



Уральский  
федеральный  
университет

# Электроника

Тема лекции: Электронно-дырочный переход  
§ 4 Идеальный *p-n* переход

Лекторы:

**Елфимов Вячеслав Ильич**

к.т.н., профессор каф. РЭИС

**Дурнаков Андрей Адольфович**

ст. преподаватель каф. РЭИС

Разработчики:

Елфимов В.И., Дурнаков А.А.

**Идеальным**, или **идеализированным  $p$ - $n$  переходом** называется такой  $p$ - $n$  переход, который представляет собой упрощенную модель реального  $p$ - $n$  перехода, для которой приняты следующие допущения:

- Все подводимое напряжение приложено и падает непосредственно на  $p$ - $n$  переходе.
- Ширина  $p$ - $n$  перехода пренебрежимо мала.
- $$U_{\text{обр}} < U_{\text{пробоя}}$$
- Границы  $p$ - $n$  перехода являются плоскими, носители заряда движутся только в направлении, перпендикулярном этим границам, краевые эффекты не учитываются.

- Толщины нейтральных областей много больше диффузионной длины неосновных носителей заряда в этих областях.
- Уровень инжекции мал, т.е. при любом значении тока через переход концентрация основных носителей заряда много больше концентрации неосновных носителей заряда.
- Изменение концентрации неосновных носителей заряда в областях за границами перехода при небольшом прямом напряжении не нарушает электрической нейтральности этих областей.

## Физические процессы при прямом напряжении на $p-n$ переходе

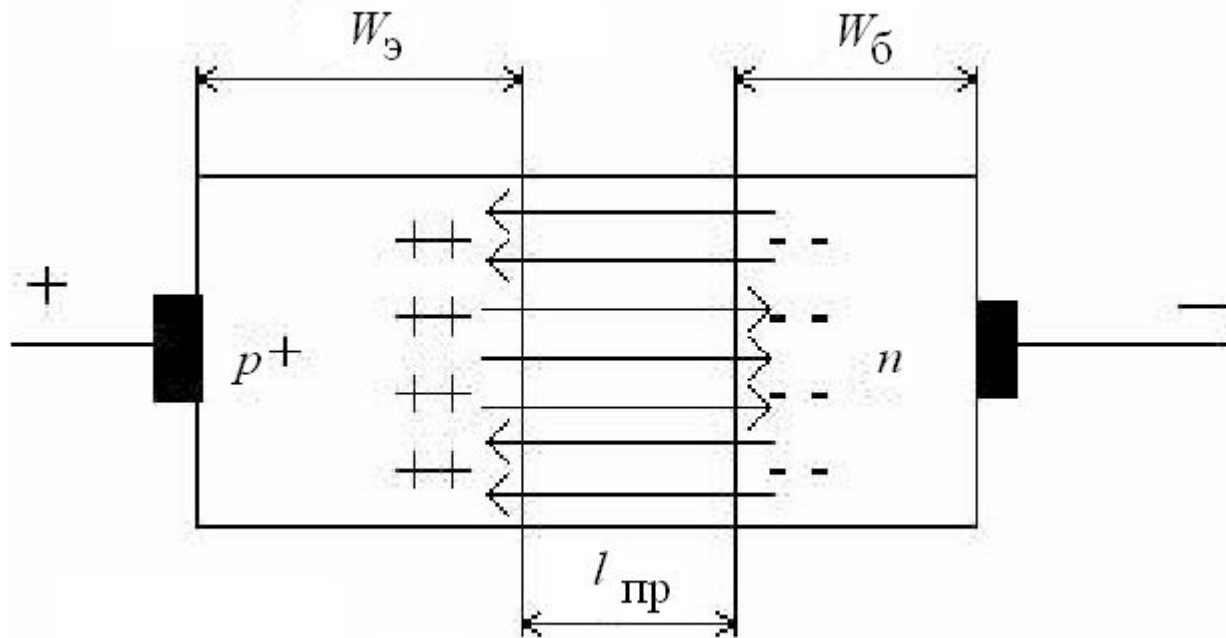


Схема движения основных носителей заряда

Стационарные распределения избыточной концентрации неосновных носителей заряда определяются из уравнения диффузии:

$$D_n \cdot \frac{d^2 n_p}{dx^2} - \frac{(n_p - n_{p0})}{\tau_n} = 0$$

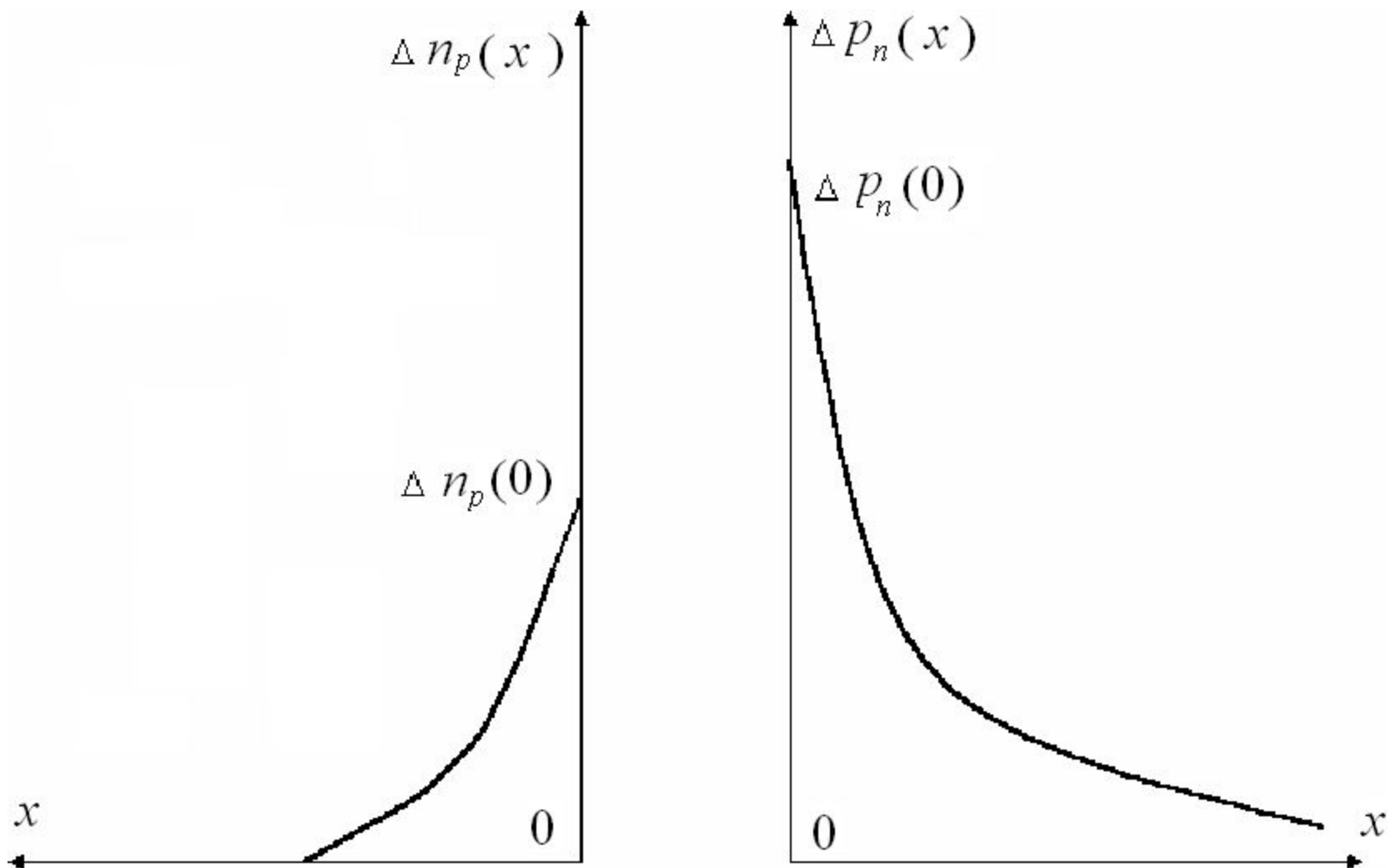
Это дифференциальное уравнение описывает диффузионное движение электронов в дырочном полупроводнике с учетом рекомбинации.

