

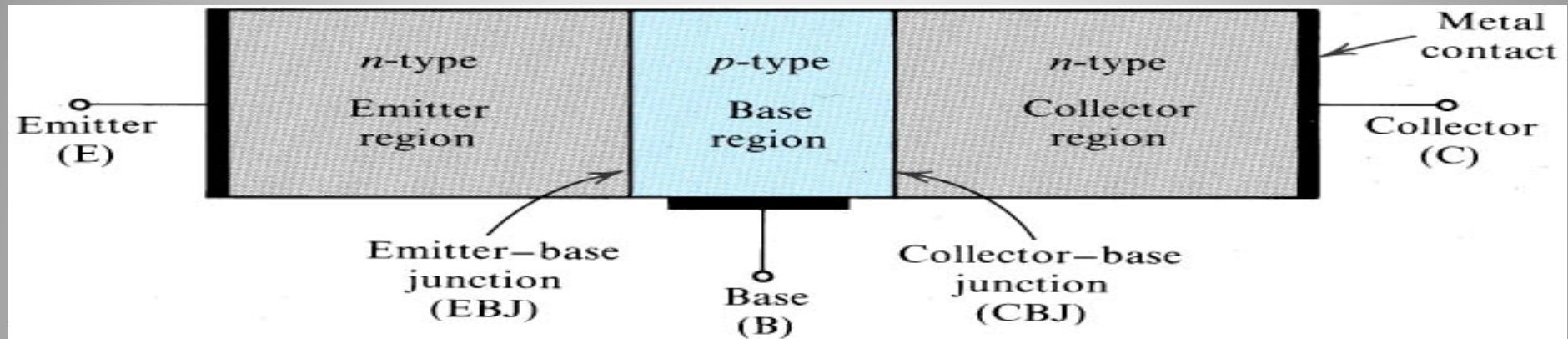
ELEKTRONIKA DASAR

Pertemuan Ke-4
Bipolar Junction Transistor (BJT)

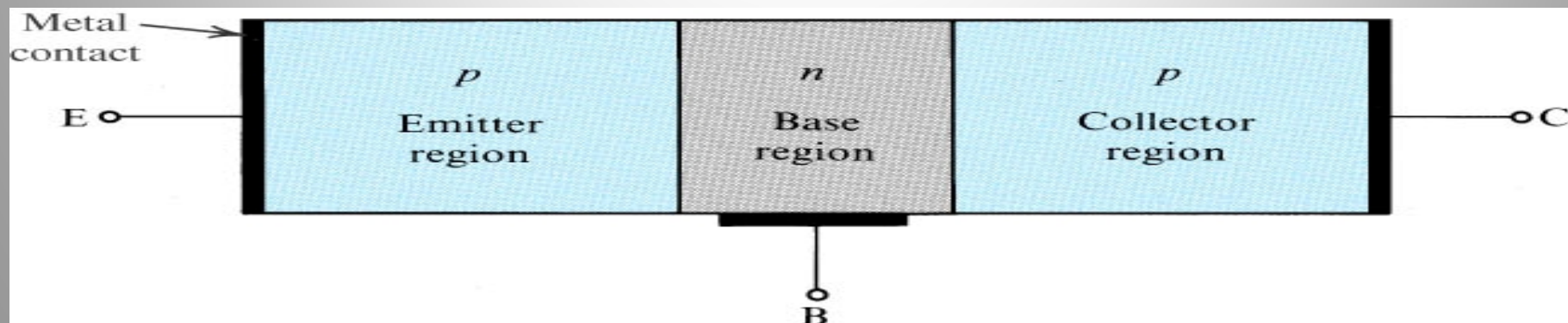
ALFITH, S.Pd,M.Pd

Struktur divais dan cara kerja fisik

Struktur yang Disederhanakan dan Mode Operasi



Gambar 1. Struktur sederhana transistor *npn*

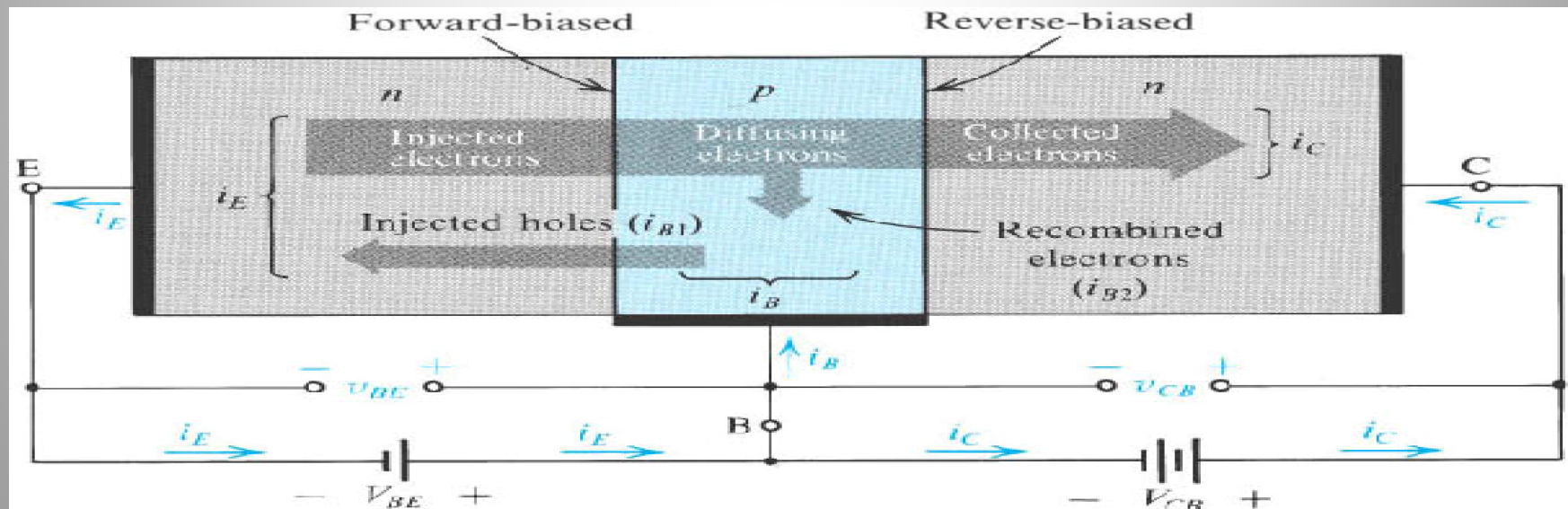


Gambar 2. Struktur sederhana transistor *pnp*

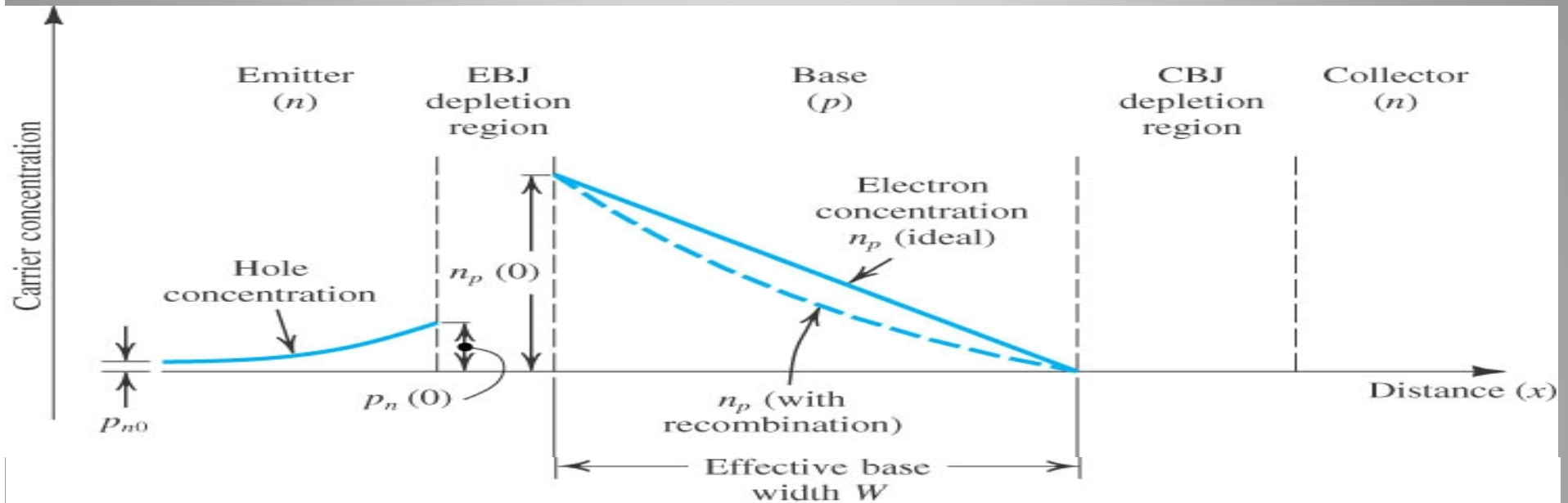
Mode kerja BJT

Mode	EBJ	CBJ
Cutoff	Reverse	Reverse
Active	Forward	Reverse
Reverse Active	Reverse	Forward
Saturation	Forward	Forward

Cara Kerja Transistor npn Pada Mode Aktif



Gambar 3: Aliran arus pada transistor npn pada mode aktif



Gambar 4: Profil pembawa muatan minoritas pada base dan emitter pada transistor npn yang bekerja pada mode aktif.

$$n_p(0) = n_{p0} e^{V_{BE} / V_T}$$

$n_p(0)$ = konsentrasi pembawa muatan minoritas (elektron) pada base

V_{BE} = tegangan forward bias base-emitter

V_T = tegangan termal $\rightarrow$ 25 mV pada suhu ruangan.

Pengurangan pembawa muatan minoritas menyebabkan elektron yang disuntikkan ke base akan merembas melalui base ke collector. Arus elektron ini sebanding dengan koefisien arah dari profil konsentrasi

$$I_n = A_E q D_n \frac{dn_p(x)}{dx}$$

$$= A_E q D_n \left(- \frac{n_p(0)}{W} \right)$$

A_E = luas penampang base-emitter junction

q = muatan elektron

D_n = kemampuan difusi elektron pada base

W = lebar efektif base

Tanda (-) menunjukkan bahwa arah arus I_n adalah dari kanan ke kiri (arah x negatif).

$$i_C = I_S e^{V_{BE} / V_T}$$

Arus Collector $I_C = A_E q D_n n_{p0} / W$

$$n_{p0} = n_i^2 / N_A$$

$$I_S = \frac{A_E q D_n n_i^2}{N_A W}$$

n_i = kerapatan pembawa instrinsik

N_A = konsentrasi doping pada base

Perhatikan: arus i_C tidak tergantung dari v_{CB} .

Arus jenuh I_S berbanding terbalik dengan lebar base W . I_S sebanding dengan luas penampang EBJ $\rightarrow$ scale current.

I_S mempunyai harga antara 10^{-18} A sampai 10^{-12} A.

I_S sebanding dengan n_i^2 yang merupakan fungsi suhu, kira-kira menjadi dua kali setiap kenaikan suhu 5°C

Arus Base

Terdiri dari i_{B1} yang disebabkan oleh holes yang disuntikkan dari base ke emitter dan i_{B2} yang disebabkan oleh holes yang dicatu dari rangkaian luar untuk menggantikan holes yang hilang akibat proses rekombinasi

$$i_{B1} = \frac{A_E q D_p n_i^2}{N_D L_p} e^{V_{BE} / V_T}$$

D_p = kemampuan difusi holes di emitter

L_p = panjang difusi holes di emitter

N_D = konsentrasi doping di emitter

$$i_{B2} = \frac{Q_n}{\tau_b}$$

τ_b = waktu rata-rata bagi sebuah elektron (minoritas) ber-rekombinasi dengan sebuah holes (mayoritas) di base. (disebut minority-carrier lifetime)
 Q_n = muatan pembawa minoritas yang ber-rekombinasi dengan holes pada waktu τ_b

Pada gambar (4) Q_n digambarkan dengan luas segitiga di bawah distribusi garis lurus pada base.

$$Q_n = A_E q \times \frac{1}{2} n_p(0) W$$

$$Q_n = \frac{A_E q W n_i^2}{2 N_A} e^{V_{BE} / V_T}$$

$$i_{B2} = \frac{1}{2} \frac{A_E q W n_i^2}{\tau_b N_A} e^{V_{BE} / V_T}$$

$$i_B = I_S \left(\frac{D_p}{D_n} \frac{N_A}{N_D} \frac{W}{L_p} + \frac{1}{2} \frac{W^2}{D_n \tau_b} \right) e^{V_{BE} / V_T}$$

$$i_B = \frac{i_C}{\beta}$$

$$i_B = \left(\frac{I_S}{\beta} \right) e^{V_{BE} / V_T}$$

$$\beta = 1 / \left(\frac{D_p}{D_n} \frac{N_A}{N_D} \frac{W}{L_p} + \frac{1}{2} \frac{W^2}{D_n \tau_b} \right)$$

β adalah suatu konstanta untuk transistor tertentu.

