотки, у которых эффект накопления заряда отсутствует. Однако реально оказывается, что время срабатывания определяется в основном временем заряда и разряда реактивностей внешней цепи, за счет чего время переключения существенно увеличивается.

2.1.2. Ограничительные диоды

Ограничительные диоды служат для ограничения (стабилизации) уровня мощности в трактах СВЧ и для защиты входных цепей приемников от воздействия мощных СВЧ-сигналов. Назначение ограничительных диодов легко пояснить на примере простейшей схемы приемника СВЧ-сигналов, показанной на рис. 2.1. В этой схеме обратносмещенный диод включен параллельно в линию передачи, соединяющую вход (антенну) с нагрузкой (входом усилителя приемника). Если из антенны поступает слабый сигнал, то он проходит по линии передачи на вход усилителя практически без ослабления. Когда же мощность сигнала превышает некоторое значение, называемое порогом ограничения, часть ее отражается. Причиной этого эффекта ограничения мощности СВЧ является изменение полного входного сопротивления диода под воздействием выпрямленного тока. Таким образом, ограничительное устройство аналогично по принципу действия переключателю и отличается от него тем, что режим прямого смещения задается не от источника питания, а непосредственно под действием СВЧ-мощности самого управляемого сигнала. Такой диод называется *ограничительным*.

Вольтамперная характеристика и структура ограничительного диода такие же, как у переключательного $p-i-n$ -диода (рис. 2.2 и 2.4) и различаются малой толщиной i -области (единицы микрон). Вследствие этого рекомбинация неравновесных носителей происходит главным образом в p - и n -областях.

Выпрямленный ток ограничительных диодов невелик из-за того, что время жизни неравновесных носителей заряда (5...10 нс) много больше длительности периода СВЧ-колебаний. В результате за время положительного полупериода рекомбинирует только незначительная часть инжектированных носителей заряда, что уменьшит скорость изменения сопротивления диода и снизит эффективность ограничителя. Для ее повышения ограничительные диоды целесообразно использовать в схемах с короткозамкнутой внешней цепью без внешнего смещения.

На рис. 2.7 и рис. 2.8 приведены типичные зависимости выходной мощности от входной для диодов с различными напряжениями смещения и толщиной i -области. Эти зависимости называются ограничительными характеристиками диода.

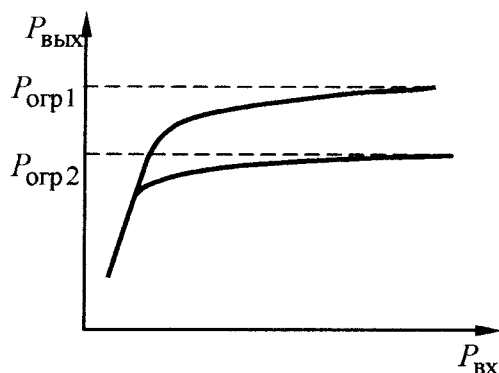


Рис. 2.7

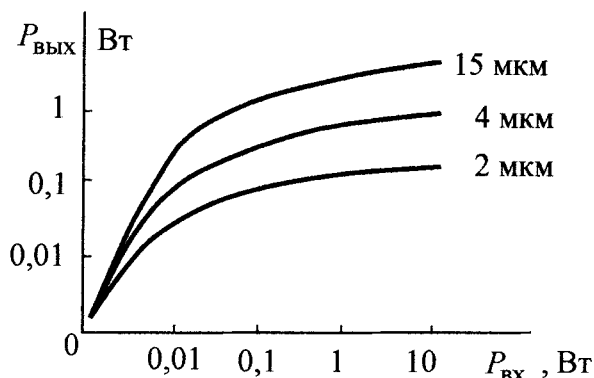


Рис. 2.8

При фиксированной толщине слоя собственного полупроводника диода порог ограничения можно регулировать изменением напряжения смещения (рис. 2.7). Понятно, что прямое смещение снижает порог ограничения, а обратное – увеличивает. Таким образом, ограничитель – устройство, использующее нелинейность ВАХ диода для ограничения мощности, проходящей через диодную секцию в нагрузку. При этом, естественно, может быть подано некоторое постоянное смещение, регулирующее уровень максимальной выходной мощности ограничителя. В ограничительных устройствах диод параллельно включается в СВЧ-тракт; если мощность СВЧ-сигнала превышает определенный уровень, диод открывается и отражение от него резко возрастает.

2.2. Описание объекта исследований

Для исследования свойств и характеристик $p-i-n$ -диодов используются кремниевые эпитаксиальные диоды с $p-i-n$ -структурой, предназначенные для работы в сантиметровом и дециметровом диапазонах. Они выпускаются в металлокерамическом корпусе с жесткими выводами (рис. 2.9).

Типичные эксплуатационные характеристики выбранных диодов:

- рабочая температура корпуса диода: 213...373 К;
- рассеиваемая мощность: 2...5 Вт;
- постоянное обратное напряжение: 200 В;
- мгновенное обратное напряжение: 300...500 В;
- постоянный прямой ток: 200 мА.

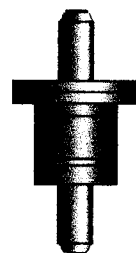


Рис. 2.9

2.3. Описание измерительной установки

В работе исследуются двухканальное коаксиальное переключающее устройство (см. рис. 2.3) и ограничитель в коаксиальном исполнении. Такой вид тракта конструктивно облегчает параллельное подключение диодов. Принципиальная схема для исследования переключателя на $p-i-n$ -диодах, представлена на рис. 2.10. Сигнал от СВЧ-генератора 1 через вентиль 2 подается на $p-i-n$ -диоды 3 и 4. Мощность СВЧ-сигнала, прошедшая переключающие секции, ослабляется фиксированными (10 дБ) аттенюаторами 5 и 6 и поступает на детекторные секции 7 и 8. Амперметры постоянного тока 9 и 10

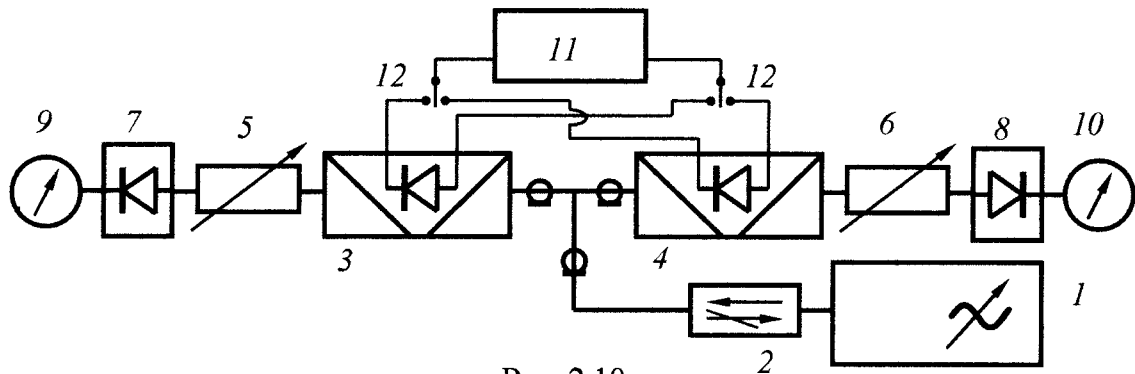


Рис. 2.10

используются для измерения мощностей на выходах левого и правого плеч устройства. В установке предусмотрена минимизация неидеальности плеч при измерениях характеристик. Напряжение смещения (прямое или обратное) от регулируемого источника питания 11 подается на $p-i-n$ -диоды. С помощью ключа 12 осуществляется последовательная коммутация диодов (если на одном из диодов есть напряжение смещения, то на другом оно равно нулю).

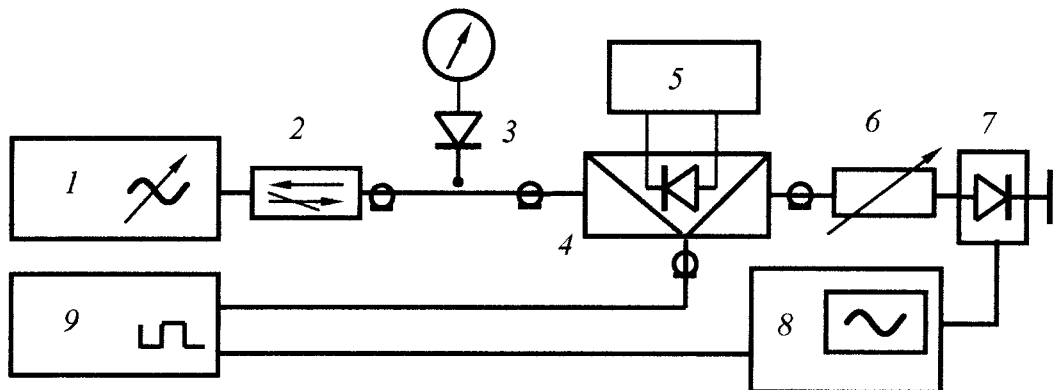


Рис. 2.11

На рис. 2.11 представлена принципиальная схема исследования ограничителя в коаксиальном исполнении. Сигнал от СВЧ-генератора 1 через вентиль 2 и измерительную линию 3 поступает в ограничитель на $p-i-n$ -диоде 4,

питание которого осуществляется от источника напряжения 5. С выхода ограничителя СВЧ-мощность, ослабленная на 10 дБ фиксированным аттенуатором 6, через детекторную секцию 7 подается на осциллограф 8. Схема позволяет исследовать зависимости времени восстановления обратного сопротивления $t_{\text{вос}}$ и времени установления прямого напряжения $t_{\text{вкл}}$ в зависимости от частоты следования и длительности импульсов генератора 9. Уровень входной СВЧ-мощности в обеих схемах регулируется и измеряется с помощью приборов генератора.

2.4. Предварительное задание

1. Изучить теоретическую часть работы.
2. Подготовить таблицы для снятия экспериментальных зависимостей.

2.5. Основное задание

1. Ознакомиться с элементами измерительной установки.
2. Снять статические вольтамперные характеристики диодов.
3. Собрать схему переключателя, подключив генератор СВЧ к входу переключателя, а измерители мощности – к его выходным плечам.
4. Исследовать зависимости потерь пропускания и запирающего от напряжения смещения для обоих плеч переключателя при постоянной частоте, указанной преподавателем.
5. Исследовать частотные свойства переключателя, сняв зависимости потерь пропускания и запирающего от частоты для обоих плеч переключателя при напряжении смещения, обеспечивающем наилучшее переключение.
6. Исследовать зависимость порога ограничения ограничителя от напряжения смещения.
7. Исследовать частотные свойства ограничителя.
8. Исследовать инерционные свойства переключательного и ограничительного $p-i-n$ -диодов.

2.6. Содержание отчета

1. Цель работы, схемы измерений.
2. Таблицы и графики экспериментальных зависимостей переключателя.
3. Таблицы и графики зависимостей потерь пропускания и потерь запирающего переключателя в децибелах.

4. Таблицы и графики экспериментальных зависимостей ограничителя.
5. Таблицы и графики обработанных зависимостей ограничителя.
6. Анализ результатов, выводы по работе.

2.7. Контрольные вопросы

1. Назовите отличительную особенность диодов с $p-i-n$ -структурой и физические процессы, лежащие в основе принципа их работы?
2. Перечислите основные параметры $p-i-n$ -диодов.
3. Каковы принципы работы СВЧ-переключателя и СВЧ-ограничителя?
4. Назовите причины, лимитирующие применение диодов в переключательных и ограничительных схемах СВЧ?
5. Каковы основные параметры и характеристики переключательных и ограничительных схем СВЧ?

3. ИССЛЕДОВАНИЕ ГЕНЕРАТОРА НА ЛАВИННО-ПРОЛЕТНОМ ДИОДЕ

Цель работы – исследование выходных характеристик генератора СВЧ с механической перестройкой частоты, выполненного на лавинно-пролетном диоде сантиметрового диапазона.

3.1. Основные теоретические положения

Лавинно-пролетные диоды (ЛПД) являются одними из наиболее мощных полупроводниковых приборов СВЧ. Работа ЛПД основана на явлениях лавинного пробоя обедненной области обратносмещенного диода и последующего дрейфа носителей в полупроводнике со скоростью, близкой к скорости насыщения. В иностранной научной литературе такой режим работы называется IMPATT (IMPact Avalanche Transit Time), а диод часто называют IMPATT диодом или диодом Рида. ЛПД получили широкое распространение при разработке генераторов СВЧ сантиметрового и миллиметрового диапазонов волн. Из-за высокого уровня шумов, особенно в области лавинной частоты, ЛПД можно использовать для создания генераторов шума. По той же причине на основе ЛПД разрабатывают в основном усилители СВЧ-мощности. В сантиметровом диапазоне генератор на ЛПД обеспечивает выходную мощность порядка 1 кВт в импульсе при КПД 30...50 %, а в миллиметровом – сотни милливатт в непрерывном режиме.

Высокий уровень собственных шумов ограничивает применение приборов этого типа в аппаратуре СВЧ и снижает их конкурентоспособность по сравнению с диодами Ганна и СВЧ-транзисторами. Генерация СВЧ-колебаний возможна в ЛПД с различными видами полупроводниковых структур. Принцип работы в пролетном режиме лучше рассматривать на примере структурной разновидности, в которой области лавинного умножения и дрейфа разделены (рис. 3.1, а). Диод имеет четыре характерные области с разным уровнем легирования: p^+ , n , i и n^+ . При подаче запирающего напряжения U_0 такая структура обеспечивает локализацию сильного электрического

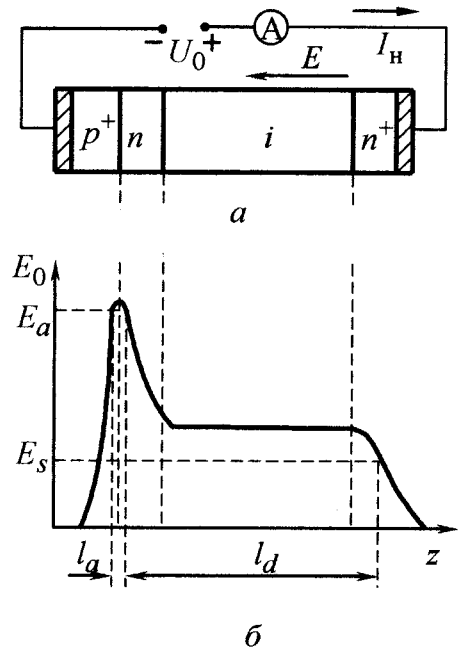


Рис. 3.1

поля в узкой области перехода p^+-n (рис. 3.1, б). При увеличении обратного напряжения U_0 поле в этой области может достичь порогового E_a (~ 300 кВ/см). При такой величине поля начинается процесс лавинного умножения количества носителей, что приводит к резкому увеличению силы тока во внешней цепи. Рост тока в этом случае ограничивается сопротивлениями внешней цепи и диода, а также нелинейными процессами развития лавины, приводящими к перераспределению электрического поля по образцу.

Поскольку коэффициент ударной ионизации сильно зависит от поля E , то протяженность области ударной ионизации невелика. В ней происходит лавинообразное нарастание количества свободных носителей заряда. Эту область называют *областью лавинного умножения* (область l_a на рис. 3.1, б). Образующиеся дырки увлекаются внутренним электрическим полем перехода в p^+ -область, а электроны, попадая в i -слой, движутся к n^+ -области в постоянном электрическом поле. Если напряженность электрического поля в слаболегированной области велика и превышает несколько киловольт на сантиметр, то скорость электронов остается почти постоянной и равной скорости насыщения $v_s = 10^5$ м/с. Обедненную область, в которой происходит движение электронов с постоянной скоростью, называют *областью дрейфа*. При этом дифференциальная подвижность электронов близка к нулю, при движении электронов не происходит уменьшения объемной плотности заряда.

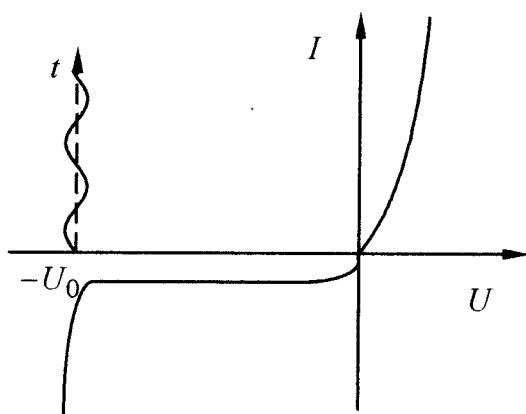


Рис. 3.2

Важно отметить, что процесс лавинного умножения носит обратимый характер. При уменьшении напряжения $|U_0|$ ток снижается до некоторой первоначальной величины. Такое увеличение и уменьшение U_0 очевидно можно проводить многократно только при условии эффективного отвода тепла от диода. Результирующая статическая вольтамперная характеристика имеет вид, характерный для обычных диодов (рис. 3.2). Если поместить такой образец в колебательный контур СВЧ, то при определенных условиях возможно генерирование СВЧ-мощности. Рассмотрим временную диаграмму работы прибора. Пусть на диод подано постоянное напряжение U_0 несколько меньшее, чем напряжение пробоя U_{0a} . При наличии дополнительного переменного напряжения СВЧ $U_{\sim} = U_1 \sin \omega t$ суммарное напряжение $U_{\Sigma} = U_0 + U_{\sim}$ может в некоторые промежутки времени превышать пороговое напряжение, т. е.

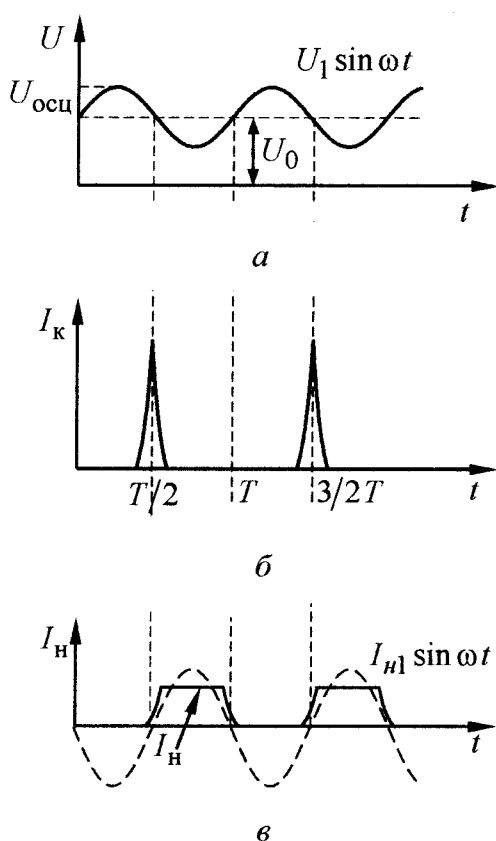


Рис. 3.3

$U_{\Sigma} > U_{0a}$ (рис. 3.3). Возникающий при этом процесс лавинного умножения носителей приведет к росту концентрации свободных электронов и дырок в области полей, напряженность которых превосходит значение E_a . Ввиду инерционности процесса лавинообразования, максимальное количество носителей обоих знаков накапливается к концу положительной фазы переменного напряжения $U_{\sim}$ (рис. 3.3, а, б). Образовавшиеся носители дрейфуют под действием приложенного электрического поля: электроны к аноду, а дырки к катоду. Поскольку катод находится в непосредственной близости от зоны лавинного умножения, дрейф дырок практически не создает наведенного тока во внешней цепи. В то же время, образовавшийся сгусток электронов,

двигаясь в i -области, создает наведенный ток I_H . Наведенный ток протекает во внешней цепи в отрицательный полупериод СВЧ-напряжения, что эквивалентно появлению отрицательной электронной проводимости в ЛПД. Значение отрицательной проводимости будет максимальным при угле пролета, приблизительно равном π . Слой лавинного умножения можно представить в виде параллельного контура с резонансной частотой, называемой лавинной. На частотах ниже лавинной активное сопротивление ЛПД положительно, а реактивное имеет индуктивный характер. На частотах выше лавинной активное сопротивление ЛПД отрицательно, а реактивное сопротивление диода носит емкостный характер. Область отрицательных сопротивлений соответствует широкому диапазону частот. Важно отметить, что движение сгустка происходит с передачей его кинетической энергии СВЧ-полю. Максимальная эффективность такой передачи наблюдается, когда время пролета сгустком расстояния от места образования до «анода» τ будет равно половине периода СВЧ-колебаний T :

$$\tau = T/2. \quad (3.1)$$

При этом условии сдвиг фазы между первой гармоникой наведенного тока I_{H1} и переменным напряжением составит радиан π (рис. 3.3, в), т. е. мощность по переменному сигналу будет отрицательна. Для того чтобы не произошло «размытия» сгустка, необходимо обеспечить его движение в сильных электрических полях $E > E_s$, где скорость движения носителей практически не зависит от поля (рис. 3.4). Для справки, у кремния и арсенида галлия одинаковое значение скорости насыщения $v_s \approx 10^5$ м/с. При этом величины порогового значения поля, соответствующие скорости насыщения, разные: $E_s \approx 30...40$ кВ/см для кремния и $E_s \approx 10$ кВ/см для GaAs. Учитывая это обстоятельство, равенство (3.1) можно преобразовать для определения связи между длиной дрейфовой области l_d (рис. 3.1, б) и генерируемой диодом частоты f_0 :

$$l_d/v_s = 1/2f_0. \quad (3.2)$$

Длина области дрейфа l_d будет существенно больше области лавинного умножения l_a (это хорошо выполняется в сантиметровом диапазоне волн).

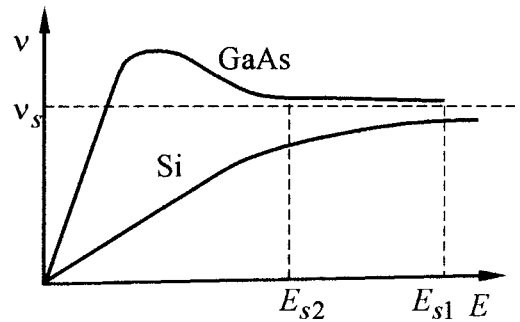


Рис. 3.4

В рассматриваемом анализе предполагалось, что СВЧ-напряжение задано извне. В генераторах начальным толчком служит тепловой шум, в спектре которого имеется любая частотная составляющая. Для обеспечения генерации в системе диод – СВЧ-тракт необходимо выполнение баланса амплитуд и фаз:

$$G_{сх}(\omega) + G_d(\omega, U) = 0, \quad (3.3)$$

$$B_{сх}(\omega) + B_d(\omega, U) = 0, \quad (3.4)$$

где $G_{сх}(\omega)$ – реальная часть входной проводимости схемы в точках подключения диода; $G_d(\omega, U)$ – реальная часть эквивалентной проводимости диода на рассматриваемой частоте ω и СВЧ-напряжении U ; $B_{сх}(\omega)$ – мнимая часть проводимости схемы; $B_d(\omega, U)$ – мнимая часть проводимости диода.

СВЧ-колебания в генераторе возбуждаются, когда отрицательное сопротивление ЛПД превысит суммарные потери в системе, включая потери в диоде, резонансном контуре и схеме. Это справедливо для токов диода, превышающих некоторое минимальное значение, т. е. выполнение условия (3.3) обеспечивается начиная с некоторого минимального тока, который называется *пусковым* – $I_{пуск}$. Пусковой ток растет с ростом частоты, обычно он составляет десятки и сотни миллиампер. Условие (3.4) определяет частоту генерации. Эквивалентные параметры диода изменяются в зависимости от протекающего через диод постоянного тока I , поэтому частота и мощность генератора будут зависеть от режима питания. Выражения (3.3), (3.4) показывают также, что изменения мощности и частоты можно достигнуть за счет изменения параметров схемы.

