

УДК:537

ББК:22.3с

## **Изучение элементов транзисторной электроники в элективном курсе физики**

**Пеньков Василий Сергеевич**

Студент, Ульяновский государственный педагогический Университет имени И.Н. Ульянова

г. Ульяновск, Россия

**Аннотация.** Рассматриваются вопросы актуальности транзисторной электроники, приведены примеры новейших транзисторов, рассмотрена историческая справка. В качестве основы работы транзисторов рассмотрен р-п переход. Исследованы принципы работы транзисторов, результат одного исследования рассмотрен в данной статье. Рассматриваются Интегральные схемы, в основе которых лежат транзисторы, а также их актуальность. Разработано методическое пособие, говорится о темах, включенных в данную разработку. Говорится о новейших разработках в области микроэлектроники.

**Ключевые слова.** Интегральные схемы, транзистор, р-п переход, усилительные свойства

Транзисторная электроника является одно из самых важных и актуальных научных направлений в полупроводниковой электронике. Интегральные схемы (ИС) широко используются во всех областях каждой промышленности, науки и техники, к примеру, рекламная отрасль. Ведь вся техника, которую мы используем фактически любое техническое устройство, любая установка в современном мире работают на микросхемах. Одним из основных активных элементов ИС является транзистор.

Транзисторный эффект, в общем случае, заключается в усилении выходного электрического сигнала. Как реализуется этот эффект и какие

принципиальные возможности открываются при его использовании?. На самом деле, эффект усиления наиболее ярко проявляется в полупроводниковых транзисторах. Полупроводниковые приборы (диоды и транзисторы) благодаря малым габаритам и массе, незначительному потреблению электроэнергии, высокой надежности широко применяются в различной аппаратуре.

Транзисторный эффект называют еще усилительным, и не только по причине его проявления в транзисторах. Усиление, в самом общем смысле, подразумевает получение такого состояния системы, которое было бы более энергетически насыщенным, чем предыдущее. Каждое последующее состояние должно быть энергетически более выгодным за счет использования преимуществ электромагнитных эффектов, протекающих в системе, которые позволяют получить энергетическую выгоду усиления.

Срок службы полупроводниковых транзисторов и их экономичность во много раз больше, чем у электронных ламп. За счёт чего транзисторы нашли широкое применение в микроэлектронике и ее важнейшего направления в вычислительной технике

Основные материалы, из которых состоят транзисторы-кремний и германий, перспективные-арсенид галлия, сульфид цинка и широко зонные проводники.

Термин усиление образовался из термина управление. Именно управление было обнаружено в 19 веке и не в полупроводниках. Пример такого управления-реле.

Реле — электромагнитный переключатель, который включается с помощью электромагнитной катушки с ферромагнитным сердечником и широко используется даже в настоящее время.

Приборы, в которых реализуются принципы передачи, усиления и обработки сигналов, берут начало от вакуумных ламп. Физические процессы в них не похожи на те, которые имеют место в полупроводниковых приборах. Хотя механизмы аналогичны, но не эквивалентны.

Электронные лампы обладали существенными недостатками:

- высоким энергопотреблением;
- большими габаритами;
- высокими требованиями к обеспечению вакуума.

В связи с этим перед разработчиками радиоэлектронной аппаратуры стояли проблемы микроминиатюризации РЭА, снижения энергопотребления и уменьшения габаритов.

Эти проблемы были решены заменой вакуумных приборов изделиями полупроводниковой электроники, в частности, полупроводниковый транзистор был изобретен в середине прошлого века, что дало толчок бурного развития транзисторной электроники.

Работа приборов транзисторной электроники основаны на физических свойствах р-п перехода.

Р-п переход – это зона контакта полупроводников с различным типом примесной проводимости

При образовании р-п перехода наблюдается интенсивная диффузия электронов из п-области в р-область и встречная диффузия дырок из р-области в п-область. В результате р-область в зоне контакта заряжается отрицательно, п-область – положительно, и образуется двойной электрический слой шириной  $L$ , электрическое поле которого препятствует диффузии основных носителей тока через зону контакта. Концентрация основных носителей тока в зоне контакта вследствие диффузии и рекомбинации уменьшается, поэтому важную роль в формировании двойного слоя имеют не скомпенсированные заряды, заряды ионизированных атомов примесей.