Untuk transistor *npn*, harga β berkisar antara 50 – 200. Untuk divais khusus β bisa mencapai 1000.

β disebut penguatan arus common-emitter.

β dipengaruhi oleh: lebar dari daerah base, W , dan perbandingan doping daerah base dan daerah emitter (N_A/N_D).

$$\begin{aligned} \text{Arus Emitter} \quad i_E &= i_C + i_B \\ i_E &= \frac{\beta + 1}{\beta} i_C \\ i_E &= \frac{\beta + 1}{\beta} I_S e^{V_{BE} / V_T} \\ i_C &= \alpha i_E \\ \alpha &= \frac{\beta}{\beta + 1} \\ i_E &= (I_S / \alpha) e^{V_{BE} / V_T} \\ \beta &= \frac{\alpha}{1 - \alpha} \end{aligned}$$

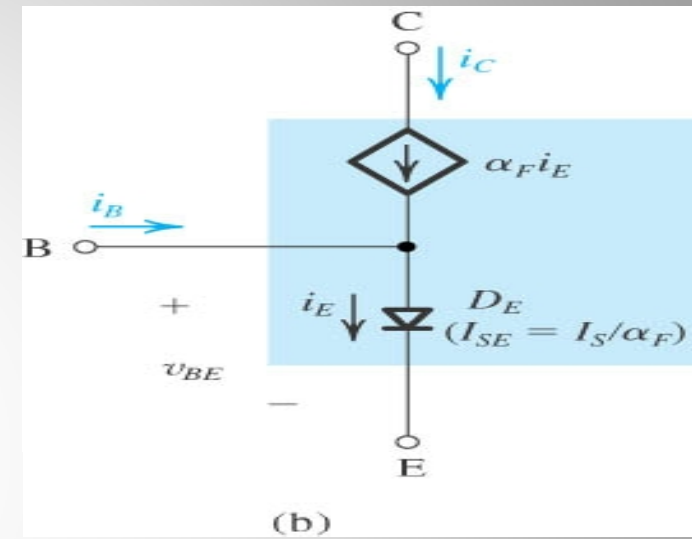
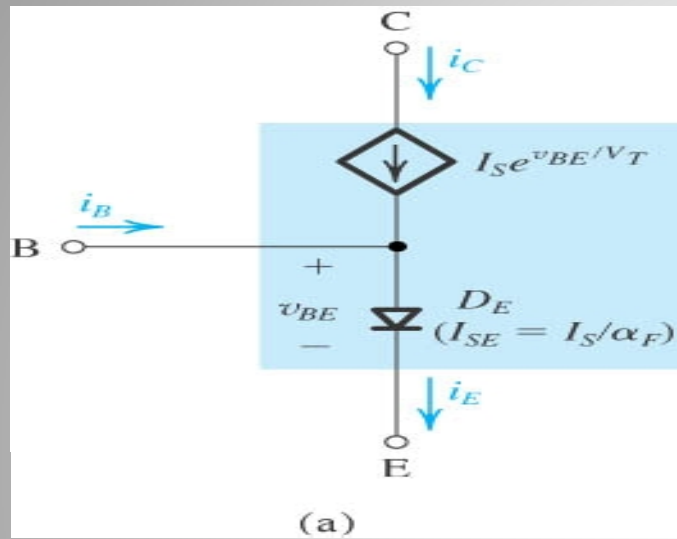
$$\alpha \approx 1$$

Perubahan yang kecil pada α menyebabkan perubahan yang besar pada β .
 α disebut penguatan arus common-base.

Karena α dan β menunjukkan karakteristik transistor yang bekerja pada mode 'forward active', kadang dituliskan sebagai α_F dan β_F .

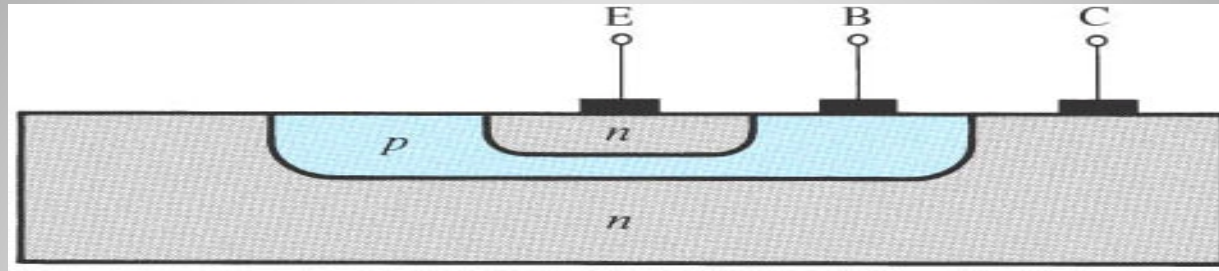
Rekapitulasi dan Model Rangkaian Pengganti

- Tegangan forward bias v_{BE} menyebabkan arus i_C mengalir ke collector mempunyai hubungan eksponensial.
- Arus i_C tidak tergantung dari tegangan v_{CB} selama CBJ reverse bias, $v_{CB} \geq 0$
- Pada mode aktif, collector berkelakuan seperti sebuah sumber arus ideal yang konstan di mana harga arus ditentukan oleh v_{BE} .
- $i_B = 1/\beta_F \times i_C$
- $i_E = i_B + i_C$
- Karena $i_B \ll i_C \rightarrow i_E \approx i_C$
- $i_E = \alpha_F \times i_C$
- $\alpha_F \approx 1$



Gambar 5: Model rangkaian pengganti sinyal besar untuk BJT *npn* yang bekerja pada mode forward active.

Struktur Transistor

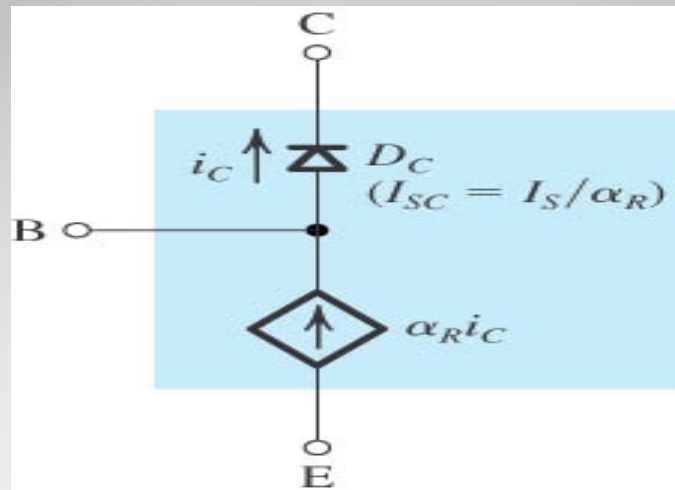


Gambar 6. Tampak melintang sebuah BJT jenis *npn*

Collector mengelilingi emitter sehingga sulit untuk elektron yang disuntikkan ke base yang tipis untuk tidak terkumpul pada collector $\rightarrow \alpha_F \approx 1$ dan β_F besar.

Divais tidak simetris berarti jika collector dan emitter ditukar dan transistor bekerja pada mode *reverse active*, $\alpha = \alpha_R$ dan $\beta = \beta_R$ yang mempunyai harga yang berbeda dengan α_F dan β_F .

Karena divais dirancang untuk bekerja optimum pada mode forward active, $\alpha_R \ll \alpha_F$ dan $\beta_R \ll \beta_F$
 α_R berkisar antara 0,01 – 0,5 dan β_R berkisar antara 0,01 – 1.



Gambar 7: Model transistor *npn* yang bekerja pada mode reverse active.

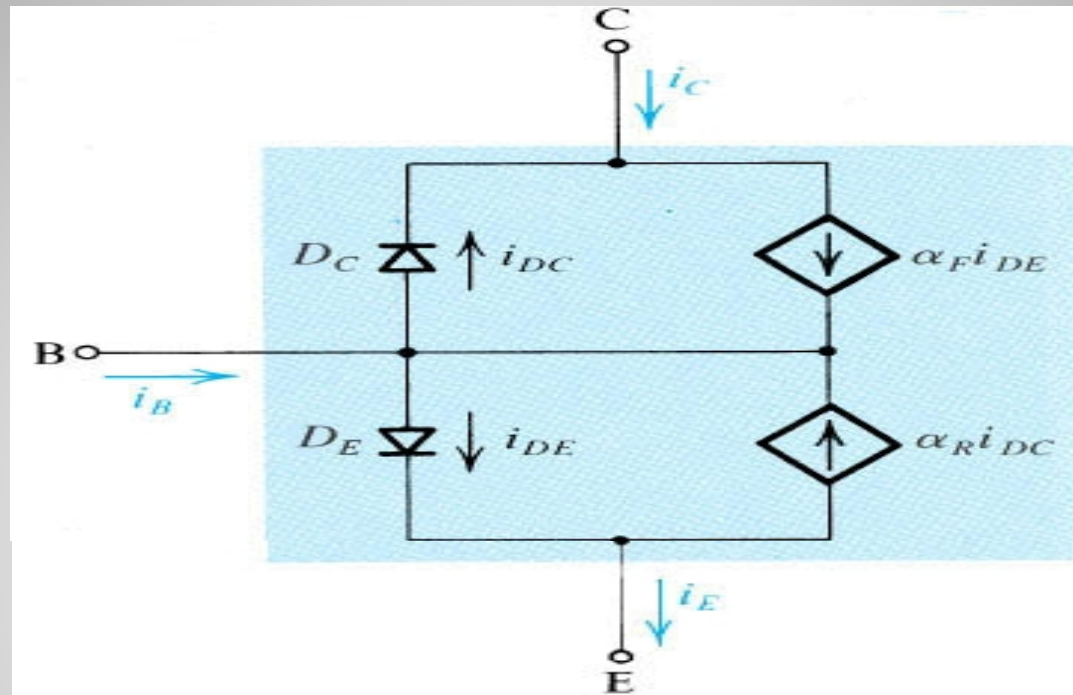
Struktur pada gambar (6) terlihat bahwa CBJ mempunyai luas yang lebih besar dari EBJ.

Pada gambar 7 dioda D_C menunjukkan CBJ yang mempunyai arus skala $I_{SC} \gg$ arus skala I_{SE} dari dioda D_E . Kedua arus ini berbanding lurus dengan luas junction

$$\alpha_F I_{SE} = \alpha_R I_{SC} = I_S$$

I_{SC} yang besar mempunyai dampak bahwa untuk arus yang sama, CBJ mempunyai penurunan tegangan yang lebih kecil jika di-bias maju daripada penurunan tegangan maju pada EBJ, V_{BE} .

