КАЗАНСКИЙ (ПРИВОЛЖСКИЙ) ФЕДЕРАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ

ИНСТИТУТ ФИЗИКИ

Кафедра физики твёрдого тела

В.В. ПАРФЕНОВ, И.В. ЯНИЛКИН

ИЗУЧЕНИЕ РАБОТЫ ПОЛЕВОГО ТРАНЗИСТОРА

Методическое пособие к лабораторным работам

Казань 2016

УДК 537.9
ББК В379.2

Принято на заседании кафедры физики твердого тела
Протокол № 2 от 19 сентября 2016 года

Рецензент: Тюрин В.А.
к. ф.-м. н., доцент кафедры радиофизики ИФ КФУ

Парфенов В.В., Янилкин И.В.
Изучение работы полевого транзистора /В.В. Парфенов, И.В. Янилкин – Казань: Казан. ун-т, 2016. – 21 с.

Методическая разработка предназначена для студентов, обучающихся по направлениям бакалавриата 03.03.02 «Физика» и 28.03.01 «Нанотехнологии и микросистемная техника» при выполнении лабораторных работ по дисциплинам «Физика конденсированного состояния», «Физические основы микро- и наносистемной техники».

Пособие не освобождает и не ограничивает студента от обращения к другим источникам информации, в том числе рекомендованным в данном пособии, необходимым для выполнения лабораторных заданий, для подготовки к зачету и экзамену, поскольку не охватывает материал, вынесенный на самостоятельное изучение студентом.

© Парфенов В.В., 2016
© Янилкин И.В., 2016
© Казанский университет, 2016

Идея полевого транзистора с изолированным затвором была предложена Лилиенфельдом в 1926—1928 годах. Однако объективные трудности в реализации этой конструкции позволили создать первый работающий прибор этого типа только в 1960 году. В 1953 году Дейки и Росс предложили и реализовали другую конструкцию полевого транзистора — с управляющим p-n-переходом. Наконец, третья конструкция полевых транзисторов — полевых транзисторов с барьером Шоттки — была предложена и реализована Мидом в 1966 году.

Значительная часть производимых в настоящий момент полевых транзисторов входит в состав КМОП-структур, которые строятся из полевых транзисторов с каналами разного (p- и n-) типа проводимости и широко используются в цифровых и аналоговых интегральных схемах. КМОП-структуры, например, используются в процессорах современных компьютеров.

За счёт того, что полевые транзисторы управляются полем (величиной напряжения приложенного к затвору), а не током, протекающим через базу (как в биполярных транзисторах), полевые транзисторы потребляют значительно меньше энергии, что особенно актуально в схемах ждущих и следящих устройств, а также в схемах малого потребления и энергосбережения (реализация спящих режимов). Кроме того, при изготовлении интегральных схем на основе полевых транзисторов можно добиться высокой плотности расположения элементов, значительно выше (примерно на порядок), чем для биполярных транзисторов.

Примеры устройств, построенных на полевых транзисторах, — наручные кварцевые часы и пульт дистанционного управления для телевизора. За счёт применения КМОП-структур эти устройства могут

работать до нескольких лет, потому что практически не потребляют энергии.

В последние годы достигнуты успехи в создании мощных полевых транзисторов. Их применение в радиопередающих устройствах позволяет получить повышенную чистоту спектра излучаемых радиосигналов, уменьшить уровень помех и повысить надежность радиопередатчиков. В силовой электронике ключевые мощные полевые транзисторы успешно заменяют и вытесняют мощные биполярные транзисторы. В усилителях мощности звуковых частот высшего класса мощные полевые транзисторы успешно заменяют мощные электронные лампы, обладающие малыми нелинейными и динамическими искажениями.

Полевым (также униполярным, также **канальным**) транзистором называется трехэлектродный полупроводниковый прибор, в котором управление током осуществляется путем изменения толщины полупроводникового слоя, проводящего ток. Ток в полевом транзисторе протекает между омическими электродами, один из которых называется **истоком,** а второй – **стоком**. Полупроводниковый слой, по которому протекает ток, называется **каналом.** Ширина канала регулируется с помощью подачи внешнего смещения на третий электрод – **затвор.** Различают три основных типа полевых транзисторов. Это полевые транзисторы с **управляющим *p-n* переходом,** МОП-транзисторы (транзисторы с **изолированным затвором)** и транзисторы с **затвором Шоттки** (З Ш П-транзисторы). Различаясь конструктивно, все эти приборы имеют сходный принцип работы и схожие основные характеристики. Рассмотрим принцип работы полевого транзистора и его характеристики на примере транзистора с управляющим *p-n* переходом.

Устройство такого транзистора показано на рис. 1. Каналом в нем служит тонкий слой полупроводника *n* – типа, ограниченный с двух

сторон *p-n* переходами.

Транзистор на рис. 1. включен по наиболее часто встречающейся схеме «с общим истоком» - т.е. исток является общим электродом и для входной цепи (затвор-исток) и для выходной цепи (исток-сток).

