



Co-funded by
the European Union

Õppeüksus: Fotogalvaaniline teekond: päikese püüdmine

DiFC - Palermo Ülikool



BIOS4YOU
AR 2.0

BIO-INSPIRED STEM TOPICS FOR ENGAGING YOUNG GENERATIONS
THANKS TO THE USE OF AUGMENTED REALITY

Project Number: KA220-BW-23-30-126516

"Funded by the European Union. Views and opinions expressed are however those of the author(s) only and do not necessarily reflect those of the European Union or the European Education and Culture Executive Agency (EACEA). Neither the European Union nor EACEA can be held responsible for them."





Sisukord

1. Fotogalvaaniline teekond: päikese püüdmine	3
Energia muundamine päikeseplatadeid; footonitest elektronideks; fotogalvaaniliste süsteemide füüsika	3
2. Avasta moodul	4
Kaasamise etapp	4
Ajurünnakud klassis	5
Algtase	6
Päikeseenergia muundamise füüsika	6
Footonitest elektronideni: P-N-siire	8
Kihiline struktuur ja laengute kogumine	9
Ristmikust vooluringini: vool ja pinge	10
Teooriast igapäevaste esemete juurde	10
Veebipõhised ressursid	11
Edasijõudnutele	11
Pööratud õppimine:	13
3. Operatsioonimoodul	14
Algtase	14
Edasijõudnutele	15
Tegevused:	17
4. Viited	18





Õpetee üldine teema	Fotogalvaaniline teekond: päikese püüdmine
Õppeüksuse täpne nimetus	Energia muundamine päikesepatareides; footonitest elektronideks; fotogalvaaniliste süsteemide füüsika
Sihtrühma vanus	17–19-aastased
Õppijale esitatavad nõuded	Füüsika (elektromagnetlained, energia, elektrivool ja -pinge), keemia (aatomite struktuur, elektronid, keemilised sidemed) ning elektri ja energia muundamise sissejuhatavad mõisted põhiteadmised.
Õppeüksuse kirjeldus	See üksus juhendab õpilasi ja õpetajaid läbi interdistsiplinaarse teekonna, mis integreerib füüsikat, keemiat ja tehnoloogiat, et mõista, kuidas päikeseenergiat fotogalvaaniliste elementide abil püütakse ja elektrienergiaks muundatakse. Õpilased uurivad footonite teekonda päikesevalgusest elektrivoolu tekkimiseni, analüüsides päikesepatareide kihilist struktuuri (p-n-siirded, pooljuhid), fotogalvaanilist efekti ja elektronide voo mehhanisme. Digitaalsete ja liitreaalsuse tööriistade kasutamise eesmärk on muuta muidu nähtamatud protsessid (footonite neeldumine, elektron-auk paaride teke, elektriväli ühenduskohas, voolu liikumine) nähtavaks, sidudes füüsikalised põhimõtted selgelt ja järk-järgult säästva energia tootmise tehnoloogiliste rakendustega.





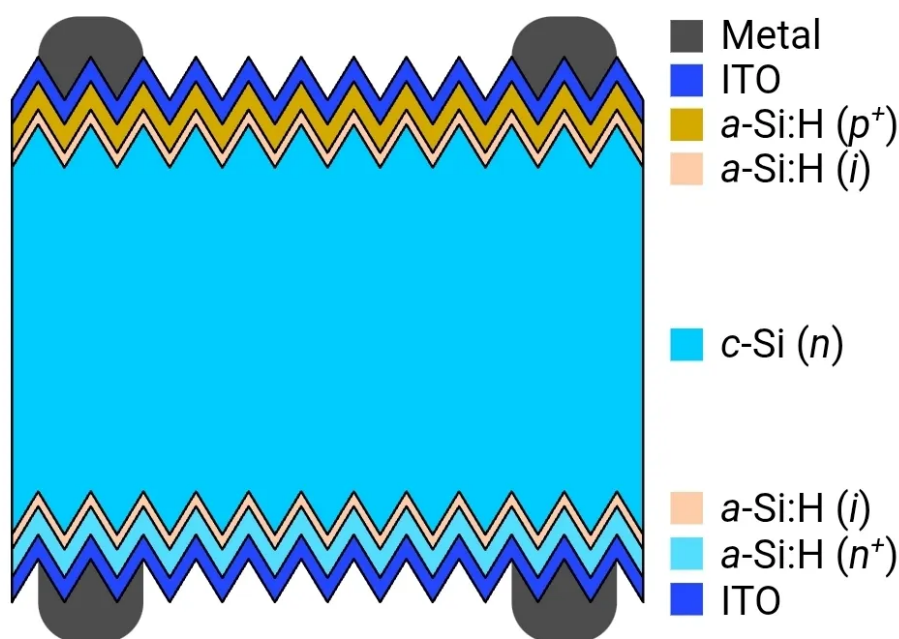
Teema: Asjaosalised	Füüsika (optika, elektromagnetism), keemia (pooljuhtmaterjalid), tehnoloogia (fotogalvaanika), jätkusuutlikkus (taastuenergia)
Märksõnad	Päikeseenergia; Fotogalvaaniline element; Footonid; Elektronid; P-N-siirded; Pooljuhid; Energia muundamine; Elektrivool; Taastuenergia; Liitreaalsus; Stseenipõhine õpe
Peamised omandatavad kvalifikatsioonid, oskused ja teadmised	- Energia muundamise protsesside arutluskäik ja probleemide lahendamine - Disainmõtlemise rakendamine füüsikaliste nähtuste järjestikusele visualiseerimisele - Praktilised teadmised: fotogalvaaniline efekt, pooljuhtide füüsika, päikeseplatade struktuur, elektrihaigad - Digitalsed/AR-oskused: aatomitasandi protsesside 3D-visualiseerimine, interaktiivsed diagrammid, stseenide navigeerimine
Kasutatud ressursid ja didaktilised abivahendid	AR-platvormid (nt Delightex Studio – Spaces, Marker), usaldusväärsed veebiressursid ja õppevideod päikeseenergia ja fotogalvaanika kohta, teadusartiklid ja andmebaasid; diagrammid ja 3D-mudelid (päikeseplatade kihid, p-n-siirded, elektronide voog, fotogalvaanilised süsteemid) ning tekstipõhised kihid oluliste andmete jaoks.
Hindamiskriteeriumid ja hindamine	Teadmiste (footonilt elektronile ja voolule ülemineku järjestus), oskuste (footoni neeldumise ja elektrienergia genereerimise vahelised põhjus-tagajärg seosed) ja pädevuste (liitreaalsuse tööriistade teadlik kasutamine, füüsika ja säästva energiatehnoloogia interdistsiplinaarne integratsioon) hindamine.



