

SÄHKÖTEKNIikka JA ELEKTRONIIKKA

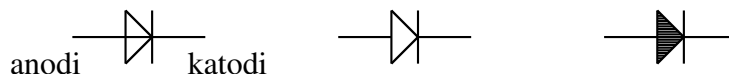
tXt-6 2017, Kimmo Silvonen

Osa VI, 6.11.2017

1 Diodit

Tämä luku esittelee diodipiirin matemaattista käsittelyä. Diodin ja muiden puolijohdekomponenttien väistämätön epälineaarisuus ja siitä juontuva piensignaalianalyysi ovat suorastaan elektroniikan kulmakiviä. Tasa-suuntaajia ja teholähteitä, jotka ovat diodien tärkeitä käyttökohteita, käsitellään myöhemmin.

Diodi päästää virtaa läpi vain piirrosmerkillä olevan nuolen suuntaan. Diodissa on kaksi elektrodiä, **anodi** ja **katodi** (kuva 1) — näin oli aikoinaan myös samannimisessä elektroniputkessa. Virta kulkee diodissa siis anodilta katodille. IEC:n standardi suosittelee kuvan 1 vasenta piirrosmerkkiä.

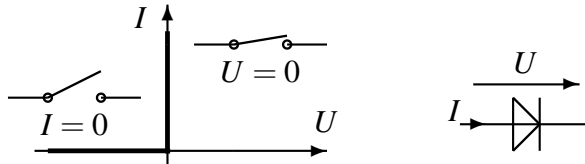


Kuva 1. Diodin piirrosmerkkejä; vasen on IEC:n standardin mukainen.

Puolijohdediodia voidaan usein approksimoida **ideaalidiodilla**. Sen toiminnan määrittelee yksikäsitteisesti kuvan 2 **ominaiskäyrä**. Ideaalidiodi on siis käytännön diodin yksinkertaistettu piirimalli.

Negatiivisilla jännitteillä ideaalidiodin virta on nolla, koska virta ei kulje piirrosmerkin nuolta vastaan. Diodi vastaa tällöin virtapiirissä katkosta. Nuolen suuntaan virta kulkee esteettömästi eli diodi vastaa oikosulkua.

Ideaalidiodin toimintaa voidaan verrata virran suunnasta riippuvaan kytkimeen. Sen jännitehäviö on suurellakin positiivisella virralla nolla. Kun virta kulkee, sanotaan diodin olevan **päästö- eli myötäsuunnassa** (*forward biased*). Muulloin diodi on **estosuunnassa** (*reverse biased*).



Kuva 2. Ideaalidiodin ominaiskäyrä. Kun diodin jännite U on negatiivinen, on virta $I = 0$ (vrt. kytkin auki). Jos $I > 0$, on jännite nolla (vrt. kytkin kiinni). Käytännön diodeissa jännite tai virta on nolla vain origossa; kaareva ominaiskäyrä kulkee siis origon kautta.

Diodi ei tietenkään käytännössä toimi täysin ideaalisesti. Puolijohdediodi jäljittelee kuitenkin ideaalidiodin toimintaa niin hyvin, että esimerkiksi tasasuuntaajien analyysissä ei tarkempia piirimalleja yleensä tarvita. Fet-kytkennöillä on mahdollista jäljitellä ideaalidiodia, koska fetin pieni kanavaresistanssi mahdollistaa hyvin pienen jännitehäviön. Käytännön diodin **epälineaarinen ominaiskäyrä** ei ole pelkästään huono asia, vaan se tarjoaa piirisuunnittelijoille jotain sellaista, mitä ideaalidiodi ei pysty tarjoamaan. Diodin **eksponentiaalisen** ominaiskäyrän avulla on mahdollista toteuttaa mm. vastaanottimissa tarvittava sekoitin (muodostaa kahden taajuuden erotuksen tai summan), logaritminen tai antilogaritminen vahvistin, analoginen kertoja tai jakaja, ym.

Luvut 2 ja 3 käsitellään vain pintapuolisesti!

2 Puolijohdefysiikkaa

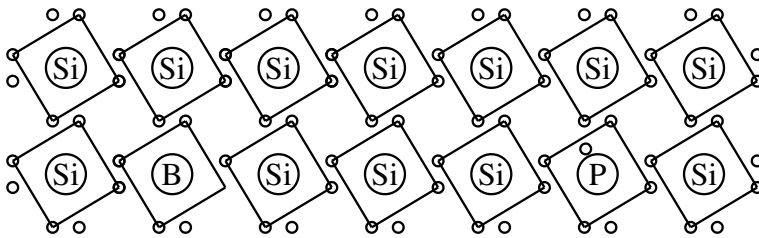
2.1 Itseispuolijohde

Ennen puolijohdediodin käsittelyä tutustutaan hieman puolijohdemateriaaleihin ja kiinteän olomuodon fysiikkaan. Atomin eri kuorille mahtuu elektroneja korkeintaan seuraavat määrät: ensimmäiselle 2, toiselle 8, ..., ja viimein n :nnelle $2n^2$. Pääryhmän roomalainen järjestysnumero kertoo (he-

liumia lukuun ottamatta) atomin ulkokuorella sijaitsevien **valenssielektronien** lukumäärän. Yleisin puolijohdekomponenteissa käytetty alkuaine on *hiiliryhmän* eli IV-ryhmän **pii** (Si).

Piiatomien välisiin sidoksiin liittyy neljä elektronia jokaisesta piiatomista; pii on siis *kvadrivalentti*. Näin muodostuu **kovalenttisia sidoksia**, joista elektroneja ei meinaa saada irti *kirveelläkään*. **Vapaita varauksen-kuljettajia**, jotka siis pystyisivät liikkumaan ja kuljettamaan virtaa, ei juurikaan ole. Puhdas pii onkin sähkötekniikan kannalta pikemminkin eriste — tosin melko huono sellainen. Parhailla johteilla (kulta, hopea, kupari) valenssielektroneja on tyypillisesti vain yksi, tosin esimerkiksi alumiinilla kolme.

