МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ ГРАЖДАНСКОЙ АВИАЦИИ.

С.Г.Камзолова

ПОСОБИЕ
к изучению дисциплины
«Общая электротехника и электроника»,
раздел «Электронные приборы»
Часть 1.

для студентов II курса
специальности 201300
заочного обучения

Москва

ФЕДЕРАЛЬНОЕ АГЕНТСТВО ВОЗДУШНОГО ТРАНСПОРТА
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ
ВЫСШЕГО ПРОФЕССИОНАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯЯ
«МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ ГРАЖДАНСКОЙ АВИАЦИИ»

Кафедра теоретической радиотехники

С.Г.Камзолова

ПОСОБИЕ
к изучению дисциплины
«Общая электротехника и электроника»,
раздел «Электронные приборы»
Часть 1.

для студентов II курса
специальности 201300
заочного обучения

Москва

Краткие теоретические сведения

ОБЩАЯ ЭЛЕКТРОТЕХНИКА И ЭЛЕКТРОНИКА

Раздел 2. Основы электроники и электрические измерения.

Тема 3. Основы электроники.

Общие сведения о полупроводниках. Электрические переходы. Выпрямительные диоды. Стабилитроны и стабисторы.

Полупроводник - это вещество, основным свойством которого является сильная зависимость удельной проводимости от внешних факторов.

Электроны в твердом теле не могут обладать произвольными энергиями. Энергия каждого электрона может принимать лишь определенные значения, называемые энергетическими уровнями. В соответствии с зонной теорией твердого тела энергетические уровни объединяются в разрешенные зоны.

Верхняя разрешенная зона, которая при температуре абсолютного нуля (Т=0 К) целиком занята электронами, называется валентной. Расположенная над ней следующая разрешенная зона, которая при Т=0 К пуста или частично заполнена электронами, называется зоной проводимости. В чистых полупроводниках при Т=0 К электропроводность отсутствует. При Т#0 К некоторое число электронов из валентной зоны переходит в зону проводимости, а в валентной зоне появляется столько же незанятых уровней энергии – положительно заряженных частиц, или дырок. Дырки наряду с электронами зоны проводимости являются свободными носителями зарядов. Образование пары носителей заряда называют генерацией носителей. В полупроводнике между зонами проводимости и валентной находится запрещенная зона (рис.3.1).

Т.к. электроны и дырки совершают хаотическое тепловое движение, обязательно

Э – энергия;
ΔЭ – ширина запрещенной зоны.

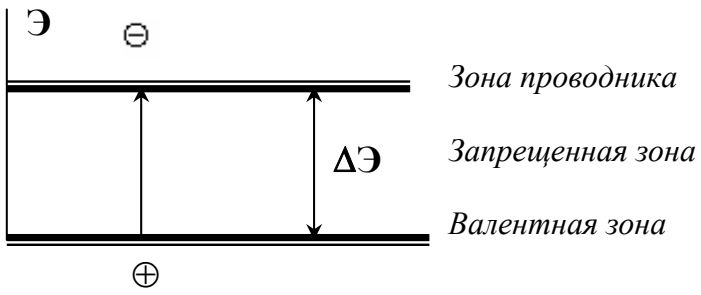


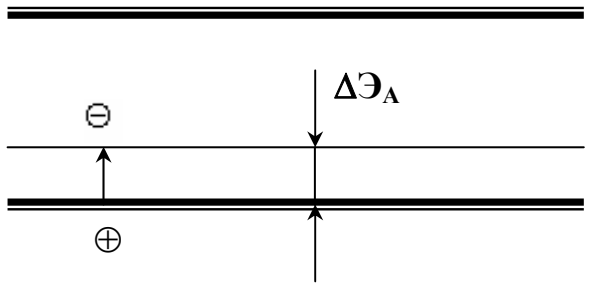
Рис. 3.1

происходит процесс рекомбинации – исчезновение пар носителей, когда электроны проводимости снова занимают свободные места в валентной зоне, т.е. объединяются с дырками. Процессы генерации и рекомбинации пар носителей всегда происходят одновременно.

С ростом ΔЭ число пар носителей собственного (без примесей) полупроводника уменьшается, а удельное сопротивление возрастает. В зависимости от ΔЭ удельное сопротивление собственного полупроводника изменяется в пределах 10^{-4}-10^{10} Ом.см.

В полупроводниковых электронных приборах применяются примесные полупроводники, содержащие акцепторные или донорные примеси.

Акцептор – примесной атом, образующий в запрещенной зоне разрешенный энергетический уровень, свободный от электрона в невозбужденном состоянии атома захватить электрон валентной зоны (рис.3.2).

