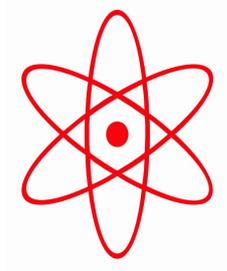


НПО УЧЕБНОЙ ТЕХНИКИ «ТУЛАНАУЧПРИБОР»

МЕТОДИЧЕСКОЕ РУКОВОДСТВО ПО ВЫПОЛНЕНИЮ ЛАБОРАТОР-
НОЙ РАБОТЫ



ФКЛ-16

**ОПРЕДЕЛЕНИЕ ШИРИНЫ ЗАПИРАЮЩЕГО СЛОЯ P-N ПЕРЕХОДА
И КОНЦЕНТРАЦИИ ПРИМЕСИ В ОБЛАСТИ ЛАВИННОГО ПРОБОЯ**

Тула, 2008 г.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ШИРИНЫ ЗАПИРАЮЩЕГО СЛОЯ P-N ПЕРЕХОДА И КОНЦЕНТРАЦИИ ПРИМЕСИ В ОБЛАСТИ ЛАВИННОГО ПРОБОЯ

Цель работы: ознакомиться с основными параметрами и характеристиками полупроводниковых стабилитронов, экспериментально исследовать вольтамперную характеристику (ВАХ), возможности применения в электронных схемах.

ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ.

Контактные явления

Принцип действия большинства полупроводниковых приборов основан на физических явлениях, происходящих в области контакта твердых тел. При этом преимущественно используются контакты: полупроводник-полупроводник; металл-полупроводник; металл-диэлектрик-полупроводник. Если переход создается между полупроводниками n-типа и p-типа, то его называют электронно-дырочным или p-n переходом.

Электронно-дырочный переход создается в одном кристалле полупроводника с использованием сложных и разнообразных технологических операций.

Рассмотрим p-n переход, в котором концентрации доноров N_d и акцепторов N_a изменяются скачком на границе раздела (рис. 1, а). Такой p-n переход называют резким. Равновесная концентрация дырок в p-области (p_{p_0}) значительно превышает их концентрацию в n-области (n_{n_0}). Аналогично для электронов выполняется условие $n_{n_0} > n_{p_0}$. Неравномерное распределение концентраций одноименных носителей зарядов в кристалле (рис. 1, б) приводит к возникновению диффузии электронов из n-области в p-область и дырок из p-области в n-область. Такое движение зарядов создает диффузионный ток электронов и дырок:

$$J_{диф} = J_{ndиф} + J_{pdиф} \quad (1.1)$$

Электроны и дырки, переходя через контакт навстречу друг другу (благодаря диффузии), рекомбинируют и в приконтактной области дырочного полупроводника образуется нескомпенсированный заряд отрицательных ионов акцепторных примесей, а в электронном полупроводнике нескомпенсированный заряд положительных донорных ионов (рис. 1, в). Таким образом, электронный полупроводник заряжается положительно, а дырочный - отрицательно. Между областями с различными типами электропроводности возникает собственное электрическое поле напряженностью $E_{соб}$ (рис. 1 а), созданное двумя слоями объемных зарядов.

Этому полю соответствует разность потенциалов U_k между n- и p-областями, называемая контактной (рис. 1, г). За пределами области объемного заряда полупроводниковые области n- и p-типа остаются электрически нейтральными.

