

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ
ФЕДЕРАЦИИ

Национальный исследовательский Нижегородский государственный университет
им. Н.И. Лобачевского

ИЗМЕРЕНИЕ ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ПОЛЕВОГО ТРАНЗИСТОРА

Практикум

Рекомендовано методической комиссией радиофизического факультета
для студентов ННГУ, обучающихся по направлениям
подготовки 03.03.03 «Радиофизика», 02.03.02 «Фундаментальная информатика
и информационные технологии», специальностям 10.05.02 «Информационная
безопасность телекоммуникационных систем», 11.05.02 «Специальные радио-
технические системы»

Нижегород
2019

УДК 537.311

ББК 22.344

ИЗ7

Рецензент: канд. физ.-мат. наук, доцент **Н.В. Прончатов-Рубцов**

ИЗ7 ИЗМЕРЕНИЕ ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ПОЛЕВОГО ТРАНЗИСТОРА. Авторы: Д.А. Санжаревский, Е.С. Оболенская, А.Ю. Чурин, Е.А. Тарасова, Е.В. Волкова, С.В. Оболенский: Практикум. – Нижний Новгород: Нижегородский госуниверситет, 2019. – 16 с.

В настоящем пособии изложены радиофизические принципы работы и методы расчета статических характеристик полевых транзисторов.

Настоящее пособие предназначено для студентов, изучающих курсы «Полупроводниковая электроника», «Твердотельная электроника», «Электроника», «Электроника и схемотехника».

Ответственный за выпуск:

зам. председателя методической комиссии радиофизического факультета ННГУ
д.ф.-м.н., профессор **Е.З. Грибова**

УДК 537.311

ББК 22.344

© Нижегородский государственный
университет им. Н.И. Лобачевского, 2019

ВВЕДЕНИЕ

Полевыми транзисторами (ПТ) называются полупроводниковые приборы, работа которых основана на управлении размерами токопроводящей области (канала) посредством изменения напряженности поперечного электрического поля. Структурная схема ПТ изображена на рис. 1.

Металлизация истока	Диэлектрик	Металлизация затвора	Диэлектрик	Металлизация стока
Область, снижающая контактное сопротивление (омический контакт)		Изолирующая область (р-п, барьер Шоттки, гетеропереход, диэлектрик)		Область, снижающая контактное сопротивление (омический контакт)
Полупроводниковая область, определяющая паразитное сопротивление истока		Область канала (толщина управляется напряжением на затворе)	Полупроводниковая область, определяющая паразитное сопротивление стока	
Буферный слой, изолирующий канал от полупроводниковой «подложки»				
Нелегированная полупроводниковая пластина («подложка»)				
Теплоотвод и/или изолятор				

Рис. 1. Структурная схема полевого транзистора

Ток прибора протекает по полупроводниковой области, называемой *каналом*. В ПТ используется движение носителей заряда только одного знака (поэтому прибор иногда называют униполярным транзистором). Они “истекают” из электрода, называемого *истоком*, движутся вдоль канала и “стекают” в *сток*. *Затвор* транзистора является управляющим электродом. Электрическое поле, возникающее при подаче напряжения между истоком и затвором, изменяет проводимость канала и, следовательно, ток через канал. Таким образом, ток прибора изменяется за счет электрического поля, направленного перпендикулярно движению носителей в канале (поэтому транзистор называют полевым). Носители движутся от истока к стоку под действием продольного электрического поля, создаваемого напряжением между истоком и стоком. Подложка – конструктивный слой полупроводника, который вырезают из полупроводникового слитка, шлифуют и полируют, а затем используют как основу для выращивания на нем тонких (0.01–10 мкм) эпитаксиальных полупроводниковых слоев, из которых формируется структура приборов.

Существует два основных типа ПТ, различающихся физической структурой и способом управления проводимостью канала. В *ПТ с изолированным затвором* между металлическим затвором и каналом расположен слой диэлектрика так, что образуется структура металл/диэлектрик/полупроводник. Поэтому такие транзисторы называются МДП-транзисторами. Поперечное электриче-

ское поле, проникая через слой диэлектрика, управляет концентрацией носителей заряда в полупроводниковом канале. Такие транзисторы делятся, в свою очередь, на приборы со встроенным и индуцированным каналом. В ПТ с управляющим переходом металлический электрод затвора образует с приповерхностным слоем полупроводника выпрямляющий контакт, на который в рабочем режиме подается обратное напряжение (изоляция затвора путем запирающего выпрямляющего контакта). В качестве управляющего перехода могут использоваться р-п переход, гетеропереход или контакт Шоттки.

Все ПТ различают также по типу проводимости канала: транзисторы с каналом р- или n-типа. Полярности рабочих напряжений смещения, подаваемых на электроды этих транзисторов, противоположны.