1. Fotogalvaaniline teekond: päikese püüdmine

Energia muundamine päikeseplatades; footonitest elektronideks; fotogalvaaniliste süsteemide füüsika

Päikeseenergia muundamine tuleneb kvantfüüsika ja materjalitehnoloogia kokkupuutepunktist. Päikesevalgus, mis koosneb diskreetsete energiapakettidega footonitest, langeb fotogalvaanilise elemendi pinnale ja interakteerub pooljuhtmaterjalidega.



Joonis 1 Räni heterosiirdega päikeseplatade ristlõike struktuur, mis näitab kihilist arhitektuuri. N-tüüpi kristalliline räni (c-Si) moodustab peamise neeldurikihi koos õhukeste amorfse räni (a-Si:H) passiivkihtide ja läbipaistvate ITO-kontaktidega. (Allikas: Wikimedia Commons, CC BY-SA 4.0)

Siin neelduvad footonid, tekitades elektron-auk paare, mis sisemise elektrivälja mõjul eralduvad ja voolavad läbi välise vooluringi. Päikeseenergia rakendamine ei tähenda passiivset soojuse kogumist, vaid valguse aktiivset muundamist kasutatavaks elektrivooluks täpselt konstrueeritud aatomisuuruses struktuuride abil.

Energiamuundamise efektiivsus sõltub materjali omadustest ja päikeseplatade arhitektuurist. Räni, kõige sagedamini kasutatav pooljuht, on lisanditega "legeeritud", et luua kaks eraldiseisvat piirkonda: N-tüüpi kiht (elektronirikas) ja P-tüüpi kiht (aukurikas). Nende kihtide vahelisel piiril – P-N-siirdekohas – tekib loomulikult elektriväli. See väli on oluline: see annab liikumapaneva jõu, mis eraldab fotogenerereeritud





elektronid ja augud, takistades nende rekombineerumist ja tagades, et laengukandjad voolavad kindlas suunas voolu tekitamiseks.

Fotogalvaaniline efekt algab siis, kui piisava energiaga foton tabab pooljuhtmaterjali. Kui footoni energia ületab keelutsooni – minimaalse energia, mis on vajalik elektroni vabastamiseks aatomi sidemest –, liigub elektron valentstsoonist juhtivustsoonile, jättes endast maha positiivselt laetud "augu". See elektron-auk paar esindab päikeseenergia muundamise põhiüksust: valgusenergia muundatakse laengute eraldumiseks aatomi tasandil.

P-N-siirdepunkt toimib laengukandjate ühesuunalise väravana. Sisseehitatud elektriväli suunab elektronid N-tüüpi piirkonna poole ja augud P-tüüpi piirkonna poole. Kui mõlemale poole on kinnitatud metallkontaktid ja ühendatud välise vooluringi kaudu, voolavad elektronid N-küljelt läbi vooluringi P-küljele, tekitades elektrivoolu. Ühe ränielemendi tekitatud pinge on umbes 0,5–0,6 volti; praktilisteks rakendusteks sobivate kõrgemate pingete saavutamiseks on mitu elementi ühendatud järjestikku. Energiatoodangut ja efektiivsust mõjutavad mitmed tegurid: sissetuleva valguse intensiivsus ja spekter, pooljuhtmaterjalide kvaliteet, elemendi temperatuur ja peegeldusvastaste katete disain, mis maksimeerivad footonite neeldumist. Kaasaegsed räni päikeseplatad saavutavad efektiivsuse 15–22%, mis tähendab, et ainult murdosa langevast päikeseenergiast muundatakse elektrienergiaks. Täiustatud materjalid, nagu perovskiidid ja mitmesiidrega elemendid, suurendavad efektiivsust, kuid kompromissid kulude, stabiilsuse ja tootmise keerukuse osas on endiselt aktiivsed uurimisvaldkonnad.

Hariduslikust vaatenurgast on oluline selgitada sündmuste järjestikust ahelat: (1) fotonid saavad ja tungivad läbi raku pinna; (2) piisava energiaga fotonid genereerivad pooljuhis elektron-auk paare; (3) P-N-siirde elektriväli eraldab need laengukandjad; (4) elektronid voolavad läbi välise vooluringi, tekitades elektrivoolu; (5) energia antakse koormusele (lamp, aku, võrk). Nende sammude järjestatud esitamine aitab õpilastel ühendada kvantmõõtmega nähtusi makroskoopilise energia genereerimisega.

Digitaalsete ja liitreaalsuse tööriistade sihipärane kasutamine võimaldab visualiseerida muidu nähtamatuid protsesse, nagu footonite neeldumine aatomi tasandil, p-n-siirde ammendumispiirkonna moodustumine ja elektronide suunatud voog läbi vooluringi. Stseenhaaval visualiseerimine hõlbustab mikroskoopilise füüsika ja suuremahuliste taastuvenergia süsteemide vaheliste seoste mõistmist.

Mõtiskleme koos.

Miks ei saa päikesevalgusest elektrienergiat ammutada ilma pooljuhtideta? Kuidas muudab p-n-siire juhusliku footonite neeldumise suunatud elektronide voogu? Milline roll on keelutsooni energial selle määramisel, milliseid valguse lainepikkusi saab elektriks muuta? Need küsimused aitavad siduda vaadeldavaid päikeseenergia nähtusi aluseks olevate kvant- ja elektrimehhanismidega.

2. Avasta moodul

Kaasamise etapp

Suunav küsimus. *Kas me saame päikesevalgusest elektrit ammutada ilma liikuvate osadeta?*

Tund algab lühikese demonstratsiooniga: väike päikesepaneel on ühendatud LED-i või kalkulaatoriga.

Valguse käes seade töötab; kaetult see seiskub. Eesmärk ei ole lihtsalt näidata, et "päikesepaneelid





töötavad", vaid tutvustada ideed, et valgusenergiat saab tahkisfüüsika abil otse elektrienergiaks muuta – pole vaja turbiine, põlemist ega mehaanilist liikumist.

