



OULUN YLIOPISTO
UNIVERSITY of OULU



PAINETTAVA ELEKTRONIIKKA

Materiaalien sähköiset ominaisuudet

© Jari Hannu, Oulun yliopisto

PAINETTAVA ELEKTRONIIKKA - MATERIAALIT

- Materiaalit elektroniikassa
 - Johtavat
 - Dielektriset
 - Magneettiset
 - Puolijohtavat
 - Funktionaaliset
- Painettavan elektroniikan valmistusmenetelmien vaikutus materiaalivalintoihin
- Painettavan elektroniikan pohjamateriaalit
- Johtavat musteet
- Dielektriset musteet
- Magneettiset musteet
- Funktionaaliset musteet
- Materiaalit komponenttien liittämiseen

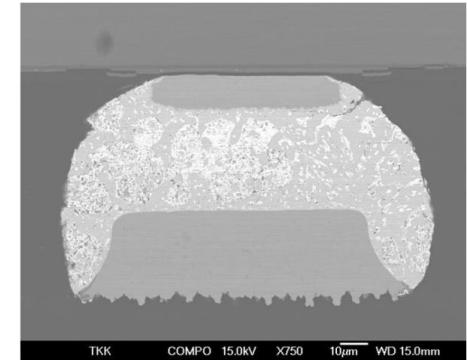


1. ELEKTRONIIKAN MATERIAALIT

- Kaikki elektroniikan komponenttien ominaisuudet riippuvat käytettyjen materiaalien ominaisuuksista

- Metallit

- Hyvä sähkön ja lämmönjohtavuus
- Muovattavuus
- Suuri lujuus ja sitkeys
- Kupari (Cu), kulta (Au), hopea (Ag), tina (Sn), palladium (Pd)
- Sekoitteet: Cu-Sn, Cu-Al, Cu-P, Sn-Ag....
- Ominaisresistanssi $\rho = 10^{-8} - 10^{-2} \Omega\text{cm}$
- Passiivi- ja aktiivikomponenteissa metallia käytetään pääasiassa niiden hyvän sähkön- ja/tai lämmönjohtavuuden takia.
- Käytetään johtimissa, läpivienneissä ja juotteissa



1. ELEKTRONIIKAN MATERIAALIT

- Eristeet
 - Ominaisresistanssi $\rho > 10^6 \Omega\text{cm}$
 - Suuri resistiivisyys ja pieni sähköjohtavuus
 - Muovi, posliini, lasi
- Puolijohteet
 - Ominaisuudet johteen ja eristeen väliltä
 - Käytetyin puolijohdemateriaali pii (**Si**): suuri lämmönsietokyky
 - Galliumarsenidi (**GaAs**)
 - Ominaisuuksia voidaan helposti muokata lisäämällä pieniä määriä epäpuhtauksia
 - Ominaisresistanssi $\rho = 10^{-2} - 10^{-6} \Omega\text{cm}$
 - Edullisia
 - Transistorit, diodit, ...



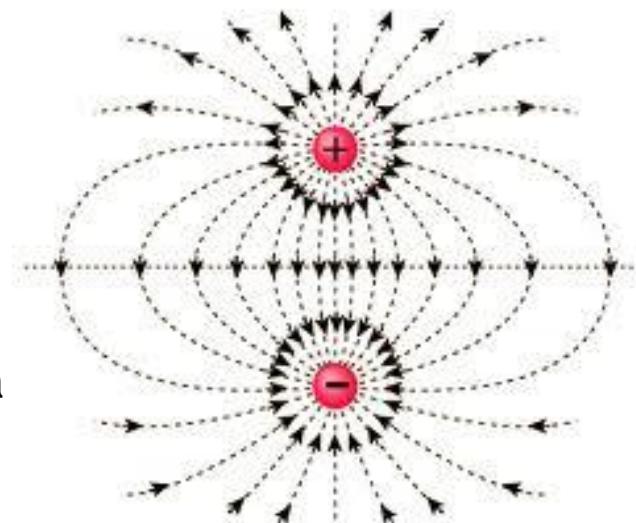
1. ELEKTRONIIKAN MATERIAALIT

- Dielektriset materiaalit

- Dielektrinen materiaali on sähköisesti eriste, mutta sillä on tai se voidaan muokata niin että sillä on sähköinen dipoli rakenne (negatiivinen ja positiivinen varauksen erillinen olemassaolo) molekyylitai atomitasolla
- Dipolien reagoivat sähkökentässä
- Keraami, lasit, polymeerit
- TiO_2 , BaTiO_2 , BST (Barium Strontium Titanate)
- PVDF (polyvinylidenefluoridi)
- Käytetään mm. kondensaattoreissa ja eristeissä

- Magneettiset materiaalit

- Kova/pehmeä riipuen materiaalin hysteresisestä
- Pehmeitä käytetään: muuntimien sydämissä
- Kovia käytetään: pysyvissä magneeteissä
- Kelat



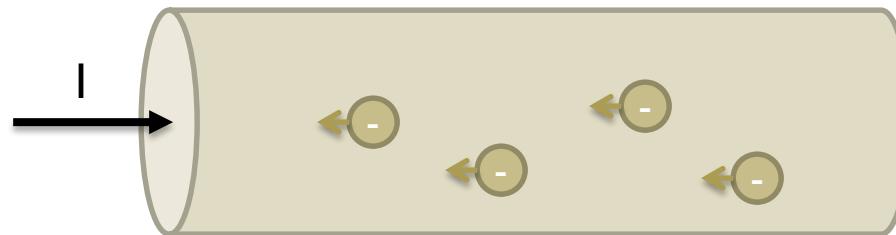
1.4. ELEKTRONIIKAN KOMPONENTIT - PASSIIVIT

- Passiivikomponenteilla ei voi vahvistaa signaaleja
- **Vastus:** Piirissä oleva resistanssi, joka vastustaa sähkövirtaa ja sen suuruus **ohmeissa** (yleensä $k\Omega$ / $M\Omega$)
- **Kondensaattori:** Kondensaattoreja on hyvin monenlaisia ja ne luokitellaan lähinnä käytetyn eristemateriaalin mukaan.
 - **Keraamiset kondensaattorit** ovat kapasitanssiltaan pieniä ja niitä käytetään lähinnä suurtaajuuspiireissä.
 - **Elektrolyyttikondensaattorit** ovat puolestaan kapasitanssiltaan suuria ja niitä käytetään mm. tasaamaan jännitevaihteluita.
- **Kela:** kun lankaa käännetään rullalle vierekkäin (tai päällekkäin) saadaan kela.
 - Tasavirralle kela ei aiheuta (suurta) vastusta, mutta vaihtovirtaa se vastustaa sitä enemmän mitä suurempi on väärähtelyn taajuus ja kelan suuruus.
 - Kelan suuruus (**induktanssi**) mitataan **henreinä (H)** (yleisesti mH tai μH).



OHMIN LAKI

- Sähkövirta (I) on minkä tahansa varauksen liikettä alueesta toiseen



- Sähkövirran määrää on johtimen poikkipinnan läpi siirtynyt varaus aikayksikössä

$$I = \frac{dQ}{dt}$$

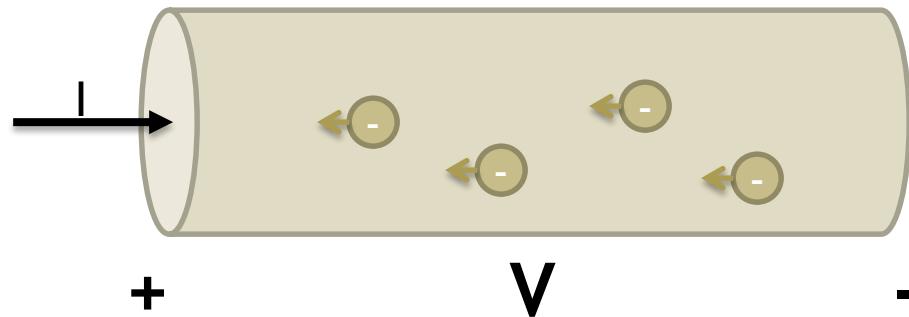
, missä Q = varaus (C) ja t = aika (s)

- Suunnaksi on valittu positiivisten varauksenkuljettajien suunta
- SI-yksikkönä ampeeri ($1\text{ A} = 1\text{ C/s}$)



OHMIN LAKI

- Materiaalissa kulkeva virta aiheuttaa jännitteen



- Jännitteen suuruuteen vaikuttavat virran suuruus ja kappaleen **resistiivisyyys**

$$V = IR \text{ (*Ohmin laki*)}$$



OHMIN LAKI

- Resistiivisyys määräytyy kappaleen koon ja materiaalin mukaan

$$R = \frac{\rho l}{A}$$

, missä l = kappaleen pituus,
 A = kappaleen poikkipinta-ala ja
 ρ = materiaalin ominaisvastus
(Ωm)

$$\rightarrow \rho = \frac{RA}{l}$$

- Kun liitetään vielä ohmin lakiin $R = \frac{V}{I} \rightarrow \rho = \frac{VA}{Il}$
- Johtavuus $\rightarrow \sigma = \frac{1}{\rho} \quad [1/\Omega\text{m}]$



SÄHKÖINEN JOHTAVUUS

- Kiinteiden materiaalien sähköisten johtavuuksien ero on valtaisa, jopa 10^{24} kertainen!
- Materiaalit voidaan jaotella johtavuuden mukaan
 - **Johteiksi** ($\sigma > 10^4 \text{ } 1/\Omega\text{m}$)
 - **Puolijohtaviksi** ($10^{-6} < \sigma < 10^4 \text{ } 1/\Omega\text{m}$)
 - **Eristeiksi** ($\sigma < 10^{-6} \text{ } 1/\Omega\text{m}$)
- Alla muutamien materiaalin eri johtavuusarvoja ($1/\Omega\text{m}$) huoneenlämmössä

Metallit	
Hopea	$6,8 * 10^7$
Kupari	$6,0 * 10^7$
Rauta	$1,0 * 10^7$

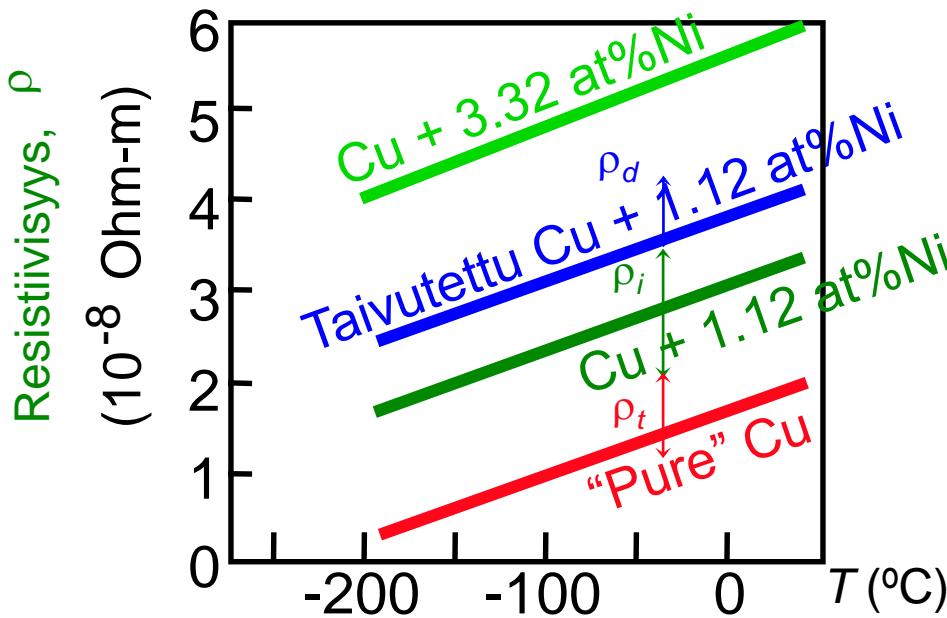
Keraamat	
Soodalasi	$10^{-10} - 10^{-11}$
Betoni	10^{-9}
Alumiinioksidi	$< 10^{-13}$

Puolijohtleet	
Pii	$4 * 10^{-4}$
Germanium	$2 * 10^0$
GaAs	10^{-6}

Muovit	
Polystyreeni	$< 10^{-14}$
Polyeteeni	$10^{-15} - 10^{-17}$

METALLIEN SÄHKÖNJOHTAVUUS

- Useimmat metallit ovat erittäin hyviä johtimia
 - Paljon vapaita elektroneja
- Johtavuus kuitenkin voi heikentyä materiaalissa
 - Lämpötilan vaikutuksesta
 - Epäpuhtauksien vaikutuksesta
 - Muodonmuutoksen vaikutuksesta



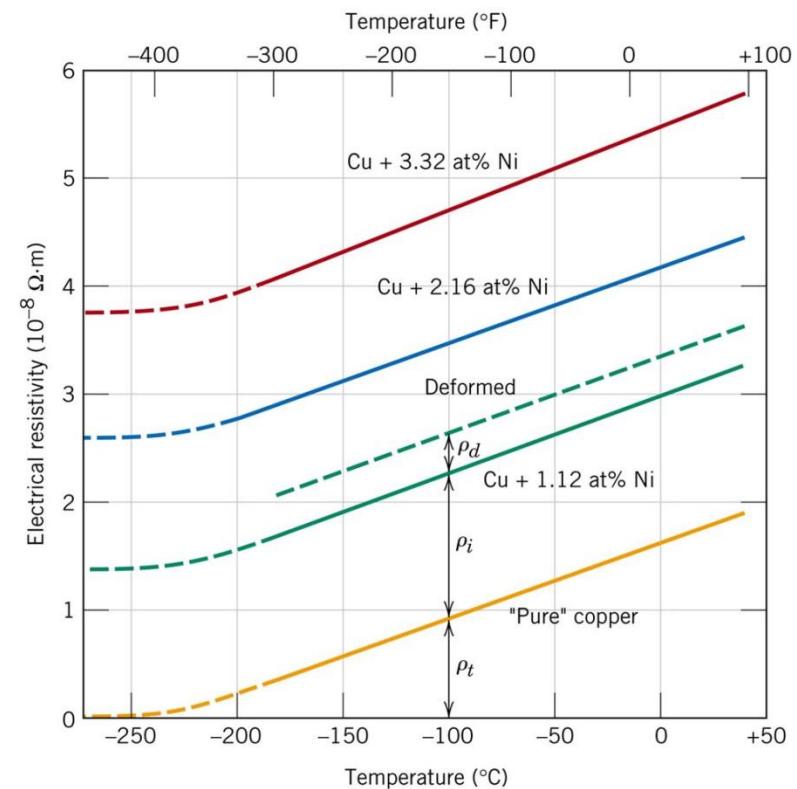
- Resistanssi kasvaa:
 - lämpötilasta
 - wt% epäpuhtauksista
 - %CW

$$\rho = \rho_{\text{thermal}} + \rho_{\text{impurity}} + \rho_{\text{deformation}}$$



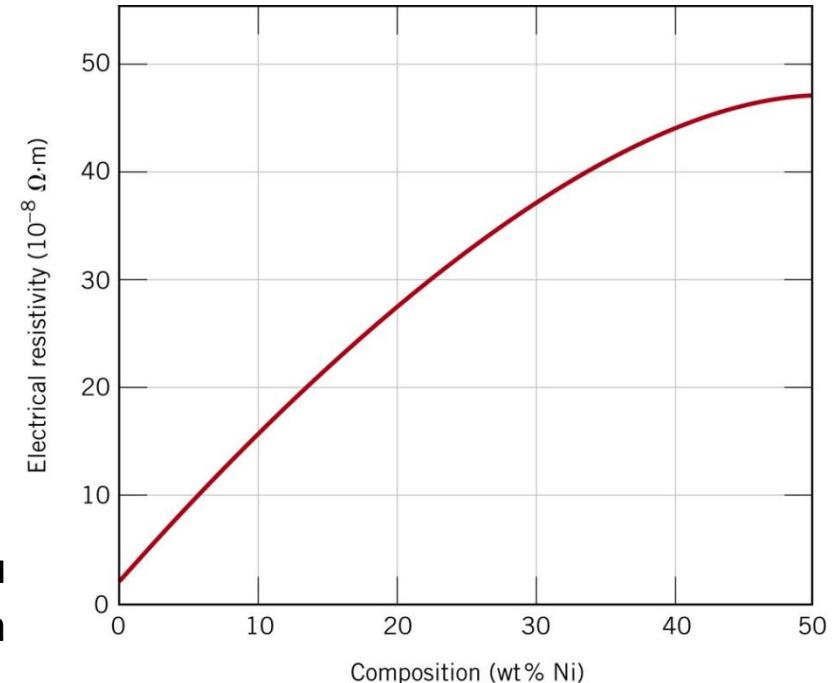
METALLIEN SÄHKÖNJOHTAVUUS

- Lämpötilan vaikutus
 - Resistiivisyys nousee lineaarisesti
 - $\rho_t = \rho_0 + \alpha T$
 - ρ_0 ja α ovat vakioita jokaiselle eri metallille
 - Resistanssin nousu johtuu lämpövärinästä sekä muista atomihilojen epäsäännöllisyyksistä
 - Epäsäännöllisyydet toimivat elektroneja siroittavina keskuksina



METALLIEN SÄHKÖNJOHTAVUUS

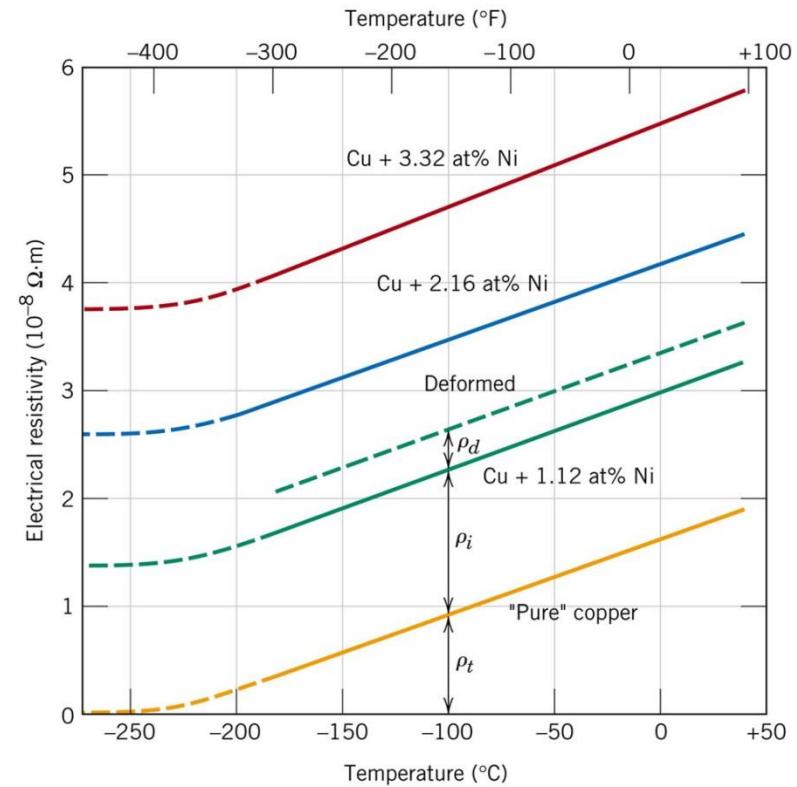
- Epäpuhtauksien vaikutus
 - Kun lisätään epäpuhtautta, joka luo kiinteän yhteyden puhtaan materiaalin kanssa resistiivisyys ρ_i on suoraan suhteessa epäpuhtauden konsentraatioon c_i (%-yksikkö)
 - $\rho_i = Ac_i(1 - c_i)$
 - A on vakio seosaineille, joka riippuu puhtaasta ja epäpuhtaasta aineesta (metallista)
 - Kaksifaasisille metalliseoksille voidaan arvioida resistiivisyyttä:
 - $\rho_i = \rho_\alpha V_\alpha + \rho_\beta V_\beta$



- $\rho_{\alpha\&\beta}$ ovat resistiivisyydet eri faaseille ja $V_{\alpha\&\beta}$ ovat tilavuussuheteita

METALLIEN SÄHKÖNJOHTAVUUS

- Muodonmuutosten vaikutukset
 - Syynä ovat useat elektronien siroamisen mahdollisuudet
 - Vaikutukset ovat paljon pienemmät kuin lämpötilan ja epäpuhtauksien vaikutukset



DIELEKTRISYYS ?!?

