

1.2.1. Электронно-дырочный переход

Работа ряда полупроводниковых приборов (диодов, транзисторов, тиристоров и др.) основана на явлениях, возникающих в контакте между полупроводниками с разными типами проводимости либо в точечном контакте полупроводника с металлом. Граница между двумя областями монокристалла полупроводника, одна из которых имеет электропроводность типа p , а другая — типа n , называется электронно-дырочным переходом. Концентрации основных носителей заряда в областях p и n могут быть равными или существенно различаться.

Симметричным называют p — n -переход, у которого концентрации дырок $N_{акц}$ и электронов $N_{дон}$ практически равны ($N_{акц} \approx N_{дон}$). Если концентрации основных носителей заряда различаются на несколько порядков ($N_{акц} \gg N_{дон}$ или $N_{акц} \ll N_{дон}$), то такие переходы называют *несимметричными*.

Несимметричные p — n -переходы используются шире, чем симметричные, поэтому в дальнейшем опишем только их.

Рассмотрим монокристалл полупроводника (рис. 1.9), в котором, с одной стороны, введена акцепторная примесь, обусловившая возникновение здесь электропроводности типа p , а с другой стороны, введена донорная примесь, благодаря которой там возникла электропроводность типа n . Каждому подвижному положительному носителю заряда в области p (дырке) соответствует отрицательно заряженный неподвижный, находящийся в узле кристаллической решетки ион акцепторной примеси, а в области n каждому свободному электрону соответствует положительно заряженный ион донорной примеси, в результате чего весь монокристалл остается электрически нейтральным.

Свободные носители электрических зарядов под действием диффузии начинают перемещаться из мест с большей концентрацией в места с меньшей

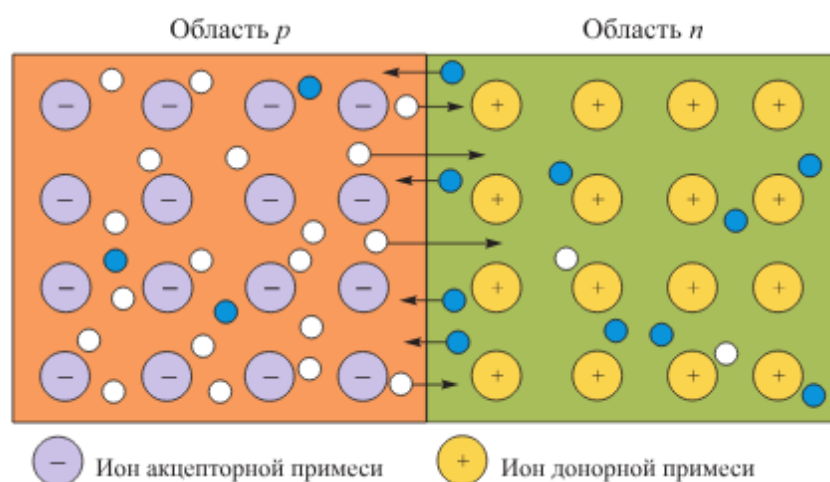


Рис. 1.9. Монокристалл полупроводника до момента образования p — n -перехода

концентрацией (дырки из области p — в область n , а электроны наоборот). Это направленное навстречу друг другу перемещение электрических зарядов образует диффузионный ток p — n -перехода. Но как только дырка из области p перейдет в область n , она окажется в окружении электронов, в результате произойдет рекомбинация. Однако останется электрически нейтральный атом полупроводника.

Если до момента образования p — n -перехода положительный электрический заряд каждой дырки (см. рис. 1.9) компенсировался отрицательным зарядом иона акцепторной примеси в области p , а заряд электрона положительным зарядом иона донорной примеси в области n , то после рекомбинации дырки и электрона электрические заряды неподвижных ионов примесей, породивших эти дырку и электрон, остались некомпенсированными. Эти ионы примесей образуют слой пространственных зарядов. На рис. 1.10, a показан кристалл с образовавшимся p — n -переходом. Между пространственными зарядами возникает электрическое поле напряженностью E , которое называют *полем потенциального барьера*, а разность потенциалов на границе раздела двух зон, обуславливающих это поле, называют *контактной разностью потенциалов* $\Delta\varphi_k$.

Это электрическое поле начинает действовать на подвижные носители электрических зарядов. Так, дырки в области p — основные носители, которые при попадании в зону действия этого поля испытывают с его стороны

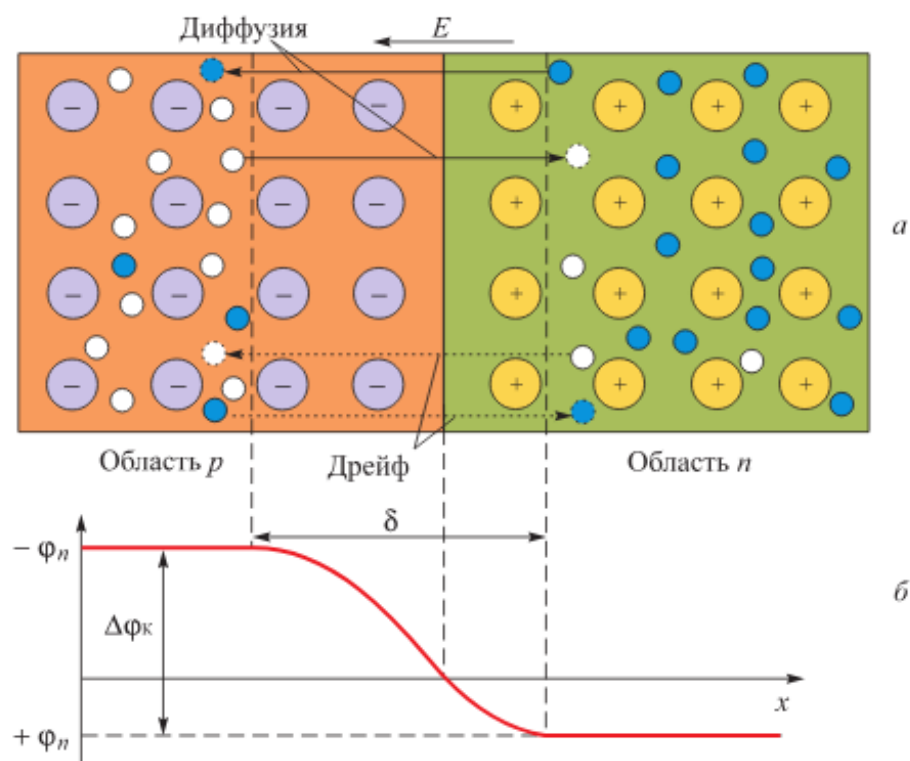


Рис. 1.10. Монокристалл с образовавшимся p — n -переходом (a) и зависимость потенциала электрона $-\varphi(x)$ (b):

$\Delta\varphi_k$ — контактная разность потенциалов; δ — ширина обедненного слоя

тормозящее действие и при перемещении вдоль силовых линий этого поля будут вытолкнуты в глубь области p . Аналогично электроны из области n , попадая в зону действия поля потенциального барьера, будут вытолкнуты им в глубь области n . Таким образом, в узкой области, где действует поле потенциального барьера, образуется слой шириной δ , в котором практически отсутствуют свободные носители электрических зарядов. Вследствие этого слой обладает высоким сопротивлением. Это так называемый *запирающий слой*.

Если в области p вблизи границы раздела областей каким-либо образом окажется свободный электрон, являющийся неосновным носителем, то он со стороны электрического поля потенциального барьера будет испытывать ускоряющее воздействие. Вследствие этого электрон будет переброшен через границу раздела в область n , где будет являться основным носителем. Аналогичный процесс происходит в случае, если в области n появляется неосновной носитель — дырка: под действием поля потенциального барьера дырка будет переброшена в область p , где она будет уже основным носителем. Движение неосновных носителей через p — n -переход под действием электрического поля потенциального барьера обуславливает составляющую *дрейфового тока*.

При отсутствии внешнего электрического поля устанавливается динамическое равновесие между потоками основных и неосновных носителей электрических зарядов, т. е. между диффузионной и дрейфовой составляющими тока p — n -перехода, поскольку эти составляющие направлены навстречу друг другу.

На рис. 1.10, б показана зависимость $-\varphi(x)$, где $-\varphi$ — потенциал электрона, x — его местоположение в монокристалле. За нулевой потенциал принят потенциал на границе раздела областей. Контактная разность потенциалов образует на границе раздела потенциальный барьер с высотой $\Delta\varphi_k$. На диаграмме изображен потенциальный барьер $\Delta\varphi_k$ для электронов, стремящихся за счет диффузии перемещаться справа налево (из области n в область p).

При отсутствии внешнего электрического поля и условии динамического равновесия в кристалле полупроводника устанавливается единый уровень Ферми для обеих областей проводимости. Поскольку в полупроводниках p -типа уровень Ферми смещается к потолку валентной зоны $W_{v(p)}$, а в полупроводниках n -типа — ко дну зоны проводимости $W_{n(n)}$, то на ширине p — n -перехода диаграмма энергетических зон (рис. 1.11) искривляется. Для основных носителей зарядов образуется потенциальный барьер:

$$\Delta\varphi_k = \frac{\Delta W}{q}, \quad (1.13)$$

где ΔW — работа, которую необходимо совершить электрону для его перехода из области n в область p , и наоборот для дырки.

Высота потенциального барьера $\Delta\varphi_k$ зависит от концентрации примесей, так как при ее изменении изменяется уровень Ферми, смещаясь от середины запрещенной зоны к верхней или нижней ее границе.