Отметим, что значения амплитуды СВЧ-напряжения U_m ограничены. Поскольку мгновенное значение напряженности электрического поля в области дрейфа не должно быть больше напряженности пробоя E_a (необходимо избегать развития лавинного пробоя в области дрейфа) и не должно быть меньше поля E_s , соответствующего скорости насыщения (скорость должна быть максимально возможной и не зависеть от поля), то амплитуда переменной составляющей электрического поля будет меньше постоянной составляющей напряженности поля в области дрейфа в статическом режиме. Поэтому максимальный электронный КПД генератора на ЛПД без учета потерь в последовательном сопротивлении диода не превышает 30 %.

Максимальная мощность полупроводниковых приборов СВЧ ограничена тепловыми и электрическими свойствами диода или транзистора. В полупроводниковых приборах рассеяние СВЧ-мощности происходит в объеме материала и на электродах. В отличие от вакуумных приборов, в которых мощность электронного потока может быть повышена за счет увеличения площади катода и ускоряющего напряжения, полупроводниковая структура имеет малый объем и площадь поперечного сечения, а увеличение напряжения ограничено возможностью теплового пробоя. Величина этой мощности характеризуется тепловым сопротивлением диода R_T , зависящим от свойств материала, конструкции прибора и температуры перегрева. Уменьшение R_T за счет увеличения площади структуры нежелательно, поскольку это приводит к росту емкости диода, способствующее увеличению потерь. Отметим, что ограничение по электрическим параметрам вызывает более резкое уменьшение выходной мощности с ростом частоты, чем тепловое.

3.2. Описание объекта исследований

В качестве объекта исследований используется лавинно-пролетный диод АА707 (различные модификации), на основе которого выполнен СВЧ-генератор. На рис. 3.5 представлена схема включения диода в СВЧ-цепь. Диод 1 помещается в волноводную резонаторную камеру P1, имеющую два окна связи O1 и O2 с внешними волноводами 2.

Через окно связи O1 осуществляется связь с нагрузкой, а окно O2 обеспечивает связь с дополнительным (настроечным) резонатором P2, образованным подвижным плунжером 3, позволяющим изменять местонахождение плоскости короткого замыкания. Перемещение плунжера изменяет проводимость схемы на «зажимах» диода, что приводит, в соответствии с (3.3), (3.4), к изменению частоты ω и мощности генерации $P_{\text{ген}}$. Подобная картина изменения ω и $P_{\text{ген}}$ наблюдается также, когда появляется отраженная волна от нагрузки. Такое явление получило название *затягивания частоты генератора* нагрузкой. Следовательно, согласование ЛПД, как и любого другого генератора, является важной задачей микроволновой техники.

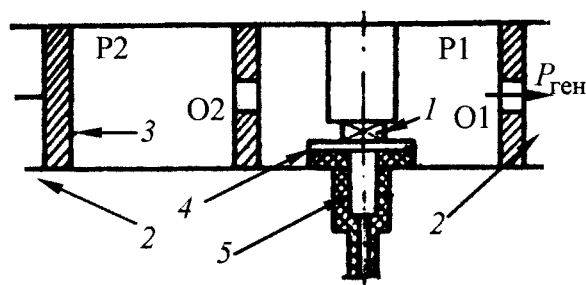


Рис. 3.5

Пластины 4 и коаксиальный кабель 5 обеспечивают подачу постоянного смещения на диод и не позволяют СВЧ-мощности проходить в цепь питания, т. е. выполняют роль фильтра низкой частоты.

3.3. Схема измерительной установки

В состав измерительной схемы (рис. 3.6) входят: генератор с волновым выходом 2, настроечный плунжер 1, измерительная линия 3, регулируемая неоднородность 4 (штырь в волноводе), регулируемый аттенюатор 5, цифровой частотомер 6 и измеритель мощности 7.

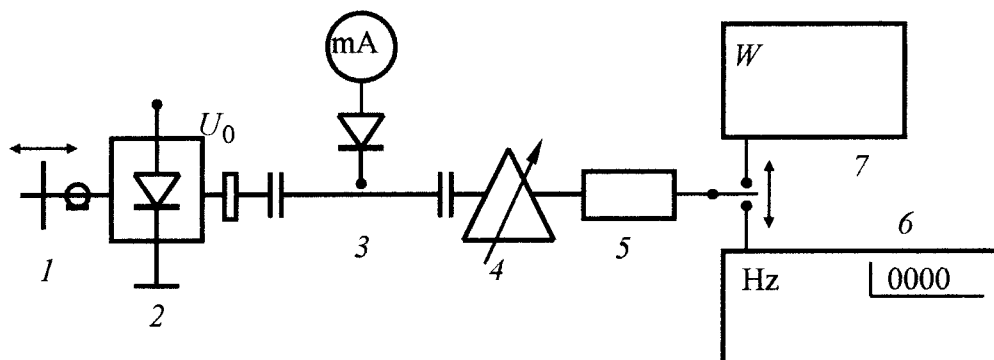


Рис. 3.6

Такая схема обеспечивает получение основных характеристик генератора. Измерительная линия 3 позволяет исследовать отражение от нагрузки и явление затягивания частоты. Неоднородность 4 служит для изменения величины отражений от нагрузки.

3.4. Предварительное задание

1. Изучить теоретическую часть работы. При необходимости обратиться к рекомендованной литературе.
2. Подготовить таблицы для снятия экспериментальных зависимостей.
3. Построить зависимость частоты от длины диода по (3.2).

3.5. Основное задание

1. Ознакомиться с аппаратурой и элементами измерительной установки.
2. Снять статическую вольтамперную характеристику ЛПД.
3. Исследовать зависимость мощности генерации и частоты от режима питания диода $P_{\text{ген}} = F(I_0)$ и $f_{\text{ген}} = F(I_0)$ при нескольких положениях настроечного плунжера, выбранных самостоятельно.
4. Исследовать зависимость мощности и частоты генерации от положения настроечного плунжера при нескольких постоянных токах через диод I_0 .

5. Исследовать зависимость частоты генерации и мощности от изменения уровня отражений от нагрузки.

6. Исследовать изменение статической характеристики при срыве генерации СВЧ-колебаний.

3.6. Содержание отчета

1. Цель работы, назначение ЛПД, схема включения диода в цепь СВЧ.
2. График расчетной зависимости частоты от длины диода (2.2).
3. Динамическая и статическая вольтамперные характеристики исследованного ЛПД, т. е. при наличии генерации СВЧ и при ее срыве.
4. Зависимости $P_{\text{ген}} = F(I_0)$ и $f_{\text{ген}} = F(I_0)$ при нескольких положениях настроечного плунжера.
5. Зависимости $P_{\text{ген}} = F(I_{\text{пл}})$ и $f_{\text{ген}} = F(I_{\text{пл}})$ при нескольких выбранных значениях тока через диод.
6. Зависимость смещения частоты генерации и изменения мощности от коэффициента стоячей волны.
7. Расчет длин активной части диода по экспериментальным данным.
8. Расчет предельного коэффициента полезного действия.
9. Выводы по работе.

3.7. Контрольные вопросы

1. Каков физический принцип действия ЛПД?
2. Почему мощность генерируемых колебаний зависит от величины постоянного тока в цепи диода?
3. Почему мощность и частота генерируемых колебаний зависят от положения плунжера?
4. Почему мощность и частота генерируемых колебаний зависят от внешней нагрузки?

4. ИССЛЕДОВАНИЕ ГЕНЕРАТОРА И УСИЛИТЕЛЯ НА ДИОДЕ ГАННА

Цель работы – исследование параметров диода Ганна, определение характеристик генератора и усилителя СВЧ, активным элементом которых является диод Ганна, изучение схем его включения в СВЧ-тракт.

4.1. Основные теоретические положения

Для усиления и генерации колебаний СВЧ-диапазона может быть использована аномальная зависимость скорости электронов от напряженности электрического поля в некоторых полупроводниковых соединениях, прежде всего в арсениде галлия и фосфиде индия. При этом основную роль играют процессы, происходящие в объеме полупроводника, а не в p – n -переходе. Генерацию СВЧ-колебаний в однородных образцах GaAs n -типа при напряженности постоянного электрического поля выше порогового значения

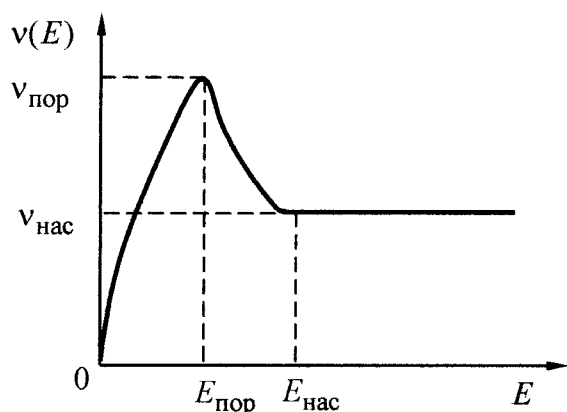


Рис. 4.1

впервые наблюдал Дж. Ганн в 1963 г. (поэтому такие приборы называют диодами Ганна). В отечественной литературе их называют также *приборами с объемной неустойчивостью* или *междолинным переносом электронов*, поскольку активные свойства диодов обусловлены переходом электронов из «центральной» энергетической долины в «боковую», где они характеризуются

большой по сравнению с «центральной» долиной эффективной массой и меньшей подвижностью. В иностранной литературе последнему названию диода соответствует термин TED (*Transferred Electron Device*).

Зависимость средней дрейфовой скорости электронов от напряженности электрического поля для GaAs показана на рис. 4.1. В слабом поле подвижность μ электронов велика и составляет $6000 \dots 8500 \text{ см}^2/\text{В} \cdot \text{с}$. При напряженности электрического поля $E > E_{\text{пор}} = 3,5 \text{ кВ/см}$ средняя дрейфовая скорость электронов уменьшается с ростом поля за счет перехода части электронов в «боковую» долину, в которой эффективная масса электрона значительно возрастает. Наибольшее значение модуля *отрицательной дифференциальной подвижности* (ОДП) $\mu_{\text{диф}} = \partial v / \partial E$ на падающем участке примерно втрое ниже подвижности электрона в слабых электрических полях. При напряженности поля выше $15 \dots 20 \text{ кВ/см}$ средняя скорость электронов почти не зависит от поля и составляет около 10^7 см/с .

Существование падающего участка характеристики $v(E)$ в области ОДП при однородном распределении электрического поля вдоль однородно

легированного образца GaAs приводит к появлению падающего участка на ВАХ диода. На этом участке диод мог бы использоваться для генерирования и усиления СВЧ-колебаний из-за наличия отрицательной дифференциальной проводимости g_d . Однако на практике осуществление такого режима в образце полупроводникового материала с *отрицательной дифференциальной проводимостью* затруднено из-за неустойчивости поля и объемного заряда. Время установления ОДП складывается из времени междолинного перехода ($\sim 10^{-14}$ с) и времени разогрева электронного газа в «центральной» долине ($\sim 10^{-12}$ с для GaAs), определяемого временем релаксации по энергии.

При напряжении $U > U_{\text{пор}} = E_{\text{пор}} l_d$ в однородном образце длиной l_d локальное повышение концентрации электронов приводит к появлению отрицательного заряженного слоя, перемещающегося вдоль образца от катода к аноду (от отрицательного электрода к положительному). Возникающие при этом внутренние электрические поля накладываются на постоянное поле, увеличивая напряженность поля справа от слоя и уменьшая ее слева (рис. 4.2). Скорость электронов справа от слоя уменьшается, а слева возрастает. Это приводит к дальнейшему нарастанию движущегося слоя накопления и к соответствующему перераспределению поля в образце. Обычно слой объемного заряда зарождается у катода, так как вблизи катодного омического контакта имеется область с повышенной концентрацией электронов и малой напряженностью электрического поля. Флуктуации, возникающие вблизи анодного контакта, вследствие движения электронов к аноду не успевают развиваться.

Однако такое распределение электрического поля неустойчиво и при наличии в образце неоднородности в виде скачков концентрации, подвижности или температуры может преобразоваться в локальное образование, называемое *доменом сильного поля*. Повышение электрического поля в части образца будет сопровождаться появлением на гра-

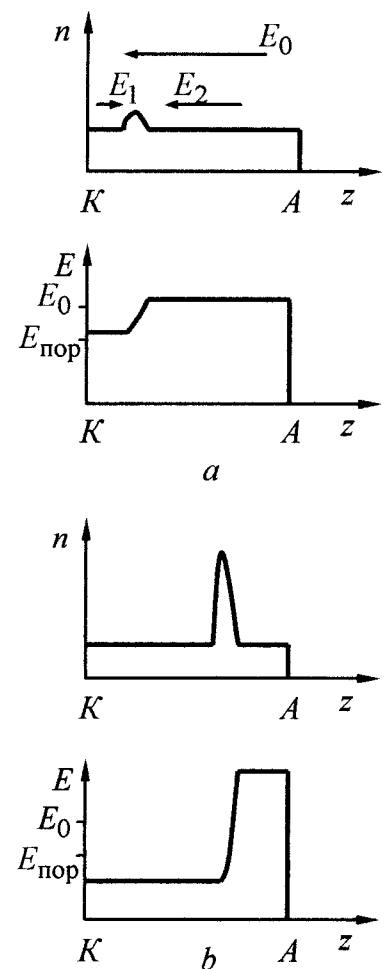


Рис. 4.2

нищах этого участка объемного заряда, отрицательного со стороны катода и положительного со стороны анода. При этом скорость электронов внутри участка упадет. Электроны со стороны катода будут догонять электроны внутри этого участка, за счет чего увеличится отрицательный заряд и образуется обогащенный электронами слой. Электроны со стороны анода будут уходить вперед, за счет чего увеличится положительный заряд и образуется обедненный слой. Это приведет к дальнейшему увеличению поля и области флуктуации по мере движения заряда к аноду и к возрастанию протяженности дипольной области объемного заряда. Если напряжение, приложенное к диоду, поддерживается постоянным, то с ростом дипольного домена поле вне домена будет уменьшаться. Нарастание поля в домене прекратится, когда скорость домена $v_{\text{дом}}$ сравняется со скоростью электронов вне домена.

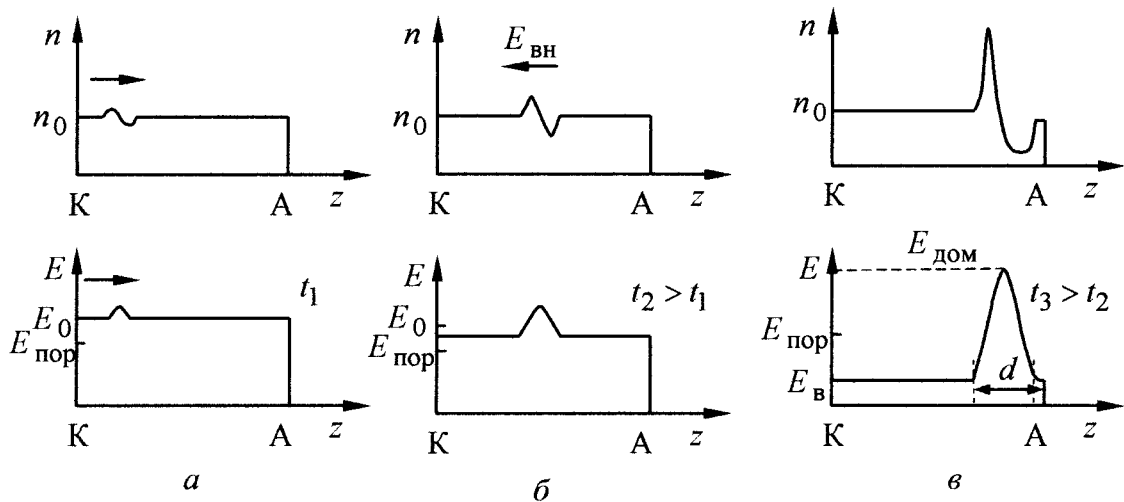


Рис. 4.3

Напряженность электрического поля вне домена будет ниже пороговой напряженности $E_{\text{пор}}$, из-за чего станет невозможным междолинный переход электронов вне домена и образование другого домена вплоть до исчезновения сформировавшегося ранее на аноде. Ток во время движения стабильного домена от катода к аноду останется постоянным (рис. 4.3).

После того как домен исчезнет на аноде, напряженность поля в образце снова повысится, и при достижении полем порогового значения $E_{\text{пор}}$ начнется образование нового домена. Такой режим работы диода Ганна называют *пролетным режимом*. При таких условиях электрическое поле вне домена и скорость домена мало изменяются при изменении напряжения на диоде. Падение избыточного напряжения происходит в основном в самом домене.

Уже при напряжении смещения $(2...3)U_{\text{пор}}$ скорость домена лишь немного отличается от скорости насыщения, поэтому пролетная частота как характеристика диода обычно определяется выражением

$$f_{\text{прол}} = v_{\text{нас}}/l_d. \quad (4.1)$$

В пролетном режиме ток через диод представляет собой импульсы, следующие с периодом $T = t_{\text{прол}} = l_d/v_{\text{прол}} = l_d/v_{\text{нас}}$ и, следовательно, диод генерирует СВЧ-колебания с пролетной частотой $f_{\text{прол}} = 1/t_{\text{прол}}$, определяемой в основном длиной образца и слабо зависящей от нагрузки.

Для доменных режимов работы диода Ганна характерно наличие в образце сформировавшегося дипольного домена в течение значительной части периода колебаний. Следует иметь в виду, что домен возникает при постоянном напряжении больше порогового, но существование домена возможно даже когда в процессе движения домена к аноду напряжение на диоде уменьшается ниже порогового. Однако существует напряжение, называемое *напряжением гашения*, при котором возникший домен рассасывается.

В зависимости от соотношения времени пролета и периода СВЧ-колебаний, а также от значений постоянного напряжения U_0 и амплитуды высокочастотного напряжения $U_{\sim}$ могут быть реализованы следующие доменные режимы: пролетный, режим с задержкой домена, режим с подавлением (гашением) домена. Значение КПД, зависящее от соотношений $U_0/U_{\text{пор}}$, $f/f_{\text{прол}}$, $v_{\text{нас}}/v_{\text{max}}$ и полных сопротивлений диода и нагрузки, при оптимальном значении $v_{\text{нас}}/v_{\text{max}}$ не превышает для GaAs-диодов 6 % в режиме с задержкой домена. Электронный КПД в режиме с гашением домена меньше, чем в режиме с задержкой домена. КПД генераторов на диоде Ганна, работающих в пролетном режиме, невелик, и этот режим обычно не имеет практического применения.

Время формирования домена определяется в значительной степени процессом перераспределения объемного заряда по длине диода. Оно зависит от начальной неоднородности электрического поля, уровня легирования активного слоя диода и приложенного к нему напряжения. Приблизительно можно считать, что дипольный домен успевает полностью сформироваться за время $\tau_f \approx 5 \times 10^4 / N_0$, где N_0 выражено в см^{-3} . Говорить о доменных режимах работы имеет смысл только в том случае, если домен успевает сформироваться

за время, равное времени пролета электронов в образце $t_{\text{прол}}$. Отсюда условием существования дипольного домена является условие $t_{\text{прол}} = \tau_{\text{ф}}$, или

$$N_0 l_d < (N_0 l_d)_{\text{крит}} = 2,09 \frac{\varepsilon v_s}{e |\mu_d|}. \quad (4.2)$$

Определенное значение произведения концентрации электронов на длину образца $(N_0 l_d)_{\text{крит}} = 2 \cdot 10^{11} \text{ см}^{-3}$, называемое *критическим значением*, или *критерием Кремера*, и является границей доменных режимов диода Ганна и режимов с устойчивым распределением электрического поля в однородно легированном образце. Приведенное численное значение критерия Кремера соответствует арсениду галлия. При $N_0 l_d < (N_0 l_d)_{\text{крит}}$ домен сильного поля не образуется, и образец называют *стабильным*. При $N_0 l_d > (N_0 l_d)_{\text{крит}}$ возможны различные доменные режимы. С ростом среднего уровня концентрации легирующей примеси все большую роль начинает играть диффузия электронов, которая игнорировалась при получении критерия Кремера. Естественно, являясь стохастическим, т. е. случайным процессом, диффузия оказывает противодействие самовозрастанию зарядовой неоднородности, обусловленному эффектом ОДП. Поэтому даже в суперкритически легированных ДГ возможно стабильное распределение электрического поля.

На рис. 4.4 представлены характерные распределения напряженности электрического поля в ДГ с омическими контактами при различных уровнях и профилях легирования. При работе диода Ганна в качестве генератора или

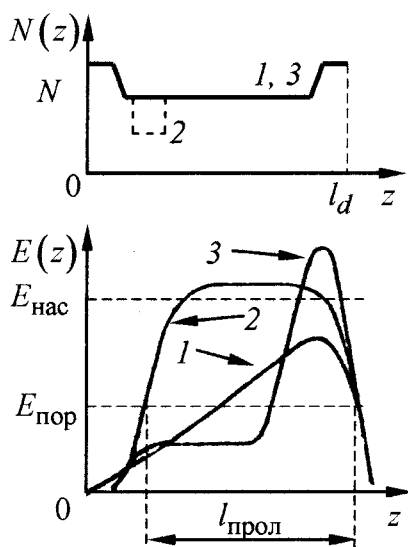


Рис. 4.4

усилителя СВЧ технологические параметры диода (профиль легирования, длина и площадь сечения) и параметры цепи (напряжение питания и свойства нагрузки) определяют различные режимы работы: доменный, ограничение накопления объемного заряда (ОНОЗ, в иностранной литературе LSA), гибридный, режим бегущих волн объемного заряда, режим отрицательной проводимости.

Неоднородность электрического поля сказывается как на динамических, так и на статических параметрах диода Ганна.

Наличие неоднородности электрического поля в устойчивом диоде Ганна приведет к тому, что на его статической вольтамперной характеристике будет отсутствовать падающий участок (кривые 1 и 2 на рис. 4.5). Появление падающего участка на вольтамперной характеристике устойчивого диода связано с разогревом кристаллической решетки под действием протекающего тока. При этом повышается температура, и как следствие возрастает интенсивность рассеяния электронов на колебаниях решетки (фононах), что приводит к падению подвижности электронов, т. е. к уменьшению значения их скорости при данном значении напряженности электрического поля (кривая 3 на рис. 4.5). Для ВАХ неустойчивого ДГ (кривая 4) характерен резкий скачок в области порогового напряжения $U_{\text{пор}}$.

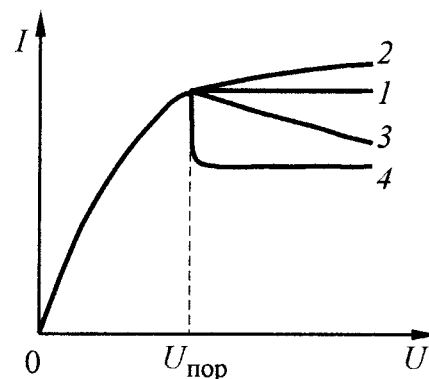


Рис. 4.5

Кстати, критерий Кримера справедлив только для структур, у которых длина активного слоя между катодом и анодом много меньше поперечных размеров, что характерно для планарных структур и мезоструктур. У тонкопленочных структур (поперечный размер может быть сравним с его длиной) образующиеся при формировании домена объемные заряды создают внутренние электрические поля, имеющие помимо продольной еще и поперечную компоненту. Это приводит к уменьшению поля по сравнению с одномерной задачей. При малой толщине активной пленки d в выражении для критерия отсутствия доменной неустойчивости длина l_d заменяется на толщину.

Для расчета генераторов и усилителей на диодах Ганна обычно используются понятие импеданса $Z(\omega) = R(\omega) + iX(\omega)$ или связанного с ним адмитанса $Y(\omega) = 1/Z(\omega) = G(\omega) + iB(\omega)$. Здесь ω — циклическая частота сигнала; R, G — вещественные части сопротивления и проводимости; X, B — реактивные части сопротивления и проводимости.

