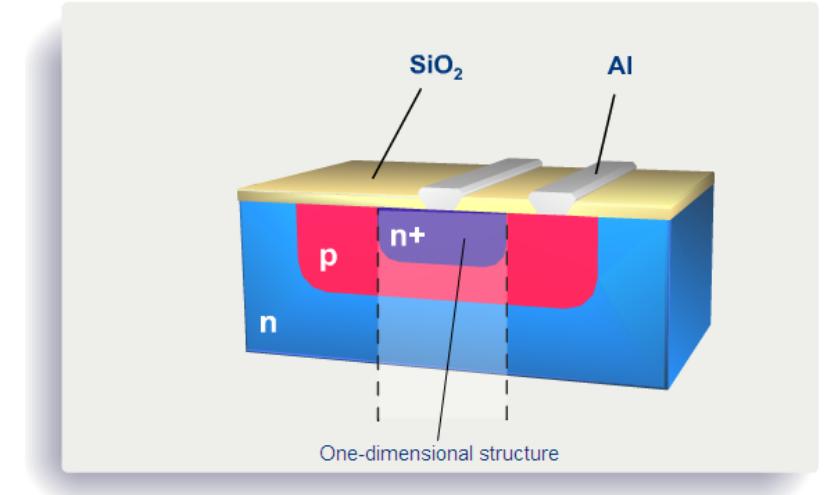
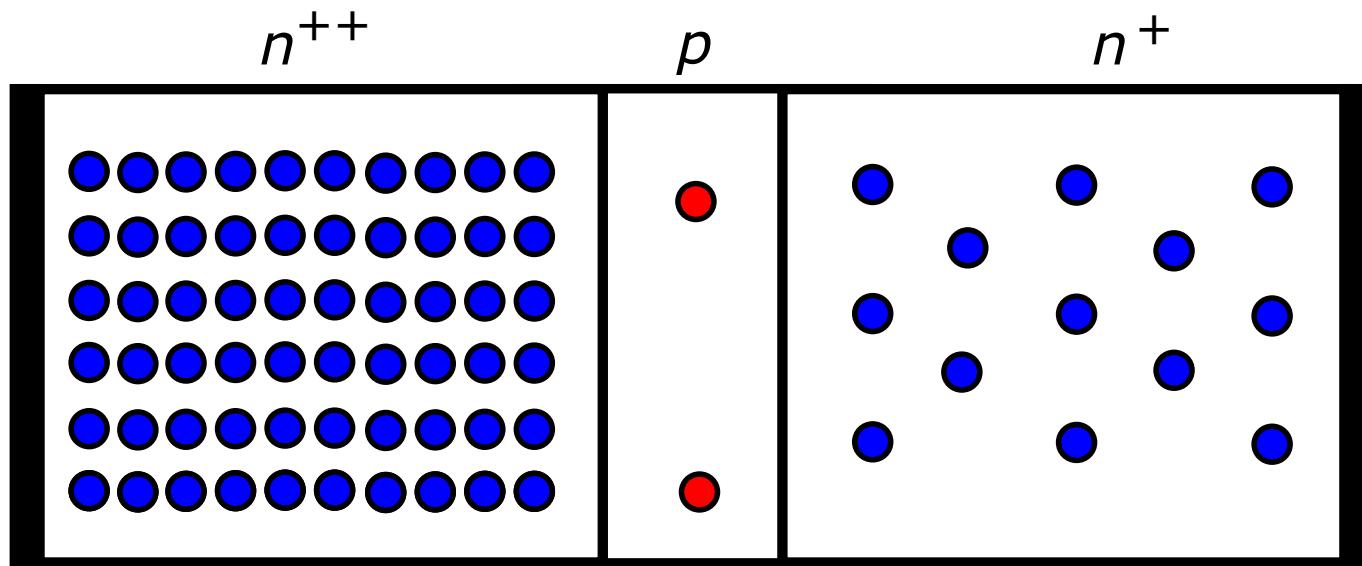




