



Sild, mis ühendab uurimistööd tänapäeva füüsikas
ja ettevõtlust nanotehnoloogias

Kvantfüüsika

*Tillukeste asjade füüsika, millel on hiiglaslikud
rakendusvõimalused*

2. osa

KVANTOMADUSED JA TEHNOLOOGIA



VII õppemoodul: Pooljuhid



Quantum Spin-Offi rahastab Euroopa Liit LLP Comeniuse programmi kaudu.
(540059-LLP-1-2013-1-BE-COMENIUS-CMP)

Renaat Frans, Laura Tamassia

Kontakt: renaat.frans@khlim.be

See teave kajastab ainult teksti autori seisukohti ning Euroopa Komisjon ei ole vastutav selle informatsiooni kasutamise eest

TÕLKIJAJA:



Sisukord

VII ÕPPEMOODUL: POOLJUHI	5
1 Aatomite energiatase	5
2 Mitte kõik ei ole madalaimal energiatasemel	7
3 Energiatasemed tahkistes: energia- ja keelutsoonid	8
4 Juhid, isolaatorid ja pooljuhid	9
5 Keelutsooni ületus: dopeerimine	11
5.a n-dopeerimine	11
5.b p-dopeerimine	12
6 Diiod	13
7 Transistor	15
8 Rakendus: LED	16
9 Rakendus: päikeseelemendid	17
10 Rakendused: tulevikuväljavaated	17
11 VII õppemooduli mõisted	18

Autorile viitamine - mitteäriline eesmärk - jagamine samadel tingimustel 4.0 rahvusvaheline (CC BY-NC-SA 4.0)



Kasutamine alljärgnevatel tingimustel:

- Autorile viitamine – peate lisama [kohase viite autorile](#) ja teabe litsentsi kohta ning [välja tooma tehtud võimalikud muudatused](#). Võite seda teha mõistlikul viisil, kuid mitte selliselt, mis annab mõista, et litsentsiandja tõstab teid või teie kasutuse kuidagi esile.
- Mitteäriline eesmärk – te ei tohi kasutada materjali [ärilisel eesmärgil](#).

Võite teha alljärgnevat:

- Jagada – võite materjali kopeerida ning igas vormingus ja iga meediumi kaudu levitada.
- Kohandada – võite materjali segada, muuta ja täiendada.

Litsentsiandja ei saa teile neid õigusi keelata, kui järgite litsentsi tingimusi.

Sellele tööle peate viitama järgmiselt:

Frans R., Boksenbojm E., Tamassia L., Andreotti E. (2015) Quantum SpinOff Learning Stations. Art of Teaching, UCLL, Diepenbeek, Belgium

Sissejuhatus 2. osasse: Kvantomadused ja tehnoloogia

Õppemoodulite 2. osas uurime kvantfüüsika rakendamist tehnoloogias. Kasutame esimeses viies õppemoodulis omandatud teadmisi, mõistmaks paljudes tehnoloogilistes uuendustes kasutatavate materjalide kvantomadusi.

Ka 2. osa moodulites käsitleme kõrvuti klassikalise füüsika ja kvantfüüsika mõisteid, et näha, kuidas toimus areng klassikalisest füüsikast kvantfüüsika ja sellega kaasaskäivate tehnoloogiliste edusammudeni. Nagu 1. osas, on ka 2. osa õppemoodulite lõpus toodud harjutuse vormis kokkuvõtte peamistest klassikalise füüsika ja kvantfüüsika mõistetest.

Järgnevalt tutvustame iga õppemooduli sisu, et enne õppemoodulitega töö alustamist anda õpitavast parem ülevaade ja saada selgust, kust alustame ja kuhu välja tahame jõuda.

VI õppemoodul: Fotoefektist digitaalse pildini

Digikaamera tööpõhimõtet uurides saame teada, et digitaalne pilt on võimalik tänu sellisele nähtusele nagu fotoefekt. Kõigepealt käsitleme fotoefekti klassikalise füüsika abil ning seejärel pöördume kvantfüüsika poole. Uurime ka mõningaid tehnoloogilisi rakendusi, mille toimimine põhineb fotoefektil.

VII õppemoodul: Pooljuhid

Selles õppemoodulis alustame elektronide energiatasemetest aatomis ja uurime, mis juhtub, kui palju aatomeid kokku panna. Avastame, et elementide omadused perioodilisustabelis on tingitud nii nende kvantomadustest kui elektrijuhtivusest. Seejärel tutvume tehnoloogiliste rakendustega, mis on tekkinud tänu materjalide vastavate omaduste mõistmisele.

VIII õppemoodul: Tunnelerumine ja STM

VIII õppemoodul tutvustab tunnelerumist ehk tunneliefekti – veel üht kvantfüüsika nähtust. Näeme, et mikroskoopilised kehad ja valgus suudavad läbida energiabarjääri hoolimata sellest, et neil ei jätku selleks piisavalt energiat. Siiski saavad nad seda teha tänu oma dualistlikule (lainelisele-osakeselisele) loomusele. Avastame ka, et tunneliefektil on mitmeid huvitavaid ja kasulikke rakendusi, nagu näiteks välgmälu ja skaneeriv tunnel-elektronmikroskoopia.

IX õppemoodul: Spinn ja selle rakendused

Ainel on palju defineerimata omadusi, mis kehadel lihtsalt on – näiteks mass. Me ei tea tegelikult, mis mass on, aga me teame, kuidas see end ilmutab. See aitab meil tutvustada üht aine kvantomadust – spinni. Klassikalisel füüsikal spinnile vastet ei leidu. Saame aga uurida, kuidas spinniga kehad käituvad, et seda paremini mõista ja kasutada tehnoloogilistes rakendustes, nagu näiteks magnetresonantstomograafias (MRT, ingl k *MRI*) ja spintroonikas.

X õppemoodul: Aatomjõumikroskoopia (AFM)

Selles õppemoodulis jätkatakse VIII õppemooduli teemat ja tutvustatakse veel üht tunneliefekti rakendust – aatomjõumikroskoopiat (AFM).

XI õppemoodul: Kvantmehaanikast nanoosakeste ja nende rakendusteni

See õppemoodul viib meid nanoosakeste ja nende omaduste maailma. Nanoosakesed on kvantmehaanilised süsteemid, mis koosnevad paljudest aatomitest või molekulidest – nad erinevad seniõpitud lihtsatest kvantmehaanilistest süsteemidest. Paljusid nanoosakeste omadusi saab kasutada nanotehnoloogilistes rakendustes ja nad on praegu väga tugevalt teaduse huviorbiidis.

