



Aalto-yliopisto
Sähkötekniikan
korkeakoulu

Sähkötekniikka ja elektroniikka

Kimmo Silvonen (X)

26.10.2022

Diodi ja puolijohteet

Luento 26.10.2022

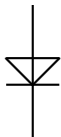
- ▶ Ideaalidiodi = kytkin
- ▶ Puolijohdediodi = epälineaarinen vastus
- ▶ Sovelluksia, mm. ilmaisimien ja LED, tasasuuntaus viim. viikolla
- ▶ Pii ja doping eli seostus epäpuhtauksilla
- ▶ *pn*-liitos
- ▶ Päästösuunta vs. estosuunta
- ▶ Elektroniikka on epälineaarista \Rightarrow iterointi
- ▶ D.C. vs. signaali, piensignaali-approksimaatio
- ▶ Kaaosteoria ja "Chuan diodi"
- ▶ Ensi viikolla: bipolaaritransistori (BJT)
- ▶ Lisätietoja: Elektroniikka ja sähkötekniikka, sivut 109–129

Toisen periodin sisällöstä

- ▶ Käsittelemme tärkeimpiä puolijohdekomponentteja: diodit, transistorit, fetit, operaatiovahvistimet, jänniteregulaattorit.
- ▶ Laskut pohjautuvat laskuharjoitukseen numero 1.
- ▶ Merkittävin lisäpiirre on komponenttien ja piiriyhtälöiden epälineaarisuus sekä monien komponenttien kolminapaisuus.
- ▶ Harjoitusten 2–5 sisällöt ovat edelleen relevantteja, mutta niitä ei yksinkertaisuuden vuoksi sotketa tähän.

Mistä elektroniikka koostuu (s.l.)

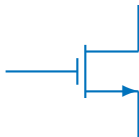
- ▶ Puolijohdekomponentit:
 - ▶ Diskreetit, esim. *Diodi*, *BJT*, *FET*
 - ▶ Monoliitti-*IC*, esim. *Opamp*, *CMOS*, *ASIC*
 - ▶ Hybridi-*IC*, esim. monet *RF*-mikropiirit
- ▶ "Passiivit": *R, L, C*, siirtojohto, muuntaja, ym.
- ▶ Anturi, toimilaite, muutin (*sensor, actuator, transducer*)
- ▶ Näytöt, liitännät, ohjelmistot



Diodi



Transistori BJT

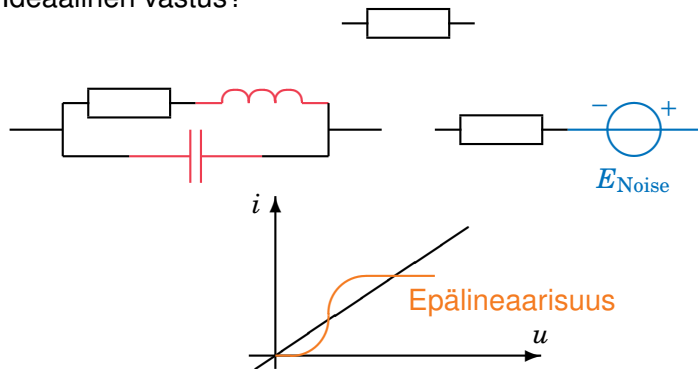


Kanavatransistori (MOS)FET

Parasiitit, kohina, särö

Elektroniikan komponentit ovat epäideaalisia, loissuureet ovat aina läsnä!

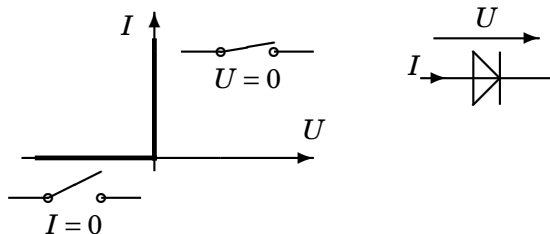
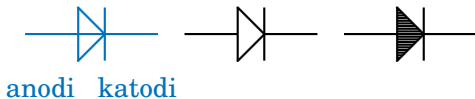
Ideaalinen vastus?



Kohinaa syntyy kaikkialla ja epälineaarisuus tuottaa säröä.

