



Aalto-yliopisto
Sähkötekniikan
korkeakoulu

Sähkötekniikka ja elektroniikka

Kimmo Silvonen (X)

4.11.2020

Bipolaaritransistori BJT

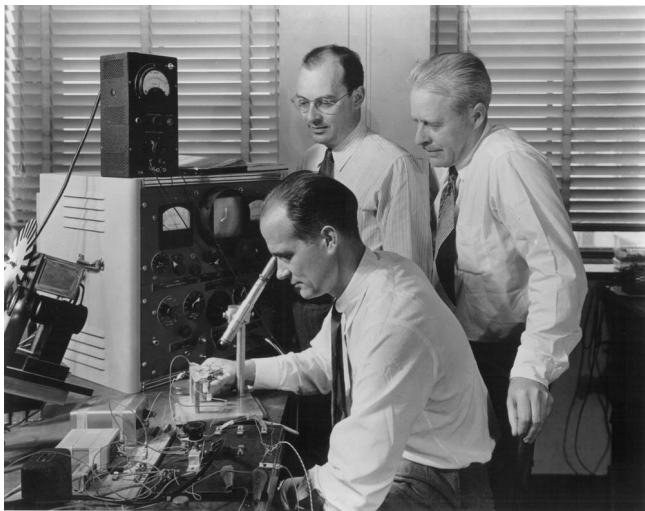
Versio 4.11.2020

Bipolar Junction Transistor, liekkö turhakin keksintö?)

- ▶ BJT 23.12.1947
- ▶ Nobel 1956 (Bell Labs, nykyisin Alcatel-Lucent)
Bell Labs: 'Where vision and technology meet customers...'
Aalto ELEC: 'Where science and technology meet society'
- ▶ Mikroelektroniikan lähtölaukaus
- ▶ IC 1959 (2 BJT, Texas Instruments), Nobel 2000
- ▶ Operaatiovahvistin 1963 (9 BJT, Fairchild Semiconductor)
- ▶ Erilliskomponenttina tai anturina sekä bipolaarisissa mikropiireissä (opva, regulaattori, tietyt logiikkapiirit, ym.)
- ▶ Vain keskinkertainen integroitavuus, pikemminkin muita etuja

The Transistor Three: Shockley, Bardeen, Brattain

Nobelisteja, Bardeenille toinen fysiikan Nobel 1972 suprajohtavuuden teoriasta



A Replica of the First Transistor, alinna Base

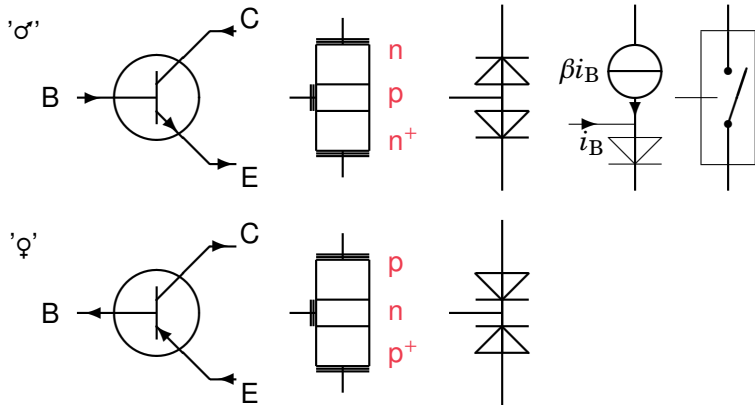


Bipolaaritransistori, *Applications*

- ▶ Signaalin vahvistaminen, esim. hifi-päätevahvistin
- ▶ Analogiset mikropiirit, mm. operaatiovahvistin, regulaattori
- ▶ Nopea virtaohjattu kytkin, mm. hakkuriteholähteissä ja lähettimissä
- ▶ Tasavirtamoottorin nopeuden säätö (PWM-ohjattu H-silta)
- ▶ Nopeat logiikkapiirit (ECL)
- ▶ Signaalin generointi (oskillaattori)
- ▶ Anturi (lämpötila, valo)

Transistorityypit, *npn* vs. *pnp*

Piirrosmerkki, rakenne, toimintaperiaate. Kanta (*base*), kollektori, emitteri.