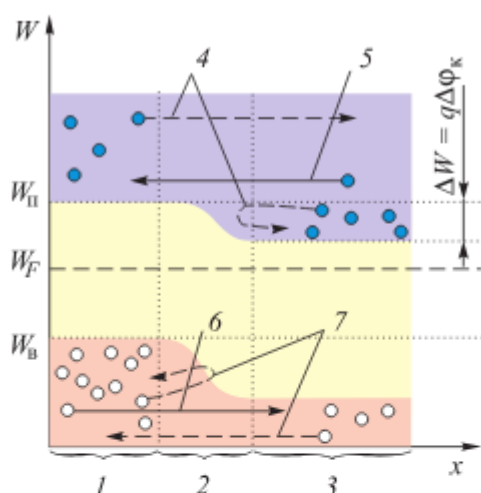


Рис. 1.11. Зонная диаграмма p — n -перехода, иллюстрирующая баланс токов в равновесном состоянии:

1 — p -область; 2 — область p — n -перехода; 3 — n -область; 4 — дрейф электронов; 5 — диффузия электронов; 6 — диффузия дырок; 7 — дрейф дырок; W — энергия электрона; W_F — энергетический уровень Ферми; W_n и W_p — границы зоны проводимости и валентной зоны соответственно; ΔW — потенциальный барьер; $\Delta\phi_k$ — контактная разность потенциалов; q — заряд электрона

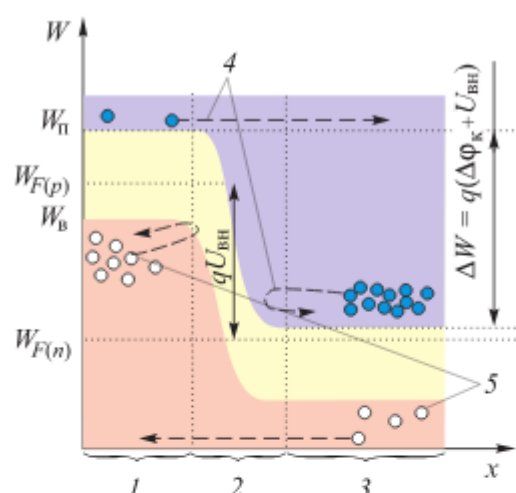


Рис. 1.12. Зонная диаграмма прямого смещения p — n -перехода, иллюстрирующая дисбаланс токов:

1 — p -область; 2 — область p — n -перехода; 3 — n -область; 4 — дрейф электронов; 5 — диффузия электронов; W — энергия электрона; $W_{F(p)}$ — энергетический уровень Ферми в p -области; $W_{F(n)}$ — энергетический уровень Ферми в n -области; W_n и W_p — границы зоны проводимости и валентной зоны соответственно; ΔW — потенциальный барьер; $\Delta\phi_k$ — контактная разность потенциалов; q — заряд электрона; $U_{\text{вн}}$ — внешнее напряжение

Переход p — n обладает свойством изменять свое электрическое сопротивление в зависимости от направления протекающего через него тока. Это свойство называется *вентильным*, а прибор, обладающий таким свойством, — *электрическим вентилем*.

Рассмотрим p — n -переход, к которому подключен внешний источник напряжения $U_{\text{вн}}$ с полярностью «+» к области p и с полярностью «—» к области n . Такое подключение называют *прямым включением p — n -перехода* (или *прямым смещением p — n -перехода*). Это приведет к снижению высоты потенциального барьера и увеличению количества основных носителей, диффундирующих через границу раздела в соседнюю область, а следовательно, к возникновению прямого тока p — n -перехода.

На рис. 1.12 изображена энергетическая диаграмма, соответствующая прямому смещению p — n -перехода.

Если к p — n -переходу подключить внешний источник с противоположной полярностью «—» к области p и с полярностью «+» к области n , то такое подключение называют *обратным включением p — n -перехода* (или *обратным смещением p — n -перехода*).

В данном случае высота потенциального барьера возрастает, а ток диффузии основных носителей практически становится равным нулю. Теперь

через p – n -переход будет протекать очень маленький ток, обусловленный перебросом электрическим полем неосновных носителей на границе раздела. Процесс переброса неосновных носителей заряда на границе раздела называется *экстракцией*. Этот ток имеет дрейфовую природу и называется обратным током p – n -перехода.

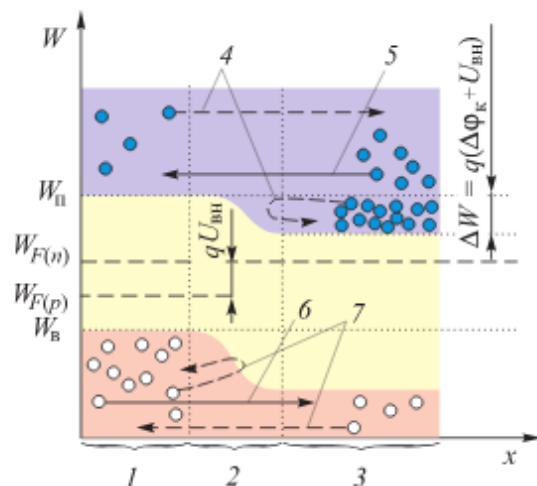


Рис. 1.13. Зонная диаграмма обратного смещения p – n -перехода, иллюстрирующая дисбаланс токов:

1 — p -область; 2 — область p – n -перехода; 3 — n -область; 4 — дрейф электронов; 5 — дрейф дырок; 6 — диффузия дырок; 7 — дрейф дырок; W — энергия электрона; $W_{F(p)}$ — энергетический уровень Ферми в p -области; $W_{F(n)}$ — энергетический уровень Ферми в n -области; W_n и W_p — границы зоны проводимости и валентной зоны соответственно; $\Delta\phi_k$ — контактная разность потенциалов; q — заряд электрона; $U_{вн}$ — внешнее напряжение

На рис. 1.13 изображена энергетическая диаграмма, соответствующая обратному смещению p – n -перехода.

1.2.2. Контакт металл — полупроводник

В современных полупроводниковых приборах помимо контактов с p – n -переходом применяются контакты металл — полупроводник.

Контакт металл — полупроводник возникает в месте соприкосновения полупроводникового кристалла n - или p -типа проводимости с металлами. Происходящие при этом процессы определяются соотношением работ выхода электрона из металла A_m и из полупроводника A_n . Под работой выхода электрона понимают энергию, необходимую для переноса электрона с уровня Ферми на энергетический уровень свободного электрона. Чем меньше работа выхода, тем больше может образоваться электронов.

В результате диффузии и перераспределения зарядов в зависимости от типа электропроводности полупроводника и соотношения работ выхода в кристалле может возникать *обедненный*, *инверсный* или *обогащенный* слой носителей электрических зарядов.

Ниже рассмотрены четыре варианта соотношений работ выхода в полупроводнике A_n и металле A_m :

1) $A_n > A_m$, полупроводник n -типа. В этом случае преобладает выход электронов из металла в полупроводник. В приграничном слое полупроводника накапливаются основные носители (электроны), и слой становится *обогащенным*. Сопротивление слоя будет малым при любой полярности при-

ложенного напряжения, и, следовательно, такой переход не будет обладать выпрямляющим свойством;

2) $A_{\text{п}} < A_{\text{м}}$, полупроводник p -типа. При этом преобладает выход электронов из полупроводника в металл, в приграничном слое образуется область, обогащенная основными носителями заряда (дырками), имеющая малое сопротивление. Такой переход не обладает выпрямляющим свойством.

Основное назначение переходов в первых двух случаях — это электрическое соединение полупроводника с металлическими токоведущими частями прибора;

3) $A_{\text{п}} < A_{\text{м}}$, полупроводник n -типа. В этом варианте электроны из полупроводника переходят в металл и в приграничном слое образуется область, обедненная основными носителями заряда и имеющая большое сопротивление. Такой контакт обладает выпрямляющим свойством и называется *переходом Шоттки*, по имени немецкого ученого Вальтера Шоттки, который первым получил основные математические соотношения для электрических характеристик таких переходов. Контактная разность потенциалов в нем

$$\Delta\varphi_{\text{к}} = \frac{A_{\text{м}} - A_{\text{п}}}{q}. \quad (1.14)$$

Если $A_{\text{п}} \ll A_{\text{м}}$, то возможно образование *инверсного* слоя (p -типа);

4) $A_{\text{п}} > A_{\text{м}}$, полупроводник p -типа. Контакт, образованный при таких условиях, обладает выпрямляющим свойством.

Особенность контакта металл — полупроводник заключается в том, что в отличие от обычного p — n -перехода здесь высота потенциального барьера для электронов и дырок разная. В результате такие контакты могут быть при определенных условиях неинжектирующими, т. е. при протекании прямого тока через контакт в полупроводниковую область не будут инжектироваться неосновные носители, что положительно сказывается на работе высокочастотных и импульсных полупроводниковых приборов.

1.2.3. Вольт-амперная характеристика p — n -перехода

Вольт-амперная характеристика (ВАХ) p — n -перехода — это зависимость тока через p — n -переход от приложенного к нему напряжения. Ее рассчитывают исходя из предположения, что электрическое поле вне обедненного слоя отсутствует, т. е. все напряжение приложено к p — n -переходу. Общий ток через p — n -переход определяется суммой четырех слагаемых:

$$I_{p-n} = I_{\text{ндиф}} + I_{\text{рдиф}} - I_{\text{ндр}} - I_{\text{рдр}}, \quad (1.15)$$

где $I_{\text{ндр}} = qn_{\text{р0}}v_{\text{ндр}}$ — электронный ток дрейфа; $I_{\text{рдр}} = qp_{\text{н0}}v_{\text{рдр}}$ — дырочный ток дрейфа; $I_{\text{ндиф}} = qn_{\text{р}}v_{\text{ндиф}} = qv_{\text{ндиф}}n_{\text{р0}}e^{\frac{qU_{\text{вн}}}{kT}}$ — электронный ток диффузии;

Вид зависимости (1.16) представлен на рис. 1.14. Первый квадрант соответствует участку прямой ветви ВАХ, а третий квадрант — обратной ветви.

При увеличении прямого напряжения ток p — n -перехода в прямом направлении сначала возрастает относительно медленно, а затем начинается участок быстрого нарастания прямого тока, что приводит к дополнительному нагреву полупроводниковой структуры. Если количество выделяемой при этом теплоты будет превышать количество теплоты, отводимой от полупроводникового кристалла либо естественным путем, либо с помощью специальных устройств охлаждения, то в полупроводниковой структуре могут произойти необратимые изменения вплоть до разрушения кристаллической решетки.

Поэтому прямой ток p — n -перехода следует ограничивать на безопасном уровне, исключая перегрев полупроводниковой структуры. Для этого используют ограничительное сопротивление, последовательно подключенное к p — n -переходу.

