

**Elektroniikan perusteet 3 op**  
**Osa 1: Puolijohteet, PN-rajapinta**

Tämä 3 op:n laajuinen materiaali on osa opintojaksoa Johdatus tietotekniikkaan (15 op). Lähtötietoina oletetaan suoritetuksi Sähkötekniikan perusteet (3 op). Elektroniikan perusteet koostuu teoriaosuudesta, lasku- ja simulointiharjoituksista ja laboratoriotöistä (4 kpl).

Opintojakson lopuksi on koe.

Laskuharjoitustehtävistä saa ”bonuspisteitä” koepisteiden päälle.

Labroissa on pakollinen läsnäolo. Labrat tehdään (pääsääntöisesti) 3 hengen ryhmissä. Jokaisesta labrakerrasta ryhmä laatii (valmiille pohjalle tehtävän) selostuksen. Kaikki 4 selostusta on oltava palautettuna ennen kurssin hyväksyttävä suoritusta.

Muut toteutuksen yksityiskohdat sovitaan kurssin alussa.

Tässä materiaalissa on käytetty seuraavia lähteitä:

- Silvonen, Tiilikainen, Helenius: Analogiaelektroniikka. Edita 2004
- Wikipedia
- Linja-aho: Elektroniikan perusteet  
<https://www.slideshare.net/linjaaho/elektroniikka-1>
- <http://www.hutasu.net/elektroniikka/>

## **1. Puolijohteet**

Kielitoimiston sanakirja 2.0: **Elektroniikka** = vapaiden elektronien ja muiden varauksenkantajientutkimus ja hyväksikäyttö (esim. puolijohde- ja näyttölaitteissa, mikropiireissä yms.).

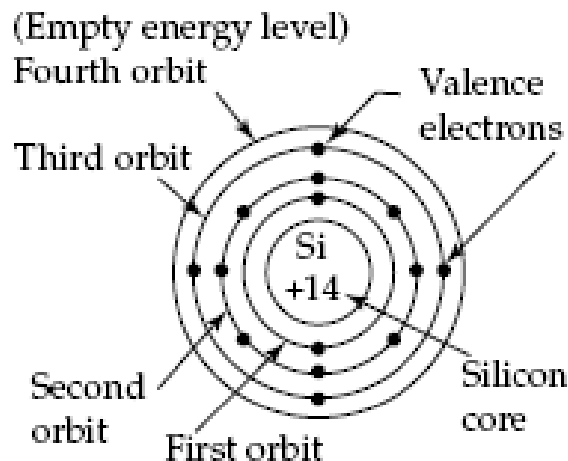
Raja sähkötekniikan ja elektroniikan välillä joskus häilyvä. Nyrkkisääntö: jos käytetään *puolijohteita* (tai radioputkia), kyse on elektroniikasta. Jos pelkkää sähkön lämpövaikutusta (esim. lämpöpatteri) tai sähkömagneettista voimavaikutusta (sähkömoottori), kyse on sähkötekniikasta

Puolijohteet ovat nykyaikaisen elektroniikan perusta. Puolijohdekomponenteilla on joukko hyödyllisiä ominaisuuksia, kuten sähkövirran päästäminen läpi helpommin toiseen suuntaan, muutettavissa oleva virranvastus ja mahdollisuus vaikuttaa niiden ominaisuuksiin valolla ja lämmöllä. Koska puolijohdemateriaalien sähköisiä ominaisuuksia voidaan muuttaa lisäämällä joukkoon sopivia määriä epäpuhtauksia tai sähkökentällä tai valolla, puolijohdekomponentteja voidaan käyttää vahvistimissa, kytkimissä ja energian muuntimissa.

## 1.1 Sähkönjohtavuus

Materiaalin sähkönjohtavuuden perusteella aineet voidaan jakaa **johteisiin**, **puolijohteisiin** ja **eristeisiin**. Eroavuudet sähkönjohtavuudessa voidaan selittää tarkastelemalla varausten liikettä materiassa. Esimerkiksi metallit johtavat yleensä hyvin sähköä johtuen atomitason rakenteesta ja nk. metallisidoksen ominaisuuksista. Metallisidoksessa on paljon helposti vapaasti liikkuvia elektroneja, jotka mahdollistavat sähkövirran kulun.

