

Päikesepaneelid ja nende kasutamine

Artiklit ja selle osasid (tekstilõike, jooniseid, tabeleid) tohib mujal avaldada vaid koos viitega allikale:
www.hemeltron.ee

I. Päikesepaneel

Päikesepaneel on õhuke monoliitne seade mõõtmatega ruutdetsimeetritest ruutmeetriteni, mis muundab nähtava valguse energia vahetult alalisvoolu energiaks.

Väiksemaid selliseid seadmeid nimetatakse päikese-elementideks ja päikesepatareideks.

Päikesepaneel on staatiline seade, milles puuduvad liikuvad osad; samuti ei esine seal kõrgeid temperatuure. Selletõttu on päikesepaneel töökindel, hooldusvaba ja pika kasutuseaga.

Funktsionaalne materjal

Kõikide tänapäeva päikesepaneelide funktsionaalne osa on pooljuhtmaterjalist (95 % juhtudel ränist); ja energia muundumise mehhanism nendes on seletatav tahkise elektriteooriaga.

Pooljuhid on tahked ained, mille elektrijhtivus on tunduvalt väiksem kui metallidel, kuid suurem kui isolaatoritel. Pooljuhtidele on iseloomulik elektrijuhtivuse tugev sõltuvus lisa-ainetest (ebapuhtusest), kristalse struktuuri korrapärasusest ja väliskeskkonna mõjudest (temperatuur, rõhk, valgus, magnetväli jne.).

Funktsionaalse materjali kogus päikesepaneelis on väike ja rüni puhul on lähteaineks tavaline valge liiv, SiO₂; kuid et paneel hakkaks energiat tootma, peab materjal olema äärmiselt puhas, ja sellesse on vaja lisaainetega kujundada eriline "struktuur".

Muud materjalid peale rüni: CdTe, GaAs, CuInSe₂, juhtivad plastid.

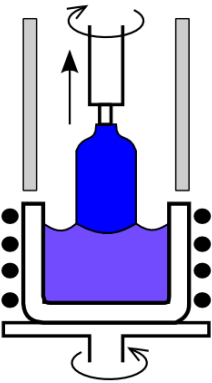
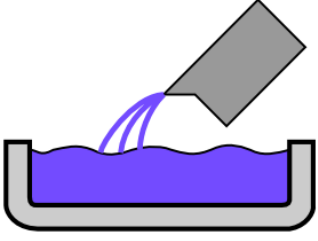
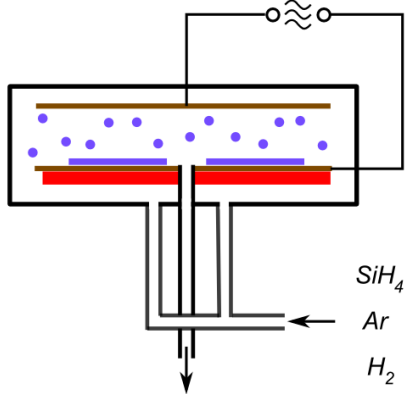
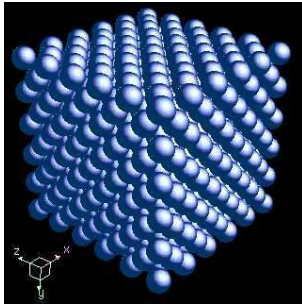
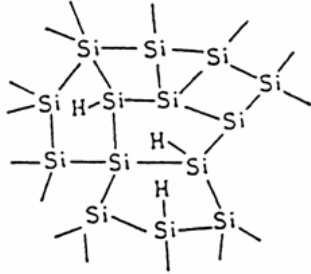
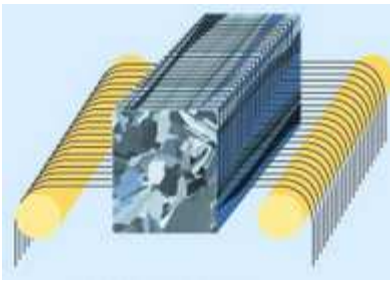
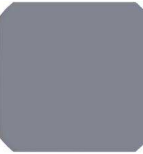
Ränist mono- ja polükristalsed paneelid valmistatakse tavaliselt monoliitsest toorikust; ülejäänud paneelid kiletehnoloogiat kasutades (materjal kasvatatakse näit. aurufaasist klaasile).

Monokristalne, polükristalne, amorfne

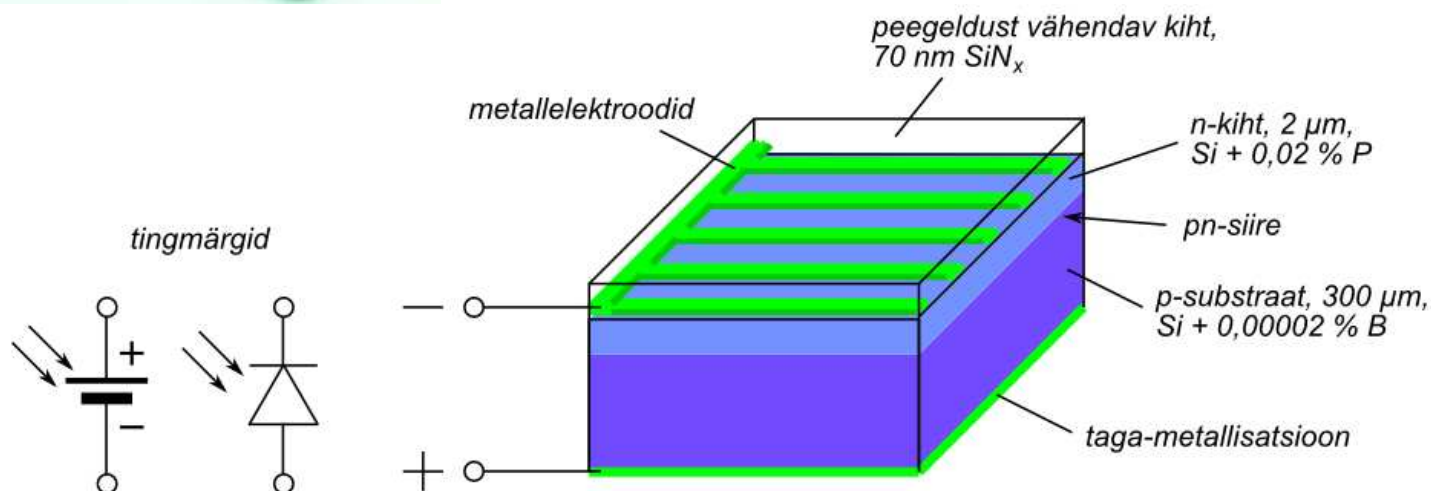
Tahke rüni, nagu enamus muidki aineid, on normaalselt alati kristalliseerunud, mis on termodünaamiliselt stabiilne olek.

Kui toorik valmistatakse kas sula materjali omasoodu jahumisel või aursadestusmeetodil, algab kristallide moodustumine diskreetselt, paljudes punktides üle pinna või ruumi. Kui pind, millelt kristalliseerumine algab, on atomaarselt korrapäratu nagu klaas või valuvormi sein, on ka idukristallid orienteeritud erinevalt. Protsessi jätkudes kasvavad kristallidid kokku, kuid jäävad erinevalt orienteerituks. Sellist materjali nimetatakse polükristalseks. Polükristalne rüni sarnaneb selles osas malmiga.