Необходимое и достаточное условие генерации или усиления имеет вид

$$Z(\omega) + Z_H(\omega) = 0. \quad (4.3)$$

В режиме стабильного усиления волн пространственного заряда активное сопротивление (проводимость) диода становится отрицательным в интервале частот, и появляется возможность использования диода в схеме усилителя.

Очевидно, что наличие достаточно сильной положительной обратной связи при отрицательном значении сопротивления (проводимости) должно приводить к неустойчивости колебаний в цепи, т. е. к появлению генерации. Разделив вещественные и мнимые части в уравнении (4.3), перепишем условие возникновения генерации или усиления:

$$R(\omega) + R_H(\omega) = 0, \quad (4.4)$$

$$X(\omega) + X_H(\omega) = 0. \quad (4.5)$$

где $Z_H(\omega) = R_H(\omega) + iX_H(\omega)$ – импеданс внешней цепи включения диода.

Выражение (4.4) отражает тот факт, что при установившихся автоколебаниях (генерация) все активные потери скомпенсированы усилением. Другими словами, за период колебаний энергия, теряемая ввиду затухания, в точности равна энергии, подводимой от внешнего источника. Это условие называют *балансом амплитуд*. Для возникновения генерации необходимо не просто восполнение потерь энергии, т. е. сложение квадратов амплитуд, а когерентное сложение самих амплитуд. Последнее требование приводит к второму условию, которое называется *балансом фаз* (4.5). Условие (4.3) позволяет сделать вывод о том, что изменением параметров внешней цепи (при неизменных эквивалентных параметрах диода) можно получить генерацию при обеспечения внешней положительной обратной связи.

Однако существует и другой способ возбуждения, не связанный со схемой включения, а обусловленный исключительно внутренней связью. В этом случае диод должен быть подключен к генератору напряжения ($Z_H(\omega) = 0$). Тогда условие (4.3) дает критерий устойчивости диода в режиме заданного напряжения. Этот критерий разделяет два режима работы: режим стабильного усиления ВПЗ, в котором диод может использоваться в качестве усилителя или генератора (в зависимости от схемы), и режим, при котором на катоде периодически возникают домены (области сильного поля), пролетающие через всю активную область до анода. Этот режим называют *пролетным (ганновским) режимом*, так как период осцилляций тока во внешней цепи, связанных с движением домена, равен времени пролета последнего от катода до анода. Поэтому критерий, вытекающий из условия (4.3) и разделяющий эти два режима, также является критерием Кремера. Таким образом, в случае выполнения условия (4.2) диод устойчив, т. е. в отсутствие внешнего сигнала в нем не возникает возбуждения волн. Такой диод называют *субкритически легированным* и используют для усиления. Если условие (4.2) не выполняется, реализуется чисто

«генераторный» режим – режим бегущих доменов, представляющих собой периодически возникающие одиночные нелинейные волны (солитоны). Подобный диод называют *суперкритически легированным* и используют исключительно для генерации СВЧ-колебаний.

Благодаря описанным свойствам ДГ находят применение в качестве активных элементов в генераторах и усилителях СВЧ-диапазона. Основными параметрами генератора являются: мощность генерации P ; частота генерации f ; полоса перестройки частоты электрическим $\Delta f_{эл}$ и механическим $\Delta f_{мех}$ способами; КПД $\eta = P/P_0$, где $P_0 = IU_0$ – мощность по постоянному току. Частотный диапазон, перекрываемый генераторами Ганна, очень широк и составляет 100...150 ГГц. Диоды Ганна включают в линии передачи и в резонаторы, перестраиваемые по частоте. Коаксиально-волноводная секция с диодом Ганна, включаемая в волноводный тракт, показана на рис. 4.6. Короткозамыкающие поршни необходимы для перестройки генератора по частоте и согласования диода с нагрузкой. Генераторы на диодах Ганна перестраиваются по частоте изменением

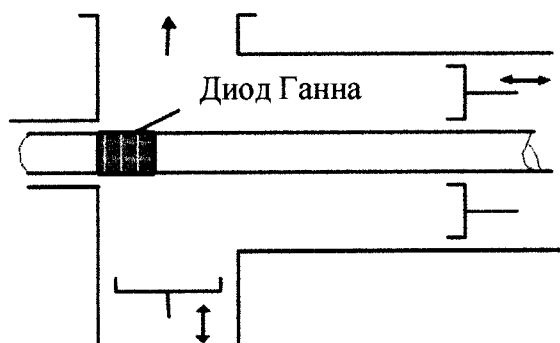


Рис. 4.6

параметров резонаторов или напряжения питания. Механическую перестройку можно проводить в широких пределах при условии плавного перехода из одного режима работы в другой. Кроме того, возможна перестройка с помощью варикапов и ферритов. Электронная перестройка частоты изменением напряжения питания в резонансных режимах работы мала и составляет 5...20 МГц/В. Эта перестройка связана с изменением емкости домена. Частота генераторов на ДГ определяется в основном резонансной частотой колебательной системы с учетом емкостной проводимости диода и может перестраиваться в широких пределах механическими и электрическими методами.

Выходная мощность диода Ганна ограничена электрическими и тепловыми процессами. Как и для ЛПД, в сантиметровом диапазоне длин волн максимальное значение выходной мощности диода Ганна определяется тепловыми эффектами. В миллиметровом диапазоне толщина активной области диодов, работающих в доменных режимах, становится малой, и начинают преобладать ограничения электрического характера.

Мощность в непрерывном режиме достигает 0,62 Вт на частоте 12,8 ГГц при КПД 3,5...4 %. В импульсном режиме на частоте 7,0 ГГц получена мощность 2,1 кВт при КПД 4 %, а на частоте 100 ГГц – около 100 мВт при КПД 5 %. КПД генераторов зависит от режима работы и составляет от единиц до 20 %. В отдельных генераторах КПД достигает 30 %.

Генераторы на диодах Ганна характеризуются значительно меньшими частотными шумами, чем генераторы на ЛПД. В настоящее время генераторы на диодах Ганна находят применение в качестве гетеродинов и генераторов в мало мощных передатчиках сантиметрового и миллиметрового СВЧ-диапазонов.

Большой интерес представляют разработки усилителей на диодах Ганна, особенно для миллиметрового диапазона длин волн, где применение СВЧ-транзисторов ограничено. Важной задачей при создании усилителей на

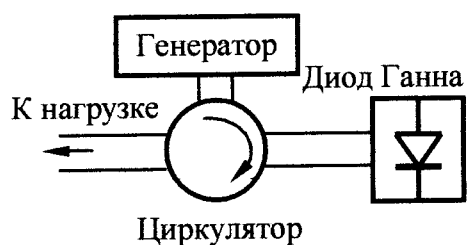


Рис. 4.7

диодах Ганна является обеспечение устойчивости их работы. В усилителях с диодами Ганна часто реализуются схемы регенеративного усилителя отражательного типа с разделением входного и выходного сигналов. Схема усилителя СВЧ-колебаний отражательного типа на ДГ с циркулятором по-

казана на рис. 4.7. Циркулятор служит для развязки входного и выходного сверхвысокочастотных сигналов усилителя мощности.

Усилители на диоде Ганна характеризуется следующими основными параметрами: полосой усиливаемых частот Δf , мощностью насыщения $P_{\text{нас}}$, КПД и максимальным коэффициентом усиления по мощности Γ :

$$\Gamma = \left| \frac{G_d(\omega) - G_n(\omega)}{G_d(\omega) + G_n(\omega)} \right|^2, \quad (4.6)$$

где $G_d(\omega)$ и $G_n(\omega)$ – активные проводимости диода и нагрузки. Очевидно, что при $G_d(\omega) < 0$ коэффициент усиления $\Gamma > 1$. Коэффициент полезного действия усилителя $\eta = P/P_0$ в пределе стремится к КПД генератора.

Наиболее чувствительным (и легко регистрируемым) к изменению профиля распределения электрического поля параметром является частота, соответствующая максимальному усилению в режиме малого сигнала, поскольку она определяется обратным временем пролета промежутка, в котором отрицательная дифференциальная подвижность $\mu_d < 0$, т. е. $f_{\text{max}} = v_{\text{нас}}/l_d$.

Усилители на субкритически легированных ДГ находят ограниченное применение из-за малых динамического диапазона и коэффициента усиления. Устойчивая отрицательная проводимость в широком диапазоне частот, достигающем 40 %, реализуется в диодах с $N_0 l_d = (2...3) \cdot 10^{12} \text{ см}^{-12}$ при малой длине диода (8...15 мкм) и отношениях напряжений $U_0/U_{\text{пор}} = (3...4)$. При меньших напряжениях наблюдается генерация, срыв которой при увеличении напряжения может быть объяснен уменьшением ОДП материала при повышении температуры прибора.

Однородное распределение электрического поля по длине диода и устойчивое усиление в широкой полосе частот могут быть получены за счет неоднородного легирования образца (рис. 4.4, кривая 2). Если вблизи катода имеется узкий слаболегированный слой длиной около 1 мкм, то он ограничивает инжекцию электронов из катода и приводит к резкому возрастанию электрического поля. Увеличение концентрации примеси по длине образца по направлению к аноду до $(1...2) \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}$ позволяет добиться однородности электрического поля. Такие усилители характеризуются широким диапазоном, КПД, равным 2...3 %, и коэффициентом шума порядка 10 дБ.

4.2. Описание объекта исследований

Диод Ганна – двухэлектродная структура, представляющая собой объемный полупроводник (арсенид галлия или фосфид индия) 1 с нанесенными на него катодным 2 и анодным 3 контактами, теплоотводом 4 и защитным слоем 5 (рис. 4.8). В качестве объекта исследований используется планарный арсенидгаллиевый диод АА703, помещенный в стандартный корпус.

Основные характеристики диода: диапазон генерации СВЧ-колебаний 8...12 ГГц; длина активной области $L = 10 \text{ мкм}$; номинальное напряжение питания 8,5 В; номинальный рабочий ток при номинальном напряжении питания 270 мА; выходная мощность генерации при номинальном напряжении питания 1 мВт; сопротивление диода по постоянному току составляет 3...20 Ом при напряжениях питания $U_d = 0,5...8,5 \text{ В}$; максимально допустимая рабочая температура диода $+75 \text{ }^\circ\text{C}$.

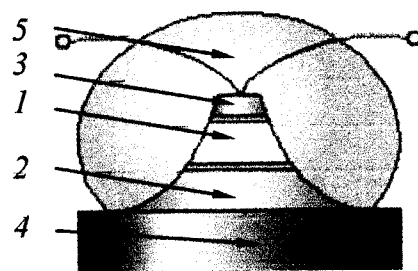


Рис. 4.8

4.3. Описание экспериментальной установки

Диод размещен в резонаторной камере, представляющей собой отрезок волновода 23×10 мм с короткозамкнутым подвижным плунжером, с помощью которого производится перестройка частоты объемного резонатора.

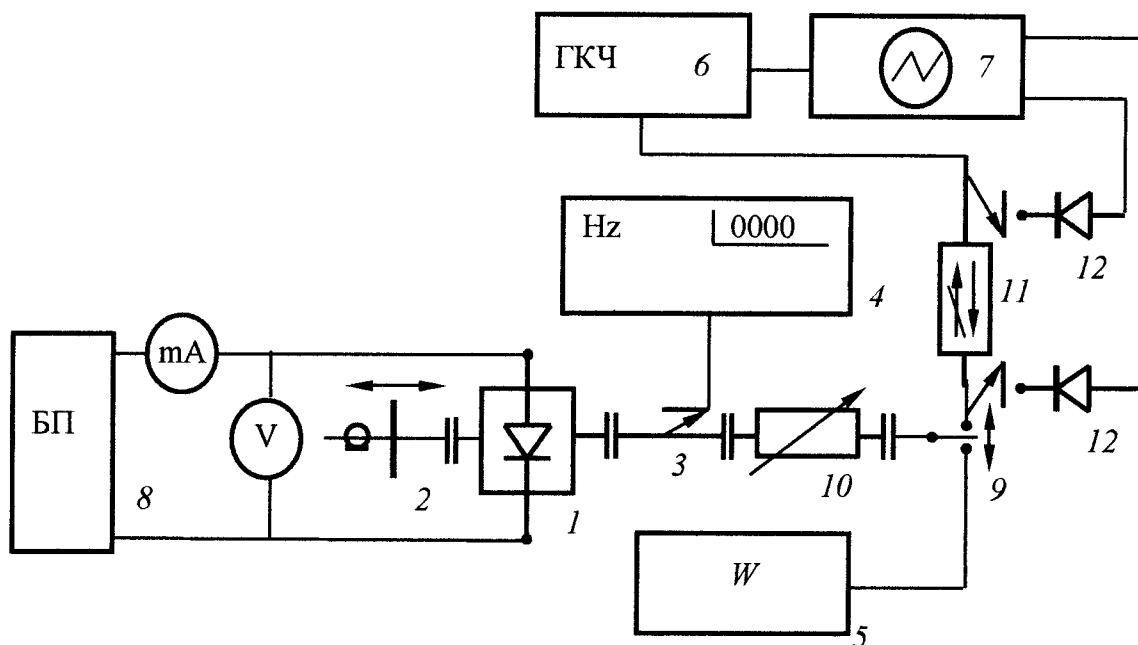


Рис. 4.9

Установка (рис. 4.9) состоит из резонатора 1 в виде волноводного отрезка, в котором размещен диод Ганна, перестраиваемого подвижного волноводного плунжера 2, обеспечивающего короткое замыкание, волноводного разветвителя 3, электронносчетного частотомера 4, термисторного измерителя мощности 5, волноводного переключателя 9, а также панорамного измерителя, состоящего из генератора качающейся частоты (ГКЧ) 6, индикатора 7 и двух направленных ответвителей 12. Напряжение смещения подается на ДГ с блока питания (БП) 8. Статические характеристики измеряются с помощью вольтметра и миллиамперметра, находящихся в измерительном блоке. Данная измерительная установка позволяет исследовать ДГ в качестве активного элемента как генератора, так и усилителя отражательного типа, применяя переключатель 9. Регулировка уровня мощности генератора и измерение усиления осуществляется аттенуатором 10. Характеристики усилителя измеряются с помощью панорамного измерителя, включенного по отражательной схеме. Ферритовый вентиль 11 исполняет роль развязывающей нагрузки.

4.4. Предварительное задание

1. Изучить теоретическую часть работы.

2. Провести предварительные расчеты. Определить значение порогового напряжения $U_{\text{пор}}$ и частоты генерации в пролетном режиме $f_{\text{ген}}$ исходя из того, что в арсениде галлия при температуре $T = 300$ К значение пороговой напряженности электрического поля $E_{\text{пор}} = 3,5$ кВ/см, а скорость насыщения $v_{\text{нас}} = 10^7$ см/с. При этом считать, что поле в активной области распределено однородно, т. е. пролетная длина совпадает с длиной этой области $l_{\text{про}} = l_d$.

4.5. Основное задание

1. Снять статическую вольтамперную характеристику ДГ.

2. Исследовать ДГ в качестве активного элемента генератора.

2.1. Исследовать электрическую перестройку генератора. При фиксированных положениях плунжера $z_{\text{плж}}$ снять зависимость выходной мощности $P_{\text{вых}}$ и частоты колебаний $f_{\text{ген}}$ от напряжения питания диода U_0 .

2.2. Исследовать механическую перестройку. При фиксированных напряжениях питания диода $U_0 > U_{\text{пор}}$ снять зависимости выходной мощности $P_{\text{вых}}$ и частоты генерируемых колебаний $f_{\text{ген}}$ от положения короткозамыкающего плунжера $z_{\text{плж}}$.

3. Исследовать ДГ в качестве активного элемента усилителя. При выбранном фиксированном напряжении на диоде U_0 перемещением плунжера добиться усиления в полосе частот Δf . В качестве прибора, регистрирующего выходной сигнал, использовать индикаторный блок панорамного измерителя КСВ. Коэффициент усиления определять с помощью прецизионного аттенюатора, включенного между измерительным генератором и диодом Ганна. Исследовать зависимость коэффициента усиления K_y от положения настроенного плунжера $z_{\text{плж}}$ и напряжения смещения U_0 .

4.6. Содержание отчета

1. Цель работы, схема измерительной установки.

2. Графики всех экспериментальных зависимостей с отмеченными на них расчетными точками.

3. Значение активной проводимости диода G_d , рассчитанное с использованием (4.6), на частоте, соответствующей максимуму усиления. При этом считать, что реактивности в системе диод–цепь полностью скомпенсированы и сопротивление нагрузки $Z_H = R_H = 1/G_H = 100 \text{ Ом}$.

4. Оценка длины диода l_d :

4.1. Исходя из экспериментального значения пролетной частоты $f_{\text{прол}}$.

4.2. Исходя из значения порогового напряжения $U_{\text{пор}}$.

4.7. Контрольные вопросы

1. В чем заключается физический принцип действия ДГ как активного элемента СВЧ-схем?

2. Может ли статическая вольтамперная характеристика ДГ иметь падающий участок?

3. Объясните смысл условий самовозбуждения ДГ (4.4) и (4.5).

4. К каким диодам следует отнести исследованный прибор – к суб- или суперкритически легированным?

5. С каким физическим эффектом связан использованный в работе способ стабилизации?

6. От каких факторов зависит коэффициент усиления отражательного усилителя?

7. Чем определяется полоса усиливаемых частот усилителя?

5. ИССЛЕДОВАНИЕ УМНОЖИТЕЛЯ ЧАСТОТЫ НА ВАРАКТОРНОМ ДИОДЕ

Цель работы – исследование свойств варакторного диода СВЧ, используемого в умножителе СВЧ-диапазона и его характеристик.

5.1. Основные теоретические сведения

5.1.1. Устройство и принцип действия варактора

Варакторным диодом (или просто варактором) называют двухэлектродную полупроводниковую структуру с p – n -переходом, реактивными сопротивлением которой можно управлять с помощью напряжения смещения. Вольтфарадная характеристика (зависимость емкости от напряжения) – оп-

ределяется профилем легирования p - n -перехода. На рис. 5.1 показаны профили легирования двух видов, использование которых наиболее целесообразно в диодах данного типа. Сверхрезкий профиль (кривая 1) – обеспечивает большую крутизну изменения емкости под действием напряжения по сравнению с резким профилем легирования (кривая 2). Это обусловлено спадом уровня легирования в n -области, приводящим к большему расширению обедненного слоя, а следовательно, и к более значительному изменению емкости при заданном изменении напряжения. Области применения варакторов – приборы и устройства с нелинейной вольтфарадной характеристикой полупроводниковой структуры. В основе принципа действия этих устройств лежит нелинейная зависимость емкости обратно смещенного p - n -перехода от напряжения. Подчеркнем: основным режимом работы варакторного диода является режим обратного смещения, так как именно в этом случае в широком диапазоне напряжений существует обедненный слой. При отрицательных напряжениях смещения отсутствует инерционная диффузионная емкость, связанная с наличием свободных (подвижных) неосновных носителей заряда.

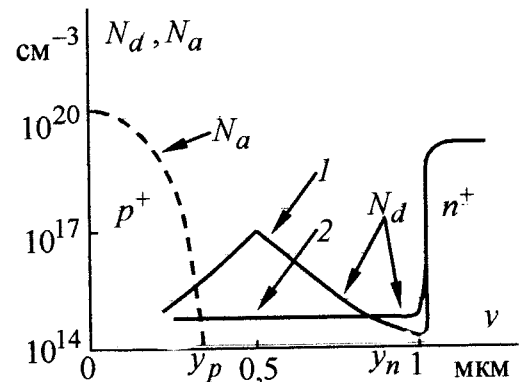


Рис. 5.1

Суммарная емкость перехода определяется по формуле

$$C = \frac{\partial Q}{\partial U} = C_{\text{бар}} + C_{\text{диф}} = \frac{\partial Q_{\text{подв}}}{\partial U} + \frac{\partial Q_{\text{неподв}}}{\partial U}. \quad (5.1)$$

Инерционная диффузионная емкость p - n -перехода является нежелательной. Ее формируют подвижные неосновные заряды p_n и n_p . Распределение концентраций неосновных носителей заряда определяется их диффузионными длинами L_{p_n} и L_{n_p} . При увеличении прямого напряжения смещения увеличивается концентрация подвижных носителей заряда и, следовательно, диффузионная емкость варактора так же увеличивается:

$$C_{\text{диф}} = \frac{q}{KT} \left(\frac{qL_{n_p}n_{p0}}{2} + \frac{qL_{p_n}p_{n0}}{2} \right) \exp\left(\frac{qU_0}{KT}\right).$$

Вполне естественно, что при отрицательном смещении эта емкость равна нулю. Асимптотический характер роста диффузионной емкости определя-

ется тем, что при достижении напряжением смещения уровня контактной разности потенциалов диод открывается. Это означает, что концентрации свободных носителей заряда в области перехода становятся значительными. В этом случае переход представляет собой короткое замыкание, что эквивалентно бесконечной емкости. Использование диффузионной емкости для конструирования диодов СВЧ-диапазона нежелательно. Процессы ее перезарядки связаны с накоплением и релаксацией свободных носителей заряда и имеют инерционный характер. Заметим, что диффузионная емкость отсутствует в диодах с барьером Шотки, так как в этом случае при образовании перехода участвует только один тип подвижных носителей.

Рассмотрим процессы, относящиеся к формированию и модуляции барьерной емкости p – n -перехода. Как уже говорилось, барьерная емкость образуется неподвижными зарядами в обедненном слое. При увеличении обратного напряжения смещения происходит увеличение ширины обедненного слоя диода. Это приводит к уменьшению барьерной емкости, формируемой неподвижными зарядами доноров и акцепторов. Этот факт можно понять, если для описания поведения барьерной емкости применить модель плоского конденсатора. Емкость, вычисленная по формуле плоского конденсатора, тем меньше, чем больше расстояние между пластинами конденсатора, в роли которого и выступает обедненный слой.

Емкость, обусловленная изменением толщины обедненной области (изменением заряда, связанным с ионизированной примесью), носит название *барьерной* (или *зарядовой*). Интегрирование уравнения Пуассона при некотором заданном профиле легирования (рис. 5.1) дает выражение для барьерной емкости $C_{\text{бар}}$ как функции напряжения смещения U_0 :

$$C_{\text{бар}} = C_0 (1 - U_0/U_b)^{-1/(m+2)}, \quad (5.2)$$

где C_0 – емкость при нулевом смещении; $U_0 < 0$ – отрицательное напряжение смещения; U_b – контактная разность потенциалов; m – коэффициент профиля легирования ($m = 0$ для резкого, $m > 0$ для плавного, $m < 0$ для сверхрезкого перехода и $m = 1$ для линейного профиля).

Для случая резкого перехода выражение для емкости при нулевом смещении имеет вид

$$C_0 = S \sqrt{\frac{q\epsilon N_d N_a}{2(N_d + N_a)U_b}}, \quad (5.3)$$

где ϵ – полная диэлектрическая проницаемость полупроводника, N_d , N_a – концентрации донорной и акцепторной примесей, S – площадь поперечного сечения перехода.

К параметрам варакторного диода, помимо обычных параметров для СВЧ-диодов, добавляются параметры, характеризующие варактор как электрически управляемую емкость:

- вольтамперная характеристика;
- вольтфарадная характеристика;
- емкость перехода при $U_0 = 0$;
- коэффициент перекрытия;
- добротность и частота отсечки.