Электрическое сопротивление канала $R_к$ зависит от его геометрических параметров: толщины W, ширины b и длины L, а также от его удельной электропроводности

$$R_к = \frac{L}{en\mu_n bW}. \qquad (1)$$

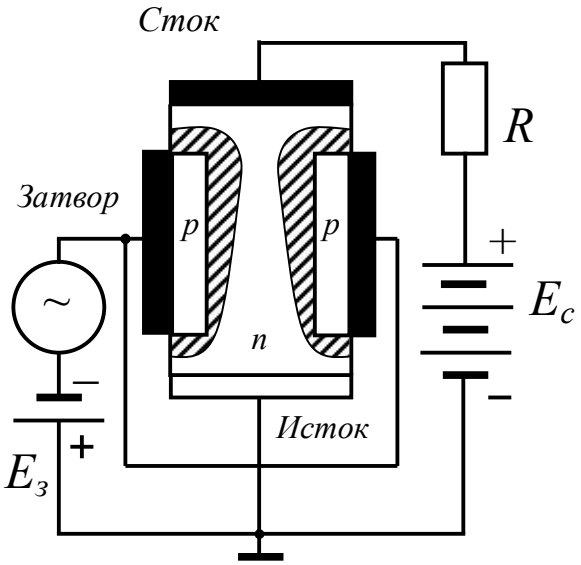


Рис. 1

Толщина канала W зависит от глубины проникновения в канал объемных зарядов *p-n* переходов затвора. Протекание тока в области объемных зарядов *p-n* переходов практически невозможно, т.к. в этой области отсутствуют свободные носители заряда, и она обладает большим электрическим сопротивлением (см. Введение). Прикладывая к затвору обратное напряжение, можно увеличивать глубину проникновения *p-n*

перехода в канал, тем самым уменьшать толщину канала и увеличивать его сопротивление.

В результате будет изменяться величина тока I_c, протекающего в цепи стока под действием приложенного к стоку напряжения V_c. На этом принципе и основано действие полевого транзистора.

Рассмотрим выходные характеристики полевого транзистора, определяющие зависимость тока I_c от напряжения V_c при заданном напряжении затвора $V_з$. Пусть $V_з = 0$. При подаче положительного напряжения на сток в канале возникает ток I_c, но при этом *p-n* переходы получат обратное смещение, их объемные заряды расширятся, а канал сузится. Чем ближе к стоку, тем больше смещение *p-n* переходов и тем тоньше в этом месте канал (рис. 1). При увеличении V_c выходной ток растет, но при этом одновременно уменьшается толщина канала, поэтому зависимость тока от напряжения не подчиняется закону Ома. Когда напряжение стока достигает некоторой величины $V_{сн}$, называемой **напряжением насыщения**, обедненные слои *p-n* переходов почти смыкаются вблизи стока. Однако полностью перекрыть канал, подавая напряжение только на сток, невозможно. Действительно, увеличение напряжения на стоке влечет за собой сужение канала и уменьшение тока стока, но это приводит к уменьшению падения напряжения на омическом сопротивлении канала (ф.1). Это, в свою очередь, приведет к уменьшению обратного смещения на *p-n* переходах, к расширению канала и росту тока. В результате такого автоматического регулирования установится определенная минимальная ширина канала, а ток стока I_c **достигнет насыщения** и дальше практически не будет расти (рис. 2).

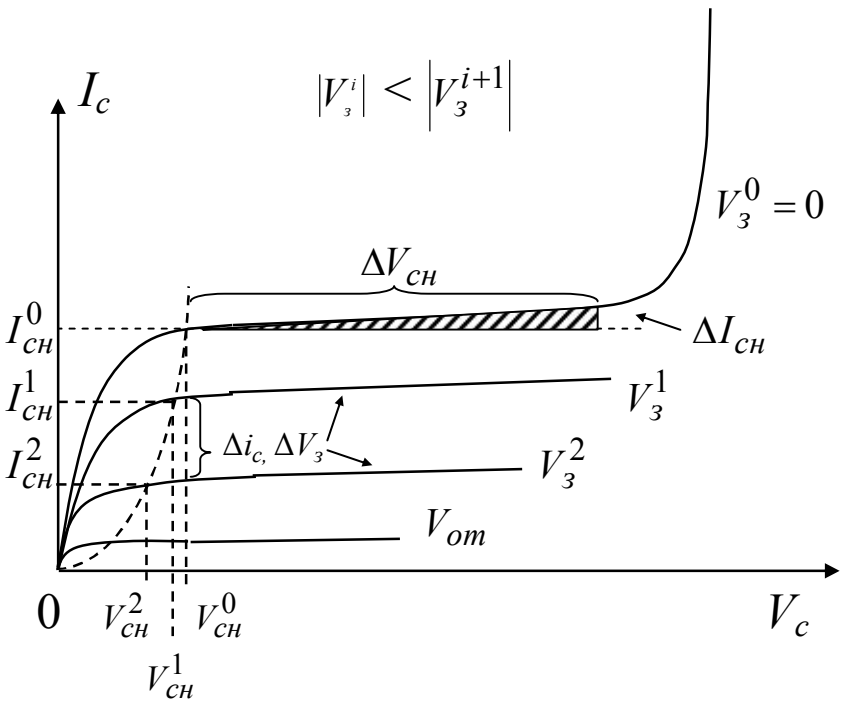


Рис. 2

При значительной величине V_c наступает пробой *p-n* перехода и ток в цепи сток-затвор лавинообразно нарастает.