Yleisesti ottaen materiaalissa atomit ovat kiinnittyneet toisiinsa erilaisin sidoksin. Tärkeimmät sidokset ovat kovalenttinen sidos, ionisidos ja metallisidos.



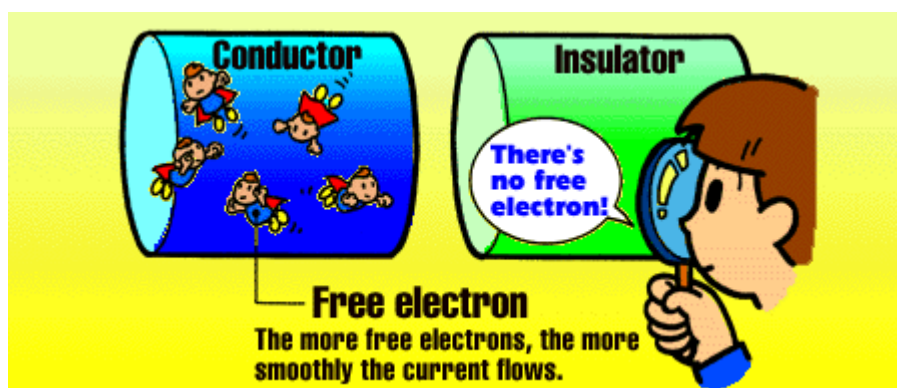
Kuva 1: Piin ( $n=14$ ) elektronit ovat jakautuneet kolmelle elektronikuorelle. Uloimman valenssikuoren elektronit määräävät kyseisen atomin sähkönjohtokyvyn.+

## **Elektroniikan perusteet 3 op**

### **Osa 1: Puolijohteet, PN-rajapinta**

Kiinteissä aineissa ja nesteissä eri atomien samoilla radoilla olevien elektronien energiat muodostavat energiavöitä. Erikoisesti valenssielektronien energiat muodostavat ns. *valenssivyön*.

Eriste on aine, joka johtaa sähkö huonosti. Kiinteissä aineissa tämä tarkoittaa, että eristeellä ei ole vapaita elektroneja, jotka voivat kuljettaa sähköä.



Kuva 2: Lähde:

[http://park.org/Japan/NTT/MUSEUM/html\\_st/ST\\_final\\_21\\_e.html](http://park.org/Japan/NTT/MUSEUM/html_st/ST_final_21_e.html)

Johteella sen sijaan on vapaita elektroneja sähkövirran kulkua varten. Muistetaan tässä, että sähkövirta on nimenomaan varattujen hiukkasten (käytännössä elektronien) liikettä.

**Elektroniikan perusteet 3 op**  
**Osa 1: Puolijohteet, PN-rajapinta**

Puolijohteen sähkönjohtavuus on eristeen ja johteen välissä. Oheisessa taulukossa on esitetty tyypillisiä sähkönjohtavuuden arvoja eri aineille (Lähde: [https://en.wikipedia.org/wiki/Electrical\\_resistivity\\_and\\_conductivity](https://en.wikipedia.org/wiki/Electrical_resistivity_and_conductivity))

Taulukko 1. Eri materiaalien sähkönjohtavuuksia ja resistiivisyyksiä.

Material	$\rho$ ( $\Omega \cdot m$ ) at 20 °C	$\sigma$ (S/m) at 20 °C	Temperature coefficient <sup>[note 1]</sup> (K <sup>-1</sup> )	Referen ce
Carbon (graphene)	$1.00 \times 10^{-8}$	$1.00 \times 10^8$	-0.0002	[17]
Silver	$1.59 \times 10^{-8}$	$6.30 \times 10^7$	0.0038	[18][19]
Copper	$1.68 \times 10^{-8}$	$5.96 \times 10^7$	0.003862	[20]
Annealed copper <sub>[note 2]</sub>	$1.72 \times 10^{-8}$	$5.80 \times 10^7$	0.00393	[21]
Gold <sub>[note 3]</sub>	$2.44 \times 10^{-8}$	$4.10 \times 10^7$	0.0034	[18]
Aluminium <sub>[note 4]</sub>	$2.82 \times 10^{-8}$	$3.50 \times 10^7$	0.0039	[18]
Calcium	$3.36 \times 10^{-8}$	$2.98 \times 10^7$	0.0041	
Tungsten	$5.60 \times 10^{-8}$	$1.79 \times 10^7$	0.0045	[18]
Zinc	$5.90 \times 10^{-8}$	$1.69 \times 10^7$	0.0037	[22]
Nickel	$6.99 \times 10^{-8}$	$1.43 \times 10^7$	0.006	
Lithium	$9.28 \times 10^{-8}$	$1.08 \times 10^7$	0.006	
Iron	$9.71 \times 10^{-8}$	$1.00 \times 10^7$	0.005	[18]
Platinum	$1.06 \times 10^{-7}$	$9.43 \times 10^6$	0.00392	[18]
Tin	$1.09 \times 10^{-7}$	$9.17 \times 10^6$	0.0045	
Carbon steel (1010)	$1.43 \times 10^{-7}$	$6.99 \times 10^6$		[23]
Lead	$2.20 \times 10^{-7}$	$4.55 \times 10^6$	0.0039	[18]