XII õppemoodul: Mikrobioloogiline kütuselement

Selle õppemooduli teemas kohtub kvantmehaanika bioloogia ja keemiaga. Tutvume selle teemaga lähemalt, uurides mikrobioloogilise kütuselemendi tööpõhimõtet.

VII õppemoodul: Pooljuhid

Kvantfüüsika tundub alguses väga teoreetiline ning inimkonnal võttis selle avastamine ja rakendamine omajagu aega. 20. sajandil hakati mõistma, et aine ja valguse põhjalik tundmine annab hämmastavaid rakendusvõimalusi, millest varem ei osatud unistadagi!

Pooljuhtidel on ainulaadne võime kontrollida voolu, mis neid läbib. See omadus teeb need asendamatuks seadmetes, nagu transistorid, päikeseelemendid, mikroskeemid, mikroprotsessorid jms, kus just voolukontrollimine on nende toimimise alus.

Elektrivoolu kontrollimine pooljuhtidega tegi võimalikuks luua **liikumatud lülited**. Terminit „transistor“ kasutati „ülekanne takisti“ lühendina. See oli inimkonnale otsustav samm. Enne seda oli kõigil seadmetel, nagu kalkulaatorid ja esimesed arvutid, mehaanilised lülited koos *liikuvate* osadega. See tegi nende mõõtmised suureks ja kasutamise aeglaseks. Kuid koos pooljuhtide transistoritega muutsid liikumatud lülited toimingud kiireks ja kindlaks, kulutades seejuures vähe energiat. Esimese transistori tegid 1947. aastal John Bardeen, Walter Brattain ja William Shockley AT&T's Belli laborites Ameerika Ühendriikides.



Valik diskreetseid transistore eri vormis (Allikas: Wikipedia avalik domeen)

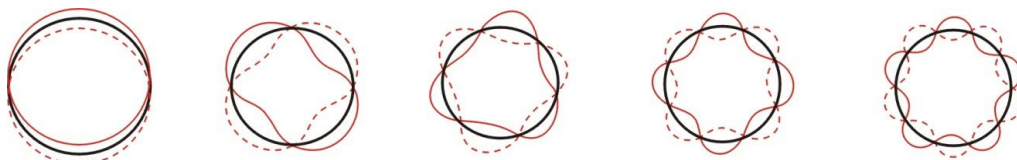
Hiljem integreeriti pisikesed transistorid kiipi ning see vallandas praeguse elektroonika- ja sidevahendite buumi. Ükski sellistest rakendustest poleks olnud võimalik ilma kvantfüüsika mõistmiseta. Selle avastuse praktilist kasu on raske üle hinnata. Liikumatud lüliteid leidub meditsiiniinstrumentides, kodumajapidamise rakendustes ja nutitelefonis andmesalvestusseadmetes. Ilma pooljuhtide rakendusteta ei töötaks meie praeguses ühiskonnas peaaegu midagi.

Seepärast püüdkem mõista, **miks mõni tahkis juhib elektrit** (näiteks metallid) ja **teised mitte**. Vaata materjale, mida me nimetame pooljuhtideks, ja püüa mõista, kuidas on võimalik, et need saavad mängida nii tähtsat rolli kõigis meie elektronseadmetes. Kõigepealt taandub kõik elektronide diskreetsetele energiatasemetele aatomis.

1 Aatomite energiatase

V õppemoodulis said teada, et vastavalt kvantmehaanikale on objekt tegelikkuses (nagu laud, elektronid ja tulbid) nii laine kui ka osake. Seega võib järeldada, et kui elektron on aatomis **piiratud**, ei saa tal olla lainepikkust. Nii nagu muusikariistade lainete puhul, *ilmneb kvantiseerimine*, sest ainult need **lained, mis end** konstruktiivselt vastastikku *ühitavad*, saavad eksisteerida. Selle tulemusena peab osakese lainepikkus järgima De Broglie tingimust:

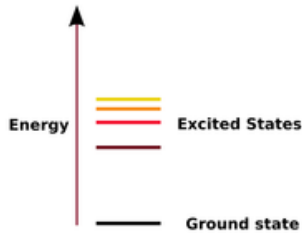
$$n \lambda = 2 \pi r$$



Kvantfüüsika: teadus väga väikestest osakestest, millel on lai rakendusala

Nagu sa juba tead, on λ elektroni lainepikkus, r aatomi raadius ja n positiivne täisarv (nimetatakse kvantarvuks). Ülajoonis näitab elektronlainet (punane joon) $n = 1, n = 2, n = 3, n = 4$ ja $n = 5$ jaoks. Igal elektronlaineril on vastav kvantiseeritud energia. Vesiniku aatomi korral, mille arvutasid V õppemoodulis, on see järgmine:

$$E_n = -\frac{1}{n^2} \frac{me^4}{8\epsilon_0^2 h^2}$$



kus e on elektroni elektrilaeng, h on Plancki konstant ja ϵ_0 on looduse konstant, mida tuntakse tühja ruumi läbitavusena, ning n on taas vastav kujuteldava energiataseme kvant- ehk täisarv.

Selle asemel et joonistada kogu aeg elektronlaineid, me lihtsalt esitame **kvantiseeritud energiatasemeid** vertikaalteljel, nagu siinoleval joonisel näha (Allikas: Wikipedia avalik domeen).

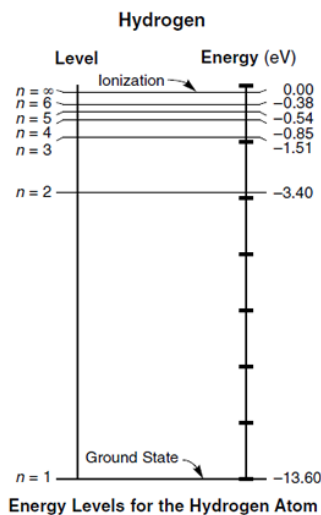
Kõige alumine rida vastab elektronlainele, millel on väikseim võimalik energiahulk, lähtudes kõige vasakpoolsemast elektronlainerist lehe ülaservas oleval joonisel. Teine ülalolev rida vastab vasakult teisele numbrile jne. Neid nimetatakse energiatasemeteks.

Mis on vesinikuaatomi elektroni kolme esimese energiataseme energiad (džaulides)? Arvuta need eespool toodud valemi abil!

$E_1 =$

$E_2 =$

$E_3 =$



Siin on vesiniku energiatasemed, mis on esitatud vertikaalteljel.