Если на затвор подано обратное напряжение $V_з$, то насыщение наступает при меньшей величине напряжения на стоке. Величина тока насыщения $I_{сн}$ в выходной цепи при этом также оказывается меньшей. При обратном напряжении затвора $V_{от}$ канал практически перекрывается уже при V_c = 0. Это напряжение называется **напряжением отсечки.** Напряжение отсечки по абсолютной величине практически равно **напряжению насыщения $V_{сн}$ при нулевом напряжении на затворе транзистора**.

Для получения соотношения, описывающего выходную характеристику полевого транзистора, пренебрежем влиянием областей, расположенных между истоком и затвором и между стоком и затвором.

Структуру рабочей части полевого транзистора можно изобразить в виде (рис. 3):

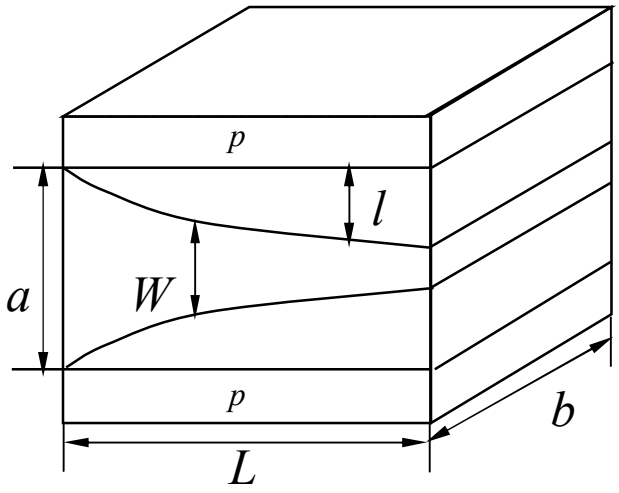


Рис. 3

Плотность тока в канале транзистора запишется как:

$$j_c = \sigma \frac{\partial \varphi}{\partial x}, \qquad (2)$$

где $\sigma = en\mu_n$ - проводимость канала. Ток стока – произведение плотности тока на поперечное сечение канала

$$I_c = S \cdot j_c = bW\sigma \frac{\partial \varphi}{\partial x} = b(a - 2l)\sigma \frac{\partial \varphi}{\partial x}, \qquad (3)$$

где $l \approx \beta\sqrt{\varphi + V_з}$ - толщина области объемного заряда *p-n* переходов затвора. При напряжении отсечки - в ситуации, когда канал полностью перекрыт, $2l = a$, т.е. $\frac{a}{2} = \beta\sqrt{V_{от}}$ и $\beta = \frac{a}{\sqrt{V_{от}}}$. Тогда для тока стока получим:

$$I_c = \sigma ba\left(1 - \sqrt{\frac{\varphi + V_з}{V_{от}}}\right) \cdot \frac{\partial \varphi}{\partial x}. \qquad (4)$$

Интегрируя уравнение (4) с граничными условиями: $\varphi = 0$ при $x = 0$ и $\varphi = V_c$ при $x = L$, получим зависимость тока стока полевого транзистора от напряжений на стоке и затворе:

$$I_c = \frac{1}{R_{к0}}\left[V_c + \frac{2}{3}\cdot\frac{V_з^{3/2} - (V_c + V_з)^{3/2}}{\sqrt{V_{от}}}\right], \qquad (5)$$

где $R_{к0} = \dfrac{L}{a \cdot b \cdot \sigma}$ - минимальное сопротивление канала транзистора, т.е. сопротивление полностью открытого канала (см. рис. 3). Уравнение (5) описывает выходную характеристику полевого транзистора до момента насыщения стокового тока. При насыщении $V_{от} = V_з + V_c$:

$$V_c = V_{сн} = V_{от} - V_з\,. \qquad (6)$$

Подставляя (5) в (6), получим для максимального значения тока

$$I_{сн} = \frac{1}{R_{к0}}\left(V_{от} - V_з + \frac{2}{3}\cdot\frac{V_з^{3/2} - V_{от}^{3/2}}{V_{от}^{1/2}}\right). \qquad (7)$$

На практике насыщение стокового тока в полевых транзисторах наступает даже несколько раньше, чем это предписывается формулами (5)–(7). На это имеются две основные причины. Во-первых - малые размеры каналов современных транзисторов. Вследствие этого в них реализуются сильные электрические поля, в которых уменьшается подвижность носителей заряда и растет сопротивление канала. Во-вторых, из канала будут экстрагироваться (вытягиваться) неосновные носители заряда – для рассмотренного нами транзистора это дырки. Уменьшение концентрации неосновных носителей приведет к уменьшению концентрации основных носителей – электронов, что также увеличит сопротивление канала.

