

Sisukord

Õpiku lugejale	7
Sissejuhatus	8
ALALISVOOL	
1.1. Elektrivoolu tekkemehhanism.....	10
1.2. Ohmi seadus	12
1.3. Elektrimõõtmised.....	14
1.4. Takistuse sõltuvus temperatuurist.....	16
1.5. Elektromotoorjõud.	18
ELEKTRIVOOL KESKKONDADES	
2.1. Elektrivool vedelikes	20
2.2. Elektrivool gaasis.....	22
2.3. Pooljuhtide elektrijuhtivus	24
2.4. p-n siire, pooljuhtdiod	26
2.5. Elektrist valgus ja valgusest elekter	28
VAHELDUVVOOL	
3.1. Vahelduvvoolu genereerimine	30
3.2. Voolutugevuse, pinge ja võimsuse efektiivväärtused	32
3.3. Trafo. Elektrienergia ülekanne	34
3.4. Elektrimootor. Elektriõhutusest.....	36
MOLEKULIDE SOOJUSLIIKUMINE	
4.1. Temperatuur	38
4.2. Ideaalne gaas	40
4.3. Ideaalse gaasi olekuvõrrand.....	42
4.4. Isoprotsessid	44
4.5. Siseenergia ja selle muutumisviisid.....	46

TERMODÜNAAMIKA

5.1. Gaasi töö. Soojushulk	48
5.2. Termodünaamika seadused	50
5.3. Entroopia	52
5.4. Soojusmasin.....	54
5.5. Sisepõlemismootor.....	56
5.6. Auruturbiin ja külmik	58

LISAD JA TÄIENDUSED

Lisa 1.1. Elektrivoolu tekkemehhanism.....	61
Lisa 1.2. Ohmi seadus	62
Lisa 1.3. Elektrimõõtmised.....	64
Lisa 1.4. Takistuse sõltuvus temperatuurist.....	65
Lisa 1.5. Elektromotoorjõud. Ohmi seadus kogu vooluringi kohta	66
Lisa 2.1. Elektrivool vedelikes	68
Lisa 2.2. Elektrivool gaasis	70
Lisa 2.3. Termistor ja fototakisti	71
Lisa 2.4. p-n siire, pooljuhtdiod	72
Lisa 2.5. Elektrist valgus ja valgusest elekter	74
Lisa 3.1. Vahelduvvoolu genereerimine	76
Lisa 3.2. Voolutugevuse, pinge ja võimsuse efektiivväärtused	77
Lisa 3.3. Trafo. Elektrienergia ülekanne	79
Lisa 3.4. Elektrimootor. Elektriõhutusest	81
Lisa 4.1. Temperatuur.....	83
Lisa 4.2. Ideaalne gaas	84
Lisa 4.3. Ideaalse gaasi olekuvõrrand	86
Lisa 4.4. Isoprotsessid	87
Lisa 4.5. Siseenergia ja selle muutumisviisid.....	88
Lisa 5.1. Gaasi töö ja soojushulk	89
Lisa 5.2. Termodünaamika seadused	91
Lisa 5.3. Entroopia	92
Lisa 5.4. Soojusmasin	94
Lisa 5.5. Sisepõlemismootor.....	95
Lisa 5.6. Auruturbiin ja külmik	96

Raudvara.....	98
Indeks	104

2.2 Elektrivool gaasis

Kõrgepingeliine ei kaeta isoleeriva kihiga, sest õhk on tavaloludes isolatoor. Ent kui isoleerimata juhtmed piisavalt lähestikku viia, tekib nende vahel elektriline läbilöök. Püüame uurida, millistel tingimustel elektrivool gaasis tekib. Anname hõõrdumisega elektriseeritud eboniitpulgaga elektroskoobile laengu. Laengu saavad ka elektroskoobiga ühendatud metallist plaadid – katood ja anood. Näeme, et laeng võib püsida küllaltki kaua. Viies plaatide vahele leegi, märkame laengu kahanemist (joonis 1.9. a), aga leegi eemaldamisel laengu kahanemine jälle seiskub.