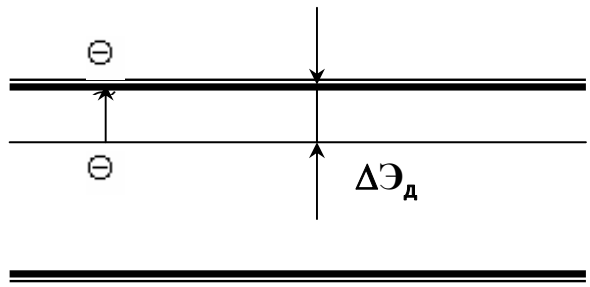


$\Delta Э_А$ - энергия ионизации акцептора.

Рис. 3.2

Основные носители заряда в этом случае – дырки, т.е. это полупроводник p-типа.

Донор – примесной атом, образующий в запрещенной зоне разрешенный энергетический уровень, занятый электроном в невозбужденном состоянии атома и способный в возбужденном состоянии отдать электрон в зону проводимости (рис.3.3).



$\Delta Э_д$ - энергия ионизации донора.

Рис. 3.3

Основные носители заряда в этом случае – электроны, т.е. полупроводник n-типа. Т.к. $\Delta Э_а << \Delta Э$ и $\Delta Э_д << \Delta Э$, то при не слишком высоких температурах число свободных дырок или электронов, возникающих вследствие ионизации соответственно акцепторов

или доноров, при достаточно большой концентрации акцепторов и доноров превышает число электронов и дырок, образовавшихся вследствие тепловой генерации.

Направленное движение носителей заряда есть электрический ток. Он может быть образован движением дырок валентной зоны (полупроводник p-типа) или электронов зоны проводимости (полупроводник n-типа). Диффузия и дрейф – разновидности направленного движения носителей в полупроводнике.

Диффузия – направленное движение носителей заряда вследствие градиента концентрации.

Электрические переходы.

Электрическим переходом называется переходный слой между областями твердого тела с различными типами или значениями проводимости, например, между областями полупроводника n- и p-типа, металлом и полупроводником, диэлектриком и полупроводником и т.д. Электрический переход составляет основу электронного полупроводникового прибора, поэтому физические процессы, происходящие в переходе, определяют принцип действия прибора.

A. p-n-переход при отсутствии внешнего напряжения.

P-n-переход образуется на границе двух полупроводников с различными типами электропроводности: p-типа, в котором основными носителями являются дырки, и n-типа, в котором основными носителями являются электроны.

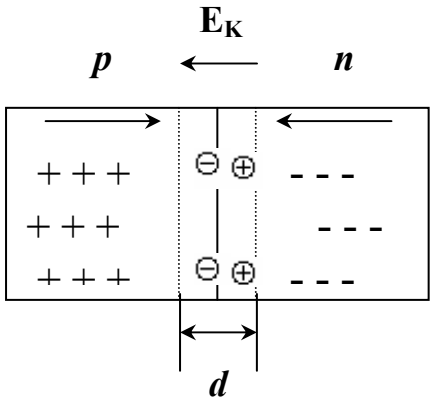


Рис. 3.4

При контакте двух областей происходит диффузия основных носителей: дырок из p-области в n-область и электронов в противоположном направлении (рис. 3.4.). Течет ток

диффузии $I_{диф}$. В области металлургической границы происходит частичная рекомбинация носителей, т. е. образуется обедненный слой толщиной **d**, обладающий повышенным сопротивлением по отношению к сопротивлению остального объема полупроводника, а также объемный заряд дырок в n-области и электронов - в p-области. Эти носители - неосновные для соответствующих областей - создают контактную напряженность E_K и потенциальный барьер U_K, который препятствует дальнейшей диффузии основных носителей. Возникает дрейф неосновных носителей вследствие напряженности E_K. Ток дрейфа, $I_{др}$ - ток неосновных носителей - направлен в противоположном по отношению к $I_{диф}$ направлении. Он приводит к уменьшению U_K, т.е. к появлению диффузии. Ток при отсутствии внешнего напряжения

$$\mathbf{I = I_{диф} - I_{др} = 0,}$$

а U_K имеет установившееся значение, например, для германия Ge U_K = 0,2... 0,4 В, для кремния Si U_K = 0,5...1,0 В.

Кроме того, p-n-переход обладает повышенным сопротивлением (обедненный слой).

Б. p-n-переход при прямом напряжении.

Прямым называется напряжение $U_{пр}$, полярность которого совпадает с полярностью основных носителей (рис.3.5). Вектор $E_{пр}$ направлен встречно E_K, поэтому толщина обедненного слоя d', т.е. идет диффузия и течет $I_{диф}$. Прямой ток $I_{пр} \approx I_{диф}$, а ток дрейфа $I_{др} \approx 0$ из-за малой результирующей напряженности поля области контакта.