Model Ebers-Moll



Gambar 8: Model Ebers – Moll dari transistor *n*p*n*

$$\begin{aligned}
 i_E &= i_{DE} - \alpha_R i_{DC} \\
 i_C &= -i_{DC} + \alpha_F i_{DE} \\
 i_B &= (1 - \alpha_F) i_{DE} + (1 - \alpha_R) i_{DC}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
i_{DE} &= I_{SE} \left(e^{V_{BE}/V_T} - 1 \right) \\
i_{DC} &= I_{SC} \left(e^{V_{BC}/V_T} - 1 \right) \\
i_E &= \left(\frac{I_S}{\alpha_F} \right) \left(e^{V_{BE}/V_T} - 1 \right) - I_S \left(e^{V_{BC}/V_T} - 1 \right) \\
i_C &= I_S \left(e^{V_{BE}/V_T} - 1 \right) - \left(\frac{I_S}{\alpha_R} \right) \left(e^{V_{BC}/V_T} - 1 \right) \\
i_B &= \left(\frac{I_S}{\beta_F} \right) \left(e^{V_{BE}/V_T} - 1 \right) + \left(\frac{I_S}{\beta_R} \right) \left(e^{V_{BC}/V_T} - 1 \right) \\
\beta_F &= \frac{\alpha_F}{1 - \alpha_F} \\
\beta_R &= \frac{\alpha_R}{1 - \alpha_R}
\end{aligned}$$

Penggunaan pertama dari model EM adalah untuk memperkirakan arus pada terminal dari transistor yang bekerja pada mode forward active.

V_{BE} positif antara 0,6 – 0,8 V dan V_{BC} negatif.

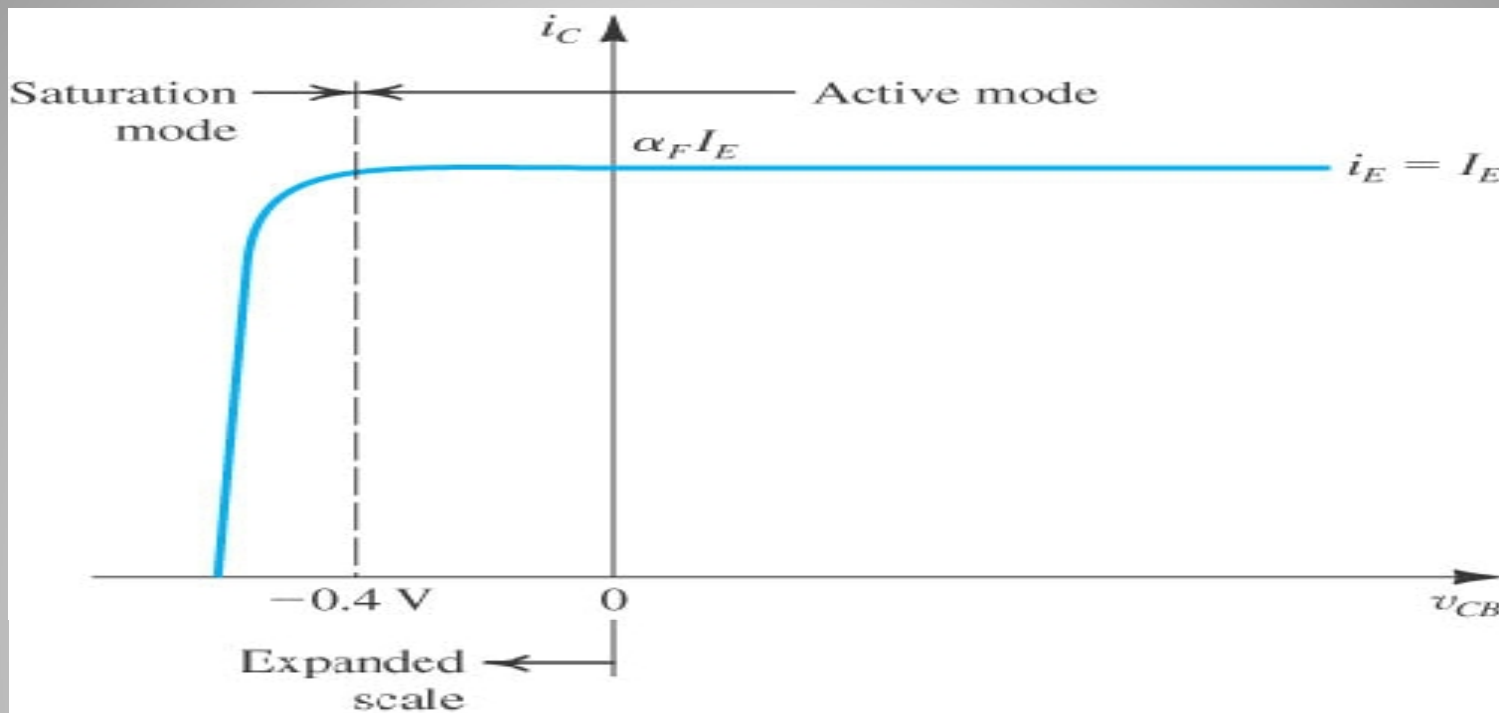
e^{V_{BC}/V_T} kecil dan dapat diabaikan

$$\begin{aligned}
 i_E &\cong \left(\frac{I_S}{\alpha_F} \right) e^{V_{BE}/V_T} + I_S \left(1 - \frac{1}{\alpha_F} \right) \\
 i_C &\cong I_S e^{V_{BE}/V_T} + I_S \left(\frac{1}{\alpha_R} - 1 \right) \\
 i_B &\cong \left(\frac{I_S}{\beta_F} \right) e^{V_{BE}/V_T} - I_S \left(\frac{1}{\beta_F} + \frac{1}{\beta_R} \right)
 \end{aligned}$$

Dari ketiga persamaan di atas, suku kedua dapat diabaikan.

Selama ini, kondisi untuk cara kerja mode forward active adalah $v_{CB} \geq 0$ agar CBJ dalam keadaan reverse bias. Pada kenyataannya, sebuah *pn* junction tidak dalam keadaan forward bias jika tegangannya tidak melebihi kira-kira 0,5 V.

Jadi cara kerja transistor *npn* pada mode forward active masih tetap bisa dicapai bila v_{CB} turun sampai mencapai -0.4 V.



Gambar 9: Karakteristik $i_C - v_{CB}$ dari transistor *npn* yang dicatu dengan arus I_E yang tetap.

Pada gambar 9 terlihat, arus i_C tetap konstan pada $\alpha_F I_E$ untuk v_{CB} sampai $-0,4$ V

Di bawah harga ini, CBJ akan 'on' dan meninggalkan mode forward active memasuki daerah kerja mode jenuh, di mana i_C menurun.

Cara Kerja pada Mode Jenuh

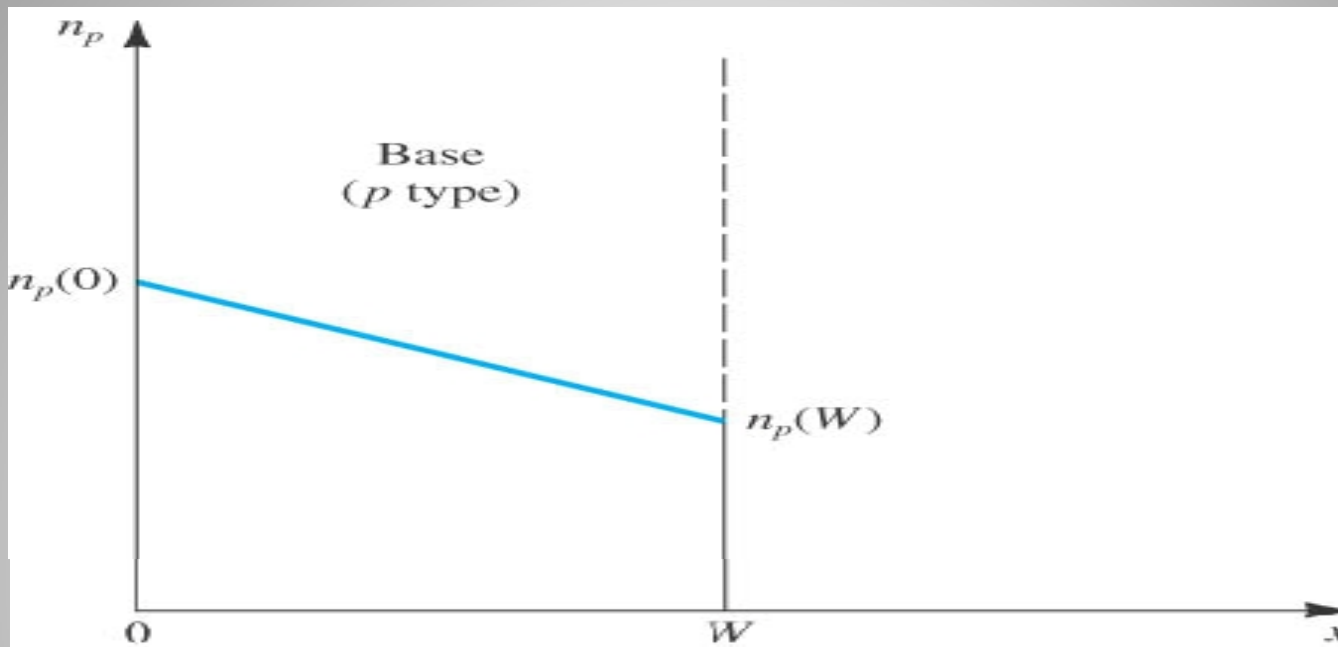
Pada gambar 9 terlihat jika v_{CB} berkurang sampai di bawah $-0,4$ V, BJT memasuki cara kerja mode jenuh.

Pada keadaan ideal, dalam mode forward active, v_{CB} tidak mempengaruhi i_C , tetapi pada mode jenuh, dengan meningkatnya v_{CB} ke arah negatif, i_C berkurang.

$$i_C = I_S e^{v_{BE}/V_T} - \left(\frac{I_S}{\alpha_R} \right) e^{v_{BC}/V_T}$$

Suku pertama adalah hasil dari forward-biased EBJ, dan suku kedua adalah hasil dari forward-biased CBJ.

Jika v_{BC} melebihi $0,4$ V, i_C akan berkurang dan akhirnya mencapai nol.

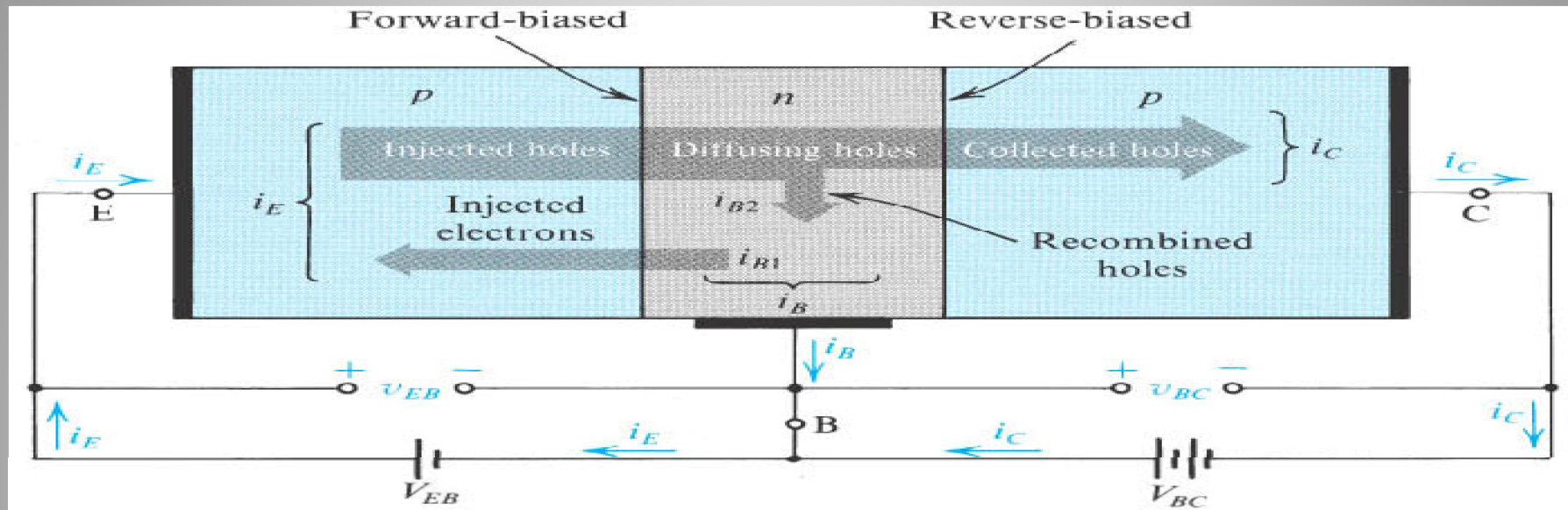


Gambar 10: Profil konsentrasi pembawa muatan minoritas (elektron) pada base dari sebuah transistor *npn*