Õhus vabad laengukandjad praktiliselt puuduvad. Kuid leegilt saadud energia arvelt toimub elektronide vabanemine õhus olevatest neutraalsetest gaasi molekulidest. Tekivad vabad elektronid ja positiivselt laetud ioonid ja seda nähtust nimetatakse **ionisatsiooniks**. Plaatidevaheline elektrivälja paneb elektronid ja ioonid vastassuunaliselt liikuma ning vähendab laengut ja osuti hälvet. Leegi kustutamisel hakkavad elektronid ja positiivsed ioonid plaatide vahel uuesti neutraalseteks molekulideks ühinema – **rekombinatsioon** – ja gaas muutub jällegi isolatooriks.

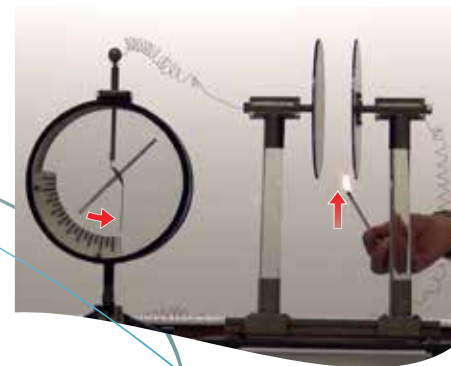
Neutraalse molekuli võib ioniseerida ka sellega pörkav elektriväljas piisavalt suure kineetilise energiani kiirendatud elektron (joonis 1.9. b). Nähtust nimetatakse **pörkeionisatsiooniks** ja selle tekkimiseks peab elektroni energia olema vähemalt võrdne elektroni väljumistööga gaasi molekulist.

$$E_k = \frac{m_e v^2}{2} \geq A$$

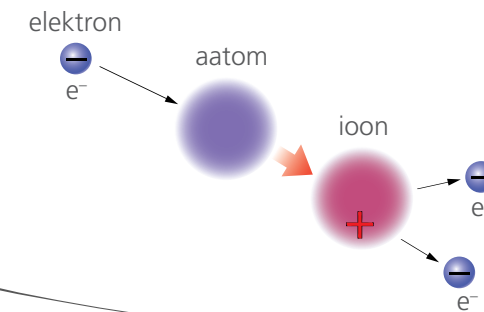
Joonisel 1.10. on esitatud voolutugevuse sõltuvus pingest gaasis. Graafiku algus on sarnane metalliga, kuid teatavast pingest alates voolutugevus enam ei kasva. Seda voolu nimetatakse **küllastusvooluks** I_k ja põhjuseks on asjaolu, et kõik ajaühikus tekkinud vabad laengukandjad jõuavad elektroodidele. Pinge edasisel suurenemisel tekib pörkeionisatsioon ja voolutugevus kasvab järsult.

Elektroni energiat saab suurendada elektrivälja tugevdamise või gaasi hõrendamisega. Hõrendamine suurendab elektroni vaba tee pikkust ja aega järgmise pörkeni. Sellisel juhul saab elektron koguda pörkeionisatsiooniks vajalikku energiat.

Elektrivoolu gaasis nimetatakse **gaaslahenduseks**, mis jaotatakse **sõltuvaks** ja **sõltumatuks** lahenduseks. Eeltoodud katses sõltus lahendus leegist, kõrvalisest ioniseerivast energiaallikast. Ionisatsiooni tekitajaks võib olla ka valgus ja radioaktiivne kiirgus. Üks viis mõõta radioaktiivset kiirgust on loendada kiirguse poolt gaasis põhjustatud vooluimpulsse. Pärast pörkeionisatsiooni on tegemist juba sõltumatu gaaslahendusega, sest vabad laengukandjad tekitatakse elektriväljas saadud energia arvelt.



Joonis 1.9. a)



Joonis 1.9. b)

ülesanded

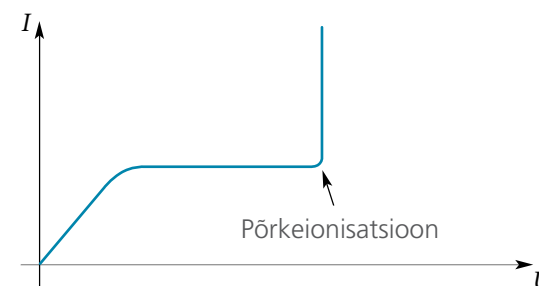
1. Metallplaatide vahel on elektrivälja tugevus 2850 V/m ja plaatidevaheline kaugus on 10 cm. Arvuta pinge plaatide vahel. Kui suure töö teeb elektrivälja elektroni viimisel ühelt plaadilt teisele?
2. Üks elektronvolt (eV) on energia, mille saab elektron läbides elektriväljas punktide, mille vaheline pinge on üks volt. Teisenda elektronvolt SI energiaühikuks džaul. Kui kiiresti liigub elektron, mille kineetiline energia on 1 eV?

küsimused

Miks tekib elektrivool hõrendatud gaasis madalamal pingel?