- Johteissa elektronit pääsevät liikkumaan vapaasti mutta entäs eristeissä?
- Kun eriste joutuu sähkökenttään elektronit eivät erotu molekyyleistä
→ jakautuu ulkoisen varauksen mukaan
- Dielektrisyys perustuu aineen **polarisoitumiseen** sähkökentässä



DIELEKTRISYYS ?!?

- **Polarisaatio** = sähköisten dipolien (positiivinen ja negatiivinen varaus) järjestäytymisen ulkoisen sähkökentän vaikutuksesta → muuttaa systeemin kokonaiskentän voimakkuutta
- Polarisaatiomekanismeja ovat
 - Elektroninen polarisaatio
 - Ionipolarisaatio
 - Orientoitumispolarisaatio
 - Avaruusvarauspolarisaatio



DIELEKTRISYYS- JOHDANTOA

- Teoreettisessa mielessä eristeen tärkein ominaisuus on kyky polarisoitua sähköisesti:
 - jos dielektrisestä aineesta koostuvan eristeen yli kytketään sähkökenttä, eristeeseen syntyy **sähköinen polarisaatio**.
 - eristen molekyylien elektronit pyrkivät molekyylin ytimen toiselle puolelle siten, että ne vastustavat ulkoista sähkökenttää ja synnyttää eristen pinnoille sähkövarauksen.
 - Tätä polarisaatiokykyä kuvataan aineen **permittiivisyydellä**.



Dielektrisyys - permittiivisyyss

- **Permittiivisyyss (ϵ)**, kompleksinen suure ($\epsilon' + j\epsilon''$), joka kuvaa, miten väliaine vaikuttaa siihen kohdistuvaan sähkökenttään.
- Permittiivisyyden SI-yksikkö:
 - faradi per metri ($1 \text{ F/m} = 1 \text{ A}\cdot\text{s}/(\text{V}\cdot\text{m}) = 1 \text{ C}^2/(\text{N}\cdot\text{m}^2)$).
- **Suhteellinen permittiivisyyss ϵ_r** , (*dielektrinen vakio*), kertoo väliaineen permittiivisyyden suhteessa tyhjiön permittiivisyyteen ϵ_0 .
 - $\epsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12} \text{ F/m}$
- ϵ_r on yksikötön suhdeluku, jonka avulla permittiivisyyss esitetään muodossa

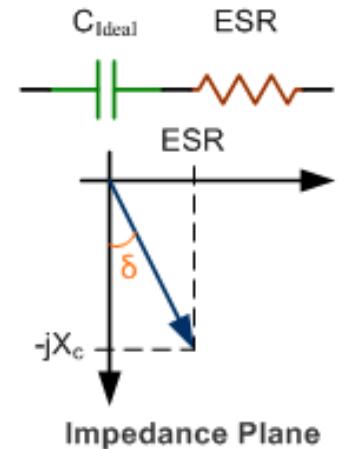
$$\epsilon = \epsilon_r \epsilon_0$$



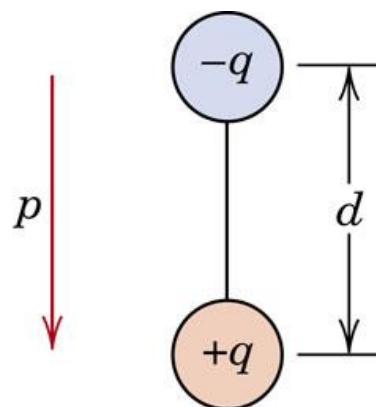
Dielektrisyys - permittiivisyys

- Dielektrisen materiaalin häviöiden vuoksi permittiivisyys on kompleksinen
- Häviöt johtuu dielektrisen materiaalin absorboimasta sähköenergiasta
 - $\epsilon' = \epsilon_r$:n reaaliosa = dielektrisyysvakio
 - $\epsilon'' = \epsilon_r$:n imaginääriosa
 - $\tan \delta_\epsilon = \epsilon''/\epsilon' =$ materiaalin häviökulman tangentti
 - $\tan \delta_\epsilon = R_\epsilon \omega C = R_\epsilon =$ materiaalin häviövastus
- Eristeen suhteellinen permittiivisyys ja häviökulma riippuvat lämpötilasta ja taajuudesta

Dielectric Loss Tangent



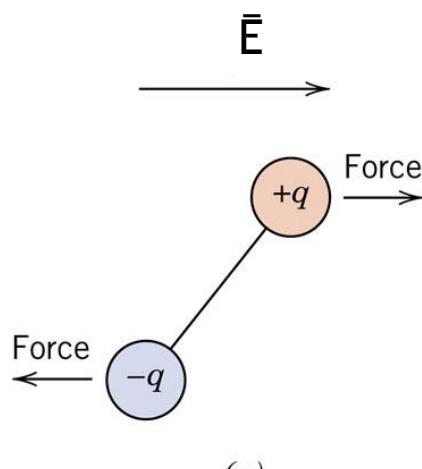
Dielektrisyys - polarisaatio



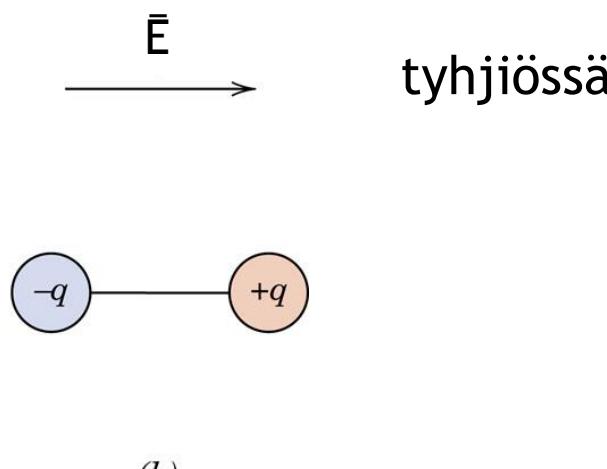
Sähköisen dipolin dipolimomentti:

$$p = qd$$

Dipoli sähkökentässä E ,
→ dielektrinen siirtymä D (dielectric displacement)



(a)



(b)

$$D_0 = \epsilon_0 E$$

$$D = \epsilon E$$



DIELEKTRISYYS - POLARISAATIO

- Polarisoituvassa aineessa sähkökenttä

$$E = E_1 - E_2$$

- E_1 = ulkoisten sähkövarausten aiheuttama kenttä
- E_2 = polarisaation synnyttämien dipolien aiheuttama lisäkenttä

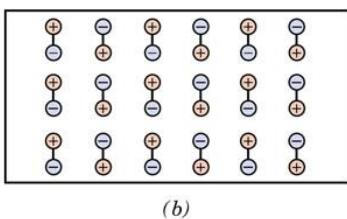
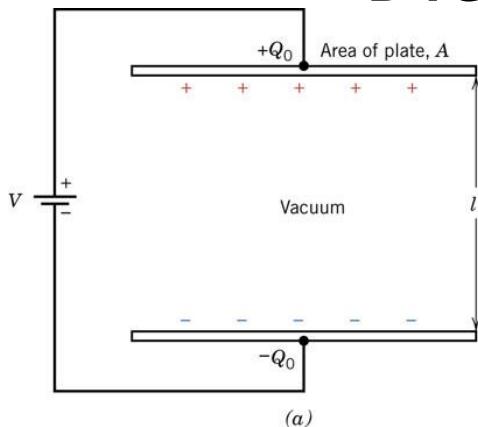
Sähkövuon tiheys: $\frac{\Phi}{A} = D = \epsilon_o E_1 = \epsilon_o (E + \bar{E}_2)$

$$D = \epsilon E = \epsilon_o \epsilon_r E \Rightarrow E \epsilon = \epsilon_o (E + E_2)$$

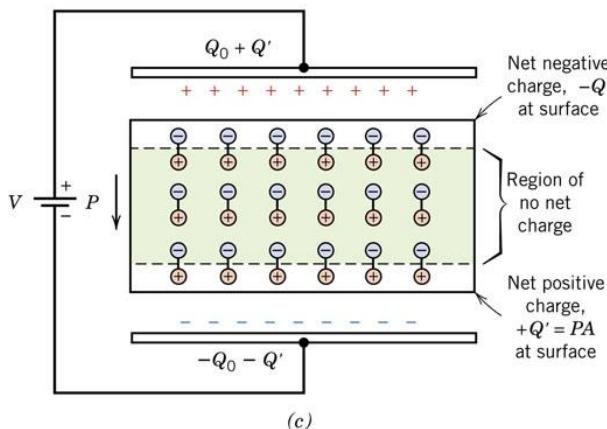
eli $\epsilon = \epsilon_o \left(1 + \frac{\bar{E}_2}{E} \right)$



Dielektrisyys - polarisaatio



(b)



(c)

Dielektrisessä materiaalissa polarisaatio P vaikuttaa dielektriseen siirtymään D

$$D = \epsilon E + P$$

Polarisaatio P voidaan ajatella myös dielektrisen materiaalin

- kokonaisdipolimomentti/tilavuusyksikkönä tai
- dielektrin polarisaatosähkökentänä seurauksena yhtenäisestä atomi/molekyyli/dipoli järjestyksestä ulkoisen sähkökentän seurauksena

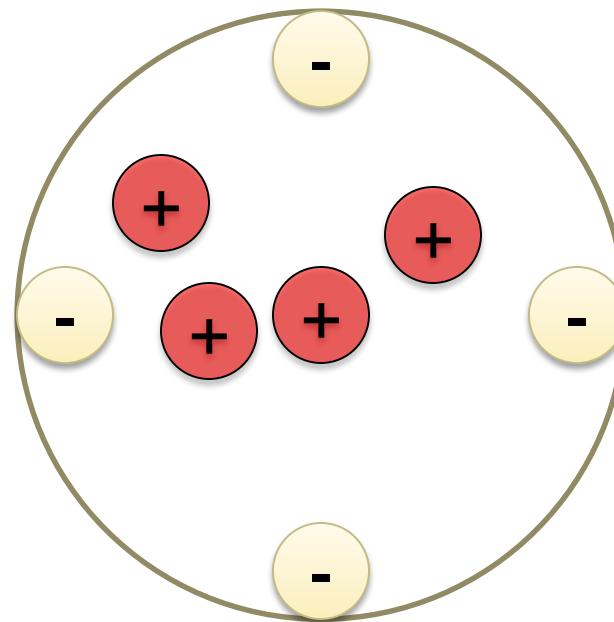
Polarisaatio [C/m^2]

$$P = \epsilon_0(\epsilon_r - 1)E$$



Dielektrisyys - polarisaatio

- Avaruuspolarisaatio
 - Johtavassa aineessa syntyy avaruusvaraus

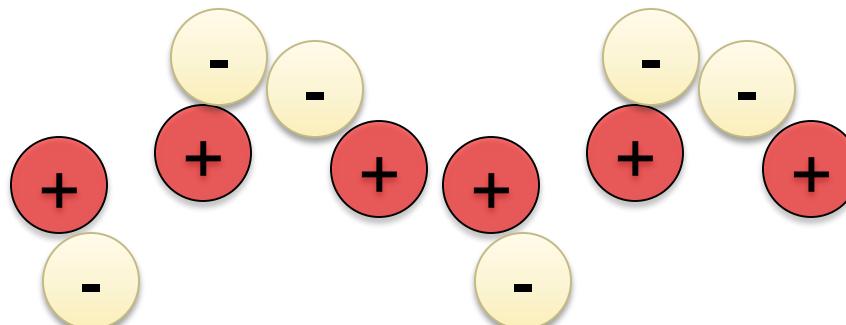


Ei ulkoista sähkökenttää
Ulkoinen sähkökenttä



Dielektrisyys - polarisaatio

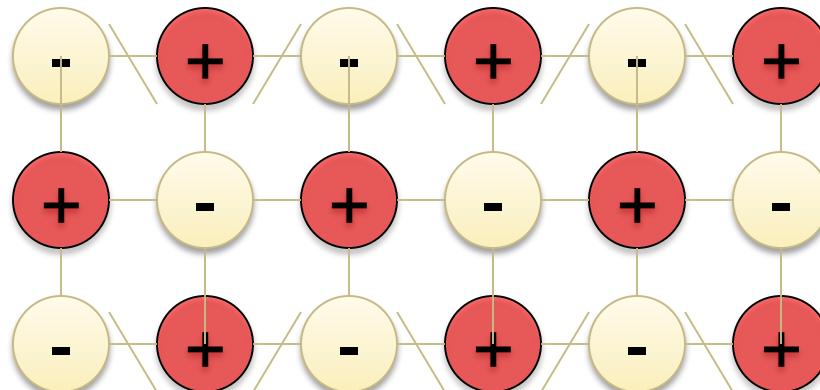
- Orientoitumispolarisaatio
 - Pysyvät dipolit orientoituva, vain materiaaleissa joissa on pysyviä dipoleita
 - Polarisaation muuttaa pysyvien dipolien suuntautumista
(random → oriented)



Ei ulkoista sähkökenttää
Ulkoinen sähkökenttä

Dielektrisyys - polarisaatio

- Ionipolarisaatio
 - Eri merkkiset ionit ionimolekyyleissä ja kiteissä siirtyvät toisiinsa nähdien
 - Ainoastaan ionisissa materiaaleissa

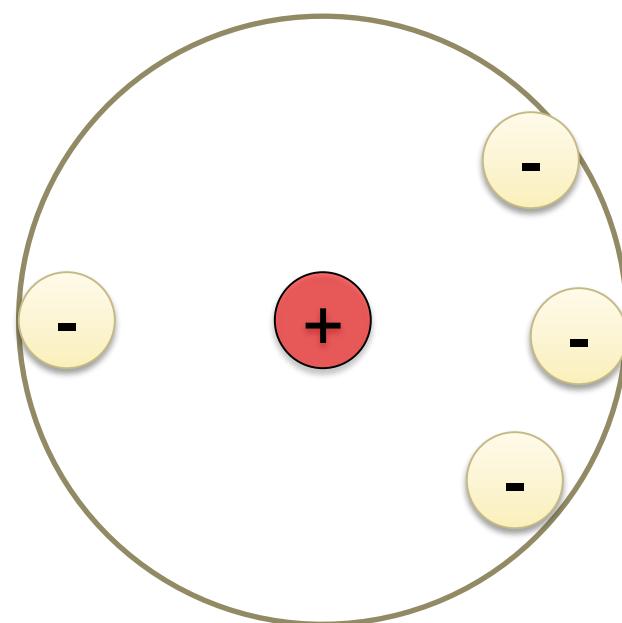


Ei ulkoista sähkökenttää

Ulkoinen sähkökenttä

DIELEKTRISYYS - POLARISAATIO

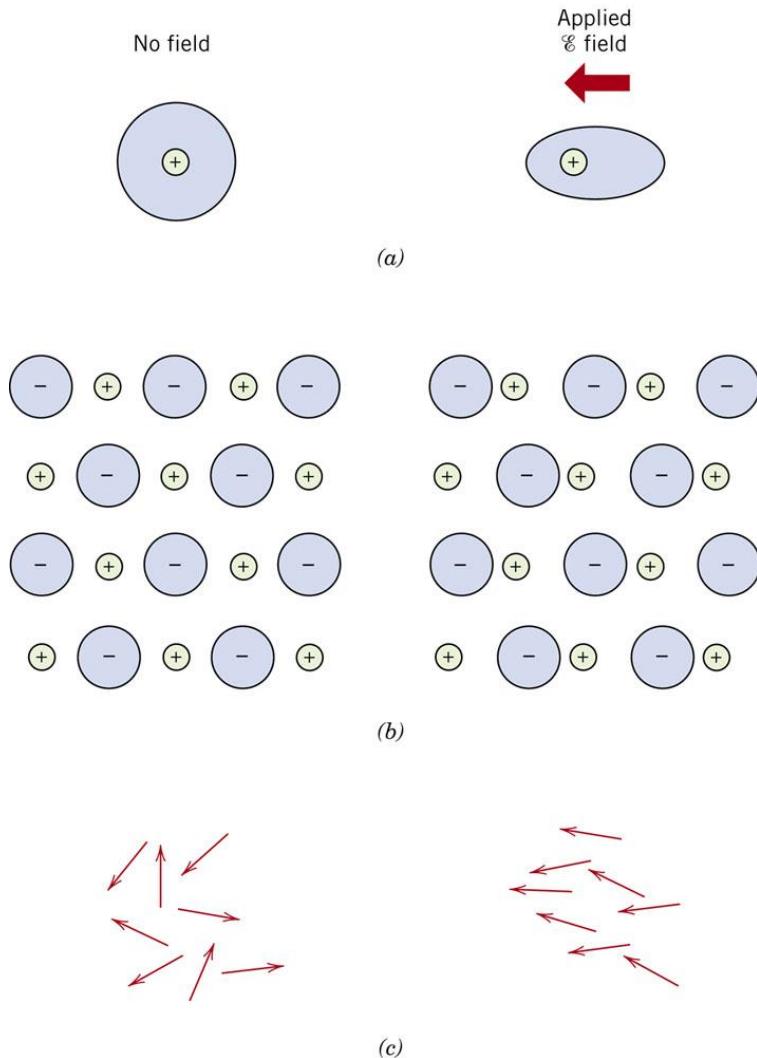
- Elektroninen polarisaatio
 - Atomin tai ionin elektronit (elektronipilvi) siirtyvät ytimeen nähdien
 - Ainoastaan ulkoisen sähkökentän vaikutusena



Ei ulkoista sähkökenttää
Ulkoinen sähkökenttä



DIELEKTRISYYS - POLARISAATIO YHTEENVETO



- Polarisaatio on pysyvien tai aiheutettujen atomien (a), ionien (b) tai dipolien (c) suuntaamista ulkoisen sähkökentän avulla
- Dielektrisissä materiaaleissa vaikuttaa yleensä jokin tai useampi mekanismi materiaalista ja ulkoisesta kentästä riippuen



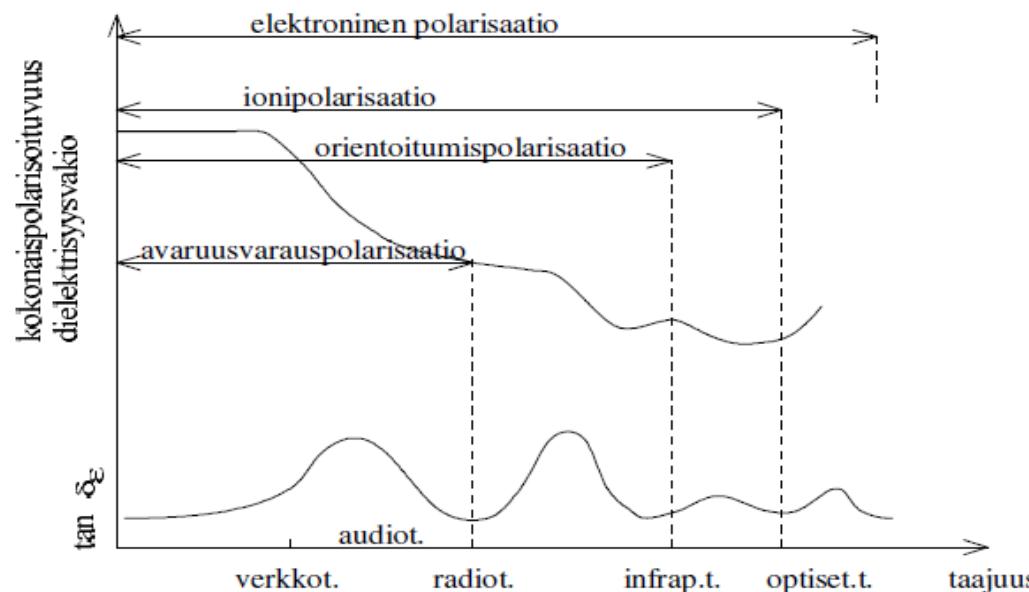
DIELEKTRISYYS VS. TAAJUUS

- Käytännön sovelluksissa useimmiten käytössä vaihtovirta (AC)
→ sähkökenttä muuttaa suuntaansa ajan funktiona
- Mitäs polarisaatio?
→ yrittää muuttua perässä, mutta viive!
- Siirryttääessä korkean taajuuden sovelluksiin → sykli lyhenee