Transistor Man

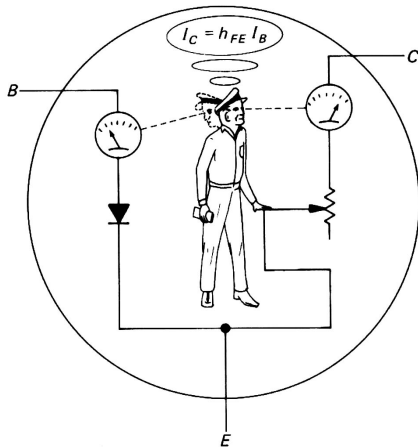
Selittää hyvin transistorin perustoiminnan, ks. seuraava sivu!

"Tämän pikkumiehen elämäntehtävänä on yrittää toteuttaa yhtälöä $I_C = \beta I_B$, mutta ainoa asia, mitä hän voi tehdä, on kääntää säätövastuksen nuppia. Täten hän kykenee siirtymään oikosulusta (*saturaatio*) katkaistuun virtapiiriin (*off-tila*) tai mihin tahansa tilaan niiden välille."

Kirjaa voi lukea elektronisena versiona, mikäli se on vielä saatavana.
Kirjoita Googleen hakusanoiksi: *The art of electronics Horowitz Hill*
PDF

Transistor Man ($h_{FE} = \beta$)

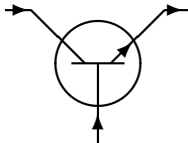
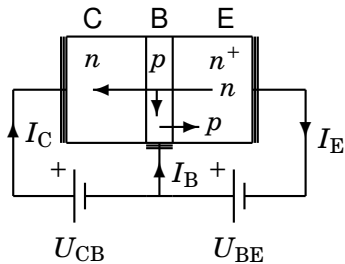
Operaatiovahvistinmiehen esikuva



©Horowitz and Hill, *The Art of Electronics*

Toiminta puolijohdetasolla *cf. Diode*

E emittii elektronit C:lle, joka kerää ne. Vain pieni osa menee B:lle.



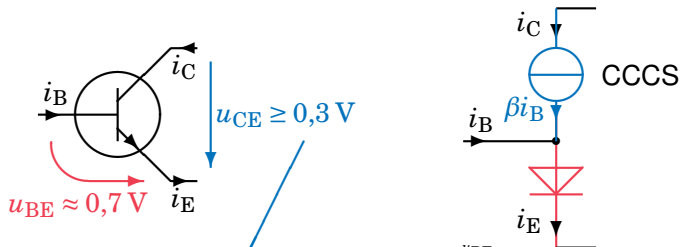
$$I_C = I_S e^{\frac{U_{BE}}{nU_T}}$$

$$n = 1$$

$$I_B = \frac{1}{\beta} I_C$$

Virtavahvistus β (ja α) Current Gain

Tässä oleellisin: pieni i_B säätelee paljon suurempaa i_C :tä \Rightarrow "virtavahvistus"!



