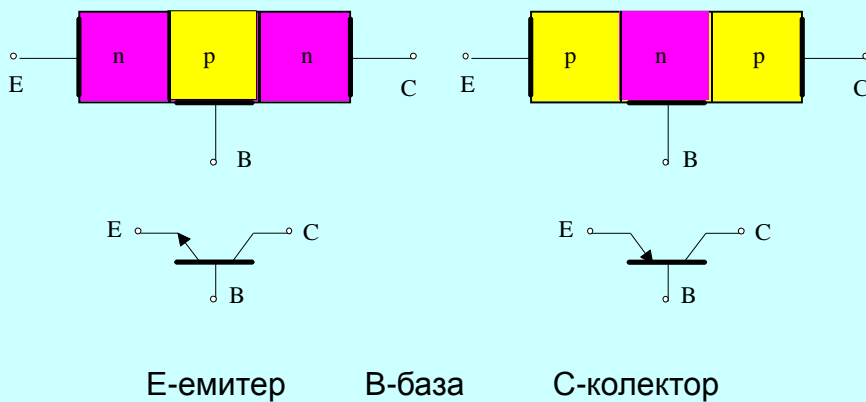


### 3. Биполарен транзистор Bipolar Junction Transistor - BJT

Ж.Косев, Т.Карталов, Електроника, ЗФЕИТ053018

1

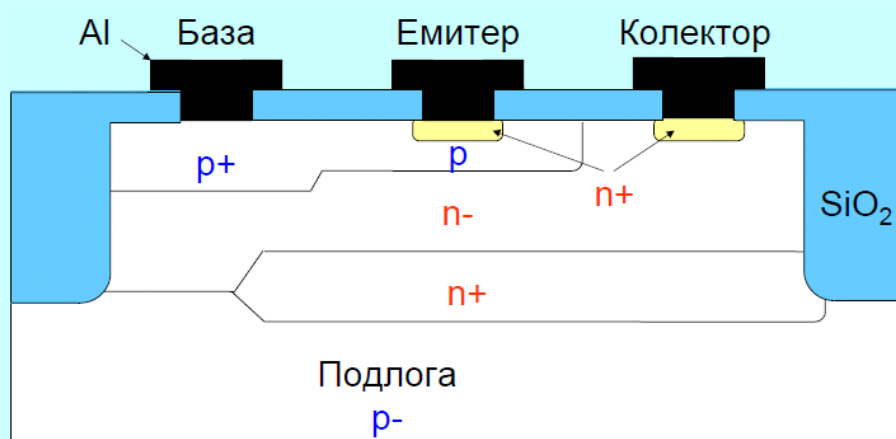
### Структура и символ на БJT



Ж.Косев, Т.Карталов, Електроника, ЗФЕИТ053018

2

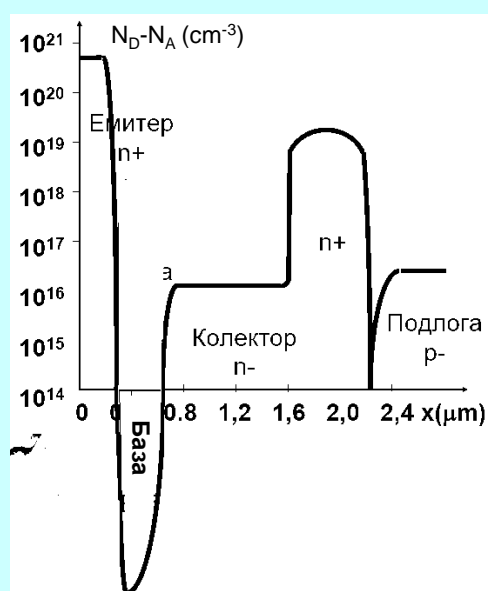
## Градба на НПН биполарен транзистор



Ј.Косев, Т.Карталов, Електроника, ЗФЕИТ053018

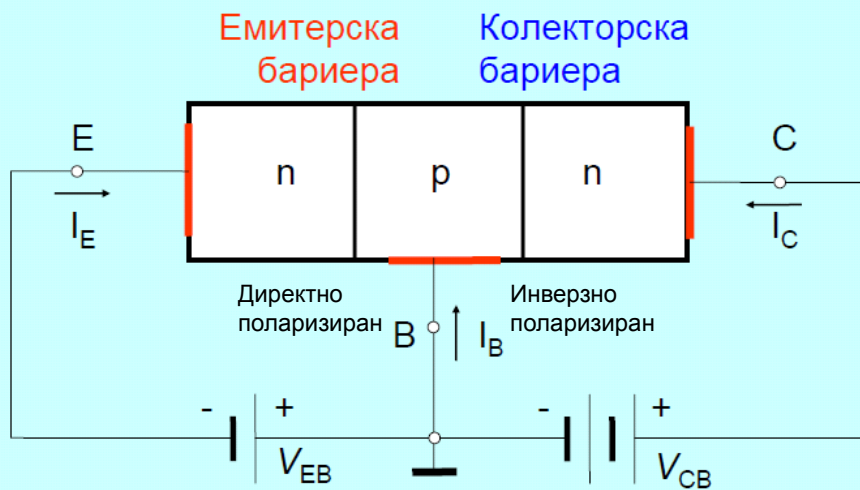
3

## Профил на примеси



4

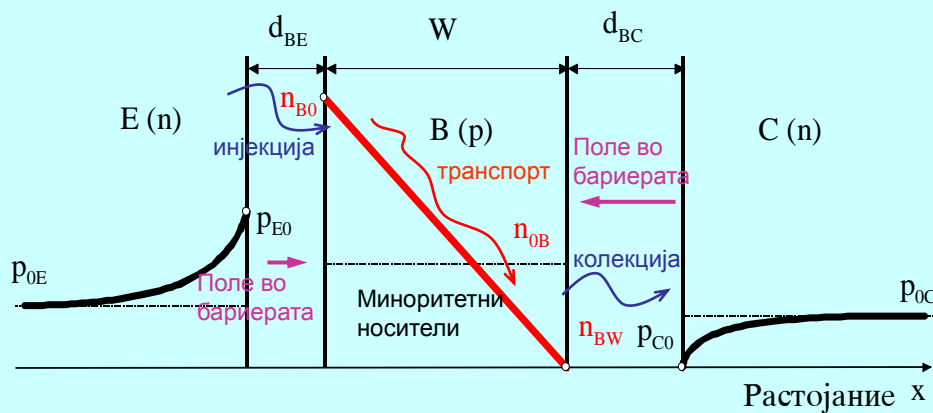
## Поляризација на (npn) биполарен транзистор во НАП



Ј.Косев, Т.Карталов, Електроника, ЗФЕИТ053018

5

## Принцип на работа на биполарен транзистор во НАП



Ј.Косев, Т.Карталов, Електроника, ЗФЕИТ053018

6

- Анимација: како работи транзисторот
- <https://www.youtube.com/watch?v=jVyyHfsAfyA>

## Компоненти на струите кај биполарен транзистор (во НАП)

Струи на инјекција:

$$N_{DE} \gg N_{AB} \Rightarrow I_{nE} \gg I_{pE}$$

Струја на рекомбинација:

$$I_R \ll I_{nE}$$



## Фактор на струјно засилување (инф.)

$$I_{nE} = \gamma(-I_E)$$

$$\gamma < \approx 1$$