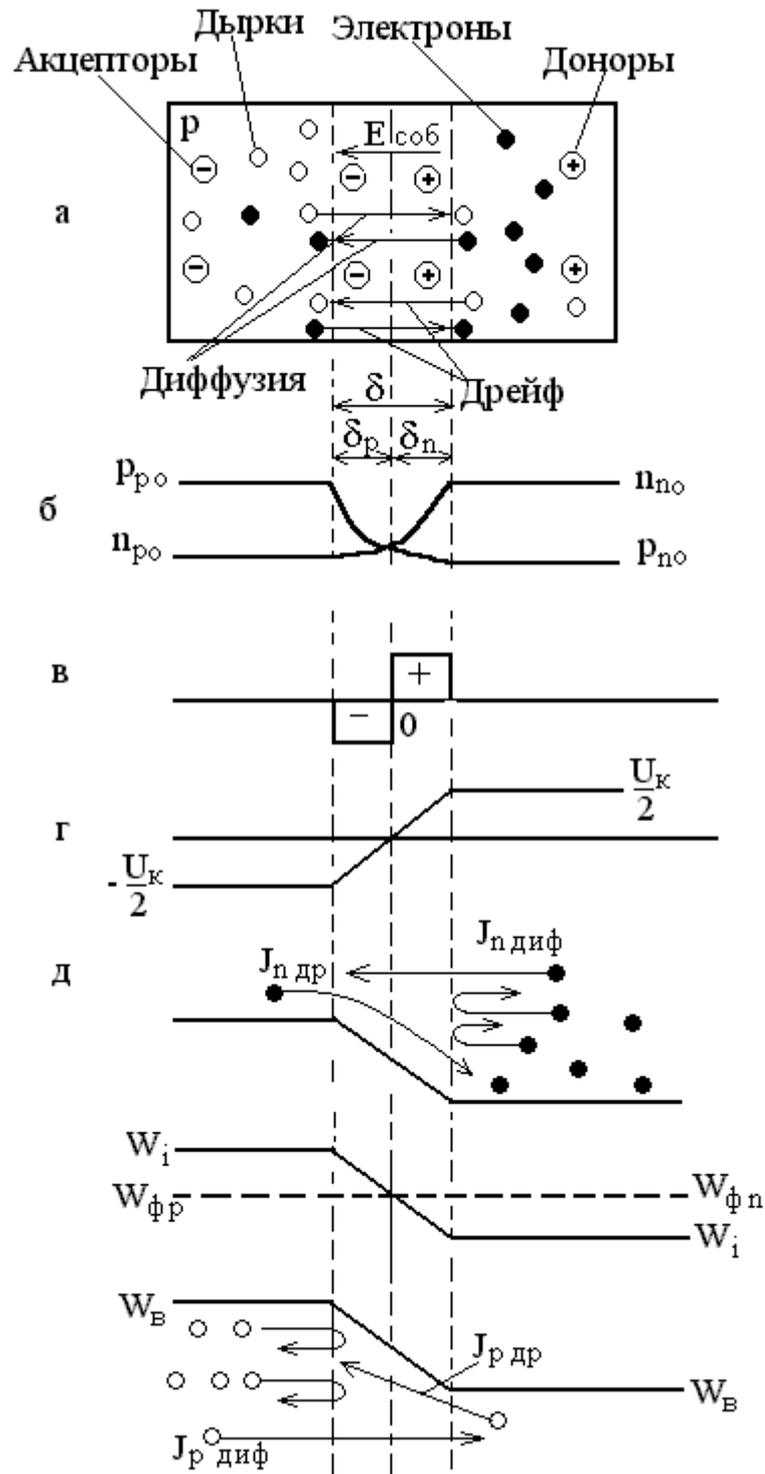


Рис. 1. Равновесное состояние р-п перехода.

Собственное электрическое поле является тормозящим для основных носителей заряда и ускоряющим для неосновных. Электроны р-области и дырки п-области, совершая тепловое движение, попадают в пределы диффузионного электрического поля, увлекаются им и перебрасываются в противоположные области, образуя ток дрейфа, или ток проводимости.

Выведение носителей заряда из области полупроводника, где они являются неосновными, через электронно-дырочный переход ускоряющим

электрическим полем называют экстракцией носителей заряда. Приконтактную область, где имеется собственное электрическое поле, называют **р-п переходом**.

Поскольку потенциальная энергия электрона и потенциал связаны соотношением $W = -qU$, образование нескомпенсированных объемных зарядов вызывает понижение энергетических уровней n-области и повышение энергетических уровней р-области. Смещение энергетических диаграмм прекратится, когда уровни Ферми W_{fn} и W_{fp} совпадут (рис. 1.7, д). При этом на границе раздела ($x = 0$) уровень Ферми проходит через середину запрещенной зоны. Это означает, что в плоскости сечения $x = 0$ полупроводник характеризуется собственной электропроводностью и обладает по сравнению с остальным объемом повышенным сопротивлением. В связи с этим его называют запирающим слоем или областью объемного заряда.

Совпадение уровней Ферми n- и р-областей соответствует установлению динамического равновесия между областями и возникновению между ними потенциального барьера $U_k = \frac{kT}{q} \text{Ln} \frac{n_{n_0} p_{p_0}}{n_i^2}$ для диффузионного перемещения через р-п переход электронов n-области и дырок р-области.

Другим важным параметром р-п перехода является его ширина, обозначаемая $\delta = \delta_p + \delta_n$.

Ширину запирающего слоя δ можно найти, решив уравнения Пуассона для n-области и р-области:

$$-dE/dx = d^2\varphi/dx^2 = qN_D/\varepsilon_0\varepsilon; \quad (1.2)$$

$$-dE/dx = d^2\varphi/dx^2 = qN_A/\varepsilon_0\varepsilon. \quad (1.3)$$

где $E = -\frac{d\varphi}{dx}$ - напряженность электрического поля.

Решения уравнений (1.2) и (1.3) при граничных условиях

$$\varphi(-\delta_p) = 0; \quad \left. \frac{d\varphi}{dx} \right|_{x=-\delta_p} = 0 \quad \varphi(\delta_n) = U_k; \quad \left. \frac{d\varphi}{dx} \right|_{x=\delta_n} = 0$$

имеют вид:

$$\begin{aligned} \varphi_p &= \frac{q}{2\varepsilon_0\varepsilon} N_A (\delta_p + x)^2 \quad \text{для } -\delta_p < x < 0; \\ \varphi_n &= \frac{q}{2\varepsilon_0\varepsilon} N_D (\delta_p + x)^2 \quad \text{для } 0 < x < \delta_n; \end{aligned} \quad (1.4)$$

В точке $x = 0$ оба решения должны давать одинаковые значения φ и $\frac{d\varphi_p}{dx}$. Приравняв $\left. \frac{d\varphi_p}{dx} \right|_{x=0}$ и $\left. \frac{d\varphi_n}{dx} \right|_{x=0}$, можно записать:

$$\delta_n / \delta_p = N_A / N_D. \quad (1.5)$$

Из равенства (1.5) видно, что ширина слоев объемных зарядов в n- и p-областях обратно пропорциональна концентрациям примесей и в несимметричном переходе запирающий слой расширяется в область с меньшей концентрацией примесей.

