

Министерство образования и науки Российской Федерации
Ярославский государственный университет им. П. Г. Демидова
Базовая кафедра нанотехнологий в электронике

ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ЭЛЕКТРОНИКИ

Учебно-методическое пособие

Ярославль
ЯрГУ
2018

УДК 537.86(075)
ББК 385я73
Ф48

Рекомендовано
Редакционно-издательским советом университета
в качестве учебного издания. План 2018 года

Рецензент
Базовая кафедра нанотехнологий в электронике
ЯрГУ им. П. Г. Демидова

Составители:
М. Е. Лебедев
А. Б. Чурилов

Физические основы электроники : учебно-методическое пособие / сост. : М. Е. Лебедев, А. Б. Чурилов ; Яросл. гос. ун-т им. П. Г. Демидова. — Ярославль : ЯрГУ, 2018. — 68 с.

В пособии рассмотрена ретроспектива развития электроники и описаны принципы работы классических электронных приборов. Пособие включает разделы «Вакуумная электроника» и «Униполярные транзисторы».

Предназначено для студентов, изучающих дисциплину «Физические основы электроники».

УДК 537.86(075)
ББК 385я73

© ЯрГУ, 2018

Введение

Дисциплина «Физические основы электроники» изучает историческое развитие, физические принципы и математические модели устройств электроники. Предмет тесно связан с курсами «Электричество и магнетизм», «Схемотехника», «Физика полупроводников» и является одним из первых специальных курсов в программе бакалавриата «Нанотехнологии в электронике».

К объектам изучения в физической электронике относятся электронные и ионные процессы переноса в вакууме, газах и твердом теле (главным образом в полупроводниках), а также на поверхностях раздела различных сред. Электроника в современном понимании — это наука об электрических сигналах. В первую очередь будут рассмотрены электронные устройства для получения, преобразования, передачи электрических сигналов малой мощности.

Раздел вакуумной электроники имеет непосредственное отношение к курсу «Физические методы анализа», в котором важное место занимает электронная микроскопия, непосредственно связанная с вакуумной техникой.

Историческая справка:

зарождение и развитие электроники

Первыми в мире исследования электрических разрядов в воздухе осуществили в XVIII в. российские академики М. В. Ломоносов и Г. В. Рихман и независимо от них американский ученый Б. Франклин. В 1802 г. электрическую дугу открыл академик В. В. Петров, а П. Н. Яблочков впервые применил ее для целей освещения в 1876 г. Первый в мире электровакуумный прибор — лампу накаливания — изобрел в 1873 г. русский электротехник А. Н. Лодыгин. Независимо от него такую же лампу создал, а затем усовершенствовал американский изобретатель Т. А. Эдисон.

Осветительные лампы являются пассивными электронными приборами и, как трансформаторы, конденсаторы, резисторы, катушки индуктивности, антенны и т. д., в общем случае не меняют форму гармонического сигнала, проходящего через эти элементы в любой схеме. Такие приборы не могут использоваться для создания генераторов, выпрямителей, усилителей и скорее являются предметом изучения электротехники, чем электроники.

Собственно истоком электроники явились первые активные приборы — электровакуумные диоды, которые изначально применялись для получения постоянного тока из переменного, а затем нашли множество других применений — детектирование сигналов, защита чувствительных элементов схем, повышающие преобразователи напряжения и т. д.

Первым поколением элементной базы электроники по праву считаются электровакуумные приборы. Это стало возможным благодаря детальному исследованию явления термоэлектронной эмиссии, проведенному англичанином О. У. Ричардсоном. В 1928 г. его работы были отмечены Нобелевской премией. Английский ученый Дж. А. Флеминг впервые применил в 1904 г. двухэлектродную лампу (диод) для детектирования высокочастотных колебаний. В 1907 г. американский инженер Л. Д. Форест разработал вакуумный триод, что позволило не только детектировать, но и усиливать электрические сигналы.

Второе поколение элементной базы электроники — дискретные полупроводниковые приборы. В 1948 г. американские ученые У. Шокли, Дж. Бардин и У. Браттейн изобрели биполярный транзистор, а в 1956 г. им была вручена Нобелевская премия.

Третье поколение элементной базы электроники — интегральные микросхемы, предложенные в 1958 г. Робертом Нойсом и Джеком Килби. Это стало новым историческим этапом развития электроники — микроэлектроники. За изобретение интегральной схемы Д. Килби удостоен Нобелевской премии в 2000 г.

Последняя треть прошлого столетия отмечена также рождением наноэлектроники. С ней связывают начало четвертого поколения элементной базы электроники. Характеристические размеры наноструктур лежат в диапазоне 0–100 нм. При таких линейных размерах элементов физические принципы, явления и привычные теоретические модели теряют силу и начинают проявляться в полной мере эффекты, обусловленные квантовой природой электрона. Уже обсуждаются проблемы создания квантовых интегральных схем, основными элементами которых станут квантовые точки, квантовые проводники, квантовые ямы, транзисторные структуры на основе квантовых размерных эффектов и устройств с управляемой интерференцией электронов.

Классификация электронных приборов

Для классификации устройств электроники можно выбрать огромное количество критериев и получить множество классов и категорий:

- по характеру влияния на сигнал можно различить *пассивные* и *активные* устройства;
- по принципу преобразования энергии: *собственно электронные устройства* и *устройства-преобразователи*;
- по характеру сигнала: *цифровые* и *аналоговые* устройства и т. д.

Несколько вариантов возможных классификаций представлены на рис. 1..

С исторической точки зрения уместно разделить устройства по типу проводящей среды: электровакуумные, газоразрядные и твердотельные (в основном полупроводниковые).

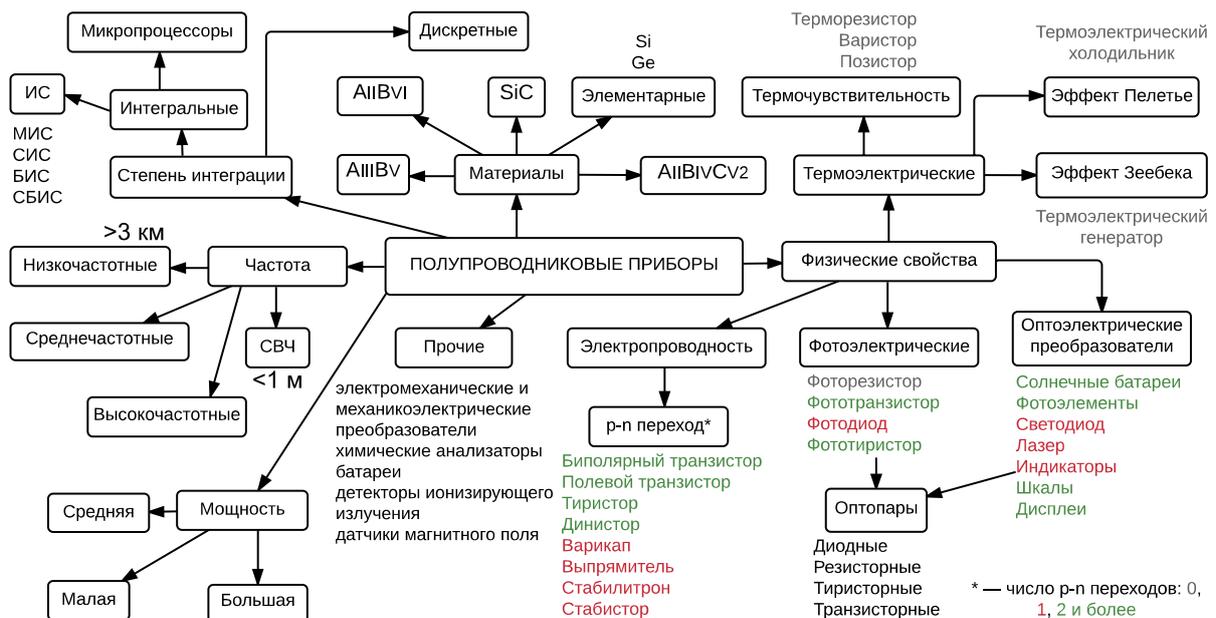


Рис. 1. Диаграмма классификации электронных приборов по некоторым критериям

Принципиально новый этап развития электроники начался с появления микроэлектроники, когда впервые был применен групповой способ производства приборов. Микроэлектроника и в настоящее время формирует практически всю элементную базу современных средств приема, обработки и передачи сигналов.

Кратко применимость различных устройств электроники сегодня можно описать так: во всех приложениях, где можно применить интегральные схемы, экономически целесообразно применять интегральные схемы. В области больших мощностей (сотни ватт, киловатты) или в случаях, когда устойчивость к внешним полям становится критична (космическая электроника), применяются электровакуумные приборы. Приборы плазменной электроники имеют несколько специфичных ниш — некоторые виды индикаторных приборов, высоковольтные защитные устройства, получение сверхкоротких импульсов большой мощности.

Простейшие электронные устройства могут быть с равным успехом построены на электронном устройстве любого рода, и в случаях, когда для решения производственной задачи требуется выбирать между полупроводниковым устройством и электровакуумным, необходимо представлять различия свойств таких приборов. Табл. 1 содержит основные различия между полупроводниковыми и электровакуумными приборами.

Таблица 1

***Преимущества и недостатки
полупроводниковой электроники в сравнении с вакуумной***

Преимущества полупроводниковых приборов по сравнению с электровакуумными лампами	Недостатки полупроводниковых приборов
<ul style="list-style-type: none"> - меньшие масса и размеры; - отсутствие затраты энергии на накал; - более высокие надежность и срок службы; - большая механическая прочность; - более высокий КПД; - возможность работы при низких питающих напряжениях; - более низкая стоимость 	<ul style="list-style-type: none"> - свойства и параметры сильно зависят от температуры; - свойства и параметры приборов со временем ухудшаются; - многие типы транзисторов не пригодны для работы на ВЧ; - полупроводниковые приборы чувствительны к перегрузкам по току и напряжению и могут выйти из строя от короткой импульсной нагрузки; - работа полупроводниковых приборов резко ухудшается под действием радиоактивного излучения

Основы вакуумной электроники

Электривакуумными называют приборы, действие которых основано на прохождении электрического тока в вакууме. К ним относят электронные лампы, электронно-лучевые трубки, фотоэлектронные умножители, магнетроны и другие приборы. Сфокусированный электронный пучок используется в аналитическом оборудовании — электронных микроскопах, рентген-анализаторах, в технологическом оборудовании — сварка электронным лучом, литография и другие приложения. В аналоговых телевизорах и осциллографах также использовался пучок электронов в разреженной среде.

Таким образом, технология широко использует вакуумную электронику, и специалисты по нанотехнологиям должны иметь представление о вакуумной технике, законам прохождения электрического тока в вакууме, источниках электронного луча и способах манипуляции им.

Измерение уровня вакуума

Термин происходит от латинского *vacuus*, «пустой», и в технике означает состояние газа под давлением ниже атмосферного. Абсолютное отсутствие частиц в макроскопическом объеме не наблюдается даже в глубоком космосе, где на кубический метр пространства приходится примерно одна частица. В электронике вакуум требуется для создания проводящей среды для электронов и ионов, а также для обеспечения химической чистоты ответственных деталей установок и материалов, а следовательно, воспроизводимости и надлежащего качества готовых изделий.

Из молекулярно-кинетической теории известно, что средняя кинетическая энергия хаотического движения молекул газа пропорциональна абсолютной температуре, а распределение молекул по скоростям имеет вид:

$$\frac{dn_v}{n} = 4\pi v^2 \cdot \left(\frac{m}{2\pi kT}\right)^{\frac{3}{2}} \exp\left(-\frac{mv^2}{2kT}\right) dv, \quad (1)$$

где dn_v — число молекул со скоростями от v до $(v+dv)$, n — общее число молекул, m — масса молекулы.

Процессы в вакууме существенно зависят от соотношения средней длины свободного пробега и линейного размера камеры. Частота столкновений молекул друг с другом, или частота внутриобъемных столкновений, зависит от длины свободного пробега:

$$K_m = \frac{v_{ap}}{L}, \quad (2)$$

а частота столкновений со стенками камеры зависит от площади и объема камеры:

$$K_c = \frac{v_{ap}S}{4V} = \frac{v_{ap}}{d_{эф}}, \quad (3)$$

где S — площадь стенок вакуумной камеры, $d_{эф}$ — эффективный размер камеры. Отношение частоты поверхностных столкновений молекул к частоте внутриобъемных столкновений называется критерием Кнудсена:

$$K_n = \frac{K_c}{K_m} = \frac{L}{d_{эф}}. \quad (4)$$

В зависимости от значения K_n различают три степени вакуума:

- низкий, или черновой, вакуум: молекулы сталкиваются друг с другом намного чаще, чем со стенками камеры, $K_n \ll 1$. Технически предельным значением K_n для низкого вакуума считается величина $5 \cdot 10^{-3}$;

- средний вакуум: вклады обоих механизмов столкновения сравнимы, $5 \cdot 10^{-3} < K_n < 1,5$;

- высокий вакуум: молекулы пролетают путь между столкновениями со стенками камеры практически прямолинейно, без взаимодействия с другими молекулами $K_n > 1,5$.

Низкий вакуум характеризуется давлением от 1 мм рт. ст. Как правило, такой вакуум создается в камере предварительной откачки, выступающей первой ступенью вакуумной системы и «приемником» молекул, которые выбрасываются на следующих стадиях откачки. В некоторых системах требуется наличие разных уровней вакуума в камере, например в микроскопии исследование биологических образцов несовместимо с высоким вакуумом. В то же время источник электронов и электронная оптика требуют высокого вакуума, поэтому с помощью специального включения насосов и применения разделительных диафрагм

в двух частях камеры поддерживаются одновременно два различных уровня вакуума.

Атмосферное давление составляет 760 мм рт. ст. (среднее давление в какой-то точке у поверхности Земли при определенной температуре) или 98066 Па, приблизительно 10^5 Па. Мерой давления также часто является 1 атмосфера (бар) или, в вакуумной технике, тысячная часть атмосферы — миллибар. Соотношения между общепринятыми единицами измерения давления можно записать в виде:

$$1 \text{ мм рт. ст.} = 1 \text{ торр} \approx 133 \text{ Па} = 1,33 \text{ мбар}. \quad (5)$$

Единица измерения торр является аналогом миллиметра ртутного столба, названа так в честь итальянского ученого Э. Торричелли, исследовавшего явление атмосферного давления.

Давление газа в сосуде есть средний импульс, передаваемый хаотично движущимися молекулами единице площади стенки сосуда в единицу времени. В первом приближении давление пропорционально концентрации газа согласно формуле Менделеева — Клапейрона:

$$p = nkT, \quad (6)$$

где n — концентрация, k — постоянная Больцмана, T — абсолютная температура.

Из формулы (6) следует, что уменьшение количества частиц в камере, например, в 10 раз при прочих равных условиях соответствует уменьшению давления в 10 раз. Давление, в отличие от числа частиц, легко измеряется множеством способов. В нормальных условиях концентрация молекул газа при атмосферном давлении составляет величину $2,7 \cdot 10^{25} \text{ м}^{-3}$.

Для измерения состояния вакуума в камере технологической или аналитической установки используются вакуумметры — приборы, тем или иным образом преобразующие давление разреженной среды в электрический сигнал.

В принципе, вакуумметр может быть индикатором для считывания данных персоналом, и поэтому не обязательно содержать электрическую схему. Так, например, устроены пружинный манометр, аналогичный манометру, измеряющему высокое давление, или гидростатический манометр, в котором используется столбик воды, спирта или ртути. Такие приборы могут использо-

ваться только для измерения состояния низкого вакуума и не обладают большой точностью.

В современных установках практически всегда используют компьютерное управление, поэтому современные вакуумметры оснащены преобразователем, и данные либо непосредственно могут быть считаны управляющим компьютером (например, через Ethernet-соединение, или через RS232), либо преобразованы с помощью управляющего устройства (плата контроля вакуума), а затем переданы компьютеру.

В основе принципа любого вакуумметра лежит какое-либо свойство газовой среды, которое меняется в зависимости от концентрации газа известным образом. Непосредственно механические индикаторы вакуума (пружинный манометр и гидростатический манометр) используют свойство газа оказывать давление на стенку сосуда. Становится очевидным, почему такие датчики не могут использоваться в области среднего вакуума, когда газ сильно разрежен и давление, оказываемое газом на макроскопические детали ничтожно мало.

Другое свойство разреженного газа — участвовать в процессах теплопереноса — лежит в основе тепловых вакуумметров различных конструкций. Принцип работы термопарного вакуумметра в следующем: в камеру с откачиваемым газом вводится датчик, содержащий нить накала, через которую пропускается постоянный ток. В плотном контакте с нитью находится термопара, напряжение которой указывает текущую температуру нити. Температура нити зависит от величины пропускаемого тока, которая всегда остается на заданном уровне, и от теплообмена с окружающей средой: чем больше концентрация газа вокруг нити, тем эффективнее нить охлаждается. Следовательно, чем меньше давление в камере, тем больше напряжение, снимаемое с термопары. Начиная с определенной концентрации газа взаимодействие молекул с нитью будет настолько редким, что не окажет влияния на температуру нити, поэтому такие датчики применяются при давлениях от атмосферного до примерно 10^{-4} Торр. Общее название отечественных датчиков такого типа — ПМТ — преобразователь манометрический термопарный. Схема такого вакуумметра изображена на рис. 1.

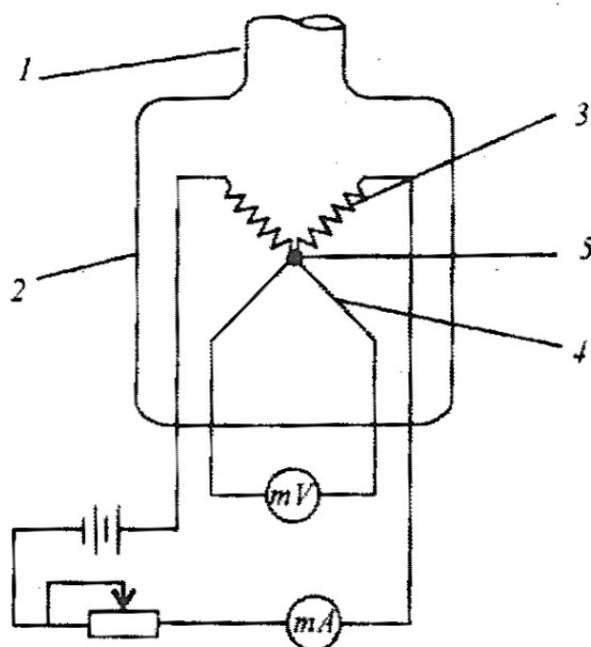


Рис. 1. Устройство и подключение термопарного вакуумметра:
 1 — входное отверстие, 2 — стеклянный или металлический баллон,
 3 — нить накала, 4 — провода термопары, 5 — термопара

Практически аналогичным образом проводятся измерения уровня вакуума с помощью датчика Пирани. В таких датчиках нет термопары, для определения температуры используется свойство металлов менять сопротивление при нагревании. Например, при пропускании постоянного тока через платиновую нить на концах нити можно снимать напряжение, которое будет пропорционально текущему сопротивлению нити. Сопротивление металлов линейно растет с увеличением абсолютной температуры. Поэтому чем сильнее откачана камера, тем большее напряжение снимается с концов нити. Как и в случае термопарных преобразователей, предел чувствительности такого датчика может составлять порядка 10^{-4} – 10^{-5} Торр.

В зависимости от конкретной применяемой схемы тепловые вакуумметры могут быть включены в режиме постоянного напряжения, постоянного тока, либо постоянной температуры нити.

Для измерения вакуума низкого и среднего уровня применяются также емкостные вакуумметры, в английской литературе известные как Varatron gauges. Вакуумный датчик такой конструкции является двухкамерным: одна часть находится под вакуумом известной величины и отделена от открытой части датчика подвижной мембраной. Мембрана является подвижным

электродом конденсатора, вблизи нее расположен неподвижный электрод. Прогиб мембраны зависит от разности давлений по две стороны от нее. Давление в закрытой камере постоянно, давление в рабочей камере установки понижается по мере откачки. Положение мембраны определяет емкость, которая измеряется с помощью электронного преобразователя и переводится в значение давления платой контроля вакуума либо компьютером. Минимальное давление, регистрируемое емкостным вакуумметром, составляет порядка 10^{-5} Торр. Конструкция емкостного вакуумметра представлена на рис. 2.

