

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РФ
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«ТОМСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ И РАДИОЭЛЕКТРОНИКИ» (ТУСУР)

Мальчуков А.Н.

ЭЛЕКТРОНИКА И СХЕМОТЕХНИКА. ЧАСТЬ 1

Лабораторный практикум
по курсу «Электроника и схемотехника»
для студентов, обучающихся по направлениям
10.05.02 – «Информационная безопасность телекоммуникационных систем»,
10.05.03 – «Информационная безопасность автоматизированных систем»,
10.03.01 – «Информационная безопасность»

УДК 621.38.

ББК 32.85/32.844.

Электроника и схемотехника: методические указания к выполнению цикла лабораторных работ по курсу «Электроника и схемотехника» для студентов, обучающихся направлениям 10.05.02 – «Информационная безопасность телекоммуникационных систем», 10.05.03 – «Информационная безопасность автоматизированных систем» и 10.03.01 – «Информационная безопасность». – 79 с.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №1 «ИССЛЕДОВАНИЕ ВЫПРЯМИТЕЛЬНОГО ДИОДА»

Цель работы: исследование основных характеристик полупроводникового выпрямительного диода.

МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ

1. Полупроводники и p-n переход

Материалы, удельное сопротивление которых больше удельного сопротивления проводников, но меньше удельного сопротивления диэлектриков, относят к полупроводникам. Для сравнения, проводники имеют удельное сопротивление 10^{-6} - 10^{-8} Ом*м, изоляторы имеют удельное сопротивление 10^8 - 10^{13} Ом*м, а полупроводники имеют удельное сопротивление 10^{-5} - 10^7 Ом*м. Обычно это кристаллический материал с неширокой (0,5-3 эВ) запрещенной зоной. В электронике в качестве полупроводников часто используют такие материалы как германий, кремний, селен, арсенид галлия и другие. Вследствие малой ширины запрещенной зоны полупроводника тепловые колебания атомов способны сообщить валентным электронам энергию, достаточную для перехода из заполненной валентной зоны в свободную зону проводимости. Каждый такой переход приводит к возникновению пары носителей заряда: свободного электрона в зоне проводимости и свободного энергетического состояния (дырки) в валентной зоне. Генерация пар свободных (способных перемещаться под действием приложенного напряжения) зарядов делает кристалл способным проводить электрический ток, а электропроводность такого кристалла называется собственной. Химически чистые полупроводники имеют собственную электропроводность и небольшую проводимость. Заметим, что электропроводность – это способность проводить электрический ток посредством чего-либо, то есть величина качественная, а проводимость – величина количественная.

Полупроводник n-типа – полупроводник с преобладающей электронной электропроводностью, которая возникает при добавлении донорных примесей, например, примеси пятивалентного фосфора к четырехвалентному кремнию. Атом примеси при этом ионизируется, добавляя электрон к электронам собственной электропроводности.

Полупроводник p-типа с преобладающей дырочной электропроводностью образуется при добавлении к химически чистому полупроводнику акцепторных примесей, например, при добавлении трехвалентного индия к четырехвалентному кремнию. Атом примеси ионизируется, принимая электрон от соседнего атома и добавляя тем самым дырку к дыркам собственной электропроводности. Электропроводность, возникающую за счет примесных атомов, называют примесной. Примесные полупроводники называются легированными.

При температуре 50-70° С почти все атомы примесей ионизируются и проводимость примесного полупроводника существенно возрастает. Несмотря на возникновение только одного типа электропроводности: или *n*-типа, или *p*-типа, примесные полупроводники являются электрически нейтральными, так как заряды ионов скомпенсированы зарядами основных носителей заряда – электронов в *n*-области и дырок в *p*-области полупроводника. Дырки в *n*-полупроводнике или электроны в *p*-полупроводнике называются неосновными носителями зарядов. Заметим, что ионы примесных атомов связаны кристаллической решеткой и не могут перемещаться под действием внешнего электрического поля.

Существуют полупроводники, состоящие из двух областей. Одна область имеет электронную электропроводность, а другая – дырочную электропроводность. Переход между двумя областями полупроводника с разными типами электропроводности называется электронно-дырочным или *p-n*-переходом (рис. 1).

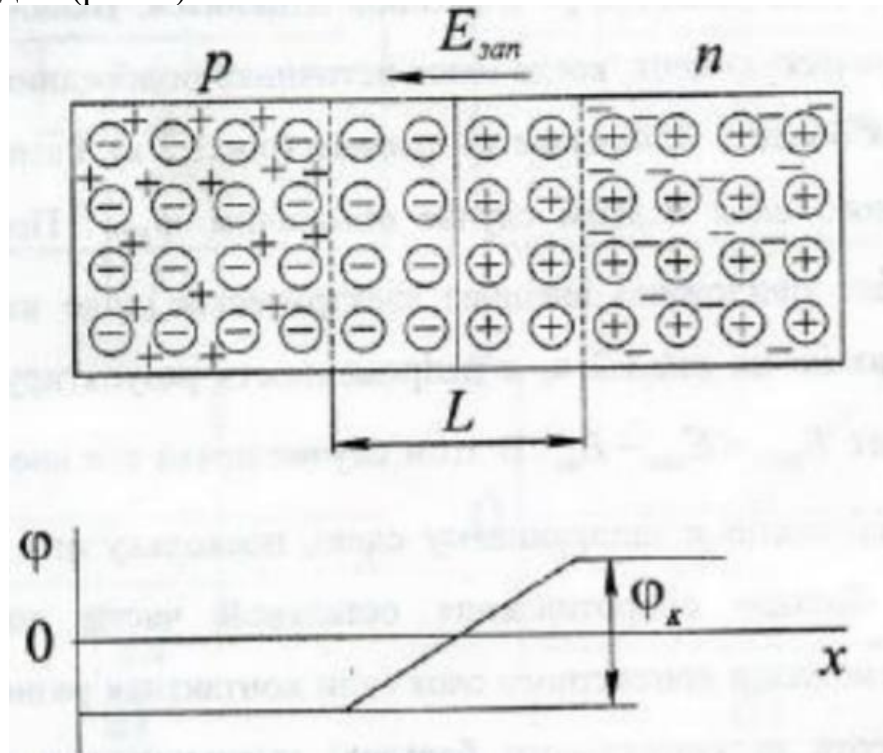


Рисунок 1. Электронно-дырочный переход и контактная разность потенциалов

Сразу же после создания в полупроводнике *p*- и *n*-областей начинается диффузия (диффузионный ток) основных носителей заряда. Диффузия дырок происходит из *p*-области в *n*-область, а диффузия электронов в обратном направлении. Встречаясь, дырки и электроны рекомбинируют, при этом вблизи граничной плоскости (где соприкасаются *p*-область и *n*-область) образуются два слоя: *n*-область приобретает нескомпенсированный положительный заряд (слой нескомпенсированных положительных ионов), а *p*-область приобретает нескомпенсированный отрицательный заряд (слой нескомпенсированных отрицательных ионов). Поскольку ионы примесных атомов связаны кристаллической решеткой, то перемещаться они не могут.

Между двумя разноименно заряженными слоями возникает электрическое поле $E_{зап}$, направленное от n -области к p -области, и называемое запирающим. Напряженность этого поля препятствует диффузии дырок и электронов (диффузионному току). Чем больше нескомпенсированных ионов, тем выше напряженность электрического поля. При некотором значении напряженности диффузионный ток прекратится. Этому значению напряженности соответствует определенная контактная разность потенциалов ϕ_K и определенная ширина слоя L , в котором рекомбинировали подвижные носители зарядов.

Немного дополним общую картину. В p -области и n -области существуют еще и неосновные носители зарядов. Под действием напряженности поля $E_{зап}$ неосновные носители начнут дрейфовать навстречу диффундирующим зарядам, возникает дрейфовый ток, направленный навстречу току диффузии. Величина дрейфового тока мала, так как мала концентрация неосновных носителей заряда. Динамическое равновесие наступит при равенстве диффузионного и дрейфового токов. При этом слой L сильно обеднен свободными носителями заряда, хотя и не лишен их полностью. С приближением к граничной плоскости обеднение слоя L носителями зарядов будет все более выраженным. Ширина обедненного слоя связана с контактной разностью потенциалов, которая в свою очередь, зависит от выбора материалов и концентрации примесей. Чем выше контактная разность потенциалов, тем шире обедненный слой. У германия и кремния контактная разность потенциалов составляет десятые доли вольта ($\sim 0,3$ В и $\sim 0,6$ В соответственно), а ширина обедненного слоя - десятые и сотые доли микрометра. Если к p - n -переходу подключить источник ЭДС, на клеммах которого будет напряжение U , то разность потенциалов на границах контактного (обедненного) слоя областей p - и n -типов изменится. Включение p - n -перехода в электрическую цепь, когда плюс источника подсоединяется к области p , а минус - к области n , называется прямым (рис. 2а), Разность потенциалов контактного слоя в этом случае обозначим $\phi_{КП}$. При этом к p - n -переходу будет приложено внешнее электрическое поле напряженностью $E_{вн}$, как показано на рис. 2 а, и напряженность результирующего поля в переходе будет $E_{рез} = E_{зап} - E_{вн}$. В этом случае почти все внешнее напряжение будет приложено к запирающему слою, поскольку его сопротивление значительно больше сопротивления остальной части полупроводника. Разность потенциалов контактного слоя (или контактная разность потенциалов, или высота потенциального барьера) уменьшится и станет равной $\phi_{КП} = \phi_K - U$, ширина его также уменьшится. Дрейфовый ток снизится, а диффузионный ток возрастет, в результате чего динамическое равновесие нарушится и возникнет ток через p - n -переход. Этот ток называют прямым током, он совпадает с диффузионным.

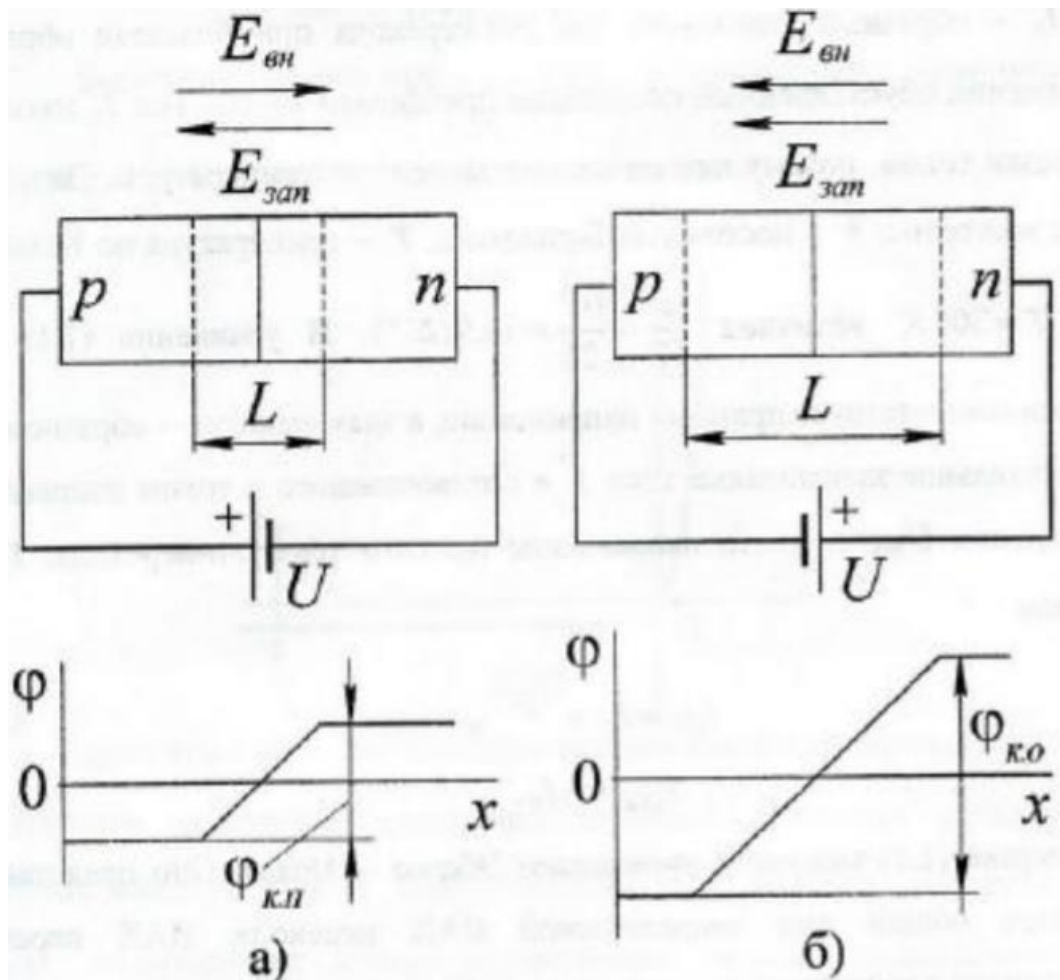


Рисунок 2. Прямое (а) и обратное (б) включения р-п-перехода

Включение, при котором к области р подсоединен минус источника, а к области n - плюс, называется обратным (рис. 2б). Соответствующую разность потенциалов контактного слоя в этом случае обозначим $\phi_{ко}$. При этом $E_{рез} = E_{зпн} + E_{вн}$. Разность потенциалов контактного слоя увеличится и станет равной $\phi_{ко} = \phi_{кп} + U$, ширина его также увеличится. Диффузионный ток уменьшится из-за противодействия электрического поля в запирающем слое. Дрейфовый ток увеличится благодаря увеличению разности потенциалов контактного слоя. Результирующий ток называют обратным, он совпадает с дрейфовым током. Напомним, что диффузионный ток создается основными носителями зарядов, а дрейфовый – неосновными. Так как концентрация основных носителей заряда на несколько порядков выше концентрации неосновных носителей, прямой ток в сотни и тысячи раз превышает обратный. Таким образом, р-п-переход, включенный в прямом направлении, пропускает электрический ток, а включенный в обратном - не пропускает. Напряжение, при котором через р-п-переход протекает прямой ток, называется прямым (открывающим) напряжением. Напряжение, при котором через р-п-переход протекает обратный ток, называется обратным (запирающим или закрывающим) напряжением. Теоретическая зависимость тока I через переход от подаваемого напряжения $U_{вн}$ имеет вид

$$I = I_0 \left(e^{\frac{\pm q U_{\text{вн}}}{kT}} - 1 \right) \quad (1)$$

где I_0 – обратный (тепловой) ток р-п-перехода при большом обратном напряжении обусловленный небольшим дрейфовым током. Ток I_0 называют тепловым током, потому что он сильно зависит от температуры. Далее q – заряд электрона, k – постоянная Больцмана, T – температура по Кельвину. По причине односторонней проводимости электронно-дырочный переход называют *выпрямляющим переходом*. Кроме электронно-дырочного перехода существуют и другие выпрямляющие переходы, например *переход Шотки*. На основе выпрямляющих переходов изготавливаются полупроводниковые диоды. *Полупроводниковый диод* – это прибор с одним выпрямляющим переходом и двумя выводами. Наибольшее распространение получили диоды на основе электронно-дырочного перехода.

2. Выпрямляющий диод

Полупроводниковый диод содержит один р-п переход и имеет два вывода: вывод А (анод) от р-области и К (катод) от n-области. Наиболее распространены и обширны две группы германиевых и кремниевых диодов – выпрямительные и импульсные, называемые в некоторых справочниках универсальными. Выпрямительные диоды, в которых используется основное свойство р-п перехода – его односторонняя электропроводность, применяют главным образом для выпрямления переменного тока в диапазоне частот от 50 Гц до 100 кГц. Импульсные диоды применяют в схемах электронных устройств, работающих в импульсных режимах. Функционирование диода в электрической схеме определяется его вольтамперной характеристикой (ВАХ). Анализ типовых ВАХ диодов показывает, что прямое напряжение $U_{\text{пр}}$ на германиевом диоде почти в два раза меньше, чем на кремниевом, при одинаковых значениях прямого тока $I_{\text{пр}}$, а обратный ток $I_{\text{обр}}$ кремниевого диода значительно меньше обратного тока германиевого диода при одинаковых обратных напряжениях. К тому же германиевый диод начинает проводить ток при ничтожно малом прямом напряжении $U_{\text{пр}}$, а кремниевый – только при $U_{\text{пр}} = 0,4-0,5$ В.

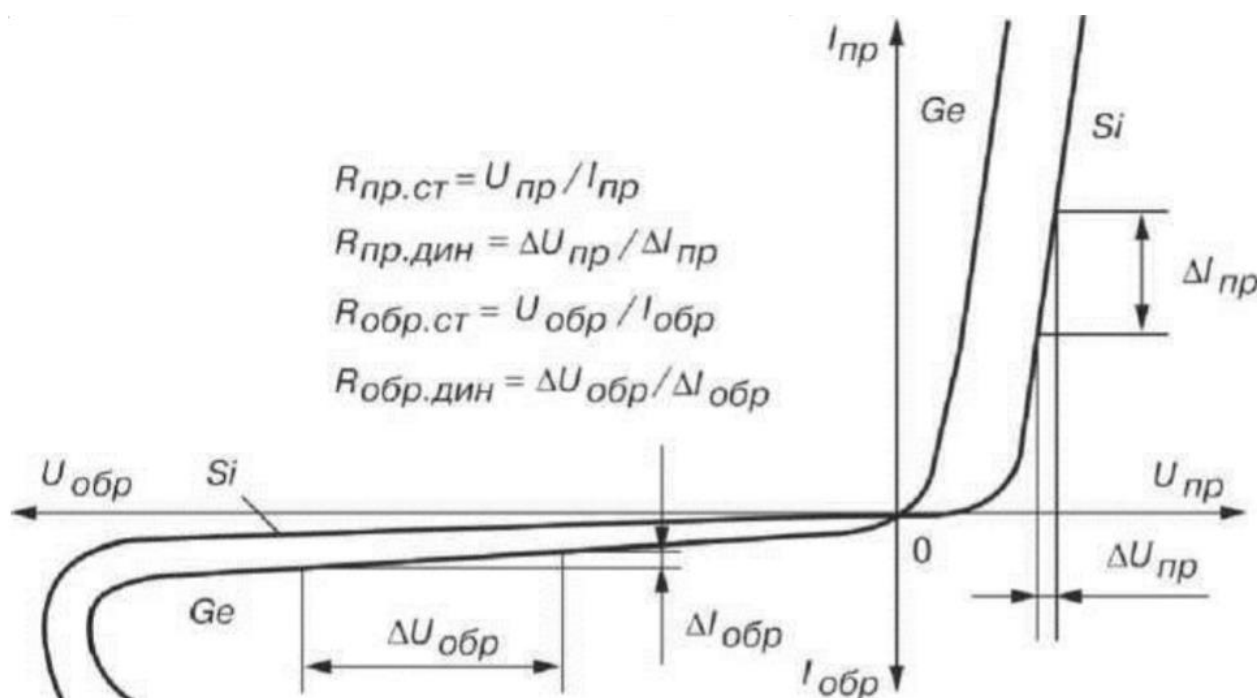


Рисунок 3. Типичные ВАХ кремниевого и германиевого диода

Исходя из этих свойств, германиевые диоды применяют как в схемах выпрямления переменного тока, так и для обработки сигналов малой амплитуды (до 0,3 В), а кремниевые, наиболее распространенные, – как в схемах выпрямления, так и в схемах устройств, в которых обратный ток недопустим или должен быть ничтожно мал. Кроме того, кремниевые диоды сохраняют работоспособность до температуры окружающей среды 125-150 °С, тогда как германиевые могут работать только до 70 °С. Основные параметры выпрямительного диода приводятся в его техническом паспорте и сравниваются (для принятия решения его использования в схеме электронного устройства) с параметрами, определенными по снятым характеристикам:

- *прямое постоянное напряжение* $U_{пр}$ при определенном для каждого диода прямом постоянном токе $I_{пр}$;

- *обратный ток* $I_{обр}$ при определенном обратном постоянном напряжении $U_{обр}$;

- *максимально допустимое обратное напряжение* $U_{обр\ max}$. Превышение $U_{обр\ max}$ переводит диод в режим пробоя. Различают электрический и тепловой пробой р-п перехода. Электрический пробой может быть лавинным или туннельным и не сопровождается разрушением р-п перехода. Тепловой пробой, как правило, приводит к разрушению р-п перехода и выводу диода из строя;

- *максимально допустимый прямой ток* $I_{пр\ max}$, обычно определяемый как средний за период прямой ток в схеме однополупериодного выпрямителя.

При большом обратном напряжении наблюдается резкий рост обратного тока через диод, это явление называется пробоем диода. Различают *электрический* и *тепловой* пробой. Электрический пробой бывает *лавинным* и *туннельным*. Если неосновные носители заряда (электроны и дырки) под действием электрического поля (созданным обратным напряжением) при

движении через переход приобретают энергию, достаточную для ударной ионизации атомов полупроводника, то в переходе происходит лавинообразное увеличение носителей заряда, что приводит к резкому увеличению обратного тока при почти неизменном обратном напряжении (кривая 1 на рис. 4). Такой вид электрического пробоя называют лавинным пробоем. Обычно он развивается в относительно широких р-п переходах, образованных слаболегированными полупроводниками

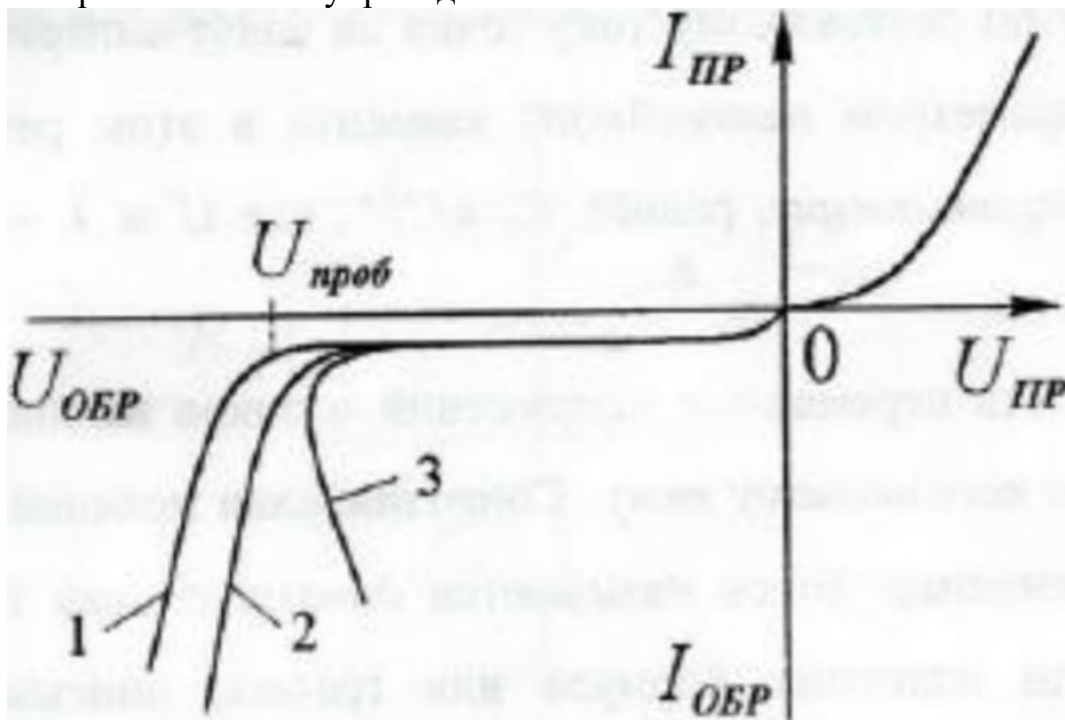


Рисунок 4. Реальные вольт-амперные характеристики диода

Туннельный пробой (кривая 2 на рис.4) возникает при большой напряженности электрического поля в тонком р-п переходе между высоколегированными полупроводниками в результате туннельного перехода электронов.

Электрический пробой является обратимым. Обратимость заключается в том, что первоначальные свойства р-п перехода полностью восстанавливаются, если отключить источник ЭДС от перехода. Благодаря этому оба вида электрического пробоя используются в качестве рабочих режимов в полупроводниковых диодах.

Если температура р-п перехода возрастает в результате его нагрева обратным током и недостаточно теплоотвода, то усиливается процесс генерации пар носителей заряда. Это в свою очередь приводит к дальнейшему нагреву р-п перехода и увеличению обратного тока, что может вызвать разрушение перехода. Такой процесс называют *тепловым пробоем*. Очевидно, что допустимое обратное напряжение на переходе зависит от условий теплоотвода. Для теплового пробоя характерен участок отрицательного сопротивления обратной ветви ВАХ р-п-перехода (кривая 3 на рис. 4). Тепловой пробой необратим, поэтому этот режим не допускается при эксплуатации полупроводниковых приборов.

Совокупность постоянных напряжений и токов на диоде определяет режим диода по постоянному току. Рабочей точкой называется соответствующая режиму по постоянному току точка на вольт-амперной характеристике диода. Параметром нелинейного элемента в этом режиме является статическое сопротивление, равное $R_c = U/I$, где U и I – напряжение и ток в рабочей точке.

Совокупность переменных напряжений и токов на диоде определяет режим диода по переменному току. Сопротивления нелинейных элементов для малых переменных токов называются *динамическими* или *дифференциальными*. Если известны формула или график, описывающие вольт-амперную характеристику диода, то дифференциальное сопротивление вычисляют, определяя производную в рабочей точке:

$$R_d = \frac{dU}{dI} \approx \frac{\Delta U}{\Delta I} \quad (2)$$

Графическое определение дифференциального сопротивления R_d диода в рабочей точке B показано на рисунке 5.

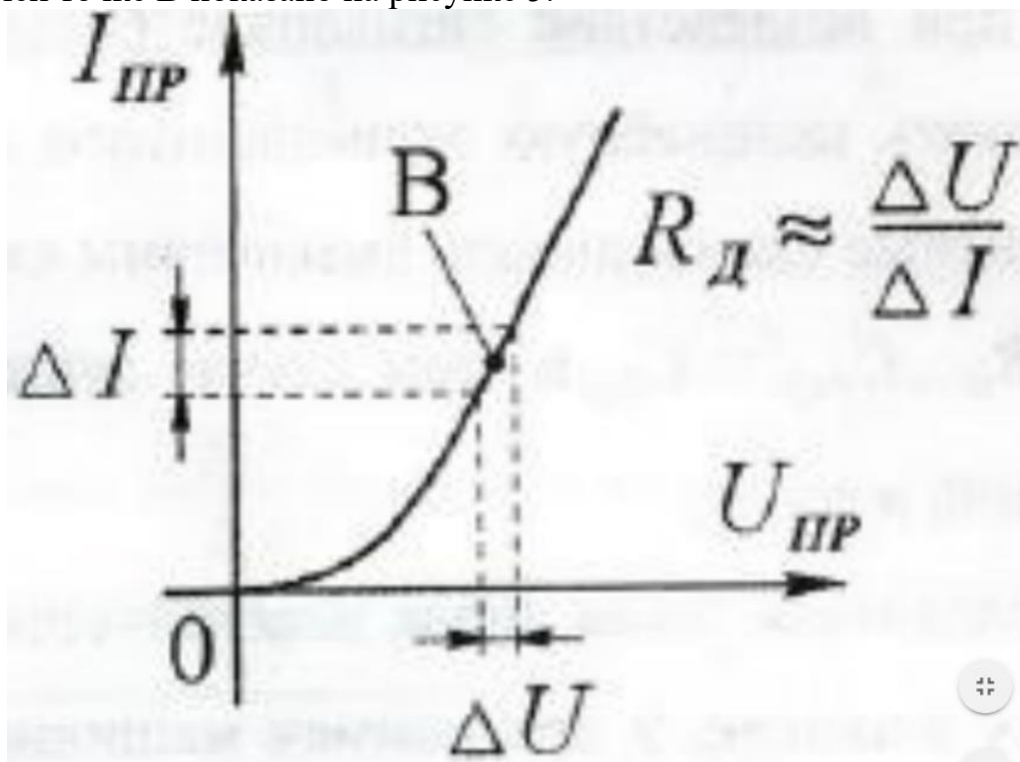


Рисунок 5. Графическое определение дифференциального сопротивления

Между переменными токами и напряжениями на диоде существует практически линейная зависимость только в том случае если амплитуды переменных напряжений меньше 0,1 вольта. Такие напряжения и токи называют малыми.

3. Работа с мультиметром

Одним из достоинств Electronics Workbench является возможность смоделировать ситуации, возникающие при самых различных уровнях приборной оснащённости исследователя, и освоить методики измерения,

соответствующие этим уровням. Рассмотрим эти ситуации на примере измерения вольтамперной характеристики полупроводникового диода. Начинаящий радиолюбитель может иметь всего лишь один универсальный прибор – мультиметр (который мы привыкли называть тестером), но и в этом случае можно снять вольтамперную характеристику (ВАХ) диода или любого другого нелинейного двухполюсника. Проще всего в этом случае измерять напряжение на диоде в схеме рис. 6а, подсоединяя к диоду через резистор источники напряжения различной величины. Ток диода при этом можно вычислять из выражения

$$I_{пр} = (E - U_{пр}) / R, \quad (3)$$

где $I_{пр}$ – ток диода в прямом направлении; E – напряжение источника питания, $U_{пр}$ – напряжение на диоде в прямом направлении.

