

**МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ**

Федеральное государственное бюджетное образовательное
учреждение высшего профессионального образования
«Московский государственный институт электроники и математики
(технический университет)»

Кафедра «Физические основы электронной техники»

**ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ
ВОССТАНОВЛЕНИЯ ОБРАТНОГО
СОПРОТИВЛЕНИЯ ДИОДА С p-n-ПЕРЕХОДОМ**

Учебно-методическое пособие по выполнению лабораторного практикума
по «Твердотельной электронике»

Москва 2012

Составитель докт. техн. наук, проф. А.П. Лысенко

Предложена методика исследования параметров переходного процесса при переключении диода из проводящего состояния в запертое.

Предназначено для студентов, обучающихся по специальностям

210104 – «Твердотельная электроника и микроэлектроника»;

210107 – «Электронное машиностроение»;

УДК 621.382.2/3(075.8)

Исследование процессов восстановления обратного сопротивления диода с р-п-переходом. Учебно-методическое пособие по выполнению лабораторного практикума по «Твердотельной электронике» /Моск. гос. ин-т электроники и математики/;

Сост. А.П. Лысенко. М., 2012. – 32 с.

Ил.20. Библиогр.: 2 назв.

ISBN 978-5-94506-311-2

Цель работы: изучение переходных процессов в диоде при резком переключении его с прямого смещения на обратное в зависимости от параметров внешней цепи; знакомство с диффузионной емкостью p - n -перехода; определение времени жизни неосновных носителей заряда в базе диода; определение времени восстановления обратного сопротивления, измерение сопротивления базы диода.

Краткая теория переходных процессов в p - n -переходе

В данной работе исследуются нестационарные процессы, протекающие при переключении диода (p - n -перехода) из хорошо проводящего состояния (прямое смещение) в плохо проводящее (обратное смещение).

Для лучшего понимания физики явлений, обуславливающих электрические характеристики выпрямительного диода в переходный период рассмотрим основные особенности стационарного состояния p - n -перехода при прямом и обратном смещениях (начальное и конечное состояния p - n -перехода, т.е. до и после переключения).

I. Стационарное состояние p - n -перехода при прямом смещении

Внешняя разность потенциалов V_{p-n} , приложенная в прямом направлении к p - n -переходу, уменьшает высоту потенциального барьера в переходе на величину qV_{p-n} , делая ее равной $(\varphi_0 - qV_{p-n})$ (см. рис.1b).

Такой барьер способно преодолеть в $e^{\frac{qV_{p-n}}{kT}}$ раз большее число основных носителей, приближающихся (вследствие хаотического теплового движения) к переходу, чем равновесный барьер φ_0 . Поэтому потоки основных носителей (электронов из n - в p -область и дырок из p - в n -область) увеличиваются по сравнению с равновесными значениями в $e^{\frac{qV_{p-n}}{kT}}$ раз. Это приводит к тому, что, в непосредственной близости от перехода, в p -области резко повышается (по сравнению с равновесной)

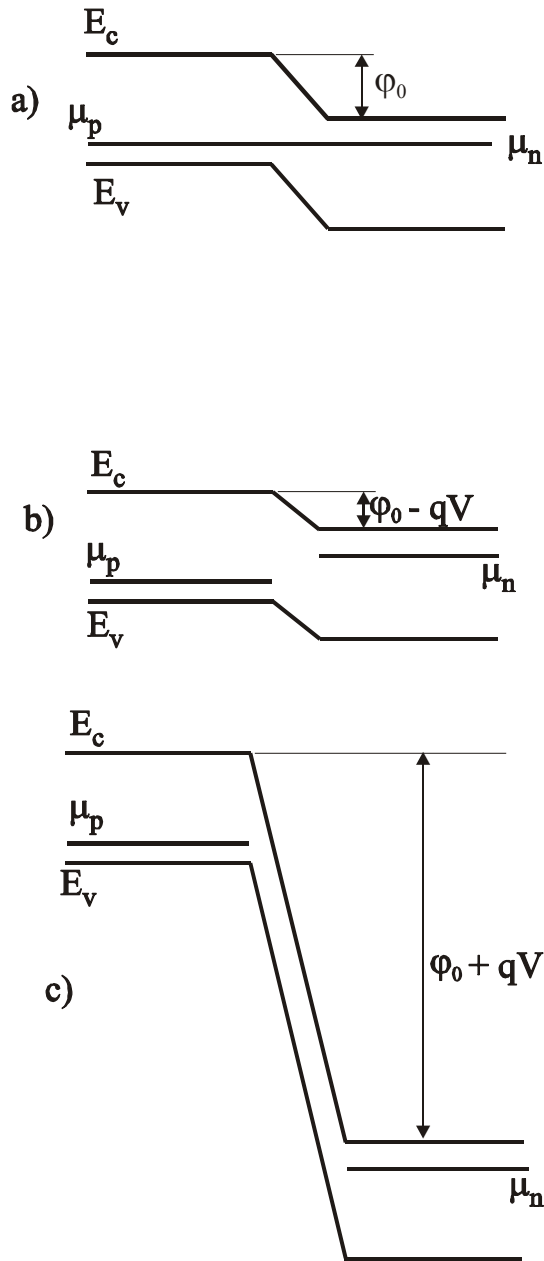


Рис.1. Энергетические диаграммы p - n -перехода при нулевом (а), при прямом (в) и при обратном смещениях

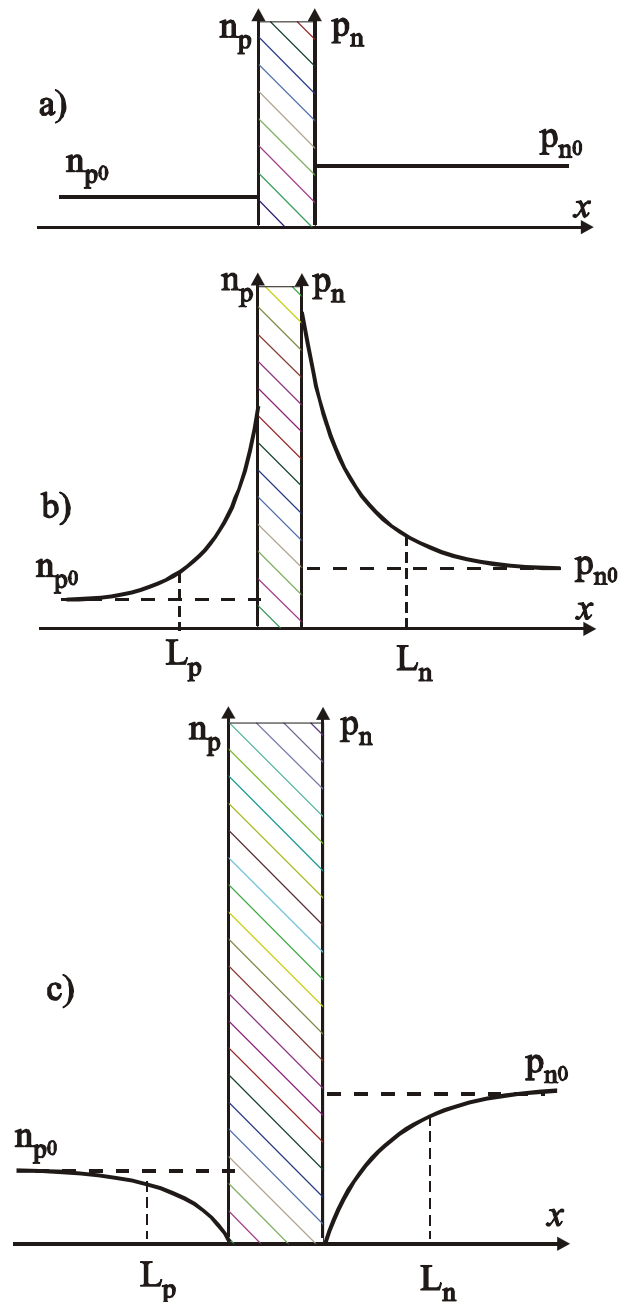


Рис.2. Распределение концентрации неосновных носителей заряда по координате в p - n -переходе при нулевом (а), при прямом (в) и при обратном смещениях

концентрация электронов, а в n -области - концентрация дырок (рис.2 б). Поскольку электроны и дырки - заряженные частицы, можно было бы ожидать, что в областях кристалла, где произошло увеличение концентрации неосновных носителей, появится объемный заряд

(отрицательный в p -области и положительный в n -области). Однако благодаря наличию внешней цепи, электроны, инжектированные в p -область, притягивают к себе дырки из объема этой области (а, в конечном счете, из внешней цепи), которые компенсируют их заряд. Точно так же заряд инжектированных в n -область дырок компенсируется притянутыми из объема электронами.