Эффективность управляющего действия затвора в полевом транзисторе определяется крутизной стоко-затворной характеристики S

прибора (рис. 4). Поскольку рабочая точка для полевых транзисторов выбирается обычно на участке насыщения выходной характеристики, где управление максимально эффективно, то из (7) получим

$$S = \left| \frac{\partial I_{сн}}{\partial V_з} \right| = \frac{1}{R_{к0}} \left(1 - \sqrt{\frac{V_з}{V_{от}}} \right). \qquad (8)$$

Входное сопротивление полевого транзистора будет определяться сопротивлением обратно смещенного *p-n* перехода:

$$R_з = \frac{\partial U_з}{\partial I_з} = \frac{kT}{e} \frac{1}{I_з - I_{з0}}, \qquad (9)$$

где $I_{з0}$ - ток насыщения запертого *p-n* перехода затвора. На практике это сопротивление бывает порядка 10^5-10^6 *Ом*. Большое входное сопротивление является одним из достоинств полевого транзистора. Определение напряжения отсечки по стоко-затворной характеристике транзистора понятно из рис.4. Отметим, что для практических расчетов электронных схем на полевых транзисторах за напряжение отсечки можно принять напряжение $V'_з$, при котором ток стока составляет 10% от максимального значения.

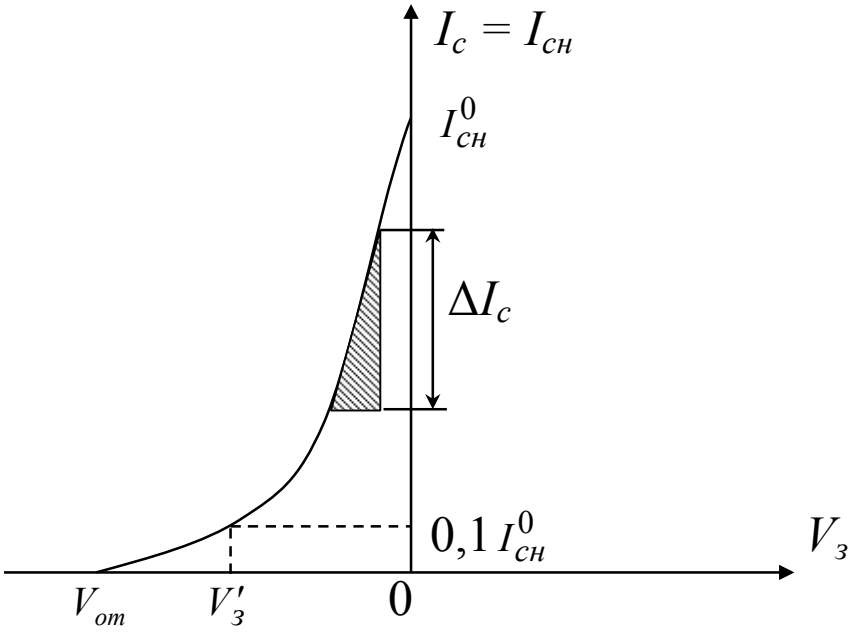


Рис. 4

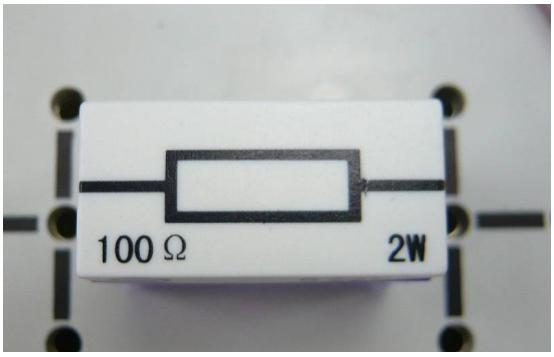
Температурная стабильность параметров полевых транзисторов значительно **лучше**, чем биполярных. Изменение параметров с температурой обычно не превосходят 0,01% на один градус. Зависимость параметров полевого транзистора от температуры обусловливается влиянием последней на подвижность носителей в канале и контактную разность потенциалов в *p-n* переходе. Влияние этих факторов на выходной ток транзистора противоположно. При повышении температуры контактная разность потенциалов и, следовательно, толщина *p-n* перехода уменьшаются, что приводит к расширению канала и увеличению выходного тока. С другой стороны, с ростом температуры падает подвижность носителей, что вызывает уменьшение выходного тока. В результате температурный коэффициент может быть положительным, отрицательным и даже нулевым.

