



Дисциплина: Электротехника и электроника



Лектор: Погодин Дмитрий Вадимович
Кандидат технических наук,
доцент кафедры РИИТ
(кафедра Радиоэлектроники и
информационно-измерительной
техники)

Рекомендуемая литература

1. Атабеков Г. И. Теоретические основы электротехники. Ч.1. Линейные электрические цепи. – М.: Энергия, 1978.
2. Гусев В. Г., Гусев Ю. М. Электроника. М., Высш. шк., 2002.
3. Кучумов А.И.. Электроника и схемотехника: Учебное пособие.- М.: Гелиос , 2005.
4. Погодин Д.В., Насырова Р.Г, Краев В.В.. Электротехника. Учебное пособие по дисциплине «Электротехника и электроника». Казань, Изд-во Казан. гос. техн. ун-та, 2005. 154с. - 0.9 экз. на студента.
5. Погодин Д.В., Насырова Р.Г., Краев В.В., Куншина Н.Б.. Электроника: Учебное пособие по дисциплине «Электротехника и электроника». Казань, Изд-во Казан. гос. техн. ун-та, 2010. 254с. - 0.9 экз. на студента.

Дополнительная литература



- Методические указания к лабораторным работам:
 1. Ознакомление с основными измерительными приборами. Погодин Д.В. 2010.
 2. Исследование частотных характеристик простейших цепей. Погодин Д.В., Краев В.В. 2010.
 3. Исследование переходных характеристик простейших цепей. Погодин Д.В., Краев В.В. 2010.
 4. Исследование характеристик одиночных колебательных контуров. Погодин Д.В., Краев В.В. 2010.
 5. Исследование полупроводниковых диодов. Погодин Д.В. Насырова Р.Г. 2010.
 6. Биполярные транзисторы. Погодин Д.В. Насырова Р.Г. 2011.
 7. Исследование усилителя с RC-связью. Погодин Д.В. 2011.
 8. Линейные устройства на ОУ. Погодин Д.В.. 2011.
 9. Компараторы напряжений. Евдокимов Ю. К. 2001.
- Пособия к выполнению курсовой работы:
 1. Погодин Д.В., Насырова Р.Г. Расчет частотных и переходных характеристик электрических цепей. Учебное пособие к курсовой и расчетно-графическим работам. Изд-во Казан. гос. тех. ун-та. Казань. 2005 г.
 - 2.
- Пособия для самоподготовки:
 1. Учебное пособие для самоподготовки к тестированию по Электротехнике. Погодин Д.В., 2009
 2. Учебное пособие для самоподготовки к тестированию по Электротехнике. Погодин Д.В., 2009



1. Учебный цикл.

Учебный семестр подразделяется на 2 учебных модуля, каждый из которых заканчивается аттестацией путем компьютерного тестирования. Продолжительность первого модуля: 1-8 неделя, второго: 9-16 неделя. Учебный цикл заканчивается итоговой аттестацией - экзаменом путем компьютерного тестирования или по билетам.

2 Балльная шкала.

В университете действует следующая шкала балльно-рейтинговой оценки для дисциплины:

86 - 100 баллов – «отлично», 76 – 85 баллов – «хорошо», 51 – 75 баллов – «удовлетворительно».

3. Распределение баллов на дисциплину по семестру.

Экзамен оценивается в 50 баллов. Студент считается сдавшим экзамен, если он на экзамене получил не менее 25 баллов.

Остальные 50 баллов распределяются между двумя промежуточными контрольными мероприятиями после 8-ой неделе и после 16 неделе. На каждое из них отводится по 25 баллов, из них 17 баллов за тестирование по теоретическому курсу и 8 баллов за своевременное и успешное выполнение и защиту лабораторных работ

На одну лабораторную работу выделяется 2 балла. Из них 1 балл за своевременное выполнение и еще 1 балл за своевременную сдачу теоретической части и оформленного отчета работы. Своевременным выполнением считается выполнение в составе группы по расписанию, своевременной сдачей – сдача до проведения следующей лабораторной работы. Пропуск занятия без уважительных причин отмечается оценкой 0 баллов с отработкой в конце семестра -1 балл.

Активность студентов на занятиях оценивается с максимальной оценкой в 10 дополнительных баллов.

«Стоимость» в баллах вопросов в билете на экзамене (зачете), устанавливается преподавателем индивидуально. Оценка за каждый вопрос проставляется дифференцированно с учетом дополнительных вопросов по теме вопроса.

4. Контроль учебной работы студента.

Сроки контрольных мероприятий: промежуточных - 8, 16, неделя и итоговый контроль на экзамене.

Отсутствие студента на промежуточном контроле без уважительной причины оценивается нулевым баллом.

Если контрольное мероприятие пропущено по уважительной причине (например, болезнь, подтвержденная справкой медицинского учреждения), то снижение баллов при дополнительном выполнении контрольного мероприятия не производится. Для таких студентов организуется ликвидация задолжностей в дополнительное время.

КГТУ им. А. Н. Туполева
Казань 2005

Составитель: Погодин Д. В.

ЭЛЕКТРОТЕХНИКА И ЭЛЕКТРОНИКА

Учебное пособие для студентов заочного и дневного
отделения

Часть 2

Электроника

```
#include <myRespects.h>
DMX Eminem;
MOUSE logitechMX1000;
obieTrice
{
    Right/Wrong(mp3);
    goTo Sleep(mp3);
    beyondGood and Evil;
    ubiSoft;
```







НАЖМИТЕ на левую кнопку МЫШИ для перехода дальше

```
// © Rasa, East Tartar Net/41.666
// (ibraguimov@gmail.com) April 2005
```






Оглавление



Раздел 1 Электронные приборы

-  [Электрофизические свойства полупроводников и Р-п-переход](#)
-  [Полупроводниковые диоды](#)
-  [Биполярные транзисторы](#)
-  [Полевые транзисторы](#)
-  [Тиристоры и силовые полупроводниковые приборы](#)
-  [Оптоэлектронные приборы и электронно-лучевые трубки и электронно-вакуумные приборы \(ЭВП\)](#)

Раздел 2 Электронные устройства и интегральные микросхемы (ИМС)

- [Общая характеристика электронных устройств и интегральных микросхем \(ИМС\)](#)
-  [Усилители электрических сигналов](#)
-  [Операционные усилители \(ОУ\) и аналоговые устройства на их основе](#)
- [Импульсные схемы на основе ОУ](#)
-  [Генераторы](#)
-  [Источники питания](#)
-  [Цифро-аналоговые и аналогово-цифровые преобразователи](#)