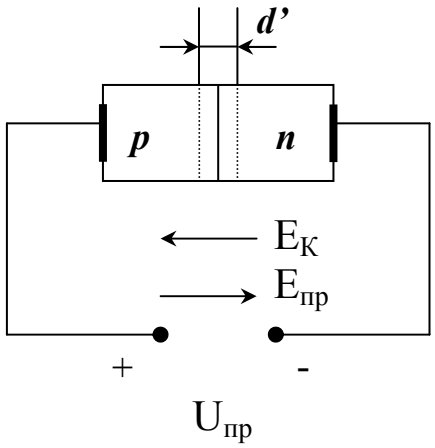


Рис. 3.5

Сопротивление приконтактного слоя $R_{пр}$ уменьшается и может стать равным сопротивлению объема при полной компенсации потенциального барьера.

Обычно p-n-переход несимметричный, т.к. области p и n легированы по-разному. Пусть p-область сильно легирована. Тогда при прямом напряжении преимущественно дырки диффундируют в n-область, содержащую малое

количество примесей, в связи с чем диффузией электронов в p-область можно пренебречь.

Диффузия основных носителей через пониженный потенциальный барьер в область, где они будут неосновными, называется инжекцией. Область, из которой происходит инжекция, называется эмиттером (Э); область, куда инжектируются носители - базой (Б). В приведенном выше примере Э - p-область, Б - n-область.

Итак, при прямом напряжении течет прямой ток основных носителей (их много), а сопротивление перехода мало.

В. p-n- переход при обратном напряжении.

Вектор $E_{обр}$ направлен так же, как и $E_к$, поэтому потенциальный барьер образуется как результат этой суммы (рис 3.6.). Толщина обедненного слоя d”>>d, т.е. диффузии нет, а течет только ток дрейфа $I_{др}$ неосновных носителей. Обратный ток $I_{обр} = I_{др}$.

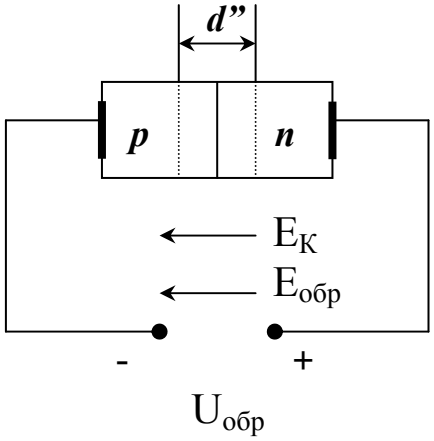


Рис. 3.6

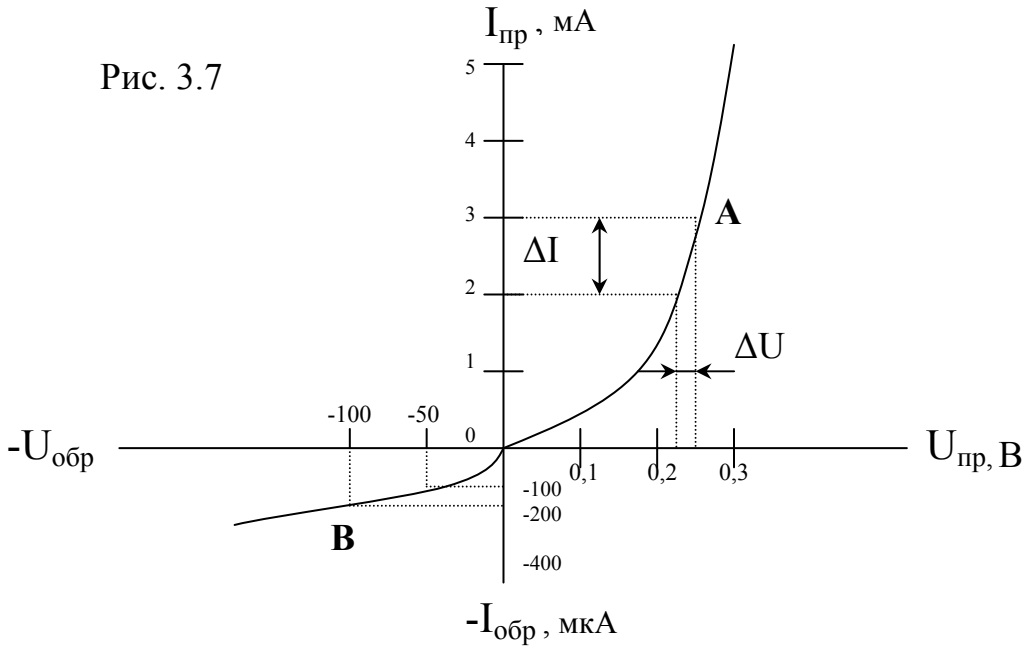
Сопротивление приконтактного слоя $R_{обр}$ велико.

Итак, при обратном напряжении течет обратный ток неосновных носителей (их мало), а сопротивление перехода велико.

Г. Вольтамперная характеристика p-n-перехода.