На основании равенства (1.5) можно записать:

$$\delta_n / \delta = N_A / (N_D + N_A); \quad \delta_p / \delta = N_D / (N_D + N_A), \quad (1.6)$$

где $\delta = \delta_n + \delta_p$.

Приравняв правые части уравнений (1.4) и учитывая соотношения (1.6) при $x = 0$ получаем

$$U_k = \frac{q}{2\epsilon\epsilon_0} \frac{N_A N_D}{N_A + N_D} \delta^2.$$

На основании этого выражения формулу для определения ширины запирающего слоя p-n перехода можно записать в следующем виде:

$$\delta = \delta_n + \delta_p = \sqrt{\frac{2\epsilon\epsilon_0(N_A + N_D)U_k}{qN_A N_D}} \quad (1.7)$$

Из соотношения (1.7) видно, что на ширину запирающего слоя существенное влияние оказывает концентрация примесных атомов. Увеличение концентрации примесных атомов сужает запирающий слой, а уменьшение расширяет его. Это часто используется для придания полупроводниковым приборам требуемых свойств.

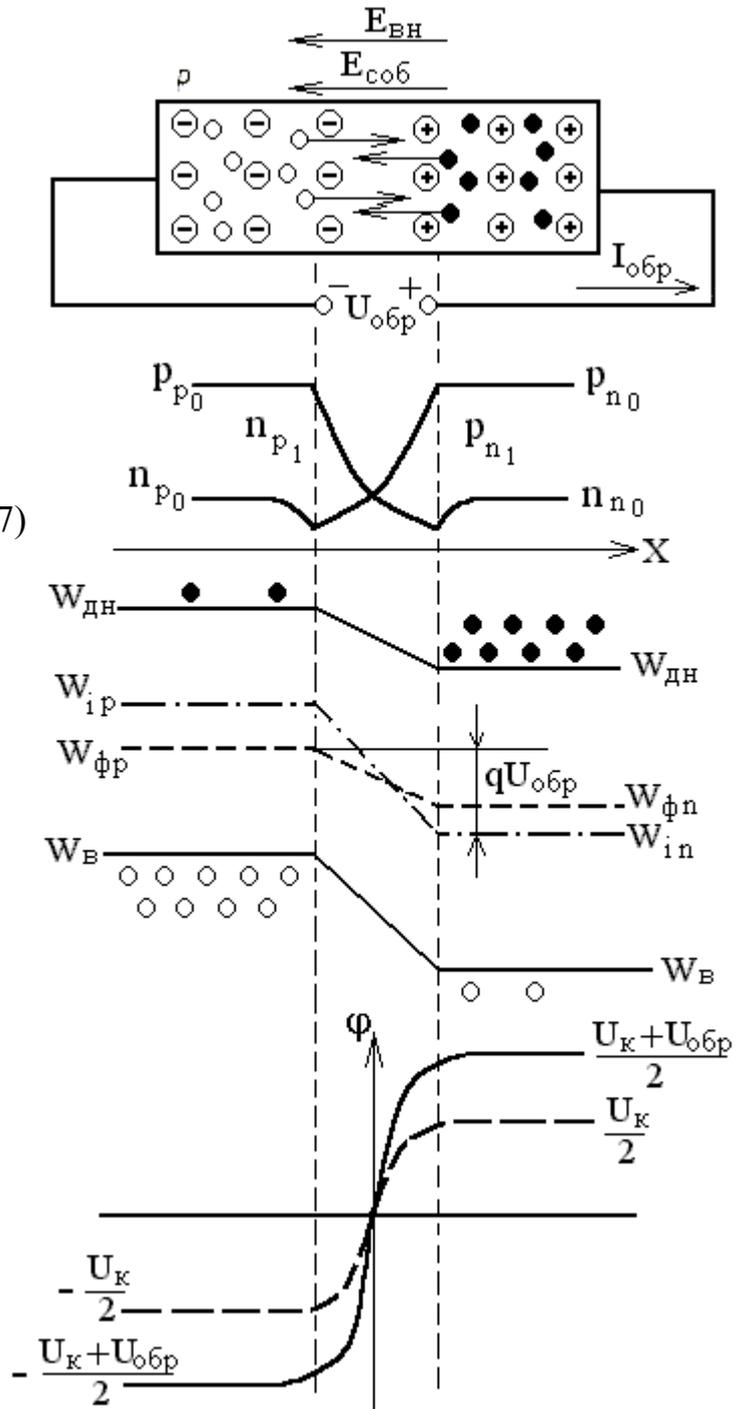


Рис. 2. Обратное включение p-n перехода.