**Elektroniikan perusteet 3 op**  
**Osa 1: Puolijohteet, PN-rajapinta**

Material	$\rho$ ( $\Omega \cdot \text{m}$ ) at 20 °C	$\sigma$ (S/m) at 20 °C	Temperature coefficient <sup>[note 1]</sup> ( $\text{K}^{-1}$ )	Reference
Titanium	$4.20 \times 10^{-7}$	$2.38 \times 10^6$	0.0038	
Grain oriented electrical steel	$4.60 \times 10^{-7}$	$2.17 \times 10^6$		[24]
Manganin	$4.82 \times 10^{-7}$	$2.07 \times 10^6$	0.000002	[25]
Constantan	$4.90 \times 10^{-7}$	$2.04 \times 10^6$	0.000008	[26]
Stainless steel <sup>[note 5]</sup>	$6.90 \times 10^{-7}$	$1.45 \times 10^6$	0.00094	[27]
Mercury	$9.80 \times 10^{-7}$	$1.02 \times 10^6$	0.0009	[25]
Nichrome <sup>[note 6]</sup>	$1.10 \times 10^{-6}$	$6.7 \times 10^5$	0.0004	[18]
GaAs	$1.00 \times 10^{-3}$ to $1.00 \times 10^8$	$1.00 \times 10^{-8}$ to $10^3$		[28]
Carbon (amorphous)	$5.00 \times 10^{-4}$ to $8.00 \times 10^{-4}$	$1.25 \times 10^3$ to $2 \times 10^3$	-0.0005	[18][29]
Carbon (graphite) <sup>[note 7]</sup>	$2.50 \times 10^{-6}$ to $5.00 \times 10^{-6}$    basal plane $3.00 \times 10^{-3}$ $\perp$ basal plane	$2.00 \times 10^5$ to $3.00 \times 10^5$    basal plane $3.30 \times 10^2$ $\perp$ basal plane		[30]
PEDOT:PSS	$2 \times 10^{-6}$ to $1 \times 10^{-1}$	$1 \times 10^1$ to $4.6 \times 10^5$	?	[31]
Germanium <sup>[note 8]</sup>	$4.60 \times 10^{-1}$	2.17	-0.048	[18][19]
Sea water <sup>[note 9]</sup>	$2.00 \times 10^{-1}$	4.80		[32]
Swimming pool water <sup>[note 10]</sup>	$3.33 \times 10^{-1}$ to $4.00 \times 10^{-1}$	0.25 to 0.30		[33]
Drinking water <sup>[note 11]</sup>	$2.00 \times 10^1$ to $2.00 \times 10^3$	$5.00 \times 10^{-4}$ to $5.00 \times 10^{-2}$		[citation needed]
Silicon <sup>[note 8]</sup>	$6.40 \times 10^2$	$1.56 \times 10^{-3}$	-0.075	[18]
Wood (damp)	$1.00 \times 10^3$ to $1.00 \times 10^4$	$10^{-4}$ to $10^{-3}$		[34]

