

Электронно-дырочный переход

Две области с разным типом легирования - n-область (концентрация доноров N_d) и p-область (концентрация акцепторов N_a)

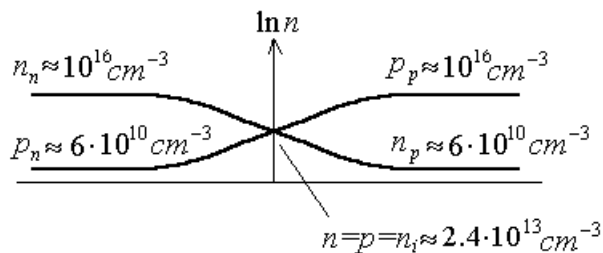
Концентрации основных носителей электронов в n-области $n_n=N_d$, дырок в p-области $p_p=N_a$

<div style="border: 1px solid black; display: inline-block; padding: 2px;">n</div> N_d n_n, p_n	N_a <div style="border: 1px solid black; display: inline-block; padding: 2px;">p</div> p_p, n_p	$n_n=N_d$ $p_p=N_a$	примеси ионизованы полностью
--	--	------------------------	---

Пусть $N_d = N_a = 10^{16} \text{ cm}^{-3}$ - **резкий симметричный p-n-переход**

Полагая $n_i = 2.4 \cdot 10^{13} \text{ cm}^{-3}$ (Ge при 300K) имеем $n_p = p_n = \frac{n_i^2}{p_p} = \frac{n_i^2}{n_n} \approx 6.2 \cdot 10^{10} \text{ cm}^{-3}$

⇒ концентрация электронов меняется слева направо от $2.4 \cdot 10^{13} \text{ cm}^{-3}$ до $6.2 \cdot 10^{10} \text{ cm}^{-3}$, дырок - аналогично, но справа налево; из-за теплового движения это плавное изменение



На границе есть слой с $n=p=n_i$ - обедненный носителями до собственного полупроводника (т.н. **обедненный слой**)

Из-за диффузии - поступление электронов из n-области в p-область, дырок из p-области в n-область - тепловое движение носителей создает **диффузионный ток** (направленный из p-области в n-область)

⇒ образование в p-области избыточного отрицательного заряда ("облака" электронов) и так же избыточного отрицательного заряда "вмороженных" ионов акцепторов, в n-области - избыточного положительного заряда "вмороженных" ионов доноров и избыточного положительного заряда неосновных носителей ("облака" дырок)

⇒ вблизи p-n-перехода возникает т.н. **объемный заряд**

⇒ возникает электрическое поле, возвращающее электроны в n-область и дырки в p-область - электрическое поле в p-n-переходе создает т.н. **ток проводимости** (направленный из n-области в p-область), в состоянии термодинамического равновесия точно компенсирующий ток диффузии

Из-за наличия поля между n-областью и p-областью возникает разность потенциалов - т.н. скачек потенциала φ_0 в p-n-переходе - потенциальный барьер, препятствующий диффузии

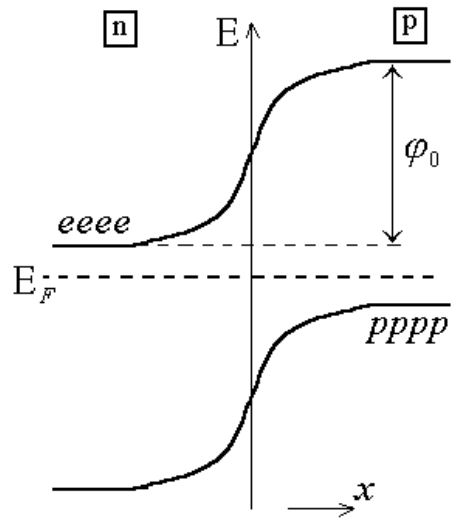
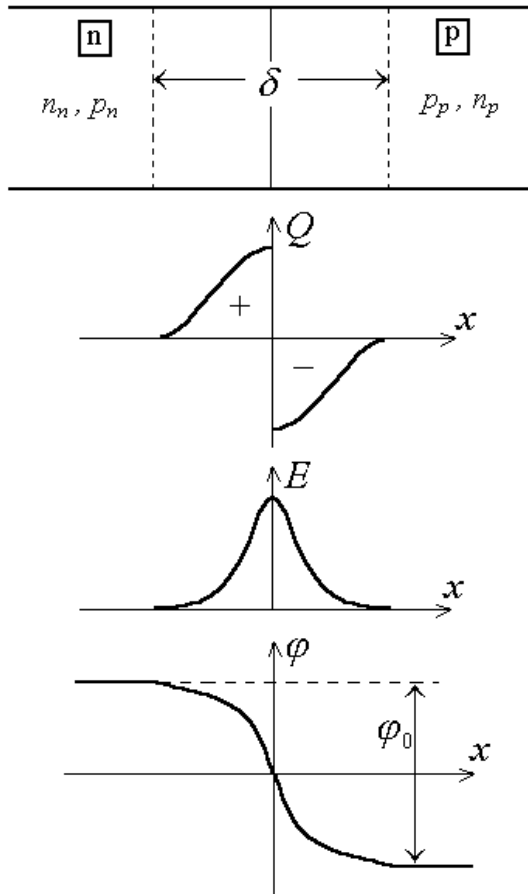