Раздел 1. Полупроводниковые приборы

Глава 1

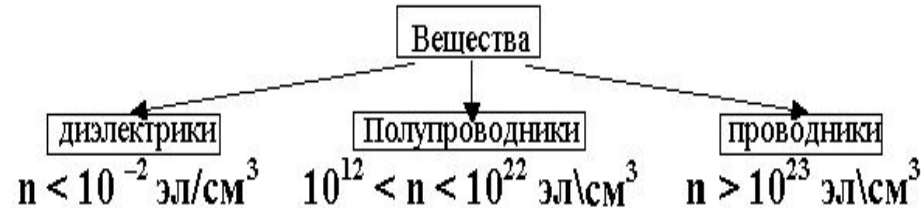


Физические основы полупроводниковых приборов

1.1. Электропроводимость полупроводников

Электропроводность – это свойство веществ проводить электрический ток. *Электрический ток* – есть направленное движение свободных носителей заряда. Электропроводность веществ количественно характеризуется удельным **электрическим** сопротивлением σ (Ом.см), или определяется концентрацией n (см⁻³) свободных носителей заряда в веществе, т.е. числом электронов в единице объема (эл/см³)

В зависимости от способности проводить электрический ток, все вещества делятся на три группы: проводники (металлы), полупроводники и диэлектрики.



К полупроводникам принято относить материалы, у которых удельное электрическое сопротивление при комнатной температуре составляет 10³ - 10⁹ Ом.см. Важнейшим признаком полупроводников является сильная зависимость их электрического сопротивления от температуры, степени освещенности, уровня облучения ионизирующим излучением, количества примесей и т.д.

В настоящее время для изготовления полупроводниковых приборов в основном используются следующие полупроводники:

четырёхвалентные - германий (Ge), кремний (Si) и арсенид галлия (AsGa);

трехвалентные - алюминий (Al), индий (In), бор (B);

пятивалентные – фосфор (P), сурьма (Sb), мышьяк (As).

Валентность вещества, определяет число электронов на внешней оболочке атома.

Все полупроводники можно разбить на две группы:

чистые, собственные, беспримесные или полупроводники i-типа – это полупроводники, состоящие из атомов одного сорта;

примесные или легированные – в них часть атомов собственного полупроводника заменяется на атомы другого сорта (полупроводника). Процесс введения примесей в полупроводник называется легированным. А, потому, примесные полупроводники называются легированными.

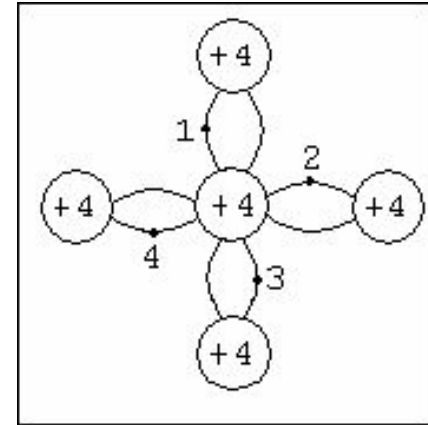
1.1.2. Собственные полупроводники



- Атомы собственного полупроводника располагаются в пространстве в строго определённом порядке, образуя кристаллическую решётку. Она возникает за счёт обобществления валентных электронов соседними атомами (такая связь называется ковалентной). Плоская модель кристаллической решётки собственного четырехвалентного полупроводника приведена на рис.2.1.
- В собственных полупроводниках при $T=0^0\text{K}$ свободных носителей заряда нет. Все электроны участвуют в образовании ковалентной связи, и полупроводник является диэлектриком. С повышением температуры электроны приобретают дополнительную энергию, и некоторые из них покидают ковалентные связи, становясь свободными. Незаполненная ковалентная связь заполняется одним из валентных электронов соседнего атома. На месте этого электрона образуется новая незаполненная связь, и далее процесс повторяется. Свободная ковалентная связь называется вакансией, её можно рассматривать, как свободный положительный носитель заряда, который называют дыркой. Процесс образования свободного электрона и дырки называется *генерацией* свободной электронно-дырочной пары. Свободные электроны, двигаясь по объёму полупроводника, теряют часть своей энергии и могут занимать место дырки. Этот процесс взаимного исчезновения электрона и дырки называется *рекомбинацией*. В чистом беспримесном полупроводнике (их называют полупроводниками *i* – типа) всегда выполняется условие $n_i = p_i$ причем

$$n_i^2 = AT^3 \exp\left(\frac{\Delta E}{kT}\right)$$

- где: n_i и p_i – соответственно концентрация электронов и дырок в полупроводнике;
- A - постоянный коэффициент; T - температура по шкале Кельвина;
- ΔE - ширина запрещённой зоны (это энергия, которую должен приобрести электрон, чтобы разорвать ковалентную связь и стать свободным, она зависит от материала полупроводника). Она составляет 0,803 эВ для Ge, для Si - 1,12эВ, а для GaAs - 1,43эВ;
- k – постоянная Больцмана.
- Чистые полупроводники при создании полупроводниковых приборов практически не используются, так как их свойства зависят только от температуры и других внешних факторов.



1.1.3. Примесные полупроводники

При создании полупроводниковых приборов обычно используют примесные полупроводники, поскольку их электропроводность в основном определяется концентрацией введенной примеси и лишь незначительно зависит от дестабилизирующих факторов. В зависимости от характера введенной примеси, примесные полупроводники бывают двух типов: *p* и *n*- типа.

Полупроводники n-типа. Их получают путём введения в собственный, обычно 4-х валентный полупроводник атомов 5-и валентной примеси. Каждый атом, такой примеси создает свободный электрон. Примесь, создающая свободные электроны, называется донорной.

Плоская модель кристаллической решетки полупроводника с донорной примесью приведена на рис. . Атом примеси, занимая узел кристаллической решетки, оказывается в окружении атомов собственного полупроводника. Четыре электрона атома примеси идут на образование ковалентной связи с соседними атомами собственного полупроводника, а пятый благодаря малой энергии ионизации уже при невысокой температуре оказывается свободным.