Биполярен Транзистор

структура, принцип на действие, токове, схеми на свързване

Структура на NPN биполярен транзистор

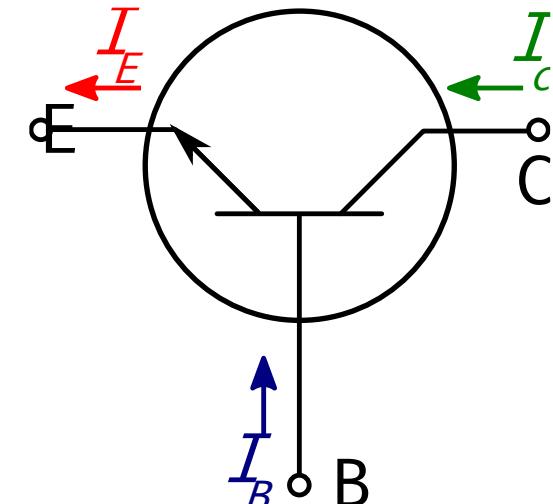
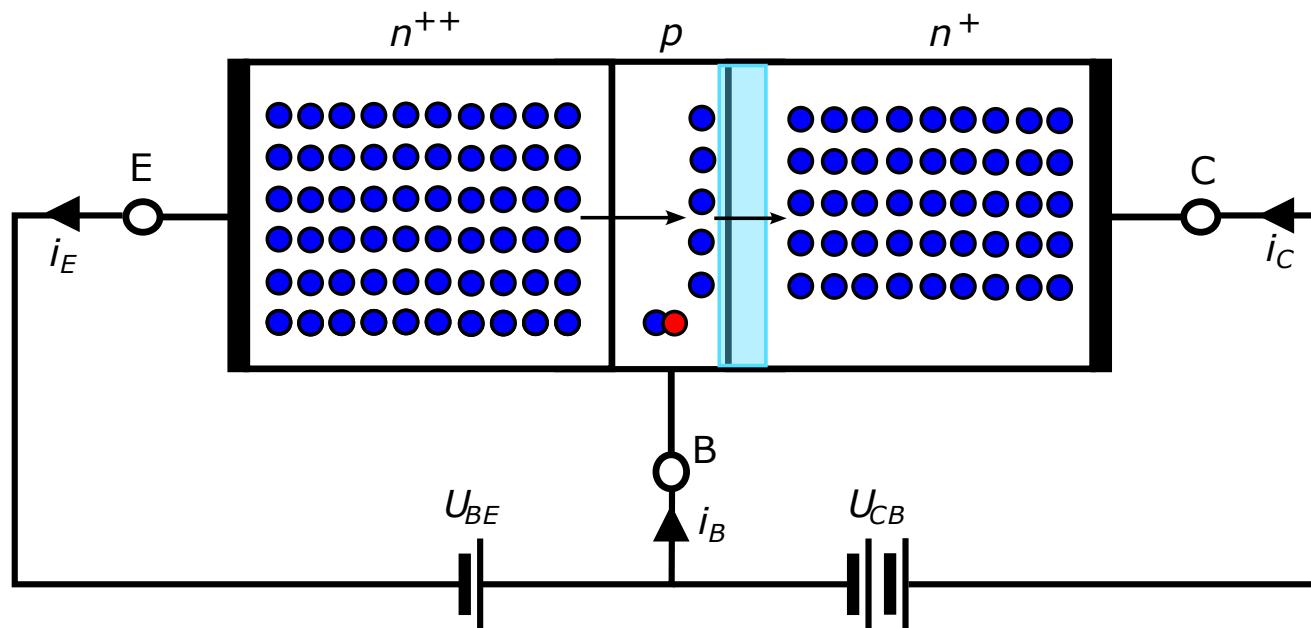


Еmiter (N): Източникът на носителите на заряд. Той е силно легиран, за да се гарантира, че има висока концентрация на електрони.

База (P): Управляващият извод. Базата е много **тънка** (от порядъка на 0,1 μm) и много **слабо легирана**. Тези две свойства са ключови за функционирането на транзистора.

Колектор (N): Неговата работа е да „събира“ носителите. Той е умерено легиран и физически е най-голямата част от транзистора, която разсейва топлината.

Транзисторът като усилвател (активен режим)

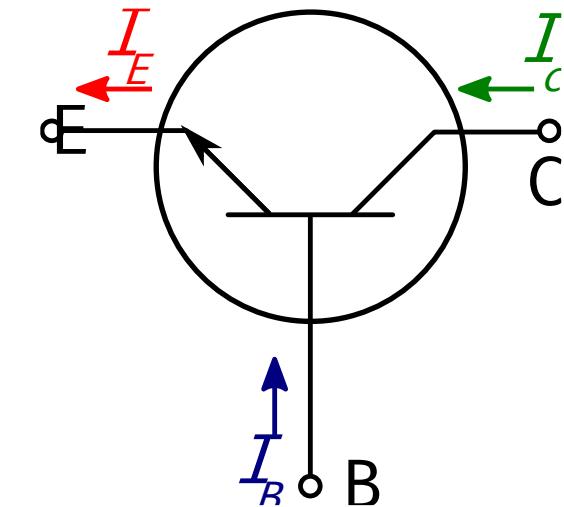
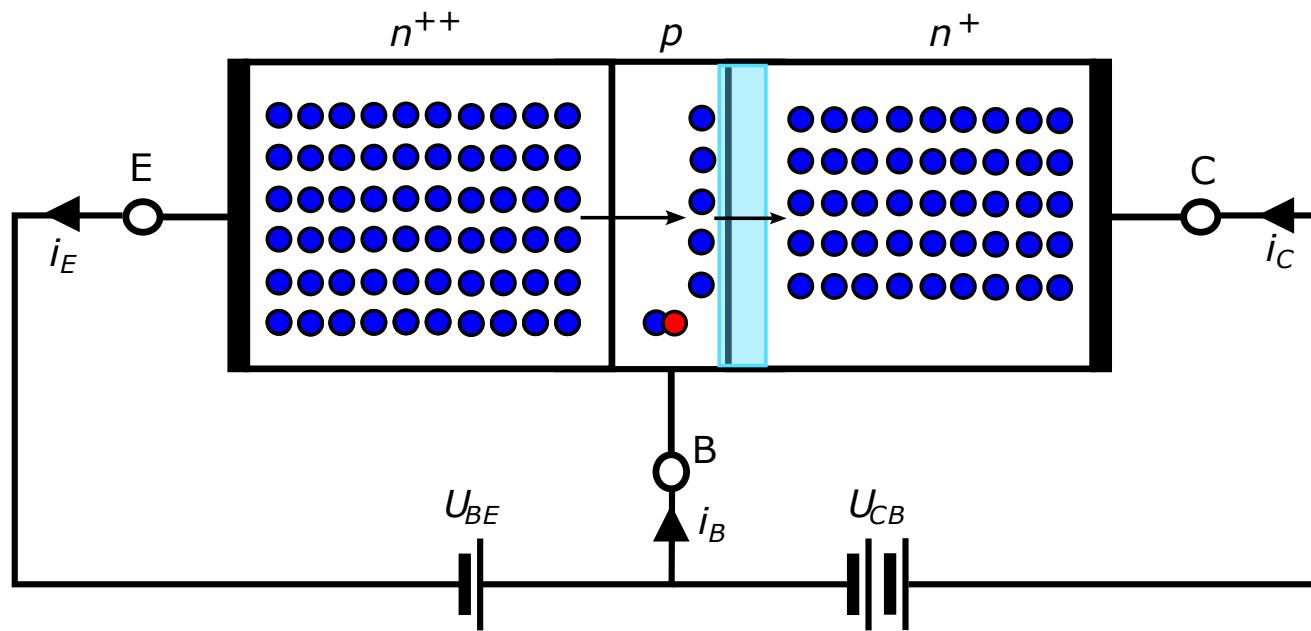


За да работи транзисторът като усилвател, PN преходът емитер-база е включен в права посока ($U_{BE} \sim 0.7V$), а преходът база-колектор – в обратна ($U_{CE} \gg U_{BE}$). Казваме, че транзисторът е в активен режим.