Ränist (ja teistestki) õnnestub aga teatavate jõupingutuste ja kulutustega kasvatada isegi meetrisuuruseid kristalle, milles aatomid on kogu tooriku ulatuses orienteerunud samu sirgeid ja tasandeid mööda, millisel juhul räägitakse monokristalsest materjalist. (Rangelt võttes sisaldab kristallvõre siiski paratamatult defekte ja lisaks rünil on seal aina mingil määral muidki elemente).

	monokristalne	polükristalne	amorfne
Tooriku valmistus			
T_{kasv}	1100 °C	1100 °C	250...400 °C
Kristallstruktuur			
Tükeldus			ei ole vaja
1 W-se paneeli suhteline suurus			
1 W suht. hind	1	1	0,95

Et räniplaat / -kiht hakkaks valgusest elektrivoolu tootma, on vaja seda veel täiendada lisa-ainete ja juhtivate kihtidega, nii et moodustuks näiteks selline struktuur:



Olulisimat rolli valguseenergia muundumisel elektrivooluks mängib *pn*-siire, mis tähendab ruumilist piirkonda *p*-kihi ja *n*-kihi kokkupuutepinna läheduses. *p* ja *n*-i tähendus selgub allpool.

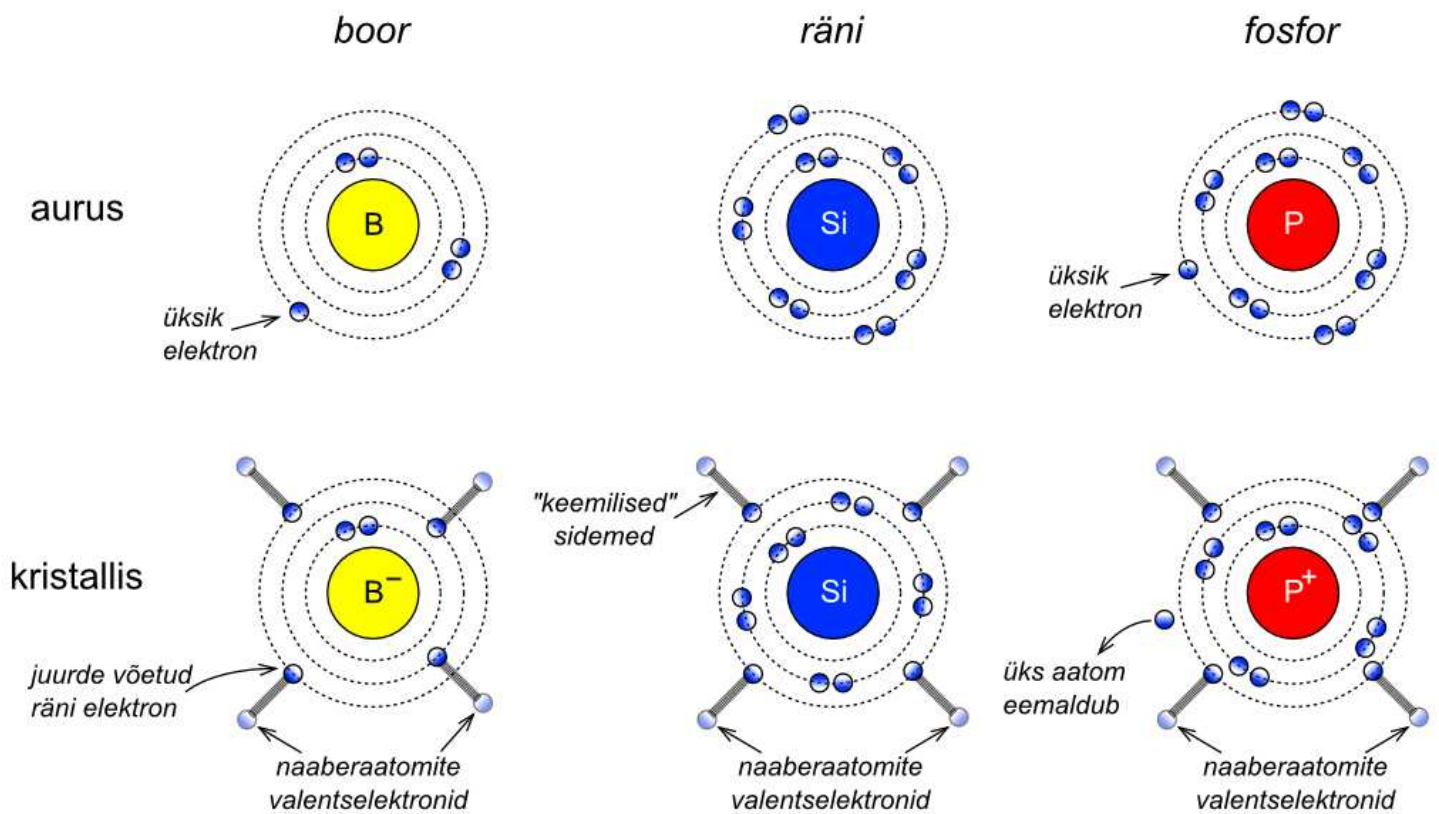
Mis toimub *pn*-siirdes?

Elektronid aatomites ja tahkises

Elektronid ja nende mõeldavad muud "lubatud" asukohad paiknevad omaette aatomites "kihtidena" ja tahkises "vöönditena". Madalatel temperatuuridel võtavad keemilistest protsessidest ja tahke keha nähtustest osa vaid tuumast kõige kaugema kihi/vööndi elektronid, "valentselektronid".

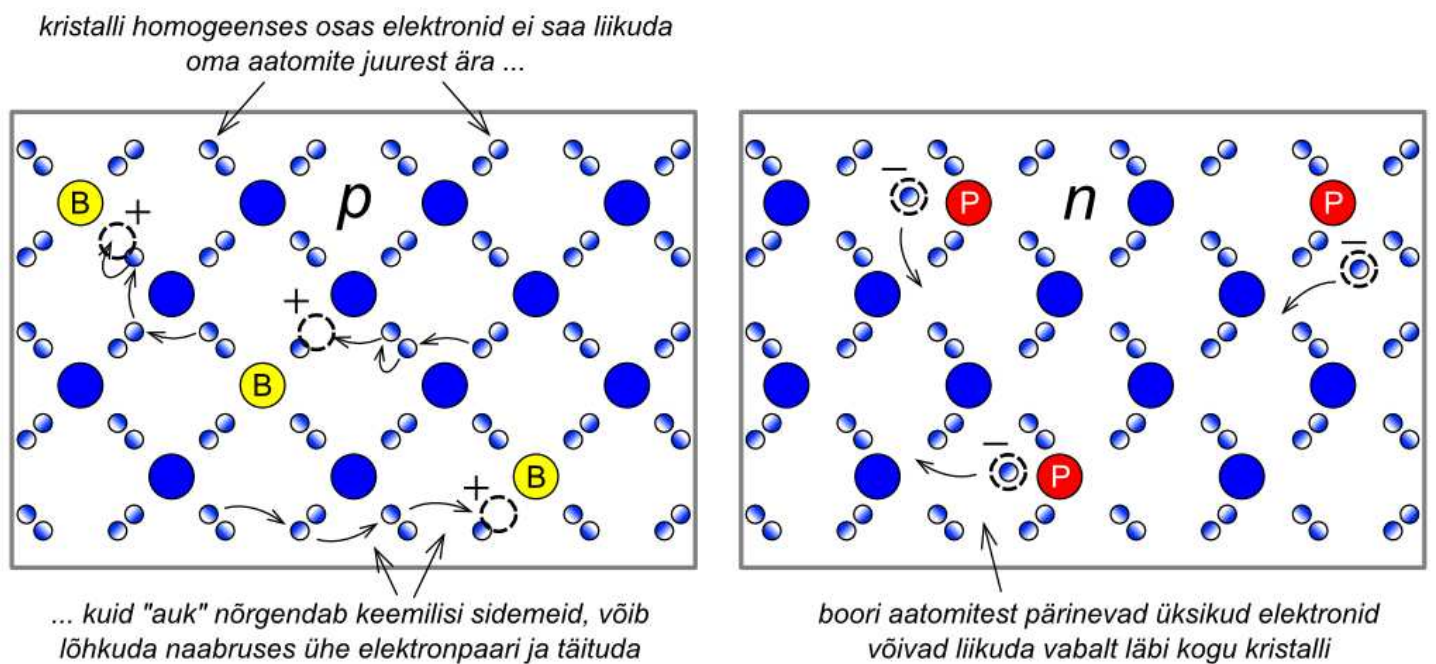
Elektronide energia võib nii aatomites, molekulides kui ka tahketes ainetes omada vaid diskreetseid väärtusi – räägitakse elektronide energiatasemetest. Kuna ühel energiatasemel võib olla kõige rohkem vaid 2 elektroni, siis kasutatakse ka väljendit "lubatud energiad".