диаграмма изгиба плоских зон

ϕ_0 определяется из одинаковости уровня Ферми (химического потенциала) для всей системы и

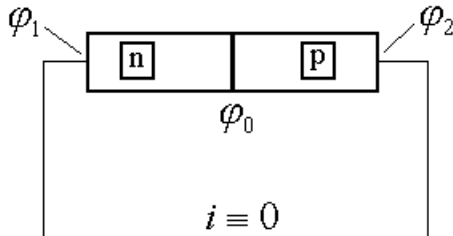
равен
$$\phi_0 = \frac{kT}{q_e} \ln \frac{p_p \cdot n_n}{n_i^2}$$

Для рассмотренной модели (Ge, $N_{\bar{d}}=N_a=10^{16} \text{ cm}^{-3}$) при 300K $\frac{kT}{q_e} = \varphi_T \approx 0.025V$,

$n_i=2.4 \cdot 10^{13} \text{ cm}^{-3}$ и $\phi_0 \approx 25mV \cdot \ln \frac{10^{16} \cdot 10^{16}}{(2.4 \cdot 10^{13})^2} \approx 25mV \cdot 12 = 300mV$

Для аналогичного перехода из Si $n_i \approx 1.4 \cdot 10^{10} \text{ cm}^{-3} \Rightarrow \phi_0 \approx 25mV \cdot 27 \approx 675mV$

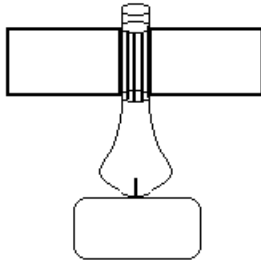
Но почему не возможен вечный двигатель ?



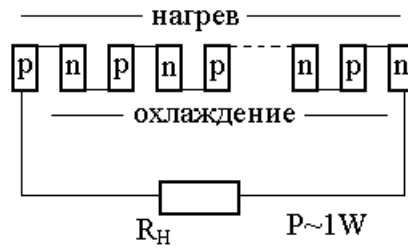
$\phi_0 + \phi_1 + \phi_2 = 0$
 - поскольку E_F - общая для всей системы (включая проводник)

Тем не мене : если нагреть (или охладить!) только переход - в цепи будет ток, т.к. $(\phi_1 + \phi_2) = \phi_0(T_1) \neq \phi_0(T_2)$ - простейший термоэлемент - аналог термопары, но с ЭДС в ~10 раз большей

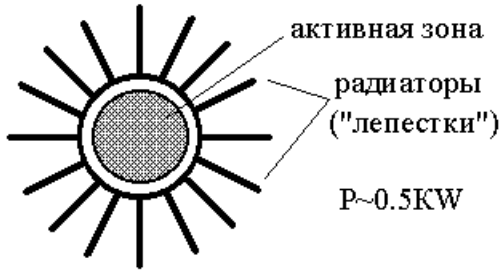
Пример : термоэлектрические генераторы



термобатарея на керосиновой лампе



аналогично : термобатарея с ядерным реактором ("Ромашка")



Ширина области пространственного заряда ("ширина" p-n-перехода) δ_0 - из уравнений электростатики $\varphi = \int E \cdot dx$, $E = \frac{1}{\epsilon\epsilon_0} \int \rho \cdot dx$ где $\rho = q_e n$ - объемная плотность заряда;