При увеличении обратного напряжения, приложенного к p — n -переходу, обратный ток изменяется незначительно, так как дрейфовая составляющая тока является основной при обратном включении и зависит от температуры кристалла. Обратное напряжение приводит лишь к увеличению скорости дрейфа неосновных носителей без изменения их количества. Такое положение будет сохраняться до обратного напряжения, при котором начинается интенсивный рост обратного тока — так называемый пробой p — n -перехода.

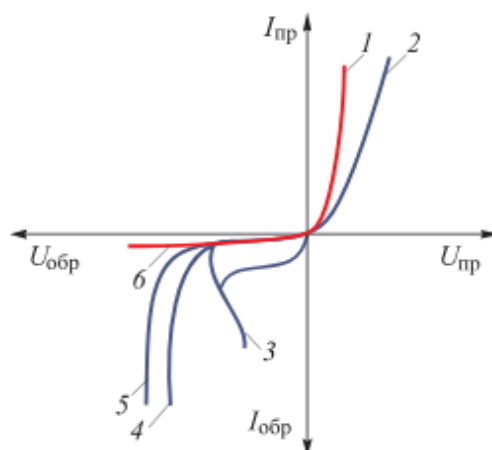


Рис. 1.14. Вольт-амперная характеристика p — n -перехода:

1 — теоретическая ВАХ; 2 — реальная ВАХ; 3 — тепловой пробой; 4 — туннельный пробой; 5 — лавинный пробой; 6 — дрейфовый ток

1.2.4. Виды пробоев p — n -перехода

Возможны обратимые и необратимые пробой. *Обратимый пробой* — это пробой, после которого p — n -переход сохраняет работоспособность. *Необратимый пробой* ведет к разрушению структуры полупроводника.

Существует четыре вида пробоя: лавинный, туннельный, тепловой и поверхностный. Лавинный и туннельный пробой также называют электрическим пробоем, который является обратимым. К необратимым относят тепловой и поверхностный пробой.

Лавинный пробой свойственен полупроводникам со значительной толщиной p — n -перехода, образованных слаболегированными полупроводниками. При этом ширина обедненного слоя гораздо больше диффузионной длины носителей. Пробой происходит под действием сильного электриче-

Распределение напряженности электрического поля в p — n -переходе может существенно изменить заряды, имеющиеся на поверхности полупроводника. Поверхностный заряд может привести к увеличению или уменьшению толщины перехода, в результате чего на поверхности перехода может наступить пробой при напряженности поля, меньшей той, которая необходима для возникновения пробоя в толще полупроводника. Это явление называют *поверхностным* пробоем. Большую роль при возникновении поверхностного пробоя играют диэлектрические свойства среды, граничащей с поверхностью полупроводника. Для снижения вероятности поверхностного пробоя применяют специальные защитные покрытия с высокой диэлектрической постоянной.

1.2.5. Емкость p — n -перехода

Изменение внешнего напряжения на p — n -переходе приводит к изменению ширины обедненного слоя и, соответственно, накопленного в нем электрического заряда (это также обусловлено изменением концентрации инжектированных носителей заряда вблизи перехода). Исходя из этого p — n -переход ведет себя подобно конденсатору, емкость которого определяется как отношение изменения накопленного в p — n -переходе заряда к обусловившему это изменению внешнему напряжению.

Различают барьерную и диффузионную емкость p — n -перехода.

Барьерная емкость $C_{\text{бар}}$ соответствует обратному включенному p — n -переходу, который рассматривается как обычный конденсатор, где пластинами являются границы обедненного слоя, а сам обедненный слой служит несовершенным диэлектриком с увеличенными диэлектрическими потерями:

$$C_{\text{бар}} = \frac{\varepsilon \varepsilon_0 S}{\delta}, \quad (1.19)$$

где ε — относительная диэлектрическая проницаемость полупроводникового материала; ε_0 ($\varepsilon_0 \approx 8,86 \cdot 10^{-12}$ Ф/м) — электрическая постоянная; S — площадь p — n -перехода, м²; δ — ширина обедненного слоя, м.

Барьерная емкость возрастает при увеличении площади p — n -перехода и диэлектрической проницаемости полупроводника и уменьшении ширины обедненного слоя. В зависимости от площади p — n -перехода значение $C_{\text{бар}}$ может составлять от единиц до сотен пикофард.

Особенность барьерной емкости заключается в том, что она является нелинейной. При возрастании обратного напряжения ширина p — n -перехода увеличивается и емкость $C_{\text{бар}}$ уменьшается. На рис. 1.15 показана зависимость $C_{\text{бар}} = f(U_{\text{обр}})$. Видно, что под влиянием $U_{\text{обр}}$ емкость $C_{\text{бар}}$ изменяется в несколько раз.

Диффузионная емкость $C_{\text{диф}}$ характеризует накопление подвижных носителей заряда в n - и p -областях при прямом напряжении на переходе. Она существует практически только при прямом напряжении, когда носители

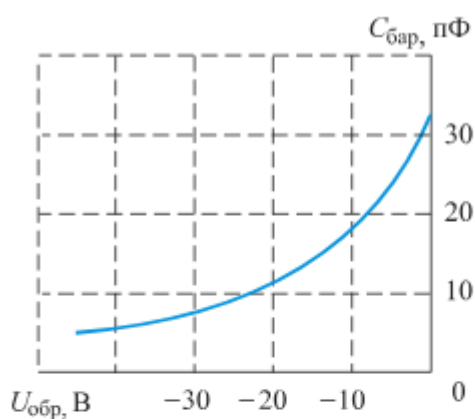


Рис. 1.15. Зависимость барьерной емкости $C_{\text{бар}}$ p — n -перехода от обратного напряжения $U_{\text{обр}}$

заряда диффундируют в большом количестве через пониженный потенциальный барьер и, не успев рекомбинировать, накапливаются в n - и p -областях. Каждому значению прямого напряжения соответствуют определенные значения двух разноименных зарядов $\pm Q_{\text{диф}}$, накопленных в n - и p -областях за счет диффузии носителей через переход. Диффузионная емкость $C_{\text{диф}}$ представляет собой отношение зарядов к разности потенциалов:

$$C_{\text{диф}} = \frac{\Delta Q_{\text{диф}}}{\Delta U_{\text{пр}}} \quad (1.20)$$

С увеличением прямого напряжения $U_{\text{пр}}$ прямой ток растет быстрее, чем напряжение, так как вольт-амперная характеристика для прямого тока имеет нелинейный вид, поэтому $Q_{\text{диф}}$ растет быстрее, чем $U_{\text{пр}}$ и $C_{\text{диф}}$ увеличиваются.

Диффузионная емкость значительно больше барьерной, но использовать ее не удастся, поскольку она шунтируется малым прямым сопротивлением p — n -перехода. Численные оценки диффузионной емкости показывают, что ее значение доходит до нескольких микрофард.

Таким образом, p — n -переход можно применять в качестве конденсатора переменной емкости, управляемого внешним напряжением.

1.3. Полупроводниковые диоды

Полупроводниковый диод — это полупроводниковый прибор с одним выпрямляющим электрическим переходом и двумя выводами, в котором используется то или иное свойство выпрямляющего электрического перехода.

В полупроводниковых диодах выпрямляющим электрическим переходом может быть электронно-дырочный (p — n -переход) или контакт металл — полупроводник, обладающий вентильным свойством.

В зависимости от типа перехода полупроводниковые диоды имеют различную структуру (рис. 1.16).

В большинстве случаев полупроводниковые диоды с p — n -переходами выпускают несимметричными. Поэтому количество неосновных носителей, которые инжектируют из сильнолегированной (низкоомной) области, называемой *эмиттером* диода, в слаболегированную (высокоомную) область, называемую *базой* диода, значительно больше, чем в противоположном направлении.

Классификация диодов осуществляется по различным признакам:

- по типу полупроводникового материала — кремниевые (Si), германиевые (Ge), из арсенида галлия (GaAs);

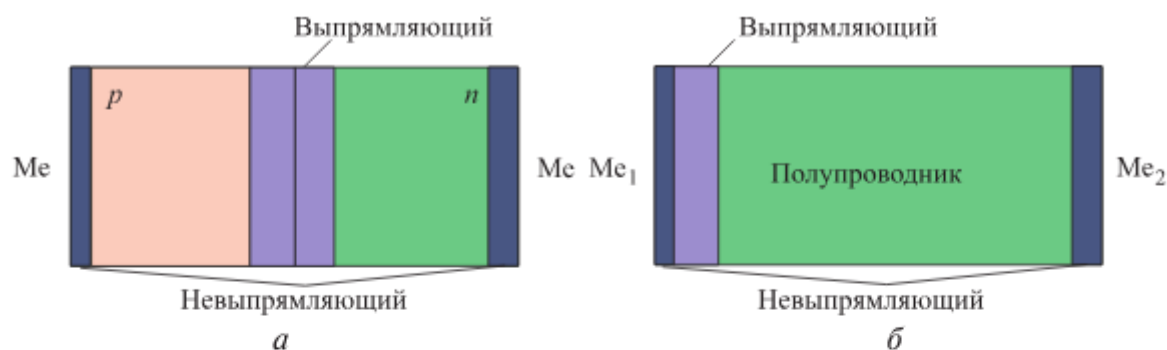


Рис. 1.16. Структура полупроводниковых диодов с выпрямляющим p — n -переходом (а) и выпрямляющим переходом на контакте металл — полупроводник (б):

Me_1, Me_2 — металлизированные контакты

- по назначению — выпрямительные, импульсные, стабилитроны, варикапы;
- по технологии изготовления электронно-дырочного перехода — сплавные, диффузионные;
- по типу электронно-дырочного перехода — точечные и плоскостные.

Основными классификационными признаками являются *тип электрического перехода* и *назначение диода*.

В зависимости от геометрических размеров p — n -перехода диоды подразделяют на плоскостные и точечные. *Плоскостными* называют такие диоды, у которых размеры, определяющие площадь p — n -перехода, значительно больше его ширины. Площадь p — n -перехода плоскостных диодов может составлять от долей квадратного миллиметра до десятков квадратных сантиметров.

Плоскостные диоды (рис. 1.17, а) изготавливают методом сплавления или методом диффузии. Они имеют сравнительно большую барьерную емкость (до десятков пикофард), что ограничивает их предельную частоту значением 10 кГц.