Esialgsed stiimulid (videod ja lühikesed ressursid)

Kuidas päikesepaneelid töötavad? TED-Ed: selge animeeritud ülevaade fotogalvaanilistest elementidest, P-N-siirdest ja elektronide voolust.

<https://www.youtube.com/watch?v=xKxrkht7CpY>

Päikeseenergia põhitõed – USA energeetikaministeerium: ligipääsetav sissejuhatus fotogalvaanilisse tehnoloogiasse ja taastuvenergia süsteemidesse.

<https://www.energy.gov/eere/solar/solar-photovoltaic-technology-basics>

Fotoelektriline efekt Fotoelektriline efekt: interaktiivne uurimus footonite ja metallpindade interaktsioonist elektronide väljutamiseks, demonstreerides valguse kvantomadusi.

<https://phet.colorado.edu/en/simulations/photoelectric>

Avategevus (5–10 min).

Kiire demonstratsioon või videoklipp, mis näitab, kuidas päikeseplatari toidab väikest mootorit või laeb akut, kutsus õpilasi üles küsima: "*Kuidas muutub valgus elektriks ilma liikuvate juhtmete või kemikaalide reageerimiseta?*"

Eesmärk on esile tõsta, et **energia muundamine on kvantprotsess** toimub pooljuhtmaterjalides aatomi tasandil, mitte makroskoopiline mehaaniline või termiline muundumine.

Soovituslik video: *Kuidas päikesepaneelid töötavad* (SciShow)

https://www.youtube.com/watch?v=L_q6LRgKpTw

Ajurünnakud klassis

Peamine küsimus. Ilma valguseta pole fotogalvaanilist voolu: mis juhtub footonitega, kui nad päikeseplatariisse sisenevad, ja kuidas need genereerivad elektrisignaali, mis suudab seadmeid toita?

Küsimuste esilekutsumine

Mis määrab, kas footon suudab päikeseplatariis elektrit toota?

Fotoni energia peab ületama pooljuhi keelutsooni; rüni keelutsoon ($\sim 1,1$ eV) tähendab, et ainult footonid lainepikkusega alla ~ 1100 nm (nähtav ja lähiiinfrapunavalgus) saavad vabastada elektrone ja genereerida voolu.

Miks me ei saa kasutada kogu päikesevalgust, mis päikesepaneelidele langeb?

Kuna footonid, mille energia on alla keelutsooni, läbivad laengukandjaid tekitamata, samas kui palju





suurema energiaga fotonid raiskavad liigse energia soojusena, on ühe siirdega ränielementide teoreetiline maksimaalne efektiivsus ~33% (Shockley-Queisseri piir).

Kas päikeseplatari "salvestab" elektrit nagu aku?

Ei; päikeseplatari genereerib voolu ainult siis, kui see on valgustatud. Fotogalvaaniline efekt tekitab laengute eraldumise ja voolu reaajas; energia salvestamiseks on vaja välist akut või kondensaatorit.

Miks mõned päikesepaneelid töötavad otsese päikesevalguse käes paremini kui varjus?

Kuna valguse intensiivsus (fotonivoog) mõjutab otseselt tekkivate elektron-auk paaride arvu, tähendab madalam intensiivsus vähem footoneid, vähem laengukandjaid ja väiksemat voolutugevust. Pinge jääb suhteliselt stabiilseks, kuid voolutugevus langeb märkimisväärselt.

Mikroülesanne.

Märgistage päikeseplatari kihid (peegeldusvastane kate, N-tüüpi räni, P-N-siirde, P-tüüpi räni, tagumine kontakt), kasutades töölehte või interaktiivset diagrammi.

Soovituslik ressurss: Päikeseplatari struktuuri diagramm- Britannica entsüklopeedia

<https://www.britannica.com/technology/solar-cell>

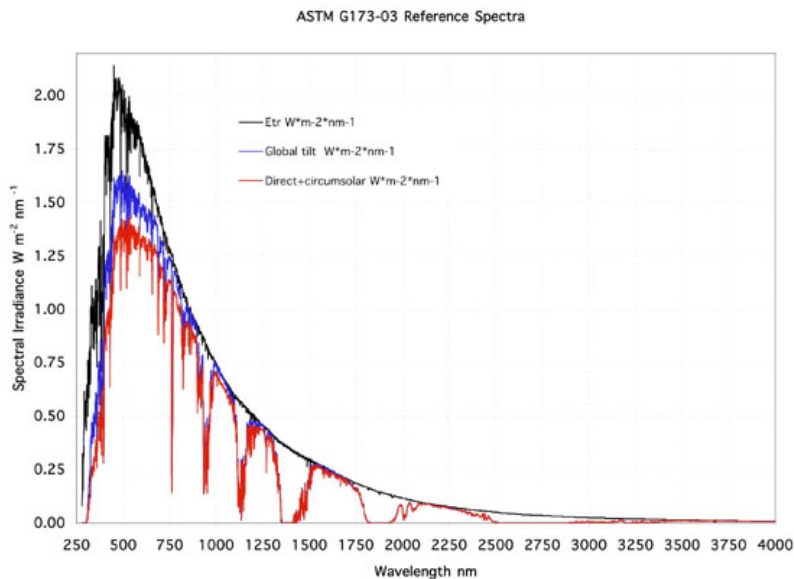
Algtase

Päikeseenergia muundamise füüsika

Valgus, neeldumine ja footonienergia

Päikeseenergia muundamine algab siis, kui päikesevalguse fotonid tabavad fotogalvaanilise elemendi pinda. Päikesevalgus on segu elektromagnetlainetest, mis hõlmavad ultraviolet-, nähtavat ja infrapunast kiirgust. Iga foton kannab endas diskreetset energiapaketti, mis määratakse selle lainepikkuse järgi: lühemad lainepikkused (sinine valgus) kannavad rohkem energiat kui pikemad lainepikkused (punane valgus).