**Elektroniikan perusteet 3 op**  
**Osa 1: Puolijohteet, PN-rajapinta**

Material	$\rho$ ( $\Omega \cdot m$ ) at 20 °C	$\sigma$ (S/m) at 20 °C	Temperature coefficient <sup>[note 1]</sup> (K <sup>-1</sup> )	Reference
	$10^4$			
Deionized water <sup>[note 12]</sup>	$1.80 \times 10^5$	$5.50 \times 10^{-6}$		[35]
Glass	$1.00 \times 10^{11}$ to $1.00 \times 10^{15}$	$10^{-15}$ to $10^{-11}$	?	[18][19]
Hard rubber	$1.00 \times 10^{13}$	$10^{-14}$	?	[18]
Wood (oven dry)	$1.00 \times 10^{14}$ to $1.00 \times 10^{16}$	$10^{-16}$ to $10^{-14}$		[34]
Sulfur	$1.00 \times 10^{15}$	$10^{-16}$	?	[18]
Air	$1.30 \times 10^{14}$ to $3.30 \times 10^{14}$	$3 \times 10^{-15}$ to $8 \times 10^{-15}$		[36]
Carbon (diamond)	$1.00 \times 10^{12}$	$\sim 10^{-13}$		[37]
Fused quartz	$7.50 \times 10^{17}$	$1.30 \times 10^{-18}$	?	[18]
PET	$1.00 \times 10^{21}$	$10^{-21}$	?	
Teflon	$1.00 \times 10^{23}$ to $1.00 \times 10^{25}$	$10^{-25}$ to $10^{-23}$	?	

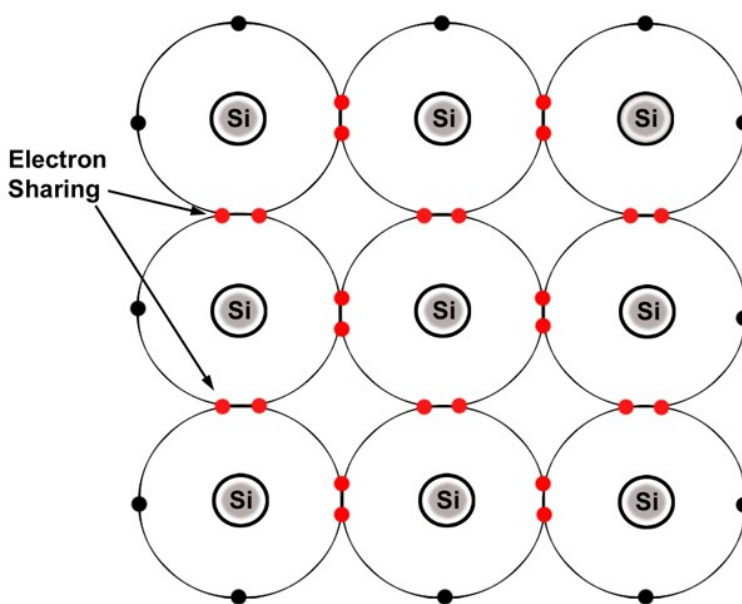
Hyviä johteita ovat esimerkiksi hopea, kulta ja kupari. Ilma, vesi ja kumi ovat hyvä eristeitä. Hiilen johtavuus riippuu sen kidemuodosta. Esimerkiksi timantti on eriste, mutta grafeeni johde.

Puolijohteet, joista tavallisimpia ovat pii ja germanium, ovat eristeiden ja johteiden välissä.

## 1.2 Kiderakenne

Puolijohteen atomirakenne on yleensä kiderakenne, joissa atomien välillä on **kova-lenttinen sidos**. Atomi pyrkii tilanteeseen, jossa sen uloimmalla elektronikuorella on kahdeksan elektronia. Jos atomilla ei ole itsellään kahdeksaa elektronia ulko-kuorellaan, se pyrkii vastaanottamaan tai luovuttamaan elektroneja muilta atomeilta. Esimerkiksi piillä on 14 elektronia, joista 4 on valenssielektroneja. Näiden neljän valenssielektronin avulla piiatomit kiinnittyvät neljään viereiseen piiatomiin kovalenttilla sidoksella "lainaamalla" viereisiltä atomeilta yhteensä neljä elektronia.

Hyvin matalassa lämpötilassa kaikki elektronit ovat sitoutuneet rakenteeseen, mutta jo lämpötilan kohottaminen riittää rikkomaan osan sidoksista ja vapaita elektroneja pääsee muodostumaan.