- Под въздействието на дифузия, масивен поток от електрони се инжектира от емитера в базата. Това формира емитерния ток (i_E).
- Тези електрони сега са неосновни носители в P-тип област. Те започват да дифундират. Тъй като базата е много тънка, около 99% от тези електрони ще достигнат успешно другата страна, преди да намерят дупка, с която да се рекомбинират.
- Веднага щом тези електрони достигнат прехода С-В, те попадат по влиянието на силното електрическо поле от обратното напрежение и веднага биват прехвърлени към колектора. Този поток от оцелели електрони формира големия колекторен ток (i_C).

Малък процент от инжектирани електрони рекомбинират с дупките в базата. За да се поддържа неутралност на заряда, базовият извод трябва да осигури нови дупки, което е същото като протичане на малък електронен ток. Това е базовият ток (i_b).

Коефициент на усилване по ток $I_C = \beta * I_B$



Големият колекторен ток е пряко следствие от действието, което причинява и малкия базов ток. I_C е пропорционален на I_B . Колекторният и базовия токове са свързани чрез най-известната зависимост за биполярния транзистор: $I_C = \beta * I_B$. Бета е коефициентът на усилване по ток, ключов параметър.

Какво контролира колекторния ток? Казваме, че биполярният транзистор «се управлява по ток», но не започнахме ли целия този процес, като приложихме напрежение U_{BE} ?

Преходът B-E е диод. Връзката между напрежението върху него (U_{BE}) и тока, протичащ през него (I_E и по-нататък I_C), е експоненциална, точно както в уравнението на диода на Шокли. Така че, по същество, малка промяна във U_{BE} (например от 0,65 V на 0,7 V) причинява експоненциално увеличение на броя на електроните, инжектирани от емитера. В този физически смисъл, биполярният транзистор е по същество контролиран от напрежение.

$$I_c = \beta * I_b$$

И така, защо казваме $I_c = \beta * I_b$?

Това е практичен инженерен модел и се използва по две причини:

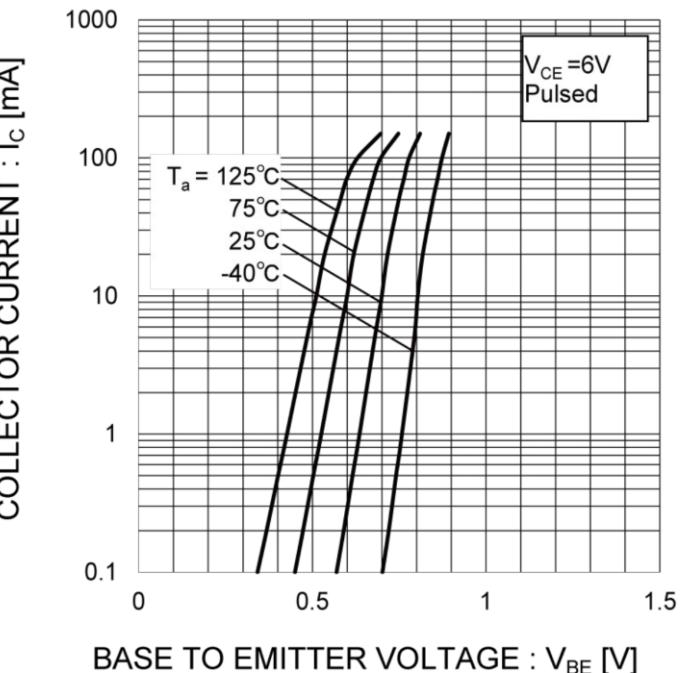
Линейност: Връзката между I_c и I_b е много линейна в широк диапазон.

Връзката между I_c и U_{BE} е силно нелинейна и експоненциална. Много по-лесно е да се проектира стабилен усилвател, използвайки линейната зависимост на тока.

Стабилност: Експоненциалната крива $I_c = f(U_{BE})$ е изключително чувствителна към температурата. Малка промяна в температурата може да причини огромна промяна в I_c за същото U_{BE} . β зависимостта е относително по-стабилна.

Мислете за това по следния начин: Малкият базов ток се формира от $\sim 1\%$ електрони, които не успяват да стигнат до колектора и рекомбинират в базата. Той е „отпадъчен продукт“ или „неблагоприятен страничен ефект“ от основния процес на инжектиране на електрони. Но тъй като този страничен ефект е пряко и линейно пропорционален на основното събитие (т.е. I_c), той прави базовият ток много по-удобен управляващ параметър при моделирането на схеми.

Ключов извод: Така че, да, физиката се определя от U_{BE} . Но инженерният модел, и този, който използваме за практическо проектиране, е $I_c = \beta * I_b$. И двете са правилни гледни точки, но ще използваме модела за управление на тока за анализ.



Откъде идва стойността на β ?

Какво определя стойността на коефициента на усилване по ток β ?