Vesinikuaatomis saab elektronidel olla ainult need energiatasemed, mis on käesolevaga kujutatud. Seega saame **võimalikud energiatasemed** ja terve rea vahepeal olevaid energiasid, kus elektroni olla ei saa.

Pane tähele, et energiatelg on *elektronvoltides*, tähis eV, selle asemel et kasutada džauke (mis on tavapärane energiaühik). Kuna džaul on väike ühik isegi elektronide energiate jaoks, on praktilisem kasutada selle asemel elektronvolte.

Vesiniku kvantiseeritud energiatasemed – allikas: www.aplusphysics.com/

Vaata järele: mida tähendab eV?

.....

Mitu džauli võrdub ühe eV-ga?

.....

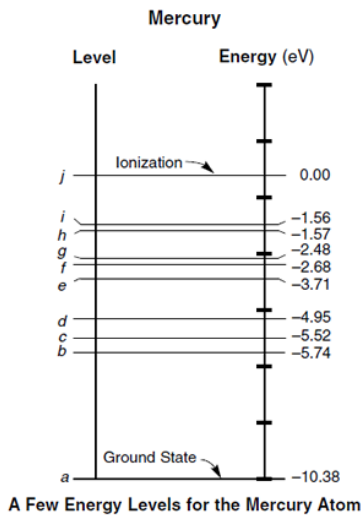
Igal Mendeleevi perioodilisustabeli elemendil on ainulaadne elektroni energiatasemete „redel“. Me nimetame seda *konkreetse* elemendi *energiaspektri*ks. Igal tuumal on tõepoolest oma elektriväli, millega elektronlained on piiratud. Vesinik on muidugi kõige kergem element: sellel on ainult

prooton, mis asub oma tuumas, ja kohustuslik elektron. Heeliumil on prootonit ja elektroni. Ja seega see kerkib. Need kõik moodustavad energiatasemed, mis on igale elemendile eriomased.

See määrab lubatud energiatega paigutuse, mis on igale elemendile eriomane. Konkreetne **lubatud energiatasemete paigutus määrab** iga looduses oleva elemendi keemilised omadused.

Haupt-		-gruppen								Perioden								
I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII											
1.00794 1 H									4.00260 2 He	1								
6.941 3 Li	9.01218 4 Be								10.81100 5 B	2								
									12.01070 6 C									
									14.00570 7 N									
									15.99940 8 O									
									18.99840 9 F									
									20.17970 10 Ne	2								
22.98977 11 Na	24.30500 12 Mg								26.98154 13 Al	3								
									28.08550 14 Si									
									30.97376 15 P									
									32.06500 16 S									
									35.45300 17 Cl									
									39.94800 18 Ar	3								
39.09830 19 K	40.07830 20 Ca	44.95591 21 Sc	47.86710 22 Ti	50.94150 23 V	51.99610 24 Cr	54.93805 25 Mn	55.93500 26 Fe	58.93320 27 Co	58.93320 28 Ni	63.54600 29 Cu	65.38000 30 Zn	69.72300 31 Ga	72.64000 32 Ge	74.92160 33 As	76.96000 34 Se	78.96000 35 Br	83.90000 36 Kr	4

(Allikas: Wikipedia avalik domeen)



Siin näed elavhõbeda võimalikke energiatasemeid.

Austria füüsik *Erwin Schrödinger* üldistas De Broglie osakese-laine mudelit. Lõppude lõpuks saab De Broglie mudeli järgi *arvutada ainult vesiniku energiatasemed*. Schrödingeri võrrand on üldisem ja kirjeldab kolmemõõtmelisi elektronilaineid tuuma ümber, mida tuntakse elektroni **orbitaalidena**.

Võimalikud elektroni orbitaalid koos nende **kvantiseeritud energiatega** saab välja selgitada mitte ainult vesiniku, vaid *iga perioodilisustabeli keemilise elemendi puhul*. Schrödingeri võrrand kirjeldab põhiliselt laine-osakesi nii aatomi sees kui sellest väljaspool.



(Erwin Schrödinger pakkus 1926. aastal välja võrrandi, mis määrab nii-öelda laine funktsiooni, mis on iga kvantosakese puhul põhiline. Allikas: Wikipedia avalik domeen)

2 Mitte kõik ei ole madalaimal energiatasemel

Niisiis, vastavalt aatomite kitsendustele ja elektronide laineomadustele elektronide energiad aatomites selgelt kvantiseeritakse. Kuid peamine küsimus, mille Niels Bohr juba tuvastas, jääb lahtiseks: **miks ei ole madalimat energiataset hõivanud kõik konkreetse aatomi elektronid?**

On selge, et kui kõik elementide elektronid oleksid madalaimal energiatasemel, siis oleksid kõigi elementide keemilised omadused ühesugused, samuti ei oleks siis spektrijooni ega värve ning siis oleks raske rääkida eri elementidest, jääksid alles ainult molekulid. Tõepoolest, molekul on loodud

Kvantfüüsika: teadus väga väikestest osakestest, millel on lai rakendusala

eraldi aatomitest, sest välimised elektronid (seega need, mis on *kõrgematel* tasanditel) moodustavad madalama energiaga võnketüübi, ühendades eraldi aatomeid, kust nad pärinevad. Seega, kui kõik elektronid oleksid madalaimal tasemel, siis oleks keemilise sideme tekkimine väga vähetõenäoline: me elaksime tuhmis maailmas või tõenäoliselt polekski siis mingisugust elu!

Puuduva võtme, mis aitab mõista aatomi- ja molekulaarstruktuuri rikkust, mida me ümbruses täheldame, andis Wolfgang Paul *keeluprintsiibi kaudu*.

Pauli keeluprintsiipi elektronidele võib võrrelda õpilastega, kes püüavad leida suures klassiruumis sobivat istekohta. Paljud õpilased soovivad istuda õpetajast võimalikult kaugele. Kahjuks ei saa aga kõik kõige tagumisse pinki istuda. Mida õpilased teevad, kui nad sisenevad klassiruumi ja parim istekoht on juba võetud?

.....

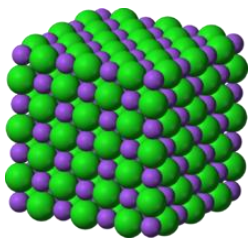
Iga sisenev õpilane peab olema rahul selle kohaga, mis on veel vaba. Kui istekohti on rohkem kui õpilasi, siis täitub ruum klassi tagaosast kuni teatud punktini.