Вольтамперная характеристика (ВАХ) p-n-перехода нелинейна. На рис.3.7 в качестве примера представлена ВАХ маломощного германиевого диода. Прямая $I_{пр} = f(U_{пр})$ и обратная $I_{обр} = f(U_{обр})$ ветви изображены в разных масштабах, поэтому ВАХ в начале координат имеет излом.

Рис. 3.7



Прямая ветвь имеет 2 участка: криволинейный, где потенциальный барьер еще не скомпенсирован, и линейный. Обратная ветвь показывает, что p-n-переход из Ge имеет довольно большой обратный ток, который увеличивается из-за $U_{обр}$, т.к. количество неосновных носителей растет, с одной стороны, из-за расширения приконтактного слоя, с другой стороны, из-за увеличения выделяемой мощности в переходе и связанной с этим термогенерацией носителей. Видно, что при небольшом прямом напряжении $I_{пр}$ относительно велик, а при значительном $U_{обр}$ обратный ток существенно меньше, т.е. p-n-переход обладает односторонней проводимостью. Сравнение дифференциальных сопротивлений перехода при прямом и обратном напряжениях также иллюстрирует это его свойство.

Дифференциальное сопротивление перехода - сопротивления малому переменному току при заданном напряжении или токе смещения, т.е.

$$r = \left.\frac{dU}{dI}\right|_{\text{т.А}}$$

Отметим, что p-n-переход, помимо нелинейности ВАХ и односторонней проводимости, обладает рядом свойств, позволяющих выполнить на его основе большое количество разнообразных полупроводниковых диодов. В каждом из диодов используется то или иное свойство p-n-перехода, при этом другие свойства его могут быть для данного диода вредными.

Д. Переход Шотки.

Переход Шотки - переходный слой между полупроводником и металлом. Выпрямляющий электрический переход образуется из-за разных работ выхода электронов из полупроводника и из металла:

$$U_{пер} = q(A_{nn} - A_m),$$

где $U_{пер}$ - напряжение на переходе при отсутствии напряжения смещения;

q - заряд электрона;

A_{nn} - работа выхода электрона из полупроводника;

$-A_m$ - работа выхода электрона и металла.

Если $A_m > A_{nn}$ и полупроводник p-типа, то в последнем образуется обедненный слой.

Если $A_m < A_{nn}$ и полупроводник n-типа, то в последнем образуется обогащенный слой, не обладающий выпрямляющим свойством. При использовании полупроводника n-типа необходимо, чтобы A_m было больше A_{nn}.

В переходе Шотки движутся только основные носители, что, в отличие от p-n-перехода обеспечивает его высокочастотность.

Полупроводниковые диоды.

Диодом называется полупроводниковый прибор, имеющий один

а) Диод на p-n-переходе *б) Диод на переходе Шотки*

Рис. 3.8

выпрямляющий электрический переход (в) и два вывода (рис. 3.8.). Диод на p-n-переход имеет два невыпрямляющих перехода (н), диод на переходе Шотки - один невыпрямляющий переход.

Области, откуда инжектируются носители заряда, называется эмиттером диода. Область, откуда они инжектируются, называется базой диода.

Условное обозначение диода представлено на рис.3.9. Стрелка условного обозначения показывает направление прямого тока. Прямой ток течет через диод в случае, когда напряжение на аноде (А) положительно относительно катода (К). В противном случае, диод закрыт обратным напряжением

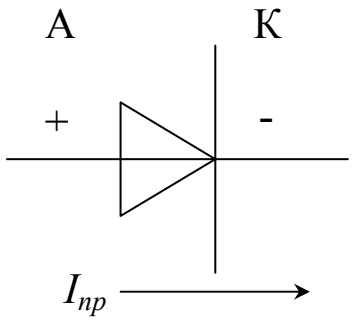


Рис. 3.9

$$U_{обр} = U_{АК},$$

где $U_{АК}$ - напряжение между А и К.

Если $I_{пр}$ составляют, в основном, дырки, то А является эмиттером, а К - базой. Если $I_{пр}$ составляют, в основном, электроны, то А является базой, а К - эмиттером.

В зависимости от соотношения линейных размеров электрического перехода и геометрической длины диода различают плоскостные и точечные диоды.

Геометрическая длина - меньшая из двух величин - диффузионной длины и толщины базы.

Если линейные размеры, характеризующие площадь электрического перехода, больше геометрической длины, то диод называется плоскостным.

Если линейные размеры, характеризующие площадь электрического перехода, меньше геометрической длины, то диод называется точечным.

Выпрямительные диоды.

Выпрямительным называется **диод**, предназначенный для преобразования переменного напряжения в постоянное. В основном, имеется в виду переменное напряжение ≈*50* Гц и ≈400 Гц, реже более высокой частоты.

В выпрямительном диоде используется свойство p-n-перехода односторонняя проводимость. Изготавливаются диоды, в основном, из кремния, реже из германия. Это плоскостные диоды.

