

Федеральное агентство по образованию
Государственное образовательное учреждение
высшего профессионального образования
ПЕТРОЗАВОДСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ

ЦЕПИ С ВЫПРЯМИТЕЛЯМИ

Методические указания
к лабораторной работе

Составители: *В. С. Кривченкова*, канд. физ.-мат. наук, доцент

Рецензент: *Е. Л. Казакова*, канд. физ.-мат. наук, доцент

Петрозаводск
2007

Цепи с выпрямителями

Цель работы:

Познакомиться с некоторыми практическими приложениями явлений, возникающих при контакте двух полупроводников с различными типами проводимости.

Задача:

Изучить работу различных цепей с выпрямителями:

- однополупериодный выпрямитель;
- двухполупериодный выпрямитель (мостовая схема);
- цепь со стабилитроном;
- умножитель напряжения.

Введение

Ряд физических явлений, возникающий в области соприкосновения разнородных твердых тел, называется *контактными явлениями*. Во многих областях современной электроники большую роль играет контакт двух полупроводников.

По характеру своей проводимости полупроводники могут быть электронными (n-тип) и дырочными (p-тип). В полупроводниках n-типа основными подвижными носителями заряда являются отрицательные электроны, а в полупроводниках p-типа – положительные дырки. В случае контакта двух полупроводников с различными типами проводимости электроны и дырки получают возможность переходить из одного полупроводника в другой, и поэтому между полупроводниками возникает контактная разность потенциалов, а в тонком пограничном слое появляется электрическое поле.

Нельзя осуществить p-n-переход просто механическим соединением двух полупроводников. Обычно области различной проводимости создают либо при выращивании кристаллов, либо при соответствующей обработке кристаллов.

p-n-переход в отсутствие тока

Вследствие теплового движения электроны из n-области будут переходить в p-область (и там рекомбинировать с дырками), а дырки из p-области в – n-область (и там рекомбинировать с электронами). Поэтому в n-области вблизи границы раздела появится положительный объемный заряд, а в p-области – отрицательный объемный заряд, n-область приобретает положительный потенциал, и энергия электрона в ней станет меньше (т. к. заряд электрона отрицателен), а потенциал в p-области сделается отрицательным, и энергия электрона в ней увеличивается. Кривая распределения потенциальной энергии электронов W_e будет иметь вид, показанный на рис. 1а сплошной кривой. Напротив, энергия положительных дырок W_d будет больше в n-области и меньше в p-области (пунктирная кривая).

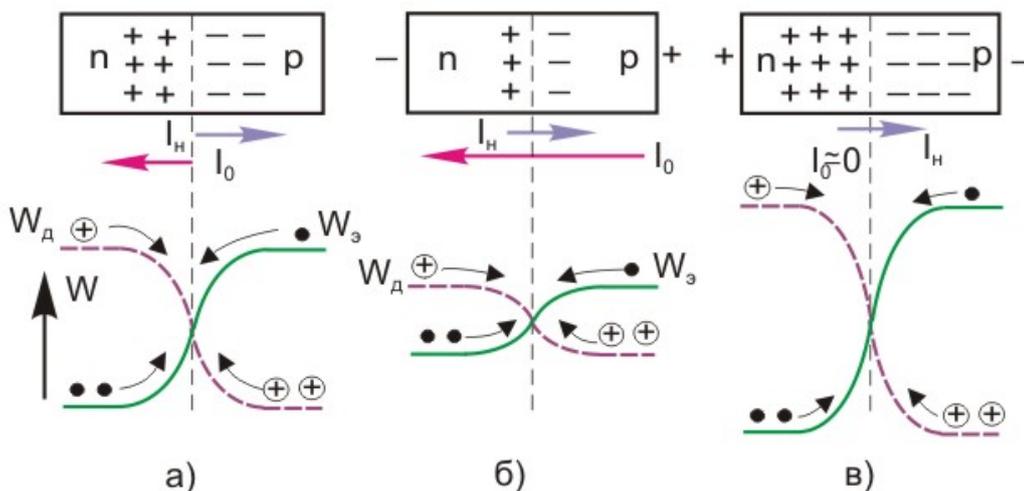


Рис. 1

В любом полупроводнике помимо основных носителей заряда всегда имеется и некоторое количество не основных носителей заряда. Поэтому в электронном полупроводнике наряду с электронами проводимости (основные носители заряда) имеется небольшое количество дырок (не основные носители заряда), а в дырочном полупроводнике кроме дырок еще и некоторое количество электронов. Количество не основных носителей заряда обычно мало.