Elektronid käituvad samalaadselt. *Igal energiatasemel on kindel arv „kohti“*, nii-öelda *seisundeid*, milles elektronid võivad olla. Ja kui need on täis, peab elektron olema teisel, võimalikult *kõrgel energiatasemel*. **Elektronide keeldu olla samas seisundis tuntakse Pauli keeluprintsiibina**¹. Kui vaadata olemasolevaid energiatsoone, siis täidavad elektronid need tsoonid, alustades madalamatest energiatest ja lõpetades kõrgemate energiatega. Kõige madalam energiatsoon sisaldab madalaima energiaga seisundeid, need tasemed täidetakse eelistatavalt elektronidega (normaaltingimustel).

Nagu sa juba keemiatundidest tead, *on elemendi kõige kaugemad elektronid* tähtsad keemilise sideme jaoks ja neid nimetatakse *valentselektronideks*. Aatomite lähedal olevad valentselektronid võivad tõepoolest vastastikku üksteist mõjutada, et moodustada ühine valentselektron. Tahkiseid käsitleme põhjalikumalt järgmises peatükis.

3 Energiatasemed tahkistes: energia- ja keelutsoonid

Arutletav küsimus seisneb järgmises: mis juhtub energiatasemetega, *kui üheskoos on palju aatomeid*, nagu esineb tahkise puhul? Paljud tahkised koosnevad suurest hulgast aatomitest, mis



kõik paiknevad struktureeritud võres, et moodustada kristall. Näiteks missugust kristalli siin kujutatakse? (vihje: sinine ja roheline aatom esindavad Na ning Cl)

.....

(Allikas: Wikipedia avalik domeen)

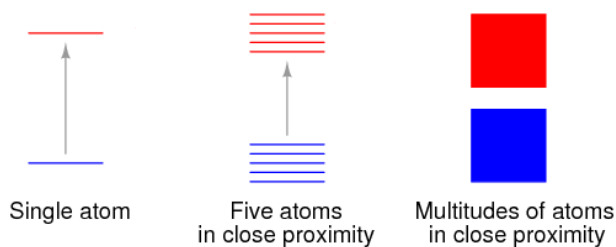
Mõelgem alustuseks lihtsamale juhtumile, kus me võtame vaatluse alla ainult viis tihedalt lähestikku aatomit. Igal aatomil on oma energiatase.

¹ Tegelikult alluvad kõik ainelaadsed osakesed, nagu elektronid, neutronid, prootonid jms, Pauli keeluprintsiibile. Osakesi, mis alluvad Pauli keeluprintsiibile, nimetatakse fermionideks. Footonid saavad seevastu olla samas seisundis. Osakesi, nagu footonid, mis ei allu Pauli keeluprintsiibile, nimetatakse bosoniteks.

Iga elektroni energiatase *kattub nende elektronidega, mis on suletud naaberaatomitesse*. Nad moodustavad uue ühise orbitaali. Pauli keeluprintsiibi järgi *ei lase loodus* elektronidel kristallis *olla täpselt samas energias seisundis*. Selle tulemusena *aatomite energiatase kristallis nihkub*. Mõni nihkub veidi üles-, mõni allapoole.

Säärase nihke tõttu on mõni energiatase madaldunud, teised tõusnud. Vastavalt Pauli keeluprintsiibile täidetakse kõige madalamad võimalikud seisundid esimesena. Tõepoolest, need valentselektronide **madalad energias seisundid** hoiavad kokku, seovad aatomeid tahkistes. See tekitab **keemilise sideme**². Seepärast saabki tahkis üldse eksisteerida!

Veelgi enam, kui me võtame väga suure arvu aatomeid, siis moodustavad nihkunud energia



tasemed tõepoolest *tihedalt pakitud energias seisundite kogumi* (punane ja sinine energiatsoon parempoolsel joonisel). Kui võres on rohkem aatomeid, ei saa aatomite energiatasemeid enam eristada: nad moodustavad **energiatsooni**.

Joonise allikas: www.allaboutcircuits.com

Kas see võimaldab elektronidel olla kristallis eri seisundites? Kuidas?

.....

Veelgi enam, kristallis esineb kordus, liikuv aatomite järjekord: kristall on *perioodiline*. Elektronid on eraldatud perioodiliselt potentsiaalses aatomite võres. See mõjutab energiatasemeid nii, et mõni tase tühistab teise taseme. Kogutulemuseks on võimalik keelutsooni **esilekerkimine**. Seega *on energiatasemed rühmitatud tsoonidesse* ning on rohkem või vähem *eraldatud energia keelutsoonidega*.

Me saame energiavahemikud, kus on võimalikud energiad (punane ja sinine osa joonisel), keelutsoon jääb vahepeale, kus energiad ei ole. See keelutsoon on tahkiste elektriomaduste poolest otsustava tähtsusega.

20. sajandi teisel poolel sai selgeks, et me saame teha elektrilisi liikumatuid lüliteid ja „ventiile“, kui nende keelutsoonidega manipuleerida. Edaspidi selgitame lähemalt, kuidas saab seda tehnoloogias kasutada.

4 Juhid, isolatorid ja pooljuhid

Keelutsooni kaudu mõistame, miks mõni materjal juhib elektrit, kuid teised mitte.

Elektronil on ilmselt vaja energiat, et põgeneda madalama **valentsiga keelutsoonest** sellest ülal olevasse keelutsooni: nii-öelda **juhtivustsooni**. Selles kõrgema energiaga tsoonis ei ole elektronid enam *aatomiga* seotud, kuid on rohkem või vähem *läinud* kristallist välja. Elektronid võivad võre sees liikuda ja põhjustada **elektrijuhtivust**.

² Tõepoolest, kvantfüüsika annab teadmised kõigi meid ümbritsevate keemiliste sidemete olemasolu kohta.

Mil viisil saavad elektronid energiat ja kuidas neid saab viia kõrgemale energiatasemele?

.....

Kui selline seisundimuutus (kui valgus paistab materjalile) toimub energiasaamise tõttu *valguse vormis*, nimetatakse seda **seesmiseks fotoelektriliseks efektiks**. Seda efekti kasutatakse **fotoodiodes** ja **päikesepaneelides**.

Milline peaks olema valgusenergia hulga tingimus, et elektroni saaks suunata valentstsoonist juhtivustsooni?

.....

Tõepoolest, kuna keelutsoon on *täpne* energiatsoon, peab valgus andma elektronile piisavalt energiat, et keelutsooni ületada. Mida väiksem on keelutsoon, seda kergem on elektronidel juhtivustsooni pääseda.