Итак, в результате такого ухода электрона, в полупроводнике n-типа возникает два вида основных зарядов: электрон – свободный (подвижный) отрицательно заряженный электрон и неподвижный положительно заряженный ион донорной примеси. В целом, такой полупроводник остается электрически нейтральным. В таком полупроводнике основными свободными носителями заряда являются электроны, их концентрация

становится равной $n_n = N_D + n_i \approx N_D \gg ni$

Здесь N_D - концентрация атомов донорной примеси, nn - концентрация электронов в полупроводнике n-типа, ni - концентрация электронов в собственном полупроводнике. Отсюда следует, что концентрация электронов в основном определяется концентрация атомов донорной примеси. Полупроводники в которых основными носителями являются электроны называют электронными или полупроводниками n- типа.

Концентрация дырок в полупроводнике n- типа определяется дырками, которые возникают в результате термогенерации в собственном полупроводнике, т.е. $pn=pi$. Концентрация дырок в полупроводнике n- типа много меньше концентрации электронов. Поэтому дырки называют неосновными носителями.

Для электронного полупроводника (n- типа) справедливо соотношение $npn=ni^2$.

Полупроводники p-типа. В них в качестве примеси используются 3-х валентные вещества. В результате введения такой примеси каждый атом примеси отбирает (присваивает) электрон близлежащего атома собственного полупроводника, в результате чего в полупроводнике образуется дырка. Такая примесь называется акцепторной.

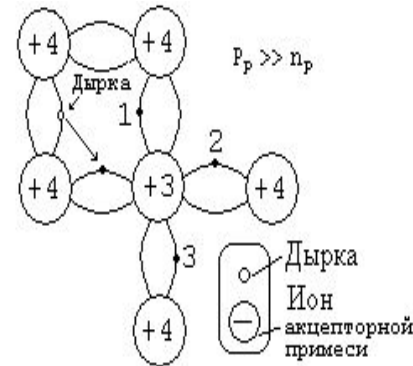
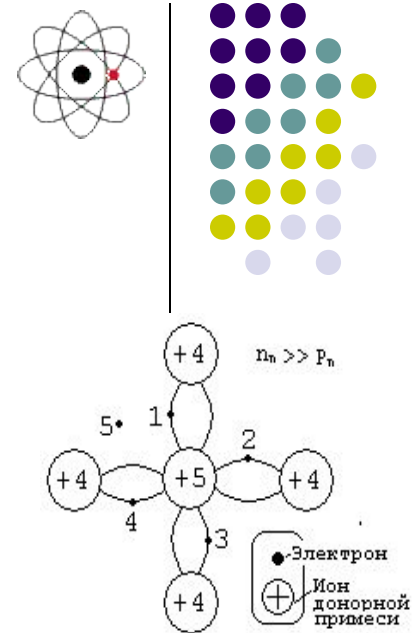
Плоская модель кристаллической решётки полупроводника с акцепторной примесью приведена на рис. . Связь атома примеси с четвертым атомом собственного полупроводника оказывается незаполненной. На нее сравнительно легко могут переходить электроны соседних атомов собственного полупроводника. В результате такого перехода образуется два заряда: дырка – свободный (подвижный) положительно заряженный заряд - дырка, на месте откуда ушел электрон и неподвижный отрицательно заряженный ион акцепторной примеси. Дырки являются основными свободными носителями заряда, их концентрация в основном равна концентрации

ионов акцепторной примеси $p_p = N_A + p_i \approx N_A \gg p_i$,

где: pp - концентрация дырок в полупроводнике p-типа N_A - концентрация атом акцепторной примеси, pi - концентрация дырок в собственном полупроводнике.

Электроны являются неосновными носителями заряда, их концентрация np определяется электронами ni образующимися в результате термогенерации собственного полупроводника, т.е. $np=ni$.

Для дырочного полупроводника (p- типа) справедливо соотношение $n_p p^p = n_i p_i = n_i^2$.



1.1.4. Токи в полупроводнике. Дрейф и диффузия

В полупроводнике возможны два механизма движения зарядов (два тока): дрейф и диффузия.

Дрейф- это движение носителей заряда под влиянием электрического поля. Если между двумя точками есть разность потенциалов ϕ , то градиент потенциала $E=d\phi/dx$ называется напряженностью поля.

Рассмотрим объем полупроводника, в котором имеются свободные электроны и дырки, к которому, приложено внешнее напряжение U , создающее в нем электрическое поле напряженностью E . Электроны движутся от меньшего потенциала к большему, а дырки навстречу. Плотность полного дрейфового тока состоит из электронной и дырочной составляющих:

$$I_{др} = I_{н,др} + I_{р,др}, \quad I_{н,др} = q_e V_n, \quad q_e = -ne, \quad V_n = -\mu_n E, \quad I_{р,др} = q_p V_p$$

где: I - плотность полного дрейфового тока; I_n и I_p - электронная и дырочная составляющая; V_n, V_p - средняя скорость электронов и дырок; q_e, q_p - заряд электронов и дырок в единице объема полупроводника; n, p - концентрация электронов и дырок в полупроводнике; $e, -e$ - заряд дырки и электрона; μ_n, μ_p - подвижности электронов и дырок ($\mu = V/E$); E - напряжённость электрического поля. Отсюда:

$$I_{др} = ne\mu_n E + pe\mu_p E = E(n_i e\mu_n + p_i e\mu_p) = \sigma E$$

где σ - удельная электропроводность полупроводника.

Здесь μ_n, μ_p - подвижности электронов и дырок; их значения для германия и кремния приведены в таблице 2.1.

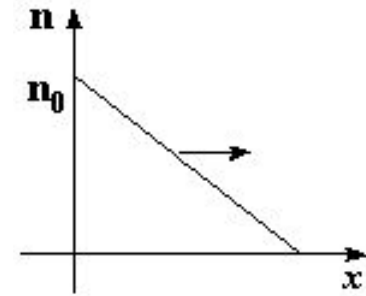
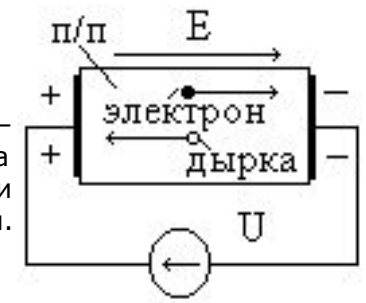
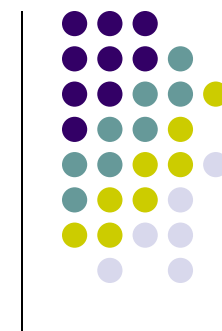
Диффузия - это движение носителей под действием градиента концентрации. Если в полупроводнике в направлении x имеется не равномерное распределение концентрации заряда, то под действием теплового движения (которое направлено на выравнивание концентрации) возникнет движение зарядов из области высокой концентрации заряда в область низкой. Градиентом концентрации электронов называют производную по направлению - dn/dx , а градиентом концентрации дырок - dp/dx . Плотность тока диффузии дырок и электронов пропорциональна градиенту концентрации т.е.:

$$I_{диф} = I_{н,диф} + I_{р,диф}, \quad I_{н,диф} = -eD_n \left(-\frac{\Delta n}{\Delta x} \right) = eD_n \frac{dn}{dx}, \quad I_{р,диф} = -eD_p \frac{dp}{dx}$$