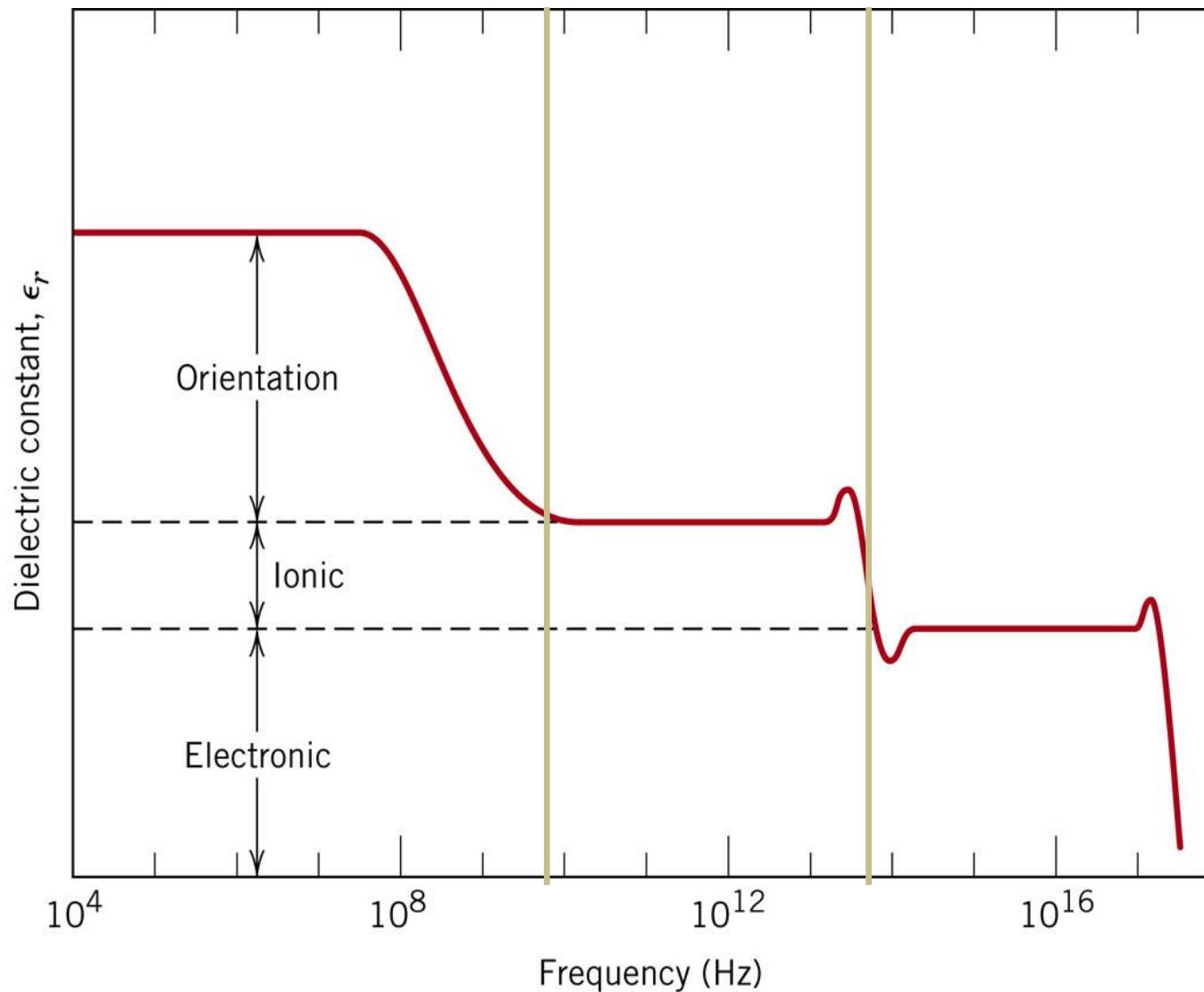


DIELEKTRISYYS VS. TAAJUUS

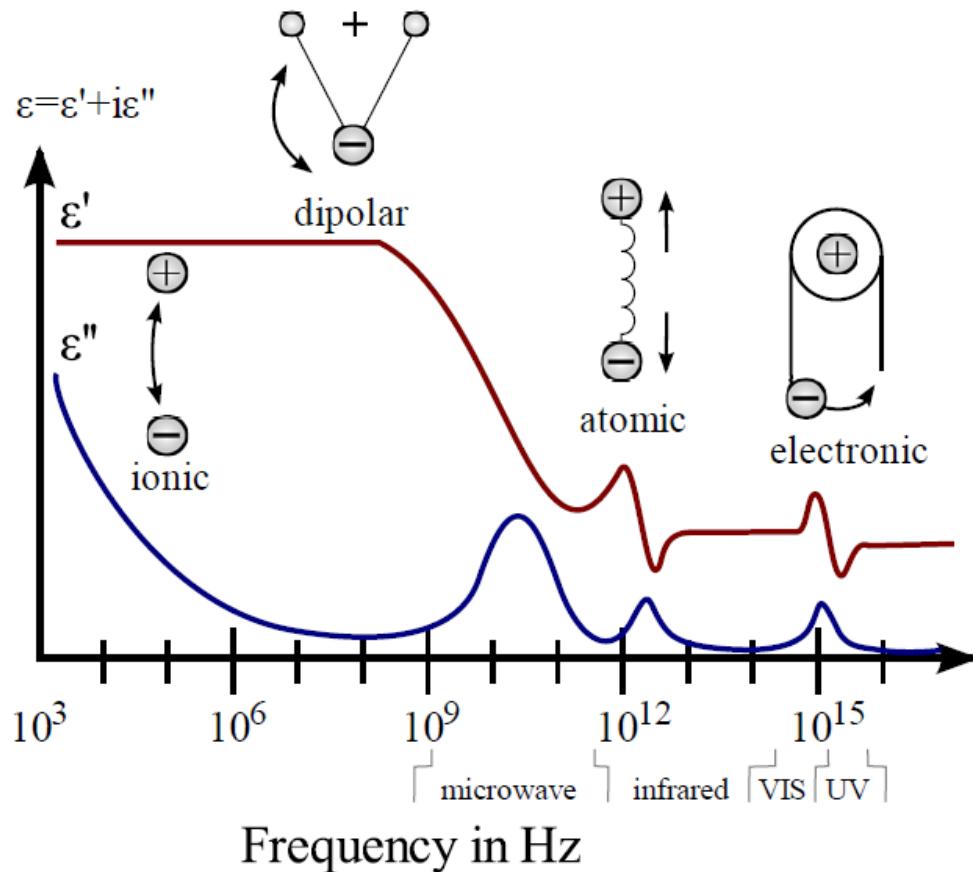
- Dielektrinen relaksaatio on viive materiaalin suhteellisessa permittiivisyydessä (ϵ_r)
- Taajuusalueella 10^2 - 10^{10} Hz, riippuen polarisaatiomekanismista
- Relaksaatiotaajuus, taajuus jonka jälkeen polarisaatiomekanimi ei enää vaikuta materiaalin permittiivisyyteen.
- Jokaisella polarisaatiomekanismilla on oma relaksaatiotaajuutensa ja taajuuden kasvaessa → hitaammat mekanismit tippuvat pois



DIELEKTRISYYS: TAAJUUS VS. PERMITIIVISYYS



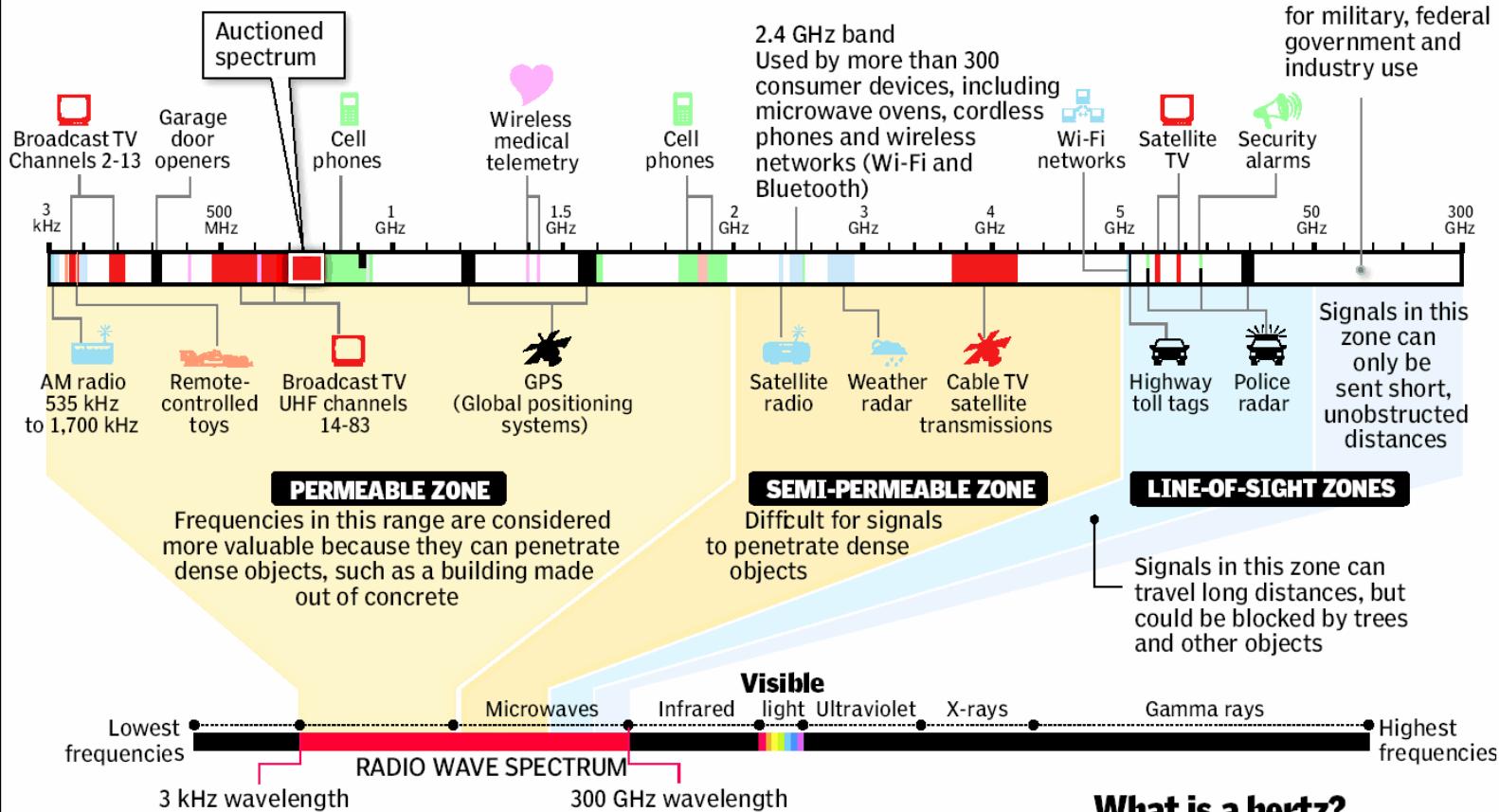
DIELEKTRISYYS: TAAJUUS VS. $\tan \Delta_{\epsilon}$



- Dielektrinen häviö kerroin (loss factor)
- $\tan \delta_{\epsilon} = \frac{\epsilon''}{\epsilon'}$
- Häviöissä piikki jokaisen kriittisen taajuuden kohdalla

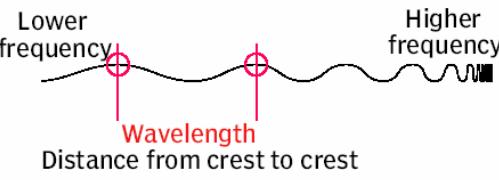
Inside the radio wave spectrum

Almost every wireless technology – from cell phones to garage door openers – uses radio waves to communicate. Some services, such as TV and radio broadcasts, have exclusive use of their frequency within a geographic area. But many devices share frequencies, which can cause interference. Examples of radio waves used by everyday devices:



The electromagnetic spectrum

Radio waves occupy part of the electromagnetic spectrum, a range of electric and magnetic waves of different lengths that travel at the speed of light; other parts of the spectrum include visible light and x-rays; the shortest wavelengths have the highest frequency, measured in hertz



What is a hertz?

One hertz is one cycle per second. For radio waves, a cycle is the distance from wave crest to crest

1 kilohertz (kHz) = 1,000 hertz

1 megahertz (MHz) = 1 million hertz

1 gigahertz (GHz) = 1 billion hertz

DIELEKTRINEN VAHVUUS

- Mikäli dielektrinen materiaali joutuu liian suureen sähkökenttää sen eristeominaisuudet eivät enää “kestä”
 - iso osa elektroneita saattaa hypätä johtavuuskaistalle
 - materiaalin läpi kulkeva virtaa kasvaa dramaattisesti aiheuttaen läpilyönnin ja materiaalin kärsimisen (palaminen, sulaminen, höyrystyminen) tai jopa hajoamisen
- **Dielektrinen vahvuus (dielectric strength)** kertoo tarvittavan sähkökentän suuruuden joka vaaditaan läpilyönnin tapahtumiseksi

aine	suhteellinen permittiivisyys	läpilyönti- kestävyys [MV/m]
akryyli	3.3	20
eboniitti	2.7	10
kuiva ilma	1.0006	4.7
lasi	5-10	15
kova paperi	5	15
eristyspaperi	5	30
posliini	5.5	35
tislattu vesi	81	30



DIELEKTRINEN VAHVUUS

Table 18.5 Dielectric Constants and Strengths for Some Dielectric Materials

Material	Dielectric Constant		Dielectric Strength (V/mil) ^a
	60 Hz	1 MHz	
<i>Ceramics</i>			
Titanate ceramics	—	15–10,000	50–300
Mica	—	5.4–8.7	1000–2000
Stearite ($\text{MgO}-\text{SiO}_2$)	—	5.5–7.5	200–350
Soda-lime glass	6.9	6.9	250
Porcelain	6.0	6.0	40–400
Fused silica	4.0	3.8	250
<i>Polymers</i>			
Phenol-formaldehyde	5.3	4.8	300–400
Nylon 6,6	4.0	3.6	400
Polystyrene	2.6	2.6	500–700
Polyethylene	2.3	2.3	450–500
Polytetrafluoroethylene	2.1	2.1	400–500

^a One mil = 0.001 in. These values of dielectric strength are average ones, the magnitude being dependent on specimen thickness and geometry, as well as the rate of application and duration of the applied electric field.



DIELEKTRISET MATERIAALIT

- Dielektrinen materiaali on eriste sähköisiltä ominaisuuksiltaan, mutta se voidaan sähkökentän avulla polaroida
- Keraami, polymeeri, lasi...
- Usein myös mekaanisesti kestäviä
- Permittiivisyys << ϵ_r >>



DIELEKTRISET MATERIAALIT - KERAAMIT

- Ns. perinteisiä keraameja, jotka on tehty kolmesta perusmateriaalista savesta, piikivestä ja maasälvästä, käytetään tiilissä ja harkoissa rakennemateriaaleina.
- Toisaalta puhtaita tai lähes puhtaita keraameja (Al_2O_3 , SiC ja Si_3N_4) käytetään mm.
 - Korkealämpötilasovelluksissa
 - Elektroniikkasovelluksissa
 - Eristeinä sekä matala- että korkeajännitepiireissä
 - Kondensaattoreissa
 - Pietsokiteissä
 - Optoelektronikassa
- Yksi tärkeimmistä keraamimateriaaleista on lasit (rakenne amorfinen), yleisimpiä lyijylasit, boorisilikaatti ja Na_2O :ta ja CaO :ta sisältävät lasit
 - läpinäkyvyys ja kovuus huoneenlämpötilassa
 - erinomainen korroosionkesto.
 - Sähköteollisuudessa laseja käytetään erilaisissa lampuissa
 - niiden eristyskyvyn ja ilmatiiviyyden ansiosta.



DIELEKTRISET MATERIAALIT - KERAAMIT

- Keraamiset tuotteet valmistetaan usein keraamipulverista tai - partikkeleista, jotka nostetaan korkeaan lämpötilaan, jotta partikkelit bondautuvat yhteen (sintraus).
- Keraamimateriaalin valmistus sisältää yleensä kolme osaprosessia:
 - *Materiaalin esikäsittelyssä hienonnettuun perusmateriaaliin lisätään lisääineet joko kuiva- tai märkäprosessina.*
 - *Materiaalin muovaus tapahtuu joko kylmä- tai kuumapuristuksella, valamalla tai ekstruusiolla.*
 - *Lämpökäsittelyssä tapahtuu mahdollisen väliaineen poisto ja/tai kuivaus ja/tai sintraus.*



DIELEKTRISET MATERIAALIT - KERAAMIT

- Alumina: Keraami jossa Al_2O_3 kiteitä, jotka ovat hautautuneina lasimaiseen matriisiin.
 - Näiden keraamien dielektrinen kesto on varsin hyvä ja dielektriset häviöt varsin pieniä.
 - Sintrattu alumina (94%, 96%, 98%, 99 % Al_2O_3) on elektronikassa yleisesti käytetty substraattimateriaali.
 - Sen dielektriset häviöt ovat alhaisia ja sen pinta on tasainen.
- LTCC (Low Temperature Cofired Ceramics)
 - lähtömateriaalina käytetään sintraamatonta alumiinioksidikeraamia + lasia
 - Monikerrosrakenteiden valmistamiseen käytetty pohjamateriaali
 - Massatuotantokelpoisuus
 - Etuja suurtaajuussovellutuksissa johtuen piirien materiaalien hyvistä sähköisistä ominaisuuksissa.
 - Alustaan voidaan myös valmistaa upotuksia ja suojauskerkille komponenteille



Dielektriset materiaalit - Polymeerit

- Matala sähköinen ja terminen johtavuus (voidaan käyttää eristeinä)
- Massavalmistettava, halpa ja kevyt
- **Termoplastiset** kestäviä ja helposti uudelleen muokattavia
- **Termoset-** polymeerit vahvempia mutta hauraampia ja muokattavuus kärsii
- Pieni permittiivisyys (2-10), erittäin pienet dielektriset häviöt $\tan \delta_{\epsilon} \sim 1-5 \times 10^{-4}$
- Voidaan käyttää matriisimateriaaleina komposiiteissa
- Polypropylene, epoxy, PVDF, PPS, POE, PTFE



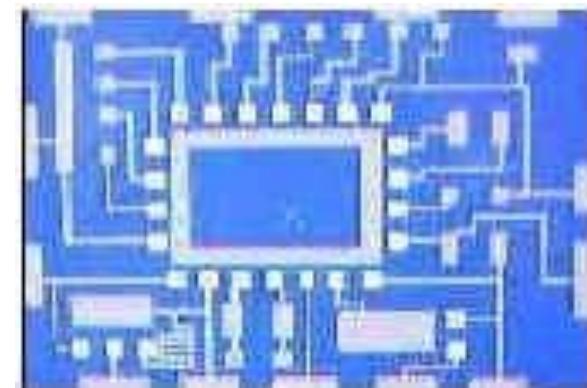
DIELEKTRISET MATERIAALIT - SOVELLUSTEN NÄKÖKULMASTA

- Tehoelektronikkaan $\epsilon'' <$, ettei energiaa hukkuu lämpöön
- Korkean taajuuden elektronikassa $\tan \delta_\epsilon \ll$, resonanssit pieniksi (filtterit, antennit)
- Matalan permittiivisyyden dielektrit ($\epsilon_r < 15$) eristykseen, mekaaniset ominaisuudet tärkeitä
- Suuren permittiivisyyden dielektrit ($\epsilon_r < 500$) ferrosähköisiin sovelluksiin