Фактор на инјекција

$$I_{nC} = \beta^* I_{nE}$$

$$\beta^* < \approx 1$$

Транспортен фактор

$$-I_E = I_{nE} + I_{pE}$$

$$I_C = I_{nC} + I_{CBO} \quad \} \Rightarrow \quad I_C = \beta^* \gamma(-I_E) + I_{CBO}$$

$$I_B = -I_C - I_E$$

$$\alpha = \beta^* \gamma$$

Фактор на струјно  
засилување во спој  
со заедничка база

$$I_C = \alpha(-I_E) + I_{CBO}$$

Типично:

$$0,95 < \alpha < 0,995$$

Ј.Косев, Т.Карталов, Електроника, ЗФЕИТ053018

9

## Фактор на струјно засилување (инф.)

$$-I_E = I_{nE} + I_{pE}$$

$$I_C = I_{nC} + I_{CBO} \quad \} \Rightarrow$$

$$I_B = -I_C - I_E$$

$$I_C = \frac{\alpha}{1-\alpha} I_B + \frac{1}{1-\alpha} I_{CBO}$$

$$\beta = \frac{\alpha}{1-\alpha}$$

Фактор на струјно  
засилување во спој  
со заеднички емитер

$$I_C = \beta I_B + (\beta + 1) I_{CBO}$$

Типично:

$$20 < \beta < 200$$

$I_{CBO}$  : типично 1nA

Ј.Косев, Т.Карталов, Електроника, ЗФЕИТ053018

10

# Струјно-напонска зависност во НАП (инф.)

Од релацијата на Шокли за емитерскиот спој:

$$-I_E = I_{Sn}(e^{\frac{U_{BE}}{U_T}} - 1) + I_{Sp}(e^{\frac{U_{BE}}{U_T}} - 1)$$