Таким образом, избыточные неосновные носители заряда в p - и n -областях перехода оказываются практически в электрически нейтральной среде. Поэтому их поведение в этих областях обусловлено, главным образом, хаотическим тепловым движением и рекомбинацией. Поскольку концентрация неосновных носителей в обеих областях вблизи p - n -перехода вследствие инжекции больше, чем вдали от перехода (где их концентрация равна равновесной p_{n0} и n_{p0}), то возникают диффузионные потоки электронов от перехода в глубь p -области, а дырок от перехода в глубь n -области. По мере диффузии неосновных (и неравновесных) носителей заряда от перехода их концентрации уменьшается вследствие рекомбинации с основными носителями. В среднем за время жизни электроны успевают продиффундировать на расстояние L_n в p -область, а дырки - на расстояние L_p в n -область (здесь L_n и L_p - диффузионные длины электронов и дырок соответственно). В результате процессов диффузии и рекомбинации устанавливается стационарное распределение по координате избыточной концентрации неосновных носителей (Δp_n и Δn_p), которое изображено на рис.2b.

Концентрации свободных носителей заряда по обе стороны от p - n -перехода и высота его потенциального барьера связаны друг с другом. Связь эту можно установить, сравнивая стационарные потоки основных и неосновных носителей заряда через переход. Рассмотрим, например, электронные потоки. Из n - в p -область, преодолевая потенциальный барьер

($\varphi = \varphi_0 - qV_{p-n}$), движется диффузионный поток электронов (I_{n1}).

Величина этого потока может быть определена по формуле:

$$I_{n1} = \frac{1}{4} n_{n0} \langle v_T \rangle e^{-\frac{\varphi}{kT}}, \quad (1)$$

где $\langle v_T \rangle$ - средняя тепловая скорость электронов. Однако почти все электроны, попавшие из n -области в p -область, возвращаются назад в n -область. Проследим, например, за судьбой одного электрона, пролетевшего через барьер в p -область и оказавшегося в точке **A** (рис.3). До того момента, когда этот электрон захватится ловушкой и рекомбинирует с дыркой в точке **B**, он проходит длинный путь,

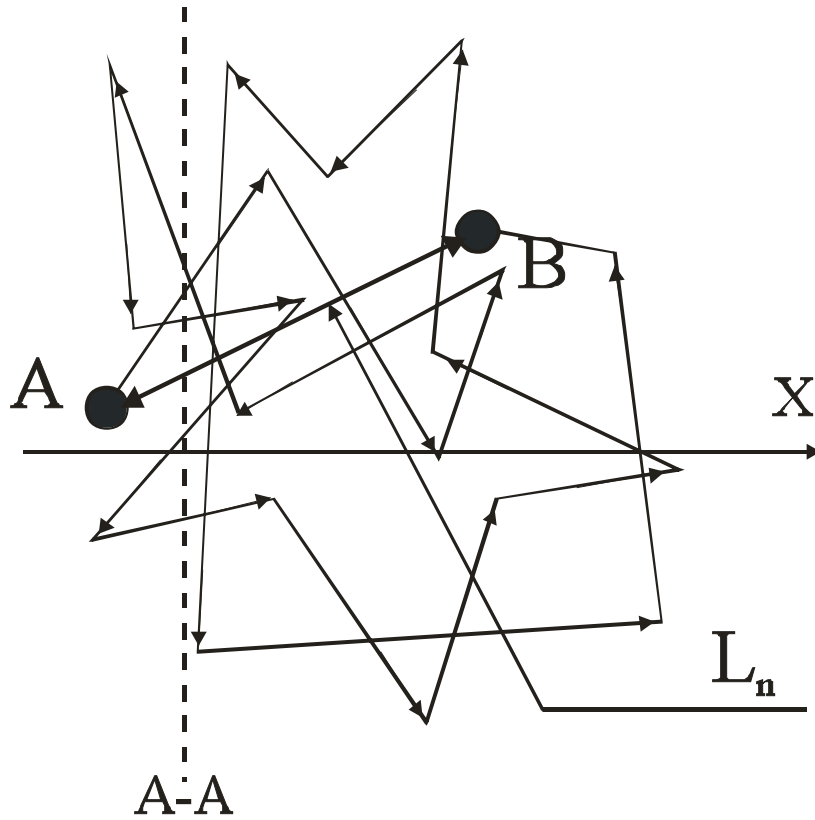


Рис.3. Траектория движения электрона за время его жизни. Б – положение электрона в момент генерации; В - положение электрона в момент рекомбинации

претерпевая многочисленные акты рассеяния. Вероятность того, что при этом он пересечет границу слоя объемного заряда (штриховая линия на

рис.3), будет подхвачен полем перехода и вытолкнут им назад в n -область, практически равна единице. Лишь небольшой доле электронов удастся уйти в глубь p -области. Таким образом, обратный поток электронов (I_{n2}), текущий через переход из p - в n -область, приблизительно равен потоку (I_{n1}). Величина обратного потока электронов (I_{n2}) может быть определена по формуле:

$$I_{n2} = \frac{1}{4} n_p(0) \cdot \langle v_T \rangle, \quad (2)$$

где $n_p(0)$ - концентрация электронов в p -области на границе слоя объемного заряда.

Поскольку, как мы выяснили, встречные потоки электронов практически равны, то, приравняв их, получим:

$$n_p(0) = n_{n0} \cdot \exp\left(-\frac{\varphi}{kT}\right). \quad (3)$$

Учитывая, что при равновесной высоте барьера ($\varphi = \varphi_0$), $n_p(0) = n_{p0}$ и,

следовательно, $n_{p0} = n_{n0} \cdot \exp\left(-\frac{\varphi_0}{kT}\right)$, получим:

$$n_p(0) = n_{p0} \cdot \exp\left(+\frac{qV_{p-n}}{kT}\right). \quad (4)$$

Для дырок получается аналогичное соотношение:

$$p_n(0) = p_{n0} \cdot \exp\left(+\frac{qV_{p-n}}{kT}\right), \quad (5)$$

где и $p_n(0)$ - концентрация дырок в n -области на границе слоя объемного заряда.

Важно, что уравнения (4) и (5) устанавливают взаимно однозначное соответствие между напряжением на переходе и концентрацией неосновных носителей на границе области объемного заряда. Иначе

говоря, не только концентрация неосновных носителей на границе слоя объемного заряда определяется величиной смещения на переходе, но и величина смещения на переходе определяется концентрацией неосновных носителей по обе стороны от перехода:

$$V_{p-n} = \frac{kT}{q} \ln \left(\frac{p_n(0)}{p_{n0}} \right),$$

или

$$V_{p-n} = \frac{kT}{q} \ln \left(\frac{n_p(0)}{n_{p0}} \right). \quad (6)$$

2. Стационарное состояние p - n -перехода при обратном смещении

При обратном смещении высота барьера в p - n -переходе возрастает на величину qV_{p-n} (см. рис.1с). Неосновным носителям в n - и p -областях по-прежнему ничто не мешает диффундировать к переходу и сваливаться с барьера. Основные же носители заряда возросший барьер преодолеть практически не могут, и поэтому - диффузионные потоки электронов из n -области в p -область и дырок из p - в n -область обращается в нуль. Концентрация неосновных носителей на границе области объемного заряда также понижается до нуля (см. [2]). За счет диффузионных процессов в n - и p -областях устанавливается экспоненциальное распределение по координате концентрации неосновных носителей, как это изображено на рис.2с.

Важно, что на границе слоя объемного заряда величина концентрации неосновных носителей $p_n(0)$ и $n_p(0)$ по-прежнему связана с напряжением на переходе соотношениями (4) и (5) (с учетом знака напряжения смещения).

3. Стационарный ток через p - n -переход

Величина тока через p - n -переход как при прямом, так и при обратном смещении однозначно связана с градиентами концентрации неосновных носителей у границы слоя объемного заряда. Действительно,

т. к. электрическое поле практически не проникает за пределы этого слоя, движение неосновных носителей по обе его стороны будет часто тепловым, диффузионным. Поэтому электронная компонента тока через p - n -переход у границы слоя объемного заряда в p -области определяется градиентом концентрации электронов в этом месте. Аналогично определяется и дырочная компонента тока в n -области. Полный ток через переход (в приближении тонкого перехода) равен сумме этих компонент. Характер распределения токовых компонент вдоль координаты, перпендикулярной плоскости перехода, меняется и показан на рис.4. Как видно из рис.4, полный ток через переход может быть представлен в виде суммы диффузионных компонент дырочного и электронного токов, вычисленных на соответствующих границах слоя объемного заряда перехода.