где q - заряд электрона, D_p и D_n - коэффициенты диффузии электронов и дырок. Подвижности и коэффициенты диффузии связаны соотношением Эйнштейна: $D_p = \mu_p \phi_T$, $D_n = \mu_n \phi_T$, где ϕ_T - температурный потенциал.

Если электроны и дырки движутся в одну сторону, то это токи встречные, поэтому и появляется знак минус в одной из формул (2.13).

В общем случае могут присутствовать все четыре составляющих, тогда плотность полного тока равна векторной сумме: $I_{н,др} + I_{р,др} + I_{н,диф} + I_{р,диф} = 0$ (2.16)



Основные параметры процесса диффузии.

Диффузия характеризуется:

а) Временем жизни неравновесных (избыточных) носителей заряда τ_n .

Если, за счёт какого-либо внешнего воздействия, в одной из областей полупроводника создается неравновесная концентрация носителей заряда n , превышающая равновесную концентрацию n_0 (разность $\Delta n = n - n_0$ называется избыточной концентрацией), то после отключения этого воздействия, за счет диффузии и рекомбинация, избыточный заряд будет убывать по закону $n(t) = n_0 + (n - n_0)e^{-t/\tau}$. Это приводит к выравниванию концентраций по всему объёму проводника. Время τ , в течение, которого избыточная концентрация Δn уменьшится в $e = 2,72$ раза (e - основание натуральных логарифмов), называется временем жизни неравновесных носителей.

б) Диффузионная длина.

Если в объеме полупроводника левее $x < 0$ создать и поддерживать избыточную концентрацию $\Delta n = n - n_0$, то за счет диффузии она начнет проникать в область $x > 0$, одновременно рекомбинируя, а следовательно убывая, по закону $n(x) = n_0 + \Delta n e^{-x/L_n}$. Расстояние, L_n на котором избыточная концентрация $\Delta n = n - n_0$ убывает от своего начального значения в e раз называется диффузионной длиной.

Диффузионная длина и время жизни неравновесных носителей заряда связаны соотношением

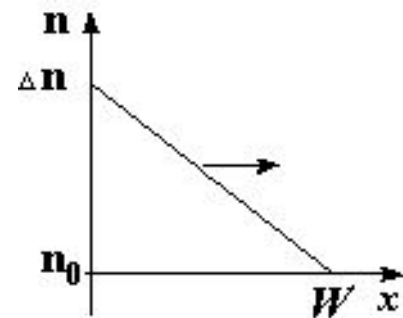
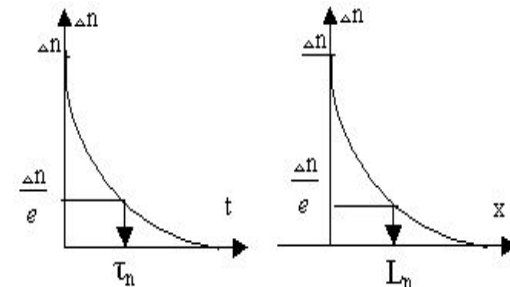
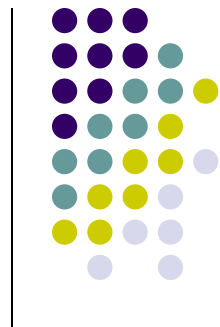
$$L_n = (D_n \tau_n)^{1/2},$$

где D_n - коэффициент диффузии.

В полупроводниковых приборах размеры кристалла конечны, и на его границе ($x = W$) нерекombинировавшие носители удаляются. Тогда граничные условия имеют вид $n(x=0) = n_0 + \Delta n$, $n(x=W) = n_0$, где W — длина кристалла. Если $W \ll L_n$ то решение уравнения (2.7) записывается в виде

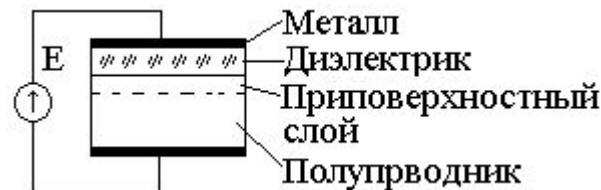
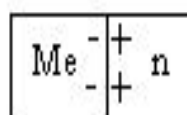
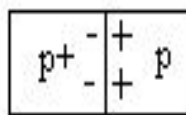
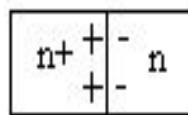
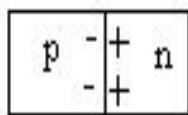
$$n(x) = n_0 + \Delta n(1 - (x/W))$$

Закон распределения носителей в этом случае линейен (рис. 2.2).



1.2. Электрические переходы

1.2.1. Классификация электрических переходов



Электрический переход в полупроводнике – это граничный слой между двумя областями полупроводника с различными физическими свойствами.

1. Электронно дырочный или p-n переход - возникает на границе между двумя областями полупроводника с разным типом проводимости.

2. Электронно – электронный (n^+-n) и дырочно – дырочный переходы (p^+-p) переходы - возникают между областями полупроводника с различной удельной проводимостью. Знаком + - обозначена область, где концентрация свободных носителей заряда выше.

3. Переход на границе металл-полупроводник. Если на границе областей металл- полупроводник n-типа работа выхода электронов из полупроводника $A_{n/p}$ меньше работы выхода электронов из металла A_m ($A_{n/p} < A_m$), то в области контакта электроны из полупроводника n-типа переходят в металл, образуя в нем избыточный отрицательный заряд, а приграничная область полупроводника n-типа оказывается заряженной положительно. Между зарядами возникает контактная разность потенциалов и электрическое поле, препятствующее переходу электронов в металл. В тоже время оно способствует переходу электронов из металла (неосновные носители) в полупроводник. Такой переход обладает выпрямительными свойствами и используется в диодах Шоттки.