Et kaks elektroni võivad omada sama energiat, on seotud sellega, et elektronid kujutavad endast väikeseid magneteid, mis tõmbuvad teineteise poole nagu suuredki magnetid. Teineteisele päris lähedale nad ei pääse, sest samamärgilised elektrilaengud on tõukuvad.



Keemilisi sidemeid, mille moodustavad kaks erinevatest aatomitest pärit elektroni, nimetatakse kovalentseteks sidemeteks.

p- ja *n*-tüüpi materjalides põhjustavad boori ja fosfori aatomid nn. "aukjuhtivust" ja "elektronjuhtivust" järgmise mehhanismi kaudu:



lisandid muudavad räni elektritjuhtivaks

"aukjuhtivus"

"elektronjuhtivus"

On oluline märkida, et mõlemad materjalid on keskmiselt neutraalsed – elektronide laeng üle mingi aatomite rühma või kristalli piirkonna on keskmiselt sama suur kui selle piirkonna aatomituumade summaarne laeng. Homogenses materjalides puuduvad makroskoopilised elektriväljad.

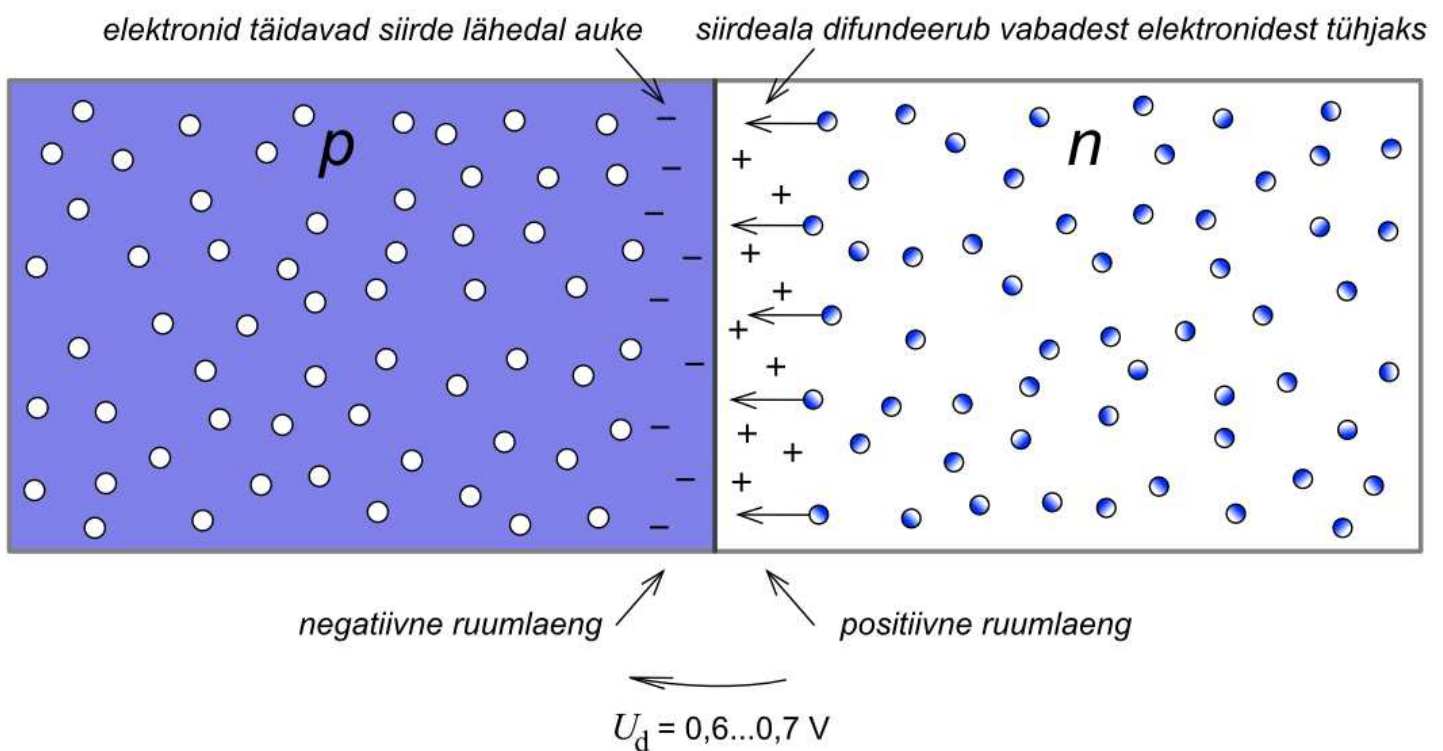
p-n-siire

Vaatleme, mis juhtub *p*- ja *n*-juhtivusega materjalide liitmisel.

Kuna *n*-poolel on suure energiaga vabu elektrone, siirdub osa neist *p*-poolele, ja täidab seal olevaid vakantse, "auke" (nn. elektronide ja aukude rekombinatsioon). Elektronide energia muutub seejuures soojuseks; protsess on selle tõttu pöördumatu.

Nii tekib liitepinnal olukord, et seal ei ole vabu laengukandjaid: liitepinna ümbruses on vaid keemiliste sidemete elektrone, mis on tugevalt seotud oma tuumadega.

Liitepinnast vasakul on summaarne laengutihedus negatiivne ja paremal pool positiivne – tekib nn. ruumlaeng, mille elektriväli takistab edasist elektronide difusiooni *n*-poolelt *p*-poolele.



Kahe materjalitüki liitmine teineteisele lähendamisega oli vajalik vaid asja paremaks selgitamiseks; lõppolukord ei sõltu sellest, kuidas lõppstruktuurini jõutakse.

Jooniselt selgub, et pärast kokkuliitmist tekib *p*- ja *n*-juhtivusega osade vahele pinge (nn. difusioonpinge U_d). *n*-pool on tervikuna positiivne ja *p*-pool negatiivne. Siis peaks päikesemoodul nagu andma välja pinget ilma valgusetagi, või on teooria vale?

Et *pn*-siirdes tõesti elektriväli ja üle siirde pinge olemas on, on võimalik kindlaks teha elektronmikroskoobiga ja teraviksondidega. Mooduli metallkontaktid on aga ühendatud lisaks *p*- ja *n*-aladele veel läbi parasiitsete pinnatakistuste, välise mõõteriista või koormusahela. Ka nimetatud väliste ahelate kaudu siirdub elektrone *n*-poolelt *p*-poolele; metallkontaktide alla moodustuvad samuti ruumlaengud, mis tasakaalustavad *pn*-siirde ruumlaenguid, ja kontaktide vahel on pinge tasakaaluolukorras null.

Päikesepaneeli teooria sisaldab kaks olulist momenti:

- 1) ruumlaengu tekkimine *pn*-siirdes (mida just käsitlesime);
- 2) fotogeneratsioon.