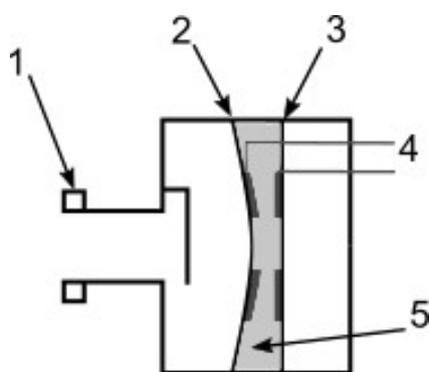


Рис. 2. Устройство емкостного вакуумметра:

- 1 — входное отверстие, 2 — подвижная мембрана,
 3 — неподвижный электрод, 4 — провода к преобразователю
 «емкость — напряжение» и в некоторых случаях к АЦП, 5 — камера
 с поддерживаемым уровнем вакуума

Помимо изменения емкости конденсатора, механическое движение также может быть преобразовано в изменение сопротивления потенциометра либо в напряжение пьезогенератора, соответствующие вакуумметры имеют сходную конструкцию с емкостным и обладают примерно таким же пределом измерений.

Вакуумметры для измерения высокого уровня вакуума, как правило, представляют собой ионизационные датчики. Они не могут включаться при атмосферном давлении и, как правило, включаются после получения управляющим устройством сигнала о достижении допустимого уровня вакуума (например, 10^{-3} Торр) от другого датчика. Простейшая конструкция напоминает вакуумный диод — см. электровакуумные приборы, примером могут служить отечественные датчики ПМИ. Другой вид ионизационных датчиков — магниторазрядные, или датчики Пеннинга.

В распространенном варианте датчика Пеннинга катод является цилиндром, одно основание которого открыто к камере установки, а внутренняя (рабочая) поверхность повторяет диаметр вакуумного соединения с камерой установки. Вдоль оси цилиндра проходит игла, являющаяся анодом, к ней подведено напряжение 2000 В. Между анодом и катодом поддерживается электрическое поле, в котором периодически образуются и движутся от катода к аноду свободные электроны. Молекулы газа, попав в ионизационную камеру, могут спонтанно ионизироваться при столкновениях со свободными электронами, образовавшиеся электроны и ионы принимают участие в протекании тока. Сила тока уменьшается с уменьшением давления в камере и может быть нулевой при достижении порогового давления для данного типа датчиков — порядка 10^{-10} Торр. При меньших давлениях вероятность обнаружения молекулы в объеме датчика становится ничтожной — молекулы не постоянно присутствуют в датчике, а изредка попадают в него, поэтому ток может прекратиться. Для увеличения длины пробега вызывающих ионизацию электронов, а следовательно, увеличения вероятности ионизации, снаружи ионизационной камеры расположен мощный магнит. Датчик Пеннинга в разрезе представлен на рис. 3.

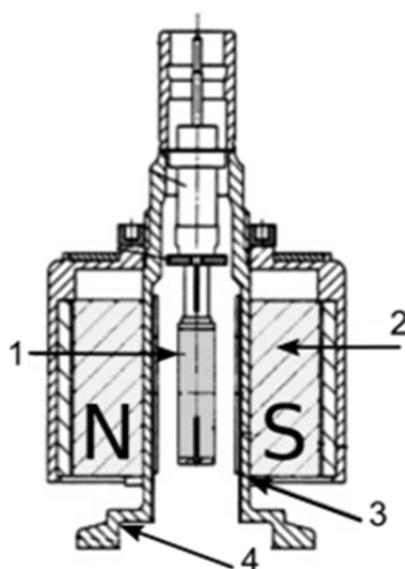


Рис. 3. Устройство ионизационного вакуумметра с холодным катодом (датчика Пеннинга): 1 — анод, напряжение +2000 В; 2 — магнит; 3 — катод, напряжение 0 В; 4 — соединение с установкой

Вакуумметры для высокого вакуума на пределе чувствительности работают с настолько малыми концентрациями газа, что показания естественным образом имеют существенный разброс и точность определения давления составляет в лучшем случае 15 % для датчиков Пеннинга. Рассмотренный далее ионно-геттерный насос также является датчиком высокого вакуума, но обладает еще более низкой точностью — около 30 % для предельно низких давлений, связано такое свойство с геометрией насоса: при предельно малых концентрациях внутри насоса давление может отличаться от давления в камере, к которой подключен насос. Краткий обзор рассмотренных вакуумметров представлен в табл. 2.

Таблица 2

Обзор вакуумметров различных типов

Вид вакуумметра	Используемый принцип или эффект	Диапазон измеряемого давления, Торр
гидростатический	давление газа	0,1–760
емкостной	давление газа	10^{-5} –760
термопарный	теплоперенос молекулами газа	10^{-4} –760
Пирани	теплоперенос молекулами газа и зависимость сопротивления металла от температуры	10^{-5} –760
магниторазрядный (датчик Пеннинга)	ионизация молекул	10^{-10} – 10^{-3}

Методы получения вакуума

Для создания предварительного вакуума используются форвакуумные насосы (англ. *prevacuum pump*), принцип действия которых может быть основан на механическом вытеснении газа либо на захвате молекул газа струей вязкой жидкости. Второй способ чаще используется на производстве, когда важна высокая производительность и экономичность, а высокая степень откачки

не требуется, кроме того, условия работы допускают использование пара высокого давления, завышения уровня шума и т. д.

Одной из распространенных конструкций форвакуумного насоса является роторный насос, схема с фазами рабочего цикла которого приведены на рис. 4.

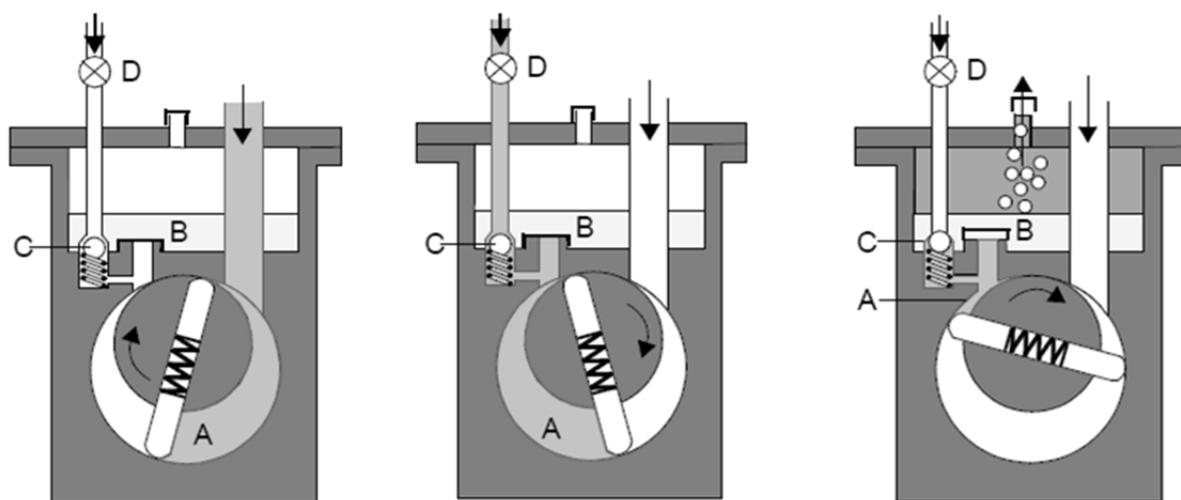


Рис. 4. Схема работы роторного насоса: А — рабочая камера, В — масляная камера с выпускным клапаном, С — клапан газового балласта, D — вход газового балласта. Газовый балласт используется в случае откачки воздуха с большим содержанием паров воды

В таком насосе необходимо использование вакуумного масла для уплотнения соединений и уменьшения износа подвижных частей. Существует также вариант исполнения форвакуумного насоса, не требующий смазки, такая конструкция называется спиральным компрессором. Вакуум лучше чем 10^{-3} мм рт. ст. с использованием таких насосов принципиально недостижим, в области среднего вакуума основными инструментами выступают сорбционные, диффузионно-масляные и турбомолекулярные насосы.

Сорбционный насос представляет собой емкость, заполненную поглощающим веществом с большой удельной поверхностью. В качестве поглотителей используются активированный уголь, цеолиты, силикагель и т. д. Капсула с поглощающим веществом сообщается с откачиваемой камерой. В рабочем режиме капсулу охлаждают до температуры жидкого азота. Таким образом можно уменьшить давление в камере до 10^{-4} мм рт. ст. В процессе работы вещество в капсуле насыщается откачанными газами и теряет по-

глошающие свойства. Для очистки от инородных молекул капсулу с поглотителем прогревают после работы установки.

Принцип действия турбомолекулярного насоса основан на применении турбулентного режима движения газа, который достигается путем вращения лопастей ротора со скоростью 90 000 и более оборотов/мин. На оси ротора расположено несколько роторных дисков с лопастями. Между роторными дисками располагаются статорные диски. Лопастей ротора и статора сориентированы в противоположные стороны. Устройство насоса представлено на рис. 5. Современные турбомолекулярные насосы могут запускаться при атмосферном давлении, однако до сих пор для достижения более щадящего режима работы насоса и prolongирования срока службы системы используется тракт предварительного вакуума. Турбомолекулярный насос позволяет получить вакуум до 10^{-7} мм рт. ст.

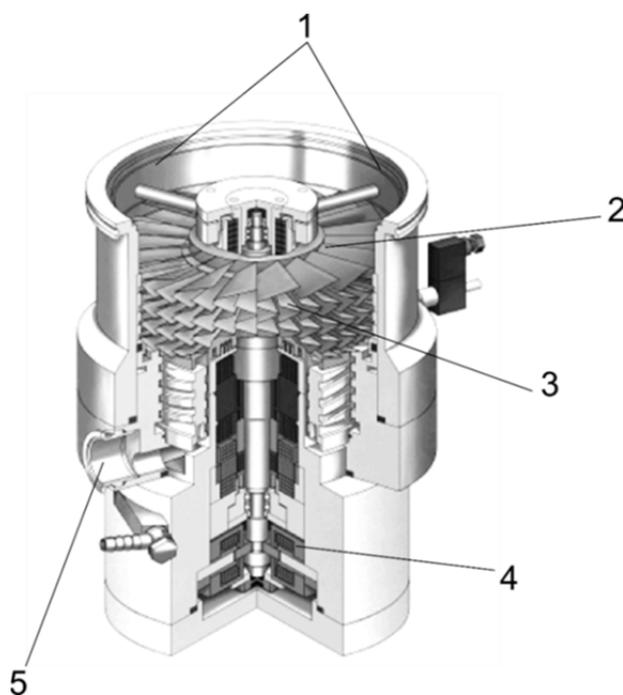


Рис. 5. Устройство турбомолекулярного насоса:
1 — входное отверстие, 2 — ротор, 3 — статор,
4 — электродвигатель, 5 — выходное отверстие

Диффузионно-масляный насос использует специализированное масло, которое интенсивно нагревается и попадает в камеру насоса в виде паров, которые связывают молекулы газа. В камере насоса охлаждаемые ловушки специальной формы, на которых пары масла конденсируются и возвращаются к нагревателю.

Освобождаемые молекулы газов поступают в тракт предварительной откачки. Предел откачки такого насоса составляет приблизительно 10^{-8} мм рт. ст. Эскиз диффузионно-масляного насоса в разрезе представлен на рис. 6.

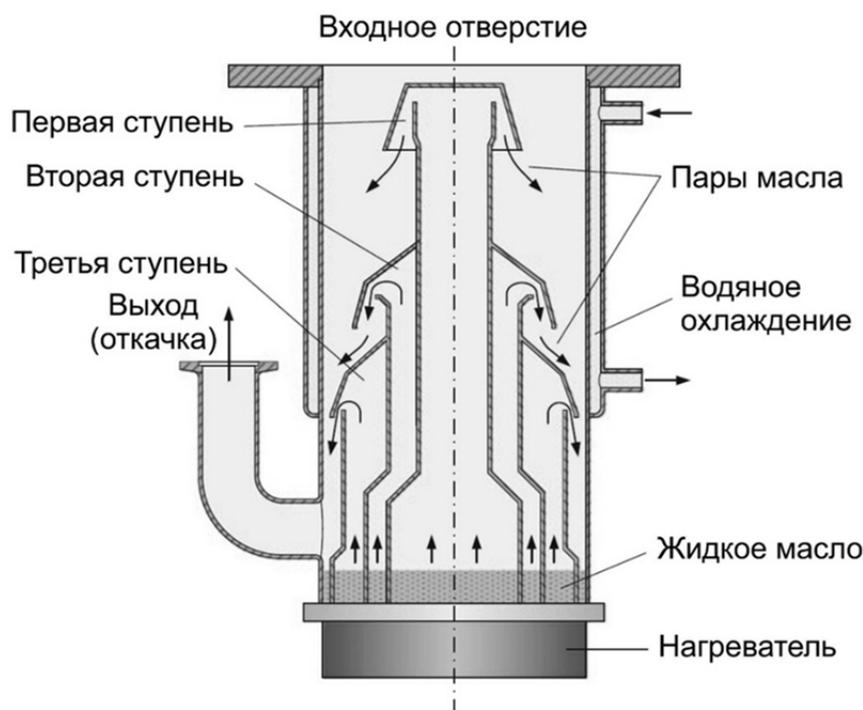


Рис. 6. Устройство и схема движения масла в диффузионно-масляном насосе

Более высокая степень вакуума может быть достигнута с помощью других видов насосов — ионно-геттерного или криосорбционного.

Ионно-поглощающий, или ионно-геттерный, насос имеет две особенности, отличающие его от насосов других типов. Во-первых, активное пространство насоса сообщается с откачиваемой камерой, выходное отверстие отсутствует. Поскольку насос работает в области глубокого вакуума, количество вещества, которое он поглощает в единицу времени, мало, поэтому ресурс насоса рассчитан на десятки лет работы без всякого обслуживания. Во-вторых, насос выступает одновременно и датчиком вакуума, ток питания насоса характеризует степень откачки. Насос состоит из двух пластин из пористого титана, между которыми расположены аноды из титана в форме трубок. Пластины-катоды обычно заземлены, на аноды подается напряжение плюс 2000–10000 В в зависимости от объема насоса.

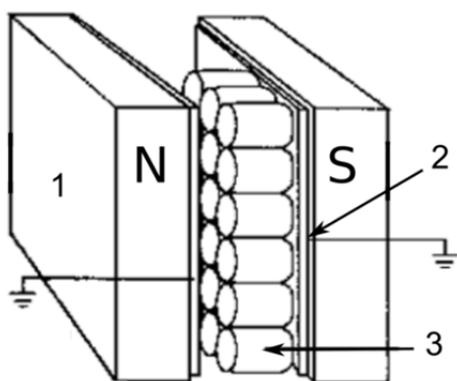


Рис. 7. Устройство ионно-геттерного насоса:
 1 — магнит,
 2 — титановые губки, выступающие катодами под нулевым напряжением,
 3 — цилиндры-аноды

Упрощенный процесс работы насоса состоит в том, что спонтанно вылетевший из катода электрон ионизует молекулу газа, положительный ион благодаря наличию электрического поля движется к титановой пластине и оседает внутри нее. Для того чтобы увеличить длину траектории электрона, снаружи корпуса насоса установлены постоянные магниты. Предельное давление, которое можно получить с помощью ионно-геттерного насоса, составляет примерно 10^{-10} мм рт. ст. Упрощенная схема ионно-геттерного насоса изображена на рис. 7.

Примерно такой предел откачки имеют и криосорбционные насосы, использующие осаждение молекул газов при гелиевых (4 К) температурах стенок камеры.

Обзор способов получения вакуума приведен в табл. 3.

Таблица 3

Обзор некоторых видов вакуумных насосов

Вид насоса	Используемый принцип или эффект	Диапазон рабочих давлений, Торр
форвакуумный: роторный либо спиральный	механическое вытеснение среды	10^{-3} –760
турбомолекулярный	создание турбулентного потока молекул	10^{-7} –1
диффузионно-масляный	диффузия газа, зависимость адсорбции молекул от температуры	10^{-8} – 10^{-3}
ионно-геттерный	ионизация молекул, поглощение ионов	10^{-10} – 10^{-3}
криосорбционный	низкотемпературная абсорбция молекул	10^{-11} – 10^{-3}

Электровакуумные приборы

Электровакуумный диод — прибор, обладающий односторонней проводимостью. Сопротивление диода зависит от приложенного к нему напряжения и становится бесконечным при подключении обратного напряжения («минус» к аноду диода, «плюс» — к катоду). В прямом включении сопротивление диода мало и в некоторых случаях пренебрежимо. Таким образом, диод, и не только электровакуумный, является простейшим электронным ключом — способность пропускать ток определяется подключенным напряжением. Такое свойство используется для выпрямления переменного тока: если между источником переменного напряжения и потребителем в схему включить диод, ток через потребитель будет идти только при совпадении проходящего на диод напряжения с его «прямым» включением — от синусоидального сигнала «остаются» только полупериоды синусоиды.

Принцип работы электровакуумного диода в следующем: в герметичном стеклянном баллоне, откачанном до состояния глубокого вакуума (порядка 10^{-7} Торр) расположены две металлические пластины — анод и катод. Если приложить к этим пластинам напряжение, электрического тока не возникнет, поскольку между пластинами нет заряженных частиц. Для того чтобы возник ток, необходимо внести носители заряда, например электроны, в пространство между анодом и катодом. Известно, что электроны в металле являются практически свободными, однако для выбивания их из металла необходимо сообщить электронам энергию, большую, чем работа выхода. Принципиальных методов сообщить электрону энергию три — повышение температуры, воздействие электрическим полем и воздействие каким-либо излучением (свет, рентген) или бомбардировка частицами (электронами, ионами).

Распространенный технологический прием повысить температуру металла — пропустить через него ток. При повышении температуры скорость хаотического движения электронов увеличивается, растет их кинетическая энергия. В данном случае речь идет о средней энергии, фактически распределение электронов по энергиям в металлах подчиняется статистике Ферми:

$$F(E) = \frac{1}{\exp\left(\frac{E - E_F}{kT}\right) + 1}, \quad (7)$$

где $F(E)$ — относительное число носителей с энергией E , E_F — энергия Ферми, k — постоянная Больцмана, T — абсолютная температура.

На рис. 7 приведена зависимость количества выбитых электронов (с точки зрения эксперимента эта величина соответствует эмиссионному току) от температуры.

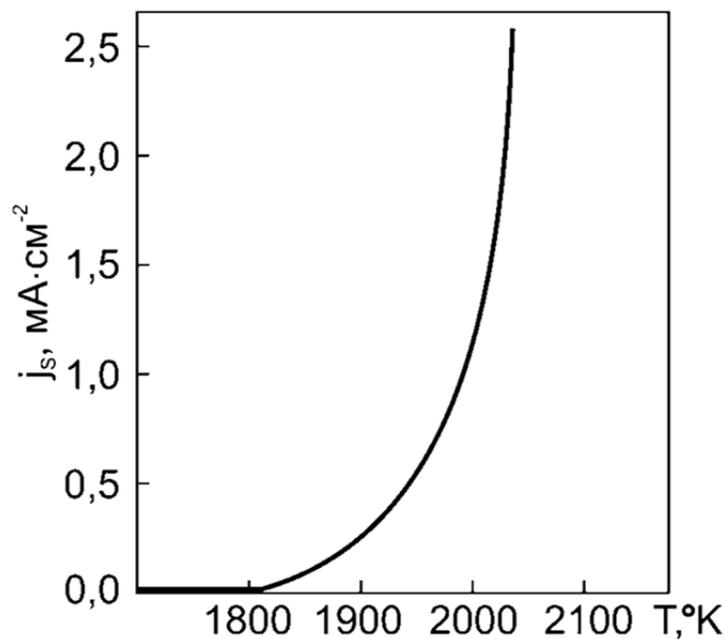


Рис. 7. График зависимости тока эмиссии горячего катода от температуры

Для вольфрама, являющегося основным материалом для катодов в электровакуумных лампах, заметное количество электронов освобождается при температурах начиная с 2000°C , при этом средняя энергия электронов $0,2$ эВ. Работа выхода для вольфрама составляет $4,54$ эВ. Получаем, что средняя энергия электронов при рабочей температуре катода более чем в 20 раз меньше необходимой для вылета энергии.