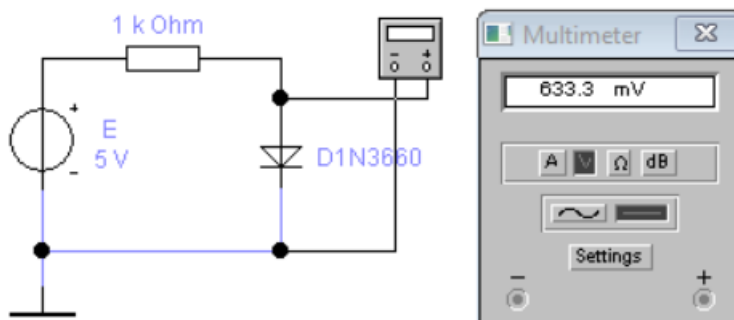


Рисунок 6а. Схема для измерения напряжения в прямом направлении

Изменив полярность источника питания E в схеме (рис. 6б), можно снять параметры диода по той же методике и в обратном направлении:

$$I_{об} = (E - U_{об})/R, \quad (4)$$

где $I_{об}$ – ток диода в обратном направлении; $U_{об}$ – напряжение на диоде в обратном направлении.

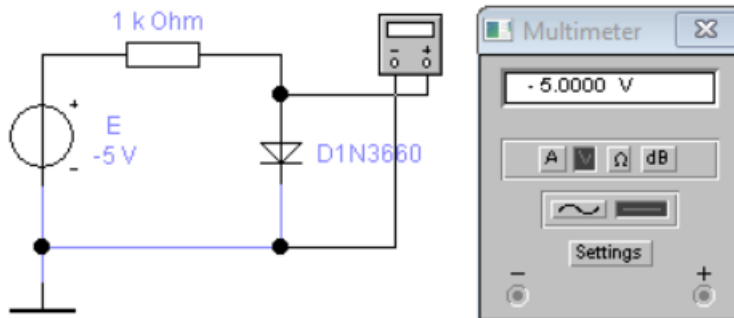


Рисунок 6б. Схема для измерения напряжения в обратном

Точность при таких измерениях в реальности оставляет желать лучшего из-за разброса сопротивлений у резисторов одного номинала. И если вы хотите получить более точную характеристику, используя только один мультиметр, необходимо сначала измерить напряжение в схемах рис. 6а,б, а затем ток в схеме рис. 7. При этом можно пользоваться по-прежнему только мультиметром, подключая его то как вольтметр, то как амперметр.

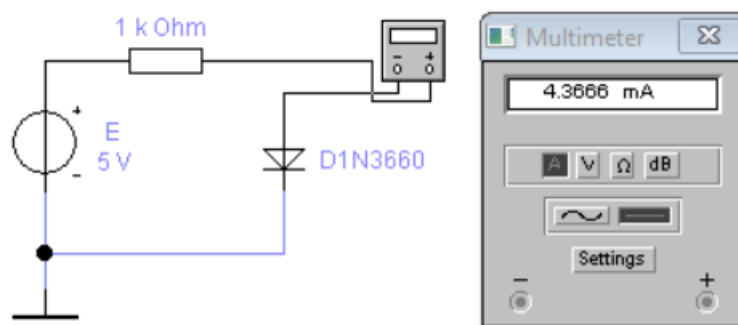


Рисунок 7. Схема для измерения тока на диоде в прямом направлении, при помощи мультиметра

4. Получение ВАХ

Гораздо быстрее можно выполнить эту работу, если у вас имеется и вольтметр, и амперметр. Тогда, включив их по схеме рис. 8, можно сразу видеть ток и напряжение на табло этих приборов. Вольтамперная характеристика может быть получена путем измерения напряжений на диоде при протекании различных токов за счет изменения напряжения источника питания V_s .

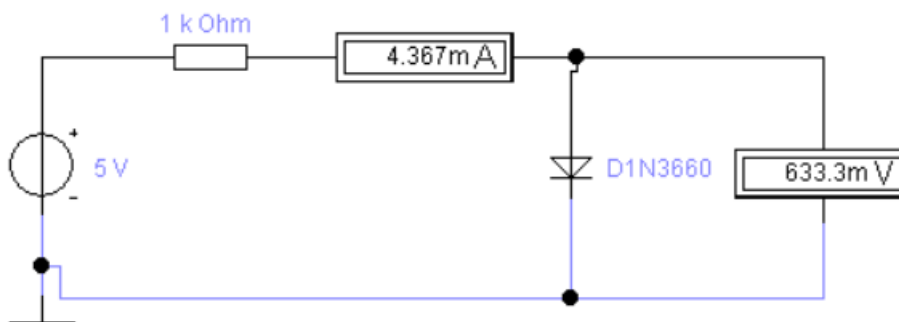


Рисунок 8. Схема для измерения тока и напряжения на диоде при помощи амперметра и вольтметра

И наконец, наиболее быстро и удобно можно исследовать ВАХ, непосредственно наблюдая ее на экране осциллографа (рис. 9). При таком подключении координата точки по горизонтальной оси осциллографа будет пропорциональна напряжению, а по вертикальной – току через диод. Поскольку напряжение в вольтах на резисторе 1 Ом численно равно току через диод в амперах ($I = U / R = U / 1 = U$), по вертикальной оси можно непосредственно считывать значения тока. Если на осциллографе выбран режим В/А, то величина, пропорциональная току через диод (канал В), будет откладываться по вертикальной оси, а напряжение (канал А) – по горизонтальной. Это и позволит получить вольтамперную характеристику непосредственно на экране осциллографа.

При получении ВАХ диода с помощью осциллографа на канал А вместо точного напряжения на диоде подается сумма напряжения диода и напряжения на резисторе 1 Ом. Ошибка из-за этого будет мала, так как падение напряжения на резисторе будет значительно меньше, чем напряжение на диоде. Для более точного измерения напряжения можно измерять ток с

помощью датчика тока. Из-за нелинейности диода его нельзя характеризовать величиной сопротивления, как линейный резистор. Отношение напряжения на диоде к току через него U/I , называемое статическим сопротивлением, зависит от величины тока. В ряде применений на существенную постоянную составляющую тока диода накладывается небольшая переменная составляющая (обычно при этом говорят, что элемент работает в режиме малых сигналов). В этом случае интерес представляет дифференциальное (или динамическое) сопротивление dU/dI . Величина динамического сопротивления зависит от постоянной составляющей тока диода, определяющей рабочую точку на характеристике.

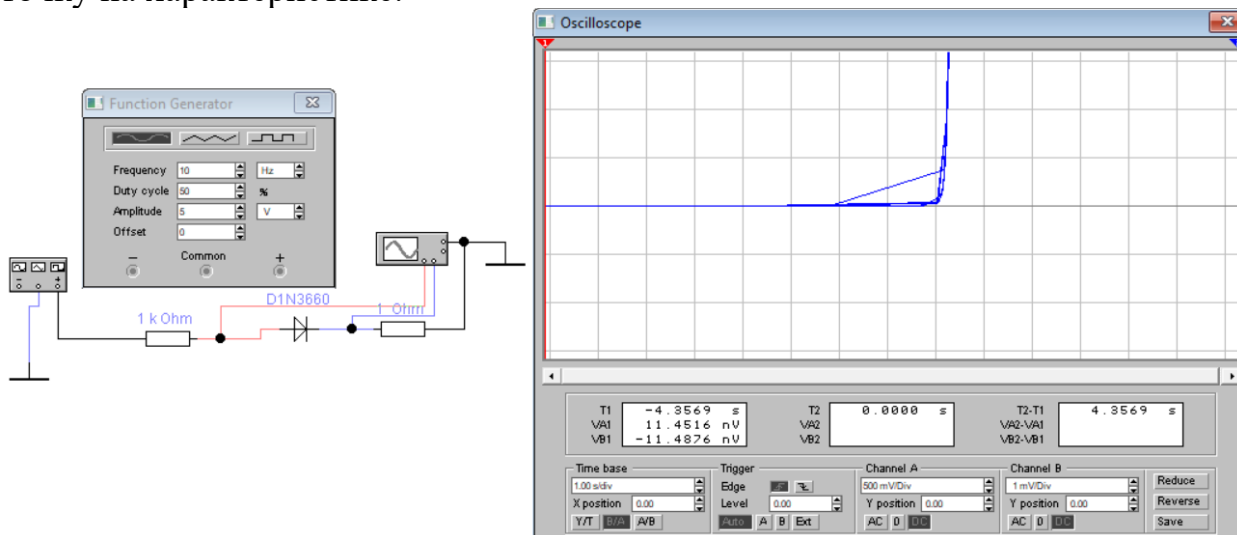


Рисунок 9. Схема для исследования ВАХ диода при помощи осциллографа

На экране осциллографа (рис. 9) точка начала координат (0,0) находится по середине экрана. С учётом того, что каждая клетка канала А (по горизонтали) равна 500 мВ, то точка изгиба примерно на 600 мВ.

ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

1. Соберите схему как на рис. 6а для заданного вариантом диода и включите схему. Мультиметр покажет напряжение на диоде $U_{пр}$ при прямом смещении. Измените полярность источника питания как на рис. 6б и снова запустите схему. Теперь мультиметр покажет напряжение на диоде $U_{об}$ при обратном смещении. Запишите показания. Вычислите ток диода при прямом $I_{пр}$ и обратном $I_{об}$ смещениях согласно формулам (3) и (4).

2. Соберите схему для заданного вариантом диода как на рис. 7 и включите схему. Мультиметр покажет ток диода $I_{пр}$ при прямом смещении. Измените полярность источника питания и снова запустите схему. Теперь мультиметр покажет ток $I_{об}$ диода при обратном смещении.

3. Постройте прямую ветвь ВАХ диода. Соберите схему для заданного вариантом диода как на рис. 8. Включите схему. Последовательно устанавливая значения источника питания: 5 В, 4 В, 3 В, 2 В, 1 В, 0,9 В, 0,8 В, 0,7 В, 0,6 В, 0,5 В, 0,4 В, 0,3 В, 0,2 В, 0,1 В, 0 В, запишите значения напряжения $U_{пр}$, тока $I_{пр}$ диода и вычислите для них $R_c = U_{пр} / I_{пр}$.

4. Постройте обратную ветвь ВАХ. Последовательно устанавливая значения источника питания: 0 В, -4 В, -5 В, -6 В, -10 В, -15 В, далее выбираются точки в зависимости от пробивного напряжения диода, для заданного вариантом, таким образом чтобы используя 10-15 точек была возможность построить более менее точную обратную ветвь ВАХ диода. Запишите значения тока $I_{об}$ и напряжения $U_{об}$ и вычислите для них $R_c = U_{обр} / I_{обр}$.

5. По полученным данным постройте графики $I_{пр}(U_{пр})$ и $I_{об}(U_{об})$.

6. С помощью формулы 2 посчитайте R_d в рабочих точках $I_{пр} = 4$ мА, $I_{пр} = 0,4$ мА, $I_{пр} = 0,2$ мА и в точке $U_{обр} = -5$ В.

7. Определите напряжение изгиба. Напряжение изгиба определяется из вольтамперной характеристики диода, смещенного в прямом направлении, для точки, где характеристика претерпевает резкий излом.

8. Соберите схему для заданного вариантом диода как на рис. 9. Генератор лучше настроить на частоту 10 Гц, чтобы все диоды успевали нормально закрыться. Амплитуда генератора порядка 5 вольт. Осциллограф перевести в режим В/А. Включите схему. Чтобы получить окно осциллографа большего размера – нажмите кнопку Expand. На ВАХ, появившейся на экране осциллографа, по горизонтальной оси считывается напряжение на диоде в милливольтках (канал А), а по вертикальной – ток в миллиамперах (канал В, 1 мВ соответствует 1 мА). Настройте масштаб каналов, пользуясь элементами управления под надписями Channel A и Channel B. Обратите внимание на изгиб ВАХ. Измерьте величину напряжения изгиба.

9. Напишите выводы о проделанной работе.

Таблица

Варианты задания

№	Диод	№	Диод	№	Диод
1	1N4148	8	BA281	15	ZC821A
2	1N4149	9	BA314	16	ZC822A
3	1N4150	10	BA315	17	ZC823A
4	1N4151	11	BA316	18	ZC824A
5	1N4152	12	BA317	19	ZC825A
6	1N4448	13	BA318	20	ZC826A
7	1N4449	14	ZC820A		

СОДЕРЖАНИЕ ОТЧЕТА

Отчет по работе должен быть оформлен согласно ОС ТУСУР 01-2021 и содержать следующие разделы.

1) введение (цель работы и постановка задачи).

В разделе описываются цель работы и задачи (как общие для всех, так и задачи своего варианта), которые необходимо выполнить.

2) описание работы с мультиметром.

Каждое измерение должно сопровождать рисунком схемы с показанием мультиметра. Результаты приводятся с расчётами и формулами.

3) построение ветвей ВАХ.

Приводятся рисунки схемы с несколькими измерениями в прямом и обратном направлении и таблица со столбцами «Е, В» (заданные напряжения источника питания) « $I_{пр}$, мВ» и « $I_{пр}$, мА» (измеренные значения) и « R_c , Ом» (вычисленное значение). Приводятся вычисленные значения $R_{диф}$ в заданных точках. Приводится график ВАХ (строится, например, в Excel). Указывается напряжение изгиба.

4) ВАХ на осциллографе.

Приводится рисунок собранной схемы с осциллографом и рисунок показаний осциллографа. Указывается напряжение изгиба по показанию осциллографа.

5) заключение.

Приводятся выводы о проделанной работе: в краткой форме описывается что было сделано и какие результаты были получены.

Структурные разделы, такие как «Оглавление», «Введение», «Заключение», «Список использованных источников» – не нумеруются, пишутся строчными буквами, кроме первой заглавной. Остальные разделы (заголовки первого уровня) должны быть пронумерованы и написаны ПРОПИСНЫМИ буквами.

ПРИМЕРНЫЙ СПИСОК ВОПРОСОВ ПРИ ЗАЩИТЕ РАБОТЫ

1. Сравните напряжения на диоде при прямом и обратном смещениях по порядку величин. Почему они различны?
2. Сравнимы ли измеренные значения тока при прямом смещении с вычисленными значениями?
3. Сравнимы ли измеренные значения тока при обратном смещении с вычисленными значениями?
4. Сравните токи через диод при прямом и обратном смещениях по порядку величин. Почему они различны?
5. Что такое ток насыщения диода?
6. Совпадают ли точки изгиба ВАХ, полученные с помощью осциллографа и построенные по результатам вычислений?
7. В чем заключается особенность электропроводности полупроводников? Пояснить с помощью энергетических диаграмм проводника, полупроводника, диэлектрика.

8. В чем отличие полупроводников с электронной и дырочной электропроводностью? Какие токи протекают в полупроводниках?
9. Какова структура р-п перехода? Пояснить электрические процессы, происходящие в отсутствии внешнего напряжения.
10. Какие процессы происходят при прямом и обратном включении р-п перехода? Показать с помощью диаграмм.
11. Что такое пробой р-п перехода? Каковы виды пробоя? Как используют явление пробоя в полупроводниковых приборах?
12. Каково назначение полупроводниковых диодов? Приведите статическую вольтамперную характеристику выпрямительного диода. Назовите виды диодов.

ДОПОЛНИТЕЛЬНАЯ ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №1 «ЛОГИЧЕСКИЕ ФУНКЦИИ «И», «ИЛИ» НА ДИОДАХ»

Цель работы: изучение работы логических функций «И», «ИЛИ» на основе выпрямительных диодов.

МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ

1. Виды диодов

Электронный прибор, представляющий из себя p-n переход с подсоединенными к нему с двух сторон металлическими контактами, называется полупроводниковым диодом. Условное обозначение диода на электрических принципиальных схемах представлено на рис 1.

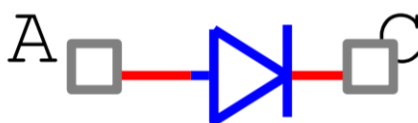


Рисунок 1. Условное обозначение диода

При протекании прямого тока через диод в области p-n перехода находится большое количество неосновных носителей заряда. Если полярность напряжения на диоде меняется скачком с прямой на обратную (рис. 2), для восстановления запирающих свойств диода эти заряды должны рассосаться и воссоздать обедненную область. Для этого необходимо конечное время, которое называется «временем обратного восстановления» t_{tr} (reverse recovery time). В течение этого времени диод продолжает проводить ток в обратном направлении. Это время состоит из т.н. «времени памяти» t_m , необходимого для рассасывания заряда в области перехода, и «времени перехода» t_{tr} , необходимого для заряда восстановившейся барьерной емкости перехода.

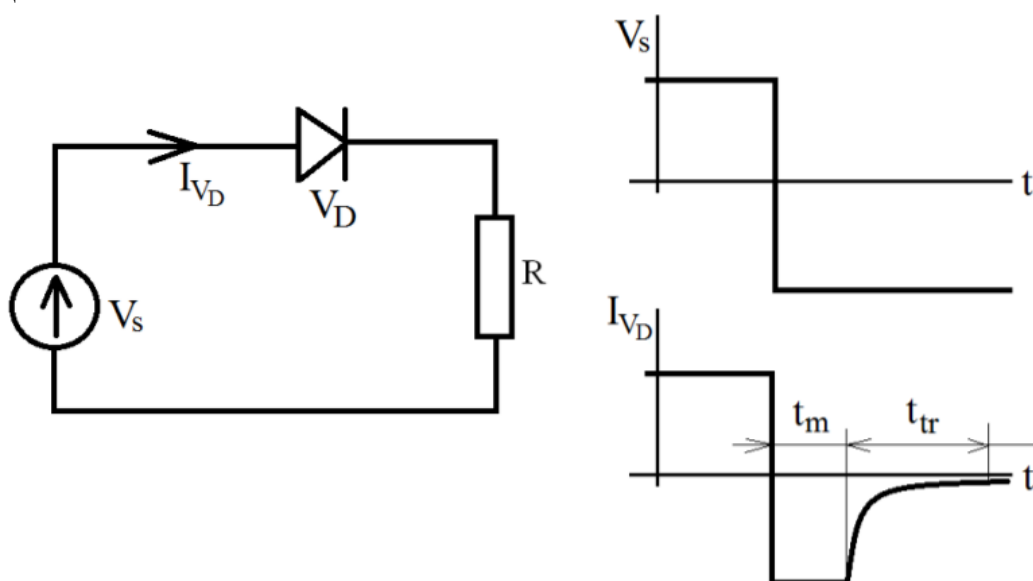


Рисунок 2.

Основными параметрами выпрямительных диодов являются:

Максимальный постоянный прямой ток I_{FMAX} – максимальный постоянный прямой ток, при котором температура перехода достигает максимально допустимого значения.

Максимальный импульсный прямой ток I_{FIMAX} – максимальный мгновенный прямой ток, при котором температура перехода достигает максимально допустимого значения.

Максимальное прямое напряжение U_{FMAX} – максимальное мгновенное значение прямого напряжения на диоде.

Максимальное обратное напряжение U_{RMAX} – максимальное обратное напряжение на диоде, при котором не происходит пробоя перехода.

Дифференциальное сопротивление r_{FDIF} , r_{RDIF} – отношение приращения напряжения к приращению тока в прямом и обратном включении.

Максимальный обратный ток I_{RMAX} – максимальный обратный ток диода при условии отсутствия пробоя перехода.

Время обратного восстановления t_{rr} – время от момента прохождения обратным током диода через 0 до момента достижения им своего номинального значения.

Заряд обратного восстановления Q_{rr} – заряд, вытекающий во внешнюю цепь при переключении с прямого включения к обратному, при заданном максимальном прямом токе.

Диоды специального типа, работающие в области лавинного или зенеровского пробоя, называются «стабилитронами». В этом режиме дифференциальное сопротивление очень мало, т.е. напряжение на диоде практически не зависит от тока. Это свойство используется для стабилизации напряжения. Условное обозначение стабилитрона на электрических принципиальных схемах представлено на рис. 3.

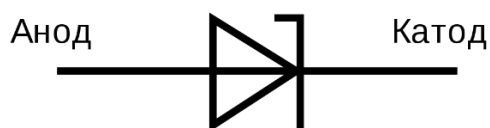


Рисунок 3.

Основные параметры стабилитронов:

Напряжение стабилизации U_Z – номинальное напряжение зенеровского пробоя. Измеряется от долей вольта до сотен вольт.

Минимальный ток стабилизации I_{ZMIN} – минимальный ток через стабилитрон, при котором обеспечивается работа на участке зенеровского пробоя.

Температурный коэффициент стабилизации $dU_Z/U_Z dT$ – относительное изменение напряжения стабилизации в зависимости от температуры. Он положителен, если стабилитрон работает в области

лавинного пробоя ($U_Z > 6 \text{ В}$), и отрицателен, если он работает в области зенеровского пробоя ($U_Z < 6 \text{ В}$).

«Туннельные диоды» изготавливаются из сильнолегированных полупроводников. В таких устройствах туннельный эффект наблюдается и при обратном, и при прямом включении. Энергетическая диаграмма туннельного диода в равновесном состоянии представлена на рис. 4.

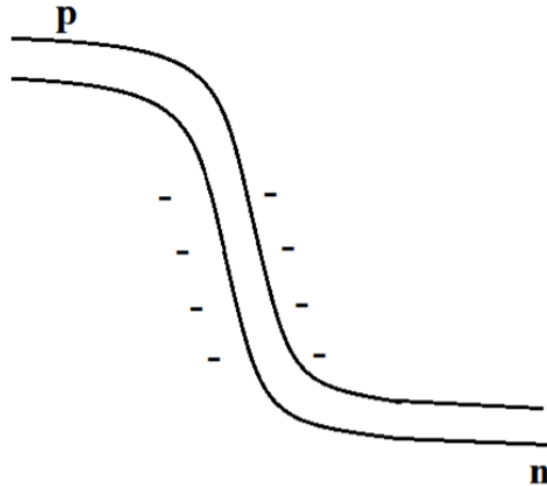


Рисунок 4.

Из-за очень сильного легирования обеих областей р-п перехода дно зоны проводимости n-области оказывается ниже потолка валентной зоны р-области. При этом обедненная область оказывается очень узкой (соизмеримой с диффузионной длиной электрона). Поэтому носители заряда могут переходить из одной области в другую, не меняя своей энергии, просачиваясь сквозь узкий потенциальный барьер, т.е. «туннелировать». В состоянии равновесия потоки носителей, движущихся из одной области в другую и обратно, одинаковы, поэтому результирующий ток равен нулю. При прямом смещении р-п перехода потенциальный барьер уменьшится, при этом часть энергетических уровней, заполненных электронами в зоне проводимости n-области, окажется напротив незанятых уровней в валентной зоне n-области рис. 5.

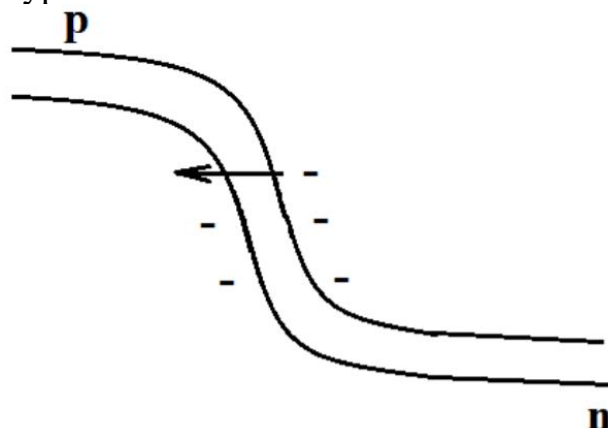


Рисунок 5.

Это приведет к тому, что появится нескомпенсированная электронная составляющая тока через переход. При увеличении положительного смещения вначале этот ток будет возрастать. Его максимум будет достигнут в тот момент, когда верхние заполненные энергетические уровни в зоне

проводимости n-области будут на уровне потолка валентной зоны p-области. При дальнейшем увеличении прямого смещения количество туннелирующих зарядов будет уменьшаться по мере уменьшения степени перекрытия между дном зоны проводимости n-области и потолком валентной зоны p-области. В точке, где эти уровни совпадут, туннельный ток достигнет своего минимального значения (рис. 6), а затем, когда туннельные переходы электронов станут невозможны, носители зарядов будут преодолевать потенциальный барьер за счет диффузии и прямой ток начнет возрастать, как у обычных диодов.

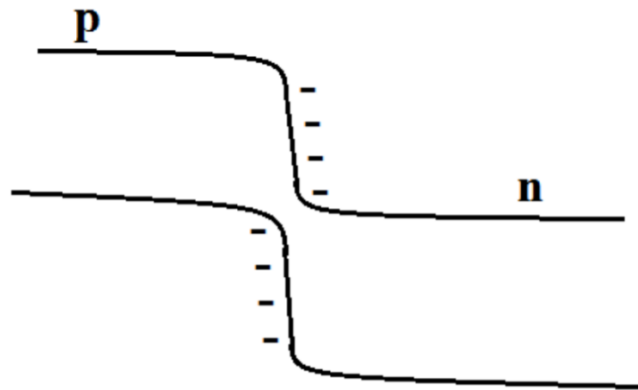


Рисунок 6.

При обратном смещении p-n перехода потенциальный барьер увеличивается. Одновременно с этим увеличивается степень перекрытия дна зоны проводимости n-области и потолка валентной зоны p-области (рис. 7).

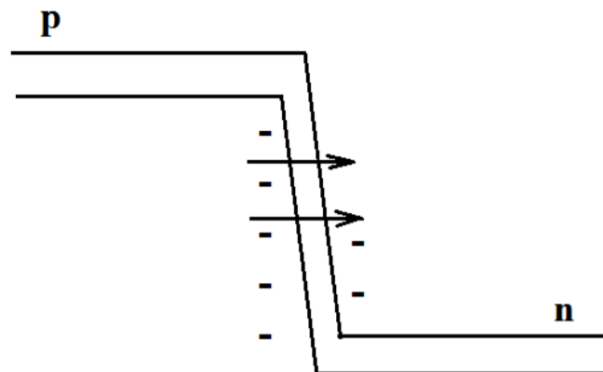


Рисунок 7.

Но теперь количество энергетических уровней, занятых электронами в валентной зоне p-области, будет преобладать над количеством энергетических уровней, занятых электронами в зоне проводимости n-области. Это приведет к появлению обратного туннельного тока, который будет возрастать с увеличением обратного смещения. Т.е. будет наблюдаться туннельный пробой перехода.

Таким образом, ВАХ туннельного диода имеет вид, представленный на рис. 8.

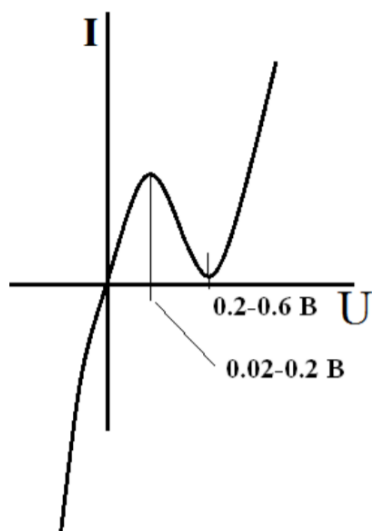


Рисунок 8.

Как видно, на графике ВАХ имеется участок с отрицательным дифференциальным сопротивлением. Поскольку туннельный эффект не связан с рассасыванием неосновных носителей заряда, туннельные диоды имеют существенно лучшие динамические свойства по сравнению с обычными диодами. Они используются в высокочастотных генераторах сигналов. Условное обозначение туннельного диода представлено на рис. 9.



Рисунок 9.

Туннельный диод с вырожденной областью отрицательного дифференциального сопротивления называется обращенным диодом. Его ВАХ представлена на рис. 10а, а условное обозначение – на рис. 10б.

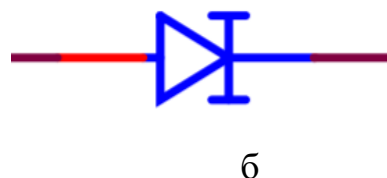
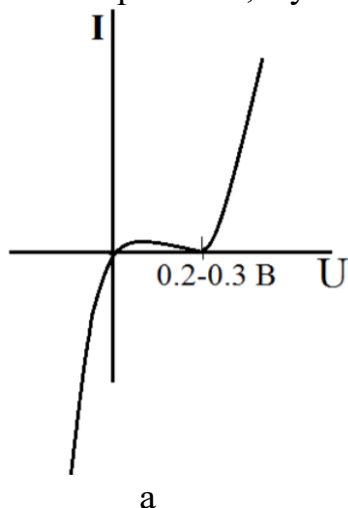


Рисунок 10.

Эти диоды используются в обратном включении для детектирования слабых высокочастотных сигналов поскольку падение напряжения на них может достигать 0.1 В , а не $0.6 - 0.7 \text{ В}$, как у обычных диодов.

Похожими свойствами обладают и т.н. «диоды Шоттки» (в честь немецкого физика Вальтера Шоттки). В них вместо классического р-п перехода используется переход «металл – легированный полупроводник». По

принципу действия такой переход аналогичен обычному р-п переходу, однако имеет по сравнению с ним меньшее прямое падение напряжения (0.2 – 0.4 В) и лучшие динамические свойства (за счет меньшей диффузионной емкости).

Недостатком диодов Шоттки является относительно малое максимальное обратное напряжение (несколько десятков вольт), при превышении которого они необратимо выходят из строя. Также, к их недостаткам можно отнести повышенные обратные токи (вплоть до единиц мА), возрастающие с ростом температуры. Условное обозначение диода Шоттки представлено на рис. 11.



Рисунок 11.

При протекании прямого тока через р-п переход электроны, диффундирующие через него, рекомбинируют с дырками, теряя энергию. Эта энергия, выделяемая в пространство, может иметь различный спектральный состав. Подбором соответствующих материалов можно добиться того, чтобы эта энергия выделялась в видимом диапазоне спектра. Тогда такой диод будет излучать свет при протекании через него прямого тока. На этом основан принцип работы т.н. «**светодиода**». Его условное обозначение представлено на рис. 12. Существуют светодиоды с разным цветом излучаемого света. Дополнительными характеристиками светодиодов являются длина волны излучаемого света и его сила при определенном значении прямого тока. Светодиоды, как правило, имеют очень маленькое допустимое обратное напряжение (единицы вольт), при превышении которого сразу выходят из строя. Светодиоды характеризуются также повышенным прямым падением напряжения (до 2 и более вольт).



