

Лабораторная работа 2.19.

ИЗУЧЕНИЕ ПОЛУПРОВОДНИКОВОГО ДИОДА

Цель работы: знакомство с основами природы электропроводности полупроводников и механизмами возникновения в них электрического тока; знакомство с **p–n**-переходом и работой полупроводникового диода.

Задание: снять вольтамперную характеристику полупроводникового диода и рассчитать постоянную Больцмана путем обработки полученных данных.

Подготовка к выполнению работы: изучить описание работы и приведенную в списке литературу (см. ниже). Дать объяснение электропроводности полупроводников с собственной проводимостью и полупроводников с проводимостью **p**-типа и **n**-типа. Дать объяснение работы **p–n**-перехода. Изучить экспериментальную установку. Оформить в тетради протокол лабораторной работы.

Библиографический список

1. Савельев И.В. - Курс общей физики.- М. : Наука, 1988, т.3, §§ 53, 57-59, 64, с. 221-225.
2. Трофимова Т.И. – Курс физики. – М. : Высшая школа, 1990, §§ 240-243, 249, 250.
3. Калашников Э.Г. - Электричество. - М. : Наука, 1977, §§ 151-155, 203, 204.

Контрольные вопросы

1. В чем состоит отличие полупроводников от металлов и от диэлектриков?
2. Назовите представителей полупроводниковых материалов.
3. Какова природа электропроводности электронных полупроводников?
4. Дайте объяснение характера зависимости сопротивления полупроводников от температуры.
5. В чем заключается понятие “дырка”?
6. Какой процесс называется рекомбинацией?

7. Какой процесс называется собственной проводимостью полупроводников?
8. Каким образом создается примесная электронная или дырочная электропроводность?
9. Что называется **p–n**-переходом?
10. Опишите механизм односторонней проводимости полупроводникового диода с **p–n**-переходом.
11. Нарисуйте принципиальную схему работы диода в пропускном и непропускном направлениях.
12. Объясните ход вольтамперной характеристики диода.
13. Назовите класс точности приборов, используемых при измерениях.
14. Каков порядок опыта по снятию вольтамперной характеристики диода?

Описание аппаратуры и метода измерений

подавляющее большинство веществ не принадлежит ни к хорошим проводникам электрического тока, ни к хорошим диэлектрикам, а занимают промежуточное положение между теми и другими. Эти вещества называют полупроводниками. Особый интерес представляют так называемые *электронные полупроводники*, т.е. кристаллические вещества, проводимость которых как и у хороших проводников металлов обусловлена направленным перемещением электронов.

Примерами наиболее распространенных электронных полупроводников являются: кремний, германий, селен, теллур; а также соединения: сульфиды, селениды, теллуриды (соединения металлов соответственно с серой, селеном и теллуrom); окислы: окиси урана, цинка, титана, закись меди и многие другие вещества.

Одним из важнейших отличительных признаков полупроводников, выделяющих их в особую группу, является сильная зависимость их электрических свойств от температуры. В отличие от металлов, при понижении температуры проводимость полупроводников уменьшается. При температурах близких к абсолютному нулю полупроводники ведут себя подобно диэлектрикам. Другими характерными особенностями

полупроводников являются сильнейшая зависимость их проводимости от ничтожных количеств примесей и их чувствительность к различного рода излучениям.

Многие фундаментальные свойства твердых тел и, прежде всего, сам факт существования проводников, полупроводников и диэлектриков удовлетворительно объясняются *зонной теорией* твердого тела, исходя из квантовых представлений. Однако в данной работе мы ограничимся нестрогим, но зато простым качественным описанием свойств полупроводников на основе полуклассических представлений.