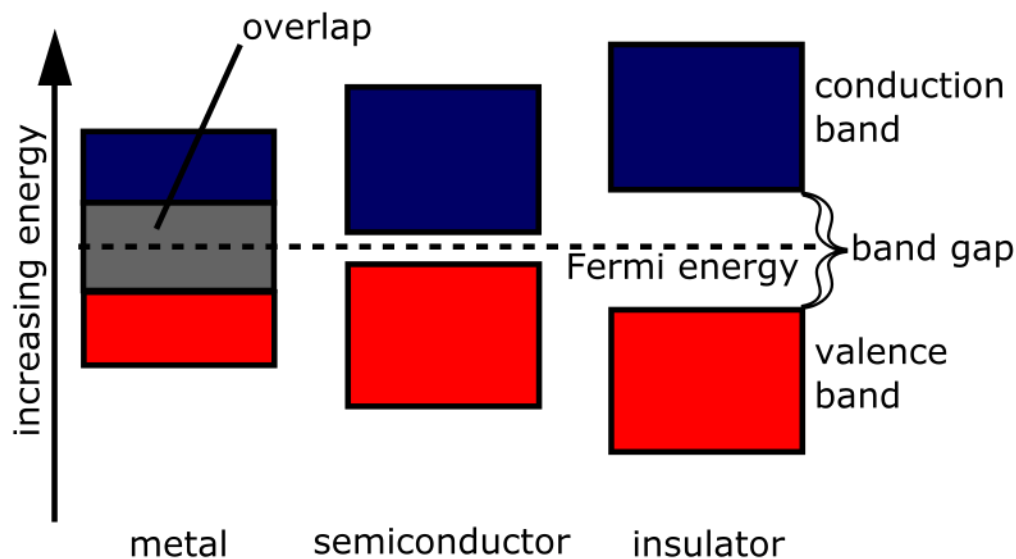




Joonis 2 Päikesekiirguse spektraal (ASTM G173-03 võrdlusspektrid), mis näitavad footonite energia jaotust lainepikkuste vahel. Ränist päikesepatareid keelutsooniga $\sim 1,1$ eV (vastab lainepikkusele ~ 1100 nm) suudavad muundada ainult nähtavaid ja lähiinfrapuna footoneid. (Allikas: NREL)

Kui footon siseneb pooljuhtmaterjali, näiteks räni sisse, võib see neelduda, peegelduda või läbi pääseda.

Imendumine on võtmetähtsusega Kui footoni energia on võrdne või ületab materjali keelutsooni energiat (minimaalne energia, mis on vajalik elektroni vabastamiseks aatomi sidemest), liigub elektron valentstsoonist juhtivustsooni.



Joonis 3 Metallide, pooljuhtide ja isolaatorite energiavõtmete struktuuride võrdlus. Pooljuhtides, näiteks räni puhul, on keelutsoon ($\sim 1,1$ eV) piisavalt väike, et footonid saaksid elektrone valentsitsoonist (punane)





juhtivustsooni (sinine) ergastada, võimaldades fotogalvaanilist energiamuundust. (Allikas: Wikimedia Commons, avalik omand)

See loobelektron-auk paar-mobiilne negatiivne laeng (elektron) ja vastav positiivne vakants (auk).

Mis määrab, kas footon neeldub või läbib seda?

Footoni energia ja pooljuhi keelutsooni vaheline seos. Räni keelutsoon on $\sim 1,1$ eV, mis vastab infrapunavalgusele lainepikkusel ~ 1100 nm. Väiksema energiaga footonid läbivad seda; palju suurema energiaga footonid tekitavad pärast elektronide vabastamist soojust.

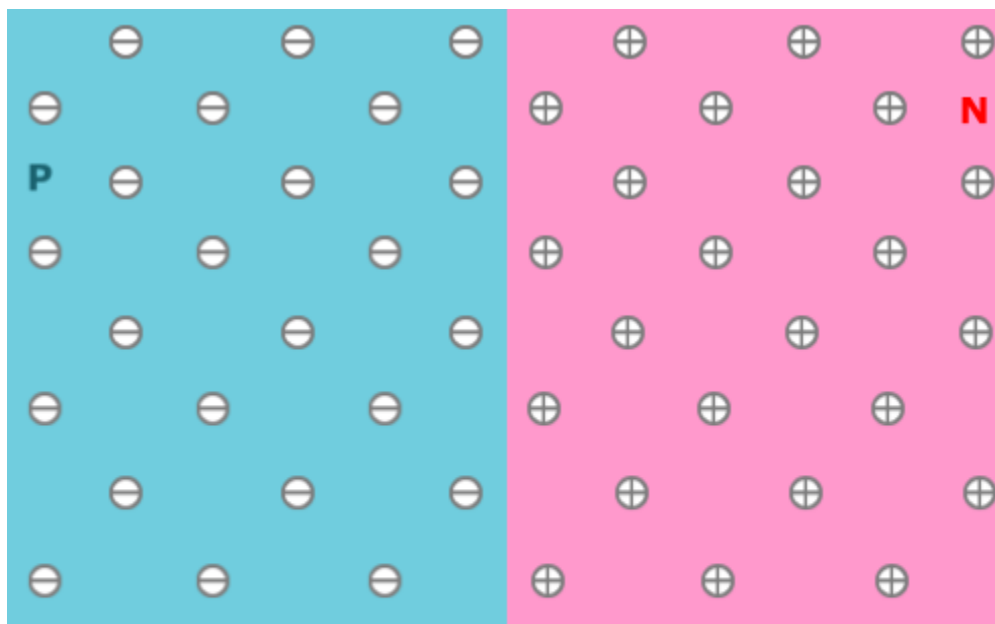
Footonitest elektronideni: P-N-siire

Neeldunud footon loob elektron-auk paari, kuid ilma sisemise elektriväljata taasühineksid need laengud kiiresti, vabastades energiat soojust, mitte elektrienergia kujul. Siin toimubki **P-N-ühendus** muutub hädavajalikuks.

Räni "legeeritakse" lisanditega, et luua kaks eraldiseisvat piirkonda:

- **N-tüüpi** räni fosforiga legeeritud (lisaelektronid $\rightarrow$ negatiivsed laengukandjad)
- **P-tüüpi** räni booriga legeeritud (elektronide defitsiit $\rightarrow$ positiivsed "augud")

N-tüüpi ja P-tüüpi piirkondade piiril **ammendumistsoon tekib looduslikult** N-poolt tulevad elektronid difundeeruvad, täites P-poolel olevaid auke, jättes maha N-poolle positiivselt laetud aatomid ja P-poolle negatiivselt laetud aatomid. See laengute eraldumine loob **sisseehitatud elektrivälja** osutatades N-st P-le.