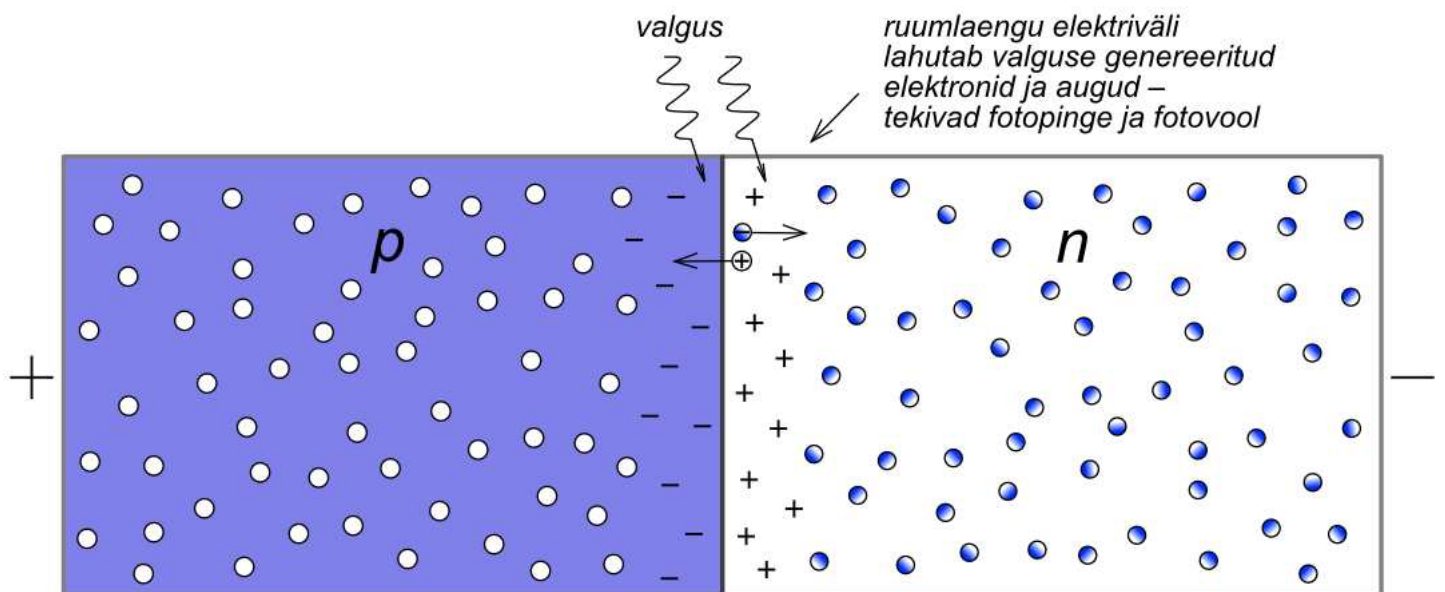
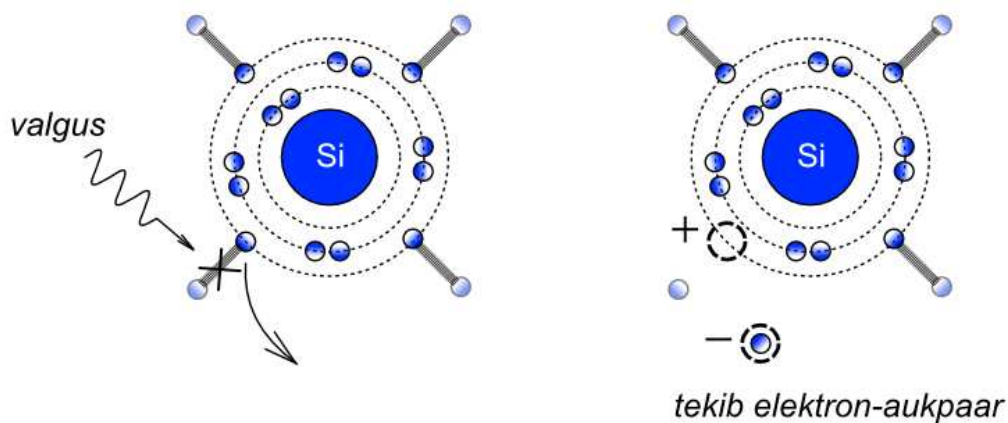
Fotogeneratsioon

Elektronidel on vastavalt oma energiatasemetele kindlad omavõnkesagedused. Elektroni võib "tõsta" suurema energiaga tasemele, kui teda võngutada "vahesagedusega". (Siin on siis tegemist analoogs nähtusega nagu raadios signaalide segustamisel)

Ränis on kovalentsete sidemete lõhkumiseks vajalik valguse võnkeagedus >270 THz, millele vastav lainepikkus õhus on $< 1,1 \mu\text{m}$.

Fotogeneratsiooni tulemusena tekivad vaba elektron ja auk, mis võivad siirduda kristallis mujale. Ruumlaengualas eraldab ruumlaenguväli elektronid ja augud ja neutraalses alas annavad nad oma energia alalisvooluna edasi mooduli väljundkontaktidele. Kui aga enne ruumlaengust välja jõudmist vaba elektron kohtab auku, toimub nende rekombinatsioon ja vaba elektroni energia muutub soojuseks.

räni fotoionisatsioon



Põhimõtteliselt on päikeseelement lihtsalt suure pindalaga pööjuhtdiod, mille *pn*-siirdele on kindlustatud valguse juurdepääs.

Päikesepaneeli tehnilised omadused

Kasutegur

η = (väljundklemmidelt saadav elektrienergia) : (paneelile langev valgusenergia)

Paneeli toodetava energia määra vähendavad:

- valguse peegeldumine välispinnalt ja kihtidevahelistelt pindadelt;
- pinna varjestamine elektrodide poolt;
- lühilainelise valguse neeldumine enne ruumlaengualasse jõudmist; pikalainelise valguse kulgemine läbi ruumlaenguala seal neeldumata (suurim energiakadu);
- genereeritud laengukandjate rekombinatsioon enne ruumlaengust välja jõudmist (väikseim monokristalses, suurim amorfses materjalis);
- oomilised kaod pooljuhtstruktuuris ja kontaktides;
- tööpunkti paiknemise mujal kui optimumis.

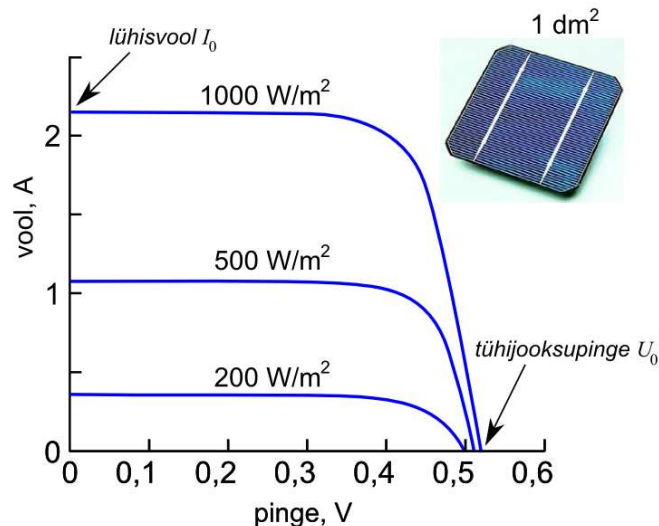
On teada mitmeid võimalusi, kuidas peegeldumiste mõju vähendada ja päikese energit laiemas spektridiapasoonis kasutada, kuid kõik need abinõud teevad toote keerulisemaks ja kallimaks.

Materjal	Kasutegur, parim tulemus laboris	Kommertsseadmete kasutegur	Suhteline hind 1 W kohta	Eluiga ($P = 80 \dots 85 \%$)
monokristalne räni	24 %	15...20 %	1	25...30 a.
polükristalne räni	18,6 %	13...15 %	1	25...30 a.
amorfne räni	13 %	5...7 %	0,95	< 20 a.
GaAs	41,1 %	...30 %	500...1500	> 20 a.