Для того, чтобы понять основные физические процессы в полупроводниках, рассмотрим вкратце их свойства на примере

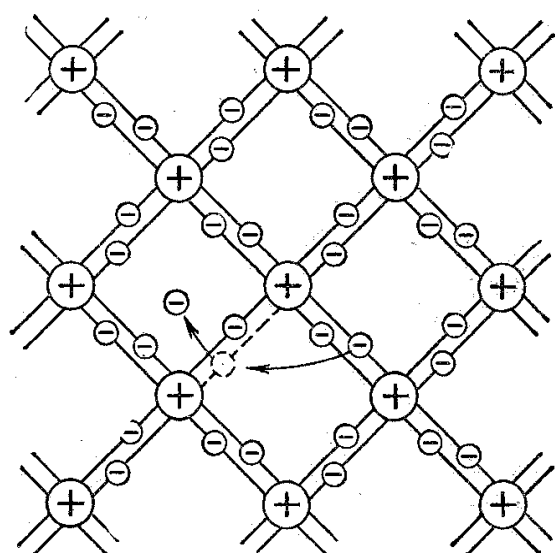


Рис.1.

можно представить в виде плоской структуры, изображенной на рис.1. Внешние оболочки атомов кремния и германия образованы четырьмя валентными электронами. При объединении таких атомов в кристаллическую решетку каждый атом как бы дополняет свою внешнюю оболочку до восьми электронов, образуя с четырьмя окружающими его атомами так называемые парно-электронные или *ковалентные* связи (двойные линии на рисунке). Картина, представленная на рисунке, соответствует чистому (без примесей) полупроводнику. Кружочки со знаком (+) обозначают положительно заряженные атомные остатки (т.е. ту часть атома, которая остается после

наиболее типичных полупроводников. Кремний и германий, основные материалы, используемые в электронных приборах, имеют кристаллическую решетку типа алмазной. Ячейки решетки представляют собой правильные тетраэдры, в вершинах которых расположены атомы. Пятый атом находится в середине тетраэдра. Условно такое взаимное расположение атомов

удаления валентных электронов), кружки со знаком (-) – валентные электроны (*электроны связи*).

При очень низкой температуре все валентные электроны участвуют в образовании связей между атомами и не могут участвовать в процессе электропроводности – полупроводник ведет себя подобно диэлектрику. При повышении температуры тепловые колебания решетки приводят к разрыву отдельных валентных связей. Минимальная энергия, необходимая для разрыва одной валентной связи, называется *энергией генерации*. Электрон, освободившийся при разрыве связи, становится *электроном проводимости* и может свободно перемещаться по всему объему полупроводника, участвуя в процессе электропроводности. При комнатной температуре один электрон проводимости приходится примерно на миллиард нейтральных атомов, т.к. энергия генерации по порядку величины составляет около 1 эВ и значительно превышает тепловую энергию.

Кроме процесса переноса заряда с помощью электронов проводимости в полупроводниках реализуется и другой механизм электропроводности. Он обусловлен тем, что при разрыве валентной связи образуется вакантное место, в окрестности которого возникает избыточный положительный заряд, равный по абсолютной величине заряду электрона. Такой положительный заряд принято называть *дыркой* (пунктирный кружок на рис.1). Наличие дырки, как показано на рис.1, создает дополнительную возможность для переноса заряда: на место отсутствующего электрона может перескочить какой-либо электрон из соседней связи (практически без затраты энергии), при этом дефектная связь будет восстановлена, а дырка возникнет уже на новом месте и т.д. Таким образом, происходит перескок соседних электронов связи на величину межатомного расстояния, а дырка, в конечном счете, может странствовать по всему кристаллу. Следует (эффект Холла) и теоретическое обоснование. Связано это с тем, что движение электронов подчиняется законам не классической, а квантовой механики. Из законов квантовой механики следует, что если концентрация дырок мала по сравнению с концентрацией электронов связи, то все электрические процессы, связанные с перемещениями