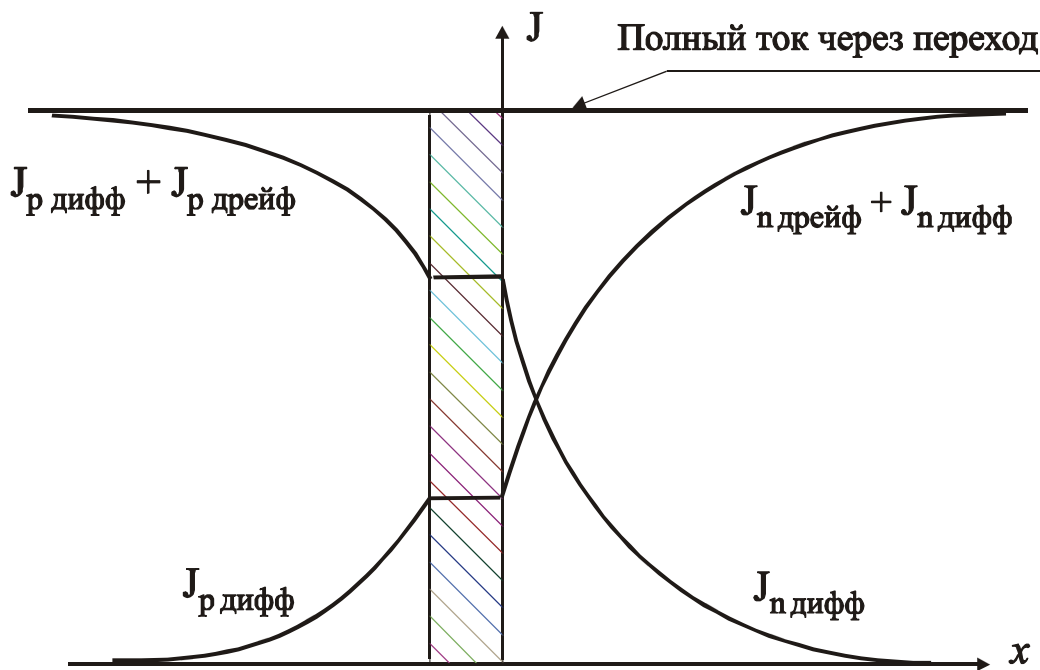


Рис.4. Составляющие тока через прямо смещенный переход

Как следует из распределения по координате концентраций неосновных носителей (показанного на рис.2b), при прямом смещении диффузионный поток электронов направлен от перехода в глубь p -области,

а диффузионный поток дырок – от перехода в глубь n -области. При обратном смещении (см. рис.2с) - наоборот: электроны в p -области и дырки в n -области диффундируют к переходу и потом перебрасываются полем перехода через слой объемного заряда.

Из изложенного следует, что полный ток через переход связан с величиной приложенного в переходу внешнего смещения не прямо, а косвенно. Роль внешнего смещения сводится только к изменению концентрации неосновных носителей (путем изменения высоты барьера) на границах слоя объемного заряда в соответствии с выражением (4) или (5). Тем самым изменяется величина градиента концентрации неосновных носителей и, следовательно, ток через переход.

4. Процесс переключения диода из проводящего состояния в запертое

Рассмотрим, что произойдет, если в цепи диода, находящегося в прямо смещенном стационарном состоянии, изменить полярность и величину внешнего напряжения, подав большое обратное смещение $E_{\text{обрат}}$. Схема коммутации изображена на рис 5.

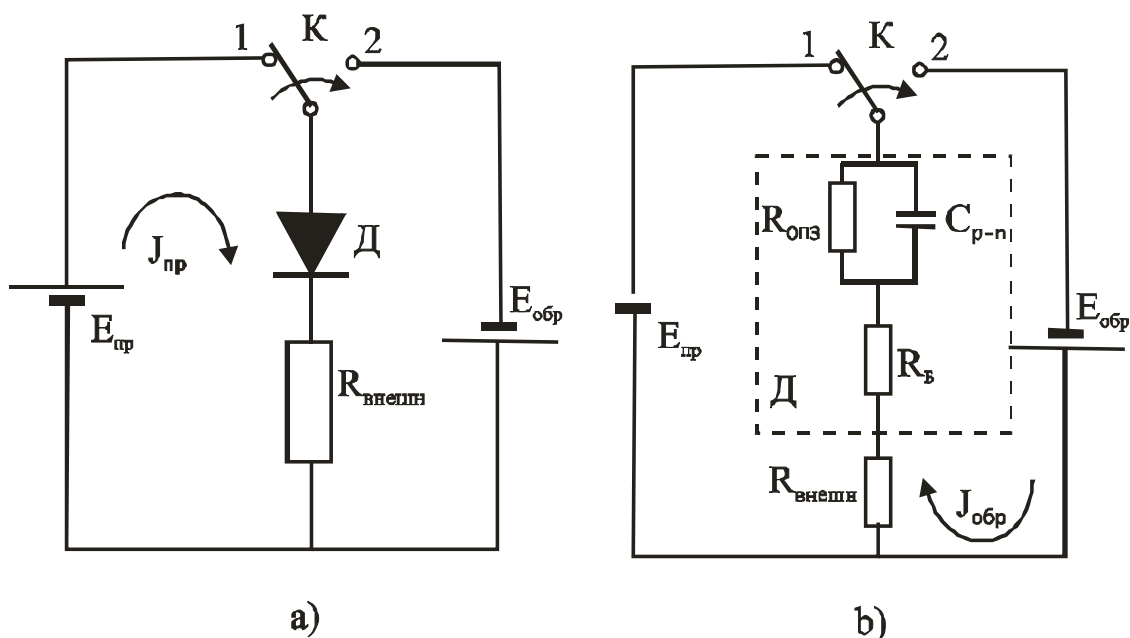


Рис.5. Схема переключения диода с прямого смещения на обратное
(а); б – диод на схеме заменен эквивалентной схемой

До коммутации ключа K_1 из положения "1" в положение "2" в цепи диода протекал прямой стационарный ток $J_{пр}$, равный:

$$J_{пр} = \frac{E_{пр}}{R_{внеш} + R_{ОПЗ}}, \quad (7)$$

где $E_{пр}$ – э.д.с. источника прямого смещения, $R_{ОПЗ}$ – сопротивление области объемного заряда $p-n$ -перехода, зависящее от тока ($J_{пр}$). При этом барьерная емкость $p-n$ -перехода ($C_{бар}$) заряжена до напряжения $V_{p-n}(0)$, где $V_{p-n}(0)$ – часть внешнего прямого смещения, падающая на ОПЗ диода (до коммутации). Так как напряжение на емкости мгновенно измениться не может, то в первый момент после коммутации все внешнее напряжение будет падать не на переходе, а на внешнем сопротивлении $R_{внеш}$, включая сюда сопротивление базы $R_{б}$ диода. При этом в цепи диода будет протекать большой обратный ток ($J_{обр}$), ограниченный только сопротивлением цепи (см. рис.5):

$$J_{обр\max} = \frac{E_{обр} + V_{p-n}(0)}{R_{внеш} + R_{б}}. \quad (8)$$

Направление этого тока таково, что основные носители заряда в p - и n -областях перехода начнут оттягиваться внешним электрическим полем от перехода к омическим контактам диода и далее во внешнюю цепь. То есть, начнется перезарядка барьерной емкости перехода. Этот процесс, в конечном счете, приведет к увеличению области объемного заряда перехода, увеличению электрического поля в нем, увеличению разности потенциалов на переходе до тех пор, пока все внешнее напряжение ($E_{обр}$) не упадет на расширившемся слое объемного заряда, после чего переход окажется в запертом состоянии и переходный процесс закончится. Таким образом, процесс переключения диода из проводящего состояния в

запертое сводится фактически к процессу перезарядки барьерной емкости p - n -перехода.