Amorfsetele elementidele on iseloomulik kiire algdegradeerumine esimese 1000 töötunni jooksul, mille järel kasutegur stabiliseerub. Enamik valmistajaid annab seetõttu tehnilistes andmetes nimivõimsuse peale sissetöötamisega. Uue paneeli võimsus võib seega olla suurem kui tehnilistes andmetes antud.

IU-tunnusjoon

1 dm² -suurusel moodulil sõltuvalt valgustatusest:

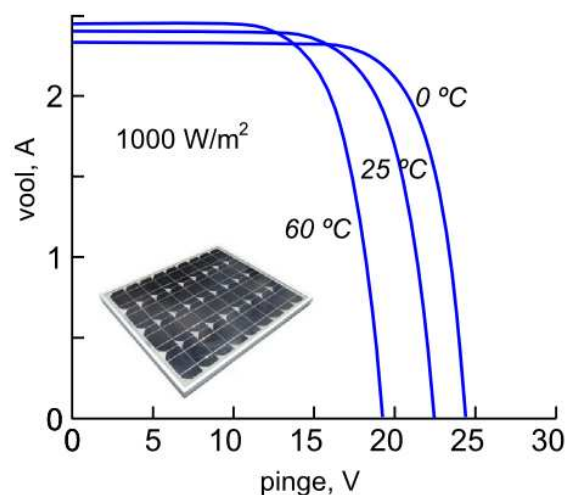
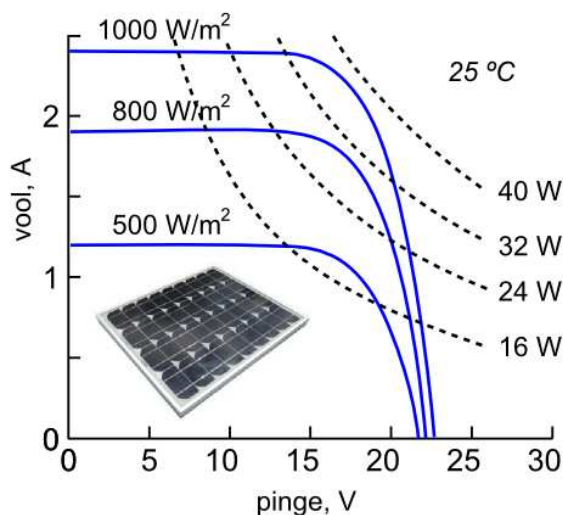


Lühisvool on määratud valguse võimsusega; tühijooksupinge difusioonipotentsiaaliga.

Päikeseelemendi pinge ei saa tõusta kõrgemale kui pinge ruumlaengul, sest siis ruumlaeng kaob ja fotogenereeritud laengute eraldumist enam ei toimu; kõik valguse poolt genereeritud laengud rekombineeruvad ja soojendavad materjali.

Päikesepaneeli märkimisväärne omadus on, et ta ei karda väljundi lühistamist.

Paneel koosneb hulgast jadamisi ühendatud moodulitest, nii et saada väljundpinge saavutaks 12 või 24 V. Selline paneel sobib hästi kokku autodes kasutatavate ja autos kasutamiseks mõeldud seadmetega – valgustite, raadiote, televiisorite, külmikute ja muudega.



Moduleid ja paneele iseloomustatakse peale tühijooksuvoolu ja tühijooksupinge veel "täiteteguriga", mis arvutatakse nii:

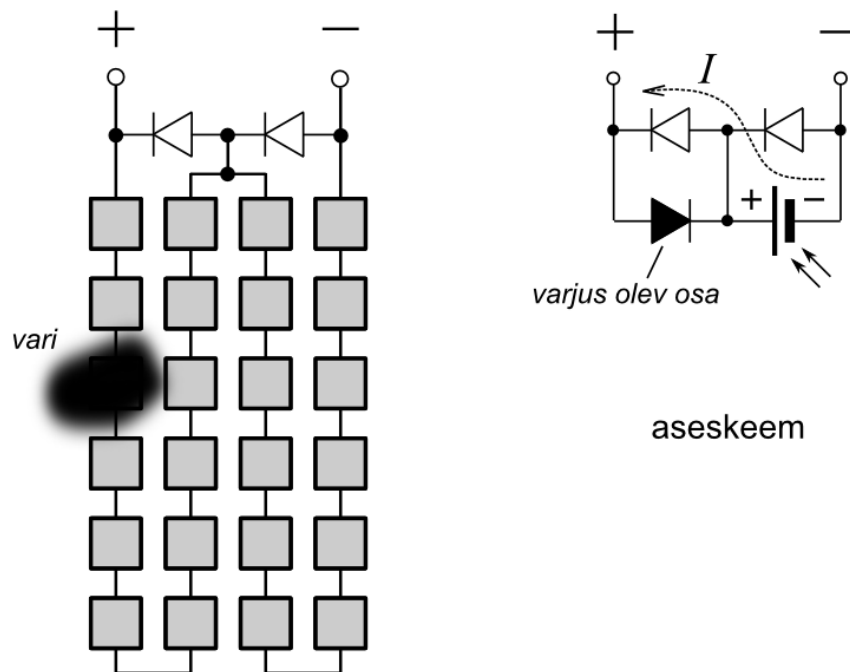
$$\text{täitetegur} = \frac{P_{maks}}{I_0 U_0}$$

Joonisel vasakul 1000 W/m² puhul on paneeli täitetegur siis $37/(2,4 \times 23) = 0,67$.

Kaitsedioidid

Ühendatakse üle moodulite rühmade; mitmepaneelilistes süsteemides ka üle iga paneeli.

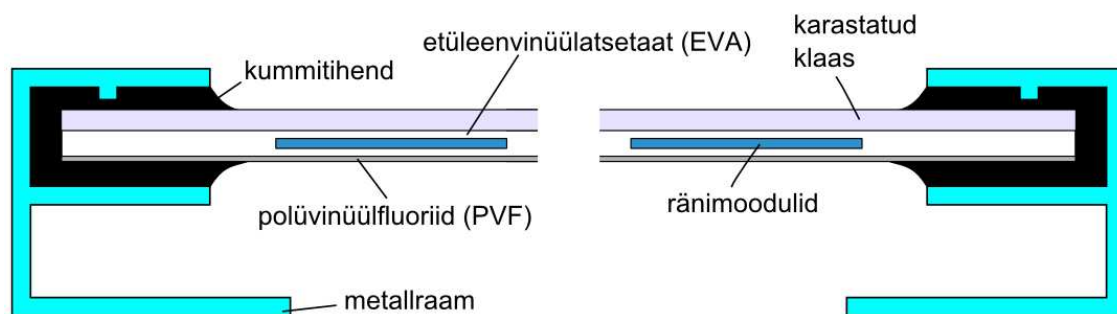
Kaitsedioidid on vajalikud sellepärast, et kui paneelile satub vari, siis pime osa kujutab endast tavalist vastupingestatud diodi, milles valgustatud osa pinge võib põhjustada läbilöögi juba 5-6 V juures. Kuna läbilöök toimub μm -suurusel alal, kuumutab see räni kiiresti sulamistemperatuurini.



Paneeli nimivõimsus: märgitakse reeglina Wp -ga (vatt-piik); see on paneeli toodetav elektriline võimsus 1000 W/m^2 -ses päikesekiirguses.