Puhdasta eli seostamatonta piitä sanotaan **itseispuolijohdeeksi** (*intrinsic semiconductor*). Kuva 3 esittää seostamattoman piin kiderakennetta.



Kuva 3. Puhtaan seostamattoman piin kiderakenne on kovalenttisten sidosten lujittama. Isot ympyrät ovat pii- tai epäpuhtausatomien ytimiä ja pienet ympyrät valenssielektroneja. Huomaa kuinka seosteena oleva fosforiatomi P oikealla tuottaa kiderakenteeseen sopimattoman elektronin ja toisaalta booriatomi B vasemmalla jättää rakenteessa yhden paikan tyhjäksi: syntyy siis aukko. Puolijohdediodi eli *pn*-liitos syntyy juuri näin, siis seostamalla piikiteen vastakkaiset päädyt eri epäpuhtauksilla.

Terminen ionisaatio saattaa irrottaa kovalenttisesta sidoksesta elektronin, jolloin siihen kohtaan jää aukko. Irronnut elektroni toimii **vapaina varauksenkuljettajana**, Jos aukko imaisee elektronin viereisestä atomista, siirtyy aukko toiseen paikkaan. Kun elektroni pujahtaa aukkoon, on kyseessä **rekombinaatio**. Koska **aukot** voivat liikkua paikasta toiseen, sanotaan niidenkin toimivan vapaina varauksenkuljettajina. Aukko vastaa alkeisvarauksen suuruista positiivista varausta. Aukon varaus on myös yhtä suuri kuin protonin varaus. Puhtaassa puolijohteessa on vapaita elektroneja ja aukkoja yhtä paljon, mutta seostetussa puolijohteessa näin ei ole. Tällöin onkin suuri merkitys sillä, ovatko varauksenkuljettajat suurimmaksi osaksi aukkoja vai elektroneja. Tämän määrää käytetty seostemateriaali.

2.2 Puolijohteet ja seostus eli *doping*

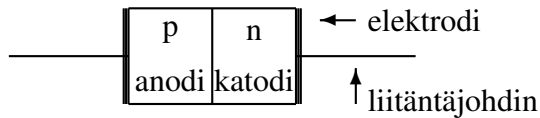
Vain noin **kolme** piiatomiä **kymmenestä biljoonasta** tuottaa vapaita varauksenkuljettajia ilman ulkoista herätettä. Siksi epäpuhtaudet lisäävät puolijohteen johtavuutta merkittävästi jo hyvin pieninäkin määrinä. Kun IV ryhmän alkuaineeseen **seostetaan** (*doping*) hyvin vähäinen määrä (suhteessa $1 : 10^6 \dots 1 : 10^8$) *pentavalenttia* eli V ryhmän alkuainetta (esim. fosfori, P) syntyy **n-tyyppinen** puolijohde. Viides valenssielektroni jää tavaltaan piiatomien kanssa muodostuvien sidosten ulkopuolelle (vrt. kuva 3). Jokaisesta epäpuhtausatomista (**donorista** eli "luovuttajasta") jää siis yksi **elektroni** vapaaksi varauksenkuljettajaksi.

Vastaavasti lisäämällä IV ryhmän alkuaineeseen *trivalenttia* III ryhmän alkuainetta (kuten boori, B) syntyy **p-tyyppinen** puolijohde. Tällöin yhteensä seitsemässä valenssielektronissa on yhden elektronin vajoaus, joka herkästi korvataan imaisemalla siihen muualta irtoava elektroni. Aukot siis syntyvät, kun epäpuhtausatomit (**akseptorit** eli "hyväksyjät") ryöstävät yhden valenssielektronin Si-atomeilta.

Pii on jo melkein kokonaan syrjäyttänyt muut IV ryhmän aineet, kuten germaniumin (Ge). Myös eräät III-V **yhdistelmäpuolijohteet**, kuten GaAs (gallium-arsenidi), GaN (gallium-nitridi), GaP (gallium-fosfidi) ja InP (indium-fosfidi), sekä II-VI yhdistelmä CdS (kadmium-sulfidi), toimivat seostettujen puolijohteiden tavoin. Ensimmäiset puolijohdediodit valmistettiin VI ryhmän seleenistä (Se); niitä käytettiin ainakin tasasuuntaajina. Jo sitä aiemmin diodina käytettiin diodi-tyyppistä elektroniputkea.

3 Puolijohdediodi ja pn -liitos

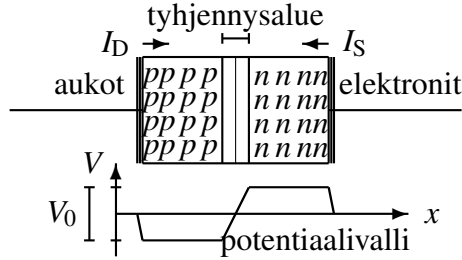
Kahden vastakkaismerkkisen puolijohteen rajapintaa kutsutaan nimellä pn -liitos. Käytännössä p- ja n-tyyppiset puoliskot tehdään yhdelle ja samalle puolijohdepalalle käyttäen eri puolilla erilaisia seosteaineita. Tällaista komponenttia nimitetään puolijohdediodiksi. Kuva 4 esittää puolijohdediodin periaatteellista rakennetta. Paksut mustat viivat pn -liitoksen päissä ovat metallointeja eli **elektrodeja**, joihin hopeiset johtimet on liitetty **bondaamalla** (eräänlaista hitsaamista). Diodin ulkopuolella näkyvät liitäntäjohdot ovat yleensä alumiinia.



Kuva 4. Puolijohdediodi koostuu p- ja n-tyyppisen puolijohteen rajapinnasta; molemmat ovat käytännössä samalla piipalalla.