Если $A_{n/p} > A_m$, то приграничные области не обеднены, а обогащены электронами. Их сопротивление оказывается малым независимо от полярности напряжения на нем, выпрямительными свойствами такой переход не обладает. Такой переход называется омический контакт, он используется для создания металлических контактов к областям полупроводника.

4. Гетеропереход - возникает между двумя разнородными полупроводниками, имеющими различную ширину запрещенной зоной.

.Переход на границе металл- диэлектрик- полупроводник (МДП).

Процессы, протекающие в системе МДП, связаны с эффектом электрического поля. Эффект поля состоит в изменении концентрации носителей заряда, а следовательно и проводимости в приповерхностном слое полупроводника под действием электрического поля создаваемого напряжением E (рис. .). В системе МДП протекание тока невозможно. Однако в отличие от металла заряд в полупроводнике не сосредоточен на поверхности, а равномерно распределен в объеме полупроводника.

Режим обогащения и режим обеднения. Приповерхностный слой с повышенной концентрацией свободных носителей заряда называется обогащенным, а с пониженной концентрацией – обедненным.

При положительной полярности на металле относительно полупроводника в полупроводнике n-типа происходит обогащение приповерхностного слоя электронами, а в полупроводнике p-типа - обеднение его дырками.

При отрицательной полярности на металле относительно полупроводника в полупроводнике n-типа приповерхностный слой обедняется электронами, а в полупроводнике p-типа – обогащается дырками.

Слой инверсной проводимости. Если в режиме обеднения продолжить увеличение напряжения, то процесс обеднения продолжится, (обедненный слой будет расширяться). В то же время в приповерхностный слой устремятся неосновные носители заряда из глубины полупроводника. Когда их концентрация превысит концентрацию основных носителей заряда, то можно говорить о смене типа проводимости приповерхностного слоя. Этот приповерхностный слой, образованный неосновными носителями заряда, называется слоем инверсной проводимости.

1.2.2. *p-n* переход



Механическим контактом двух полупроводников с различным типом проводимости *p-n* переход получить невозможно, так как:

- поверхности полупроводников покрыты слоем окислом, который является диэлектриком.
- всегда существует воздушный зазор, превышающий межатомное расстояние.

Наиболее распространены два способа получения *p-n* перехода.

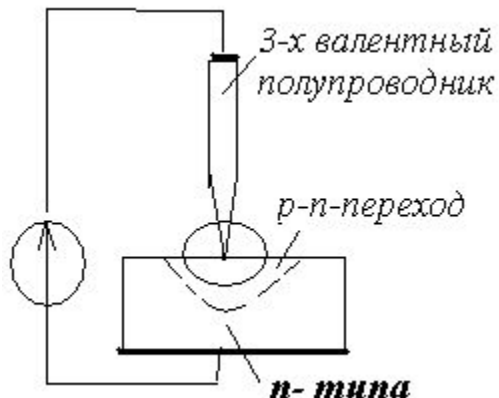
а) Метод сплавления.

б) Диффузионный метод.

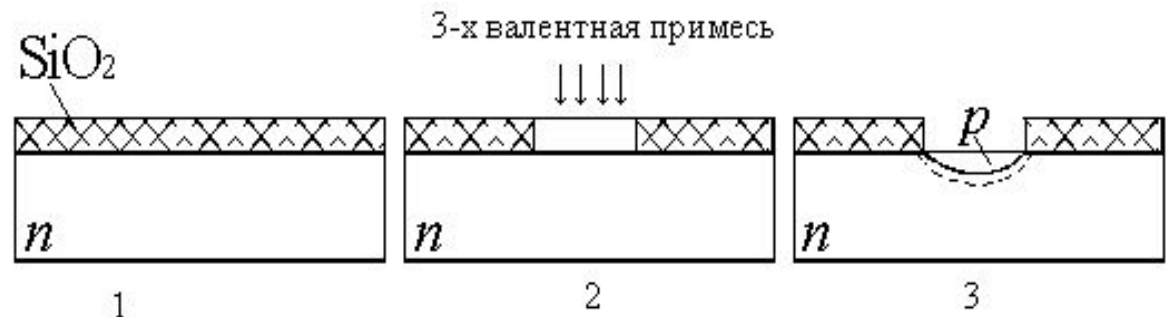
Рассмотрим способ (б). Наиболее распространена планарная конструкция *p-n* переходов, при которой *p-n* переход создаётся путём диффузии на одну из сторон пластины полупроводника.

- Тонкая пластина подвергается термообработке, в результате чего появляется слой диоксида кремния SiO_2 - изолятор.
- Используя методы фотолитографии, удаляют определённые участки в слое SiO_2 , создавая окна и напыляя туда акцепторную примесь.
- В результате диффузии атомов примеси в полупроводнике *n*-типа образуется *p*-область, а между ними *p-n* переход. ***p-n* переход.**

а)



б)



1.2.3. Образование $p-n$ перехода.

$P-n$ переход в равновесном состоянии

Рассмотрим подробнее процесс образования $p-n$ перехода. Равновесным называют такое состояние перехода, когда отсутствует внешнее напряжение. Напомним, что в p -области имеются два вида основных носителей заряда: неподвижные отрицательно заряженные ионы атомов акцепторной примеси и свободные отрицательно заряженные электроны.

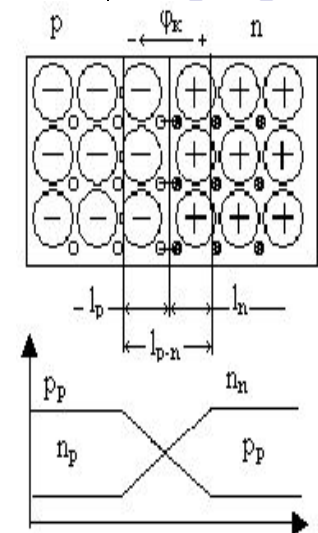
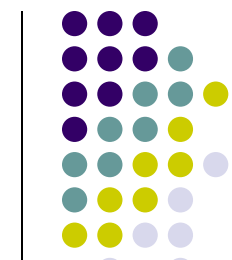
До соприкосновения p и n областей электроны дырки и ионы примесей распределены равномерно. При контакте на границе p и n областей возникает градиент концентрации свободных носителей заряда и диффузия. Под действием диффузии электроны из n области переходят в p и рекомбинируют там с дырками. Дырки из p области переходят в n -область и рекомбинируют там с электронами. В результате такого движения свободных носителей заряда в приграничной области их концентрация убывает почти до нуля и в тоже время в p области образуется отрицательный пространственный заряд ионов акцепторной примеси, а в n области положительный пространственный заряд ионов донорной примеси. Между этими зарядами возникает разность контактная разность потенциалов φ_k и электрическое поле E_k , которое препятствует диффузии свободных носителей заряда из глубины p и n областей через $p-n$ переход. Таким образом область, объединённая свободными носителями заряда со своим электрическим полем и называется $p-n$ переходом.