Основные параметры:

1. прямой максимальный ток $I_{пр\ max}$;

2. прямое напряжение $U_{пр}$, измеренное при $I_{пр\ max}$;

3. максимальное обратное напряжение $U_{обр\ max}$; оно меньше пробивного;

4. максимальный обратный ток $I_{обр\ max}$, измеренный при $U_{обр\ max}$;

5. диапазон рабочих температур.

По силе выпрямленного тока различают диоды малой ($I_{пр}$<300 мА), средней ($I_{пр}$<10 А) и большой ($I_{пр}$>10 А) мощности. Эти диоды применяют в основном в выпрямителях источников питания.

Вольтамперные характеристики кремниевого и германиевого диодов для различных температур окружающей среды показывают, что при одинаковом токе прямое падение $U_{пр}$ в германиевый диодах меньше в 1,5-2 раза, чем в кремниевых, что является единственным существенным преимуществом диодов из Ge.

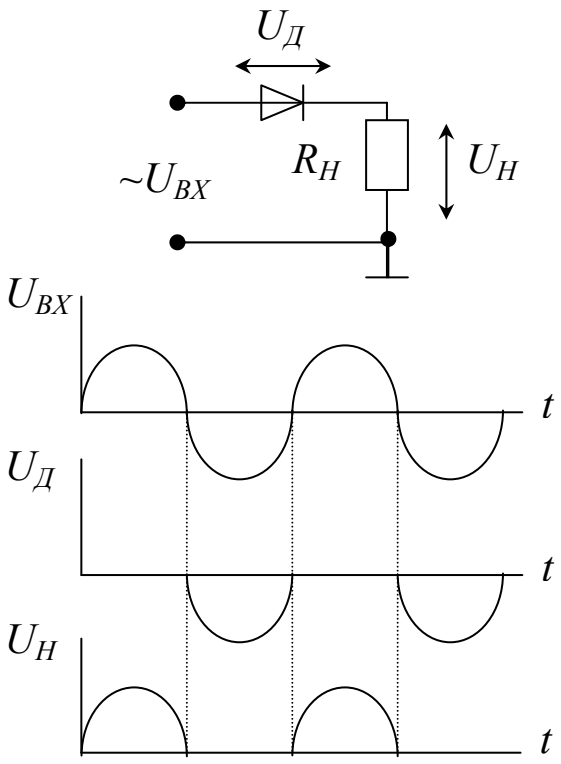


Рис. 3.11

Кремниевые диоды по сравнению с германиевыми имеют меньшие $I_{обр}$ при одинаковых $U_{обр}$ и размерах электрического перехода, а также наибольшие обратные напряжения 1000-1500 В.

Электрический пробой в кремниевых и германиевых диодах обычно лавинный. Но в

германиевых диодах сразу же переходит в тепловой. Поэтому германиевые диоды не выдерживают даже кратковременные перегрузки. С увеличением температуры пробивное напряжение $U_{проб}$ в кремниевых диодах растет, а в германиевых уменьшается. Температурный диапазон кремниевых диодов -60...+125°С, германиевых -60...+85°С.

На рис. 3.11. приведены схема и эпюры однополупериодного выпрямителя. Выпрямительный диод пропускает положительную полуволну в нагрузку ($U_{пр}$ не учитывается), а отрицательная полуволна падает на диодов. В результате на R_H имеется пульсирующее однополярное напряжение, содержащее постоянную составляющую, которая может быть выделена фильтром (на рис.3.11) фильтр не показан).

Стабилитроны и стабисторы.

Стабилитрон - полупроводниковый диод, работающий при обратном напряжении в режиме электрического пробоя и обеспечивающий относительное постоянство напряжения на своих электродах при значительных изменениях тока через него.

Применяется в схемах стабилизаторов, как простых, так и сложных. Выполняется на базе кремния на напряжение от 2 В до 400 В.

ВАХ стабилитрона представлена на рис 3.12.

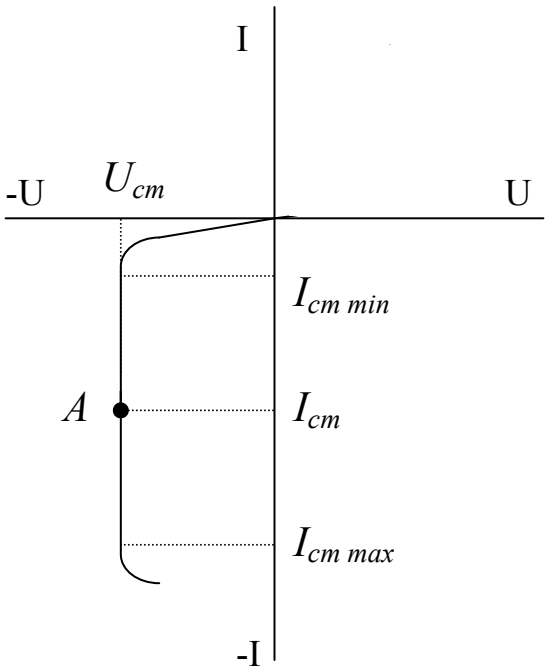


Рис. 3.12

Основные параметры:

1. ток стабилизации $I_{ст}$;

2. ток стабилизации минимальный $I_{ст\ min}$;

3. ток стабилизации максимальный $I_{ст\ max}$;

4. напряжение стабилизации $U_{ст}$;

5. температурный коэффициент напряжения стабилизации $\alpha = \frac{1}{U_{CT}} \cdot \frac{\Delta U_{CT}}{\Delta T}$,

где ΔТ - диапазон рабочих температур;

6. дифференциальное сопротивление $r = \frac{\Delta U_{CT}}{\Delta I_{CT}}$.

На рис. 3.13 представлена схема стабилизатора напряжения на стабилитроне. Напряжение E, также как и сопротивление нагрузки R_H, может меняться, при этом рабочая точка стабилитрона не должна выходить за пределы участка ВАХ: $I_{см\ min}$ - $I_{ст\ max}$ - Для обеспечения точки покоя А (см. рис.3.12) используется сопротивление $R_г$, которое определяется

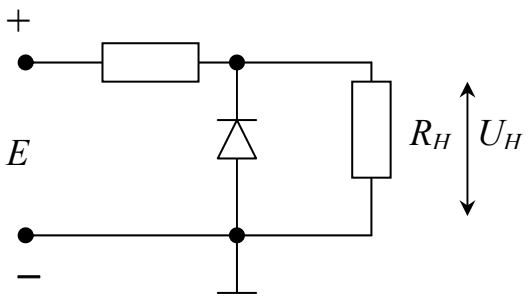


Рис. 3.13

$$R_г = \frac{E - U_H}{I_{CT} + U_H / R_H}.$$

Допустимые изменения E, т.е. ±ΔE, очевидны (см. рис.3.14.). Температурный коэффициент а стабилитрона положителен, т.е. с увеличением температуры увеличивается $U_{см}$. Для термокомпенсации стабилитронов применяются стабисторы - полупроводниковые диоды, которые сохраняют постоянство напряжения на своих электродах при значительных изменениях прямого тока. Т.к. стабисторы используются при прямом напряжении (рис.3.15. - ВАХ стабистора), то температурный коэффициент их отрицателен, а последовательное соединение стабилитрона и стабистора обеспечивает термокомпенсацию результирующего напряжения. Такая структура называется термокомпенсированным стабилитроном.

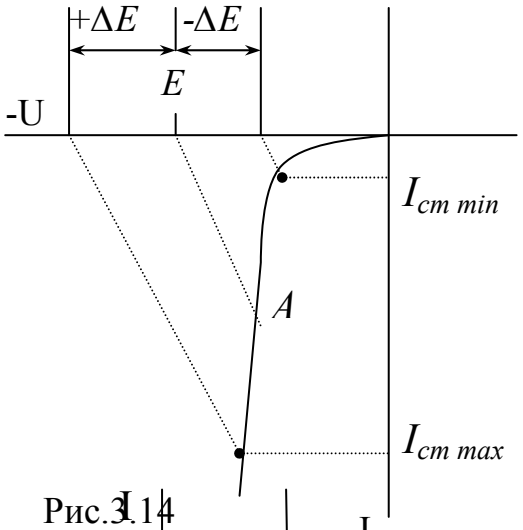


Рис.3.14

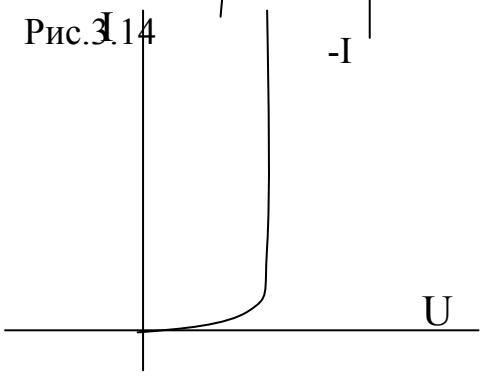


Рис.3.15

Импульсные диоды.

Импульсный диод - полупроводниковый диод, имеющий малую длительность переходных процессов и предназначенный для применения в импульсных режимах работы.

Основное назначение - работа в качестве коммутационных элементов ЭВМ. Кроме того, в радиоэлектронике импульсные диоды используются для детектирования высокочастотных сигналов.