3.1 Diodi estosuunnassa, tyhjennysalue

Kuvassa 5 esitetään **tyhjennysalueen** (*depletion region, space-charge region*) muodostuminen. Aukot ja elektronit voivat kohdatessaan yhtyä eli rekombinoitua, koska **erimerkkiset varaukset vetävät toisiaan** puoleensa. Rekombinaation tuloksena aina kaksi vapaata varauksenkuljettajaa kumoavat toisensa. Jos tietyn alueen (lähes) kaikki varauksenkuljettajat rekombinoituvat, syntyy tyhjennysalue. Usein pn -liitoksessa toisen puolen seostus on voimakkaampi; tällöin tyhjennysalue ulottuu pitemmälle heikommin seostetulla puolella, koska rekombinaatioon osallistuvia varauksenkuljettajia ei muuten riitä tarpeeksi.



Kuva 5. Tyhjennysalue jännitteettömässä pn -liitoksessa. Rajapinnan yli diffuusion vaikutuksesta siirtyneet varauksenkuljettajat synnyttävät diffuusiiovirran I_D . Kuvaan on merkitty myös vähemmistövarauksenkuljettajien aiheuttama *drift*-virta I_S , joka on virrattomassa (ja jännitteettömässä) diodissa yhtä suuri kuin I_D . Rajapinnan molemmilla puolilla aukot ja elektronit rekombinoituvat, jolloin rajapinnan lähistölle jää tyhjennysalue, jossa ei ole vapaita varauksenkuljettajia. Diffuusion vaikutus näkyy vain rajapinnan lähistöllä, koska rajapinnasta kauempana olevat varaukset eivät enää jaksa houkutella rajantakaisia vastakkaismerkkisiä varauksenkuljettajia "ylämäkeen" potentiaalivallin yli.

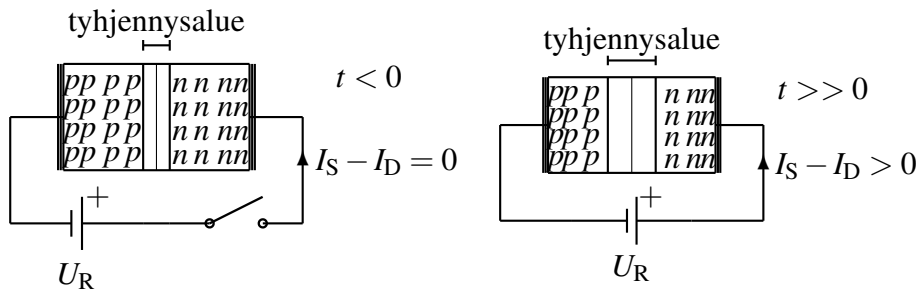
Kuvaan merkityt **enemmistövarauksenkuljettajat** p ja n ovat peräisin seostetuista epäpuhtausatomeista. Niiden joukossa olevia termisen ionisaation hereille ravistelemia vastakkaismerkkisiä **vähemmistövarauksenkuljettajia** ei ole piirretty näkyviin, koska niiden suhteellinen määrä on merkityksetön. Vähemmistövarauksenkuljettajat ajautuvat kuitenkin tyhjennysalueen yli sähkökentän avittamina. Rajapinnan oikealla puolella oleva positiivinen varaus laskettelee potentiaalivallia pitkin alas sähkökentän suuntaisesti eli korkeammasta potentiaalista matalampaan. Tämä synnyttää diodin läpi *drift*-virran I_S , joka virrattomassa diodissa kumoaa diffuusiiovirran I_D . I_S koostuu termisen ionisaation irrottamista varauksenkuljettajista ja on siksi voimakkaasti lämpötilan funktio.

Koska tyhjennysalue oli alunperin sähköisesti neutraali (seostettukaan pii ei ole ionisoitua), tuovat rajan yli siirtyneet varauksenkuljettajat rajapinnan vasemmalle puolelle negatiivisen ja oikealle puolelle positiivisen varauksen. Tämä näkyy **potentiaalivallina** V_0 , joka täytyy kumota ulkopuolisella vastakkaismerkkisellä jännitteellä, jotta virta alkaa kulkea. Yksinkertaistaen voidaan sanoa, että diodin "kynnysjännite" perustuu tähän seikkaan.

Huomaa, että potentiaalivalli ei näy ulospäin, koska metallin ja puolijohteen rajapintaan diodin päissä syntyy automaattisesti vastakkaisuun-

tainen **kontaktipotentiaali**, joka kumooa potentiaalivallin. Diodin päissä metallin ja piin rajapintaan syntyy myös tyhjennysalue. Tämä tyhjennysalue tehdään tarkoituksellisesti ohueksi seostamalla puolijohde voimakkaasti metallielektrodin läheisyydessä. Tämä on yleinen käytäntö useimmissa puolijohdekomponenteissa. Koska tyhjennysalueella ei ole vapaita varauksenkuljettajia, on sen vastus suuri. Ohuella tyhjennysalueella ei ole kuitenkaan kovin suurta merkitystä diodin johtavuuden kannalta. Ratkaisevaksi jää keskellä olevan leveän tyhjennysalueen leveys. Samantapaisia puolijohdefysiikkaan verrattavia ilmiöitä syntyy hapettuneissa liittimissä ja kytkimien kontakteissa. Tällöin kyseessä ei ole pelkästään suurentunut resistanssi, vaan liitoksen sähköinen epälinearisuus aiheuttaa myös säröä analogiasignaaliin.

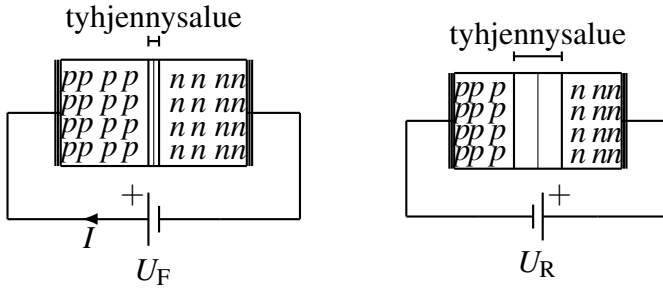
Tyhjennysalueen leveyttä voidaan säätää ulkopuolisella jännitteellä. Estosuuntainen jännite U_R levittää tyhjennysaluetta entisestään (kuva 6).