$$i_C = \beta i_B = \alpha i_E = I_S e^{\frac{u_{BE}}{nU_T}}$$

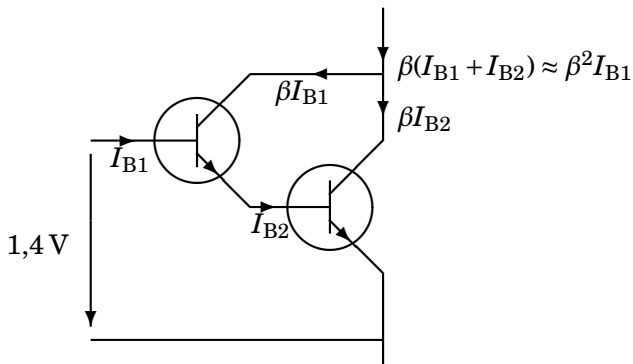
$$i_E = i_C + i_B = (\beta + 1)i_B$$

$$\beta = \frac{\alpha}{1 - \alpha} \approx 100 \quad (20 \dots 500)$$

$$\alpha = \frac{\beta}{\beta + 1} \approx 0,99 \quad (0,95 \dots 0,998)$$

Darlington-pari

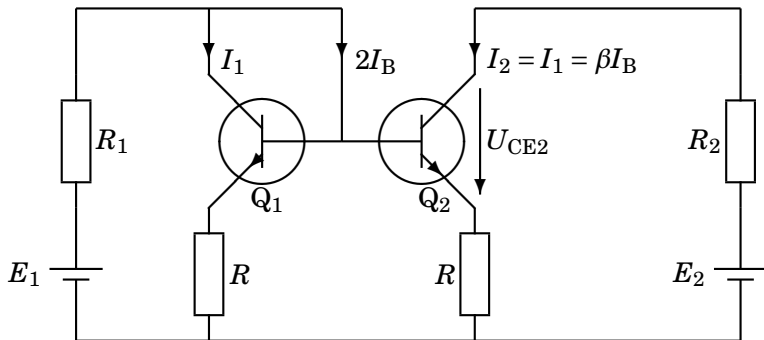
Virtavahvistus noin 10 000



Virtapeili

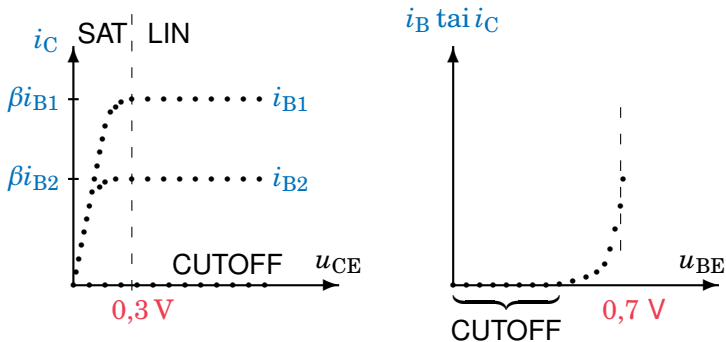
Vakiovirtalähde

Vastus R_1 määrää virran I_1 . Koska virta I_2 ei riipu kuormavastuksesta R_2 , on kyseessä vakiovirtalähde. Jännitteen E_2 tulee olla riittävän suuri, jotta Q_2 ei kyllästy: $U_{CE2} \geq 0,3V$.



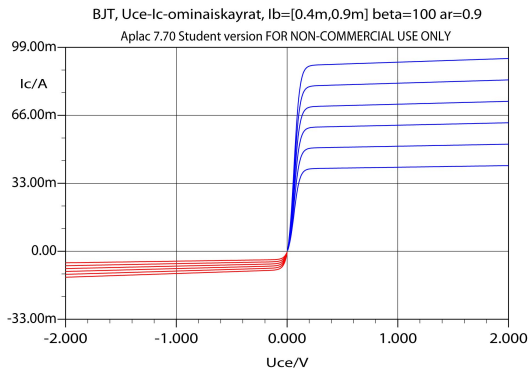
Ominaiskäyrät *Characteristic Curves*

Epäideaalisuus johtuu ominaiskäyristä; oikealla B–E-diodi.