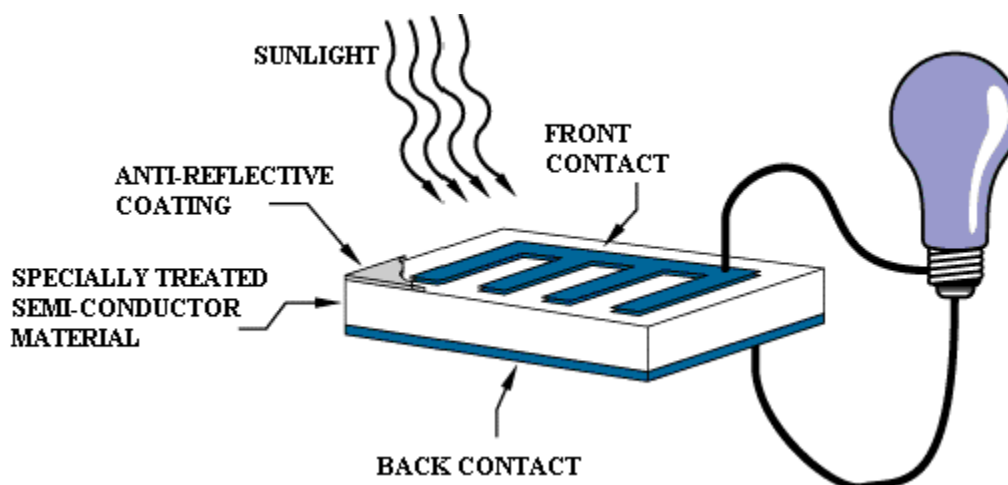


Joonis 4. P-N-siirde skemaatiline esitus enne tasakaalu. P-tüüpi piirkond (vasakul, tsüaan) sisaldab liigseid auke (positiivsed laengukandjad), samas kui N-tüüpi piirkond (paremal, roosa) sisaldab liigseid elektrone (negatiivsed laengukandjad). Kui need kaks piirkonda kokku puutuvad, difundeeruvad laengukandjad üle siirde. (Allikas: PVEducation.org, hariduslik kasutus)

Kui footon tekitab ühenduskoha lähedal elektron-auk paari, siis elektriväli suunab elektroni N-poolle ja augu P-poolle. See eraldamine takistab rekombinatsiooni ja liigutab laengukandjaid vastassuundades, tekitades pinge erinevuse elemendi kahe külje vahel.

Miks elektron-auk paarid eralduvad, selle asemel et kohe uuesti ühineda?

Kuna P-N-siirde elektriväli annab juhuslikust termilisest liikumisest tugevama liikumapaneva jõu, suunab elektronid ja augud üksteisest eemale enne, kui nad saavad taasühineda.



Joonis 5 Päikesepatarei täielik tööpõhimõte, mis näitab päikesevalguse muundumist elektrivooluks. Footonid tabavad pooljuhtmaterjali läbi peegeldusvastase katte, tekitades elektron-auk paare, mis on eraldatud sisemise elektrivälja abil. Elektronid voolavad läbi välise vooluringi (mida esindab lambipirn) enne kui naasevad rekombineeruma, luues kasutatavat elektrienergiat. (Allikas: Wikimedia Commons, avalik omand)

Kihiline struktuur ja laengute kogumine

Tüüpiline räni päikesepatarei koosneb mitmest kihist, mis on optimeeritud valguse neeldumiseks ja laengu kogumiseks:

Peegeldusvastane kate (ülemine): vähendab peegeldust, maksimeerides footonite sisenemist

N-tüüpi räni (õhuke kiht): elektronirikas piirkond, kuhu elektronid kogunevad

P-N-siirdepunkt (liides): koht, kus elektriväli eraldab laengukandjaid

P-tüüpi räni (paksem alus): kuhu kogunevad augud

Metallkontaktid (ülemine ja alumine): juhivad elektronid välisele vooluringile





Esikontakt on kujundatud ruudustiku muustrina, et minimeerida varjutamist voolu kogumise ajal. Tagumine kontakt katab kogu tagumise pinna maksimaalse juhtivuse tagamiseks.

Miks on N-kiht õhem kui P-kiht?

Kuna enamik footoneid neeldub pinna lähedal, tagab õhuke N-kiht fotogeneeritud laengukandjate läheduse ühenduskoha elektriväljale, et tagada efektiivne eraldamine, samas kui paksem P-kiht neelab pikema lainepikkusega footoneid materjali sügavamal.

Ristmikust vooluringini: vool ja pinge

Kui päikesevalgus rakku valgustab, tekitab pidev footonite neeldumine pideva elektron-auk paaride hulga. Siirdekoha elektriväli eraldab neid laenguid pidevalt, suunates elektronid N-poolsele ja augud P-poolsele poole.

Kui metallkontaktid on kinnitatud ja ühendatud välise vooluahela kaudu, **elektronid voolavad N-küljelt läbi vooluringi (toites koormust) ja naasevad P-küljele** aukudega rekombineeruma. See voog moodustab **fotogalvaanilise vooli**.

Ühe ränielemendi tekitatud pinge on ligikaudu **0,5–0,6 volti**, mis on määratud keelutsooni energia ja ülemineku omaduste poolt. Voolutugevus sõltub valguse intensiivsusest ja raku pindalast: rohkem footoneid → rohkem elektron-auk paar → suurem vool.

Kui üks element toodab ainult ~0,5 V, kuidas päikesepaneelid kasulikku pinget genereerivad?

Mitu rakku on omavahel ühendatud **seeria** (ühe positiivne klemm järgmise negatiivse klemmiga) pingete lisamiseks. Tüüpiline paneel sisaldab järjestikku 60–72 elementi, mis toodavad standardtingimustes 30–40 volti.

Teooriast igapäevaste esemete juurde

Samad päikeseplatvormides toimivad põhimõtted on leitavad ka järgmistest allikatest:

- **Päikesekalkulaatorid** väikesed elemendid, mis pakuvad millivatte võimsust madala energiatarbega seadmetele
- **Katusele paigaldatavad päikesepaneelid**: kodudele kilovatte genereerivate järjestikku ühendatud elementide massiivid
- **Päikesefarmid** suured seadmed, mis toodavad elektrivõrgu jaoks megavatte
- **Kosmosesatelliidid**: suure tõhususega mitme ühenduskohaga elemendid, mis toidavad kosmoselaevu olukordades, kus töökindlus on kriitilise tähtsusega

Kvantfüüsika abstraktsest väljatoomine aitab õpilastel mõista mitte ainult *kuidas* fotogalvaanika töötab, *agamiks* Projekteerimisvalikud (keeldumisriba valik, peegeldusvastased katted, elemendi paksus) mõjutavad otseselt tegelikku energiatõhusust.