Kuva 6. Estosuuntaisen jännitteen kytkeminen saa aikaan tyhjennysalueen leventymisen. Diffuusiovirta I_D pienenee pienemmäksi kuin *drift*-virta I_S . Kuitenkin heti kytkemisen jälkeen diodin läpi kulkee suurehko **takavirtapulssi**, joka varaa tyhjennysalueen kapasitanssin ja nostaa sen jännitteen vastaamaan ulkopuolista jännitettä U_R , tyhjennysalueen jännitteeksi tulee $V_0 + U_R$, missä V_0 on potentiaalivallin korkeus.

3.2 Diodi päästösuunnassa

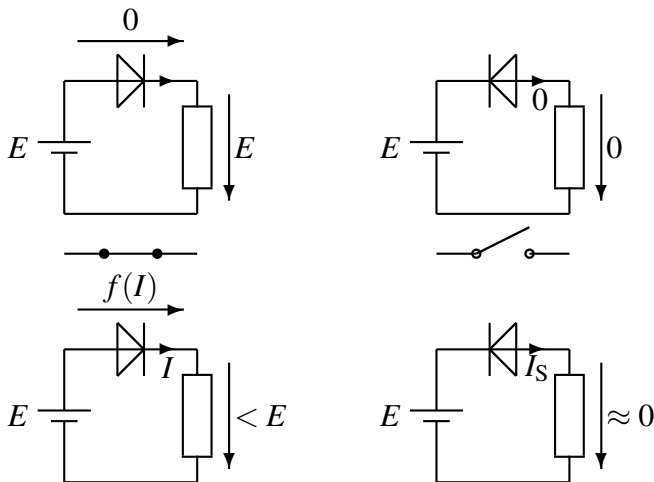
Kun jännitteen U_F positiivinen napa kytketään anodille eli *p*-puolelle, hylkii se samanmerkkisiä aukkoja ja vastaavasti negatiivinen potentiaali *n*-puolella eli katodilla hylkii elektroneja (kuva 7). Tämä johtaa tyhjennysalueen kaventumiseen. Virta alkaa kulkea erittäin voimakkaasti, kun tyhjennysalueen leveys kaventuu nolllaksi.



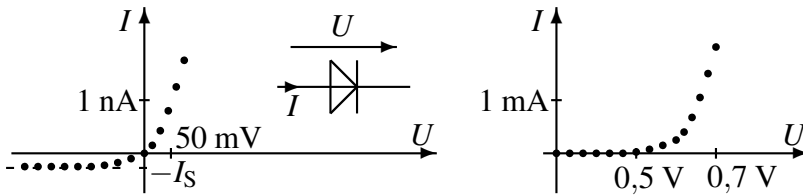
Kuva 7. Jännitteen suunta ja suuruus määräävät tyhjennysalueen leveyden. Tyhjennysalueen läpi menee vain pieni vuotovirta, ellei jännite päästösuunnassa (U_F) ylitä kynnsjännitettä tai estosuunnassa (U_R) läpilyöntijännitettä.

4 Diodin ominaiskäyrä

Puolijohdediodi toimii lähes samalla tavalla kuin ideaaliodidi (vrt. kuva 8). Myös tavallinen transistori (BJT) ja liitoskanavatransistori (JFET) perustuvat pn -liitokseen, mutta MOSFETin rakenne on hieman erilainen. Kuva 9 esittää puolijohdediodin ominaiskäyrää.



Kuva 8. Ideaaliodidin (yllä) ja puolijohdediodidin (alla) ero: vasemmalla päästösuunta (kytkin kiinni), oikealla estosuunta (kytkin auki). Käytännön puolijohdediodissa on pieni estosuuntainen vuotovirta I_S ja päästösuuntainen jännitehäviö $f(I)$ riippuu virran voimakkuudesta (f tarkoittaa siis funktiota).



Kuva 9. Puolijohdediodin ominaiskäyrä. Käyrän "kulmapisteen" sijainti riippuu erityisesti pystyakselin asteikon skaalauksesta. Huomaa tämä ero yllä olevissa saman diodin ominaiskäyrissä!

Kuvan 9 ominaiskäyristä nähdään, että negatiivisilla jännitteillä diodin virta on (lähes) jännitteestä riippumaton (negatiivinen) vakio $-I_S$. Virta tavallaan kyllästyy tähän arvoon, kun jännite U muuttuu negatiiviseksi. Virtaa $I_S > 0$ ($S = \textit{saturation}$) nimitetään diodin **kyllästys-** eli **vuotovirräksi**. Ideaalisen diodin vuotovirta olisi nolla, mutta käytännön diodillakin se on tyypillisesti vain nanoampeerin tai sen murto-osien luokkaa. Koska vuotovirta on hyvin pieni, se ei yleensä erotu piirrettyissä käyrissä (vrt. kuvan 9 oikeanpuoleinen käyrä; huomaa käyrien erilaiset asteikot).

Diodin virta alkaa selvästi kasvaa, kun jännite ylittää **kynnysjännitteen** (noin 0,5 V). Suurella virralla jännite pysyy virrasta riippumatta suunnilleen vakiona. Usein oletetaan yksinkertaistaen, että diodin jännitehäviö on likimain 0,7 V. Diodin virran ja jännitteen välinen ominaiskäyrä on kuitenkin siis eksponentiaalisesti kasvava — mitään selvää kynnysjännitettä ei todellisuudessa ole. Käyrä kulkee aina origon kautta kuten kuvasta 9 nähtiin. Ominaiskäyrän yhtälö on eksponentiaalinen:

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

missä $n = \eta$ on **emissiokerroin** eli **ideaalisuusvakio** (*ideality factor*), jonka arvo vaihtelee yleensä välillä 1 ... 2. Emissiokertoimelle ei ole yksinkertaista fysikaalista perustelua; kertoimen tehtävänä on sovittaa yksinkertaistettu matemaattinen teoria vastaamaan paremmin käytännön mittaustuloksia (vrt. leikkimielinen "*Lindströmin vakio*"). Vakion arvoon vaikuttavat diodin materiaali, valmistusmenetelmä ja virran voimakkuus. Yleistykseenä voidaan sanoa, että germanium-diodeilla sekä Ge- ja Si-transistoreilla $n = 1$, piidiodeilla $n = 2$. Virran ollessa suuri n lähestyy kuitenkin ykköstä myös piidiodeilla. Mikropiireissä voidaan yleensä myös olettaa, että $n = 1$.