Рисунок 12.

Диоды могут не только излучать свет, но и генерировать ток под действием светового излучения. Такие устройства называются «**фотодиодами**». Условное обозначение фотодиода представлено на рис. 13.



Рисунок 13.

В таких устройствах одна из областей перехода (например, р-область) освещается светом. Под воздействием светового излучения генерируются свободные носители заряда (электроны и дырки). Электроны (неосновные носители в р-области) диффундируют к переходу и скатываются с потенциальной горки в п-область. Дырки из-за потенциального барьера не могут пересечь границу перехода. Т.о., через переход течет т.н. «фототок» I_F .

В результате р-область заряжается положительно, а п-область – отрицательно, между клеммами диода возникает фотоэдс E_F . Его полярность соответствует прямому смещению перехода. Это приводит к снижению потенциального барьера и, как следствие, появлению диффузионного тока, направленного противоположно фототоку. Если к клеммам диода не подключена нагрузка, то суммарный ток через него равен нулю. Если фотодиод подключить к внешней цепи, то через него пойдет ток. ВАХ фотодиода в зависимости от светового потока, падающего на него, представлена на рис. 14.

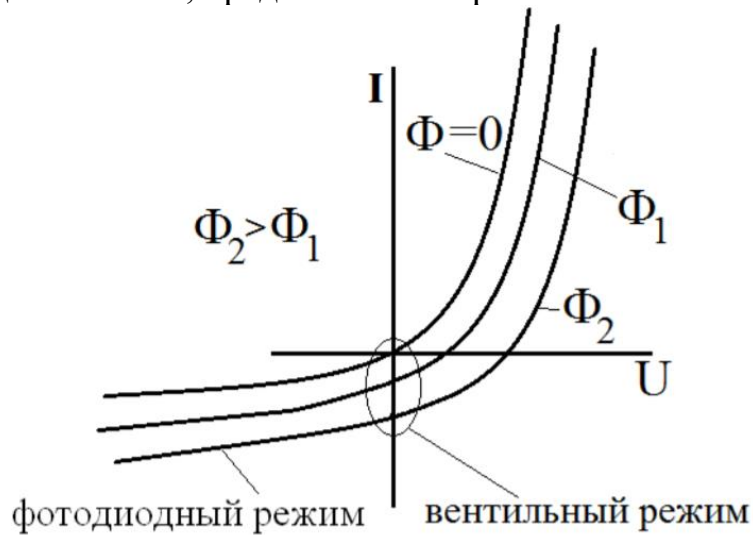


Рисунок 14.

Она описывается выражением

$$I = I_S(e^{((V-V_B)e/kT)} - 1) - I_F. \quad (1)$$

При отсутствии освещения фототока нет и ВАХ фотодиода такая же, как у обычного диода. При увеличении освещения обратный ток фотодиода увеличивается. Если фотодиод подключить к нагрузке без дополнительного внешнего напряжения ($V=0$ в выражении (1)), по цепи пойдет ток, направление которого совпадает с фототоком. Такой режим работы фотодиода называется «вентильным». В этом режиме фотодиоды работают в солнечных батареях.

Если к фотодиоду подключить внешний источник питания, полярность которого соответствует обратному смещению перехода, то ток через него будет равен $-I_F$, поскольку I_S пренебрежимо мал. Такой режим работы называется «фотодиодным». В этом режиме фотодиоды работают в т.н. «оптопарах».

Дополнительными характеристиками фотодиодов являются время восстановления термодинамического равновесия после прекращения облучения (10^{-6} секунды и меньше), а также фоточувствительность (отношение «сигнал-шум»), определяемая темновым током фотодиода.

Условное обозначение оптопары представлено на рис. 15.

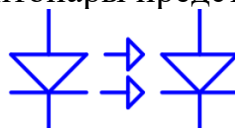


Рисунок 15.

Оптопара представляет собой комбинацию светодиода и фотодиода, реализованную в одном светозащищенном корпусе. Такие устройства применяются для гальванической развязки при передаче информации. Внутри оптопары информация передается с помощью светового потока. Важной характеристикой оптопары является коэффициент передачи тока ($K_I = I_{out}/I_{in}$), равный отношению выходного тока фотодиода ко входному току светодиода. Для диодных оптопар он измеряется единицами процентов. Также, параметрами оптопар являются сопротивление изоляции между входной и выходной цепями и максимальное напряжение изоляции.

На рис. 16 представлено условное обозначение «варикапа» – диода, предназначенного для работы в качестве емкости, управляемой напряжением.



Рисунок 16.

Они работают в области обратных напряжений и используют зависимость барьерной емкости от внешнего напряжения. Варикапы используются для электронной подстройки колебательных контуров, в частности, в селекторах каналов телевизионных и радиоприемников.

2. Логические функции на диодах

Способность диодов проводить электрический ток только в одном направлении может быть использована в различных устройствах коммутации и логических цепях. Примеры простейших диодных логических элементов приведены на рис. 17-18

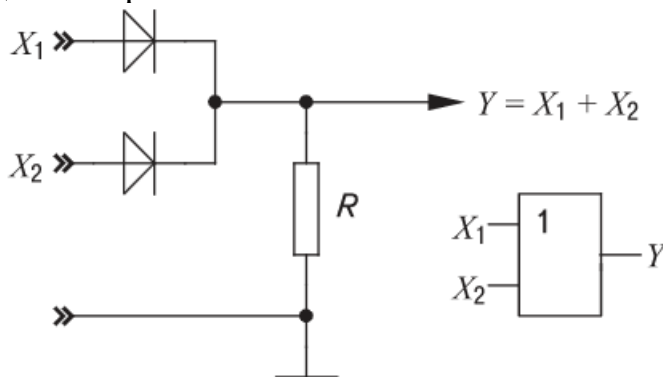


Рисунок 17. Логический элемент ИЛИ на диодах

На заре вычислительной техники диодная логика (ДЛ), а затем смешанная диодно-транзисторная логика (ДТЛ) были основой схемотехники цифровых узлов (в дискретном исполнении), но с появлением интегральных микросхем довольно быстро были вытеснены транзисторно-транзисторной логикой (ТТЛ), многочисленные варианты которой и по сей день "правят бал" в цифровой схемотехнике.

И хотя в современных цифровых приборах подобные диодные узлы уже не востребованы, но в аналоговых и в комбинированных аналого-цифровых

The diagram illustrates a diode AND gate circuit. A positive supply voltage $+U$ is connected to a resistor R . The other end of the resistor is connected to a common node. Two diodes are connected to this node, with their cathodes facing the common node and their anodes connected to inputs X_1 and X_2 . The output Y is taken from the common node. The output is labeled $Y = X_1 \cdot X_2$. To the right, the logic symbol for an AND gate is shown, consisting of a rectangle with an ampersand (&) inside. Inputs X_1 and X_2 enter from the left, and the output Y exits from the right.

electronics Workbench для проверки работы та

The screenshot shows the 'Word Generator' window on the left, configured with 'Edit' set to 0003, 'Current' to 0007, 'Initial' to 0000, and 'Final' to 03E7. The 'Trigger' is set to 'Internal'. The 'Frequency' is 1 Hz. The 'Data ready' checkbox is checked. The 'Binary' output shows 0000000000000001. A red arrow points to the 'Word Generator' window. The circuit diagram in the center shows a 16-bit shift register with two D1N3660 diodes connected to the 'Data ready' output. A 1 kOhm resistor is connected to the 'Data ready' output. A red arrow points to the 'Data ready' output. The 'Logic Analyzer' window on the right shows the captured data, with a red arrow pointing to the 'Data ready' output.

Для измерения электрических параметров схем логических функций н

Можно задавать самостоятельно в их меню, которое вызывается двойным нажатием ЛКМ. Лучше применять 1, 2 и 3.

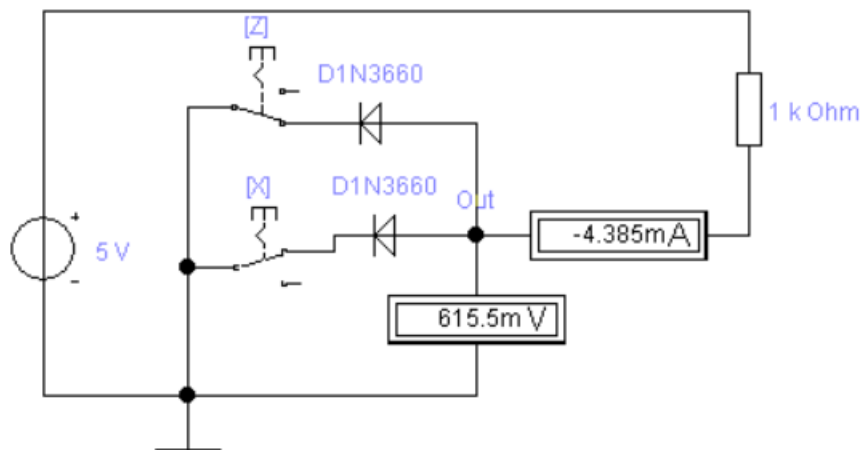


Рисунок 20. Схема стенда для измерения электрических параметров логической функции И на диодах

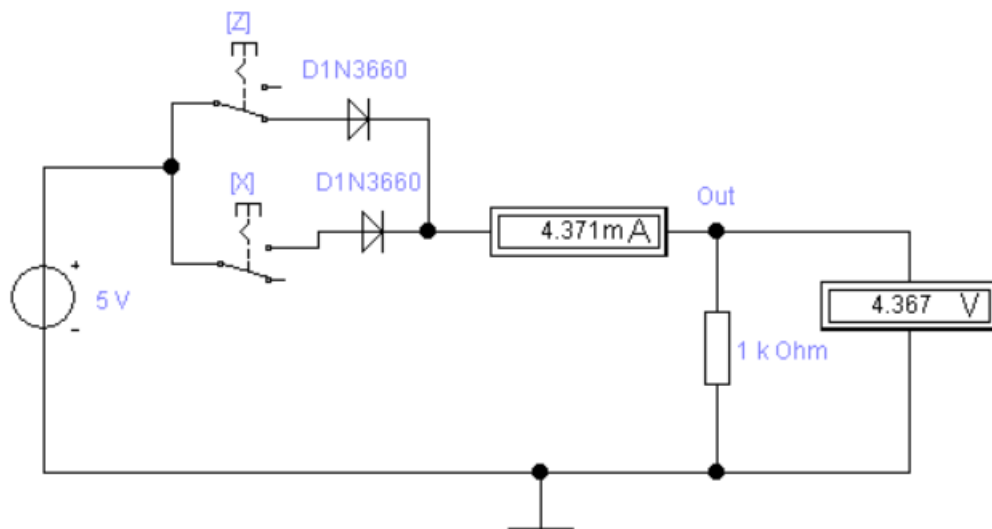


Рисунок 21. Схема стенда для измерения электрических параметров логической функции ИЛИ на диодах

Такие схемы можно совмещать, получая более сложные функции. Например, на рис. 22 показана схема стенда для исследования логической функции 2-2ИЛИ-2И на диодах. Генератор входных сигналов настроен на частоту смены сигналов согласно заданной таблице 1 Гц, анализатор сигналов в свою очередь настроен на 10 Гц. На мониторе логического анализатора показан случай, когда на оба входа 2И приходят логические единицы и выход схемы переключается в состояние логической единицы.

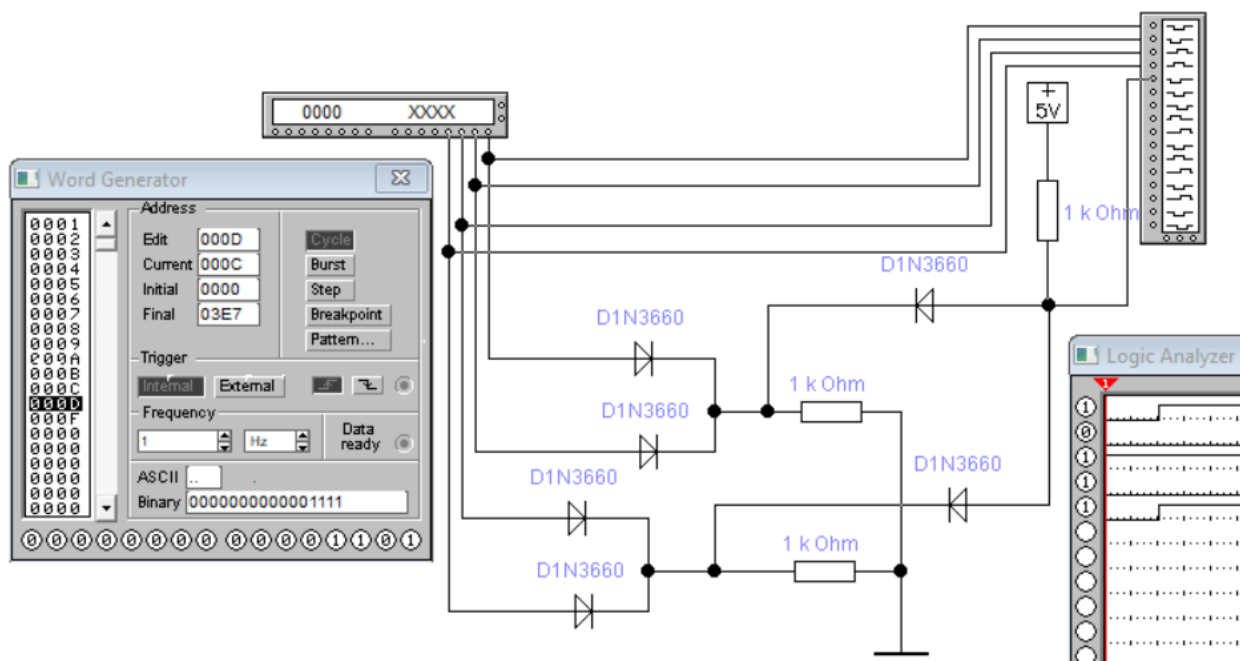


Рисунок 22. Схема стенда исследования составной логической функции 2-2ИЛИ-2И на диодах

ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

1. Соберите стенд для исследования логической функции И как на рис. 19 для заданного вариантом диода, номинала сопротивления и количества входов функции. В генераторе входных сигналов задайте в таблице слов полный двоичный перебор для заданного вариантов количества входов (2 вх. – 4 комбинации, 3 вх. – 8 комбинаций). Настройте частоты генератора входных слов на 1 Гц и логический анализатор на 10 Гц. Включите схему. Дождитесь пока все заданные Вами входные комбинации сработают.

2. Соберите стенд для измерения электрических параметров логической функции И как на рис. 20 для заданного вариантом диода, номиналом сопротивления и количества входов. Установите переключатели на схеме в положение разрыва схемы. Включите схему. Запишите показания приборов. Выключите схему. Поменяйте положение переключателей. Включите схему. Запишите показания приборов. В итоге необходимо записать показания приборов для всех положений переключателей, которые замыкаются на землю (для схемы ИЛИ на питание) либо разрывают цепь.

3. Повторите пункты 1 и 2 для логической функции ИЛИ согласно варианту задания.

4. Соберите стенд для исследования составной логической функции как на рис. 22 для заданного вариантов диода, номинала сопротивления и составной функции. В генераторе входных сигналов задайте в таблице слов полный двоичный перебор для заданного вариантов количества входов (2-2-2=6 вх. – 64 комбинации, 3-3=6 вх. – 64 комбинации). Настройте частоты генератора входных слов на 1 Гц и логический анализатор на 10 Гц. Включите схему. Дождитесь пока все заданные Вами входные комбинации сработают.

5. Напишите выводы о проделанной работе.

Таблица

Варианты задания

№	Диод	Кол. входов		Состовная лог. функция	R
		И	ИЛИ		
1	1N4148	3	2	3-3-ИЛИ-2И	1К
2	1N4149	3	2	3-3-И-2ИЛИ	1К
3	1N4150	3	2	2-2-2-ИЛИ-3И	1К
4	1N4151	3	2	2-2-2И-3ИЛИ	1К
5	1N4152	2	3	3-3-ИЛИ-2И	1К
6	1N4448	2	3	3-3-И-2ИЛИ	1К
7	1N4449	2	3	2-2-2-ИЛИ-3И	1К
8	BA281	2	3	2-2-2И-3ИЛИ	1К
9	BA314	3	2	3-3-ИЛИ-2И	2К
10	BA315	3	2	3-3-И-2ИЛИ	2К
11	BA316	3	2	2-2-2-ИЛИ-3И	2К
12	BA317	3	2	2-2-2И-3ИЛИ	2К
13	BA318	2	3	3-3-ИЛИ-2И	2К
14	ZC820A	2	3	3-3-И-2ИЛИ	2К
15	ZC821A	2	3	2-2-2-ИЛИ-3И	2К
16	ZC822A	2	3	2-2-2И-3ИЛИ	2К
17	ZC823A	3	2	3-3-ИЛИ-2И	3К
18	ZC824A	3	2	3-3-И-2ИЛИ	3К
19	ZC825A	3	2	2-2-2-ИЛИ-3И	3К
20	ZC826A	3	2	2-2-2И-3ИЛИ	3К

СОДЕРЖАНИЕ ОТЧЕТА

Отчет по работе должен быть оформлен согласно ОС ТУСУР 01-2021 и содержать следующие разделы.

1) введение (цель работы и постановка задачи).

В разделе описываются цель работы и задачи (как общие для всех, так и задачи своего варианта), которые необходимо выполнить.

2) исследование логической функции И на диодах.

Приводится собранная схема стенда для исследования логической функции И согласно варианту задания, экранный снимок генератора с заданной таблицей комбинаций входных сигналов и примеры экранных снимков анализатора сигналов. Также приводится собранная схема стенда для измерения электрических параметров логической функции И на диодах с показаниями приборов в каком-то положении переключателей и таблица с показаниями приборов при различном положении переключателей. Пример заголовков таблицы: «Переключатель Z» («Переключатель 1»); «Переключатель X»

(«Переключатель 2»); U, B; I, mA; «Состояние». Если входа (переключателя три), то столбцов больше. Значения в столбцах переключателей указывать «0» или «1» в соответствии с тем, куда в данный момент подключен переключатель: к источнику питания – «1», к земле – «0». В столбце «Состояние» указать в каком состоянии находится выход (0, 1 или Z).

4) исследование логической функции ИЛИ на диодах.

Приводится собранная схема стенда для исследования логической функции ИЛИ согласно варианту задания, экранный снимок генератора с заданной таблицей комбинаций входных сигналов и примеры экранных снимков анализатора сигналов. Также приводится собранная схема стенда для измерения электрических параметров логической функции ИЛИ на диодах с показаниями приборов в каком-то положении переключателей и таблица с показаниями приборов при различном положении переключателей. Пример заголовков таблицы: «Переключатель Z» («Переключатель 1»); «Переключатель X» («Переключатель 2»); U, B; I, mA. Если входа (переключателя три), то столбцов больше.

5) исследование составной логической функции.

Приводится собранная схема стенда для исследования составной логической функции согласно варианту задания, экранный снимок генератора с заданной таблицей комбинаций входных сигналов и примеры экранных снимков анализатора сигналов.

6) заключение.

Приводятся выводы о проделанной работе: в краткой форме описывается что было сделано и какие результаты были получены.

Структурные разделы, такие как «Оглавление», «Введение», «Заключение», «Список использованных источников» – не нумеруются, пишутся строчными буквами, кроме первой заглавной. Остальные разделы (заголовки первого уровня) должны быть пронумерованы и написаны ПРОПИСНЫМИ буквами.

ПРИМЕРНЫЙ СПИСОК ВОПРОСОВ ПРИ ЗАЩИТЕ РАБОТЫ

1. Сравните напряжения на диоде при прямом и обратном смещениях по порядку величин. Почему они различны?
2. Сравнимы ли измеренные значения тока при прямом смещении с вычисленными значениями?
3. Сравнимы ли измеренные значения тока при обратном смещении с вычисленными значениями?
4. Сравните токи через диод при прямом и обратном смещениях по порядку величин. Почему они различны?
5. Что такое ток насыщения диода?

6. Совпадают ли точки изгиба ВАХ, полученные с помощью осциллографа и построенные по результатам вычислений?
7. В чем заключается особенность электропроводности полупроводников? Пояснить с помощью энергетических диаграмм проводника, полупроводника, диэлектрика.
8. В чем отличие полупроводников с электронной и дырочной электропроводностью? Какие токи протекают в полупроводниках?
9. Какова структура р-п перехода? Пояснить электрические процессы, происходящие в отсутствии внешнего напряжения.
10. Какие процессы происходят при прямом и обратном включении р-п перехода? Показать с помощью диаграмм.
11. Что такое пробой р-п перехода? Каковы виды пробоя? Как используют явление пробоя в полупроводниковых приборах?
12. Каково назначение полупроводниковых диодов? Приведите статическую вольтамперную характеристику выпрямительного диода. Назовите виды диодов.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №2 «ИССЛЕДОВАНИЕ БИПОЛЯРНОГО ТРАНЗИСТОРА»

Цель работы: исследование режимов работы биполярного транзистора.

МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ

1. Биполярный транзистор

Биполярный транзистор – полупроводниковый прибор с двумя взаимодействующими выпрямляющими р-п-переходами и тремя выводами, усилительные свойства которого обусловлены явлениями инжекции и экстракции неосновных носителей заряда. В биполярном транзисторе используются одновременно два типа носителей заряда – электроны и дырки (отсюда и название – биполярный). Переходы транзистора образованы тремя областями с чередующимися типами проводимости.

Структура биполярного транзистора и его схемное обозначения приведены на рисунке 1. Здесь же обозначены выводы транзисторов: **к** – коллектор, **б** – база, **э** – эмиттер.

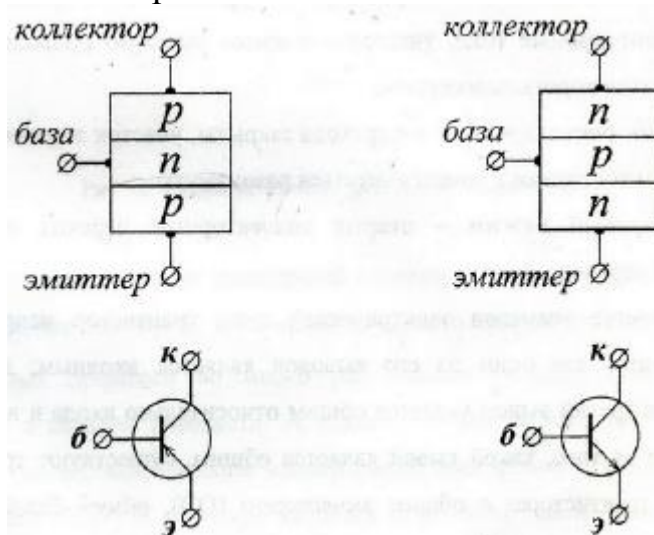


Рисунок 1 Структура биполярного транзистора и его схемные обозначения, слева – транзистор р-п-р типа, справа – п-р-п типа

Центральная область транзистора называется базой, а две крайних области – коллектором и эмиттером. Переход, возникающий между коллектором и базой, называется коллекторным переходом, а переход, возникающий между эмиттером и базой – эмиттерным. Конструктивно область коллектора и эмиттера отличаются друг от друга, к тому же концентрация примесей в эмиттерной области значительно больше чем в коллекторной, поэтому путать их не следует.

Существует четыре режима работы биполярного транзистора:

- активный режим – открыт эмиттерный переход и закрыт коллекторный. В этом режиме ток коллектора зависит от тока базы и связан с ним следующим соотношением: $I_k = I_b \cdot \beta$.

Активный режим используется при построении транзисторных усилителей;

- режим насыщения – оба р-п перехода транзистора открыты и через них протекают прямые токи, участок э-к имеет высокую проводимость и может считаться короткозамкнутым. При этом ток коллектора перестаёт зависеть от тока базы в соответствии с указанной выше формулой. В этом случае говорят, что транзистор полностью открыт или просто открыт;

- режим отсечки – оба р-п перехода закрыты, участок э-к находится в высокоомном состоянии и может считаться разомкнутым. При этом ток через него не течёт (за исключением очень маленьких токов утечки – обратных токов через р-п переходы). В этом случае говорят, что транзистор полностью закрыт или просто закрыт. Режимы насыщения и отсечки используются при построении транзисторных ключей;

- инверсный режим – открыт коллекторный и закрыт эмиттерный переход. Этот режим является довольно экзотическим и используется редко.

В качестве элемента электрической цепи транзистор используется таким образом, что один из его выводов является входным, другой выходным, а третий вывод является общим относительно входа и выхода. В зависимости от того, какой вывод является общим, существует три схемы включения транзистора: с *общим эмиттером* (ОЭ), *общей базой* (ОБ) и *общим коллектором* (ОК). При включении биполярного транзистора с ОЭ цепь базы является входной, а цепь коллектора – выходной. Схема включения транзистора с ОЭ в активном режиме показана на рисунке 2.

Физические процессы в транзисторе с ОЭ аналогичны при включении транзистора с ОБ. Под действием напряжения $U_{бэ}$ в цепи эмиттера проходит ток $I_э$. В базе этот ток разветвляется. Основная его часть идет в коллектор, создавая управляемую составляющую тока коллектора, другая часть – в цепь базы, определяя ток базы рекомбинации. Из всего вышесказанного получаем уравнение для токов транзистора

$$I_э = I_k + I_b. \quad (1)$$



Здесь ток базы много меньше тока эмиттера и тока коллектора, поэтому $I_{\text{э}} \approx I_{\text{к}}$.

Навстречу току рекомбинации в базе проходит обратный ток коллектора $I_{\text{кб0}}$.

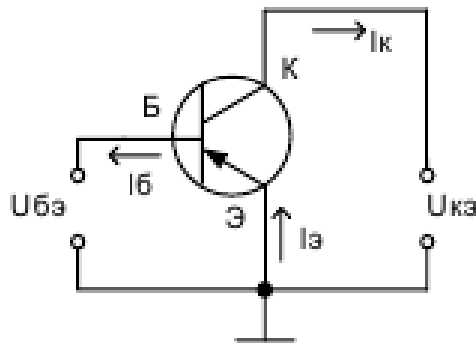


Рисунок 2 - Схема включения транзистора с ОЭ в активном режиме
Соотношения между токами транзистора описываются двумя параметрами:

- статическим коэффициентом передачи тока эмиттера $\alpha = I_{\text{к}}/I_{\text{э}}$;
- статическим коэффициентом передачи тока базы $\beta = I_{\text{к}}/I_{\text{б}}$.

Используя уравнение для токов транзистора легко получить выражение взаимосвязи коэффициентов передачи:

$$\beta = \alpha / (1 - \alpha). \quad (2)$$

Величины этих коэффициентов зависят от конструкции транзистора. Для маломощных транзисторов обычно коэффициент $\beta = 20 \dots 350$, а коэффициент $\alpha = 0,95 \dots 0,995$.

Выходными статическими характеристиками транзистора с ОЭ является семейство характеристик $I_{\text{к}} = f(U_{\text{кэ}})$ при $I_{\text{б}} = \text{const}$. Вид этих характеристик отражает особенности работы транзистора с ОЭ в различных режимах (рисунок 2).



Рисунок 3 – Выходные характеристики транзистора с ОЭ

В активном режиме и режиме насыщения эмиттерный переход включается в прямом направлении. Под действием напряжения в цепи базы проходит ток $I_{\text{б}}$. За счет напряжения $U_{\text{бэ}}$ при нулевом напряжении коллектора оба р-п-перехода транзистора смещены в прямом направлении. Транзистор работает в режиме насыщения и через коллектор проходит ток инжекции,

направление которого противоположно направлению коллекторного тока в активном режиме. В базе накапливаются неосновные носители заряда.

С появлением небольшого отрицательного напряжения на коллекторе ток инжекции из коллектора уменьшается, а ток обусловленный экстракцией дырок из базы в коллектор увеличивается. Поэтому при увеличении отрицательного напряжения коллектора до значения $U_{кэ} = U_{бэ}$ наблюдается значительный рост коллекторного тока. При $|U_{кэ}| > |U_{бэ}|$ транзистор из режима насыщения переходит в активный режим. Рост коллекторного тока при дальнейшем увеличении отрицательного напряжения $U_{кэ}$ замедляется. Но наклон выходных характеристик в схеме с ОЭ оказывается больше, чем в схеме с ОБ.

Увеличение тока базы вызывает увеличение коллекторного тока, то есть смещение выходных характеристик вверх.

Входные характеристики. Входные характеристики транзистора с ОЭ (рисунок 3) отображают зависимость $I_b = f(U_{бэ})$ при $U_{кэ} = \text{const}$.

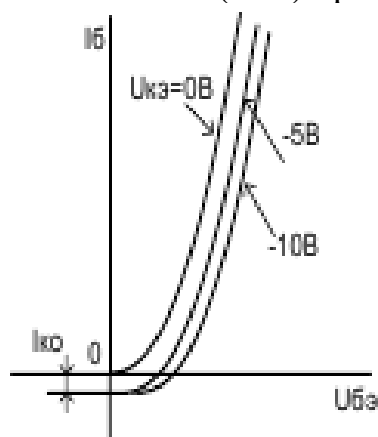


Рисунок 4 – Входные характеристики транзистора с ОЭ

При $U_{кэ} = 0$ оба р-п-перехода транзистора оказываются включенными в прямом направлении. Из эмиттера и коллектора осуществляется инжекция дырок в базу. В цепи базы проходит ток рекомбинации обоих переходов. Поэтому входная характеристика представляет собой ВАХ двух параллельно включенных р-п-переходов.

При $U_{кэ} < 0$ коллекторный переход включается в обратном направлении и в цепи базы проходит ток $I_b > 0$.