Обратимся к рис. 1. Видно, что контактное поле способствует движению не основных носителей. Поэтому все не основные носители, генерируемые в приконтактной области, движутся через р-п переход и образуют некоторый ток силы I_n , направленный от п к р. Сила этого тока определяется только количеством не основных носителей, образующихся в единицу времени в приконтактной области. Основные же носители образуют ток I_0 , направленный от р к п. Из рис. 1а видно, что контактное поле препятствует движению основных носителей, которые должны преодолеть потенциальный барьер. В состоянии равновесия устанавливается такая высота потенциального барьера, при которой полный ток

$$I = I_0 - I_n = 0.$$

Толщина контактного слоя р-п перехода в полупроводнике составляет примерно 10^{-6} - 10^{-7} м, а контактная разность потенциалов – десятые доли вольт. Носители тока способны преодолеть такую разность потенциалов лишь при температуре в несколько тысяч градусов, т. е. при обычной температуре равновесный контактный слой является *запирающим*.

Действие внешней разности потенциалов на р-п переход

Предположим, что мы приложили к контакту разность потенциалов такого знака, что в п-области имеется отрицательный потенциал, а в р-области – положительный (рис. 1б). Тогда энергия электронов в п-области увеличится, а в р-области уменьшится, а следовательно, высота потенциального барьера уменьшится. При этом ток не основных носителей I_n не изменится. Ток же основных носителей I_0 увеличится, т. к. теперь большее количество электронов может преодолеть потенциальный барьер и перейти слева направо и большее количество дырок - перейти в противоположном направлении. В результате через контакт будет идти ток $I = I_0 - I_n$, направленный от р к п, который будет быстро нарастать с увеличением приложенной разности потенциалов.

Иное будет происходить, если к п-области подключен положительный полюс источника тока, а к р-области – отрицательный (рис. 1в). В этом случае высота потенциального барьера увеличится, и ток основных носителей уменьшится. Уже при разности потенциалов порядка 1 В этот ток практически будет равен нулю, и поэтому через контакт будет течь ток только не основных носителей I_n , величина которого мала.

В силу изложенного вольтамперная характеристика р-п перехода имеет вид, изображенный на рис. 2. Когда ток направлен от р к п-области, контакт для этого направления тока имеет малое сопротивление, сила тока велика и быстро увеличивается с напряжением. Если же ток

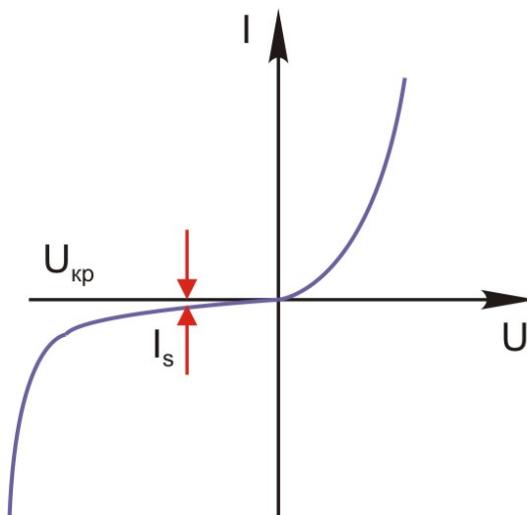


Рис. 2

направлен от n к p-области, сила тока мала и почти не зависит от напряжения. Для этого направления тока контакт имеет большое сопротивление. Таким образом, p-n переход обладает односторонней проводимостью, или вентильным свойством. При включении в цепь переменного тока такие контакты действуют как выпрямители.

Независимость I от U при $U < 0$ имеет место до некоторого критического значения $U_{кр}$ (пробивное напряжение), после чего ток резко возрастает с ростом U . Этот рост обусловлен ударной ионизацией в полупроводнике, если p-n переход изготовлен из полупроводника с большим удельным сопротивлением ρ (толщина запирающего слоя велика), либо туннельным просачиванием через барьер (эффект Зенера), если ρ мало.

Полупроводниковые диоды

Односторонняя проводимость контактов двух полупроводников используется для выпрямления и преобразования переменных токов.

Приложим к p-n переходу переменную разность потенциалов, меняющуюся со временем по синусоидальному закону (рис. 3а).