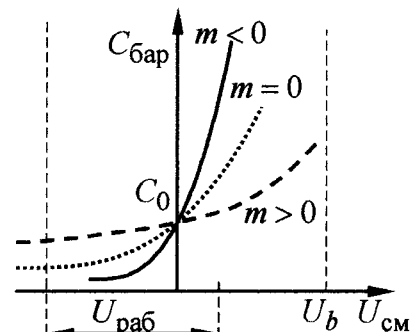


Рис. 5.2

Вольтамперная характеристика варактора аналогична характеристике любого диода с p – n -переходом. Вольтфарадные характеристики для различных типов перехода представлены на рис. 5.2. Из выражения (5.2) следует, что сверхрезкий переход обеспечивает наибольшую крутизну вольтфарадной характеристики (наивысшую чувствительность). Величина емкости C_0 является важным параметром варактора, не зависит от типа перехода и для промышленных образцов колеблется от 1 до 20 пФ.

Коэффициент перекрытия представляет собой отношение C_0 к минимальному значению емкости при предельном обратном смещении. Очевидно, что последнее ограничено напряжением пробоя, зависящим как от уровня легирования, так и от геометрии диода. Обычно при напряжении более 45 В минимальное значение емкости в три раза меньше C_0 . Для варактора с сверхрезким переходом коэффициент перекрытия возрастает до пяти.

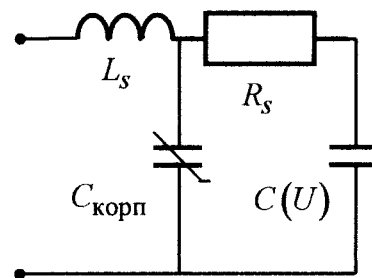


Рис. 5.3

Эквивалентная схема варакторного диода аналогична схемам полупроводниковых диодов. В силу конструктивных особенностей варакторов можно несколько упростить схему (рис. 5.3). Для анализа работы прибора достаточно ограничиться рассмотрением $C(U)$ – барьерной емкостью, зависящей от напряжения обратного смещенного диода, R_s – сопротивлением толщи полупроводника, $C_{\text{корп}}$ – емкостью корпуса и L_s – индуктивностью выводов варакторного диода.

Добротность Q характеризует эффективность варактора и определяет отношение запасенной энергии к рассеиваемой мощности за период и для приведенной эквивалентной схемы вычисляется по формуле, полученной в пренебрежении индуктивностью выводов и емкостью корпуса:

$$Q \approx (2\pi f R_s C(U))^{-1}. \quad (5.4)$$

Значение частоты, при которой добротность $Q = 1$, называется *частотой отсечки* варактора f_c . Как следует из (5.4), при работе на высоких частотах для получения приемлемых значений добротности ($Q \gg 10$) необходимо стремиться к уменьшению сопротивления R_s . Для этого в диапазоне СВЧ используются диоды не из кремния, а из арсенида галлия, поскольку в последнем подвижность в несколько раз выше. Это при прочих равных условиях (геометрии, уровне легирования, температуре) приводит к уменьшению в несколько раз сопротивления толщи полупроводника R_s .

5.1.2. Устройство и принцип действия умножителя частоты

Перейдем к анализу принципа действия умножителя частоты (генератора гармоник) на варакторном диоде, схема которого показана на рис. 5.5. В ее состав входят: источник постоянного смещения $U_0 < 0$, генератор входного

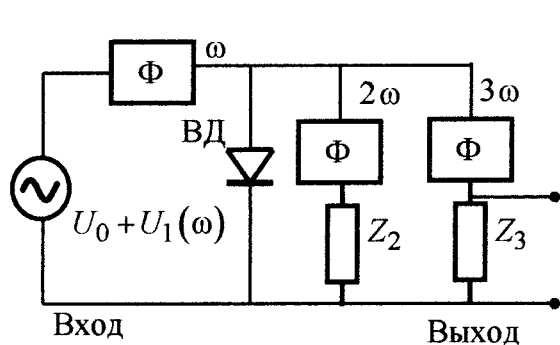


Рис. 5.5

переменного сигнала $U_1(\omega) = U_1 \cos(\omega t)$, варакторный диод (нелинейная емкость) и полосовые фильтры с соответствующими нагрузками. Фильтры настроены на первую, вторую и третью гармоники входного сигнала. С выхода такой схемы снимается сигнал утроенной частоты.

Используя выражение для вольтфарадной зависимости (5.2), представим емкость как функцию переменного напряжения $U_1(\omega)$ в следующем виде, предполагая $U_1 \ll U_b - U_0$:

$$C(U_1) \approx C(U_0) \left[1 + \alpha_1 U_1(\omega) + \frac{1}{2} \alpha_2 U_1^2(\omega) \right], \quad (5.5)$$

где $\alpha_1 = \gamma / (U_b - U_0)$, $\alpha_2 = \gamma(\gamma + 1) / (U_b - U_0)^2$, $\gamma = 1 / (m + 2)$, $C(U_0)$ определяется из (5.2). Выражение (5.5) получено разложением в ряд по степеням $U_1(\omega)$ до квадратичного слагаемого включительно, что вполне достаточно

для объяснения принципа действия генератора третьей гармоники, исследуемого в данной работе. Изменение во времени реактивного параметра (емкости варактора) и вызывает параметрический эффект – генерацию гармоник. Для заданной схемы можно ограничиться тремя гармониками тока:

$$i(t) = C(U_1) \frac{\partial U_1}{\partial t} = \\ = \omega C(U_0) U_1 \left[\left(1 + \frac{1}{8} \alpha_2 U_1^2 \right) \sin \omega t + \frac{\alpha_1}{2} U_1 \sin 2\omega t + \frac{\alpha_2}{8} U_1 \sin 3\omega t \right]. \quad (5.6)$$

Наличие гармоник в спектре тока приводит к появлению напряжения как по второй гармонике, так и по третьей. Причем, существование цепи, настроенной на вторую гармонику, обеспечивает возникновение соответствующего напряжения на диоде, которое складывается с напряжением первой гармоники и порождает дополнительный сигнал на комбинационной частоте (суммарной, т. е. третьей гармонике). Коэффициент преобразования для такого устройства может быть весьма большим, поскольку вся мощность, подводимая по первой гармонике (в предположении идеальных емкости диода и фильтров, а также отсутствия потерь в дополнительной цепи второй гармоники), преобразуется в мощность высших гармоник:

$$P_1(\omega) = P_2(2\omega) + P_3(3\omega). \quad (5.7)$$

Естественно, что в реальной цепи всегда присутствуют потери, которые уменьшают значение коэффициента преобразования $\eta = P_3/P_1$, поэтому даже при оптимально настроенном дополнительном контуре второй гармоники он не может превышать 60...80 %.

Поскольку значение емкости $C(U_0)$ зависит от напряжения, то и коэффициент преобразования проявляет такую зависимость. Коэффициент преобразования зависит как от напряжения смещения (при постоянной мощности на входе), так и от входной мощности (при постоянном смещении). Обе зависимости имеют максимум. Первоначальный рост связан с уменьшением обратного тока через диод, т. е. с уменьшением омических потерь. Максимум достигается при равенстве смещения и амплитуды СВЧ-сигнала. Дальнейший спад обусловлен уменьшением крутизны вольтфарадной зависимости.

5.2. Описание объекта исследований

Реальные структуры варакторов имеют некоторые особенности. Прежде всего, они связаны с профилями легирования полупроводников. Структура

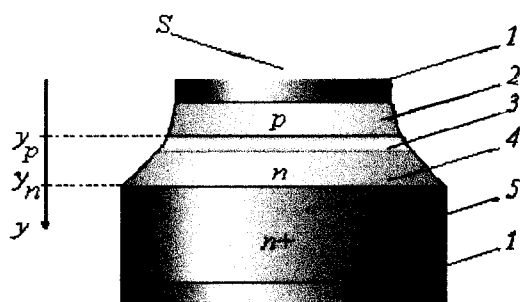


Рис. 5.6

варакторного диода показана на рис. 5.6, на котором отмечены: 1 – омические контакты; 2 – диффузионный p -слой; 3 – обедненная область; 4 – эпитаксиальный n -слой; 5 – подложка из сильнолегированного полупроводника.

В качестве объекта исследований используется арсенидгаллиевый диод 2А602В, помещенный в корпус. Его основные характеристики: – частота отсечки $f_c = 35$ ГГц; – общая емкость $C = 1,7 \dots 2,7$ пФ при $V_{обр} = 6$ В и $f = 10$ МГц; – пробивное напряжение $V_{пр} = 45$ В при обратном токе $I_{обр} = 100$ мкА; – диапазон допустимых рабочих температур $T = 213 \dots 373$ К; – емкость корпуса $C_{корп} = 0,5 \dots 0,7$ пФ; – предельная непрерывная СВЧ-мощность – 1 Вт.

5.3. Описание измерительной установки

Электрическая схема измерительной установки представлена на рис. 5.7. Она состоит из двух частей (на рисунке обозначены цифрами I и II). Часть I, предназначенная для исследования вольтфарадной характеристики варактора, содержит автоматический цифровой LCR-измеритель 1 и колодку с измеряемым варактором 2. Часть II схемы предназначена для исследования варакторного умножителя частоты (утроителя) и собранного по принципу, показанному на рис. 5.5. Она содержит умножитель 3, частотомер 4 и измеритель мощности 5, мультиметр 6 для измерения тока через диод и СВЧ-генератор 7

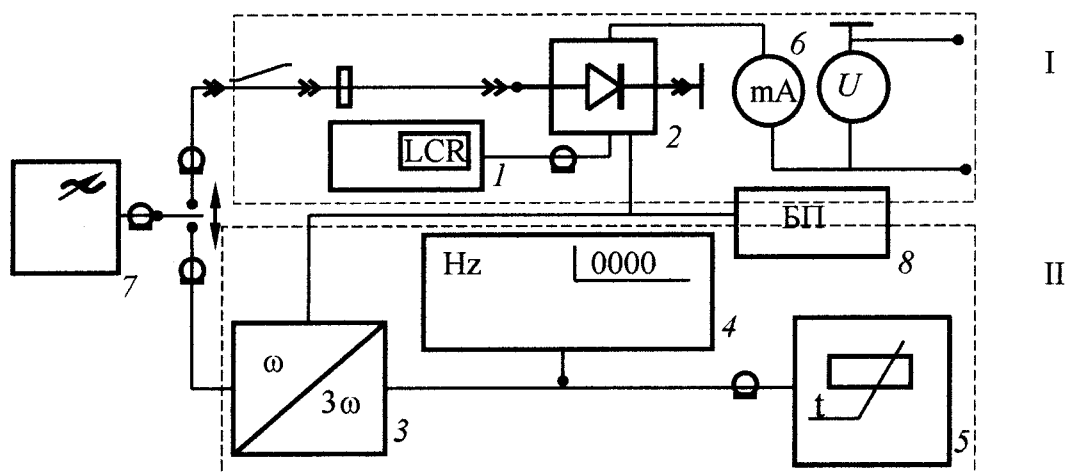


Рис. 5.7

с комбинированным выходом. Блок питания 8 является общим для обеих частей схемы и обеспечивает калиброванное напряжение смещения варактора. Фильтрация переменного сигнала обеспечивается конструкцией умножителя.

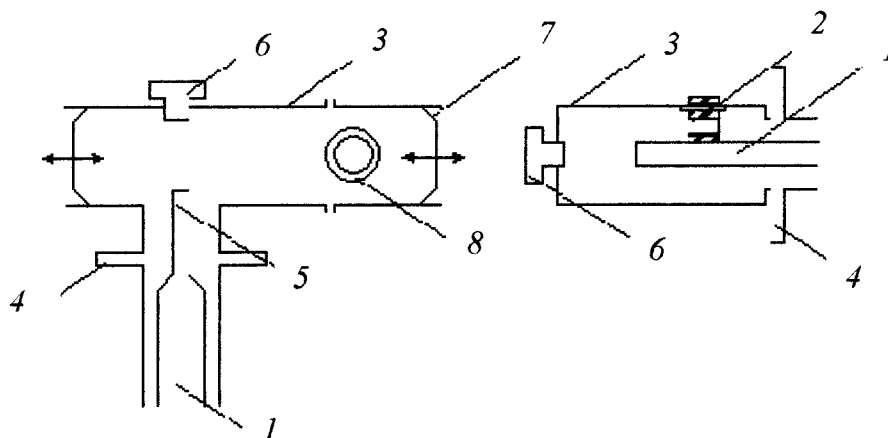


Рис. 5.8

Конструкция умножителя показана на рис. 5.8. Диод помещен в резонатор, имеющий механические элементы настройки. Входной сигнал по коаксиальной линии 1 подается на варактор 2, помещенный в прямоугольный волновод 3. Цилиндрический резонатор 4, настроенный на третью гармонику сигнала, образует фильтр, препятствующий просачиванию выходного сигнала во входную цепь. Контур, образованный емкостью между штырем 5 и подстроечным винтом 6, а также индуктивностью штыря, настраивается на холостую частоту (частоту второй гармоники), а контур, образованный короткозамкнутым отрезком волновода 7 и варактором, – на утроенную частоту входного сигнала. На выходе умножителя установлен коаксиально-волноводный переход 8. Так как волновод является заградительным для первой и второй гармоник входного сигнала, то на выход умножителя поступает только сигнал с утроенной частотой 3ω .

5.4. Предварительное задание

1. Изучить описания лабораторной работы. При необходимости обратиться к рекомендованной литературе.

2. Провести предварительные расчеты. Оценить значение добротности Q на частоте $f = 1$ ГГц, используя (5.4) и основные характеристики варактора: $R_s = 2$ Ом; $U_{обр} = 6$ В; $C = 2,2$ пФ.

3. Подготовить таблицы для снятия экспериментальных зависимостей.

5.5. Основное задание

1. Исследовать прямую и обратную ветви вольтамперной характеристики варакторного диода. При этом прямое напряжение не должно превышать 0,8 В.
2. Снять вольтфарадную характеристику варактора с помощью автоматического LCR-измерителя В7-12 при прямом и обратном смещениях.
3. Снять зависимость проводимости варактора с помощью автоматического LCR-измерителя В7-12 при прямом и обратном смещениях.
4. Подключить генератор к умножителю частоты. Установив на генераторе частоту 1 ГГц, настроить контуры умножителя и коаксиально-волноводный переход на максимальную выходную мощность.
5. Исследовать зависимости выходной мощности, коэффициента преобразования, выходной частоты и тока варактора от напряжения смещения и уровня входной мощности.
5. Исследовать зависимости выходной мощности, выходной частоты и коэффициента преобразования от частоты входного сигнала при фиксированной настройке умножителя (напряжение смещения и входная мощность).

5.6. Содержание отчета

1. Цель работы, схема измерительной установки.
2. Данные предварительных расчетов.
2. Графики всех экспериментальных зависимостей.
3. Определение значения величин γ или m и C_0 по совпадению расчетной и экспериментальной вольтфарадных характеристик, считая, что при максимальном обратном смещении $C_{\text{полн}} = C + C_{\text{корп}} \approx C_{\text{корп}}$.
4. Определение частоты отсечки варактора, с применением (5.4) при усредненном значении экспериментальной емкости.
5. Выводы по работе.

5.7. Контрольные вопросы

1. В чем заключается физический принцип действия варактора как элемента умножителя частоты?
2. Чем определяется значение частоты отсечки варактора? Каковы пути увеличения ее значения?

3. Какой профиль легирования является оптимальным для варактора?
4. Как следует изменить схему, чтобы на выходе получить четвертую гармонику входной частоты?

6. ИССЛЕДОВАНИЕ ПАРАМЕТРОВ ПОЛЕВОГО ТРАНЗИСТОРА СВЧ

Цель работы – определение основных физико-топологических параметров полевого транзистора с барьером Шотки (ПТШ) по экспериментальным статическим характеристикам и вычисление эквивалентной схемы транзистора в зависимости от размеров прибора и режима работы.

6.1. Теоретические положения

Идея построения полевого транзистора была высказана в 20-х гг. XX в. американским ученым О. Лилиенфельдом, но практически прибор реализован У. Шокли в 1952 г., на 4 г. позже изобретения биполярного транзистора. Основная сложность при изготовлении приборов такого типа заключается в реализации барьера Шотки с малой плотностью поверхностных зарядов. Принцип действия полевого транзистора (ПТ) заключается в том, что при изменении напряжения на затворе меняется эффективная ширина пролетного канала и ток в цепи исток–сток I_d соответственно. Полевые транзисторы различаются по методу управления потоком основных носителей заряда, движущихся в полупроводниковом канале. Они могут иметь изолированный затвор на основе p – n -перехода либо на основе барьера Шотки. Транзисторы с изолированным затвором из-за наличия МОП-структуры имеют невысокие граничные частоты и не используются в сантиметровом диапазоне волн. Полевые транзисторы с p – n -переходом не позволяют существенно увеличивать уровень мощности вследствие низких допустимых напряжений и малой площади поверхности, отводящей тепло при нагреве во время работы.

Наиболее широкое применение на СВЧ находит ПТ с барьером Шотки, схематичное изображение которого представлено на рис. 6.1. Для формирования структуры ПТШ на подложке 1 из полуизолирующего арсенида галлия изготавливается буферный высокоомный слой 2, выполнены также из GaAs. Затем создается эпитаксиальный проводящий канал 3 n -типа с концентрацией носителей N_d высотой A . Через омические (невьшряляющие) контакты,

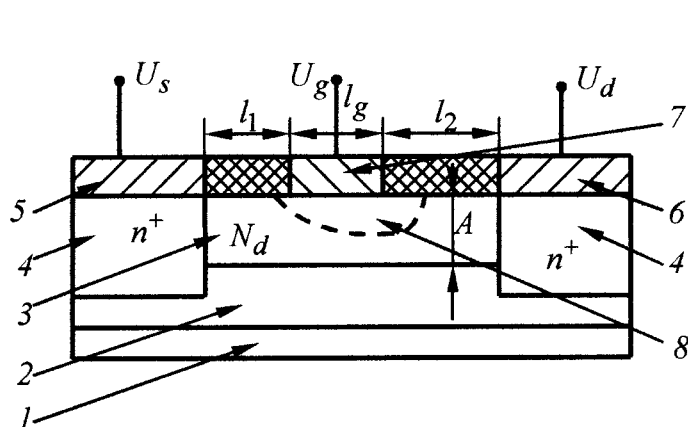


Рис. 6.1

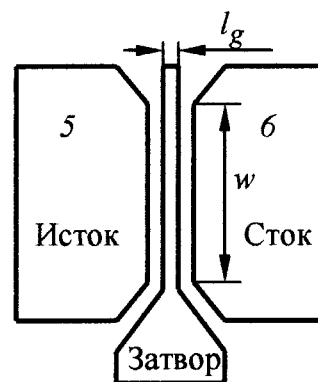


Рис. 6.2

образованные n^+ -областями 4 и металлическими пленками 5 и 6, канал 3 соединяется с выводами истока и стока. Сверху между истоком и стоком размещается слой металла, который служит электродом затвора 7, образующий барьер Шотки на границе с n -каналом. Простейшая топология с характерными размерами транзистора приведена на рис. 6.2. При приложении разности потенциалов между стоком и истоком через n -канал начинает протекать электронный ток. Отметим, что подвижные носители заряда в ПТШ вводятся в n -канал и выводятся из него через невыпрямляющие контакты, поэтому ПТШ относят к однополярным (униполярным) полупроводниковым приборам. Затвор 7 используется в ПТШ для управления током транзистора с помощью внешнего сигнала. При протекании тока через канал возникает падение напряжения на распределенном сопротивлении канала вдоль его длины. При этом часть барьера Шотки, расположенная ближе к стоку, оказывается сильнее смещенной в обратном направлении, чем остальная часть транзистора. Это приводит к несимметричному расширению слоя обедненного заряда 8 под затвором (рис. 6.1). Область обедненного слоя может расширяться до высокоомной подложки 2 и перекрывать проводящий канал 3. При этом ток транзистора в цепи исток–сток практически перестает зависеть от напряжения стока. Наступает режим насыщения тока исток–сток на рабочем участке характеристики транзистора. Повышение обратного смещения на электроде затвора вызывает увеличение ширины обедненной области и тем самым сужение n -канала. Изменение высоты проводящего канала приводит к возрастанию сопротивления канала и уменьшению тока стока. Так осуществляется модуляция электронного потока в канале с помощью внешнего управляющего напряжения на затворе.

Одним из основных факторов, определяющих частотные свойства полевого транзистора, является время пролета носителей заряда в канале $\tau = l_k / v_{\text{нас}}$, где $l_k = l_1 + l_2 + l_g$ – длина канала; $v_{\text{нас}}$ – дрейфовая скорость насыщения носителей заряда в канале. Очевидно, что для получения высокочастотных приборов необходимо обеспечить малую длину канала и большую дрейфовую скорость насыщения. Из этих условий вытекает ряд требований к материалу транзистора и к размерам его затвора.

В качестве материала канала в ПТШ используют преимущественно GaAs, так как подвижность электронов в этом материале примерно в 6 раз выше, чем в кремнии, и, следовательно, скорость насыщения больше. Перспективным является создание ПТШ на основе фосфида индия, в котором дрейфовая скорость носителей в 1,5 раза

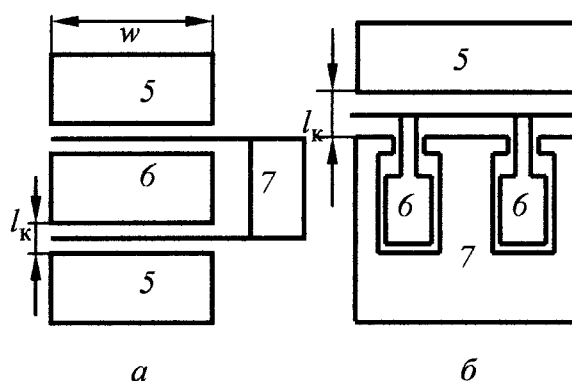


Рис. 6.3

выше, чем в арсениде галлия. В настоящее время длину активной части полупроводникового канала l_k удается снизить до 1...2 мкм. Ток прибора и отдаваемую мощность можно повысить за счет увеличения ширины канала w до 2...3 мм и создания многоканальной структуры (рис. 6.3, а). Например, ячейка ПТШ, предназначенного для работы на частоте 4 ГГц, имеет затвор $l_g = 1,5$ мкм, а размеры l_1 и l_2 – 1,0 и 2,0 мкм соответственно (рис. 6.3, б). При ширине канала транзистора 2,6 мм и размещении на одной подложке до трех десятков единичных структур, соединенных параллельно, обеспечивается выходная мощность 2 Вт. Уменьшение длины канала, однако, неблагоприятно сказывается на величине коэффициента отражения от входа, что затрудняет согласование ПТШ с входным СВЧ-трактом.

К электрофизическим параметрам полевого транзистора относятся: концентрация легирования n -канала N_d , длина затвора l_g , высота токового канала A , контактная разность потенциалов барьера Шотки U_b , паразитные сопротивления контактов стока R_d и истока R_s и сопротивление металлизации затвора R_g . К основным статическим характеристикам транзистора можно отнести: *стоковую характеристику* $I_d = F(U_{ds})$ – зависимость тока стока I_d от напряжения исток–сток U_{ds} при фиксированном напряжении на затворе U_g ,

затворную характеристику $I_d = F(U_{gs})$ – зависимость тока стока I_d от напряжения затвор–исток U_{gs} при фиксированном напряжении U_{ds} . При включения ПТШ в схемах с общим истоком второй индекс, относящийся к истоку, в обозначениях часто опускается.