Однако процесс перезарядки барьерной емкости перехода в рассматриваемом случае существенно отличается (и качественно и количественно) от процесса перезарядки обычной емкости C (например, конденсатора), равной по величине $C_{бар}$. Дело в том, что на перезаряд барьерной емкости перехода существенное влияние оказывают избыточные концентрации неосновных носителей заряда в n - и p -областях перехода. Эти носители заряда переходят через область объемного заряда взамен ушедших основных носителей заряда и снижают скорость расширения ОПЗ. Рассмотрим этот процесс более детально. Так как сразу после коммутации (рис.5) напряжение на переходе сохраняется таким же, каким оно было при положительном смещении, сохраняется в первый момент и распределение по координате неосновных носителей заряда вблизи перехода (см. рис.6, кривая 1). Следовательно, диффузионные потоки этих носителей заряда в первый момент сохраняют свою величину

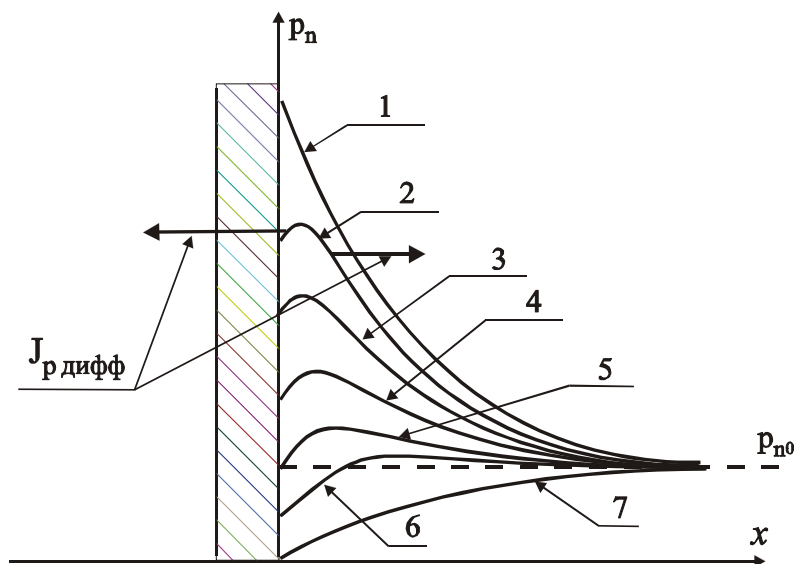


Рис.6. Распределение неравновесных дырок в n -области p - n -перехода: 1-при стационарном прямом смещении; 2÷7 – изменение во времени $p(x)$ при резкой смене полярности напряжения с прямого на обратное

и направление (как и до переключения), т.е. направлены от перехода в глубь соответствующих областей. В то же время, за счет внешнего электрического поля в n - и p -областях перехода возникают дрейфовые потоки основных носителей заряда, направленные (как указывалось выше) от перехода к омическим контактам диода и дальше во внешнюю цепь. Таким образом, ток, например, дырок по обе стороны от перехода имеет в рассматриваемый момент времени не только разную величину, но и разное направление. Уход дырок из p -области за счет дрейфа во внешнюю цепь вызывает зарядку этой области отрицательным зарядом. Аналогичное поведение электронов в n -области приводит к зарядке ее положительным зарядом. Изменение потенциалов p - и n -областей вследствие изменения их зарядов приводит к повышению потенциального барьера на переходе. Это и есть процесс перезарядки барьерной емкости. Однако даже незначительное увеличение барьера приводит к изменению соотношения диффузионных потоков основных и неосновных носителей заряда через переход. Например, диффузионный поток дырок из p - в n -область уменьшится, а встречный диффузионный поток дырок не изменится, пока не изменится концентрация дырок в n -области (на границе с объемным зарядом). Теперь поток дырок из n - в p -область становится больше, чем поток дырок из p - в n -область. Их разность определяется величиной дырочной компоненты обратного тока. Преимущественный переход дырок из n - в p -область тормозит нарастание отрицательного заряда в p -области, т.е. задерживает увеличение потенциального барьера (затягивается процесс перезарядки барьерной емкости). До тех пор, пока избыточные дырки в n -области на границе слоя объемного заряда не исчезнут (во-первых, за счет их перехода в p -область, во-вторых, за счет их рекомбинации в n -области) на переходе будет сохраняться положительное смещение (первая фаза переключения). Следует обратить внимание на то, что именно благодаря рассмотренному механизму изменения

диффузионных потоков основных и неосновных носителей заряда через переход существует взаимно однозначное соответствие между высотой барьера (т.е. смещением перехода) и концентрацией неосновных носителей заряда на границах слоя объемного заряда, даваемое формулами (4) и (5). Все это время ток в цепи диода (согласно закону Кирхгофа) по-прежнему определяется выражением (8).

Если $E_{обр} \gg V_{p-n}(0)$, то обратный ток в течение 1-й фазы переключения, определяемый выражением (8), можно считать постоянным. На осциллограмме тока в это время наблюдается «полочка» (см. рис. 7). Если $E_{обр}$ одного порядка с $V_{p-n}(0)$, то в течение 1-й фазы ток в цепи не будет оставаться постоянным, а будет уменьшаться согласно (8).

Чтобы определить длительность 1-й фазы переключения («полочки»), необходимо выяснить, как быстро уменьшается концентрация неосновных носителей заряда вблизи области объемного заряда. Для этого рассмотрим процессы токопереноса, например, в n -области. В этой области дырочный ток переносится, главным образом, за счет диффузии. Величина и направление этой компоненты тока определяются в каждой точке n -области согласно пространственному распределению дырок (например, кривая 2 на рис.6). Часть дырок, которая диффундирует к переходу, подхватывается полем объемного заряда и перебрасывается в p -область. Электроны же, которые компенсировали эти дырки в n -области, через переход не проходят. Возникший заряд некомпенсированных электронов рассасывается через внешнюю цепь. Другая часть дырок диффундирует от перехода в глубь n -области совместно с экранирующими их электронами и по пути с ними рекомбинируют. Таким образом, происходит рассасывание дырок вблизи слоя объемного заряда перехода, и их концентрация уменьшается, как показано на рис.6 (кривые 2÷7).

Изменение величины смещения на переходе V_{p-n} и на диоде со временем показано на рис.7.

Как только концентрация дырок на границе слоя объемного заряда в n -области $p(0)$ станет равна p_{n0} (кривая 5 на рис.6), напряжение на переходе обратится в нуль (формула (4)). В последующие моменты времени концентрация дырок $p(0)$ будет уже ниже p_{n0} , и напряжение на переходе станет обратным.

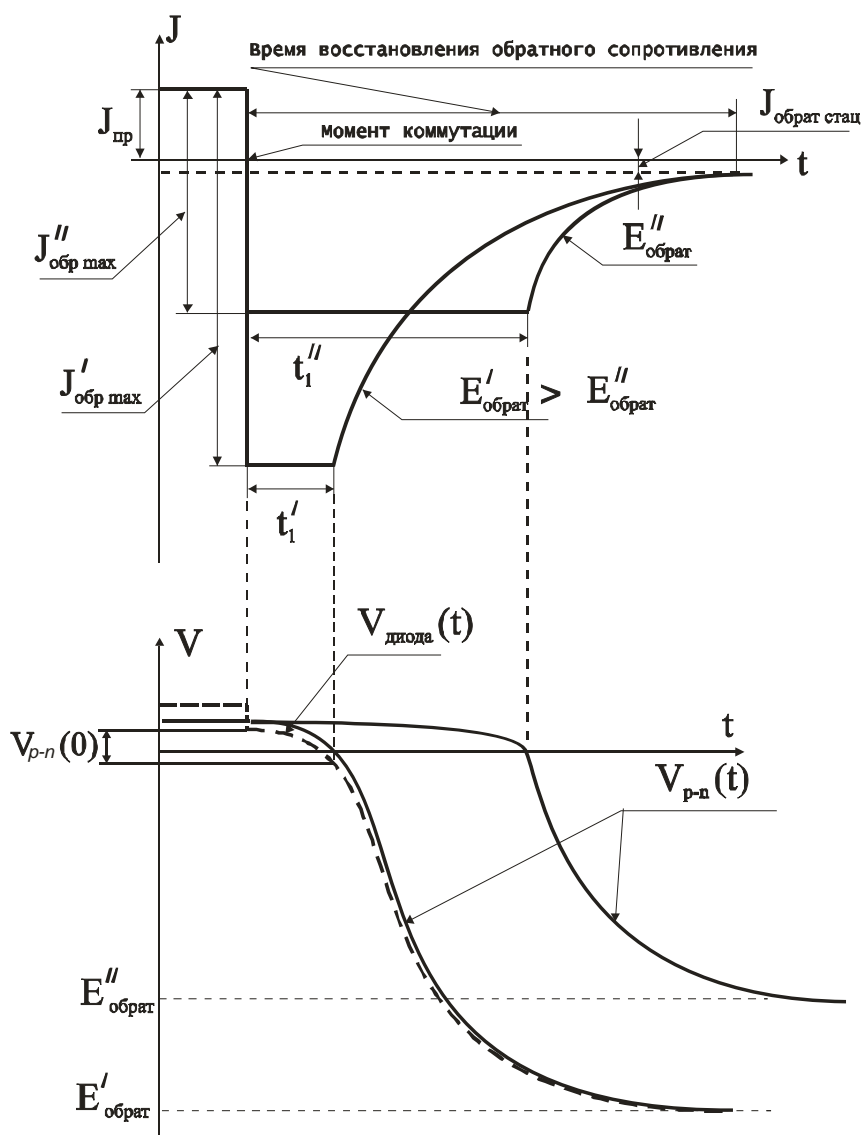


Рис.7. Влияние величины $E_{обрат}$ на характер переходного процесса в диоде

С этого момента часть внешнего напряжения ($E_{обрат}$) начинает падать на $p-n$ -переходе и ток в цепи быстро уменьшается (см. рис.7).