Jos laskimestasi puuttuu e^x -funktio, saat Neperin luvun seuraavasti:

$$e = \ln^{-1} 1 = \text{INV ln} 1 \quad (2)$$

$$e = \ln^{-1} (\ln^{-1} 0) = \text{INV ln INV ln} 0 \quad (3)$$

Yhtälössä esiintyvä **terminen jännite** (lämpöjännite, *thermal equivalent*) U_T ei tarkoita diodin navoissa olevaa jännitettä, vaan ainoastaan lämpötilasta riippuvaa kerrointa, jonka (väärin) pyöristetty arvo huoneenlämpötilassa on 25 mV (tämä vastaa todellisuudessa noin $+17^\circ\text{C}$ lämpötilaa). Tarkka arvo saadaan **Einsteinin yhtälöstä**:

$$U_T = \frac{kT}{q} \approx 25 \dots 26 \text{ mV} \quad (4)$$

$$q = 1,602 \cdot 10^{-19} \text{ As} \quad (5)$$

$$k = 1,381 \cdot 10^{-23} \frac{\text{J}}{\text{K}} \quad (6)$$

missä q on alkeisvaraus, k Boltzmannin vakio ja T lämpötila kelvineinä. Joskus merkitään $nU_T = \frac{1}{\lambda}$, missä λ on siis vakiokerroin.

Monissa käytännön tilanteissa diodin jännite on "kaukana nolasta, jolloin se on selvästi päästösuunnassa ($U \gg 0$) tai estosuunnassa ($U \ll 0$), tällöin yhtälö yksinkertaistuu:

$$I \approx I_S \left(e^{\frac{U}{U_T}} \right) \quad \text{jos } U > 0,12 \text{ V} \quad (7)$$

$$I \approx 0 \quad \text{jos } U \approx 0 \quad (|U| < 20 \text{ mV}) \quad (8)$$

$$I \approx I_S (-1) \quad \text{jos } U < -0,12 \text{ V} \quad (9)$$

Diodin tarkkaa yhtälöä tarvitaan vain origon läheisyydessä, koska $e^{10} \approx 22026$ ja jopa $e^{2,4} \approx 11$. Yllä olevien ± 120 mV rajojen kohdalla virhe on piidiodilla noin 10 %; toisaalta I_S :n tarkkuus on yleensä tätä huonompi. Ominaiskäyrän yhtälöstä voidaan laskea jännite U tai jännitteen muutos $U_2 - U_1$ virran funktiona:

$$U = nU_T \ln \frac{I + I_S}{I_S} \quad (10)$$

$$U_2 - U_1 \approx nU_T \ln \frac{I_2}{I_1} = 2,3nU_T \lg \frac{I_2}{I_1} \quad (11)$$

Jos **ideaalisuusvakio** n halutaan mitata, se saadaan ehkä helpoimmin arvioitua oheisen derivaatan avulla

$$\frac{1}{n} = U_T \frac{d(\ln I)}{dU} \quad (12)$$

Tämä voidaan määrittää graafisesti U :n funktiona piirretyn käyrän $\ln I$ tai $\lg I$ tangentin kulmakertoimesta (vrt. yhtälö (11)).

Koska U_T on diodiyhtälössä eksponentin nimittäjässä, näyttäisi diodin virta pienenevän lämpötilan kasvaessa. Todellisuudessa asia on päinvastoin. Kerroin I_S kasvaa erittäin voimakkaasti lämpötilan noustessa. Karkeasti ottaen noin viiden asteen nousu kaksinkertaistaa I_S :n arvon. Koska diodin parametriarvoja ei yleensä tunneta tarkasti, ei tarkempi laskenta ole tällöin mahdollista. Lisäksi parametriarvot riippuvat lämpötilasta. Käytännössä riittävä tarkkuus saavutetaankin usein likimääräisemmillä menetelmillä, jopa ideaaliodimallilla.

Diodissa ja transistorissa syntyvä kohina on tyypillisesti tasavirran suuruudesta riippuvaa raekohinaa. Diodin pn -liitoksen kapasitanssit vaikuttavat diodipiirien toimintaan esimerkiksi kytkinkäytössä tai tasasuuntaajana. Tyypillisesti tasasuuntaajat toimivat kunnolla vain yllättävän matalilla taa-juuksilla, mikä on otettava huomioon esimerkiksi vaihtojännitemittauksissa.

Diodia käytetään mm. vaihtovirran tasasuuntaajana, jännitereferenssinä, estämään vääränsuuntaisen virran kulkua tai rajoittamaan piirin jännitekynnysjännitteen alapuolelle. Modulaattorin toiminta perustuu matemaattisesti diodin ominaiskäyrän esittämiseen sarjakehitelmänä. Ilmaisindiodilla erotetaan pienitaajuinen signaali suuritaajuisesta kantoaallostasta (vrt. kidekone). Tasasuuntausdiodia valittaessa on otettava huomioon suurin sallittu myötäsuntainen virta ja suurin sallittu estosuuntainen jännite. Jos sallitut arvot ylitetään, voi diodi palaa oikosulkuun tai poikki.