Если $U_{бэ} = 0$, то $I_э = 0$ и в цепи базы проходит ток $I_b = -I_{кб0}$. Увеличение напряжения $U_{бэ}$ сопровождается рекомбинационной составляющей тока базы, и при некотором напряжении $U_{бэ}$ ток базы становится равным нулю. Дальнейшее увеличение напряжения $U_{бэ}$ сопровождается ростом тока базы. При увеличении отрицательного напряжения коллектора наблюдается смещение характеристик в сторону оси токов. Это связано с прохождением обратного тока коллектора $I_{кб0}$.

Статический коэффициент передачи транзистора по постоянному току определяется как отношение тока коллектора I_k к току базы I_b :

$$\beta_{DC} = I_k / I_b. \quad (4)$$

Статический коэффициент передачи транзистора по переменному току определяется как отношение приращения тока коллектора I_K к приращению тока базы I_B :

$$B_{AC} = \Delta I_K / \Delta I_B. \quad (5)$$

Выходными статическими характеристиками транзистора, включенного с ОЭ является семейство характеристик

$$I_K = f(U_{KЭ}) \text{ при } I_B = \text{const}. \quad (6)$$

Входными статическими характеристиками транзистора, включенного с ОЭ является семейство характеристик

$$I_B = f(U_{БЭ}) \text{ при } U_{KЭ} = \text{const}. \quad (7)$$

Дифференциальное входное сопротивление $R_{двх}$ транзистора в схеме с общим эмиттером (ОЭ) определяется при фиксированном значении напряжения коллектор-эмиттер $U_{КЭ}$. Оно может быть найдено как отношение приращения напряжения база-эмиттер к вызванному им приращению тока базы:

$$R_{двх} = \Delta U_{БЭ} / \Delta I_B = (U_{БЭ2} - U_{БЭ1}) / (I_{Б2} - I_{Б1}). \quad (8)$$

В режиме отсечки полярности и значения напряжений $U_{КЭ}$ и $U_{БЭ}$ таковы, что коллекторный и эмиттерный переходы смещены в обратном направлении. В этом случае через эмиттерный переход проходит обратный ток $I_{ЭБО}$, а через коллекторный переход – ток $I_{КБО}$. Во входной цепи проходит ток базы

$$I_B = I_{ЭБО} + I_{КБО}. \quad (9)$$

2. Активный режим и насыщения

Для исследования биполярного транзистора в активном режиме и режиме насыщения необходимо собрать стенд схемы с ОЭ как на рис. 5. Для выполнения работы транзистор берётся согласно варианту из таблицы.

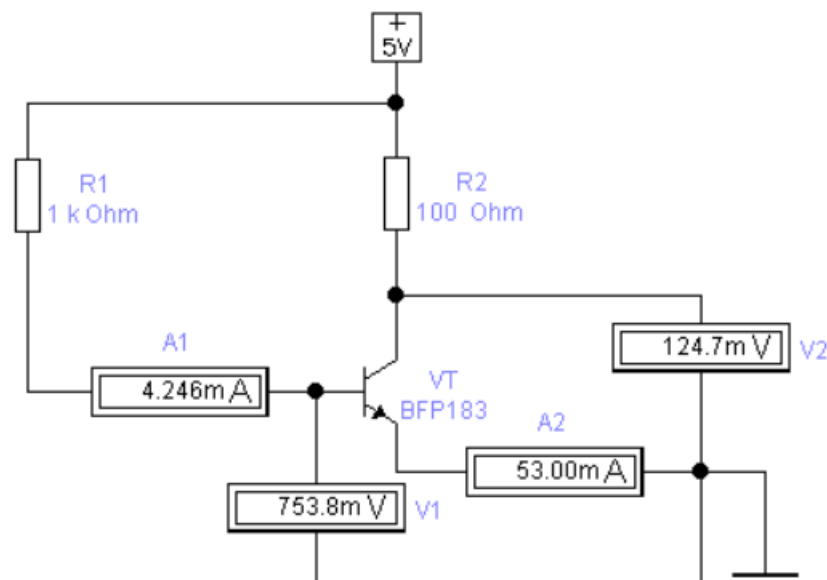


Рисунок 5. Схема стенда для исследования биполярного транзистора в активном режиме и насыщения

Коэффициент усиления по току вычисляется согласно формуле (4), где ток коллектора вычисляется по формуле (1).

3. Режим отсечки

Для исследования биполярного транзистора в режиме отсечки необходимо в схему стенда на рис. 5 добавить переключатель между сопротивлением R1 и амперметром A1, как показано на рис. 6.

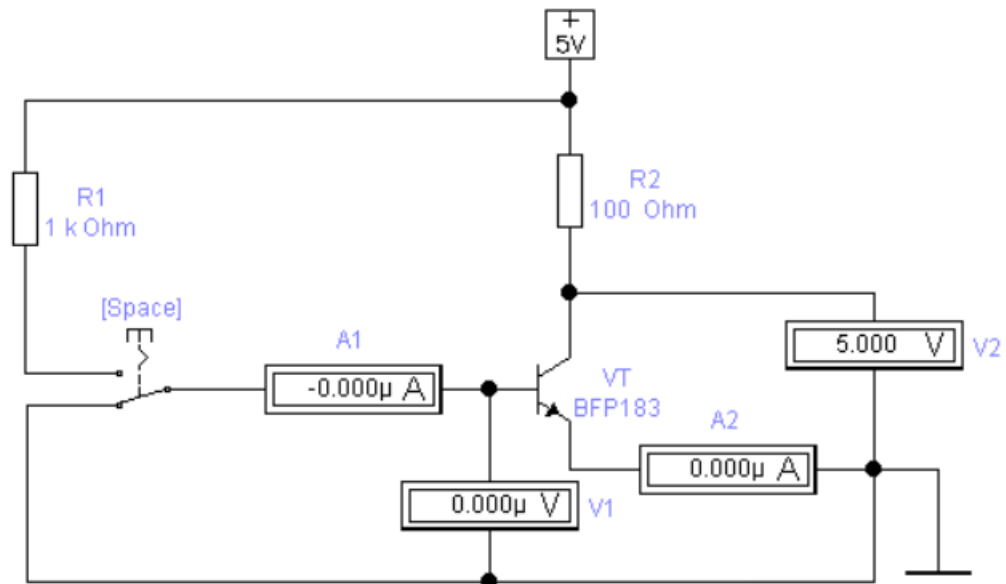


Рисунок 6. Схема стенда для исследования биполярного транзистора в режиме отсечки

Переключая положения кнопки между землёй и сопротивлением R1, транзистор VT переводится из режима отсечки в активный режим или насыщения (в зависимости от номинала R1) соответственно.

4. Инверсный режим

Для исследования биполярного транзистора в инверсном режиме необходимо собрать схему стенда, как показано на рис. 7.

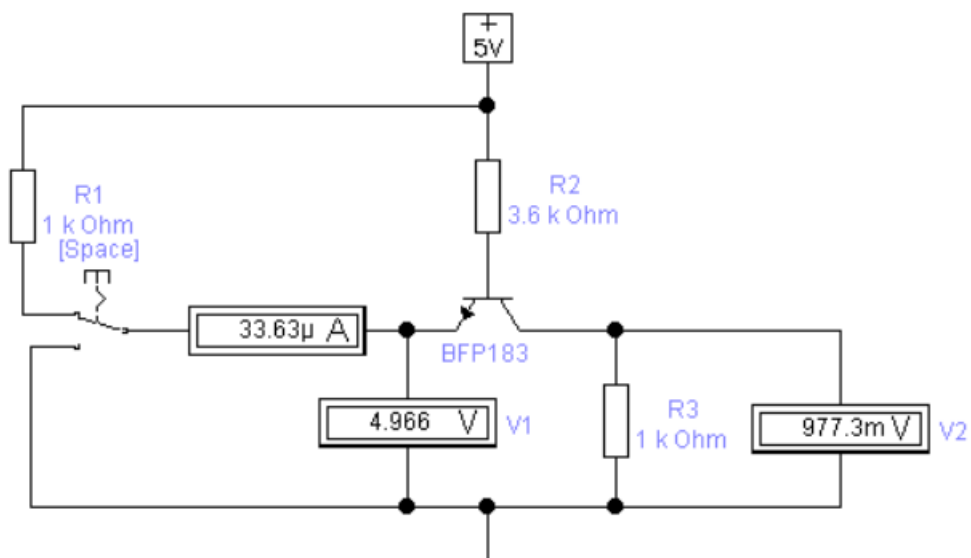


Рисунок 7. Схема стенда для исследования биполярного транзистора в инверсном режиме

Транзистор находится в инверсном режиме при положении кнопки на сопротивлении R1. Вольтметр V2 показывает напряжение U_n на нагрузке R3. В другом положении кнопки транзистор в активном режиме проводит ток через б-э переход. В этом случае амперметр будет показывать ток утечки I_y .

ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

1. Соберите стенд как показано на рис. 5 для заданного вариантом транзистора и включите его. Последовательно устанавливая значения сопротивления R1 в кОм: 0,4, 0,6, 0,8, 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 20, 40, 60, 80, 100, запишите показания для $U_{бэ}$, $U_{кэ}$. Вычислите ток коллектора I_k согласно формуле (1), сопротивление к-э перехода $R_{кэ} = U_{кэ} / I_k$ и коэффициент усиления по току β_{DC} согласно формуле (4). Определите границы активного режима и насыщения.

2. Добавьте на стенд переключатель как на рис. 6 и включите схему. Убедитесь, что транзистор правильно работает в режиме отсечки. Переведите положение кнопки на резистор R1 и убедитесь, что транзистор работает в том же режиме, в каком работал до добавления переключателя.

3. Соберите стенд как показано на рис. 7 для заданного вариантом транзистора. Включите схему. Запишите значение U_n . Выключите схему. Переведите переключатель в другое положение и включите схему. Запишите значение I_y .

4. Напишите выводы о проделанной работе.

Таблица

Варианты задания

№	Транзистор	№	Транзистор	№	Транзистор
1	2N2712	8	2N3393	15	T341
2	2N2923	9	2N3394	16	T351
3	2N2924	10	2N3414	17	T395
4	2N2925	11	BFG196	18	T503
5	2N3390	12	T251	19	BC107BP
6	2N3391	13	T259	20	BC337AP
7	2N3392	14	T296		

СОДЕРЖАНИЕ ОТЧЕТА

Отчет по работе должен быть оформлен согласно ОС ТУСУР 01-2021 и содержать следующие разделы.

1) введение (цель работы и постановка задачи).

В разделе описываются цель работы и задачи (как общие для всех, так и задачи своего варианта), которые необходимо выполнить.

2) работа транзистора в активном режиме и насыщения.

Приводятся рисунки схемы с несколькими измерениями и таблица со столбцами «R1, кОм» (номинал резистора), «Uбэ, мВ» (значения с вольтметра V1), «Uкэ, мВ» (значения с вольтметра V2), «Iб, мА» (значение с амперметра A1), «Iк, мА» (вычисленное значение) и «Rкэ, Ом» (вычисленное значение), « β_{DC} » (вычисленное значение) и «режим» (указывается для каждой строчки в каком режиме работает транзистор).

3) работа транзистора в режиме отсечки.

Приводятся рисунки стенда в двух режимах транзистора. К каждому рисунку приводятся пояснения к показаниям приборов согласно режиму работы транзистора.

4) работа транзистора в инверсном режиме.

Приводятся рисунки стенда для двух положений переключателя. К каждому рисунку приводятся пояснения к показаниям приборов согласно режиму работы транзистора. Записать значения U_n и I_y .

5) заключение.

Приводятся выводы о проделанной работе: в краткой форме описывается что было сделано и какие результаты были получены.

Структурные разделы, такие как «Оглавление», «Введение», «Заключение», «Список использованных источников» – не нумеруются, пишутся строчными буквами, кроме первой заглавной. Остальные разделы (заголовки первого уровня) должны быть пронумерованы и написаны ПРОПИСНЫМИ буквами.

ПРИМЕРНЫЙ СПИСОК ВОПРОСОВ ПРИ ЗАЩИТЕ РАБОТЫ

1. Чем объяснить название биполярного транзистора? Как биполярные транзисторы обозначаются в схемах? Какие основные физические процессы лежат в основе принципа действия биполярного транзистора?
2. Какие вы знаете режимы работы биполярного транзистора? Показать на схемах, назвать области применения.
3. Какие существуют схемы включения биполярного транзистора? Назовите основные параметры биполярных транзисторов.
4. Какие зависимости называются статическими характеристиками транзисторов? Назовите их разновидности, назначение.
5. Поясните работу схемы включения биполярного транзистора с общей базой. Статические вольтамперные характеристики для этой схемы включения (входные и выходные). Чему равны коэффициенты усиления?

6. Поясните работу схемы включения биполярного транзистора с общим эмиттером. Выходные и входные статические характеристики. Чему равны коэффициенты усиления?
7. Поясните работу схемы включения биполярного транзистора с общим коллектором. Выходные и входные статические характеристики. Чему равны коэффициенты усиления?
8. От чего зависит ток коллектора транзистора?
9. Что такое токи утечки транзистора в режиме отсечки?
10. Сколько существует режимов работы биполярного транзистора? Перечислите и охарактеризуйте их.
11. Сколько существует схем включения транзистора? Перечислите и нарисуйте их.
12. Какой режим работы транзистора используется для усиления сигналов?

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №3 «ЛОГИЧЕСКИЕ ЭЛЕМЕНТЫ ТТЛ»

Цель работы: изучение работы логических элементов ТТЛ.

МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ

1. Цифровые интегральные схемы

Цифровые интегральные схемы (ИС) представляют собой электронные устройства, из которых состоят практически все узлы или блоки вычислительных машин. Обработка информации представлена в виде двоичных чисел. Переменные величины и функции от них называются соответственно логическими переменными и логическими функциями (принимает только два значения 0 или 1).

Свойства логических функций изучает алгебра логики, электронные устройства, реализующие логические функции, называются логическими или цифровыми.

Схемотехническая реализация потенциальных цифровых микросхем осуществляется на основе ряда типовых базовых логических элементов (БЛЭ).

Простейшей логической функцией является функция НЕ (инверсия или логическое отрицание), которая записывается в виде $Y(X) = \bar{X}$. В электронных схемах отрицание реализуется с помощью прибора, построенного на транзисторах. Следует отметить, что все потенциальные цифровые элементы могут работать в двух логических режимах. Если за «1» принят высокий, а за «0» – низкий уровень сигнала, то имеет место *положительная логика*. Если за «1» принят низкий уровень сигнала, а за «0» – высокий, то имеет место *отрицательная логика*. Как правило, в справочниках на ИС указываются функции, реализуемые для положительной логики.

На основе простейших цифровых элементов, выполняющих функции: И; ИЛИ; НЕ; И-НЕ; ИЛИ-НЕ; и др. могут быть построены более сложные функциональные узлы:

- комбинаторные схемы;
- схемы с памятью.

К комбинаторным схемам относятся схемы, для которых состояние выходов зависит от состояния входов в текущий момент времени. К таким схемам можно отнести преобразователи кодов, сумматоры, шифраторы, мультиплексоры и т.д.

Схемы с памятью включают в себя различные типы триггеров в сочетании со схемами управления. К таким ИС можно отнести различные регистры, счётные устройства и т.д.

ТТЛ расшифровывается как *транзисторно-транзисторная логика*, а ТТЛШ – как *транзисторно-транзисторная логика с переходами Шотки*.

В табл. 1 приведена маркировка схем ТТЛ, принятая в России, и их импортные аналоги фирмы Texas Instruments.

Маркировка ТТЛ

Отечественные серии ИС (К, КР)	Импортные функциональные аналоги
133, 155	SN54, SN74
130, 131 (<i>впоследствии заменены микросхемами серий 530, 531</i>)	SN54H, SN74H
134	SN54L, SN74L
530, 531	SN54S, SN74S
533, 555	SN54LS, SN74LS
1530	SN54AS
1533	SN54ALS, SN74ALS
1531	54F, 74F (F – FAST)

В отечественной маркировке для микросхем, используемых в устройствах широкого потребления, в начале обозначения ставится буква К (например, К555АП4):

КР – пластмассовый корпус DIP;

КМ – металлокерамический корпус DIP;

КС – стеклокерамический корпус DIP.

В импортных маркировках ИС используются обозначения:

L (Low) – с малой потребляемой мощностью,

S (Schottky) – наличие в структурах диодов Шоттки,

A (Advanced) – усовершенствованные,

H (High) – с повышенным быстродействием,

F (FAST) – Fairchild Advanced Schottky TTL.

Цифрой 54 обозначают микросхемы, работающие в расширенном (промышленном) температурном диапазоне $-55...+125$ °С. Корпус металлокерамический.

Цифрой 74 обозначают микросхемы, работающие в «обычном» температурном диапазоне $0...+70$ °С. Но существуют варианты для диапазона $-40...+85$ °С. Корпус чаще всего пластмассовый.

2. Базовый логический элемент ТТЛ

Базовый элемент ТТЛ состоит из биполярных транзисторов.

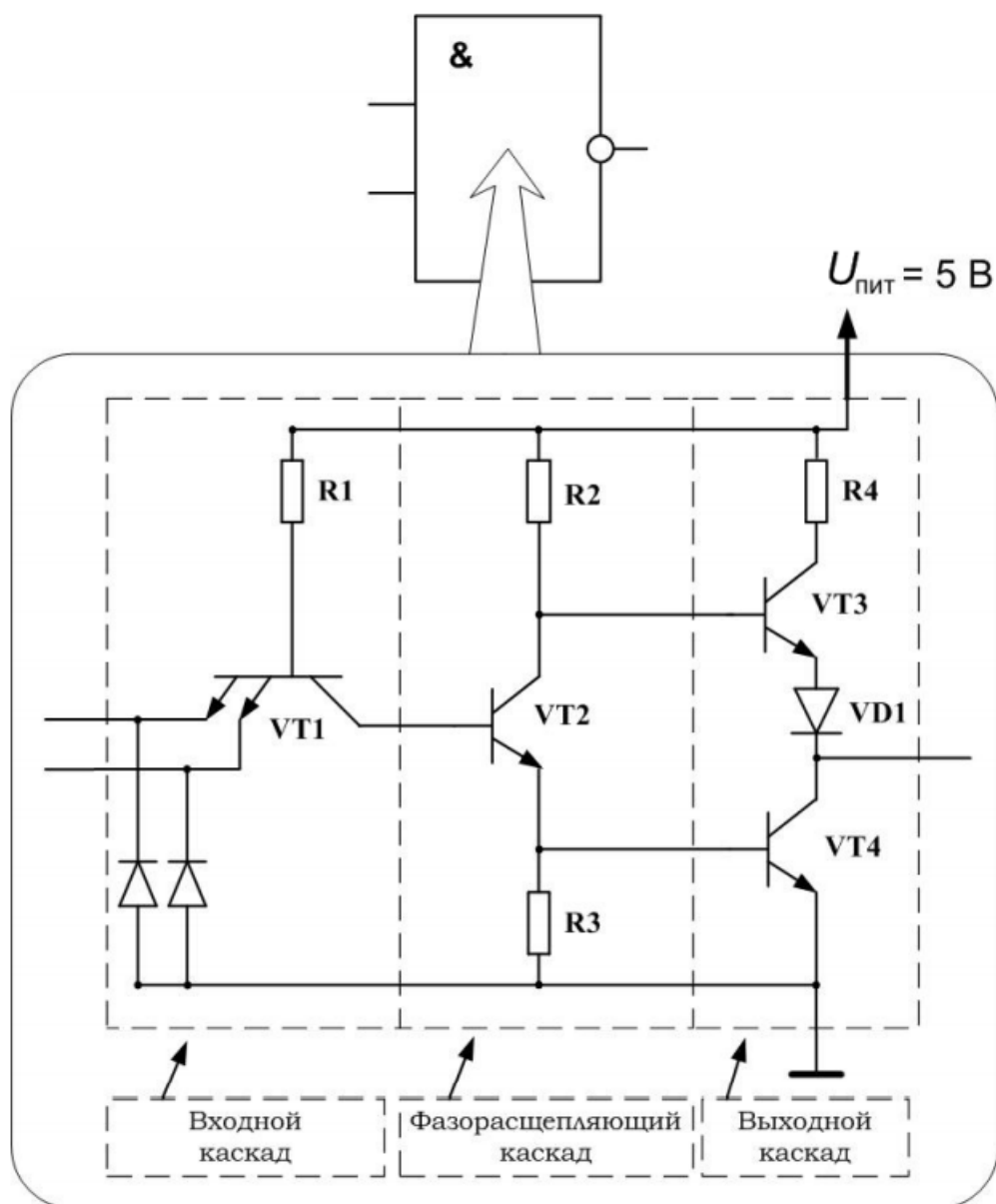


Рисунок 1. Схема двухвходового ТТЛ элемента И-НЕ

На рис. 1 представлена упрощённая схема элемента И-НЕ на два входа «2-И-НЕ», которая содержит каскады:

- входной многоэмиттерный транзистор (МЭТ) VT1;
- фазорасщепляющий каскад на транзисторе VT2;
- двухтактный выходной каскад на транзисторах VT3 и VT4.

Многоэмиттерный транзистор (МЭТ) представляет собой интегральный элемент, объединяющий свойства диодной схемы (два перехода ЭМИТТЕР–БАЗА (Э–Б) можно рассматривать как два параллельно включенных диода) и транзисторный усилитель с малым инверсным коэффициентом усиления по току. Функция И выполняется в общих (для нескольких эмиттеров транзистора VT1) областях: базе и коллекторе.

Основное отличие МЭТ от обычных транзисторов том, что эмиттеры расположены так, что прямое взаимодействие между ними через разъединяющий их участок пассивной базы практически исключается.

Рассмотрим принцип работы логического элемента (ЛЭ) 2-ИНЕ, схема которого представлена на рис. 1.

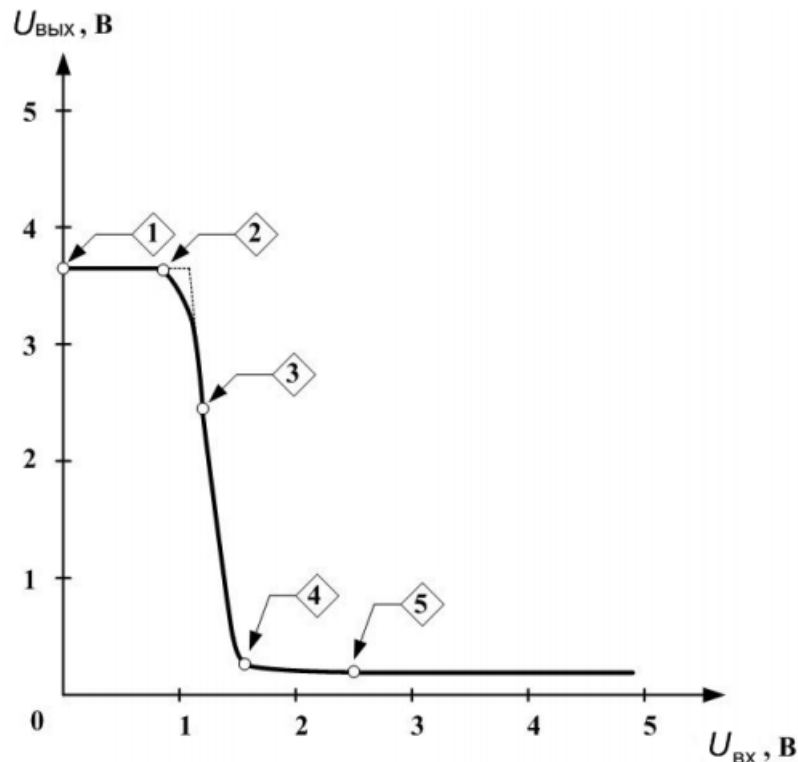


Рисунок 2. Передаточная характеристика инвертора стандартной серии ТТЛ

Если (уровень логического нуля подан на любой из эмиттеров – входов МЭТ) переход Б–Э транзистора VT1 открыт. Ток $I_{вх}^0$ определяется, как

$$I_{вх}^0 \approx \frac{U_{пит} - 0,7}{R_1}.$$

При этом потенциала на базе VT1 $U \approx 0,7$ В недостаточно, чтобы открыть три р-п-перехода:

- Б-К транзистора VT1;
- Б-Э транзистора VT2;
- Б-Э транзистора VT4.

Для открывания этой цепи из трёх р-п-переходов необходим потенциал $U_{бVT1} \approx 0,6 \cdot 3 = 1,8$ В. Следовательно, транзисторы VT2, VT4 закрыты.

Транзистор VT3 открыт, и уровень напряжения на выходе Y соответствует уровню логической 1, $U_{вых}^1 \approx 3,85$ В.

При увеличении $U_{вх}$ (на обоих входах МЭТ VT1) до порогового значения $U_{пор1} = 0,8$ В (точка 2 на передаточной характеристике) транзистор VT2 начинает открываться, но транзистор VT4 ещё закрыт. При дальнейшем увеличении $U_{вх}$ до порогового значения $U_{пор2} = 1,25$ В транзистор VT2 открывается, а транзистор VT4 только начинает открываться (точка 3 на передаточной характеристике).

Дальнейшее увеличение $U_{вх}$ приводит к увеличению потенциала на базе транзистора VT1 до 1,2 В. Этого вполне достаточно, чтобы открыть два перехода:

- Б-К транзистора VT1;

- Б-Э транзистора VT2.

Транзистор VT2 открывается, ток через резистор R2 увеличивается, что вызывает уменьшение напряжения U_k транзистора VT2. Увеличение тока через R3 вызывает увеличение потенциала на базе транзистора VT4 и приводит к его открыванию. Открытый транзистор VT4 (участок 3–4 передаточной характеристики) шунтирует R3, что резко увеличивает коэффициент передачи транзистора VT2 и вызывает дальнейшее уменьшение напряжения U_k транзистора VT2.

Однако некоторое время транзистор VT4 уже открыт, а транзистор VT3 ещё не закрыт. Это приводит к протеканию «сквозного тока» через выходные транзисторы VT3 и VT4, ток потребления при этом ограничивается R4 и объёмными сопротивлениями транзисторов и диода VD1.

При дальнейшем увеличении $U_{вх}$ транзисторы VT2 и VT4 переходят в режим насыщения (участок 4–5 передаточной характеристики). Потенциал U_k транзистора VT2 равен 0,9 В (такой же потенциал базы транзистора VT3), чего недостаточно, чтобы открыть два перехода:

- Б-Э транзистора VT3;
- переход VD1.

Наличие диода VD1 обеспечивает надёжное закрытие транзистора VT3 при «0» на выходе логического элемента. Принято считать $U^0_{вых} \approx 0,2$ В – это напряжение на транзисторе VT4 полностью открытого, «в насыщении».

В реальных схемах ТТЛ в базу выходного транзистора VT4 введена корректирующая цепочка, состоящая из резисторов R3, R4 и транзистора VT3 (рис. 3).

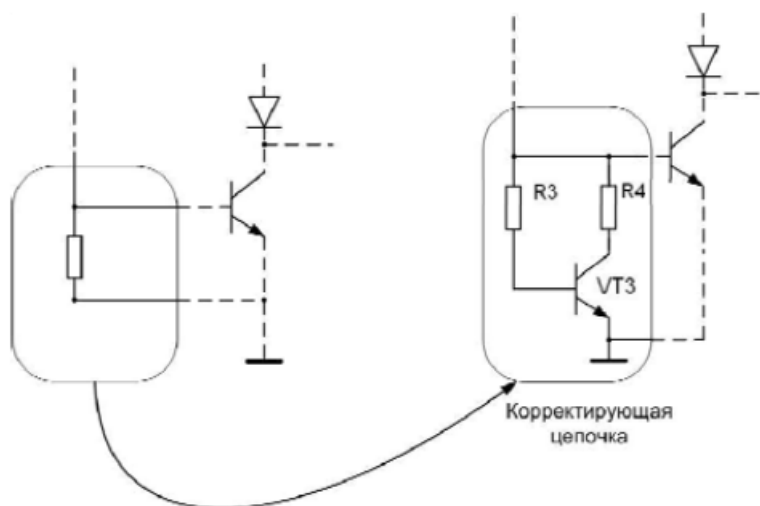


Рисунок 3. Корректирующая цепочка

Эта цепочка позволяет получить передаточную характеристику, по форме близкую к прямоугольной (см. штриховую линию на рис. 2).

Реальные сигналы в цифровых устройствах не имеют строгой прямоугольной формы. В моменты «окончания сигнала» в монтажных цепях могут возникать затухающие колебания, следствием чего может быть ложное срабатывание схемы, на вход которой они попадают. Для исключения этого явления схемы ТТЛ подвергались доработке, в результате к каждому входу

МЭТ были подключены так называемые демпфирующие диоды VD1, VD2 (рис. 4).