Kuva 2. Piin kovalenttinen sidos

Edellä oleva tilanne vallitsee vain lähellä absoluuttista nollapistettä. Kun piihin tuodaan ulkoista energiaa (lämpöä, sähköinen jännite jne), osa



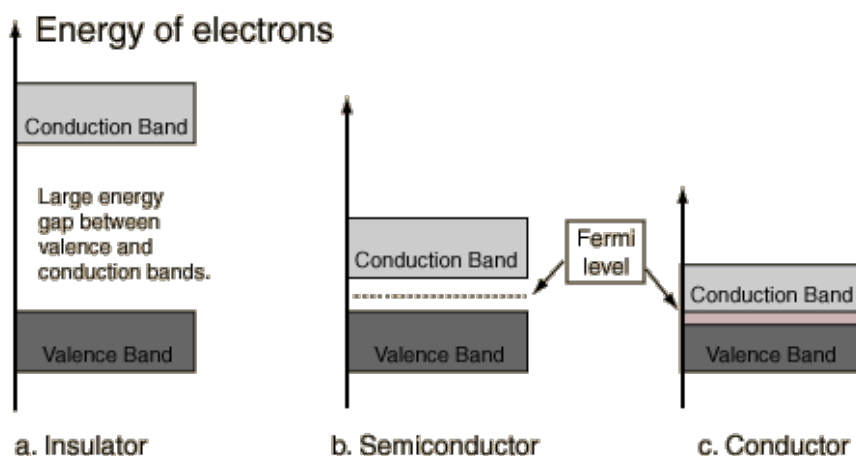
## Elektroniikan perusteet 3 op

### Osa 1: Puolijohteet, PN-rajapinta

valenssielektroneista irtaava kiderakenteesta vapaiksi elektroneiksi ns. johtavuusvyölle. Ne mahdollistavat sähkövirran kulkemisen.

### 1.3 Sähkönjohtavuus atomitasolla

Jos johtavuusvyö liittyy välittömästi valenssivyöhön - kuten metalleilla - on kyseessä johde. Eristeessä valenssivyön ja johtavuusvyön välissä on kielletty energia-alue, kielletty vyöhyke. Elektronin siirtymiseen valenssivyöltä johtavuusvyölle tarvitaan ulkopuolista energiaa (siis esim. jännite). Johtavuusvyöllä ollessaan elektroni pystyy liikkumaan aineessa lähes vapaasti, ja tällöin aine johtaa sähköä.



Kuva 4. Johteen, puolijohteen ja eristeen energiatasokaaviot (<http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbase/Solids/band.html>)

## **Elektroniikan perusteet 3 op**

### **Osa 1: Puolijohteet, PN-rajapinta**

Puolijohteilla kielletty energiavyö on suhteellisen kapea eli ulkopuolista energiaa ei tarvita paljoa puolijohteen saamiseksi johtavaksi.

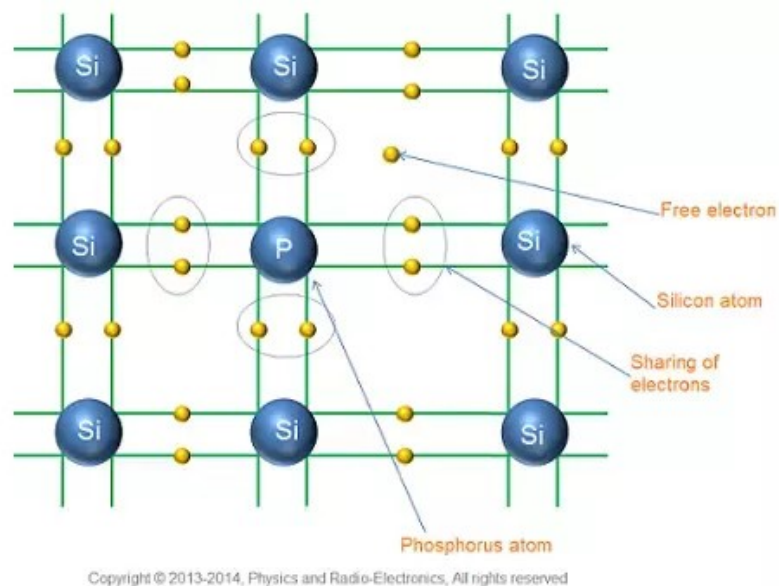
Normaalilämpötiloissa jotkut elektronit saavat kielletyn vyöhykkeen ylitykseen tarvittavan energialisäyksen ja siirtyvät johtavuusvyölle. Tällöin syntyy kahta tyyppiä **liikkuvia varauksia: johtavuuselektroneja ja johtavuusaukkoja**. Johtavuusaukolla tarkoitetaan johtavuuselektronin jättämää tyhjää paikkaa kovalenttisessa sidoksessa. Tällainen aukko voi siepata naapuriatomiltaan elektronin, jolloin aukko siirtyy naapuriatomiin.

