



Aalto-yliopisto
Sähkötekniikan
korkeakoulu

Sähkötekniikka ja elektroniikka

Kimmo Silvonen (X)

10.11.2021

Bipolaaritransistori BJT

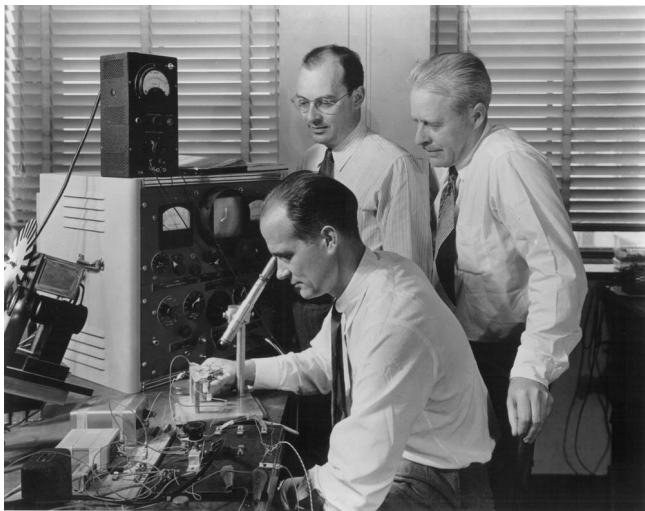
Versio 10.11.2021

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
- ▶ Teoriaa: Elektroniikka ja sähkötekniikka, kirjan sivut 147–164.

The Transistor Three: Shockley, Bardeen, Brattain

Nobelisteja, Bardeenille toinen fysiikan Nobel 1972 suprajohtavuuden teoriasta



A Replica of the First Transistor, alinna Base

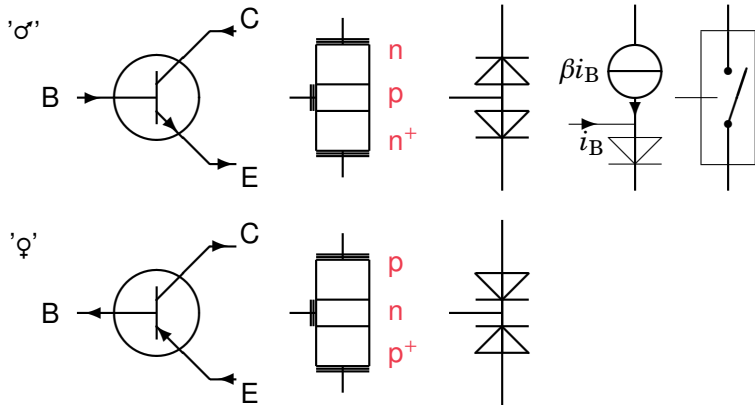


Bipolaaritransistori, *Applications*

- ▶ Signaalin vahvistaminen, esim. audio-vahvistimet
- ▶ 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)
- ▶ Bipolaaritransistoreita (BJT) ja kanavatransistoreita (FET) käytetään usein samanlaisissa sovelluksissa.

Transistorityypit, *npn* vs. *pnp*

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



Transistor Man

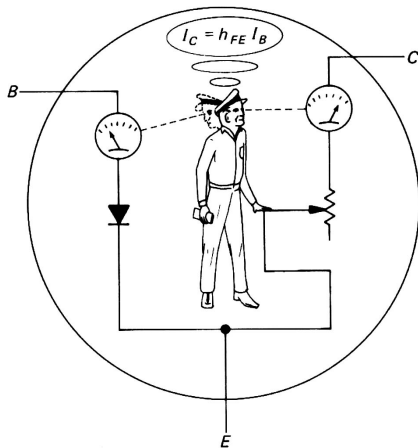
Selittää hyvin transistorin perustoiminnan, ks. seuraava sivu!