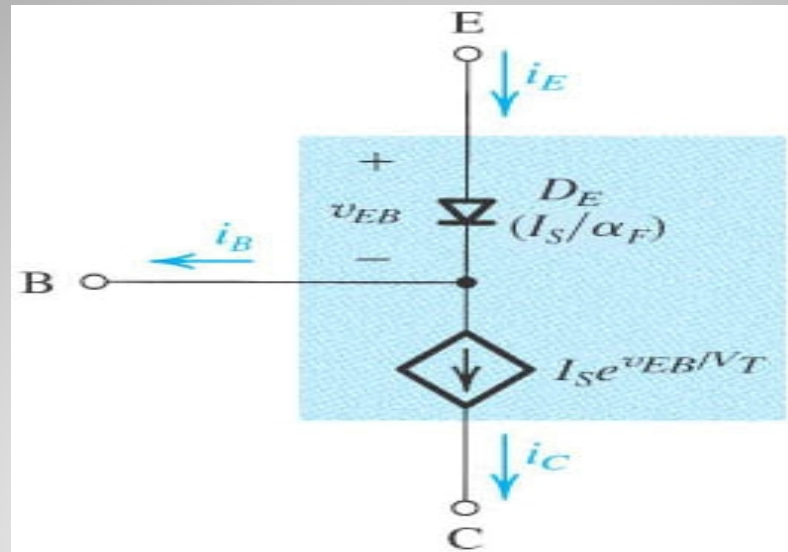
Karena CBJ forward biased, konsentrasi elektron pada sisi collector tidak nol, tapi sebanding dengan e^{V_{BE}/V_T}

Koefisien arah dari profil konsentrasi sebanding dengan pengurangan i_C

Transistor pnp



Gambar 11: Aliran arus pada transistor *pnp* untuk bekeja pada mode forward active.



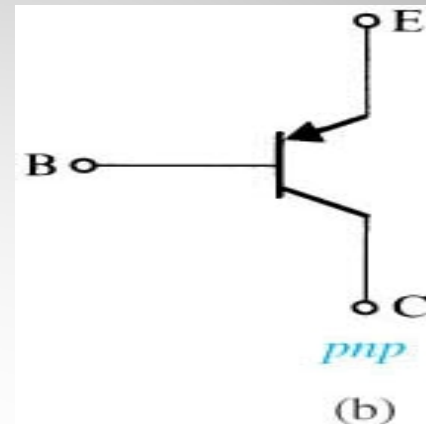
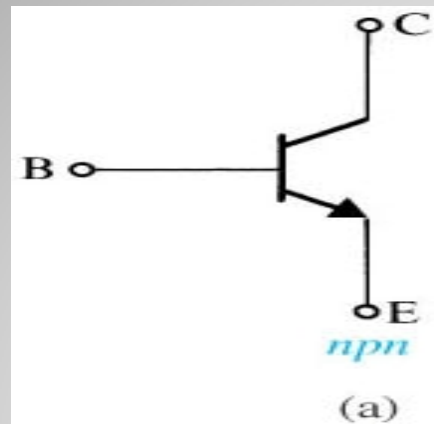
Gambar 12: Model sinyal besar untuk transistor *pnp* yang bekerja pada mode aktif.

Hubungan arus – tegangan pada transistor *pnp* sama dengan pada transistor *nnp* hanya v_{BE} diganti dengan v_{EB} .

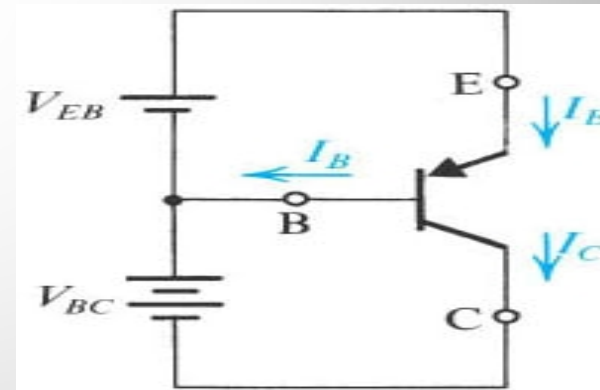
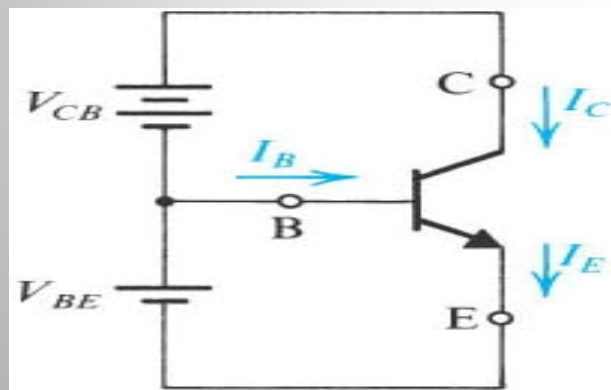
Gambar 12 menunjukkan rmodel angkaian pengganti sinyal besar, yang juga mungkin digantikan dengan sumber arus yang dikendalikan sumber arus, CCCS, $\alpha_F i_E$.

Transistor *pnp* dapat bekerja pada mode jenuh seperti pada transistor *nnp*

Karakteristik Arus – Tegangan



Gambar 13: Simbol rangkaian BJT



Gambar 14: Polaritas tegangan dan aliran arus dalam transistor yang di bias dalam mode aktif

Ringkasan hubungan arus – tegangan dari BJT pada mode aktif

$$i_C = I_S e^{v_{BE} / V_T}$$

$$i_B = \frac{i_C}{\beta} = \left(\frac{I_S}{\beta} \right) e^{v_{BE} / V_T}$$

$$i_E = \frac{i_C}{\alpha} = \left(\frac{I_S}{\alpha} \right) e^{v_{BE} / V_T}$$

Catatan: untuk transistor *pnp*, gantilah v_{BE} dengan v_{EB}

$$i_C = \alpha i_E \qquad i_B = (1 - \alpha) i_E = \frac{i_E}{\beta + 1}$$

$$i_C = \beta i_B \qquad i_E = (\beta + 1) i_B$$

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

V_T = tegangan termal = $kT/q \approx 25$ mV pada suhu kamar

Konstanta n

Untuk BJT, konstanta n mendekati satu kecuali pada kasus tertentu:

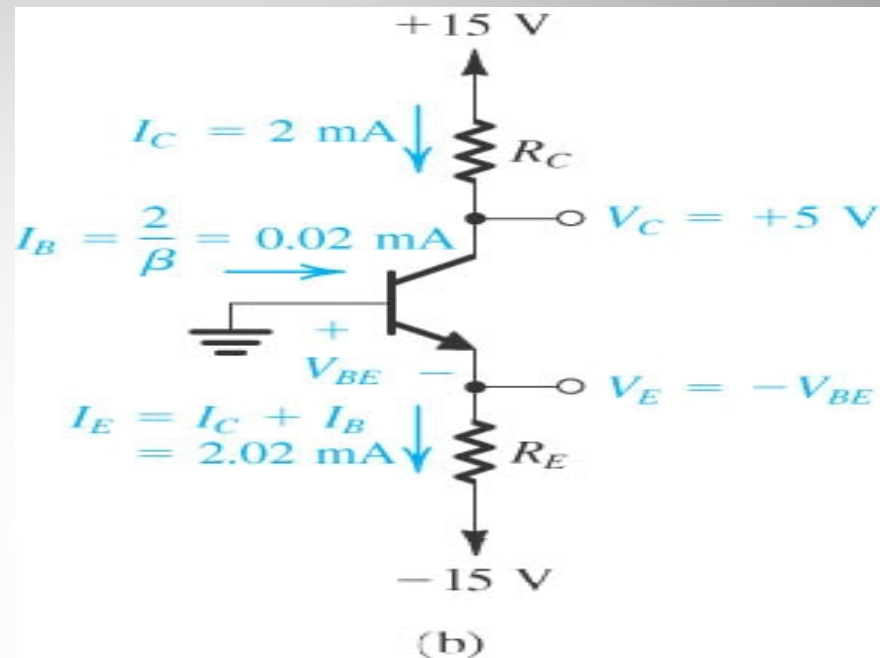
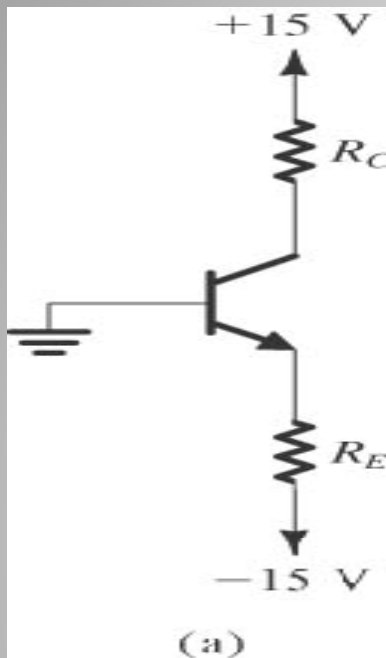
- pada arus yang tinggi, hubungan $i_C - v_{BE}$ menunjukkan harga n mendekati 2
- pada arus yang rendah, hubungan $i_B - v_{BE}$ menunjukkan harga n mendekati 2

Jika tidak disebutkan $n=1$

Arus balik collector – base (I_{CBO})

Adalah arus balik dari collector menuju base dengan emitter hubung terbuka. Arus ini mempunyai harga dalam orde nanoamper. I_{CBO} mempunyai komponen arus bocor, dan harganya tergantung dari v_{CB} . I_{CBO} sangat tergantung pada suhu, rata-rata harganya menjadi dua kali lipat dengan kenaikan 10°C .

Contoh soal 1:



Gambar 15: Rangkaian untuk contoh soal 1

Transistor pada gambar (15.a) mempunyai $\beta = 100$ dan $v_{BE} = 0,7 \text{ V}$ pada $i_C = 1 \text{ mA}$.

Rancanglah rangkaian sehingga arus 2 mA mengalir melalui collector dan tegangan pada collector = +5 V

Jawab:

$V_C = 5 \text{ V} \rightarrow$ CBJ reverse bias $\rightarrow$ BJT pada mode aktif

$$V_C = 5 \text{ V} \rightarrow V_{RC} = 15 - 5 = 10 \text{ V}$$

$$I_C = 2 \text{ mA} \rightarrow R_C = 5 \text{ k}\Omega$$

$v_{BE} = 0,7 \text{ V}$ pada $i_C = 1 \text{ mA} \rightarrow$ harga v_{BE} pada $i_C = 2 \text{ mA}$:

$$V_{BE} = 0,7 + \ln \left(\frac{2}{1} \right) = 0,717 \text{ V}$$

$$V_B = 0 \text{ V} \rightarrow V_E = -0,717 \text{ V}$$

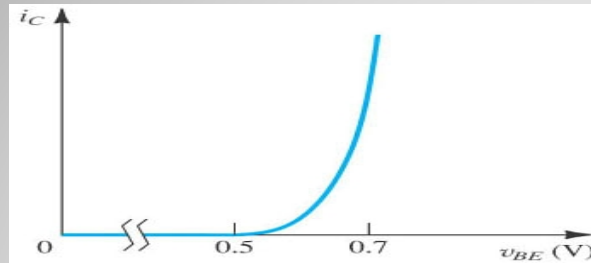
$$\beta = 100 \rightarrow \alpha = 100/101 = 0,99$$

$$I_E = \frac{I_C}{\alpha} = \frac{2}{0,99} = 2,02 \text{ mA}$$

Harga R_E diperoleh dari:

$$\begin{aligned} R_E &= \frac{V_E - (-15)}{I_E} \\ &= \frac{-0,717 + 15}{2,02} = 7,07 \text{ k}\Omega \end{aligned}$$

Penampilan Grafis dari Karakteristik Transistor



Gambar 16: Karakteristik $i_C - v_{BE}$ dari sebuah transistor *npn*

$$i_C = I_S e^{v_{BE} / V_T}$$

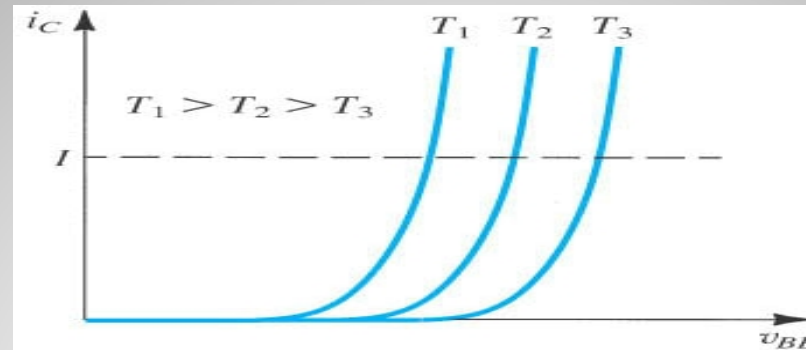
Karakteristik $i_C - v_{BE}$ identik dengan karakteristik $i - v$ pada dioda.