Elektronit ja aukot materiaalissa mahdollistavat sähkövirran kulun. Sekä aukot valenssivyössä, että elektronit johtavuusvyössä lisäävät omalta osaltaan puolijohteen sähkönjohtavuutta.

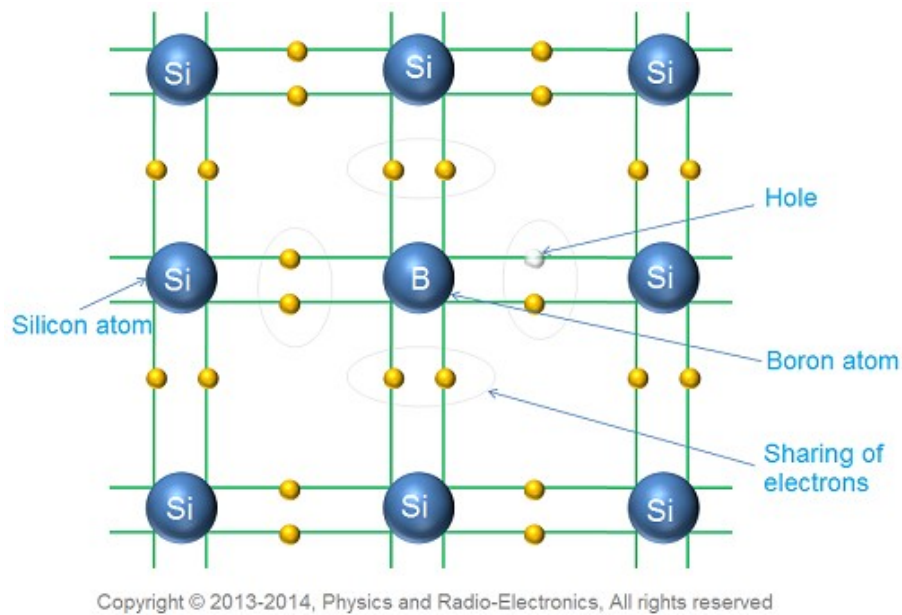
Puolijohteen toiminta ja käyttö elektroniikassa perustuu juuri puolijohdemateriaalin johtavuuden muutteluun ulkoisella ohjauksella. Täten on mahdollista valmistaa mm. puolijohdekytkin, jossa sähköä ohjataan toisella sähköisellä signaalilla (vrt. mekaaninen kytkin, joka kuluu). Puolijohdekomponenttien käyttöön kytkimenä perustuvat mm. tietokoneen mikroprosessorit.

## Elektroniikan perusteet 3 op

### Osa 1: Puolijohteet, PN-rajapinta



Kuva 5. N-tyypin puolijohteessa on johtavuusvyöissä vapaita elektroneja



Kuva 6. P-tyypin puolijohteessa on valenssivyöissä aukkoja, eli vajausta elektroneista

## **1.4 Puolijohteiden seostus**

Puhtailla puolijohteilla ei ole juurikaan käytännön sovellutuksia. Yleensä puolijohde seostetaan aineilla, joissa on kovalenttisen sidoksen kannalta valenssivyöllä joko yksi ”ylimääräinen” elektroni, eli piin tapauksessa 5 elektronia (Kuva 5) tai 3 elektronia, eli yksi ”puuttuu” (Kuva 6). Sekoitussuhde on tyypillisesti  $1: 10^6 - 1:10^8$ , joten kemiallisesti aine on edelleen esim. piitä, vain sähköiset ominaisuudet muuttuvat.

n-tyyppin puolijohteeseen seostettuja atomeja (esim. fosfori, arseeni ja antimoni). kutsutaan **donoreiksi** ja ne muodostavat ylimääräisiä energiatasoja johtavuusvyön alareunan läheisyyteen. Tällä ylimääräisellä elektronilla on jo huoneenlämmössä niin suuri energia, että se asettuu johtavuusvyölle ja virran kulku on mahdollista. Koska varauksenkuljettajat ovat pääasiassa elektroneja, kutsutaan tällä tavalla seostettua puolijohdetta n-tyyppiseksi. Elektronien sanotaan olevan enemmistövarauksenkuljettajia.