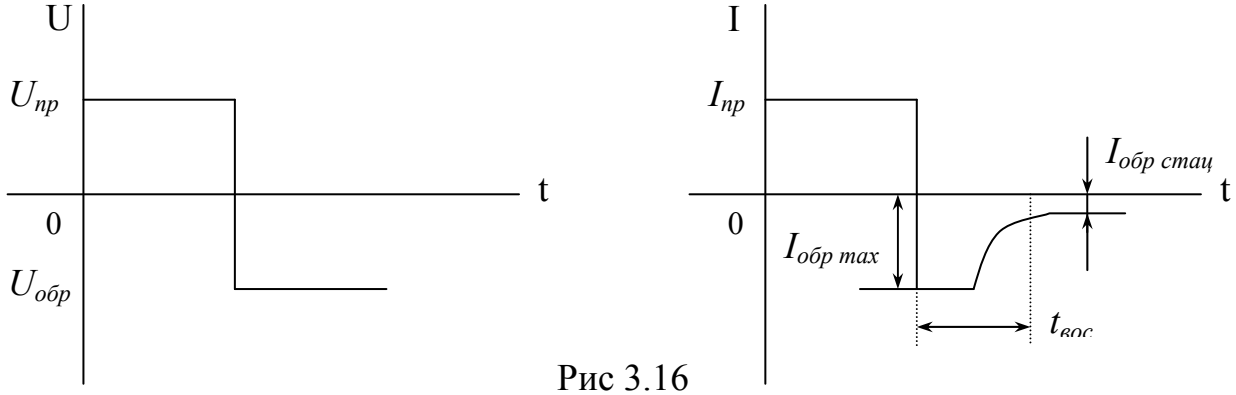


Рис 3.16

Условия работы импульсных диодов обычно соответствуют высокому уровню инжекции, т.е. относительно большим прямым токам. При переключении диода с прямого направления на обратный (рис.3.16) в начальный момент времени через диод идет большой обратный ток $I_{обр.max.}$ ограниченный сопротивлением базы. С течением времени накопленные в базе носители рекомбинируют или уходят из базы через p-n-переход, после чего обратный ток уменьшается до своего стационарного значения - $I_{обр\ стац}$.

Переходный процесс, в течение которого обратное сопротивление импульсного диода восстанавливается до постоянного значения после быстрого переключения с прямого направления на обратное, называют восстановлением обратного сопротивления диода. Время восстановления обратного сопротивления $t_{вос}$ равно интервалу времени от момента прохождения тока через 0 после переключения диода с заданного прямого тока в состояние заданного обратного напряжения до момента достижения обратным током заданного низкого значения. По значению $t_{вос}$ импульсные диоды делятся на б групп: >500 нс, 150...500 нс. 30...150 нс, 5...30 нс, I...5 нс и менее 1 нс.

При пропускании импульса тока в прямом направлении через диод наблюдается выброс напряжения R первый момент после включения (рис.3.17.). Вызвано это

повышенным падением напряжения до тех пор, пока не произойдет накопление неосновных носителей заряда в базе диода в результате инжекции и

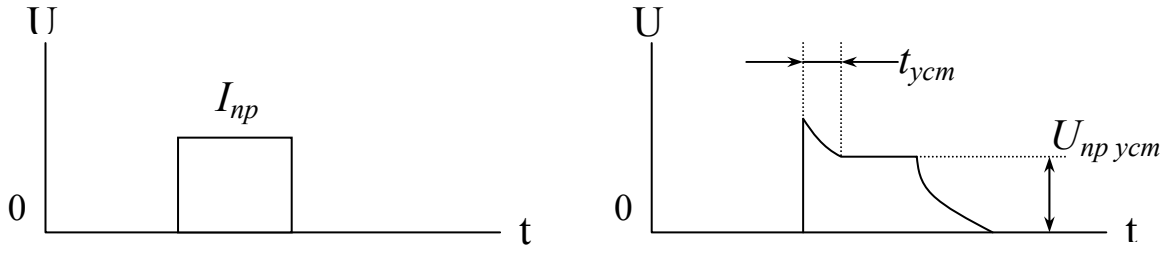


Рис. 3.17

не уменьшится объемное сопротивление базы. Переходный процесс, в течение которого прямое сопротивление устанавливается до постоянного значения после быстрого включения диода в прямом направлении, называют установлением прямого сопротивления диода.

Время установления прямого сопротивления - интервал времени от момента подачи импульса $I_{пр}$ на диод (при нулевом начальном напряжении смещения) до достижения заданного значения прямого напряжения ($U_{пр\ уст}$)-Значения $t_{вос}$ и $t_{уст}$ зависят от структуры диода, от времени жизни неосновных носителей заряда в базе, от условий измерения.

Лавинно-пролетные диоды.

Лавинно-пролетный диод (ЛПД) – полупроводниковый диод, работающий в режиме лавинного пробоя при обратном напряжении и предназначенный для генерации СВЧ-колебаний.

На рис 3.18 представлена структура ЛПД и распределение напряженности Е вдоль нее.