Miks vaakum tavatingimustes elektrit ei juhi, ehkki vaakumit võib vaadelda kui tugevasti hõrendatud gaasi?

Vaata ka lisamaterjali lk 70.



Joonis 1.10. Gaasi pinge-voolu tunnusjoon

2.3 Pooljuhtide elektrijuhtivus

Pooljuhid on kaasaegse elektroonika kõige olulisemaks lähtematerjaliks. Neist valmistatakse transistore, diode ja teisi pooljuhtseadeldisi.

Kõige olulisem pooljuhi omadus on eritakistus, mis sõltub tugevalt lisanditest ning on kergesti mõjutatav väliste energiaallikatega. Kõrgem temperatuur, valgustatus ja lisandid parandavad oluliselt pooljuhi juhtivusomadusi. Olulisteks pooljuhtmaterjalideks on räni ja germaanium, mis paiknevad elementide perioodilisuse süsteemis 14. ehk IVA rühmas. Nende aatomite väliskihis on 4 elektroni ja nad on omavahel seotud kovalentsete sidemetega (joonis 1.11. a).

Madalatel temperatuuridel on sidemed tugevad ja pooljuht käitub isolatorina. Kõrgemal temperatuuril räni aatomiga nõrgalt seotud elektronid vabanevad. Struktuurist lahkunud elektronide asemele jäävad nn augud (joonis 1.11. b), mida võime vaadelda positiivsete laengutena. Pooljuhti on tekkinud **elektron-auk paarid**.

Rakendades pooljuhile elektrivälja, hakkavad vabanenud elektronid liikuma. Positiivse laenguga auk tõmbab enda kohale kõrvalaatomis elektroni, tekitades omakorda kõrvalaatomis augu. **Elektrivool pooljuhis on vabade elektronide ja aukude suunatud liikumine**. Sellist puhaste pooljuhtide juhtivust, kus vastassuunas liigub sama hulk elektrone ja auke, nimetatakse **omajuhtivuseks**. Nähtust rakendatakse termo- või fototakistis, mida omakorda saab kasutada temperatuuri ja valgustatuse elektrilisel registreerimisel.

Viies pooljuhti sobivaid lisandiaatomeid, saab tekitada **lisandjuhtivuse**. Kui neljavalentsele ränille lisada pisut viievalentset lisandit, näiteks fosforit (joonis 1.12. a), siis jääb räniaatomitest ümbritsetud fosforil üks elektron üle, sest talle ei leidu struktuuris kindlat kohta.

Iga lisandiaatomi kohta jääb vabaks üks elektron, mis hakkab elektrivälja rakendamisel pooljuhis triivima. Sellises pooljuhis on põhilisteks laengukandjateks elektronid ja vastavat juhtivust nimetatakse laengukandjate negatiivse laengu tõttu **n-juhtivuseks**. Sünonüümideks on ka elektronjuhtivus ja doonorjuhtivus.

Lisades neljavalentsele põhiale kolmevalentset lisandit (joonis 1.12. b), näiteks ränile boori, jääb räniaatomil booriga üks side moodustamata ja tekib auk. Vastavat juhtivust nimetatakse **p-juhtivuseks**, millel on veel samatähenduslikeks terminiteks auk- ja akseptorjuhtivus.

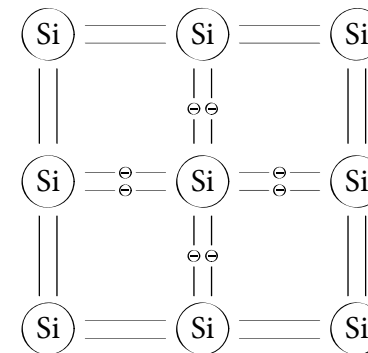
Koos lisandjuhtivusega kaasneb alati ka omajuhtivus, mida püütakse üldjuhul võimalikult vähendada. **Enamuslaengukandjateks on n-juhtivuse korral elektronid ja p-juhtivuse korral augud**. Pooljuhtide elektrijuhtivus on seotud oluliselt ainete kristallstruktuuriga ja seetõttu pooljuhtseadiste tehnoloogia algab eriti puhaste ainete saamisest.