Для основных носителей электрическое поле перехода не является препятствием, и они, случайно дрейфуя, через р-п переход создают ток, противоположный диффузионному. Динамическое равновесие наступает при установлении такой напряженности поля двойного слоя, когда суммарный

ток всех зарядов через р-п переход равен нулю, при этом на границе контакта образуется потенциальный барьер. [1]

Транзисторная электроника развивается на основе использования биполярных и полевых транзисторах.

Биполярный транзистор состоит из двух р-п переходов. Основная часть транзистора, именуемая базой, представляет собой легированный примесью кристалл полупроводника малой толщины, к которому с двух сторон примыкают области с другим типом проводимости – эмиттер и коллектор. В приближенных теориях транзистор рассматривают как совокупность двух диодов, включенных навстречу друг другу.

На практике транзисторы используются как усилители по силе тока, напряжения и мощности.

В схеме с общей базой (рис. 1) в выходной цепи (коллекторной) практически проходит тот же ток, что и во входной (эмиттерной), т. е. усиление по току в данном случае отсутствует.

Однако эта схема дает усиление по напряжению, а следовательно, и по мощности ( $P=IU$ ). Чтобы понять принцип усиления мощности в транзисторе, надо учесть взаимодействие носителей заряда с электрическим полем.

В схеме с общим эмиттером входной цепью является цепь базы. Так как ток базы существенно меньше тока эмиттера, можно получить и усиление по току. Изменяя ток через вывод базы, меняем количество основных носителей в области базы, т. е. заряд базы, и, следовательно, потенциальный барьер между эмиттером и базой. Изменение высоты потенциального барьера вызывает соответствующую инжекцию неосновных носителей заряда. Большинство инжектированных носителей доходит до коллекторного перехода, изменяя его ток. В этом и заключается усиление по току в схеме с общим эмиттером. Усиление по мощности в данном случае объясняется аналогично усилению в схеме с общей базой.

В схеме с общим коллектором выходной цепью является эмиттерная, входной — цепь базы. В связи с тем, что ток эмиттера приблизительно равен току коллектора, здесь тоже имеет место усиление по току и по мощности. [2]

Ниже приведены описанные схемы включения биполярных транзисторов (рис. 1).

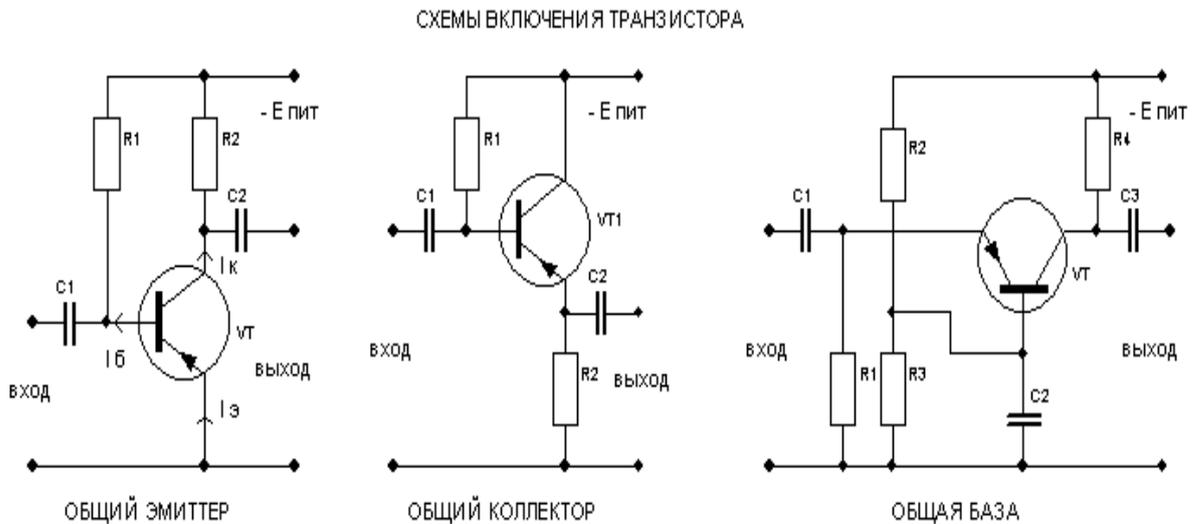


Рис. 1

#### Схемы подключения биполярного транзистора

Связь между коллекторным и эмиттерным токами можно записать в виде:

$$I_k = \alpha I_\varepsilon, \quad (1)$$

где  $\alpha$  - коэффициент усиления эмиттерного тока, один из основных параметров транзистора