$$I_C = \alpha(-I_E) + I_{CBO} \approx I_S(e^{\frac{U_{BE}}{U_T}} - 1)$$

$$I_C = I_S(e^{\frac{U_{BE}}{U_T}} - 1) \neq f(U_{CB})$$

$I_{CBO}$  : занемарливо

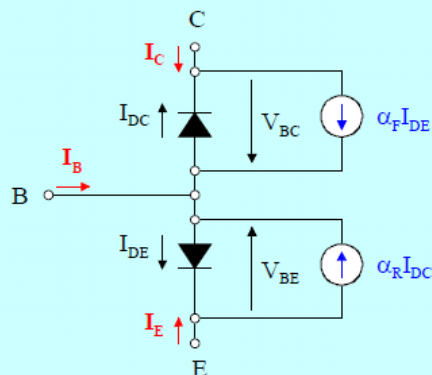
**!! Поведение: НАПОНСКИ КОНТРОЛИРАН СТРУЕН ГЕНЕРАТОР**

## Други поларизации на биполарен транзистор

Режим на работа	Поларизација на емитерската бариера	Поларизација на колекторската бариера
Нормално активно подрачје, НАП	Директна	Инверзна
Инверзно активно подрачје, ИАП	Инверзна	Директна
Режим на заситување	Директна	Директна
Режим на запирање	Инверзна	Инверзна

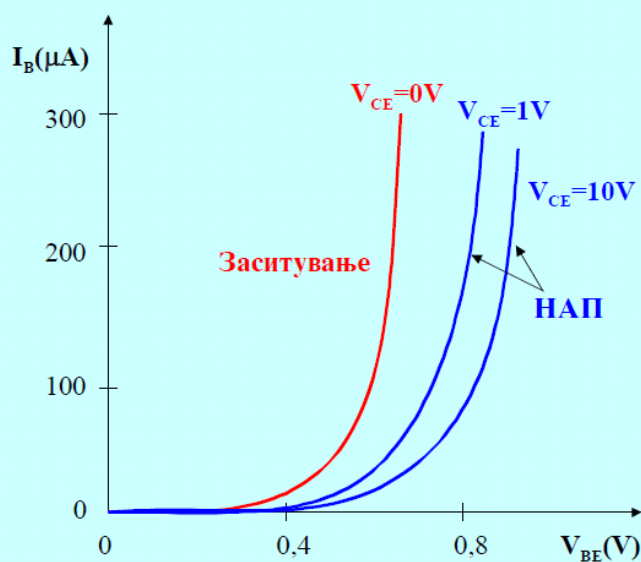
## Струјно-напонска зависност во сите подрачја - Еберс Мол (инф.)

- Комплетните струјно-напонски карактеристики се дефинирани со релациите (моделот) на Еберс-Мол (информативно):



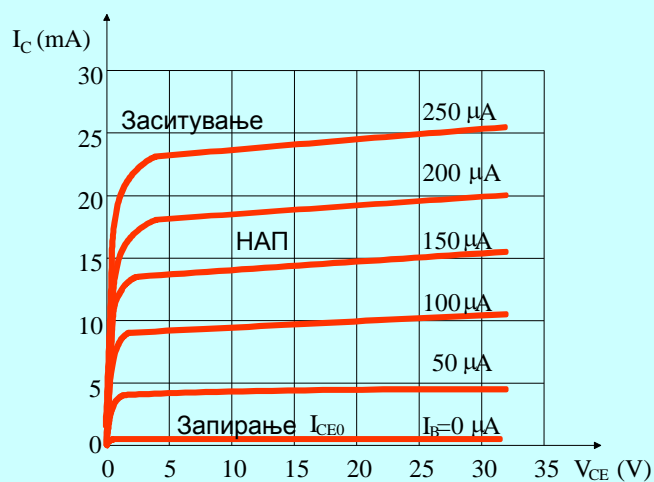
13

## Статички карактеристики на транзистор (влезни)



14

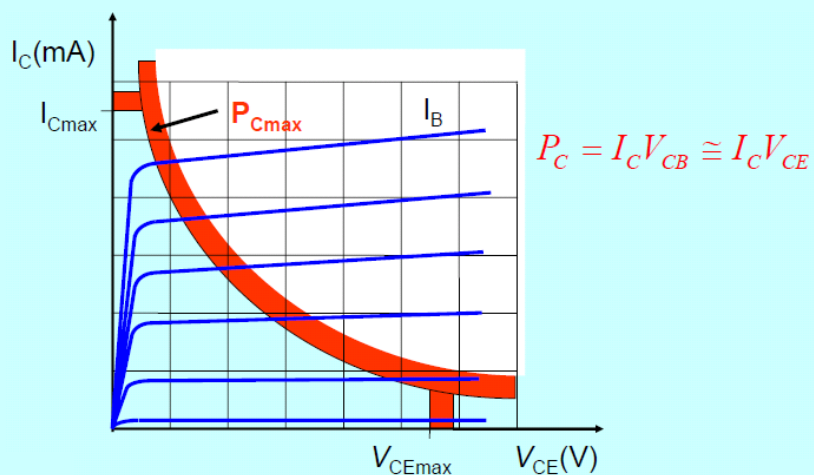
## Статички карактеристики на транзистор (излезни)