Mõtiskleme koos.





Päikesevalguse elektri muundamine nõuab täpset juhtimist aatomi tasandil. Kui P-N-siirdepunkt on laengute eraldamiseks hädavajalik, miks me ei saa kasutada ühtegi pooljuhti? Milline roll on legeerimisel sisemise elektrivälja loomisel? Kuidas mõjutavad temperatuur, varjutus ja materjali kvaliteet energiamuundamise efektiivsust?

Veebipõhised ressursid

Kuidas päikesepaneelid töötavad? – TED-Ed

<https://www.youtube.com/watch?v=xKxrkh7CpY>

Fotogalvaaniliste elementide ja elektronide voo animeeritud selgitus.

Päikeseenergia fotogalvaanika tehnoloogia põhitõed – USA energeetikaministeerium

<https://www.energy.gov/eere/solar/solar-photovoltaic-technology-basics>

Ülevaade PV-tehnoloogiast ja päikeseenergia muundamise meetodist.

PhET – fotoelektriline efekt

<https://phet.colorado.edu/en/simulations/photoelectric>

Footonienergia ja elektronide väljutamise interaktiivne uurimine.

Edasijõudnutele

Fotogalvaanilise muundamise kvantmehaanika

Fotogalvaaniline efekt on põhimõtteliselt kvantnähtus. Kui rüü aatom neelab footoni, peab selle energia ületama **keelutsooni energia** ($E_g \approx 1,1$ eV kristallilise rüü puhul), et elektron valentstsoonist juhtivustsooni liikuda. See protsess loob **elektron-auk paarit**õenäosusega, mis on määratud materjali neeldumisteguri ja footonienergia poolt.

Energiakaodesineda mitmes etapis:

- **Footonid, mille $E < E_g$** läbivad ilma laengukandjaid tekitamata (ülekandekaod)
- **Footonid, mille $E > E_g$** tekitavad "kuumaid" energiakandjaid, mis kaotavad kiiresti liigse energia soojuse kaudu **termiseerimise**
- **Pinna peegeldus** (ilma peegeldusvastase katteta kaob ~30% langevast valgusest)
- **Rekombinatsioon** (elektron-auk paarid rekombineeruvad enne kontakti saavutamist, vabastades energiat soojuse või valguse kujul)

See **Shockley-Queisseri** piirmäärab ühe siirdega päikeseptareti teoreetiliseks maksimaalseks efektiivsuseks ~33% standardse päikesepektri (AM1.5G) korral. Reaalses rüüptareides saavutatakse see 15–22% tänu lisakadudele takistuse, ebatäiuslike materjalide ja mitteideaalsete siirdeomaduste tõttu.

Efektiivsus, spektraalne reaktsioon ja materjali optimeerimine

Päikeseptareide efektiivsus sõltub kriitiliselt sellest, kui hästi pooljuhi keelutsoon vastab päikesepektrile. Rüü 1,1 eV keelutsoon on kompromiss: see püüab tõhusalt kinni nähtavat ja





lähiinfrapunavalgust, kuid ei suuda kasutada madalama energiaga infrapunafotoneid ega täielikult ära kasutada kõrge energiaga ultraviolettfotoneid.

Shockley-Queisseri piiri ületamise edasijõudnud strateegiad:

- **Mitmeühendustega (tandem) rakud**Erineva keelutsooniga pooljuhtide (nt GaInP/GaAs/Ge) virnastamiseks tuleb iga kiht neelata spektrist teatud osa. Laboris on kontsentreeritud päikesevalguse käes efektiivsus üle 47%.
- **Perovskiidi rakud**Hübriidsed orgaanilis-anorgaanilised materjalid, millel on reguleeritavad keelutsoonid, kiire laengutransport ja lahuses töödeldav tootmine. Praegune efektiivsus läheneb 26%-le, kuid stabiilsus ja skaleeritavus on endiselt probleemiks.
- **Kuumad kanderakud**(eksperimentaalne): Kuumlaengukandjatele energia kogumine enne termiseerimist, mille efektiivsus võib ületada 66%. Nõuab ülikiireid laengu eraldamise mehhanisme, mis pole veel kaubanduslikult tasuvad.

Miks suure energiaga fotonid vähendavad üldist efektiivsust?

Kuna keelutsoonist kõrgem liigne energia kaob pikosekundite jooksul kiiresti soojusena foononite emissiooni (termalisatsiooni) kaudu, tekitab 3 eV foton (UV) sama ühe elektron-auk paari kui 1,2 eV foton (punane), raisates soojusena 1,9 eV.

Miks me ei saa lihtsalt kasutada väga väikest keelutsooni, et kõik fotonid kinni püüda?

Kuna väiksemad keelutsoonid tekitavad madalamat pinget ($V \propto Nt$) ja laengukandjate termiline genereerimine suureneb, suurendades "tumevoolu", mis vähendab netoeffektiivsust. Optimaalne keelutsoon (~1,1–1,4 eV) tasakaalustab fotonite neeldumist ja pinge väljundit.

Laengutransport, rekombinatsioon ja seadmefüüsika

Pärast üleminekul tekkimist peavad laengukandjad liikuma kontaktideni ilma rekombineerumata. **Rekombinatsioonimehhanismid** piirata efektiivsust:

- **Kiirgusrekombinatsioon:** elektron-auk paarid rekombineeruvad, kiirgades fotoneid (oluline otsese keelutsooniga materjalides nagu GaAs, minimaalne ränis)
- **Augeri rekombinatsioon**kolmeosakese vastastikmõju, kus energia kandub valguse asemel kolmandale laengukandjale (suureneb suure laengukandjate tiheduse korral)
- **Shockley-Read-Halli (SRH) rekombinatsioon:** kristallvõres olevad defektid ja lisandid püüniskandjates, mis soodustavad rekombinatsiooni (domineerib madalama kvaliteediga räni puhul)

Kõrge kvaliteet**kristalliline räni**Minimeerib SRH rekombinatsiooni kontrollitud tootmise abil. **Passiveerimiskihid**(nt räninitriid, alumiiniumoksiid) pindadel vähendavad piirpindade rekombinatsiooni. **Dopinguprofiilid**on optimeeritud nii, et elektriväli ulatub üle aktiivse piirkonna, tagades kiire laengukandjate eraldumise.