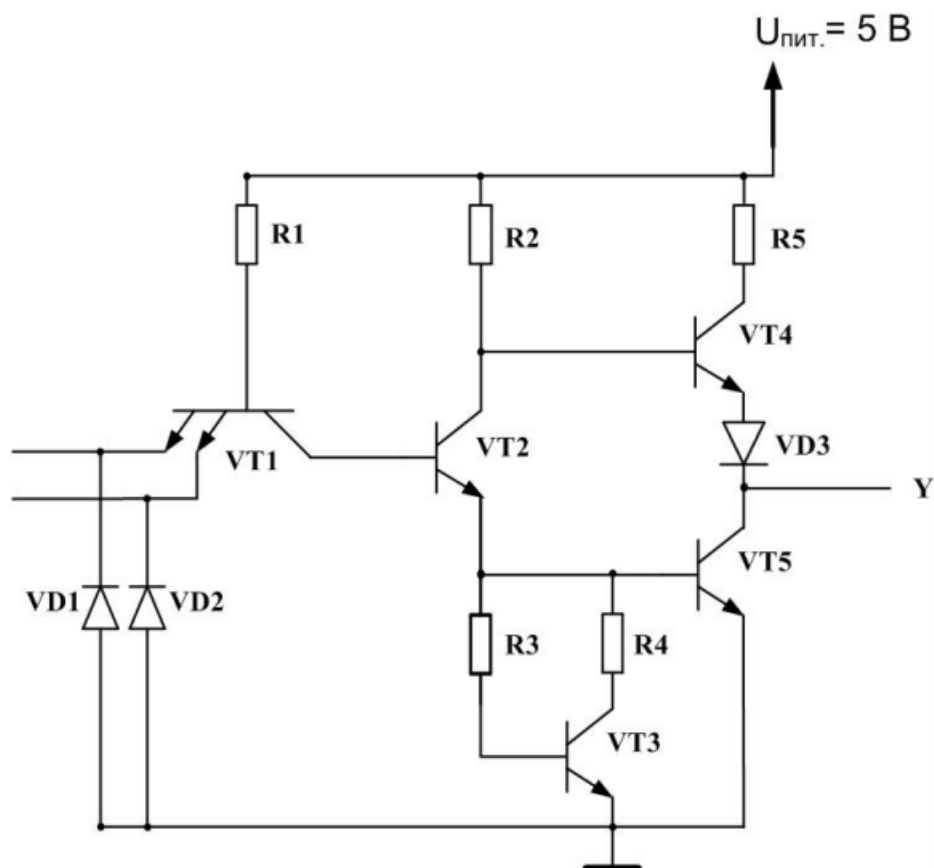


Рисунок 4. Схемотехника ЛЭ стандартной серии ТТЛ

3. Уровни сигналов

В настоящее время применяются два вида ТТЛ микросхем — с пяти и с трёхвольтовым питанием, но, независимо от напряжения питания микросхем, логические уровни нуля и единицы на выходе этих микросхем совпадают. Поэтому дополнительного согласования между ТТЛ микросхемами обычно не требуется. Допустимый уровень напряжения на выходе цифровой ТТЛ микросхемы показан на рис. 5.

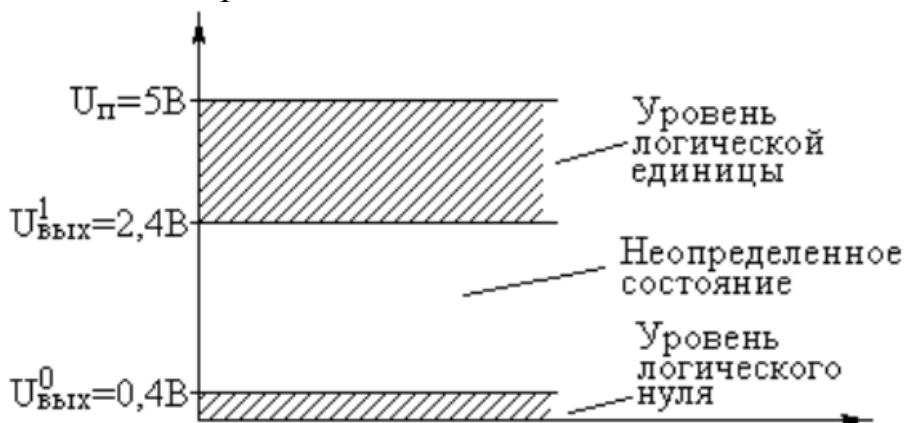


Рисунок 5. Уровни логических сигналов на выходе цифровых ТТЛ микросхем

Напряжение на входе цифровой микросхемы по сравнению с выходом обычно допускается в больших пределах. Границы уровней логического нуля и единицы для ТТЛ микросхем приведены на рисунке 6.

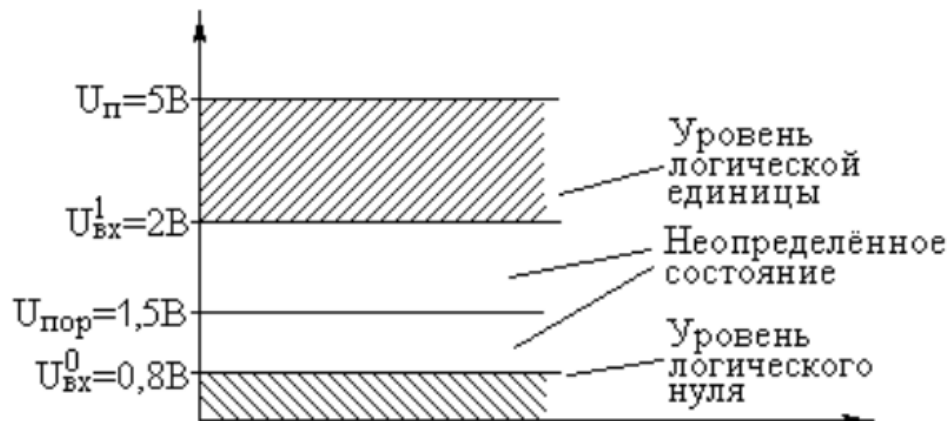


Рисунок 6. Уровни логических сигналов на входе цифровых ТТЛ микросхем

Минимум от разниц между $U^1_{\text{вых}} - U^1_{\text{вх}}$ и $U^0_{\text{вх}} - U^1_{\text{вх}}$ – формирует запас статической помехоустойчивости конкретной ИС. Для примеров на рис. 5 и 6 запас статической помехоустойчивости 0,4 В ($\min(2,4 - 2; 0,8 - 0,4)$).

4. Схемы стендов ЛЭ ТТЛ

Для исследования работы ЛЭ НЕ и измерения электрических параметров необходимо использовать стенд как на рис. 7.

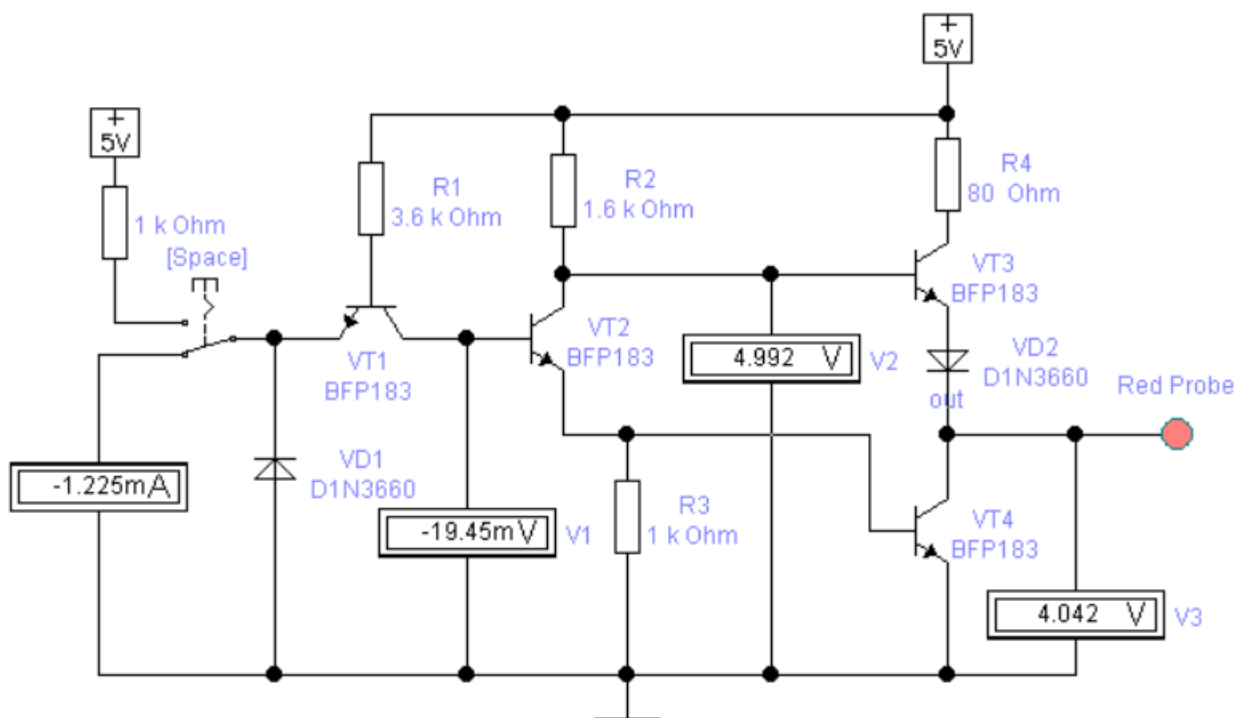


Рисунок 7. Схема стенда ЛЭ НЕ ТТЛ

С помощью стенда на рис. 8 можно исследовать ЛЭ 2ИЛИ-НЕ.

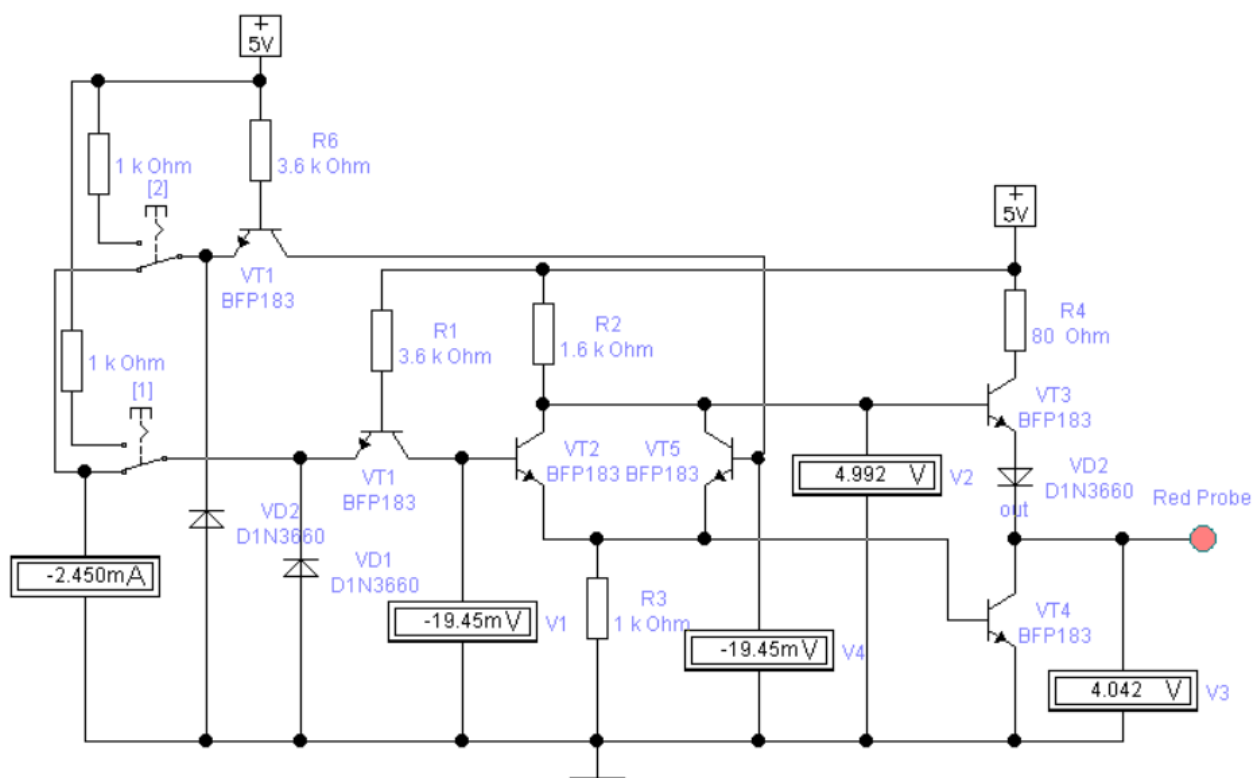


Рисунок 8. Схема станда ЛЭ 2ИЛИ-НЕ ТТЛ
Для исследования ЛЭ И-НЕ показан пример станда на рис. 9.

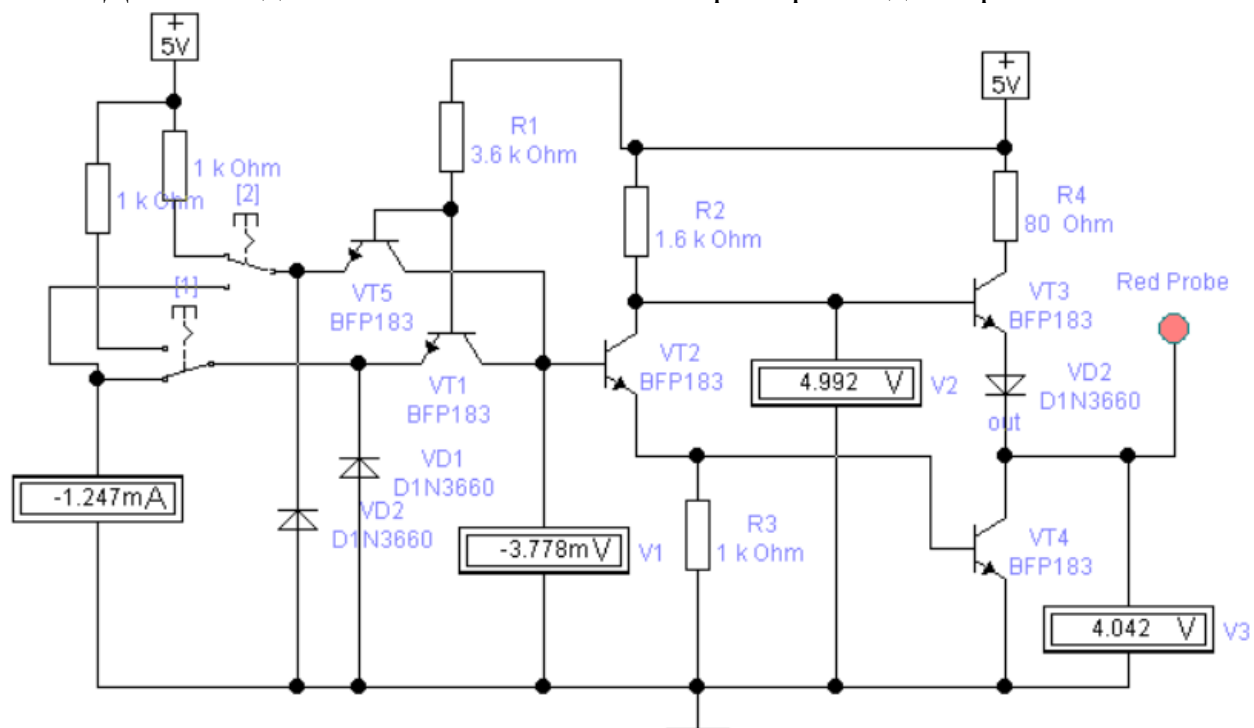


Рисунок 9. Схема станда ЛЭ 2И-НЕ ТТЛ
В выходном каскаде вместо пары VT3-VD2 используют составной транзистор по схеме Дарлингтона. Пример станда ЛЭ НЕ с составным транзистором показан на рис. 10.

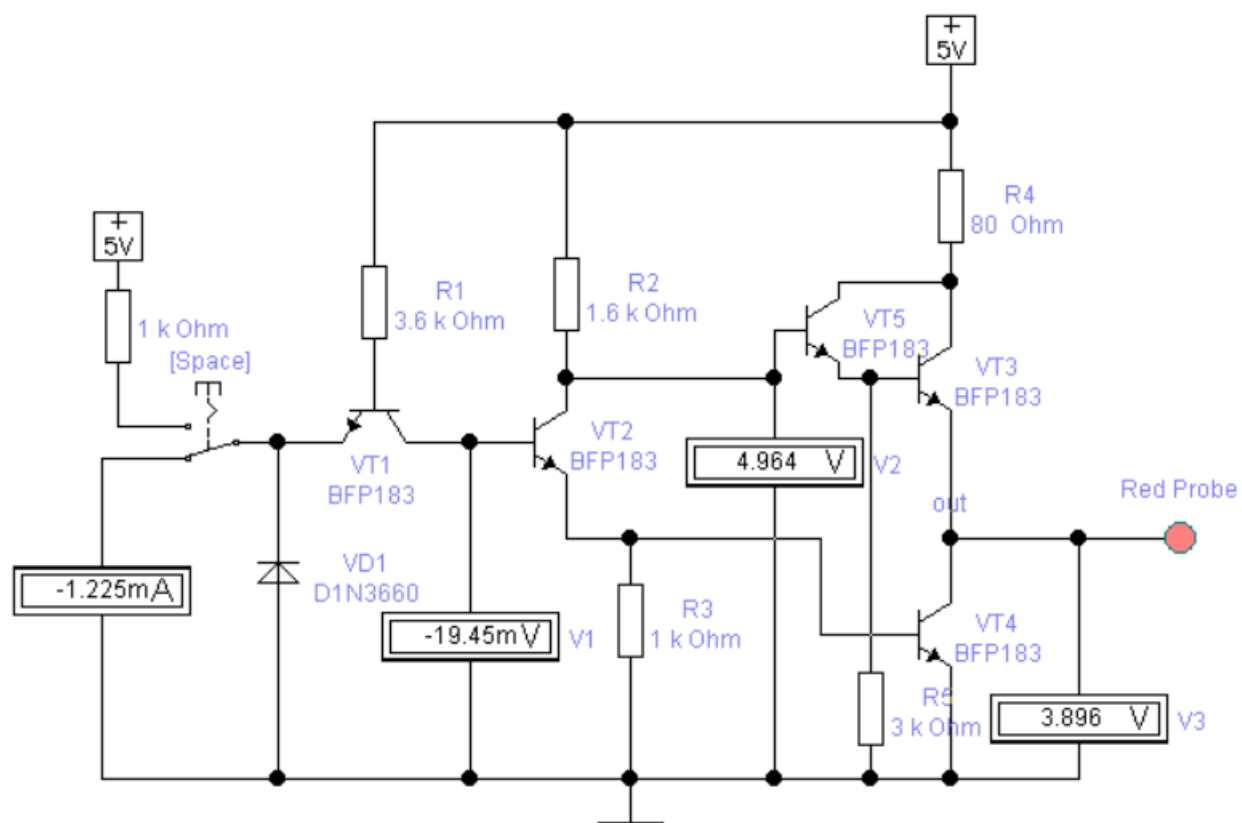


Рисунок 10. Схема стенда ЛЭ НЕ ТТЛ с составным транзистором по схеме Дарлингтона в выходном каскаде

Пример стенда ЛЭ НЕ с тремя состояниями выхода показан на рис. 11.

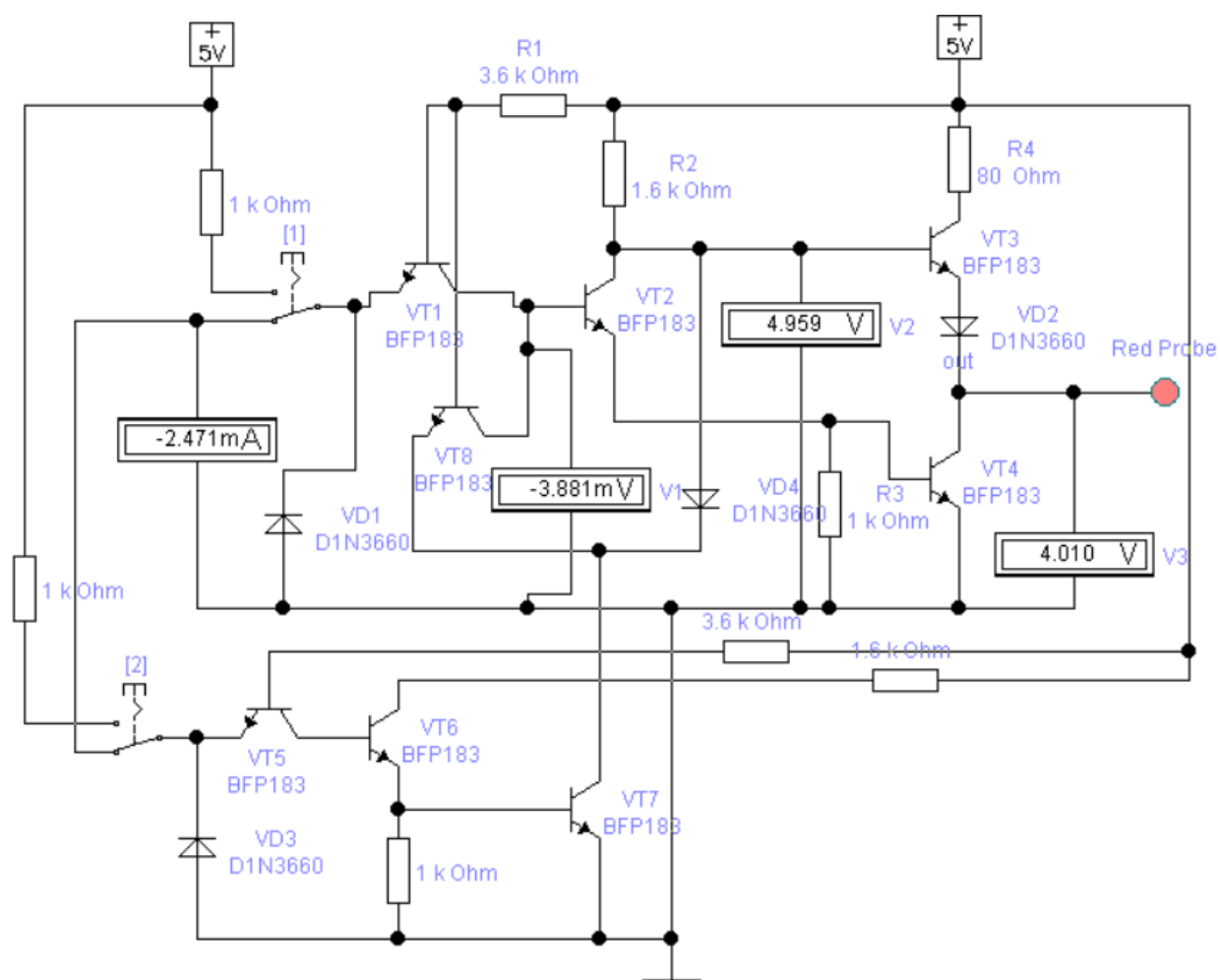


Рисунок 11. Схема стенда ЛЭ НЕ ТТЛ с тремя состояниями выхода
Стенд для исследования инвертора с открытым коллектором приведена на рис. 12.

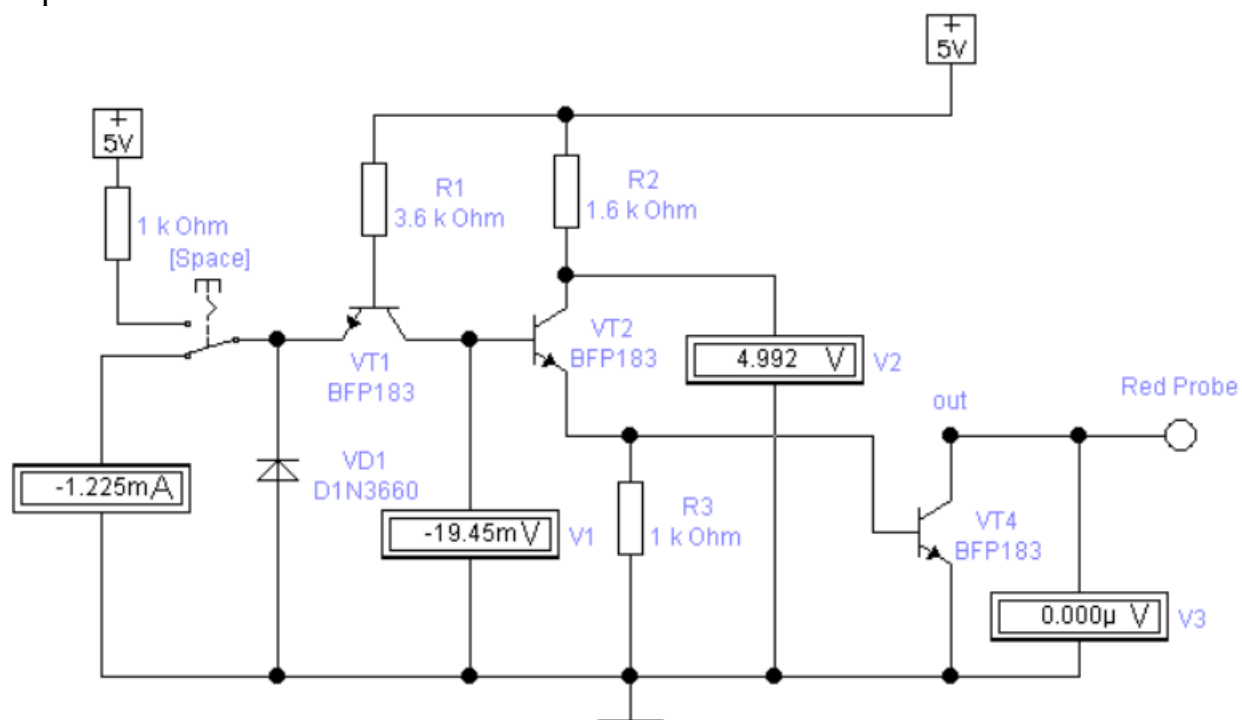


Рисунок 12. Схема стенда ЛЭ НЕ ТТЛ с открытым коллектором

Для исследования ЛЭ с помощью осциллографа необходимо источник тока +5 В заменить на генератор сигнала (рис. 13) с частотой 1 МГц и длительностью сигнала 0,1 от общего периода сигнала (duty cycle = 10%) с амплитудой напряжения 4 В.

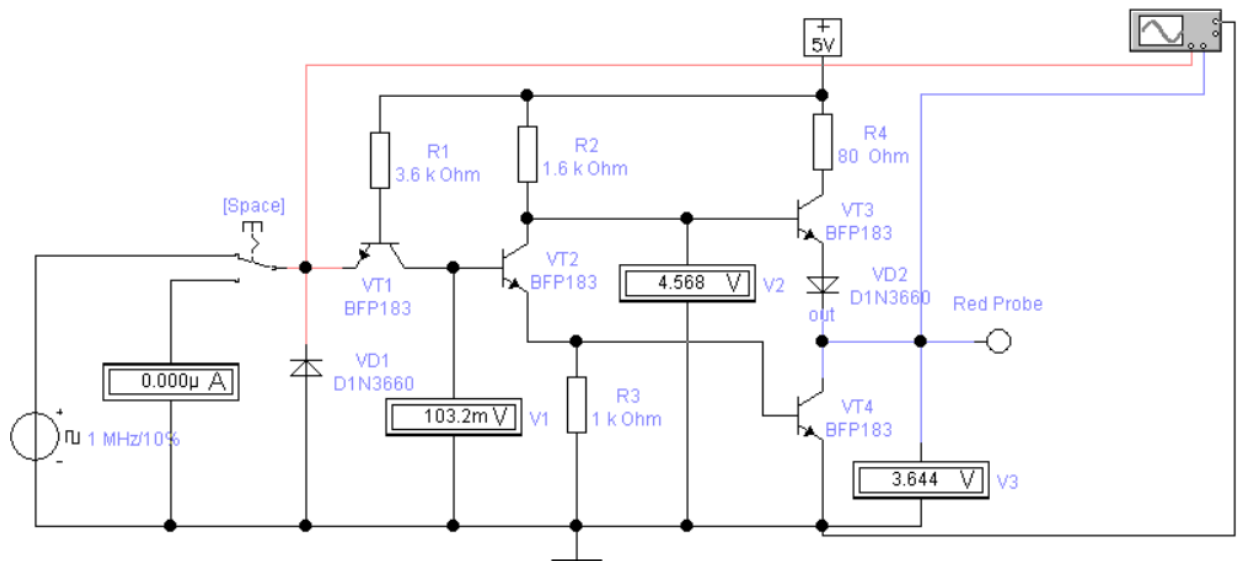


Рисунок 13. Схема стенда ЛЭ НЕ ТТЛ с осциллографом
Пример сигнала на мониторе осциллографа показан на рис. 14.



Рисунок 14. Пример входного и выходного сигналов на экране осциллографа
При превышении максимальной частоты входного сигнала, сигнал на выходе начинает искажаться (рис. 15).

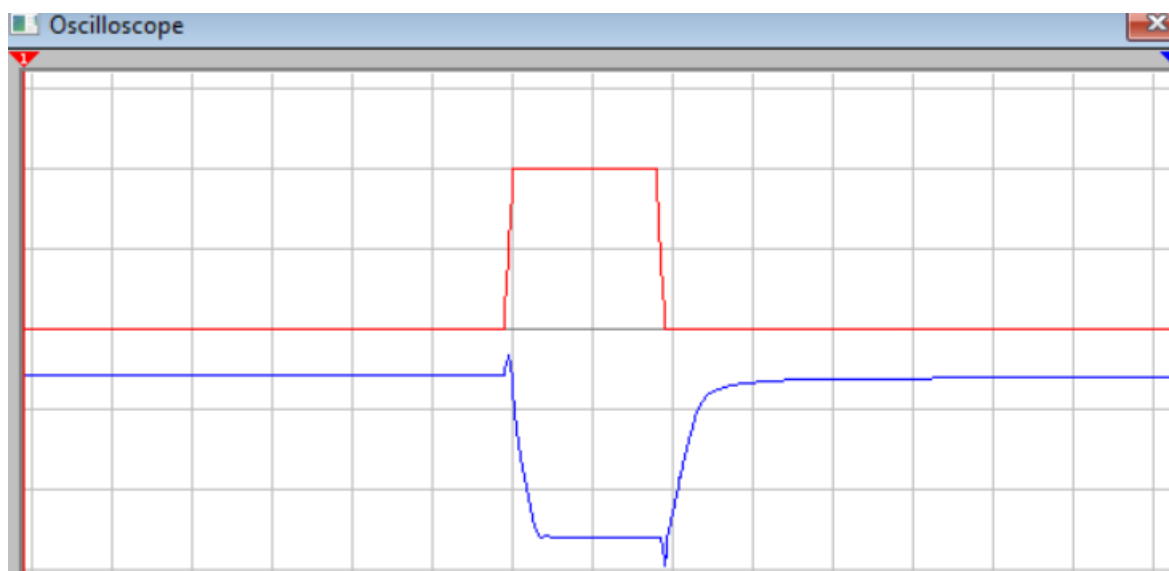


Рисунок 15. Пример искажения выходного сигналов на экране осциллографа

ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

1. Соберите стенд для исследования ЛЭ НЕ как на рис. 7 для заданного вариантом диода, транзистора и номинала сопротивления R_4 на схеме. Измерьте ток утечки на входе I_u и напряжение выхода $U_{вых}$ при всех положениях ключа.