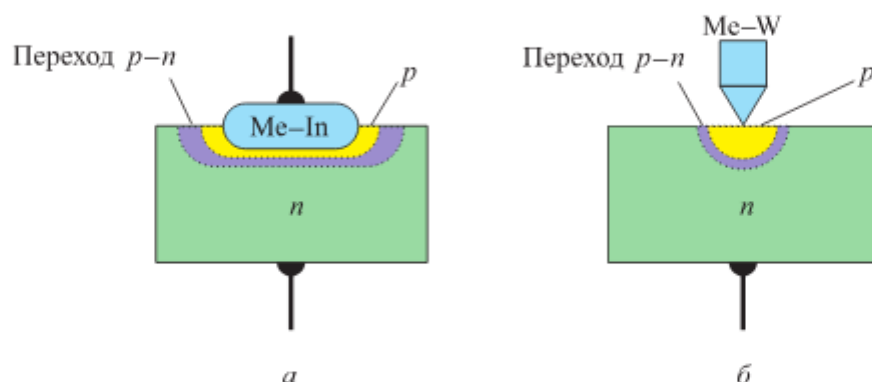


Рис. 1.17. Структура плоскостного диода, изготовленного методом сплавления (а), и структура точечного диода (б):

Me — металл; In — индий; W — вольфрам

Промышленностью выпускаются плоскостные диоды в широком диапазоне токов (до тысяч ампер) и напряжений (до тысяч вольт), что позволяет их использовать как в установках малой мощности, так и в установках средней и большой мощности.

Точечные диоды имеют очень малую площадь p — n -перехода, причем ее линейные размеры меньше толщины p — n -перехода. Точечные p — n -переходы (рис. 1.17, б) образуются в месте контакта монокристалла полупроводника и острия металлической проволоочки — пружинки. Чтобы обеспечить более надежный контакт, диод подвергают формовке, для чего через собранный диод пропускают короткие импульсы тока.

В результате формовки из-за сильного местного нагрева материал острия пружинки расплавляется и диффундирует в кристалл полупроводника, образуя слой электропроводностью другого типа, чем полупроводник. Между этим слоем и кристаллом возникает p — n -переход полусферической формы. Благодаря малой площади p — n -перехода барьерная емкость точечных диодов очень незначительна, что позволяет использовать их на высоких и сверхвысоких частотах.

По аналогии с электровакуумными диодами ту сторону диода, к которой при прямом включении подключается отрицательный полюс источника питания, называют *катодом*, а противоположную — *анодом*.

1.3.1. Характеристики полупроводниковых диодов

Основные параметры полупроводникового диода, влияющие на его работу, можно определить из его ВАХ (рис. 1.18), при этом выделяют статические (номинальные), динамические и предельные параметры.

Статические параметры полупроводникового диода:

- $U_{пр.ср.ном}$, $I_{пр.ср.ном}$ — номинальные среднее прямое напряжение и средний прямой ток, при котором обеспечивается допустимый нагрев полупроводника;
- U_0 — напряжение отсечки, определяемое точкой пересечения линейного участка прямой ветви ВАХ с осью напряжений; параметр используется при составлении схем с последовательным включением диодов;

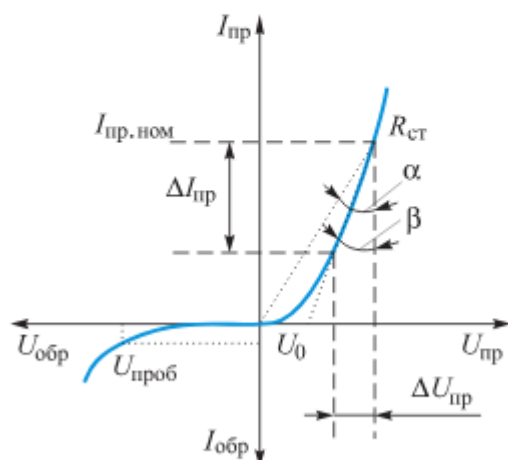


Рис. 1.18. Вольт-амперная характеристика полупроводникового диода и его основные параметры: U_0 — напряжение отсечки; $U_{пр}$ — постоянное прямое напряжение; $U_{обр}$ — постоянное обратное напряжение; $U_{проб}$ — напряжение пробоя; $I_{пр.ном}$ — прямой номинальный ток; $I_{пр.ном}$ — прямой номинальный постоянный ток через диод; $\Delta I_{пр}$ — приращение прямого тока через диод в окрестности рабочей точки; $R_{ст}$ — статическое сопротивление диода (сопротивление диода постоянному току); α — угол наклона, соответствующий статическому сопротивлению диода; β — угол наклона, соответствующий динамическому сопротивлению диода

- $U_{\text{проб}}$ — напряжение пробоя, соответствующее началу участка пробоя на ВАХ диода;

- $U_{\text{проб,ном}}$ — номинальное обратное напряжение на диоде ($U_{\text{проб}}/2$); параметр используется при составлении схем с параллельным включением диодов;

- $R_{\text{ст}} = \frac{U_{\text{пр}}}{I_{\text{пр}}} = \text{tg } \alpha$ — статическое сопротивление диода (сопротивление

диода постоянному току).

К *динамическим* параметрам диодов относят:

- $R_{\text{дин}} = \frac{\Delta U_{\text{пр}}}{\Delta I_{\text{пр}}} = \text{tg } \beta$ — динамическое (дифференциальное) сопротивление

как отношение приращения падения напряжения на диоде к приращению прямого тока диода в окрестности рабочей точки ($I_{\text{пр}}, U_{\text{пр}}$). Динамическое сопротивление играет важную роль и в рассмотрении процессов при обратном включении диода, например в стабилитронах, где динамическое сопротивление определяется через приращение обратного тока и обратного напряжения;

- $\frac{di}{dt}$ — скорость нарастания прямого тока. Этот параметр является очень

важным при включении силовых диодов в цепи, где возможно очень быстрое нарастание прямого тока (например, в цепях, имеющих емкостный характер). Если ток через диод не превышает допустимого значения, но имеет очень крутой фронт нарастания, то в полупроводниковом кристалле возможно возникновение явления, называемого *шнурованием тока*, когда в первый момент времени вследствие неоднородностей в p — n -переходе ток сосредотачивается в узкой области p — n -перехода, имеющей наименьшее сопротивление, образуя так называемый *токовый шнур*. Плотность тока в «шнуре» может оказаться недопустимо большой, что приведет к проплавлению полупроводниковой структуры и выходу прибора из строя. Поэтому для силовых диодов этот параметр часто нормируется в паспортных данных с указанием его предельного значения. Для защиты силовых диодов от выхода из строя ввиду высокой скорости нарастания тока можно последовательно с диодом включить дроссель, который приводит к затягиванию фронта нарастания тока;

- $\frac{du_{\text{обр}}}{dt}$ — скорость нарастания обратного напряжения. Если фронт на-

растания обратного напряжения на силовом диоде будет очень крутой (это характерно для цепей с индуктивным характером), то импульс обратного тока диода с учетом собственной барьерной емкости p — n -перехода $C_{\text{бар}}$ будет ра-

вен $i = C_{\text{бар}} \frac{du_{\text{обр}}}{dt}$ и может представлять собой опасность для полупроводни-

ковой структуры. Для защиты силовых диодов в этом случае их шунтируют RC -цепочкой, причем емкость C выбирают больше собственной барьерной емкости p — n -перехода. Тогда импульс обратного тока будет проходить в основном по защитной цепочке, не нанося вреда самому диоду;

- $C_{\text{бар}}$ — собственная барьерная емкость p — n -перехода силового диода.

В настоящее время на практике преимущественно применяется система *предельных* параметров, основные из которых перечислены ниже:

- $I_{\text{пр.срmax}}$ — максимально допустимый средний прямой ток, равный среднему за период значению прямого тока, длительно протекающего через прибор;
- $I_{\text{прг max}}$ — максимально допустимый ток перегрузки, длительное протекание которого вызвало бы превышение максимально допустимой температуры полупроводниковой структуры, но ограниченный по времени так, что превышения этой температуры не происходит;
- $U_{\text{обр max}}$ — максимально допустимое постоянное обратное напряжение, соответствующее началу процесса пробоя.

Большинство указанных параметров обычно приводится в техническом паспорте на прибор, а более подробная информация о параметрах, характеристиках и эксплуатационных свойствах — в технических условиях на прибор.

1.3.2. Особенности вольт-амперных характеристик кремниевых и германиевых диодов

Особенности вольт-амперных характеристик *кремниевых* диодов при различной температуре окружающей среды заключаются в следующем:

- 1) максимально допустимые прямые токи кремниевых плоскостных диодов различных типов составляют 0,1...1600 А;
- 2) падение напряжения на диодах при этих токах обычно не превышает 1,5 В;
- 3) с увеличением температуры прямое падение напряжения уменьшается, что связано с уменьшением высоты потенциального барьера p — n -перехода и перераспределением носителей заряда по энергетическим уровням;
- 4) обратная ветвь ВАХ кремниевых диодов не имеет участка насыщения обратного тока, так как обратный ток в кремниевых диодах вызван процессом генерации носителей заряда в p — n -переходе;
- 5) пробой кремниевых диодов имеет лавинный характер, поэтому напряжение пробоя с повышением температуры увеличивается. Для некоторых типов кремниевых диодов при комнатной температуре напряжение пробоя может составлять 1500...2000 В;

6) диапазон рабочих температур для кремниевых выпрямительных диодов ограничивается значениями $-60...+125$ °С. Нижний предел рабочих температур обусловлен различием температурных коэффициентов линейного расширения различных элементов конструкции диода: при низких температурах возникают механические напряжения, которые могут привести к растрескиванию кристалла. Верхний предел диапазона рабочих температур выпрямительных диодов определяется резким ухудшением выпрямления в связи с ростом обратного тока: сказывается тепловая генерация носителей заряда в результате ионизации атомов полупроводника. Исходя из этого верхний предел диапазона рабочих температур кремниевых выпрямительных диодов,

как и большинства других полупроводниковых приборов, связан с шириной запрещенной зоны исходного полупроводникового материала.