Toisen ryhmän seosaineita muodostavat ne aineet, joiden atomirakenteessa on 3 valenssielektronia (esim. boori, alumiini, gallium ja indium). Kun nämä alkuaineet asettuvat piin kidehilaan, jää niiden kohdalle yhden elektronin vaje, jotta sidos olisi kovalentti. Vierasaineatomi sieppaa helposti ympäristöstä elektronin pyrkiessään saamaan 8 elektronia valenssivyölle, jolloin syntyy herkästi liikkuva **johtavuusaukko**. p-tyyppin materiaalissa olevia epäpuhtausatomeja kutsutaan **akseptoreiksi**, ja ne saavat aikaan energiatasoja valenssivyön yläreunan läheisyyteen.

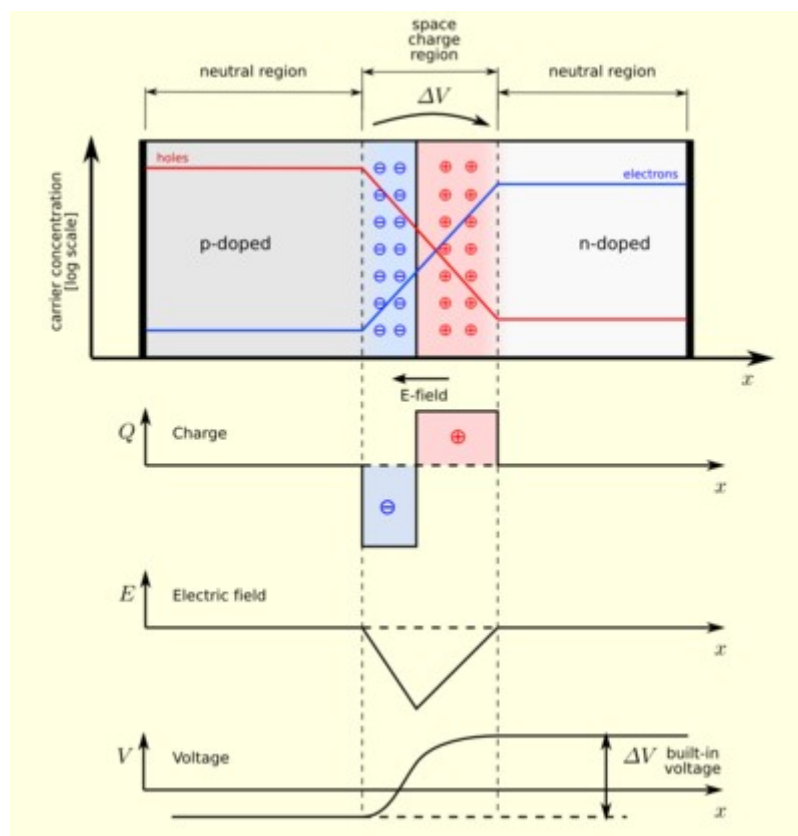
## Elektroniikan perusteet 3 op

### Osa 1: Puolijohteet, PN-rajapinta

Koska vapaat varaukset ovat nyt pääosin aukkoja (positiivisia varauksia) kutsutaan tällaista puolijohdetta p-tyyppiseksi. Nyt ovat aukot enemmistökantajia ja elektronit vähemmistökantajia.

## 2 PN-rajapinta

Puolijohdekomponenttien tärkein rakenneos on pn-rajapinta (pn-liitos). Tämä saadaan aikaan liittämällä yhteen p-tyyppinen ja n-tyyppinen puolijohde.



Kuva 8. PN-rajapinta sekä varaus, sähkökenttä ja jännite rajapinnassa.