ülesanne

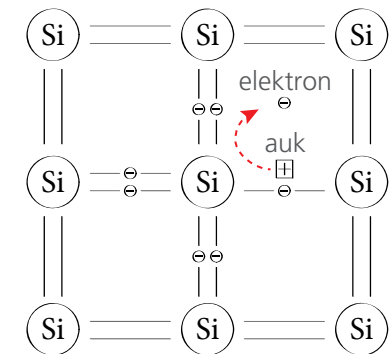
1. Kui palju vabu elektrone tekib pooljuhis juurde, kui ränile lisada 1 mikrogramm fosforit?

Omajuhtivuse korral on vabadeks laengukandjateks elektronid ja augud. Kumba arv on suurem?

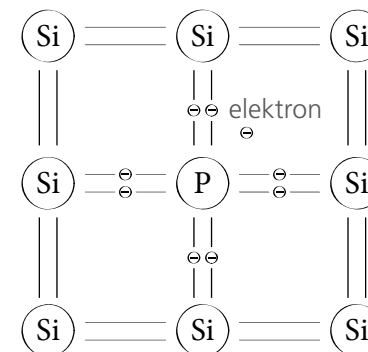
Vaata ka lisamaterjali lk 71.



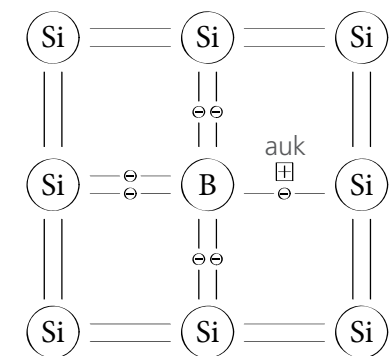
Joonis 1.11. a)



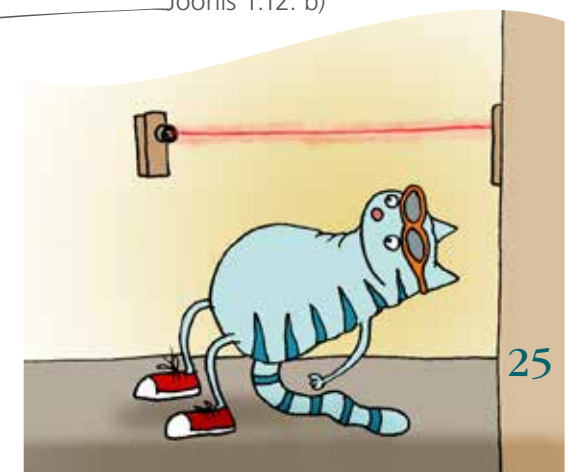
Joonis 1.11. b)



Joonis 1.12. a)



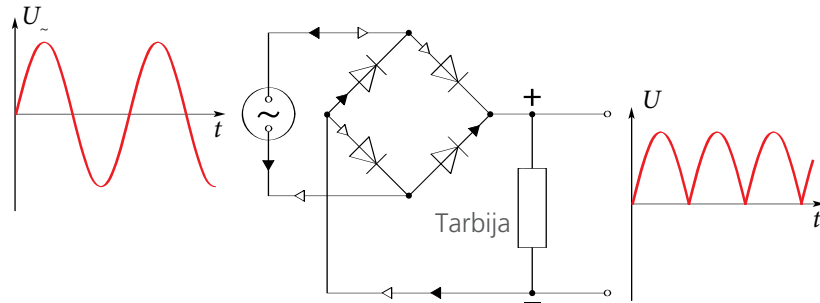
Joonis 1.12. b)



