



Aalto-yliopisto
Sähkötekniikan
korkeakoulu

Sähkötekniikka ja elektroniikka

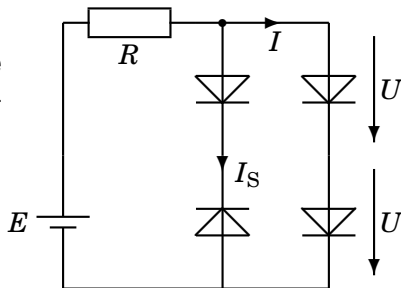
Kimmo Silvonen (X)

2.11.2022

Kotitehtävä 6.

Laske iteroimalla likiarvo jännitteelle U . Oleta kaikki diodit täysin identtisiksi. $E = 10,5 \text{ V}$, $R = 1 \text{ k}\Omega$, $nU_T = 50 \text{ mV}$, $I_S = 1 \text{ nA}$.

Diodin päästösuuntainen jännite on lähes aina alle yhden voltin.



$$-E + R(I_S + I) + 2U = 0 \Rightarrow -E + RI + 2U \approx 0 \quad (1)$$

$$I = I_S \left(e^{\frac{U}{nU_T}} - 1 \right) \approx I_S e^{\frac{U}{nU_T}} \quad (2)$$

$$U \approx \frac{E}{2} - \frac{R}{2} I_S e^{\frac{U}{nU_T}} \Rightarrow U \approx 800 \text{ mV} \quad (3)$$

$$\left(\frac{E - 2U}{R} = 8,9 \text{ mA} \approx I_S e^{\frac{U}{nU_T}} \right) \quad (4)$$

Bipolaaritransistori BJT

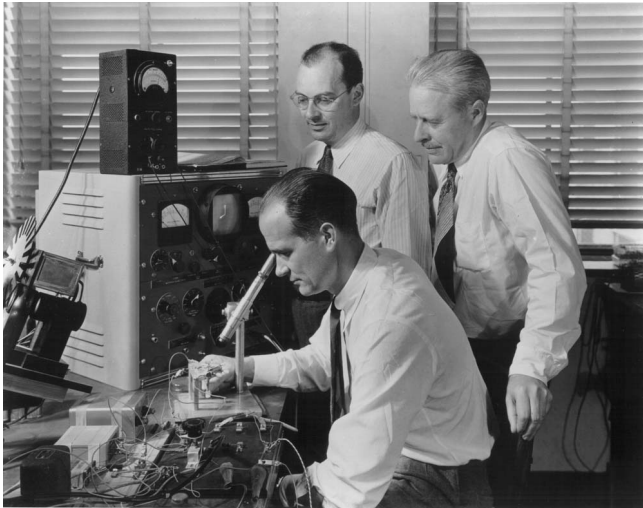
Versio 2.11.2022

Bipolar Junction Transistor, liekkö turhakin keksintö?

- ▶ BJT 23.12.1947. Täyttää 75 vuotta!
- ▶ 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 suprajohdavuuden teoriasta



A Replica of the First Transistor, alinna Base

Kopio: noin 140 kuutiotuumaa, alkuperäinen: ?