Начинается 2-я фаза переключения. Уже при незначительных отрицательных напряжениях на переходе концентрация неосновных носителей заряда на границе ОПЗ практически спадает до нуля (4), (5). Поэтому дальнейшее рассасывание неосновных носителей заряда будет приводить к уменьшению градиента их концентрации вблизи перехода (как это показано кривыми 6÷7 на рис.6) и, следовательно, к уменьшению обратного тока. Спад тока при этом происходит за время порядка времени жизни неосновных носителей заряда, так как на этом этапе диффузионные потоки уменьшаются, и дальнейший спад избыточной концентрации происходит главным образом за счет рекомбинации. Ток через переход при этом стремится к стационарному обратному току. Полное время, за которое диод из проводящего состояния (при прямом смещении) переходит в запертое (при подаче обратного смещения), называется временем восстановления обратного сопротивления $t_{\text{восст}}$. Поскольку процесс релаксации обратного тока носит асимптотический характер, то $t_{\text{восст}}$ определяется по моменту, когда обратный ток достигает определенного значения, которое оговорено в технических условиях на прибор.

Длительность "полочки" t_1 обратного тока определяется временем, которое необходимо на рассасывание избыточной концентрации неосновных носителей заряда вблизи перехода. Поэтому чем больше величина максимального обратного тока, тем быстрее неосновные носители заряда стекают обратно через переход и короче будет длительность "полочки" обратного тока.

Как видно из формулы (8), чем больше $E_{\text{обрат}}$, тем больше $J_{\text{обр max}}$, и процесс рассасывания избыточных концентраций неосновных носителей заряда ускоряется. Длительность "полочки" уменьшается (как это изображено на рис.7).

Таким образом, характер рассматриваемого переходного процесса (длительность и амплитуда "полочки" обратного тока) зависит от величины накопленного количества неосновных носителей (которое определяется величиной стационарного прямого тока до переключения), от сопротивления внешней цепи и от величины обратного смещения.

В заключение следует отметить, что с точки зрения электротехники поведение диода при переключении носит емкостной характер. При этом соответствующая эквивалентная емкость *p-n*-перехода может оказаться значительно больше (на порядки) барьерной емкости. Эта дополнительная емкость называется диффузионной емкостью *p-n*-перехода ($C_{\text{диф}}$) и она определяется количеством накопленных неравновесных носителей заряда в *p*- и *n*-областях перехода в течение фазы прямого смещения.

Предварительная подготовка к работе

1. Ознакомиться со схемой установки.
2. Ознакомиться с порядком выполнения работы.
3. Получить у преподавателя диод для исследования.
4. Не включая питания, подключить к схеме исследуемый диод и необходимые приборы. Проверить правильность подсоединения у преподавателя.
5. Получить у преподавателя допуск к выполнению работы.

Задание

1. Для заданной схемы коммутации (см. рис.5) снять следующие семейства переходных кривых
 - $J(t)$ и одну кривую семейства $V_{\text{диода}}(t)$ при $R_{\text{цепи}} = \text{const}; E_{\text{прям}} = \text{const}; E_{\text{обрат}} = \text{var}$
 - $J(t)$ при $R_{\text{цепи}} = \text{const}; E_{\text{прям}} = \text{var}; E_{\text{обрат}} = \text{const}$
 - $J(t)$ при $R_{\text{цепи}} = \text{var}; E_{\text{прям}} = \text{const}; E_{\text{обрат}} = \text{const}$.
2. Определить сопротивление базы диода.
3. Определить время жизни неосновных носителей заряда в базе диода.
4. Определить время восстановления обратного сопротивления диода.

5. Для одного из режимов оценить величину диффузионной емкости p - n -перехода

Схема установки

Схема установки изображена на рис.8.



Рис. 8. Схема установки

Роль источников прямого и обратного смещения (см. рис.6) играет генератор сдвоенных импульсов с фиксированной длительностью прямого и обратного импульса и независимой регулировкой их амплитуд. Амплитуды импульсов регулируются изменением соответствующего напряжения питания.

Ток через диод определяется через напряжение, измеряемое каналом «В» осциллографа, на калиброванном сопротивлении 10 Ом. Напряжение на исследуемом диоде измеряется каналом «А» осциллографа. Схема позволяет также менять сопротивление в цепи диода (два значения) с помощью соответствующего тумблера.

Порядок выполнения работы

1. Перед сборкой измерительной схемы надо включить и подготовить к работе источник питания. Для этого надо:
 - Включить питание прибора и ручками грубой и тонкой регулировки (рис.9) установить требуемые напряжения питания генератора прямого (левый источник) и обратного (правый источник) импульсов,

расположенного на сменной вставке (см. рис.8). Первоначально можно установить напряжение, управляющее амплитудой прямого импульса, равное 10В, а напряжение, управляющее амплитудой обратного импульса, равное 12В.



Рис.9. Органы регулировки выходного напряжения

- Нажав кнопку установки режима стабилизации тока (рис.10), при помощи регулятора тока установить максимально допустимое значение тока (предельное значение тока). В данной работе достаточно 1,5 А.

При нажатии (и удерживании) одной из этих кнопок необходимо установить (с помощью органов регулировки) требуемое максимального значение выходного тока каждого из каналов.

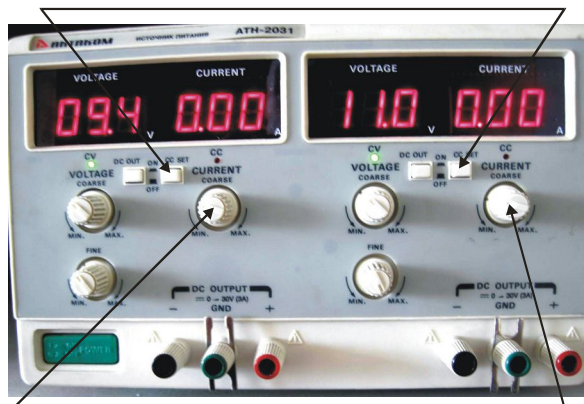


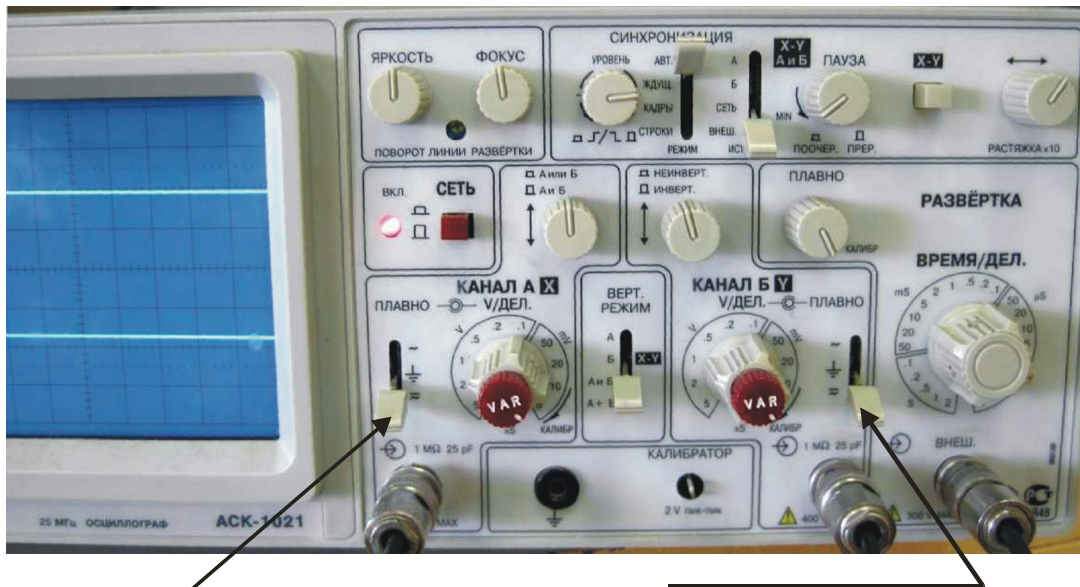
Рис.10. Органы регулировки уровня максимального выходного тока каждого источника

- Если в эксплуатационном режиме изменение величины нагрузки вызовет превышение указанного предельного значения тока, прибор автоматически перейдет в режим стабилизации тока, и выходное напряжение будет пропорционально падать.
 - Для подачи заданного значения напряжения на выходные гнезда прибора нажмите кнопки, показанные на рис.9.
2. Соединить проводами источники регулировки выходных импульсов с измерительной схемой.
 3. Включить осциллограф. Дождаться (в течение полуминуты) появления на экране лучей развертки. Если переключатель каналов (рис.11) стоит в положении A+B, то должно появиться два луча, положение которых на экране можно менять с помощью ручек, указанных на рис.11.
 4. Переключатель входа каналов поставить в нижнее положение, как указано на рис.12.