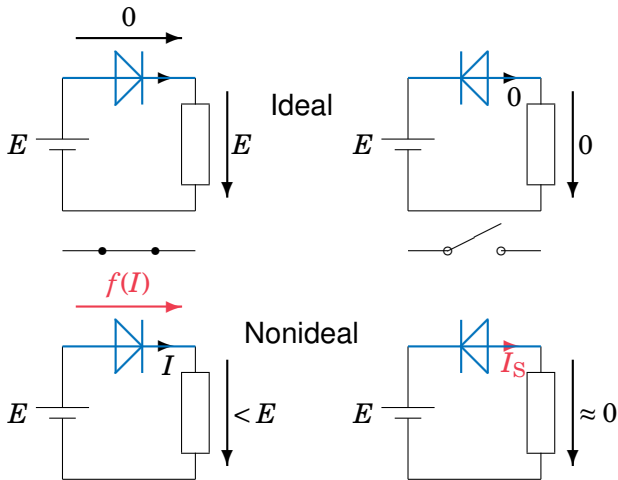
Ideaalidiodi, cf. Switch

Ominaiskäyrä koostuu kahdesta suorasta; voidaan mallintaa kytkimellä



Ideaalidiodi (yllä) vs. puolijohdediodi (alla)

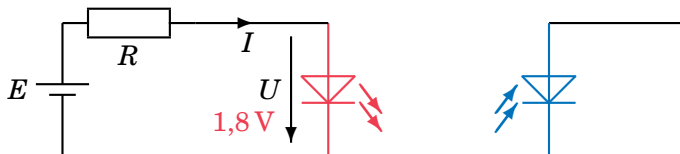
Päästösuunta/estosuunta. *Ideal Diode vs. Semiconductor Diode, forward/reverse.*



LED = loistediodi vs. fotodiodi

Myös laserdiodi (optinen tietoliikenne) ja IR = *infrared*

Esimerkkinä LED merkkivalona, oikealla fotodiodi:

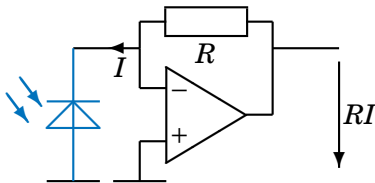


Vrt. kaukosäädin, langaton näppäimistö ja hiiri (IR, usein kuitenkin Bluetooth-radioyhteys)

Ledeillä ja muilla diodeilla sallittu jänniteikkuna on hyvin kapea: U hieman liian pieni \Rightarrow ei johda, U hieman liian suuri \Rightarrow kärkehtää!

Fotodiodin sovelluskytkentä

Vuotovirta I on verrannollinen valon intensiteettiin



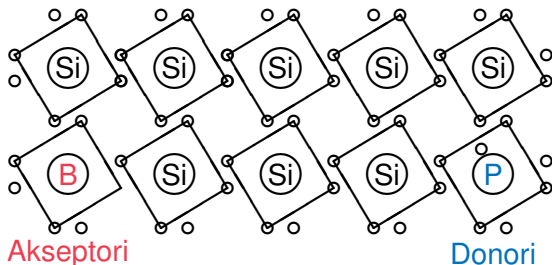
Seostettu puolijohde, *pn*-liitos

Doping, pn-junction, piihin on seostettu heikosti booria tai fosforia

Kovalenttinen sidos

(Si) IV + III (B) = p-
tyyppinen puolijohde

(Si) IV + V (P) = n-
tyyppinen puolijohde

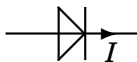
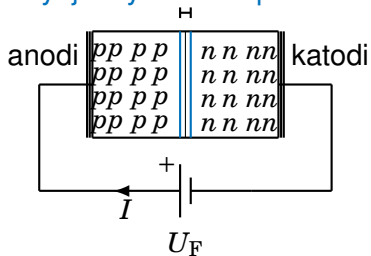