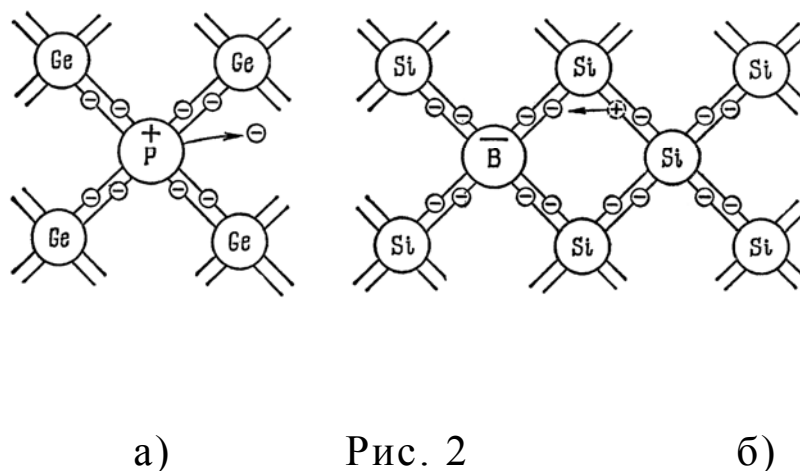
электронов связи, происходят так, как если бы на самом деле в полупроводнике перемещались не электроны связи, а дырки – частицы, имеющие определенную массу, элементарный положительный заряд и подчиняющиеся простым классическим законам движения.

Наряду с переходами электронов из связанных состояний в свободные (генерации электронов и дырок) реализуются и обратные переходы, при которых электроны проводимости восстанавливают нарушенные связи. Пары электрон – дырка при этом исчезают. Такой процесс носит название *рекомбинации*. В состоянии теплового равновесия устанавливается такая концентрация электронов (и равная ей концентрация дырок), при которой число прямых и обратных переходов в единицу времени одинаково. При понижении температуры подвижное равновесие процессов генерации и рекомбинации сдвигается в сторону уменьшения числа генераций. При этом уменьшается концентрация свободных электронов и дырок, что ведет к увеличению сопротивления полупроводника.

В отсутствие внешнего электрического поля электроны и дырки движутся хаотически. При включении поля на хаотическое движение накладывается упорядоченное движение: электронов против поля и дырок в направлении поля, т.е. возникает электрический ток, свободными зарядами которого являются электроны проводимости и дырки, концентрации которых в чистых полупроводниках, лишенных химических примесей и других дефектов решетки, одинаковы. Рассмотренный процесс проводимости получил название *собственной проводимости*.

Еще один способ образования носителей тока в полупроводниках заключается во введении в чистый полупроводник контролируемых примесей. Предположим, что в чистый германий внедрено небольшое количество атомов примеси. В качестве примеси рассмотрим какой-либо элемент пятой группы таблицы Менделеева, например фосфор. Для осуществления ковалентных связей в решетке германия необходимы всего четыре валентных электрона, поэтому пятый валентный электрон атома фосфора оказывается как бы лишним

и легко отделяется от атома за счет очень небольшой дополнительной энергии. При этом возникает электрон проводимости, не оставляющий дырки, которую мог бы занять соседний электрон, а атом фосфора превращается в положительно заряженный, связанный ион. Описанный процесс, схематически представленный на рис.2 а), приводит к тому, что в полупроводнике кроме электронов и дырок собственной проводимости появляется дополнительное число свободных электронов, концентрация которых определяется концентрацией примеси. Легко подсчитать, что добавление одного атома фосфора на миллион атомов германия приводит к преобладанию концентрации электронов над концентрацией дырок в тысячу раз. Примеси, атомы которых отдают электроны, получили название *донорных* примесей, а полупроводник, в котором преобладают отрицательные носители заряда – полупроводника **n**-типа.



Теперь рассмотрим случай, когда в решетку чистого кремния внедрены трехвалентные атомы бора. Эта ситуация условно изображена на рис.2 б). Три своими валентными электронами атом бора вступит в ковалентные связи с соседями. Недостающий четвертый электрон будет захвачен из одной из соседних связей. В соответствующем месте образуется дырка, а атом бора превратится в отрицательный связанный ион. В таком полупроводнике кроме электронов и дырок собственной проводимости появляется дополнительное число дырок,

концентрация которых так же определяется концентрацией примеси и может на несколько порядков превышать концентрацию собственных свободных зарядов. Примеси, вызывающие появление дырок, получили название *акцепторных*, а полупроводники, в которых преобладает дырочная проводимость, – полупроводниками **p**-типа.