Lisa 2.4. p-n siire, pooljuhtdiodid lk 26

Alaldi

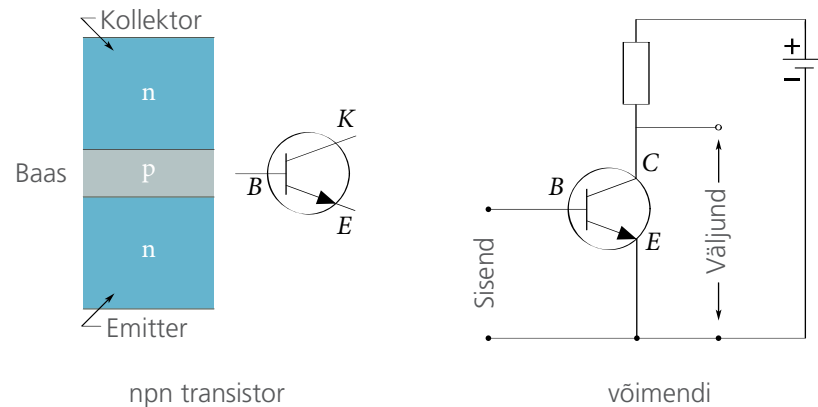
Elektrivõrgus on vahelduvvool, mille suurus ja suund perioodiliselt muutuvad. Paljud elektriseadmed või nende komponendid vajavad alalisvoolu. Seetõttu tuleb vahelduvvoolu **alaldada**, st muuta alalisvooluks. Vastavas seadises, **alaldis**, kasutatakse pooljuhtdiodide vastavalt järgnevale skeemile.



Joonise vasakul pool on alaldile rakendatud vahelduvpinge U_{\sim} . Alaldi koosneb neljast pooljuhtdiodist. Olenemata voolu suunast sisendis, läbib tarbijaks olevat takistit ühesuunaline vool. Pulseeriva pinge saab vajadusel pooli ja kondensaatoriga muuta alalispingeks.

Transistor

Transistor on pooljuhtseadis, mille abil saab elektrisignaali võimendada, lülitada, tekitada ja muundada. Transistor koosneb kolmest eri juhtivusega piirkonnast, millest keskmine on baas ning äärmised emitter ja kollektor (all vasakpoolne joonis). Seega on transistoris kaks p-n siiret.

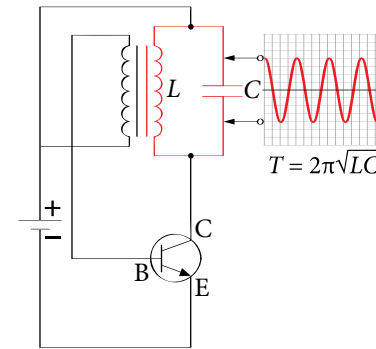


Kui emitteriks on n juhtivusega pooljuht, siis transistori tüübiks on npn. Vaatame sellist transistorit ühise emitteriga lülituses (eelnev parempoolne joonis), mis on sobiv elektrisignaali võimendamiseks. Emmitteri piirkonnas on tunduvalt rohkem lisandiatomeid, antud juhul ka vabu elektrone. Esimest siiret läbib elektronide pärivool. Baas on õhuke ja temas jõuab rekombineeruda väga väike arv elektronidest. Peamine osa suundub läbi teise siirde kollektorisse. Baasivoolu väikene muutus põhjustab kollektorvoolu suuri muutusi, millel põhinebki transistori võimendusefekt. Elektroonikas kasutatakse erinevat tüüpi transistore ja ühendusi.

Kõrgsagedusvõnkumise generaator

Madalsagedusliku vahelduvvoolu tekitamiseks paneb turbiin generaatori pöörlema. Kõrgemate sageduste jaoks ei saa kasutada mehaanilist meetodit, vaid poolist ja kondensaatorist koosnevat **võnkeringi**, kus võnguvad väikese massi ja inertsiiga elektronid. Võnkeringis toimuva elektromagnetvõnkumise perioodi valemist on näha, et kõrgsagedusvõnkumise saamiseks peavad võnkeringi induktiivsus ja mahtuvus olema väikesed.

$$T = 2\pi\sqrt{LC}$$



Selleks, et võnkumised ei sumbuks, peab võnkeringi õigel ajal energiat lisama. Seda saab teha nn **tagasiside** kaudu. Järgneval joonisel on kujutatud kõrgsagedusvõnkumise generaatori põhimõtteskeem, kus võnkeringi pool L indutseerib teises tema lähedal asuvas poolis induktsoonivoolu. See vool on ka transistori avav baasivool, mille tulemusel saab võnkering vooluallikast õigel ajal energiat juurde. Antud juhul on tegemist induktiivse tagasisidega.

Kondensaatori klemmidelt saame sumbumatu elektromagnetvõnkumise, mille sagedus sõltub pooli induktiivsusest ja kondensaatori mahtuvusest. Selline generaator on oluline raadiosides elektromagnetlainete tekitamisel.