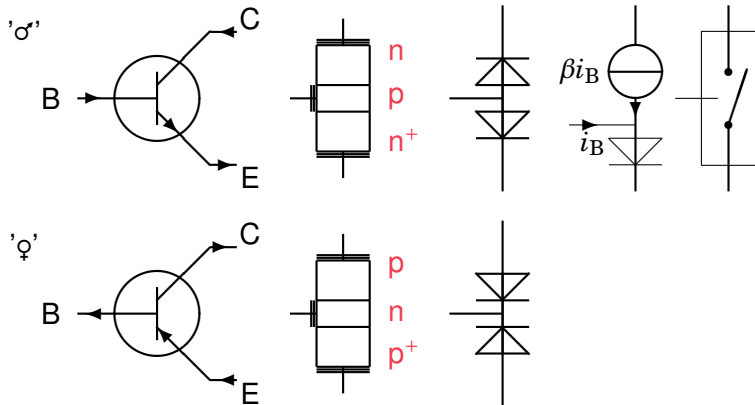


Bipolaaritransistori, *Applications*

- ▶ 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

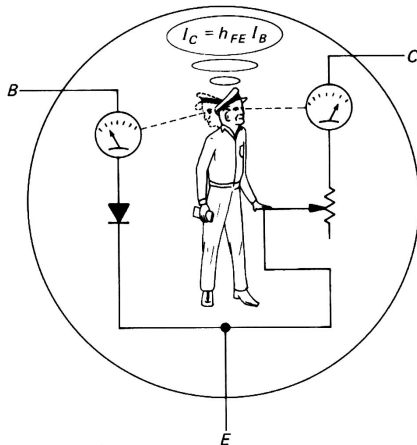
Selittää hyvin transistorin perustoiminnan, ks. seuraava sivu!

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

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

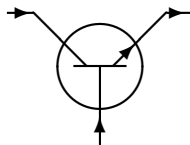
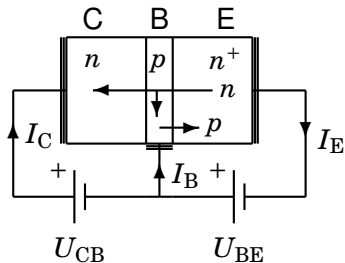
Operaatiovahvistinmiehen esikuva



©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.



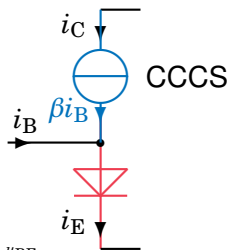
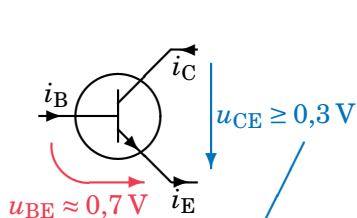
$$I_C = I_S e^{\frac{U_{BE}}{nU_T}}$$