Следует иметь в виду, что при комнатных температурах практически все атомы примесей оказываются ионизованы. Заметим попутно, что проводимость полупроводников, связанная с наличием в них примесей, носит название *примесной*, носители заряда, представленные в большинстве (электроны в полупроводнике **n**-типа и дырки в полупроводнике **p**-типа), получили название *основных* носителей заряда, а представленные в меньшинстве – *неосновных*. Если создать контакт двух полупроводников с различными типами проводимости, то на границе возникает тонкий переходный слой, называемый *электронно-дырочным* или **p-n-переходом**.

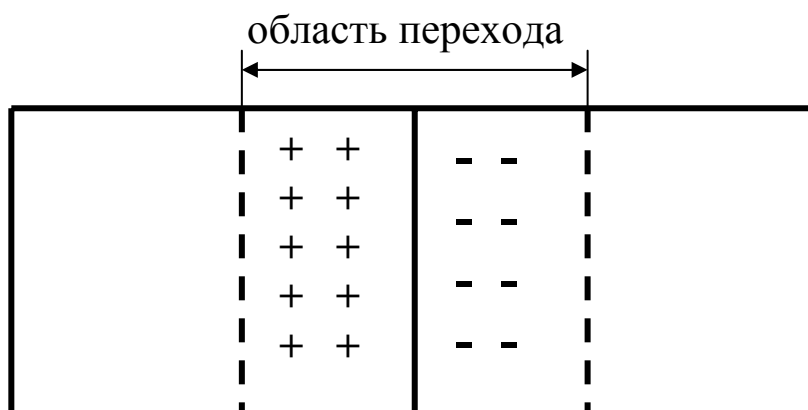


Рис. 3

Технологически такой «контакт» создают путем введения в смежные области одного и того же полупроводника донорных и соответственно акцепторных примесей.

Рассмотрим подробнее, какие процессы приводят к возникновению переходного слоя. Пусть внешнее напряжение отсутствует. Непосредственно после образования контакта свободные электроны вследствие теплового движения начнут диффундировать из **n**-полупроводника, где их концентрация

велика, в **p**-полупроводник, где она мала, и там рекомбинировать с дырками. В обратном направлении по той же причине происходит диффузия дырок и их рекомбинация со свободными электронами **n**-полупроводника. В **n**-области полупроводника из-за ухода электронов вблизи границы остается положительный объемный заряд ионов-доноров, который не компенсируется теперь электронами. В **p**-области из-за ухода дырок вблизи границы возникает отрицательный объемный заряд ионов-акцепторов, который не компенсируется теперь дырками. Эти объемные заряды образуют двойной электрический слой (рис. 3), электрическое поле которого E_k противодействует дальнейшей диффузии основных носителей тока через область заряженного слоя. Контактному полю E_k соответствует определенное значение *контактной разности потенциалов* $\Delta\phi_k$, возникающей между границами заряженного слоя. В свою очередь возникновение контактной разности потенциалов означает образование в области перехода *потенциального барьера* для электронов, движущихся из **n**-области полупроводника в **p**-область, и для дырок, движущихся в обратном направлении. Высота этого барьера равна $e\Delta\phi_k$, где e – элементарный заряд, определяет величину *диффузионного тока*, текущего через **p-n**-переход в направлении, противоположном направлению контактного поля.

С другой стороны контактное поле E_k вызывает дрейф неосновных носителей через область переходного слоя. С этим процессом связано возникновение *дрейфового тока*, текущего через **p-n**-переход в направлении, совпадающем с направлением контактного поля E_k . Практически все неосновные носители, количество которых обычно мало, участвуют в образовании этого тока, поэтому его величина не зависит от высоты потенциального барьера и определяется только скоростью генерации неосновных носителей в приконтактном слое.

В состоянии равновесия устанавливается такая высота потенциального барьера, при которой суммарный ток через переход равен нулю. Отметим, что определенной высоте потенциального барьера соответствует определенная ширина

переходного слоя, которая в состоянии равновесия имеет величину порядка 10^{-7} м. При этом контактная разность потенциалов составляет десятые доли вольта. Переходный слой, который называют также *запорным*, оказывается сильно обедненным носителями тока, т.к. в нем идет активная рекомбинация электронов и дырок, и обладает поэтому большим сопротивлением.