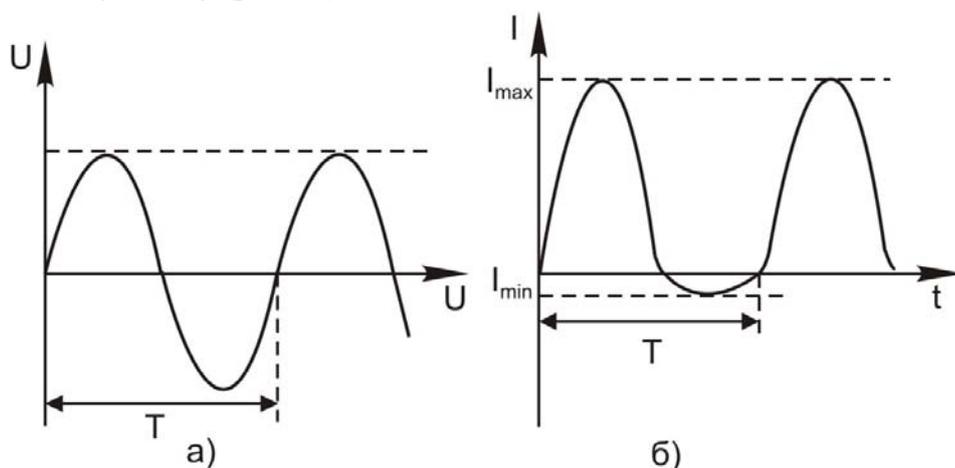


Рис. 3

Тогда в течение полупериода $T/2$, когда p-n переход работает в пропускном (прямом) направлении, в цепи будет идти сильный ток с наибольшим значением I_{max} , а в течение следующего полупериода, когда p-n переход работает в запирающем (обратном) направлении, ток в цепи будет очень мал I_{min} . В результате по цепи пойдет почти выпрямленный ток.

Если имеется только один электронно-дырочный переход, то его действие аналогично действию двухэлектродной лампы. Поэтому полупроводниковое устройство, содержащее один p-n переход, называется *полупроводниковым (кристаллическим) диодом*. Выпрямительные полупроводниковые диоды применяются для выпрямления переменного тока низкой частоты (до 50 кГц). Они должны выдерживать большие обратные напряжения ($U_{кр}$ на рис. 2), иметь малые обратные токи (I_s на рис. 2) и в пропускном направлении – большие токи и малые падения напряжения. Поэтому к основным параметрам полупроводниковых выпрямительных диодов относятся: 1) максимально допустимый средний выпрямленный ток; 2) максимально допустимое постоянное обратное напряжение.

Преимущество выпрямительных полупроводниковых диодов по сравнению с другими электрическими вентилями: высокая надежность, постоянная готовность к работе, высокие к.п.д. и срок службы; недостаток: (как всех полупроводниковых приборов) ограниченный интервал рабочих температур (примерно от -70°C до $+125^\circ\text{C}$).

Для графического изображения полупроводниковых диодов на электрических схемах применяется условное изображение: $\text{---} + \blacktriangleright | \text{---}$

Однополупериодный выпрямитель

Выпрямителем называют электрическую схему, предназначенную для преобразования энергии переменного тока в энергию постоянного тока. Схема выпрямителя выбирается в зависимости от принципа действия вентиля, мощности устройства и др. Простейшей является однополупериодная схема (рис. 4). В этой схеме посредством вентиля В ток пропускается че-

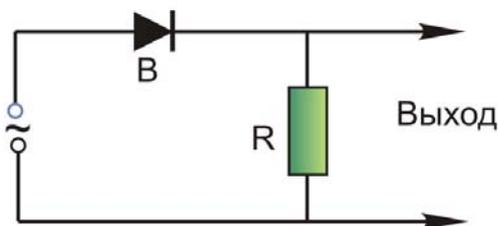


Рис. 4

рез нагрузку R в течение только одной половины периода (см. рис. 3), поэтому на сопротивлении R образуется пульсирующее напряжение одного знака

В этом случае при синусоидальном переменном напряжении $U = U_m \cdot \sin(\omega t)$ на входе идеального вентиля (сопротивление в прямом направлении $R_{пр} = 0$, а в обратном $R_{обр} = \infty$) и чисто активной нагрузке среднее значение выпрямленного тока (постоянная составляющая пульсирующего тока) связано с амплитудным значе-

нием I_m соотношением $I_{cp} = I_m/\pi$, а действующее (эффе́ктивное) значение выпрямленного

тока $I_{эф} = I_m/2$. (Напомним, что $I_{cp} = \frac{1}{T/2} \int_0^{T/2} I(t) dt$, $I_{эф} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T I^2(t) dt}$.) Среднее значение вы-

прямленного напряжения $U_{cp} = U_m/\pi$. Активная мощность цепи $P = U_m I_m/4$.

Для однополупериодного выпрямителя при нулевой нагрузке

$$U_{\text{вых}} = \sqrt{2} \cdot U_{\text{эфф.вход}} - U_d \quad (1)$$

где U_d – прямое напряжение диода (между 0.5 В и 0.8 В для кремниевых диодов).

Так как $U_d = \text{const}$, зависимость (1) для экспериментальной проверки записывают в виде:

$$U_{\text{вых}} = a_1 + b_1 U_{\text{эфф.вход}} \quad (1')$$

здесь a_1 и b_1 – константы.

Недостаток однополупериодного выпрямления: выпрямленный ток получается только в течение одного полупериода, и в нем имеются значительные переменные составляющие. Колебания выпрямленного тока характеризуются отношением действующего значения всех переменных составляющих выпрямленного тока к его постоянной составляющей. При указанных выше условиях и однополупериодном выпрямлении это отношение $w = 1.211$, т.е. переменная составляющая здесь преобладает над постоянной.

Однополупериодная схема выпрямителя применяется в тех случаях, когда требуется небольшая мощность выпрямленного тока при сравнительно высоком напряжении, а нормы допустимых пульсаций не очень жесткие.