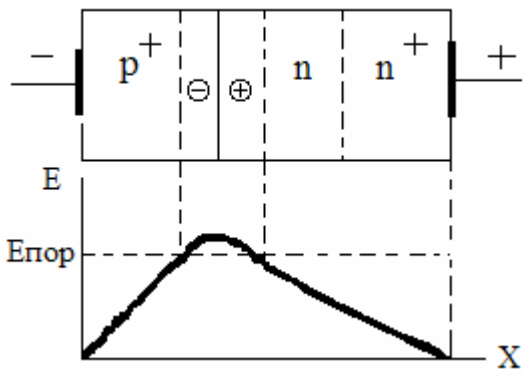


Рис. 3.18

При совместном действии постоянного (U_A, рис.3.19) и переменного (СВЧ) напряжений E превышает пороговое значение ($E > E_{ПОР}$) в области p-n- перехода, поэтому в переходе развивается процесс лавинного размножения зарядов.

Электроны и дырки, образованные в результате этого, разделяются полем p-n- перехода – дырки в p- область, электроны в n- область. Они и образуют выходной ток.

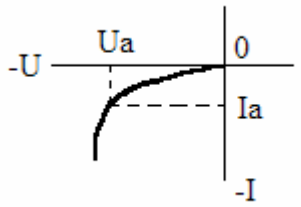


Рис. 3.19

Лавина развивается не мгновенно.

Время пролета электронов и дырок вдоль ЛПД также конечно, что создает запаздывание (фазовый сдвиг) тока относительно переменного напряжения. Пусть фазовый сдвиг равен π (рис 3.20).

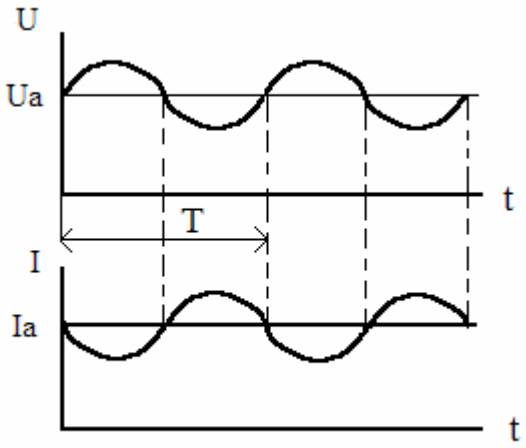


Рис. 3.20

Из эпюр видно, что увеличение ~ U вызывает уменьшение ~ I и наоборот. Это свидетельство того, что в течение всего периода (T) ЛПД обладает отрицательным дифференциальным сопротивлением, т.е. способностью генерировать колебания.

При уменьшении частоты переменного напряжения фазовый сдвиг между I и U становится больше π и при достижении 270° ЛПД теряет способность генерировать СВЧ-колебания. То же происходит и при увеличении частоты переменного напряжения, когда фазовый сдвиг достигает 90°. Таким образом, ЛПД способен генерировать СВЧ – колебания в узком диапазоне частот. Отметим, что переменное напряжение U не подается извне. Оно выделяется резонансной камерой, где располагается диод из сигнала включения.

ЛПД обладает большим уровнем шума, поэтому используется только как генератор СВЧ – колебаний.

Словарь специальных терминов

Полупроводник – это вещество, основным свойством которого является сильная зависимость удельной проводимости от внешних факторов.

Акцептор – примесный атом, образующий в запрещенной зоне разрешенный энергетический уровень, свободный от электрона в невозбужденном состоянии атома и способный в возбужденном состоянии захватить электрон валентной зоны.

Донор – примесной атом, образующий в запрещенной зоне разрешенный энергетический уровень, занятый электроном в невозбужденном состоянии атома и способный в возбужденном состоянии отдать электрон в зону проводимости.

Дрейф – направленное движение электрических зарядов под действием электрического поля.

Диффузия – направленное движение носителей заряда вследствие градиента концентрации.

Электрический переход – переходный слой между областями твердого тела с различными типами или значимости проводимости.

Полупроводниковый диод – полупроводниковый прибор, имеющий один выпрямляющий электрический переход и два вывода.

Выпрямительный диод – диод, предназначенный для преобразования переменного напряжения в постоянное.

Стабилитрон – диод, работающий при обратном напряжении в режиме электрического пробоя и обеспечивающий относительное постоянство напряжения на своих электродах при значительных изменениях тока через него.

Стабистор – диод, который сохраняет постоянство напряжения на своих электродах при значительных изменениях прямого тока.

Импульсный диод – диод, имеющий малую длительность переходных процессов и предназначенный для применения в импульсных режимах работы.

Контрольные вопросы

1. Дайте определение полупроводника.
2. Понятие о зонах полупроводника.

3. Что такое p-n-переход?
4. Что такое диффузия?
5. Что такое дрейф?
6. Понятие об односторонней проводимости p-n-перехода.
7. Основные параметры выпрямительного диода.
8. Основное свойство стабилитрона.
9. Основной параметр импульсного диода.