На электрических свойствах **p-n**-перехода основано действие двухэлектродного полупроводникового прибора - *полупроводникового диода*. Полупроводниковый диод представляет собой конструктивно оформленный **p-n**-переход с омическими контактами, служащими для включения его в электрическую цепь.

Действие большого класса полупроводниковых диодов основано на нелинейной зависимости тока **I**, текущего через **p-n**-переход, от напряжения на нем **U**, и описывается формулой:

$$I = I_0 \left(\exp\left(\frac{eU}{kT}\right) - 1 \right), \quad (1)$$

где I_0 - ток насыщения **p-n**-перехода, e - величина заряда электрона, k - постоянная Больцмана, T - абсолютная температура. Для прямого направления $U > 0$, для обратного - $U < 0$.

График зависимости **I** от **U** называется *вольтамперной характеристикой* диода. Типичная вольтамперная характеристика полупроводникового диода показана на Рис. 4. Постараемся объяснить ход представленной зависимости, используя развитые выше представления.

Если соединить плюс источника напряжения с **n**-областью кристалла, а минус с **p**-областью (напряжение такого направления получило название *обратного* или *запорного*), то внешнее электрическое поле **E**, созданное источником, будет

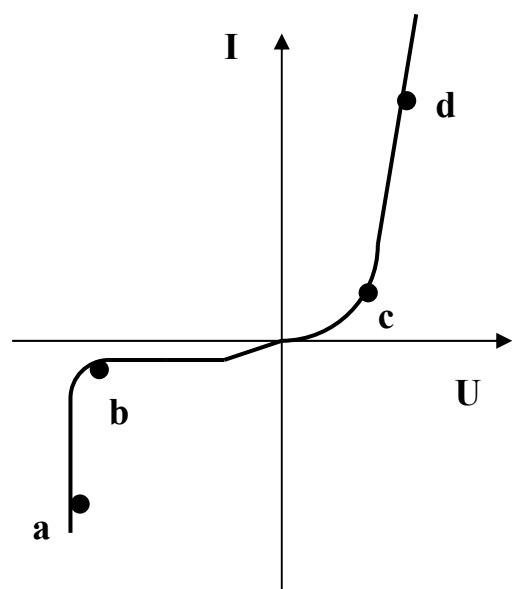
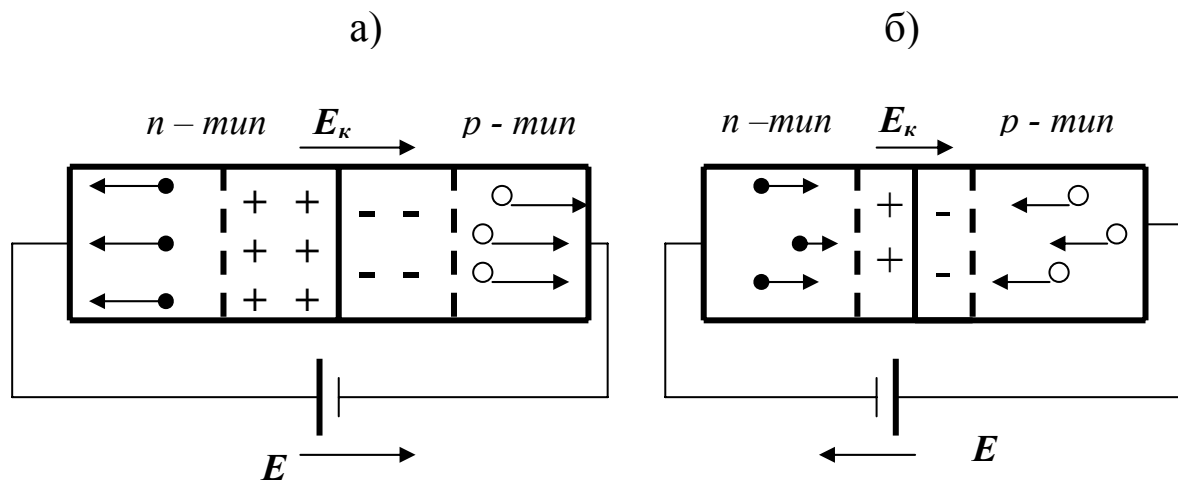


Рис.4.