С помощью данного переключателя каналов можно наблюдать сигналы каналов А и В либо одновременно, либо отдельно

Рис. 11. Органы перемещения лучей обоих каналов



Данные переключатели должны находиться в нижнем положении

Рис. 12. Переключатели входа каналов А и В (~ - вход, пропускающий только переменную составляющую сигнала, □ - вход, пропускающий весь сигнал, в среднем положении – вход закорочен)

5. Произвести подсоединение сменной вставки к осциллографу. Обратите внимание, что к осциллографу идет от вставки три кабеля – от калиброванного сопротивления в 10 Ом сигнал поступает на канал «Б» осциллографа, от диода сигнал поступает на канал «А» осциллографа и от генератора импульсов на вход внешней синхронизации осциллографа поступает синхроимпульс. **Напоминание.** Каждый кабель осциллографа представляет собой коаксиальную структуру: медная оплетка, центральная жила и слой изолятора между ними. **Оплетка кабеля всегда должна подсоединяться к заземленным точкам схемы,** поскольку она соединена с корпусом осциллографа, который заземлен. **Поэтому важно уметь определять, какой вывод кабеля соединен с оплеткой, а какой с жилой.** Обычно вывод от оплетки более длинный. Иногда, правда, они одинаковой длины. В этом случае вывод от центральной жилы легко определить с помощью измерительного канала осциллографа. Для этого надо подсоединить кабель к каналу «А» или «В», увеличить чувствительность входного усилителя и прикоснуться поочередно к каждому выводу кабеля. На касание оплетки осциллограф реагировать не будет, а вот на касание жилы на экране появится наводка, т.к. ваше тело является своеобразной антенной для многочисленных электромагнитных полей окружающего пространства.

Для удобства наблюдения токового сигнала вход канала «Б» надо инвертировать с помощью регулятора, показанного на рис.13. Этот регулятор надо (без усилий) потянуть на себя до фиксации.

При вытянутой ручке сигнал канала Б инвертируется

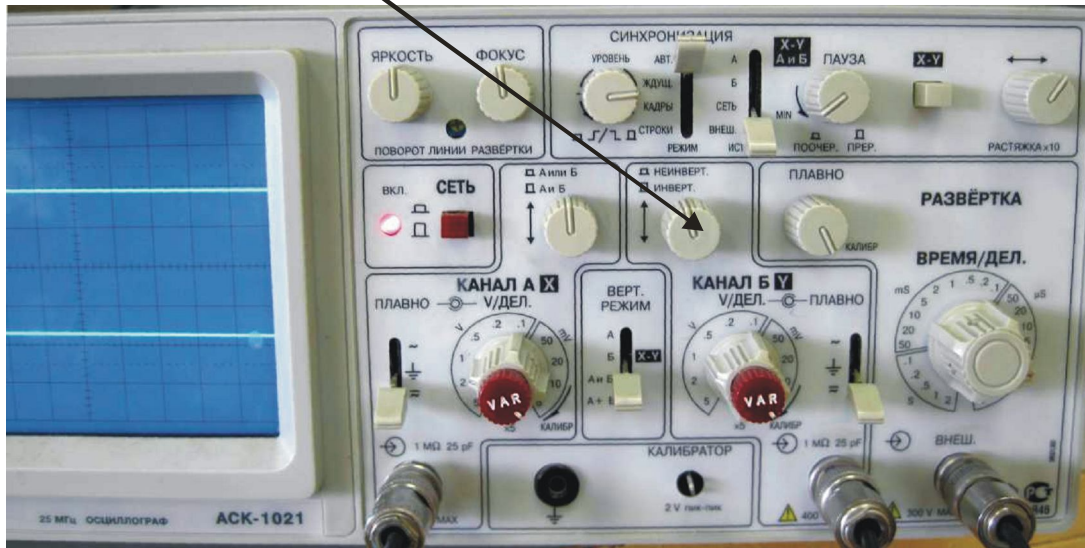


Рис. 13. Инвертирование сигнала, поступающего на канал «Б»

6. Включить внутренний источник питания стенда с помощью тумблера (см. рис.8), расположенного на крайней правой панели стенда (при этом рядом с тумблером должна загореться сигнальная лампочка).
7. Установить органы управления разверткой в положение, показанное на рис.14.

Положение переключателей блока развертки

Уровень синхронизации

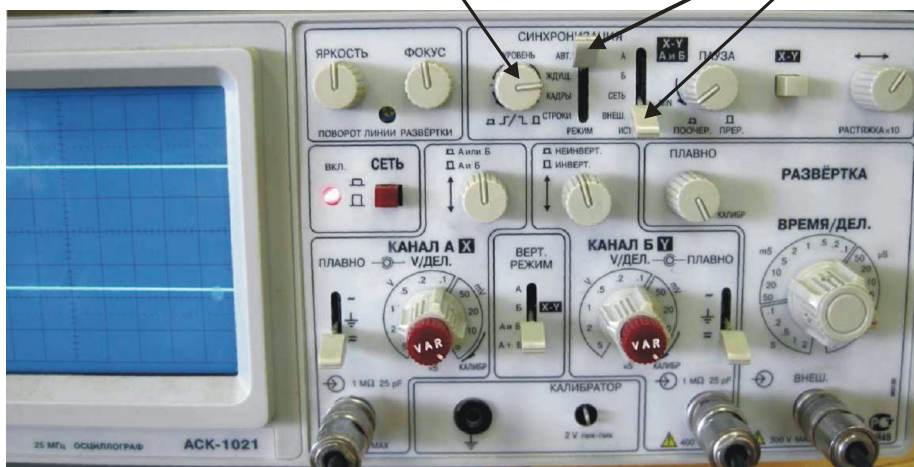


Рис.14. Органы управления разверткой

8. Включить на вставке генератор спаренных импульсов. При этом на экране осциллографа появятся характерные кривые зависимостей $J(t)$ и $V_{\text{диода}}(t)$ (см. рис.15). На «звон» сигнала в момент переключения (см. выделенный кружком фрагмент осциллограммы тока) не следует обращать внимание, так это проявление паразитных реактивностей монтажа и к изучаемому вопросу отношения не имеет.