Kaitse ilmastiku ja mehaaniliste mõjude eest

Tüüpiline ehitus:

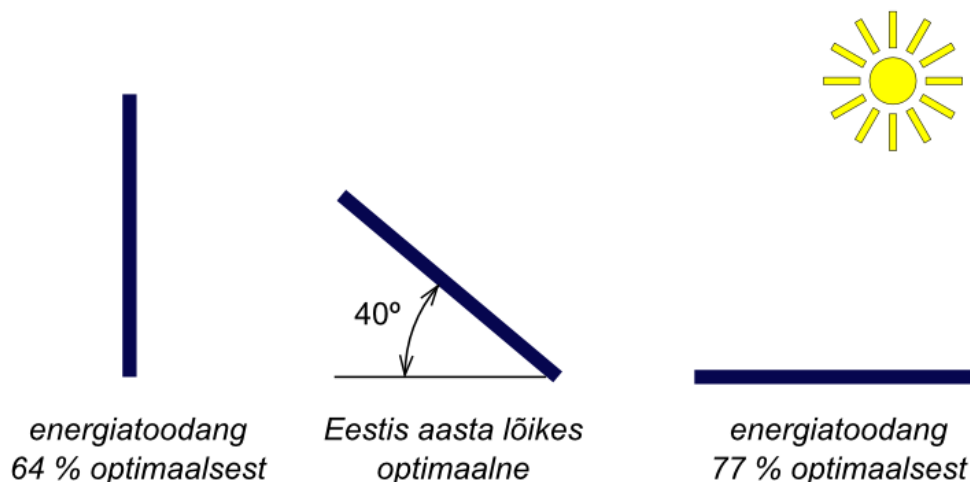


Paneel on ilmastikule (lumele, rahele jne.) sama vastupidav kui katuseaken. Välg siiski kahjustab.

Päikesekiirgus

Päikesepaneeli kasutaja seisukohast on päikesekiirgus iseloomustatud kiirguse suuna ja intensiivsusega. Suurim kiiritusvõimsus, $\sim 1000 \text{ W/m}^2$, esineb meie laiuskraadidel siis, kui päike paistab selgest taevast risti pinnale. 1 m^2 -suurune paneel, mille kasutegur on 20 %, toodab siis 200 W.

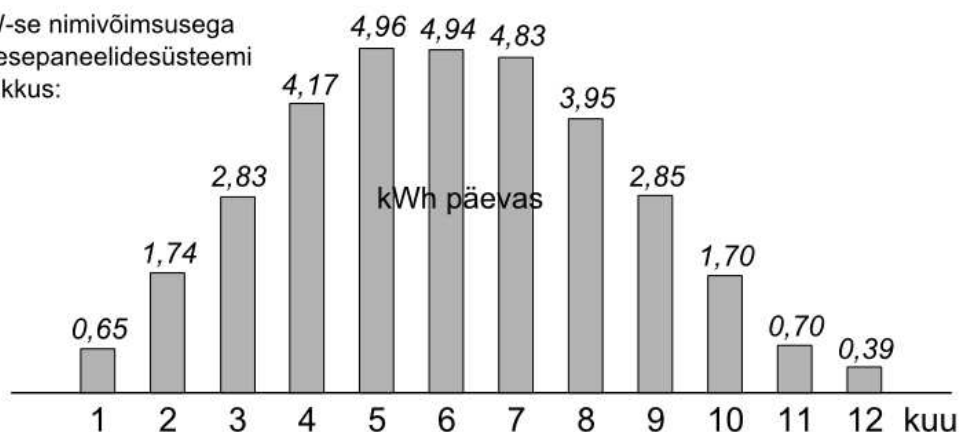
Kuna paneeli pidev keeramine otse vastu päikest on enamikel juhtudel välistatud, siis optimaalse lahendusena on soovitatav paneel asetada statsionaarselt suunaga lõunasse ja 40-kraadilise nurga alla maapinna suhtes.



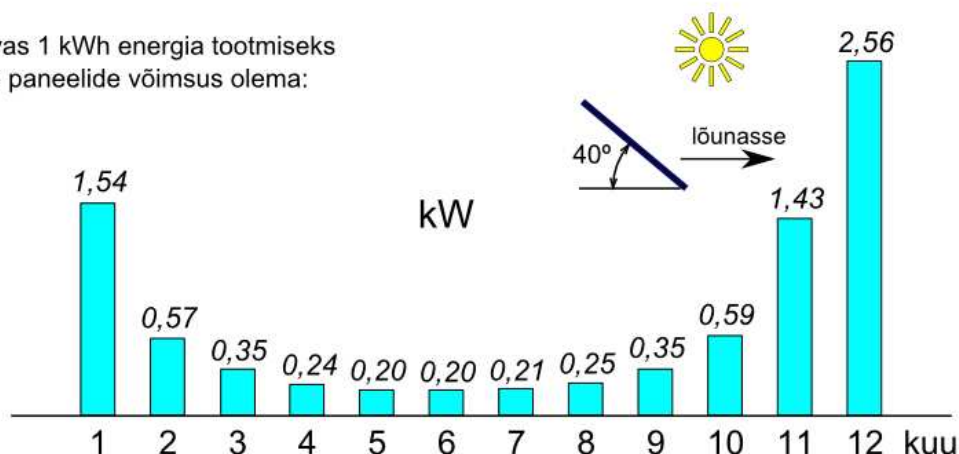
Kui paneeli kasutatakse vaid suvel, siis on optimaalne nurk 25° ; kui talvel, siis $70^\circ \dots 85^\circ$.

Päikesepaneelide kasutamist planeerides võib lähtuda järgmisest statistilistest andmetest:

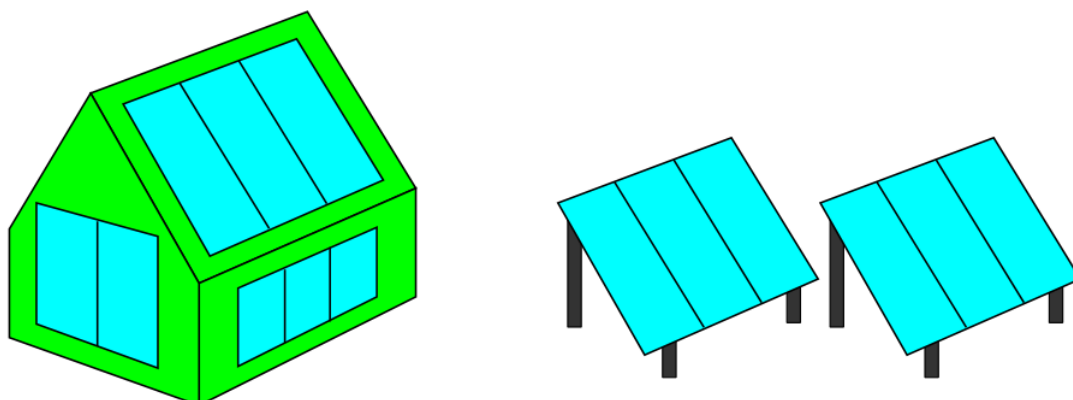
1 kW-se nimivõimsusega
päikesepaneelidesüsteemi
tootlikkus:



Päevas 1 kWh energia tootmiseks
peab paneelide võimsus olema:



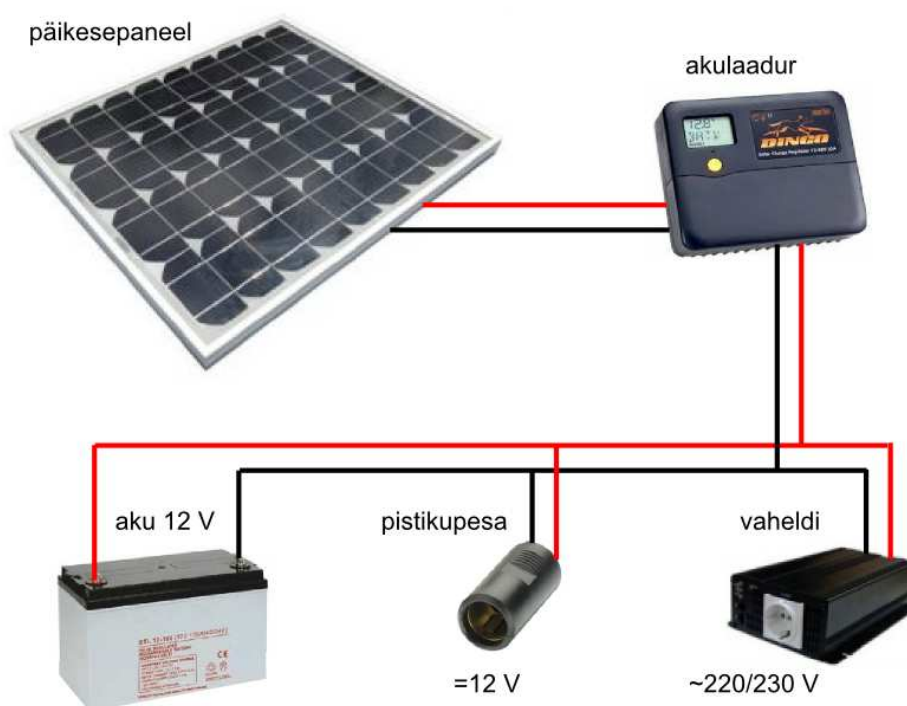
Päikesepaneeli paigutus



Koormus katusele

Päikesemoodulite kaal on umbes $10\ldots15 \text{ kg/m}^2$, paneeli kaal koos raamidega $15\ldots25 \text{ kg/m}^2$; kuid võttes arvesse ka kinnitused, võib kogu süsteem kaaluda $100\ldots150 \text{ kg/m}^2$, seega olla sama suur kui katusele lubatud lumekoormus.

Paneeli toodetud energia kasutamine



Akulaadur

Ülesanded:

- elektriline sobitus (paneeli pinge muutub olenevalt valgustatusest; aku pinge on aga ~püsiv);
- kaitseb akut ülelaadimise ja alatühjenemise eest, pikendades nii aku tööiga.

Hea akulaaduri omadused:

- * temperatuurikompensatsioon
- * hoiab ära aku alatühjenemise
- * kaitseb süsteemi komponentide väära polaarsusega ühendamise puhul
- * elektroonne lühiskaitse
- * dunaamiline ülelaadimiskaitse
- * võimalik koormust käsitsi lahti ühendada
- * graafiline staatusetabloo
- * väike omavõimsustarve
- * välistemperaturiandur
- * arvutiliides

Aku

Soodsaima hinnaga aku süsteemidele, mille võimsus on kümneid-sadu vatte, on plii-happeaku.

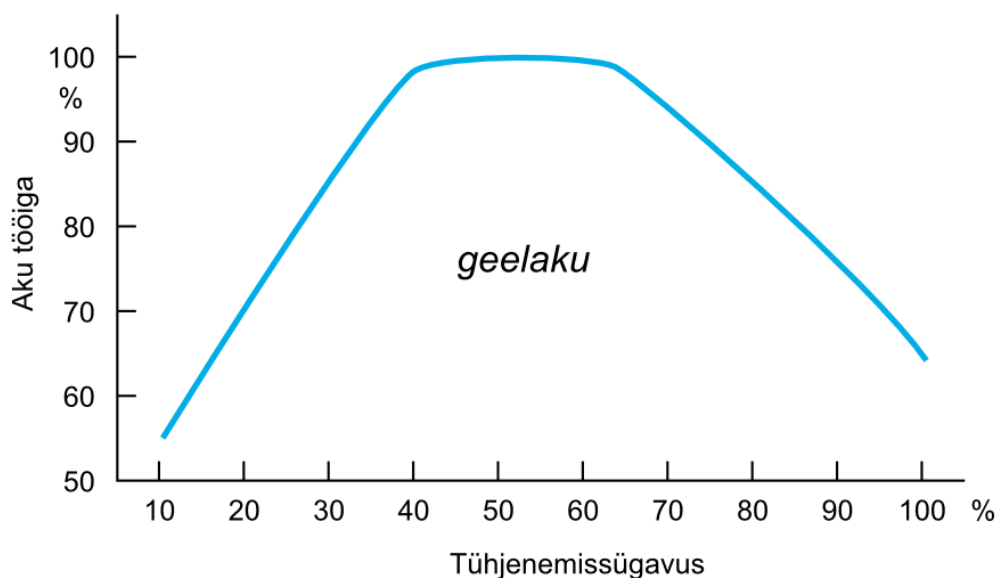
Happeakude tüüpe:

Aku tüüp	Hape	Geel	Vlies (AGM)	Happe-toruplaat	Geel-toruplaat
Keskmine tsüklite arv	500	700	800	2500	3500
Säilivusaeg (ilma kasutamata)	1...5 a.	1...7 a.	1...7 a.	3...15 a.	3...15 a.
Tühjenemispiir (0 % – tühi)	80...85 %	50...70 %	50...60 %	30...40 %	10...20 %
Külmataluvus		5 °C (mahtuvus 80 %)		–5 °C (mahtuvus 88 %)	–10 °C (mahtuvus 82 %)

Geelaku – hape paikneb ränihappegeelis ega saa nii voolata

Vlies (AGM) – hape on immutatud klaaskiudmattidesse

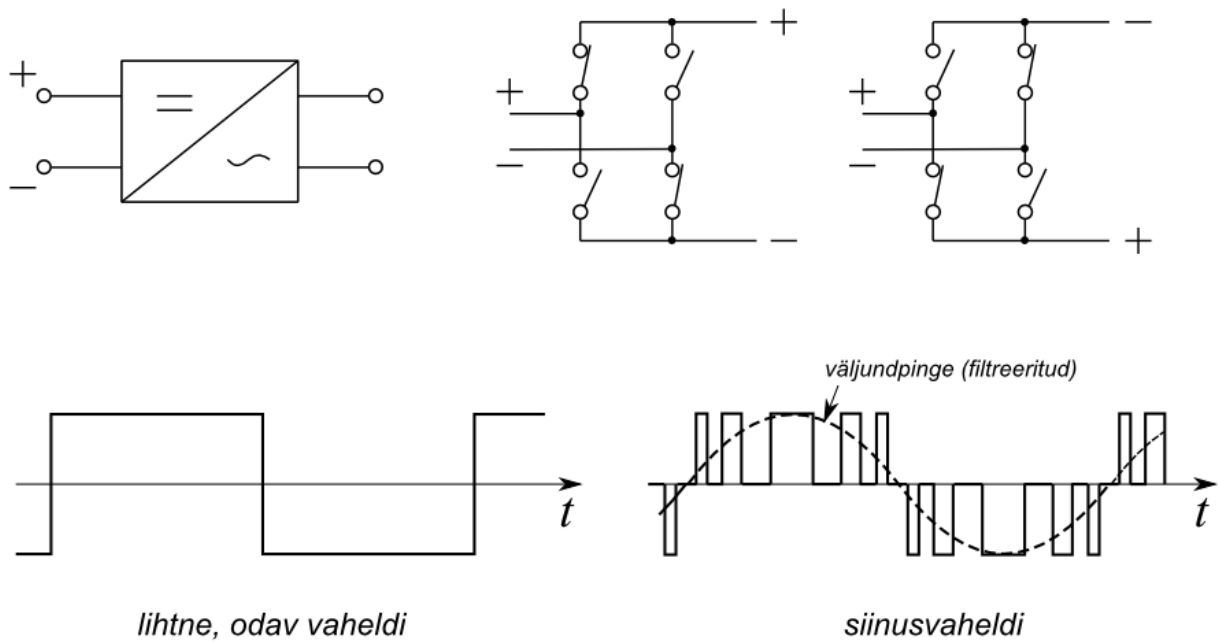
Toruplaatakid – aktiivmaterjal paikneb pliivardaid ümbritsevates torudes; torud on paigutatud plaatidena



Happeakudest, ka suletutest, eraldub alati mingil määral vesinikku, sellepärast on soovitatav paigutada akud tuulduvasse ruumi. Ruumi temperatuur ei peaks ületama 35 °C.