Päästösuunta, *Forward Bias*

Tyhjennysalue *Depletion Region decreases due to the forward Voltage*

n = elektronit, p = aukot

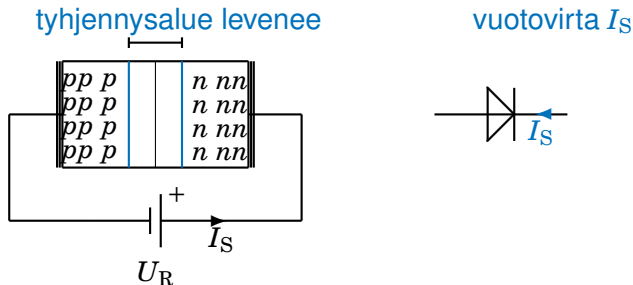
tyhjennysalue kapenee



Estosuunta, *Reverse Bias*

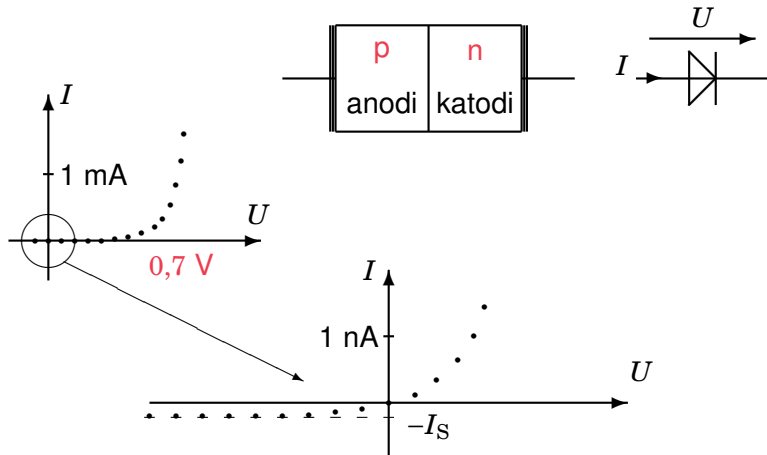
Depletion Region increases, but a small Saturation Current leaks

Saturaatiovirta I_S (estosuuntainen vuotovirta)
ei juuri riipu jännitteestä \Rightarrow 'kyllästysvirta'



Puolijohdediodi, pn -liitos

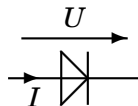
Semiconductor Diode, pn -junction; 0,7 V (vrt. lab.)



Ominaiskäyrä $i = f(u)$ ja Einsteinin yhtälö: U_T

Characteristic Curve

Epälineaarinen vastus



$$I = I_S(e^{\frac{U}{nU_T}} - 1) \approx \begin{cases} I_S e^{\frac{U}{nU_T}} & U \gg nU_T \\ 0 & U \approx 0 \\ I_S(-1) & U \ll 0 \end{cases}$$

$$U_T = \frac{kT}{q} \approx 25 \text{ mV} \quad q = 1,60 \cdot 10^{-19} \text{ As} \quad k = 1,38 \cdot 10^{-23} \frac{\text{J}}{\text{K}}$$

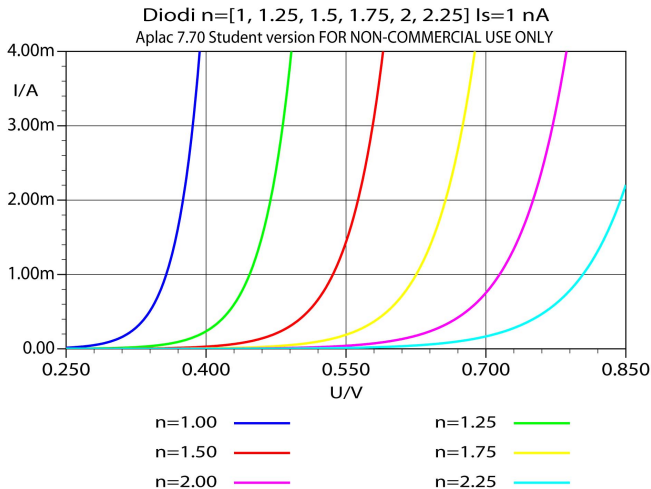
'Lämpöjännite'

Alkeisvaraus

'Boltzimienn' vakio

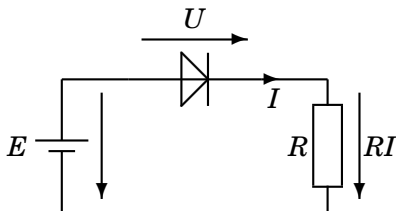
Emissiokerroin $n \approx 2$ (Diode), $n \approx 1$ (BJT)

Emission Coefficient, Ideality Factor



Epälineaarinen yhtälö

Nonlinear Equation



$$U = E - RI$$

$$U = E - RI_S(e^{\frac{U}{nU_T}} - 1)$$

Newton–Raphson-iterointi:

Iterointi

Kokeillaan eri U :n arvoilla

$$E = 10 \text{ V}, R = 1 \text{ k}\Omega, I_S = 1 \text{ nA}, n = 2, U_T = 25 \text{ mV}$$