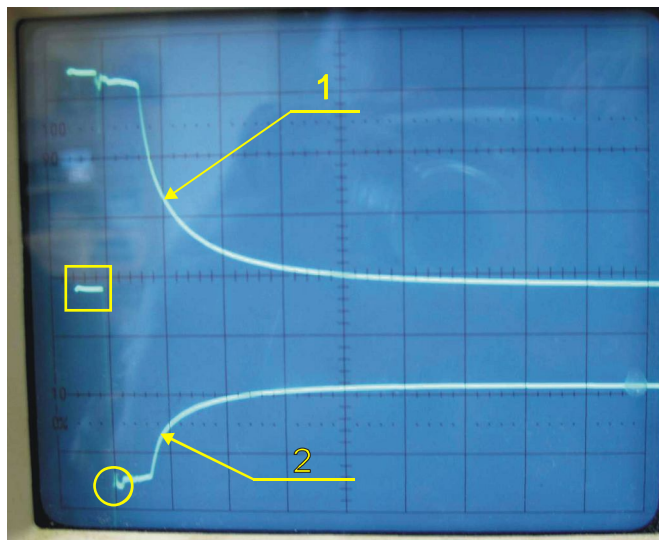
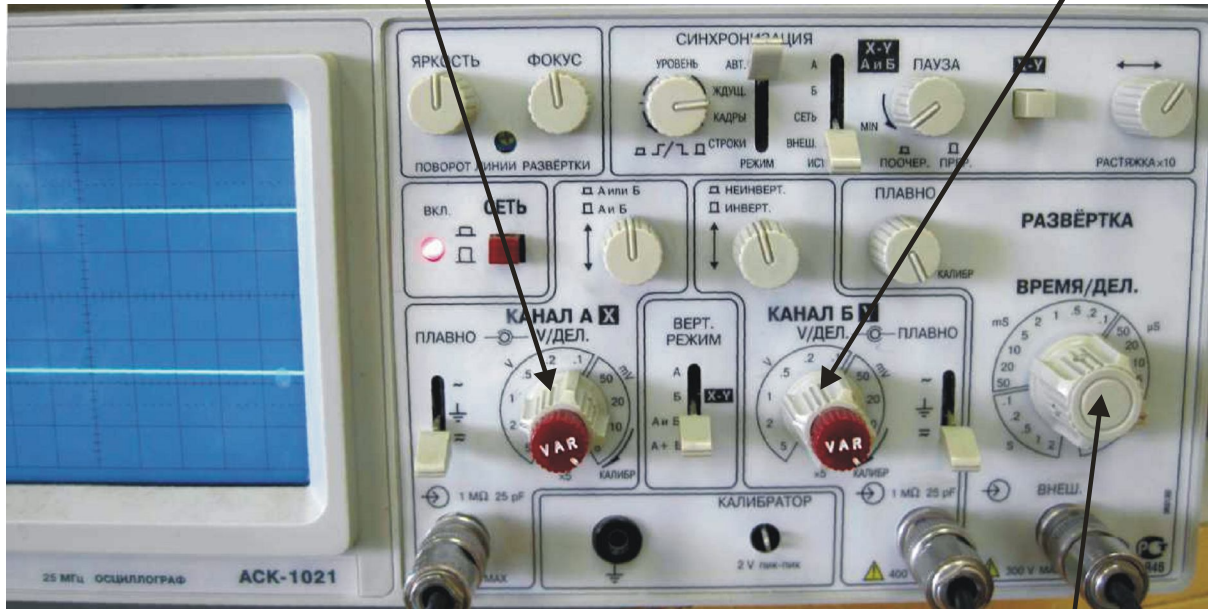


Рис.15. Зависимости $V_{\text{диода}}(t)$ (кривая 1) и $J(t)$ (кривая 2)

9. С помощью ручки «Уровень» блока развертки (рис.14) надо выбрать так начало развертки, чтобы был виден кусочек осциллограммы, соответствующий прямому смещению (выделен квадратиком на рис.15).
10. К сожалению, ввиду малого размера экрана осциллографа, изучать одновременно обе эти зависимости сложно. Поэтому предлагается следующий алгоритм исследования.
11. Сначала исследуем семейство зависимостей $J(t)$ и одну кривую семейства $V_{\text{диода}}(t)$ при $R_{\text{цепи}} = \text{const}; E_{\text{прям}} = \text{const}; E_{\text{обрат}} = \text{var}$ в следующем порядке:
- Установить напряжение питания прямого импульса 15 В, регулируемое сопротивление цепи 10 Ом, переключатель каналов (рис.12) поставить в положение «Б» и увести луч канала «А» с экрана регулятором положения луча (рис.11).
 - С помощью соответствующего регулятора (см. рис.16) установить масштаб по горизонтали 2мкс/см и чувствительность канала «Б» (масштаб по вертикали) на уровне 0,5 В/см.

Регулировка чувствительности
канала А канала В



С помощью данного переключателя
устанавливается масштаб времени
по горизонтали

Рис.16. Задание масштаба для обоих каналов по вертикали и горизонтали

- с. Луч канала «Б» (при среднем положении переключателя на рис. 12) совместить с одной из верхних координатных линий экрана (рис.17).

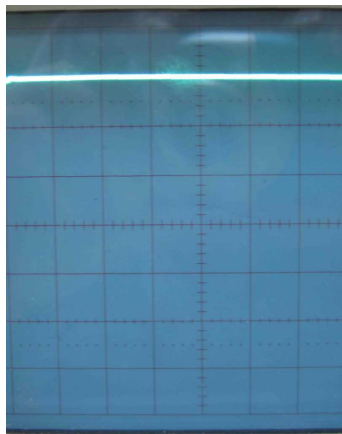


Рис.17. Выбор нулевого уровня тока через диод

- d. Установить переключатель входа канала «Б» в крайнее нижнее положение и, меняя напряжение питания обратного импульса, добиться, чтобы амплитудное значение сигнала обратного тока, поступающего на канал «Б», достигло одной из нижних координатных линий экрана.

- е. Меняя напряжение питания прямого импульса, установить длительность «полочки» 2 мкс (одна клеточка на экране) и аккуратно зарисовать на миллиметровке кривую $J(t)$, учитывая, что ток измеряется как $\frac{V_A}{10\Omega}$, и записать все исходные данные, относящиеся к полученной осциллограмме.
- ф. Теперь надо измерить величину прямого тока до коммутации, для этого надо регулятором положения луча «Б» опустить всю осциллограмму настолько, чтобы стал виден уровень прямого тока до коммутации и нулевой уровень тока. Если при прежней чувствительности оба этих уровня не видны одновременно, надо уменьшить чувствительность канала «Б». Отметить уровень прямого тока на зарисованной осциллограмме $J(t)$. Масштаб для этой зависимости надо выбрать таким образом, чтобы был виден весь переходный процесс. Пример такой зависимости приведен на рис.18.

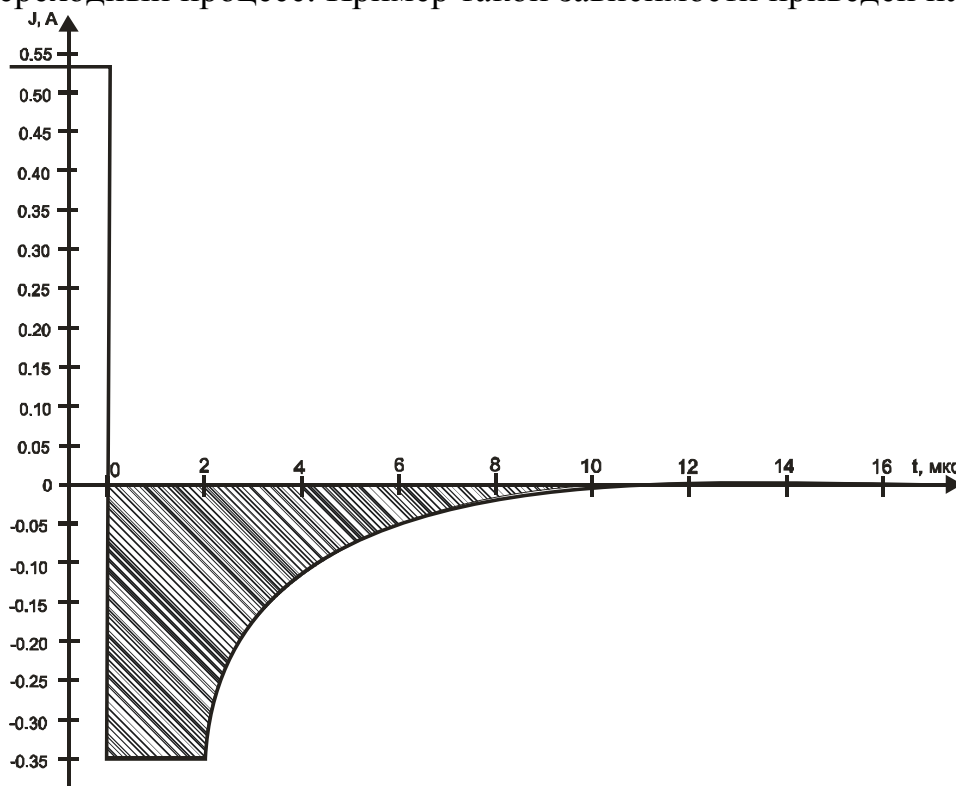


Рис. 18. Вид осциллограммы тока

- г. Теперь надо зарисовать осциллограмму напряжения на диоде (рис. 19). (Смотри также кривую 1 на рис.15).