Еще одним достоинством полевого транзистора являются существенно **меньшие токовые шумы.** Т.к. ток в канале переносится носителями одного знака (в рассмотренной конструкции – электронами),

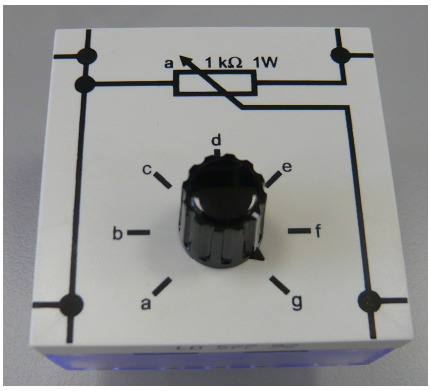
то в приборе отсутствует рекомбинация носителей заряда. В биполярном транзисторе процесс переноса неосновных носителей заряда через базовую область всегда сопровождается рекомбинацией. И хотя ее стараются свести к минимуму, уменьшая толщину базы, полностью исключить рекомбинацию нельзя. Процессы рекомбинации носят стохастический характер, что проявляется при эксплуатации биполярных транзисторов в виде токовых шумов.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

В работе используются электронные компоненты: резисторы различного номинала, потенциометры и полевой транзистор с управляющим p-n переходом. Основными измерительными приборами являются мультиметр и осциллограф.

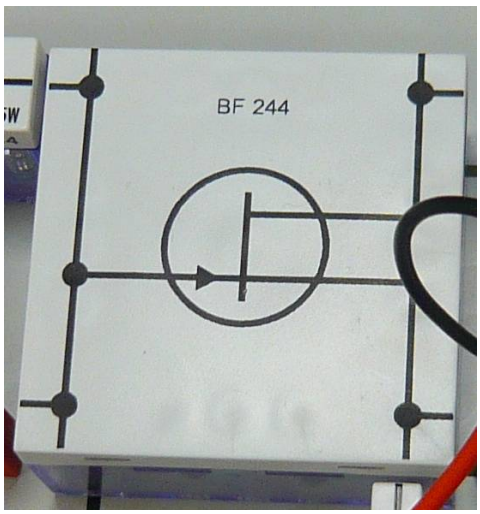


Резистор.



Потенциометр. Вращение по часовой стрелке увеличивает сопротивление.

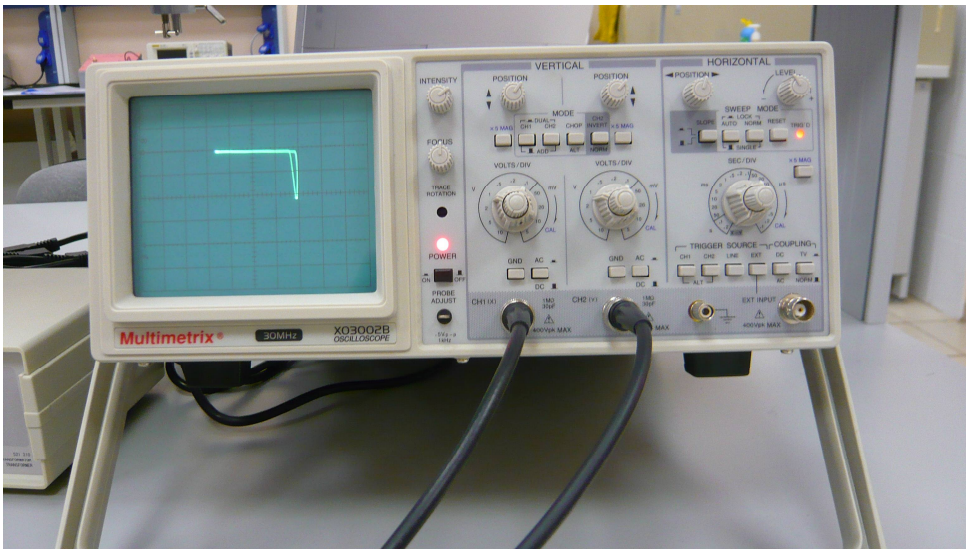
Диапазон 1Ом – 100 кОм.



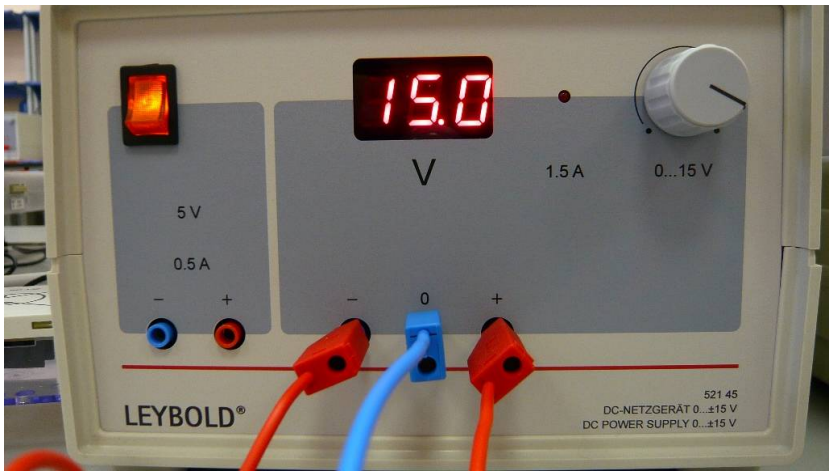
Полевой транзистор BF 244.