Miks temperatuur vähendab päikesepatareide efektiivsust?

Kuna kõrgem temperatuur suurendab võre vibratsioone (foononeid), mis hajutavad laengukandjaid, vähendavad liikuvust ja suurendavad rekombinatsioonikiirust. Lisaks väheneb keelutsoon temperatuuriga veidi ($\sim -0,3$ meV/K räni puhul), vähendades pinge väljundit. Tüüpiline efektiivsuse kadu: $\sim 0,4\%$ iga $^{\circ}\text{C}$ kohta üle 25°C .

Süsteemi integreerimine ja reaalse maailma jõudlus

Fotogalvaaniline süsteem ei hõlma ainult päikesepatareid, vaid ka:

- **Inverterid:** teisendab alalisvoolu väljundi vahelduvvooluks, et tagada võrguga ühilduvus
- **Maksimaalse võimsuspunkti jälgimine (MPPT):** reguleerib pidevalt koormust, et valgustingimuste muutudes maksimaalset võimsust saavutada
- **Energia salvestamine**(valikuline): patareid salvestavad üleliigse energia ööseks või pilviseks ajaks
- **Võrguühendus:** suunata üleliigse energia elektrivõrku, sageli netomõõtmise poliitika abil

Mahtuvustegur Päikesepaneelide (tegelik energiatoodang / teoreetiline maksimum) on tavaliselt 15–25%, mida piiravad:

- Päeva/öö tsüklid
- Ilma muutlikkus
- Päikese nurga hooajalised muutused
- Süsteemi kaod (juhtmestiku takistus, inverteri ebaefektiivsus, varjutus)

Miks päikesepaneelid aja jooksul lagunevad?

UV-kiirgus, niiskuse sissepääs, termilised tsüklid ja potentsiaalselt põhjustatud lagunemine (PID) vähendavad järk-järgult efektiivsust. Kvaliteetsed moodulid kaotavad $\sim 0,5\%$ efektiivsust aastas; garantiid garanteerivad tavaliselt 80% väljundvõimsust 25 aasta pärast.

Mõtiskleme koos

Miks töötavad tänapäevased päikesepatareid ikka veel Shockley-Queisseri piirist palju allpool?

Kuna reaalsetes materjalides esineb defekte, põhjustavad pinnad rekombinatsiooni ja laengu eraldamine ei ole täiesti efektiivne. Teoreetilise ja praktilise jõudluse vahelise lõhe ületamine on materjaliteaduse ja seadmetehnika käimasolevate uuringute motivaator.

Miks me ei saa saavutada 100% efektiivsust isegi ideaalsete materjalidega?

Kuna kehtivad fundamentaalsed termodünaamilised ja kvantmehaanilised piirangud: kõiki footoneid ei saa neelata (spektraalne mittevastavus), termiseerimine raiskab suure energiaga footoneid ja pinge väljundi säilitamiseks on vaja teatud energia hajumist. Termodünaamika teine seadus piirab lõppkokkuvõttes muundamise efektiivsust.





Pööratud õppimine:

Eesmärk. Valmistuge klassiruumis aruteluks, mõistes järjekorda *footon* → *neeldumine* → *laengu eraldumine* → *voolu voogja* fotogalvaaniliste süsteemide füüsika/inseneri seosed.

Ülesanded (esitada 1–2-leheküljelise aruandena või 6–8 slaidina):

1. **Lühike lugemineräni** päikeseplatari struktuurist ja footonite teekonnast. Olulisemad teemad: peegeldusvastane kate, N-tüüpi kiht, P-N-siirdepunkt, P-tüüpi kiht, metallkontaktid.
2. **Tööleht "N-tüüpi vs. P-tüüpi räni"**: täida tabel järgmisega:
 - o Dopinglelement (fosfor/boor)
 - o Enamuslaengukandjad (elektronid/augud)
 - o Roll laengute eraldamisel
 - o Positsioon raku struktuuris (ülemine/alumine)
3. **PhET pooljuhtide simulatsioon**: loo kaks ekraanipilti -
 - a. **Sisemine (legeerimata) räni**: jälgige energiaribasid ja vabade laengukandjate puudumist
 - b. **Legeeritud räni (N+P-ühendus)**: jälgige riba painutamist, sisseehitatud elektrivälja ja laengute eraldumist valguse all
4. **Lühike süntees (maksimaalselt 120 sõna)** Selgita oma sõnadega, kuidas päikeseplatari ei "kogu" päikesevalgust nagu termopaneel, vaid **muundab footoni energia eraldatud elektrilaenguteks** kvantneeldumise ja üleminekufüüsika kaudu.
5. **Kolm aruteluküsimust**:
 - o Üks pealkvantfüüsika Miks peab footoni energia ületama keelutsooni?
 - o Üks pealmaterjaliteadus Kuidas doping tekitab elektrivälja?
 - o Üks pealsüsteemide inseneriteadus Miks päikeseplatariid toodavad alalisvoolu, aga kodud kasutavad vahelduvvoolu?

Esitamine. Laadi PDF-fail või slaidid enne tundi klassi kanalile üles.

3. Operatsioonimoodul

Algtase

Fotogalvaanilise muundamise protsessi mõistmist saab süvendada praktiliste tegevuste abil, mis võimaldavad õpilastel jälgida nii päikeseenergia püüdmisega seotud kvant- kui ka elektrinähtusi. Selle osa eesmärk on rakendada juhendatud viisil teoreetilises osas uuritud footonite neeldumise, laengute eraldumise ja voolu genereerimise kontseptsioone, ühendades need omavahel. **pooljuhtide füüsikakoosrealse maailma energiasüsteemid.**

Kui valgus tabab pooljuhtmaterjali, ergastab piisava energiaga footonid seotud olekutest elektrone liikuvateks laengukandjateks – see on kvantnähtus, mis on otsese vaatluse jaoks nähtamatu, kuid





elektriliste instrumentidega mõõdetav. Õpilased saavad seda käitumist jälgida lihtsa katse abil: ühendage väike päikesepatarei multimeetriga ja asetage see erinevate valgusallikate (päikesevalgus, LED-lamp, taskulamp) mõjule. Valguse intensiivsuse suurenedes suureneb voolutugevus proportsionaalselt, samas kui pinge jääb suhteliselt stabiilseks. See otsene mõõtmine illustreerib, kuidas footonivoog muundub elektriliseks väljundiks.