Чтобы установить связь между током коллектора и током базы,

$$I_k = \beta I_\delta, \quad (2)$$

где  $\beta$  — коэффициент усиления базового тока:

$$\beta + \frac{\alpha}{(1-\alpha)} \quad (3)$$

Этот параметр, широко используемый в транзисторной электронике, особенно удобен тогда, когда задан ток базы, прежде всего в схеме ОЭ

$$Y = \frac{I_{эн}}{I_э} \quad (4)$$

$Y$ - коэффициент инжекции. Он характеризует долю полезной электронной составляющей в общем токе эмиттера. Только эта составляющая, как уже отмечалось, способна дойти до коллектора и составить коллекторный ток.

Полевой транзистор — это полупроводниковый прибор, усилительные свойства которого обусловлены потоком основных носителей, протекающим через проводящий канал и управляемым электрическим полем.

Полевой транзистор с управляющим р-п-переходом имеет два омических перехода к области полупроводника, по которой проходит управляемый или регулируемый поток основных носителей заряда, и один или два управляющих р-п-перехода, смещенных в обратном направлении. При изменении обратного напряжения на управляющем р-п-переходе изменяется его толщина, а следовательно, толщина области, по которой

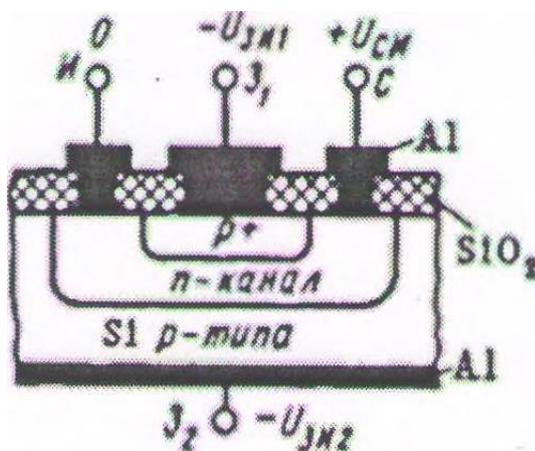


Рис 2 Структура полевого транзистора.

проходит управляемый поток основных носителей заряда. Область в полупроводнике, в которой регулируется поток основных носителей заряда, называют проводящим каналом. Электрод полевого транзистора, через который в проводящий канал входят носители заряда, называют истоком. Электрод полевого транзистора, через который из канала выходят носители заряда, называют стоком. Электрод полевого транзистора, на который

подают сигнал, называют затвором. Проводящий канал может иметь электропроводность как n, так и p-типа.

Соответственно различают полевые транзисторы с n-каналом и p-каналом.

Все полярности напряжений смещения, подаваемых на электроды полевых транзисторов с n и p-каналом, противоположны. Управление током стока, т. е. током от внешнего относительно мощного источника питания в цепи нагрузки, происходит при изменении обратного напряжения на p-n-переходе затвора (или на двух p-n-переходах одновременно). В связи с малостью обратных токов мощность, необходимая для управления током стока и потребляемая от источника сигнала в цепи затвора, оказывается ничтожно малой. Поэтому полевой транзистор может обеспечить усиление электрических сигналов как по мощности, так и по току и напряжению.

Полевой транзистор с изолированным затвором — это транзистор, имеющий один или несколько затворов, электрически изолированных от проводящего канала. В кристалле полупроводника с относительно высоким удельным сопротивлением, который называют подложкой, созданы две сильнолегированные области с противоположным типом электропроводности. На эти области нанесены металлические электроды — исток и сток. Расстояние между сильнолегированными областями истока и стока может составлять всего несколько микрометров. Поверхность кристалла полупроводника между истоком и стоком покрыта тонким (порядка 0,1 мкм) слоем диэлектрика. На слой диэлектрика нанесен металлический электрод — затвор. Получается структура, состоящая из слоя металла, диэлектрика и полупроводника, т. е. МДП- структура. Структура полевых транзисторов (МДП транзисторов) изображена на рис. 3.