Обратное включение полупроводникового диода.

Т. к. исследуемый нами полупроводниковый диод – стабилитрон работает при обратном включении, то более подробнее рассмотрим эту область. При включении р-п перехода в обратном направлении (рис. 2) внешнее обратное напряжение $U_{обр}$ создает электрическое поле, совпадающее по направлению с собственным, что приводит к росту потенциального барьера на величину $U_{обр}$ и увеличению относительного смещения энергетических диаграмм на $q(U_k + U_{обр})$. Это сопровождается увеличением ширины запирающего слоя, которая может быть найдена из соотношения (1.7) подстановкой вместо U_k величины $U_k + U_{обр}$.

$$\delta = \sqrt{\frac{2\epsilon\epsilon_0(N_A + N_D)}{qN_A N_D}}(U_k + U_{обр}). \quad (1.8)$$

Для кремниевых диодов величина контактной разности потенциалов составляет $U_k \approx 0,7$ В. Толщина электронно-дырочных переходов δ имеет порядок (0,1-10)мкм.

Возрастание потенциального барьера уменьшает диффузионные токи основных носителей (т. е. меньшее их количество преодолет возросший потенциальный барьер).

Уменьшение диффузионного тока приведет к нарушению условия равновесия. Через переход будет проходить результирующий ток, определяемый в основном током дрейфа неосновных носителей.

Концентрация неосновных носителей у границ р-п перехода вследствие уменьшения диффузионного перемещения основных носителей уменьшится до некоторых значений n_{p1} и p_{n1} . По мере удаления от р-п перехода концентрация неосновных носителей будет возрастать до равновесной.

Опорные диоды (кремниевые стабилитроны). Механизмы пробоя р-п перехода.

Стабилитронами или Опорными диодами называются полупроводниковые диоды, вольт-амперная характеристика которых имеет участок со слабой зависимостью напряжения от тока (Рис. 4). Название «опорных» они получили за счет способности фиксировать (стабилизировать) уровни напряжений в схемах. В основу работы

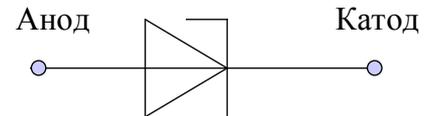


Рис. 3. Схематическое изображение стабилитрона

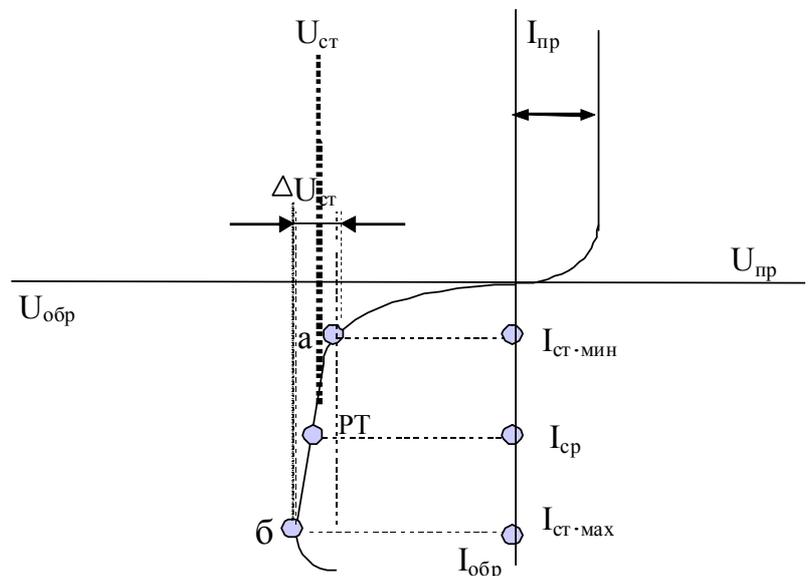


Рис. 4. ВАХ кремниевого стабилитрона

опорных диодов положено явление холодной эмиссии и управляемый пробой в p - n -переходе. Концентрация примесных атомов в стабилитроне гораздо выше, чем в обычных диодах, поэтому стабилитрон находится как бы в предпробойном состоянии.

Назначение стабилитронов – стабилизация напряжения; у современных стабилитронов напряжение стабилизации доходит до нескольких сотен вольт, а ток – до десятков ампер, при этом дрейф напряжения может быть не более $0,1\text{ В}$.

Конструкция стабилитронов та же, что и у выпрямительных диодов; у тех и у других выбор корпуса связан с мощностью рассеяния.

Участок "аб" – для стабилизации напряжения: большим изменениям тока (от $I_{ст.мин.}$ до $I_{ст.мах}$) соответствуют незначительные изменения напряжения ($\Delta U_{ст.}$).