4.1 Diodipiirin epälineaarinen yhtälö

Koska diodin virta on likimain nolla, kun $U \leq 0,5$ V, puhutaan **kynnysjännitteestä** U_t ($t = threshold$). Kun diodin jännite on saavuttanut kynnysjännitteen, alkaa virta kasvaa, mutta jännite ei virtaa kasvatettaessa nouse kuin noin 0,7...0,8 volttiin asti. Tosin käytännön diodeissa jännite kasvaa vielä tästäkin diodin sarjavastuksen takia. Todellista kynnysjännitettä eli kulmapistettä ei eksponenttikäyrässä tietenkään ole. Diodin jännite voidaan kuitenkin ilmoittaa jollakin diodille tyypillisellä virran arvolla. Kun virta vaihtelee tämän arvon molemmin puolin, ei jännite vaihtele paljoakaan, ellei virta mene aivan pieneksi. Si-diodin jännitteen sanotaan yleensä olevan 0,7 V (0,6 ... 0,8 V) ja Ge-diodin 0,2 ... 0,3 V, mutta tarkkaan ottaen diodin jännitehäviö riippuu aina virran voimakkuudesta.

Diodissa ja monissa muissa elektroniikan komponenteissa jännitteen ja virran välinen yhtälö on **epälineaarinen**. Tällöin vain harvoin voidaan jännitteet ja virrat ratkaista muuten kuin kokeilemalla — yleensä sitä ei edes yritetä. Piirisimulointiohjelmat käyttävät yhtälöiden ratkaisuun **Newton–Raphson-iterointia** tai jotain muuta iterointimenetelmää. Käsien laskentaessa voidaan laskiniteroinnin vaihtoehtona soveltaa graafista ratkaisumenetelmää, mutta käytännössä tähän on harvoin tarvetta.

5 Piensignaalianalyysi

5.1 Tasajännitteen päällä ratsastava signaali

Seuraavassa sana *signaali* tarkoittaa virran ja jännitteen sitä osaa, joka muuttuu ajan funktiona. Elektroniikkapiirit eivät useinkaan pysty toimimaan puhtaalla signaalilla, koska ainakin signaalin negatiiviset puolijaksot menisivät jännitteen sallitun vaihtelualan ulkopuolelle. Signaali on nostettava tasajännitteen päälle, jotta toiminta sijoittuu sopivaan kohtaan ominaiskäyrää. Lisäksi esimerkiksi origon lähellä ominaiskäyrä on usein väääräsuuntainen tai liian käyrä.

Puolijohdekomponentit ovat epälineaarisia, mikä tarkoittaa mm. sitä, että jännite ei ole suoraan verrannollinen virtaan: komponentin resistanssi riippuu virran voimakkuudesta. Tällöin tasavirran ja signaalin kerrostaminen on mahdollista vain, jos signaalin amplitudi on niin pieni, että komponentin epälineaarista ominaiskäyrää voidaan approksimoida tasavirtatoimintapisteen läheisyydessä suoralla. Tasavirran suuruus määrää toimintapisteen paikan ja ominaiskäyrän tangentti edellä mainitun suoran kulmakertoimen. Tämä on vallitseva menetelmä lähes kaikessa analogisen signaalin käsittelyssä ja näin saavutettava tarkkuus on hyvin suuri. Ehkä vielä tärkeämpää on kuitenkin se, että tulokset ovat helposti tulkittavia, kun tasavirta ja signaali käsitellään erillisinä.

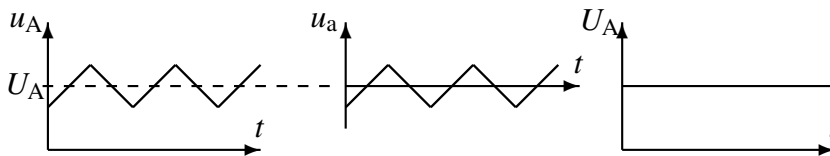
Kerrostamismenetelmä eli **superpositioperiaate** tarkoittaa sitä, että eri jännitelähteiden vaikutus piirin virtoihin ja jännitteisiin lasketaan jokainen erikseen (muut kuin tarkasteltava lähde nollataan). Lähteiden eritaajuiset signaalin osat voidaan myös kerrostaa eli *superponoida*. Linearisessa piirissä näin voidaan menetellä aina.

Koska elektroniikkapiireissä esiintyy yleensä sekä tasajännitteitä että signaaleja yhtä aikaa, on tarpeen pystyä erottamaan ne toisistaan tekstissä. Vakiintuneen kansainvälisen käytännön mukaan merkitään **tasajännitteitä**

isoilla kirjaimilla ja isoilla alaindeksillä. Isolla kirjaimella pienen alaindeksin kanssa ei ole erityismerkitystä, mutta se voi tarkoittaa esim. vakiota. Ajan funktiona **vaihtelevia** jännitteitä merkitään **pienillä** kirjaimilla. Pienen kirjaimen ja ison alaindeksin yhdistelmä tarkoittaa **kokonaisjännitettä** eli tasajännite- ja signaaliosaa yhdessä. Pelkkää signaalia ilman DC:tä merkitään pienellä kirjaimella ja pienellä alaindeksillä. Siis esimerkiksi (vrt. kuva 10):

$$\underbrace{u_A(t)}_{\text{kokonais}} = \underbrace{U_A}_{\text{d.c.}} + \underbrace{u_a(t)}_{\text{signaali, a.c.}} \quad (13)$$

Samanlainen merkintäsopimus pätee jännitteen ohella virralle ja tarvittaessa muillekin signaaleille. Varsinkin ulkomaiset oppikirjat noudattavat näitä sääntöjä tarkasti. Kuvassa 10 ajan funktiona vaihteleva kokonaisjännite jaetaan tasajänniteosaan ja puhtaaseen signaaliosaan.



Kuva 10. Tasajännite U_A (oik.), signaalijännite u_a (kesk.) ja niiden resultanttina muodostuva kokonaisjännite u_A (vas.). Kuvan kolmioaallon sijasta aaltomuoto voi tietysti olla mikä tahansa.