Мостовая схема выпрямителя

В двухполупериодной схеме выпрямления получают выпрямленный ток, соответствующий обоим полупериодам переменного тока. Наиболее распространена *мостовая* схема двухполупериодного выпрямителя (рис. 5а).

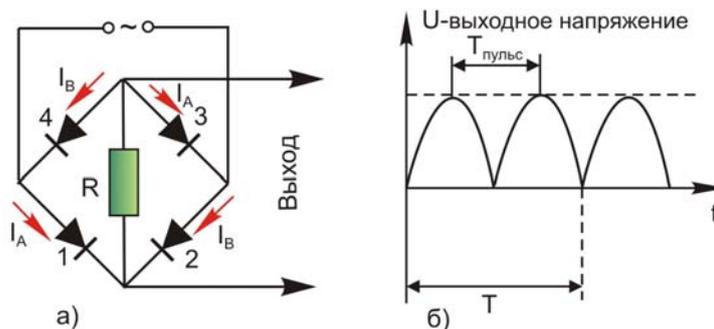


Рис. 5

В двухполупериодной мостовой схеме при одном направлении переменного напряжения ток I_A проходит через вентиль 1, нагрузку R и вентиль 3, а при обратном направлении напряжения ток I_B проходит через вентили 2 и 4 в том же направлении, что и ток I_A . Такая схема называется двухтактной. При такой форме выпрямления $U_{cp} = 2U_m/\pi$, $I_{cp} = 0.64 \cdot I_m$, $w = 0.46$. Частота пульсаций выпрямленного напряжения в 2 раза больше частоты переменного тока (рис. 5б).

В отличие от однополупериодного выпрямителя эффективный ток, проходящий через диод в двухполупериодном выпрямителе равен половине выходного тока, т. к. в любое время полупериода включена всего одна пара диодов.

Поскольку в каждом полупериоде работают два последовательно подключенных диода, выходное напряжение равно:

$$U_{\text{вых}} = \sqrt{2} \cdot U_{\text{эфф.вход}} - 2U_d \quad (2)$$

или

$$U_{\text{вых}} = a_2 + b_2 U_{\text{эфф.вход}} \quad (2')$$

где a_2 и b_2 – константы.

Сглаживающие фильтры

На процесс выпрямления тока в ряде случаев может существенно воздействовать реакция индуктивности или емкости в цепи нагрузки, поэтому на выходе выпрямителей включаются *сглаживающие фильтры*, функцией которых является уменьшение пульсаций.

При однополупериодном выпрямлении, если активная нагрузка шунтирована емкостью C (рис. 6а), то ток I_B , проходящий через вентиль B в проводящую часть периода (когда напряжение $U > 0$ и увеличивается) складывается из зарядного тока емкости I_C и тока активной нагрузки I_R . Но как только напряжение на конденсаторе U_C достигает максимума, начинается разряд емкости через нагрузочное сопротивление R по закону:

$$U_C = U_{0C} \cdot e^{-\frac{t}{RC}},$$

где $RC = \tau$ – постоянная времени разряда конденсатора, т. е. время, за которое напряжение падает в $e = 2.71$ раза. При выполнении условия $\tau = RC \gg T$ изменения напряжения на нагрузочном сопротивлении очень невелики, т. к. заряд конденсатора периодически пополняется из внешней цепи. В результате получается выходное напряжение, зависимость которого от времени изображена на рис. 6б.

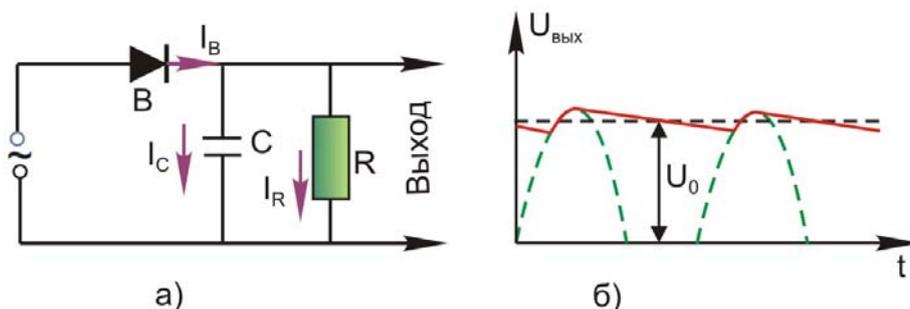


Рис. 6

Выходное напряжение является пульсирующим. Его величина меняется по негармоническому, но периодическому закону. Любую периодическую функцию можно разложить на постоянную и ряд гармонических переменных составляющих, т. е. выходное напряжение состоит из постоянного напряжения, наложенного на переменное (пульсирующее) $U_{\text{пульс}}$. Амплитуда переменной составляющей пропорциональна выходному току:

$$U_{\text{пульс}} \sim \frac{I_{\text{вых}}}{C \cdot f'} \quad (3)$$

где C – емкость; f – частота переменного напряжения; f' – частота пульсации. В однополупериодном выпрямителе $f' = f = 50$ Гц. Поскольку в выпрямителе, работающем по мостовой схеме $f' = 2f$, то пульсации рассчитываются как

$$U_{\text{пульс}} \sim I_{\text{вых}} / (2Cf) \quad (3')$$

При $I_{\text{вых}} = \text{const}$ зависимости (3) и (3') можно представить в виде:

$$U_{\text{пульс}} = a_3 \cdot C^{-b_3}, \quad (3'')$$

здесь a_3 и b_3 – константы.