U/V	$U \approx E - RI_S e^{\frac{U}{nU_T}} / \text{V}$	
0,7	8,80	$\gg 0,7$
0,8	1,11	$> 0,8$
0,81	-0,85	$< 0,81$
0,802	0,75	$\approx 0,80$
0,801727	0,802 \Rightarrow	$U \approx 0,802 \text{ V}$

$$I = \frac{E - U}{R} \approx 9,198 \text{ mA}$$

$$I = I_S (e^{\frac{U}{nU_T}} - 1) \approx 9,249 \text{ mA}$$

Tasavirta ja signaali *DC vs. signal*

Kansainvälinen merkintäsopimus (IEC): *total* u or $i = DC + \text{pure signal}$

Tasavirta: iso kirjain, iso alaindeksi: $U_D = R_D I_D$

Signaali: pieni kirjain, pieni alaindeksi: $u_d = r_d i_d$

Kokonaisvirta: pieni kirjain, iso alaindeksi:

$$\begin{aligned} u_D &= U_D + u_d & U_D &= u_{AVE} & u_d &= \Delta u_D \\ i_D &= I_D + i_d & I_D &= i_{AVE} & i_d &= \Delta i_D \end{aligned}$$

Iso kirjain, pieni alaindeksi: ei vakiintunutta merkitystä, mutta tätäkin joskus näkee.

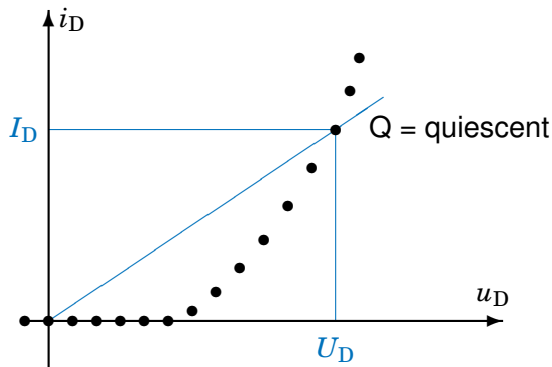
IEC = *International Electrotechnical Commission*

Toimintapiste ja staattinen resistanssi

Operating Point Q, static (DC) Resistance R_D

$$u_D = U_D = U_Q = R_D I_D$$

$$i_D = I_D = I_Q = I_S \left(e^{\frac{U_D}{nU_T}} - 1 \right)$$

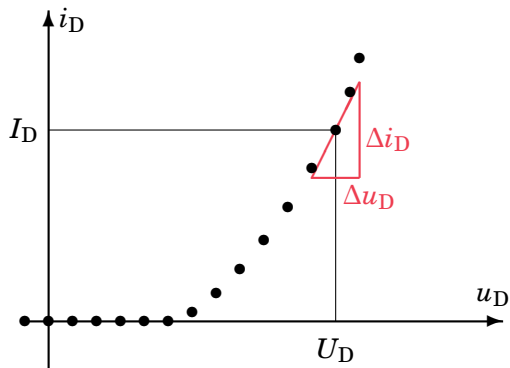


Dynaaminen resistanssi, muutos käyrällä

Dynamic (ac) Resistance near the Operating Point

$$i_D = I_S(e^{\frac{u_D}{nU_T}} - 1)$$

$$r_d = \frac{\Delta u_D}{\Delta i_D} \approx \frac{nU_T}{I_D}$$



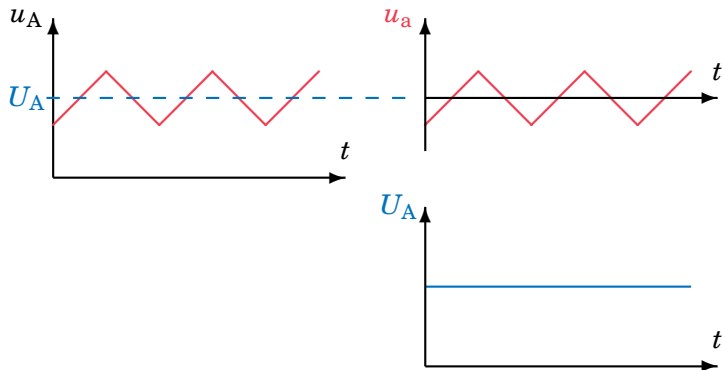
Piensignaalianalyysi

Small-Signal Analysis

- ▶ Dynaaminen resistanssi ja piensignaalianalyysi liittyvät mm. tehtävään 64.
- ▶ Signaalin käyttäytyminen epälineaarisissa komponenteissa
- ▶ Käyrän linearisointi toimintapisteessä; siksi 'vain' **pien...**
- ▶ Lineaarisilla komponenteilla, kuten R , ei ole eroa 'pien' vs. 'suur'
- ▶ DC-lähteitä ei oteta huomioon, nollataan
- ▶ Esim. vahvistimen vahvistus ja tuloresistanssi lasketaan piensignaalianalyysillä