Reverse vs. Forward

Virtalähteen sisäisen vastuksen r_o takia suorat ovat lievästi nousevia (k)



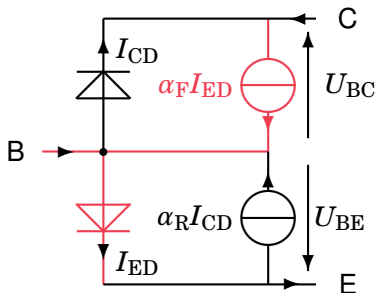
$$\beta_R \ll \beta = \beta_F$$

$$k = \frac{1}{r_o}$$

Ebers-Moll Equivalent Circuit

vrt. dtf.pdf

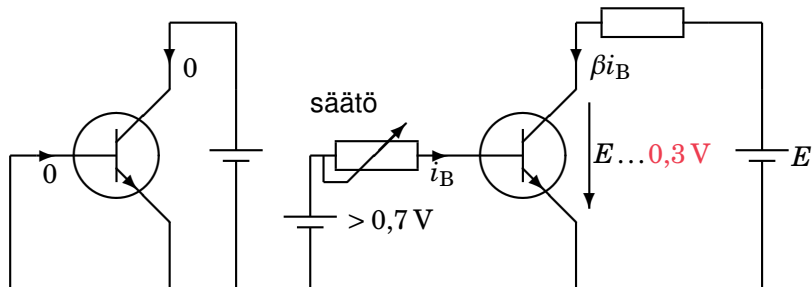
npn:



$$I_{ED} = \frac{I_S}{\alpha_F} \left(e^{\frac{U_{BE}}{U_T}} - 1 \right) \quad I_{CD} = \frac{I_S}{\alpha_R} \left(e^{\frac{U_{BC}}{U_T}} - 1 \right)$$

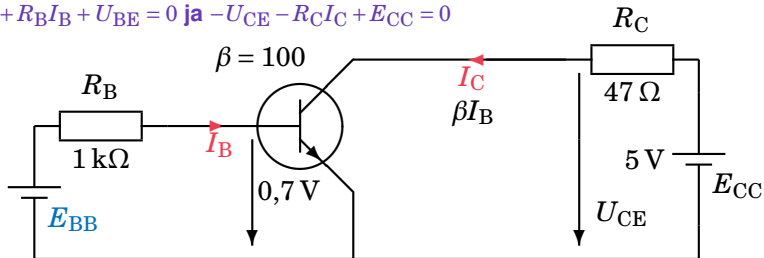
Toimintatilat, *Operation Modes*

Sulkutila ($U_{CE} = E$), lineaarinen toiminta ($U_{CE} \leq E$), **kyllästystila** ($U_{CE} \approx 0,3 \text{ V}$)



CUT, AKT or SAT as a function of E_{BB}

$$-E_{BB} + R_B I_B + U_{BE} = 0 \text{ ja } -U_{CE} - R_C I_C + E_{CC} = 0$$

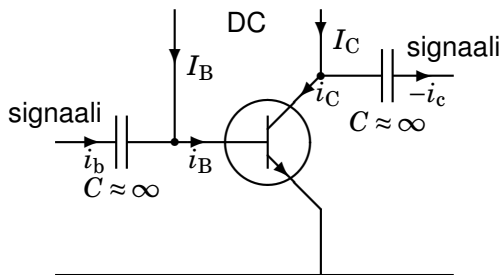


C	0,5 V	0 mA · β =	0 mA	5 V	
C/A	0,7 V	0 mA · β =	0 mA	5 V	
A	1,2 V	0,5 mA · β =	50 mA	2,65 V	Hyvä
A/S	1,7 V	1 mA · β =	100 mA	0,3 V	
S	2,0 V	1,3 mA →	100 mA	0,3 V	

esimerkki.

Biasointi ja kytkentäkondensaattorit

Biasointi eli "esijännittäminen" tarkoittaa tasavirtojen säätämistä niin, että päästään halutulle kohdalle ominaiskäyriä. Tasavirta otetaan jännitelähteestä tai vakiovirtalähteestä. Signaali tuo mukaan ajan funktiona muuttuvan virran.