При увеличении R постоянная составляющая напряжения U_0 стремится к максимальному (пиковому) значению входного напряжения.

Действие индуктивного фильтра основано на явлении самоиндукции и проявляется в том, что катушка с сердечником, характеризуемая индуктивностью L , оказывает переменному току частотой ω индуктивное сопротивление $Z_L = \omega L$. Если $\omega L \gg R$, то такой фильтр, включенный последовательно с нагрузкой, будет хорошо пропускать постоянную составляющую тока и плохо пропускать переменные составляющие. Это приведет также к сглаживанию пульсаций.

Еще лучший эффект сглаживания пульсаций дают смешанные индуктивно-емкостные фильтры.

Способность фильтра уменьшать пульсации выпрямленного напряжения принято оценивать коэффициентом сглаживания K_c :

$$K_c = \frac{P_{\text{вх}}}{P_{\text{вых}}},$$

где $P_{\text{вх}}$ и $P_{\text{вых}}$ – коэффициенты пульсации на входе и выходе фильтра.

В свою очередь коэффициент пульсации – это отношение амплитуды переменной составляющей основной частоты U_{\sim} к среднему значению выпрямленного напряжения $U_{\text{ср}}$:

$$P = \frac{U_{\sim}}{U_{\text{ср}}}.$$

Коэффициент пульсаций на входе фильтра зависит от режима работы выпрямителя. Допустимые величины коэффициента пульсаций на выходе фильтра определяются характером нагрузки.

Стабилизаторы напряжения

Для стабилизации напряжения в электрических цепях используются стабилизаторы. *Стабилизатор* – газоразрядный или полупроводниковый прибор, напряжение на котором слабо зависит от протекающего через него тока (в определенной области токов).

Основные показатели стабилизаторов напряжения: коэффициент стабилизации; коэффициент полезного действия (КПД), выходное сопротивление.

Коэффициент стабилизации $K_{\text{ст}}$ показывает, во сколько раз относительное изменение напряжения на выходе стабилизатора меньше относительного изменения напряжения на его входе:

$$K_{\text{ст}} = \frac{\Delta U'_{\text{вх}} / U'_{\text{вх}}}{\Delta U'_{\text{вых}} / U'_{\text{вых}}},$$

где $U'_{\text{вх}}$ и $U'_{\text{вых}}$ – напряжения на входе и выходе стабилизатора; $\Delta U'_{\text{вх}}$ и $\Delta U'_{\text{вых}}$ – изменения напряжений на входе и выходе стабилизатора.

Коэффициент стабилизации характеризует также степень сглаживания пульсаций в схеме стабилизатора.

КПД – отношение мощности на выходе стабилизатора к мощности на его входе.

Выходное сопротивление – сопротивление стабилизатора переменному току со стороны выхода.

В полупроводниковых стабилизаторах для стабилизации напряжения используется высокая крутизна вольт-амперной характеристики р-п перехода в области $U > U_{\text{кр}}$.

Полупроводниковые стабилизаторы характеризуются высоким коэффициентом стабилизации (до 1000), сравнительно высоким КПД и низким выходным сопротивлением.

Полупроводниковый стабилизатор представляет собой плоскостной полупроводниковый диод, работающий в области р-п перехода при обратном напряжении на нем. Механизм пробоя

в диоде может быть обусловлен просачиванием носителей заряда через энергетический барьер p-n перехода под действием сильного электрического поля (полевой пробой, пробой Зенера) и ударной ионизацией носителей в переходе (лавинный пробой), в зависимости от удельного сопротивления полупроводниковых материалов.

Полупроводниковые стабилизаторы изготавливают главным образом из кремния. Это обусловлено, во-первых, тем, что обратный ток кремниевого диода мал, вследствие чего саморазогрев диода в предпробойной области отсутствует, и переход в область пробоя весьма резок. Во-вторых, в широком диапазоне рабочих токов в кремниевом p-n переходе не возникает теплового пробоя. Основное преимущество полупроводниковых стабилизаторов – большой диапазон стабилизируемых напряжений (3.5-180 В). Рабочий участок вольт-амперной характеристики полупроводникового стабилитрона приведен на рис. 7.