Характерным для всех ПТ является очень малый ток в цепи затвора, так как затвор либо изолирован диэлектриком, либо образует с каналом управляющий переход, включаемый в обратном направлении. Так как затвор в электрических схемах является входным электродом, то ПТ обладает высоким входным сопротивлением на постоянном токе (10^6 – 10^{10} Ом). В этом заключается отличие ПТ от биполярных транзисторов, во входной цепи которых (обычно базовой) протекает значительный ток при прямом напряжении на переходе эмиттер-база. Поэтому входное сопротивление биполярных транзисторов относительно мало (10–1000 Ом в схемах с общим эмиттером и общей базой).

В связи с указанным различием входных сопротивлений говорят, что ПТ – это прибор, управляемый напряжением (электрическим полем), а биполярный – управляемый током. В приборах, управляемых напряжением, напряжение на входном электроде из-за высокого входного сопротивления $R_{ВХ}$ практически не зависит от параметров самого прибора и определяется ЭДС генератора входного сигнала, если $R_{ВХ} \gg R_{ГЕН}$, где $R_{ГЕН}$ – внутреннее сопротивление генератора. В приборах, управляемых током, входной ток из-за малого входного сопротивления слабо зависит от параметров прибора и определяется током генератора входного сигнала (при $R_{ВХ} \ll R_{ГЕН}$).

В настоящее время наиболее развита технология изготовления границы Si/SiO₂. Поэтому МДП- транзисторы широко используются в кремниевых интегральных схемах. Транзисторы с управляющим переходом металл – полупроводник, изготавливаемые в основном из GaAs n-типа (подвижности электронов в этом материале значительно выше, чем в Si), используются для создания сверхскоростных интегральных микросхем, используемых в СВЧ устройствах.

1. ПРИНЦИП РАБОТЫ ПОЛЕВОГО ТРАНЗИСТОРА

1.1. Конструкция транзистора

В полевых транзисторах с управляющим переходом изменение потока основных носителей происходит с помощью выпрямляющего электрического перехода, смещенного в обратном направлении. Принцип действия ПТ с различными типами управляющих переходов один и тот же, поэтому мы подробно

рассмотрим лишь прибор с р-п переходом. На его примере будут проиллюстрированы и общие свойства, присущие также полевым транзисторам с барьером Шоттки и с гетероструктурным переходом.

Полевой транзистор с управляющим р-п переходом имеет два омических контакта к области, по которой проходит управляемый ток основных носителей заряда, один управляющий электронно-дырочный переход и один изолирующий от подложки р-п переход. На оба перехода подаются запирающие напряжения (говорят, что они «смещены в обратном направлении») (рис. 2).

Управление током стока происходит при изменении обратного напряжения на р-п переходе затвора. При этом изменяется толщина р-п перехода и, следовательно, толщина канала – области, по которой протекает управляемый ток. В связи с тем, что обратные токи малы, мощность, затрачиваемая для управления током стока, оказывается также малой. Поэтому полевой транзистор обеспечивает усиление сигнала по мощности, току и напряжению. Принцип действия полевого транзистора аналогичен вакуумному триоду. Исток в полевом транзисторе подобен катоду, затвор – сетке, сток – аноду.

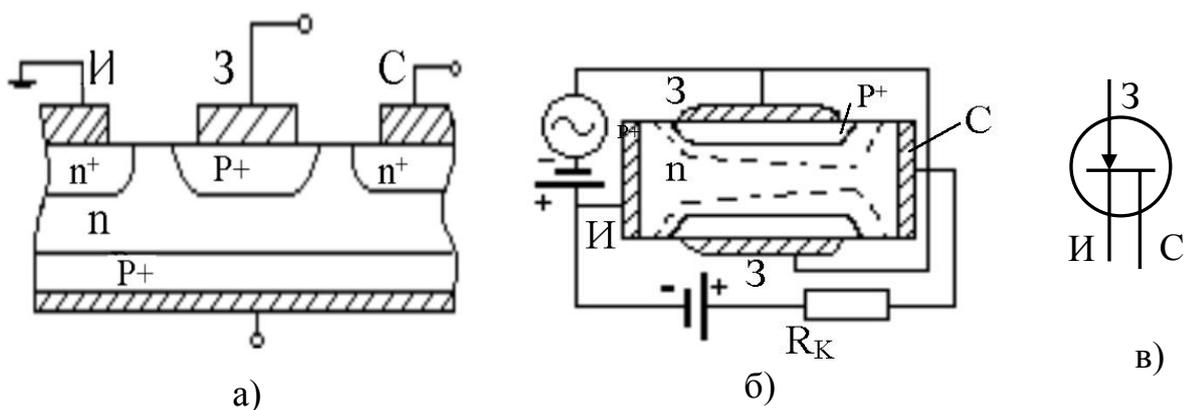


Рис. 2. Полевой транзистор с управляющим р-п переходом: а) реальная структура транзистора; б) схема включения модельной (симметричной) структуры транзистора по схеме с общим истоком; в) графическое обозначение полевого транзистора с управляющим переходом. Обозначения: И – исток; З – затвор; С – сток; n – область канала n-типа; p⁺ - область затвора р-типа (значок «+» обозначает высокий уровень содержания легирующей примеси); пунктиром показана обедненная электронами область р-п переходов затвора в слое канала