В принципе, электровакуумный диод может быть изготовлен в виде прибора с тремя выводами: анод, катод, и накал катода. Схематичное изображение простейшего лампового диода изображено на рис. 9.

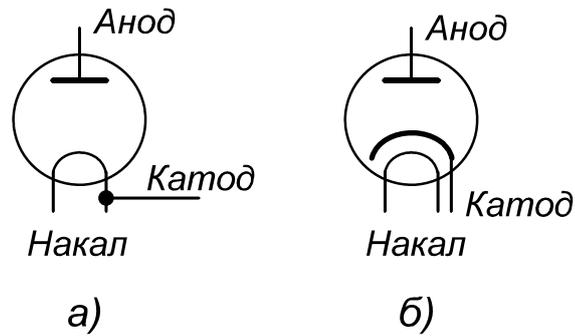


Рис. 8: а) простейший диод с прямым накалом, катод и нагреватель электрически соединены; б) диод с косвенным накалом, катод электрически не связан с нагревателем

Практически рационально разделить цепь накала и сигнальную цепь, поэтому чаще всего нагреватель катода и катод разделены диэлектриком и на один диод приходится 4 вывода. Из тех же рациональных соображений в одном стеклянном корпусе, как правило, размещают не менее двух диодов, использующих один нагреватель.

Основное назначение такого прибора — преобразование переменного тока в постоянный. Механизм так называемого «выпрямления» тока в следующем: если нагреть катод путем подачи напряжения на нагреватель, над катодом появится «электронное облако» из свободных электронов, находящихся в динамическом равновесии, — часть электронов с низкой энергией постоянно возвращается в металл, и наоборот, из металла наиболее горячие электроны забрасываются в область вакуума.

Пусть катод имеет нулевой потенциал, влияние потенциала нагревателя не рассматривается. Если к аноду подключить положительное напряжение, облако свободных электронов вблизи катода придет в ускоренное движение, и возникнет анодный ток.

Закон Богуславского — Ленгмюра, или закон «трех вторых», устанавливает взаимосвязь между анодным током I_A и анодным напряжением U_A в вакуумном диоде:

$$I_A = \frac{4\varepsilon_0}{9} \sqrt{\frac{2e}{m}} \frac{S_A^2}{d^2} U_A^{3/2}, \quad (8)$$

где ε_0 — диэлектрическая постоянная, e — элементарный заряд, m — масса электрона, S_A — активная площадь анода, d — расстояние между электродами.

Как видно из формулы (8), при сохранении геометрии диода зависимость тока от напряжения выглядит как степень $3/2$, с умножением на константу.

При подаче на анод отрицательного смещения электроны ускоряются в обратном направлении — возвращаются в катод и анодного тока не возникает. Зависимость анодного тока от напряжения «анод — катод» называется вольтамперной характеристикой (ВАХ) и имеет вид, показанный на рис. 10.

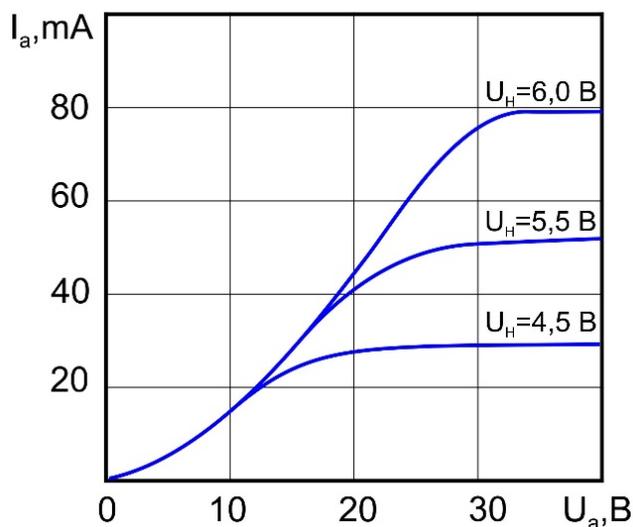


Рис. 9. Вольтамперные характеристики электровакуумного диода при различных напряжениях накала (различных температурах катода)

На графиках показана прямая ветвь ВАХ, соответствующая положительному напряжению «анод — катод». Обратная ветвь ВАХ описывается полупрямой $I = 0$. Три графика соответствуют трем напряжениям накала и, следовательно, трем различным температурам катода. При повышении анодного напряжения начиная с некоторого значения наступает насыщение: все электроны, вылетающие из катода, достигают анода и рост анодного тока замедляется.

Иногда в литературе встречаются ВАХ электровакуумного диода, у которых при нулевом напряжении существует положительный ток, а для выключения тока требуется подать небольшое отрицательное напряжение, называемое запирающим. Графики для этого случая отличаются от приведенных на рис. 11 смещением влево на несколько вольт. Связано такое свойство с различием материалов катода и анода, запирающее напряжение равно разности работ выхода металлов.

На рис. 10 показаны графики выпрямления напряжения с помощью лампового диода. Исходный сигнал синусоидальной формы (кривая *a* на рис. 10) преобразуется в пульсирующий (кривая *б*) — ток наблюдается только в те полупериоды, когда напряжение «анод — катод» положительно.

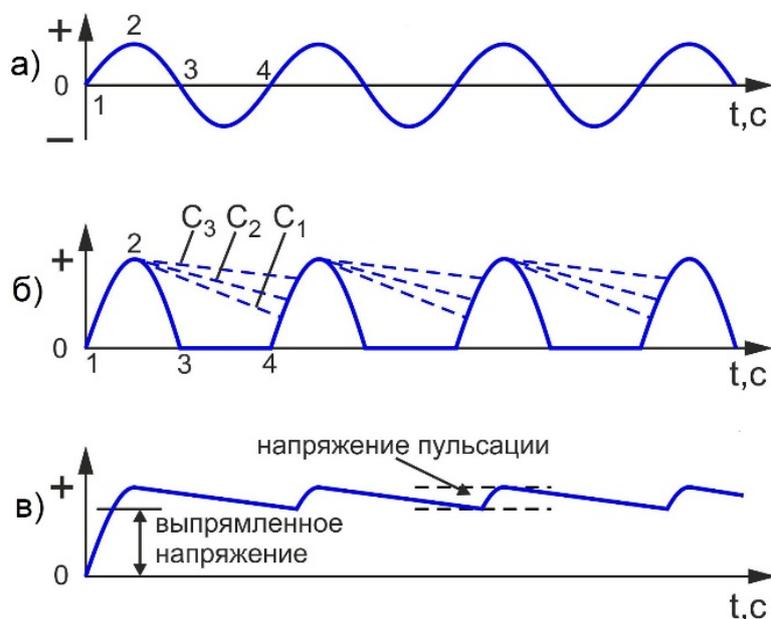


Рис. 10. Выпрямление напряжения однополупериодным выпрямителем: а) зависимость анодного напряжения от времени; б) зависимость анодного тока, или напряжения на нагрузке от времени; в) зависимость тока через нагрузку от времени при подключении конденсатора

Если параллельно нагрузке подключить конденсатор, пульсации напряжения сгладятся, ток и напряжение на нагрузке примут вид кривой *в*. Чем больше сопротивление нагрузки и чем больше емкость конденсатора, тем меньше напряжение пульсаций. С помощью подбора элементов можно достичь постоянного напряжения на нагрузке без каких-либо пульсаций. Пример схемы однополупериодного выпрямителя приведен на рис. 11.

Кратко результаты рассмотрения электровакуумного диода, можно сформулировать следующим образом:

- использует термоэлектронную эмиссию: электроны проводимости попадают в пространство между катодом и анодом за счет нагрева катода электрическим током;
- служит главным образом для получения постоянного напряжения из переменного. Анодный ток возникает только при положительном напряжении «анод — катод»;

- вакуумный диод предназначен для работы в области относительно высоких напряжений (сотни вольт), устойчив к перегрузкам и радиационному воздействию;
- обладает значительными габаритами и относительно низким КПД, срок службы прибора составляет от сотен до десятков тысяч часов.

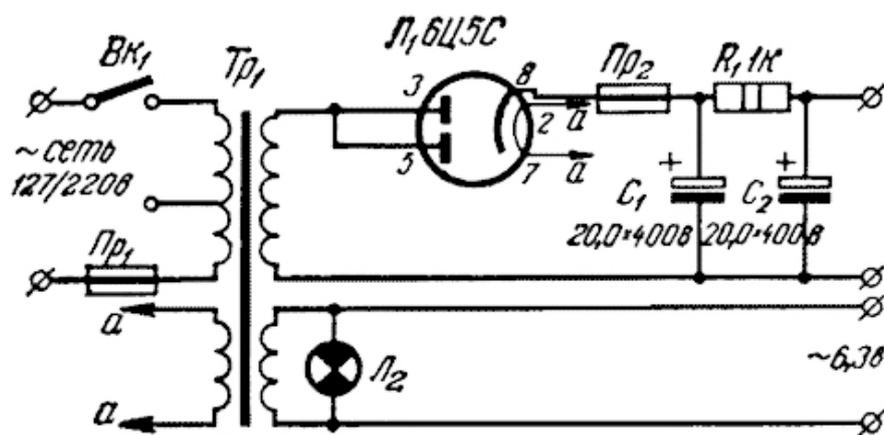


Рис. 11. Пример фактически используемой схемы выпрямителя напряжения на кенотроне 6Ц5С. Трансформатор Tr_1 преобразует сетевое напряжение в накальное (обычно 6 или 12 В, точки a) и анодное (обычно 200–300 В), которое подается на двойной диод, включенный как одиночный (два анода соединены), а затем на конденсаторы. Лампа L_2 служит для индикации напряжения, предохранители Pr_1 и Pr_2 для защиты схемы от случайного превышения тока

Электрoвакуумный триод является исторически первым усилительным элементом электроники — с его появлением стало возможным использование слабых сигналов (антенна, термopара, микрофон и т. д.) для управления мощными исполнительными устройствами (динамик, нагреватель, передающая антенна и т. д.). Конструктивно триод представляет собой диод, вблизи катода которого расположен управляющий электрод-сетка. Простейший триод содержит три сигнальных электрода: катод, сетку и анод — и чаще всего два электрода нагревателя. Сетка обычно выполнена в виде решетки или спирали так, чтобы площадь просвета была много больше площади металлической части. Если приложить к сетке напряжение относительно катода, электрическое поле будет практически однородным, подобно полю между пластинами плоского конденсатора. В зависимости от полярности напряжения «катод — сетка» можно ускорять либо замедлять электроны на пути

«катод — анод». А посредством изменения величины напряжения на сетке можно модулировать анодный ток. В этом заключается суть работы электронного усилителя: с помощью малого сигнала (и напряжение, и ток сетки по меньшей мере на порядок меньше анодных) происходит управление более мощным сигналом.

Анодный ток зависит от температуры катода, напряжения «анод — катод» и напряжения «сетка — катод». Температуру катода, как правило, фиксируют путем подачи определенного напряжения на нагреватель. Наиболее распространенной схемой включения триода является схема с общим катодом — катод выступает общим электродом как для управляющей цепи (напряжение на сетке отсчитывается относительно напряжения на катоде), так и для выходной цепи «анод — катод». Вместо зависимости $I_A(U_A)$ возникает семейство выходных характеристик — набор кривых $I_A(U_A, U_C)$, соответствующих различным напряжениям на сетке. Кривая, соответствующая отключенной сетке, совпадает с ВАХ диода аналогичного исполнения.

Пример выходных характеристик триода и его обозначение на схеме представлены на рис. 12.

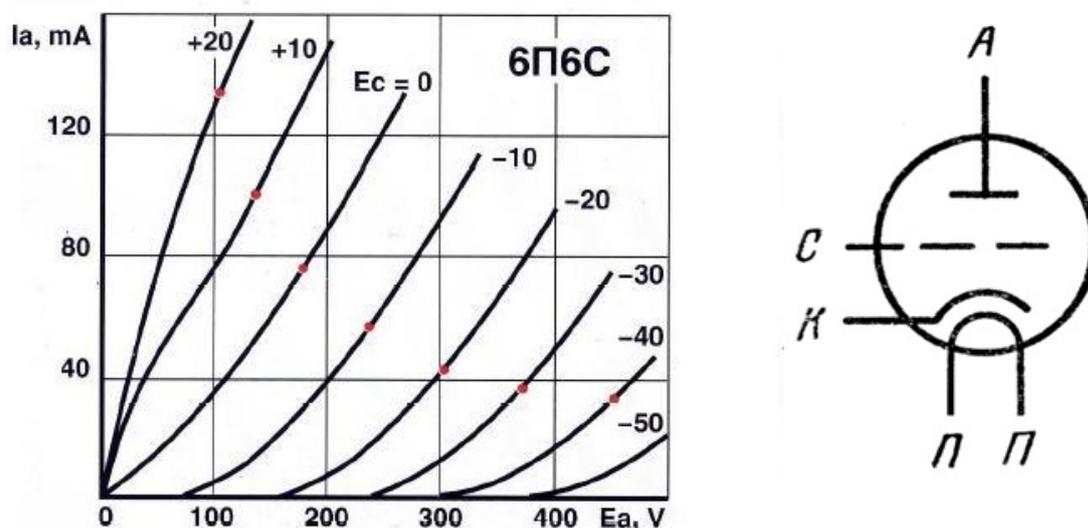


Рис. 12. Выходные характеристики триода 6П6С — зависимость анодного тока от анодного напряжения при различных напряжениях на сетке (E_c). Справа — обозначение триода на схеме, А — анод, С — сетка, К — катод, П — подогреватель (часто встречается также Н — накал)

Схема простейшего усилителя на триоде представлена на рис. 13. Напряжение 6,3 В подается на накал катода, это напряжение может быть переменным или постоянным. Входное напряжение подается через конденсатор $C_{св}$ на сетку лампы.

Конденсатор служит для разделения переменного сигнала и постоянной составляющей — как со стороны источника напряжения — с целью отфильтровывания постоянного напряжения, так и со стороны лампы — с целью избежать влияния на источник. Резисторы сетки и катода R_C и R_K служат для создания определенных смещений (напряжений) на катоде и сетке, чтобы триод работал в выбранном режиме. Резистор R_a между источником питания ($U_{и.п.}$) и анодом, является необходимым для преобразования тока анода в полезное напряжение выходного сигнала.

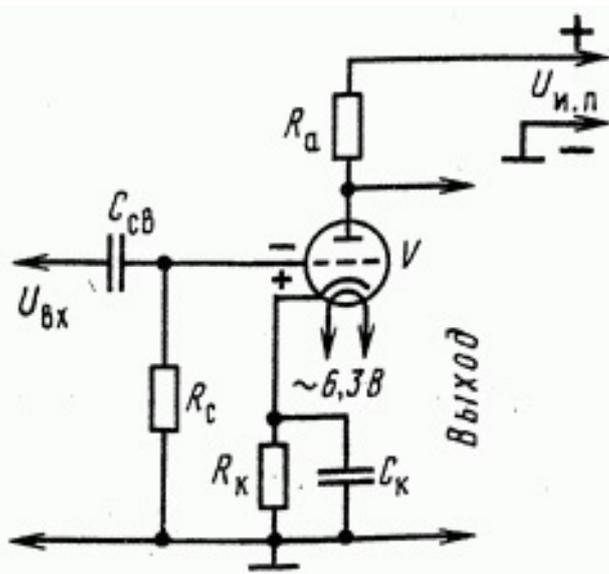


Рис. 13. Схема усилителя с общим катодом на триоде

Поскольку подобные схемы оперируют сравнительно высокими напряжениями — сотни вольт, и незначительными токами — десятки миллиампер, в качестве нагрузки может использоваться какой-то высокоомный потребитель, такой как газоразрядная осветительная лампа. Для подключения низкоомной нагрузки, например динамика, применяется понижающий трансформатор — из сигнала, например, на уровне 200 В, 10 мА после трансформатора получается сигнал 4 В, 500 мА, и в качестве полезной нагрузки может быть подключен динамик с сопротивлением 4 Ом и мощностью до 2 Вт. В общем случае трансформатор не уменьшает мощность передаваемого сигнала и не искажает его форму.

Униполярные транзисторы как элементы интегральной электроники

Полевым транзистором называется полупроводниковый прибор, работа которого основана на модуляции сопротивления полупроводникового материала поперечным электрическим полем, т. е. *напряжением*. Это принципиальное различие между ним и биполярным транзистором, в котором сила основного тока регулируется управляющим *током*. Следствием этого является очень высокое входное сопротивление полевого транзистора, достигающее 10^{12} Ом (для биполярного транзистора входное сопротивление $\sim 10^5$ Ом).

Полевые транзисторы иногда называют также **униполярными**, поскольку носителями электрического заряда в нем выступают только электроны или только дырки. В работе же биполярного транзистора, как следует из названия, участвует одновременно два типа носителей заряда — электроны и дырки.

Таблица 4

Классификация униполярных транзисторов

ПОЛЕВОЙ ТРАНЗИСТОР					
ПОЛЕВОЙ ТРАНЗИСТОР С УПРАВЛЯЮЩИМ P-N ПЕРЕХОДОМ		МОП ТРАНЗИСТОР			
		МОП ТРАНЗИСТОР СО ВСТРОЕННЫМ КАНАЛОМ		МОП ТРАНЗИСТОР С ИНДУЦИРОВАННЫМ КАНАЛОМ	
п-канал	р-канал	п-канал	р-канал	п-канал	р-канал

Полевые транзисторы бывают двух видов:

- с управляющим p-n переходом (бывают с каналом n-типа или с каналом p-типа), *junction field-effect transistor*, сокращенно *JFET*
- со структурой «металл — диэлектрик — полупроводник» (МДП-транзистор). Часто в качестве диэлектрика применяют окисел кремния, поэтому их часто называют «МОП-транзисторы» (металл-окисел-полупроводник, *metal-oxide-semiconductor field effect transistor*, сокращенно *MOSFET*).

МОП-транзисторы могут быть двух типов:

- транзисторы с встроенным каналом;
- транзисторы с индуцированным каналом.

Схемотехнические

и конструктивно-технологические особенности униполярных транзисторов

Устройства интегральной электроники с высокой степенью интеграции на униполярных транзисторах, в особенности на основе структур «металл-диэлектрик-полупроводник» (МДП), в настоящее время получили очень широкое распространение [6; 7]. Важнейшими *преимуществами* МДП интегральных микросхем (ИМС) являются:

- технологическая простота изготовления (по сравнению с биполярной), позволяющая создавать более сложные схемы с меньшими затратами;
- сравнительная простота конструкции, обеспечивающая высокий процент выхода годных, отсутствие необходимости дополнительной изоляции элементов;
- высокая степень интеграции элементов ИМС;
- одна или две разновидности элементов ИМС, электрические свойства которых можно изменять, варьируя геометрическую конфигурацию соответствующего прибора.

Биполярная технология примерно на 30 % дороже МДП-технологии. Можно выделить по крайней мере *три технологических преимущества* МДП ИМС по сравнению с биполярной:

- из-за меньшего числа технологических операций уменьшается суммарный допуск на эти операции, что приводит к существенному уменьшению площади МДП ИМС;
- нет необходимости формирования изолирующих *p-n*-переходов или локальных изолирующих областей, что также существенно повышает степень интеграции;
- возможность использования многослойных межэлементных соединений с учетом того, что часть соединений формируется непосредственно в процессе создания МДП-структур из диффузионных соединительных линий с электропроводностью *n*- или *p*-типа, называемых туннелями.

Кроме того, следует отметить более *низкую стоимость* реализации отдельной схемной функции. Для реализации одной схемной функции требуется меньшее число элементов и контактов между ними. Площадь МДП ИМС менее 10 % от площади биполярной ИМС той же функциональной сложности. Постоянное совершенствование технологии позволяет либо создавать более сложные схемы на МДП-транзисторах, либо разрабатывать более дешевые ИМС без снижения их рабочих характеристик. Малая площадь элементов, высокое входное сопротивление, позволяют на одной подложке реализовать большое число различных схемных функций. Высокая помехоустойчивость позволяет использовать МДП ИМС в сложных динамических системах, например в процессорах и памяти. Следует также отметить простоту разработки и высокую вероятность получения ИМС с заданными характеристиками.