2. Соберите стенд для исследования ЛЭ И-НЕ как на рис. 9 для заданного вариантом диода, транзистора, номинала сопротивления R_4 на схеме и количества входов функции. Измерьте ток утечки на входе I_u и напряжение выхода $U_{вых}$ при всех положениях ключей.

3. Повторите пункт 2 для логической функции ИЛИ-НЕ согласно варианту задания.

4. Повторите пункт 1 для составного транзистора на выходе по схеме Дарлингтона (рис. 10).

5. Повторите пункт 1 для схемы с тремя состояниями выхода (рис. 11). Если на выходе устанавливаются состояния 0 или Z – убедитесь в этом с помощью резистора подтяжки (pull-up). Подключите к выходу через нагрузочный резистор номиналом 1 кОм источник питания. Если напряжение на выходе осталось в пределах уровней напряжения нуля (меньше 0,8 В), тогда это действительно 0 на выходе.

6. Повторите пункт 1 для схемы с открытым коллектором (рис. 12).

7. Повторите пункт 6 подсоединив к точке out источник питания +5 В через сопротивление 1 кОм.

8. Напишите выводы о проделанной работе.

Дополнительные задания за дополнительные +5 баллов независимо от срока сдачи работы. Все задания должны быть выполнены.

1. Соберите стенд для исследования предельной частоты работы схемы согласно рис. 13. На генераторе периодического сигнала изменяйте частоту входного сигнала, пока на мониторе осциллографа не будет искажаться

выходной сигнал как на рис. 15. Уменьшайте частоту входного сигнала, пока не добьётесь чистый выходной сигнал, как на рис. 14. Исходя из эксперимента определите максимальную частоту входного сигнала. Использовать заданные вариантом диод, транзистор и номинал сопротивления R4.

2. Соберите стенд составной функции И-ИЛИ-НЕ, взяв количество входов для И из варианта для И-НЕ, и количество входов для ИЛИ – для ИЛИ-НЕ. Например, в варианте задано 3И-НЕ и 2ИЛИ-НЕ, значит составная функция будет 3-3И-2ИЛИ-НЕ. В выходном каскаде использовать составной транзистор по схеме Дарлингтона. Использовать заданные вариантом диод, транзистор и номинал сопротивления R4.

3. Соберите стенд с тремя состояниями выхода для функции И-НЕ, если в варианте указана 3И-НЕ. Иначе для ИЛИ-НЕ. Количество входов функции согласно варианту задания. В выходном каскаде использовать составной транзистор по схеме Дарлингтона. Использовать заданные вариантом диод, транзистор и номинал сопротивления R4. Если на выходе устанавливаются состояния 0 или Z – убедитесь в этом с помощью резистора подтяжки (pull-up). Подключите к выходу через нагрузочный резистор номиналом 1 кОм источник питания. Если напряжение на выходе осталось в пределах уровней напряжения нуля (меньше 0,8 В), тогда это действительно 0 на выходе.

4. Соберите стенд с открытым коллектором для функции ИЛИ-НЕ, если в п.3 реализовывали функции И-НЕ. Иначе для функции И-НЕ. Количество входов функции согласно варианту задания. Использовать заданные вариантом диод и транзистор.

Таблица 2

Варианты задания

№	Диод	Транзистор	Лог. функц.		R, Ом
1	1N4148	2N2712	ЗИ-НЕ	2ИЛИ-НЕ	100
2	1N4149	2N2923	ЗИ-НЕ	2ИЛИ-НЕ	100
3	1N4150	2N2924	ЗИ-НЕ	2ИЛИ-НЕ	100
4	1N4151	2N2925	ЗИ-НЕ	2ИЛИ-НЕ	100
5	1N4152	2N3390	2И-НЕ	ЗИЛИ-НЕ	100
6	1N4448	2N3391	2И-НЕ	ЗИЛИ-НЕ	100
7	1N4449	2N3392	2И-НЕ	ЗИЛИ-НЕ	150
8	BA281	2N3393	2И-НЕ	ЗИЛИ-НЕ	150
9	BA314	2N3394	ЗИ-НЕ	2ИЛИ-НЕ	150
10	BA315	2N3414	ЗИ-НЕ	2ИЛИ-НЕ	150
11	BA316	BFG196	ЗИ-НЕ	2ИЛИ-НЕ	150
12	BA317	T251	ЗИ-НЕ	2ИЛИ-НЕ	150
13	BA318	T259	2И-НЕ	ЗИЛИ-НЕ	200
14	ZC820A	T296	2И-НЕ	ЗИЛИ-НЕ	200
15	ZC821A	T341	2И-НЕ	ЗИЛИ-НЕ	200
16	ZC822A	T351	2И-НЕ	ЗИЛИ-НЕ	200
17	ZC823A	T395	ЗИ-НЕ	2ИЛИ-НЕ	200
18	ZC824A	T503	ЗИ-НЕ	2ИЛИ-НЕ	200
19	ZC825A	BC107BP	ЗИ-НЕ	2ИЛИ-НЕ	200
20	ZC826A	BC337AP	ЗИ-НЕ	2ИЛИ-НЕ	200

СОДЕРЖАНИЕ ОТЧЕТА

Отчет по работе должен быть оформлен согласно ОС ТУСУР 01-2021 и содержать следующие разделы.

1) введение (цель работы и постановка задачи).

В разделе описываются цель работы и задачи (как общие для всех, так и задачи своего варианта), которые необходимо выполнить.

2) исследование логических элементов.

Приводится собранная схема и её словесное описание для каждого стенда согласно порядку выполнения работы с показаниями приборов в каком-то положении переключателей и таблица с показаниями приборов при различном положении переключателей. Пример заголовков таблицы: «Переключатель Z» («Переключатель 1»); «Переключатель X» («Переключатель 2»); I_y , мА; $U_{вых}$, В; «Состояние». Если входа (переключателя) три, то столбцов больше. Для каждой строки с уникальным значением тока I_y необходимо привести подтверждающий экраный снимок с показаниями приборов. Значения в столбцах переключателей указывать «0» или «1» в соответствии с тем, куда в данный момент подключен переключатель: к источнику питания – «1», к земле – «0». В столбце «Состояние» указать в каком состоянии находится выход (0, 1 или Z).

3*) Дополнительные задания (***необязательный раздел, только для тех, кто выполняет доп. задания**)

Для доп. задания 1 приводятся примеры экранных снимков стенда и показания монитора осциллографа для неискажённого и искажённого сигнала. Для искажённого сигнала 3-4 варианта частоты с нарастанием искажения. Сделать вывод о предельной частоте входного сигнала без искажения выходного сигнала.

Для остальных доп. заданий описание такое, как в п.3 исследование логических элементов.

4) заключение.

Приводятся выводы о проделанной работе: в краткой форме описывается что было сделано и какие результаты были получены.

Структурные разделы, такие как «Оглавление», «Введение», «Заключение», «Список использованных источников» – не нумеруются, пишутся строчными буквами, кроме первой заглавной. Остальные разделы (заголовки первого уровня) должны быть пронумерованы и написаны ПРОПИСНЫМИ буквами.

ПРИМЕРНЫЙ СПИСОК ВОПРОСОВ ПРИ ЗАЩИТЕ РАБОТЫ

1. Какие состояния выхода ИС Вы знаете?
2. Каким образом можно определить, совместимы ли ИС между собой?
3. На какие части условно разделяется базовый ЛЭ ТТЛ?
4. Что такое соглашение положительной и отрицательной логики?
5. Что понимается под запасом статической помехозащищённости ИС? Как определить запасы статической помехозащищённости ИС?
6. В чём отличия 2С, ОК и 3С выходов ИС?
7. Перечислите логические функции, которые выполняют каскады базового ЛЭ ТТЛ.
8. Расскажите, каким образом построить функцию 2ИЛИ, используя базовый ЛЭ ТТЛ.
9. Расскажите, каким образом построить функцию 2И, используя базовый ЛЭ ТТЛ.
10. Зачем в выходном каскаде базового ЛЭ ТТЛ необходим диод?
11. Почему составной транзистор по схеме Дарлингтона может заменить связку транзистор+диод в выходном каскаде базового ЛЭ ТТЛ?
12. Чем ТТЛШ отличается от ТТЛ?

ДОПОЛНИТЕЛЬНАЯ ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №2 «ЛОГИЧЕСКИЕ ЭЛЕМЕНТЫ НА ОСНОВЕ MOSFET»

Цель работы: изучение работы логических элементов на основе униполярных транзисторов.

МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ

1. Полевой транзистор

Полевой транзистор – это полупроводниковый прибор, в котором ток стока (Drain) через полупроводниковый канал n- или p-типа управляется электрическим полем, возникающим при приложении напряжения между затвором (Gate) и истоком (Source). Первоначальное название полевых транзисторов – *униполярные транзисторы* – было связано с тем, что в таких транзисторах используются основные носители только одного типа (электронов или дырок). Процессы инжекции и диффузии в таких транзисторах практически отсутствуют, во всяком случае, они не играют принципиальной роли. Основным способом движения носителей является дрейф в электрическом поле.

Для того чтобы управлять током в полупроводнике при постоянном электрическом поле, нужно изменять удельную проводимость полупроводникового слоя или его площадь. На практике используются оба способа и основаны они на эффекте поля (управление напряжением на затворе). Проводящий слой, по которому протекает ток, называют каналом. Отсюда еще одно название такого класса транзисторов – *канальные транзисторы*.

Каналы могут быть приповерхностными и объёмными. Приповерхностные каналы представляют собой либо обогащённые слои, обусловленные наличием донорных примесей в диэлектрике, либо инверсионные слои, образующиеся под действием внешнего поля. Объёмные же каналы представляют собой участки однородного полупроводника, отделенные от поверхности обеднённым слоем.

Полевые транзисторы с изолированным затвором называют МДП (металл-диэлектрик-полупроводник) или МОП (металл-окисел-полупроводник) транзисторами (MOSFET – metal-oxide-semiconductor-field-effect-transistor). У этих транзисторов электрод затвора отделён от полупроводникового канала изолирующим слоем диэлектрика (оксидным слоем). Поэтому входной ток у таких транзисторов ещё меньше, чем у транзисторов с управляющим p-n-переходом. Различают два вида МОП-транзисторов:

- с управляющим затвором типа p-n-перехода (рис. 1 а, б);
- с изолированным (слоем диэлектрика) затвором. Их изготавливают или со встроенным каналом (рис. 1 в, г) или с индуцированным каналом (рис. 1 д, е).

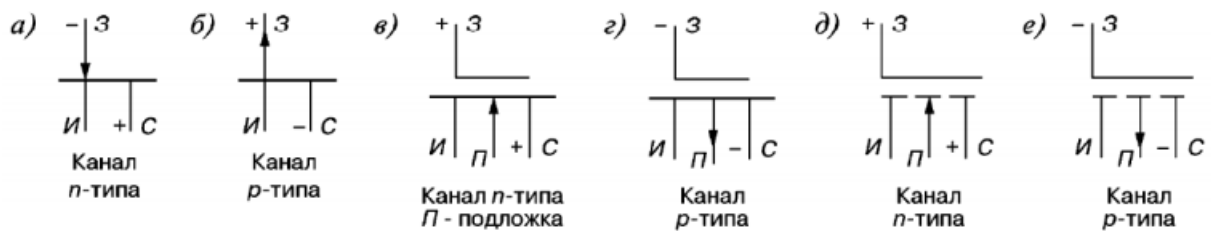


Рисунок 1. УГО полевых транзисторов.

Полевой транзистор с управляющим р-п-переходом схематически показан на рис. 2.

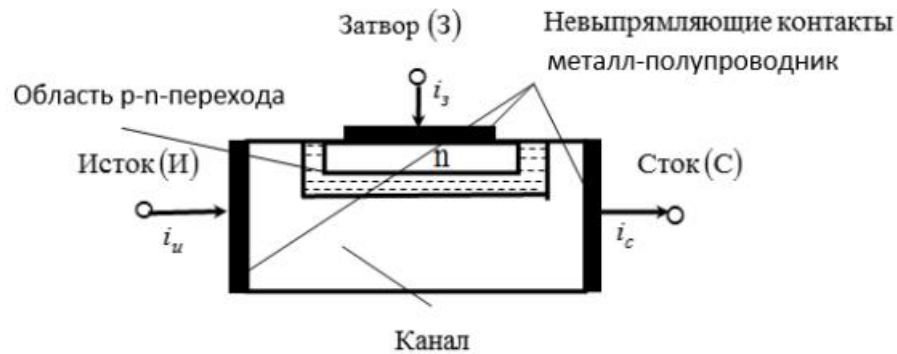


Рисунок 2. Устройство транзистора с управляющим р-п-переходом

Удельное сопротивление затвора (слоя n) намного меньше удельного сопротивления канала (слоя p), поэтому обеднённая подвижными носителями область p - n -перехода, имеющая большое удельное сопротивление, расположена в основном в слое p .

Если подать отрицательное напряжение между затвором и истоком транзистора с каналом n -типа, то оно сместит p - n -переход в обратном направлении. С увеличением обратного напряжения на p - n -переходе он расширяется за счёт канала из-за различия удельных сопротивлений слоёв. С увеличением ширины p - n -перехода уменьшается толщина канала, в силу чего его сопротивление увеличивается, а ток между истоком и стоком уменьшается. Это явление позволяет управлять током приложенным напряжением и соответствующим ему электрическим полем. Если напряжение $U_{зи}$ продолжить уменьшать до уровня напряжения отсечки $U_{зи\text{отс}}$, то канал полностью перекроется областью p - n -перехода.

В случае изменения в рассмотренном транзисторе типов проводимости слоев полупроводника на противоположные получится полевой транзистор с управляющим p - n -переходом и каналом n -типа.

В нормальном режиме p - n -переход должен находиться под обратным или нулевым напряжением. При этом в рабочем режиме ток затвора примерно равен нулю ($I_z = 0$), а ток стока I_c примерно равен току истока I_i .

На ширину р-п-перехода и толщину канала прямое влияние может оказывать напряжение между истоком и стоком $U_{ис}$ (рис. 3).

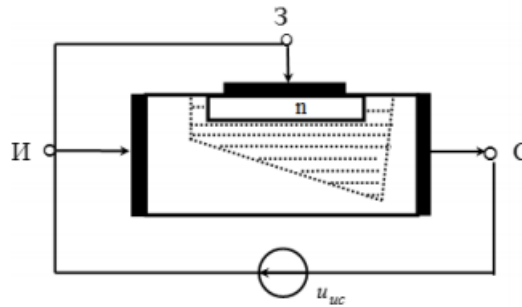


Рисунок 3. Схема включения полевого транзистора с управляющим р-п-переходом

Для полевого транзистора, как и для биполярного, выделяют три схемы включения – это схемы с общим затвором (ОЗ), общим истоком (ОИ) и общим стоком (ОС). Наиболее часто используются схемы с общим истоком (рис. 4).

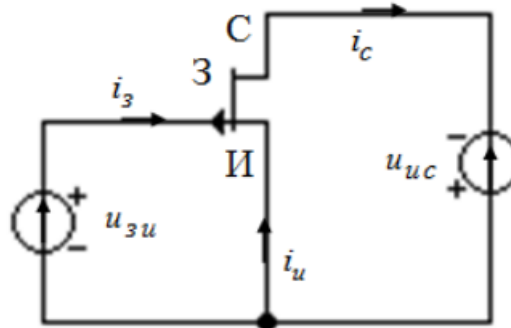


Рисунок 4. Схема включения полевого транзистора с управляющим р-п-переходом

Для полевых транзисторов, как и для биполярных могут быть построены семейства вольтамперных характеристик.

Основными характеристиками полевых транзисторов являются стоковые, которые отражают зависимость тока стока от напряжения сток – исток при фиксированном напряжении затвор – исток (рис. 5).



Рисунок 5. Семейство стоковых характеристик полевого транзистора

В области малых напряжений (участок 0-а, рис. 6) влияние напряжения $U_{ис}$ на проводимость канала незначительно, в связи с чем здесь практически линейная зависимость. По мере увеличения напряжения (участок а-б на рис. 6) сужение токопроводящего канала оказывает всё большее влияние на его

проводимость, что приводит к уменьшению крутизны нарастания тока. При подходе к границе (точка б) сечение токопроводящего канала уменьшается до минимума. Дальнейшее увеличение напряжения на стоке не должно приводить к увеличению тока через прибор. Наличие увеличения тока объясняется тем, что у реальных приборов существуют утечки.

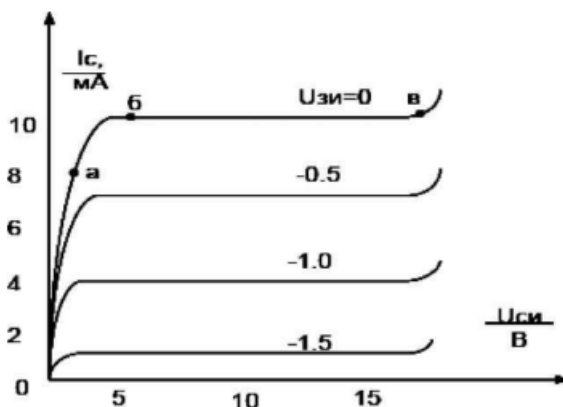


Рисунок 6. Семейство стоковых характеристик полевого транзистора с управляющим р-п-переходом

Так как у полевых транзисторов отсутствует затворный ток, то построить входную характеристику полевого транзистора невозможно, вместо этого строят стоко-затворную характеристику полевого транзистора (рис. 7) она показывает зависимость тока стока от напряжения затвор-исток при фиксированном напряжении сток-исток.

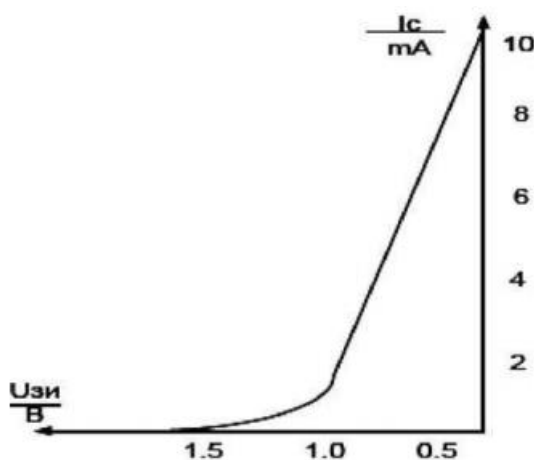


Рисунок 7. Стоко-затворная характеристика полевого транзистора с управляющим р-п-переходом

При прямом смещении р-п-перехода затвор-исток, транзистор с управляющим р-п-переходом теряет свои вентиляльные свойства, и поэтому стокозатворная характеристика для прямого смещения не строится.

Другой тип полевых транзисторов - транзисторы с приповерхностным каналом и структурой металл-диэлектрик-полупроводник (МДП-транзисторы). В частном случае, если диэлектриком является окисел (диуокись кремния), используется название МОП-транзисторы (MOSFET).

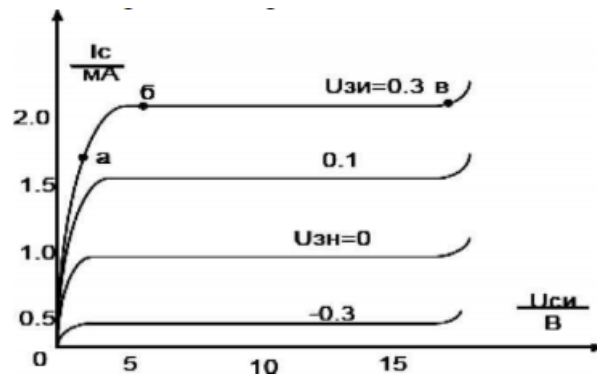


Рисунок 9.

МДП-транзисторы в общем случае представляют собой приборы с четырьмя выводами. Четвертый вывод, подложка, выполняет вспомогательную функцию.

Стоко-затворные характеристики МДП-транзистора со встроенным каналом показаны на рис. 10.



Рисунок 10. – Стоко-затворная характеристика МДП-транзистора со встроенным каналом

Транзисторы со встроенным каналом могут работать как в режиме обеднения канала носителями заряда, так и в режиме обогащения. Транзисторы с индуцированным каналом можно использовать только в режиме обогащения.

В отличие от транзисторов с управляющим р-п-переходом металлический затвор МДП-транзисторов изолирован от полупроводника слоем диэлектрика и имеет дополнительный вывод от кристалла, называемый подложкой (Base), на которой выполнен прибор.

Управляющее напряжение подается между затвором и подложкой. Под влиянием образующегося электрического поля у поверхности полупроводника создается р-канал за счет отталкивания электронов от поверхности вглубь полупроводника в транзисторе с индуцированным каналом. В транзисторе со встроенным каналом происходит расширение или сужение имеющегося канала.

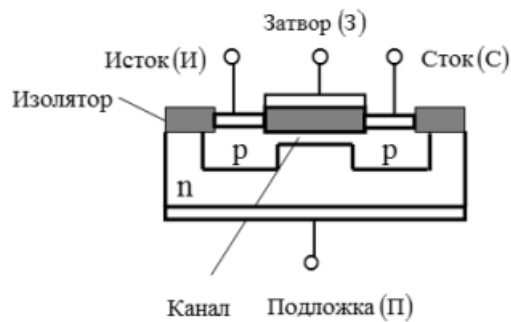


Рисунок 11. Структура полевого МДП-транзистора со встроенным каналом р-типа.

Под действием управляющего напряжения изменяется ширина канала и, соответственно, сопротивление и ток транзистора.

Для МДП-транзисторов с индуцированным каналом характерно отсутствие тока между стоком и истоком при отсутствии напряжения между стоком и истоком.

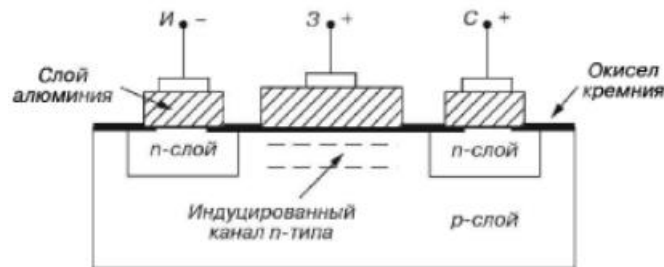


Рисунок 12. Структура полевого МОП-транзистора с индуцированным каналом n-типа

Напряжение на затворе, при котором индуцируется канал, называется *пороговым напряжением*. При практическом определении этого напряжения обычно задается определенный ток стока, при котором потенциал затвора достигает порогового напряжения (0,2-1 В для транзисторов с n-каналом и 2-4 В с p-каналом).

По мере удаления от поверхности полупроводника концентрация индуцированных дырок уменьшается. На расстоянии, приблизительно равном половине толщины канала, электропроводность становится собственной (беспримесной). Далее располагается участок, обеднённый основными носителями заряда, в котором существует область положительно заряженных ионов донорной примеси. Наличие обеднённого участка обусловлено также отталкиванием основных носителей заряда от поверхности вглубь полупроводника.

Таким образом, сток, исток и канал, представляющие собой рабочие области МДП-транзистора, изолированы от подложки р-п-переходом.

Дырки, образующие канал р-типа, поступают в него не только из подложки n-типа (рис. 11), где их мало и генерируются они сравнительно медленно, но также из слоев р-типа истока и стока, где их концентрация практически не ограничена, а напряженность поля вблизи этих электродов достаточно велика.

В транзисторах со встроенным каналом ток в цепи стока будет протекать и при нулевом напряжении на затворе. Для его прекращения необходимо к затвору приложить положительное напряжение (при структуре с каналом р-типа), равное или большее напряжения отсечки. При этом дырки из инверсного слоя будут практически полностью вытеснены вглубь полупроводника и канал исчезнет. При приложении отрицательного напряжения канал расширяется и ток снова увеличивается. Таким образом, МДП-транзисторы со встроенными каналами работают в режимах как обеднения, так и обогащения.

Как и полевые транзисторы с управляющим р-п-переходом, МДП-транзисторы при малых напряжениях сток-исток ведут себя подобно линейному сопротивлению. При увеличении этого напряжения ширина канала уменьшается вследствие падения на нём напряжения и уменьшения напряженности электрического поля. Особенно сильно это проявляется в той части канала, которая находится вблизи стока. Перепады напряжения, создаваемые током стока I_d , приводят к неравномерному распределению смещения на затворе вдоль канала, причем оно уменьшается по мере приближения к стоку.

Важным преимуществом МДП-транзисторов по сравнению с биполярными является малое падение напряжения на них при коммутации малых сигналов. Так, если в биполярных транзисторах в режиме насыщения напряжение коллектор-эмиттер принципиально не может быть меньше нескольких десятых долей вольт, то для МДП-транзисторов при малых токах стока это напряжение при работе транзистора в начальной области выходной ВАХ может быть сведено к ничтожно малой величине.

Стоковые характеристики полевого транзистора с индуцированным каналом n-типа очень близки по виду аналогичным характеристикам транзистора со встроенным каналом и имеют тот же характер зависимости.

Отличие заключается в том, что управление током транзистора осуществляется напряжением одной полярности, совпадающей с полярностью напряжения $U_{си}$.

На рис. 13 представлены полевые транзисторы с различным типом проводящего индуцируемого канала.

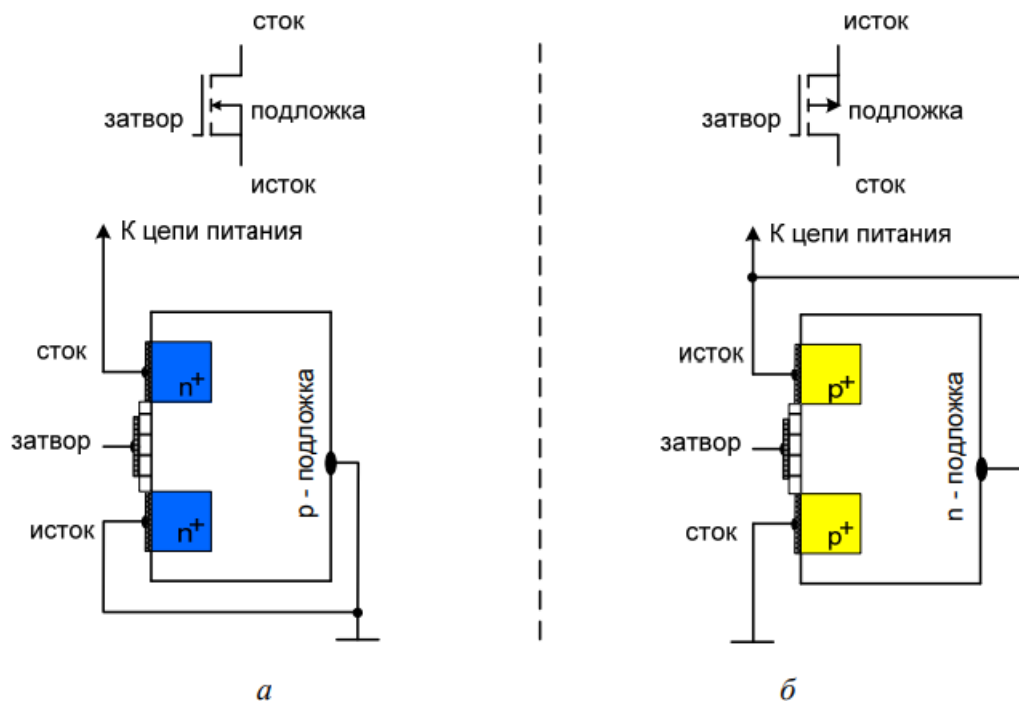


Рисунок 13. Схемы полевых транзисторов с индуцируемым каналом п-типа (а) и р-типа (б)

На рис. 14. показаны схемы управления полевыми транзисторами с индуцируемыми каналами. Обратите внимание на то, что показанное для транзистора с каналом р-типа напряжение $U_{зи}$ меньше нуля. В реальности уровень напряжения на затворе этого транзистора совпадает с потенциалом «земли» – «0», а так как исток в данной схеме в отличие от схемы с п-канальным транзистором подключается к цепям питания (наиболее высокому потенциалу в схеме), то напряжение на затворе транзистора относительно истока, конечно же, будет меньше, поэтому в формуле на рис. 14 оно имеет отрицательное значение.