Максимальный ток $I_{ст.мах}$ ограничивается допустимой мощностью рассеяния, а минимальный ($I_{ст.мин.}$) соответствует началу устойчивого электрического пробоя. При меньших значениях тока стабилитрона он может служить источником шумов (используется в генераторах шумов).

В пределах "аб" сопротивление стабилитрона изменяется при изменении тока через него, а напряжение при этом остается почти постоянным. После точки "б" стабилитрон переходит в режим теплового пробоя, при этом в нем идут необратимые процессы и структура диода разрушается. В режиме теплового пробоя стабилитрон имеет участок на ВАХ с отрицательным динамическим сопротивлением.

Приборные характеристики стабилитронов:

1) Напряжение стабилизации $U_{ст.}$ которое практически совпадает с напряжением пробоя диода;

2) Динамическое (или дифференциальное) сопротивление $r_{диф} = \frac{dU}{dI}$ диода на рабочем участке характеризует качество стабилизации напряжения;

С точки зрения практического использования необходимы стабилитроны на любые напряжения. Однако реально на базе кремниевых p - n -переходов можно сделать приборы с более или менее приличными параметрами на рабочие напряжения, лежащие в диапазоне от 1 до 200 вольт.

Чтобы понять, от чего зависят указанные основные параметры стабилитронов и как ими управлять, надо разобраться в механизмах, приводящих к пробую p - n -перехода. Механизмов, которые можно использовать для создания качественных приборов, всего два: лавинный и туннельный. Далее более подробно рассмотрим механизм лавинного пробоя перехода.

Лавинный пробой p - n -перехода

При обратном смещении p - n -перехода через него протекает ток, обусловленный тепловой генерацией неосновных носителей заряда в базе диода и тепловой генерацией электронно-дырочных пар в слое объемного заряда перехода. Энергетическая диаграмма p - n -перехода при обратном смещении изображена на рис.5. Электронная составляющая тока насыщения такого перехода будет обусловлена тепловой генерацией электронов из валентной зоны в зону проводимости в p - области (в пределах диффузионной длины от границы области пространственного заряда) и их последующей диффузией к p - n -переходу, где они подхватываются электрическим полем

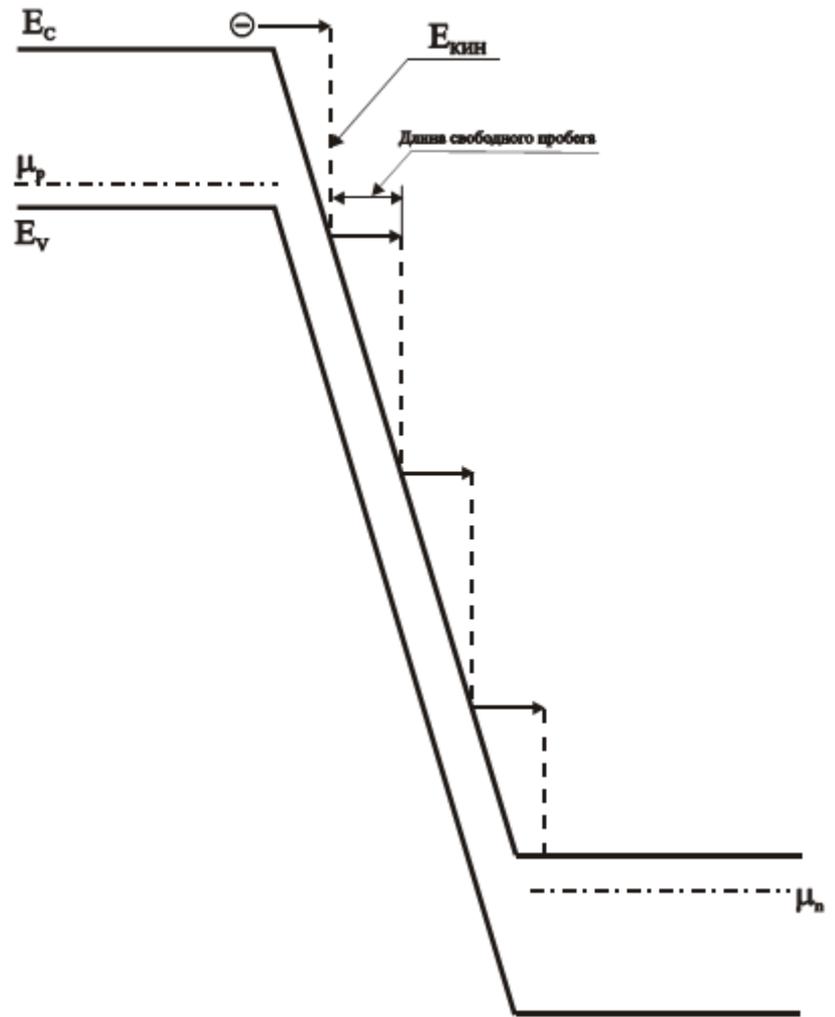


Рис.5. Энергетическая диаграмма p - n -перехода при обратном смещении и схема перемещения электрона из p -области в n -область

перехода и перебрасываются в n -область. Двигаясь в поле перехода электроны разгоняются (за счет кулоновской силы) на длине свободного пробега и их кинетическая энергия в конце свободного пробега равна:

$$E_{кин} = q \mathcal{E} \lambda$$

где q - заряд электрона; \mathcal{E} - электрическое поле перехода, которое, вообще говоря, зависит от координаты; λ - длина свободного пробега, зависящая от количества структурных дефектов и температуры (т.е. от концентрации фононов и ионов примеси).