Основные направления применения МДП ИМС:

1. Быстродействующие схемы на динамических элементах с высокой функциональной сложностью и малой потребляемой мощностью.

2. Микропроцессоры с высоким быстродействием и высокой плотностью компоновки.

3. БИС и СБИС — статические, маломощные и радиационно стойкие, на комплементарных МДП-транзисторах.

Историческая справка:

изобретение полевого транзистора

Исторически первые попытки создания твердотельного аналога вакуумного триода, а затем полевого транзистора оказались безуспешными. Однако 16 декабря 1947 г. они привели к созданию физиком-экспериментатором Уолтером Браттейном, работавшим с теоретиком Джоном Бардином, первого несовершенного точечного биполярного транзистора. Идею создания полевых транзисторов, иначе называемых униполярными или канальными, в 1952 г. предложил У. Шокли [8], автор теории *p-n*-перехода и один из создателей биполярного плоскостного транзистора. Главным достоинством этих транзисторов является высокое входное сопротивление (как у ламп и даже больше). Полевой

транзистор со встроенным каналом и является аналогом вакуумного триода. Исток в полевом транзисторе подобен катоду вакуумного триода, затвор — сетке, сток — аноду.

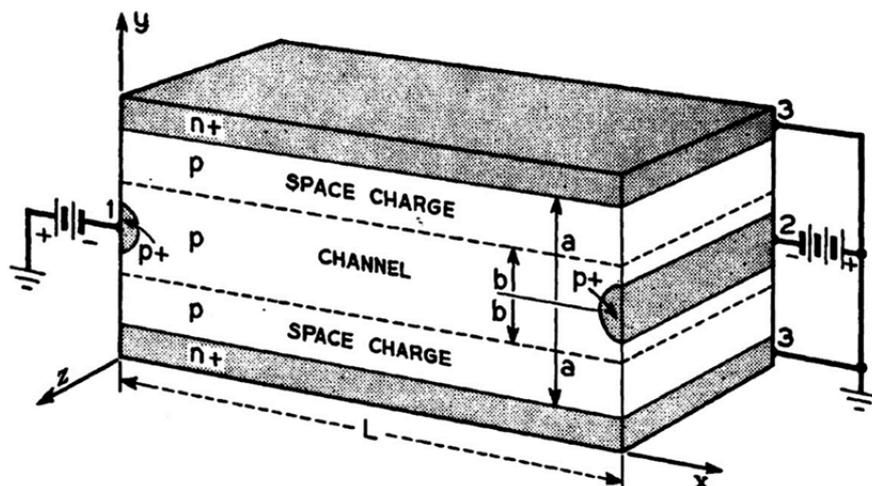


Рис. 16. Область пространственного заряда и канала в $(n+)p(n+)$ -структуре из работы У. Шокли [8]

Принцип модуляции проводимости исходя из электростатики был предложен в первых патентах на полевой транзистор в США в 1926–1930 гг., 1928–1932 гг. и 1928–1933 гг. Автор этих патентов — Юлиус Эдгар Лилиенфельд. Он родился в 1881 г. во Львове, столице тогдашней австрийской Галиции, в семье доктора права адвоката Сигизмунда Лилиенфельда [9].



Рис. 17. Юлиус Эдгар Лилиенфельд (1881–1963)

Получив в 1904 г. диплом университета им. Фридриха Вильгельма (с 1946 г. — Берлинский университет им. Гумбольдта), где изучал новейшие разделы физики и электроники у Макса Планка, президента Германского физического общества Эмиля Варбурга и др., он занимался мощными ртутными лампами низкого давления на кафедре физики Лейпцигского университета. В 1910 г. защитил докторскую диссертацию и занялся исследованием рентгеновских трубок, причем не бросил эту работу даже после того, как в 1914 г. студентов отправили на войну, лекции свернули, а его патентованные в Англии изобретения стали недоступны и он лишился средств. Впрочем, заявки на патенты принимали занимавшие нейтральную позицию США, а в 1916 г. саксонское правительство ради научного авторитета открыло Лилиенфельду в порядке исключения личную ставку профессора. Но летом 1917 г. США вступили в войну и его патенты приобрели статус «конфискованного имущества противника».

В 1919 г. он впервые описал видимое глазом слабое «серовато-голубоватое» свечение у анода рентгеновских трубок при подаче напряжения в 5 кВ, названное «излучением Лилиенфельда» (в 1946 г. оно было исследовано советскими физиками, Нобелевским лауреатом академиком В. Л. Гинзбургом и академиком И. М. Франком как переходное излучение).

В 1921 г. Лилиенфельд поехал в Нью-Йорк читать лекции в университете и отстаивать права на свои патенты, похищенные в 1919 г. Томасом В. Миллером — куратором по имуществу противника — за взятку «из высших кругов». В 1927 г. Миллера судили за мошенничество, особенно за продажу германских патентов «по бросовым ценам». В Нью-Йорке Лилиенфельд познакомился с американкой Беатрис Гинзбург, в 1926 г. женился и оставил свою должность в Лейпциге: в Европе наступал фашизм.

В 1927 г. он получил статус эмигранта и с 1928 г. заведовал Ergon Research Lab в г. Малден (шт. Массачусетс), занимаясь оксидными алюминиевыми пленками и их применением в электролитических конденсаторах, что способствовало и разработке транзистора.

Еще в 1922 г. Лилиенфельд подал заявку на «устройство, испускающее электроны только за счет электромагнитного поля» (автоэлектронный эффект). Автоэлектронное устройство с кон-

тактом, покрытым очищенным веществом, который испускает поток электронов и очищается бомбардировкой электронами, в 1926 г. получило патент США № 1578045.

В 1923 г., узнав о работе немецкого физика Вальтера Шоттки по исследованию холодных и горячих электронных разрядов, Лилиенфельд описал низковольтный полупроводниковый выпрямитель: «... с током в 3 А применим для зарядки аккумуляторов и других целей» — и в 1926 г. запатентовал выпрямитель переменного тока, первое из его твердотельных устройств.

Его первый патент на транзистор заявлен в 1926 г. (US Patent № 1745175 от 1928 г.), это был полевой транзистор — комбинация металла и полупроводника. Второй патент следует из первого, заявлен в 1928 г. (US Patent № 1900018 от 1933 г.): полевой транзистор, работающий в режиме обеднения. В 1928 г. заявлено устройство с полевой эмиссией, названное им «электронным триодом», который можно использовать как генератор рентгеновских лучей или переменного тока (US Patent № 1979275, выдан в 1934 г.).

Еще один патент — усилитель электрического тока (US Patent № 1877140 от 1932 г.) — описывает транзистор на металлической основе (полупроводниковый транзистор «полупроводник-металл») и транзистор Шоттки с *p-n*-коллектором. Это первый известный патент на транзистор с металлической базой.

Предложенные Лилиенфельдом транзисторы не были внедрены в производство. Транзисторы по патентам № 1900018 и № 1745175 представлены на рис. 18, 19.

С полевым транзистором он «поторопился» лет на пятнадцать: материалов для изготовления надежного экземпляра еще не было, но прогресс электроники доказал его научную прозорливость. В 1953 г. Дейки и Росс [10] предложили и реализовали другую конструкцию полевого транзистора — с управляющим *p-n*-переходом (рис. 20).

Наиболее важная особенность изобретения Лилиенфельда заключается в том, что он понимал работу транзистора на принципе модуляции проводимости исходя из электростатики. В описании к патенту формулируется, что проводимость тонкой области полупроводникового канала модулируется входным сигналом, поступающим на затвор через входной трансформатор.

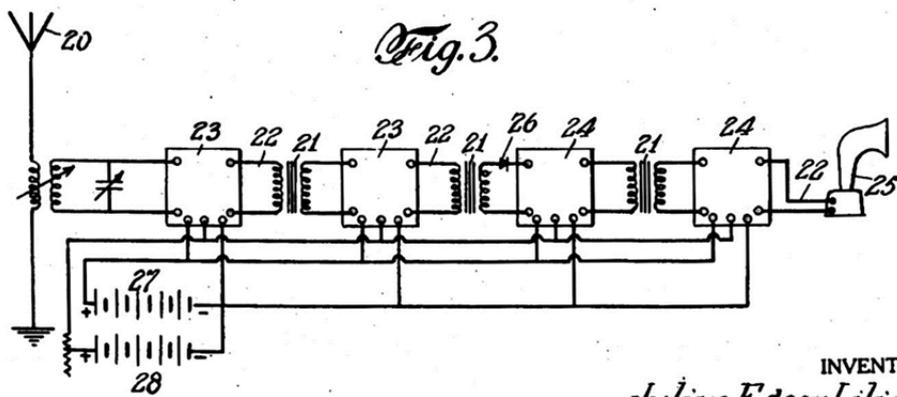
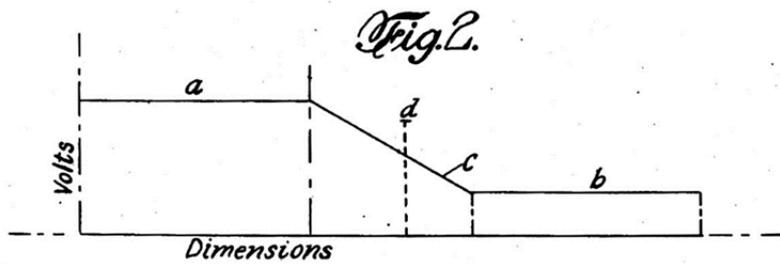
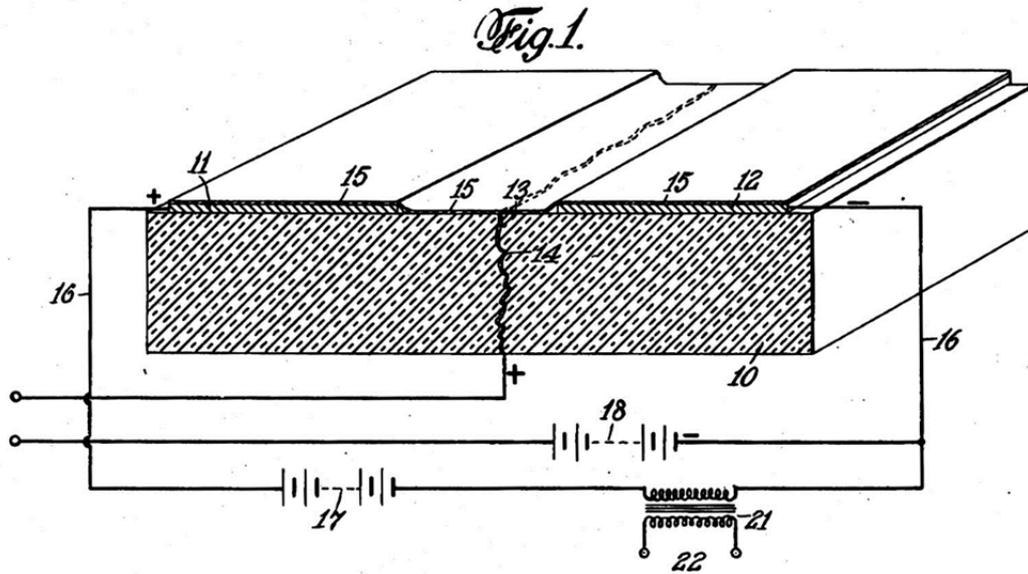
Jan. 28, 1930.

J. E. LILIENFELD

1,745,175

METHOD AND APPARATUS FOR CONTROLLING ELECTRIC CURRENTS

Filed Oct. 8, 1926



INVENTOR
Julius Edgar Lilienfeld
BY *Freih. Schmidt*
ATTORNEY

Рис. 18. Страница патента № 1745175
на полевой транзистор — комбинацию металла и полупроводника

March 7, 1933.

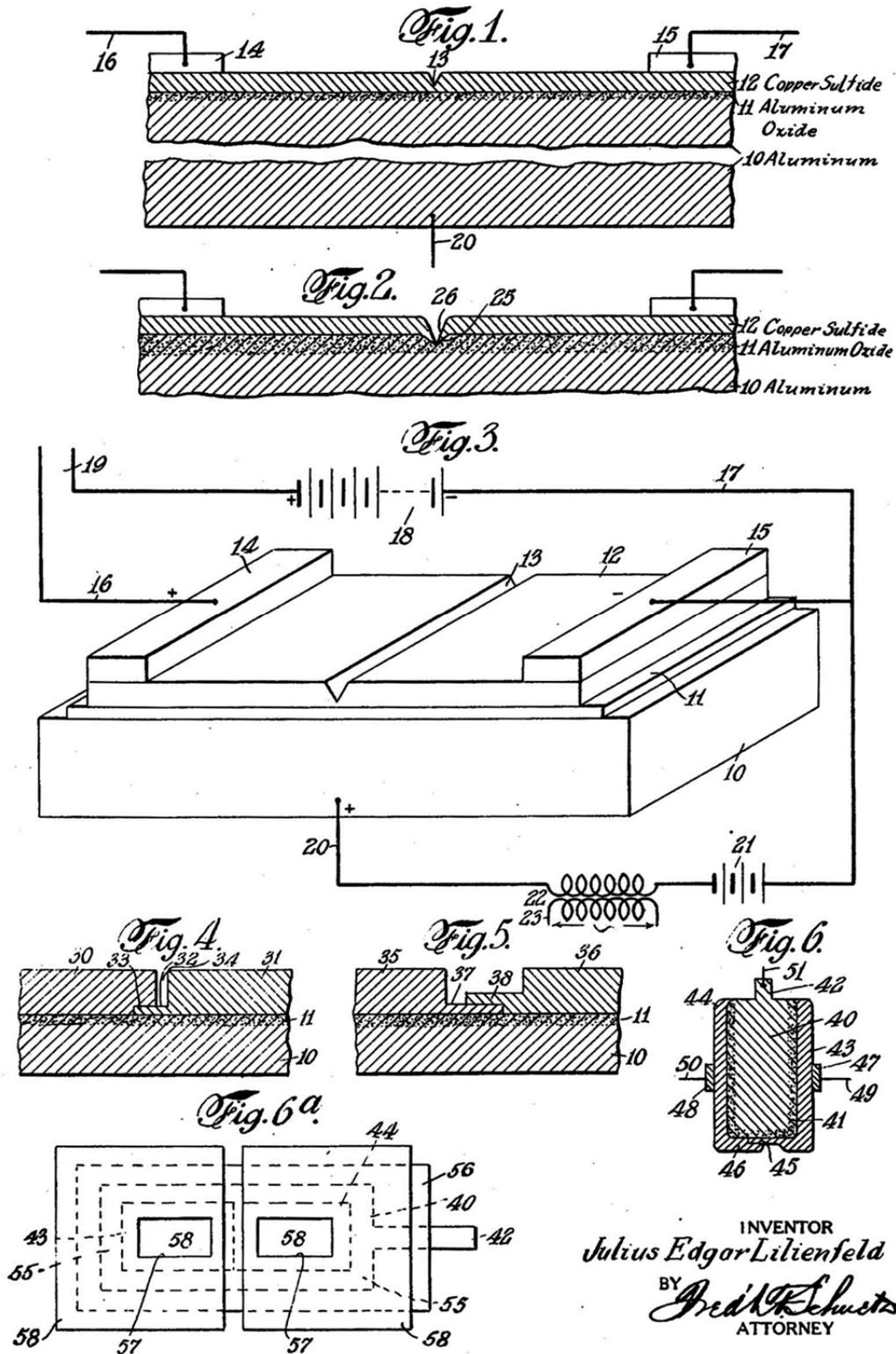
J. E. LILIENFELD

1,900,018

DEVICE FOR CONTROLLING ELECTRIC CURRENT

Filed March 28, 1928

3 Sheets-Sheet 1



INVENTOR
Julius Edgar Lilienfeld
BY
Fred K. Schuetz
ATTORNEY

Рис. 19. Страница патента № 1900018 на полевой транзистор, работающий в режиме обеднения

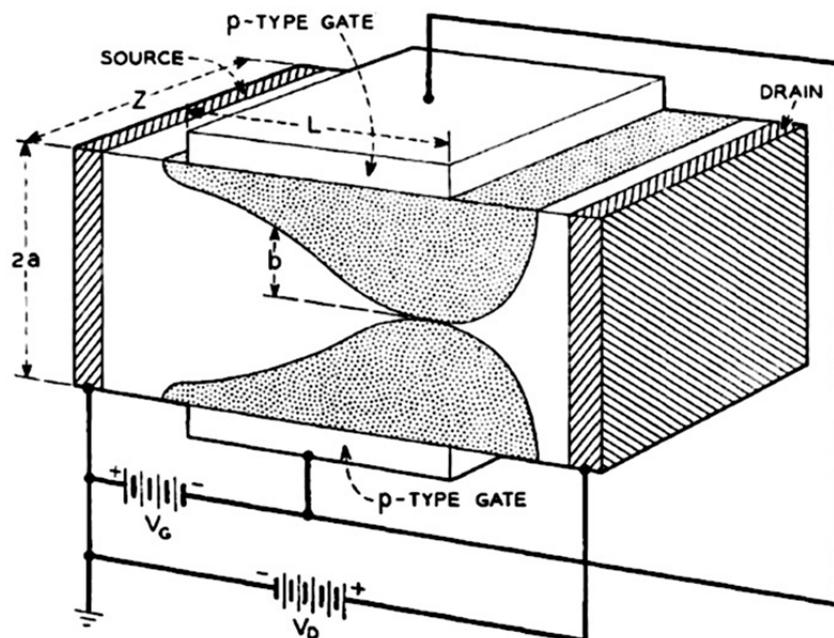


Рис. 20 . Схематическое изображение полевого транзистора из работы [10]

Структура и принцип действия полевого транзистора

Энергетическая зонная диаграмма при тепловом равновесии

В качестве исходной позиции для анализа работы полевого транзистора построим энергетическую зонную диаграмму трехкомпонентной структуры «металл — диэлектрик — полупроводник» (МДП-структура). Такая система при тепловом равновесии характеризуется тем, что уровень Ферми одинаков во всех трех материалах [11]. Для определенности рассмотрим кремний, легированный акцепторной примесью. В качестве металла возьмем алюминий, диэлектрика — термическую двуокись кремния (рис. 21).

В идеализированной МДП-структуре все границы раздела между материалами плоские и не содержат зарядов. Энергетический уровень вакуума есть непрерывная функция координаты. При контакте в различных материалов выравнивание их уровней Ферми происходит посредством переноса отрицательных зарядов из материалов с более высокими уровнями Ферми через границы в материалы с более низкими уровнями Ферми (большими работами выхода).