DIELEKTRISET MATERIAALIT - $E_R < 15$

- Eristeinä
- Monikerros piirilevyjen materiaaleina
- Painetun elektroniikan pohjalevynä
- Alumina (Al_2O_3)
- LTCC



DIELEKTRISET MATERIAALIT -15 < E_R > 500

- Usein ferrosähköisiä
- $\tan \delta_\epsilon < 0.003$
- Suurteho kondensaattoreissa (0.5 - 50 MHz)
- Yleiselektronikassa kondensaattorimateriaalina (1 kHz - 100 MHz)
- Mikroaaltotaajuus resonaattoreissa (0.5 - 50 GHz)
- Ti, Zr, Sn => TiO_2

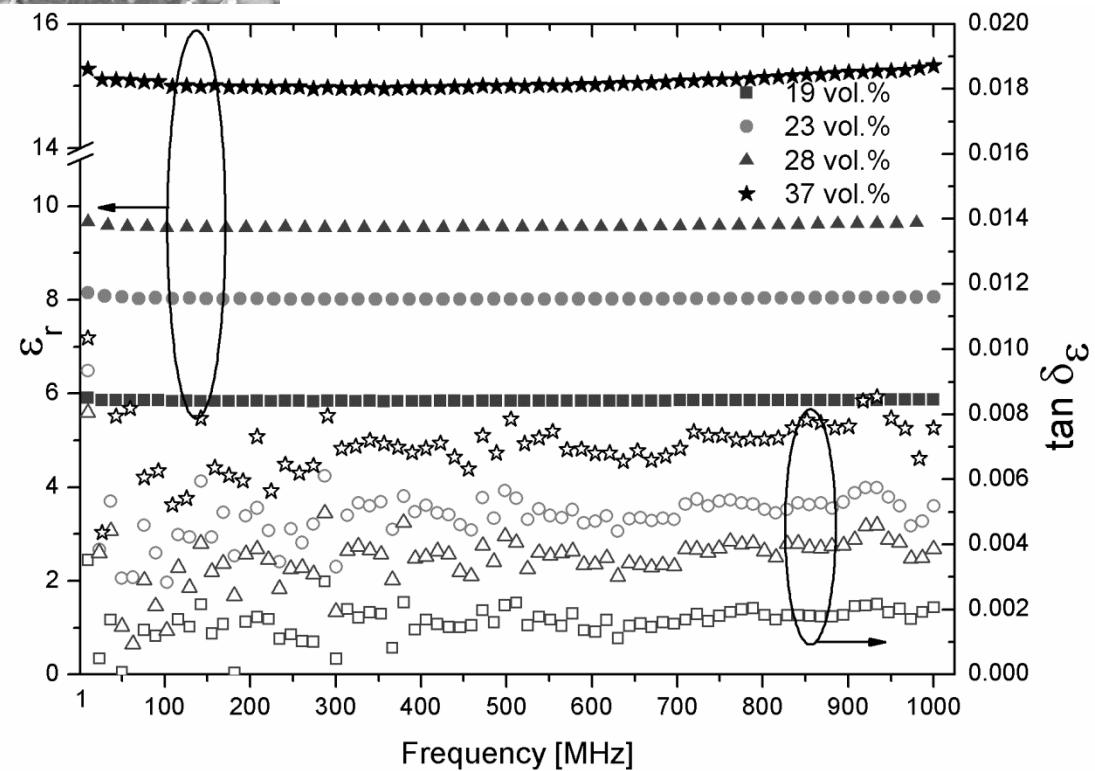
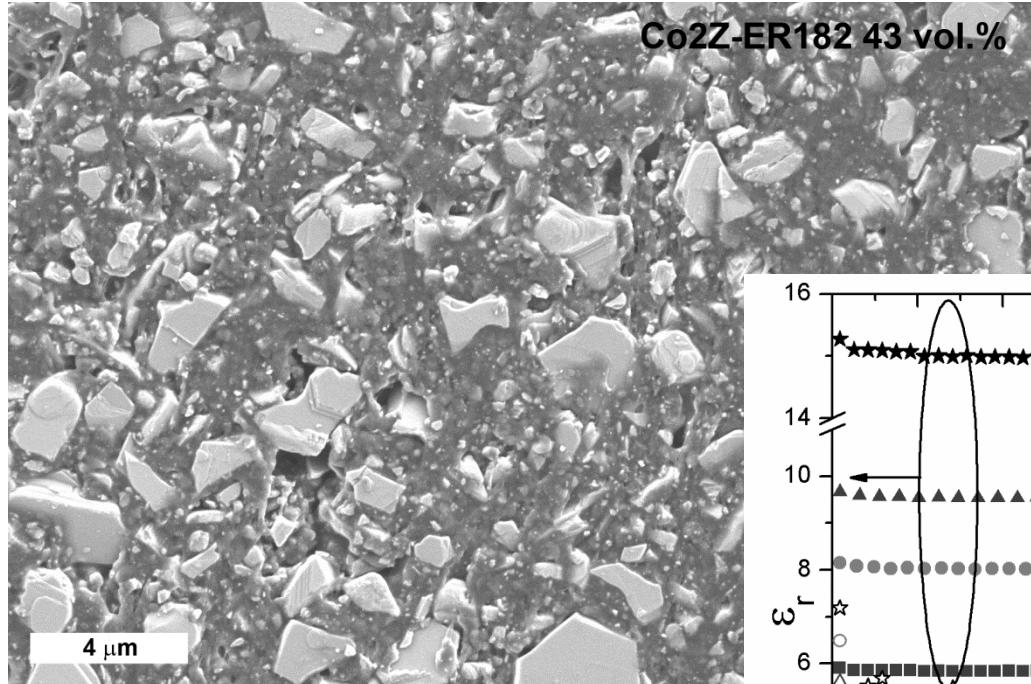


DIELEKTRISET MATERIAALIT - $\epsilon_R > 500$

- ferrosähköisiä
- $\tan \delta_\epsilon < 0.003$
- Relaksoreina (lämpötila) 500 Hz - 1GHz
- Ferrosähköisinä muistikomponentteina (RAMs)
- Ba, Ti, Sr, => BaTiO_3 , BST

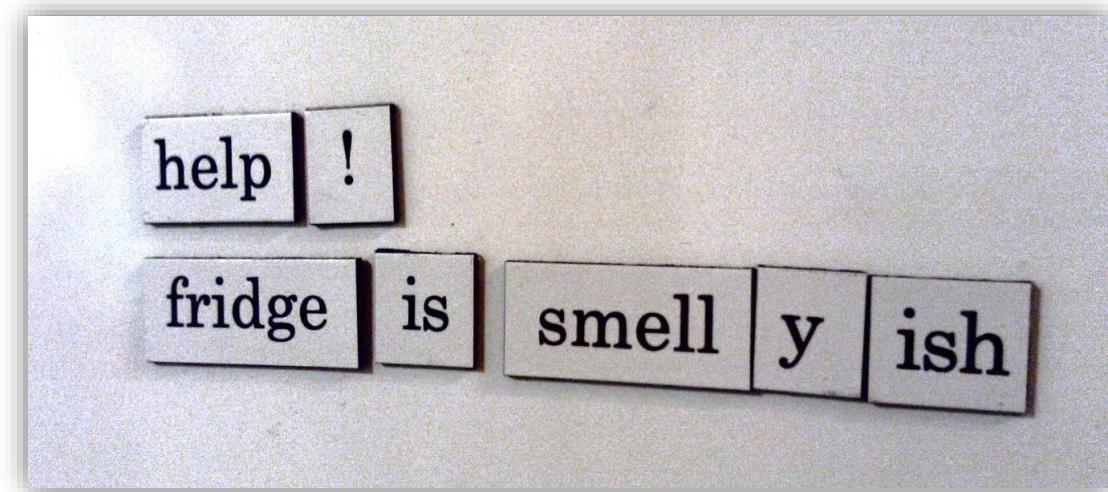


KOMPOSIITTI



MAGNEETTISTEN MATERIAALIEN SOVELLUSKOHTEITA

- Magneettinen muisti
- Tehomuuntimet
- Antennit
- Sähkömoottorit



MAGNEETTINEN MUISTI

- Digitalisoitu data sähköisenä signaalina tallennetaan magneettiseen materiaaliin
- Siirto tapahtuu käyttämällä “kirjoitus/luku” päättä
- “kirjoitus” tehdään järjestämällä domeenit pienillä alueilla magneettikentän avulla
- “luku” tapahtuu tutkailemalla muutoksia magnetisaatiossa

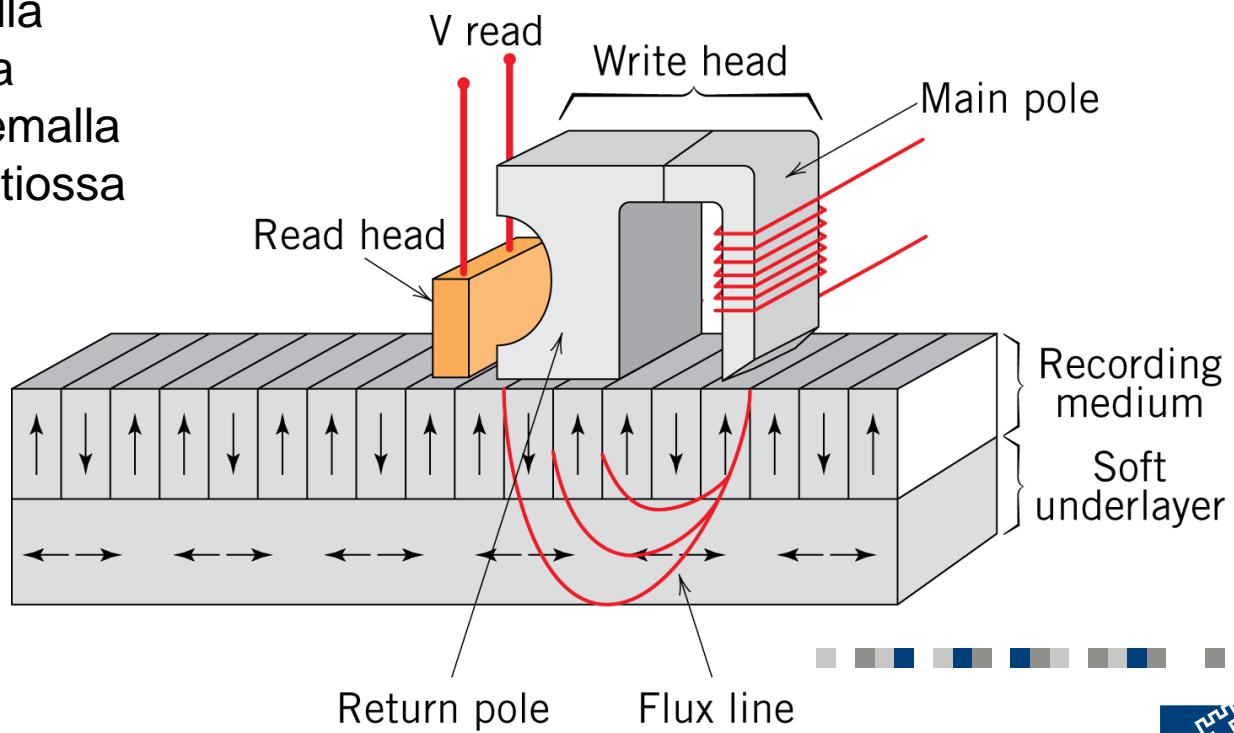


Fig. 20.23, Callister & Rethwisch 8e.



MUUNTAJAT JA KELAT

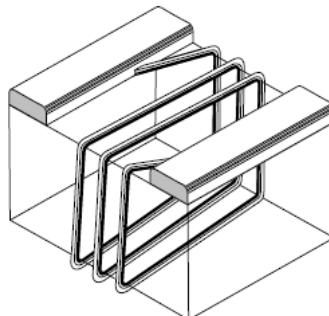


Fig. 2. Typical Wire-Wound Inductor Chip Design

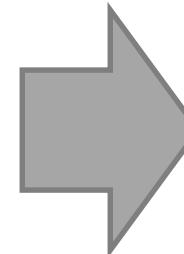
ANTENNIT

Antennin efektiivinen korkeus h_e

$$h_e = \frac{U}{E} = 2\pi\mu_{re} \frac{An}{\lambda}$$

A silmukan pinta-ala,
 n silmukoiden lkm,
 λ aallonpituuus,
 μ_{re} suhteellinen permeabiliteetti

Matalammat taajuudet vaativat suuremman efektiivisen korkeuden, koska aallonpituuus on pitempi



Magneettiset materiaalit mahdollistavat suuremman efektiivisen korkeuden ilman fyysisä koon kasvatusta!

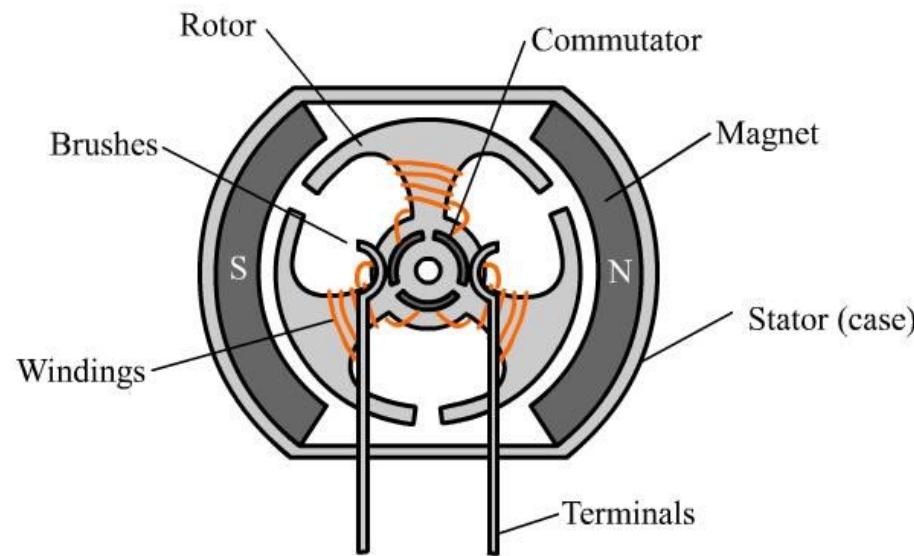
Table 9.6 Antenna rod dimensions and properties

μ_r	Length/mm	Diameter/mm	Demagnetizing factor N_D	μ_{re}	h_e/mm
175	200	9.5	0.0043	100	5.9
175	150	12.7	0.0112	59	6.3
500	200	9.5	0.0045	154	9.1
500	150	9.5	0.0073	108	6.4

Short central winding of 40 turns; 1 MHz ($\lambda = 300 \text{ m}$).

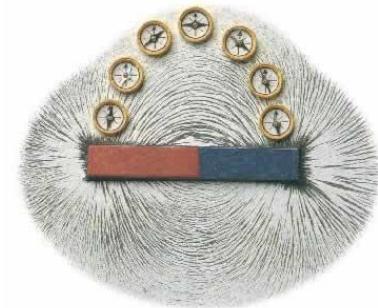
DC-MOOTTORIT

Typical Brushed Motor in Cross-section

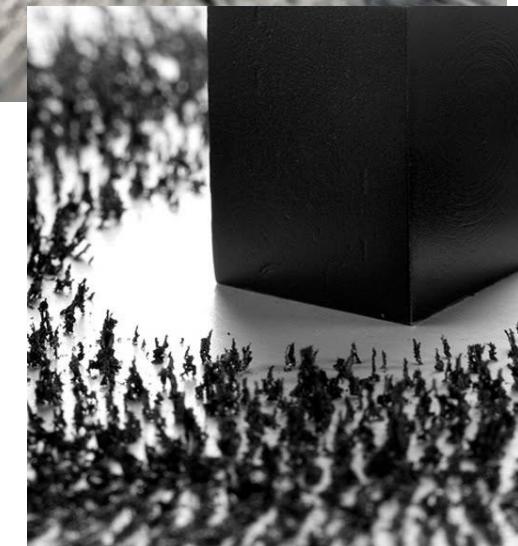
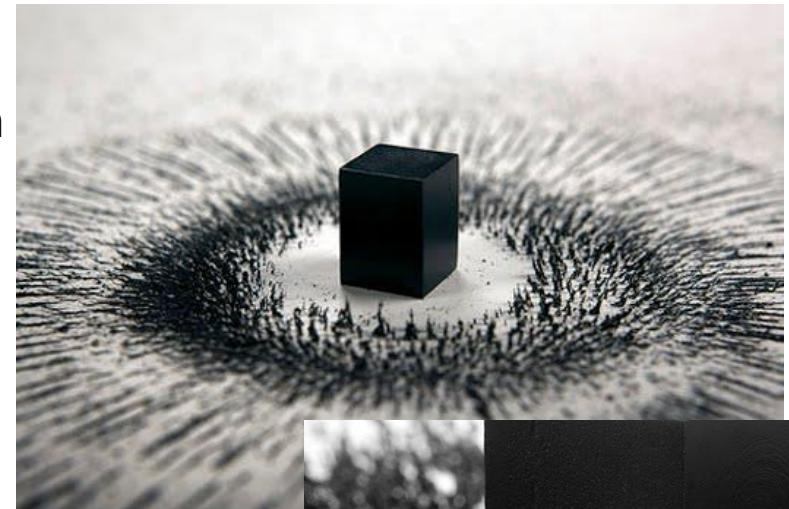


Field of application	Products	Requirements	Materials
Soft Magnets			
Power conversion electrical - mechanical	Motors Generators Electromagnets	Large M_R Small H_C Low losses = small conductivity low w	Fe based materials, e.g. Fe + » (0,7 - 5)% Si Fe + » (35 - 50)% Co
Power adaption	(Power) Transformers	Linear M - H curve	
Signal transfer	Transforme LF ("low" frequency; up to » 100 kHz) HF ("high" frequency up to » 100 kHz)	Small conductivity medium w	Fe + » 36 % Fe/Ni/Co » 20/40/40
Magnetic field screening	"Mu-metal"	Very small conductivity high w Large dM/dH for $H \gg 0$ ideally $m_r = 0$	Ni - Zn ferrites Ni/Fe/Cu/Cr » 77/16/5/2
Hard Magnets			
Permanent magnets	Loudspeaker Small generators Small motors Sensors	Large H_C (and M_R)	Fe/Co/Ni/Al/Cu » 50/24/14/9/3 SmCo_5 $\text{Sm}_2\text{Co}_{17}$ "NdFeB" (= $\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$)
Data storage analog	Video tape Audio tape	Medium H_C (and M_R), hystereses loop as rectangular as possible	NiCo, CuNiFe, CrO_2
Data storage digital	Ferrite core memory Drum Hard disc, Floppy disc Bubble memory	Special domain structure	Fe_2O_3 Magnetic garnets

MAGNEETTISUUS - JOHDANTO

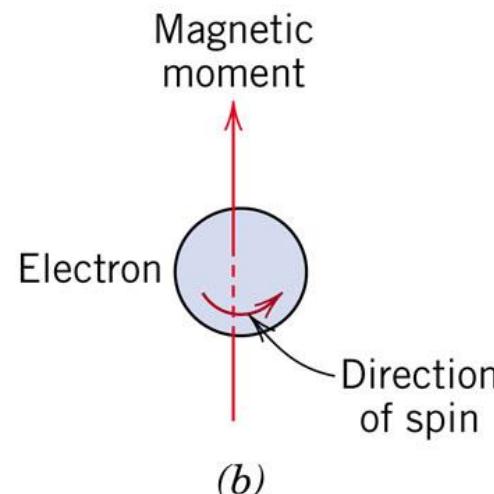
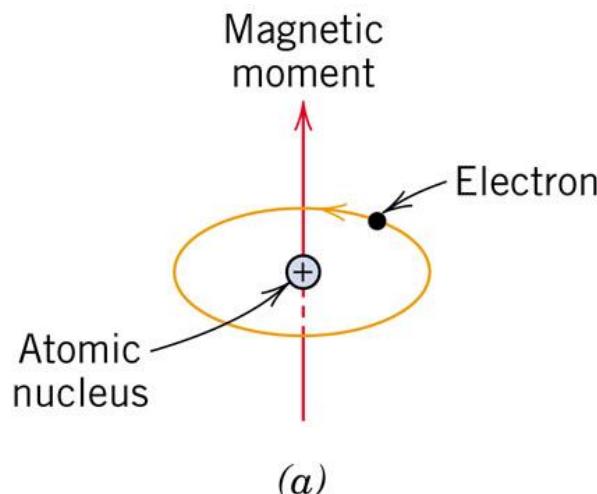