5.2 Staattinen vai dynaaminen resistanssi

Elektroniikassa on tavallista, että epälineaariseen komponenttiin johdetaan tasavirta (tai esimerkiksi fetin hilan ja sourcen väliin tasajännite), jotta ominaiskäyrällä päästään halutulle alueelle (**biasointi**). Ominaiskäyrän eri osilla on yleensä erilainen kaltevuus ja muoto. Tasavirran tai -jännitteen päällä ratsastaa tyypillisesti amplitudiltaan pienempi vaihtovirtasignaali. Tasavirran määräämä kohta ominaiskäyrällä on **toimintapiste** (U_Q, I_Q) ($Q = \textit{quiescent}$). Toimintapisteessä signaali on nollassa eli lepotilassa.

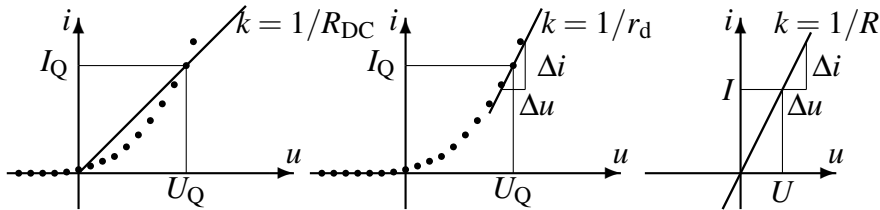
Olettamalla piiri paikallisesti lineaariseksi eli ominaiskäyrä suoraksi toimintapisteen läheisyydessä voidaan virrat ja jännitteet laskea tasa- ja vaihtovirralla erikseen (vrt. kerrostamismenetelmä). Jos esimerkiksi diodin (tasa)virta on likimain vakio, diodi voidaan periaatteessa korvata DC-analyysissä staattisella resistanssilla, mutta erityisesti ac-analyysissä sig-

naalin näkemällä **dynaamisella resistanssilla** eli **piensignaali-resistanssilla** $r_d = r_{ac}$ (ks. kuva 11).

$$r_d = \frac{\Delta u}{\Delta i} = \left. \frac{\partial u}{\partial i} \right|_{u=U_Q} = \frac{1}{\left. \frac{\partial I}{\partial u} \right|_{u=U_Q}} = \frac{1}{\frac{1}{nU_T} I_Q e^{\frac{U_Q}{nU_T}}} \approx \frac{1}{\frac{1}{nU_T} I_Q} \quad (14)$$

$$r_d = \frac{\Delta u}{\Delta i} = \frac{nU_T}{I_Q} \quad (15)$$

missä merkki ∂ (delta) kuvaa osittaisderivaattaa; se lasketaan käytännössä samalla tavalla kuin tavallinenkin derivaatta. Ominaiskäyrän tangentin kulmakertoimesta k laskettuja vastuksia merkitään yleensä pienillä kirjaimilla.



Kuva 11. Diodin staattisen eli globaalin resistanssin R_{DC} ja dynaamisen eli lokaalin resistanssin r_d määrittely. Staattinen resistanssi on yksinkertaisesti jännitteen ja virran suhde. Dynaaminen resistanssi kuvaa jännitteen muutoksen suhdetta virran muutokseen: $I_Q + \frac{1}{2}\Delta i = I_Q + \frac{1}{r_d}\frac{1}{2}\Delta u$ (nouseva suora) eli $r_d = \frac{\Delta u}{\Delta i}$. Oikealla on vertailun vuoksi tavallisen vastuksen ominaiskäyrä; koska viime mainittu on *origon* kautta kulkeva suora, ovat vastuksen staattinen ja dynaaminen resistanssi yhtä suuret ($R = \frac{U}{I} = \frac{\Delta u}{\Delta i}$). Kun jännite kasvaa pienen määrän Δu , kasvaa lineaarisen vastuksen virta suoraan verrannollisena konduktanssiin $I + \Delta i = I + \frac{1}{R}\Delta u = G(U + \Delta u)$.

Piensignaali tarkoittaa sitä, että signaalin amplitudi on riittävän pieni, jotta komponentin toiminta käyrälläkin ominaiskäyrän kohdalla voidaan vielä olettaa likimain lineaariseksi. Dynaaminen resistanssi määräytyy tietyssä toimintapisteessä käyrän tangentin kulmakertoimen perusteella (kulmakertoimen käänteisluku $\frac{1}{k}$ on jännitteen muutoksen suhde virran muutokseen). Piensignaali-resistanssi kuvaa oikeastaan suuremman tasavirran I_Q päällä ratsastavan pieniampitudisen vaihtovirran näkemää resistanssia. Tämä on eri suuri kuin **staattinen** eli **tasavirtaresistanssi**, joka määritelt-

lään tasajännitteen ja tasavirran suhteena:

$$R_D = R_{DC} = \frac{U_Q}{I_Q} \quad (16)$$

Epälineaarisisilla komponenteilla tämäkin riippuu toimintapisteestä (U_Q, I_Q) eli tasavirran keskimääräisestä arvosta. Diodi voitaisiin korvata R_{DC} :n suuruisella vastuksella, mikäli diodin läpi kulkisi koko ajan vakiona pysyvä tasavirta; vastus siis muodostaisi yhtä suuren jännitehäviön kuin diodi. Tasavirtatason muuttaminen muuttaa myös diodin resistanssia, koska ominaiskäyrä ei ole suora.