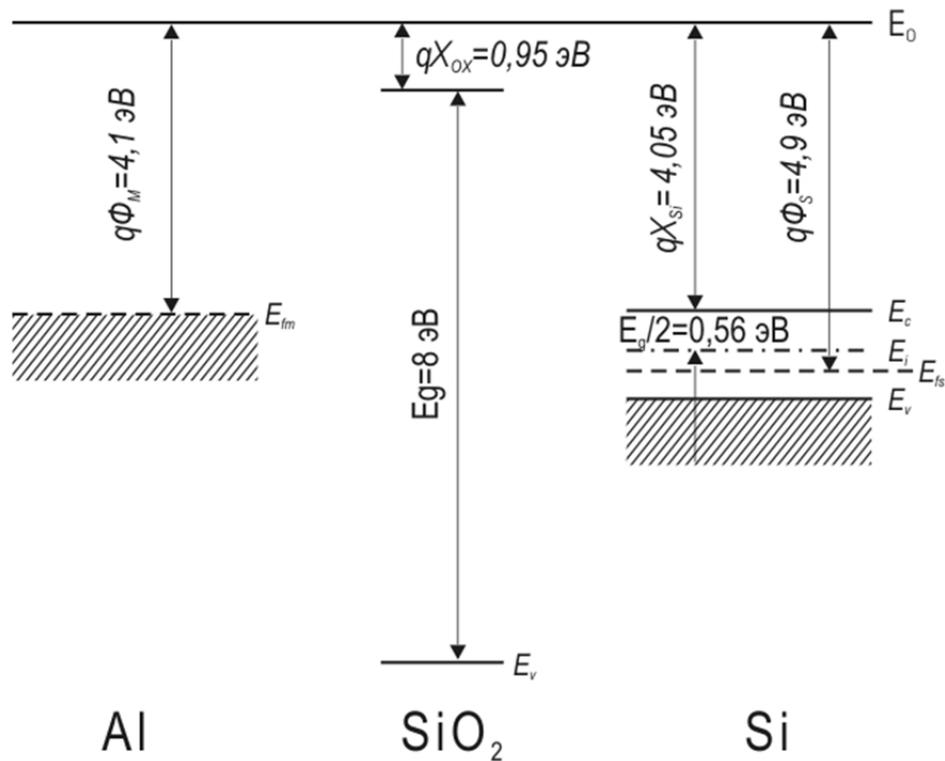


Рис. 21. Уровни энергии в трех составляющих МДП-структуры. Примесная концентрация в Si составляет $N_a \approx 1,1 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}$. Работа выхода для Al составляет 4,1 эВ, сродство к электрону: для SiO₂ — 0,95 эВ, для равномерно легированного кремния *p*-типа — 4,05 эВ [11]

При объединении материалов в структуру Al – SiO₂ – Si отрицательный заряд из алюминия переносится в кремний. На диэлектрике, который не может переносить заряд, возникает падение потенциала, обусловленное накопленным с обеих сторон зарядом. Этот заряд состоит из тонкого слоя положительного заряда на поверхности металла и из отрицательного заряда акцепторных примесей в приповерхностном слое полупроводника. *Напряжение*, соответствующее этой разности энергий, *делится между окислом и приповерхностной областью объемного заряда в кремнии*.

При изготовлении такой структуры никаких цепей переноса заряда между металлом и полупроводником, кроме как окисла, не существует, т. е. в идеальном случае, когда окисел является «абсолютным» диэлектриком, материалы могут оставаться в неравновесном состоянии сколь угодно долгое время. В реальной МДП-структуре всегда существует цепь для передачи заряда, которая обладает много большей проводимостью в сравнении с окислом. Поэтому считаем, что между металлом и полупровод-

ником действительно существует тепловое равновесие. Зонная диаграмма такой МДП-структуры показана на рис. 22.

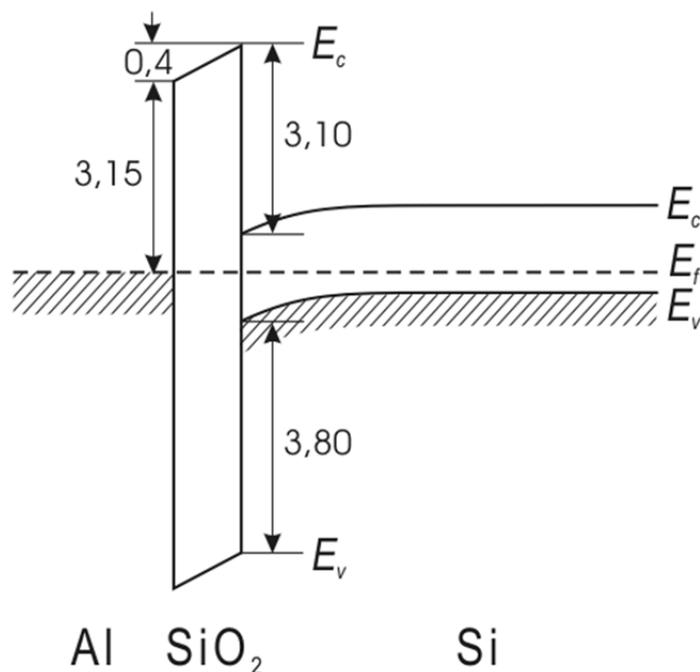


Рис. 22. Зонная диаграмма МДП-структуры при тепловом равновесии. Значения энергии даны в электрон-вольтах [11]

С точки зрения переноса заряда диаграмма соответствует результату переноса дырок в кремнии p - типа к омическому контакту (не показан), где они легко превращаются в электроны. Эти электроны поступают от алюминиевого электрода МОП-структуры. Нарушение зарядовой нейтральности алюминия вследствие передачи электронов приводит к образованию положительно заряженной плоскости на поверхности металла, граничащей с окислом. Типовое падение напряжения на окисле составляет 0,4 В.

Между металлом и кремнием действует разность потенциалов, обусловленная разницей работ выхода $\Phi_{MS} = 4,9 - 4,1 = 0,8$ В. Падение потенциала на окисле составляет 0,4 В, т. е. падение потенциала на приповерхностном слое кремния также составляет $\phi_s = 0,4$ В. Падение потенциала на окисле выражается через напряженность поля в окисле и толщину слоя как: $V_{ox} = E_{ox} \cdot x_{ox}$. Перпендикулярная к границе раздела составляющая вектора электрического смещения D непрерывна, поэтому связь между полем у поверхности кремния E_{s0} и полем в окисле E_{ox} выражается как

$$E_{ox} = \left(\frac{\varepsilon_s}{\varepsilon_{ox}} \right) E_{s0} \quad (9)$$

Максимальное поле достигается у границы раздела, т. е. соответствует поверхностному полю в кремнии E_{s0} , и в соответствии с законом Гаусса дается выражением

$$E_{s0} = \frac{qN_a x_d}{\varepsilon_s}, \quad x_d = \left(\frac{2\phi_s \varepsilon_s}{qN_a} \right)^{1/2} \quad (10)$$

Концентрация акцепторной примеси может быть найдена из уравнения

$$N_a = p = n_i \exp\left(\frac{E_i - E_f}{kT}\right) \quad (11)$$

где $E_i - E_f$ определяется из рис. 16 и составляет

$$E_i - E_f = 4,9 - 4,05 - 0,56 = 0,29 \text{ эВ.}$$

Из уравнения (11) получаем $N_a = 1,1 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}$.

Далее получим, что $x_d = 685 \text{ нм}$, $E_{s0} = 1,17 \cdot 10^4 \text{ В/см}$,

$$E_{ox} = 3,505 \cdot 10^4 \text{ В/см}, \quad x_{ox} = \frac{V_{ox}}{E_{ox}} = 114 \text{ нм.}$$

Влияние напряжения смещения

При тепловом равновесии металл и полупроводник образуют две обкладки конденсатора, заряженного до разности потенциалов, соответствующей разности работ выхода металла и полупроводника.

В случае приложения напряжения, компенсирующего разность работ выхода металла и полупроводника, накопленный в МДП-конденсаторе заряд уменьшается до нуля, а электрическое поле в окисле и полупроводнике исчезают. Энергетические зоны в приповерхностной области становятся плоскими, а напряжение называется *напряжением плоских зон* V_{FB} (*Flat Bands*) [11]. Структура в этом режиме не находится в состоянии теплового равновесия и положения уровней Ферми металла и полупроводника не совпадают (рис. 23).

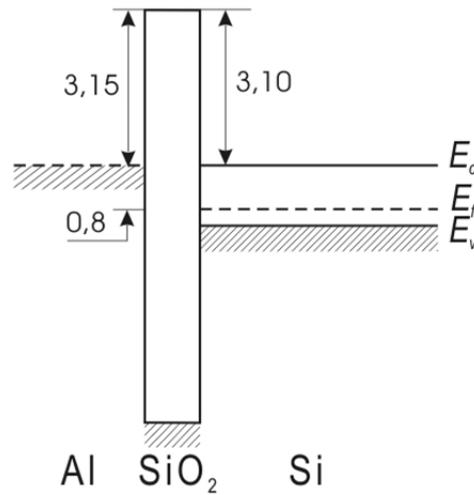


Рис. 23. Зонная диаграмма МДП структуры в режиме плоских зон. Значения энергии даны в электрон-вольтах. Между металлом и полупроводником приложено напряжение (V_{FB}), которое обеспечивает этот режим, не совпадающий с состоянием при тепловом равновесии [11]

Напряжение, которое следует подать на структуру для приведения ее в режим плоских зон равно разности работ выхода «металл — кремний»:

$$V_{FB}^0 = \frac{1}{q}(\Phi_M - \Phi_S) \equiv \frac{1}{q}\Phi_{MS} \quad (12)$$

При наличии заряда с поверхностной плотностью Q_{SS} напряжение плоских зон выражается как

$$V_{FB} = \frac{1}{q}(\Phi_M - \Phi_S) - \frac{x_{ox}}{\epsilon_{ox}} \equiv \frac{1}{q}\Phi_{MS} \quad (13)$$

Если кремний заземлен, а отрицательное напряжение на электроде становится по абсолютной величине больше V_{FB}^0 , у поверхности кремния начнется накопление положительного заряда за счет увеличения количества дырок у поверхности. Поверхностная концентрация дырок становится больше концентрации акцепторной примеси N_a . Таким образом наступает *поверхностное обогащение*, сопровождаемое увеличением концентрации дырок в *обогащенном слое*. Приповерхностный обогащенный слой — это слой объемного заряда, образованного свободными носителями. Половина этого заряда находится в пределах припо-

верхностного слоя толщиной $\sqrt{2}L_D$, где L_D — длина Дебая у поверхности, выражаемая как $L_D = \left(\frac{\epsilon_s kT}{q^2 p_s} \right)^{1/2}$, а p_s представляет собой избыточную концентрацию носителей в полупроводнике у границы раздела. Для случая $N_a = 10^{15} \text{ см}^{-3}$, а поверхностная концентрация дырок превышает объемную в 10 раз, получаем длину Дебая у поверхности около 40 нм.

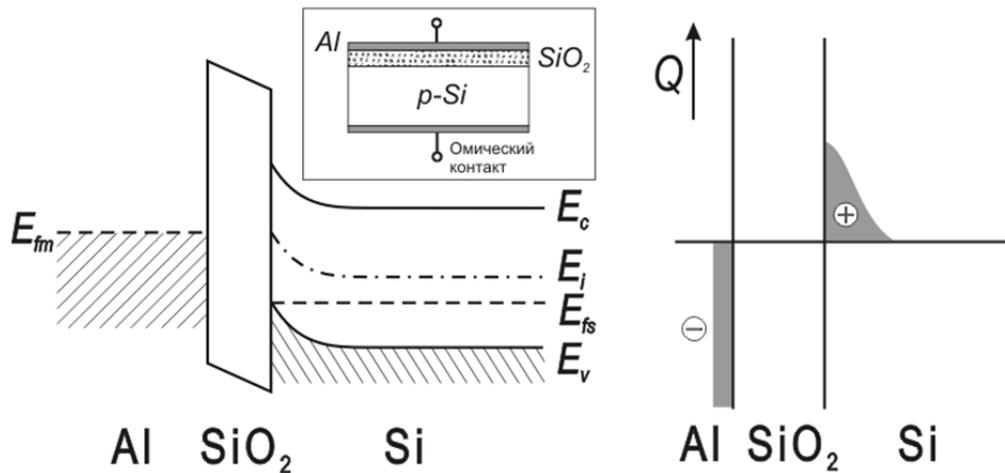


Рис. 24. Зонная диаграмма и распределение зарядов в МДП-структуре в режиме обогащения для кремния p -типа. На вставке показана структура МДП диода [11]

В соответствии с рис. 22 отрицательный заряд накапливается у поверхности кремния а положительный — на поверхности металла. Это согласуется с существованием положительного встроенного потенциала между металлом и кремнием. Подача положительного напряжения между металлом и кремнием, т. е. «усиление» встроенного потенциала, приводит к *поверхностному обеднению* в полупроводнике.

Зонная диаграмма и распределение зарядов в режиме обеднения в МДП-структуре очень напоминает зонные диаграммы обратносмещенного диода Шотки. Однако при дальнейшем увеличении напряжения поведение МДП-структуры отличается от поведения структуры «металл — полупроводник». Поскольку скорость рекомбинации $U \sim (np - n_i^2)$, а $np < n_i^2$, т. е. поверхностная область обеднена основными носителями, получается, что генерация носителей превосходит их рекомбинацию.

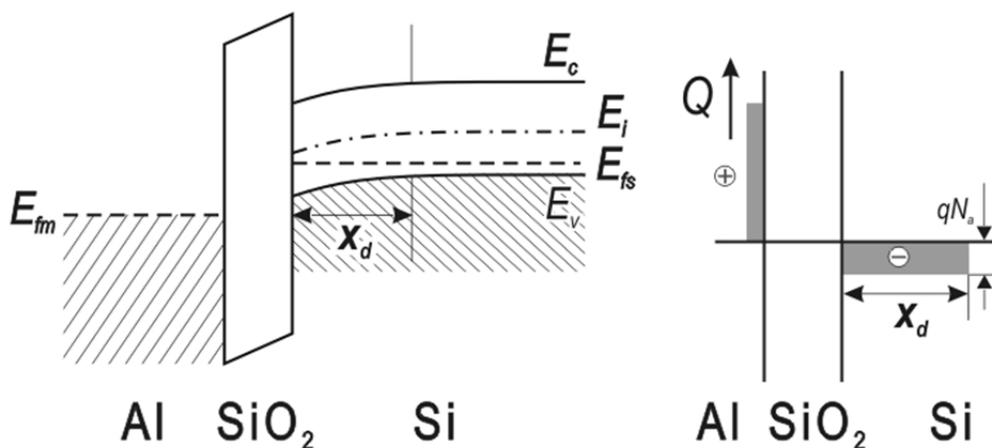


Рис. 25. Зонная диаграмма и распределение зарядов в МДП-структуре в режиме обеднения для кремния p -типа [11]

Электрическое поле разделяет носители в сгенерированных электронно-дырочных парах. Дырки оттягиваются вглубь полупроводника, а электроны двигаются к границе раздела Si/SiO₂ и тормозятся там вследствие существования энергетического барьера между зонами проводимости Si и SiO₂. В равновесном состоянии уровень Ферми постоянен во всем объеме кремния, вплоть до границы с окислом. При достаточном напряжении смещения уровень Ферми для собственного полупроводника E_i (середица запрещенной зоны) пересечет уровень Ферми E_{fs} . Край зоны проводимости Si окажется ближе к уровню Ферми, чем край валентной зоны, т. е. у поверхности образуется *инверсный слой*. Количество электронов у поверхности превышает количество дырок, хотя исходный материал легирован акцепторной примесью.

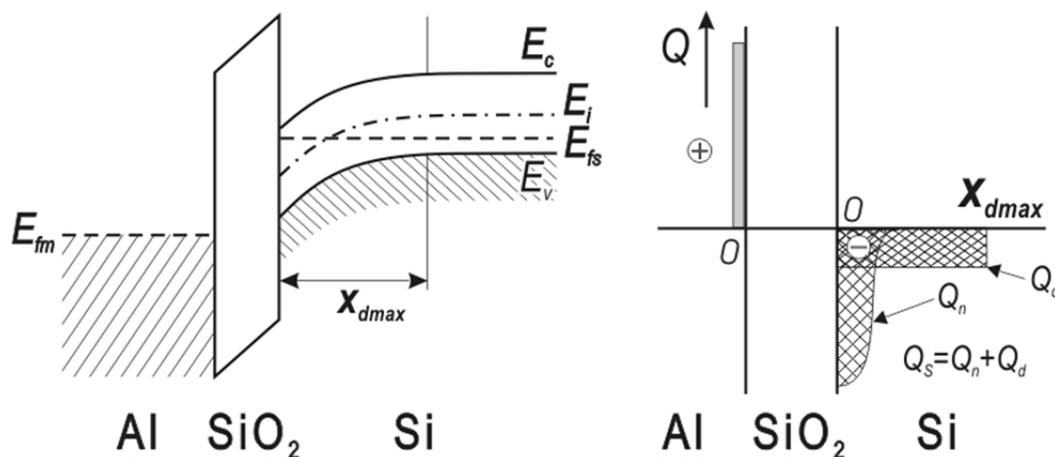


Рис. 26. Зонная диаграмма и распределение зарядов в МДП-структуре в режиме инверсии для кремния p -типа

Если $E_i \leq E_{fs}$, то концентрация электронов у поверхности в инверсном слое мала и составляет примерно n_i , т. е. равна собственной. В этом случае говорят о режиме слабой инверсии. Если $(E_c - E_{fs})$ у поверхности меньше $(E_{fs} - E_v)$ в объеме, то МДП-структура находится в режиме сильной инверсии.

Емкость МДП-структуры

Если зарядить одну из обкладок МДП-конденсатора — затвор, — то на второй — полупроводниковой — обкладке должен появиться заряд, равный по величине и противоположный по знаку, который будет связан с поверхностными состояниями, ионизованными атомами примеси и свободными носителями заряда. Если индуцированный внешним полем заряд на полупроводниковой обкладке превышает изменение заряда на поверхностных состояниях, то в приповерхностной области полупроводника происходит изменение концентрации свободных носителей заряда, что сопровождается изменением поверхностной проводимости и соответственно протекающего вдоль поверхности тока, в случае если имеется направленное вдоль поверхности поле.

В той приповерхностной полупроводниковой области, где существует электрическое поле, имеется обедненная носителями область пространственного заряда, аналогичная по свойствам области ОПЗ p - n -перехода, работающая как диэлектрик. При изменении потенциала на металлической обкладке (затворе) МДП-конденсатора будет изменяться заряд ОПЗ и соответственно ширина обедненной области. При этом будет изменяться емкость МДП-структуры. Зависимости емкости МДП-структур от напряжения показаны на рис. 27. Емкость МДП-структуры можно рассматривать как состоящую из двух последовательно включенных емкостей: емкости диэлектрика C_{ox} и емкости слоя пространственного заряда в полупроводнике C_S . Тогда суммарная емкость определяется как

$$C = \frac{C_{ox} \cdot C_S}{C_{ox} + C_S} \quad (14)$$

Если $C_{ox} \gg C_S$, то можно с хорошим приближением считать, что емкость структуры определяется емкостью ОПЗ, т. е. $C = C_S$.

Если $C_S \gg C_{ox}$, то приближенно можно считать, что $C = C_{ox}$, поэтому максимальное значение емкости на рис. 27 ограничено линией $C = C_{ox}$.

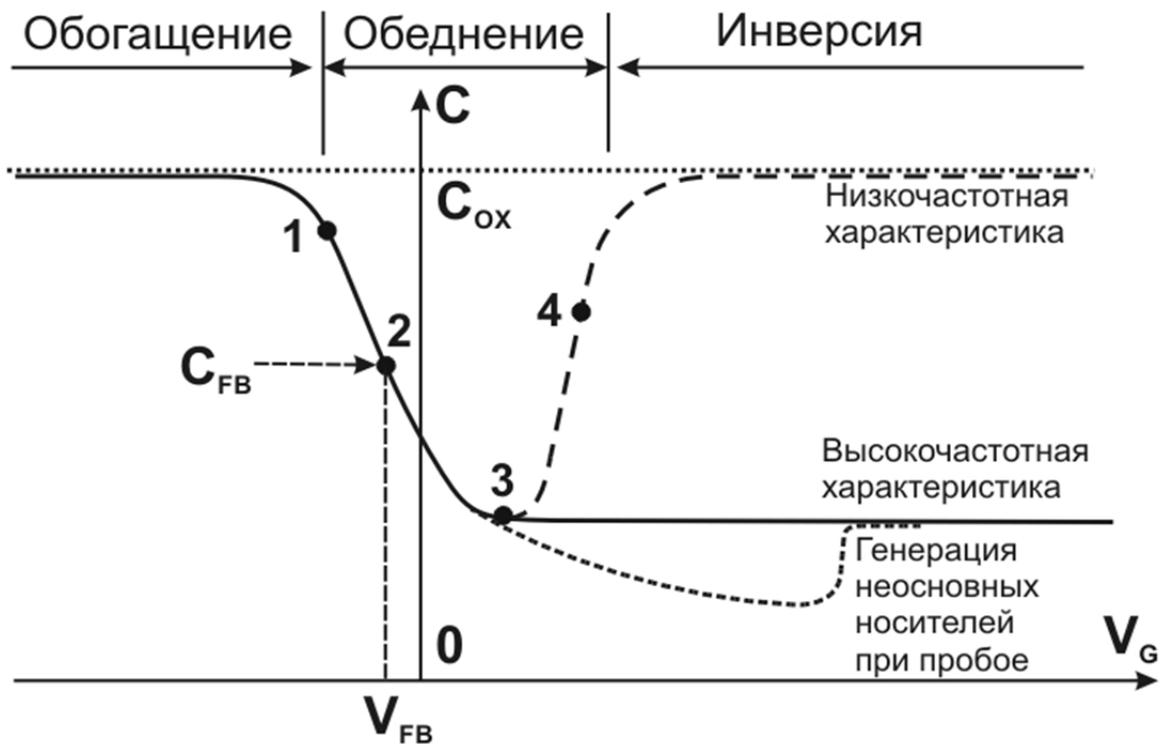


Рис. 27. Вольт-фарадная характеристика МДП-структуры на p -Si [11; 12]

Источники заряда в окисле

В системе «окисел — кремний» обычно различают четыре различных типа зарядов. Это Q_t — плотность неподвижных граничных зарядов, Q_{ot} — плотность зарядов на ловушках в окисле, Q_{it} — плотность заряда на граничных ловушках, Q_m — плотность подвижных зарядов. Приведенные на рис. 28 обозначения плотностей зарядов Q [Кл/см²], поверхностных плотностей N [см⁻²] или удельных плотностей состояний D [(см²·эВ)⁻¹] являются общепринятыми в литературе.