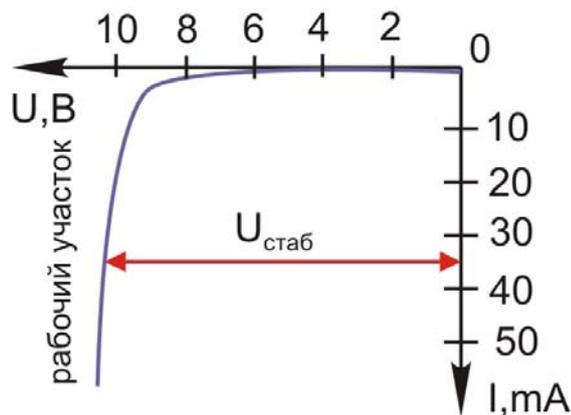


Рис. 7

Особенно целесообразно применение полупроводниковых стабилизаторов для стабилизации низких напряжений (10-30 В).

Схема включения стабилитрона приведена на рис. 8.

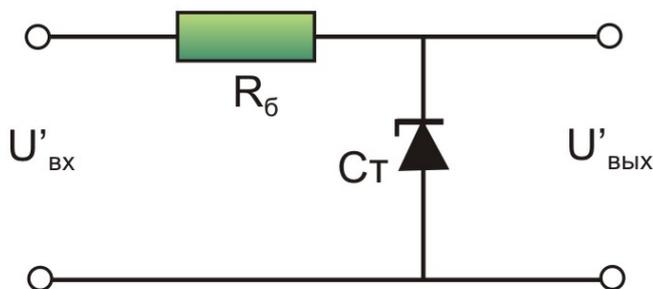


Рис. 8

На рис. 8:

Cт – стабилитрон;

R_б – балластное сопротивление.

Дифференциальное сопротивление стабилитрона $R_d = \partial U / \partial I$ по абсолютной величине много меньше статического сопротивления $R_{ст} = U / I$; чем больше отношение $R_{ст} / R_d$, тем выше коэффициент стабилизации $K_{ст}$. Балластное сопротивление $R_б$ не только ограничивает ток в цепи стабилитрона, но и существенно для получения стабилизирующего эффекта: если $R_б = 0$, то $K_{ст} = 1$, то есть стабилизация отсутствует.

Умножители напряжения

Умножение напряжения в выпрямителях – многократное увеличение выпрямленного напряжения. В простейшем случае удвоение напряжения может быть осуществлено с помощью двух электрических вентилях B_1 и B_2 , каждый из которых заряжает свой конденсатор C_1 и C_2 до постоянного напряжения, близкого к амплитуде переменного питающего напряжения U (рис. 9). В результате этого падение напряжения на нагрузке R станет равным $\sim 2U$. Последовательным включением емкостей, заряжаемых через вентили, можно получить любое умножение напряжения. Например, однополупериодная схема, дающая четырехкратное умножение напряжения, состоит из четырех конденсаторов и вентилях.

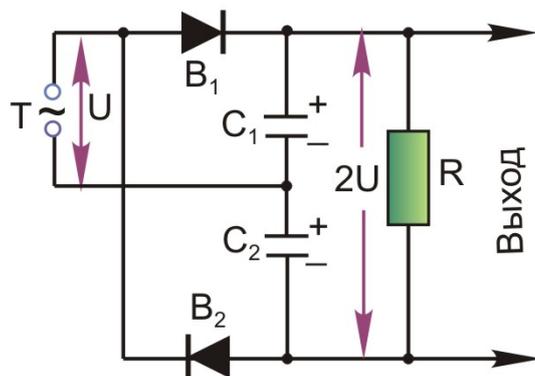


Рис. 9

Недостатки схемы умножения напряжения – высокие пульсации, амплитуда которых возрастает с увеличением числа ступеней умножения (каскадов), и высокое выходное сопротивление, что уменьшает выходное напряжение с увеличением нагрузки.

Экспериментальная часть

Общий вид установки приведен на рис. 10.