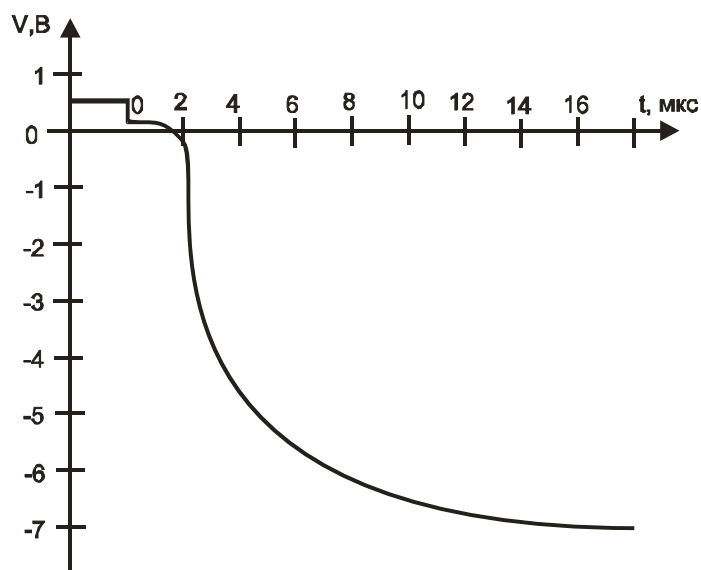


Рис.19. Вид осциллограммы напряжения на диоде

Для этого надо переключатель каналов поставить в положение «А», совместив нулевой уровень сигнала «А» с одной из верхних координатных линий экрана (при среднем положении переключателя входа на рис.12). Установить чувствительность канала «А» таким образом, чтобы импульс напряжения максимально полно занимал весь экран, и зарисовать на миллиметровке полученную осциллограмму. Следует обратить внимание на скачок напряжения ΔV на диоде в момент коммутации (рис.20).

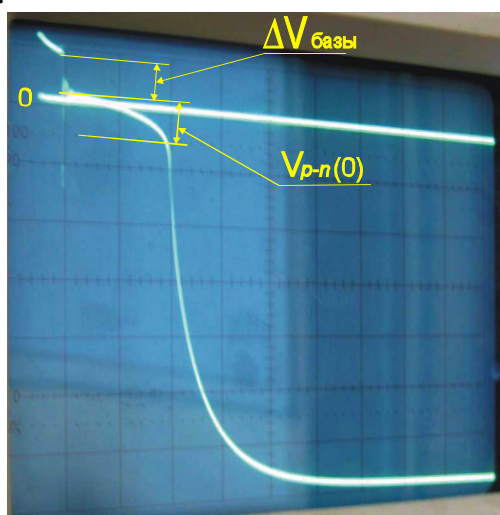


Рис.20. Вид зависимости $V_{\text{дио́да}}(t)$

Величину $\Delta V_{\text{базы}}$ необходимо измерить точнее, для чего, возможно, потребуется увеличить чувствительность канала «А». Записать это значение.

- h. Теперь надо вернуть на экран осциллограмму токового импульса в первое зарисованное положение и затем снизить величину напряжения питания обратного импульса так, чтобы длительность «полочки» стала равна 4 мкс, срисовать полученную

осциллограмму на миллиметровку, наложив ее на предыдущую осциллограмму, и записать величину обратного напряжения.

- i. Теперь с помощью напряжения питания обратного импульса следует увеличить длительность «полочки» еще вдвое (8 мкс) и опять зарисовать полученную осциллограмму и записать величину обратного напряжения.
 - j. Увеличить длительность «полочки» до 10 мкс и зарисовать полученную осциллограмму и записать величину обратного напряжения.
12. Следующим этапом проводим исследование семейства зависимостей $J(t)$ (для каждой из кривой $J(t)$, не забываем зарисовывать и значение прямого тока (до коммутации), как это было описано в п.9 f) при $R_{\text{цепи}} = \text{const}$; $E_{\text{прям}} = \text{var}$; $E_{\text{обрат}} = \text{const}$ в следующем порядке:
- Выводим на экран импульс обратного тока. Устанавливаем напряжение, регулирующее амплитуду прямого тока на уровне 8 В и с помощью регулировки обратного импульса доводим **амплитуду** обратного тока до 4 клеточек (на экране осциллографа). Полученную осциллограмму зарисовываем. Затем, меняя напряжение питания прямого импульса (и не меняя напряжение обратного импульса), увеличиваем длительность «полочки» на две клеточки и снова срисовываем осциллограмму, записывая при этом значения $E_{\text{прям}}$ и $E_{\text{обратн}}$. Затем, снова меняя $E_{\text{прям}}$, увеличиваем длительность «полочки» еще на две клеточки и опять зарисовываем полученную картинку, и записываем исходные параметры.
13. Следующим этапом выясняем влияние на переходной процесс сопротивления цепи. Для этого восстанавливаем на экране осциллографа самую первую из нарисованных кривых $J(t)$, снова ее зарисовываем, после чего переключаемся на сопротивление 50 Ом. Полученную в результате этой операции зависимость $J(t)$ (включая уровень прямого тока до коммутации) нанести на рисунок.
14. Используя полученные данные, рассчитать величину сопротивления базы диода.
15. Измерив длительность полочки при условии равенства прямого тока и максимального обратного тока, рассчитать время жизни неосновных носителей заряда в базе диода по формуле: $\tau_p = \frac{0.228}{t_{\text{полочки}}}$.
16. Оценить время восстановления обратного сопротивления диода для любого из исследованных режимов.
17. Для любого из исследуемых режимов оценить величину диффузионной емкости диода следующим образом:

- Рассчитать заряд (в Кулонах), протекающий в цепи разряда диффузионной емкости, по площади фигуры, описываемой кривой $J(t)$ (см. рис.18).

$$Q = \int_0^{t_{\text{восстановл}}} J(t) dt$$

- Рассчитать $C_{\text{дифф}}$ по формуле

$$C_{\text{дифф}} = \frac{Q}{V_{p-n}(0)},$$

где $V_{p-n}(0)$ - напряжение на $p-n$ -переходе до коммутации (см. рис.20).

18. Написать отчет по работе.

Содержание отчета

1. Точное наименование и цель работы.
2. Схема коммутации для исследования переходных процессов в $p-n$ -переходе с краткой характеристикой входящих в нее элементов.
3. Семейства переходных характеристик $J(t)$ диода при $R_{\text{цены}} = \text{const}; E_{\text{прям}} = \text{const}; E_{\text{обрат}} = \text{var}$.
4. Осциллограмма зависимости $V_{\text{диода}}(t)$ при $R_{\text{цены}} = \text{const}; E_{\text{прям}} = \text{const}; E_{\text{обрат}} = \text{const}$.
5. Семейства переходных характеристик $J(t)$ диода при $R_{\text{цены}} = \text{const}; E_{\text{прям}} = \text{var}; E_{\text{обрат}} = \text{const}$.
6. Семейства переходных характеристик $J(t)$ диода при $R_{\text{цены}} = \text{var}; E_{\text{прям}} = \text{const}; E_{\text{обрат}} = \text{const}$.
7. Рассчитать сопротивление базы диода.
8. Оценка времени жизни неосновных носителей заряда в базе диода.
9. Оценить время восстановления обратного сопротивления диода для одного из исследуемых режимов.

10. Для одного из режимов оценить величину диффузионной емкости диода

Вопросы к защите лабораторной работы

- Объяснить, что такое инжекция.
- Чем вызвана инерционность диода с p - n -переходом при переключении полярности внешнего смещения?
- Чем вызвано наличие "полочки" на кривой зависимости обратного тока от времени при переключении диода из проводящего состояния в запертое?
- Чем определяется длительность "полочки" обратного тока?
- Что такое "время восстановления обратного сопротивления"?
- Чем определяется разность потенциалов на p - n -переходе и как она меняется в процессе переключения?
- Как зависит характер переходного процесса от уровня инжекции?
- Как зависит характер переходного процесса от сопротивления внешней цепи?

Рекомендуемая литература

1. Епифанов Г.И., Мома Ю.А. Твердотельная электроника. М., Выс. шк., 1986.
2. Лысенко А.П. Физические процессы в p - n -переходе. Москва, МИЭМ, 2009.

Учебное издание

Исследование процессов восстановления обратного
сопротивления диода с p-n-переходом

Составитель
ЛЫСЕНКО Александр Павлович

Редактор С.П. Клышинская

Технический редактор О.Г. Завьялова

Подписано в печать 14.03.12

Формат

60x84/16

Бумага типографская офсетная

Печать – ризография

Усл.печ.л. 1,9

Уч.изд. л.1,5.

Тираж 50 экз. Заказ

Бесплатно.

Изд №30

Московский государственный институт электроники и математики
109028 Москва, пер. Б. Трехсвятительский, 3.

Отдел оперативной полиграфии Московского государственного
института электроники и математики.

113054 Москва, ул. М. Пионерская, 12.