Естественно, возникает вопрос - куда девается потерянная электронами энергия. Оказывается, это зависит от того, как велика эта энергия. Если величина теряемой энергии невелика, то она идет на увеличение интенсивности тепловых колебаний кристаллической решетки (т.е. на генерацию фононов). Если же кинетическая энергия электрона превышает ширину запрещенной зоны полупроводника, то возможна передача этой энергии электрону валент-

ной зоны, в результате чего происходит генерация электронно-дырочной пары. Такой механизм образования пар называется ударным. А сам процесс называется ударной ионизацией вещества. В результате ударной ионизации растет число свободных носителей заряда в полупроводнике, так как после каждого акта ударной ионизации к первичным электронам (которые все равно остаются в зоне проводимости) добавляется еще два носителя - электрон, возбужденный из валентной зоны, и дырка.

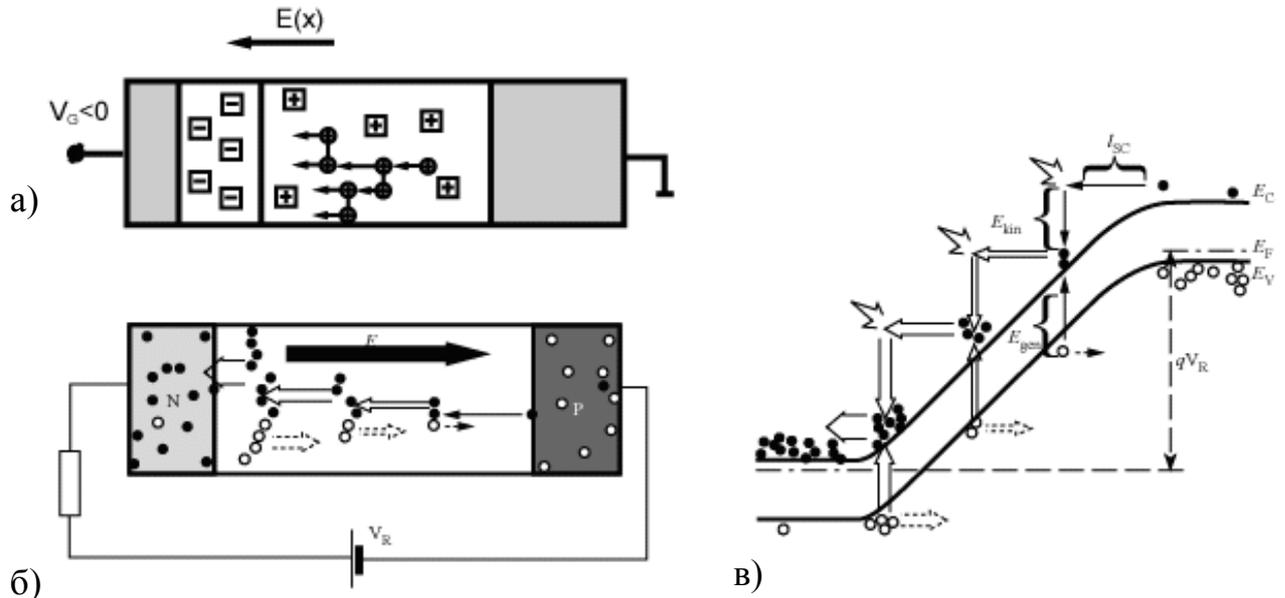


Рис.6. Схема, иллюстрирующая лавинный пробой в однородном полупроводнике: а) распределение электрического поля, доноров и акцепторов и свободных носителей; б) распределение токов; в) зонная диаграмма, иллюстрирующая лавинное умножение в p-n переходе.

Рассмотрим механизм лавинного пробоя более подробно. Если двигаться вдоль силовых линий электрического поля электрон на расстоянии, равном длине свободного пробега λ , наберет энергию, равную либо большую, чем ширина запрещенной зоны, то, неупруго рассеиваясь, этот электрон может вызвать генерацию еще одной электронно-дырочной пары. Дополнительно сгенерированные свободные носители также будут участвовать в аналогичном процессе. Это явление лавинного размножения свободных носителей в условиях сильного электрического поля получило название лавинного пробоя. На рисунке б показана схема, иллюстрирующая лавинный пробой.