совпадать по направлению с полем E_k контактного слоя (рис.5 а)). Это поле вызовет смещение электронов в **n**-области полупроводника и дырок в его

Рис. 5



p-области от границы **p-n**-перехода в противоположные стороны. В результате запирающий слой расширится и его сопротивление возрастет. Соответственно увеличится и высота потенциального барьера для основных носителей, что приведет к уменьшению величины диффузионного тока. Уже при напряжениях порядка 1 В величина этого тока снижается практически до нуля. Величина же дрейфового тока не зависит от высоты потенциального барьера. В результате, при наложении обратного напряжения, результирующий ток (этот ток называют *обратным*) через переход быстро достигает насыщения и полностью определяется величиной дрейфового тока неосновных носителей I_0 (рис.4, участок **b0**). При достаточно больших обратных напряжениях (каждый **p-n**-переход характеризуется своим предельным значением обратного напряжения) происходит электрический пробой **p-n**-перехода, характеризующийся резким возрастанием обратного тока (рис. 4, участок **ab**).

Если теперь поменять полярность соединения источника, т. е. соединить минус источника напряжения с **n**-областью кристалла, а плюс с **p**-областью (напряжение такого направления называется *прямым* или *пропускным*), то внешнее электрическое

поле E будет направлено противоположно полю E_k контактного слоя (рис.5 б)). Это поле вызовет движение электронов в n -области полупроводника и дырок в его p -области к границе p - n -перехода навстречу друг другу. В результате ширина запирающего слоя и его сопротивление уменьшаются. Соответственно уменьшается и высота потенциального барьера для основных носителей, что приводит к росту величины диффузионного тока. При этом величина дрейфового тока будет оставаться практически неизменной. Следовательно, результирующий ток станет отличен от нуля. Понижение потенциального барьера пропорционально приложенному напряжению. При уменьшении высоты барьера ток основных носителей, а следовательно и результирующий ток, быстро нарастает. Таким образом, в направлении от p -области к n -области полупроводника p - n -переход пропускает ток (этот ток называют *прямым*), сила которого быстро нарастает с ростом приложенного напряжения (рис.4, участок $0d$). Нелинейность вольт-амперной характеристики диода при малых значениях прямого напряжения (рис.4, участок $0c$) можно объяснить тем, что с ростом этого напряжения ширина запирающего слоя, а значит и его сопротивление, уменьшаются. При достижении прямым напряжением величины порядка нескольких десятых вольта запирающий слой практически исчезает. При более высоких значениях напряжения сопротивление диода почти не меняется (рис.4, участок cd).

Односторонняя проводимость полупроводникового диода используется для выпрямления и преобразования переменных токов.

Путем несложных математических операций формула (1) может быть преобразована к виду:

$$U = \frac{kT}{e} \cdot \ln\left(\frac{I}{I_0} + 1\right). \quad (2)$$

Откуда, переходя к приращениям:

$$k = \frac{e}{T} \cdot \frac{\Delta U}{\Delta \left(\ln \left(\frac{I}{I_0} + 1 \right) \right)} \quad (3)$$

Схема установки (упрощенная), используемой в данной работе для получения вольтамперной характеристики полупроводникового диода, представлена на рис.6.