Karakteristik $i_E - v_{BE}$ dan $i_B - v_{BE}$ juga eksponensial dengan I_S yang berbeda: I_S/α untuk i_E dan I_S/β untuk i_B .

Karena konstanta dari karakteristik eksponensial, $1/V_T$, cukup tinggi (≈ 40), kurva meningkat sangat tajam.

Untuk $v_{BE} < 0,5$ V, arus sangat kecil dan dapat diabaikan. Untuk harga arus normal, v_{BE} berkisar antara 0,6 V – 0,8 V. Untuk perhitungan awal, $v_{BE} = 0,7$ V.

Untuk transistor *pnp*, karakteristik $i_C - v_{BE}$ tampak identik, hanya v_{BE} diganti dengan v_{EB} .



Gambar 17: Pengaruh suhu pada karakteristik $i_C - v_{BE}$

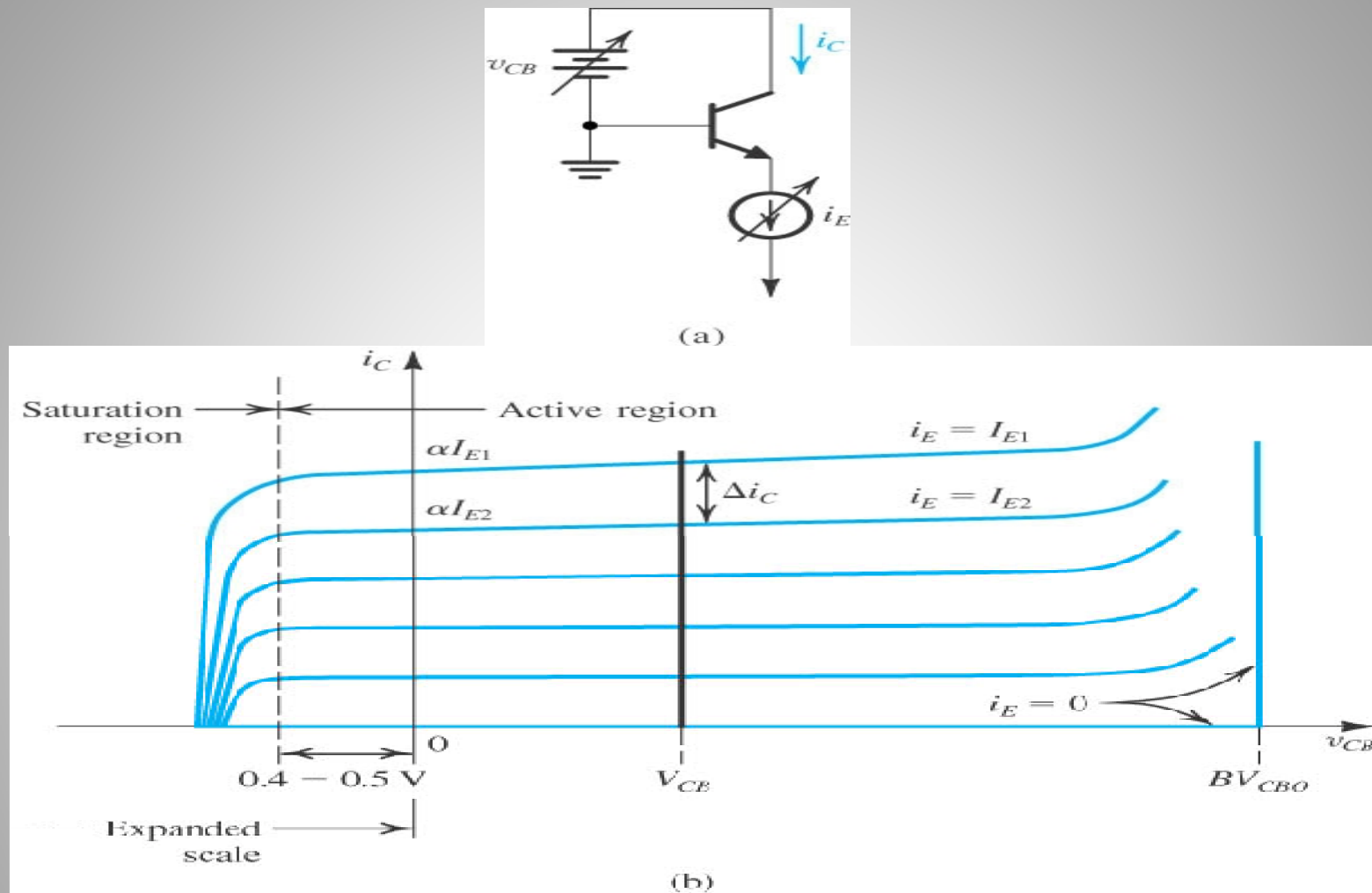
Seperti pada dioda silikon, tegangan pada junction base - emitter menurun 2 mV untuk setiap kenaikan suhu 1°C pada arus yang tetap.

Karakteristik Common – Base

Gambar (18.a) menunjukkan cara kerja BJT dengan membuat kurva $i_C - v_{CB}$ dengan i_E yang berbeda.

Pada pengukuran ini tegangan base tetap dan base berperan sebagai terminal bersama (common) masukan dan keluaran.

Jadi kurva ini disebut juga kurva karakteristik common – base



Gambar 18: karakteristik $i_C - v_{CB}$ dari sebuah transistor *npn*

Dalam daerah aktif, $v_{CB} \geq -0,4 \text{ V}$, kurva $i_C - v_{CB}$ berbeda dengan yang diharapkan karena:

- Kurva tidak datar tapi menunjukkan koefisien arah yang positif. Hal ini disebabkan adanya ketergantungan i_C terhadap v_{CB}
- Pada harga v_{CB} yang relatif besar, i_C meningkat dengan cepat, karena terjadinya 'breakdown'

Pada gambar (18.b), setiap kurva karakteristik memotong sumbu vertikal pada harga arus $= \alpha I_E$ (I_E konstan untuk setiap kurva).

α untuk sinyal besar $= i_C / i_E$ yang merupakan penguatan arus common-base.

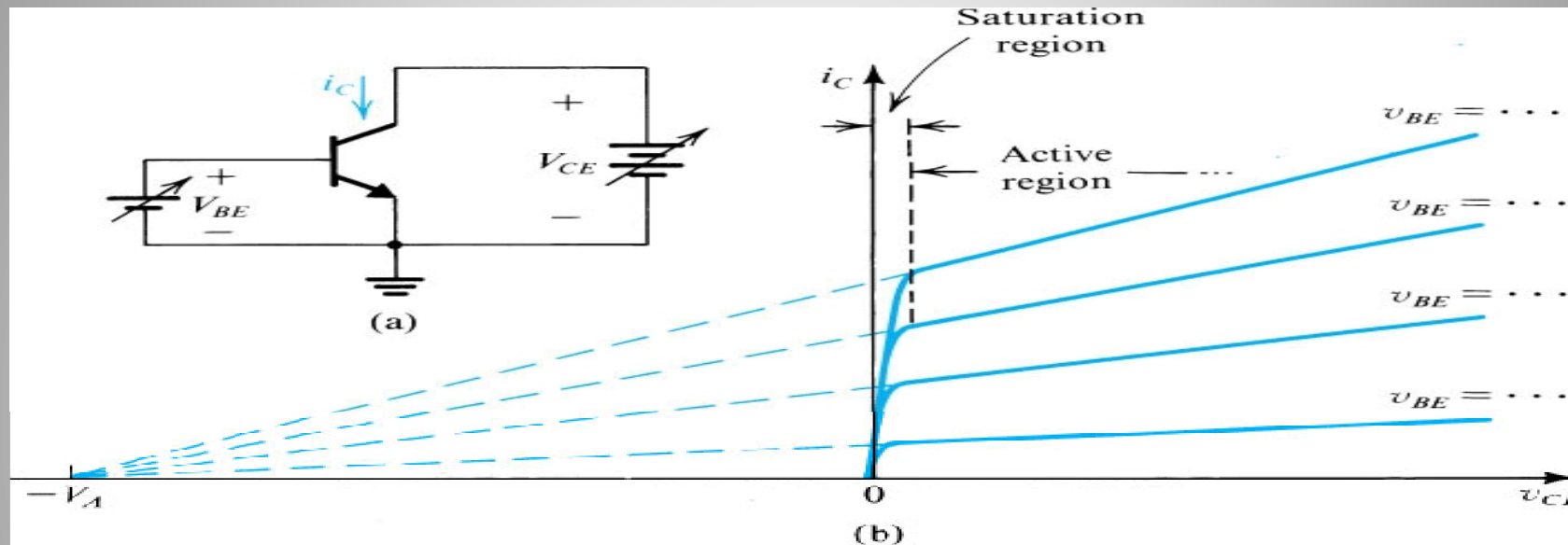
α untuk sinyal kecil $\equiv \Delta i_C / \Delta i_E$.

Dengan menggunakan persamaan Ebers-Moll, untuk daerah jenuh: $i_E = I_E$:

$$i_C = \alpha_E I_E - I_S \left(\frac{1}{\alpha_R} - \alpha_F \right) e^{v_{BC} / V_T}$$

CBJ lebih besar dari EBJ, penurunan tegangan v_{BC} akan lebih kecil dari v_{BE} , sehingga menghasilkan tegangan v_{CE} jenuh pada $v_{CE} = 0,1 \text{ V} - 0,3 \text{ V}$.