Nagu sa tead, on mõni materjal parem kui teised ja juhib elektrivoolu. Mis materjalid on head elektrijuhid?

.....

Mis materjalid on halvad elektrijuhid?

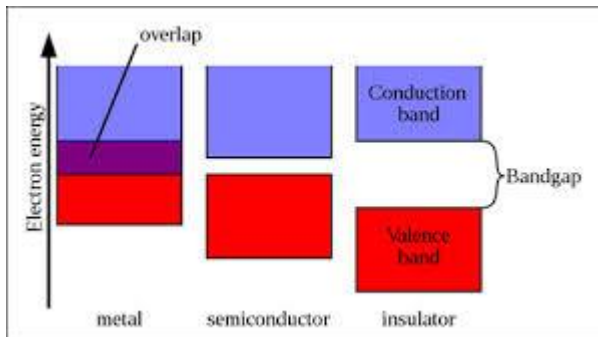
.....

Kas materjalide elektrijuhtivust võib selgitada keelutsooni kvantmudeli kaudu?

Juhi ja isolaatori erinevus seisneb *keelutsooni* suuruses. Kas isolaatoritel ja juhtidel on suurem keelutsoon?

.....

Metallidel pole keelutsooni, mistõttu elektronidel on lihtne minna valentstsoonist juhtivustsooni. Seetõttu saavad elektronid metallides vabalt liikuda. **Isolaatoritel** on aga seevastu **suur** keelutsoon, mis teeb elektrivoolu voolamise raskemaks.



Pooljuht on materjal, millel on küll keelutsoon olemas, kuid mis on **väike**. Kui elektronidele antakse väga väikesed energiakogused, siis nad käituvad isolaatoritena. Kui aga elektronidele antakse suuremad energiakogused, hakkavad pooljuhid elektrit juhtima. Sellest tuleneb ka nende nimetus.

(Allikas: solarcellcentral.com)

Perioodilisustabelis on pooljuhid 14. grupis. Mis elemendid on pooljuhid?

.....

Varem kutsuti seda gruppi IV grupiks. Mida see 'IV' valentselektronide terminites tähendab?

.....

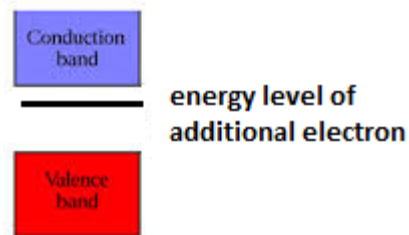
Puhtas pooljuhis, mis koosneb 14. grupi elementidest, on iga kristalli aatom korda seotud järgmise aatomiga.

5 Keelutsooni ületus: dopeerimine

Puhaste pooljuhtide **keelutsoon** on **liiga suur selleks, et** panna vool tõepoolest kristalli läbima: seal on liiga vähe elektrone, mis saaksid ehitada keelutsooni. Normaaljuhul juhib puhastes pooljuhtides elektrone edasi ainult üks aatom umbes 1000 miljoni elektronis, panustades nii elektrijuhtimisse. Metallis panustab elektrijuhtimisse peaaegu iga aatom. Kas me saaksime vahepeal midagi ette võtta?

5.a n-dopeerimine

Kas me saame keelutsooni väiksemaks muuta? Kas me saaksime lisada otse keelutsooni energiatasemetega elektrone? Seda on illustreeritud siinoleval pildil.



Seda saab tõepoolest teha, dopeerides kristalli mõne võõra elemendiga **koos ühe lisaelektroniga** (võrreldes IV grupiga). Nagu sa tead, on elektronidel, mis ei ole keemiliselt seotud, kõrgem energiaseisund kui seotud elektronidel. Seepärast ongi seal ülal dopeeringu tulemusel uus energiatase, mis on kõrgem kui valentstsoon ja natuke madalam kui olemasolev juhtivustsoon.

Millises grupis me peame leidma elemente koos ühe lisavalentsielektroniga?

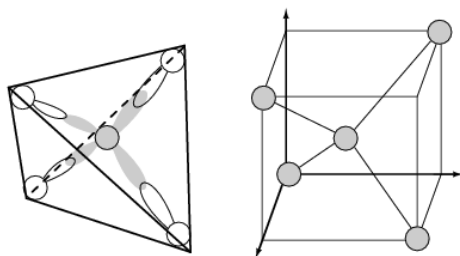
.....

Missugused elemendid sellesse dopeerimisprotsessi sobiksid?

.....

Tavaliselt on iga miljoni aatomi kohta üks aatom kristallis asendatud. See uus aatom on tihti P (fosfor). P-l on elektroni elektronkattes. nendest elektronidest moodustab koos naaberaatomitega sideme (Si või Ge). Kuid viiendal grupil ei ole ühtegi teist elektroni, et moodustada siduv seisund. Me tegelikult madaldasime juhtivustsooni, esitledes neid sidumata elektrone. Elektronid saavad seda uut energiataset kasutada selleks, et end lahti siduda ning liikuda pooljuhi ümber ja põhjustada elektrivoolu.

Sellist V grupi elementidega dopeeritud (lisaelektron) pooljuhti nimetatakse **n-pooljuhiks**, sest negatiivselt laetud elektronid panustavad juhtivusse materjalis.

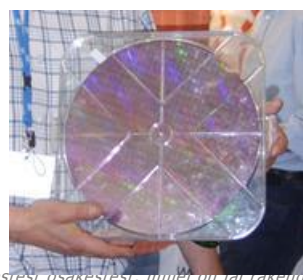


Suure võimsusega elektroonikarakendustes kasutatakse räni kristalli kujul. Kristalli kujul Si on olemuselt sama nagu teemandil, kus iga räniaatom on seotud nelja lähima naabriga, et moodustada üks nelitahkne.

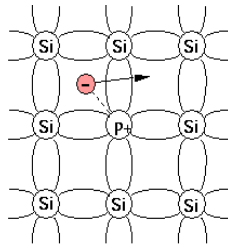
Si aatomi nelitahkne sidumine viib 1/4 kuubilise elemendi ühikuni. (Allikas: www.allaboutcircuits.com)



Kristallilisest ränist saab nüüd lõigata vahvlid. (Allikas: Wikipedia avalik domeen)



Kiibiarendajad, nagu Intel, panevad kokku mahukaid integreeritud mikroprotsessoreid ühekristallilise ränivahvli alusel (Allikas: Wikipedia avalik domeen)



Kuigi räni kristalli struktuur on nelitahkne, on dopeeritud kristall mõnikord esitatud lihtsalt tasandil. (Allikas: Wikipedia avalik domeen)

5.b p-dopeerimine

Kas me saame keelutsooni väiksemaks muuta, lisades keelutsooni madalamale küljele energiataseme, nagu juuresolevalt pildilt näha?