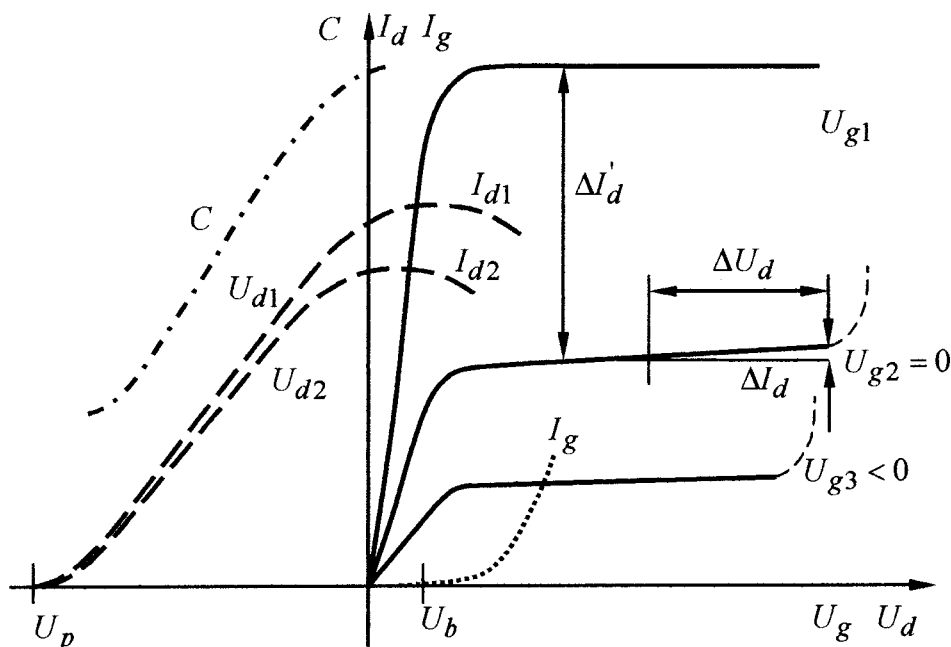


Рис. 6.4

Проанализируем эти характеристики (рис. 6.4). Для выяснения вида характеристики $I_d = F(U_{ds})$ исключим вначале электрод затвора из рассмотрения. В этом случае зависимость получившейся диодной структуры будет иметь омический (линейный) участок при малых напряжениях U_{ds} (соответствующая средняя напряженность поля $E < 2...3$ кВ/см) и неомический (нелинейный) участок при больших U_{ds} ($E > 3$ кВ/см). Насыщение тока в такой диодной структуре обусловлено насыщением средней скорости дрейфа носителей заряда в больших электрических полях ($E \geq 15$ кВ/см для арсенида галлия и $E > 30$ кВ/см для кремния). При дальнейшем увеличении напряжения стока ($E > 250...300$ кВ/см) существует вероятность лавинного пробоя. Подключение затвора изменяет толщину токового канала, что скажется только на уровне тока насыщения, не изменяя форму характеристик $I_d = F(U_{ds})$. Это обстоятельство иллюстрируется кривыми на рис. 6.4 для трех напряжений на затворе: $U_{g2}=0$, $U_{g3}<0$ и $U_{g1}>0$ (для случая n -канального прибора). На величину тока насыщения существенно влияет длина затвора l_g . При проте-

кании тока стока возникает падение потенциала вдоль канала, которое приводит к изменению высоты области обеднения h вдоль затвора. Это изменение в первом приближении подчиняется формуле Шокли:

$$h = \sqrt{2\varepsilon(U_K(z) - U_g + U_b - (kT_e/q)) / (qN_d)}, \quad (6.1)$$

где $U_K(z)$ – потенциал в рассматриваемой точке канала z ; U_g – потенциал затвора; U_b – контактная разность потенциалов; N_d – уровень легирования токового канала; T_e – электронная температура; k – постоянная Больцмана; q – заряд электрона; ε – диэлектрическая проницаемость. Формула (6.1) записана для n -канального транзистора. Следует заметить, что значение kT_e/q («тепловой» потенциал) характеризует увеличение ширины токового канала за счет тепловой энергии электронов.

Из (6.1) видно, что высота обедненного слоя от истока к стоку увеличивается, что равносильно уменьшению токового канала и, соответственно, допустимого тока насыщения. Такое поведение канала обеспечивает внутреннюю отрицательную обратную связь, что обуславливает постоянство тока стока. Этот факт позволяет использовать такие приборы в качестве стабилизаторов тока. Отметим, что стоковые характеристики ПТШ $I_d = F(U_d)$ аналогичны анодным характеристикам пентода $I_a = F(U_a)$ при постоянном напряжении на первой сетке лампы.

Затворная характеристика $I_d = F(U_g)$ (рис. 6.4) начинается от некоторого напряжения запирания (перекрытия) транзистора U_p , при котором в канале полностью отсутствуют подвижные носители заряда. Анализ (6.1) показывает, что полное напряжение перекрытия U_p связано с высотой канала A и уровнем легирования следующим соотношением:

$$U_p = (qN_d A^2) / (2\varepsilon). \quad (6.2)$$

Внешнее (на выводах прибора) напряжение перекрытия U_{pe} меньше по модулю напряжения U_p на значение контактной разности потенциалов контакта металл-полупроводник U_b и можно записать $|U_{pe}| = |U_p| - U_b$. Максимальное значение тока стока будет наблюдаться при напряжениях на затворе, компенсирующих U_b . Дальнейшее увеличение напряжения на затворе U_g

приводит к перераспределению тока истока I_s между током на затвор I_g и током стока I_d , что вызывает падение тока стока (рис. 6.5). Заметим, что такое поведение тока стока и затвора аналогично поведению анодного и сеточного токов в вакуумном триоде.

Для вычисления статических характеристик ПТШ, а также поведения транзистора при воздействии переменного сигнала необходимо знать конструктивно-технологические параметры прибора и иметь математическую модель токопереноса. В данной работе предлагается на основе обработки некоторых характерных экспериментальных зависимостей определить такие физико-топологические параметры, как U_b , N_d , A , а также паразитные сопротивления истока R_s , стока R_d и сопротивление металлизации затвора R_g .

6.2. Основные расчетные соотношения

6.2.1. Определение параметров барьера

К параметрам управляющего барьера Шотки относятся: контактная разность потенциалов U_b , коэффициент идеальности n и паразитное сопротивление контакта R . Для определения этих параметров можно использовать прямые ветви вольтамперных характеристик диодов, образованных электродами исток-затвор или сток-затвор. Известно, что теоретически вольтамперная характеристика диода Шотки описывается выражением

$$I = A_r T^2 \exp((-qU_b)/(kT)) \left[\exp((-q(U_g - IR))/(kT)) - 1 \right] S, \quad (6.3)$$

где A_r – постоянная Ричардсона; T – температура диода; U_g – внешнее напряжение на диоде; $(U_g - IR)$ – напряжение на барьере; S – площадь поперечного сечения диода. Искомые величины U_b , n , R можно легко найти, если воспользоваться тремя значениями токов и напряжений, полученных из эксперимента. При выборе этих точек необходимо иметь в виду следующие обстоятельства. При малых плотностях тока (напряжениях $U_g < 0,2U_b$) выражение (6.3) плохо аппроксимирует реальную харак-

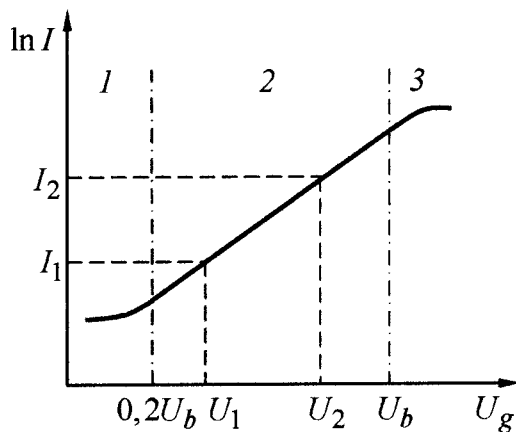


Рис. 6.6

терного сечения диода. Искомые величины U_b , n , R можно легко найти, если воспользоваться тремя значениями токов и напряжений, полученных из эксперимента. При выборе этих точек необходимо иметь в виду следующие обстоятельства. При малых плотностях тока (напряжениях $U_g < 0,2U_b$) выражение (6.3) плохо аппроксимирует реальную харак-

теристику, так как сказывается влияние токов утечки. При больших токах (напряжениях $\sim U_b$) на ограничение роста тока влияет сопротивление R , что снижает точность описания зависимости $I = F(U_g)$ выражением (6.3). На рис. 6.6 показана вольтамперная характеристика диода Шотки. Значения тока представлены в логарифмическом масштабе. На графике видны три характерные области: область токов утечки 1, линейная область 2 и область последовательного сопротивления 3. Линейная связь между $\ln I$ и U_g в области 2 свидетельствует о том, что зависимость $I = F(U_g)$ хорошо может аппроксимироваться выражением (6.3). Выбирая на линейном участке экспериментальной характеристики две характерные точки I_1 и I_2 и соответствующие напряжения U_1 и U_2 (рис. 6.6), подставляем эти значения в (6.3) и находим:

$$U_b \cong (kT/q) \ln \left[I_1 / \left(A_r T^2 w l_g \exp[-qU_1/kT] \right) \right], \quad (6.4)$$

$$n \cong (q/kT) ((U_2 - U_1) / \ln[I_2/I_1]). \quad (6.5)$$

Для определения величины сопротивления R необходимо воспользоваться зависимостью $I = F(U_g)$, представленной в линейном масштабе. Увеличение положительного напряжения на затворе U_g сверх значения U_b приводит к тому, что на барьере металл–полупроводник падение напряжения становится несоизмеримо мало по сравнению с падением напряжения на сопротивлении R . Тогда легко вычислить $R \cong \Delta U_g / \Delta I$. Используя такой подход для диодов, образованных электродами исток–затвор и сток–затвор, получим два сопротивления R_{sg} и R_{gd} . Разница этих сопротивлений обусловлена различием паразитных сопротивлений стоковой и истоковой областей и, следовательно, можно записать:

$$R_s - R_d = R_{sg} - R_{gd}. \quad (6.6)$$

Уравнение (6.6) в дальнейшем будет использовано для определения сопротивлений стока R_d и истока R_s .

6.2.2. Определение параметров токового канала

Для определения уровня легирования N_d и высоты токового канала A необходимо иметь два уравнения, связывающие эти величины между собой и с внешними измеряемыми статическими характеристиками. Одним из таких

уравнений является выражение для напряжения перекрытия канала (6.2). Учитывая, что измеряемое напряжение перекрытия U_{pe} отличается от внутреннего потенциала прокола канала, можно записать:

$$U_{pe} + U_b = (qN_d A^2) / (2\epsilon). \quad (6.7)$$

Второе уравнение может быть получено из выражения для сопротивления полностью открытого канала R_0 в области слабых электрических полей:

$$R_0 = \rho l_g / S = l_g / (qN_d \mu_0 w A), \quad (6.8)$$

где ρ – удельное сопротивление; S – площадь поперечного сечения канала; w – ширина затвора; μ_0 – подвижность носителей заряда в слабых полях. Значение подвижности μ_0 в свою очередь зависит от концентрации N_d . Эта зависимость хорошо аппроксимируется формулой

$$\mu_0 = 0,8 / (1 + \sqrt{N_d}), \quad (6.9)$$

в которой значения концентрации легирования подставляются в 10^{17} см^{-3} .

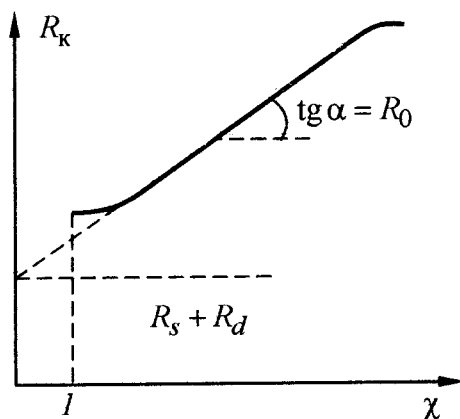


Рис. 6.7

Сопротивление достаточно просто определяется из наклона стоковых характеристик в линейной области (рис. 6.4). При малом напряжении на стоке и разных напряжений на затворе сопротивление канала меняется в соответствии с изменениями высоты токового канала a или связанной с ней – высотой обедненной подзатворной области $h = A - a$. Используя выражения (6.1), (6.2) и (6.7) для различных напряжений на затворе, можно получить уравнение для

сопротивления канала $R_K = R_0 / \sqrt{1 - (U_b - U_g) / U_p}$. Из экспериментальных стоковых характеристик сопротивление канала определяется отношением напряжения стока к току стока при некотором значении напряжения на затворе, т. е. $R_K = U_d / I_d$ при $U_g = \text{var}$.

Если представить графическую зависимость сопротивления канала от параметра $\chi = (1 - (U_b - U_g) / U_p)^{-1/2}$, то в идеальном случае должна получиться прямая (рис. 6.7). Величина χ характеризует степень перекрытия канала и называется *параметром «закрытости»* канала.

По наклону характеристики $R_k = F(\chi)$ определяется искомое значение сопротивления полностью открытого канала R_0 . В реальных транзисторах неравномерность уровня легирования в поперечном направлении канала приводит к отклонению от линейности этой зависимости, особенно в области напряжений на затворе, близких к напряжению запираания U_{pe} или контактной разности потенциалов U_b . Поэтому наклон функции $R_k = F(\chi)$ необходимо определять в диапазоне χ от 2 до 20. Полученное таким образом сопротивление R_0 используется для определения значений концентрации N_d и A из уравнений (6.7) и (6.8), если принять начальное значение подвижности $\mu_0 = 3500 \text{ см}^2/\text{В} \cdot \text{с}$. Далее, используя (6.9), а затем снова (6.7) и (6.8), повторяют расчет до сходимости по N_d и A .

Следует заметить, что продолжение прямой линии до пересечения с осью ординат дает точку, отсекающую от начала координат отрезок, равный по значению сумме паразитных сопротивлений стока и истока. Это позволяет вместе с выражением (6.6) определить отдельно R_d и R_s . Полученная информация может быть использована для расчета всего семейства ВАХ.

6.3. Характеристика программы анализа статических и малосигнальных параметров ПТШ

Для обработки результатов эксперимента используется программа, основанная на модели двух областей, относящейся к простейшим физикотопологическим моделям. В качестве исходных данных используются уже упомянутые величины: μ_0 , N_d , l_g , A , w , U_b , R_s , R_d .

Программа позволяет проводить расчет статических стоковых и затворных характеристик, а также параметров малосигнальной эквивалентной схемы полевого транзистора с барьером Шотки. Для упрощения ограничиваемся элементами кристалла: переходной проводимостью (крутизной) G , выходным сопротивлением (проводимостью) $R_{ds}(G_d)$, емкостью затвор–исток C_{gs} и емкостью затвор–сток C_{gd} .

Для описания свойств материала применяется двухкусочная аппроксимация полескоростной характеристики. На рис. 6.7 представлены два типа полескоростной характеристики и ее двухкусочная аппроксимация. Соответствие аппроксимации реальной характеристике определяется двумя величинами:

низкополевой подвижностью μ_0 (или величиной порогового поля $E_{\text{пор}}$) и скоростью насыщения $v_{\text{нас}}$. Значение скорости насыщения слабо зависит от концентрации легирования и в расчетах принимается равным 10^5 м/с. Значение порогового поля $E_{\text{пор}}$ для принятой аппроксимации находится из выражения $E_{\text{пор}} = v_{\text{пор}}/\mu_0$.

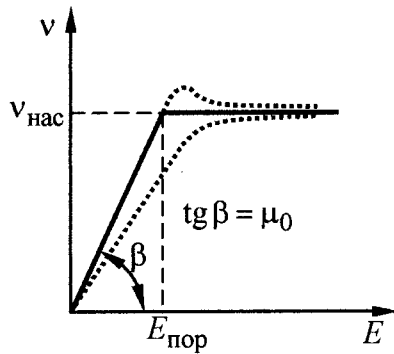


Рис. 6.7

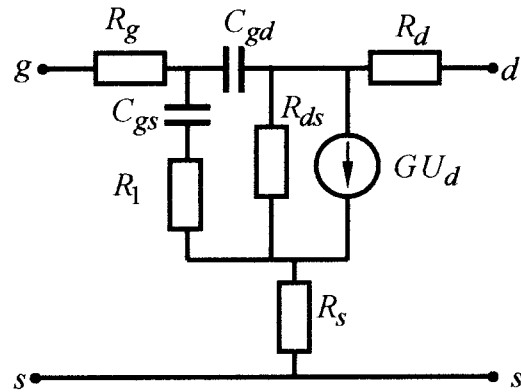


Рис. 6.8

Эквивалентная схема позволяет легко рассчитать амплитудно-частотную характеристику транзистора. Существует большое разнообразие эквивалентных схем, различающихся количеством элементов и их предназначением для описания работы ПТШ. На рис. 6.8 показана малосигнальная эквивалентная схема активного кристалла с добавлением паразитных омических сопротивлений. В ней распределенные сопротивления и емкости отдельных областей ПТШ представлены в виде сосредоточенных элементов. Сопротивления активных потерь в областях затвора, стока, истока и канала в этом случае представлены сопротивлениями R_g, R_d, R_s и R_1 . Сопротивление R_{ds} отражает выходное сопротивление сток–исток. Емкости C_{gs}, C_{gd} представляют частичные емкости канала. Активные свойства транзистора отражены генератором тока, управляемым напряжением затвор–канал. Не учтены некоторые элементы кристалла (например, межэлектродная емкость сток–исток), индуктивности и емкости выводов.

По определению сопротивления (проводимости) транзистора:

$$G = \frac{\partial I_d}{\partial U_g}, \quad U_d = \text{const}; \quad (6.10)$$

$$R_{ds} = \frac{\partial U_d}{\partial I_d}, \quad U_g = \text{const}. \quad (6.11)$$

Емкости, соответствующие различным участкам канала:

$$C_{gs} = \frac{\partial Q}{\partial U_{gs}}, \quad U_{ds} = \text{const}; \quad (6.12)$$

$$C_{gd} = \frac{\partial Q}{\partial U_{gd}}, \quad U_{gs} = \text{const}. \quad (6.13)$$

В выражениях (6.12) и (6.13) переменной Q обозначен заряд обедненного слоя. В первом приближении величины G и R_{ds} находятся по наклону соответствующих статических характеристик (см. рис. 2.3). Зная параметры, определенные выражениями (6.10)–(6.13), а также паразитные сопротивления стока и истока, можно получить эквивалентную схему, адекватно описывающую поведение транзистора на переменном сигнале (рис. 6.8). Из ранее неописанных параметров в схему введены сопротивление металлизации затвора и сопротивление части канала, через которое происходит перезарядка емкости.

Часто для оценки предельных частотных возможностей используют величину, называемую *граничной частотой* $f_{гр} = G / (2\pi C_{gs})$. Эта величина показывает, на какой частоте коэффициент усиления по току равен единице (для транзистора без паразитных элементов). Чем выше $f_{гр}$, тем лучше работает транзистор на высоких частотах, обеспечивая меньшее время задержки сигнала.

6.4. Предварительное задание

1. Изучить теоретическую часть работы.
2. Ознакомиться с измерительной установкой и инструкцией.

6.5. Основное задание

1. Снять стоковую зависимость при 5–6 значениях напряжения на затворе $I_d = F(U_{ds})$ при $U_{gs} = \text{const}$.

2. Снять зависимость тока стока от напряжения на затворе при двух напряжениях на стоке в интервале значений от внешнего напряжения перекрытия до контактной разности потенциалов $I_d = F(U_{gs})$ при $U_{ds} \sim (U_{pe} \dots U_b)$.

3. Снять зависимость тока стока от напряжения на затворе при напряжении на стоке из диапазона $U_d \sim (0,05 \dots 0,1)$ В $- I_d = F(U_{gs})$ при $U_{ds} = \text{const}$.

4. Снять диодную зависимость тока затвор–исток от напряжения на диоде затвор–исток $I_{gs} = F(U_{gs})$.

5. Снять диодную зависимость тока затвор–сток от напряжения на диоде затвор–сток $I_{gd} = F(U_{gd})$.

6.6. Содержание отчета

1. Цель работы.
2. Эскиз исследуемого транзистора, схема измерений.
3. Экспериментальные статические характеристики ПТШ.
4. Результаты обработки экспериментальных данных и значения величин U_b , n , $(R_s - R_d)$ и R_0 . Рассчитанные значения N_d и A .
5. Теоретический расчет стоковых и затворных характеристик. Анализ влияния физико-технологических параметров на стоковые и затворные характеристики. Сравнение полученных результатов с экспериментом.
6. Рассчитанные параметры эквивалентной схемы.
7. Найти граничную частоту $f_{гр}$ и рассчитать коэффициент усиления по току в диапазоне частот $(0,1...2) f_{гр}$.
8. Выводы по работе.

7. ИССЛЕДОВАНИЕ УСИЛИТЕЛЯ НА ОСНОВЕ ПОЛЕВОГО ТРАНЗИСТОРА СВЧ

Цель работы – определение параметров малосигнальной эквивалентной схемы полевого транзистора с барьером Шотки (ПТШ) и исследование амплитудно-частотной характеристики транзисторного усилителя.

7.1. Теоретические положения

В диапазоне частот от единиц до сотен гигагерц и мощностей от милливатт до сотен ватт используются разнообразные полупроводниковые технологии и материалы. Основные типы транзисторов в этой области – это традиционные полевые и биполярные приборы, полевые транзисторы с затвором Шотки (MESFET), полевые транзисторы с гетеропереходом (HFET, они же HEMT), а также биполярные транзисторы с гетеропереходом (HBT).

С точки зрения полупроводниковых материалов, на рынке СВЧ-электроники безраздельно доминируют GaAs-приборы. Полевые транзисторы с барьером Шотки на основе арсенида галлия находят применение в малошумящих усилителях, усилителях мощности, генераторах и смесителях в диапазоне частот от 0,5 до 50 ГГц при выходных мощностях от сотен ватт (в метровом диапазоне) до единиц и долей ватта на коротковолновой границе диапазона. Широкополосность таких усилителей достигает 10...15 %. Коэффициент усиления составляет от 20...30 дБ в длинноволновом участке указанного диапазона до единиц децибел в коротковолновой части этого диапазона при КПД 15...50 %, что заметно больше, чем у усилителей на диодных активных элементах СВЧ. К основным достоинствам транзисторных устройств СВЧ следует отнести повышенное значение КПД и обеспечение однонаправленных свойств усилителей без введения дополнительных невзаимных элементов. Области применения СВЧ-транзисторов – сотовая связь, беспроводные сети передачи информации, системы спутниковой связи, системы цифрового телерадиовещания, РЛС для управления воздушным движением. Характеристики ПТШ в этих устройствах обуславливают перспективность прибора в СВЧ-диапазоне.

При расчете и анализе транзисторных схем СВЧ наиболее часто используются два типа моделей: *структурная модель*, основанная на эквивалентной схеме транзистора, и *бесструктурная модель*, представляющая собой транзистор в виде эквивалентного четырехполосника.

Преимуществом структурной модели является высокая информативность, так как эквивалентная схема позволяет установить связь между ее элементами и характеристиками транзистора. Трудность описания эквивалентной схемой поведения транзистора на СВЧ связана с тем, что в этом диапазоне необходимо учитывать большое количество паразитных элементов, существенно влияющих на свойства прибора. Бесструктурные модели более достоверны, поскольку их параметры могут быть измерены значительно точнее, чем параметры эквивалентной схемы. Минус такого описания транзистора – такая модель строго справедлива лишь на одной фиксированной частоте. СВЧ-транзистор как эквивалентный четырехполосник может быть описан, например, Y - или H -параметрами, которые обычно используются на относительно низких частотах. Но для измерения этих параметров необходимо обеспечить режимы холостого хода и короткого замыкания, трудно осуществимые на сверхвысоких частотах из-за влияния паразитных элемен-

тов схемы. Поэтому чаще для описания используются параметры матрицы рассеяния или S -параметры, измеряемые в линиях с согласованными нагрузками, что на сверхвысоких частотах реализуется сравнительно просто.