Тя се определя директно от физическата конструкция на транзистора.

Емитерен ток (I_e): Броят на електроните, инжектирани от емитера, зависи силно от концентрацията на примеси в емитера. По-високото ниво на легиране означава повече налични електрони, което води до по-висок ток за дадено U_{BE} .

Базов ток (I_b): Рекомбинационният ток в базата зависи от две неща:

- Концентрация на примесите в базата: По-високото легиране на базата означава, че има повече дупки, достъпни за рекомбинация, което би увеличило I_b .
- Ширина на базата: По-широката база означава, че електронът трябва да пътува по-далеч, което му дава повече време и възможност за рекомбинация. Това също би увеличило I_b .

Не забравяйте, че I_c е приблизително I_e , а β е I_c / I_b . За да получим много висока бета (добър усилвател), трябва да увеличим максимално I_c и да минимизираме I_b . Как да направим това?

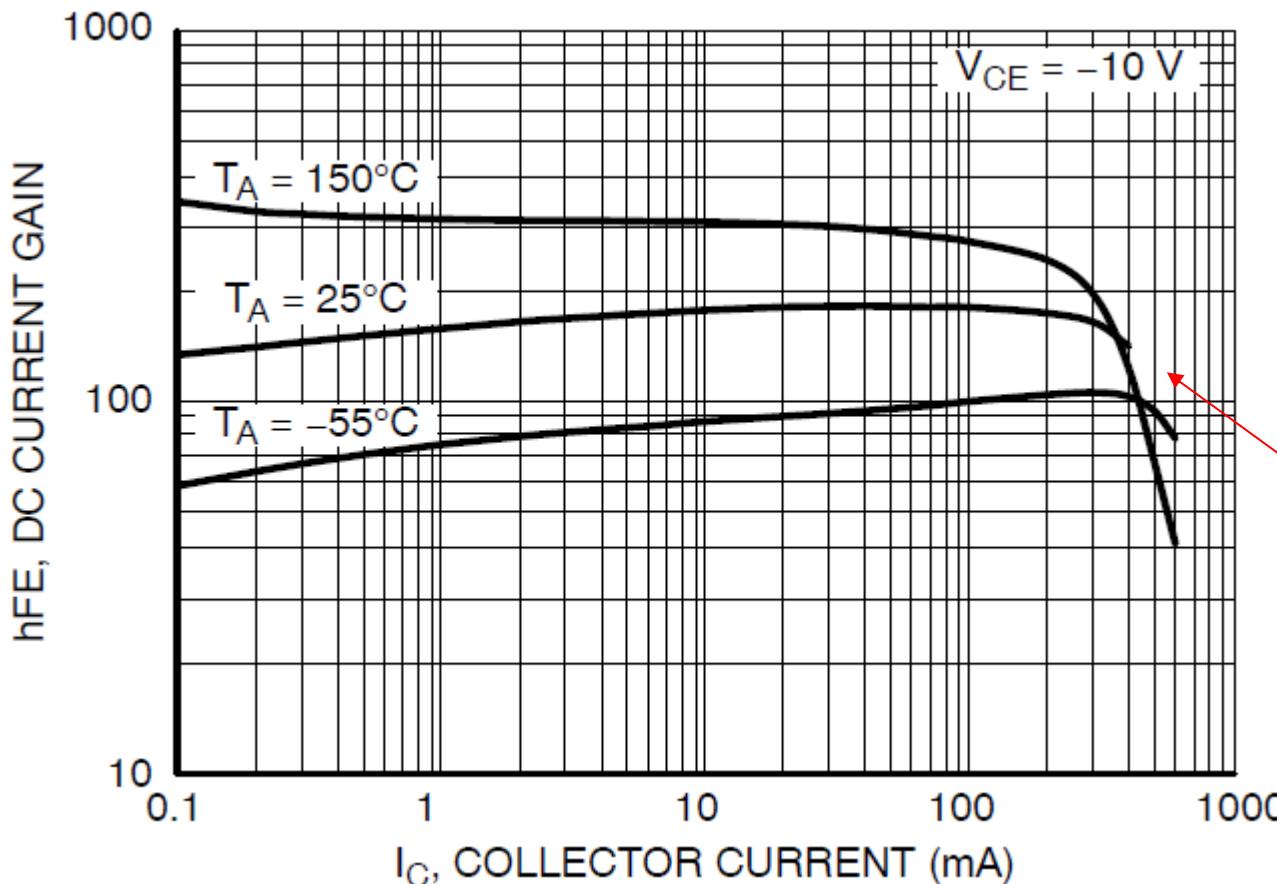
Рецептата за транзистор с висока бета:

- Силно легиране на емитера: Това осигурява массивно инжектиране на електрони.
- Много слабо легиране на базата: Това минимизира броя на дупките, достъпни за рекомбинация.
- Направете базата изключително тънка: Това минимизира времето за преминаване, като не дава възможност на електроните да се рекомбинират.

Ето защо физическото описание (силно легиран емитер, тънка, леко легирана база) е толкова важно. Именно тази физическа асиметрия придава на биполярния транзистор неговото усилващо свойство.