- Ilmiö jossa kaksi materiaalia vetävät toisiaan puoleensa - magneetisuus - tunnettu jo tuhansia vuosia
- Monet nykyajan teknologisista laitteista on riippuvaisia materiaalien magneettista ominaisuuksista
 - Sähköiset teholähteet, muuntimet, sähkömoottorit, radio, TV, AV - systeemit...
- Rauta (Fe), jotkin metalliseokset ja luonnonmineraalit ovat magneettisista ominaisuuksistaan tunnettuja materiaaleja
- Kaikki materiaalit reagoivat jollain tasolla joutuessaan magneettikenttään



MAGNEETTISUUS - JOHDANTOA

- Liikkuva varaus indusoi ympärilleen magneettikentän
- Elektroni (-) kiertää ydintä (+) → magneettinen dipolimomentti
- Atomin magneettiseen momenttiin vaikuttavat
 - Kiertävät elektronit
 - Kiertävien elektronien spin
 - Ytimen magneettinen momentti (protonit, neutronit) $\sim 10^{-3} \times$ Bohr magneton -> merkityksetön)



MAGNEETTISUUS - BOHRIN MAGNETONI

- Bohrin magnetoni μ_B

$$\mu_B = \frac{e\hbar}{2m_e c} = 9.27 * 10^{-24} \text{ Am}^2$$

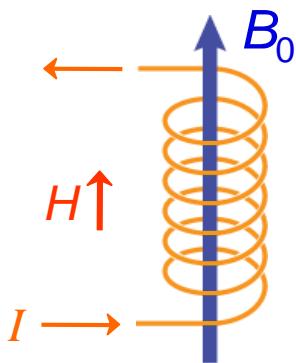
- e yksikkövaraus
- \hbar Dirac:n vakio = $h/2\pi$
- h Planckin vakio
- m_e elektronin massa
- c valon nopeus

- Jokaisella elektronilla atomissa magneettinen spin momentti $\pm \mu_B$ (up/ down)
- Riippuen elektronien määrästä ja spineistä materiaali voi olla pysyvästi magneettinen (He, Ne, Ar...) tai sillä ei ole netto-magneettsuutta ollenkaan



MAGNEETTIKENTTÄ - TYHJIÖSSÄ

- Liikkuvan varauksen synnyttämä kenttä



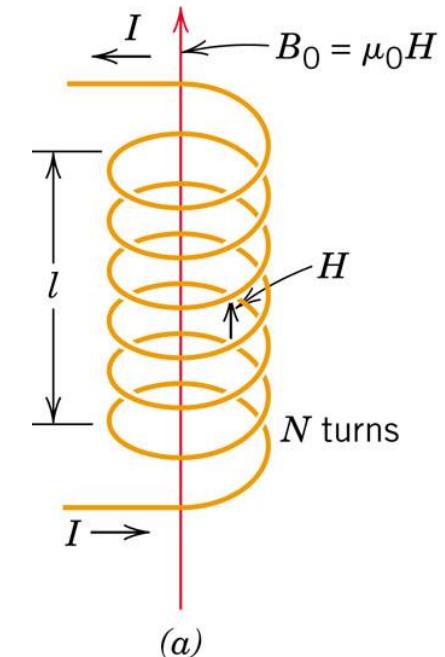
N = kierosten klm.

ℓ = yksittäisen kierroksen pituus(m)

I = virta(A)

H = Magneettikenttä

B_0 = Magneettivuon tiheys (tesla)



- Magneettikenttä H

$$H = \frac{N I}{\ell}$$

- Magneettivuon tiheys B_0

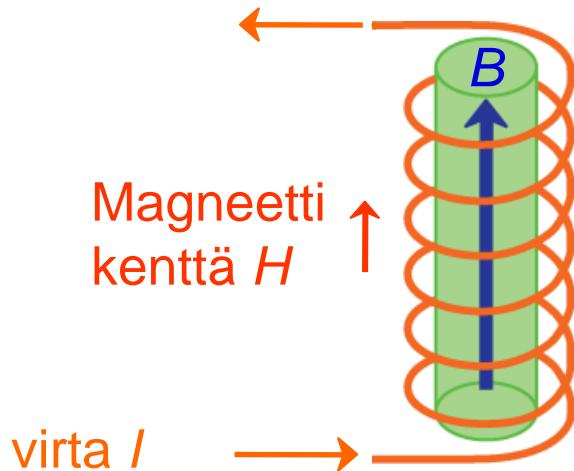
$$B_0 = \mu_0 H$$

$$\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} \text{ Hm}^{-1}$$
$$= (1.257 \times 10^{-6} \text{ Henry/m})$$

- μ = permeabiliteetti [(weber/ampeerimetri) \rightarrow Wb/A*m \rightarrow H/m]

MAGNEETTIKENTTÄ - VÄLIAINEESSA

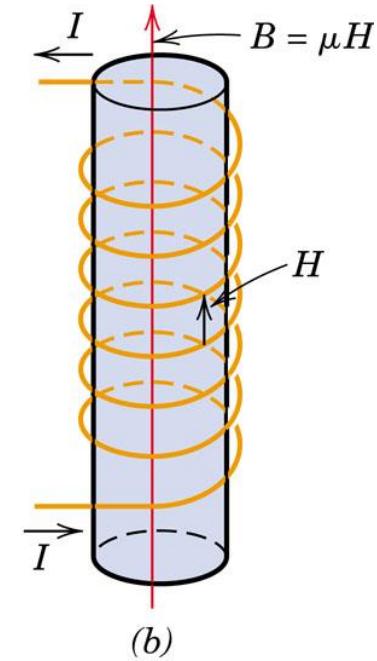
- Indusoitunut magneettikenttä materiaaliin



B = Magneettinen
induktio
materiaalissa (tesla)

$$B = \mu H$$

Väliaineen permeabiliteetti



- Suhteellinen permeabiliteetti (määreeton)

$$\mu_r = \frac{\mu}{\mu_0}$$

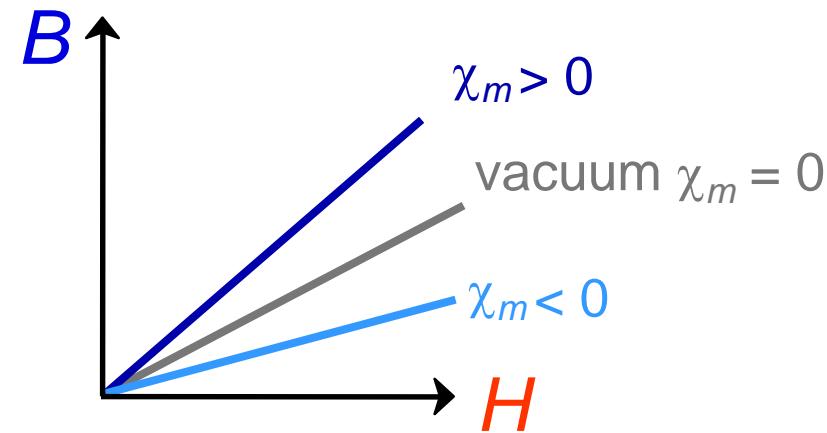


MAGNETISAATIO & MAGNEETTINEN SUSKEPTIIVISYYS

- Magneettikenttä $B = \mu_0 H + \mu_0 M$
- Magnetisaatio $M = \text{magneettimomentti} / \text{tilavuus}$

$$\boxed{M = \chi_m H} \rightarrow \boxed{B = \mu_0 H + \mu_0 \chi_m H \\ B = (1 + \chi_m) \mu_0 H} \rightarrow \boxed{B = \mu_0 \mu_r H \\ \mu_r = 1 + \chi_m}$$

- χ_m = magneetinen suskeptiivisuus, materiaalin ominaiskuore joka kuvaaa sen magneettista vastetta suhteessa tyhjiöön (määreetön)



MAGNEETTISUUDEN TERMIT

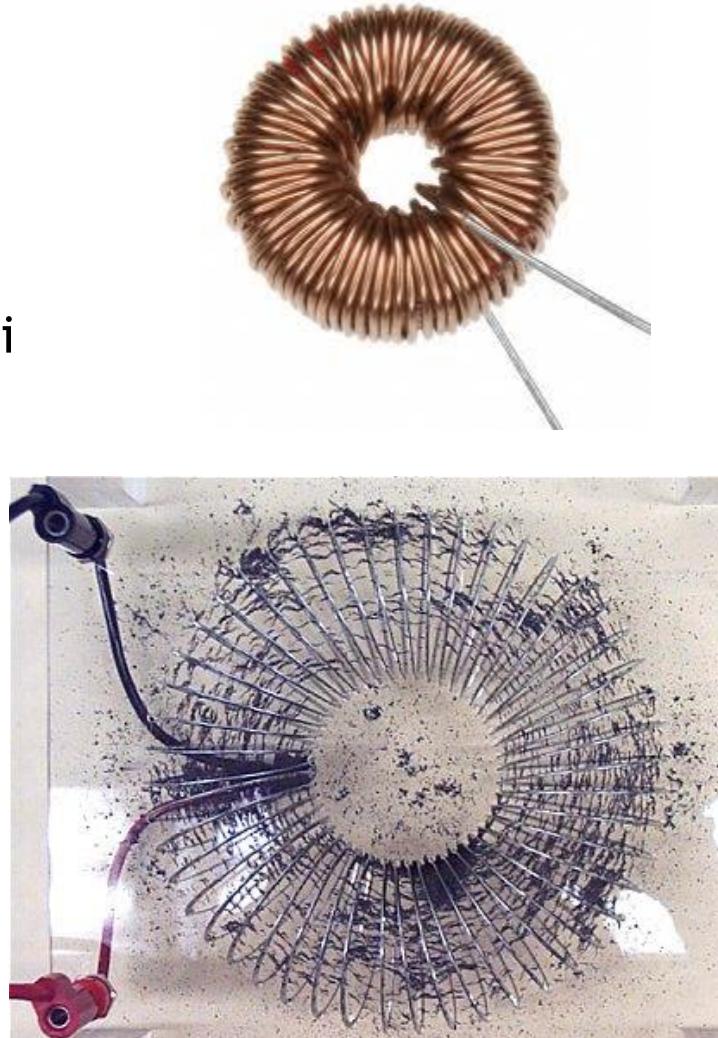
Määre	Symboli	SI yksikkö
Magneettivuon tiheys	B	Tesla [T]
Magneettikentän voimakkuus	H	Ampeeri/metri [A/m]
Magnetisaatio	M	Ampeeri/metri [A/m]
Tyhjiön permeabiliteetti	μ_0	Henry/metri [H/m]
Väliaineen permeabiliteetti	μ_r	yksikötön
Suskehtiivisuus	χ_m	yksikötön



MAGNEETTISUUS - MUOTOANISOTROPIA

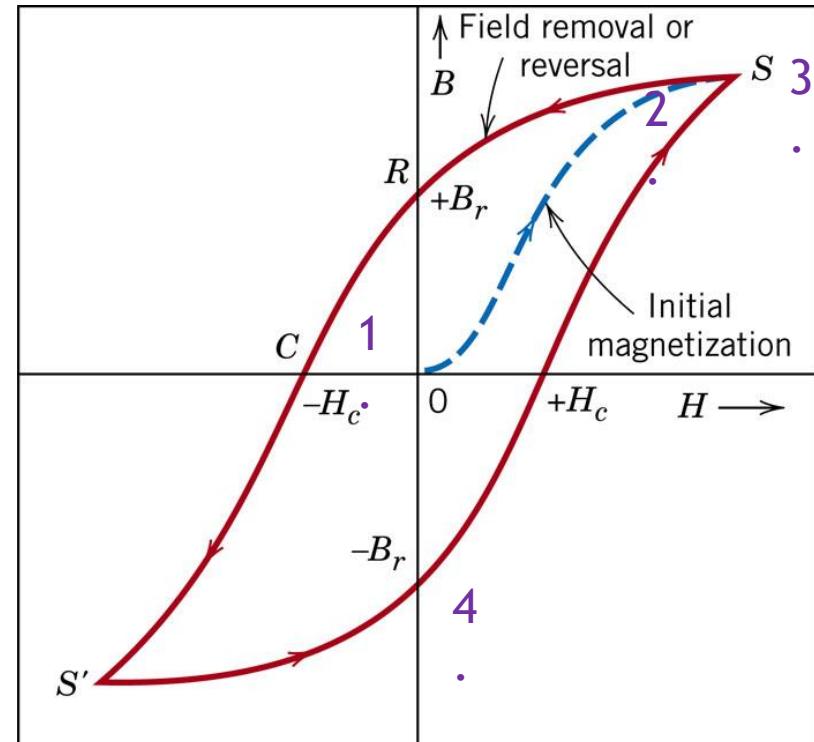
- Muotoanisotropia l. demagnetisaatio kerroin N_D
- Magneettivuon tiheys B on yhtäläinen materiaalissa kun se on toroidin muotoinen
- Magneettisissa materiaalisessa permeabiliteetti ja magnetisaatio M vaihtelee merkittävästi kentän mukaan materiaalin eri kohdissa mikäli materiaali ei ole toroidin muotoinen
- Pienet rakenteelliset virheet (esim. halkeamat) kohtisuorassa magnetisaation suuntaan aiheuttaa demagnetisaation joka voi merkittävästi pienentää materiaalin permeabiliteettia

$$\frac{1}{\mu_{re}} = \frac{1}{\mu_r} + N_D \left(1 - \frac{1}{\mu_r} \right)$$



Magneettinen hystereesi

- 1) Alkupermeabilitetti (μ_i)
- 2) Maksimi permeabilitetti (μ_{\max})
- 3) Saturaatio magnetisatio B_s
- 4) Jäännös magnetisaatio B_r



MAGNEETTISUUDEN LUOKITTELU

- Magneettiset materiaalit voidaan luokitella niiden magneettisen suskeptiivisyyden x_m mukaan
- Useimmat materiaalit **diamagneettisia**:
 - Ainoastaan ulkoisen magneettikentän vaikutuksesta (orbitaalien elektronien liikkeen muutos)
 - orgaaniset yhdisteet, ei-metalliset materiaalit, inertit kaasut
 - elektronien liikeen synnyttämä magneettinen nettomentti on nolla.
 - $x_m \approx -10^{-6}$
- **Paramagneettisilla** materiaaleilla:
 - atomeilla pysyvä magneettimomentti elektronien kierrosta ja spineistä johtuen
 - Tarvitsee ulkoisen magneettikentän polarointiin → magneettiset domeenit kääntyy samansuuntaisiksi
 - siirtymämetallit (transition metal), harvinaiset maametallit (rare earth metals)
 - $x_m \approx -10^{-6} - 10^{-3}$



MAGNEETTISUUDEN LUOKITTELU

- **Ferromagneettiset** materiaalit

- Spontaanisesti magneettinen Curie lämpötilan alapuolella ilman ulkoista kenttää
- erittäin korkea permeabiliteetti
- $\chi_m \approx - 10^{-3} - 10^6$
- Rauta (Fe), Kobalt (Co), Nikkeli (Ni), Gadolium (Ga) ja jotkin seokset

- **Antiferromagneettiset**

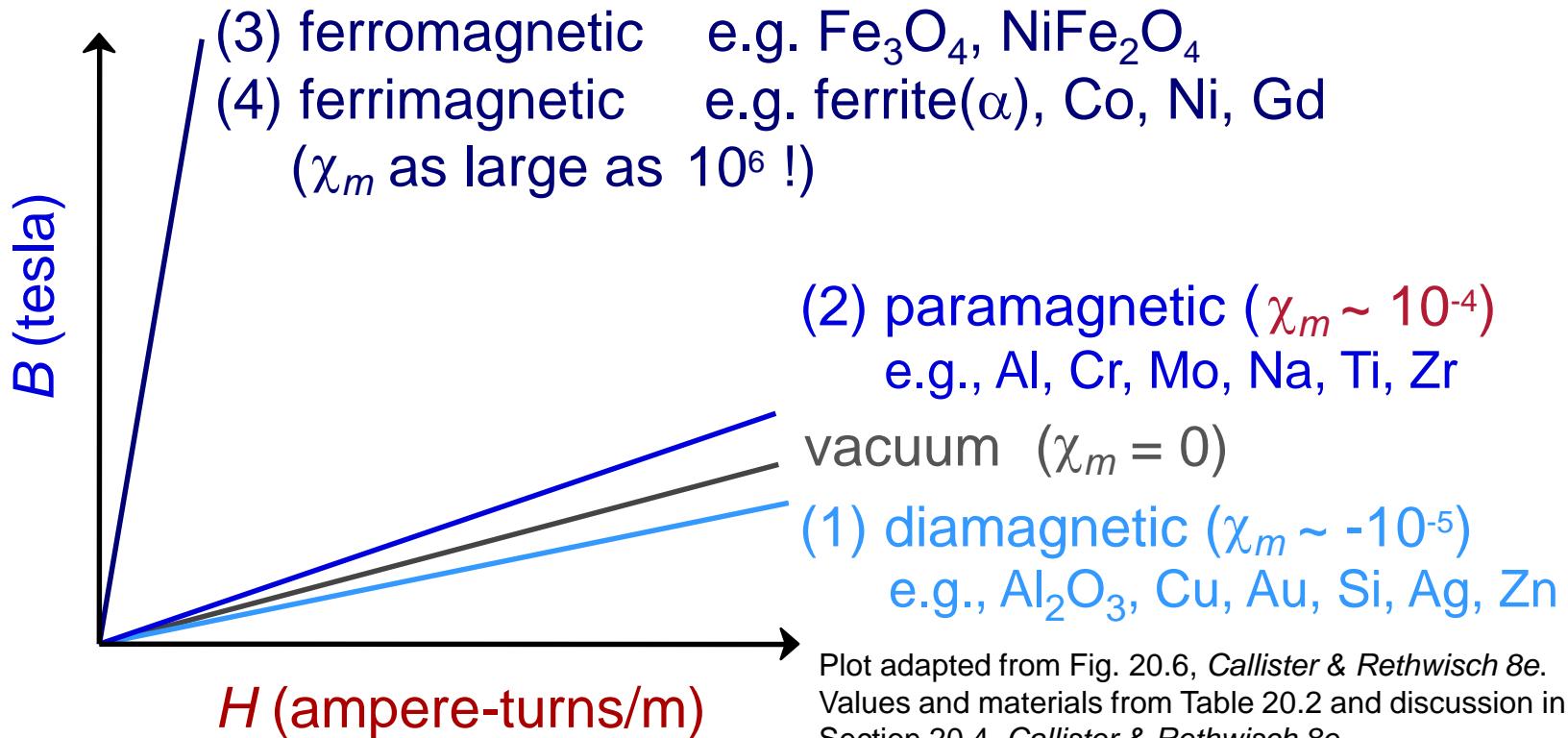
- Kokonaismagnetisaatio nolla (aina ja ikuisesti)
- Metallinen manganeesi, kromi, siirtymämetalli-oksidit