Размеры геометрической области полупроводника δ , в которой происходит лавинное умножение, должны быть существенно больше длины свободного пробега электрона λ . Соотношения, определяющие условие лавинного пробоя, будут следующие:

$$q \mathcal{E} \lambda \geq E_g; \delta \gg \lambda \quad (1.9)$$

Одним из параметров лавинного пробоя является коэффициент лавинного умножения M , определяемый как количество актов лавинного умноже-

ния в области сильного электрического поля. Если обозначить начальный ток I_0 , то после лавинного умножения величина тока будет иметь вид: $I = M \cdot I_0$,

$$M = \frac{I}{I_0} = \frac{1}{1 - \left(\frac{U}{U_{\text{стабил.}}} \right)^n} \quad (1.10)$$

где $U_{\text{стабил.}}$ - напряжение лавинного пробоя (которое практически равно напряжению стабилизации), U - напряжение, n - коэффициент, равный 3 или 5 для Ge или Si соответственно.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

Приборы и оборудование.

Определение ширины запирающего слоя p-n перехода и концентрации примеси производится с помощью исследования вольт-амперной характеристики стабилитронов в области лавинного пробоя (при обратном включении). Работа выполняется на лабораторной установке ФКЛ-16. Упрощенная электрическая блок-схема установки приведена на рис. 7.

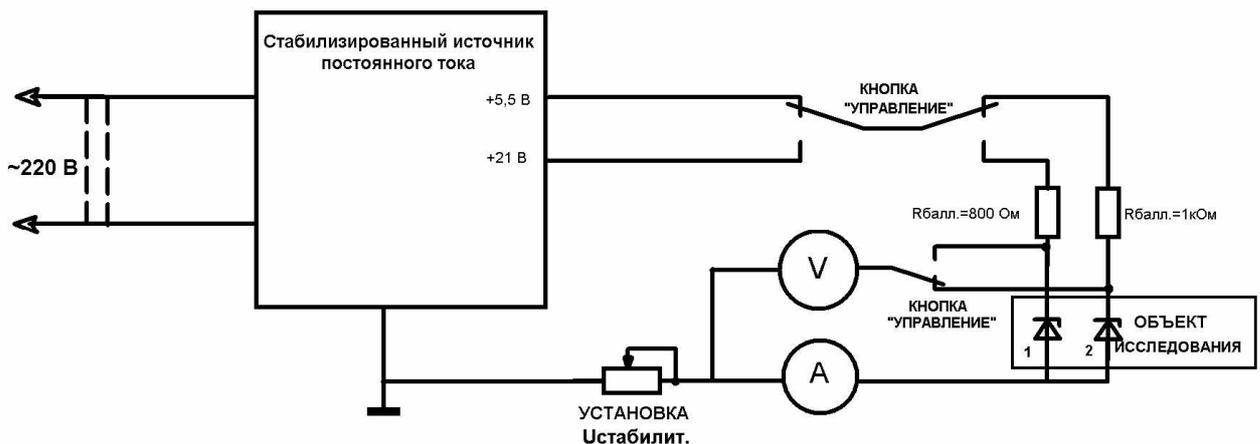


Рис.7. Упрощенная блок-схема экспериментальной установки для исследования стабилитронов.

Стабилизированное напряжение от источника питания постоянного тока подается через балластный резистор на исследуемый образец (объект исследования) – полупроводниковый стабилитрон. Сдвоенный переключатель (кнопка) «СТАРТ/УПРАВЛЕНИЕ» служит для перевода установки в рабочий режим (однократное нажатие после включения) и переключения между исследуемыми стабилитронами (лабораторная установка позволяет снять вольт-амперные характеристики для двух образцов). Вольтметр и амперметр, изображенные на схеме рис.7 отдельно, выполнены в виде цифрового «ИЗМЕРИТЕЛЬНОГО ПРИБОРА», все показания выводятся на ЖКД LCD индикатор. Кнопки «УСТАНОВКА Устабилит.» (на схеме рис.7 обозначены как переменный резистор) позволяют установить обратное напряжение на исследуемых стабилитронах до 5,5 В для первого и до 21 В для второго образца.

Порядок выполнения.

1. Ознакомиться с принципиальной схемой установки на рис. 7. Проверить целостность сетевого провода перед включением.
2. Включить установку в сеть напряжением ~ 220 В.
3. Поставить переключатель «СЕТЬ» на панели установки в положение «ВКЛ» при этом должен загореться сигнальный светодиод-кнопка.
4. Дать установке прогреться в течение 1-2 минут, после чего, для начала проведения эксперимента нажать кнопку «СТАРТ/УПРАВЛЕНИЕ» (кнопку необходимо удерживать в течение одной-двух секунд).
5. Изменяя кнопками «УСТАНОВКА Устабилит.» обратное напряжение, подаваемое на стабилитрон, и, контролируя это значение и значение тока, измеряемые цифровым индикатором, **показания которого индуцируются в Вольтах и мА**, снять вольт-амперную характеристику для первого образца. Шаг изменения напряжения по возможности делать как можно меньше. Особое внимание обращать на фиксацию результатов в области лавинного пробоя (см. рис. 4). Данные занести в табл. 1.
6. Переключить схему для исследования ВАХ второго образца, для чего нажать и удерживать в течение одной-двух секунд кнопку «СТАРТ/УПРАВЛЕНИЕ»
7. Повторить действия п.5 для образца №2, так же занести данные в табл. 1

Образец № __

табл. 1 вольтамперная характеристика стабилитрона

$U, В$	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...
$I, А$	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...