для резкого p-n-перехода
$$\delta_0 = \sqrt{\frac{2\epsilon\epsilon_0\varphi_0}{q_e} \left(\frac{1}{n_n} + \frac{1}{p_p} \right)}$$

Для нашего случая (Ge $n_n=p_p=N_d = N_a=10^{16} \text{ cm}^{-3}$, $\varphi_0 \approx 300 \text{ mV}$, $\epsilon_{\text{Ge}}=16$) $\delta_{0\text{Ge}} \approx 3.2 \mu\text{m}$

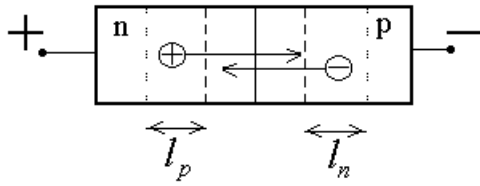
Для аналогичного перехода из Si меняются $\varphi_0 \approx 675 \text{ mV}$, $\epsilon_{\text{Si}}=12$ и $\delta_{0\text{Si}} \approx 4.3 \mu\text{m}$

VA-характеристика p-n-перехода

а) в отсутствии внешнего смещения - система в равновесии - ток диффузии уравновешивается током проводимости; в переходе существует потенциальный барьер, а в центре перехода - область с повышенным сопротивлением

б) при приложении напряжения соотношение ток диффузии / ток проводимости изменяется \Rightarrow во внешней цепи появляется ток - система неравновесная; два варианта :

1. приложено напряжение одного знака с φ_0 - потенциальный барьер растет \Rightarrow растет "выметающее" поле в переходе \Rightarrow ток диффузии падает, ток проводимости выходит на константу



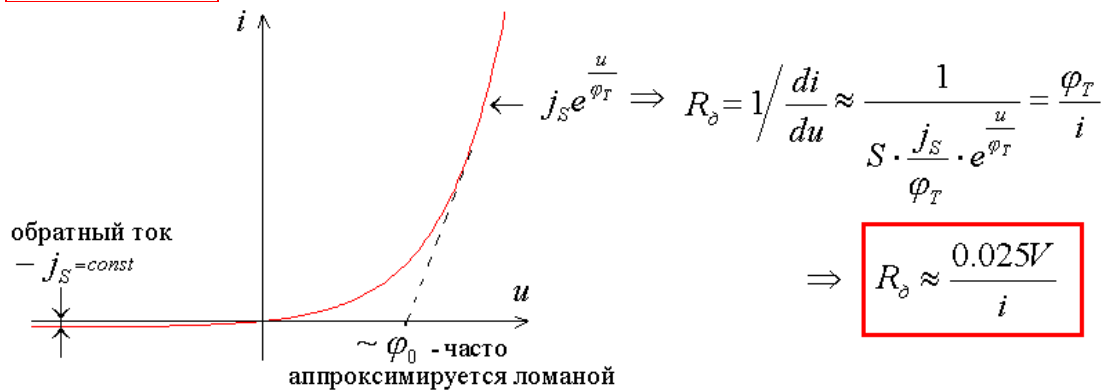
(определяется диффузией неосновных носителей из нейтральных объемов полупроводника и в идеале не зависит от "ширины" перехода и смещения) :

$$j_S = q_e \left(\frac{l_p}{\tau_p} p_n + \frac{l_n}{\tau_n} n_p \right) \text{ - в переход за время } \tau \text{ поступает заряд из слоя } l$$

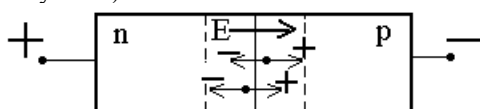
j_S - плотность тока насыщения, τ_p и l_p - время жизни и диффузионная длина дырок в n-слое, τ_n и l_n - время жизни и диффузионная длина электронов в p-слое

2. при прямом смещении (уменьшающем потенциальный барьер) ток проводимости практически не меняется, а диффузионный ток растет экспоненциально :

$$j = j_S \cdot (e^{\frac{u}{\varphi_T}} - 1) \quad i = S \cdot j, \quad j \text{ - плотность тока, } S \text{ - площадь перехода}$$