Tasavirta- vs. piensignaalianalyysi

Tämä tehtiin jo diodilla tehtävässä 64

I_B = virran vakio-osa eli keskiarvo, d.c.

i_b = virran vaihteleva osa, a.c.-signaali

$i_B = I_B + i_b$ = kokonaisvirta, d.c. + a.c.

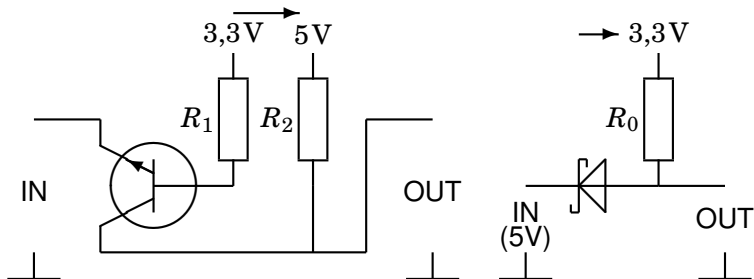
$$i_C \approx I_S e^{\frac{U_{BE} + u_{be}}{nU_T}} = \underbrace{\left(I_S e^{\frac{U_{BE}}{nU_T}} \right)}_{I_C} e^{\frac{u_{be}}{nU_T}}$$

$$i_C = I_C \left(1 + \frac{u_{be}}{nU_T} + \underbrace{\frac{1}{2!} \left(\frac{u_{be}}{nU_T} \right)^2 + \dots}_{\approx 0} \right)$$

Taylorin sarja: d.c. + signaali + särö(t) *distortion*, vrt. viime viikon tehtävä 63.

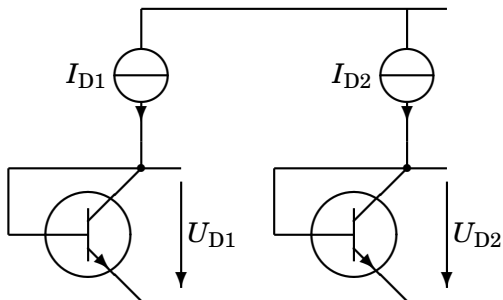
Logiikkatason muunnin 3,3 V / 5 V

BJT-versio: $R_1 = 2,2 \text{ k}\Omega$ ja $R_2 = 6,8 \text{ k}\Omega$. Schottkydiodi-versio: $R_0 = 10 \text{ k}\Omega$



Lämpötilan mittaaminen BJT-anturilla

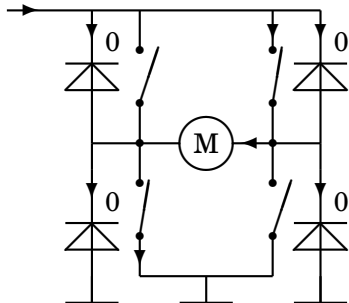
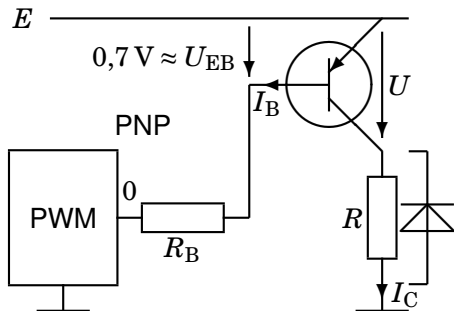
Diodi-kytkentä (B-C)



$$U_{D1} - U_{D2} = \frac{nkT}{q} \ln \left(\frac{I_{D1}}{I_{D2}} \right) = \frac{nkT}{q} \ln \left(\frac{I_{E1}}{I_{E2}} \right) \quad (1)$$

Kytkintransistorit, H-silta ja suojadiodit

PWM = pulssinleveysmodulaatio



Ensi viikolla

- ▶ Kanavatransistori eli FET
- ▶ Erityisesti N-kanavainen avauskanavatransistori
- ▶ Mosfet ja mikropiirit
- ▶ Mooren laki