Ajaloost

*Esimesed pooljuhtdiodid võeti kasutusele 20. sajandi algul raadiovastuvõtjas detektorina. Oluliseks murranguks elektroonikas kujunes sama sajandi keskpaigas leiutatud kolme elektroodiga pooljuhtseadis transistor, mille eest sai John Bardeen 1956. aastal Nobeli füüsikapreemia. Järgmine oluline muutus oli paljude pooljuhtseadiste, takistite, kondensaatorite jm tihed integreerimine ühisele õhukesele räniplaadile. Nii saadi **kiip** ehk **integraallülitus**, kus ühel ruutmillimeetril võib paikneda mitu miljonit transistori. Kiipide kasutamine tavalistes elektroonikaseadmetes (arvuti, mobiiltelefon jms) sai võimalikuks nende tootmise madala hinna, vastupidavuse, vähese energiatarbimise ja signaalide ülikiiire vahetamise tõttu. Esimese teadaoleva kiibi valmistas 1958. aastal Jack St. Clair Kilby, kes sai selle eest 2000. aastal Nobeli füüsikapreemia.*

Probleem

1. Mida võiks öelda tõkkekihi paksuse kohta pooljuhtdiodis päri- ja vastupinge korral?
2. Mille arvel toimub transistoris elektrisignaali võimendamine?

Kokkuvõte

Pooljuhtdiodis on p-n siire, mille põhiomaduseks on juhtida elektrivoolu ühes suunas.

Transistor on pooljuhtseadis, mille abil saab tekitada, lülitada, võimendada ja muundada elektrisignaali (voolu).

Lisa 2.5. Elektrist valgus ja valgusest elekter lk 28

Digikaameras kasutatakse fotoraku omadust muuta valguskiirgus elektrienergiaks. Kaameras tekitatakse objektiiviga kujutis fotorakkude ridadest ja veergudest moodustatud pildisensorile. Fotorakul tekki laeng on võrdeline pealelangeva valguse energiaga. CCD pildisensoris nihutatakse laengupakette samm-sammult pildielemente mööda iga rea lõppu ja sealt võimendi ja muunduri kaudu töötlemiseks pildiprotsessorisse. Fotorakud reageerivad üksnes kujutise intensiivsusele. Värvilise kujutise saamine põhineb **RGB-värvimudelil**: kolme värvusega – punane (R *red*), roheline (G *green*), sinine (B *blue*) – kiirguste eri annustes liitmisel on võimalik saada kõik värvused. Seega peavad sensori väljundisse jõudma nende kolme põhivärvuse infot esitavad signaalid. Objektiivist saabuvast valgusest põhivärvuste eraldamiseks võib kasutada fotorakkude ette asetatud filtreid. Inimsilm tajub kõige paremini rohelist valgust, seepärast on pooltel elementidel rohelised filtrid, teistel vaheldumisi punased ja sinised. Niisuguse filtriga sensorit nimetatakse **Bayeri sensoriks**. Iga pildielemendi kohta registreerib pildiprotsessor üheaegselt kolme põhivärvuse väärtused: üheks värvuseks on piksli filtri värvus, kahe ülejäänud värvuse väärtused arvutab protsessor, hinnates infot naaberpikslite rühma kohta. Sellisel salvestatud pildi eeliseks võrreldes traditsioonilise fotoga on lihtne pilditöötlus ja väike ruuminõudlus.

Päikesepatarei ehk päikesepaneel koosneb samuti suurest hulgast fotorakkudest, mis on ühendatud omavahel patareiks. Pooljuhtmaterjalina kasutatakse peamiselt räni. Selliste paneelide kasutegur on 15–20%. Päikeseenergiast elektri tootmisega tegeldakse kõige intensiivsemalt Euroopas, USA-s, Indias ja Hiinas. Kalifornia osariigis asuva suurima päikesepaneelidel töötava elektrijaama võimsus ületas 2014. aasta juunis 500 MW. Eestis Võrumaal Kurenurme külas valmis 2013. aastal 100 kW võimsusega suunatavate paneelidega elektrijaam, kuid laharvamuste tõttu võrguettevõttega pole see elektrivõrguga veel ühendatud. Eesti oludes on novembrist kuni märtsini päikesekiirguse intensiivsus nõrk, kuid päikesepatareide kasuteguri paranedes ja hinna alanedes võib osutada elektrienergia tootmine kirjeldatud moel kasulikuks ka meil. Päikeseenergia on kõige puhtam energia. Saastamine toimub siiski päikesepaneelide ja muu elektrijaama jaoks vajaliku materjali tootmisel. Ka vanade paneelide taaskasutus on võimalik.