Особенности ВАХ германиевых диодов при различной температуре окружающей среды заключаются в следующем:

1) прямое напряжение на германиевом диоде при допустимом прямом токе практически в 2 раза меньше, чем на кремниевом диоде. Это связано с меньшей высотой потенциального барьера германиевого перехода, что является единственным преимуществом;

2) для германиевых диодов характерно существование обратного тока насыщения, что связано с механизмом образования обратного тока — процессом экстракции неосновных носителей заряда. Плотность обратного тока в германиевых диодах значительно больше, так как при прочих равных условиях концентрация неосновных носителей заряда в германии на несколько порядков больше, чем в кремнии;

3) у германиевых диодов пробой имеет тепловой характер. Это связано с ростом плотности обратного тока, вследствие чего напряжение пробоя с увеличением температуры уменьшается, а значения этого напряжения меньше напряжений пробоя кремниевых диодов;

4) верхний предел диапазона рабочих температур германиевых диодов составляет около 75 °С;

5) германиевые диоды плохо выдерживают даже очень кратковременные импульсные перегрузки при обратном смещении $p-n$ -перехода. Это определяется тепловым пробоем, происходящим при шнуровании тока с выделением большой удельной мощности в месте пробоя.

1.3.3. Выпрямительные диоды

Выпрямительный диод — это полупроводниковый диод, предназначенный для преобразования переменного тока в постоянный. Условные графические обозначения выпрямительного диода показаны на рис. 1.19.

Выпрямительные диоды помимо применения в источниках питания для выпрямления переменного тока в постоянный также используются в цепях управления и коммутации, ограничительных и развязывающих цепях, в схемах умножения напряжения и преобразователях постоянного напряжения,



Рис. 1.19. Условные графические обозначения полупроводникового выпрямительного диода



Рис. 1.20. Схемы включения выпрямительного диода с ограничением нарастания прямого тока (*a*) и с ограничением нарастания обратного напряжения (*б*)

где не предъявляются высокие требования к частотным и временным параметрам сигналов.

Выпрямительные диоды должны иметь как можно меньшее значение обратного тока, что определяется концентрацией неосновных носителей заряда или в конечном счете степенью очистки исходного полупроводникового материала.

Для уменьшения влияния на работу выпрямительных диодов скачков тока и обратных напряжений предусматривают специальные схемы включения (рис. 1.20), которые ограничивают мгновенные токи и напряжения, действующие на диод.

1.3.4. Импульсные диоды

Импульсный диод — это полупроводниковый диод, имеющий малую длительность переходных процессов, предназначенный для применения в импульсных режимах работы, когда диоды переключаются с прямого напряжения на обратное через короткие промежутки времени.

Основным назначением импульсных диодов является работа в качестве коммутирующих элементов. Условия работы импульсных диодов обычно соответствуют высокому уровню инжекции, т. е. относительно большим прямым токам. Вследствие этого свойства параметры импульсных диодов определяются переходными процессами.

Рассмотрим процесс переключения такого диода при воздействии на него прямоугольного импульса (рис. 1.21).

При прямом напряжении на участке $0...t_1$ происходят инжекция носителей из эмиттерной области в базовую и их накопление там. При смене полярности напряжения на обратную в первый момент значение обратного тока будет существенным, а обратное сопротивление диода резко уменьшится, так

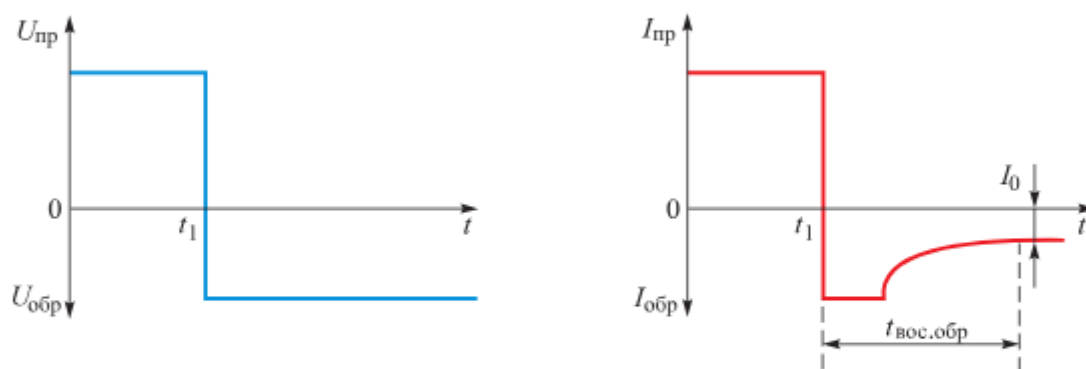


Рис. 1.21. Временные диаграммы переключения импульсного диода:

$U_{пр}$, $I_{пр}$ — прямые напряжение и ток на диоде; $U_{обр}$, $I_{обр}$ — обратные напряжение и ток на диоде; t_1 — момент переключения прямого напряжения на обратное; $t_{вос.обр}$ — время восстановления обратного сопротивления диода; I_0 — значение обратного тока в установившемся режиме

как накопленные в базе неосновные носители под действием изменившегося направления напряженности электрического поля начнут двигаться в сторону $p-n$ -перехода, образуя импульс обратного тока. По мере перехода носителей заряда в эмиттерную область их количество уменьшится, и через некоторое время обратный ток достигнет нормального установившегося значения, а сопротивление диода в обратном направлении восстановится до нормального.

Процесс уменьшения накопленного заряда в базе называется *рассасыванием*, а время, в течение которого обратный ток изменяется от максимального значения до установившегося, — *временем восстановления обратного сопротивления* $t_{\text{вос.обр}}$. Чем оно меньше, тем диод лучше.

Для улучшения свойств импульсных диодов исходный полупроводник выбирают с малым временем жизни носителей заряда (для более интенсивного процесса рекомбинации в базе), а сам $p-n$ -переход выполняют с малой площадью, чтобы уменьшить барьерную емкость перехода $C_{\text{бар}}$.

1.3.5. Диоды Шоттки

Потенциальный барьер, полученный на основе контакта металл — полупроводник, часто называют *барьером Шоттки*, а диоды, использующие такой потенциальный барьер, — *диодами Шоттки*. В контакте металл — полупроводник не происходит накопления неосновных носителей в базе, поскольку отсутствует инжекция неосновных носителей, вследствие чего значительно уменьшается время восстановления обратного сопротивления, а это в сочетании с малой барьерной емкостью создает идеальные условия для применения таких диодов в импульсных и высокочастотных устройствах.

Диоды Шоттки обычно изготавливают на основе кремния Si или арсенида галлия GaAs. Выбор металла для контакта с полупроводником определяет многие параметры диода. В первую очередь важно значение контактной разности потенциалов, образующейся на границе контакта. Чаще всего используют металлы серебро Ag, золото Au, платину Pt, палладий Pd, вольфрам W, которые наносятся на полупроводник и обеспечивают значение потенциального барьера в диапазоне 0,2...0,9 эВ.

На рис. 1.22 показано условное графическое обозначение диода Шоттки.



Рис. 1.22. Условное графическое обозначение диода Шоттки

1.3.6. Варикапы

Варикап — это полупроводниковый диод, в котором используется зависимость барьерной емкости $p-n$ -перехода от обратного напряжения. Варикап можно рассматривать как конденсатор, емкость которого можно регулировать с помощью электрического сигнала. Максимальное значение емкости варикапа имеет при нулевом обратном напряжении. При увеличении

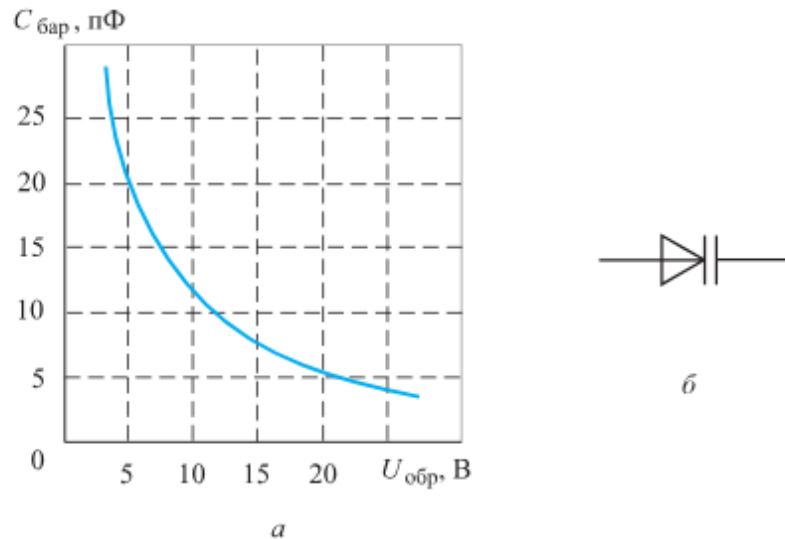


Рис. 1.23. Варикап:
a — вольт-фарадная характеристика $C_{бар} = f(U_{обр})$; *б* — условное графическое обозначение

обратного напряжения емкость варикапа уменьшается. На рис. 1.23, *a* показана типовая зависимость емкости варикапа от приложенного напряжения (его вольт-фарадная характеристика), а на рис. 1.23, *б* приведено условное графическое обозначение варикапа.

К основным параметрам варикапов относятся:

- $C_{ном}$ — номинальная емкость варикапа при номинальном обратном напряжении;
- $K_C = \frac{C_{min}}{C_{max}}$ — коэффициент перекрытия емкости;
- $\alpha_c = \frac{\Delta C}{C_{ном} \Delta T}$ — температурный коэффициент изменения удельной емкости;
- Q — добротность (это отношение реактивного сопротивления варикапа к сопротивлению потерь).

1.3.7. Стабилитроны

Стабилитронами называют полупроводниковые диоды, использующие особенность участка пробоя обратной ветви ВАХ: изменение в широком диапазоне обратного тока при сравнительно небольшом отклонении обратного напряжения. Это свойство применяется в специальных устройствах — *стабилизаторах напряжения*.

Напряжение пробоя стабилитрона зависит от ширины p — n -перехода, которая определяется удельным сопротивлением материала полупроводника.

Поэтому существует определенная зависимость напряжения пробоя от концентрации примесей.