1.2. Статические характеристики

Важнейшими семействами статических характеристик ПТ являются выходные статические характеристики и характеристики передачи. Выходные статические характеристики представляют собой зависимость тока стока J_C от напряжения на стоке относительно истока $U_{СИ}$ при различных постоянных

напряжениях на затворе $U_{зи}$: $J_C=f(U_{си})$ при $U_{си}=const$ (рис. 3). Все характеристики выходят из начала координат и имеют три характерных участка.

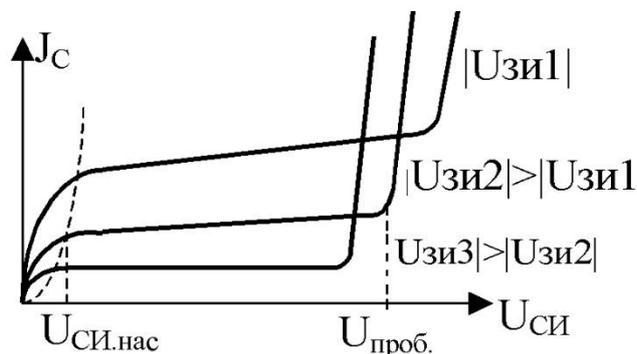


Рис. 3. Выходные статические вольт-амперные характеристики ПТ при различных напряжениях исток-затвор

На начальном (крутом) участке отличие от линейной зависимости объясняется увеличением толщины управляющего $p-n$ перехода около стока, при котором поперечное сечение канала уменьшается, а сопротивление канала увеличивается. Другая причина нелинейности выходной характеристики – уменьшение подвижности носителей заряда в канале при увеличении в нем напряженности электрического поля.

При $U_{си}=U_{си.нас}$ (напряжение насыщения) происходит смыкание областей пространственного заряда (ОПЗ) затворов сначала около стока. При дальнейшем увеличении $U_{си}$ длина перекрытой части канала увеличивается, причем статическое сопротивление канала растет пропорционально увеличению напряжения стока, поэтому ток стока остается постоянным (насыщенным).

При увеличении $|U_{зи}|$ уменьшается исходное поперечное сечение канала (рис. 4). Поэтому начальные участки выходных характеристик имеют меньший наклон, что соответствует большему начальному статическому сопротивлению канала. Перекрытие канала происходит при меньших напряжениях насыщения.

При некотором напряжении на стоке возникает пробой $p-n$ перехода затвора, обратное напряжение на котором изменяется вдоль канала, достигая максимума у стокового конца. Напряжение, приложенное к $p-n$ переходу затвора в этом месте равно $U_{си}+|U_{зи}|$. Поэтому, чем больше $|U_{зи}|$, тем меньше $U_{си.проб}$ (напряжение пробоя).

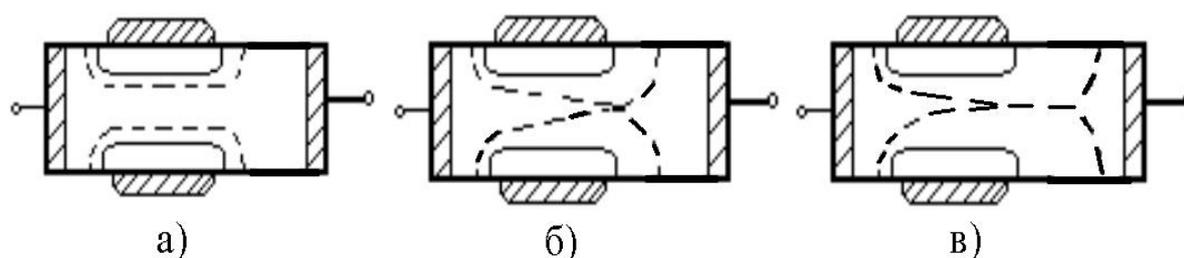


Рис. 4. Увеличение толщины управляющего $p-n$ перехода при увеличении $U_{си}$: а) $U_{си1}$; б) $U_{си2} > U_{си1}$; в) $U_{си3} > U_{си2}$

Характеристики передачи представляют собой зависимость $J_C=f(U_{ЗИ})$ при $U_{СИ}=const$ (рис 5). Они снимаются в режиме насыщения тока стока (пологая часть выходных статических характеристик), т.к. это основной рабочий режим полевого транзистора. При изменении $U_{СИ}$ смещением характеристик передачи практически можно пренебречь. При $U_{ЗИ}=U_{ЗИотс.}$ (напряжение отсечки) $J_C=0$.