Vertaus palkkatulojen verotukseen havainnollistaa R_D :n ja r_d :n eroa: jos piirretään maksettavat verot (i) verotettavien tulojen (u) funktiona, saadaan paloittain lineaarinen eksponenttikäyrä. Tällöin $G_D = \frac{1}{R_D}$ vastaa veroprosenttia henkilökohtaisessa toimintapisteessä, mutta $g_d = \frac{1}{r_d}$ sitä vastaa **marginaaliveroprosenttia**. Johtavassa asemassa, eli kun $U_Q > nU_T$, on diodin $g_d > G_d$; signaali läpäisee diodin helpommin kuin tasavirta. Resistanssi R_{DC} ilmoittaa, mikä jännitehäviö diodissa syntyy tietyllä vakiovirralla, mutta r_d kertoo, paljonko jännite muuttuu virran muuttuessa tietyn määrän. Lineaarisen piirin ominaiskäyrä on origon kautta kulkeva suora (vrt. arvonlisävero, jossa ei ole progressiota); esimerkiksi vastuksen staattinen ja dynaaminen resistanssi ovat yhtä suuret, mutta diodissa näin ei ole.

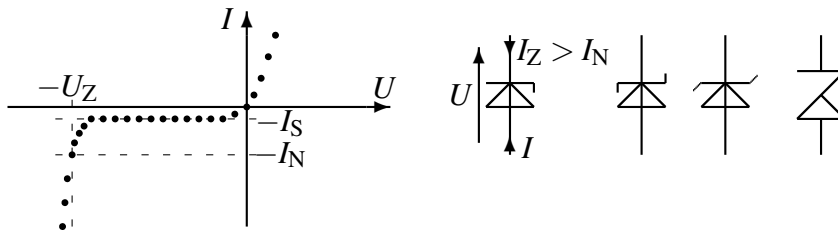
6 Zenerdiodi

6.1 Zener- ja vyörypurkausilmiöt

Hyvin negatiivisilla jännitteillä diodin ominaiskäyrä kääntyy jyrkkään laskuun; tapahtuu niin sanottu läpilyönti. Sen aiheuttavat **zener-** ja **avalanche-** (**vyörypurkaus-** eli lumivyöry-) ilmiöt.

Molemmat läpilyöntimekanismit vaikuttavat yhtä aikaa, mutta karkean jaottelun mukaan zener-ilmiö on vallitseva alle 5 voltin läpilyöntijännitteillä ja vyörypurkausilmiö yli 7 voltin jännitteillä. Zener-ilmiössä tyhjennysalueen sähkökenttä on niin voimakas, että se pystyy irrottamaan elektroneja kovalenttisista sidoksista. Avalanche-ilmiössä tyhjennysalueen läpi sähkökentän ajamina kulkevat vähemmistövarauksenkuljettajat irrottavat elektroneja kovalenttisista sidoksista törmäysenergiansa (liike-energiaa) voimalla. 'Lumivyöry' syntyy, kun nämä irronneet elektronit irrottavat omalla törmäysenergiallaan lisää elektroneja, jne.

Tavallinen diodi yleensä särkyä tässä vaiheessa, ellei läpilyöntivirtaa ole rajoitettu. Zenerdiodi (kuva 12) sitä vastoin on suunniteltu toimimaan juuri läpilyöntialueella; sitä käytetäänkin normaalisti **estosuunnassa**. Päästösuunnassa zenerdiodi käyttäytyy tavallisen diodin tavoin. **Läpilyöntijännitettä** $-U_Z$ negatiivisemmilla jännitteillä ominaiskäyrä laskee lähes pystysuorasti, jolloin jännite ei juuri muutu, vaikka virta vaihtelisi melko paljonkin. Zenerjännitettä U_Z vastaava nimellisvirta I_N ilmoitetaan diodin datalehdellä. Normaalikäytössä zenerdiodin virta I_Z mitoitetaan suuremmaksi kuin I_N (molemmat positiivisia). Tavallisimmilla zenerdiodeilla I_N on noin 5 ... 20 mA, mutta suuritehoisilla zenerdiodeilla jopa satoja milliampeereja.



Kuva 12. Zenerdiodin ominaiskäyrä ja piirrosmerkkejä, joista ensimmäinen on IEC:n standardin mukainen. Tässäkin kuvassa pysty akselin skaalaus vaikuttaa käyrän muotoon ja yleisvaikutelmaan.

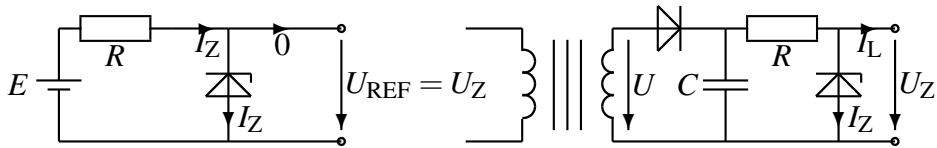
Zenerdiodin maksimi tehohäviö on likimain zenerjännitteen ja estosuuntaisen maksimivirran tulo:

$$P_{\text{MAX}} = U_Z I_{\text{MAX}} \quad (17)$$

Tyypillisiä arvoja ovat 0,2 W ja 0,5 W, mutta jopa 20 W on mahdollinen. Määrätyn tehonkeston omaavia zenerdiodeja on aina saatavana useilla eri zenerjännitteen arvoilla.

6.2 Jännitereferenssi ja zener-regulaattori

Zenerdiodia voidaan käyttää mm. jännitereferenssinä tai jännitteen rajoittimena. Kuvassa 13 on esimerkkejä zenerdiodin käytöstä jännitteen rajoittimiksi eli vakavointiksi. Huomaa, että zenerdiodia käytetään yleensä estosuunnassa.



Kuva 13. Zener-reguloinnin periaate. Vasemmalla jännitereferenssi, jota ei kuormiteta. Oikealla pienitehoinen tehollähde. Zenerdiodin jännite on sen nimellijännitteen suuruinen, mikäli jännite ilman zeneriä olisi samalla kohdalla tätä korkeampi.

Zenerdiodin tärkeimmät käyttösovellukset ovat siis **referensijännitteinä** (kuvassa 13 vasemmalla) sekä **jänniteregulaattorina** (oikealla). Jänniteregulaattori on yleensä järkevää toteuttaa mikropiiriregulaattorilla — zeneriodi soveltuu lähinnä tilanteisiin, joissa kuormavirta on hyvin pieni.