Низковольтные стабилитроны выполняют на основе сильнолегированного кремния. Ширина p — n -перехода в этом случае получается очень маленькой, а напряженность электрического поля потенциального барьера — очень большой, что создает условия для возникновения туннельного пробоя. При большой ширине p — n -перехода пробой носит лавинный характер. При напряжении стабилизации $U_{\text{стаб}}$ от 3 до 6 В в p — n -переходах наблюдается практически туннельный пробой. В диапазоне 6...8 В имеют место процессы как туннельного, так и лавинного пробоя, а в диапазоне 8...200 В — только лавинного.

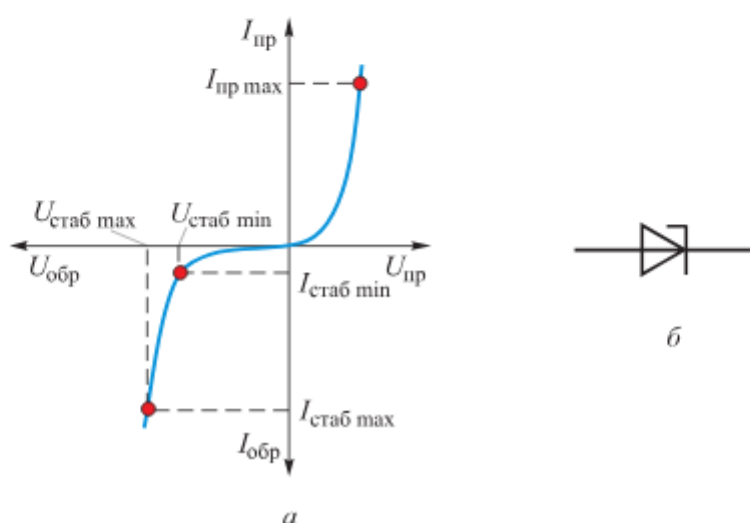


Рис. 1.24. Стабилитрон и основные параметры стабилитрона:

a — ВАХ $I_{\text{обр}} = f(U_{\text{обр}})$; b — условное графическое обозначение; $I_{\text{пр}}$, $I_{\text{пр max}}$ — прямой и максимально допустимый токи через стабилитрон соответственно; $I_{\text{стаб min}}$, $I_{\text{стаб max}}$ — минимально и максимально допустимые токи стабилизации соответственно; $I_{\text{обр}}$ — обратный ток стабилитрона; $U_{\text{пр}}$, $U_{\text{обр}}$ — прямое и обратное напряжения стабилитрона соответственно; $U_{\text{стаб min}}$, $U_{\text{стаб max}}$ — минимальное и максимальное напряжения стабилизации соответственно

Вольт-амперная характеристика стабилитрона и его условное графическое обозначение представлены на рис. 1.24. Рабочий ток стабилитрона (обратный ток) не должен превышать максимально допустимого значения $I_{\text{стаб max}}$ во избежание перегрева полупроводниковой структуры и выхода его из строя.

Одним из важных параметров стабилитронов является температурный

коэффициент стабилизации напряжения $\alpha = \left. \frac{\Delta U_{\text{стаб}}}{U_{\text{стаб ном}} \Delta T} \right|_{dI_{\text{стаб}} = \text{const}}$.

1.3.8. Стабисторы

Стабистор — это полупроводниковый диод, напряжение на котором в области прямого смещения слабо зависит от тока в заданном диапазоне его значений. Он используется для стабилизации напряжения.

Стабилизации постоянного напряжения можно также добиться, применяя диод, включенный в прямом направлении, и используя для этой цепи крутой участок прямой ветви вольт-амперной характеристики (рис. 1.25).

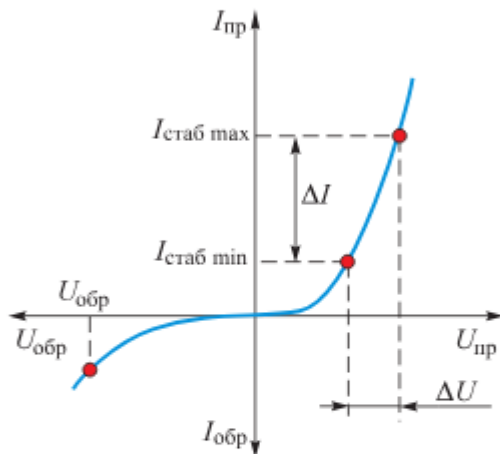


Рис. 1.25. Вольт-амперная характеристика стабистора $I_{\text{пр}} = f(U_{\text{пр}})$ и его основные параметры: $I_{\text{пр}}$, $I_{\text{обр}}$ — прямой и обратный токи стабистора соответственно; $I_{\text{стаб min}}$, $I_{\text{стаб max}}$ — минимально и максимально допустимые токи стабилизации соответственно; ΔI — диапазон изменения тока стабилизации; $U_{\text{пр}}$, $U_{\text{обр}}$ — прямое и обратное напряжения стабистора соответственно; ΔU — диапазон изменения напряжения стабилизации

При изменении прямого тока в диапазоне от $I_{\text{стаб min}}$ до $I_{\text{стаб max}}$ падение напряжения будет изменяться в относительно небольшом диапазоне ΔU .

Кремниевые диоды, предназначенные для этой цели, также называют стабисторами. Для изготовления стабисторов используют кремний с большой концентрацией примесей, что необходимо для получения меньшего сопротивления и слабой температурной зависимости прямой ветви ВАХ.

По сравнению со стабилитронами стабисторы имеют меньшее напряжение стабилизации, равное прямому падению напряжения на диоде и составляющее примерно 0,7 В. Последовательное соединение двух или трех стабисторов позволяет получить удвоенное или утроенное значение напряжения стабилизации. Некоторые типы стабисторов представляют собой единый прибор с последовательным соединением отдельных элементов.

Основные параметры стабисторов такие же, как у стабилитронов (см. рис. 1.25).

ту амплитуды. Но возведение в квадрат меняет только постоянную времени, а не экспоненциальную форму затухания¹⁴.

Плохое заземление может вызывать резонансный «звон» в LC-контуре

Пример такого случая показан слева на рис. 3N.18. Такая реакция LC-контурa наблюдается всегда при измерении прямоугольного сигнала щупом, не заземленным должным образом вблизи измеряемой точки, в результате протекания блуждающего тока по длинному (индуктивному) пути. Паразитная индуктивность и емкость образуют резонансный контур, который и создает этот неприятный звон. Если вам не терпится, то можете проверить этот эффект прямо сейчас; в противном случае вы все равно столкнетесь с этим эффектом не по своей воле в какой-то момент (который почти гарантировано настанет).

На рис. 3N.18 демонстрируется, как уменьшение длины заземляющего провода щупа осциллографа уменьшает звон. Более короткий заземляющий проводник обладает меньшей индуктивностью, вследствие чего повышается резонансная частота и уменьшается накапливаемая энергия.

3N.5. Схемы с диодами

Диоды дают возможность по-новому управлять сигналами: ток через диод протекает только в одном направлении (рис. 3N.19)¹⁵.

¹⁴ См. «Introductory Electronics», автор R.E. Simpson, 2-е изд., 1984, с. 98–100.

¹⁵ AoE § 1.6.1.



Рис. 3N.19. Диод как односторонний вентиль управления током

Символ диода на принципиальных схемах выглядит как дорожный знак одностороннего движения, что удобно для понимания: он указывает условному току, в каком направлении можно протекать. Для многих приложений достаточно рассматривать диод как односторонний вентиль, хотя следует иметь в виду, что открытый диод ведет себя не совсем подобно проводу. Разница состоит в том, что при протекании тока через диод на нем возникает характерное падение напряжения величиной около 0,6 В, называемое прямым напряжением диода. Мы наблюдали это явление на лабораторном занятии 1L.4 и нарисовали соответствующий график. На рис. 3N.20 приведен пример такого графика (называемого вольт-амперной характеристикой диода), чтобы напомнить вам об этом эксперименте.

Примечание

Мы не экспериментировали с пиковым обратным напряжением (или напряжением пробоя), что было хорошо как для вашей безопасности, так и для здоровья диода.



Рис. 3N.20. Графики вольт-амперных характеристик диода: величина тока при обратном напряжении лежит в наноамперном диапазоне

3N.6. Самое важное применение диода: выпрямление переменного тока

Как мы уже упоминали, электроэнергия вырабатывается и распределяется в виде переменного напряжения, чтобы уменьшить потери в линиях передачи. Это позволяет использовать для передачи электроэнергии высокие напряжения и, соответственно, малые токи. Переменное напряжение легко понизить или повысить с помощью трансформаторов, простых устройств, состоящих из двух катушек на сердечниках, расположенных рядом друг с другом, в результате чего между ними создается электромагнитная связь. Пример с решением 1W.2 наглядно демонстрирует преимущество в эффективности за счет применения высокого напряжения при передаче электроэнергии.

Поскольку электроэнергия передается в виде переменного напряжения, тогда как для работы электронных устройств требуется постоянное напряжение, преобразование переменного напряжения в постоянное является важной задачей диодных схем.

3N.6.1. Однополупериодный выпрямитель и ограничитель напряжения

Подобно резисторам и конденсаторам, диоды часто используются в делителях напряжения¹⁶. На рис. 3N.21 показано несколько делителей напряжения, содержащих диоды. Можете ли вы предположить, как будет выглядеть выходное напряжение каждого из этих делителей?

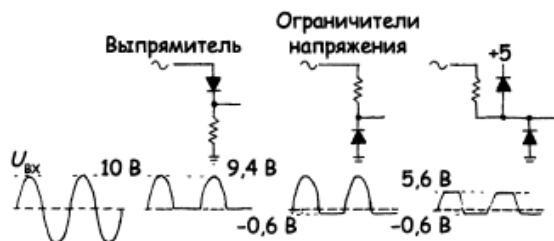


Рис. 3N.21. Три делителя напряжения на диодах: один выпрямитель (слева) и два ограничителя напряжения (посередине и справа)

¹⁶ AoE § 1.6.2.

Выходные сигналы первых двух схем очень похожи друг на друга. Но лишь выпрямитель способен создавать постоянное напряжение, требуемое для источников питания. Почему так? Какое важное отличие, невидимое на экране осциллографа, существует между выпрямителем и ограничителем напряжения¹⁷? Хотя выходной сигнал выпрямителя еще далеко не той формы, которая нам требуется для создания источника питания, преобразующего переменное напряжение электросети в постоянное, но сгладить пульсации способен конденсатор. Однако сначала давайте рассмотрим наилучший вариант выпрямителя.