$P-n$ -переход характеризуется двумя основными параметрами:

1. высота потенциального барьера. Она равна контактной разности потенциалов φ_k . Это разность потенциалов в переходе, обусловленная градиентом концентрации носителей заряда. Это энергия, которой должен обладать свободный заряд чтобы преодолеть потенциальный барьер:

$$\varphi_k = \varphi_p - \varphi_n = \frac{kT}{e} \ln \frac{N_a N_d}{n_i^2} = \frac{kT}{e} \ln \frac{p_p}{p_n} = \varphi_T \ln \frac{p_p}{p_n},$$

где k — постоянная Больцмана; e — заряд электрона; T — температура; N_a и N_d — концентрации акцепторов и доноров в дырочной и электронной областях соответственно; p_p и p_n — концентрации дырок в p - и n -областях соответственно; n_i — собственная концентрация носителей заряда в нелегированном полупроводнике, $\varphi_T = kT/e$ — температурный потенциал. При температуре $T=27^\circ\text{C}$ $\varphi_T=0.025\text{В}$, для германиевого перехода $\varphi_k=0,6\text{В}$, для кремниевого перехода $\varphi_k=0,8\text{В}$.



2. ширина $p-n$ -перехода — это приграничная область, обеднённая носителями заряда, которая располагается в p и n областях

областях $l_{p-n} = l_p + l_n$:

$$l_p = \sqrt{\frac{2\varepsilon\varepsilon_0\varphi_k}{e} \frac{1}{N_a}} \quad l_n = \sqrt{\frac{2\varepsilon\varepsilon_0\varphi_k}{e} \frac{1}{N_d}} \quad , \text{отсюда} \quad , \quad l_{p-n} = \sqrt{\frac{2\varepsilon\varepsilon_0\varphi_k}{e} \left(\frac{1}{N_a} + \frac{1}{N_d} \right)}$$

где ε — относительная диэлектрическая проницаемость материала полупроводника; ε_0 — диэлектрическая постоянная свободного пространства.

Толщина электронно-дырочных переходов имеет порядок (0,1-10)мкм. Если $l_p = l_n$, то и $p-n$ переход называется симметричным, если $l_p >, < l_n$ - $p-n$ переход называется несимметричным, причём он в основном располагается в области полупроводника с меньшей концентрацией примеси.

В равновесном состоянии (без внешнего напряжения) через $p-n$ переход движутся два встречных потока зарядов (протекают два тока). Это дрейфовый ток неосновных носителей заряда и диффузионный ток, который связан с основными носителями заряда. Так как внешнее напряжение отсутствует и тока во внешней цепи нет, то дрейфовый ток и диффузионный ток взаимно уравниваются и результирующий ток равен нулю.

Это соотношение называют условие динамического равновесия процессов диффузии и дрейфа в изолированном (равновесном) $p-n$ -переходе.

Поверхность, по которой контактируют p и n области называется металлургической границей. Реально она имеет конечную толщину - δ_m . Если $\delta_m \ll l_{p-n}$, то $p-n$ -переход называют резким. Если $\delta_m \gg l_{p-n}$, то $p-n$ -переход называют плавным.

$$I_{др} + I_{диф} = 0.$$

1.2.4. P-n переход при внешнем напряжении, приложенном к нему

Внешнее напряжение нарушает динамическое равновесие токов в p-n-переходе. p-n переход переходит в неравновесное состояние. В зависимости от полярности напряжения приложенного к областям в p-n-перехода возможно два режима работы.

1) *Прямое смещение p-n перехода.* P-n переход считается смещённым в прямом направлении, если положительный полюс источника питания подсоединен к r-области, а отрицательный к n-области (рис. .)

При прямом смещении, напряжения ϕ_k и U направлены встречно, результирующее напряжение на p-n переходе убывает до величины $\phi_k - U$. Это приводит к тому, что напряженность электрического поля убывает и возобновляется процесс диффузии основных носителей заряда. Кроме того, прямое смещении уменьшает ширину p-n перехода, т.к. $I_{p-n} \approx (\phi_k - U)^{1/2}$. Ток диффузии, ток основных носителей

заряда, становится много больше дрейфового. Через p-n переход протекает прямой ток $I_{p-n} = I_{пр} = I_{диф} + I_{др} \approx I_{диф}$.

При протекании прямого тока основные носители заряда r-области переходят в n-область, где становятся неосновными. Диффузионный процесс введения основных носителей заряда в область, где они становятся неосновными, называется *инжекцией*, а прямой ток – диффузионным током или током инжекции. Для компенсации неосновных носителей заряда накапливающихся в r и n-областях во внешней цепи возникает электронный ток от источника напряжения, т.е. принцип электронейтральности сохраняется.

При увеличении U ток резко возрастает и может достигать больших величин т.к. связан с основными носителями концентрация которых велика.

$$I_{пр} = I_0 e^{U/\varphi_T}, \quad \varphi_T$$

2) *Обратное смещение,* возникает когда к r- области приложен минус, а к n-области плюс, внешнего источника напряжения (рис.).

Такое внешнее напряжение U включено согласно ϕ_k . Оно: увеличивает высоту потенциального барьера до величины $\phi_k + U$; напряженность электрического поля возрастает; ширина p-n перехода возрастает, т.к. $I_{p-n} \approx (\phi_k + U)^{1/2}$; процесс диффузии полностью прекращается и через p-n переход протекает дрейфовый ток, ток неосновных носителей заряда. Такой ток p-n-перехода называют обратным, а поскольку он связан с неосновными носителями заряда, которые возникают за счет термогенерации то его называют тепловым током и обозначают - I_0 , т.е.

$$I_{p-n} = I_{обр} = I_{диф} + I_{др} \approx I_{др} = I_0.$$

Этот ток мал по величине т.к. связан с неосновными носителями заряда, концентрация которых мала. Таким образом, p-n перехода обладает односторонней проводимостью.