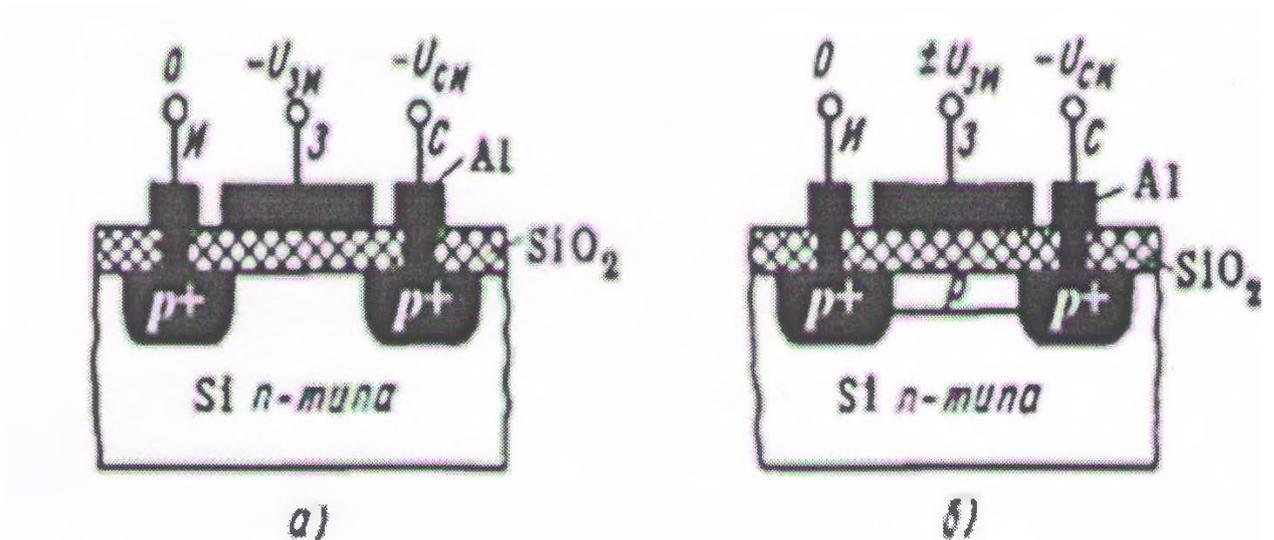


Рис. 3. Структура МДП транзисторов

А) с индуцированным каналом Б) со встроенным каналом

Существуют две разновидности МДП-транзисторов: с индуцированным каналом и со встроенным каналом.

В МДП-транзисторах с индуцированным каналом (рис. 3, а) проводящий канал между сильнолегированными областями истока и стока и, следовательно, заметный ток стока появляются только при определенной полярности и при определенном значении напряжения на затворе относительно истока, которое называют пороговым напряжением. В МДП-транзисторах со встроенным каналом (рис. 3, б) у поверхности полупроводника под затвором при нулевом напряжении на затворе относительно истока существует инверсный слой -канал, который соединяет исток со стоком.

Изображенные на рис. 3 структуры полевых транзисторов с изолированным затвором имеют подложку с электропроводностью n-типа. Поэтому сильнолегированные области под истоком и стоком, а также индуцированный и встроенный канал имеют электропроводность p-типа. Если же аналогичные транзисторы созданы на подложке с электропроводностью p-типа, то канал у них будет иметь электропроводность n-типа. [4]

Исследования усилительных свойств нами произведено измерение серии транзисторов разного типа.

Целью данного исследования являлось проверка входных и выходных характеристик транзистора, а также нахождение коэффициентов усиления, таким образом ход исследования включает следующие этапы:

- 1.Изменяя входное напряжения, снимается зависимость базового тока от напряжения.
2. Изменяя напряжение коллектора снимается зависимость коллекторного тока от напряжения коллектор-эмиттер
3. По данным измерения построены входные и выходные характеристики транзистора.
- 4.Определить по характеристикам транзисторов коэффициенты усиления.