Vaheldi (inverter)

Seade, mis muudab alalisvoolu vahelduvvooluks



Skeemitähis ja tööpõhimõte

Juhtmed, liitmikud, lülitid, releed

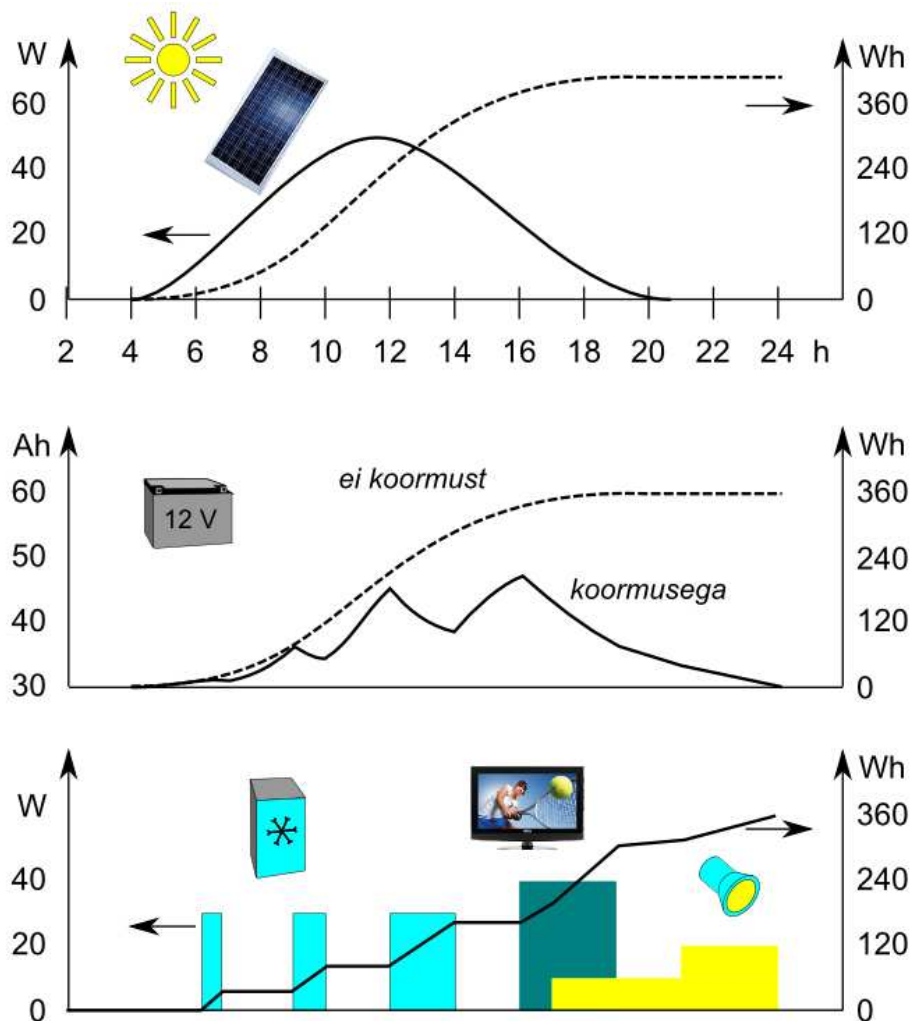
12/24 V -süsteemides sobivad auto omad (pinged väikesed; voolud suured). Alalisvoolu tõttu esineb 50 Hz -süsteemidega võrreldes suurem elektrikaare tekkimise oht avanevate kontaktide vahel.

Kaabli valik tingimusest, et pingelang sellel ei ületa 0,5 V:

Kaabel	Koormusvool								
	1 A	2 A	3 A	4 A	5 A	8 A	10 A	15 A	20 A
2×1,5 mm ²	24 m	12 m	8 m	6 m	5 m	3 m	2,5 m	1,6 m	1,2 m
2×2,5 mm ²	40 m	20 m	13 m	10 m	8 m	5 m	4 m	3 m	2 m
2×4 mm ²	60 m	30 m	20 m	15 m	12 m	7 m	6 m	4 m	3 m
2×6 mm ²	96 m	48 m	32 m	24 m	20 m	12 m	10 m	7 m	5 m
2×10 mm ²	160 m	80 m	53 m	40 m	32 m	20 m	16 m	12 m	8 m
2×16 mm ²	240 m	120 m	80 m	60 m	48 m	28 m	24 m	16 m	12 m

Süsteemi dimensioneerimine

Selgel suvepäeval näeks olukord süsteemis välja umbes nii:



Süsteemi dimensioneerimine algab majapidamise energiakulu väljaselgitamisest. Esitame siin arvutusnäite.

Tarbija	Võimsus	Kasutusaeg ööpäevas	Energia ööpäevas
külmkapp	30 W	8 h	240 Wh
valgustid	10 W	5 h	50 Wh
televiisor	40 W	3 h	120 Wh
raadio	10 W	2 h	20 Wh
veepump	60 W	0,5 h	30 Wh
seinakell	1,5 W	24 h	36 Wh
		kokku:	496 Wh

Elektritarbijate võimsus on tavaliselt neile peale märgitud, või selle leiab kaasaantud tehnilistest andmetest.

Akuga süsteemi summaarne kasutegur on 60-70 % (arvestab kadusid akulaaduris, juhtmetes, kontaktides jm.); seega päikesepaneelilt on vaja saada energiat

$$496 : 0,65 = 763 \text{ Wh päevas}$$

Eelpool olevalt graafikust: Eestis juunikuus toodab 1 kW-ne, 40° all lõunasse suunatud paneel keskmiselt 4940 Wh päevas. Seega vajatakse paneeli/paneele võimsusega vähemalt

$$763 : 4940 = 0,154 \text{ kW} = 154 \text{ W}$$

Kuna kasutatakse paneeliruutmeetri keskmist tootlikkust; ei garanteeri 154 W veel kõigi loetletud tarbijate varustamist elektrienergiaga iga päev.

Aku mahtuvus:

Oletame lihtsuse mõttes pessimistlikult, et aku peab salvestama kogu ööpäevas tarbitava energia (et tarbimine toimub vaid pimedal ajal).

Kui aku pingeline on 12 V, siis vastav akus salvestatud laeng on:

$$763 : 12 = 63,6 \text{ Ah}$$

Eeldusel, et kasutusel on geelaku, mille võib tühjendada 50 %-ni, peab aku nimimahtuvus olema vähemalt

$$63,6 : 0,5 = 127 \text{ Ah}$$

Kasutaja võib nende arvutuste põhjal leida, et süsteem läheb liiga kalliks, ja otsustab elektritarbimist vähendada. Sellisel juhul võib ta korrata sama arvutuskäiku uute lähteandmetega. Hõlpsaimalt läheb see, kui arvutuskäik on sisse programmeeritud mingisse tabelarvutussüsteemi (näit. Excelisse).

Oletame, et saadud arvutustulemuste põhjal kasutaja valis 120 W-se koguvõimsusega monokristalsed paneelid ja 200 Ah-se koguvõimsusega akud.

Paneeli voolu leiame jagades paneelide koguvõimsuse aku pingega:

$$120 : 12 = 10 \text{ A}$$

Paneel–akulaadur–aku -vaheliste kaablite soonte ristlõikepindala võtame eelpool toodud tabelist:

Olgu kaablite kogupikkus 10 m, siis vajatakse 2×6 mm² -kaablit.