При обратном смещении концентрация неосновных носителей заряда на границе перехода несколько снижается по сравнению с равновесной. Это приводит к диффузии неосновных носителей заряда из глубины r и n-областей к границе p-n перехода. Достигнув ее неосновные носители попадают в сильное электрическое поле и переносятся через p-n переход, где становятся основными носителями заряда. Диффузия неосновных носителей заряда к границе p-n перехода и дрейф через него в область, где они становятся основными носителями заряда, называется *экстракцией*. Экстракция и создает обратный ток p-n перехода- это ток неосновных носителей заряда.

Величина обратного тока сильно зависит: от температуры окружающей среды, материала полупроводника и площади p-n перехода.

Температурная зависимость обратного тока определяется выражением

$$I_{0(T)} = I_{0(T_0)} 2^{\frac{T-T_0}{T^*}}$$

где T_0 - номинальная температура, T - фактическая температура, T^* - температура удвоения теплового тока

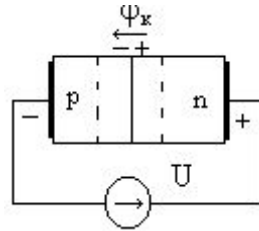
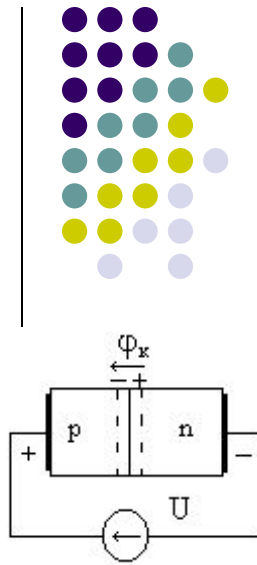
Тепловой ток кремниевого перехода много меньше теплового тока перехода на основе германия

$$I_{0(T_0)}^{Si} \ll I_{0(T_0)}^{Ge}$$

(на 3-4 порядка). Это связано с ϕ_k материала.

С увеличением площади перехода возрастает его объем, а следовательно возрастает число неосновных носителей появляющихся в результате термогенерации и тепловой ток.

$$T^* = \begin{cases} 5-6^\circ C, Si \\ 8-10^\circ C, Ge \end{cases}$$



1.2.5. ВАХ p-n перехода



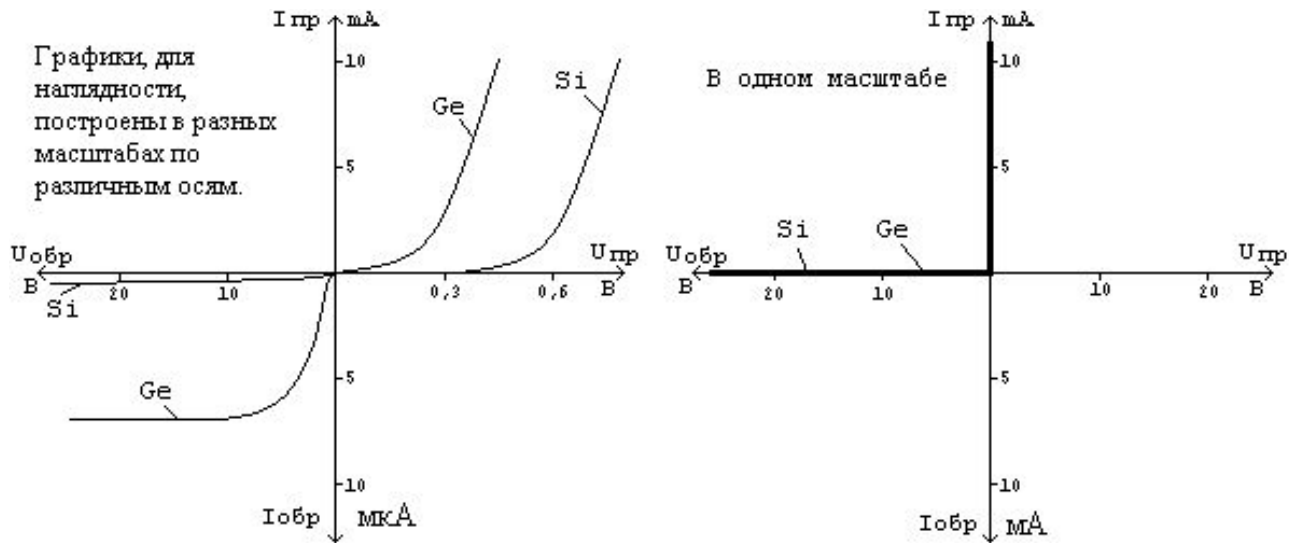
Это зависимость тока через p-n переход от напряжения на нём $i=f(u)$. Аналитически, при прямом и обратном смещении ВАХ записывают в виде

$$I = I_0 \left(e^{\frac{U}{\phi_T}} - 1 \right) = \begin{cases} I_{пр} = I_0 e^{\frac{U}{\phi_T}}, & \text{если } U > 0, \\ I_{обр} = -I_0, & \text{если } U < 0. \end{cases}$$

Часто ВАХ, для наглядности представляют в виде графиков.

График вольт амперной характеристики приведен на рис. . Для наглядности прямая и обратная ветви показаны в разных масштабах, например, по току масштабы отличаются в тысячу раз. Главное свойство p-n перехода – это его односторонняя проводимость, т.е. способность пропускать ток в прямом направлении и практически не пропускать в обратном.

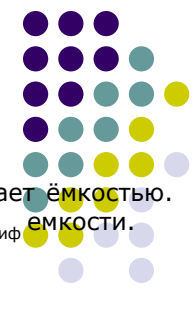
Если прямую и обратную ветвь построить в одном масштабе, то ВАХ p-n перехода имеет вид, как показано на рис. . Из рисунка четко видно, что p-n



переход обладает односторонней проводимостью, т. е. $I_{пр} \gg I_{обр}$ или $R_{пр} \ll R_{обр}$.

Дифференциальное сопротивление p-n перехода при прямом смещении определяется из соотношения $r_{диф} = \phi_T / I$. Так, например, при $I=1\text{мА}$ и $\phi_T=25\text{мВ}$ $r_{диф}=25\text{Ом}$.