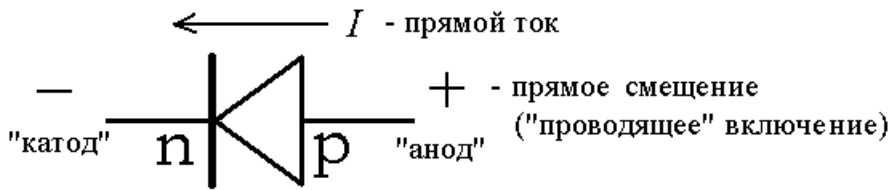
На самом деле : при больших прямых токах и смещениях растет вклад омического сопротивления полупроводника и экспоненциальность нарушается; при обратном смещении обратный ток $> j_S$ и зависит от u из-за термогенерации в обедненной зоне (прежде всего на ловушках)



Отличие p-n-перехода от вакуумного диода :

1. ВА-характеристика проходит через 0 - нет внутреннего источника энергии
2. ток меняет знак (обратный ток $\neq 0$)

Обозначение на схеме цепи :



обратный ток $I \longrightarrow$
 \oplus обратное смещение \ominus
 ("непроводящее" включение)

Инжекция и накопление неосновных носителей

При прямом токе преобладает диффузионная компонента - т.е. через переход навстречу идут потоки основных носителей в области, где они оказываются неосновными - это процесс **инжекции**

\Rightarrow вблизи перехода растет концентрация неосновных носителей - такое **накопление заряда** можно трактовать как наличие у р-п-перехода **диффузионной емкости** :

$$C_{\text{дифф}} = \frac{\Delta Q}{\Delta u} = \frac{S}{\varphi_T} (j_p \tau_p + j_n \tau_n)$$

где j_p - диффузионный ток дырок, j_n - электронов, $j_p + j_n = j + j_s$

для несимметричного перехода : например, $N_a \gg N_d \Rightarrow j_p \gg j_n$ и $C_{\text{дифф}} \approx \frac{S}{\varphi_T} (j + j_s) \tau_p$ - при

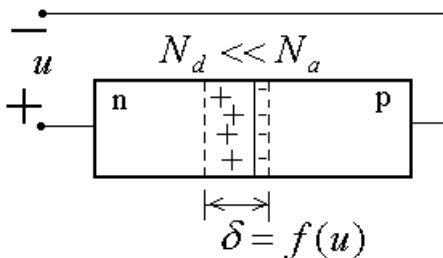
условии $j = -j_s$ (обратный ток насыщен при достаточном обратном смещении) диффузионная емкость = 0

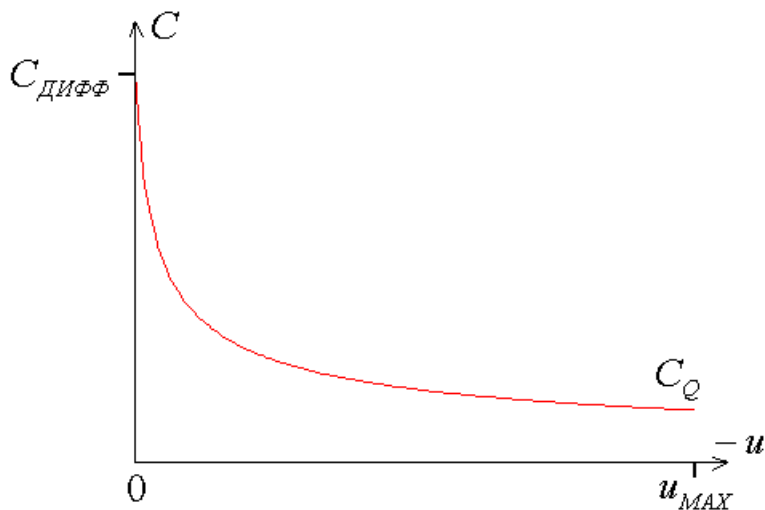
Диффузионная емкость связана с протеканием тока \Rightarrow емкость с большими потерями ("с низкой добротностью")

Но : при обратном смещении существует емкость запирающего слоя - обусловлена зарядом "вмороженных" ионов примеси - это т.н. **зарядовая емкость**