Коефициент на усилване по ток β (h_{FE}) в каталога

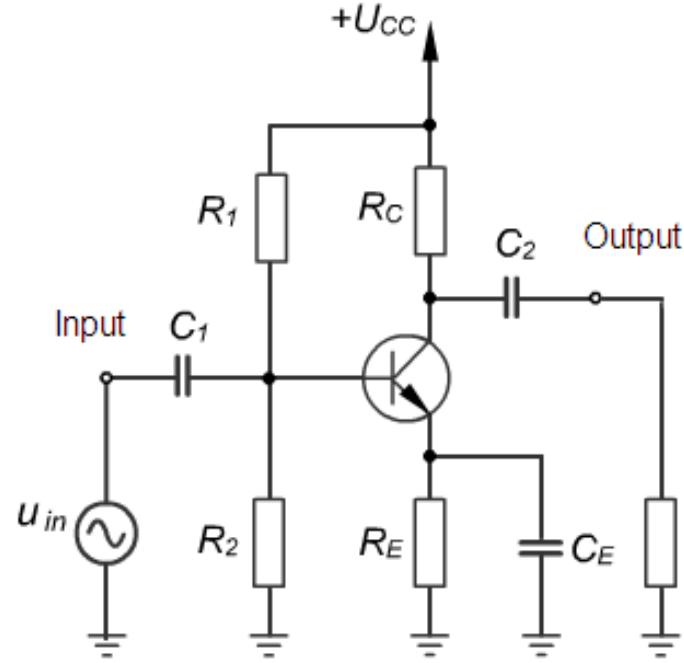
	MIN	MAX
DC Current Gain ($I_C = -0.1 \text{ mA}_{dc}$, $V_{CE} = -10 \text{ V}_{dc}$)	h_{FE}	75
($I_C = -1.0 \text{ mA}_{dc}$, $V_{CE} = -10 \text{ V}_{dc}$)		100
($I_C = -10 \text{ mA}_{dc}$, $V_{CE} = -10 \text{ V}_{dc}$)		100
($I_C = -150 \text{ mA}_{dc}$, $V_{CE} = -10 \text{ V}_{dc}$) (Note 1)		100
($I_C = -500 \text{ mA}_{dc}$, $V_{CE} = -10 \text{ V}_{dc}$) (Note 1)		300
	50	-



Коефициентът на усилване по ток β се променя в широки граници при изменение на колекторния ток, температурата и при смяна на транзистора.

Kirk effect

Схеми на включване – Общ емитер



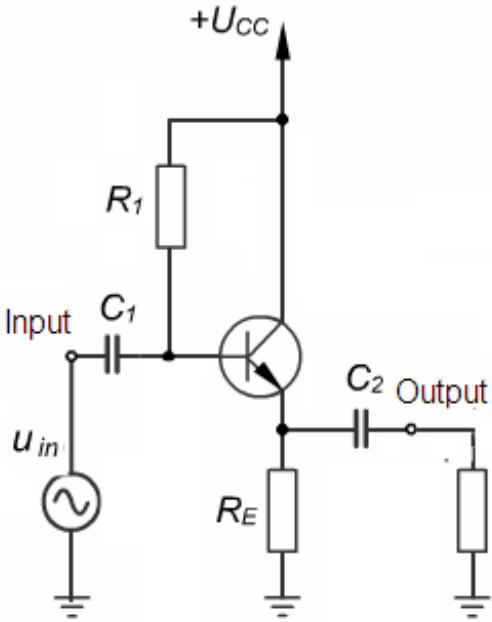
Общ емитер (CE):

Вход: Подаден към базата.

Изход: Взет от колектора.

Това е най-популярната конфигурация. Тя ви дава добро усилване по ток и добро усилване по напрежение. Това е най-универсалният усилвател.

Схеми на включване – Общ колектор



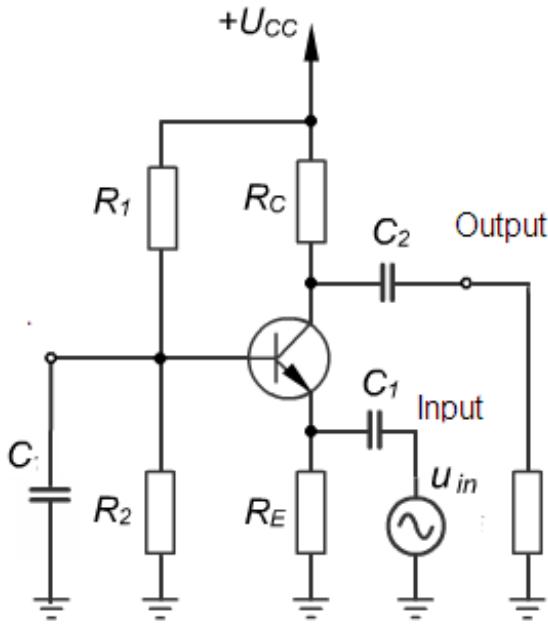
Общ колектор (СС):

Вход: Подаден към базата.

Изход: Взет от емитера.

Известен още като „емитерен повторител“. Той има коефициент на усилване по напрежение от почти единица (т.е. не усилва по напрежение), но има много висок коефициент на усилване по ток. Основната му цел е да действа като буфер, осигурявайки висок входен импеданс и нисък изходен импеданс.