Ј.Косев, Т.Карталов, Електроника, ЗФЕИТ053018

15

## Ограничувања во работата на транзисторот



Ј.Косев, Т.Карталов, Електроника, ЗФЕИТ053018

16



- Транзистор во електрично коло

## Струјно-напонска зависност (во НАП) (повторно)

Од релацијата на Шокли за емитерскиот спој (со мали занемарувања):

$$-I_E = I_{Sn}(e^{\frac{U_{BE}}{U_T}} - 1) + I_{Sp}(e^{\frac{U_{BE}}{U_T}} - 1) = I_{SE}(e^{\frac{U_{BE}}{U_T}} - 1)$$

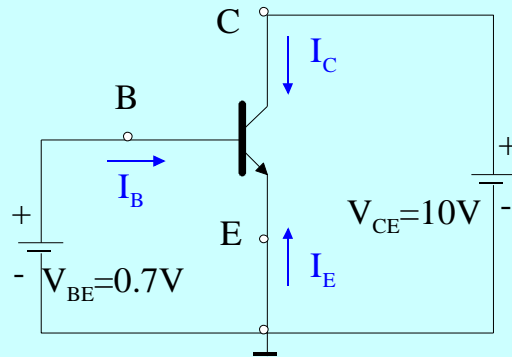
$$I_B = -I_E - I_C = \dots I_{SB}(e^{\frac{U_{BE}}{U_T}} - 1) \longleftarrow \text{Ист експоненцијален закон}$$

$$\frac{I_C}{I_B} = \frac{I_S(e^{\frac{U_{BE}}{U_T}} - 1)}{I_{SB}(e^{\frac{U_{BE}}{U_T}} - 1)} \approx \beta$$