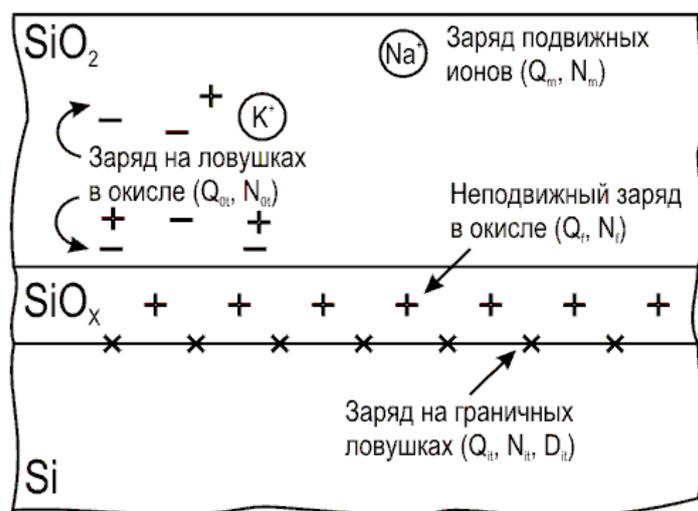


Рис. 28. Четыре типа зарядов в окисле МДП-структуры [11]

МДП-транзистор с индуцированным каналом

Принципы работы, классификация МДП-транзисторов

МДП-транзистор имеет 4 электрода: исток, сток, затвор и подложку. Области истока и стока изолированы друг от друга *p-n*-переходами (рис. 29).

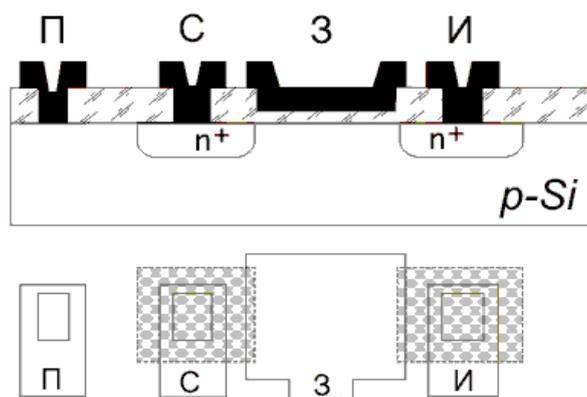


Рис. 29. Схематическое изображение МДП-транзистора в интегральном исполнении [13]

Параметры и характеристики МДП-транзисторов

Рассмотрим некоторые наиболее важные параметры МДП-транзисторов. Полагая, что приборы имеют индуцированный канал *n*-типа, рассмотрим следующие параметры:

- пороговое напряжение;

- удельную крутизну;
- крутизну;
- внутренне сопротивление;
- коэффициент усиления.

Допустим, что подложка легирована слабо. Напряжение на затворе наводит в полупроводнике тем больший удельный заряд, чем больше удельная емкость между металлом затвора и полупроводником. Управляющая способность затвора определяется удельной емкостью между затвором и каналом

$$C_0 = \frac{\varepsilon_0 \varepsilon_d}{d}, \quad (15)$$

где d — толщина диэлектрика, а ε_d — относительная диэлектрическая проницаемость подзатворного диэлектрика. Для SiO_2 $d = 0,05 \div 0,1$ мкм в стандартных процессах. Если положить $d = 0,03$ мкм, $\varepsilon_d = 3,9$ (для SiO_2), то $C_0 \approx 1000$ пФ/мм². Удельная емкость «затвор — канал» является одной из величин, определяющих *пороговое напряжение* (U_0), т. е. напряжение на затворе, при котором ток стока уменьшается до нуля.

$$U_0 = U_{0F} + U_{0B}, \quad (16)$$

где U_{0F} — напряжения спрямления энергетических зон, оно сводит к нулю равновесный поверхностный потенциал φ_{s0} , U_{0B} — напряжение изгиба энергетических зон, создающее поверхностный потенциал φ_{sm} , при котором уровень электростатического потенциала пересекает уровень Ферми. Первая составляющая компенсирует начальное искривление зон на границе «диэлектрик — полупроводник», вторая обеспечивает изгиб зон соответствующий образованию канала.

$$U_{0F} = \varphi_{MS} + \frac{Q_{0s}}{C_0}, \quad (17)$$

φ_{MS} — контактная разность потенциалов, Q_{0s} — равновесный удельный заряд поверхности, складывающийся из заряда поверхностных состояний и заряда ионизированных примесей. Величина обычно изменяется в пределах $5 \cdot 10^{-9} \div 5 \cdot 10^{-8}$ Кл/см²

$$U_{0B} = \varphi_{sm} + \frac{\sqrt{2q\varepsilon_0\varepsilon_s N\varphi_{sm}}}{C_0}, \quad (18)$$

обычно полагают $\varphi_{sm} = 2\varphi_F$ — модуль разности между положением уровня Ферми в объеме полупроводника и уровнем электростатического потенциала (серединой запрещенной зоны), ε_s — диэлектрическая проницаемость полупроводника, N — концентрация примесных атомов в подложке, C_0 — удельная емкость между затвором и каналом.

Пример: При $N = 10^{16} \text{ см}^{-3}$, $\varphi_F \approx 0,3 \text{ В}$. Тогда $\varphi_{sm} = 0,6 \text{ В}$, и, полагая $C_0 = 10^{-7} \text{ Ф/см}^2$, получаем: $U_{0B} \approx 1,0 \text{ В}$. На практике значения полного порогового напряжения лежат в пределах $U_0 = 0,5 \div 1,5 \text{ В}$.

Статические характеристики МДП-транзистора*

Если $U_{cu} = 0$, поверхность полупроводника является эквипотенциальной, поле в диэлектрике однородно и толщина канала h одинакова по всей длине (рис. 30а). При $U_{cu} > 0$ через канал проходит ток и потенциал поверхности возрастает в направлении от истока к стоку. Таким образом, разность потенциалов между затвором и поверхностью уменьшается по мере удаления от истока к стоку.

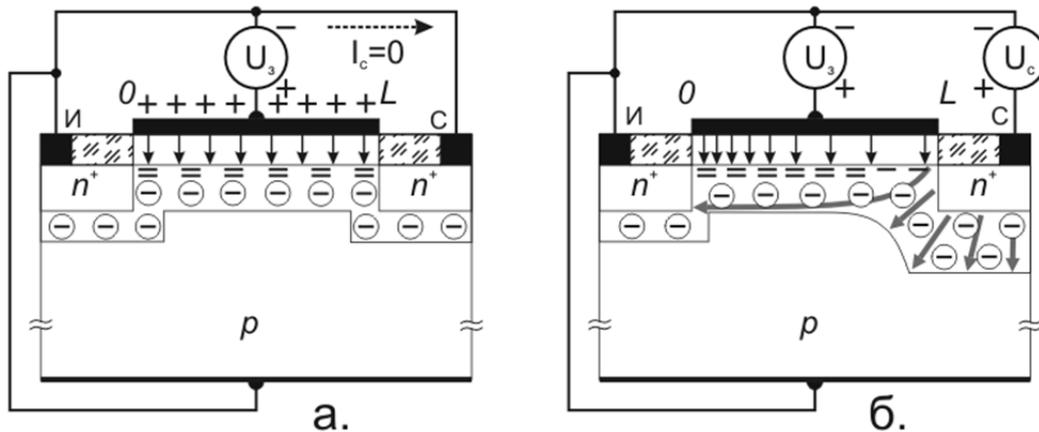


Рис. 30. Распределение поля и зарядов в МДП-транзисторе при нулевом (а.) и наибольшем положительном (б.) напряжениях на стоке. Фиксированный заряд обозначен как \oplus , подвижные заряды: $-$ и $+$

* Маллер Р., Кейминс Т. Элементы интегральных схем. М.: Мир, 1989.

Одновременно происходит уменьшение напряженности электрического поля в диэлектрике и удельного заряда электронов в канале. Все это приводит к сужению сечения канала вблизи области стока (точка $x = L$, рис. 30б). При напряжении на стоке, называемом напряжением насыщения, разность потенциалов между затвором и поверхностью на границе области стока становится равной пороговому напряжению. Образуется «горловина канала» (рис. 31 а). Одновременно в этой точке обращается в нуль напряженность электрического поля в диэлектрике и удельный заряд носителей в канале. Напряжение насыщения имеет вид:

$$U_{CH} = U_{3И} - U_0, \quad (19)$$

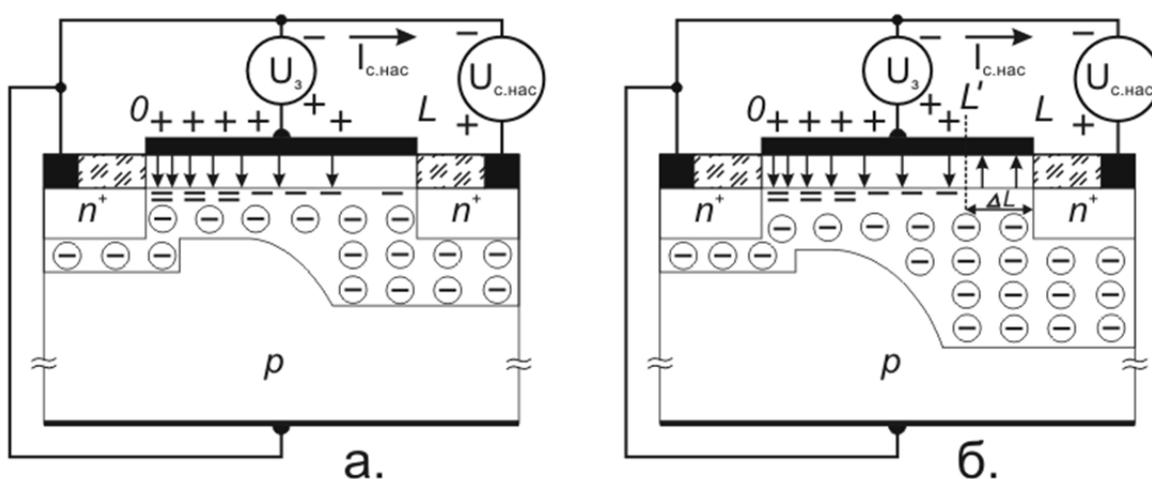


Рис. 31. Распределение поля и зарядов в МДП транзисторе:
а. — на границе насыщения ($U_{СИ} = U_{CH}$); б. — в области насыщения ($U_{СИ} > U_{CH}$). Фиксированный заряд обозначен как \oplus , подвижные заряды: $-$ и $+$.

Если $U_{СИ} > U_{CH}$ то слой объемного заряда, отделявшийся до сих пор от поверхности канала, теперь выходит на поверхность на участке ΔL , а горловина канала сдвигается в точку L' . В результате происходит уменьшение длины канала на ΔL , потенциал горловины в точке L' сохраняет значение U_{CH} , которое было в начале насыщения.

Величина ΔL (приповерхностная ширина объемного заряда) определяется разностью напряжений на участке укорочения канала (зависимость аналогичная зависимости ширины p - n -перехода от обратного напряжения):

$$\Delta L \sim \sqrt[n]{U_{СИ} - U_{СН}}, \quad (20)$$

где n изменяется в пределах от 2 до 3 в зависимости от характера распределения концентрации примесных атомов вблизи границы раздела между подложкой и боковой стенкой области стока.

После образования горловины канала ток в цепи практически перестает зависеть от напряжения на стоке и наступает насыщение тока (см. рис. 32), откуда и название напряжения $U_{СН}$.

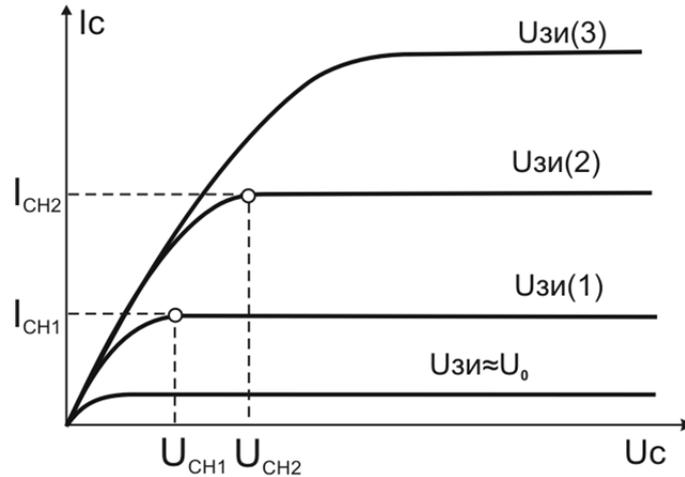


Рис. 32. Выходные статические характеристики МДП-транзистора

На практике пользуются аппроксимационными зависимостями ВАХ. Наиболее просто выходная ВАХ на крутом участке $U_{СИ} < U_{СН}$ может быть аппроксимирована соотношением

$$I_C = b \left[(U_{ЗИ} - U_0) U_{СИ} - \frac{U_{СИ}^2}{2} \right], \quad (21)$$

в котором через b обозначена удельная крутизна ВАХ:

$$b = \mu C_0 \frac{z}{L} = \frac{\varepsilon_0 \varepsilon_s \mu z}{d L}, \quad (22)$$

где μ — приповерхностная подвижность носителей заряда, которая обычно в 2–3 раза меньше объемной; z — ширина канала.

Пример

При $\mu = 550 \text{ см}^2/(\text{В} \cdot \text{с})$, $z/L = 10$ и полагая $C_0 = 10^{-7} \text{ Ф/см}^2$ получаем: $b \approx 0,5 \text{ мА/В}^2$.

Выражение (21) действительно только при условии $U_{СИ} < U_{СН}$, т. е. на начальных *крутых* участках (рис. 32). Если $U_{СИ} > U_{СН}$, то ток не меняется и остается равным тому значению, которое он имеет при $U_{СИ} = U_{СН}$. Подставляя (19) в (21), получим выражение для области насыщения, т. е. для *пологих* участков ВАХ:

$$I_C = b \frac{(U_{ЗИ} - U_0)^2}{2}, \quad (23)$$

Выражению (23) соответствует кривая $U_{СН}$ на рис. 33.

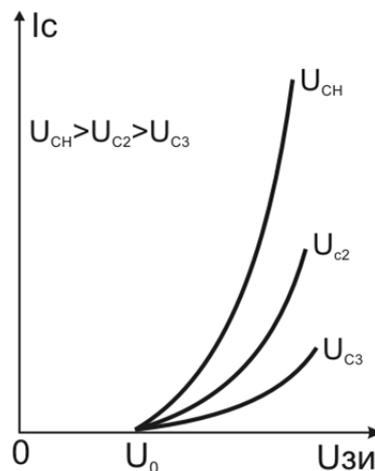


Рис. 33. Передаточные статические характеристики МДП-транзистора

Номинальным током МДП-транзистора считается ток при напряжении $U_{ЗИ} = 2U_0$, т. е.

$$I_{С.НОМ} = \frac{bU_0^2}{2}. \quad (24)$$

Чем меньше пороговое напряжение, тем меньше рабочий ток. Номинальному режиму, т. е. режиму $U_{ЗИ} = 2U_0$ соответствует напряжение насыщения $U_{СН} = U_0$. Следовательно, малые значения U_0 обеспечивают и малые токи и малые напряжения транзистора.

Для начальных *крутых* участков ВАХ положим $U_{СИ} \ll U_{ЗИ} - U_0$ и пренебрегая квадратичным членом в (21) получим линейную зависимость

$$I_C = b(U_{ЗИ} - U_0)U_{СИ}. \quad (25)$$

Коэффициент перед $U_{СИ}$ называется проводимостью канала, а

$$R_0 = \frac{1}{b(U_{3И} - U_0)}. \quad (26)$$

сопротивлением канала. Из (26) видно, что сопротивление канала меняется в широких пределах путем изменения напряжения на затворе.

Малосигнальные параметры МДП-транзистора

Крутизна $S = \left. \frac{dI_C}{dU_{3И}} \right|_{U_{СИ}=\text{const}}$

Внутреннее сопротивление $r_c = \left. \frac{dU_{СИ}}{dI_C} \right|_{U_{3И}=\text{const}}$

Коэффициент усиления $k = \left. \frac{dU_{СИ}}{dU_{3И}} \right|_{I_C=\text{const}}$

Эти три параметра связаны соотношением

$$k = Sr_c. \quad (27)$$

В области насыщения из (23) следует для крутизны

$$S = b(U_{3И} - U_0). \quad (28)$$

Структура, условные обозначения, классификация МДП-транзисторов

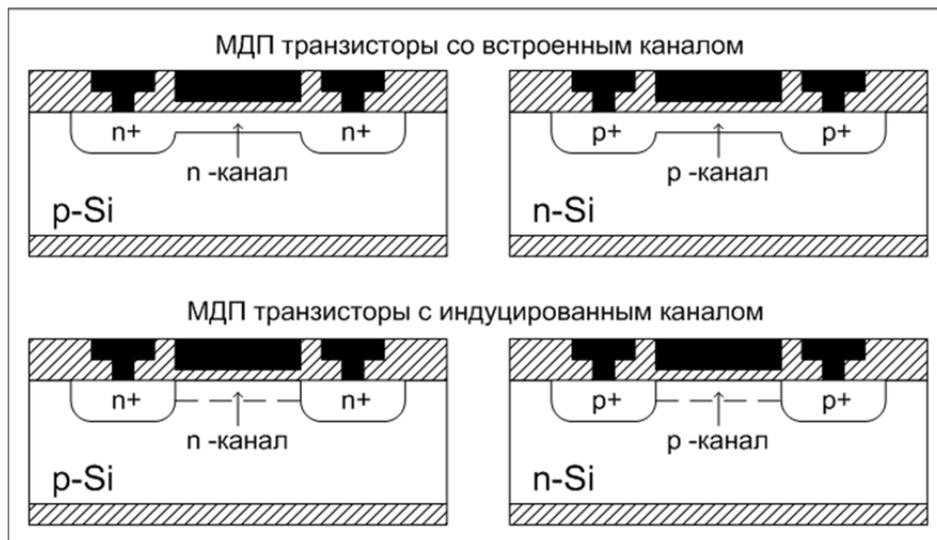


Рис. 34. Структура МДП-транзисторов со встроенными и индуцированными каналами *n*- и *p*-типов

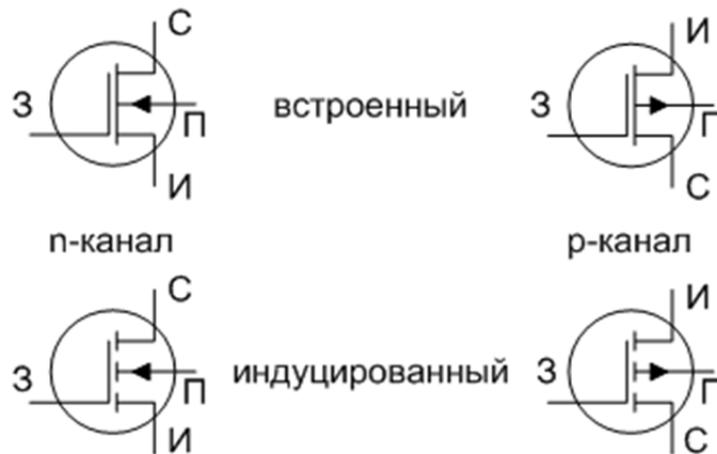


Рис. 35. Условные обозначения на схемах МДП-транзисторов со встроенными и индуцированными каналами n - и p -типов

Полевые транзисторы с управляющим p - n -переходом

Наряду с полевыми транзисторами с затвором, изолированным от рабочего полупроводникового объема диэлектриком, можно выделить второй основной класс униполярных приборов — полевые транзисторы с затвором в виде p - n -перехода (ПТУП) или полевые транзисторы с затвором Шоттки (ПТШ).