8. По результатам измерений пп. 5, 7 построить на миллиметровой бумаге график зависимости тока от напряжения (ВАХ) для двух изучаемых образцов.
9. Из вольтамперных характеристик определить напряжение пробоя (напряжение стабилизации) для каждого из стабилитронов (рис. 4).
10. По окончании измерений выключить установку и вынуть сетевую вилку из розетки.
11. На практике зависимость напряжения лавинного пробоя р-п перехода от концентрации примеси определяют по эмпирическим формулам. Так для исследуемого нами резкого несимметричного

перехода ($N_A \gg N_D$, $\frac{1}{N_A} \ll \frac{1}{N_D}$, т. е. эмиттером является р область) при комнатной температуре $T=300$ К имеем:

$$U_{\text{лав.проб.}} \cong 60 \cdot \left(\frac{E_g}{1,1}\right)^{3/2} \cdot \left(\frac{N_B}{10^{16}}\right)^{-3/4} \quad (2.1)$$

где $U_{\text{лав.проб.}}$ - напряжение лавинного пробоя в вольтах; E_g - **ширина запрещенной зоны образца полупроводника в эВ** (в нашем случае оба изучаемых стабилитрона кремниевые, поэтому для кремния $E_g \approx 1,14$ эВ), $N_B \approx N_D$ – концентрация примеси в базе диода см^{-3} . Путем несложных математических преобразований из формулы (2.1) можно выразить концентрацию примесей N_B через измеренное значение напряжения лавинного пробоя:

$$N_B \approx 1,941 \cdot 10^{18} \cdot \left(\frac{E_g^2}{U^{4/3}}\right) [\text{см}^{-3}] \quad (2.2)$$

E_g - в эВ; U - напряжение лавинного пробоя в вольтах;

12. Используя формулу (2.2), вычислить значение концентрации примеси для двух исследуемых образцов.
13. Пренебрегая в формуле (1.8) контактной разностью потенциалов U_k и считая по-прежнему $N_A \gg N_D$, получим формулу для оценки толщины электронно-дырочного перехода в области лавинного пробоя:

$$\delta = \sqrt{\frac{2\varepsilon\varepsilon_0 U_{\text{лав.пробоя}}}{qN_D}} \quad (2.3)$$

где $\varepsilon = 12$ - диэлектрическая проницаемость материала образца (кремния), $U_{\text{лав.пробоя}}$ - напряжение лавинного пробоя, В;

$\varepsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12}$ Ф/м – электрическая постоянная (диэлектрическая проницаемость вакуума); $q=e=1,6 \cdot 10^{-19}$ Кл – модуль заряда электрона, N_D – **концентрация примеси, найденная экспериментально из формулы (2.2) в м^{-3} (перевести см^{-3} в м^{-3})**.

14. Оценить дифференциальное сопротивление стабилитронов на рабочем участке как $r_{\text{диф}} = \frac{dU}{dI} \approx \frac{\Delta U}{\Delta I}$ (см. участок «аб» ВАХ на рис.4).

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. В чем состоит принцип работы кремниевого стабилитрона? Какой вид пробоя *p-n*-перехода используется в этих приборах?
2. Почему в качестве материала для изготовления данного типа диодов используется кремний?
3. Расскажите о конструктивном оформлении, условном графическом обозначении и маркировке кремниевого стабилитрона.
4. Начертите и объясните схему включения кремниевого стабилитрона.
5. Нарисуйте ВАХ кремниевого стабилитрона и расскажите о физических процессах, определяющих форму характеристики на разных участках.
6. Укажите основные параметры кремниевого стабилитрона и поясните их физический смысл.
7. Расскажите о применении кремниевых стабилитронов в электронной аппаратуре.
8. Получите формулу для определения ширины запирающего слоя *p-n* перехода.

РЕКОМЕНДУЕМАЯ ЛИТЕРАТУРА

1. Гусев В.Г., Гусев Ю.М. Электроника. – М.: Высшая школа, 1991.
2. Жеребцов И.П. Основы электроники. – Л.: Энергоатомиздат, 1990.
3. Прянишников В.А. Электроника: полный курс лекций. – С.-П.: Корона принт, 2004.
4. Андреев А.В., Горлов М.И. Основы электроники. – Р.-Д.: Феникс, 2003.
5. Бобровников Л.З. Электроника. – СПб: Питер, 2004.
6. Лачин В.И., Савелов Н.С. Электроника. – Р.-Д.: Феникс, 2002.
7. Пасынков В.В. Полупроводниковые приборы. М, Высшая школа, 1981
8. Степаненко И.П. Основы теории транзисторов и транзисторных схем. М.; Энергия, 1977.