Для резкого асимметричного р-п-перехода (например, $N_d \ll N_a$) :

$$C_Q = \frac{\varepsilon \varepsilon_0 S}{\delta} \approx C_0 \sqrt{\frac{\varphi_0}{\varphi_0 + |u|}} \approx C_0 \sqrt{\frac{\varphi_0}{|u|}} \quad C_0 = \frac{\varepsilon \varepsilon_0 S}{\delta_0}$$



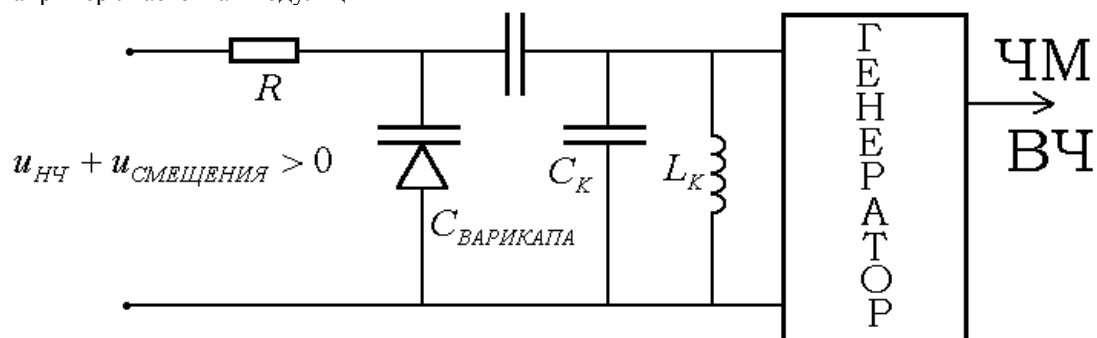


Чаще - сложное распределение примеси $N_a(x)$, $N_d(x)$ - нерезкий (плавный) p-n-переход \Rightarrow емкость как $f(u)$ и аппроксимируют как $C \approx \frac{A}{(|u| + B)^\alpha}$, обычно $\alpha < 1$

Применение :

варикапы (емкости, управляемые напряжением) - перестройка контуров,
варакторы (нелинейные емкости) - умножение частоты