- **Ferrimagneetiset**

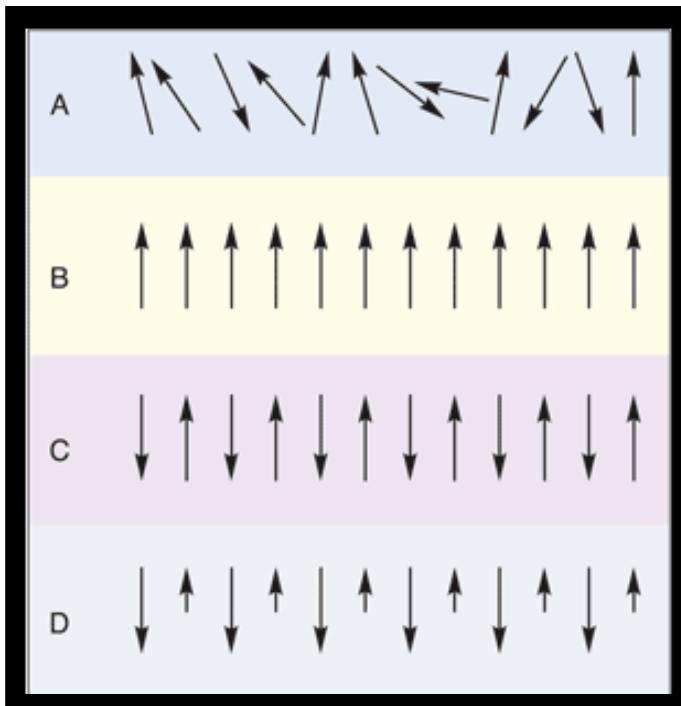
- Kaksi eri suuria magnetisaatiota → nettomagnetisaatio
- Lämpötilan noustessa magnetisaatio pienenee → nollaan
- Keraami materiaalit (pääaineena rauta tai koboltti), spinellit garnet - rakenteet
- Mikroalto ja magneto-optisissa sovelluksissa



MAGNEETTISUUSLUOKAT



MAGNEETTISUUSLUOKAT



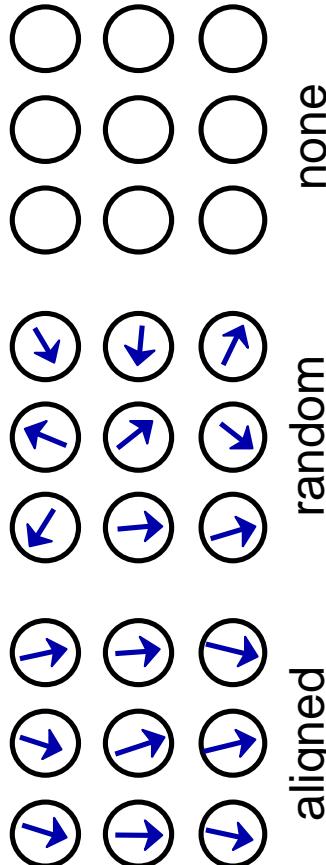
- A) Paramagneettinen
- B) Ferromagneettinen, magneettiset dipolit suuntautuneet samaansuuntaan spontaanisti
- C) Antiferromagneettinen, magneettiset dipolit mitätöi toisensa
- D) Ferrimagneettinen, magneettiset dipoli eri suuntiin mutta voimakkuuksiltaan eri suuruiset



MAGNEETTISTEN DIPOLIEN VASTE MAGNEETTIKENTÄSSÄ

Ei kytkettyä
Magneettikenttää ($H = 0$)

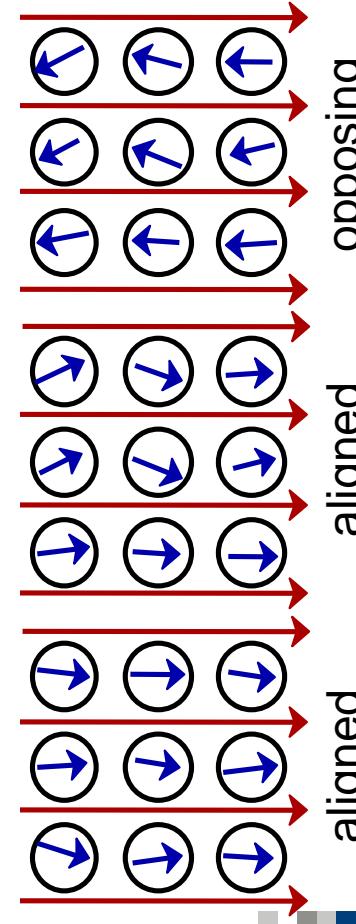
(1) diamagneettinen



(2) paramagneettinen

(3) ferromagneettinen
(4) ferrimagneettinen

Magneettikenttä (H)



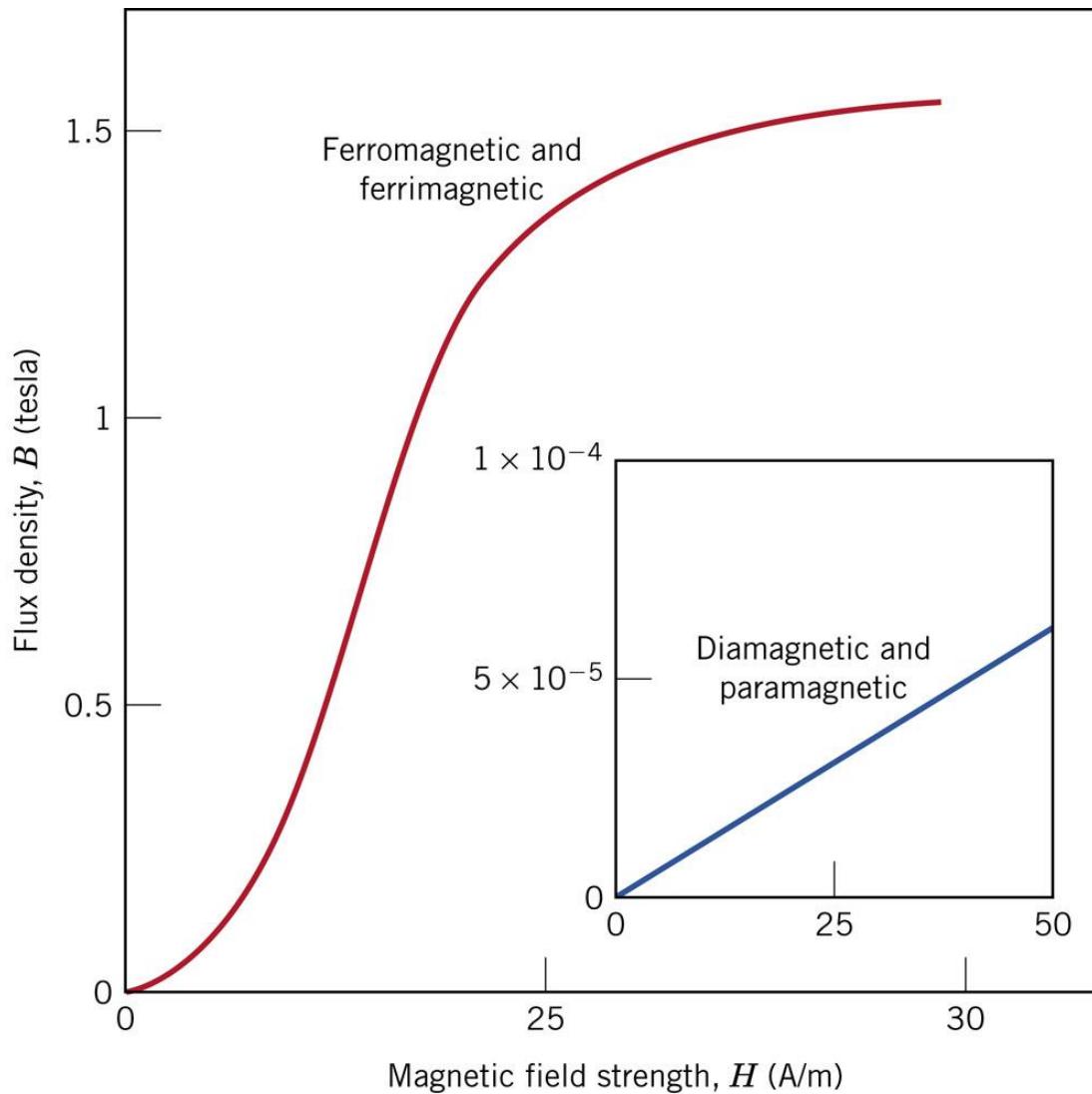
DIA- JA PARAMAGNEETTISTEN MATERIAALIEN OMINAISUUKSIA

Table 20.2 Room-Temperature Magnetic Susceptibilities for Diamagnetic and Paramagnetic Materials

<i>Diamagnetics</i>		<i>Paramagnetics</i>	
<i>Material</i>	<i>Susceptibility χ_m (volume) (SI units)</i>	<i>Material</i>	<i>Susceptibility χ_m (volume) (SI units)</i>
Aluminum oxide	-1.81×10^{-5}	Aluminum	2.07×10^{-5}
Copper	-0.96×10^{-5}	Chromium	3.13×10^{-4}
Gold	-3.44×10^{-5}	Chromium chloride	1.51×10^{-3}
Mercury	-2.85×10^{-5}	Manganese sulfate	3.70×10^{-3}
Silicon	-0.41×10^{-5}	Molybdenum	1.19×10^{-4}
Silver	-2.38×10^{-5}	Sodium	8.48×10^{-6}
Sodium chloride	-1.41×10^{-5}	Titanium	1.81×10^{-4}
Zinc	-1.56×10^{-5}	Zirconium	1.09×10^{-4}

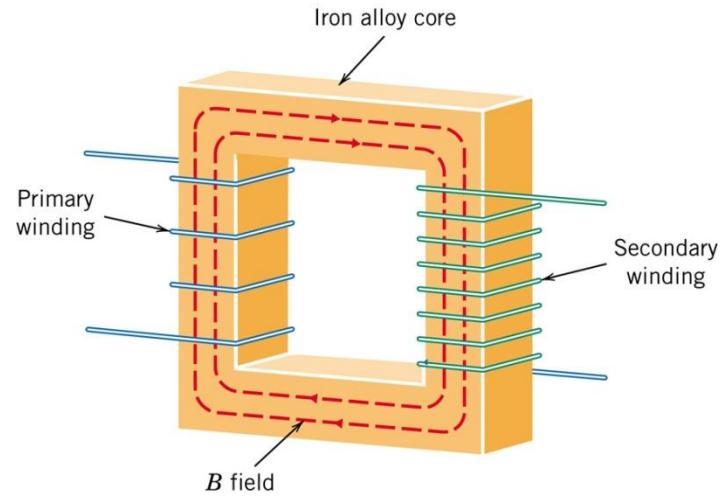


FERRO JA FERRI VS. DIA JA PARA



KOVAT/PEHMEÄT MAGNEETTiset MATERIAALIT

- Magneettisesti ferro- tai ferrisähköinen materiaali voi olla joko "pehmeä" tai kova"
- Materiaali jolla on pysyvä magnetisaatio ja jotka eivät ole helposti demagnetoitavissa ovat magneettisesti kovia
- Helposti magnetoitavissa/ demagnetoitavissa materiaali on magneettisesti pehmeä
 - Käytetään sovelluksissa joissa on muuttuva magneettikenttä tai vaaditaan pieniä häviötä
 - Muuntimien sydäminä

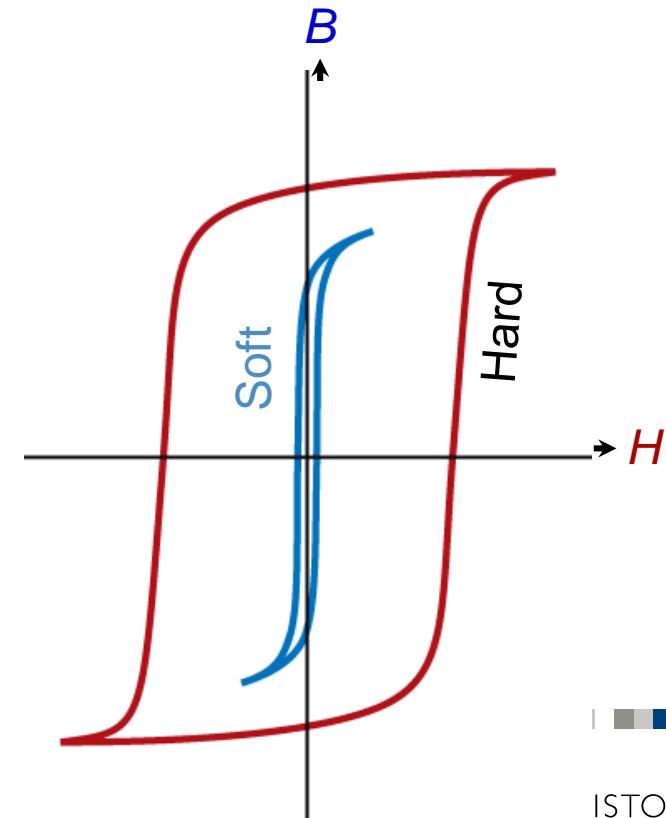


KOVAT JA PEHMEÄT MAGNEETTISET MATERIAALIT

Hystereesikäyrän sisälle jäävä tila kertoo paljonko materiaalin magneettinen energia häviö/tilavuus/ sykli → muuttuu lämmöksi

Kovat magneettiset materiaalit:

- ◆ Suuri koersiivikenttä
- ◆ Käytetään pysyväismagneeteissa
- ◆ Domeeniseinien liikettä voidaan kasvattaa lisäämällä partikkeleita/ aukkoja
- ◆ Esim: tungsten steel → $H_c = 5900$ amp-turn/m)



Pehmeät magneettiset materiaalit:

- ◆ Pieni koersiivikenttä
- ◆ Käytetään sähkömoottoreissa
- ◆ Esim: kaupallinen rauta 99.95 Fe

KOVAT MAGNEETTiset MATERIAALIT

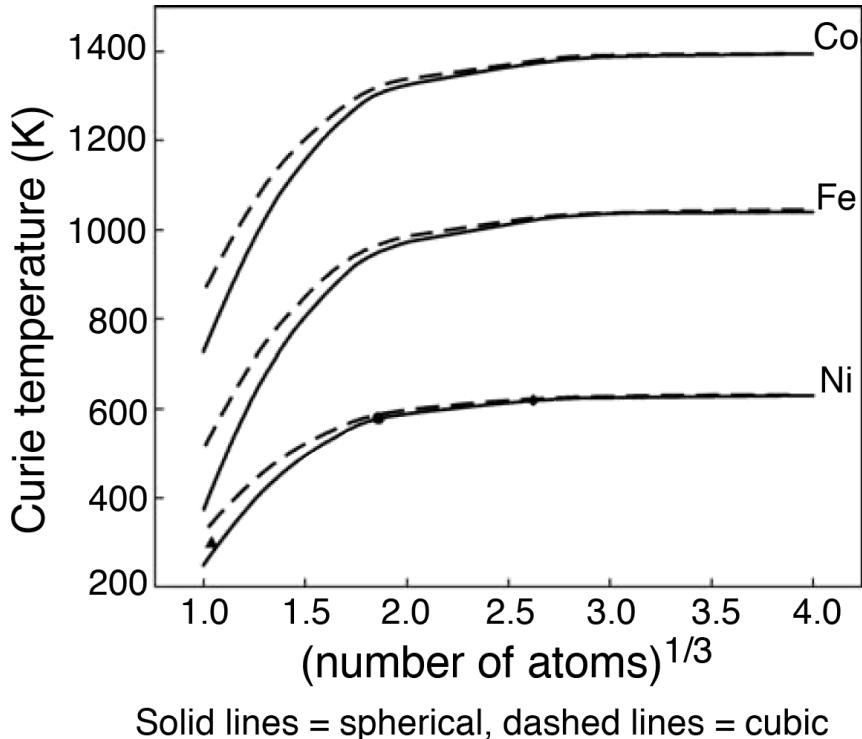
Table 20.6 Typical Properties for Several Hard Magnetic Materials

Material	Composition (wt%)	Remanence B_r [tesla (gauss)]	Coercivity H_c [amp-turn/m (Oe)]	$(BH)_{\max}$ [kJ/m ³ (MGoe)]	Curie Temperature T_c [°C (°F)]	Resistivity ρ (Ω·m)
Tungsten steel	92.8 Fe, 6 W, 0.5 Cr, 0.7 C	0.95 (9500)	5900 (74)	2.6 (0.33)	760 (1400)	3.0×10^{-7}
Cunife	20 Fe, 20 Ni, 60 Cu	0.54 (5400)	44,000 (550)	12 (1.5)	410 (770)	1.8×10^{-7}
Sintered alnico 8	34 Fe, 7 Al, 15 Ni, 35 Co, 4 Cu, 5 Ti	0.76 (7600)	125,000 (1550)	36 (4.5)	860 (1580)	—
Sintered ferrite 3	$\text{BaO}-6\text{Fe}_2\text{O}_3$	0.32 (3200)	240,000 (3000)	20 (2.5)	450 (840)	$\sim 10^4$
Cobalt rare earth 1	SmCo_5	0.92 (9200)	720,000 (9,000)	170 (21)	725 (1340)	5.0×10^{-7}
Sintered neodymium– iron–boron	$\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$	1.16 (11,600)	848,000 (10,600)	255 (32)	310 (590)	1.6×10^{-6}

Source: Adapted from *ASM Handbook*, Vol. 2, *Properties and Selection: Nonferrous Alloys and Special-Purpose Materials*. Copyright © 1990 by ASM International. Reprinted by permission of ASM International, Materials Park, OH.