Võib-olla võiksime nüüd otsida vastandlikku olukorda: ühe liigse elektroni asemel otsi nüüd elemente, millel on **üks lisaelektron** liiga lühike (võrreldes IV grupiga). Millises grupis me peame leidma elemente koos ühe liiga lühikese lisavalentselektroniga?

.....

Missugused elemendid sellesse dopeerimisprotsessi sobiksid?

.....

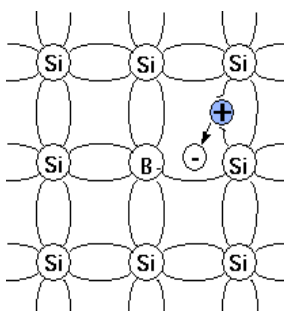
Nendel keemilistel elementidel on ainult elektroni valentselektronkihis. nendest elektronidest moodustab koos naaberaatomitega sideme (Si või Ge).



energy level of hole

Dopeerimine III grupi aatomitega põhjustab kindlates kohtades *sideme puudumist*. Nagu sa tead, on siduvatel orbitaalidel madalam energia kui mittesiduvatel orbitaalidel. Seega loob seosepuudus (hõivamata) energiataseme koos veidi kõrgema energiaga kohe valentsitsooni kohal. Kuna see on teiste valentselektronide jaoks ainult üks väike energiasamm tulla sellele hõivamata energiatasemele (mõnikord nimetatakse seda „auguks“), liiguvad mujalt

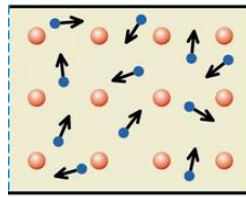
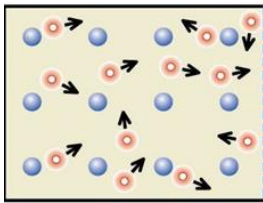
pärinevad elektronid sellesse auku. Niimoodi toimides jätavad nad augu (sideme puudumine) ka mujale kristallis. See tekitab uue kergesti ligipääsetava energiataseme valentsitsooni lähedale, kuhu teised valentselektronid saavad tulla. Selle tulemusena tekib vool!



Näiteks boori saab kasutada nii-öelda **p-dopeerimiseks** („p“ tähistab „positiivset“, sest positiivsed augud põhjustavad elektrijuhtivust). Siinkohal võid mõelda hõivamata energiatasemele, sellelaadne auk oli positiivselt laetud aineosake. Seega võid arvestada p-pooljuhtide puhul „liikuva augu vooluga“.

Kuid ära unusta, et füüsiliselt liiguvad elektronid ikka naaberaatomitest, täites auke ja jättes maha omakorda uue hõivatava augu.

Millisel joonisel on kujutatud p-pooljuhti? Millisel n-pooljuhti?



.....

.....

6 Diod

Kuna me saame tekitada pooljuhtivates materjalides mõningast elektrivoolu, taotleme rohkemat: elektriseadmed, mis suudavad voolu *kontrollida*!

Üks lihtsamaid asju, mida me saame teha, on ehitada seade, kus me liimime p- ja n-pooljuhid üksteisega (seda nimetatakse **pn-siirdeks**). Sel moel oleme ehitanud diodi **elektronlambi**, kus vool saab voolata ainult ühes suunas. See teeb näiteks võimalikuks hoida elektriahelat kõrge pinge all (loogilist osa), ilma et takistataks voolul tagasi voolata. See on igasuguse elektroonika lähtepunkt! Vaadake, kuidas see töötab!

Kui me ühendame p-tüüpi pooljuhtiva materjali n-tüübi kõrvale, siis kummas osas on rohkem vabu elektrone?

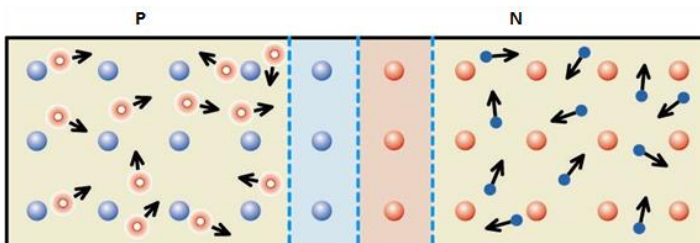
.....

Millises osas on rohkem auke?

.....

Mis juhtub kahe pooljuhi piiril?

.....



Diffusion

See, mis juhtub keskel, sarnaneb tõepoolest veidi sellega, kui valada tilk tinti veeklaasi. Mis juhtub tilgaga isegi siis, kui seda mitte segada?

.....

(Allikas: Wikipedia avalik domeen)

Spontaanset tilga levimist vees nimetatakse difusiooniks. Difusioon, kuid nüüd laengute, mitte tinditilkade oma, leiab aset ka kahe pooljuhi vahelisel piiril. n-pooljuhi vabad elektronid liiguvad p-pooljuhti, et täita augud.

Selle tulemusel ei ole keskel enam vabu laengukandjaid. Seepärast nimetame seda **tühjenemistsooniks**.

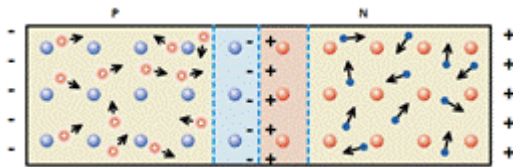
Kui elektronid on liikunud, on ka elektrilaengud liikunud.

Kui elektronid liiguvad p-tsooni, saab see tsoon (positiivse/negatiivse) laengu.

Kui elektronid liiguvad n-tsoonist välja, saab see tsoon (positiivse/negatiivse) laengu.

Ümberasustatud laengud loovad elektrivälja, mis vähendab difusiooni (vt piiri pn-siirde joonisel). See teeb uute elektronide liikumise raskeks. Kas oskad selgitada, miks?

.....



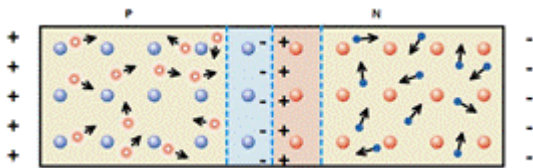
Nüüd ühendame *patarei* sellisel viisil, et *patarei negatiivne poolus on ühendatud p-tüübiga* ja positiivne poolus n-tüübiga.