Решение уравнения диффузии для  $p$ -области имеет вид:

$$\Delta n_p(x) = \Delta n_p(0) \cdot \exp(-x/L_n)$$

для  $n$ -области:

$$\Delta p_n(x) = \Delta p_n(0) \cdot \exp(-x/L_p)$$



Распределения избыточных концентраций носителей заряда

Плотность тока диффузии на границе  $p-n$  перехода:

$$I_n = S \cdot i_{D_n}(0) = q \cdot S \cdot D_n \cdot \Delta n_p(0) / L_n$$

$$I_p = S \cdot i_{D_p}(0) = q \cdot S \cdot D_p \cdot \Delta p_n(0) / L_p$$

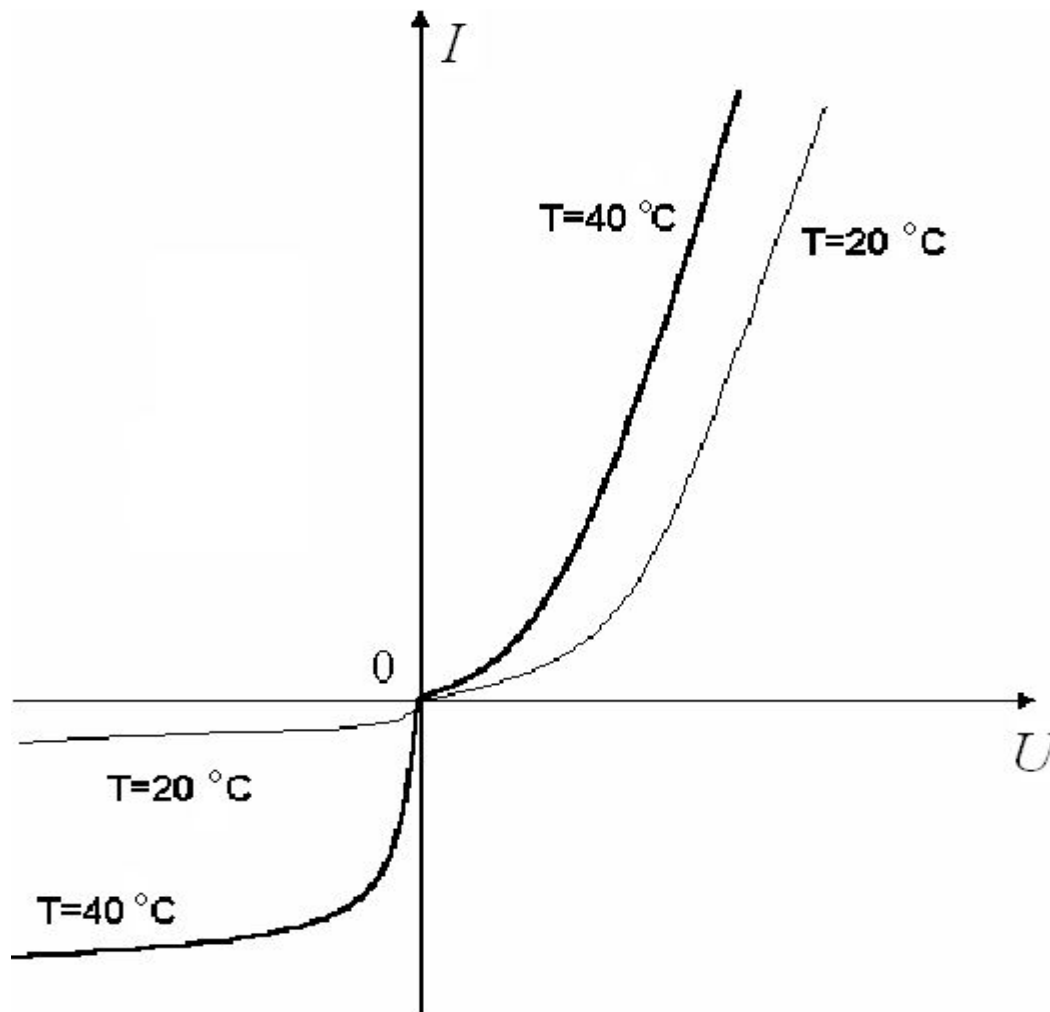
Ток через  $p-n$  переход опишется вольтамперной характеристикой идеального перехода:

$$I = I_n + I_p = I_0 \left( \exp\left[\frac{U}{\phi_T}\right] - 1 \right)$$

$$I_0 = qS \left( D_p p_{n0} / L_p + D_n n_{p0} / L_n \right)$$

Коэффициент инжекции  $\gamma$  характеризует относительную роль главной составляющей тока в переходе:

$$\gamma = \frac{I_p(0)}{I(0)} = \frac{I_p(0)}{I_p(0) + I_n(0)} \approx 1 - \frac{\rho_{\text{Э}}}{\rho_{\text{Б}}}$$



Теоретическая ВАХ  $p$ - $n$  перехода



Параметры прямой ветви ВАХ –  
дифференциальное сопротивление  
перехода:

$$r_{\text{пер}} = dU/dI = \phi_T / I$$

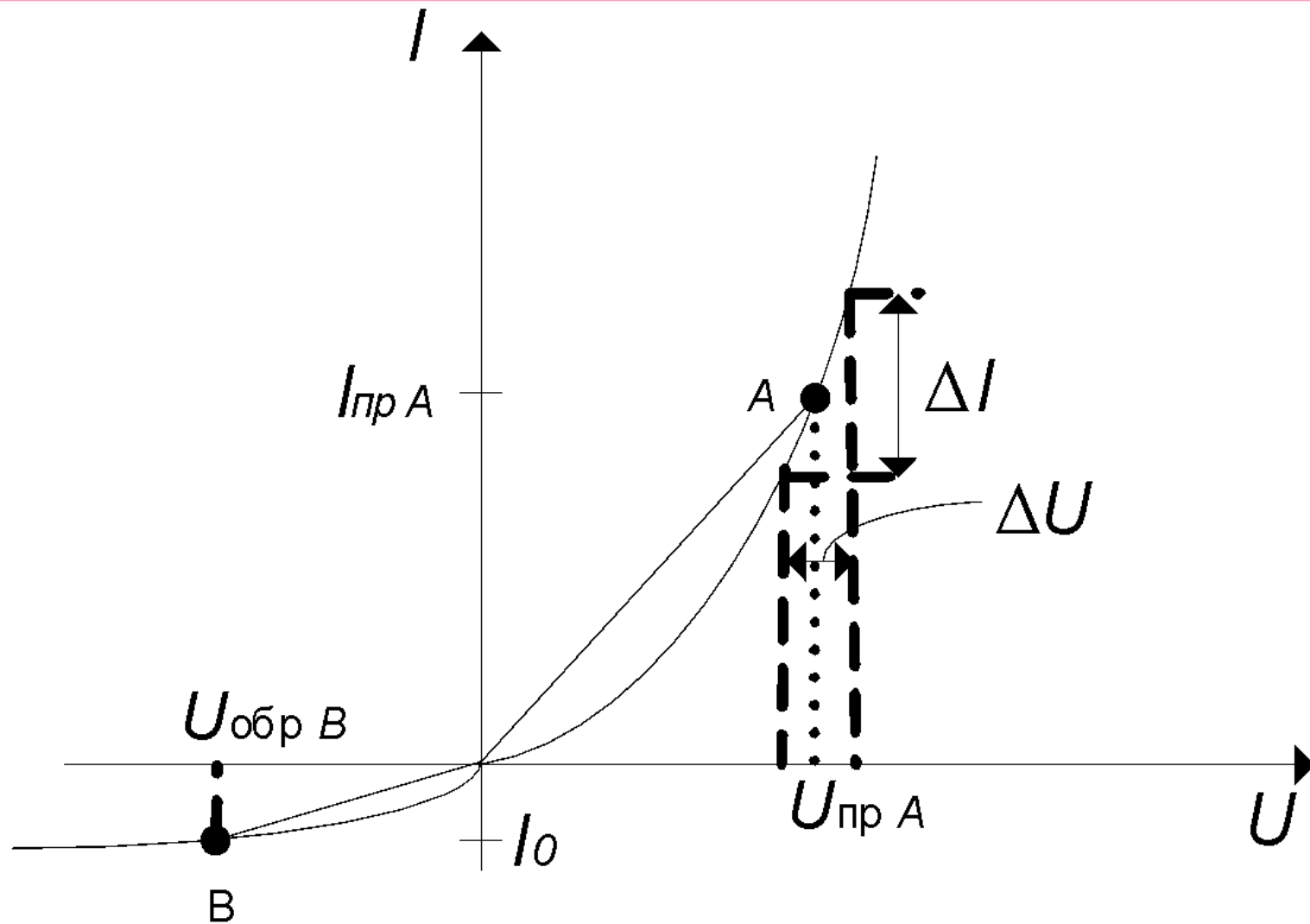
сопротивление постоянному току

$$R_{\text{пер}} = U / I = \frac{\phi_T}{I} \cdot \ln\left(\frac{I}{I_0} + 1\right)$$

Для обратной ветви ВАХ :