Схеми на включване – Обща база



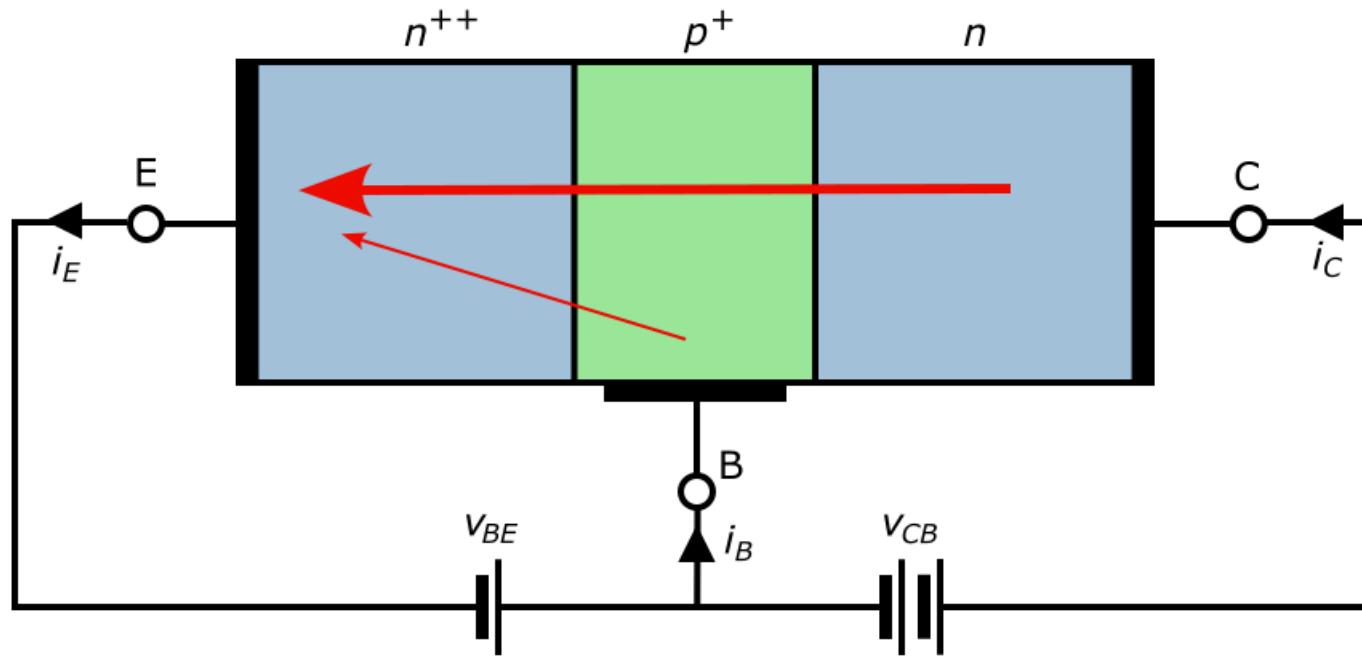
Обща база (СВ):

Вход: Подаден към емитера.

Изход: Взет от колектора.

Тази конфигурация няма коефициент на усилване по ток (кофициентът на усилване по ток е малко по-малък от 1), но може да има много висок коефициент на усилване по напрежение. Използва се във високочестотни приложения, като RF усилватели, тъй като не страда от определени високочестотни ограничения на СЕ конфигурацията.