Соединительный контакт.

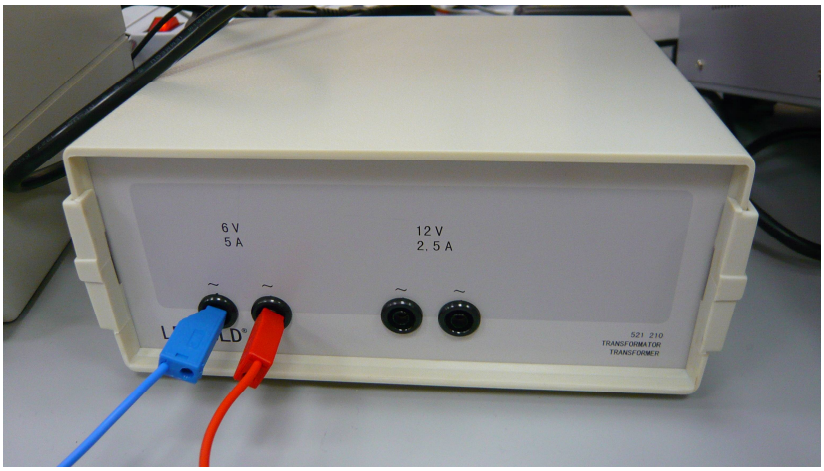
Мультиметр. Переключением верхнего тумблера можно переключаться между красной и черной шкалой



Осциллограф.



Источник питания 30 В.



Источник переменного напряжения.

Задание 1.

1. Соберите схему как показано на рис. 1-2. Покажите преподавателю. Включите источник питания. Напряжение источника питания плавно поднимите до значения 30 В.
2. Вращением ручки потенциометра (220 Ом) выведите напряжение $V_з$ на 0. Затем плавно изменяя сопротивление потенциометра (1 к Ом) снимите зависимость $I_c(V_c)$.

3. Вращением ручки потенциометра (220 Ом) выведите напряжение $V_з$ на -0.5 В. Затем плавно изменяя сопротивление потенциометра (1 к Ом) снимите зависимость $I_c(V_c)$.
4. Повторить пункт 3 для $V_з$= -1 В.
5. Занесите полученные значения в таблицу, постройте график $I_c(V_c)$ для различных $V_з$.
6. Задайте определенное значение V_c и вращением ручки потенциометра (220 Ом) снимите статическую стоко-затворную характеристику (характеристику управления) $I_c(V_з)$. Вычислить крутизну $S \approx \left(\Delta I_c / \Delta V_з \right)$, используя конечные приращения ΔI_c и $\Delta V_з$ на характеристике управления.
7. Выключите источник питания.

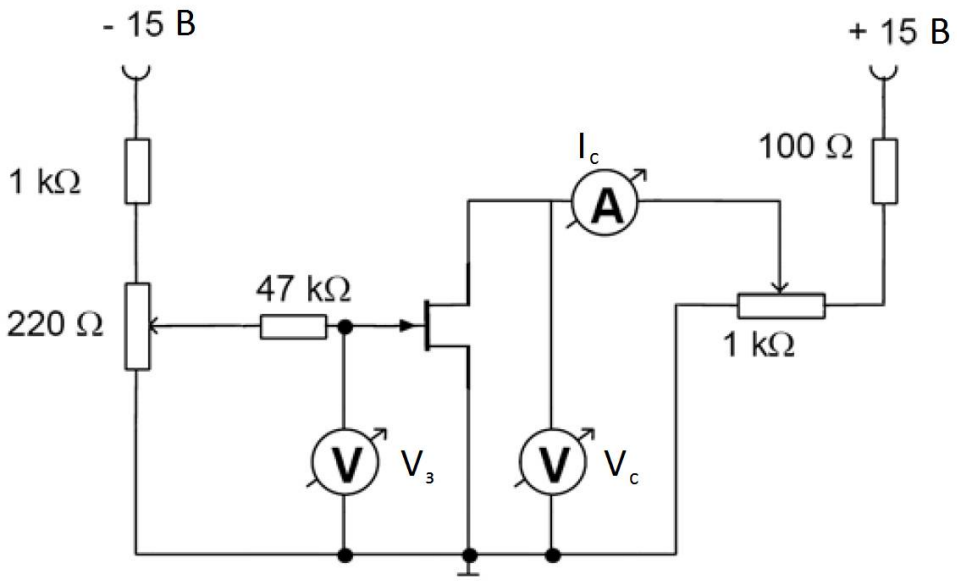


Рис. 1. Схема для измерения стоко-затворной характеристики полевого транзистора.