Так же как и биполярные, полевые транзисторы могут работать в ключевом режиме, однако падение напряжения на них во включенном состоянии весьма значительно, поэтому эффективность их работы в мощных схемах меньше, чем у биполярных приборов.

Полевые транзисторы могут иметь как p -, так и n -области затворов, за счет которых осуществляется управление при разной полярности на них. Это свойство комплементарности расширяет возможности при конструировании схем и широко используется при создании запоминающих ячеек и цифровых схем на основе МДП-транзисторов (CMOS-схемы).

Полевые транзисторы относятся к приборам униполярного типа, это означает, что принцип их действия основан на дрейфе основных носителей заряда. Последнее обстоятельство значительно упрощает их анализ по сравнению с биполярными приборами, поскольку в первом приближении возможно пренебречь диффузионными токами, неосновными носителями заряда и их рекомбинацией.

Принцип работы полевых транзисторов с управляющим p - n -переходом (ПТУП, ПТШ)

Структура n -канального полевого транзистора с p - n -переходом изображена на рис. 36.

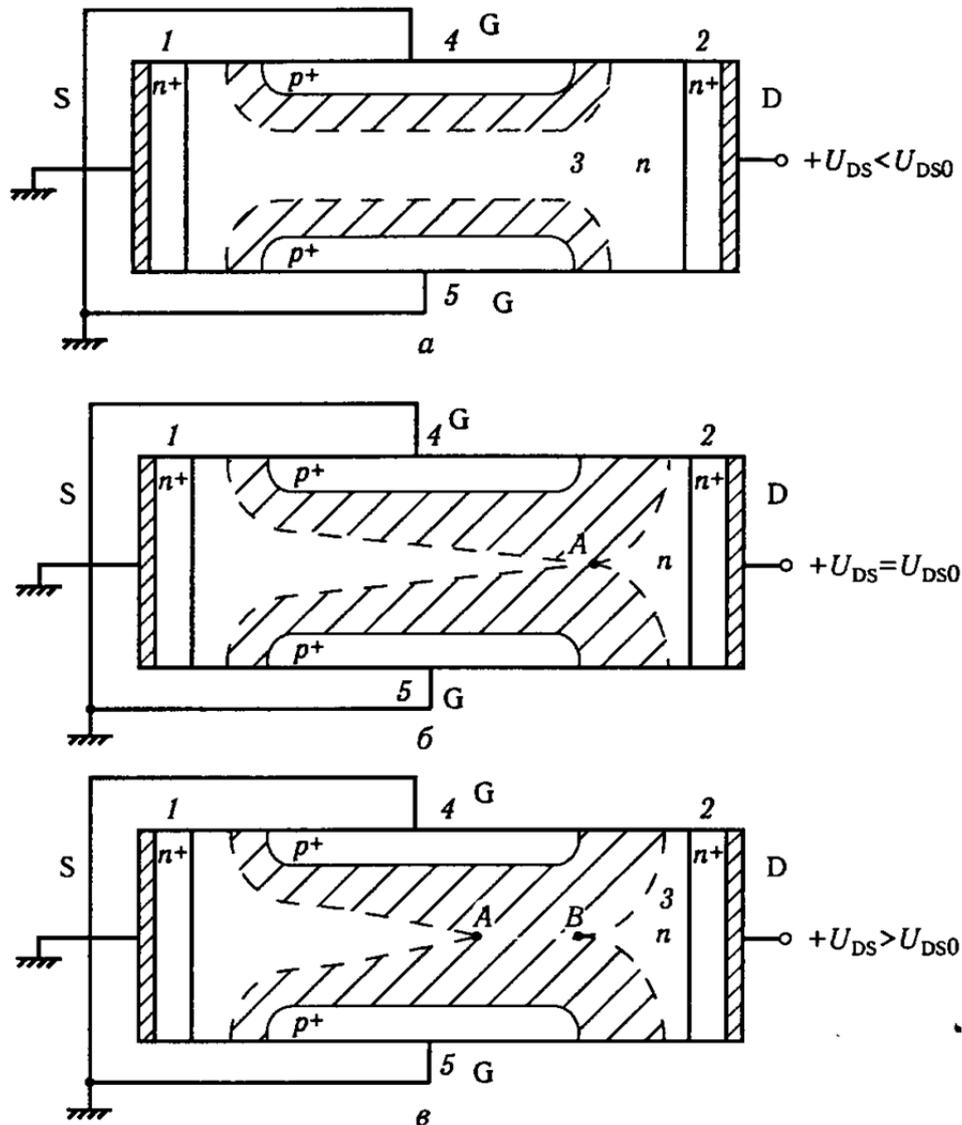


Рис. 36. Полевой n -канальный транзистор с управляющим p - n переходом [14]

Между высоколегированными областями n -типа истока (S) 1 и стока (D) 2 находится область низколегированного канала n -типа 3. Сужение в нем создано двумя областями p -типа 4 и 5, которые называются затворами (G).

Обратное смещение p - n -перехода «затвор — канал» создает толстые обедненные слои в слаболегированной области канала.

Канал проводимости в таких транзисторах представляет собой узкую область в исходном полупроводнике, не занятую обедненным слоем p - n -перехода. Толщиной этой области можно управлять, подавая на p - n -переход обратное смещение. В зависимости от этого смещения меняется начальное сопротивление «сток — исток».

Толщина обедненного слоя p - n -перехода при обратном смещении зависит от уровня легирования областей p -типа затвора, n -типа канала и внешнего напряжения. Толщину обедненного слоя, а соответственно, и толщину канала под затвором регулируют напряжениями «затвор — исток» и «затвор — сток». Если при неизменном напряжении на p - n -переходе смещение «сток — исток» увеличивать, канал сужается к стоку и ток стока растет с напряжением медленнее, чем при малых смещениях. При перекрытии канала (рис. 36 б) ток стока выходит на насыщение. Механизм протекания тока по каналу такого транзистора и его выходные характеристики весьма близки к характеристикам МПД-транзистора.

В полевом транзисторе, изображенном на рис. 36 а затвор и исток заземлены, а на сток подано положительное напряжение. Если напряжение U_{DS} мало, то канал n -типа 3 между истоком 1 и стоком 2 можно эквивалентно смоделировать резистором. Через транзистор проходит ток I_D . Если увеличивать напряжение на стоке и учитывать резистивный характер канала, то ток I_D возрастает линейно (рис. 37).

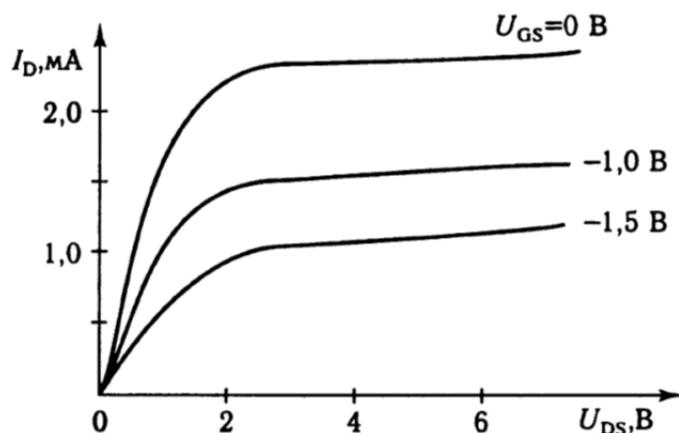


Рис. 37. Вольт-амперная характеристика (ВАХ) n -канального полевого транзистора с управляющим p - n -переходом

Соответственно, к p - n -переходу между затвором и каналом подается обратное смещение и толщина обедненного слоя

p - n -перехода «затвор — канал» будет расти от истока к стоку. Площадь поперечного сечения канала вдоль оси «исток — сток» будет уменьшаться. Дальнейшее увеличение напряжения U_{DS} повлечет еще более значительное уменьшение площади поперечного сечения канала. Сопротивление канала и наклон вольтамперной характеристики растет, а ток канала уменьшается (см. рис. 37), а при напряжении $U_{DS} = U_{DS0}$ канал перекрывается (рис. 36 б). В точке А обедненные области перекрываются и канал исчезает. Области истока и стока «изолируются» друг от друга обедненными областями переходов. Ток стока проходит через обедненный слой так же, как и для МДП-транзистора в условиях перекрытия канала. Ток стока при напряжении U_{DS0} обозначим как I_{D0} . Если напряжение U_{DS} увеличивать дальше, то обедненные слои станут еще толще (см. рис. 36 в), но ток I_{D0} остается почти без изменений, т. к. основная доля растущего напряжения U_{DS} падает на обедненной области между точками А и В. Полевой транзистор работает в области насыщения.

Влияние напряжения на затворе относительно истока U_{GS} можем понять, рассмотрев рис. 38 а.

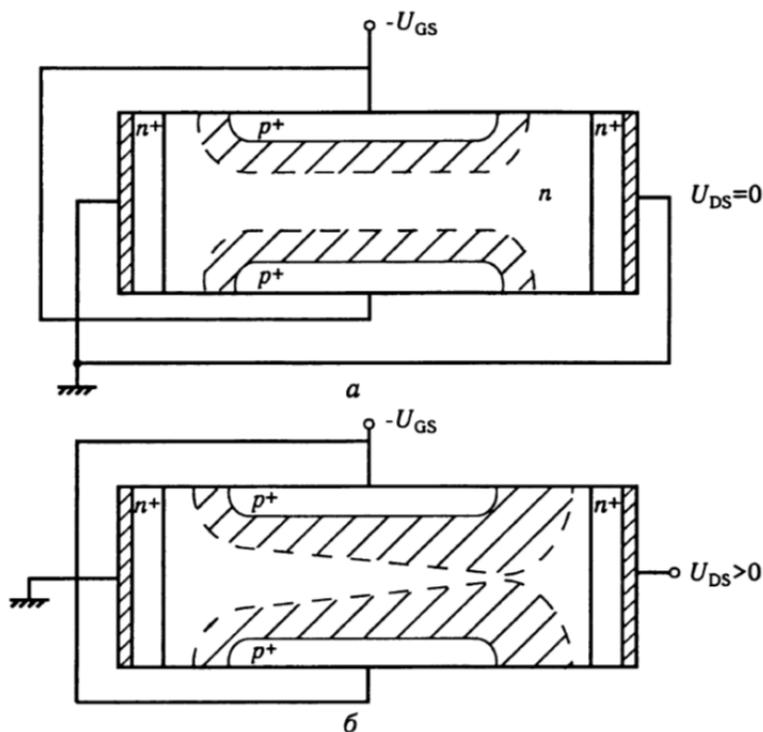


Рис. 38. Влияние напряжения $-U_{GS}$ на форму канала полевого транзистора с управляющим p - n -переходом [14]

Сток и исток соединим с землей, а на затвор будем подавать отрицательное напряжение $-U_{GS}$. С увеличением отрицательного напряжения на затворе обедненные слои будут расширяться равномерно вдоль всего канала, толщина которого будет уменьшаться. При напряжении $U_{GS} = U_{GST}$ канал полностью перекроется вдоль затвора.

Если одновременно подавать напряжения на сток U_{DS} и на затвор U_{GS} , то сможем управлять каналом с помощью двух электродов. При малых значениях U_{DS} ВАХ линейная. При увеличении U_{DS} канал перекрывается и транзистор работает в области насыщения. В условиях увеличения отрицательного напряжения на затворе U_{GS} ток в канале уменьшается, и при достаточно большом напряжении ток стока становится равен нулю.

Направления стрелок на схемных обозначениях транзисторов с управляющим p - n -переходом указывают на направление прямого тока через управляющий p - n -переход и на тип затвора и транзистора. Полевые транзисторы с n -каналом имеют лучшие электрические характеристики.

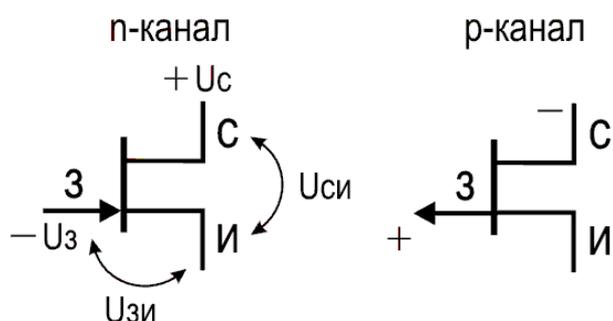


Рис. 39. Обозначения полевого транзистора с управляющим p - n -переходом (ПТУП)

Входное сопротивление полевых транзисторов на низких частотах является чисто емкостным. Входная емкость C_{GS} образуется затвором и непокрытой частью канала со стороны истока.

Так как для заряда этой емкости ток должен протекать через непокрытую часть канала с сопротивлением R_C , то собственная постоянная времени транзистора равна $C_{GS}R_C$ — это время, однако, очень мало, и в интегральных схемах, применяемых, например, в цифровой вычислительной технике, длительность

переходных процессов определяется не им, а паразитными емкостями схемы и входными емкостями других транзисторов, подключенных к выходу данного. Вследствие этого при изготовлении таких схем стремятся сделать входную емкость как можно меньшей за счет уменьшения длины канала и строгого совмещения границ затвора с границами истока и стока.

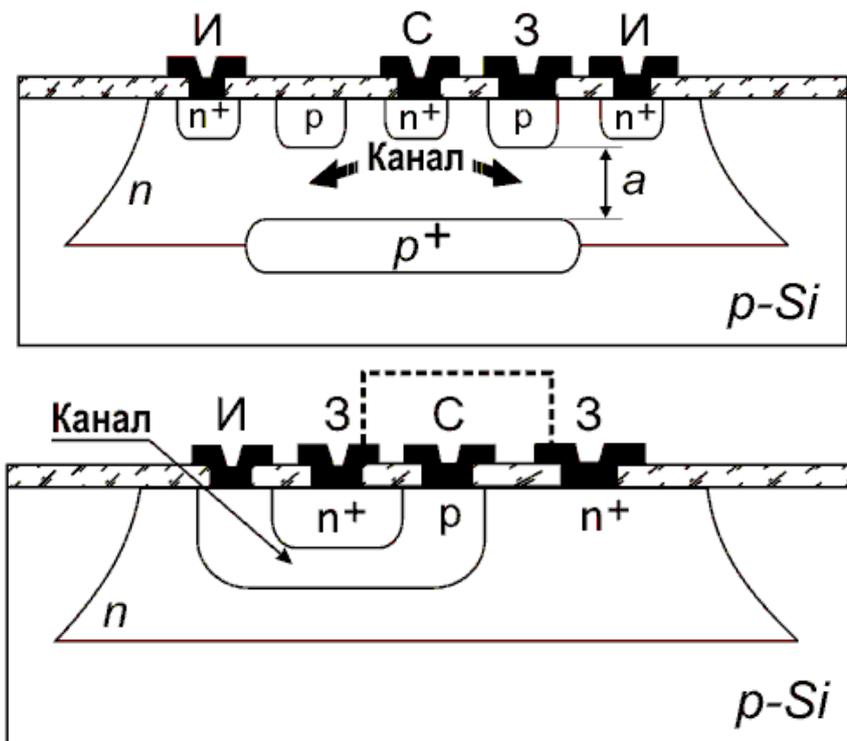


Рис. 40. Интегральные полевые транзисторы с n -каналом ($U_z < U_i, U_c$) и p -каналом

Напряжение перекрытия канала

Рассмотрим n -канальный ПТ с p - n -переходом с равномерно легированными областями затвора и канала, т. е. когда концентрация легирующих примесей в областях p - и n -типа не зависит от координат (рис. 41).

Такой переход называется резким p - n -переходом. Приближение резкого p - n -перехода применимо к структурам, в которых толщина переходной области (в которой разность $N_D - N_A$ заметно меняется) мала по сравнению с толщиной обедненного слоя.

На практике такие p - n -переходы получают либо сплавлением примеси в легированный полупроводник, либо наращиванием эпитаксиального слоя полупроводника одного типа проводимости

на подложку, изготовленную из полупроводника другого типа проводимости. В обоих случаях диффузионное размытие профиля легирования за время создания p - n -перехода оказывается небольшим.

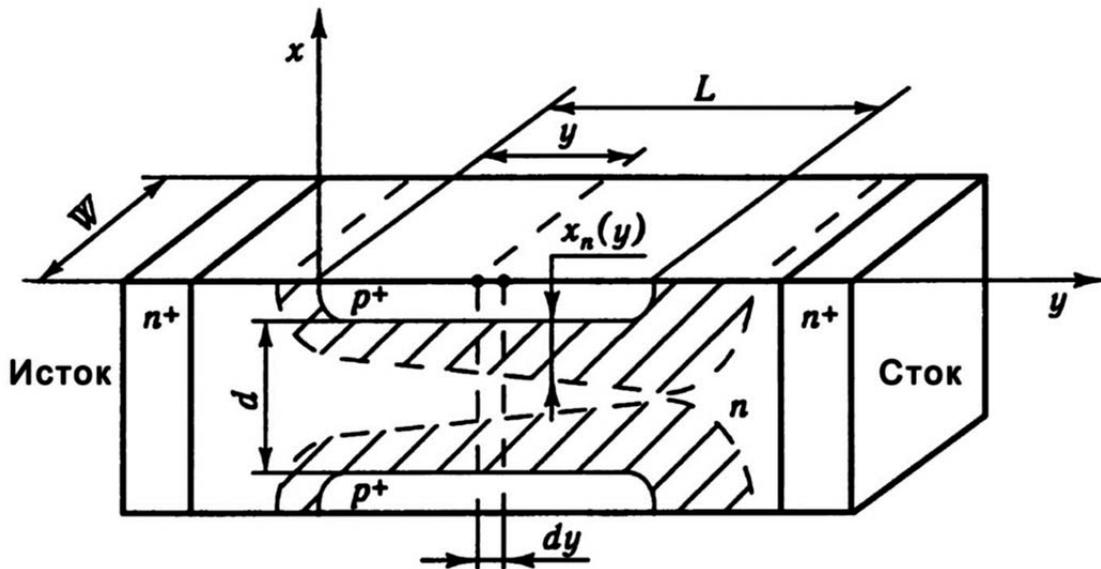


Рис. 41. Структура полевого транзистора с управляющим p - n переходом [14]

Толщина обедненного слоя в полупроводнике n -типа в состоянии равновесия для перехода $p^+ - n$ дается выражением:

$$x_{depl} = \left(\frac{2\varepsilon_{Si} \Phi_0}{qN_D} \right)^{1/2}, \quad \Phi_0 = \frac{kT}{q} \ln \left(\frac{N_A N_D}{n_i^2} \right) \quad (29)$$

где N_A — концентрация примеси в p^+ области, а n_i — собственная концентрация [15; 16].