Например : частотная модуляция

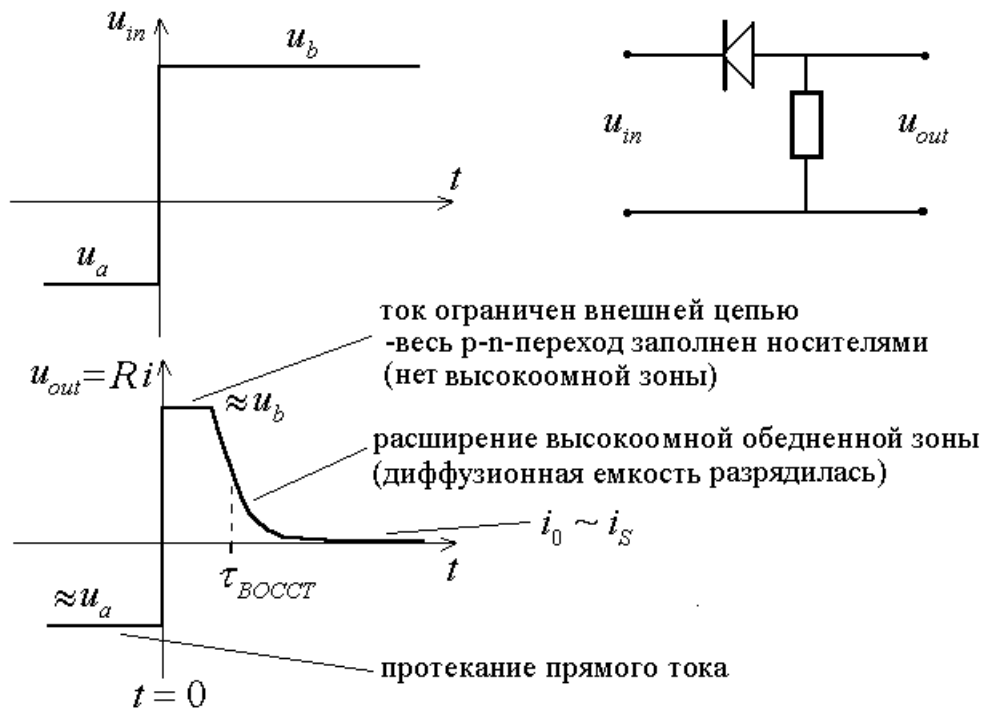


Характерные емкости варикапов - в пределах

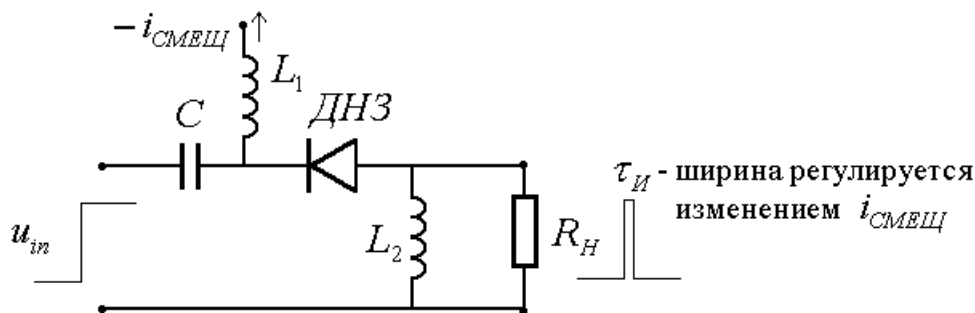
от 0.5 - 5pF до 100 - 1000pF ($u_{СМЕЩ}$ от ~ -0 до $-30V$)
ТЕЛЕВИДЕНИЕ, УКВ ДВ-СВ приемники

Диоды с накоплением заряда (ДНЗ)

Обычно $C_{ДИФФ} \gg C_0 \Rightarrow$ при переключении смещения с прямого на обратное снижение тока до уровня $\sim j_s$ происходит с задержкой из-за **рассасывания объемного заряда неосновных носителей**



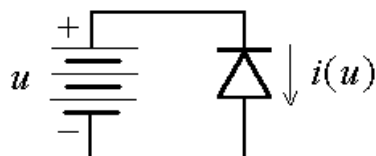
Применение ДНЗ - формирование коротких импульсов :



Обычно $\tau_{ИМП} > \tau_{ВОССТ} \sim 1 - 100ns$; для специальных диодов $\tau_{ИМП} < 100ps$

При специальной структуре p-n-перехода (особом профиле распределения примеси) - формирование почти прямоугольных импульсов

Но чаще всего : накопление заряда - очень вредный эффект - ограничивает предельные рабочие частоты, приводит к потерям мощности



Пробой p-n-перехода

Основные типы пробоя :

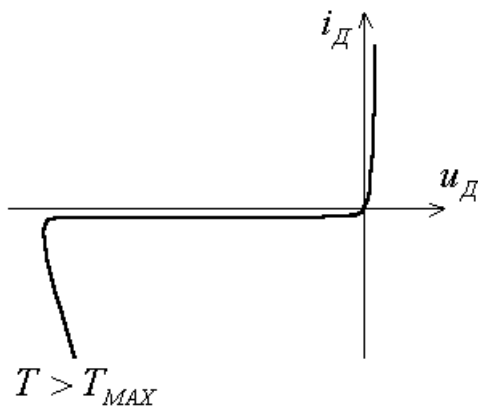
1. тепловой пробой
2. поверхностный пробой

- 3. лавинный пробой
- 4. зенеровский (туннельный) пробой

1. Тепловой пробой

При протекании обратного тока в полупроводниковом диоде в виде тепла выделяется мощность $i \cdot u$, приводящая к разогреву диода.

Однако увеличение температуры перехода ведет к увеличению обратного тока и к усилению разогрева - и при недостаточном теплоотводе на статической ВА-характеристике может появиться область отрицательного сопротивления и развиваться тепловой пробой.