$I_{CBO}$  : занемарливо

**!! Сооднос на две експоненцијални зависности по ист закон резултира со линеарна зависност**

## Спој со заеднички емитер

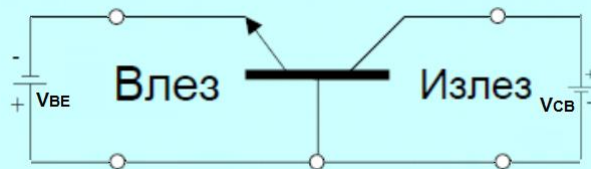


**НАПОНСКИ КОНТРОЛИРАН СТРУЕН ГЕНЕРАТОР**  
**во колекторската контура**

Ј.Косев, Т.Карталов, Електроника, ЗФЕИТ053018

19

## Спој со заедничка база

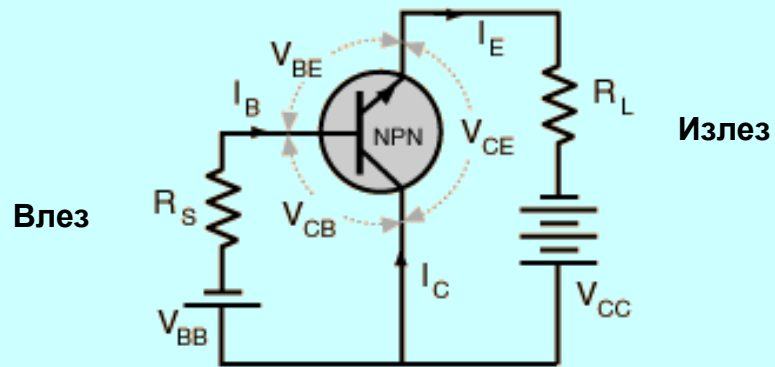


**НАПОНСКИ КОНТРОЛИРАН СТРУЕН ГЕНЕРАТОР**  
**во колекторската контура**

Ј.Косев, Т.Карталов, Електроника, ЗФЕИТ053018

20

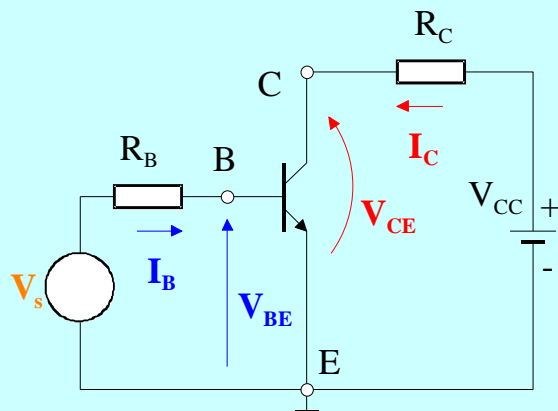
## Спој со заеднички колектор



Ј.Косев, Т.Карталов, Електроника, ЗФЕИТ053018

21

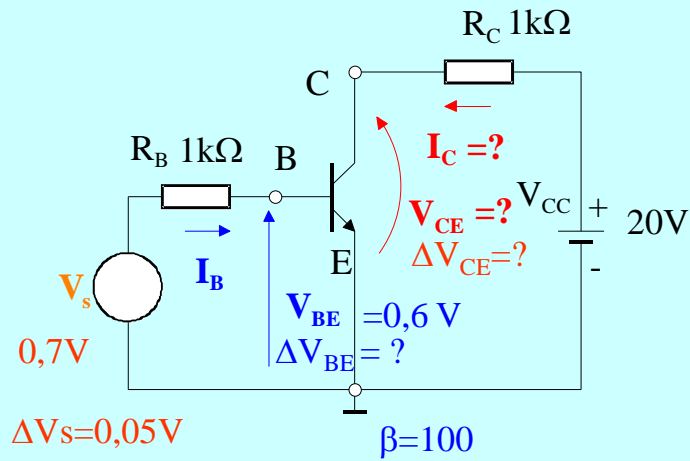
## Транзистор како засилувач



Ј.Косев, Т.Карталов, Електроника, ЗФЕИТ053018

22

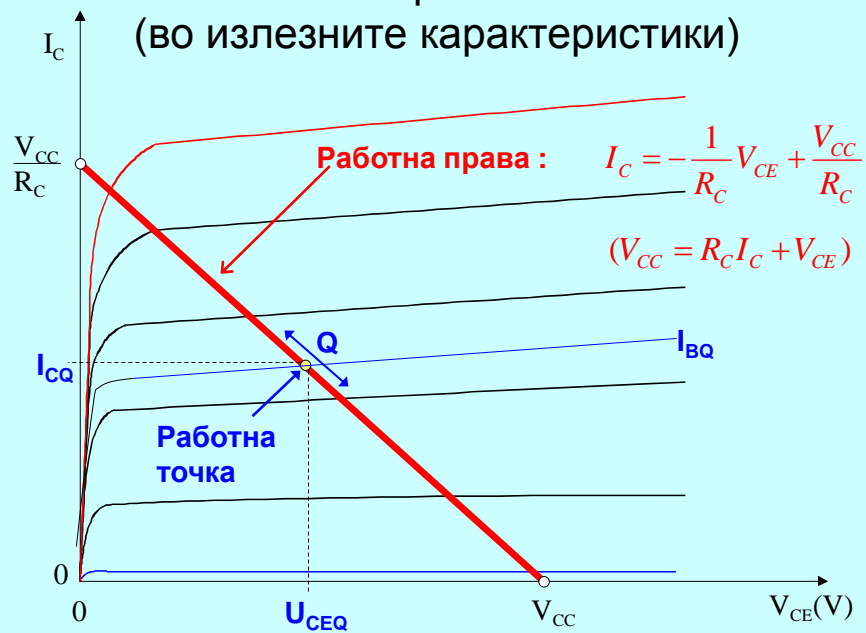
## Нумерички пример



Ј.Косев, Т.Карталов, Електроника, ЗФЕИТ053018

23

## Работна права и точка (во излезните карактеристики)



Ј.Косев, Т.Карталов, Електроника, ЗФЕИТ053018

24

## Упростен модел за мали сигнали (= мали промени на напоните и струите во НАП) (инф.)

Е-М модел генерално:

математика:

$$\left. \begin{aligned} I_C &= I_C(V_{BE}, V_{CE}) \\ I_B &= I_B(V_{BE}, V_{CE}) \end{aligned} \right\} \Rightarrow \begin{aligned} dI_C &= \left. \frac{\partial I_C}{\partial V_{BE}} \right|_Q dV_{BE} + \left. \frac{\partial I_C}{\partial V_{CE}} \right|_Q dV_{CE} \\ dI_B &= \left. \frac{\partial I_B}{\partial V_{BE}} \right|_Q dV_{BE} + \left. \frac{\partial I_B}{\partial V_{CE}} \right|_Q dV_{CE} \end{aligned}$$