Однако измерение параметров рассеяния требует дорогостоящей измерительной аппаратуры и соответствующего математического обеспечения, а в паспортных данных отечественных транзисторов такие параметры не приводятся. Выход из сложившейся ситуации – возможность использования эквивалентной схемы для определения параметров рассеяния. На рис. 7.1 показана упрощенная физическая структура транзистора и соответствующие ей некоторые элементы эквивалентной схемы. Особо выделим собственно элементы кристалла, такие как полная емкость перехода затвор–канал, входное сопротивление, выходная проводимость (проводимость стока). Модулирующие свойства отображаются источником тока с некоторой крутизной.

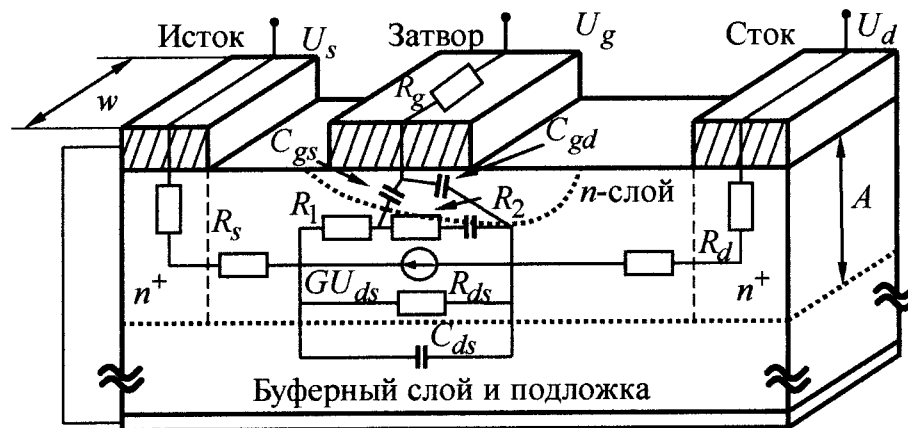


Рис. 7.1

В настоящее время известно большое количество подобных моделей, как линейных, так и нелинейных. Значительная часть моделей не являются универсальными, т. е. с достаточной точностью позволяют определять лишь некоторые, наиболее важные в отношении применения параметры транзисторов, что существенно упрощает используемые модели, а также методы их оптимизации. Основными параметрами в этих схемах являются емкость C_{gs} , обусловленная изменением заряда обедненной области при изменении напряжения на затворе или в канале, и переходная проводимость (крутизна) G , характеризующая изменение тока стока I_d при изменении напряжения на затворе U_g (при постоянном напряжении на стоке U_d), т. е.

$$C_{gs} = \frac{\partial Q}{\partial U_g}, \quad G = \frac{\partial I_d}{\partial U_g}.$$

Эти два элемента эквивалентной схемы определяют величину *граничной частоты* $\omega_{гр}$, на которой коэффициент усиления по току равен единице:

$$\omega_{гр} = G/C_{gs}.$$

На рис. 7.2 представлены эквивалентные схемы полевого транзистора на низких (а) и на высоких частотах (б) без учета паразитных индуктивностей и емкостей. Определение параметров эквивалентной схемы из простейших измерений на постоянном токе или на низких частотах с последующим расчетом параметров рассеяния могло бы значительно облегчить разработку и эксплуатацию полевого транзистора с барьером Шотки.

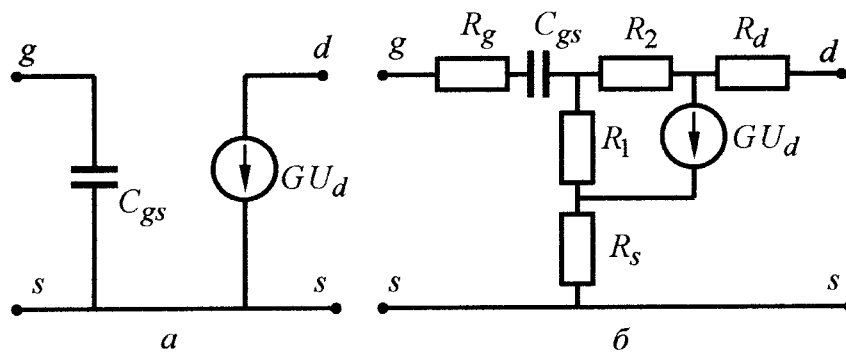


Рис. 7.2

Влияние напряжения стока на ток стока отражается включением в эквивалентную схему сопротивлений R_1 , R_2 параллельно управляемому источнику тока $I = GU_c$. При этом сопротивление R_1 обеспечивает внутреннюю обратную связь по току, присущую полемому транзистору. При возрастании тока увеличивается падение напряжения на сопротивлении R_1 , что ведет к увеличению перекрытия токового канала и ограничению возрастания тока. На статических вольтамперных характеристиках это обстоятельство вызывает насыщение зависимости тока стока от напряжения стока (рис. 7.3). Другой причиной, способствующей появлению пологого участка, является насыщение дрейфовой скорости носителей в канале при больших полях.

Элемент R_s (рис. 7.2, б) соответствует сопротивлению участка транзистора от контакта истока до начала обеднения, а R_d — от конца обеднения до внешнего контакта стока. Элемент R_g обусловлен конечностью сопротивления металлизации затвора. Для повышения адекватности описания кроме указанных элементов необходимо включить паразитные взаимные емкости контактных площадок и индуктивности выводов.

Рассмотрим методику, позволяющую определить некоторые элементы эквивалентной схемы по статическим измерениям с последующим переходом к бесструктурной схеме. Оценка величин в предложенной эквивалентной схеме может быть проведена на основе вольтфарадных и вольтамперных характеристик (рис. 7.3). Применение статических (или квазистатических) измерений для предсказания СВЧ-параметров правомочно, так как характерные размеры транзистора много меньше длины волны в используемом материале, т. е. распределенными эффектами можно пренебречь. Для нахождения параметров R_s , R_g , R_d можно использовать специальные диодные измерения при больших положительных смещениях на затворе, когда барьер Шотки практически не оказывает влияния на протекание тока.

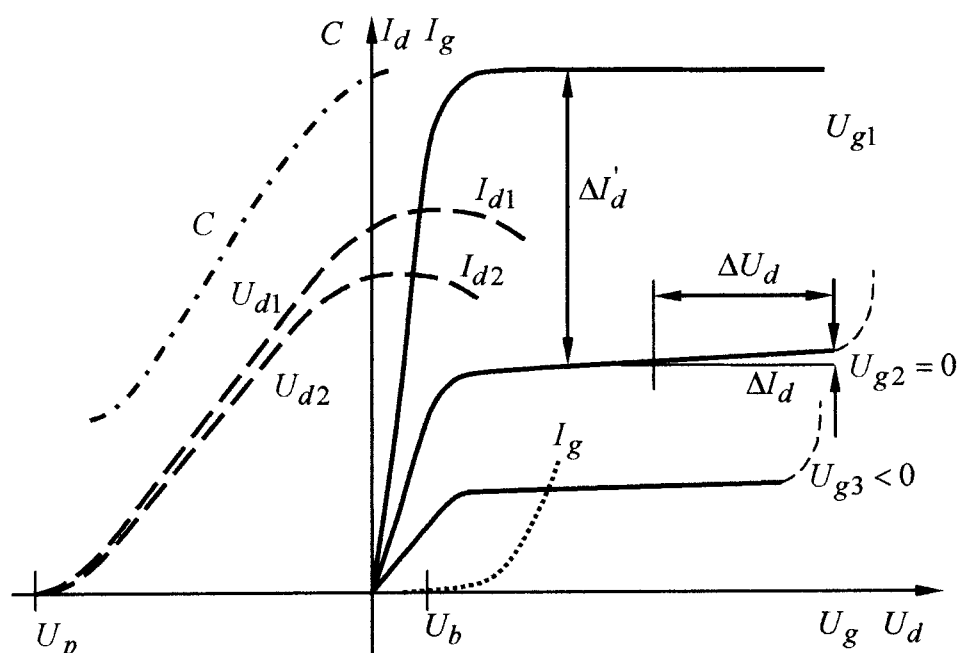


Рис. 7.3

Емкость C_{gs} определяется непосредственно из вольтфарадной характеристики $C_{gs} = f(U_g)$ (рис. 7.3) при заданном напряжении стока U_d . Измерения обычно проводятся на частотах 10...50 МГц, когда сопротивлениями R_s , R_g , R_l можно пренебречь в сравнении с модулем емкостного сопротивления. Переходная проводимость G легко определяется по наклону затворной характеристики $I_d = f(U_g)$.

Наибольшую трудность вызывает определение сопротивлений R_1 и R_2 из-за их скрытого характера, так как их влияние маскируется другими эле-

ментами эквивалентной схемы. Для заданной величины U_g находится наклон линейного участка стоковой зависимости $I_d = f(U_d)$:

$$R_{\Sigma} = U_d / I_d . \quad (7.1)$$

С другой стороны, значение R_{Σ} равно сумме сопротивления истока R_s , сопротивления частично перекрытого канала R_k и сопротивления стока R_d .

$$R_{\Sigma} = R_s + R_d + R_k . \quad (7.2)$$

Если известны сопротивления истока R_s и стока R_d , то легко найти сопротивление канала R_k , используя (7.1, 7.2)

$$R_k = R_{\Sigma} - R_s - R_d . \quad (7.3)$$

Сопротивления истока и стока в (7.3) находятся из специальных измерений при диодном включении транзистора. Для оценки значения R_1 необходимо учесть, что ток, перезаряжающий емкость C_{gs} , протекает не по всему сопротивлению канала транзистора, а только по некоторой его части. Детальный анализ показывает, что реальное перераспределение токов в канале ПТШ хорошо соответствует условию $R_1 \approx R_k / 3$, и тогда можно считать

$$R_1 \approx (R_{\Sigma} - R_s - R_d) / 3 . \quad (7.4)$$

Для определения сопротивления R_2 вычисляется наклон стоковой характеристики $I_d = f(U_d)$ в точке с выбранными напряжениями на стоке и затворе, равный статической выходной проводимости $G_d = \Delta I_d / \Delta U_d$. Из анализа эквивалентной схемы (рис. 7.2) следует $G_d = (1 - G R_1) / (R_1 + R_2)$. Последнее выражение позволяет выразить искомую величину:

$$R_2 = (1 - G R_1) / (G_d - R_1) . \quad (7.5)$$

Определенные таким образом элементы эквивалентной схемы позволяют рассчитать как схемы согласования, так и предельные параметры самого транзистора. Для корпусного ПТШ необходимо учитывать в эквивалентной схеме паразитные элементы корпуса. Задача определения элементов мало-сигнальной эквивалентной схемы по данной методике хорошо формулируется, что позволяет автоматизировать измерения по (7.1)–(7.5).

7.2. Описание объекта

В качестве объекта исследований используется транзистор, технические характеристики которого указаны в инструкции по проведению измерений.

Конфигурация полевого транзистора показана на рис. 7.4. На рисунке цифрами обозначены: сток 1, затвор 2, исток 3. К затвору напряжение подводится через специальные контактные площадки. Для снятия вольтамперных и вольтфарадных характеристик транзистор помещается в специальное контактное устройство, обеспечивающее возможность подключения к входу и выходу транзистора нагрузок по 50 Ом. Это необходимо для исключения самовозбуждения транзистора, которое может существенно исказить статические характеристики. Питание осуществляется через фильтр, расположенный на контактной площадке.

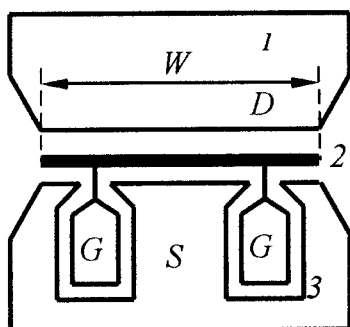


Рис. 7.4

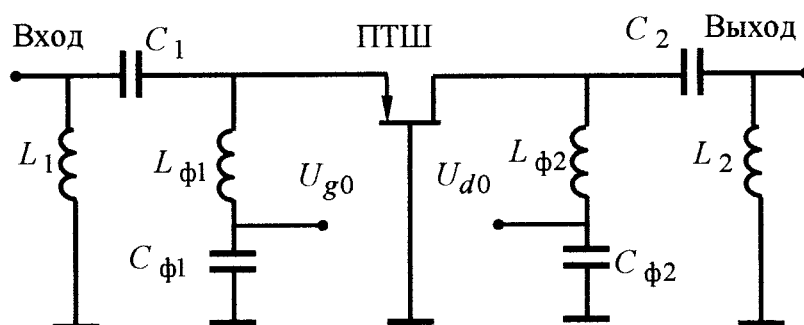


Рис. 7.5

Исследуемый транзистор является активным элементом усилителя мощности. В усилителе для согласования входа и выхода транзистора применяются простейшие согласующие цепи на сосредоточенных индуктивностях и емкостях (рис. 7.5). На схеме обозначены собственно транзистор ПТШ, согласующие элементы C_1 , C_2 , L_1 , L_2 и элементы фильтров питания $L_{ф1}$, $L_{ф2}$, $C_{ф1}$, $C_{ф2}$. Полоса рабочих частот усилителя определяется прежде всего параметрами цепей согласования, так как сам транзистор может работать в диапазоне частот от 0,5 до 12 ГГц.

7.3. Описание измерительной установки

Для снятия статических и динамических характеристик полевого транзистора используется установка, блок-схема которой изображена на рис. 7.6. Транзистор размещается в контактном устройстве 1 с фильтрами питания и нагрузкой. Питание от источника 2 постоянного тока осуществляется через блок коммутаций, конструктивно расположенный в 1. Для снятия вольтфарадных характеристик к контактному устройству присоединяется цифровой измеритель емкости В7-12. Приборы, необходимые для измерений по посто-

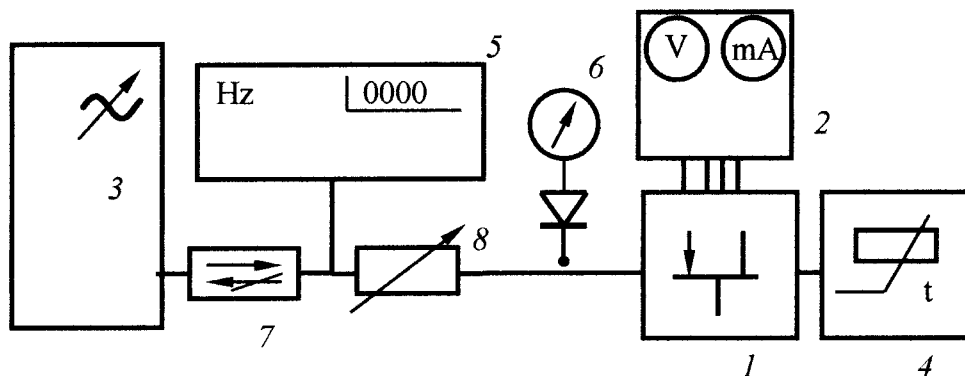


Рис. 7.6

явному току, объединены в общий блок с источником 2. Для исследования характеристик усилителя используется высокочастотная часть схемы. Генератор 3 вырабатывает СВЧ-сигнал частоты f , который, проходя через развязывающий вентиль 7 и аттенюатор 8, попадает на вход исследуемого устройства 1. Сигнал с выхода усилителя поступает на термисторный измеритель мощности 4. Для контроля уровня согласования на входе усилителя в СВЧ-тракт включена измерительная линия 6. При определении коэффициента усиления требуется предварительно провести измерение мощности генератора в рабочем диапазоне частот, исключив из тракта усилитель.

7.4. Предварительное задание

1. Изучить теоретическую часть работы.
2. Ознакомиться с измерительной установкой и инструкцией.

7.5. Основное задание

1. Снять зависимости токов стока I_d и затвора I_g от напряжения на стоке U_d при нескольких значениях напряжений на затворе U_g .

2. Провести измерения токов стока и затвора от напряжения на затворе при 3 значениях напряжения на стоке. Одно из напряжений стока должно соответствовать линейной части характеристик $I_d = f(U_d)$, а два других – области насыщения тока стока. Напряжение на затворе U_g изменять от напряжения перекрытия U_p до напряжения, превышающего контактную разность потенциалов барьера Шотки на 0,3...0,5 В, т. е. до напряжений 1...1,2 В.

3. Провести диодные измерения для определения контактных сопротивлений и параметров барьера Шотки (см. инструкцию по измерениям).

4. Измерить вольтфарадную характеристику $C_{gs} = f(U_g)$ при напряжении на стоке, равном нулю.

5. Измерить зависимость коэффициента усиления от напряжения на стоке и затворе.

6. Обработать результаты измерений по пп. 1...4 с помощью ЭВМ по соответствующей программе.

7. Рассчитать параметры рассеяния и максимального коэффициента усиления по эквивалентной схеме, полученной в результате измерений и расчетов.

7.6. Содержание отчета

1. Цель работы, эскиз исследуемого транзистора, схема измерений.
2. Вольтамперные и вольтфарадные характеристики ПТШ.
3. Семейство амплитудно-частотных характеристик усилителя.
4. Результаты измерений и расчетов на ЭВМ величин эквивалентной схемы транзистора.
5. Результаты расчета параметров рассеяния и максимального коэффициента усиления. Сравнение с коэффициентом усиления реального усилителя.
7. Выводы по работе.

7.7. Контрольные вопросы

1. Какие существуют системы описания свойства транзисторов на СВЧ?
2. Зависят ли параметры эквивалентной схемы ПТШ от частоты?
3. Почему возможно использование квазистатических измерений?

8. ИССЛЕДОВАНИЕ СВЧ БИПОЛЯРНОГО ТРАНЗИСТОРА

Цель работы – изучение и исследование основных физических зависимостей и параметров СВЧ биполярного транзистора на основе математических моделей и экспериментальных измерений.

8.1. Основные положения

В биполярных транзисторах ток определяется движением носителей заряда двух типов: электронов и дырок. Отсюда их название – биполярные транзисторы (БТ). Биполярные транзисторы $p-n$ -типа, изготовленные по планарно-эпитаксиальной технологии, являются основными элементами усили-

телей мощности в низкочастотной части СВЧ-диапазона. Современные БТ работают на частотах до 15 ГГц. Максимальная выходная мощность в непрерывном режиме на частоте 1 ГГц достигает 300 Вт, на частоте 3 ГГц – 20 Вт, на 10 ГГц – 1 Вт и на 14 ГГц – 0,1 Вт. Коэффициент полезного действия превышает 50 % в диапазоне частот 1...3 ГГц. На верхней частотной границе КПД биполярного транзистора составляет около 20 %. Биполярные транзисторы СВЧ-диапазона имеют минимальный коэффициент шума 2,5...3 дБ на частотах 2...4 ГГц и порядка 7 дБ на частотах более 10 ГГц.

При проектировании и применении СВЧ биполярных транзисторов широко используются различные модели описания. Любая модель транзистора обычно предназначена для вполне определенных целей. Структурные модели, в которых для описания работы транзистора используются их внутренние параметры, позволяют разработчикам связывать характеристики модели с физико-технологическими параметрами БТ.

С другой стороны, использование биполярного транзистора как активного элемента в различных схемах СВЧ-электроники требует установления формальных связей между токами и напряжениями на внешних контактах, позволяющих производить анализ поведения транзистора в различных режимах работы, т. е. применения бесструктурных моделей.

Выбор модели обусловлен ее адекватностью физическим процессам, требуемой точности и поставленной задаче.

8.1.1. Дифференциальные параметры транзистора

Бесструктурные модели более достоверны, поскольку их параметры могут быть измерены значительно точнее, чем параметры эквивалентной схемы. По отношению к внешней схеме транзистор представляет собой активный четырехполюсник, который обычно характеризуется системой дифференциальных параметров. Эти параметры определяют связь между малыми приращениями токов и напряжений на электродах БТ. Условие малых приращений токов и напряжений позволяет ввести линейные связи между ними. Существует три системы: Z -, Y - и H -параметры. Значения параметров зависят от схемы включения БТ, от режима его работы и от частоты. На рис. 8.1 показан транзистор в виде четырехполюсника с входными (индексы 1) и выходными (индексы 2) напряжениями и токами для схем с общей базой (*а*) и общим эмиттером (*б*).

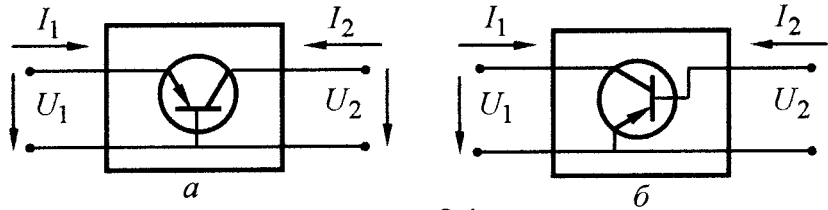


Рис. 8.1

В данной работе при исследовании транзистора используются две системы: Y - и H -параметры. Рассмотрим систему Y -параметров. В этой системе независимыми величинами являются напряжения, а токи являются функциями от них. Дифференциалы токов можно записать в виде:

$$dI_1 = \frac{\partial I_1}{\partial U_1} dU_1 + \frac{\partial I_1}{\partial U_2} dU_2, \quad dI_2 = \frac{\partial I_2}{\partial U_1} dU_1 + \frac{\partial I_2}{\partial U_2} dU_2.$$

Если заменить приращения токов и напряжений комплексными амплитудами, а частные производные — Y -параметрами, то получим систему

$$\begin{aligned} \dot{I}_1 &= Y_{11}\dot{U}_1 + Y_{12}\dot{U}_2, \\ \dot{I}_2 &= Y_{21}\dot{U}_1 + Y_{22}\dot{U}_2. \end{aligned} \quad (8.1)$$

При дополнительных условиях переменные этой системы имеют физический смысл. Параметр Y_{11} , определяемый как $Y_{11} = \dot{I}_1 / \dot{U}_1$, является входной проводимостью транзистора при $\dot{U}_2 = 0$. Параметр $Y_{12} = \dot{I}_1 / \dot{U}_2$ — обратной проводимостью при $\dot{U}_1 = 0$, параметр $Y_{21} = \dot{I}_2 / \dot{U}_1$ — прямой проводимостью при $\dot{U}_2 = 0$, параметр $Y_{22} = \dot{I}_2 / \dot{U}_2$ — выходной проводимостью при $\dot{U}_1 = 0$. Все Y -параметры имеют смысл проводимостей при условии короткого замыкания на входе ($\dot{U}_1 = 0$) или на выходе ($\dot{U}_2 = 0$) транзистора. Система Y -параметров (8.1) удобна для проведения расчетов транзисторных схем, однако их экспериментальное определение не представляется возможным.

В системе H -параметров независимыми величинами являются ток входа и напряжение выхода, и уравнения выглядят следующим образом:

$$\begin{aligned} \dot{U}_1 &= H_{11}\dot{I}_1 + H_{12}\dot{U}_2, \\ \dot{I}_2 &= H_{21}\dot{I}_1 + H_{22}\dot{U}_2. \end{aligned} \quad (8.2)$$

В этой системе параметр $H_{11} = \dot{U}_1 / \dot{I}_1$ — входное сопротивление транзистора при $\dot{U}_2 = 0$, параметр $H_{12} = \dot{U}_1 / \dot{U}_2$ — коэффициент обратной связи по напряжению при $\dot{I}_1 = 0$, параметр $H_{21} = \dot{I}_2 / \dot{I}_1$ — коэффициент передачи по

току при $\dot{U}_2 = 0$, параметр $H_{22} = \dot{I}_2 / \dot{U}_2$ – выходная проводимость транзистора при $\dot{I}_1 = 0$. Условие нулевого входного тока соответствует режиму холостого хода и достаточно легко осуществимо. Такая система H -параметров является смешанной системой, так как параметры имеют различные единицы измерения. Заметим, величины H_{12} и H_{21} являются безразмерными. В общем случае, комплексные H - и Y -параметры зависят от частоты. В диапазоне низких частот дифференциальные параметры не изменяют своего значения и имеют действительный характер. В этом случае их обозначают, соответственно, h - и y -параметрами.