$$r_{\text{пер}} \rightarrow \infty$$

$$R_{\text{пер}} = \left| U_{\text{обр}} \right| / I_0$$



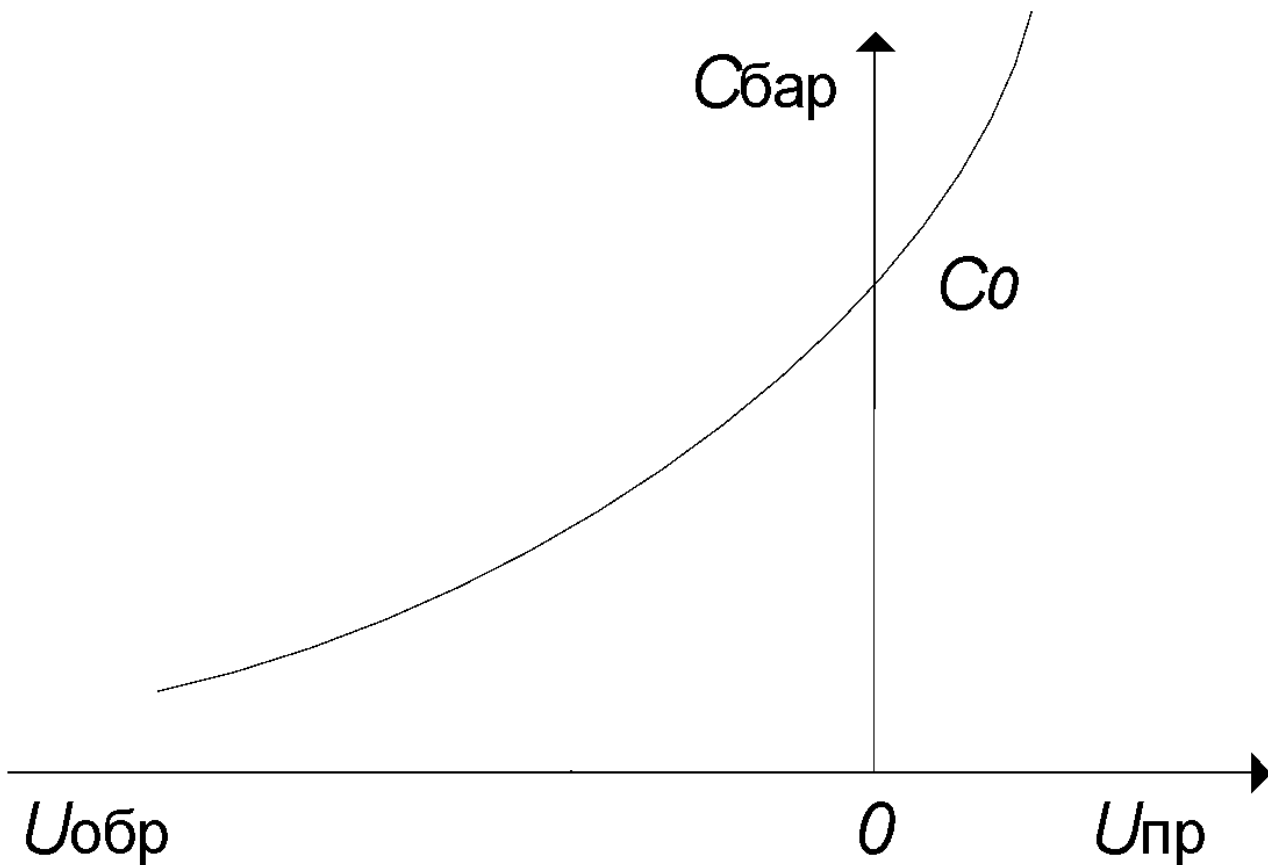
Определение сопротивлений перехода

## Вольт-фарадная характеристика $p$ - $n$ перехода

Идеальный электронно-дырочный переход можно рассматривать как плоский конденсатор, емкость которого определяется соотношением:

$$C_{\text{бар}} = \varepsilon S/l$$

$$C_{\text{бар}} = S \sqrt{\frac{\varepsilon q N_a N_d}{2(U_k + |U_{\text{обр}}|)(N_a + N_d)}}.$$