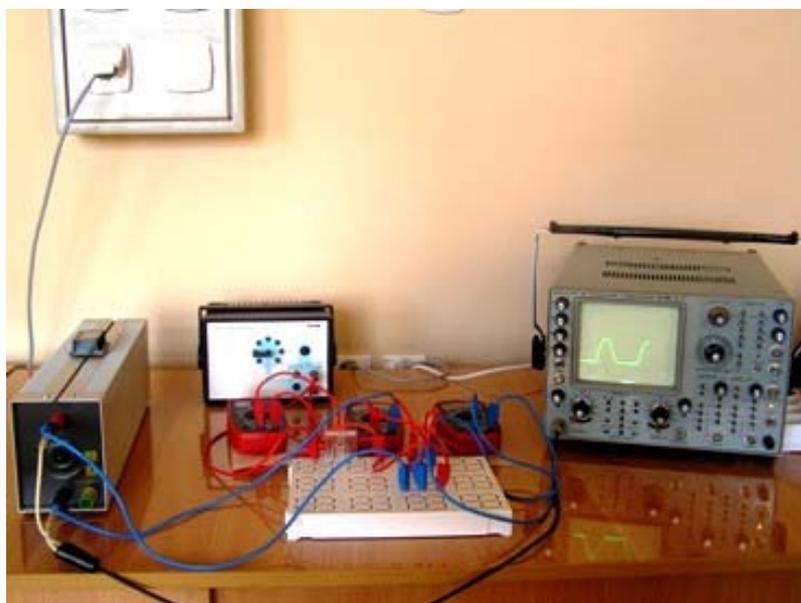


Рис. 10

Приборы и принадлежности

1. Многоступенчатый трансформатор T (14 В переменный ток / 12 В постоянный ток, 5 А).
2. Полупроводниковые диоды Si/IN (4).
3. Набор конденсаторов: $C = 470$ мкФ (1), 10 мкФ (4), 2000 мкФ (1), 1000 мкФ (1).
4. Угольный резистор $R_L = 470$ Ом, 1 Вт (1).
5. Угольный резистор $R_V = 47$ Ом, 1 Вт (1).

6. Стабилитрон ZF 4.7 (1)/
7. Осциллограф, 2 канала (1).
8. Цифровые мультиметры (3).
9. Реостат R_L , 330 Ом, 1 А (1).
10. Коммутационная панель, соединительные шнуры, штекеры.

Внимание! Перед включением источника питания пригласить преподавателя или инженера для проверки собранных схем.

Упражнение 1. Однополупериодный выпрямитель

1. Собрать схему, изображенную на рис. 11. Установить входное напряжение $U_i = 4$ В.

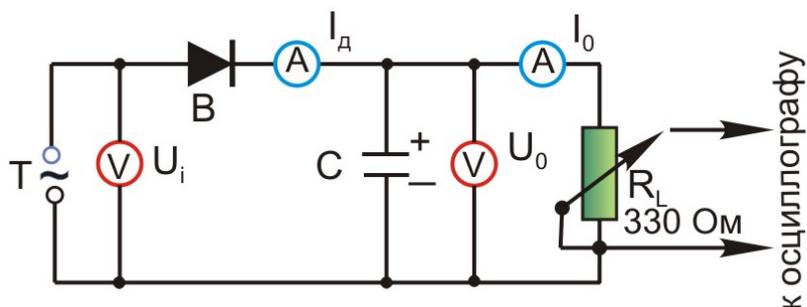


Рис. 11

2. Вывести выходное напряжение (без зарядного конденсатора) на осциллограф. (Осциллограф используется с разверткой по времени для наблюдения формы напряжения на нагрузочном сопротивлении R_L , то есть вида зависимости тока I_0 через выпрямитель от времени). Зарисовать полученную осциллограмму.
3. Включить в цепь конденсатор и зарисовать вид осциллограммы при наличии в цепи емкостного фильтра.
4. Измерить зависимость тока на диоде I_d от величины выходной силы тока I_0 (с зарядным конденсатором). Выходной ток меняется нагрузочным сопротивлением R_L . Построить зависимость $I_d = f(I_0)$.
5. Измерить зависимость величины переменной составляющей $U_{\text{пульс}}$ выходного напряжения от выходного тока (при $C = \text{const}$). Построить график зависимости $U_{\text{пульс}} = f(I_0)$ и сравнить полученную кривую с зависимостью, выраженной формулой (3).
6. Измерить зависимость $U_{\text{пульс}}$ от емкости при постоянном выходном токе ($I_0 = \text{const}$). Построить зависимость $\ln U_{\text{пульс}}$ от $\ln C$ и определить значение константы b_3 .
7. Измерить зависимость выходного напряжения U_0 от входного U_i (при $I_0 = 0$) и представить эту зависимость графически. По графику определить константу b_1 (см (1')), которая численно равна прямому напряжению диода.

Упражнение 2. Мостовая схема

1. Собрать схему, представленную на рис. 12. Установить входное напряжение $U_i = 4$ В.

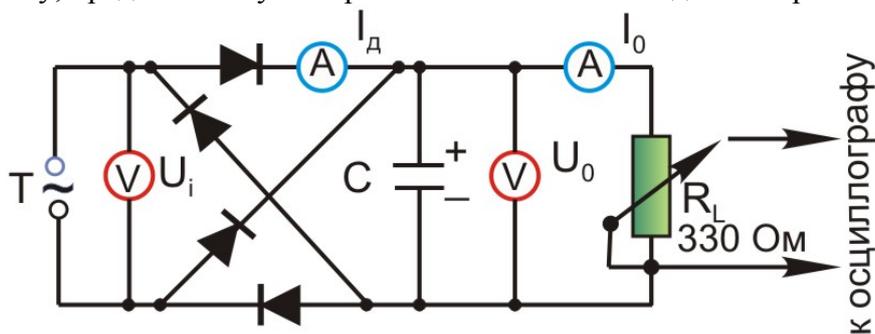


Рис. 12

1. Выполнить последовательно все задания (2-7), указанные выше для однополупериодного выпрямителя.
2. Сравнить зависимости и результаты вычислений для однополупериодного и двухполупериодного выпрямления.