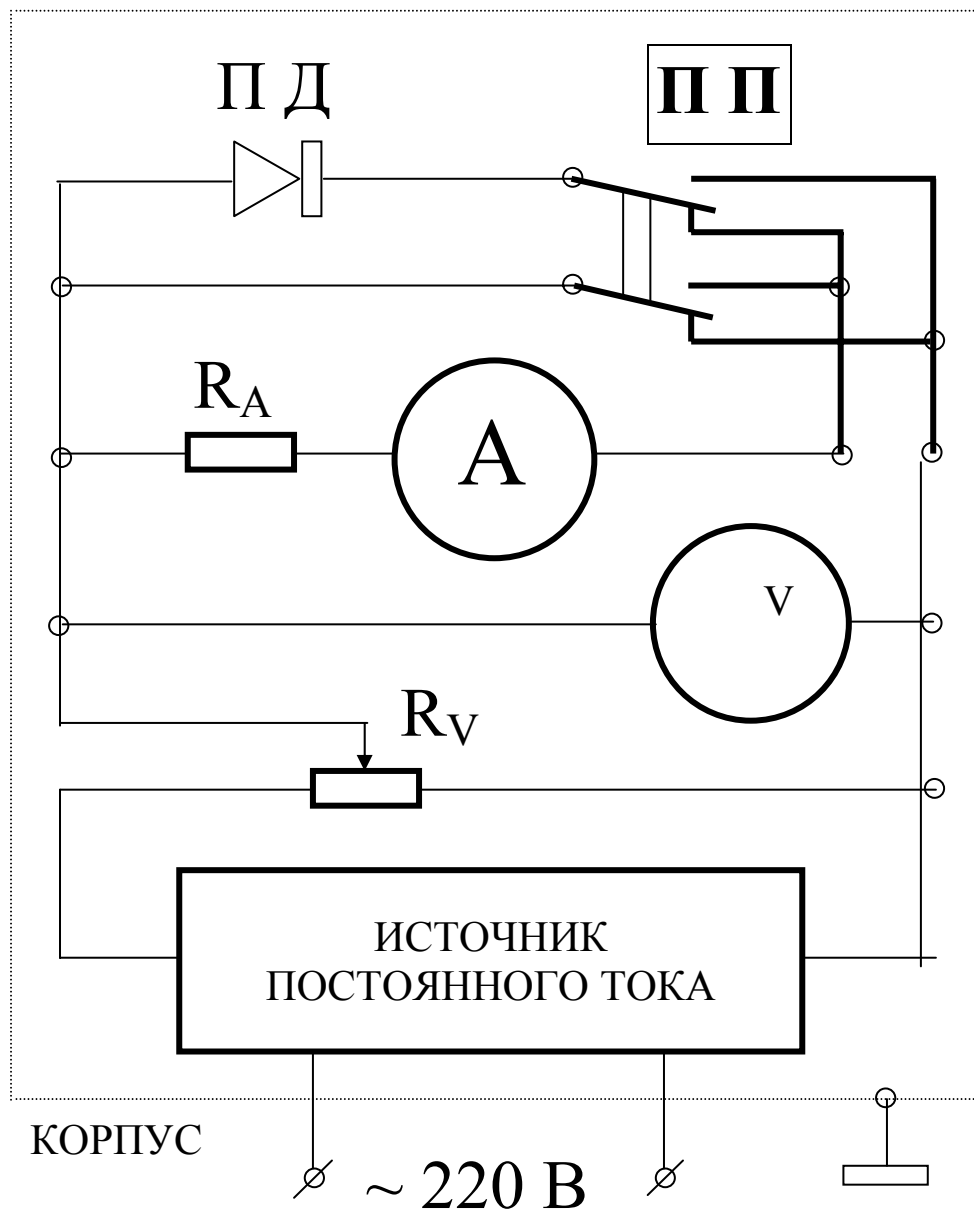


Рис. 6

Установка собрана в едином металлическом корпусе, на передней панели которого установлены головки измерительных приборов: амперметра A и вольтметра V , а так же: ручка управления реостатом R_V , переключатель полярности ПП: «Прямая ветвь» - «Обратная ветвь», переключатель пределов измерения амперметра: «Миллиамперы» – «Микроамперы», тумблер «СЕТЬ» и индикаторная лампочка сети (на схеме не показаны). Из схемы видно, что переключатель полярности позволяет подключить полупроводниковый диод ПД как в пропускном, так и в непропускном направлениях.