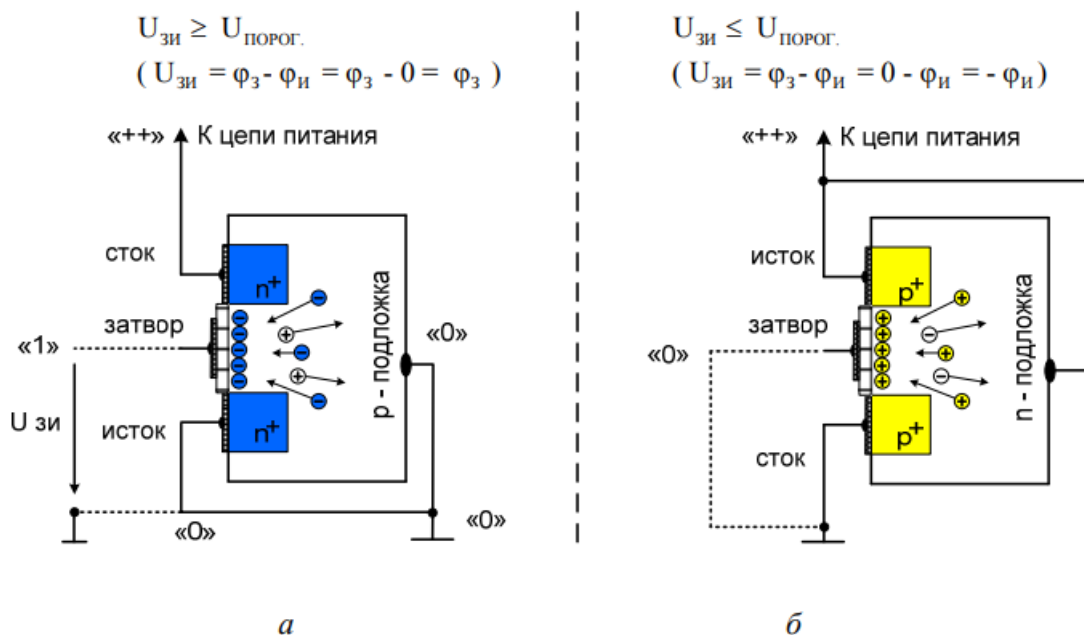


Рисунок 14. Управление полевыми транзисторами с проводящим индуцируемыми каналом п-типа (а) и р-типа (б)

2. Логические элементы на МДП-транзисторах

С точки зрения функционального принципа работы между элементами р-типа и n-типа нет принципиальной разницы. Однако технология изготовления последних сложнее.

Параметры n-транзисторов превосходят параметры р-транзисторов по следующим причинам.

1. В транзисторах с n-каналами носители заряда – электроны, подвижность которых в два раза выше подвижности дырок.

2. Транзисторы с n-каналами выполняют по технологии с самосовмещением затворов, обеспечивающей уменьшение паразитных ёмкостей в 2-3 раза; в результате быстродействие схем n-транзисторами в среднем в 5-10 раз выше.

3. В n-МОП используется соглашения положительной логики, в р-МОП – отрицательной.

4. Упит. в n-МОП позволяет +5 В, в р-МОП до –27 В.

В соответствии с логическим соглашением (ГОСТ 2.743-82), в зависимости от конкретной физической реализации элементов цифрового устройства, более положительному значению физической величины (в нашем случае уровню напряжения), "H" (High, высокий) – уровень, соответствует состоянию "логическая 1", а менее положительному значению, "L" (Low, низкий) – уровень – "логический 0". Какое соглашение называется положительной логикой. Обратное соотношение называется отрицательной логикой, т.е. когда состояние логической 1 соответствует меньшему напряжению (например, -10 В), а логический 0 – большему относительно лог. 1 (около 0 В).

На рис. 15 у V_{Tn} затвор соединён с истоком, и транзистор всегда включен и проводит ток, причём в большей части диапазон изменения напряжения работает в области пологой части выходной характеристики. При высоком уровне входного сигнала в открытом (проводящем) режиме находятся оба транзистора и уровень напряжения выходного определяется соотношением сопротивлений канала нагрузочного и активного.

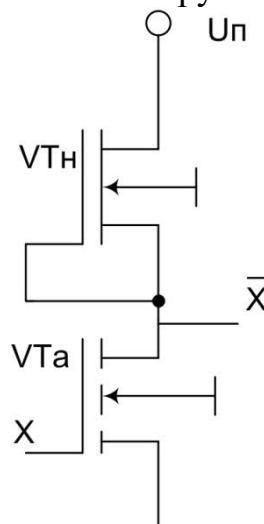


Рисунок 15. Логический элемент НЕ (инвертор)

Нагрузочный транзистор VTн может быть заменён на резистор (рис. 18).

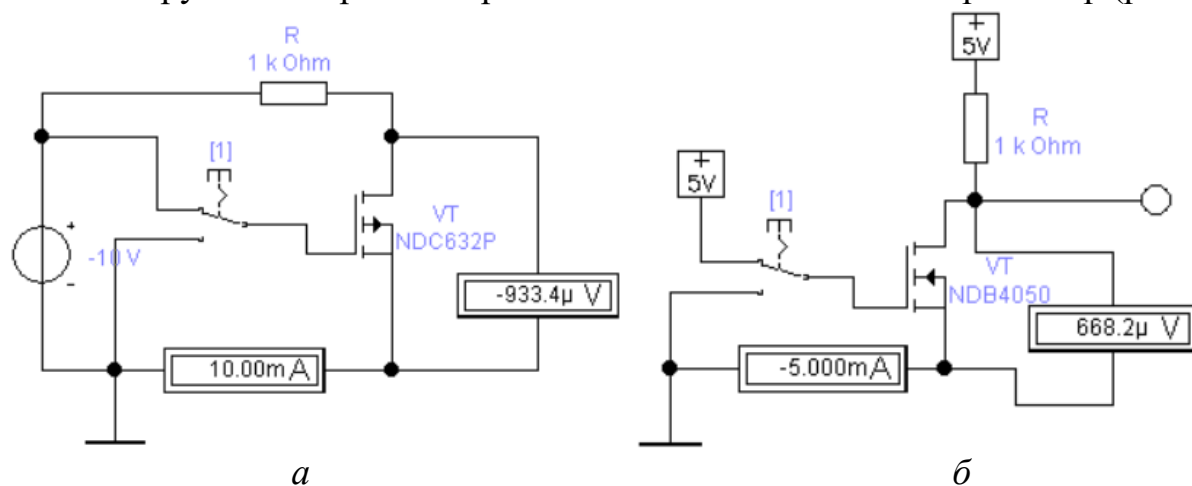


Рисунок 18. Стенды инвертора на р-МОП-транзисторе (а) и п-МОП (б)

Включая в схему дополнительные транзисторы последовательно или параллельно, строятся схемы логических элементов И-НЕ и ИЛИ-НЕ (рис. 19).

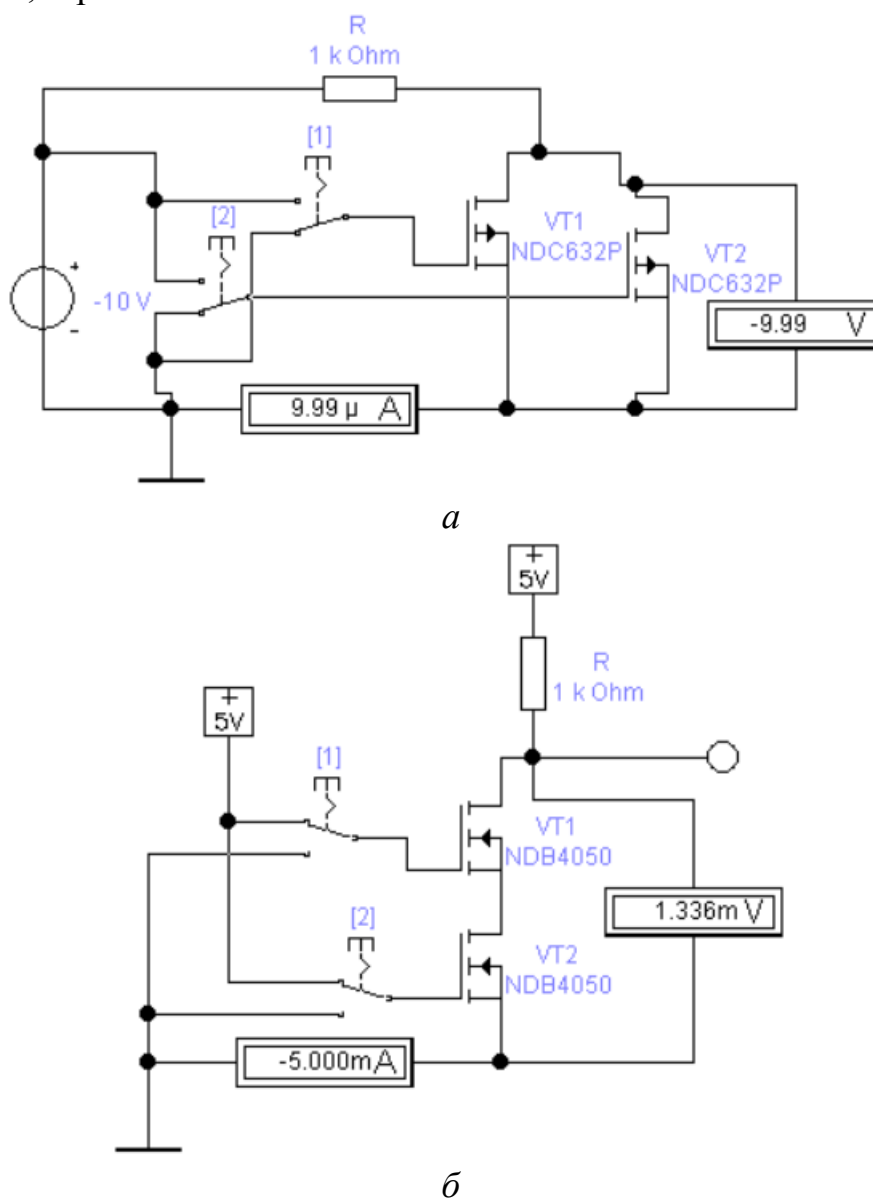


Рисунок 19. Стенды логических элементов И-НЕ, ИЛИ-НЕ на р-МОП-транзисторе (а) и п-МОП (б)

ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

1. Соберите стенды как показано на рис. 18 для заданного вариантом транзисторов, номинала сопротивления R и напряжения источника питания (батарейки), включите его. Запишите показания приборов (ток потребления I_p и напряжение на выходе $U_{вых.}$) для разного положения переключателя.

2. Соберите стенды для заданных вариантом логических функций на обоих транзисторах (по два стенда для каждой логической функции И-НЕ и ИЛИ-НЕ), номинала сопротивления R и напряжения источника питания (батарейки). На рис. 19 показаны примеры для логических функций 2И-НЕ и 2ИЛИ-НЕ. Включите стенды. Запишите показания приборов (ток потребления I_p и напряжение на выходе $U_{вых.}$) для разного положения переключателей каждого стенда.

3. Соберите стенды для логической функции 3И, если в варианте задана 3И-НЕ, (иначе 3ИЛИ) на обоих заданных вариантом транзисторах (два стенда), номинала сопротивления R и напряжения источника питания (батарейки). Включите стенды. Запишите показания приборов (ток потребления I_p и напряжение на выходе $U_{вых.}$) для разного положения переключателей каждого стенда.

4. Напишите выводы о проделанной работе.

Таблица

Варианты задания

№	Транзистор		Лог. функц.		R, кОм	U, В
	P-МОП	N-МОП				
1	irf4905	NDB7051	ЗИ-НЕ	4ИЛИ-НЕ	1,5	-10,5
2	NDH832P	NDB705A	ЗИ-НЕ	4ИЛИ-НЕ	1,5	-11
3	NDS8435	NDB705B	ЗИ-НЕ	4ИЛИ-НЕ	1,5	-11,5
4	irf5305	NDB606A	4И-НЕ	ЗИЛИ-НЕ	1,5	-12
5	NDT454P	NDB605A	4И-НЕ	ЗИЛИ-НЕ	1,5	-12,5
6	NDS9430	NDB606B	4И-НЕ	ЗИЛИ-НЕ	1,5	-13
7	irf5210	NDB608A	4И-НЕ	ЗИЛИ-НЕ	2	-13,5
8	NDS9405	NDB605B	4И-НЕ	ЗИЛИ-НЕ	2	-14
9	NDH8447	NDB608B	4И-НЕ	ЗИЛИ-НЕ	2	-14,5
10	irf7304	NDB505A	ЗИ-НЕ	4ИЛИ-НЕ	2	-15
11	NDS9435	NDB506B	ЗИ-НЕ	4ИЛИ-НЕ	2	-15,5
12	irf7306	NDB508B	ЗИ-НЕ	4ИЛИ-НЕ	2	-16
13	NDC652P	NDB4060	4И-НЕ	ЗИЛИ-НЕ	2,5	-16,5
14	NDS9400A	NDP4050	ЗИ-НЕ	4ИЛИ-НЕ	2,5	-17
15	NDS356P	NDB406A	4И-НЕ	ЗИЛИ-НЕ	3	-17,5
16	NDT452P	NDB405A	4И-НЕ	ЗИЛИ-НЕ	3	-18
17	NDS9400	NDB406B	4И-НЕ	ЗИЛИ-НЕ	3	-18,5
18	NDT2955	NDB408A	ЗИ-НЕ	4ИЛИ-НЕ	3	-19
19	irf6215	NDB408B	ЗИ-НЕ	4ИЛИ-НЕ	3	-19,5
20	NDS352P	NDB405B	ЗИ-НЕ	4ИЛИ-НЕ	3	-20

СОДЕРЖАНИЕ ОТЧЕТА

Отчет по работе должен быть оформлен согласно ОС ТУСУР 01-2021 и содержать следующие разделы.

1) введение (цель работы и постановка задачи).

В разделе описываются цель работы и задачи (как общие для всех, так и задачи своего варианта), которые необходимо выполнить.

2) исследование логических элементов.

Приводится собранная схема и её словесное описание для каждого стенда согласно порядку выполнения работы с показаниями приборов в каком-то положении переключателей и таблица с показаниями приборов при различном положении переключателей. Пример заголовков таблицы: «Переключатель Z» («Переключатель 1»); «Переключатель X» («Переключатель 2»); I_p , мА; $U_{вых}$, В; «Состояние». Если входа (переключателя) три или четыре, то столбцов больше. Для каждой строки с уникальным значением тока I_p необходимо привести подтверждающий экранный снимок с показаниями приборов. Значения в столбцах переключателей указывать «0» или «1» в соответствии с тем, куда в данный момент подключен переключатель: к

источнику питания – «1», к земле – «0». В столбце «Состояние» указать в каком состоянии находится выход (0, 1 или Z).

3) заключение.

Приводятся выводы о проделанной работе: в краткой форме описывается что было сделано и какие результаты были получены.

Структурные разделы, такие как «Оглавление», «Введение», «Заключение», «Список использованных источников» – не нумеруются, пишутся строчными буквами, кроме первой заглавной. Остальные разделы (заголовки первого уровня) должны быть пронумерованы и написаны ПРОПИСНЫМИ буквами.

ПРИМЕРНЫЙ СПИСОК ВОПРОСОВ ПРИ ЗАЩИТЕ РАБОТЫ

1. Чем обусловлено название полевых транзисторов?
2. Перечислите полевые транзисторы и их названия.
3. Чем объясняется управляющие свойства полевых транзисторов с р-п-переходом?
4. В чём различие полевых транзисторов с р-п-переходом и МДП-транзисторов?
5. Каковы основные параметры полевых транзисторов с р-п-переходом?
6. Что такое режим обеднения и режим обогащения в МДП-транзисторах?
7. Чем отличаются MOSFET со встроенным и индуцированным каналами?
8. Каковы преимущества МДП-транзисторов перед биполярными транзисторами?
9. В схеме логического элемента транзисторы включены последовательно (параллельно), какую логическую функцию выполняет элемент?
10. Изобразите УГО транзистора указанного типа.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №4 «ЛОГИЧЕСКИЕ ЭЛЕМЕНТЫ КМОП»

Цель работы: изучение работы логических элементов КМОП.

МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ

1. Логические элементы КМОП

«Комплементарные» — означает, что в схемах используются транзисторы разных типов проводимости (рис. 1).

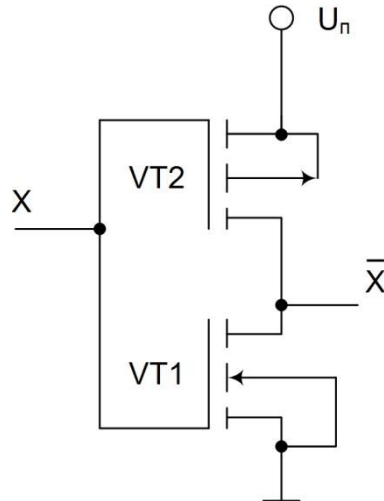


Рисунок 1. Схема инвертора КМОП

В соглашении положительной логики: «1» $\approx U_B$, «0» $\approx 0 B$.

Если на вход X подаётся уровень напряжения, соответствующий уровню логической «1», то $VT1$ открыт, т.к. имеется разность потенциалов между затвором и подложкой, а в свою очередь $VT2$ закрыт, т.к. $U_{зп}$ близко к нулю. Выходное напряжение отличается от нуля незначительным падением напряжения на проводящем канале $VT1$, сопротивлением которого не превышает 10 Ом, от остаточного тока закрытого транзистора $VT2$. Сопротивление в закрытом состоянии $\sim 10 M\Omega$, открытом $\sim 10 \Omega$.

При подаче на вход X уровня напряжения, соответствующего уровню логического «0» $VT1$ закрыт, $VT2$ открыт, т.к. $U_{зп} VT2 \approx U_B$ и $U_{вых} \approx U_B$.

В статике элемент имеет низкую мощность потребления. Мощность, потребляемая схемой на КМОП-транзисторах расходуется в основном во время переходного процесса на заряд выходных ёмкостей схемы и во время переключений из-за протекания сквозных токов.

Если внимательно изучить вольт-амперные характеристики (ВАХ) полевых транзисторов, то заметно, что пороговые напряжения транзисторов с различным типом каналов не одинаковы. Видно, что для р-канального транзистора пороговое напряжение больше, чем для н-канального (рис. 2).

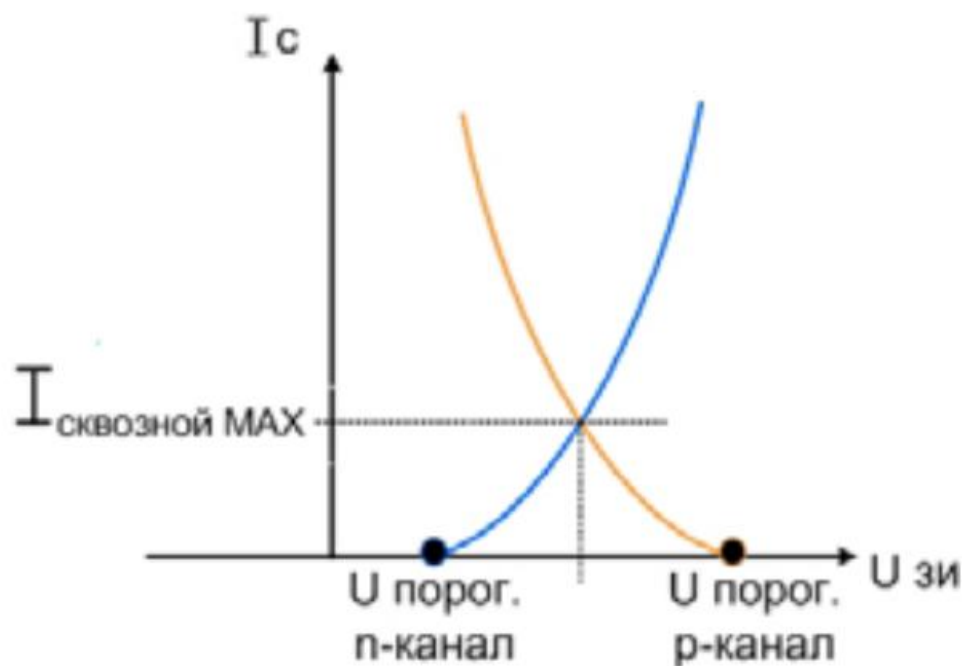


Рисунок 2. ВАХ полевых транзисторов с различным типом проводящих каналов

Значит, при переключениях логического элемента КМОП, возможна ситуация, когда в паре транзисторов будут открыты оба транзистора, и протекающий сквозной ток ограничен только собственным сопротивлением проводящих каналов.

На рис. 3 схематично показано, что в моменты переключения логического элемента ток потребления существенно возрастает.

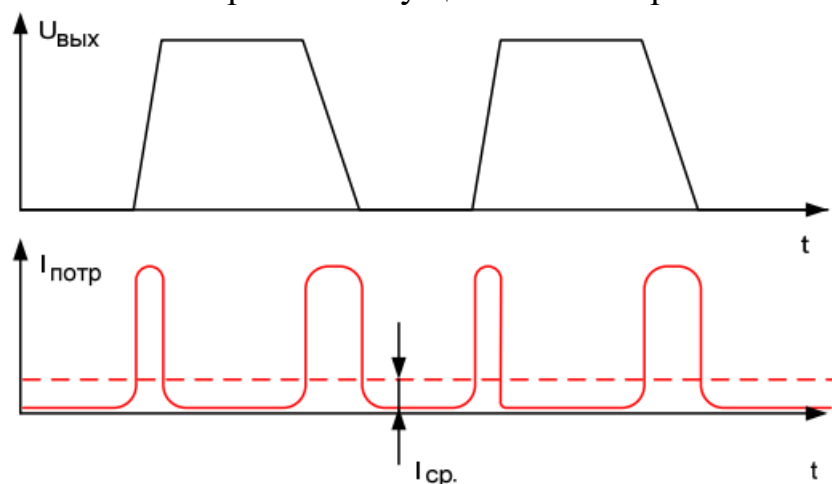


Рисунок 3. Ток потребления логического элемента КМОП в динамическом режиме

Чем выше частота переключения, тем чаще за определённый интервал времени (например, за одну миллисекунду) будет протекать сквозной ток – по каждому фронту переключения. Из рис. 3 и 4 видно, что с увеличением частоты переключений элемента возрастает потребляемая элементом мощность.

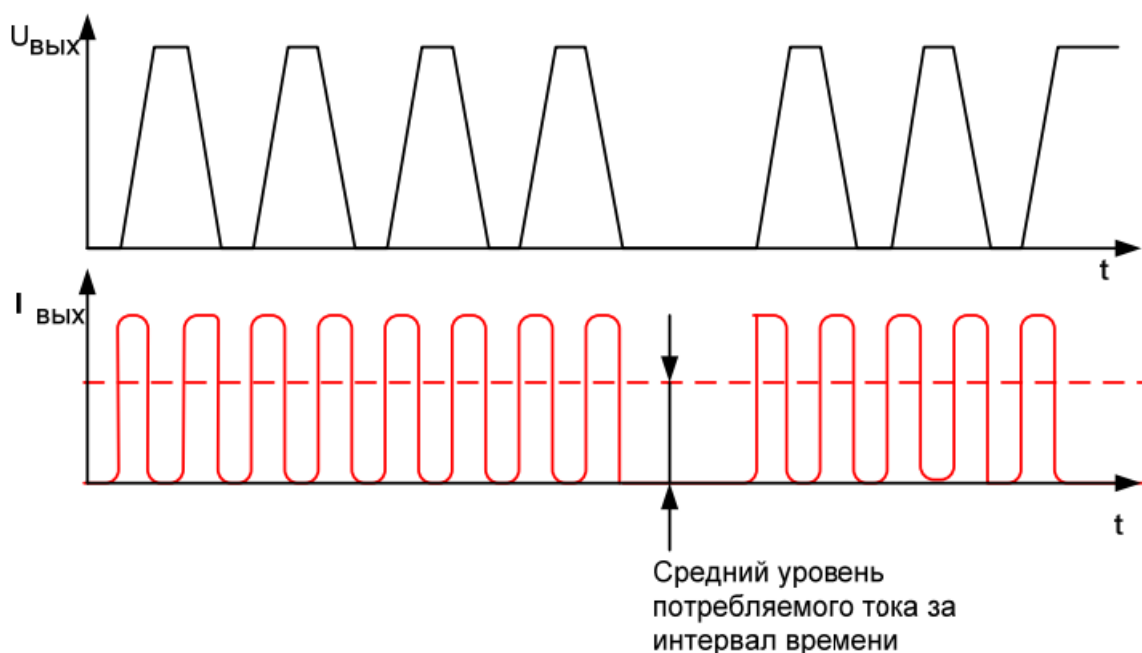


Рисунок 4. Ток потребления логического элемента КМОП в динамическом режиме

На рис. 5 показана «начинка» элемента 2-И-НЕ, у комплементарных пар транзисторов Т1 и Т4, Т2 и Т3 затворы объединены.

Каждая пара транзисторов управляется от одного входа: Т1 и Т4 – от входа Х1, а Т2 и Т3 – от входа Х0. В левой части рисунка показана таблица состояний для входов элемента 2И-НЕ Х0 и Х1 и соответственно состояние выхода элемента Y.

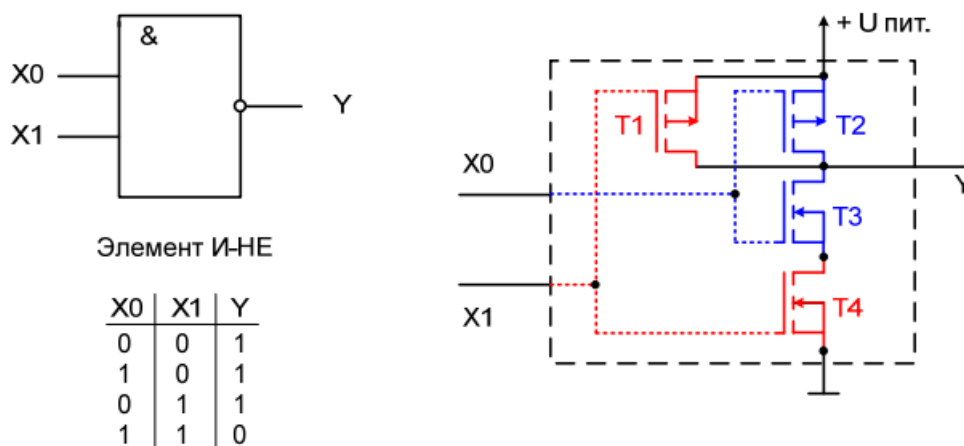


Рис. 25. Комплементарные пары транзисторов в ЛЭ

Рисунок 5. Комплементарные пары транзисторов в ЛЭ на примере функции И-НЕ

Для обеспечения работы функции И-НЕ транзисторы-ключи между источником питания и выходом параллельны друг другу, а между выходом и общей шиной – включены последовательно. Таким образом, если хотя бы на один какой-либо вход подаётся уровень напряжения, соответствующий уровню логического «0», тогда один из параллельно включённых транзисторов между выходом и источником питания будет открыт, упрощённо говоря, создавая доступ к источнику питания, а доступ к общей шине будет

отрезан хотя бы одним запертым транзистором из последовательно включённых между выходом и «землёй».

На рис. 6 показана схема 2ИЛИ-НЕ логического элемента КМОП. Схема включения транзисторов относительно функции И-НЕ обратная, т.е. транзисторы между выходом и источником питания включаются последовательно, а между выходом и общей шиной – параллельно. Таким образом, если хотя бы на один какой-либо вход подаётся уровень напряжения, соответствующий уровню логической «1», тогда один из параллельно включённых транзисторов между выходом и общей шиной будет открыт, упрощённо говоря, создавая доступ к «земле», а доступ к источнику питания будет отрезан хотя бы одним запертым транзистором из последовательно включённых между выходом и источником питания.

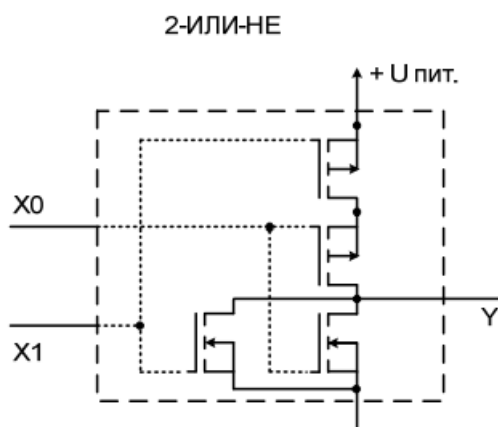


Рисунок 6. Схема логического элемента 2ИЛИ-НЕ КМОП

Для реализации Z-состояния (высокоимпедансного) выхода необходимо, чтобы выход «отрезался» от источника питания и от общей шины одновременно. Это достигается за счёт включения инвертора между входом и затвором одного из пары транзистором, тем самым ликвидируется противофазный режим управления состояниями пары транзисторов разных каналов (рис. 7).

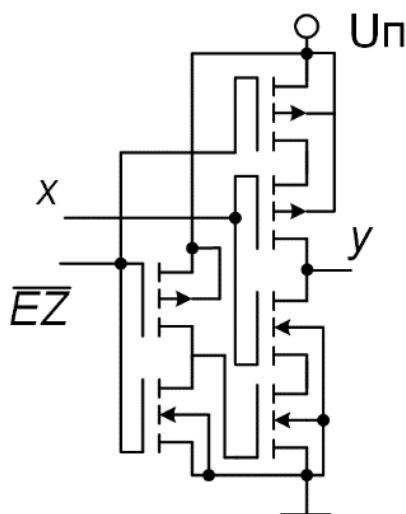


Рисунок 7. Схема инвертора КМОП с тремя состояниями выхода и активным уровнем входа $EZ=0$

Затвор МОП транзистора и подложка, разделённые тонким слоем диэлектрика, образуют конденсатор. Его ёмкость мала ($\approx 3-5$ пФ), а сопротивление утечки $\sim 10^{12}$ Ом, что создаёт условие для накопления статических зарядов. Слой диэлектрика под затвором (толщина 70-100 нм), поэтому диэлектрическая прочность не превышает 180 В. На теле человека за счёт электроизоляции могут возникать заряды с потенциалами несколько киловольт. Такой заряд способен вызвать необратимый пробой в этом слое. Поэтому, для защиты интегральных схем от повреждения статическим электричеством, каждый вход К-МОП ИС снабжают защитной цепочкой (рис. 8). Эти цепи являются неотъемлемой частью ИС, изготавливаются в едином технологическом процессе, и не отображаются в справочниках.