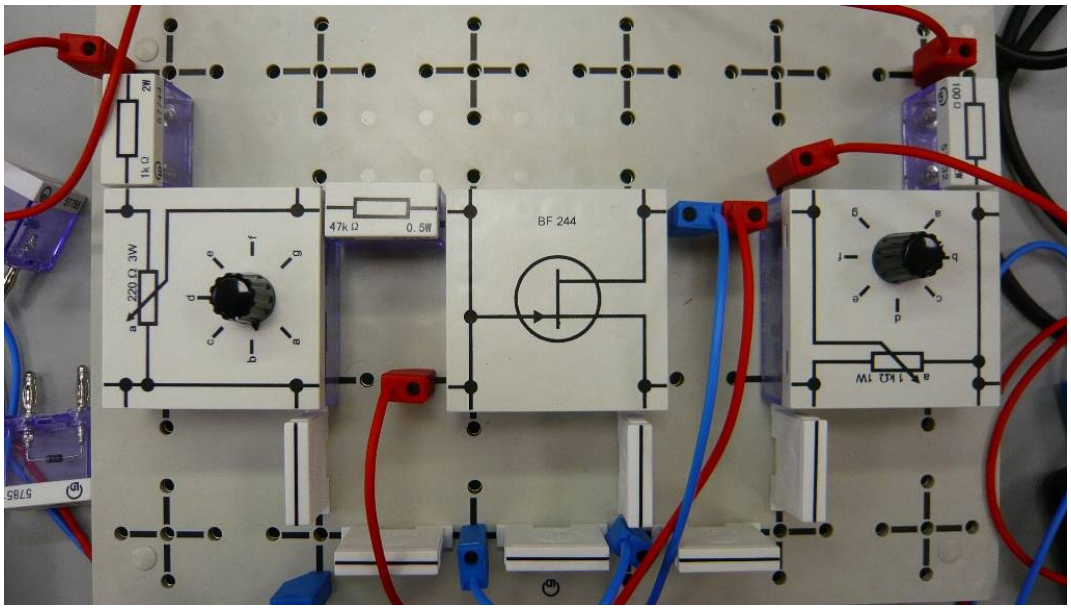


Рис. 2. Схема для измерения стоко-затворной характеристики полевого транзистора.

Задание 2.

1. Соберите схему как показано на рис. 3-4. Покажите преподавателю. Включите источник питания 5 В.
2. Включите осциллограф в режиме XY (правая ручка).
3. Затем плавно изменяя сопротивление потенциометра (1 к Ом) снимите на осциллографе зависимость $I_c(V_c)$ для различных $V_з$. Учтите, что напряжение V_c на осциллографе инвертировано.
4. Занесите полученные значения в таблицу, постройте график $I_c(V_c)$ для различных $V_з$. Сравните с данными, полученными в задании 1.

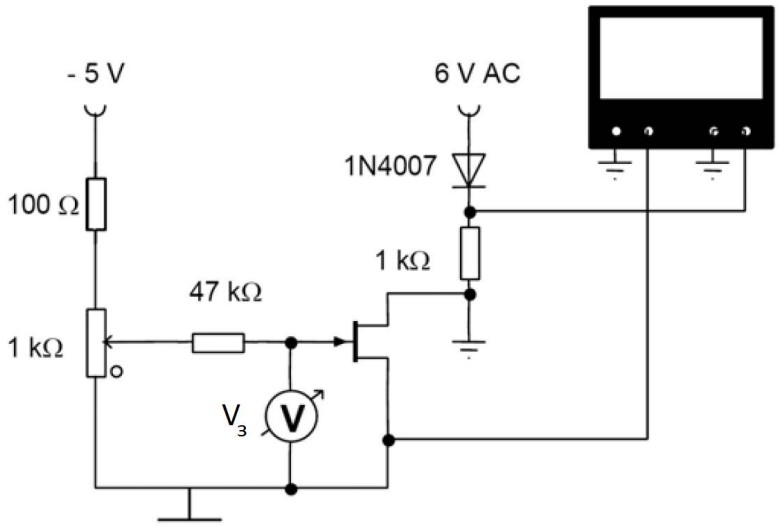


Рис. 3. Схема для измерения стоко-затворной характеристики полевого транзистора для переменного сигнала.