Kas elektrivool voolab läbi tühjenemistsooni? Miks?

.....

Tõepoolest, *patarei* negatiivne poolus on ühendatud tühjenemispiiri negatiivse poolusega (ja positiivne poolus positiivse poolusega) ja võrdsed laengud tõukuvad üksteisest. Seega ei saa *patarei* laeng piiri ületada ja elektrivool ei voola. Seda nimetatakse vastupingestatud pn-siirdeks.

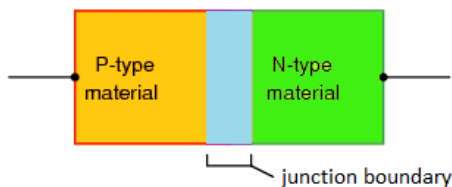
Kui aga *patarei* ümber pöörata, saame alloleva vabastuse.



Kas nüüd on vool olemas? Selgita.

.....

Tõepoolest, *patarei* positiivne poolus tõmbab külge elektrone, mis liikusid p-tüüpi pooluse piirjoonele. *Patarei* negatiivne poolus tõmbab külge nii-öelda positiivselt laetud auke piirjoone n-tüüpi poolusel. (Tegelikult liiguvad elektronid vastupidises suunas.) Ränne, mille algul peatas piirjoonel olevate laengute olemasolu, võib nüüd taas alata ja seega voolab elektrivool läbi diodi. Nimetame seda päripingestatud pn-siirdeks.



Diodi sümbol elektriahelates.



Triibuga diod, mis tähistab negatiivset katoodi. Seega sa tead, kuidas lülitada see vooluringi. (Allikas: Wikipedia avalik domeen)

Diodil on samuti lihtsad rakendusvõimalused: näiteks kasutatakse seda peaaegu igas seadmes, kuhu tuleb panna patareid. Diod takistab elektrivoolul voolata, kui asetada patareid seadmesse vale polaarsusega.

Diode kasutavad ka alaldid, mis muudavad vahelduvvoolu alalisvooluks. Nagu eespool öeldud, on kõige arenenumad rakendused, mida leiab elektroonilises elektri ahelas, need, mis takistavad voolul tagasi voolata.

Vastupingestatud diodid on kasutusel ka kiirgusdetektorites – seadeldistes, mida kasutatakse nii füüsika alusuuringutes kui tuumajaamade lähedal või haiglates radioaktiivse kiirguse mõõtmiseks.

7 Transistor

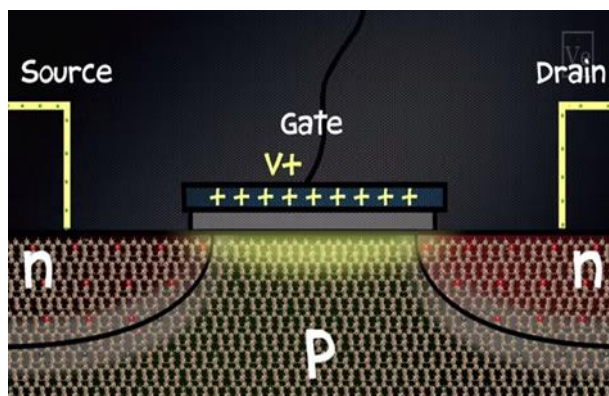
Vahemaa De Broglie tõenäosuslainetest moodsate arvutite ja muude elektroonikaseadmeteni tundub tõeliselt pikk. Kuid see on seesama, mis juhtub aeg-ajalt füüsikas: püüdes maailma mõista, avanevad uued vaatenurgad ja võimalused, millest keegi ei osanud varem mõeldagi.

Seega me teame, kuidas teha seadet, mis võimaldab elektrivoolul voolata ühes suunas ja mitte teises suunas: märksõna on „diod“. Mis juhtub siis, kui me teeme kaks diodi mitmekihiliseks? Tehkem kahe n-tüübi vaheline p-pooljuht mitmekihiliseks.

Seda seadet nimetatakse transistoriks ja selle tähtsust elektriseadmetes on raske üle hinnata (sa võid samaväärselt mitmekihistada kahe p-tüübi vahelise n-pooljuhi).

Igal juhul saame kaks pn-siiret ühe asemel (mis oli võimalik diodi korral). Me oleme pannud 2 diodi vastassuunda, üks teise järel. See tundub esmapilgul kasutu, sest elektrivool ei saa üheski suunas läbi liikuda, kuna kumbki diod blokeerib voolu ühes suunas.

Tõepoolest, keskel on p-tüüpi materjal ja see on laetud negatiivselt elektronide poolt, mis rändasid nendesse välistest n-pooljuhtidest. Elektronid, mis püüavad rännata allikast (vasakul) suudmesse, blokeeritakse nende negatiivsete laengute poolt pn-siiretes. Transistori elektrivool ei läbi. See on välja lülitatud või vastandseisundis.



Kuid iga väline pooljuht on ühendatud traadiga (siinsel joonisel on n-pooljuhid). Vasakut poolt nimetatakse allikaks ja paremat poolt suudmeks, p-materjal keskel on aga alus või värav.

Nüüd on eesmärk lasta vool ühest allikast (vasakul) teise traati, mida tuntakse suudmena.

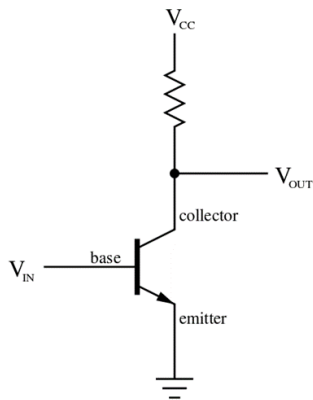
Source Veritasiumi teadusblogi: kuidas transistor töötab?

Kuid mis juhtub siis, kui rakendada pinget mitmekihilisele pooljuhile keskel (joonisel p-pooljuhid).

Kui väravale rakendatakse positiivset pinget, siis negatiivse pinge mõju pn-siiretes tühistatakse ning elektrivool saab voolata allikast suudmeni. Transistor on seisundis „sees“ või „mööda lastud“.

Kui pinge ära võtta, lülituvad transistorid taas välja. Seega tegid sa lülituse ilma ühegi liikuva osata! Transistore on palju kergem masstoota kui mehaanilisi lüliteid. Veelgi enam, neid saab teha väga väikeses mikromastaabis.