Ketergantungan i_C pada tegangan collector – The Early effect



Gambar 19.(a): Rangkaian konseptual untuk mengukur karakteristik $i_C - v_{CE}$ dari sebuah BJT
(b): Karakteristik $i_C - v_{CE}$ dari sebuah BJT

Ketergantungan linier i_C terhadap v_{CE} :

$$i_C = I_S e^{v_{BE}/V_T} \left(1 + \frac{v_{CE}}{V_A} \right)$$

Koefisien arah dari kurva $i_C - v_{CE}$ yang tidak nol menunjukkan bahwa resistansi keluaran dilihat ke arah collector mempunyai harga tertentu ($\neq \infty$)

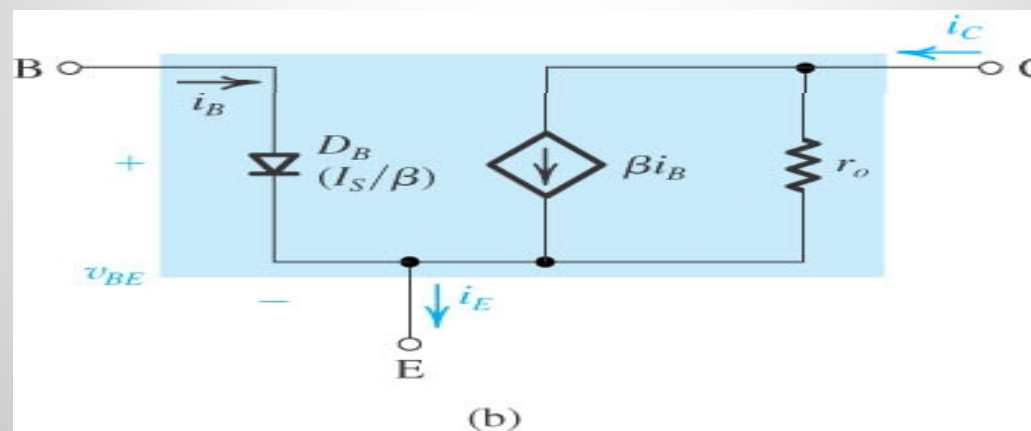
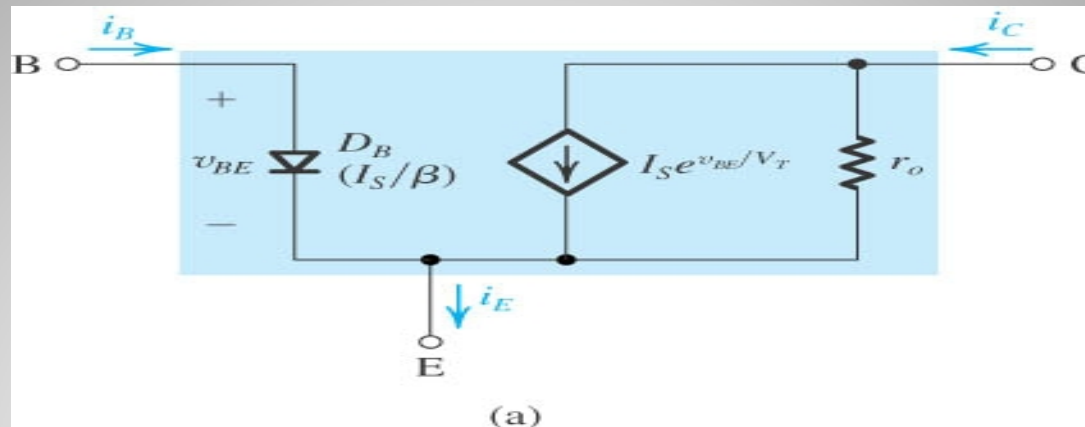
$$r_o \equiv \left[\frac{\partial i_C}{\partial v_{CE}} \bigg|_{v_{BE} = \text{konstan}} \right]^{-1}$$

$$r_o = \frac{V_A + v_{CE}}{I_C}$$

I_C dan v_{CE} adalah koordinat titik kerja BJT pada kurva $i_C - v_{CE}$.

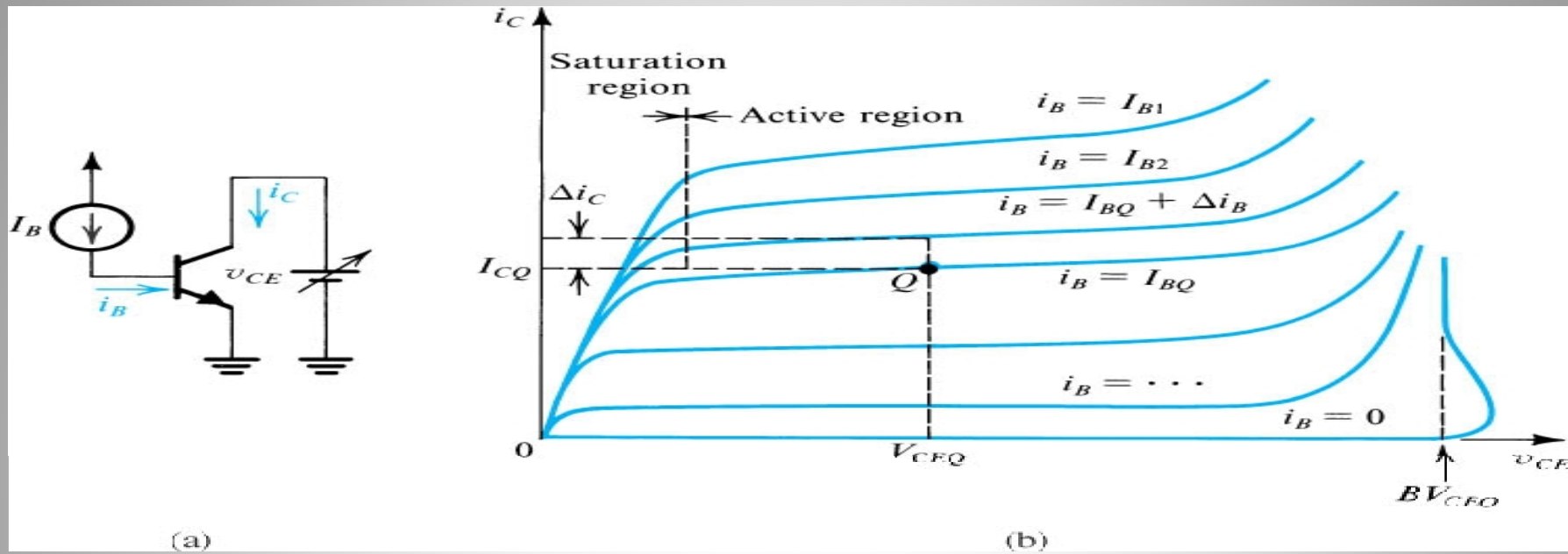
$$r_o = \frac{V_A}{I_C'}$$

$$I_C' = I_S e^{v_{BE}/V_T}$$



Gambar 20: Model rangkaian pengganti sinyal besar dari BJT *npn* yang bekerja di daerah aktif dalam konfigurasi common-emitter.

Karakteristik Common-Emitter



Gambar 21: Karakteristik common-emitter

Penguatan arus common-emitter β .

β didefinisikan sebagai perbandingan antara total arus pada collector dan total arus pada base.

β mempunyai harga yang konstan untuk sebuah transistor, tidak tergantung dari kondisi kerja.

Pada gambar 21, sebuah transistor bekerja pada daerah aktif di titik Q yang mempunyai arus collector I_{CQ} , arus base I_{BQ} dan tegangan collector – emitter V_{CEQ} . Perbandingan arus collector dan arus base adalah β sinyal besar atau β_{dc} .

$$\beta_{dc} \equiv \frac{I_{CQ}}{I_{BQ}}$$

β_{dc} juga dikenal sebagai h_{FE} .

Pada gambar 21 terlihat, dengan tegangan v_{CE} tetap perubahan i_B dari I_{BQ} menjadi $(I_{BQ} + \Delta i_B)$ menghasilkan kenaikan pada i_C dari I_{CQ} menjadi $(I_{CQ} + \Delta i_C)$

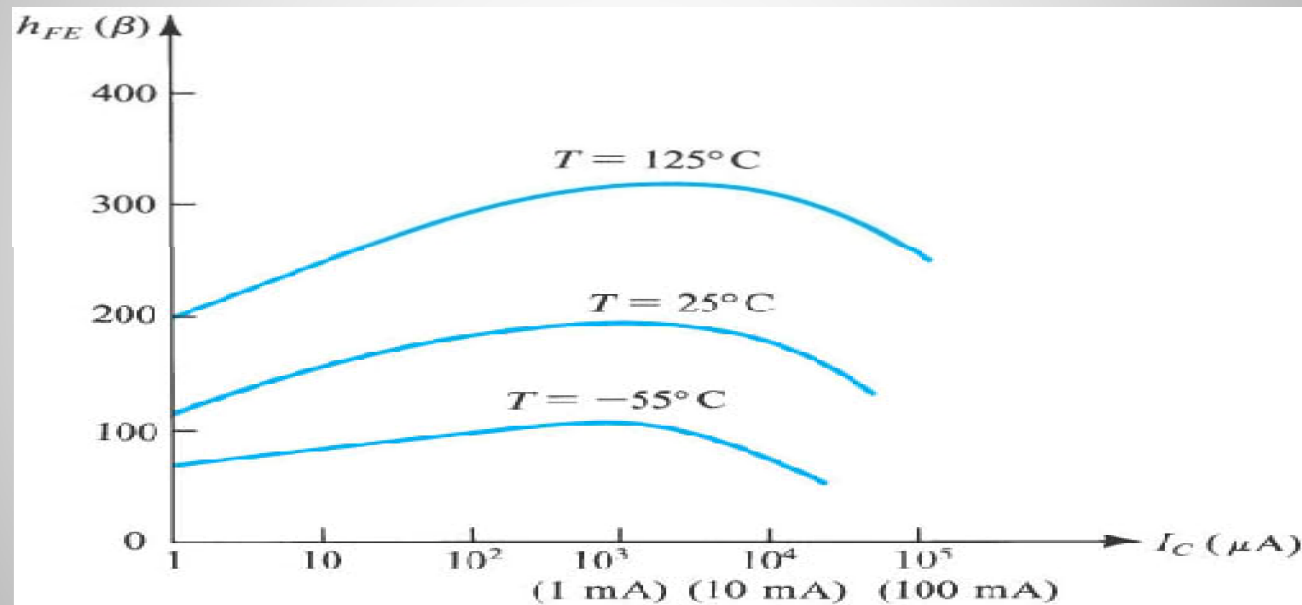
$$\beta_{ac} \equiv \left. \frac{\Delta i_C}{\Delta i_B} \right|_{V_{CE} = \text{konstan}}$$

β_{ac} disebut β 'incremental'.

β_{ac} dan β_{dc} biasanya berbeda kira-kira 10% – 20%.

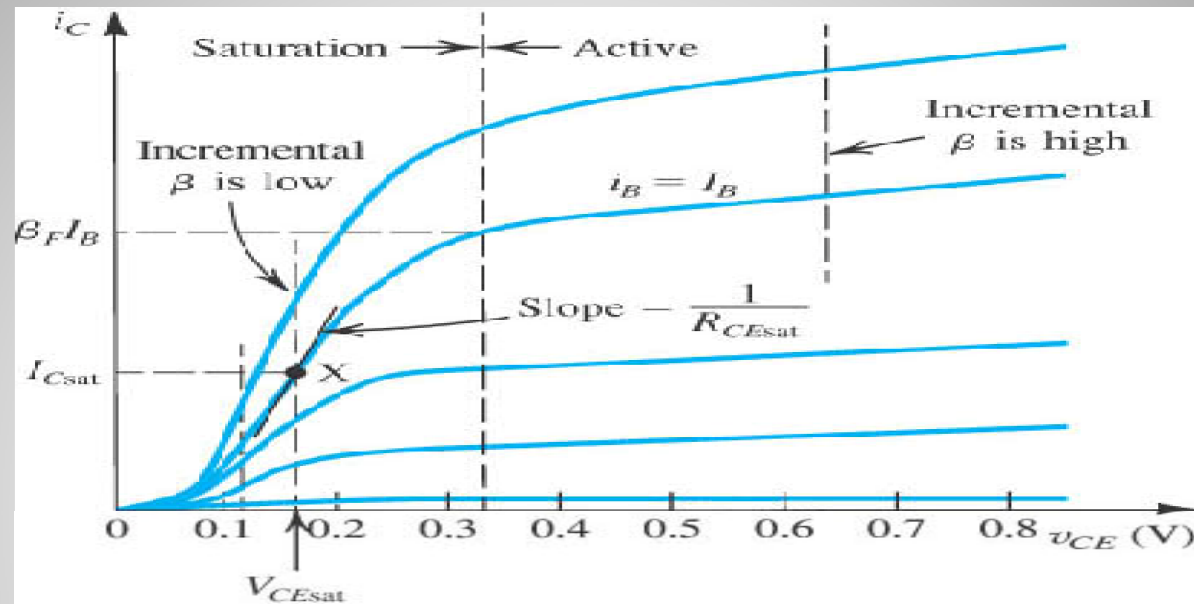
β_{ac} disebut juga β sinyal kecil yang dikenal juga dengan h_{fe} .