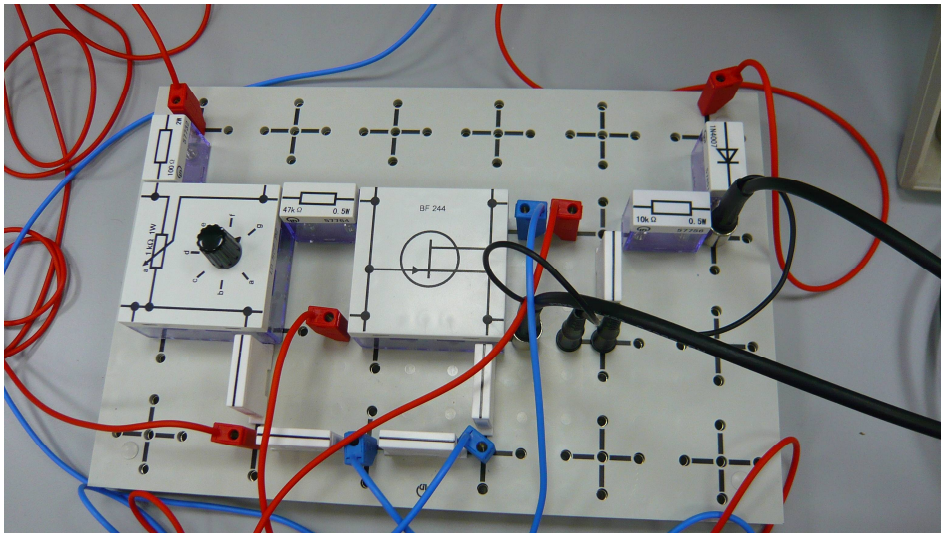


Рис. 4. Схема для измерения стоко-затворной характеристики полевого транзистора для переменного сигнала.

Контрольные вопросы.

1. Что представляют собой полупроводники p и n-типа?
2. Что представляет собой p-n переход?
3. Объясните принцип работы полевого транзистора.
4. Объясните поведение стоко-затворной характеристики полевого

транзистора.

5. Почему полевой транзистор обладает меньшими и более термостабилен шумами по сравнению с биполярным?

Список рекомендуемой литературы

1. Пасынков В.В., Чиркин Л.К., Шинков А.Д. Полупроводниковые приборы. М.: Высшая школа, 1973.
2. Епифанов Г.Н., Мома Ю.А. Твердотельная электроника. М.: Высшая школа, 1986.
3. Тугов Н.М., Глебов Б.А., Чарыков Н.А. Полупроводниковые приборы. М.: Энергоатомиздат, 1990.
4. Парфенов В.В., Закиров Р.Х. Физика полупроводников: Методич. пособие к практикуму по физике твердого тела. Казань: Изд-во КГУ, 2001.
5. Игнатов, Фадеева, Савиных: Классическая электроника и наноэлектроника. М.: ФЛИНТА: Наука, 2009.

РЕЦЕНЗИЯ

на учебно-методическое пособие Парфенова В.В., Янилкина И.В.

«Изучение работы полевого транзистора»

В учебно-методическом пособии «Изучение работы полевого транзистора» рассмотрены физические основы работы униполярного (полевого) транзистора на примере транзистора с управляющим p-n переходом. Подробно рассмотрены выходная и стоко-затворная характеристики прибора, выведены основные формулы, описывающие эти характеристики. Приведено качественное описание некоторых других, важных с эксплуатационной точки зрения свойств полевых транзисторов – термостабильности и характеристики сигнал-шум. После изложения теоретических основ подробно рассмотрена методика измерения выходной и стоко-затворной характеристик прибора в статическом и динамическом режимах на лабораторном макете. В конце пособия приведены контрольные вопросы и список литературы. Пособие написано хорошим научным языком, в достаточной мере иллюстрировано. Считаю, что методическое пособие «Изучение работы полевого транзистора» может быть опубликовано в электронном виде на университетском сайте и использовано для студентов, обучающихся по направлениям бакалавриата 03.03.02 «Физика» и 28.03.01 «Нанотехнологии и микросистемная техника» при выполнении лабораторных работ по дисциплинам «Физика магнитных материалов и полупроводников», «Физика конденсированного состояния», «Физические основы микро- и наносистемной техники».

Рецензент:

кандидат физ.-мат. наук, доц. кафедры радиофизики К(П)ФУ

Тюрин В.А.

ВЫПИСКА ИЗ ПРОТОКОЛА № 2 ЗАСЕДАНИЯ КАФЕДРЫФИЗИКИ ТВЕРДОГО ТЕЛА ОТ 19.09.2016 Г.

ПРИСУТСТВОВАЛИ:

зав. каф. д.ф.-м.н., проф. Тагиров Л.Р., к.ф.-м.н., доцент Болтакова Н.В., д.ф.-м.н., проф. Парфенов В.В., д.ф.-м.н., проф. Садыков Э.К., ассистент Пятаев А.В., ассистент Янилкин., научн. сотрудник Усеинов Н.Х., инж. Закиров Р.Х., инж. Хуснутдинова Г.М.

СЛУШАЛИ:

проф. Парфенова В.В. о подготовленных коллективом авторов (Парфенов В.В., Янилкина И.В.) методических пособиях к лабораторным работам к практикуму «Физика конденсированного состояния».

ПОСТАНОВИЛИ:

Рекомендовать к опубликованию в электронном варианте методические пособия к лабораторным работам к практикуму «Физика конденсированного состояния»:

1. Изучение работы биполярного транзистора.
2. Изучение работы полевого транзистора.

ГОЛОСОВАЛИ: единогласно.

Секретарь Хуснутдинова Г.М.

Завед. кафедрой Тагиров Л.Р.