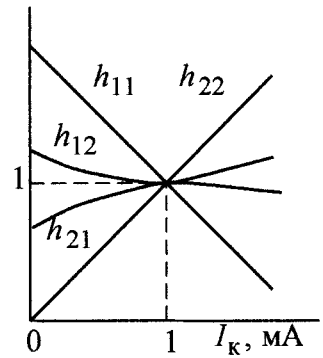


Рис. 8.2

На рис. 8.2 приведены экспериментальные зависимости h -параметров от коллекторного тока I_k транзистора, включенного по схеме с ОЭ. Видно, что наибольшие изменения претерпевают параметры h_{11} и h_{22} . Входное сопротивление h_{11} непосредственно связано с нелинейной зависимостью вольт-амперной характеристики эмиттерного перехода и отражает факт изменения производной к этой характеристике. Составной частью входного сопротивления h_{11} является сопротивление эмиттера, значение которого для бездрейфового транзистора равно $R_3 = kT / (2qI_3)$, а для дрейфового – $R_3 = kT / (qI_3)$. С ростом тока эмиттера или коллектора сопротивление эмиттера, а следовательно, и величина h_{11} уменьшаются. Выходная проводимость в схеме с ОЭ обусловлена эффектом модуляции ширины базы w_6 .

Поскольку $h_{22} = (I_3 d_k) / (U_{кэ} w_6)$, то с ростом эмиттерного тока сопротивление коллекторного перехода уменьшается и проводимость h_{22} , соответственно, растет.

В отличие от других систем h -параметры измеряются просто. По измеренным h -параметрам можно вычислить значения других систем. В частности, система Y -параметров (8.1) выражается через H -параметры (8.2):

$$\begin{aligned} Y_{11} &= \frac{1}{H_{11}}, & Y_{12} &= -\frac{H_{12}}{H_{11}}, \\ Y_{21} &= \frac{H_{21}}{H_{11}}, & Y_{22} &= \frac{H_{11}H_{22} - H_{12}H_{21}}{H_{11}}. \end{aligned} \quad (8.3)$$

8.1.2. Гибридная схема замещения транзистора

Рассмотренные системы параметров (8.1)–(8.3) устанавливают формальную связь между токами и напряжениями на входе и выходе транзистора. Существенным недостатком этих параметров является их зависимость от режима работы транзистора, частоты и температуры. В формальных системах отсутствует связь самих параметров со структурой транзистора. Поэтому применяют эквивалентные схемы БТ, учитывающие способ включения, технологию изготовления и частотную зависимость. Эквивалентные схемы (схемы замещения) составляют таким образом, чтобы токи и напряжения, протекающие в них, в достаточной мере отвечали процессам в транзисторе. Схему замещения целесообразно строить, сначала моделируя активную область транзистора, расположенную под вводом эмиттера, а затем учитывать области транзистора в поперечном направлении. Одна из таких схем транзистора, включенного по схеме с ОЭ, предложенная А. Джаколетто, носит название гибридной П-образной схемы (рис. 8.3).

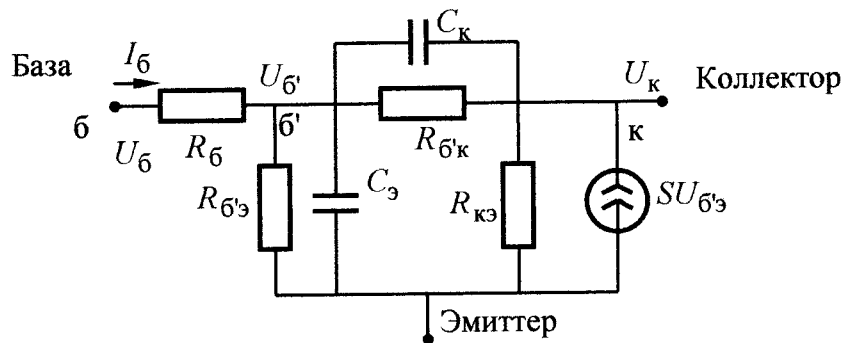


Рис. 8.3

Схема имеет две базовые точки: б – внешний вывод базы и б' – внутреннюю точку базы. Базовый ток протекает от базового вывода через пассивную область, имеющую сравнительно большое сопротивление. Это поперечное сопротивление увеличивается по мере удаления от края эмиттера к его середине и, следовательно, является усредненным по сечению эмиттера сопротивлением базы $R_б$. Падение напряжения, создаваемое базовым током на этом сопротивлении, приводит к уменьшению потенциала эмиттерного перехода $U_{б'э}$ (в точке б') по сравнению с приложенным к базе напряжением $U_б$ (в точке б). Так как потенциал базы у эмиттерного перехода зависит от поперечной координаты вдоль ширины эмиттера, потенциал $U_{б'э}$ также является усредненной величиной. Эмиттерный переход представлен здесь сопротив-

лением $R_{б'э}$ (проводимостью $G_{б'э} = 1/R_{б'э}$) и емкостью $C_э$, а коллекторный переход – сопротивлением $R_{б'к}$ (проводимостью $G_{б'к} = 1/R_{б'к}$) и емкостью коллектора $C_к$. Генератор тока $SG_{б'э}$ отражает влияние входной цепи на выходной ток. Величина $S = dI_к/dU_{б'к}$ называется *внутренней крутизной*, так как она определяется по потенциалу внутренней точки б'. Емкость эмиттерного перехода $C_э$, работающего в прямом включении, в основном определяется диффузионной емкостью, связанной с процессами накопления заряда подвижных носителей в базе. Коллекторный переход смещен, как правило, в обратном направлении, поэтому его емкость обусловлена барьерной емкостью перехода. Сопротивление $R_{кэ}$ (проводимостью $G_{кэ} = 1/R_{кэ}$) характеризует воздействие коллекторного напряжения на ток эмиттера за счет изменения ширины коллекторного перехода и эффективной ширины базы. Значения элементов эквивалентной схемы можно определить из геометрических размеров и конструкции транзистора. С другой стороны их можно найти экспериментальным путем с помощью h -параметров.

Крутизна S является величиной, обратной сопротивлению эмиттера. При комнатной температуре сопротивление $R_{б'э}$ превышает сопротивление эмиттера во столько раз, во сколько эмиттерный ток больше базового. По определению параметра h_{21} можно записать $R_{б'э} = h_{21}R_э$, и тогда

$$S = 1/R_э = h_{21}/R_{б'э} = 0,04 I_э, \quad (8.4)$$

где $I_э$ – постоянная составляющая тока эмиттера, мА. На низких частотах емкостью $C_{б'э}$ можно пренебречь и записать:

$$R_б = h_{11} - R_{б'э}. \quad (8.5)$$

Это сопротивление лучше замерить непосредственно на высокой частоте, когда $R_{б'э}$ зашунтировано емкостью $C_э$, и в этом случае

$$R_б = h_{11}. \quad (8.6)$$

Сопротивление коллекторного перехода можно найти с помощью коэффициента обратной связи по напряжению h_{12} , который определяется в режиме холостого хода на входе транзистора $I_б = 0$:

$$R_{б'к} = R_{б'э}/h_{21}. \quad (8.7)$$

В соответствии со схемой (рис. 8.3) выходная проводимость с учетом большой величины сопротивления база–эмиттер и база–коллектор

$$R_{кэ} = 1 / (h_{22} - S h_{12}) . \quad (8.8)$$

Емкость $C_э$ может быть найдена из условия равенства проводимости база–коллектор и проводимости емкости эмиттера, которое выполняется на некоторой граничной частоте $\omega_{гр}$, когда выходной ток транзистора уменьшается по абсолютной величине в $\sqrt{2}$ раз по сравнению с током на низких частотах:

$$C_э = G_{б'э} / \omega_{гр} . \quad (8.9)$$

Для этого случая граничную частоту удобно находить по экспериментальной характеристике $h_{21} = F(\omega)$.

8.2. Экспериментальное определение h -параметров в схеме с ОЭ

Параметры h_{11} и h_{21} определяются в режиме короткого замыкания выхода. Схема такого соединения показана на рис. 8.4, а. Режим короткого замыкания выхода обеспечивается конденсатором C_2 , который осуществляет замыкание коллектора по переменной составляющей коллекторного тока. Последовательно с конденсатором включено сопротивление $R_2 \ll R_k$ для измерения этого тока $I_k = U_3 / R_2$. Необходимый статический режим работы транзистора ($I_{к0}$ и $U_{к0}$ в рабочей точке) устанавливается подбором значений сопротивления R_6 . Входной сигнал на базу подается от генератора ГНЧ через блокирующий конденсатор C_1 и сопротивление R_1 . Это сопротивление применяется для измерения входного тока $I_6 = (U_1 - U_2) / R_1$. Проведя с помощью осциллографа измерения напряжений U_1 , U_2 и U_3 , можно найти параметры h_{11} и h_{21} :

$$h_{11} = U_{бэ} / I_6 = U_2 R_1 / (U_1 - U_2), \quad h_{21} = I_k / I_6 = U_3 R_1 / (U_1 - U_2) R_2.$$

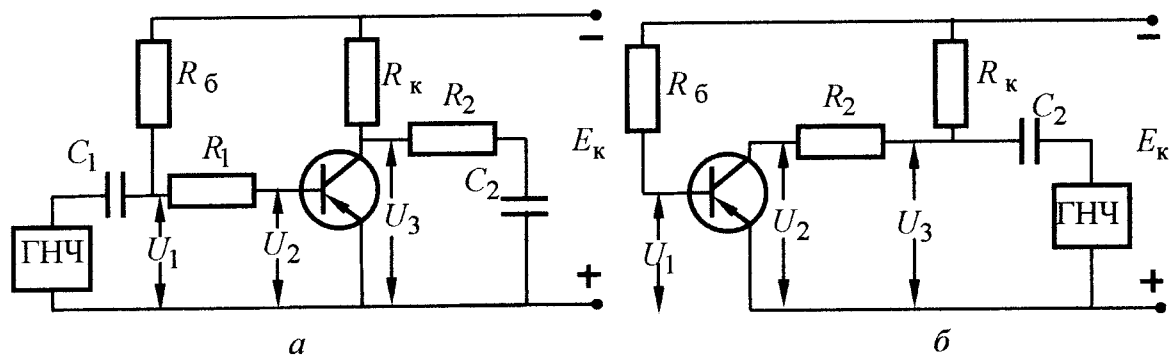


Рис. 8.4

Измерения параметров h_{12} и h_{22} проводятся по схеме (рис. 8.4, б). Режим холостого хода на входе транзистора обеспечивается большим значением сопротивления R_6 (порядка 1 МОм). Переменный сигнал от ГНЧ подается на коллектор через сопротивление R_2 , необходимое для измерения тока $I_k = (U_3 - U_2)/R_2$. Измерив напряжения U_1 , U_2 и U_3 , можно найти:

$$h_{12} = U_{6э}/I_6 = U_1/U_2, \quad h_{22} = I_k/U_k = (U_3 - U_2)/U_2 R_2.$$

Для сохранения режима работы транзистора в схемах (рис. 8.4) необходимо обеспечить равенство суммарного сопротивления $(R_2 + R_k)$ в коллекторной цепи схемы (рис. 8.4, б) сопротивлению R_k схемы (рис. 8.4, а).

8.3. Выполнение работы

1. Провести экспериментальное измерение h -параметров транзистора для различных эмиттерных токов $I_э$ при частоте 1 кГц.
2. Провести экспериментальное измерение h -параметров транзистора для различных частот при выбранном токе $I_э$.

8.4. Содержание отчета

1. Цель работы, схемы включения биполярного транзистора СВЧ.
2. Графики зависимостей h -параметров от тока $I_э$ и частоты.
3. Результаты расчета эквивалентной схемы по измеренным h -параметрам (8.4)–(8.9). Значение емкости C_k берется из справочника.
4. Y -параметры по рассчитанной эквивалентной схеме для разных частот. Графики частотных зависимостей проводимостей транзистора.
5. Результаты расчета проводимостей по h -параметрам, измеренным на различных частотах. Графики частотных зависимостей проводимостей.

Список литературы

1. Зи. С. Физика полупроводниковых приборов. В 2-х т. М: Мир, 1984.
2. СВЧ полупроводниковые приборы и их применение/ Под ред. Г. Уотсона. М.: Мир, 1972.
3. Полупроводниковые приборы в схемах СВЧ/ Под ред. М. Хауэса, Д. Моргана. М.: Мир, 1979.
4. Электронные приборы СВЧ: Учеб. пособие для вузов/ В. М. Березин, В. С. Буряк, Э. М. Гутцайт, В. П. Марин// М.: Высш. шк., 1985.

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ АВТОНОМНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ
ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«СЕВЕРО-КАВКАЗСКИЙ ФЕДЕРАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»

МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ
для по организации и проведению самостоятельной работы
по дисциплине «Устройства СВЧ»
для студентов направления подготовки
11.03.04 Электроника и нанoeлектроника
Направленность (профиль):
Интеллектуальные программируемые системы и устройства

Ставрополь
2026

Содержание

Введение

Самостоятельная работа как важнейшая форма учебного процесса

Цели и основные задачи СРС

Виды самостоятельной работы

Организация СРС

Общие рекомендации по организации самостоятельной работы

Самостоятельная работа студента - необходимое звено становления исследователя

Методические рекомендации для студентов по отдельным формам самостоятельной работы

Учебно-методическое и информационное обеспечение дисциплины

ВВЕДЕНИЕ

1. Цель и задачи освоения дисциплины (модуля)

Цель освоения дисциплины является формирование набора профессиональных компетенций будущего бакалавра по направлению подготовки 11.03.04 Электроника и наноэлектроника, путем ознакомления с теоретическими основами передачи сигналов СВЧ, параметрами и характеристиками пассивных и активных компонентов СВЧ устройств

Задачи освоения дисциплины:

- ознакомление с теоретическими основами передачи сигналов СВЧ;
- изучение параметров и характеристик пассивных компонентов СВЧ устройств;
- изучение параметров и характеристик активных компонентов СВЧ устройств.

2. Перечень планируемых результатов обучения по дисциплине (модулю), соотнесённых с планируемыми результатами освоения образовательной программы

Код, формулировка компетенции	Код, формулировка индикатора	Планируемые результаты обучения по дисциплине (модулю), характеризующие этапы формирования компетенций, индикаторов
ПК-5 Способен к монтажу и наладке технических средств автоматизации технологических процессов производства электронных приборов, блоков и систем различного функционального назначения	ИД-1 _{ПК-5} Использует методы наладки измерительного, диагностического и технологического оборудования, используемого в области электроники и наноэлектроники	Использует методы наладки и диагностики параметров компонентов, элементов и узлов СВЧ устройств
ПК-6 Способен к сервисному обслуживанию измерительного, диагностического и технологического оборудования, к управлению программно-аппаратными средствами информационных служб инфокоммуникационной системы предприятия	ИД-3 _{ПК-6} Осуществляет мониторинг диагностического, технологического оборудования	Демонстрирует знание правил мониторинга и технического обслуживания компонентов, элементов и узлов СВЧ устройств

САМОСТОЯТЕЛЬНАЯ РАБОТА КАК ВАЖНЕЙШАЯ ФОРМА УЧЕБНОГО ПРОЦЕССА

Самостоятельная работа - планируемая учебная, учебно-исследовательская, научно-исследовательская работа студентов, выполняемая во внеаудиторное (аудиторное) время по заданию и при методическом руководстве преподавателя, но без его непосредственного участия (при частичном непосредственном участии преподавателя, оставляющем ведущую роль за работой студентов).

Самостоятельная работа студентов в ВУЗе является важным видом учебной и научной деятельности студента. Самостоятельная работа студентов играет значительную роль в рейтинговой технологии обучения. Обучение в ВУЗе включает в себя две, практически одинаковые по объему и взаимовлиянию части – процесса обучения и

процесса самообучения. Поэтому СРС должна стать эффективной и целенаправленной работой студента.

Концепцией модернизации российского образования определены основные задачи профессионального образования - "подготовка квалифицированного работника соответствующего уровня и профиля, конкурентоспособного на рынке труда, компетентного, ответственного, свободно владеющего своей профессией и ориентированного в смежных областях деятельности, способного к эффективной работе по специальности на уровне мировых стандартов, готового к постоянному профессиональному росту, социальной и профессиональной мобильности".

Решение этих задач невозможно без повышения роли самостоятельной работы студентов над учебным материалом, усиления ответственности преподавателей за развитие навыков самостоятельной работы, за стимулирование профессионального роста студентов, воспитание творческой активности и инициативы.

К современному специалисту общество предъявляет достаточно широкий перечень требований, среди которых немаловажное значение имеет наличие у выпускников определенных способностей и умения самостоятельно добывать знания из различных источников, систематизировать полученную информацию, давать оценку конкретной финансовой ситуации. Формирование такого умения происходит в течение всего периода обучения через участие студентов в лабораторных занятиях, выполнение контрольных заданий и тестов, написание курсовых и выпускных квалификационных работ. При этом самостоятельная работа студентов играет решающую роль в ходе всего учебного процесса.

Формы самостоятельной работы студентов разнообразны. По данной дисциплине «Основы нейронных сетей» предусмотрены следующие:

Использование материала учебно-методического комплекса дисциплины

На первом этапе необходимо ознакомиться с обязательным минимумом содержания основной образовательной программы по изучаемой дисциплине. Далее необходимо изучить рабочую программу дисциплины, в которой рассмотрено содержание тем дисциплины лекционного курса, взаимосвязь тем лекций с лабораторными занятиями, темы и виды самостоятельной работы. По каждому виду самостоятельной работы предусмотрены определённые формы отчетности, представленные в учебной программе по дисциплине «Основы нейронных сетей».

Работа с литературой

Для успешного освоения дисциплины, необходимо самостоятельно детально изучить представленные темы по рекомендуемым источникам информации, которые представлены в учебной программе.

Самостоятельная работа приобщает студентов к научному творчеству, поиску и решению актуальных современных проблем.

ЦЕЛИ И ОСНОВНЫЕ ЗАДАЧИ СРС

Ведущая цель организации и осуществления СРС должна совпадать с целью обучения студента – подготовкой бакалавра с высшим образованием. При организации СРС важным и необходимым условием становятся формирование умения

самостоятельной работы для приобретения знаний, навыков и возможности организации учебной и научной деятельности.

Целью самостоятельной работы студентов является овладение фундаментальными знаниями, профессиональными умениями и навыками деятельности по профилю, опытом творческой, исследовательской деятельности. Самостоятельная работа студентов способствует развитию самостоятельности, ответственности и организованности, творческого подхода к решению проблем учебного и профессионального уровня.

Задачами СРС являются:

- систематизация и закрепление полученных теоретических знаний и практических умений студентов;
- углубление и расширение теоретических знаний;
- формирование умений использовать нормативную, правовую, справочную документацию и специальную литературу;
- развитие познавательных способностей и активности студентов: творческой инициативы, самостоятельности, ответственности и организованности;
- формирование самостоятельности мышления, способностей к саморазвитию, самосовершенствованию и самореализации;
- развитие исследовательских умений;
- использование материала, собранного и полученного в ходе самостоятельных занятий на семинарах, на лабораторных занятиях, при написании курсовых и выпускной квалификационной работ, для эффективной подготовки к итоговым зачетам и экзаменам.

ВИДЫ САМОСТОЯТЕЛЬНОЙ РАБОТЫ

В образовательном процессе высшего профессионального образовательного учреждения выделяется два вида самостоятельной работы – аудиторная, под руководством преподавателя, и внеаудиторная. Тесная взаимосвязь этих видов работ предусматривает дифференциацию и эффективность результатов ее выполнения и зависит от организации, содержания, логики учебного процесса (межпредметных связей, перспективных знаний и др.):

Аудиторная самостоятельная работа по дисциплине выполняется на учебных занятиях под непосредственным руководством преподавателя и по его заданию.

Внеаудиторная самостоятельная работа выполняется студентом по заданию преподавателя, но без его непосредственного участия.

Основными видами самостоятельной работы студентов без участия преподавателя по данной дисциплине являются:

- формирование и усвоение содержания конспекта лекций на базе рекомендованной лектором учебной литературы, включая информационные образовательные ресурсы (электронные учебники, электронные библиотеки и др.);
- подготовка к лабораторным работам, их оформление.

Основными видами самостоятельной работы студентов с участием преподавателей являются:

- текущие консультации;
- прием и защита лабораторных работ (во время проведения л/р).

ОРГАНИЗАЦИЯ СРС

Методика организации самостоятельной работы студентов зависит от структуры, характера и особенностей дисциплины «Основы нейронных сетей», объема часов на ее изучение, вида заданий для самостоятельной работы студентов, индивидуальных качеств студентов и условий учебной деятельности.

Процесс организации самостоятельной работы студентов включает в себя следующие этапы:

- подготовительный (определение целей, составление программы, подготовка методического обеспечения, подготовка оборудования);
- основной (реализация программы, использование приемов поиска информации, усвоения, переработки, применения, передачи знаний, фиксирование результатов, самоорганизация процесса работы);
- заключительный (оценка значимости и анализ результатов, их систематизация, оценка эффективности программы и приемов работы, выводы о направлениях оптимизации труда).

Деятельность студентов по формированию и развитию навыков учебной самостоятельной работы

В процессе самостоятельной работы студент приобретает навыки самоорганизации, самоконтроля, самоуправления, саморефлексии и становится активным самостоятельным субъектом учебной деятельности.

Выполняя самостоятельную работу под контролем преподавателя студент должен:

- освоить минимум содержания, выносимый на самостоятельную работу студентов и предложенный преподавателем в соответствии с образовательными стандартами высшего образования;
- планировать самостоятельную работу в соответствии с графиком самостоятельной работы, предложенным преподавателем;
- самостоятельную работу студент должен осуществлять в организационных формах, предусмотренных учебным планом и рабочей программой преподавателя;
- выполнять самостоятельную работу и отчитываться по ее результатам в соответствии с графиком представления результатов, видами и сроками отчетности по самостоятельной работе студентов.

студент может:

сверх предложенного преподавателем (при обосновании и согласовании с ним) и минимума обязательного содержания, определяемого программой по данной дисциплине:

- самостоятельно определять уровень (глубину) проработки содержания материала;
- предлагать темы и вопросы для самостоятельной проработки;
- в рамках общего графика выполнения самостоятельной работы предлагать обоснованный индивидуальный график выполнения и отчетности по результатам самостоятельной работы;
- предлагать свои варианты организационных форм самостоятельной работы;
- использовать для самостоятельной работы методические пособия, учебные пособия, разработки сверх предложенного преподавателем перечня;

– использовать не только контроль, но и самоконтроль результатов самостоятельной работы в соответствии с методами самоконтроля, предложенными преподавателем или выбранными самостоятельно.

Самостоятельная работа студентов должна оказывать важное влияние на формирование личности будущего бакалавра, она планируется студентом самостоятельно. Каждый студент самостоятельно определяет режим своей работы и меру труда, затрачиваемого на овладение учебным содержанием по каждой дисциплине. Он выполняет внеаудиторную работу по личному индивидуальному плану, в зависимости от его подготовки, времени и других условий.

ОБЩИЕ РЕКОМЕНДАЦИИ ПО ОРГАНИЗАЦИИ САМОСТОЯТЕЛЬНОЙ РАБОТЫ

Основной формой самостоятельной работы студента является изучение конспекта лекций, их дополнение, рекомендованной литературы, активное участие на лабораторных занятиях. Но для успешной учебной деятельности, ее интенсификации, необходимо учитывать следующие субъективные факторы:

1. Знание школьного программного материала, наличие прочной системы знаний, необходимой для усвоения основных вузовских курсов. Это особенно важно для математических дисциплин. Необходимо отличать пробелы в знаниях, затрудняющие усвоение нового материала, от малых способностей. Затратив силы на преодоление этих пробелов, студент обеспечит себе нормальную успеваемость и поверит в свои способности.