On märkimisväärne, et kristalli omaduste kasutamisel oleme me võimelised ehitama



lülitit, mida saab sisse ja välja lülitada, rakendades või rakendamata elektrivoolu väravale. Kuna kõik on looduses puhtalt elektriline (ei ole olemas mehaanilisi liikuvaid osi), saab transistor sisse ja välja lülitada nii kiiresti, et väikse ajaga võib teha palju toiminguid. Samuti võtab see kõik vähem energiat kui siis, kui töötatakse tõeliste mehaaniliste lülitite või releedega.

Transistoril on kaks põhifunktsiooni: see töötab lülitina, mida saab sisse ja välja lülitada: lisaks saab seda ühendada vooluringi, et see töötaks võimendina. Siin näed tavalist vooluahelat, mille sees on transistor.

8 Rakendus: LED

Valgusdiodid kaotavad kõrgema juhtivustsooni elektronid energiat valguse kujul. Seetõttu kukuvad elektronid läbi keelutsooni alla, andes samal ajal valgust.

Kas sellist energiat kaotatakse kindlas koguses või võivad elektronid kaotada ükskõik kui palju energiat?

.....

Seega, keelutsooni kvantmudel takkistes koos Einstein Plancki seosega prognoosib, et keelutsoon on (KÕRGEM/MADALAM/VÕRDNE) sinise valguse korral võrreldes punase valgusega. Kas oskad selgitada, miks?

.....



Kas sinine valgusdiod vajab valgustamiseks suuremat pinget kui punane? (Jah/Ei) Miks?

Katse: võta valgusdiodid ja muudetava pingega allikas. Mõõda multimeetriga, mis pinge juures hakkab valgusdiodid särama. (Veendu, et rakendad valgusdiodile alalisvoolu õiges suunas.)

Valgusdiodi värvus	U (V)
Punane	
Kollane	
Roheline	
Sinine	

Kas kvantteooria ja keelutsooni mudeli prognoos on kinnitatud või mitte? (Jah/Ei)

9 Rakendus: päikeseelemendid

Nagu sa tead, saab päikesepaneelide abil genereerida elektrit.

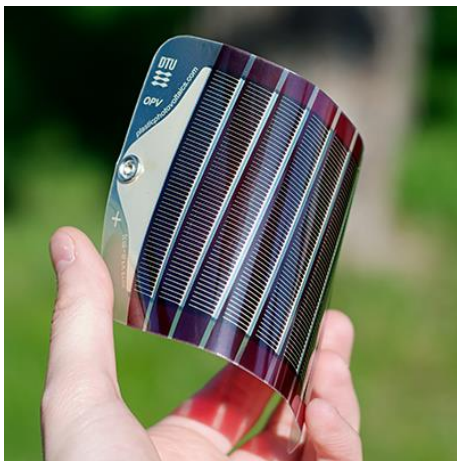
Kujutle – arutluskäik koos keelutsooni mudeliga –, mis päikeseelemendi tahkes materjalis juhtub, et tekib elekter?

.....

Seega töötab päikesepaneel seesmise fotoefekti baasil.

Kas keelutsooni suurus ja valguse värvus, mille jaoks paneel töötab, on omavahel seotud? Selgita.

.....



Pooljuhid on päikeseelementides räni- või germaaniumipõhised. Praegu on päevakorral uurimistöö päikesepaneelide kohta, mis on tehtud orgaanilistest pooljuhtidest süsiniku baasil. Nendel võiksid olla paljutöötavad omadused, nagu volditavus. See teeks nende rakendamise kergemaks sellistel pindadel nagu katused, telgid, paadid, autod jne. Kuid praegu on nende tõhusus ja stabiilsus (palju) väiksem kui mitteorgaanilistel paneelidel.

Orgaanilised päikesepaneelid meenutavad meile loodusprotsesse, nagu taime fotosüntees, kus valguselt saadav energia püütakse kinni molekulaartasandil.

Allikas: plasticphotovoltaics.org

10 Rakendused: tulevikuväljavaated

Praegune uurimistöö püüab teha transistore nano- ja peitnanoskaalas. Need mõtted on aatomi mastaabis ja esile kerkivad uued füüsikalised piirangud, nagu vooluleke, mis on põhjustatud kvanttunneleerimisest või liiga aeglasest signaalitöötusest, mis on tingitud piiratud valguskiirusest. Kui muid vihjeid ega tehnikaid ei leita, võivad need

piirangud aeglustada evolutsiooni, mis on muutunud viimase 50 aasta jooksul harjumuspäraseks.

Peaaegu 5 miljardit transistori on tänapäeval Inteli nm protsessorites (n-ö Xeon Phi protsessoripere). Kiibil olevad struktuurid on muutunud isegi veel väiksemaks kui inimrakud, bakterid või viirused. Murranguid on oodata biosensorite, meditsiinirakenduste ja loodusteaduste valdkonnas. Tulevikus saab võimalikuks asendada kõik labori vahendid väikeste, suhteliselt odavate, kiirete ja täpsete käsi-laborikiipidega. Sel moel saab vähki ja muud liiki haigusi avastada üsna vara ja püsivalt. Mõnda mõõtmist, mida praegu tehakse arstikabinetis või isegi haiglas, võidakse tulevikus teha kodus või mujal.

Saab selgeks, et pooljuhtrakendused, mida peab ikka veel arendama, võivad aidata lahendada moodsa elu probleeme, nagu terviseküsimused, kliimamuutused ja jätkusuutliku energia varud.

11 VII õppemooduli mõisted

Kirjuta lünkadesse puuduvad mõisted!

Klassikalise füüsika mõisted

.....

Kvantfüüsika mõisted

Igal energiatasemel on kindel arv „kohti“, nii-öelda seisundeid, milles elektronid võivad olla. Ja kui need on täis, peab elektron olema teisel energiatasemel. Elektronide keeldu olla samas seisundis tuntakse

Konkreetne lubatud energiatasemete paigutus määrab iga perioodilisustabelis oleva elemendi

Kristallis iga elektroni energiatase nende elektronidega, mis on suletud naaberaatomitesse. Nad moodustavad uue ühise orbitaali. järgi ei lase loodus elektronidel kristallis olla täpselt samas energiaseisundis. Selle tulemusena aatomite energiatase kristallis Need nihkunud energiatasemed moodustavad tihedalt kokkupakitud võimalike energiaseisundite kogumi ja üksikute aatomite energiatasemed ei ole enam eristatavad – nad moodustavad

Seega on energiatasemed rühmitatud tsoonidesse ning on rohkem või vähem eraldatud