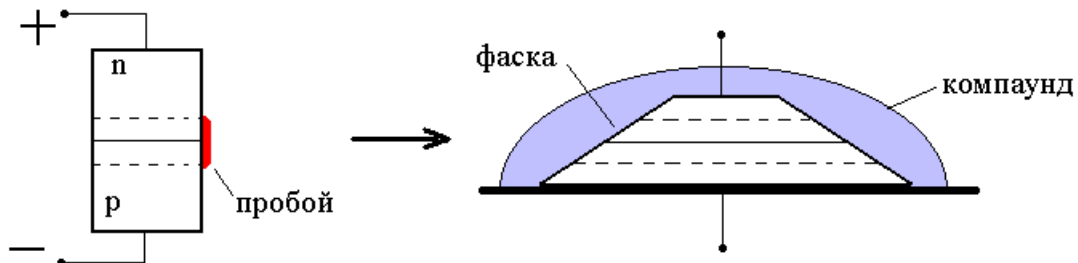
Реально - время развития теплового пробоя велико - 0.01-100sec

Тепловой пробой ограничивает рабочие температуры
 70-80°C (Ge)
 100-130°C (Si)

Если развивающийся ток пробоя не достаточно ограничен внешней цепью, то происходит тепловое разрушение диода (например, плавление полупроводника).

2. поверхностный пробой

p-n-переход - очень тонкий слой (0.1-100μm), и при существенным приложенном обратном напряжении (10-1000V) возможно развитие электрического разряда (искры, дуги) по поверхности полупроводника (на границе газ-полупроводник); пробой обычно стимулируется дефектами и загрязнениями на поверхности

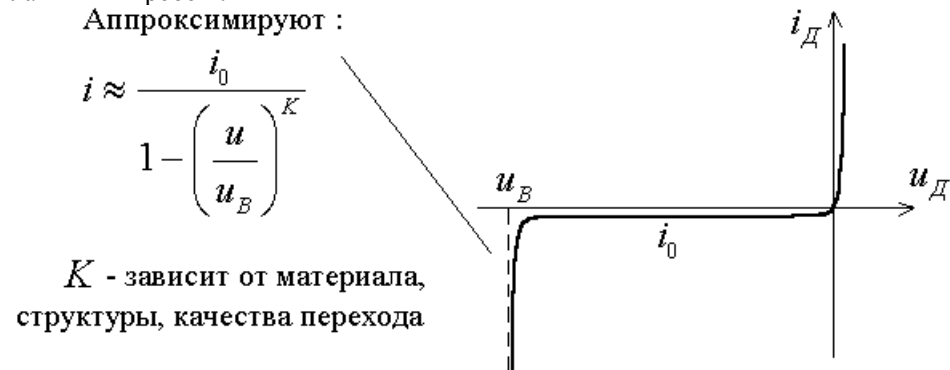


Предотвращение : спецобработка поверхностей (полировка, травление, пассивация), нанесение покрытия (компаунды), снятие фасок, специальные профили распределения примесей

3. лавинный пробой

В сильных полях ($\sim 10^4$ - 10^6 V/cm) носитель между двумя соударениями с решеткой набирает энергию, достаточную для ионизации атома в узле - т.е. при соударениях он генерирует новые электронно-дырочные пары

Новые носители далее так же генерируют пары - возникает **лавинное размножение носителей** - а на ВА-характеристике возникает быстрое (не ограниченное) возрастание тока - происходит лавинный пробой :



Особенность лавинного пробоя - рост $|u_B|$ с ростом температуры перехода (положительный ТКН) - тепловое движение "сбивает" разгон носителей

Другая особенность - **микроплазмы** - развитие пробоя в локальных (микроскопических) областях концентрации поля вблизи дефектов

⇒ при "подходе" к пробую - очень сильный шум обратного тока - усиление в "зажженных" микроплазмах велико, но число носителей не достаточно для самоподдерживающейся лавины :



- диффузия носителей - случайный процесс ⇒ генерация истинно случайного шума

4. туннельный (зенеровский) пробой

В очень тонких переходах ($\delta \sim 10$ - 100 nm) - число соударений носителя с решеткой мало ⇒ лавина не возникает даже в сильных полях

Но : в очень сильных полях - $\sim 10^5$ - 10^6 V/cm - ширина потенциального барьера для валентного электрона уменьшается и появляется возможность "туннелирования" под барьером с образованием электронно-дырочной пары - развивается зенеровский (туннельный) пробой

Особенность туннельного пробоя - снижение пробивного напряжения с ростом температуры (отрицательный ТКН)

Для Si диодов пробивные напряжения соответствуют :

- <4V - туннельному пробую
- >8V - лавинному пробую
- 4-8V - конкуренции процессов

Применение зенеровских и лавинных диодов
(полупроводниковых стабилитронов)