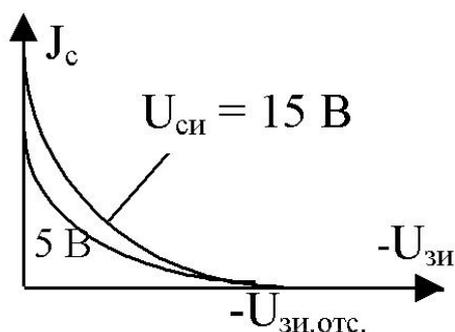


Рис. 5. Статическая передаточная вольтамперная характеристика

1.3. Основные параметры полевого транзистора

Основными параметрами полевого транзистора являются:

S – крутизна вольт-амперной характеристики транзистора (или просто крутизна транзистора), характеризует усилительные свойства полевого транзистора

$$S = \left. \frac{\partial J_C}{\partial U_{ЗИ}} \right|_{U_{СИ} = const}$$

R_i – внутреннее сопротивление транзистора в режиме насыщения:

$$R_i = \left. \frac{\partial U_{СИ}}{\partial J_C} \right|_{U_{ЗИ} = const}$$

μ – статический коэффициент усиления

$$\mu = \left. \frac{\partial U_{СИ}}{\partial U_{СИ}} \right|_{J_C = const}$$

Нетрудно доказать, что $\mu = S \cdot R_i$

1.4. Расчет статических характеристик полевого транзистора с управляющим р-п переходом

Пренебрегая объемным сопротивлением кристалла полупроводника на участках между концами канала и контактами истока и стока, рабочую часть полевого транзистора можно представить в упрощенном виде (рис. 6):

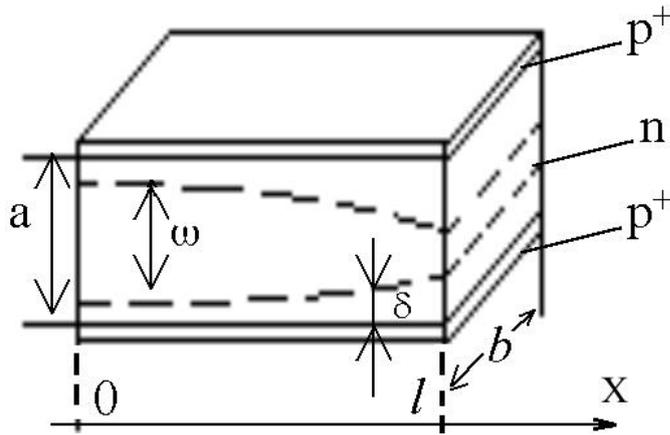


Рис. 6. Структура рабочей части полевого транзистора с двумя управляющими p-n переходами представляет собой «удвоенный» транзистор, как будто он зеркально отражен относительно канала

Плотность тока в канале

$$j = \sigma \cdot E = -\sigma \cdot \frac{d\varphi}{dx},$$

где σ – удельная проводимость канала, E – напряженность электрического поля, $\varphi(x)$ – потенциал произвольной точки канала. Будем считать, что σ не зависит от E , т.е. подвижность не меняется.

Ток в канале одинаков в любом сечении и равен:

$$J_C = -\sigma b \omega(x) \frac{d\varphi(x)}{dx},$$

где b – ширина канала.

Толщина канала ω зависит от толщины p-n перехода

$$\omega = a - 2\delta.$$

Толщина p-n перехода зависит от напряжения на нем. Учитывая распределение потенциала в канале, возникающее из-за прохождения тока по каналу от истока к стоку, и пренебрегая U_K , получим:

$$\delta = \sqrt{\frac{2\varepsilon\varepsilon_0}{eN_d}(\varphi - U_{3И})},$$

где $U_{3И}$ – абсолютная величина разности потенциалов между затвором и истоком, ε – диэлектрическая проницаемость, $\varepsilon_0 = 8.86 \cdot 10^{-12}$ ф/м – диэлектрическая постоянная; $e = 1.6 \cdot 10^{-19}$ Кл – заряд электрона; N_d – концентрация донорной примеси ($N_d \ll N_a$).