$$n = 1$$

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

Virtavahvistus β (ja α) Current Gain

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



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

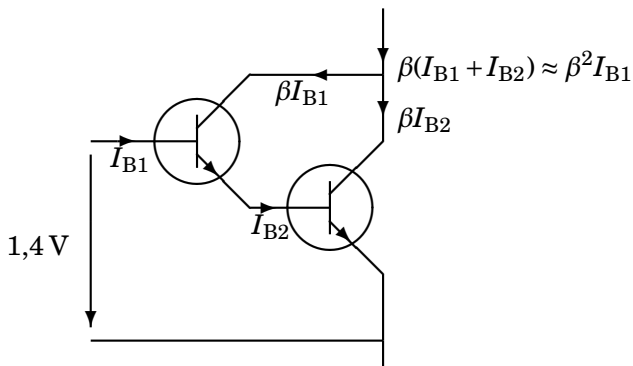
$$i_E = i_C + i_B = (\beta + 1)i_B$$

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

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

Darlington-pari

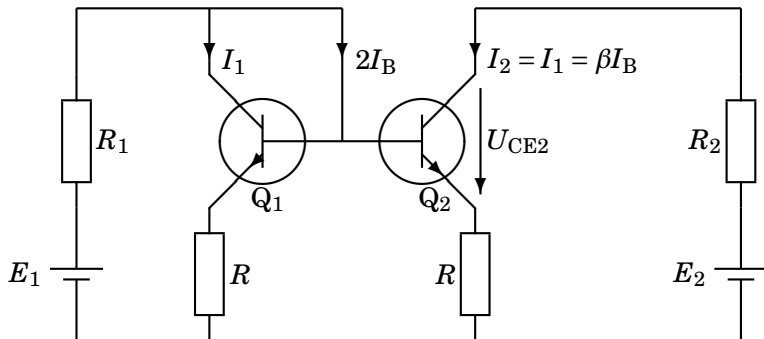
Virtavahvistus noin 10 000



Virtapeili

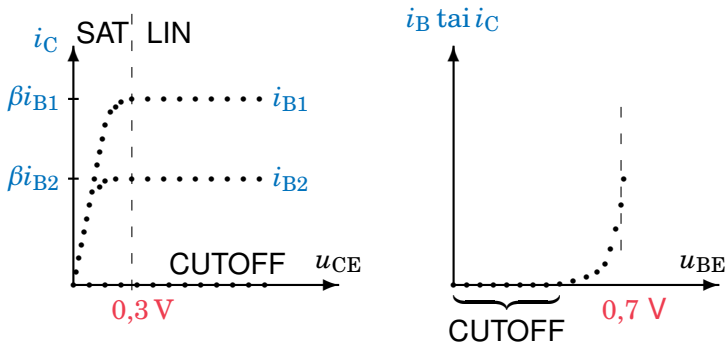
Vakiovirtalähde, vrt. laskuharjoitus 72.

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: $U_{CE2} \geq 0,3V$.



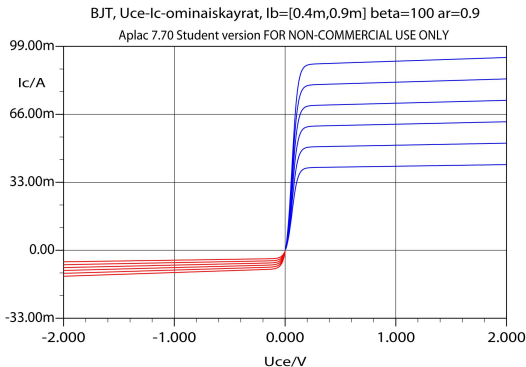
Ominaiskäyrät *Characteristic Curves*

Epäideaalisuus johtuu ominaiskäyristä; oikealla B–E-diodi.



Reverse vs. Forward

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



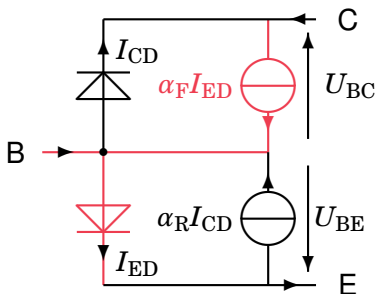
$$\beta_R \ll \beta = \beta_F$$

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

Ebers-Moll Equivalent Circuit

vr. dtf.pdf

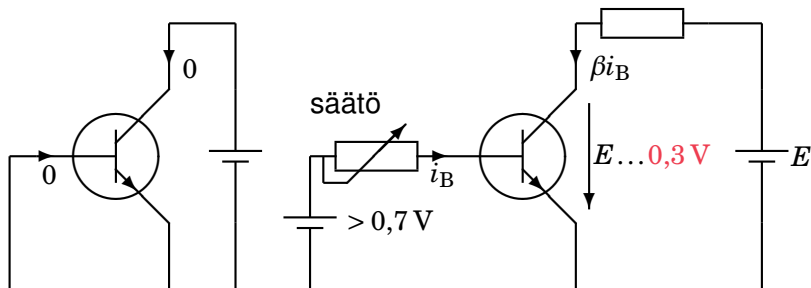
npn:



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

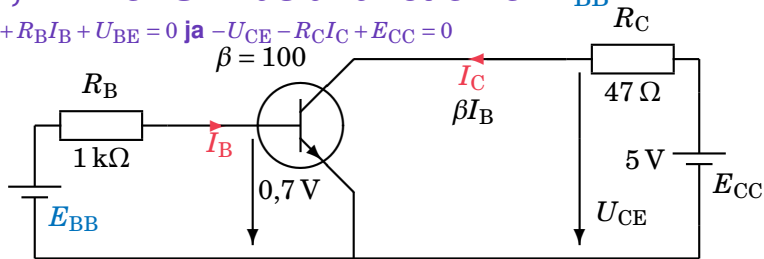
Toimintatilat, *Operation Modes*

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}

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

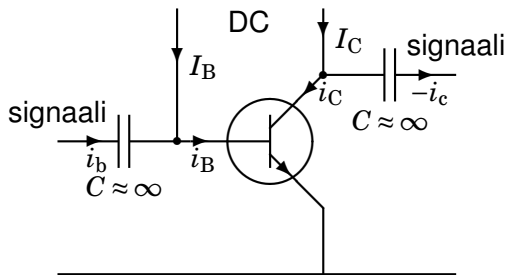


C	0,5 V	0 mA	$\cdot \beta =$	0 mA	5 V
C/A	0,7 V	0 mA	$\cdot \beta =$	0 mA	5 V
A	1,2 V	0,5 mA	$\cdot \beta =$	50 mA	2,65 V
A/S	1,7 V	1 mA	$\cdot \beta =$	100 mA	0,3 V
S	2,0 V	1,3 mA	\rightarrow	100 mA	0,3 V

Hyvä esimerkki. KJL:ssa kannattaa kiertää sellaista reittiä, ettei mukaan tarvitse ottaa jännitettä $U_{CB} = -U_{BC}$

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.

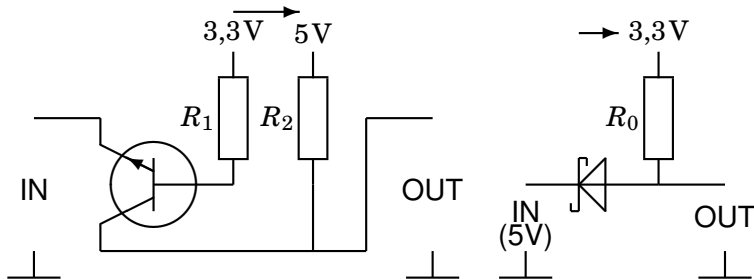
$$i_C \approx I_{Se} \frac{U_{BE} + u_{be}}{nU_T} = \left(\underbrace{I_{Se} \frac{U_{BE}}{nU_T}}_{I_C} \right) e^{\frac{u_{be}}{nU_T}}$$

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

Taylorin sarja: d.c. + signaali + särö(t) *distortion*, vrt. viime viikon tehtävä 64.

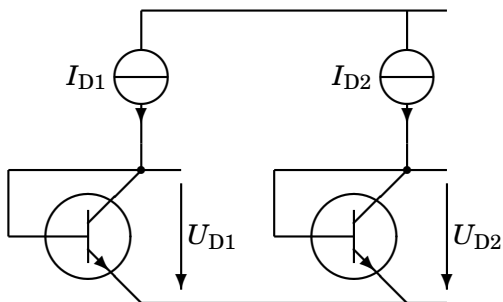
Logiikkatason muunnin 3,3 V / 5 V

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

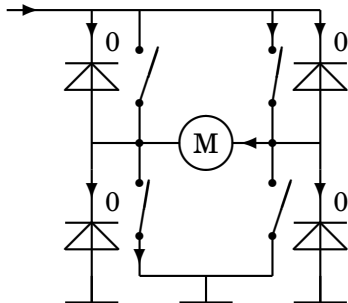
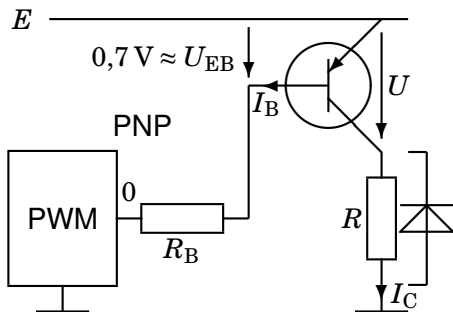
Diodi-kytkentä (B-C)



$$U_{D1} - U_{D2} = \frac{nkT}{q} \ln \left(\frac{I_{D1}}{I_{D2}} \right) = \frac{nkT}{q} \ln \left(\frac{I_{E1}}{I_{E2}} \right) \quad (5)$$

Kytkintransistorit, H-silta ja suojadiodit

PWM = pulssinleveysmodulaatio



Ensi viikolla

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