Модел во НАП:

$$\left. \begin{aligned} I_C &\approx I_S e^{\frac{V_{BE}}{V_T}} \\ I_B &\approx \frac{I_S}{\beta} e^{\frac{V_{BE}}{V_T}} \end{aligned} \right\} \Rightarrow \begin{aligned} dI_C &\approx \left. \frac{I_C}{V_T} \right|_Q dV_{BE} + 0 \cdot dV_{CE} \\ dI_B &\approx \left. \frac{I_B}{V_T} \right|_Q dV_{BE} + 0 \cdot dV_{CE} \end{aligned}$$

Ј.Косев, Т.Карталов, Електроника, ЗФЕИТ053018

25

## Модел за мали сигнали (НАП)

- Мала промена на струјата/напонот:

$$dI_C \rightarrow i_c, \quad dV_{BE} \rightarrow v_{be}, \quad dI_B \rightarrow i_b \Rightarrow$$

$$dI_C \approx \left. \frac{I_C}{V_T} \right|_Q dV_{BE} \rightarrow i_c \approx g_m v_{be}$$

$$dI_B \approx \left. \frac{I_B}{V_T} \right|_Q dV_{BE} \rightarrow i_b \approx \frac{1}{r_\pi} v_{be}$$

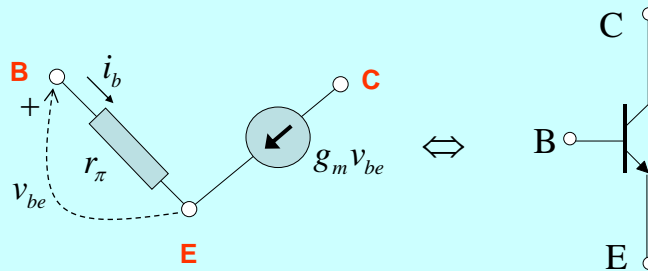
- $g_m = I_{CQ}/V_T$  @  $V_{CE} = V_{CEQ}$ : преносна проводност (транскондуктанса)
- $r_\pi = V_T/I_{BQ}$  @  $V_{CE} = V_{CEQ}$ : динамичка отпорност база-емитер

Ј.Косев, Т.Карталов, Електроника, ЗФЕИТ053018

26

## Модел за мали сигнали (НАП)

- Еквивалентна шема:



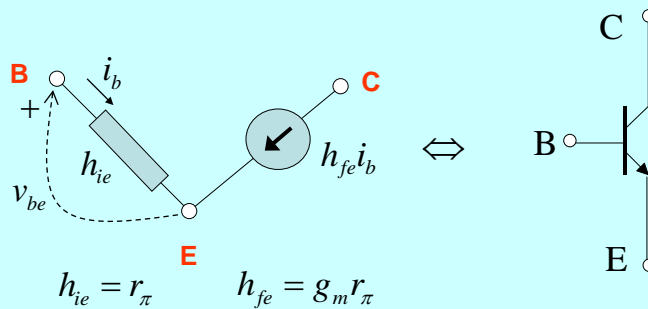
- Релации што ги поврзуваат **малите промени** на напоните и струите кај транзисторот **околу работната точка во НАП**

Ј.Косев, Т.Карталов, Електроника, ЗФЕИТ053018

27

## Модел за мали сигнали (НАП)

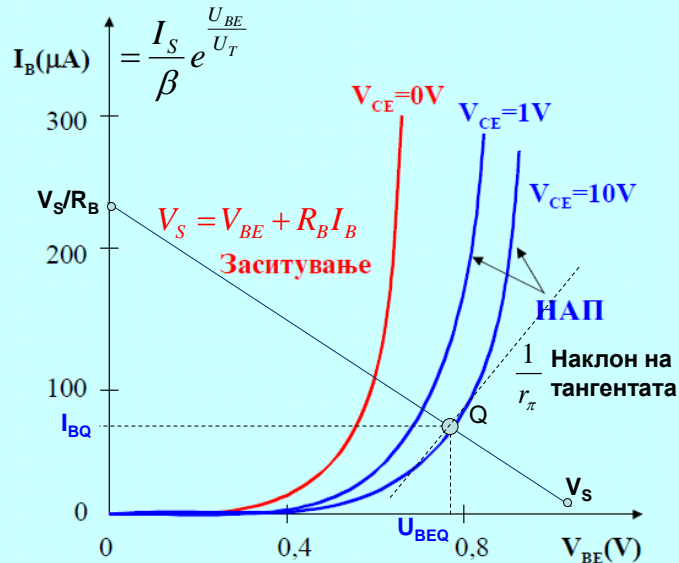
- Алтернативна еквивалентна шема:



Ј.Косев, Т.Карталов, Електроника, ЗФЕИТ053018

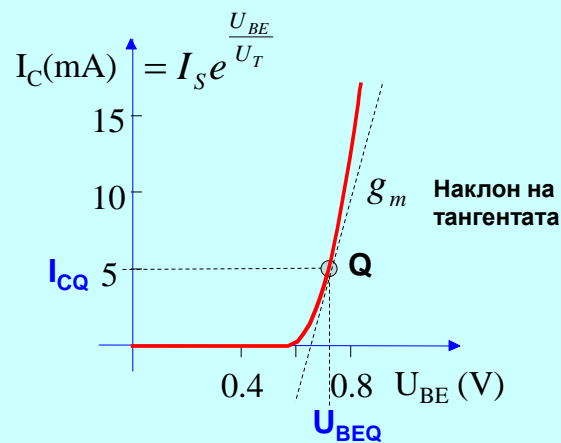
28

## Параметри за мали сигнали (влезни карактеристики)



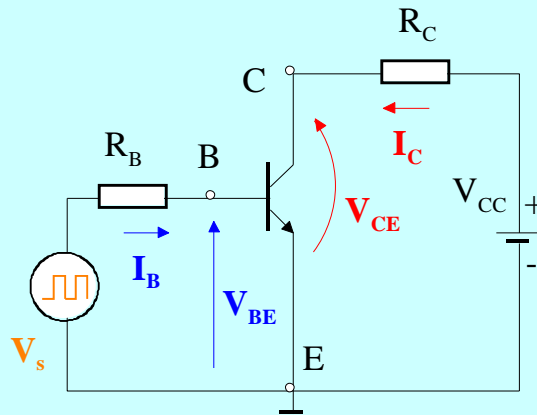
29

## Параметри за мали сигнали (преносни карактеристики)



30

## Транзистор како прекинувач



Ј.Косев, Т.Карталов, Електроника, ЗФЕИТ053018

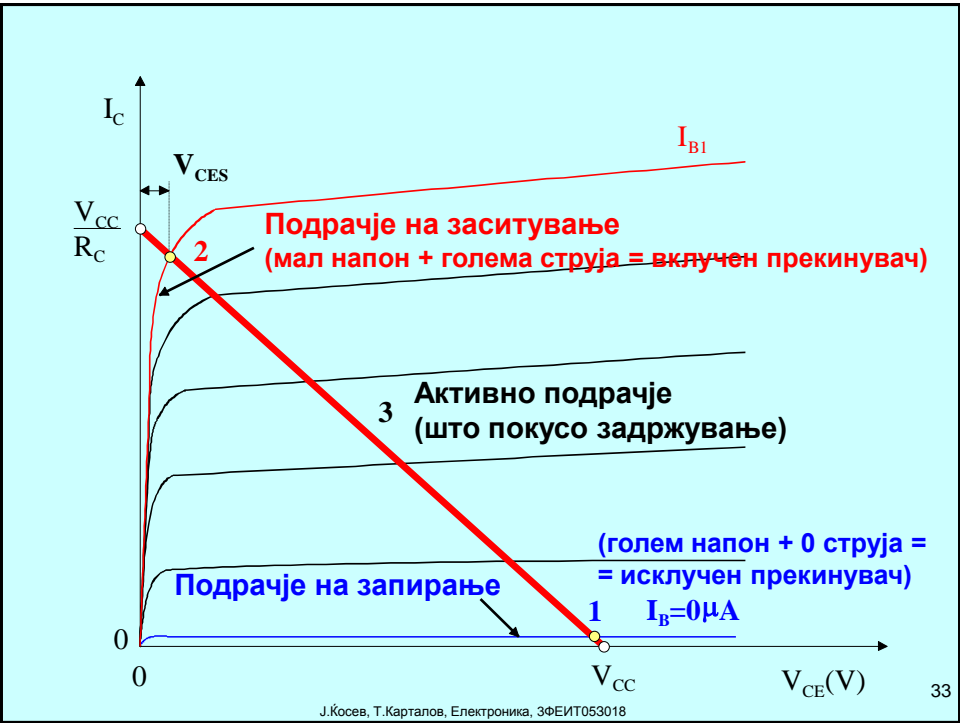
31

- Транзисторот работи во **режим на големи сигнали**.
- Од подрачје на **заситување** во подрачје на **запирање**.
- Транзисторот работи како **напонски (струјно) управувана преклопка**.