"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. Kirjoita Googleen hakusanoiksi: *The art of electronics Horowitz Hill PDF*

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

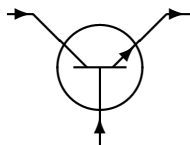
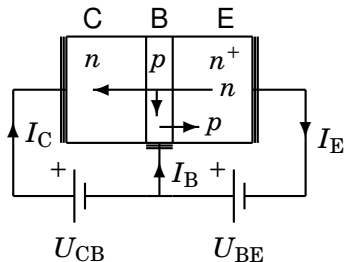
Operaatiovahvistinmiehen esikuva



©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.



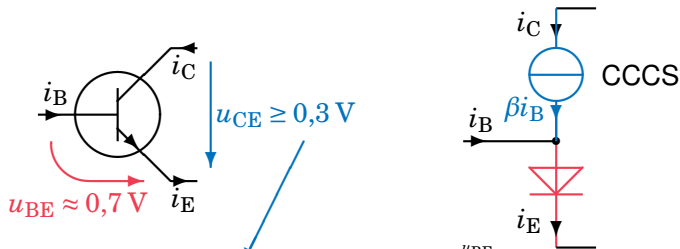
$$I_C = I_S e^{\frac{U_{BE}}{nU_T}}$$

$$n = 1$$

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

Virtavahvistus β (ja α) Current Gain

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



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

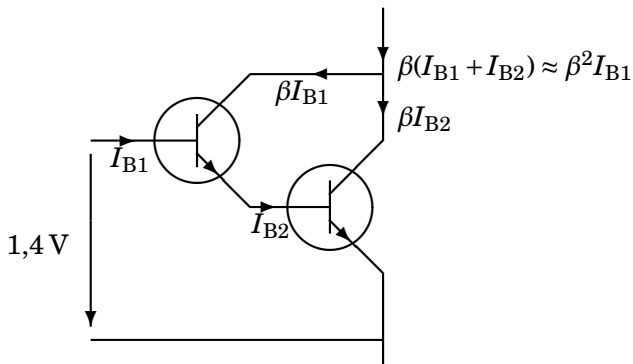
$$i_E = i_C + i_B = (\beta + 1)i_B$$

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

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

Darlington-pari

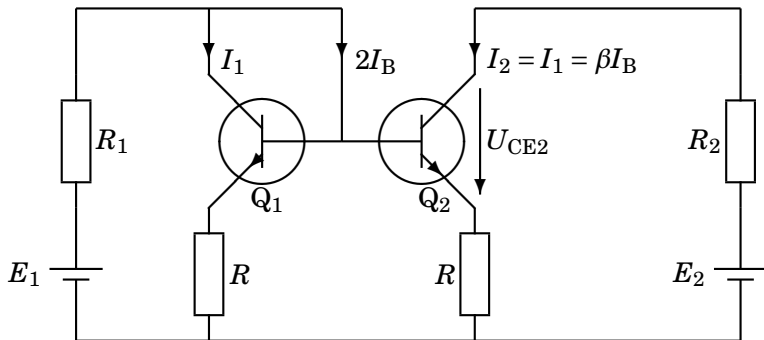
Virtavahvistus noin 10 000



Virtapeili

Vakiovirtalähde

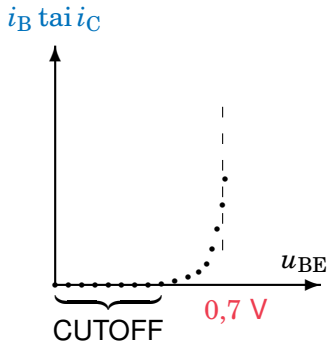
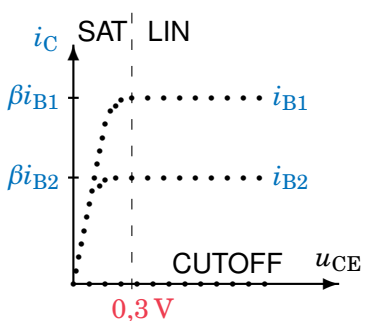
Vastus R_1 määrää virran I_1 . Koska virta I_2 ei riipu kuormavastuksesta R_2 , on kyseessä vakiovirtalähde. Jännitteen E_2 tulee olla riittävän suuri, jotta Q_2 ei kyllästy: $U_{CE2} \geq 0,3V$.