Поскольку в нашем случае концентрация акцепторной примеси N_A в области затвора p^+ -типа намного больше концентрации донорной примеси N_D :

$$N_A \gg N_D, \quad (30)$$

толщина перехода x_n может быть выражена формулой:

$$x_n = \left[\frac{2\varepsilon_{Si} \varepsilon_0 U}{qN_D} \right]^{1/2}, \quad (31)$$

где $U = U_0 + U_{GC}$ — сумма высоты потенциального барьера $p^+ - n$ -перехода и напряжения внешнего смещения «затвор — канал» U_{GC} . Напряжение U_{GC} определяется напряжениями U_{GS} и U_{DS} . В условиях увеличения напряжения на стоке и при $U_{GS} = 0$ толщина обедненных областей вблизи стока растет, и при напряжении $U_{DS} = U_{DS0}$ они сомкнутся. При этом напряжении на стоке толщина обедненного слоя x_n равна $d/2$. Таким образом, уравнение (31) может быть записано в виде:

$$\frac{d}{2} = \left[\frac{2\varepsilon_{Si}\varepsilon_0 (U_{DS0} + U_0)}{qN_D} \right]^{1/2}, \quad (32)$$

Тогда напряжение перекрытия канала U_{DS0} :

$$U_{DS0} = \left(\frac{qN_D d^2}{8\varepsilon_{Si}\varepsilon_0} \right) - U_0 \text{ при } U_{GS} = 0. \quad (33)$$

Если на затвор для увеличения обратного смещения $p - n$ -перехода затвор-канал подать отрицательное напряжение, то произойдет дальнейшее увеличение толщины обедненного слоя, а значение напряжения перекрытия канала U_{DS0} уменьшится на величину напряжения U_{GS} :

$$U_{DS0} = \left(\frac{qN_D d^2}{8\varepsilon_{Si}\varepsilon_0} \right) - U_0 + U_{GS}. \quad (34)$$

Для n -канального транзистора значение напряжения U_{GS} отрицательное.

При некотором напряжении на затворе напряжение перекрытия канала может равняться нулю: $U_{DS} = 0$. Это свидетельствует о том, что напряжения на затворе достаточно для перекрытия канала при отсутствии напряжения на стоке. Напряжение на затворе, при котором происходит перекрытие канала при напряжении на стоке, равном нулю ($U_{DS} = 0$), называется пороговым напряжением (U_{GST}).

Из уравнения (34) определим U_{GST} :

$$U_{\text{GST}} = -\left(\frac{qN_D d^2}{8\varepsilon_{\text{Si}}\varepsilon_0}\right) + U_0 \text{ при } U_{\text{DS0}} = 0. \quad (35)$$

Введя обозначение $U_{\text{GST}} - U_0 = U'_{\text{GST}}$ получим уравнение

$$U'_{\text{GST}} = -\left(\frac{qN_D d^2}{8\varepsilon_{\text{Si}}\varepsilon_0}\right)_0. \quad (36)$$

Оценим численные значения. При $N_D = 3 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}$, $N_A = 1 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$, $L = 2 \text{ мкм}$, $U_0 = 0,8 \text{ В}$ для Si, $U'_{\text{GST}} = -2,26 \text{ В}$. Напряжение запирания (перекрытия канала проводимости) $U_{\text{DS0}} = 2,26 - 0,8 + U_{\text{GS}}$. Если $U_{\text{GS}} = -1,46 \text{ В}$, то $U_{\text{DS0}} = 0$. Пороговое напряжение $U_{\text{GST}} = -1,46 \text{ В}$.

Статические характеристики и параметры полевых транзисторов с управляющим p - n -переходом (ПТУП)

В полевых транзисторах с управляющим переходом для изменения проводимости канала используется эффект изменения ширины области пространственного заряда (ОПЗ) обратного смещенного перехода при изменении приложенного к нему напряжения затвора. На рис. 42 показана конструкция n -канального транзистора, в котором для управления используется обратный смещенный p^+ - n -переход.

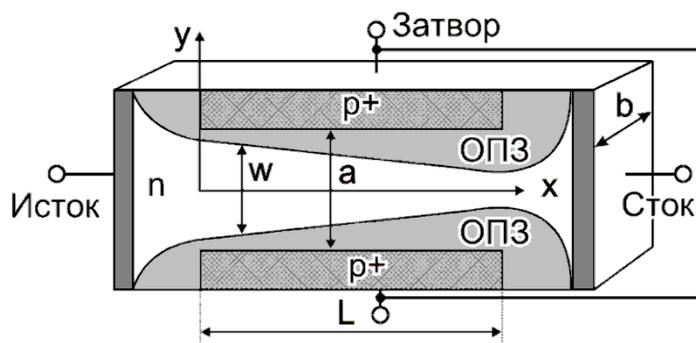


Рис. 42. Полевой транзистор с управляющим p - n -переходом

Поскольку ОПЗ обладает высоким сопротивлением, то при увеличении ширины ОПЗ сечение канала уменьшается и его сопротивление возрастает. Самое низкое сопротивление канала и самый

большой ток через него будет при нулевом напряжении на затворе ($U_3 = 0$), затем по мере увеличения ширины ОПЗ при возрастании U_3 и соответственно уменьшении сечения канала ток будет падать, и при некотором напряжении отсечки U_{30} канал полностью перекроется, и ток через него перестанет возрастать.

Выведем уравнение, описывающее ВАХ ПТУП, при этом сделаем ряд допущений, позволяющих значительно упростить расчет [17]. Прежде всего будем использовать все допущения, которые ранее были сделаны при выводе ВАХ. Кроме того, будем считать, что ток в канале определяется только основными носителями заряда и что при нулевом смещении ширина ОПЗ близка к нулю. Тогда для геометрии, показанной на рис. 42, можно записать:

$$R_{c0} = \rho \frac{L}{S} = \rho \frac{L}{b \cdot a}$$

$$dR_x = \rho \frac{dx}{b \cdot a},$$
(37)

где R_{c0} — сопротивление канала при нулевом напряжении на затворе.

Для ширины канала и ширины ОПЗ справедливо:

$$w(U) = a - 2d(U)$$

$$d(U) = \sqrt{\frac{\varepsilon\varepsilon_0 (N_d - N_a)(U_k + U)}{2\pi q N_d N_a}},$$
(38)

где U — разность потенциалов между p^+ -областью затвора и n -областью канала в точке x .

Поскольку p^+ -область затвора легирована значительно сильнее, чем область канала $N_a \gg N_d$, то (37) можно упростить:

$$d(U) = \sqrt{\frac{\varepsilon\varepsilon_0 (U_k + U)}{2\pi q N_d}}$$

$$w(U) = a - 2\sqrt{\frac{\varepsilon\varepsilon_0 (U_k + U)}{2\pi q N_d}}.$$
(39)

При некотором напряжении U_0 канал перекрывается, т. е. будет выполняться условие: $w(U_0) = a - 2d(U_0) = 0$. Откуда:

$$a = 2\sqrt{\frac{\varepsilon\varepsilon_0(U_k + U_0)}{2\pi qN_d}} \quad (40)$$

$$w(U) = a\left(1 - \sqrt{\frac{U + U_k}{U_0 + U_k}}\right)$$

Для приращения напряжения вдоль канала, используя (37), запишем:

$$dU = J_c dR = \frac{J_c \rho}{bw(U)} dx = \frac{J_c \rho}{ab\left(1 - \sqrt{\frac{U + U_k}{U_0 + U_k}}\right)} =$$

$$= \frac{J_c R_{c0}}{L\left(1 - \sqrt{\frac{U + U_k}{U_0 + U_k}}\right)} dx \quad (41)$$

Разделим переменные в (41) и выполним интегрирование по длине канала, учитывая что $U(0) = U_3$ и $U(L) = U_c + U_3$:

$$\int_0^L \frac{J_c}{L} dx = \frac{1}{R_{c0}} \int_{U_3}^{U_c + U_3} \left(1 - \sqrt{\frac{U + U_k}{U_0 + U_k}}\right) dU_x \quad (42)$$

$$J_c = \frac{1}{R_{c0}} \left[U_c - \frac{2(U_c + U_3 + U_k)^{3/2}}{3(U_0 + U_k)^{1/2}} + \frac{2(U_3 + U_k)^{3/2}}{3(U_0 + U_k)^{1/2}} \right] \quad (43)$$

Уравнение (43) представляет семейство характеристик с максимумами и описывает крутую часть вольтамперной характеристики ПТУП. Максимум соответствует точке перекрытия канала. В реальных характеристиках после достижения напряжением стока значения U_0 спада тока не происходит, и характеристики идут параллельно оси напряжений (см. рис. 43), т. е. происходит переход от крутой области ВАХ к пологой, в которой ток очень слабо зависит от U_c .

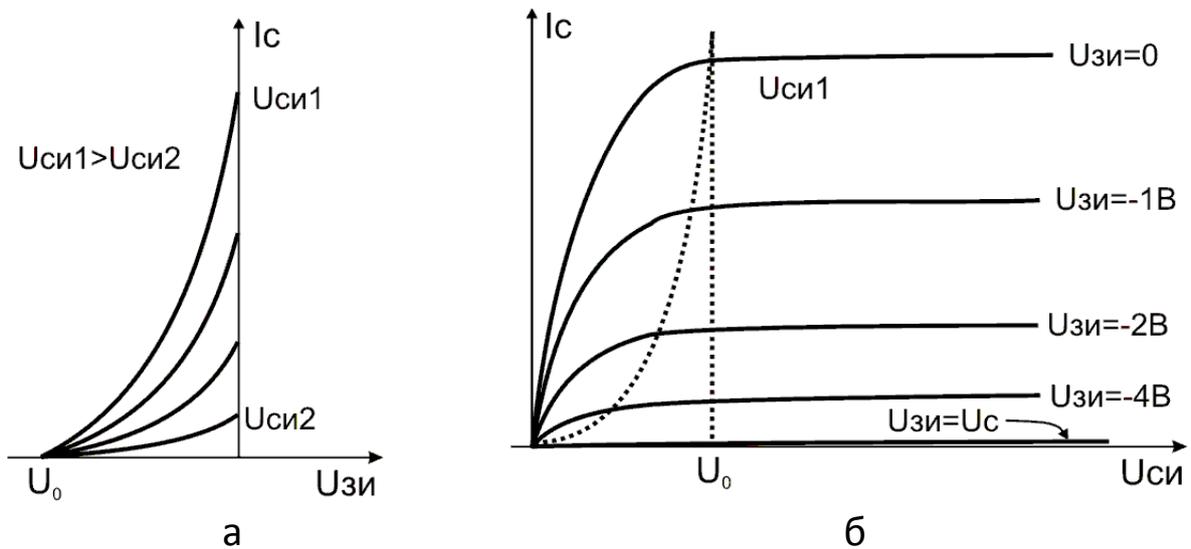


Рис. 43. Передаточная (а) и выходная (б) характеристики полевого транзистора с управляющим $p-n$ -переходом

Насыщение тока J_C после перекрытия канала объясняется перераспределением падения напряжения между низкоомной и высокоомной (перекрытой) областями канала. После перекрытия канала практически все напряжение падает в области перекрытия. Дальнейшее увеличение напряжения стока приводит к расширению области перекрытия и увеличению падения напряжения на ней и не сопровождается увеличением тока. В то же время ток не уменьшается, поскольку все электроны, достигшие ОПЗ вблизи стока, переносятся электрическим полем в область стока.

Пологая область ВАХ начинается после экстремальной точки характеристик. Найдем эту точку из условия $dJ_C/dU_C = 0$. Продифференцируем и приравняем нулю (43):

$$\frac{1}{R_{C0}} \left[1 - \frac{(U_C + U_3 + U_K)^{1/2}}{(U_0 + U_K)^{1/2}} \right] = 0.$$

Откуда: $U_C = U_0 - U_3$. Подставив в (43) это значение U_C для экстремальной точки, получим для пологой области ВАХ:

$$J_C = \frac{U_0 + U_K}{3R_{C0}} \left[1 - 3 \frac{U_3 + U_K}{U_0 + U_K} + 2 \frac{(U_3 + U_K)^{3/2}}{(U_0 + U_K)^{3/2}} \right] \quad (44)$$

Это выражение достаточно громоздко, и поэтому вместо него без значительной потери точности используют более простое выражение:

$$J_c = \frac{U_0 + U_K}{3R_{c0}} \left(1 - \frac{U_3 + U_K}{U_0 + U_K} \right)^2 = J_{cm} \left(1 - \frac{U_3 + U_K}{U_0 + U_K} \right)^2. \quad (45)$$

Если $U_3 \gg U_K$ и $U_0 \gg U_K$ ($U_0 \gg U_K$ (что справедливо в большинстве режимов)), то:

$$J_c = J_{cm} \left(1 - \frac{U_3}{U_0} \right)^2. \quad (46)$$

Усилительные свойства полевого транзистора принято характеризовать крутизной S :

$$S = \frac{\partial J_c}{\partial U_3} = \frac{2J_{cm}}{U_0} \left(1 - \frac{U_3}{U_0} \right). \quad (47)$$

Как видно из (47), с ростом напряжения затвора крутизна для полевого транзистора с управляющим $p-n$ -переходом падает. Характер соответствующей зависимости крутизны от напряжения на затворе воспроизведен на рис. 44.

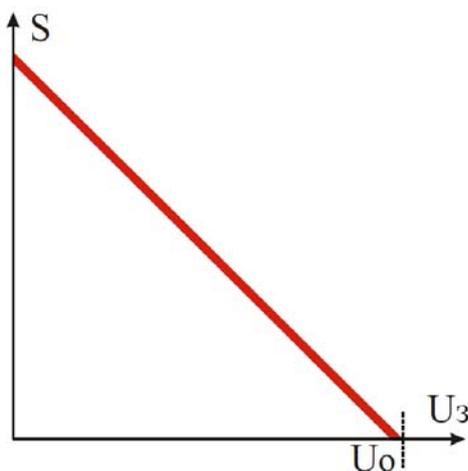


Рис. 44. Зависимость крутизны полевого транзистора с управляющим $p-n$ -переходом от напряжения затвора (U_0 — напряжение отсечки)

Передаточная характеристика — это зависимость $I_{\text{вых}}(U_{\text{вх}})$.
Выходная характеристика — это зависимость $I_{\text{вых}}(U_{\text{вых}})$.

При $U_{ЗИ} = 0$ имеем $I_C = I_{C0}$ — остаточный ток. При $U_{ЗИ} = U_0$ — пороговому напряжению — $I_C = 0$. Причем $I_C = I_{C0} \left(1 - \frac{U_{ЗИ}}{U_0}\right)^2$.
 У крутой области выходной характеристики $r_{СИ} = \frac{1}{2k^*(U_{ЗИ} - U_0)}$.

Учитывая это, имеем выражение для крутизны:

$$S = \frac{\partial I_{\text{вых}}}{\partial U_{\text{вх}}} = \frac{\partial I_C}{\partial U_{ЗИ}} = \frac{2I_{C0}}{U_0^2} (U_{ЗИ} - U_0),$$

где $\frac{2I_{C0}}{U_0^2} = k^*$ зависит от физических характеристик вещества.

Обычно $k^* \approx 0,1 \frac{\mu A}{B^2}$. Очевидно, что $S_{\text{max}} = \frac{2I_{IC}}{|U_0|}$, $S = \sqrt{2k^* I_C}$.

Выходное сопротивление $r_{СИ} = \frac{\Delta U_{СИ}}{\Delta I_C} > 100$ кОм, а выходное сопротивление ~ 1 Мом.

$$U_{СИ} = U_{ЗИ} - U_0$$

$$U_{СИ} < U_{ЗИ} - U_0 \rightarrow \text{крутая область}$$

$$I_C = k^* [2(U_{ЗИ} - U_0)U_{СИ} - U_{СИ}^2]$$

Зависимость $I_C(U_{ЗИ})$ линейна, а $I_C(U_{СИ})$ линейна при малых $U_{СИ}$.

Литература

1. Егоров, Н. М. Электроника. Версия 1.0 / Н. М. Егоров. — Красноярск : ИПКСФУ, 2008. — 330 с.
2. Титце, У. Полупроводниковая схемотехника / У. Титце, К. Шенк. — М. : ДМК Пресс, 2008. — Том I. — 832 с.
3. Глазачев, А. В. Физические основы электроники : конспект лекций / А. В. Глазачев, В. П. Петрович. — Томск : Томский политехнический университет, 2015. — 136 с.
4. Борисов, В. Г. Юный радиолюбитель / В. Г. Борисов. — М. : Радио и связь, 1992. — 409 с.
5. Хоровиц, П. Искусство схемотехники : в 3 т. / П. Хоровиц, У. Хилл. — М. : Мир, 1993. — Т. 1. — 413 с.
6. Ефимов, И. Е. Микроэлектроника : Проектирование, виды микросхем, функциональная микроэлектроника : учеб. пособие для приборостроительных спец. вузов / И. Е. Ефимов, И. Я. Козырь, Ю. И. Горбунов. — М. : Высшая школа, 1987. — 416 с.
7. Ефимов, И. Е. Основы микроэлектроники : учебник / И. Е. Ефимов, И. Я. Козырь. — СПб. : Лань, 2008. — 384 с.
8. Shockley, W. Unipolar "Field-Effect" Transistor / W. Shockley // Proceedings of the IRE. — 1952. — Vol. 40, Issue: 11, Nov. — P. 1365–1376.
9. Нитусов, А. Юлиус Лилиенфельд : 130 лет забытому пионеру электроники / А. Нитусов // PC Week/RE. — 2011. — № 26 (776). — URL: <http://www.pcweek.ru/themes/detail.php?ID=134409>
10. Dacey, G. C. Unipolar "Field-Effect" Transistor / G. C. Dacey, I. M. Ross // Proceedings of the IRE. — 1953. — Vol. 41, Issue: 8, Aug. — P. 970–979.
11. Маллер, Р. Элементы интегральных схем / Р. Маллер, Т. Кейминс. — М. : Мир, 1989. — 630 с.
12. Сугано, Т. Введение в микроэлектронику / Т. Сугано, Т. Икома, Е. Такэиси. — М. : Мир, 1988. — 320 с.
13. Аваев, Н. А. Основы микроэлектроники : учеб. пособие для вузов / Н. А. Аваев, Ю. Е. Наумов, В. Т. Фролкин. — М. : Радио и связь, 1991. — 288 с.

14. Прищепа, М. М. Мікроелектроніка : в 3 ч. Ч. 1 : Елементи мікроелектроніки : навч. посіб. / М. М. Прищепа, В. П. Погребняк ; за ред. М. М. Прищепи. — Київ : Вища шк., 2004. — 431 с.

15. Пикус, Г. Е. Основы теории полупроводниковых приборов / Г. Е. Пикус. — М. : Наука, 1965. — 448 с.

16. Colinge, J.-P. Physics of Semiconductor Devices / J.-P. Colinge, C. A. Colinge. — Kluwer Academic Publishers, 2002. — 436 p.

17. Зи, С. Физика полупроводниковых приборов : в 2 кн. / С. Зи. — М. : Мир, 1984. — Кн. 1. — 456 с.

ОГЛАВЛЕНИЕ

Введение.....	3
Историческая справка: зарождение и развитие электроники	3
Классификация электронных приборов	5
Основы вакуумной электроники.....	7
Измерение уровня вакуума.....	7
Методы получения вакуума	14
Электроракуумные приборы	19
Униполярные транзисторы как элементы интегральной электроники	27
Схемотехнические и конструктивно-технологические особенности униполярных транзисторов.....	28
Историческая справка: изобретение полевого транзистора.....	29
Структура и принцип действия полевого транзистора.....	35
Энергетическая зонная диаграмма при тепловом равновесии	35
Влияние напряжения смещения.....	38
Емкость МДП-структуры	42
Источники заряда в окисле.....	43
МДП-транзистор с индуцированным каналом	44
Принципы работы, классификация МДП-транзисторов	44
Параметры и характеристики МДП-транзисторов.....	44
Статические характеристики МДП-транзистора.....	46
Малосигнальные параметры МДП-транзистора	50
Структура, условные обозначения, классификация МДП-транзисторов.....	50
Полевые транзисторы с управляющим <i>p-n</i> -переходом.....	51
Принцип работы полевых транзисторов с управляющим <i>p-n</i> -переходом (ПТУП, ПТШ)	52
Напряжение перекрытия канала	56
Статические характеристики и параметры полевых транзисторов с управляющим <i>p-n</i> -переходом (ПТУП).....	59
Литература	65

Учебное издание

Физические основы электроники

Учебно-методическое пособие

Составители:

Лебедев Михаил Евгеньевич
Чурилов Анатолий Борисович

Редактор, корректор М. Э. Левакова
Верстка М. Э. Леваковой

Подписано в печать 30.05.2018. Формат 60×84 1/16.

Усл. печ. л. 3,95. Уч.-изд. л. 2,0.

Тираж 2 экз. Заказ

Оригинал-макет подготовлен
в редакционно-издательском отделе ЯрГУ.

Ярославский государственный университет
им. П. Г. Демидова.
150003, Ярославль, ул. Советская, 14.