Для предотвращения нежелательных явлений, напряжение питания всегда следует подавать раньше любых входных сигналов. Выключение в обратном порядке. В противном случае возможно КЗ источника питания. Из-за паразитных биполярных транзисторов, которые образуются при изготовлении элемента. Неиспользуемые входы К-МОП должны подключаться либо к $U_{пит}$, либо к земле. Свободные входы запрещены.

При монтаже, для исключения случайного пробоя статическим электричеством нужно уравнивать потенциалы монтируемой платы, паяльника и тела монтажника. Передавать ИС из рук в руки нельзя. Пайку выводов ИС ведут в определённой последовательности: «+»; общий; контакты.

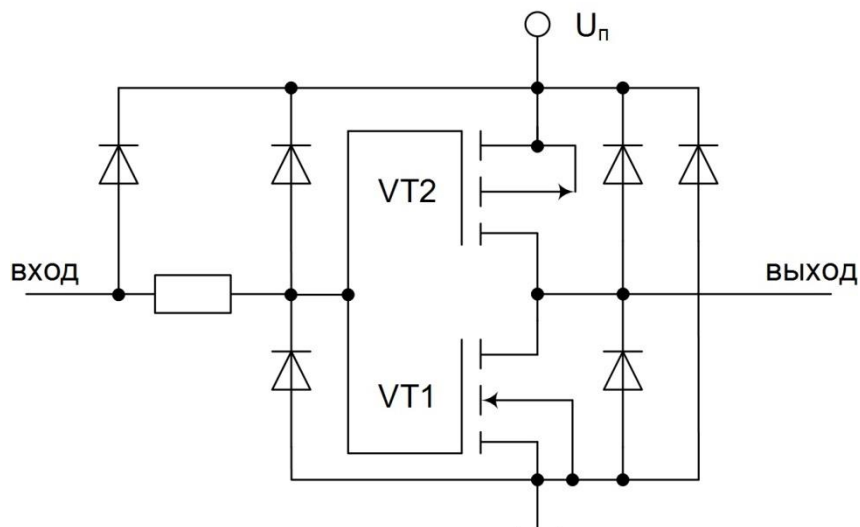


Рисунок 8. Пример схемы инвертора с защитными элементами

2. Согласование уровней ТТЛ и КМОП

На рис. 9 показаны уровни напряжений для входов и выходов элементов ИС КМОП, которые принято считать соответствующими логическим «0» и «1».

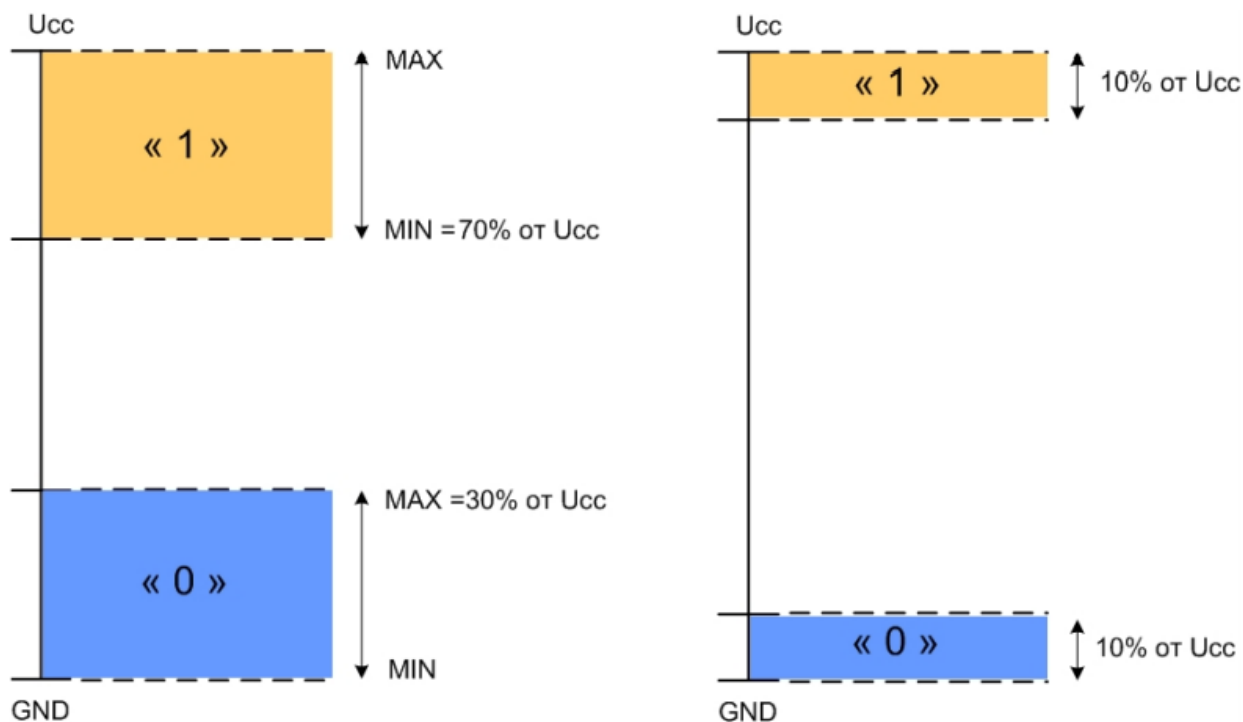


Рисунок 9. Уровни напряжений для входов (слева) и выходов (справа) элементов ИС КМОП

Сопряжение микросхем КМОП и ТТЛШ при одинаковом питании (5 В). При использовании ИС КМОП в качестве передатчика информации, а ИС ТТЛШ – как приёмника информации специальных мер по согласованию уровней не требуется. Серии КМОП управляют ТТЛШ и КМОП сериями напрямую.

На рис. 10 видно, что уровни сигналов на выходе ИС КМОП не выходят за допустимые пределы для ИС ТТЛШ (для приёмника).

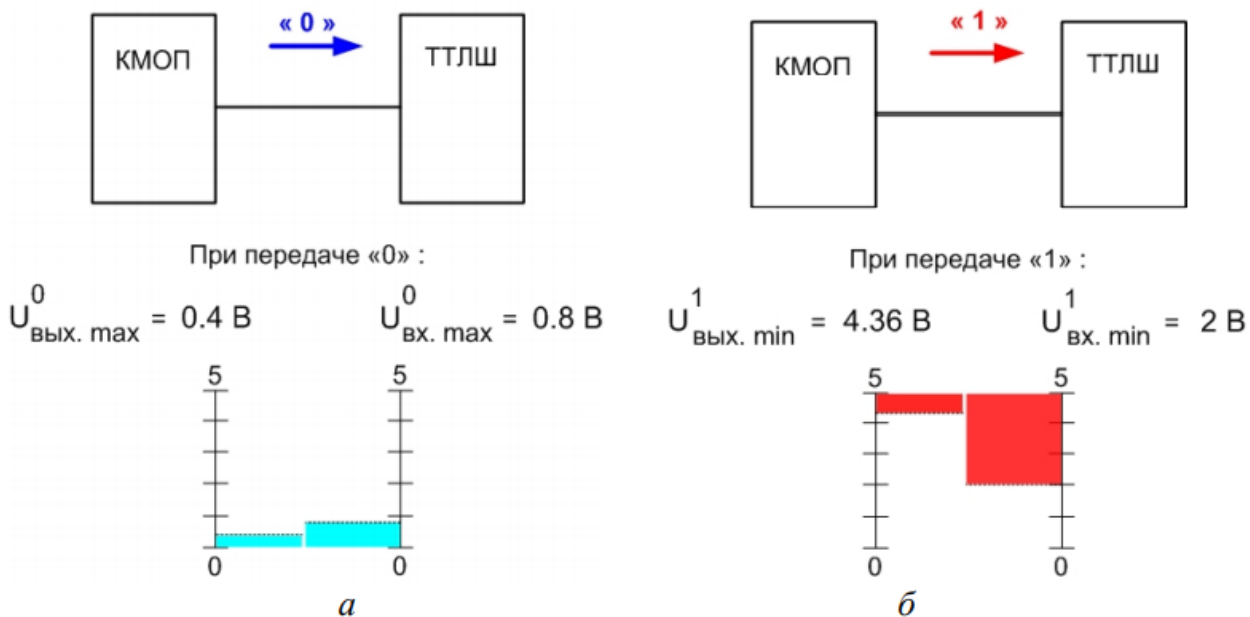


Рисунок 10. Совместимость уровней по «0» (а) и по «1» (б)

ИС ТТЛШ может использоваться как передатчик информации, а ИС КМОП – как приёмник информации. На рис. 11 показано, что при передаче

«0» от ИС ТТЛШ уровень напряжения на входе приёмника ИС КМОП не выходит за предел максимального значения.

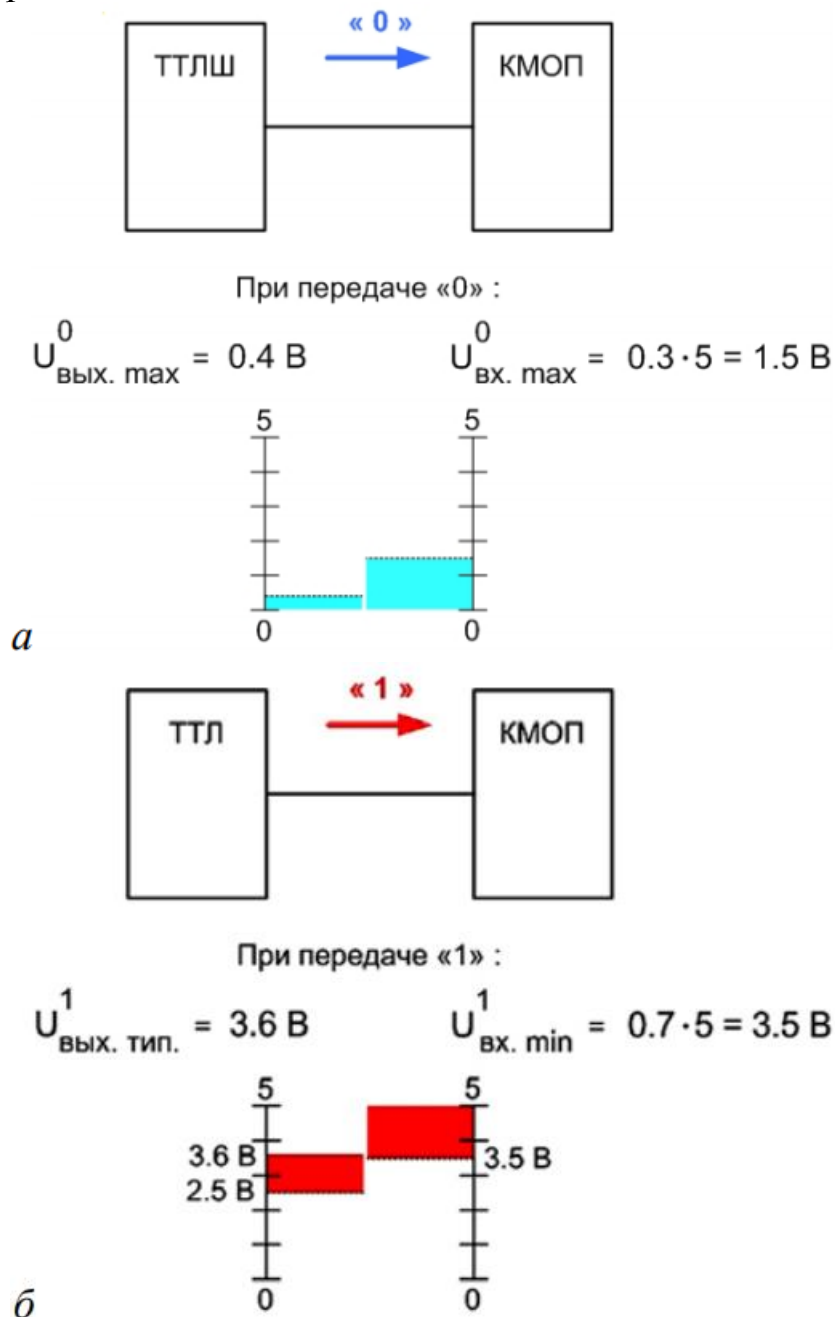


Рисунок 11. Совместимость уровней по «0» (а) и по «1» (б)

На рис. 11, б видно, что минимальный уровень на входе ИС КМОП должен быть не менее 3,5 В. Такой уровень воспринимается на входе логического элемента ИС КМОП как «1». Но для ИС ТТЛШ уровень напряжения на выходе логического элемента $U_{\text{вых}}^1 = 2,5 \text{ В} \dots 4,36 \text{ В}$.

Уровни в пределах от 2,5 до 3,6 В находятся ниже предела $U_{\text{вх min}}^1$ для ИС КМОП, значит, информация, передаваемая с помощью такого сигнала, может быть потеряна!

Следовательно, для сопряжения передатчика ТТЛШ и приёмника КМОП требуется согласование уровней передаваемых сигналов. Стандартная схема согласования показана на рис. 12.

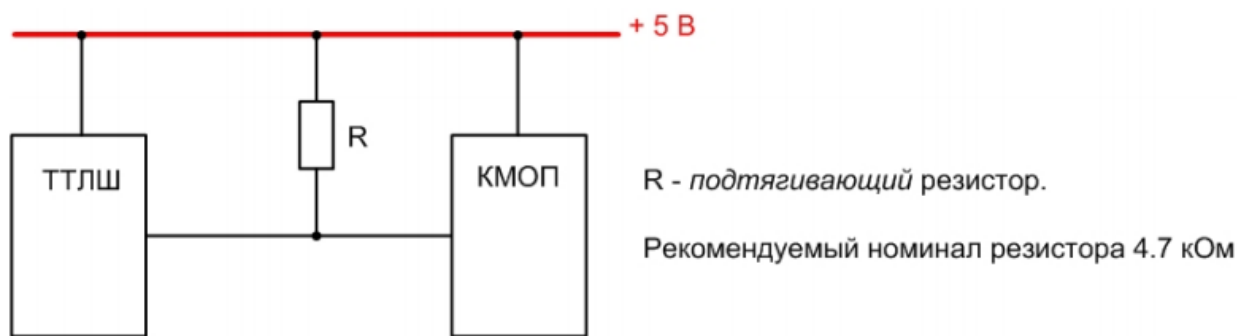


Рисунок 12. Типовая схема согласования серий 1533 (ТТЛ) и 1554 (КМОП)

3. Примеры стендов

На рис. 13-14 показаны примеры стендов ЛЭ НЕ, 2И-НЕ и 2ИЛИ-НЕ КМОП.

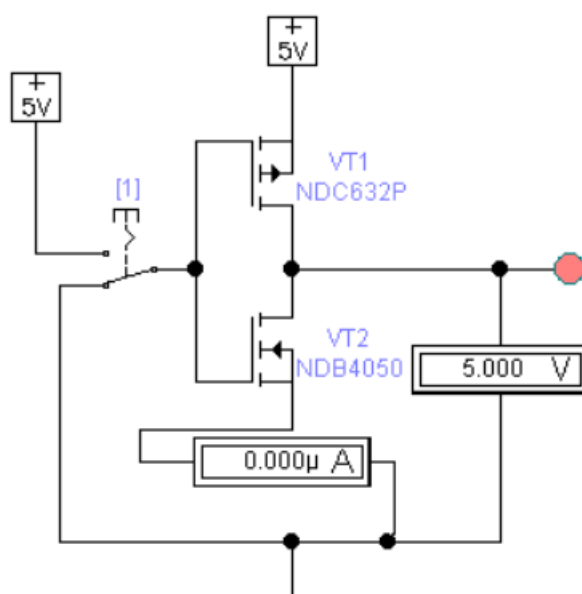


Рисунок 13. Пример стенда ЛЭ НЕ КМОП

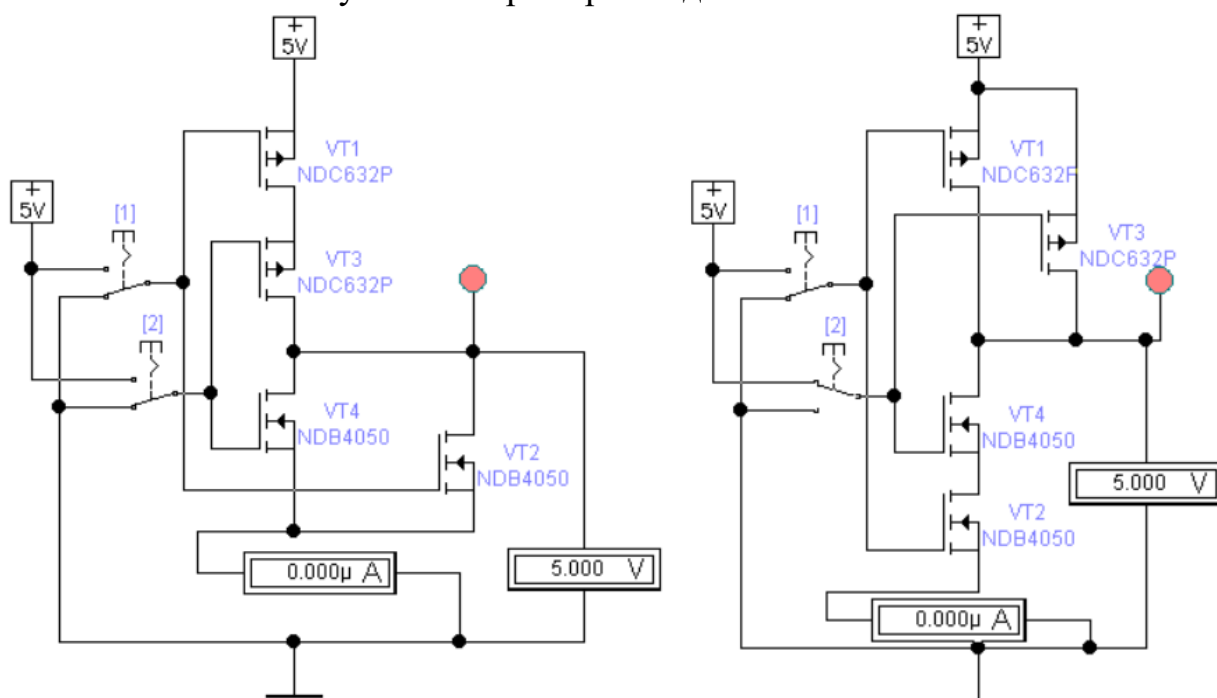


Рисунок 14. Примеры стендов ЛЭ 2И-НЕ и 2ИЛИ-НЕ КМОП

Пример стенда с подключённым осциллографом и сигналов показаны на рис. 15 и 16.

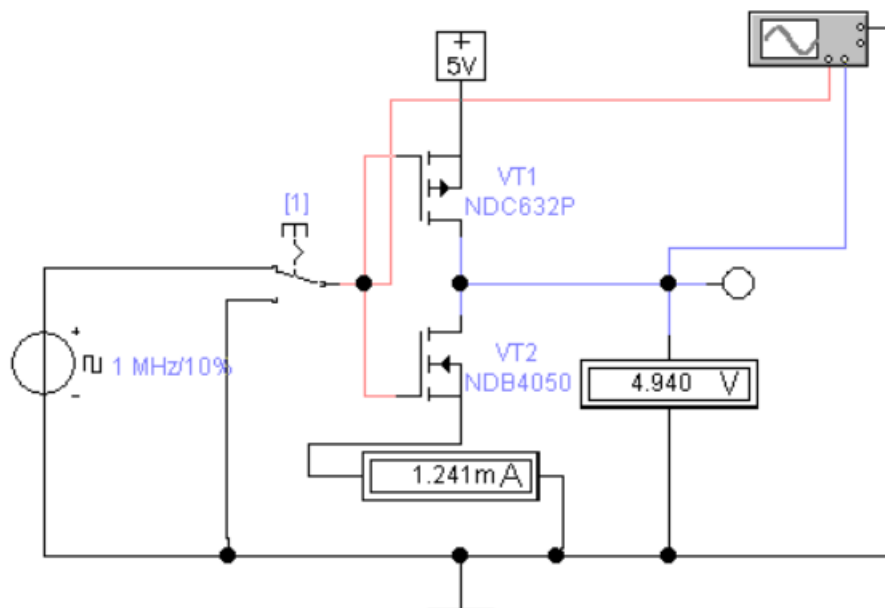


Рисунок 15. Стенд с подключённым генератором сигналов и осциллографом

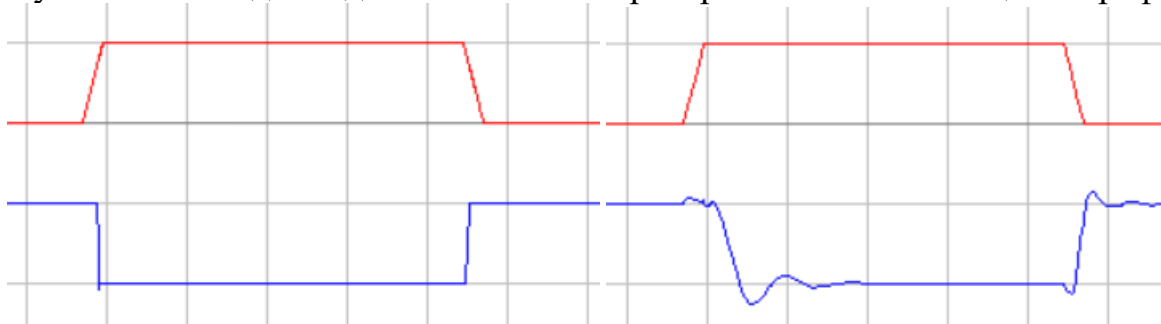


Рисунок 16. Примеры сигналов

ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

1. Соберите стенды как показано на рис. 13, 14 для заданного вариантом транзисторов и логической функции для выходов 2С, включите их. Запишите показания приборов (ток потребления I_p и напряжение на выходе $U_{вых.}$) для разного положения переключателей каждого стенда.

2. Соберите стенд для заданного вариантом логического элемента с выходом 3С с активным уровнем $EZ=1$. На рис. 7 показан пример для логического элемента НЕ с выходом 3С и активным уровнем $EZ=0$. Включите стенд. Запишите показания приборов (ток потребления I_p и напряжение на выходе $U_{вых.}$) для разного положения переключателей. Если на выходе устанавливаются состояния 0 или Z – убедитесь в этом с помощью резистора подтяжки (pull-up). Подключите к выходу через нагрузочный резистор номиналом 1 кОм источник питания. Если напряжение на выходе осталось в пределах уровней напряжения нуля (меньше 0,8 В), тогда это действительно 0 на выходе.

3. Соберите стенд для логической функции ЗИ, если в варианте задана ЗИ-НЕ, (иначе ЗИЛИ). Включите стенд. Запишите показания приборов (ток потребления I_p и напряжение на выходе $U_{вых.}$) для разного положения переключателей.

4. Напишите выводы о проделанной работе.

Дополнительные задания за дополнительные +5 баллов независимо от срока сдачи работы. Все задания должны быть выполнены.

1. Соберите стенд ЛЭ 2Искл.ИЛИ с выходами 2С для заданного вариантом транзисторов, включите его. Запишите показания приборов (ток потребления I_p и напряжение на выходе $U_{вых.}$) для разного положения переключателей.

2. В стенде из п.1 измените выходы 2С на 3С с активным уровнем $EZ=0$, включите его. Запишите показания приборов (ток потребления I_p и напряжение на выходе $U_{вых.}$) для разного положения переключателей. Если на выходе устанавливаются состояния 0 или Z – убедитесь в этом с помощью резистора подтяжки (pull-up). Подключите к выходу через нагрузочный резистор номиналом 1 кОм источник питания. Если напряжение на выходе осталось в пределах уровней напряжения нуля (меньше 0,8 В), тогда это действительно 0 на выходе.

3. Измените стенд из п.1 таким образом, чтобы на одном из входов был подключен генератор сигналов и осциллограф как на рис. 15. Второй вход оставьте без изменения, поставив переключатель в положение константы, которая будет выполнять роль инвертора другого входного сигнала. На генераторе периодического сигнала изменяйте частоту входного сигнала, пока на мониторе осциллографа не достигнете двух вариантов сигналов как на рис. 16. Изменяйте частоту входного сигнала, пока не добьётесь чистого и искажённого выходных сигналов. Исходя из эксперимента определите максимальную частоту изменения входного сигнала.

Таблица

Варианты задания

№	Транзистор		Логический элемент		
	P-МОП	N-МОП	Выход 2С		Выход 3С
1	irf4905	NDB7051	4И-НЕ	3ИЛИ-НЕ	2ИЛИ-НЕ
2	NDH832P	NDB705A	4И-НЕ	3ИЛИ-НЕ	2ИЛИ-НЕ
3	NDS8435	NDB705B	4И-НЕ	3ИЛИ-НЕ	2ИЛИ-НЕ
4	irf5305	NDB606A	3И-НЕ	4ИЛИ-НЕ	2И-НЕ
5	NDT454P	NDB605A	3И-НЕ	4ИЛИ-НЕ	2И-НЕ
6	NDS9430	NDB606B	3И-НЕ	4ИЛИ-НЕ	2И-НЕ
7	irf5210	NDB608A	3И-НЕ	4ИЛИ-НЕ	2И-НЕ
8	NDS9405	NDB605B	3И-НЕ	4ИЛИ-НЕ	2И-НЕ
9	NDH8447	NDB608B	3И-НЕ	4ИЛИ-НЕ	2И-НЕ
10	irf7304	NDB505A	4И-НЕ	3ИЛИ-НЕ	2ИЛИ-НЕ
11	NDS9435	NDB506B	4И-НЕ	3ИЛИ-НЕ	2ИЛИ-НЕ
12	irf7306	NDB508B	4И-НЕ	3ИЛИ-НЕ	2ИЛИ-НЕ
13	NDC652P	NDB4060	3И-НЕ	4ИЛИ-НЕ	2И-НЕ
14	NDS9400A	NDP4050	4И-НЕ	3ИЛИ-НЕ	2ИЛИ-НЕ
15	NDS356P	NDB406A	3И-НЕ	4ИЛИ-НЕ	2И-НЕ
16	NDT452P	NDB405A	3И-НЕ	4ИЛИ-НЕ	2И-НЕ
17	NDS9400	NDB406B	3И-НЕ	4ИЛИ-НЕ	2И-НЕ
18	NDT2955	NDB408A	4И-НЕ	3ИЛИ-НЕ	2ИЛИ-НЕ
19	irf6215	NDB408B	4И-НЕ	3ИЛИ-НЕ	2ИЛИ-НЕ
20	NDS352P	NDB405B	4И-НЕ	3ИЛИ-НЕ	2ИЛИ-НЕ

СОДЕРЖАНИЕ ОТЧЕТА

Отчет по работе должен быть оформлен согласно ОС ТУСУР 01-2021 и содержать следующие разделы.

1) введение (цель работы и постановка задачи).

В разделе описываются цель работы и задачи (как общие для всех, так и задачи своего варианта), которые необходимо выполнить.

2) исследование логических элементов.

Приводится собранная схема и её словесное описание для каждого стенда согласно порядку выполнения работы с показаниями приборов в каком-то положении переключателей и таблица с показаниями приборов при различном положении переключателей. Пример заголовков таблицы: «Переключатель Z» («Переключатель 1»); «Переключатель X» («Переключатель 2»); I_p , мкА; $U_{вых}$, В (мкВ, смотря для какой функции); «Состояние». Если входа (переключателя) три или четыре, то столбцов больше. Для каждой строки с уникальным значением тока I_p необходимо привести подтверждающий экраный снимок с показаниями приборов. Значения в столбцах переключателей указывать «0» или «1» в соответствии с тем, куда в данный момент подключен переключатель: к источнику питания – «1», к земле – «0».

В столбце Uвых для элемента с 3С выхода указывать значения без учёта резистора подтяжки. В столбце «Состояние» указать в каком состоянии находится выход (0, 1 или Z).

3*) Дополнительные задания (*необязательный раздел, только для тех, кто выполняет доп. задания).

Для доп. задания 3 приводятся примеры экранных снимков стенда и показания монитора осциллографа для неискажённого и искажённого выходных сигналов. Для искажённого выходного сигнала 3-4 варианта частоты с нарастанием искажения. Сделать вывод о предельной частоте изменения входного сигнала без искажения выходного сигнала.

Для остальных доп. заданий описание такое, как в п.3.

4) заключение.

Приводятся выводы о проделанной работе: в краткой форме описывается что было сделано и какие результаты были получены.

Структурные разделы, такие как «Оглавление», «Введение», «Заключение», «Список использованных источников» – не нумеруются, пишутся строчными буквами, кроме первой заглавной. Остальные разделы (заголовки первого уровня) должны быть пронумерованы и написаны ПРОПИСНЫМИ буквами.

ПРИМЕРНЫЙ СПИСОК ВОПРОСОВ ПРИ ЗАЩИТЕ РАБОТЫ

1. Чем обусловлено название КМОП?
2. Почему в статическом режиме ЛЭ КМОП имеют малое потребление тока?
3. Можно ли совместно применять ИС ТТЛ и КМОП? Поясните свой ответ.
4. Почему в динамическом режиме потребление тока ЛЭ КМОП возрастает? Каким образом зависит потребление тока ЛЭ КМОП от частоты изменения входного сигнала?
5. В схеме логического элемента транзисторы р-типа (n-типа) включены последовательно (параллельно), какую логическую функцию выполняет элемент?
6. Можно ли объединять выходы ЛЭ КМОП? Поясните свой ответ.
7. Есть ли отличия уровней напряжения выхода в ЛЭ ТТЛ и КМОП при одинаковом уровне напряжения источника питания +5 В?
8. Какое на Ваш взгляд принципиальное отличие построение ЛЭ КМОП и на МОП-структурах?