Токове в транзистора – връзка между колекторен и емитерен ток



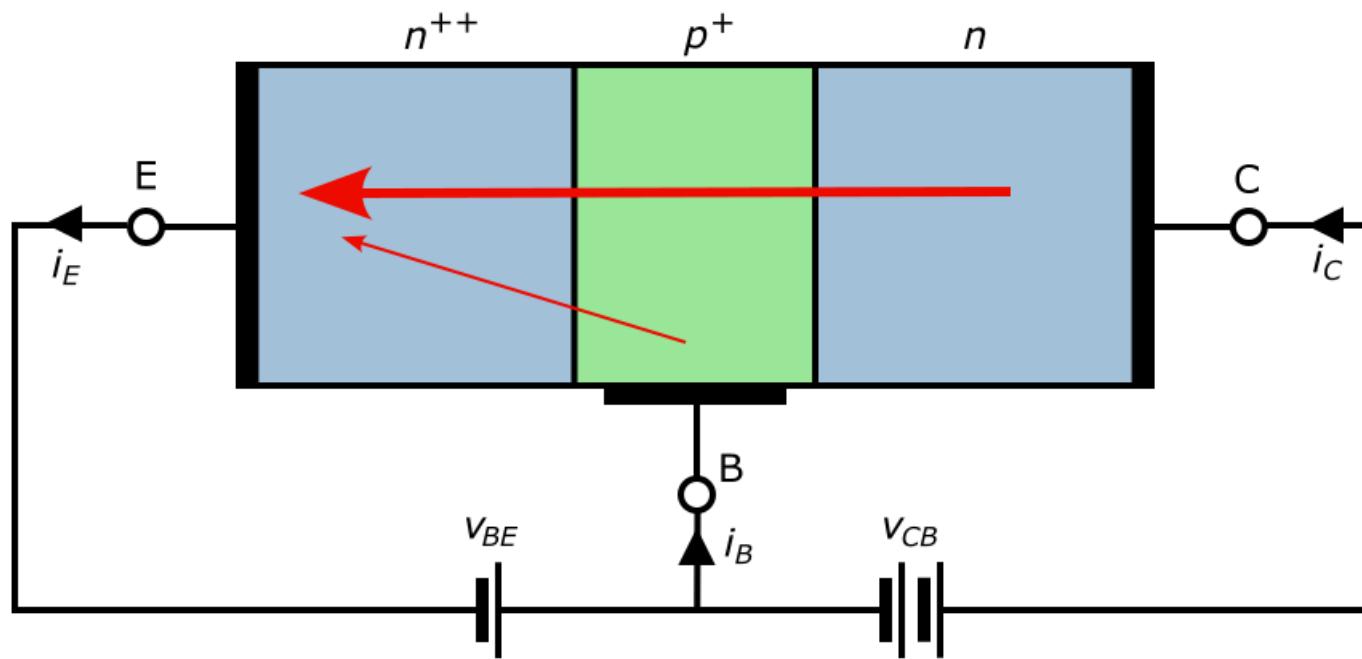
$$I_E = I_C + I_B$$

$$I_C = \alpha I_E$$

$$\alpha \sim 0,99$$

α - коефициент на усилване по ток в схема обща база

Токове в транзистора – връзка между колекторен и базов ток



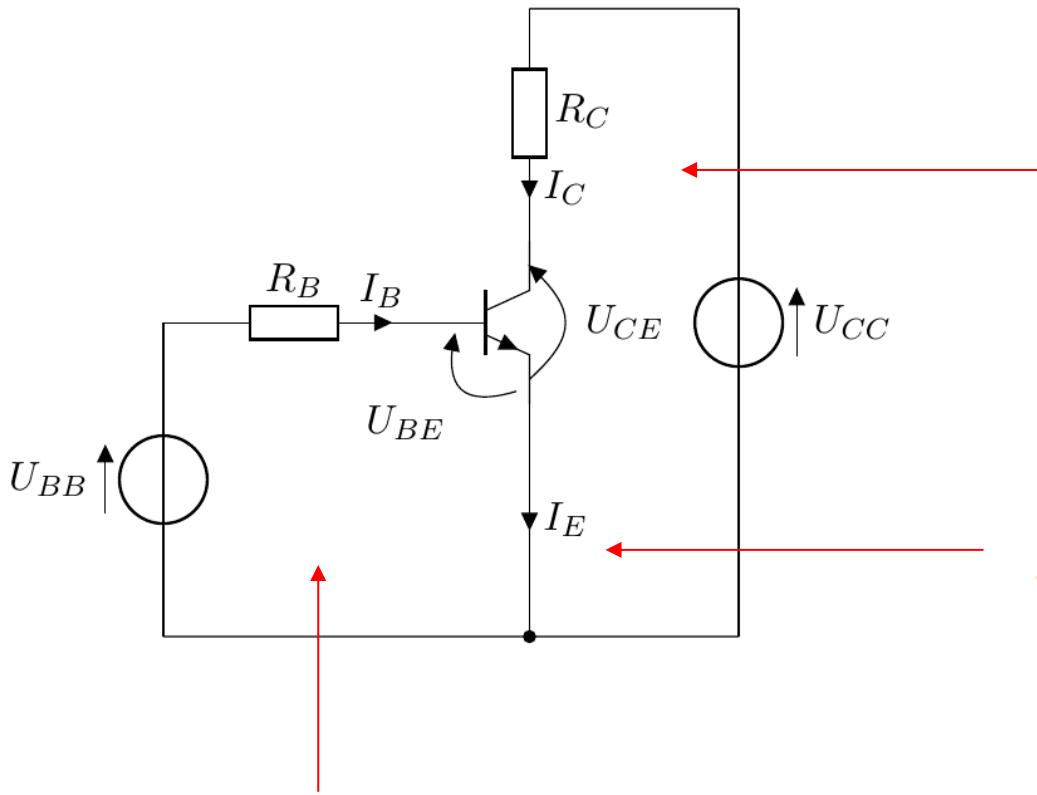
$$I_E = I_C + I_B$$

$$I_C = \alpha I_E = \alpha I_C + \alpha I_B = \frac{\alpha}{1-\alpha} I_B = \beta I_B$$

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

Задачи

Постоянно-токов режим – схема общ емитер



$$U_{CE} = U_{CC} - I_C R_C \quad \text{KVL}$$

$$I_C = \frac{U_{CC} - U_{CE}}{R_C} \quad \text{Ohm Law}$$

$$I_E = I_C + I_B \quad \text{KCL}$$

$$U_{BE} = U_{BB} - I_B R_B \quad \text{KVL}$$

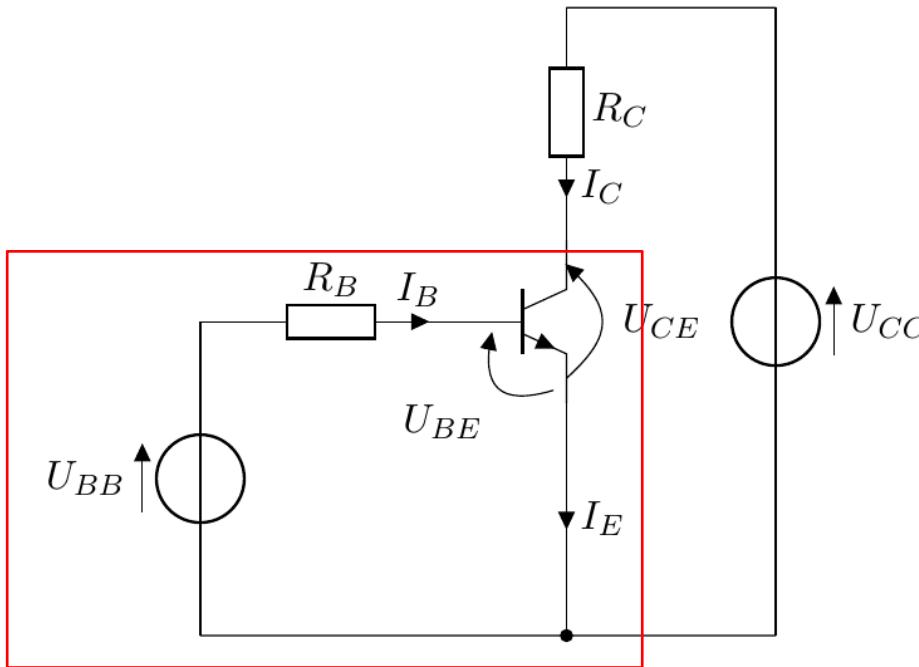
$$I_B = \frac{U_{BB} - U_{BE}}{R_B} \quad \text{Ohm Law}$$