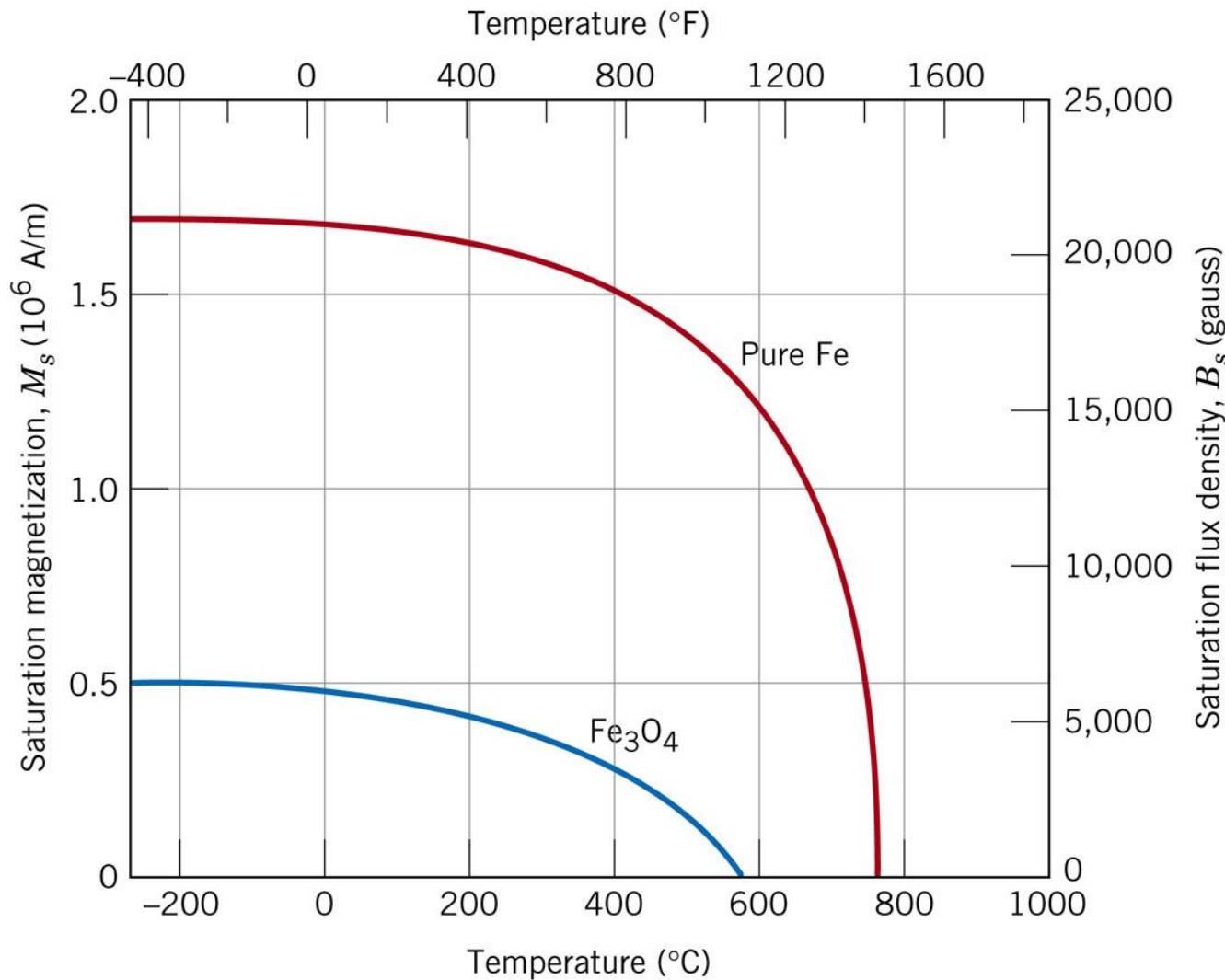


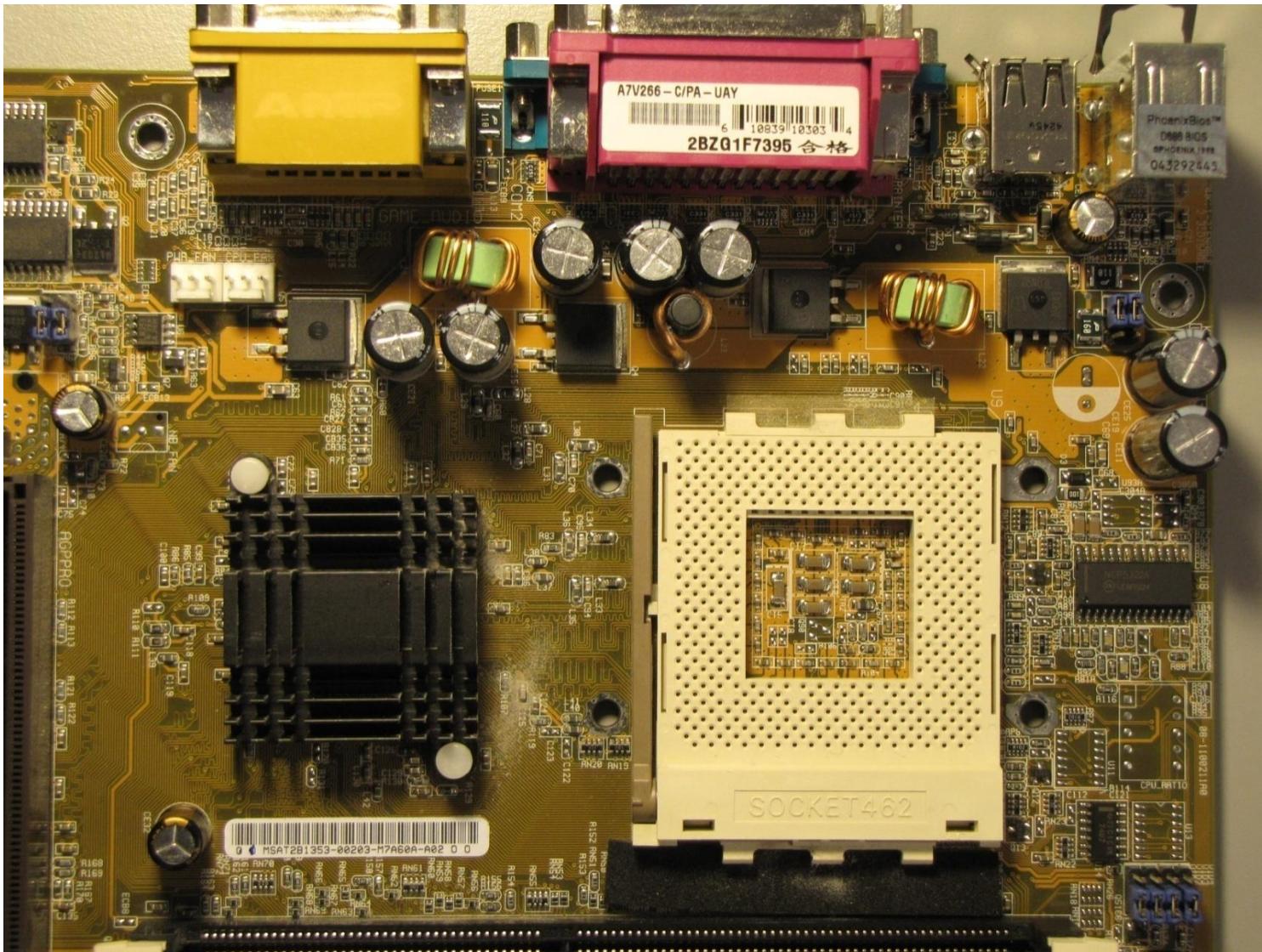
LÄMPÖTILAN VAIKUTUS MAGNEETTISIIN OMINAISUUksiIN



- Lämmittääessä materiaalia Curie lämpötilan yläpuolelle materiaalissa (ferromagneettisessa) tapahtuu faasitransitio
→ yhtenäinen magnetisaatio domeeneissa spontaanisti katoaa
 - Jokaisella atomilla oma magneettimomentin suunta ja riippumaton naapuriatomista (tyypillistä paramagneettisilla materiaaleilla)

LÄMPÖTILAN VAIKUTUS MAGNEETTISIIN OMINAISUUksiIN





SÄHKÖINEN JOHTAVUUS (KERTAUS)

- Kiinteiden materiaalien sähköisten johtavuuksien ero on valtaisa, jopa 10^{24} kertainen!
- Materiaalit voidaan jaotella johtavuuden mukaan
 - **Johteiksi** ($\sigma > 10^4 \text{ } 1/\Omega\text{m}$)
 - **Puolijohtaviksi** ($10^{-6} < \sigma < 10^4 \text{ } 1/\Omega\text{m}$)
 - **Eristeiksi** ($\sigma < 10^{-6} \text{ } 1/\Omega\text{m}$)
- Alla muutamien materiaalin eri johtavuusarvoja ($1/\Omega\text{m}$) huoneenlämmössä

Metallit	
Hopea	$6,8 * 10^7$
Kupari	$6,0 * 10^7$
Rauta	$1,0 * 10^7$

Keraamatit	
Soodalasi	$10^{-10} - 10^{-11}$
Betoni	10^{-9}
Alumiinioksidi	$< 10^{-13}$

Puolijohteet	
Pii	$4 * 10^{-4}$
Germanium	$2 * 10^0$
GaAs	10^{-6}

Muovit	
Polystyreeni	$< 10^{-14}$
Polyeteeni	$10^{-15} - 10^{-17}$



MITÄ JOHTAVUUS ON? (KERTAUS)

- Metallit (**Johteet**):

- Metalleille tyhjät energiatilat ovat rinnan täytetyjen tilojen kanssa

- Lämpöenergia kiihdyytää elektronit korkeampiin tyhjiin energiatiloihin

- Kahdenlaisia energiavyörakenteita metallilla

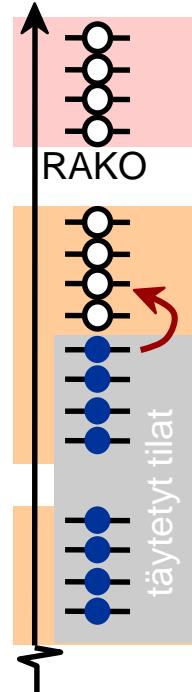
- osittain täytetty vyö

- tyhjä vyö rinnan täytetyn vyön kanssa

Osittain täytetty vyö

Energia

tyhjä
vyö

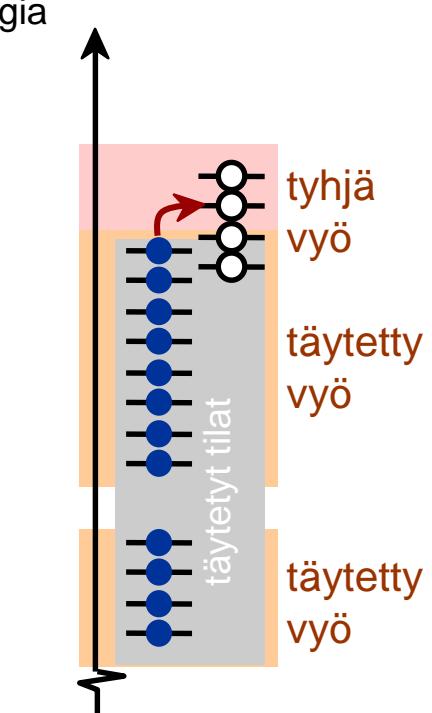


Overlapping vyö

Energia

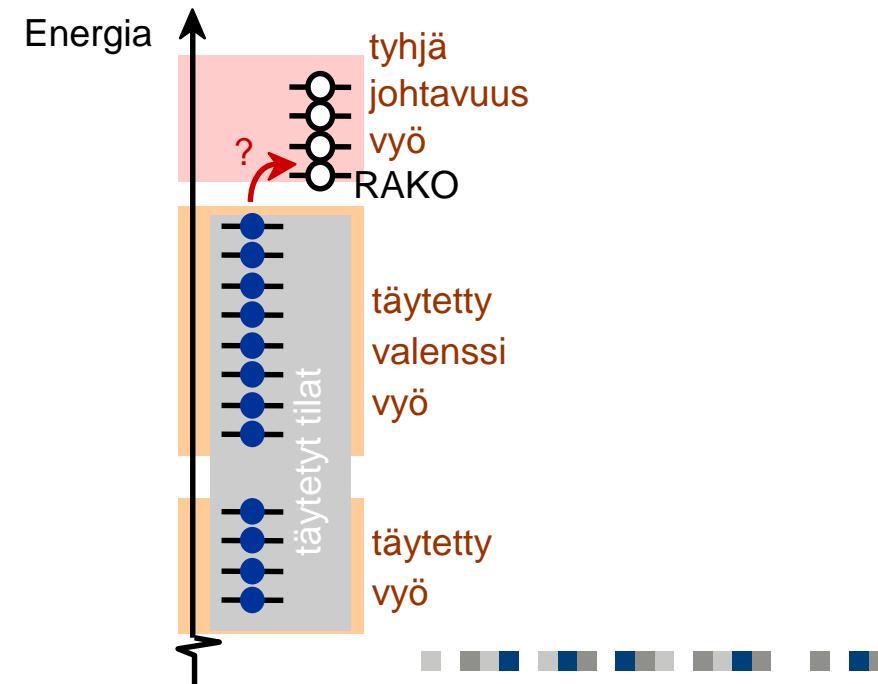
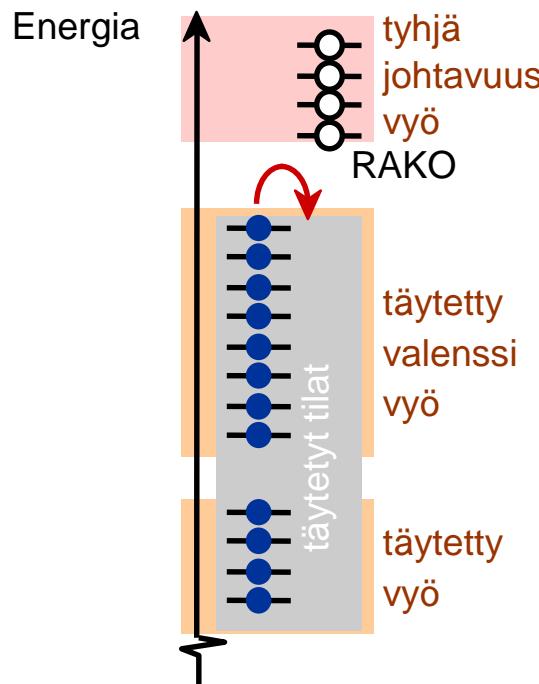
tyhjä
vyö

täytetty
vyö



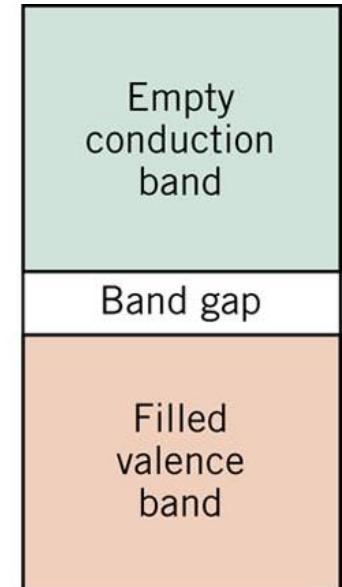
MITÄ JOHTAVUUS ON? (KERTAUS)

- Eristeet:
 - leveä energiavyörako ($> 2 \text{ eV}$)
 - muutamia elektroneja raon yli
- Puolijohteet:
 - kapea energiavyörako ($< 2 \text{ eV}$)
 - enemmän elektroneita kiihdytetty raon yli



INTRISIITTINEN PUOLIJOHTAVUUS

- Intrisiittiset puolijohteet tarkoittavat puhtaita puolijohteita
- Elektronivyörakenteeltaan kuvan kaltaiset 0 K lämpötilassa
 - Täysi valenssivyö, tyhjä johtavuus ja niiden välissä suhteellisen ohut energiavyörako
 - Energiavyöraon on tyypillisesti alle 2 eV



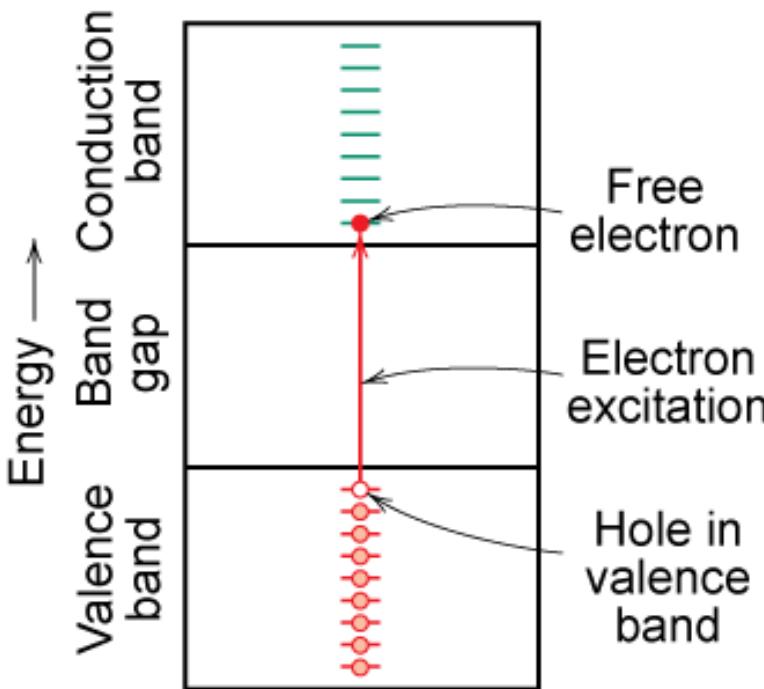
INTRISIITTINEN PUOLIJOHTAVUUS

Table 18.3 Band Gap Energies, Electron and Hole Mobilities, and Intrinsic Electrical Conductivities at Room Temperature for Semiconducting Materials

Material	Band Gap (eV)	Electrical Conductivity $[(\Omega \cdot m)^{-1}]$	Electron Mobility ($m^2/V \cdot s$)	Hole Mobility ($m^2/V \cdot s$)
Elemental				
Si	1.11	4×10^{-4}	0.14	0.05
Ge	0.67	2.2	0.38	0.18
III–V Compounds				
GaP	2.25	—	0.03	0.015
GaAs	1.42	10^{-6}	0.85	0.04
InSb	0.17	2×10^4	7.7	0.07
II–VI Compounds				
CdS	2.40	—	0.03	—
ZnTe	2.26	—	0.03	0.01



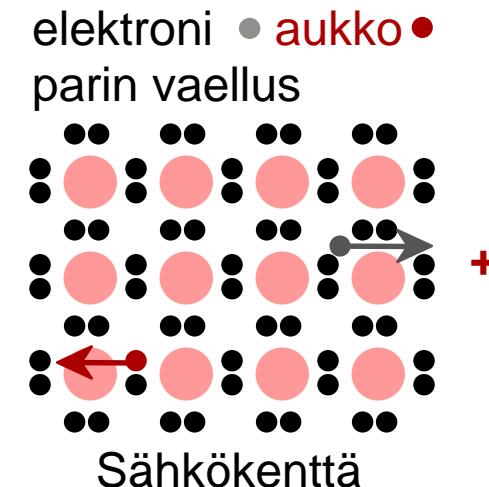
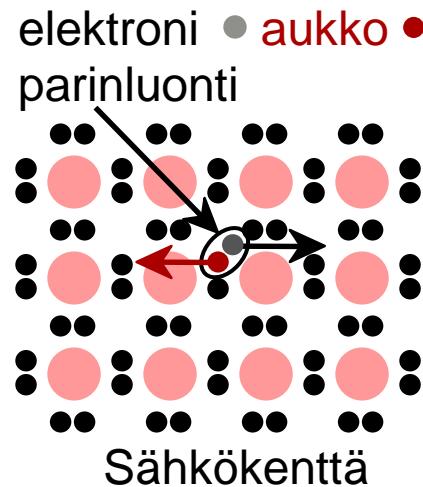
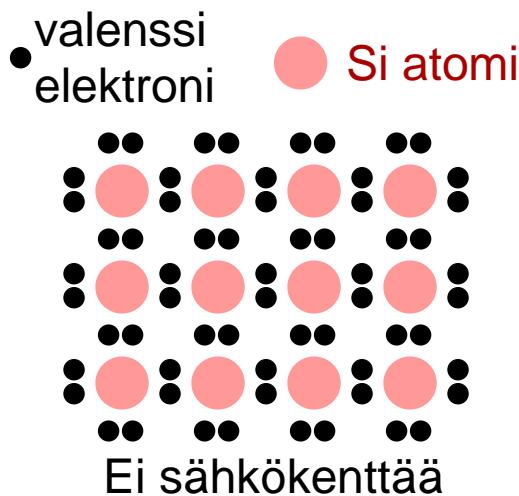
KAHDEN TYYPPISIÄ VARAUKESENSIIRTÄJIÄ



- Vapaa elektroni
 - Negatiivinen varaus
 - Johtavuuskaistalla
- Aukko
 - Positiivinen varaus
 - Valenssikaistalla



INTRISIITTINEN PUOLIJOHTAVUUS



- Sähköinen johtavuus:

$$\sigma = n|e|\mu_e + p|e|\mu_h$$

elektronia/m³

Elektronien liikkuvuus

aukkoja/m³

Aukkojen liikkuvuus





INTRISIITTINEN PUOLIJOHTAVUUS

- Intrisiittinen johtavuus
- Intrisiittisellä puolijohteella $n=p=n_i$
 - intrisiittinen varauksensiirtokonsentraatio
→
- Esim. GaAs

$$\sigma = n|e|\mu_e + p|e|\mu_h$$
$$\sigma = n_i|e|(\mu_e + \mu_h)$$

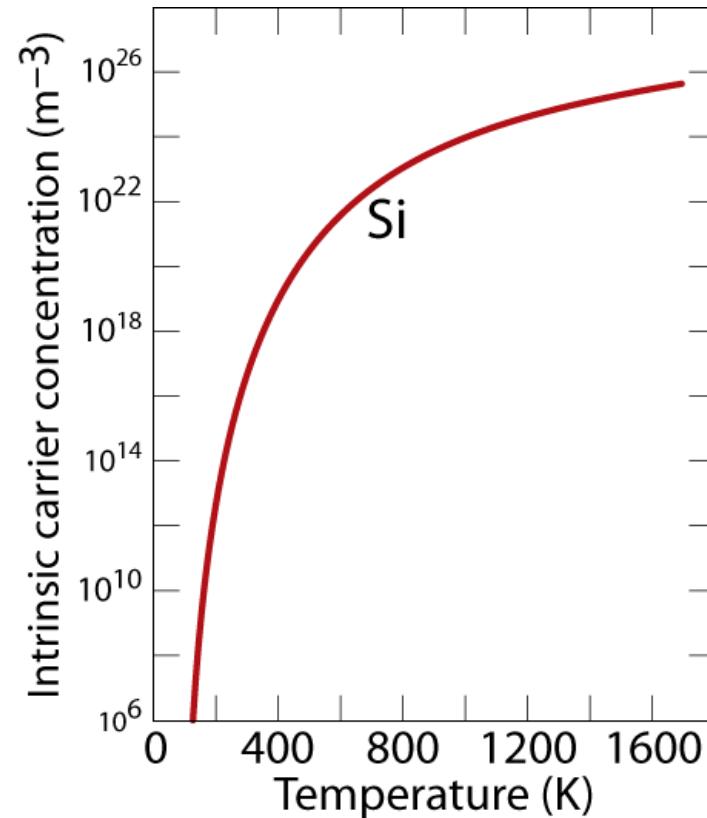
$$n_i = \frac{\sigma}{|e|(\mu_e + \mu_h)} = \frac{10^{-6}(\Omega \cdot m)^{-1}}{(1.6 \times 10^{-19} C)(0.85 + 0.45 m^2/V \cdot s)}$$