Порядок выполнения работы

Сначала нужно удостовериться, что корпус установки подключен к защитному заземлению, а ручка реостата, регулирующего напряжение на полупроводниковом диоде, выведена в крайнее левое положение. Затем включить тумблер «СЕТЬ» и дать установке прогреться в течение пяти-семи минут.

Прежде чем приступить к измерениям составляют спецификацию электроизмерительных приборов и рассчитывают погрешности измеряемых величин по формуле:

$$\Delta X = \frac{K \cdot X_m}{100} , \quad (4)$$

где K – класс точности прибора (указывается на лицевой стороне прибора), X_m – предельное значение измеряемой величины. При этом погрешность амперметра следует рассчитать для каждого из пределов измерений.

Далее, установив переключатель полярности в положение «Прямая ветвь», а переключатель пределов в положение «Миллиамперы», снимают зависимость прямого тока диода от напряжения (не менее десяти значений во всей области возможных напряжений).

Затем переключатель полярности переводят в положение «Обратная ветвь», переключатель пределов (он может быть выполнен в виде кнопки, которую во время измерения нужно

держат нажатой) – в положение «Микроамперы» и проводят аналогичные измерения для обратного тока. При этих измерениях можно ограничиться двумя-тремя значениями напряжений, при которых обратный ток перестает меняться (достигнут ток насыщения I_0).

Результаты измерений заносят в Таблицу 1 с точностью, рассчитанной по формуле (4).

По окончании измерений вывести ручку реостата в крайнее левое положение, переключатель пределов поставить в положение «Миллиамперы», переключатель полярности в положение «Прямая ветвь», тумблер «СЕТЬ» в положение «Выкл.».

Таблица 1.

Пропускное направление			Непропускное направление		$\ln\left(\frac{I}{I_0} + 1\right)$
№	$U_V, \text{мВ}$	$U, \text{мВ}$	$I, \text{мА}$	$U, \text{мВ}$	
1.					
2.					
...					

Обработка результатов измерений

1. Рассчитать для каждого измеренного значения прямого тока соответствующее значение напряжения на диоде по формуле:

$$U = U_V - I \cdot R_A .$$

Результаты расчетов занести в Таблицу 1. (значение сопротивления R_A указано на установке).

Такой перерасчет приходится делать потому, что, как видно из схемы установки (рис. 6), вольтметр V измеряет сумму напряжений на диоде и на сопротивлении R_A .

2. На листе миллиметровой бумаги, по данным Таблицы 1, построить график зависимости тока через диод в прямом и

обратном направлении – вольтамперную характеристику диода (по подобию рис. 4). Размер графика должен быть не менее тетрадной страницы. Масштабы вдоль оси тока в прямом и обратном направлениях следует выбрать разными.

3. По экспериментальной вольтамперной характеристике (обратная ветвь) определить ток насыщения I_0 . Используя полученное значение I_0 , вычислить для каждого значения тока I пропускного направления величину $\ln\left(\frac{I}{I_0} + 1\right)$. На

миллиметровой бумаге построить график зависимости $U = f\left(\ln\left(\frac{I}{I_0} + 1\right)\right)$ (размер графика должен быть не менее

тетрадной страницы). Как следует из формулы (2), теоретически этот график представляет собой прямую, проходящую через начало координат. Поскольку экспериментальные точки имеют разброс, прямую нужно провести так, чтобы алгебраическая сумма расстояний от точек до прямой (расстояния от точек, лежащих по одну сторону от прямой берут условно со знаком плюс, а по другую со знаком минус) стремилась к нулю.

4. С помощью графика найти соответствующие приращения величин (отметить выбранные приращения на графике) и рассчитать угловой коэффициент построенной прямой по формуле:

$$\frac{\Delta U}{\Delta\left(\ln\left(\frac{I}{I_0} + 1\right)\right)}$$

При этом нужно иметь в виду, что для большей точности расчета, нужно выбрать максимально возможные приращения (которые удобно отсчитывать от нуля). Подставив найденное значение углового коэффициента в формулу (3), вычислить постоянную Больцмана. (Считать, что $T = 300$ К). Выписать табличное значение постоянной Больцмана и сравнить с найденным.