Для более компактной записи найдем $U_{3И.омс.}$ из условия, что толщина около стока при этом напряжении равна нулю:

$$\delta = \frac{a}{2} = \sqrt{\frac{2\varepsilon\varepsilon_0}{eN_d}} \left| U_{3И.омс.} \right|^{3/2},$$

$$|U_{ЗИ.отс.}| = \frac{eN_d a^2}{8\epsilon\epsilon_0}.$$

Таким образом,

$$\omega = a \left(1 - \sqrt{\frac{\varphi - U_{ЗИ}}{|U_{ЗИ.отс.}|}} \right).$$

В результате

$$J_C = \sigma b a \left(1 - \sqrt{\frac{\varphi - U_{ЗИ}}{|U_{ЗИ.отс.}|}} \right) \frac{d\varphi}{dx}.$$

Решая это дифференциальное уравнение с разделяющимися переменными при условиях: $x=0, \varphi=0$; $x=l, \varphi=U_{си}$, получим искомую функцию:

$$J_C = \frac{1}{R_{СИ}} \left[U_{СИ} + \frac{2}{3} \frac{|U_{ЗИ}|^{3/2} - (U_{СИ} + U_{СИ})^{3/2}}{|U_{ЗИ.отс.}|^{1/2}} \right],$$

где $R_{СИ} = \frac{l}{\sigma ab}$ – сопротивление сток-исток в открытом состоянии.

Определим величину тока насыщения. Перекрытие канала происходит при напряжении отсечки. Режим насыщения наступит при условии

$$|U_{ЗИ}| + U_{СИ} = |U_{ЗИ.отс.}|,$$

т.е. при напряжении на стоке:

$$U_{СИ.нас.} = |U_{ЗИ.отс.}| - |U_{ЗИ}|.$$

Заменяя в выражении для тока стока $U_{ЗИ}$ получим:

$$J_{C.нас.} = \frac{1}{R_{СИ}} \left[U_{си.нас.} + \frac{2}{3} |U_{зи.отс.}| - U_{си.нас.} \cdot \sqrt{\frac{|U_{зи.отс.}| - U_{си.нас.}}{|U_{зи.отс.}|}} - \frac{2}{3} |U_{зи.отс.}| \right]$$

Чтобы найти характеристику передачи для тока насыщения, в выражении для тока стока надо заменить $U_{СИ}$ на значение $U_{СИ.нас.}$. Тогда

$$J_{C.нас.} = \frac{1}{R_{СИ}} \left[\frac{1}{3} |U_{ЗИ.отс.}| + U_{ЗИ} \left(1 - \frac{2}{3} \sqrt{\frac{U_{ЗИ}}{|U_{ЗИ.отс.}|}} \right) \right].$$

Поскольку пологий участок выходных статических характеристик полевых транзисторов является основным рабочим участком, определим крутизну S :

$$S = \left| \frac{dJ_{C.нас.}}{dU_{ЗИ}} \right| = \frac{1}{R_{СИ}} \left(1 - \sqrt{\frac{U_{ЗИ}}{U_{ЗИ.отс.}}} \right).$$

Из этого выражения следует, что для увеличения крутизны S надо выбирать материал с большей подвижностью носителей заряда и увеличивать отношение b/l , т.к. это ведет к уменьшению $R_{СИ}$.

1.5. Эквивалентная схема полевого транзистора с управляющим р-п переходом и его частотные свойства

Электрическая эквивалентная схема полевого транзистора приведена на рис. 7. Здесь R_C и R_I – объемные сопротивления кристалла полупроводника в стоковой и истоковой областях; R_i – большое дифференциальное сопротивление канала; $C_{ЗИ}$, $C_{ЗС}$, $R_{ЗИ}$, $R_{ЗС}$ – замещают в этой эквивалентной схеме р-п переход с его барьерной емкостью и большим активным дифференциальным сопротивлением при обратном смещении. Генератор тока отражает усилительные свойства транзистора.

Высокочастотные характеристики канальных транзисторов зависят от двух основных факторов: времени пролета канала транзистора носителями заряда и характерного времени зарядки затвора. Временем пролета называют конечный временной интервал τ , который требуется носителям для преодоления расстояния от истока до стока. В приближении постоянной подвижности

$$\tau = \frac{L}{\mu E_x} \approx \frac{L^2}{\mu U_{СИ}},$$

а при высоких полях, в приближении скорости насыщения v_s : $\tau = L/v_s$.

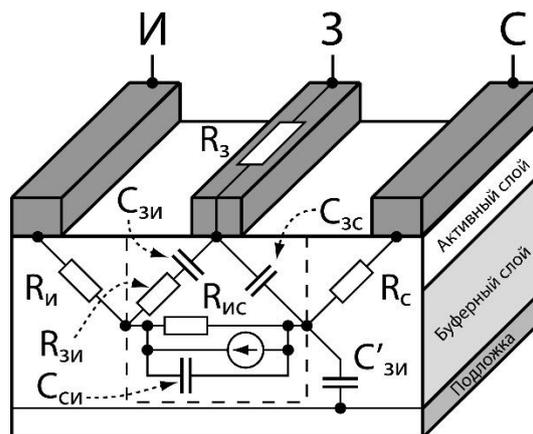
Так, например, в полевом $GaAs$ транзисторе с длиной затвора 1 мкм время пролета составляет ≈ 10 пс (10^{-11} с). Обычно время пролета сравнимо с временной постоянной $R_I C_{ЗИ}$, определяемой входной областью транзистора.