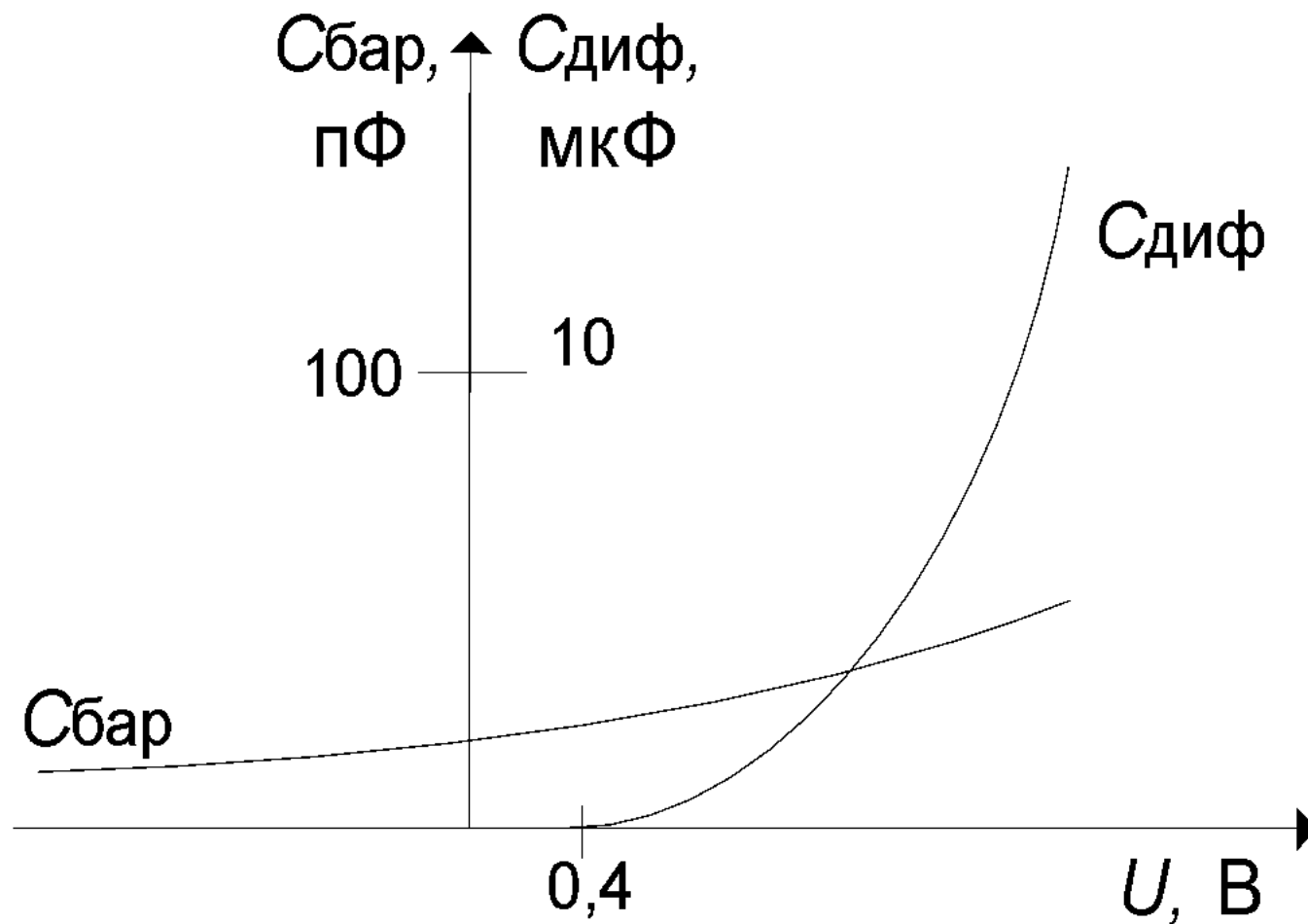


Вольт-фарадная характеристика  $p-n$  перехода

Для диффузионной емкости:

$$C_{\text{диф}} = C_{\text{дифр}} + C_{\text{дифн}} =$$

$$= (qS / \phi_T) (L_{np} n_{p0} + L_p p_{n0}) \exp(U / \phi_T).$$



Зависимость барьерной и диффузионной емкостей  $p-n$  перехода от напряжения

## Выводы

1. Ток насыщения с  $\uparrow T$  растет экспоненциально, так как экспоненциально возрастает концентрация неосновных носителей заряда (приблизительно: ток насыщения увеличивается в 2 раза на каждые  $10^\circ\text{C}$ ).
2. Прямая ветвь ВАХ  $p$ - $n$  перехода с  $\uparrow T$  смещается влево: возрастает тепловая энергия основных носителей заряда, снижается высота потенциального барьера, следовательно растет число носителей заряда, энергия которых больше высоты потенциального барьера  $p$ - $n$  перехода.
3. С ростом степени легирования происходит уменьшение тока  $I_0$ .

## Выводы

- Нелинейность ВАХ : прямая ветвь –  $r_{\text{пер}} \ll R_{\text{пер}}$ ; обратная ветвь –  $R_{\text{пер}} \ll r_{\text{пер}} \rightarrow \infty$ .
- В динамическом режиме  $p$ - $n$  переход является инерционным элементом по отношению к быстрым изменениям тока или напряжения и обладает барьерной емкостью, отражающую перераспределение зарядов в переходе, и диффузионной емкостью, отражающую перераспределение носителей зарядов в базе.