3N.6.2. Двухполупериодный мостовой выпрямитель

Схема выпрямителя, изображенная на рис. 3N.22, заполняет пустые промежутки между полуволнами выходного сигнала однополупериодного выпрямителя за счет выпрямленного отрицательного полупериода¹⁸.

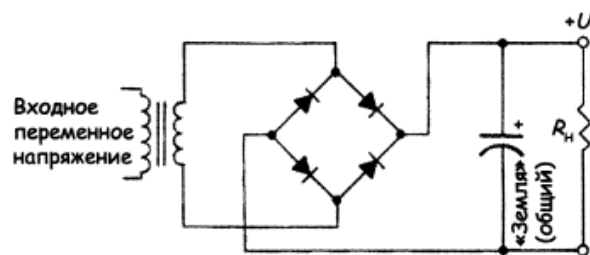


Рис. 3N.22. Двухполупериодный мостовой выпрямитель

Хорошо придумано, не так ли? Увидев форму выходного сигнала этого выпрямителя, сразу можно понять, почему предыдущий более простой выпрямитель называется однополупериодным.

¹⁷ Очевидная разница в сигналах (один сигнал сдвинут на -0,6 В, а другой нет) не является правильным ответом, поскольку тогда выходной сигнал второй схемы (ограничителя) окажется даже более предпочтительным. Но не это главное. Важна разница между выходными импедансами этих двух схем. (Помните? Мы ведь обещали вам, что импеданс будет лейтмотивом аналоговой части этого курса.) В схеме слева (выпрямитель) между источником сигнала (которым обычно является силовой трансформатор) и нагрузкой находится только диод, тогда как в ограничителе между источником и нагрузкой включен резистор. В результате выпрямитель пригоден для создания источника питания, а ограничитель — нет.

¹⁸ AoE § 1.6.2.

На рис. 3N.23 приведен график выходного сигнала двухполупериодного выпрямителя, содержащий некоторые особенности, в том числе тот не совсем очевидный факт, что в течение одной половины периода входной сигнал опускается ниже нуля.



Рис. 3N.23. График выходного сигнала двухполупериодного мостового выпрямителя

Из-за этой особенности двухполупериодный мостовой выпрямитель можно использовать только с плавающим входным напряжением, таким, которое присутствует на вторичной обмотке трансформатора. Если один из выходных проводов двухполупериодного выпрямителя заземлен, никакой из входов этого выпрямителя подключать к земле нельзя.

В настоящее время использование в источнике питания выпрямителя иного типа, чем двухполупериодный, может быть оправдано только в очень редких случаях. На заре электроники диод представлял собой вакуумную лампу стоимостью около 5 долларов, вследствие чего разработчики прилагали все усилия, чтобы ограничить количество таких элементов. Но сейчас легко можно приобрести готовый диодный мост: небольшое устройство в залитом эпоксидной смолой корпусе, содержащее четыре диода и четыре вывода. Такой компонент даже большой мощности может стоить около доллара.

Двухполупериодный мост в двухполярном источнике питания

Двухполупериодный выпрямительный мост подойдет и для сборки двухполярного источника питания, т. е. выдающего как положительное, так и отрицательное напряжение относительно

земли. На рис. 3N.24 приведена принципиальная схема такого выпрямителя.

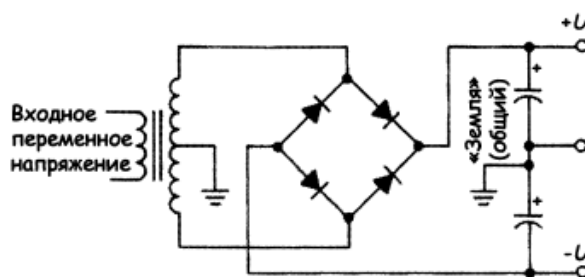


Рис. 3N.24. Двухполупериодный мостовой выпрямитель выдает двухполярное, т. е. и положительное, и отрицательное напряжение

Очевидно, что единственное отличие от однополярного источника питания, изображенного на рис. 3N.22, состоит в центральном отводе от вторичной обмотки трансформатора, который подключается к шине земли (общему проводу) двухполярного источника питания.

Примечание

В схеме на рис. 3N.24 не показаны нагрузочные сопротивления; нагрузка, конечно же, подразумевается, зачем собирать источник питания, если не для подключения нагрузки?

Можно поддаться искушению считать, что заземлять среднюю точку вторичной обмотки трансформатора не обязательно, и что двухполярный источник питания можно создать, просто подключив к земле точку между конденсаторами в схеме на рис. 3N.24. Но это будет ошибкой.

При отсутствии центрального отвода вторичной обмотки распределение выходного напряжения между положительной и отрицательной клеммами будет непредсказуемым, поскольку оно будет зависеть от относительной нагрузки каждого из этих двух выводов. При заземленном центральном отводе обмотки эти выходы становятся независимыми и трансформатор определяет не только общее напряжение, но и U_+ минус U_- . В результате на каждой выходной клемме (U_+ и U_-) присутствует напряжение, определяемое половиной вторичной обмотки трансформатора.

Если приведенное утверждение кажется вам неясным и сбивает вас с толку, можете попробовать проследить путь тока при каждом полупериоде входного напряжения. На рис. 3N.25 приведена такая трассировка.

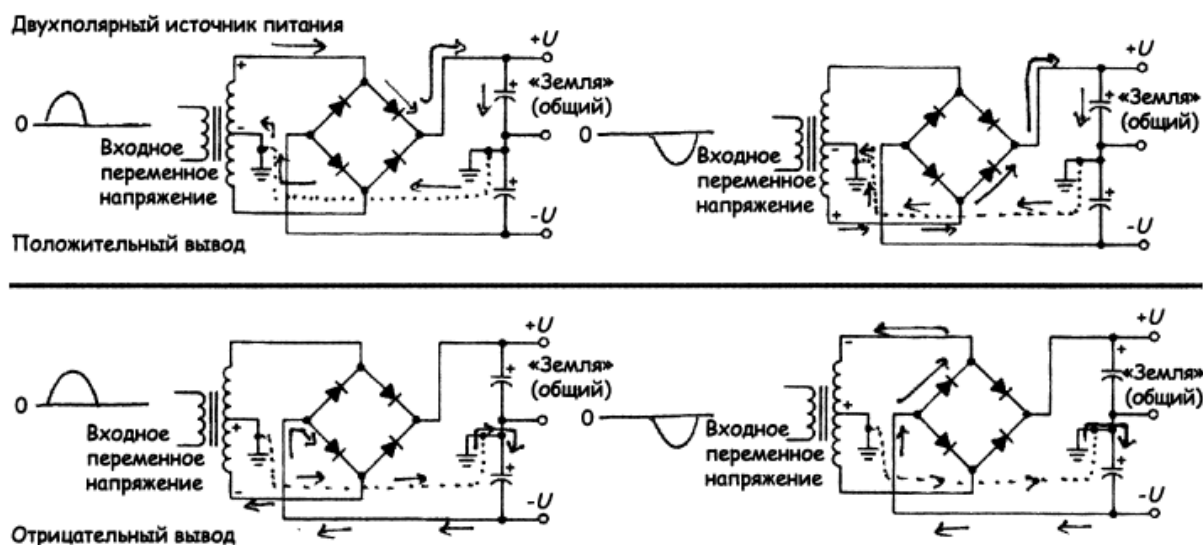


Рис. 3N.25. Протекание тока в выпрямителе двухполярного источника питания: сигналы на положительном и отрицательном выходах показаны отдельно

На рис. 3N.25 показаны четыре случая, но в действительности, конечно же, рассматриваются только два полупериода. Положительный и отрицательный выходы изображены отдельно по той причине, что мы опасались, что одновременное рассмотрение обеих полярностей может оказаться слишком непонятным. Кроме того, обратите внимание, что оба символа земли соединены между собой пунктирной линией; это сделано, чтобы наглядно показать путь тока к центральному отводу обмотки.

Скоро мы познакомимся со схемой полноценного источника питания, собранного на двухполупериодном выпрямительном диодном мосте. Но прежде чем приступить к этой теме, рассмотрим еще один тип диода: стабилитрон (или зенеровский диод).

3N.6.3. Стабилитроны (зенеровские диоды)

На наших лабораторных занятиях стабилитроны нам не понадобятся (хотя на лабораторном занятии 11L нам придется познакомиться с более сложным устройством — стабилизатором напряжения). Но мы бы хотели вкратце упомянуть стабилитроны наряду с другими диодами, с которыми нам придется работать на сегодняшнем лабораторном занятии 3L: стандартный кремниевый диод (наподобие диода 1N914, который мы постоянно используем) и диод Шоттки, который имеет малое напряжение прямого смещения. Последний тип диода

предпочтителен для сборки простого радиоприемника, чем мы будем заниматься в конце лабораторного занятия 3L.

Стабилитрон проводит ток при определенном (не очень большом) обратном напряжении¹⁹. Включив стабилитрон в делитель напряжения в «обратном» направлении (т. е. с обратным смещением, при котором ток будет протекать в направлении, противоположном по сравнению с обычными диодами), мы получим схему, выходное напряжение которой будет довольно постоянным, несмотря на возможные колебания входного напряжения и на изменения величины нагрузки.

Пример такого включения стабилитрона приведен на рис. 3N.26.

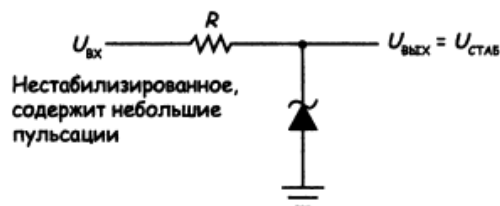


Рис. 3N.26. Подключение стабилитрона

Вольтамперная характеристика стабилитрона показана слева на рис. 3N.26. По этой характеристике можно видеть, что проводимость прибора при обратном смещении неидеальна: кривая не вертикальна. Этот график иллюстрирует, почему необходимо следовать эмпирическому

¹⁹ АоЕ § 1.2.6А.