β sinyal kecil didefinisikan dan diukur pada v_{CE} konstan, artinya tidak ada komponen sinyal antara collector dan emitter, sehingga dikenal juga sebagai penguatan arus hubung singkat common-emitter.



Gambar 22: Ketergantungan β pada I_C dan suhu

Tegangan jenuh V_{CEsat} dan Resistansi jenuh R_{CEsat}



Gambar 23: Karakteristik common-emitter pada daerah jenuh

Pada daerah jenuh kenaikan β lebih kecil dibandingkan dengan di daerah aktif.

Perhatikan titik kerja X di daerah jenuh $\rightarrow$ arus base I_B , arus collector I_{Csat} dan tegangan collector – emitter V_{CEsat} .

$$I_{Csat} < \beta_F I_B$$

Karena harga I_{Csat} ditentukan oleh perancang rangkaian, sebuah transistor jenuh dikatakan bekerja pada '*forced β* '

$$\beta_{forced} \equiv \frac{I_{Csat}}{I_B}$$

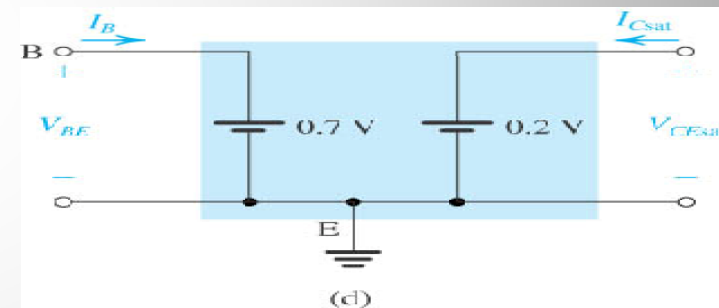
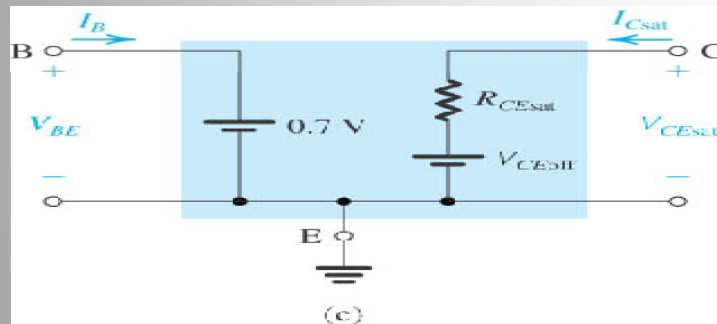
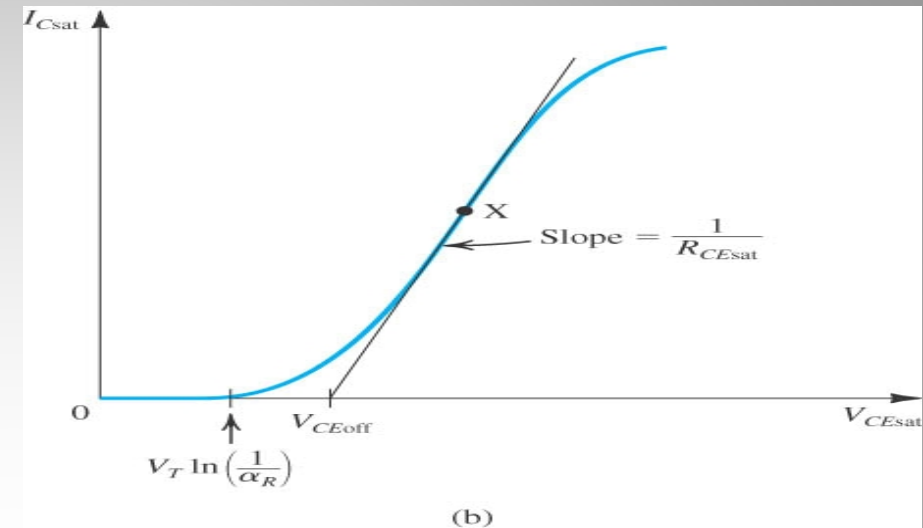
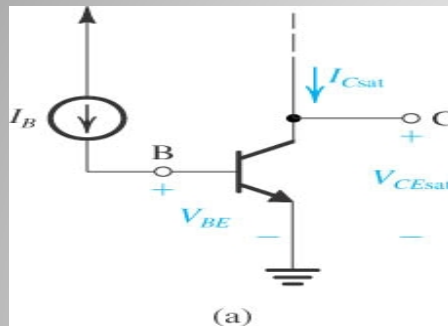
$$\beta_{forced} < \beta_F$$

Perbandingan antara β_F dan β_{forced} disebut '*overdrive factor*'. Makin besar '*overdrive factor*', makin dalam transistor dipaksa ke daerah jenuh dan makin kecil V_{CEsat} .

Kurva $i_C - v_{CE}$ pada daerah jenuh cukup tajam menunjukkan bahwa transistor jenuh mempunyai resistansi collector – emitter, R_{CEsat} yang rendah:

$$R_{CEsat} \equiv \left. \frac{\partial v_{CE}}{\partial i_C} \right|_{\substack{i_B = I_B \\ i_C = I_{Csat}}}$$

R_{CEsat} mempunyai harga berkisar beberapa ohm sampai beberapa puluh ohm.



- Gambar 24. (a) transistor *nnp* beroperasi pada mode jenuh dengan arus base yang tetap I_B .
 (b) Kurva karakteristik $i_C - v_{CE}$ pada $i_B = I_B$ dengan koefisien arah $1/R_{CEsat}$.
 (c) Rangkaian ekivalen transistor jenuh
 (d) Model rangkaian ekivalen yang disederhanakan dari transistor jenuh

Perhatikan pada gambar (24.b):

- kurva memotong sumbu v_{CE} pada $V_T \ln (1/\alpha_R)$. Harga ini sama untuk semua kurva $i_C - v_{CE}$
- tangent pada titik kerja X sama dengan $1/R_{CEsat}$. Jika diekstrapolasikan, tangent ini akan memotong sumbu v_{CE} pada tegangan V_{CEsat} yang mempunyai harga kira-kira 0,1V.

Pada gambar (24.c) pada sisi collector, transistor direpresentasikan dengan R_{CEsat} diseriikan dengan sebuah batere V_{CEsat} . Jadi:

$$V_{CEsat} = V_{CEoff} + I_{Csat} R_{CEsat}$$

Harga V_{CEsat} berkisar antara 0,1V – 0,3V.

Tegangan offset pada transistor jenuh menyebabkan BJT kurang menarik untuk dijadikan saklar jika dibandingkan dengan MOSFET.

Gunakan model Ebers-Moll untuk menurunkan ekspresi analisis untuk karakteristik sebuah transistor jenuh.

$$i_B = \left(\frac{I_S}{\beta_F} \right) (e^{V_{BE}/V_T} - 1) + \left(\frac{I_S}{\beta_R} \right) (e^{V_{BC}/V_T} - 1)$$

Gantikan $i_B = I_B$ dan abaikan suku yang tidak mempunyai fungsi eksponensial

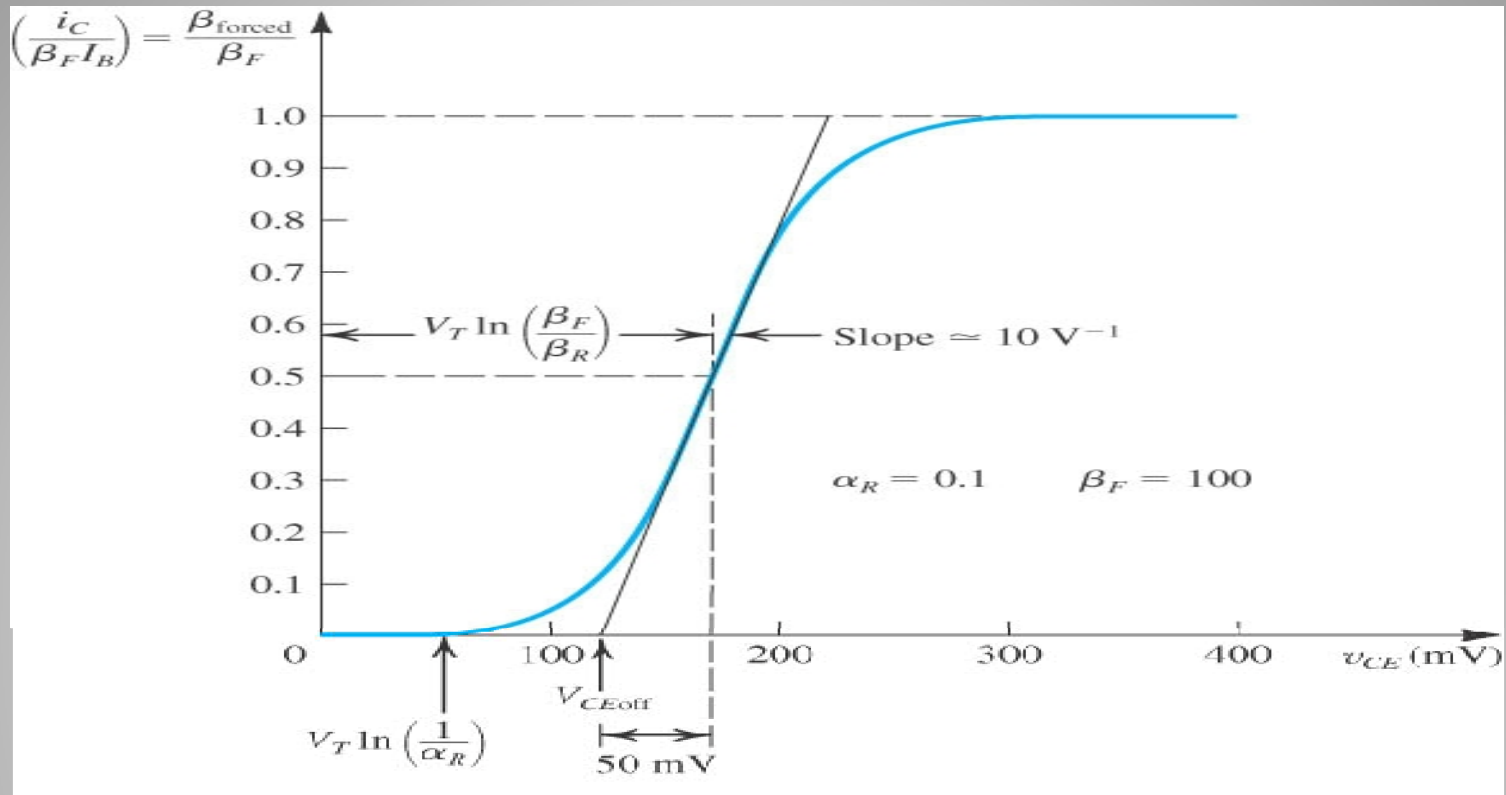
$$I_B = \frac{I_S}{\beta_F} e^{V_{BE}/V_T} + \frac{I_S}{\beta_R} e^{V_{BC}/V_T}$$

$$i_C = I_S e^{V_{BE}/V_T} - \frac{I_S}{\alpha_R} e^{V_{BC}/V_T}$$

Bagilah persamaan I_B dengan persamaan i_C dan tulis $v_{BE} = v_{BC} + v_{CE}$, sehingga diperoleh:

$$i_C = (\beta_F I_B) \left(\frac{e^{v_{CE}/V_T} - \frac{1}{\alpha_R}}{e^{v_{CE}/V_T} + \frac{\beta_F}{\beta_R}} \right)$$

Ini adalah persamaan kurva karakteristik $i_C - v_{CE}$ yang diperoleh jika base dipaksa dengan arus tetap I_B .



Gambar 25: Plot i_C (normalisasi) terhadap v_{CE} untuk transistor *npn* dengan $\beta_F = 100$ dan $\alpha_R = 0,1$

Kurva dapat didekati dengan garis lurus pada titik $\beta_{forced}/\beta_F = 0,5$. Koefisien arah pada titik ini kira-kira 10 V^{-1} , tidak tergantung dari parameter transistor.

$$R_{CEsat} = 1/10\beta_F I_B$$

Ganti $i_C = I_{Csat} = \beta_{forced} I_B$ dan $V_{CE} = V_{CEsat}$ diperoleh:

Transistor breakdown

Tegangan maksimum yang dapat dipasangkan pada sebuah BJT dibatasi oleh efek breakdown pada EBJ dan CBJ.