*Упражнение 3. Стабилизация напряжения

1. Собрать схему, представленную на рис. 13.

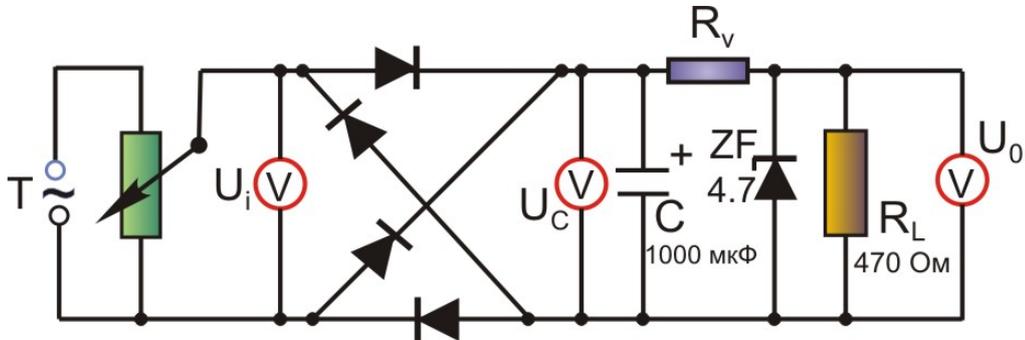


Рис. 13

2. Измерить зависимость напряжения на зарядном конденсаторе U_C от входного напряжения U_i .
3. Измерить зависимость выходного напряжения U_0 от входного U_i .
4. На одном графике построить полученные зависимости.
5. Рассчитать коэффициент стабилизации по тангенсу угла наклона полученных зависимостей к оси U_i :

$$K_{\text{ст}} = \frac{\Delta U_C}{\Delta U_0}.$$

*Упражнение 4. Умножитель напряжения

1. Собрать схему, представленную на рис. 14. (Выпрямитель, схема которого приведена на рис. 14, состоит из $n = 2$ каскадов. Каждый каскад генерирует напряжение $U = 2\sqrt{2} \cdot U_{\text{вх.эфф}}$. Если выпрямитель не нагружен, то $U_0 = 2n\sqrt{2} \cdot U_i - 2nU_d$. Эту зависимость можно записать в виде:

$$U_0 = a_4 + b_4 U_i. \quad (4)$$

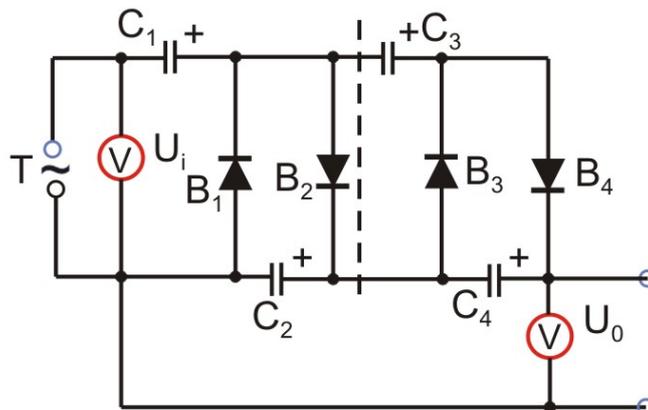


Рис. 14

* Задания, помеченные звездочкой, предназначены для студентов-физиков

2. Измерить зависимость выходного напряжения от входного (при нулевой нагрузке).
3. По графику $U_0 = f(U_i)$ найти коэффициенты a_4 и b_4 (см. (4)), из которых получить значение прямого напряжения диодов U_d и число каскадов n умножителя.

Контрольные вопросы

1. Какие вещества называются полупроводниками?
2. Что такое собственная проводимость и примесная проводимость полупроводника?
3. Как образуется и какими свойствами обладает р-п переход?
4. Какие четыре вида токов текут туда и обратно через р-п переход в случае динамического равновесия в нем и в отсутствие разности потенциалов?
5. Какие причины вызывают соответствующее движение носителей тока через переход?
6. Каково физическое объяснение вентильного свойства р-п перехода?
7. Объясните работу однополупериодного выпрямителя, двухполупериодного выпрямителя.
8. Зачем и как осуществляется сглаживание выпрямленного тока?
9. Как работают емкостной и индуктивный фильтры?
10. *Объясните, как работает полупроводниковый стабилизатор.

Литература

1. *С. Г. Калашников. Электричество / Калашников С. Г. М.: Наука, 1977.*
2. *Я. А. Федотов. Основы физики полупроводниковых приборов / Федотов Я. А. М.: Наука, 1963.*