2. Наличие умений, навыков умственного труда:

а) умение конспектировать на лекции и при работе с книгой;
б) владение логическими операциями: сравнение, анализ, синтез, обобщение, определение понятий, правила систематизации и классификации.

3. Специфика познавательных психических процессов: внимание, память, речь, наблюдательность, интеллект и мышление. Слабое развитие каждого из них становится серьезным препятствием в учебе.

4. Хорошая работоспособность, которая обеспечивается нормальным физическим состоянием. Ведь серьезное учение — это большой многосторонний и разнообразный труд. Результат обучения оценивается не количеством сообщаемой информации, а качеством ее усвоения, умением ее использовать и развитием у себя способности к дальнейшему самостоятельному образованию.

5. Соответствие избранной деятельности, профессии индивидуальным способностям. Необходимо выработать у себя умение саморегулировать свое эмоциональное состояние и устранять обстоятельства, нарушающие деловой настрой, мешающие намеченной работе.

6. Овладение оптимальным стилем работы, обеспечивающим успех в деятельности. Чередование труда и пауз в работе, периоды отдыха, индивидуально обоснованная норма продолжительности сна, предпочтение вечерних или утренних занятий, стрессоустойчивость на экзаменах и особенности подготовки к ним,

7. Уровень требований к себе, определяемый сложившейся самооценкой.

Адекватная оценка знаний, достоинств, недостатков - важная составляющая самоорганизации человека, без нее невозможна успешная работа по управлению своим поведением, деятельностью.

Одна из основных особенностей обучения в высшей школе заключается в том, что постоянный внешний контроль заменяется самоконтролем, активная роль в обучении принадлежит уже не столько преподавателю, сколько студенту.

Зная основные методы научной организации умственного труда, можно при наименьших затратах времени, средств и трудовых усилий достичь наилучших результатов.

Эффективность усвоения поступающей информации зависит от работоспособности человека в тот или иной момент его деятельности.

Работоспособность - способность человека к труду с высокой степенью напряженности в течение определенного времени. Различают внутренние и внешние факторы работоспособности.

К внутренним факторам работоспособности относятся интеллектуальные особенности, воля, состояние здоровья.

К внешним:

- организация рабочего места, режим труда и отдыха;
- уровень организации труда - умение получить справку и пользоваться информацией;
- величина умственной нагрузки.

Выдающийся русский физиолог Н. Е. Введенский выделил следующие условия продуктивности умственной деятельности:

- во всякий труд нужно входить постепенно;
- мерность и ритм работы. Разным людям присущ более или менее разный темп работы;
- привычная последовательность и систематичность деятельности;
- правильное чередование труда и отдыха.

Отдых не предполагает обязательного полного бездействия со стороны человека, он может быть достигнут простой переменой дела. В течение дня работоспособность изменяется. Наиболее плодотворным является *утреннее время* (с 8 до 14 часов), причем максимальная работоспособность приходится на период с 10 до 13 часов, затем *послеобеденное* - (с 16 до 19 часов) и *вечернее* (с 20 до 24 часов). Очень трудный для понимания материал лучше изучать в начале каждого отрезка времени (лучше всего утреннего) после хорошего отдыха. Через 1-1,5 часа нужны перерывы по 10 - 15 мин, через 3 - 4 часа работы отдых должен быть продолжительным - около часа.

Составной частью научной организации умственного труда является овладение техникой умственного труда.

Время, которым располагает студент для выполнения учебного плана, складывается из двух составляющих: одна из них — это аудиторная работа в вузе по расписанию занятий, другая - внеаудиторная самостоятельная работа. Задания и материалы для самостоятельной работы выдаются во время учебных занятий по расписанию, на этих же занятиях преподаватель осуществляет контроль за самостоятельной работой, а также оказывает помощь студентам по правильной организации работы.

Самостоятельные занятия потребуют интенсивного умственного труда, который необходимо не только правильно организовать, но и стимулировать. При этом очень важно уметь поддерживать устойчивое внимание к изучаемому материалу. Выработка

внимания требует значительных волевых усилий. Именно поэтому, если студент замечает, что он часто отвлекается во время самостоятельных занятий, ему надо заставить себя сосредоточиться. Подобную процедуру необходимо проделывать постоянно, так как это является тренировкой внимания. Устойчивое внимание появляется тогда, когда человек относится к делу с интересом.

Следует правильно организовать свои занятия по времени: 50 минут - работа, 5-10 минут - перерыв; после 3 часов работы перерыв - 20-25 минут. Иначе нарастающее утомление повлечет неустойчивость внимания. Очень существенным фактором, влияющим на повышение умственной работоспособности, являются систематические занятия физической культурой. Организация активного отдыха предусматривает чередование умственной и физической деятельности, что полностью восстанавливает работоспособность человека.

САМОСТОЯТЕЛЬНАЯ РАБОТА СТУДЕНТА - НЕОБХОДИМОЕ ЗВЕНО СТАНОВЛЕНИЯ ИССЛЕДОВАТЕЛЯ

Прогресс науки и техники, информационных технологий приводит к значительному увеличению научной информации, что предъявляет более высокие требования не только к моральным, нравственным свойствам человека, но и в особенности, постоянно возрастающие требования в области образования – обновление, модернизация общих и профессиональных знаний, умений специалиста.

Всякое образование должно выступать как динамический процесс, присущий человеку и продолжающийся всю его жизнь. Овладение научной мыслью и языком науки является необходимой составляющей в самоорганизации будущего специалиста исследователя. Под этим понимается не столько накопление знаний, сколько овладение научно обоснованными способами их приобретения. В этом, вообще говоря, состоит основная задача вуза.

Специфика вузовского учебного процесса, в организации которого самостоятельной работе студента отводятся все больше места, состоит в том, что он является как будто бы последним и самым адекватным звеном для реализации этой задачи. Ибо во время учебы в вузе происходит выработка стиля, навыков учебной (познавательной) деятельности, рациональный характер которых будет способствовать постоянному обновлению знаний высококвалифицированного выпускника вуза.

Однако до этого пути существуют определенные трудности, в частности, переход студента от синтетического процесса обучения в средней школе, к аналитическому в высшей. Это связано как с новым содержанием обучения (расширение общего образования и углубление профессиональной подготовки), так и с новыми, неизвестными до сих пор формами: обучения (лекции, семинары, лабораторные занятия и т.д.). Студент получает не только знания, предусмотренные программой и учебными пособиями, но он также должен познакомиться со способами приобретения знаний так, чтобы суметь оценить, что мы знаем, откуда мы это знаем и как этого знания мы достигли. Ко всему этому приходят через собственную самостоятельную работу.

Это и потому, что самостоятельно приобретенные знания являются более оперативными, они становятся личной собственностью, а также мотивом поведения, развивают интеллектуальные черты, внимание, наблюдательность, критичность, умение оценивать. Роль преподавателя в основном заключается в руководстве накопления знаний (по отношению к первокурсникам), а в последующие годы учебы, на старших курсах, в

совместном установлении проблем и заботе о самостоятельных поисках студента, а также контролирования за их деятельностью. Отметим, что нельзя ограничиваться только приобретением знаний, предусмотренных программой изучаемой дисциплины, надо постоянно углублять полученные знания, сосредотачивая их на какой-нибудь узкой определенной области, соответствующей интересам студента. Углубленное изучение всех предметов, предусмотренных программой, на практике является возможным, и хорошая организация работы позволяет экономить время, что создает условия для глубокого, систематического, заинтересованного изучения самостоятельно выбранной студентом темы.

Конечно, все советы, примеры, рекомендации в этой области, даваемые преподавателем, или определенными публикациями, или другими источниками, не гарантируют никакого успеха без проявления собственной активности в этом деле, т. е. они не дают готовых рецептов, а должны способствовать анализу собственной работы, ее целей, организации в соответствии с индивидуальными особенностями. Учитывая личные возможности, существующие условия жизни и работы, навыки, на основе этих рекомендаций, возможно, выработать индивидуально обоснованную совокупность методов, способов, найти свой стиль или усовершенствовать его, чтобы изучив определенный материал, иметь время оценить его значимость, пригодность и возможности его применения, чтобы, в конечном счете, обеспечить успешность своей учебы с будущей профессиональной деятельности

МЕТОДИЧЕСКИЕ РЕКОМЕНДАЦИИ ДЛЯ СТУДЕНТОВ ПО ОТДЕЛЬНЫМ ФОРМАМ САМОСТОЯТЕЛЬНОЙ РАБОТЫ

Система вузовского обучения подразумевает значительно большую самостоятельность студентов в планировании и организации своей деятельности.

Работа с литературой

При работе с литературой необходимо подобрать литературу, научиться правильно ее читать, вести записи. Для подбора литературы в библиотеке используются алфавитный и систематический каталоги.

Важно помнить, что рациональные навыки работы с книгой — это всегда большая экономия времени и сил.

Правильный подбор учебников рекомендуется преподавателем, читающим лекционный курс. Необходимая литература может быть также указана в методических разработках по данному курсу.

Изучая материал по учебнику, следует переходить к следующему вопросу только после правильного уяснения предыдущего, описывая на бумаге все выкладки и вычисления (в том числе те, которые в учебнике опущены или на лекции даны для самостоятельного вывода).

При изучении любой дисциплины большую и важную роль играет самостоятельная индивидуальная работа.

Особое внимание следует обратить на определение основных понятий курса. Студент должен подробно разбирать примеры, которые поясняют такие определения, и уметь строить аналогичные примеры самостоятельно. Нужно добиваться точного представления о том, что изучаешь. Полезно составлять опорные конспекты. При изучении материала по учебнику полезно в тетради (на специально отведенных полях)

дополнять конспект лекций. Там же следует отмечать вопросы, выделенные студентом для консультации с преподавателем.

Выводы, полученные в результате изучения, рекомендуется в конспекте выделять, чтобы они при перечитывании записей лучше запоминались.

Опыт показывает, что многим студентам помогает составление листа опорных сигналов, содержащего важнейшие и наиболее часто употребляемые формулы и понятия. Такой лист помогает запомнить формулы, основные положения лекции, а также может служить постоянным справочником для студента.

Различают два вида чтения; первичное и вторичное. *Первичное* - это внимательное, неторопливое чтение, при котором можно остановиться на трудных местах. После него не должно остаться ни одного непонятого слова. Содержание не всегда может быть понятно после первичного чтения.

Задача *вторичного* чтения полное усвоение смысла целого (по счету это чтение может быть и не вторым, а третьим или четвертым).

Чтение научного текста является частью познавательной деятельности. Ее цель – извлечение из текста необходимой информации. От того на сколько осознанна читающим собственная внутренняя установка при обращении к печатному слову (найти нужные сведения, усвоить информацию полностью или частично, критически проанализировать материал и т.п.) во многом зависит эффективность осуществляемого действия.

Выделяют **четыре основные установки в чтении научного текста**:

1. информационно-поисковый (задача – найти, выделить искомую информацию)
1. усваивающая (усилия читателя направлены на то, чтобы как можно полнее осознать и запомнить как сами сведения, излагаемые автором, так и всю логику его рассуждений)
2. аналитико-критическая (читатель стремится критически осмыслить материал, проанализировав его, определив свое отношение к нему)
3. творческая (создает у читателя готовность в том или ином виде – как отправной пункт для своих рассуждений, как образ для действия по аналогии и т.п. – использовать суждения автора, ход его мыслей, результат наблюдения, разработанную методику, дополнить их, подвергнуть новой проверке).

С наличием различных установок обращения к научному тексту связано существование и нескольких **видов чтения**:

1. библиографическое – просматривание карточек каталога, рекомендательных списков, сводных списков журналов и статей за год и т.п.;
2. просмотровое – используется для поиска материалов, содержащих нужную информацию, обычно к нему прибегают сразу после работы со списками литературы и каталогами, в результате такого просмотра читатель устанавливает, какие из источников будут использованы в дальнейшей работе;
3. ознакомительное – подразумевает сплошное, достаточно подробное прочтение отобранных статей, глав, отдельных страниц, цель – познакомиться с характером информации, узнать, какие вопросы вынесены автором на рассмотрение, провести сортировку материала;
4. изучающее – предполагает доскональное освоение материала; в ходе такого чтения проявляется доверие читателя к автору, готовность принять изложенную информацию, реализуется установка на предельно полное понимание материала;

5. аналитико-критическое и творческое чтение – два вида чтения близкие между собой тем, что участвуют в решении исследовательских задач. Первый из них предполагает направленный критический анализ, как самой информации, так и способов ее получения и подачи автором; второе – поиск тех суждений, фактов, по которым или в связи, с которыми, читатель считает нужным высказать собственные мысли.

Из всех рассмотренных видов чтения основным для студентов является изучающее – именно оно позволяет в работе с учебной литературой накапливать знания в различных областях. Вот почему именно этот вид чтения в рамках учебной деятельности должен быть освоен в первую очередь. Кроме того, при овладении данным видом чтения формируются основные приемы, повышающие эффективность работы с научным текстом.

Основные виды систематизированной записи прочитанного:

1. Аннотирование – предельно краткое связное описание просмотренной или прочитанной книги (статьи), ее содержания, источников, характера и назначения;

1. Планирование – краткая логическая организация текста, раскрывающая содержание и структуру изучаемого материала;

2. Тезирование – лаконичное воспроизведение основных утверждений автора без привлечения фактического материала;

3. Цитирование – дословное выписывание из текста выдержек, извлечений, наиболее существенно отражающих ту или иную мысль автора;

4. Конспектирование – краткое и последовательное изложение содержания прочитанного.

Конспект – сложный способ изложения содержания книги или статьи в логической последовательности. Конспект аккумулирует в себе предыдущие виды записи, позволяет всесторонне охватить содержание книги, статьи. Поэтому умение составлять план, тезисы, делать выписки и другие записи определяет и технологию составления конспекта.

Методические рекомендации по составлению конспекта:

1. Внимательно прочитайте текст. Уточните в справочной литературе непонятные слова. При записи не забудьте вынести справочные данные на поля конспекта.

2. Выделите главное, составьте план.

3. Кратко сформулируйте основные положения текста, отметьте аргументацию автора.

4. Законспектируйте материал, четко следуя пунктам плана. При конспектировании старайтесь выразить мысль своими словами. Записи следует вести четко, ясно.

5. Грамотно записывайте цитаты. Цитируя, учитывайте лаконичность, значимость мысли.

В тексте конспекта желательно приводить не только тезисные положения, но и их доказательства. При оформлении конспекта необходимо стремиться к емкости каждого предложения. Мысли автора книги следует излагать кратко, заботясь о стиле и выразительности написанного. Число дополнительных элементов конспекта должно быть логически обоснованным, записи должны распределяться в определенной последовательности, отвечающей логической структуре произведения. Для уточнения и дополнения необходимо оставлять поля.

Овладение навыками конспектирования требует от студента целеустремленности, повседневной самостоятельной работы.

Лабораторные занятия

Следует подчеркнуть, что только после усвоения лекционного материала с определенной точки зрения (а именно с той, с которой он излагается на лекциях) он будет закрепляться на лабораторных занятиях как в результате обсуждения и анализа лекционного материала, так и с помощью выполнения заданий лабораторной работы, поставленных задач. При этих условиях студент не только хорошо усвоит материал, но и научится применять его на практике, а также получит дополнительный стимул (и это очень важно) для активной проработки лекции.

При самостоятельном выполнении заданий нужно обосновывать каждый этап решения, исходя из теоретических положений курса. Если студент видит несколько путей решения проблемы (задачи), то нужно сравнить их и выбрать самый рациональный. Полезно до начала вычислений составить краткий план решения проблемы (задачи). Решение задач или примеров следует излагать подробно, вычисления располагать в строгом порядке, отделяя вспомогательные вычисления от основных. Решения при необходимости нужно сопровождать комментариями, схемами, чертежами и рисунками.

Следует помнить, что выполнение каждого учебного задания должно доводиться до окончательного логического ответа, которого требует условие, и по возможности с выводом. Выполнение заданий данного типа нужно продолжать до приобретения твердых навыков в их решении.

Самопроверка

После изучения определенной темы по записям в конспекте и учебнику, а также решения достаточного количества соответствующих заданий на лабораторных занятиях и самостоятельно студенту рекомендуется, используя лист опорных материалов, воспроизвести по памяти определения, выводы формул, формулировки основных положений и доказательств.

В случае необходимости нужно еще раз внимательно разобраться в материале.

Иногда недостаточность усвоения того или иного вопроса выясняется только при изучении дальнейшего материала. В этом случае надо вернуться назад и повторить плохо усвоенный материал. Важный критерий усвоения теоретического материала - умение решать задачи или пройти тестирование по пройденному материалу. Однако следует помнить, что правильное решение задачи может получиться в результате применения механически заученных формул без понимания сущности теоретических положений.

Консультации

Если в процессе самостоятельной работы над изучением теоретического материала или при выполнении заданий у студента возникают вопросы, разрешить которые самостоятельно не удастся, необходимо обратиться к преподавателю для получения у него разъяснений или указаний. В своих вопросах студент должен четко выразить, в чем он испытывает затруднения, характер этого затруднения. За консультацией следует обращаться и в случае, если возникнут сомнения в правильности ответов на вопросы самопроверки.

Подготовка к экзамену по дисциплине

Изучение многих общепрофессиональных и специальных дисциплин завершается экзаменом. Подготовка к экзамену способствует закреплению, углублению и обобщению знаний, получаемых, в процессе обучения, а также применению их к решению практических задач. Готовясь к экзамену, студент ликвидирует имеющиеся пробелы в знаниях, углубляет, систематизирует и упорядочивает свои знания.

Экзамен - форма промежуточной аттестации студентов по результатам освоения теоретических знаний, приобретения практических навыков и компетенций, целью которой является контроль результатов освоения студентами учебного материала по программе конкретной дисциплины, проверка и оценка знаний, полученных за семестр (курс), их прочности, развития творческого мышления, приобретения навыков самостоятельной работы, умения применять теоретические знания при решении практических задач. Экзамен может быть проведен в устной форме, в устно-письменной форме, в форме письменной работы или тестирования.

Число вопросов, включаемых в экзаменационный билет, должно быть не менее двух и не более пяти, при этом вопросы могут носить как теоретический, так и прикладной характер. На экзамен могут выноситься типовые задачи, проработанные в течение семестра на аудиторных занятиях и в процессе самостоятельной работы. Содержание вопросов и задач, включаемых в экзаменационный билет, должно соответствовать учебной программе дисциплины и фондам оценочных средств. Перечень примерных вопросов, заданий и критерии оценки уровня обученности и уровня сформированности компетенций доводятся до сведения обучающихся в начале семестра изучения дисциплины.

Систематическая подготовка к занятиям в течение семестра позволит использовать время экзаменационной сессии для систематизации знаний.

Текущая аттестация студентов проводится преподавателями, ведущими лабораторные занятия по дисциплине в следующих формах: собеседование при защите лабораторной работы с предоставлением письменного отчета. Допуск к лабораторным работам происходит при наличии у студентов печатного варианта отчета. Защита отчета проходит в форме собеседования. Максимальное количество баллов студент получает, если оформление отчета соответствует установленным требованиям, а отчет полностью раскрывает суть работы. Основанием для снижения оценки являются:

- не качественно выполненная работа на персональном компьютере,
- письменный отчет выполнен в небрежной форме и с ошибками,
- студент не дает исчерпывающий ответ на вопрос преподавателя,
- путается или затрудняется в демонстрации работы на компьютере.

Отчет может быть отправлен на доработку в следующих случаях:

- небрежное выполнение и с ошибками,
- сокращенное содержание отчета.

Критерии оценивания собеседования приведены в Фонде оценочных средств по дисциплине Основы нейронных сетей.

УЧЕБНО-МЕТОДИЧЕСКОЕ И ИНФОРМАЦИОННОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ДИСЦИПЛИНЫ

8.1. Перечень основной и дополнительной литературы, необходимой для освоения дисциплины (модуля)

8.1.1. Перечень основной литературы:

1. Скворцова Т.И. Компьютерные коммуникации и сети Электронный ре-сурс / Скворцова Т.И.: учебно-методическое пособие. - Москва: РТУ МИ-РЭА, 2020. - 223 с., экземпляров неограниченно.

2. Берлин А.Н. Высокоскоростные сети связи Электронный ресурс: учебное пособие / А.Н. Берлин. - Высокоскоростные сети связи. - Москва: Ин-тернет-Университет Информационных Технологий (ИНТУИТ), 2016. - 437 с. - Книга находится в базовой версии ЭБС IPRbooks., экземпляров неограниченно.

3. Проскуряков А.В. Компьютерные сети: основы построения компьютерных сетей и телекоммуникаций: учебное пособие / А.В. Проскуряков; Министерство науки и высшего образования Российской Федерации; Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Южный федеральный университет»; Инженерно-технологическая академия. - Ростов-на-Дону|Таганрог: Издательство Южного федерального университета, 2018. - 202 с.: ил. - <http://biblioclub.ru/>. - Библиогр.: с. 195-196. - ISBN 978-5-9275-2792-2, экз-земпляров неограниченно.

8.1.2. Перечень дополнительной литературы:

1. Шишова Н.А. Основы построения инфокоммуникационных систем и сетей [Электронный ресурс]: учебное пособие / Н. А. Шишова. — Электрон. текстовые данные. — М.: Московский технический университет связи и информатики, 2015. — 43 с. — 2227-8397. — Режим доступа: <http://www.iprbookshop.ru/61512.html>, экземпляров неограниченно.

2. Олифер В.Г. Компьютерные сети: принципы, технологии, протоколы: учеб. пособие для вузов / В.Г. Олифер, Н.А. Олифер. - 4-е изд. - СПб. [и др.]: Питер, 2014. - 944 с. : ил. - (Учебник для вузов). - Гриф: Рек. МО. - Библиогр.: с. 917. - Алф. указ.: с. 918-943. - ISBN 978-5-469-00004-8 – 14 экземпляров.

3. Оливер Ибе Компьютерные сети и службы удаленного доступа Электронный ресурс: Учебное пособие / Ибе Оливер; пер. И. В. Сеницын. - Компьютерные сети и службы удаленного доступа. - Саратов: Профобразование, 2017. - 333 с. - Книга находится в премиум-версии ЭБС IPR BOOKS. - ISBN 978-5-4488-0054-2, экземпляров неограниченно.

4. Зиангирова Л.Ф. Сетевые технологии Электронный ресурс: Учебно-методическое пособие / Л.Ф. Зиангирова. - Саратов: Вузовское образование, 2017. - 100 с. - Книга находится в премиум-версии ЭБС IPR BOOKS. - ISBN 978-5-906172-30-3, экземпляров неограниченно.

5. Методические рекомендации по выполнению лабораторных работ по дисциплине "Компьютерные сети": Направление подготовки 44.03.05 Педагогическое образование. Профиль подготовки - Информатика и Иностранный язык (английский). Квалификация выпускника - бакалавр. Форма обучения - очная. Учебный план 2018г. Изучается в 7 и 8 семестре. / Сев.-Кав. федер. ун-т. - Ставрополь: СКФУ, 2017. - 206 с., экземпляров неограниченно.

8.2. Перечень учебно-методического обеспечения самостоятельной работы обучающихся по дисциплине (модулю)

8.3. Перечень ресурсов информационно-телекоммуникационной сети «Интернет», необходимых для освоения дисциплины (модуля)

NetCracker Professional Users Guide and Reference Manual [электронный ресурс] // <http://www.netcracker.com/>.

Единое окно доступа к образовательным ресурсам: [портал]. URL: <http://window.edu.ru/>

Национальный открытый университет ИНТУИТ. URL: <http://www.intuit.ru/>