GaAs $n_i = 4.8 \times 10^{24} \text{ m}^{-3}$

Si $n_i = 1.3 \times 10^{16} \text{ m}^{-3}$

INTRISIITTiset PUOLIJOHTEET

- Toisin kuin metalleissa, johtavuus kasvaa lämpötilan noustessa
 - Yksi keino määrittää puolijohtava materiaali



P- JA N-TYYPIN PUOLIJOHTEET

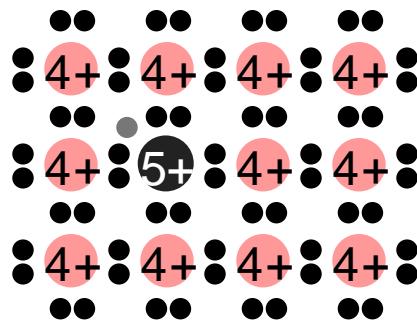
- p- ja n-tyypin puolijohteita sanotaan yleisesti extrisiittisiksi puolijohteiksi
- Intrisiittisilla puolijohteilla aukkojen (p) ja elektronien (n) määrä on vakio
- p- ja n-tyypin puolijohteilla epäpuhtaudet määrävät jommankumman ylimääärän



P- JA N-TYYPIN PUOLIJOHTEET

- *n*-tyyppi ($n \gg p$)

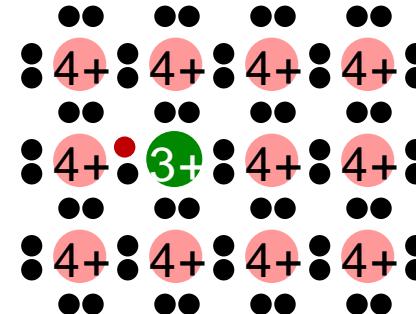
Fosfori atomi



$$\sigma \approx n|e|\mu_e$$

- *p*-tyyppi: ($p \gg n$)

Boori atomi



$$\sigma \approx p|e|\mu_h$$

aukko
johtava
elektroni
valenssi
elektroni

Si atomi

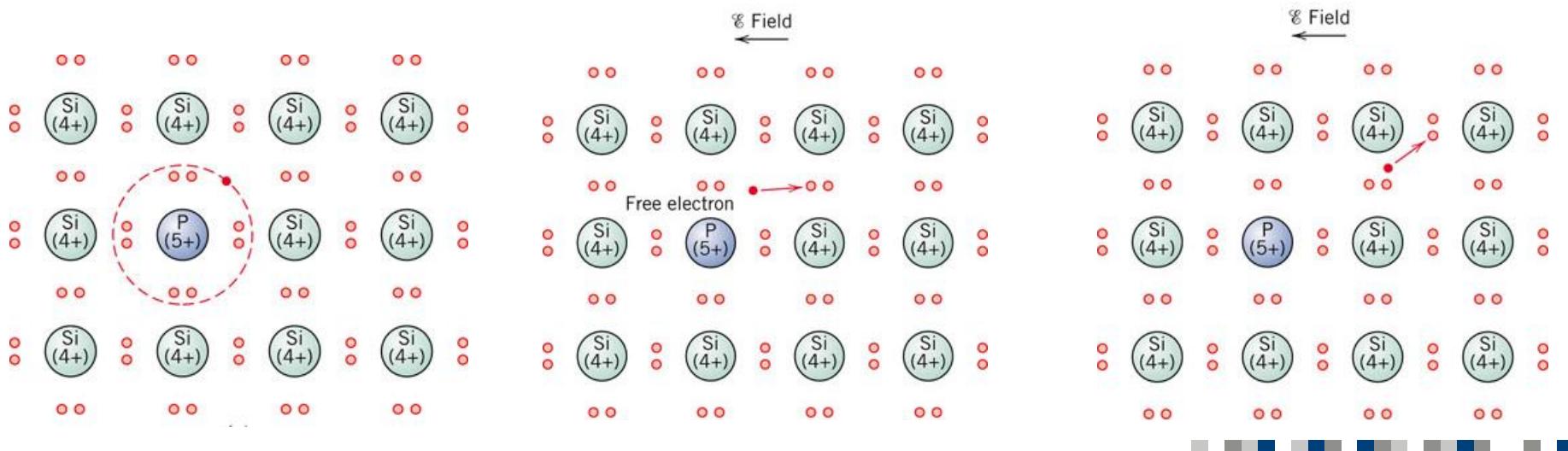
Ei sähkökenttää

Ei sähkökenttää



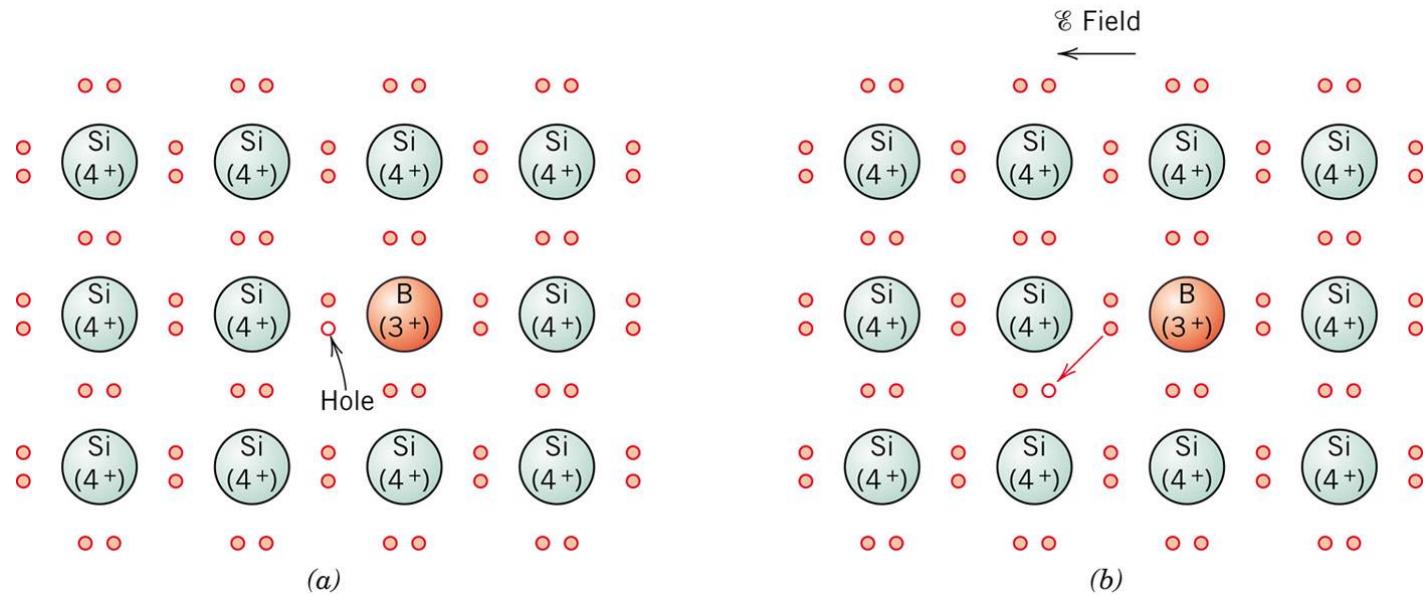
N-TYYPIN PUOLIJOHTEET

- N-tyypin puolijohteen on doupattu (sekoitettu) esim. 5 valenssiatomia omaavalla epäpuhtaudella (fosfori)
 - Näitä kutsutaan donoriatomeiksi (donor)
 - Johtavat sähköä paremmin kuin intrisiittiset puolijohteen
 - Atomien lukumäärällä voidaan säätää johtavuutta



P-TYYPIN PUOLIJOHTEET

- p-tyypin puolijohteet on doupattu (sekoitettu) esim. 3 valenssiatomia omaavalla epäpuhtaudella (boori)
 - Näitä kutsutaan akseptoriatomeiksi (acceptor)
 - Johtavat sähköä paremmin kuin intrisiittiset puolijohteet
 - Atomien lukumäärällä voidaan säätää johtavuutta



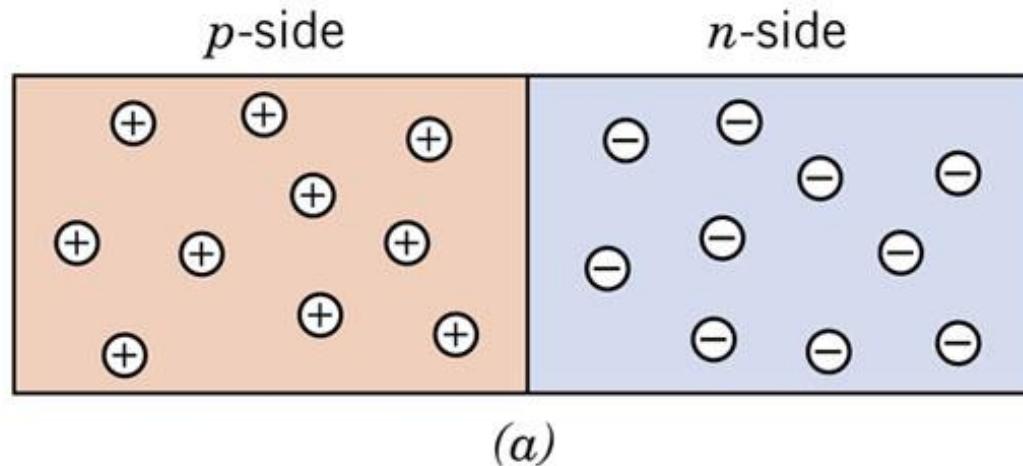
PN-LIITOS

- Yksistään puolijohdemateriaalit ovat tylsiä johteita - funktionaalisuus puuttuu
- Ihmeitä alkaa tapahtumaan kun erityyppisiä puolijohteita liitetään toisiinsa



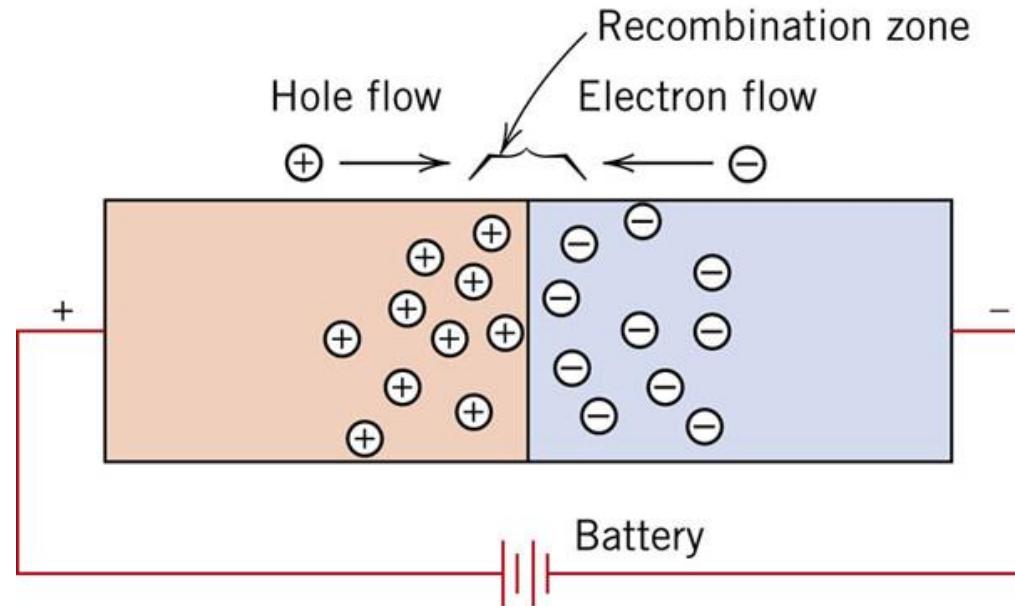
PN-LIITOS

- pn-liitos sallii virran kuljemisen vain yhteen suuntaan
 - Ei jännitettä, varauksenkuljettaja pysyvät omilla puolillaan



PN-LIITOS

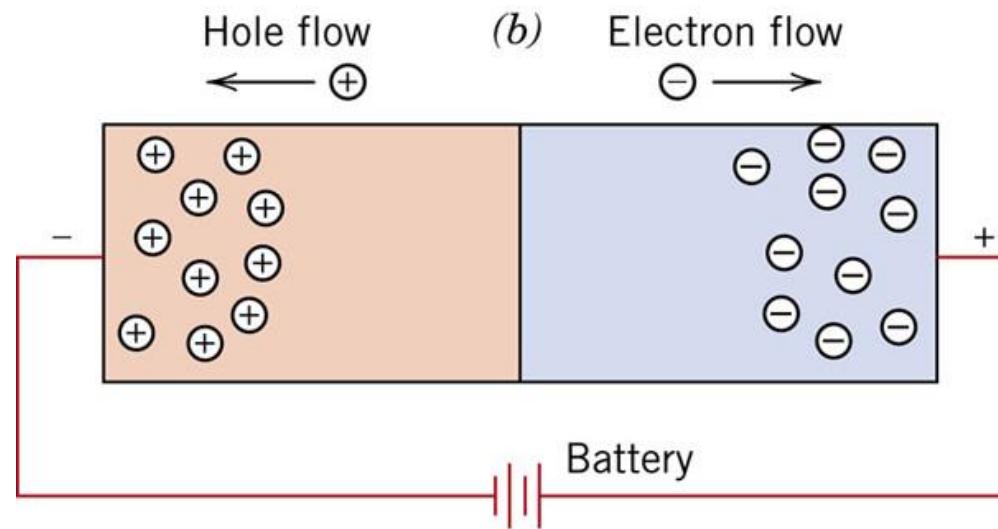
- Myötäjännite
 - Virrankuljettajat kulkevat läpi p- ja n-alueiden
 - pn-liitoksessa elektronit ja aukot yhdistyvät



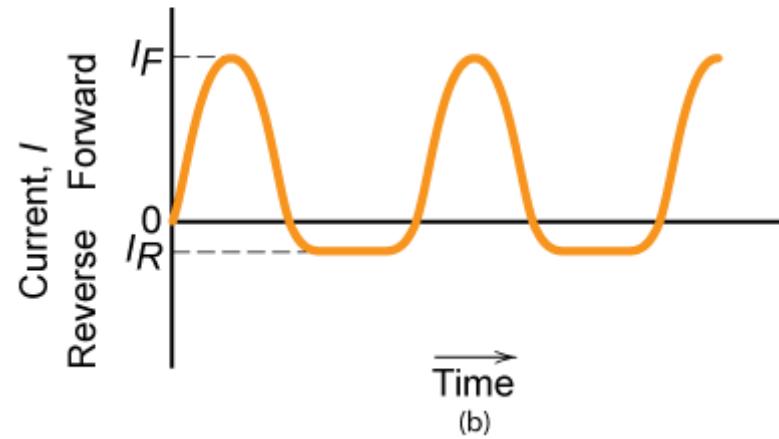
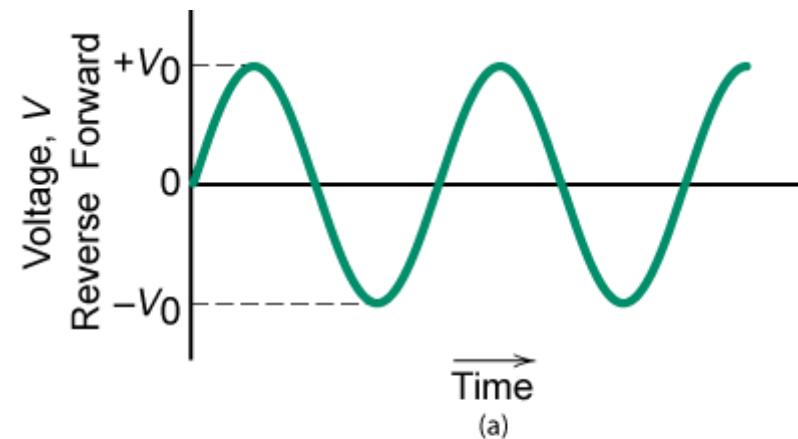
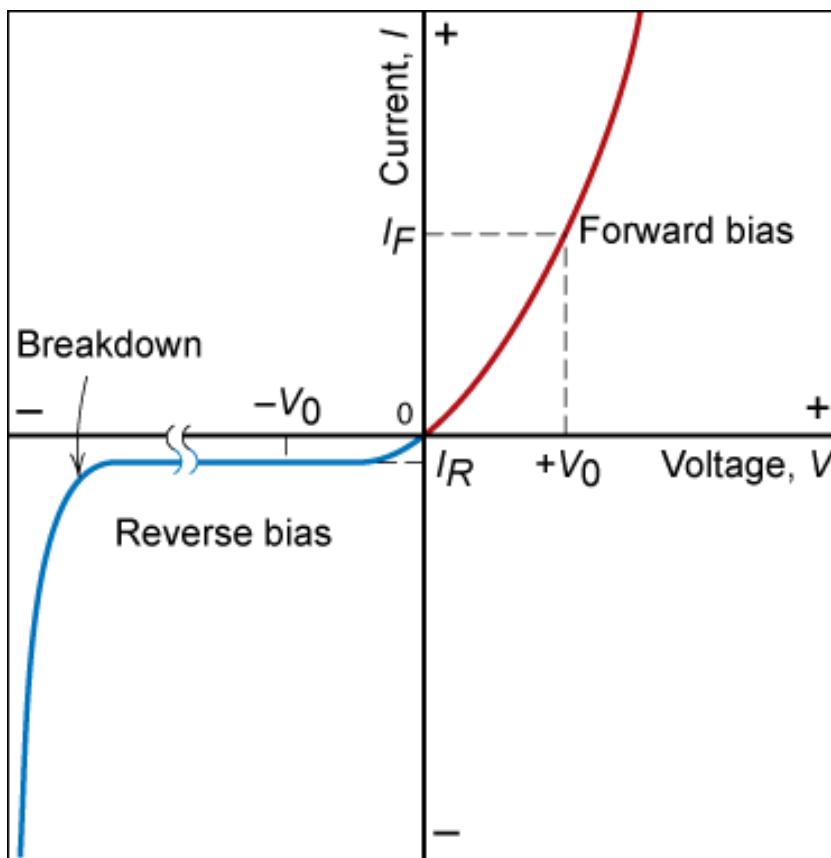
PN-LIITOS

- Vastajännite

- Virrankuljettajat kulkevat poispäin pn-liitoksesta ja n-alueiden
- pn-liitosalue tyhjenee virrankuljettajista



PN-LIITOS



PN-LIITOKSEEN PERUSTUVA PIIDIODI

- Tyypillisen piipohjaiseen pn -liitokseen perustuva diodin virta-jännitekäyrä voidaan jakaa kolmeen osaan
 - Myötäjännitealue
 - Vastajännitealue
 - Läpilyöntialue