Важной характеристикой прибора является граничная частота f_T , при которой коэффициент усиления равен 1. В соответствии с эквивалентной схемой (рис. 7) при этой частоте ток через $C_{ЗК}$ равен току генератора $S U_C$:

$$f_T = \frac{S}{2\pi C_{ЗК}} \left(= \frac{1}{2\pi\tau} = \frac{v_s}{2\pi L} \right).$$

В заключение данного раздела отметим, что принципы действия полевых транзисторов с р-п переходом и с барьером Шоттки идентичны, поэтому последние не будут рассматриваться нами отдельно.

Рис. 7. Эквивалентная схема полевого транзистора



2. ОПИСАНИЕ КОМПЛЕКТА АППАРАТУРЫ

Комплект аппаратуры для сбора измерительной установки показан на рис. 1. В состав входят: источники питания 1, многопредельный миллиамперметр 2, измерительный модуль 3, осциллограф 4 и генератор сигналов 5.

Исследуемый транзистор и несколько пассивных элементов помещены в измерительный модуль, обеспечивающий защиту элементов схемы от внешних факторов и защищающий экспериментаторов от неблагоприятных воздействий электрических сигналов (рис 8). Для подсоединения питающих напряжений и измерительных приборов на корпусе модуля имеются клеммы и радиочастотные разъемы.

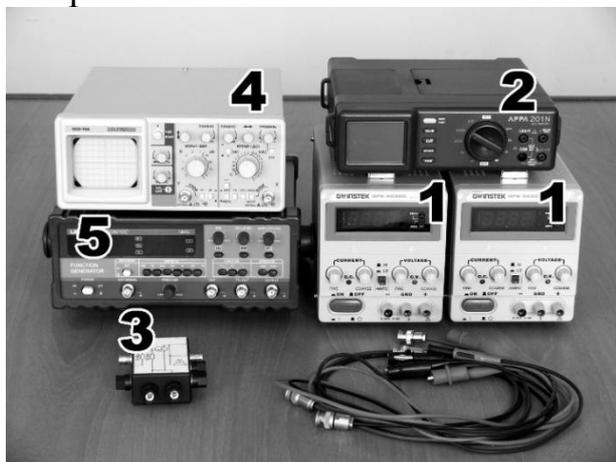


Рис. 8. Комплект измерительной аппаратуры

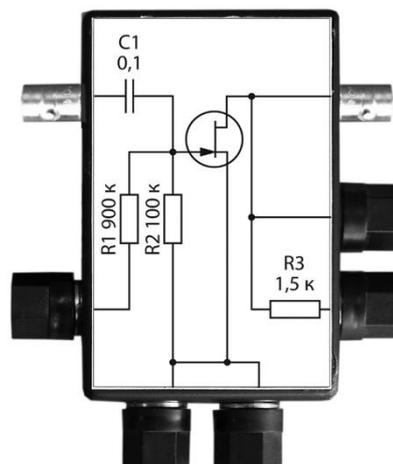


Рис. 9. Измерительный модуль с исследуемым транзистором

Для питания схемы используются два лабораторных источника питания GPS3030D. Для измерения тока в работе используется мультиметр АРРА-201N. Для визуализации сигналов в данной установке используется осциллограф ОСУ-10А. Генератор сигналов UTG9000С служит для подачи сигнала на затвор исследуемого транзистора. Форма, частота и другие параметры сигнала зависят

от поставленного задания. Краткую инструкцию по пользованию приборами ищите на сайте www.rf.unn.ru/eleder в разделе «Студентам – Лабораторные работы – Инструкции к приборам», подробное описание прибора есть у зав. лабораторией, информацию об особенностях измерений можно прочитать на сайте в разделе «Мерь точно!».

3. ПРАКТИЧЕСКИЕ ЗАДАНИЯ

3.1. Измерение характеристики передачи транзистора $I_c = f(U_3)$

Для выполнения этого задания потребуется собрать схему № 1 (рис. 10). Проведите измерение семейства характеристик передачи при напряжениях на стоке транзистора 0,5 В, 2 В и 10 В. Ток стока должен быть не более 15 мА. Рассчитайте крутизну характеристики передачи транзистора для каждого напряжения стока.