Примери

$$U_{BB} = 5V$$

$$R_B = 100k\Omega$$

$$I_B = ?$$



$$U_{BE} = U_{BB} - I_B R_B \quad \text{KVL}$$

$$I_B = \frac{U_{BB} - U_{BE}}{R_B} \quad \text{Ohm Law}$$

$$\begin{aligned} I_B &= \frac{U_{BB} - U_{BE}}{R_B} \\ &= \frac{5V - 0,7V}{100k\Omega} \\ &= 4,3V \cdot 1 \times 10^{-5}A = 43\mu A \end{aligned}$$

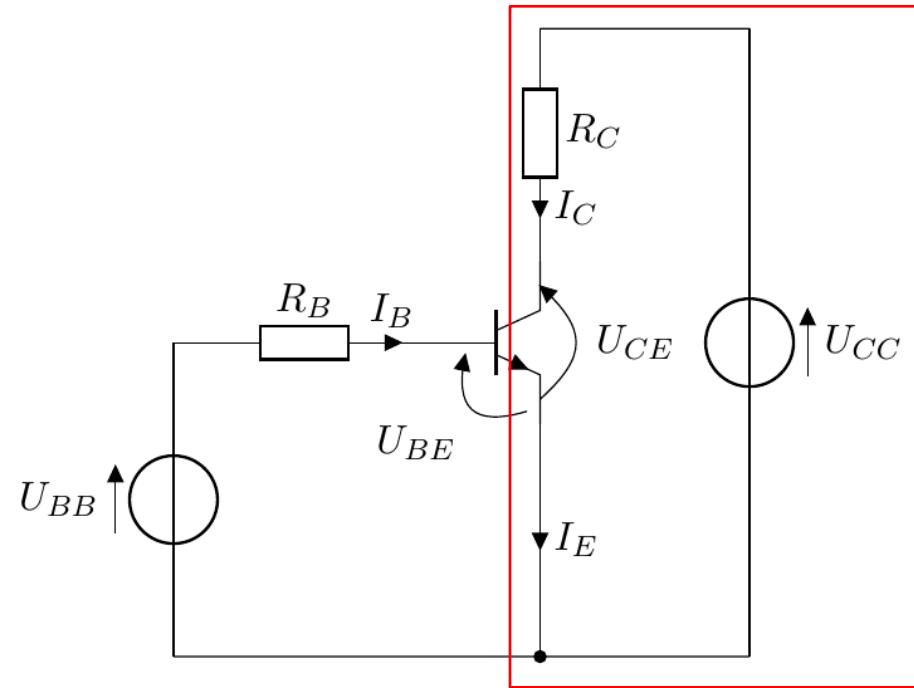
Примери

$$U_{CC} = 12V$$

$$R_C = 3k\Omega$$

$$I_C = 1mA$$

$$U_{CE} = ?$$



$$\begin{aligned}U_{CE} &= U_{CC} - I_C R_C \\&= 12V - 1mA \cdot 3k\Omega \\&= 12V - 1 \times 10^{-3}A \cdot 3 \times 10^3\Omega \\&= 12V - 3V = 9V\end{aligned}$$

Примери

$$U_{CC} = 12V$$

$$R_C = 1,5k\Omega$$

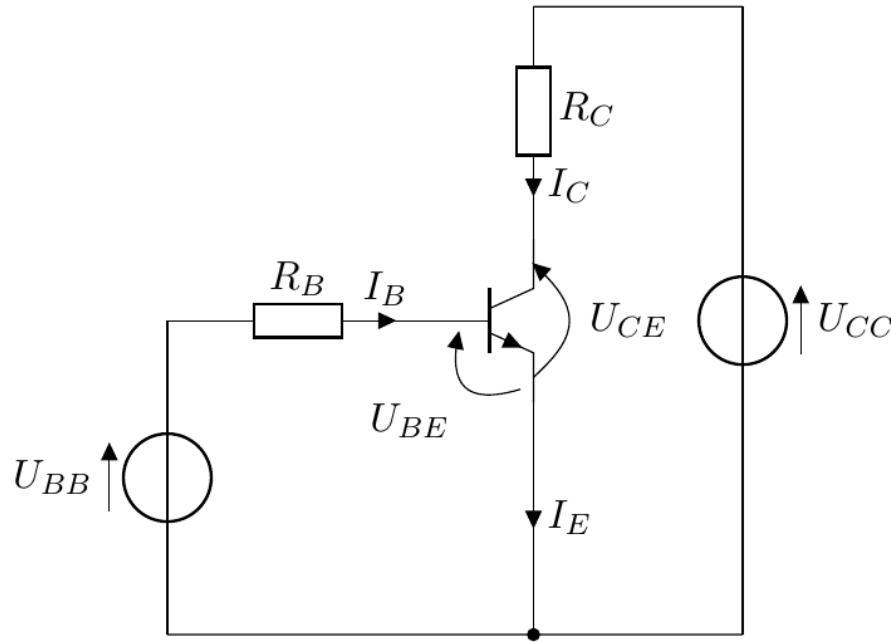
$$R_B = 330k\Omega$$

$$I_B = 25\mu A$$

$$\beta = 200$$

$$U_{CE} = ?$$

$$P_C = ?$$



$$U_{CE} = U_{CC} - I_C R_C \quad \text{KVL}$$

$$P_C = U_{CE} \cdot I_C$$

$$\begin{aligned} I_C &= \beta \cdot I_B \\ &= 200 \cdot 25 \times 10^{-6} A \\ &= 5000 \times 10^{-6} A \\ &= 5 \times 10^{-3} A = 5mA \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} U_{CE} &= 12V - 5 \times 10^{-3} A \cdot 1,5 \times 10^3 \Omega \\ &= 12V - 7,5V = 4,5V \end{aligned}$$

$$P_C = 4,5V \cdot 5mA = 22,5mW$$