Ominaiskäyrät *Characteristic Curves*

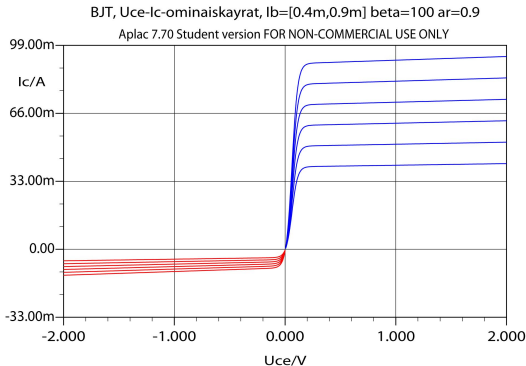
Epäideaalisuus johtuu ominaiskäyristä; oikealla B–E-diodi.

BJT:n kannan ja emitterin välillä on diodi. Niin on myös kannan ja kollektorin välillä, mutta jälkimmäinen diodi on yleensä estosuunnassa.



Reverse vs. Forward

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



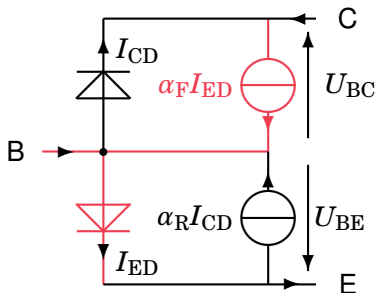
$$\beta_R \ll \beta = \beta_F$$

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

Ebers-Moll Equivalent Circuit

vr. dtf.pdf

npn:

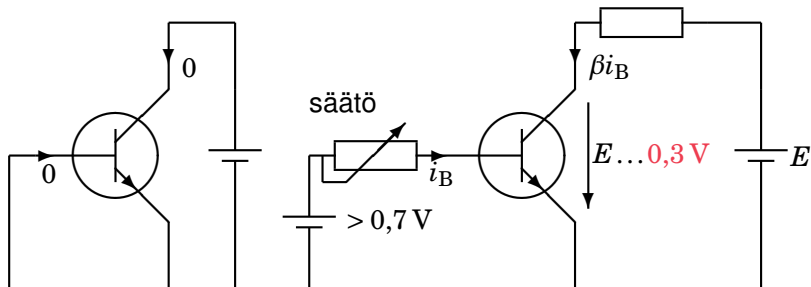


$$I_{ED} = \frac{I_S}{\alpha_F} \left(e^{\frac{U_{BE}}{U_T}} - 1 \right)$$

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

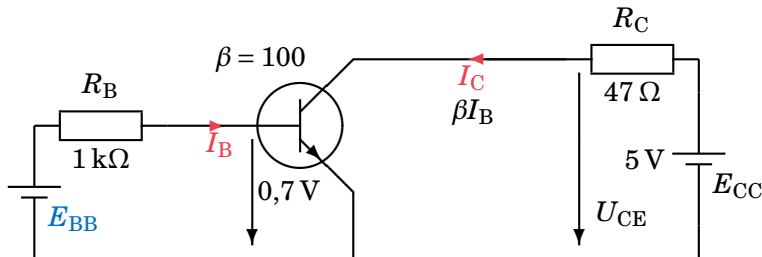
Toimintatilat, *Operation Modes*

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}

$-E_{BB} + R_B I_B + U_{BE} = 0$ ja $-U_{CE} - R_C I_C + E_{CC} = 0$, kirja s. 159–160.