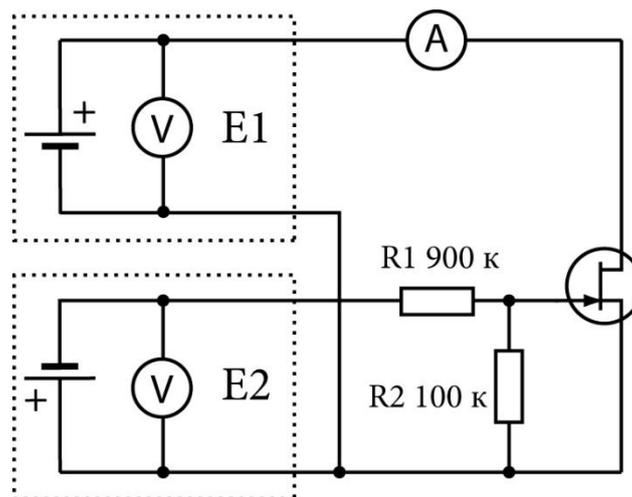


Рис. 10. Измерительная схема № 1

3.2. Измерение выходных характеристик транзистора $I_c = f(U_c)$

Выполнение этого задания производится при включении транзистора по схеме № 1 (рис. 10). Проведите измерение семейства выходных вольт-амперных характеристик при напряжениях на затворе транзистора 0 В, -0,5 В, -1 В, -1,5 В. Напряжение исток-сток должно быть не более 10 В. Ток стока должен быть не более 15 мА.

3.3. Исследование режимов работы транзистора

Соберите схему № 2 (рис. 11). Установите напряжение $E_1=10$ В. Подайте с генератора сигналов синусоидальный сигнал амплитудой 100...300 мВ, частотой 10...50 кГц. Изменяя напряжение на затворе транзистора, переведите транзистор в режимы: отсечки, насыщения, линейный. В каждом из режимов:

- измерьте напряжение на затворе;
- измерьте напряжение и ток стока;
- зарисуйте (сфотографируйте) осциллограмму выходного сигнала.

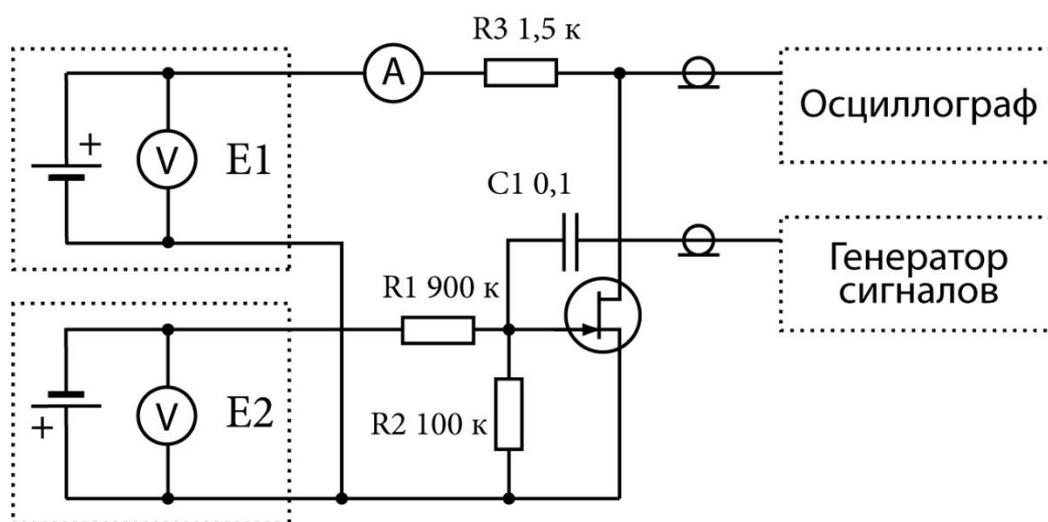


Рис. 11. Измерительная схема № 2

3.4. Измерение коэффициента усиления транзистора

Измерение производится по схеме № 2 (рис. 11). Установите линейный режим работы транзистора: напряжение $E_1 = 10$ В, напряжение на затворе примерно 0,5...1,5 В, при этом ток стока должен быть в районе 5 мА, напряжение на стоке около 5 В. Подайте с генератора сигналов синусоидальный сигнал 10...30 мВ, частотой 10...50 кГц. Получите на осциллографе выходной сигнал. Скорректируйте положение рабочей точки и уровень входного сигнала для достижения минимальных искажений выходного сигнала. Проведите измерение зависимости коэффициента усиления по напряжению от частоты усиливаемого сигнала. Найдите предельную частоту усиления. При оформлении графика частоту откладывайте в логарифмическом масштабе (по основанию 10).

3.5. Измерение времени переключения транзистора

Измерение проводится по схеме № 2 (рис. 11). Установите для транзистора режим отсечки: напряжение $E_1 = 10$ В, ток стока должен быть равен нулю, напряжение на стоке около 10 В. Подайте с генератора прямоугольный сигнал

«меандр» частотой 120...150 кГц, напряжением 2...3 В. Получите на осциллографе выходной сигнал. Подстройте уровень входного сигнала так, чтобы транзистор переключался из режима отсечки в режим насыщения. Измерьте зависимость времени переключения транзистора из режима отсечки в режим насыщения и из режима насыщения в режим отсечки от напряжения на затворе. Оцените предельную частоту усиления транзистора, сравните со значением, полученным в предыдущем задании.

4. КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Какие носители заряда создают ток в ПТ? Откуда они берутся?
2. Как связаны предельная частота работы ПТ с его конструкцией (уровнем легирования и площадью перехода затвора)?
3. Малосигнальные характеристики полевого транзистора.
4. Будут ли изменяться (и если будут, то как) вольт-амперные характеристики ПТ при нагревании?
5. Физический принцип процесса усиления сигнала в ПТ.

5. ПРАВИЛА ОФОРМЛЕНИЯ ОТЧЕТА ПО ЛАБОРАТОРНОЙ РАБОТЕ

Каждый студент обязан иметь свой экземпляр отчета, оформленный на отдельных листах. Основные требования к существу отчета: необходимо обращать внимание на четкую рубрикацию отчета (нумерацию составных частей, выделение заголовков и т.д.). Сокращение слов в отчете (кроме единиц измерения физических величин) не допускается. Отчет должен содержать следующие элементы:

- полное название лабораторной работы и дату составления отчета;
- кратко сформулированную цель работы;
- перечень приборов, используемых в данной работе, с указанием их марки и класса точности;
- принципиальную схему электрической цепи, на основе которой делаются измерения;
- краткое изложение теории изучаемого в данном эксперименте физического явления с выводом формул, используемых для обработки экспериментальных данных, определениями измеряемых величин и пояснением всех используемых буквенных сокращений;
- содержание выполняемых заданий.
- Результаты измерений.
- Расчет погрешностей косвенных измерений.
- Выводы.
- Ответы на вопросы (при наличии).

Результаты измерений (прямых и косвенных) должны быть оформлены в виде таблиц или графиков. Графики должны быть построены с использованием любого доступного программного обеспечения. При выборе масштаба надо предусмотреть, чтобы на графике не оставалось много свободных полей, т.е. кривая не должна быть прижата к одной или другой оси. У концов осей координат наносят обозначения величин и единиц их измерений. На осях откладывают масштабные единицы, а не координаты экспериментальных точек. На подготовленной таким образом плоскости наносят точки. Так как и аргумент, и функция определяются на опыте с соответствующими погрешностями, то около экспериментальных точек строят прямоугольник ошибок, стороны которого выражают в данном масштабе величины абсолютных ошибок функции и аргумента. Линию графика проводят не через каждую точку, а плавно и, по возможности, близко к экспериментальным точкам так, чтобы точки равномерно располагались по обе стороны кривой. Она должна пересекать или касаться прямоугольников ошибок. Для точек, резко отклоняющихся от кривой, нужно проверить правильность измерения или вычисления их координат.

Расчет погрешностей косвенных измерений так же должен быть приведен в отчете. Число значащих цифр при вычислении косвенно измеряемой величины должно соответствовать погрешности этой величины.

Выводы должны содержать сравнение измерений и вычислений, проведенных в работе с теоретическими значениями, причины расхождения опыта и теории, рекомендации по их устранению.

6. ТЕХНИКА БЕЗОПАСНОСТИ

1. В лабораторной установке используются низкие напряжения, не опасные для жизни, поэтому дополнительных требований к безопасности нет.

2. Сборку, разборку и любые изменения в схеме следует производить только при выключенном питании.

3. После сборки схемы перед ее включением следует пригласить заведующего лабораторией. Он проверит правильность сборки схемы и проведет инструктаж по технике безопасности на рабочем месте.

7. СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Зи С.М. Физика полупроводниковых приборов. М.: Сов. Радио, 1984.
2. Бонч-Бруевич В.Л., Калашников С.Г. Физика полупроводников. М.: Наука, 1990.
3. Орешкин П.Т. Физика полупроводников. М.: Высшая школа, 1976.
4. Оболенский С.В., Демарина Н.В., Волкова Е.В. Основы физики полупроводников. Транспорт носителей заряда в электрических полях: Учебное пособие. – Н. Новгород: Издательство Нижегородского госуниверситета, 2007. - 79 с.

5. Волкова Е.В., Оболенский С.В. Полупроводниковые диоды: Учебное пособие.
- Н. Новгород: Издательство Нижегородского государственного университета, 2013. - 84 с.

ИЗМЕРЕНИЕ ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ПОЛЕВОГО ТРАНЗИСТОРА

Авторы:

Дмитрий Александрович Санжаревский
Елизавета Сергеевна Оболенская
Андрей Юрьевич Чурин и др.

Практикум

Компьютерный набор – Д.А.Санжаревский

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования
«Национальный исследовательский Нижегородский государственный университет
им. Н.И. Лобачевского».
603950, Нижний Новгород, пр. Гагарина, 23.