Обычный график вольтамперной характеристики

Вольтамперная характеристика повернута на 90°, чтобы наглядно показать импеданс

Рис. 3N.27. Графики вольтамперной характеристики стабилитрона. В обычном ракурсе (слева) и повернутый на 90°, чтобы показать импедансы

правилу, гласящему, что даже при подключении нагрузки через стабилитрон должен протекать ток не менее 10 мА.

Поворот вольтамперной характеристики на рис. 3N.27 на 90° против часовой стрелки позволит нам использовать крутизну графика для определения значения импеданса в Омах. В частности, крутизна графика представляет отношение $\Delta U / \Delta I$, или дифференциальное сопротивление устройства. Эта величина описывает качество стабилитрона в роли источника опорного напряжения: как будет изменяться выходное напряжение в ответ на варьирование тока.

Примечание

В данном случае ток варьируется по двум причинам: из-за колебаний входного напряжения и/или изменения нагрузки.

Здесь мы можем видеть, насколько плохо будет функционировать диод, если подняться вверх по кривой в область, где ток $I_{\text{СТАБ}}$ очень мал.

В настоящем источнике питания никогда (почти никогда) стабилитрон не используется самостоятельно, как в только что рассмотренных схемах. Вместе с ним всегда будет последовательно включаться схема на транзисторе или операционном усилителе для уменьшения колебаний выходного тока (см. книгу АоЕ, раздел 2.2.4). Такой подход реализован в стабилизаторах напряжения, рассматриваемых в главе 11 (и в главе 9 книги АоЕ), хотя вместо

стабилитронов здесь используются интегральные микросхемы — источники опорного напряжения. Но, по крайней мере, вы должны лучше понимать подобные схемы благодаря этому краткому обзору стабилитронов. Теперь самое время рассмотреть наиболее часто встречающиеся варианты применения диодов.

3N.7. Самое важное применение диода: источник питания (нестабилизированный)

На рис. 3N.28 приведена принципиальная схема стандартного нестабилизированного источника питания²⁰. Мы узнаем позже значение выражения «нестабилизированный», поскольку вы не сможете понять его смысл полностью, пока мы не познакомимся со стабилизированными источниками питания, в которых предусмотрена отрицательная обратная связь для поддержания постоянного уровня выходного напряжения $U_{\text{ВЫХ}}$, несмотря на изменения как входного напряжения $U_{\text{ВХ}}$, так и выходного тока.

Теперь давайте рассмотрим процесс выбора значений компонентов. Здесь мы не будем подробно рассматривать эту задачу, а выполним грубую оценку номиналов элементов схемы. Но в *Примере с решением 3W* приведено детальное

²⁰ АоЕ § 9.5.

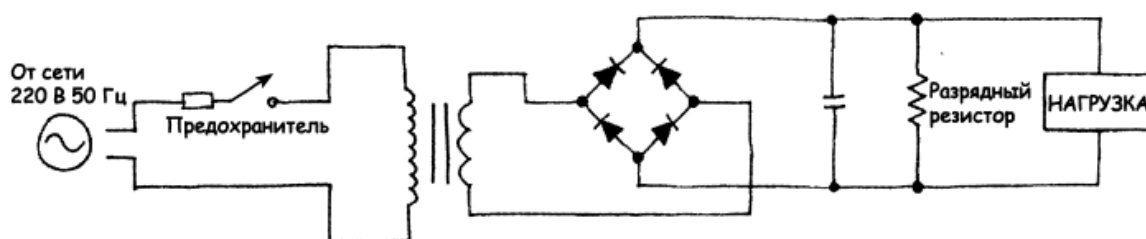


Рис. 3N.28. Принципиальная схема простого источника питания

решение подобной задачи. Предположим, что мы хотим получить следующие характеристики:

- выходное напряжение $U_{\text{вых}}$: приблизительно 12 В;
- пульсации: приблизительно 1 В;
- сопротивление нагрузки $R_{\text{н}} = 120 \text{ Ом}$.

Нам нужно оценить следующие значения:

- емкость конденсатора в мкФ;
- напряжение вторичной обмотки трансформатора ($U_{\text{действ}}$);
- номинал предохранителя.

На данном этапе мы опустим два менее важных параметра (поскольку часто их можно просто прикинуть). Но их расчет подробно рассматривается в *Примере с решением 3W*. Вот эти параметры:

- требования по номинальному току трансформатора;
- значение сопротивления разрядного резистора.

Работу будем выполнять поэтапно. Для начала следует начертить принципиальную схему, не указывая значения компонентов, как в примере на рис. 3N.28.

3N.7.1. Напряжение вторичной обмотки трансформатора

Это напряжение просто равно выходному напряжению $U_{\text{вых}}$ плюс потеря напряжения на мостовом выпрямителе²¹. На пути тока через выпрямительный мост всегда присутствуют два диода. Величина напряжения на обмотке трансформатора указывается для действующего напряжения, что для синусоидального сигнала означает $U_{\text{пика}}/\sqrt{2}$. В нашем случае напряжение

²¹ AoE § 9.5.2.

$U_{\text{пика}}$ на трансформаторе величиной около 14 В соответствует действующему значению около 10 В (рис. 3N.29).

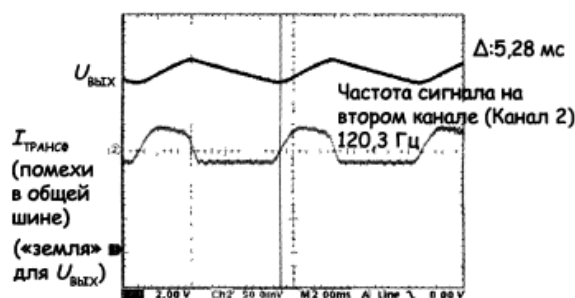


Рис. 3N.29. Форма напряжения на вторичной обмотке трансформатора

Как видно из рис. 3N.30, пульсации напряжения сопровождаются скачками тока. Сигнал (помеченный как $I_{\text{трансф}}$ на рисунке) измеряется в общей шине.

Примечание

Обратите внимание, что осциллограмма снята при высокой чувствительности второго канала вертикального отклонения (CH2: 50 мВ/деление)

Рис. 3N.30. Пульсации выходного напряжения источника питания: $I_{\text{н}} = 1 \text{ А}$, $C = 3300 \text{ мкФ}$

3N.7.2. Конденсатор

Теперь перейдем к самому интересному²². Вообще предстоящая задача довольно трудная, но мы упростим ее, сделав два предположения. На рис. 3N.31 изображен график пульсаций выходного сигнала.

²² AoE § 1.6.3A, AoE § 9.5.3A.



Рис. 3N.31. Временные параметры сигнала пульсаций

Мы можем примерно определить величину пульсаций (или рассчитать требуемую емкость при пульсациях указанной величины, как в этой задаче), используя следующую общую формулу:

$$I = C \frac{dU}{dt}$$

Здесь dU или ΔU — пульсации, dt или ΔT — период времени, в течение которого разряжается конденсатор, а I — ток, потребляемый из источника питания. Чтобы определить точное значение емкости конденсатора, при котором пульсации не превысят указанной величины при заданной максимальной нагрузке, требуется ответить на некоторые вопросы:

- ♦ Какой у нас выходной ток $I_{\text{вых}}$? Если нагрузка резистивная, выходной ток не будет постоянным, а будет спадать экспоненциально в каждом полупериоде.
- ♦ Какой у нас временной интервал ΔT ? То есть в течение какого периода времени происходит разряд конденсатора (прежде чем напряжение с трансформатора снова повысится, чтобы зарядить его)?

Как обычно, мы легко обойдем эти трудности, если рассмотрим наихудшие случаи. В частности, мы будем предполагать, что:

- ♦ выходной ток $I_{\text{вых}}$ постоянный, а его значение максимально;
- ♦ конденсатор разряжается в течение всего периода между максимумами амплитуды.

Оба допущения увеличивают величину получаемых пульсаций. Но поскольку пульсации желательно уменьшить, ничего плохого, если в нашей схеме величина пульсаций будет меньшей, чем рассчитанная. Зададим следующие приблизительные значения:

- ♦ выходной ток $I_{\text{вых}}$ будет просто $I_{\text{вых-макс}}$, т. е. 100 мА;
- ♦ период времени ΔT равен половине периода входного сигнала частотой 50 Гц, т. е. $1/100 \text{ Гц} = 10 \text{ мс}$.

В результате получим следующее значение емкости:

$$C = I \cdot \frac{\Delta T}{\Delta U} \cdot 0,1 \cdot 10 \cdot \frac{10^{-3}}{1\text{В}} \approx 1 \cdot 10^{-3} \text{ Ф} = 1000 \text{ мкФ}.$$

На первый взгляд емкость выглядит внушительной, но для накопительного конденсатора источника питания это типичное значение.

3N.7.3. Номинальный ток трансформатора (нагрев, вызываемый действующим током)

Поскольку ток, который заряжает конденсатор, поступает периодически, а не постоянно, это сильнее нагревает трансформатор, чем при равномерном протекании тока, как в нагрузке²³. Дополнительную информацию на эту тему см. в *Примере с решением 3W* по источникам питания. Величину дополнительного нагрева можно вычислить, используя действующее (среднеквадратическое) значение тока трансформатора. Это простая задача, если знать скважность сигнала, т. е. интервал, в течение которого ток течет через обмотку трансформатора. Это отношение трудно вычислить математически, но легко определить визуально.

На рис. 3N.30 показаны пульсации, которые мы наблюдали на одной из наших лабораторных макетных плат, оснащенных источником питания, при постоянном потреблении тока величиной 1 А (на момент отвлечемся от текущей задачи, ток в которой значительно ниже: всего лишь 100 мА).

В течение времени, когда трансформатор заряжает накопительный конденсатор, он должен возместить весь заряд, израсходованный нагрузкой в течение периода. Таким образом, величина тока, протекающего в течение активной части периода (составляющей примерно 3/8 от всего периода на рис. 3N.30), должна быть пропорционально большей, чем ток для постоянной нагрузки. В данном случае этот ток должен быть на 8/3 больше выходного тока постоянной нагрузки величиной 1 А. Такой бросок тока вызывает больший нагрев, чем ток

²³ Supplement 3S, AoE § 9.5.2.