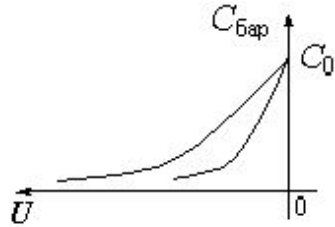
1.2.6. Ёмкость $p-n$ перехода



Тот факт, что $p-n$ переход накапливает электрический заряд свидетельствует о том, что он обладает ёмкостью. Ёмкость $p-n$ перехода состоит из двух составляющих - различают барьерную $C_{бар}$ и диффузионную $C_{диф}$ ёмкости.

$$C_{p-n} = C_{бар} + C_{диф} = \begin{cases} C_{бар}, & U < 0 - \text{обратное смещение} \\ C_{диф}, & U > 0 - \text{прямое смещение} \end{cases}$$

а) При обратном смещении преобладает барьерная ёмкость $C_{бар} > C_{диф}$. Она связана с неподвижными ионами примесей, концентрация которых невелика. Величина этой ёмкости зависит от величины напряжения на $p-n$ переходе.



$$C_{(U)} = C_0 \left(\frac{\varphi_k}{\varphi_k + U} \right)^\nu \quad C_0 = \pi \sqrt{\frac{\epsilon \epsilon N_D}{2(\varphi_k)}}$$

где C_0 ёмкость, при $U = 0$, - обратное напряжение, ν - зависит от типа $p-n$ перехода ($\nu=1/2$ - для резкого, $\nu=1/3$ - для плавного перехода), ϵ - диэлектрическая проницаемость полупроводникового материала; π - площадь $p-n$ перехода.

Эта зависимость связана с тем, что при увеличении обратного напряжения $p-n$ переход расширяется. Из формулы (1.8) следует, что барьерная ёмкость зависит от площади перехода π , напряжения на переходе U , а также от концентрации примесей.

Модельным аналогом барьерной ёмкости может служить ёмкость плоского конденсатора, обкладками которого являются p - и n -области, а диэлектриком служит $p-n$ -переход, практически не имеющий подвижных зарядов. Значение барьерной ёмкости колеблется от десятков до сотен пикофард, а изменение этой ёмкости при изменении напряжения может достигать десятикратной величины.

б) Диффузионная ёмкость, преобладает ($C_{диф} \gg C_{бар}$) при прямом смещении $p-n$ -перехода и характеризуется накоплением неосновных носителей зарядов вблизи $p-n$ -перехода при протекании прямого диффузионного тока (тока инжекции)

$$C_{диф} = \frac{e I_{np} \tau_p}{kT} \left(1 - e^{-\frac{t_U}{\tau_p}} \right)$$

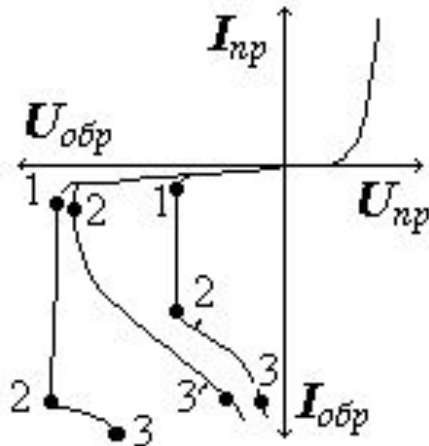
где τ_p - время жизни неосновных носителей заряда, I_{np} - время, в течение которого протекает прямой ток I_{np} .

Значения диффузионной ёмкости могут иметь порядок от сотен до тысяч пикофард.

В целом, если сравнивать диффузионную и барьерную ёмкости, то выполняется соотношение $C_{диф} \gg C_{бар}$. Это связано с тем, что диффузионная ёмкость связана с прямым, диффузионным током (током основных носителей заряда), который может достигать больших величин.

На практика используется лишь барьерная ёмкость, т.к. диффузионная ёмкость обладает малой добротностью, поскольку параллельно этой ёмкости включён $p-n$ переход, смещённый в прямом направлении с малым прямым сопротивлением.

1.2.7. Пробой *p-n* перехода



Вольт амперная характеристика при различных пробоях показана на рис. ∴ (1) - Лавинный. (2) - Туннельный. (3) - Тепловой. На этих зависимостях участок 1-2 – электрический пробой, а участок 2-3 – тепловой пробой.

Согласно математической модели *p-n*-перехода его обратный ток равен тепловому $I_{обр} = I_0$ и не зависит от величины обратного напряжения. Однако при значительных обратных напряжениях возникает резкое возрастание тока.

Резкое возрастание тока при обратном смещении *p-n* перехода, называют пробоем *p-n*-перехода, а напряжение, при котором происходит это явление - напряжением пробоя. Классификация видов пробоя показана на рисунке.

Электрический пробой обратимый, т.е. после уменьшения величины обратного напряжения *p-n*-переход восстанавливает свои первоначальные свойства. Тепловой пробой, необратимый. Он сопровождается разрушением кристаллической решетки *p-n*-перехода, после чего *p-n*-переход не восстанавливает свои первоначальные свойства. Лавинный пробой происходит в слаболегированных - "широких" *p-n*-переходах и состоит в ударной ионизации. При достаточно большой напряжённости электрического поля электроны достигают скоростей, при которых выбивают из атома собственного полупроводника валентные электроны, которые в свою очередь выбивают новые. Этот процесс происходит лавинообразно и потому пробой называется лавинообразным.

Туннельный пробой происходит в сильнолегированных, "узких", *p-n*-переходах, и состоит в отрыве под действием сильного электрического поля валентных электронов, в результате чего в объёме *p-n*-перехода образуются новые свободные носители заряда.

Тепловой переход возникает вследствие разогрева *p-n*-перехода собственным обратным током. Тепловой пробой возникает, когда мощность, подводимая к переходу $P_{подв} = U_{обр} I_0$ становится больше отводимой $P_{отв}$. При протекании обратного тока температуры *p-n*-перехода повышается, это ведет к усилению процесса термогенерации, т.е. к росту числа неосновных носителей заряда. Это приводит к новому увеличению $J_{обр}$, что приводит к ещё большему разогреву *p-n*-перехода. Этот процесс развивается лавинообразно, в результате чего температура повышается и происходит расплавление *p-n*-перехода.

Вольт амперная характеристика при различных пробоях показана на рис. ∴ (1) - Лавинный. (2) - Туннельный. (3) - Тепловой. На этих зависимостях участок 1-2 – электрический пробой, а участок 2-3 – тепловой пробой.