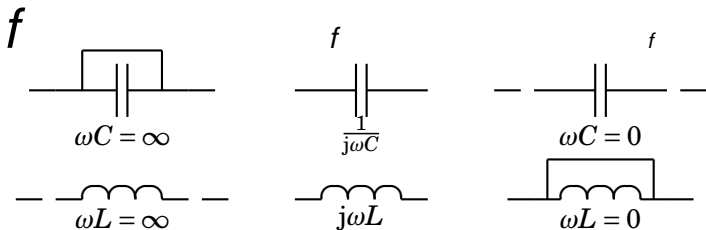
Tasajännitteen päällä ratsastava signaali

Little red signal riding on a smooth d.c.



Hyvin suuri – keskisuuri – hyvin pieni taajuus

Taajuusalueapproksimaatit ja komponenttien käsittely

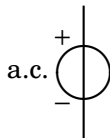
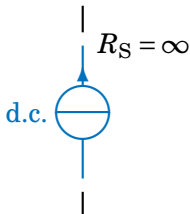
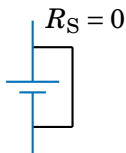


D.c.-lähteiden nollaus

Linear

Epälin.

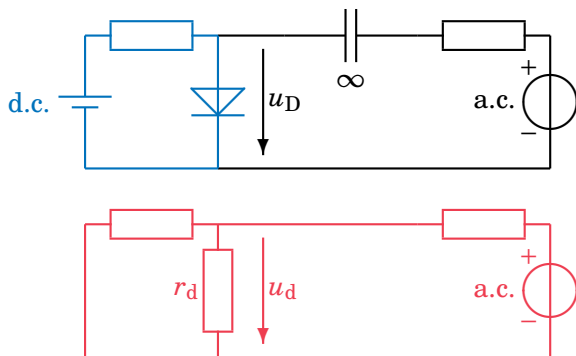
Signaalilähteet



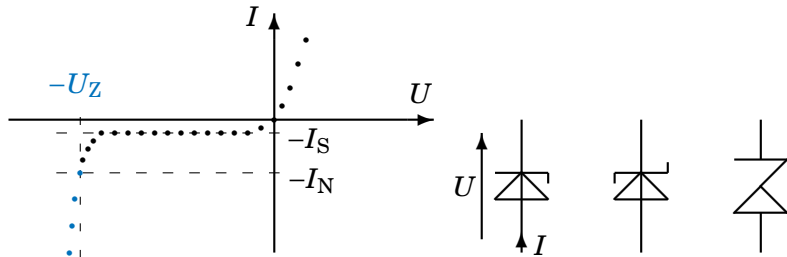
Tasavirta- vs. piensignaalianalyysi

DC vs. Small Signal Analysis

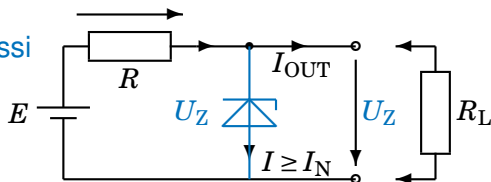
Signaali läpäisee tasajännitelähteen ja ison kondensaattorin. Epälineaarinen komponentti näkyy dynaamisen resistanssin määräämänä vastuksena r_d (tarkka approksimaatio).



Zeneriodi, Voltage Reference for small I_{OUT}



Jännitereferenssi
(pieni I_{OUT})



$$E \geq R(I_{OUT} + I_N) + U_Z$$

Chua's Circuit, *Butterfly Effect*

Yksinkertaisin mahdollinen kaottisesti toimiva piiri, ks. [chua-circuit.i.txt](#)

Yleinen kaaosteorian testialusta (Leon Chua).

Vasemmalla Chuan diodi (negatiivista resistanssia sisältävä epälineaarinen komponentti, joka tosin ei ole diodi).

MyCossa *APLAC-netlist*, piirrä(n) $y = u_2$ vs. $x = u_1$