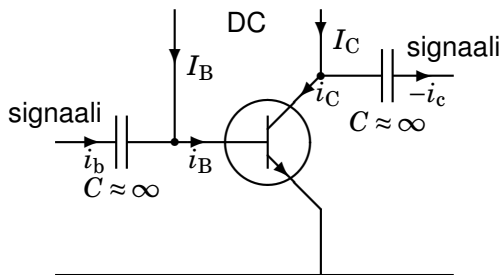


C	0,5 V	0 mA	$\cdot \beta =$	0 mA	5 V
C/A	0,7 V	0 mA	$\cdot \beta =$	0 mA	5 V
A	1,2 V	0,5 mA	$\cdot \beta =$	50 mA	2,65 V
A/S	1,7 V	1 mA	$\cdot \beta =$	100 mA	0,3 V
S	2,0 V	1,3 mA	\rightarrow	100 mA	0,3 V

Hyvä esimerkki. Kotitehtävä!

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.

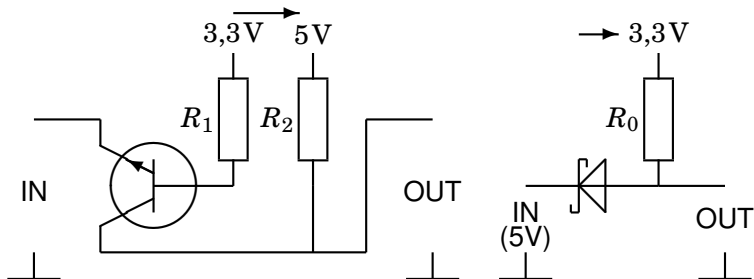
$$i_C \approx I_S e^{\frac{U_{BE} + u_{be}}{nU_T}} = \underbrace{\left(I_S e^{\frac{U_{BE}}{nU_T}} \right)}_{I_C} e^{\frac{u_{be}}{nU_T}}$$

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

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

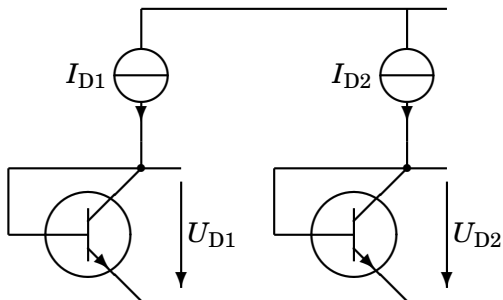
Logiikkatason muunnin 3,3 V / 5 V

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

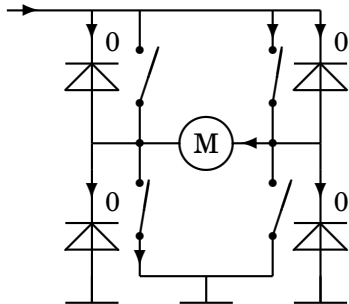
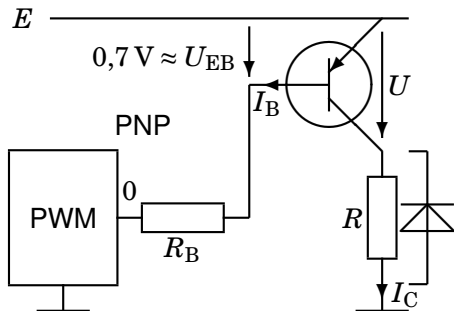
Diodi-kytkentä (B-C), lämpötilasta riippuva I_S eliminoiduu.



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

Kytkintransistorit, H-silta ja suojadiodit

PWM = pulssinleveysmodulaatio



Ensi viikolla

- ▶ Kanavatransistori eli FET
- ▶ Erityisesti N-kanavainen avauskanavatransistori
- ▶ Paljon yhteyksiä käytäntöön
- ▶ Mosfet ja mikropiirit
- ▶ CMOS eli Complementary MOS
- ▶ Mooren laki