Ј.Косев, Т.Карталов, Електроника, ЗФЕИТ053018

32





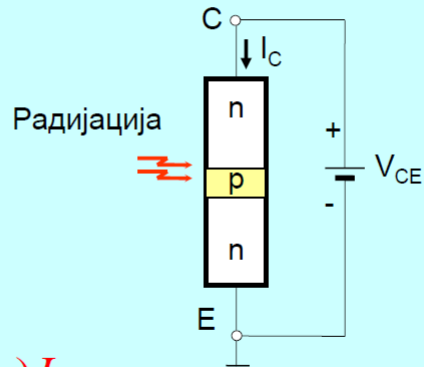
Ј.Косев, Т.Карталов, Електроника, ЗФЕИТ053018

# Модел на транзисторот за големи сигнали

	OFF	NAP	SAT
Еквивалентно коло			
Равенки	$I_B, I_C, I_E = 0$	$V_{BE} = V_{BE,ON}$ $I_C = \beta \cdot I_B$	$V_{BE} = V_{BE,ON}$ $V_{CE} = V_{CE,SAT}$
Услов кој мора да биде исполнет	$V_{BE} < V_{BE,ON}$	$V_{CE} > V_{CE,SAT}$ $I_B, I_C, I_E > 0$	$I_C < \beta \cdot I_B$ $I_B, I_C, I_E > 0$
Услов за премин кон десно		$V_{BE} = V_{BE,ON}$	$V_{CE} = V_{CE,SAT}$
Услов за премин кон лево	$I_B, I_C, I_E = 0$	$I_C = \beta \cdot I_B$	

Ј.Косев, Т.Карталов, Електроника, ЗФЕИТ053018

## 4. Фототранзистор

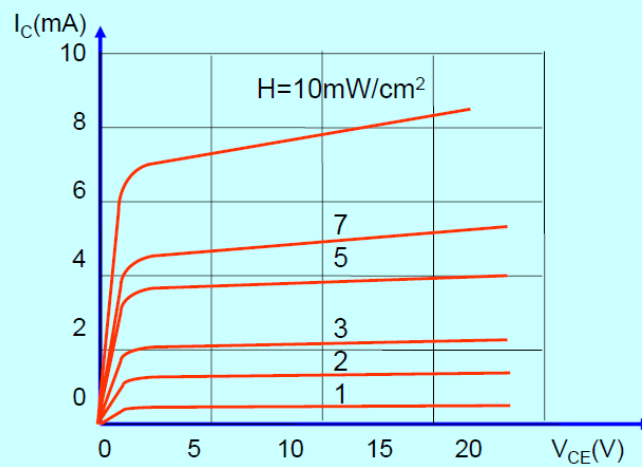


$$I_C = (1 + \beta_F) I_{CB0}$$

Ј.Косев, Т.Карталов, Електроника, ЗФЕИТ053018

35

Зрачењето делува како базна струја.

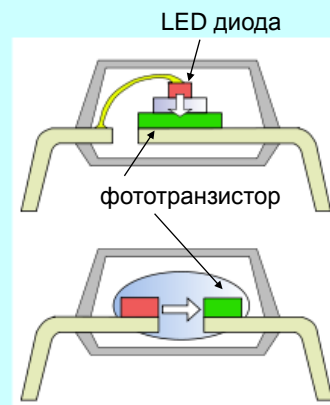
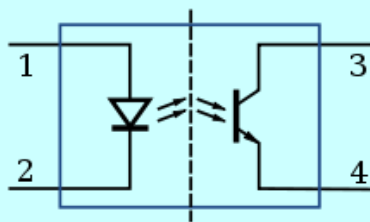


Ј.Косев, Т.Карталов, Електроника, ЗФЕИТ053018

36

## Оптокаплер / оптоизолатор (информативно)

- Овозможува пренос на сигнали со галванска изолација (при потенцијална разлика 1000-5000V)

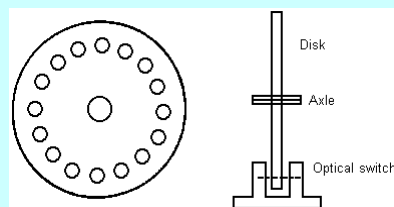
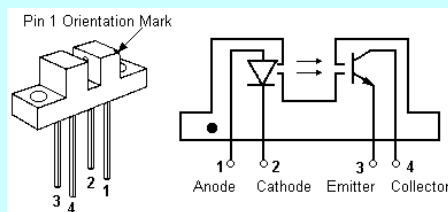


Ј.Косев, Т.Карталов, Електроника, ЗФЕИТ053018

37

## Фотодетектор (оптопрекинувач) (информативно)

- Овозможува детекција на препрека во засекот меѓу LED диодата и фототранзисторот
- Претвора брзина на вртење (на перфориран диск) во фреквенција на импулси



Ј.Косев, Т.Карталов, Електроника, ЗФЕИТ053018

38