## Elektroniikan perusteet 3 op

### Osa 1: Puolijohteet, PN-rajapinta

Diffuusion eli elektronien ja aukkojen satunnaisen lämpöliikkeen vaikutuksesta enemmistövarauksenkuljettajia pääsee siirtymään liitoskohdan yli, eli elektroneja pääsee p-puolelle ja aukkoja n-puolelle

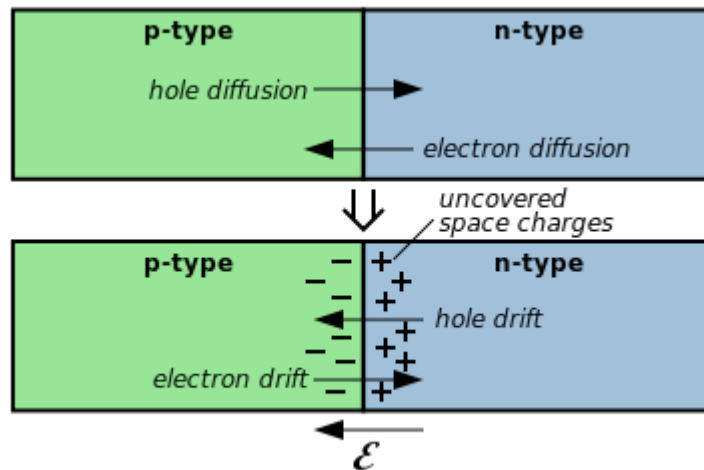
Sanotaan, että aukot ja elektronit **rekombinoituvat**. Tämä johtuu siitä, että erimerkkiset varaukset vetävät toisiaan puoleensa ja samanmerkkiset hylkivät toisiaan. Liitoskohdan ympäristöön jää tällöin p-puolelle elektronien aiheuttama negatiivinen varaus ja n-puolelle aukkojen aiheuttama positiivinen varaus. Liitoskohtaan syntyy **sähkökenttä** (E).

Syntyneen sähkökentän aiheuttamaa jännite-eroa rajakerroksen yli kutsutaan **potentiaalivalliksi**. Potentiaalivalli ei täysin lopeta diffuusiota. Syntyvä sähkökenttä aiheuttaa liikkuvuuden perusteella n-tyypissä olevien johtavuusaukkojen ja p-tyypissä olevien johtavuuselektronien (vähemmistökantajat) siirtymisen liitoksen yli. Tasapainotilassa tämän pienen liikkuvuusvirran vaikutuksen kumoaa yhtä suuri mutta vastakkaisuuntainen diffuusiovirta.

Tämä *estää diffuusion jatkumisen, kun tietty tasapainotila on saavutettu*. Enemmistökantajista tyhjentynyttä aluetta kutsutaan **rajakerrokseksi** tai **tyhjennysalueeksi**. Liitoksen ympärille **syntyy katoalue, rajakerros, jossa ei ole vapaita, sähköä johtavia, varauksia**.

## Elektroniikan perusteet 3 op

### Osa 1: Puoliyohteet, PN-rajapinta



Kuva 9. Diffuusio (ylempi) ja liikkuvuusvirta (alempi)

#### 2.1.1 pn-liitoksen sovelluksia

pn-liitoksella on monia käyttökohteita elektroniikassa. Näistä tyypillisimpiä ovat:

- **Diodi**, jonka tärkein ominaisuus on sen kyky päästää virtaa vain toiseen suuntaan. Diodia käytetään mm. tasasuuntauksessa, jossa vaihtojännitteestä tehdään tasajännitettä.
- **Bipolaaritransistori**, jossa käytetään kahta pn-liitosta. Transistoria voidaan käyttää mm. sähköisenä kytkimenä tehoelektroniikassa ja digitaalisissa piireissä, kuten prosessorissa, tai vahvistimena analogisissa piireissä.

**Elektroniikan perusteet 3 op**  
**Osa 1: Puolijohteet, PN-rajapinta**

- **LED**, jota käytetään monessa sovelluksessa mm. pieninä merkkivaloina.
- **Diodilaser**, joka on ledin erikoissovellus. Diodilaseria käytetään mm. optisessa tiedonsiirrossa, kuten Internetin runkoyhteyksissä.
- **Aurinkokenno**, jossa ulkopuolista energiaa tuodaan pn-liitokseen. Valon säteily saa aikaan elektroni/aukko -pareja, jotka näkyvät pn-liitoksen jännitteenä. Syntyvä jännite on melko pieni (tyypillisesti n. 1 V), joten haluttaessa suurempaa jännitettä, täytyy kennoja kytkeä sarjaan.