Ajaloost

Valgustitest

Kui inimene võttis kasutusele tule, sobis see nii valgustamiseks, toidu valmistamiseks kui ka kiskjate peletamiseks. Hiljem võeti kasutusele küünlad, õli-, petrooleum- ja gaasilambid. Elektri abil valgustamine algas kaarlambiga. Hiljem lisandusid söest ja metallist hõõgniitidega lambid. Hõõgniit peab taluma kõrget temperatuuri, sest nähtava valguse tekitamiseks peab tõusma niidi temperatuur üle 500 °C. Päikesevalgusele vastab temperatuur 5800 °C. Hõõglampide niidid valmistatakse tavaliselt kõrge sulamis-

temperatuuriga volframist. Hõõglampide kasutegur on mõni protsent ja seepärast võeti ajapikku tarvitusele paremad luminofoorlampid, hiljem kompaktluminofoorlampid ehk säästulambid. Praegu toimub LED-lampide intensiivne arendamine, mille tõttu on paranenud tehnilised näitajad ja vähenenud hind.

Fotograafia

Juba antiikajal tunti camera obscurat, mille abil sai pimedas ruumis seinale väike ava abil tekitada väljaspool kambrit asuvast esemest kujutise. J. N. Niépce ühendas camera obscura valgustundliku paberiga ja tal õnnestus 1816. aastal jäädvustada esimene foto. Hiljem asetati avasse lääts ja katsetuste põhjal leiti kõige sobivamaks fotomaterjaliks hõbedaühendid. 19. sajandi viimasel veerandil töötati välja nn klassikaline tehnoloogia, mida kasutatakse siiani. Pildistamisel tekitatakse valgustundlikule materjalile varjatud kujutis, mis pärast keemilist töötlemist – ilmutamist – muutub nähtavaks fotonegatiiviks. Negatiiv kinnistatakse keemiliselt. Pärast negatiivi läbivalgustamist – kopeerimist – ja teistkordset ilmutamist saame tegelikusele vastava positiivi. Selline protsess on küllaltki töömahukas, eriti siis, kui on tegemist värvifotoga.

Aastal 1975 leiutas Steven Sasson esimese digikaamera, kus kasutas Willard Serling Boyle'i ja George Elwood Smith'i 1969. aastal leiutatud CCD sensorit. Täielik läbimurre tuli 21. sajandi alguses, sest digikaamera hind pole enam kuigi kõrge ja pildistamine ja pilditöötlus arvutis ei nõua erilist ettevalmistust. Esimene kaameratelefon tuli turule Jaapanis aastal 2000. Boyle ja Smith said 2009. aastal CCD sensori leiutamise eest Nobeli füüsikapreemia.

Päikesepatarei

1954. aastal valmistati Ameerika Ühendriikides esimene pooljuhtpäikesepatarei kosmoselaeva jaoks. Selle maksumuseks arvatati 286 dollarit võimsusühiku vati kohta ja kasuteguriks 4%. Esimesed võrku energiat andvad päikeseelektrijaamad ehitati USA-s 1980ndatel. 20. sajandi lõpus odavnesid päikesepaneelid sedavõrd, et jaamade rajamine muutus majanduslikult otstarbekaks. Aastal 2006 valmis Saksamaal Pockingis suurem päikeseelektrijaam võimsusega 10 MW.

Valgusdiodid

Esimese, punast valgust kiirgava valgusdiodi konstrueeris Nick Holonyak aastal 1962. Selle valgus oli nõrk ja punaseid LEDe kasutati indikaatoritena mõõteriistade tabloodes. Robkem kui kümme aastat hiljem leiutati kollast valgust kiirgavad diodid. Alles 1990ndatel jõudis Shuji Nakamura (Nobeli aubind 2014) sinise LEDi valmistamiseni. Erinevad värvused olid vajalikud valget päevavalgust kiirgavate valgusdiodide saamiseks. Viimastel aastatel on valge valgusega diodid kasutuses autolaternates, taskulampides, jalgratastel, valgusfoorides ja ekraanides. Esimesena rakendati LED-tänavavalgustuse süsteem Hollandis Ede linnas 2006. aastal. Aastal 2013 otsustas Tartu minna täielikult üle LED-tänavavalgustitele. Säästlike valgustite kasutuselevõtt on oluline, kuna maailmas kulub 19% elektrienergiast valgustusele.