Pada konfigurasi common-base, karakteristik $i_C - v_{CB}$ menunjukkan bahwa untuk $i_E = 0$ (emitter hubung terbuka), CBJ breakdown pada tegangan BV_{CBO} . Untuk $i_E > 0$, breakdown terjadi pada tegangan lebih kecil dari BV_{CBO} . Biasanya $BV_{CBO} > 50 \text{ V}$

Untuk konfigurasi common-emitter, breakdown terjadi pada tegangan BV_{CEO} . Harga BV_{CEO} kira-kira setengah harga BV_{CBO} . Pada lembaran data transistor, BV_{CBO} disebut 'sustaining voltage', LV_{CEO}

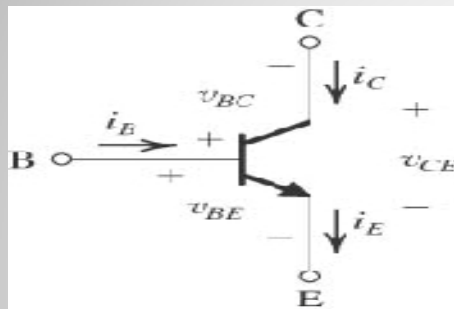
Breakdown pada CBJ baik pada konfigurasi common-emitter atau common-base tidak merusak selama daya disipasi pada divais masih dalam batas normal.

Breakdown pada EBJ yang disebabkan fenomena avalanche terjadi pada tegangan BV_{EBO} yang jauh lebih kecil dari BV_{CBO} . Biasanya BV_{EBO} berkisar antara 6 V – 8 V, dan breakdown ini merusak dalam arti β dari transistor berkurang secara permanen. Cara ini tidak mencegah pemakaian EBJ sebagai sebuah dioda zener untuk menghasilkan tegangan rujukan dalam perancangan IC. Dalam aplikasi ini tidak dilihat sebagai efek β -degeneration.

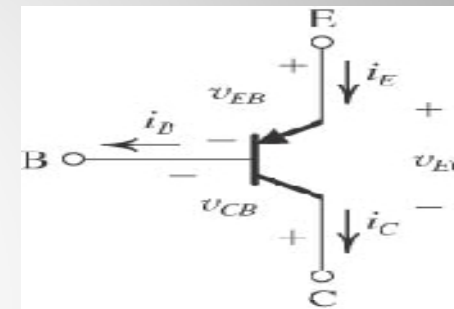
Ringkasan Karakteristik arus – tegangan dari BJT

Simbol rangkaian dan arah aliran arus

Transistor *npn*



Transistor *pnp*



Cara kerja pada mode aktif (untuk pemakaian sebagai penguat)

Kondisi:

1. EBJ forward biased:

npn: $v_{BE} > V_{BEon}$; $V_{BEon} \approx 0,5 \text{ V}$
biasanya $v_{BE} = 0,7 \text{ V}$

pnp: $v_{EB} > V_{EBon}$; $V_{EBon} \approx 0,5 \text{ V}$
biasanya $v_{EB} = 0,7 \text{ V}$

2. CBJ reverse biased

$$\text{nnp: } v_{BC} \leq V_{BCon} : V_{BCon} \approx 0,4 \text{ V} \rightarrow v_{CE} \geq 0,3 \text{ V}$$

$$\text{pnp: } v_{CB} \leq V_{CBon} : V_{CBon} \approx 0,4 \text{ V} \rightarrow v_{EC} \geq 0,3 \text{ V}$$

Hubungan arus – tegangan:

$$\text{pnp: } i_C = I_S e^{v_{EB} / V_T}$$

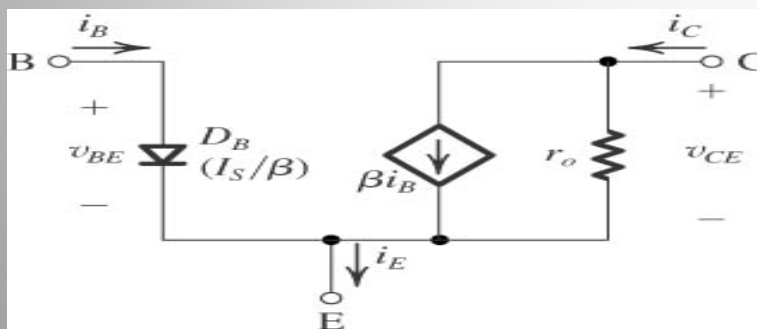
$$i_B = i_C / \beta \Leftrightarrow i_C = \beta i_B$$

$$i_E = i_C / \alpha \Leftrightarrow i_C = \alpha i_E$$

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

Model rangkaian ekivalen sinyal besar

nnp:

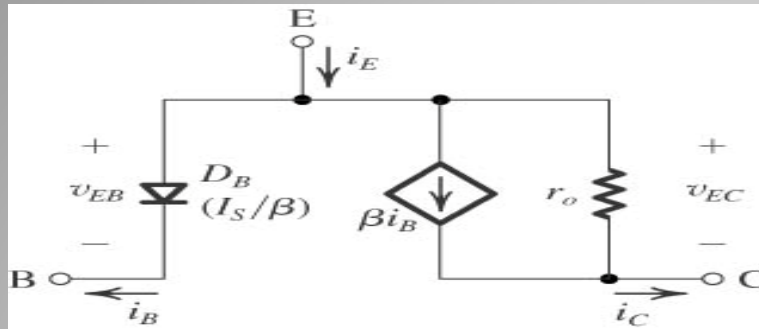


$$i_B = \left(\frac{I_S}{\beta} \right) e^{v_{BE} / V_T}$$

$$i_C = I_S e^{v_{BE} / V_T} \left(1 + \frac{v_{CE}}{V_A} \right)$$

$$r_o = V_A / \left(I_S e^{v_{BE} / V_T} \right)$$

pnp



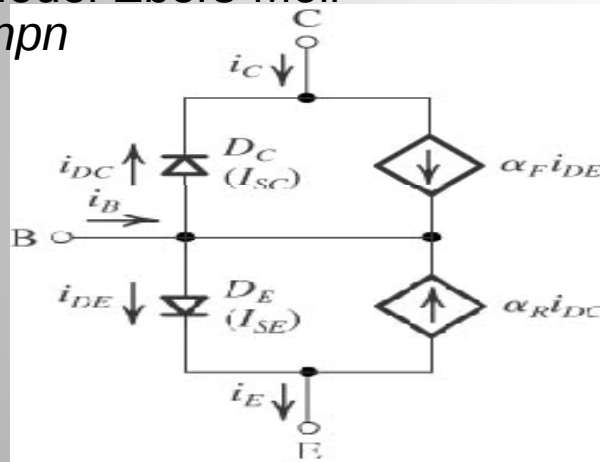
$$i_B = \left(\frac{I_S}{\beta} \right) e^{v_{EB} / V_T}$$

$$i_C = I_S e^{v_{EB} / V_T} \left(1 + \frac{v_{EC}}{V_A} \right)$$

$$r_o = V_A / (I_S e^{v_{EB} / V_T})$$

Model Ebers-Moll

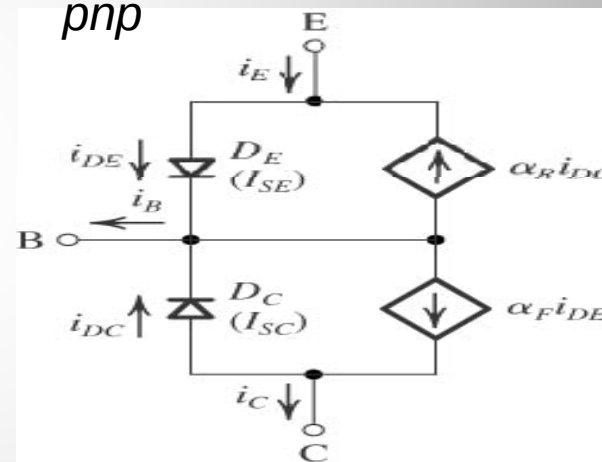
nnp



$$i_{DE} = I_{SE} \left(e^{v_{BE} / V_T} - 1 \right)$$

$$i_{DC} = I_{SC} \left(e^{v_{BC} / V_T} - 1 \right)$$

pnnp



$$i_{DE} = I_{SE} \left(e^{v_{EB} / V_T} - 1 \right)$$

$$i_{DC} = I_{SC} \left(e^{v_{CB} / V_T} - 1 \right)$$

$$\alpha_F I_{SE} = \alpha_R I_{SC} = I_S$$

$$\frac{I_{SC}}{I_{SE}} = \frac{\alpha_F}{\alpha_R} = \frac{\text{luas CBJ}}{\text{luas EBJ}}$$

Cara kerja pada mode jenuh

Kondisi:

1. EBJ forward biased:

nnp: $v_{BE} > V_{BEon}$; $V_{BEon} \approx 0,5 \text{ V}$
biasanya $v_{BE} = 0,7 - 0,8 \text{ V}$

pnp: $v_{EB} > V_{EBon}$; $V_{EBon} \approx 0,5 \text{ V}$
biasanya $v_{EB} = 0,7 - 0,8 \text{ V}$

2. CBJ forward biased

nnp: $v_{BC} \geq V_{BCon}$; $V_{BCon} \approx 0,4 \text{ V}$
biasanya: $v_{BC} = 0,5 - 0,6 \text{ V}$

$\rightarrow v_{CE} = V_{CEsat} = 0,1 - 0,2 \text{ V}$

pnp: $v_{CB} \geq V_{CBon}$; $V_{CBon} \approx 0,4 \text{ V}$
biasanya: $v_{CB} = 0,5 - 0,6 \text{ V}$

$\rightarrow v_{EC} = V_{ECsat} = 0,1 - 0,2 \text{ V}$

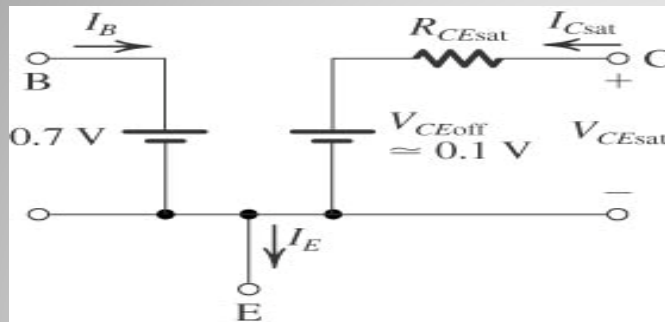
Arus: $I_{Csat} = \beta_{forced} I_B$

$$\beta_{forced} \leq \beta_F$$

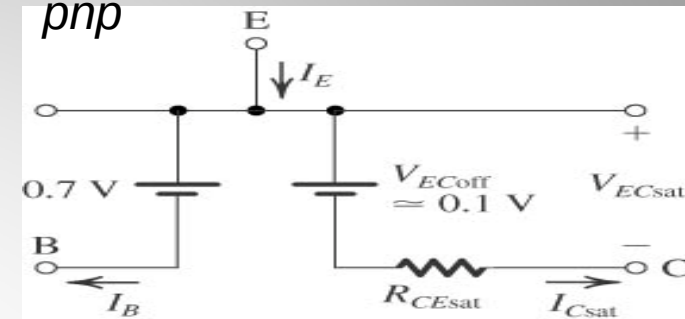
$$\frac{\beta_F}{\beta_{forced}} = \text{Overdrive factor}$$

Rangkaian ekivalen

nnp



pnp



$$|V_{CEsat}| = V_T \ln \left[\frac{1 + \left(\frac{\beta_{forced} + 1}{\beta_F} \right)}{1 - \frac{\beta_{forced}}{\beta_F}} \right]$$

Untuk: $\beta_{forced} = \beta_F/2$;

$$R_{CEsat} = 1/10\beta_F I_B$$