В качестве исследуемого транзистора был выбран 2N3932,использовалась схема с общим эмиттером

Таблица№1: Зависимость тока базы от напряжения база-эмиттер

$I_b, \text{мкА}$	$U_{бэ}, \text{мВ}$	
	$U_{кэ}=0\text{В}$	$U_{кэ}=10\text{В}$
0	0	0,011
1	329,9	454.4
2	353.2	480.9
5	379.9	508.9
10	398.8	528.2
20	417	546.8
50	441.2	570.9
100	459.3	589

200	477.2	607
-----	-------	-----

Таблица №2:зависимость тока коллектора от напряжения коллектор-эмиттер

Uкэ,В	Iб=50мкА	Iб=100мкА	Iб=150мкА	Iб=200мкА
	Iк,мА	Iк,мА	Iк,мА	Iк,мА
0	-0,049	-0,098	-0,148	-0,198
0,1	1,46	2,64	3,64	4,53
0,2	4,67	7,75	10,22	12,34
0,5	4,92	8,14	10,71	12,91
1	4,95	8,18	10,76	12,97
2	5	8,26	10,87	13,11
5	5,15	8,51	11,19	13,49
15	5,64	9,32	12,27	14,79

В результате проведенных исследований были вычислены коэффициенты  $h_{12}$ -обратной связи, коэффициент  $h_{21}$ -передачи тока составили 0,013 и 60 соответственно.

Произведенные исследования усилительных свойств различных транзисторов, позволили выявить оптимальные режимы работы транзисторов для усиления различных параметров тока, мощности и напряжения.

В современной микроэлектронике, как правило, транзисторы используются в составе интегральных схем.

Интегральная схема - это совокупность большого количества взаимосвязанных компонентов (транзисторов, резисторов, диодов) изготовленных в едином технологическом цикле. Главный тип интегральных схем в настоящее время-полупроводниковые. В основе полупроводниковых

интегральных схем лежит транзистор, при изготовлении на него ориентируется весь технологический цикл [3].

Интегральные схемы широко используются в любых сферах жизни человеческого общества. Например, любое музыкальное оборудование не в сила воспроизвести звук без микросхемы обработки звука. Ведь все аудиозвуки должны обрабатываться в определенном порядке так, чтобы окружающие воспринимали качественный звук. Такая же ситуация обстоит и с микросхемами памяти. Например, цифровые фотоаппараты, видеокамеры и другие записывающие устройства. (видеодомофоны, диктофоны), различная вычислительная техника др.

В 21 веке развитие микроэлектроники не стоит на месте. К примеру, команда биоинженеров в Стэнфордском университете создала логический элемент из генетического материала, который получил название биологический транзистор.

Командой исследователей из Нового Университета Лиссабона разработан способ использования бумаги в качестве элемента полевого транзистора. Ученым удалось изготовить устройства на обеих сторонах бумаги, что позволило бумаге работать одновременно в качестве основания и изолятора. Разработка является серьезным шагом вперед в области создания тонких экранов. При этом «бумажные транзисторы» крайне дешевые в производстве. Еще в начале 21 века создан транзистор состоящий из одного электрона, который теперь является элементом в интегральных схемах с более мощными транзисторами.

По результатам проведенных исследований и в связи с актуальностью современной транзисторной электроники было разработано методическое пособие элективного курса для старшеклассников.

Разработанное методическое пособие для старшеклассников включает основные сведения о собственной и примесной проводимости полупроводников, физические основы работы р-п перехода, а также

рассмотрены различные виды транзисторов и их схемы включения, и результаты экспериментальных исследований по усилительным свойствам транзисторов.

Для старшеклассников разработанный элективный курс является полезным и актуальным, поскольку каждый из них, повседневно, использует компьютер, телефон, планшет и другую вычислительную технику. В основе всех выше перечисленных устройств лежат ИС.

#### **Список литературы.**

1. Зайцев, А.А.; Миркин, А.И.; Моряков, В.В. и др. Полупроводниковые приборы. Транзисторы малой мощности Справочник; М.: Радио и связь, 2012. - 393 с.
2. Петухов, В.М. Полевые и высокочастотные биполярные транзисторы средней и большой мощности и их зарубежные аналоги. Справочник; М.: ИП РадиоСофт, 2015. - 388 с.
3. Степаненко И.И. «Основы микроэлектроники». М.: Изд-во Лаборатория базовых знаний, 2003 г.
4. Янсен, Й. Курс цифровой электроники; - , 2015. – 278