Simulatsiooni abil saavad õpilased jälgida energiaribade diagramme, kasutada legerimist N-tüüpi ja P-tüüpi piirkondade loomiseks ning visualiseerida, kuidas P-N-siire tekitab sisseehitatud elektrivälja. Valguse sissetoomisel näevad õpilased elektron-auk paare, mis tekivad ja eralduvad üleminekuvälja poolt, tekitades voolu. See tegevus aitab õpilastel mõista, kuidas **Doping ja ühendusfüüsika võimaldavad suunatud laengutransporti**-fotogalvaanilise töö alus.

Nendest vaatlustest tulenevad olulised küsimused: milline on seos footonienergia ja elektronide ergastuse vahel? Miks loob doping sisemise elektrivälja ilma välise pingeta? Simuleeritud pooljuhi võrdlemine reaalse päikesepatarei struktuuriga selgitab, kuidas aatomitasandi materjalitehnoloogia määrab makroskoopilise elektrilise jõudluse.

Seejärel nihkub fookus sellele, **päikesepatareide kihiline arhitektuur**. Tudengid analüüsivad funktsionaalsete kihtide – peegeldusvastane kate, N-tüüpi emitter, P-N-siirde, P-tüüpi alus, metallkontaktid – paigutust ja nende üksteist täiendavaid rolle:

- See **peegeldusvastane kate** maksimeerib footonite sisenemist, vähendades pinna peegeldust
- See **õhuke N-kiht** püüab kinni pinna lähedal tekkivad elektronid
- See **P-N-ühendus** tekitab elektrivälja, mis eraldab laengukandjaid
- See **paks P-kiht** neelab pikema lainepikkusega footoneid sügavamal materjalis
- **Metallist kontaktid** koguda ja juhtida voolu välistele vooluahelatele

Klassis jätkub arutelu elementide käitumise analüüsimisega erinevates valgustingimustes. Miks muutub voolutugevus varjutamisel dramaatiliselt, samal ajal kui pinge jääb suhteliselt stabiilseks? Vastus peitub selles, et **footonvoo ja laengukandjate tekkimise otsene proportsionaalsus**. See ühine mõtisklus aitab õpilastel mõista, kuidas päikesesüsteemi projekteerimisel tuleb arvestada osalise varjutuse, orientatsiooni ja kellaaegade kõikumistega.

Seejärel kutsutakse õpilasi võrdlema päikesepatareid igapäevaste energiaseadmetega:

- **Päikesekalkulaatorid** väikese energiatarbega rakendused, kus väikesed elemendid pakuvad piisavalt energiat
- **Katusepaneelid**: jadaühendusega elemendid, mis toodavad kodumajapidamiste tasemel elektrit
- **Võrgustiku mastaabis päikesepaneelide farmid** megavattise võimsusega paigaldised inverterite, trafode ja salvestussüsteemidega
- **Kosmosesatelliidid**: suure tõhususega mitme ühenduskohaga elemendid, mille puhul on töökindlus ja kaal kriitilise tähtsusega

Selle analoogia kaudu tõlgendatakse fotogalvaanikat ümber kui **kvant-võrgu energia muundamise ahela** aatomifüüsika, materjalitehnika ja elektrisüsteemide ühendamise.





Mõtiskleme koos. Päikeseenergia muundamine on keeruline protsess, mis ühendab kvantmehaanikat, tahkisfüüsikat ja elektrotehnikat. Kuidas piirab pooljuhtide keelutsoon lainepikkusi, mida saab elektriks muundada? Millised inseneristrateegiad maksimeerivad footonite neeldumist ja minimeerivad laengute rekombinatsiooni? Kuidas mõjutavad reaalsed piirangud – hind, vastupidavus, skaleeritavus – päikeseplatade disainivalikuid?

Edasijõudnutele

Edasijõudnute tase süvendab seost footonite neeldumise ja välise vooluahelate kaudu kulgeva elektrivoolu vahel. Õpilased jälgivad, kuidas valgusenergia muundatakse P-N-siirde eraldatud laenguteks ja kuidas need laengukandjad levivad läbi pooljuhtide ja metallide kontaktide, et energiat edastada.

Sündmuste jada mõistmiseks on vaja mõista kontseptsioonil **lindi painutamist** P-N-siirde juures tekib: kui N-tüüpi ja P-tüüpi piirkonnad kokku puutuvad, difundeeruvad elektronid N-st P-sse ja augud P-st N-sse, kuni saavutatakse tasakaal. See loob **ammendumispiirkonda** mobiilsete laengukandjateta, N-poolel fikseeritud positiivsete ja P-poolel fikseeritud negatiivsete laengutega. Tekkiv elektriväli ($\sim 10^5$ V/cm) on piisavalt tugev, et eraldada fotogenereeritud elektron-auk paare enne nende rekombineerumist.

Laengukandjate levikut ja elektrivoolu teket illustreeritakse järgmise diagrammi abil. **Liitreaalsuse simulatsioon** arendatud koos **Delightex Studio – tühikud (marker):**

<https://edu.delightex.com/Studio/Spaces>

Mobiilseadmete abil uurivad õpilased päikeseplatade kolmemõõtmelist mudelit:

1. Jälgige, kuidas footonid pinnale langevad ja pooljuhi läbi tungivad
2. Visualiseeri elektron-auk paari teket, kui footoni energia ületab keelutsooni.
3. Jälgige ühendusvälja abil N-kihi poole liikuvaid elektrone ja P-kihi poole liikuvaid auke
4. Vaadake elektronide voolamist läbi välise vooluringi (juhe, koormus, tagasitee)
5. Jälgige kogu vooluahelat genereerimisest koormuseni ja tagasi

Tegevuse käigus pakutakse välja suunavaid küsimusi:

– **Millisel raku hetkel muutub valgus eraldatud elektrilaenguteks?**

P-N-siirde juures, kus sisseehitatud elektriväli eraldab fotogenereeritud elektronid ja augud enne nende rekombineerumist.

– **Miks voolab vool läbi välise vooluringi, kui element on valgustatud?**

Kuna ühenduskoht tekitab pidevalt pinget erinevust (fotovolti) N-poolle ja P-poolle vahel, ajab elektronid läbi vooluringi potentsiaalide erinevuse minimeerimiseks.

– **Kuidas päikeseplatade toodab energiat ilma kütust või liikuvaid osi tarbimata?**

Footonienergia otsene muundamine laengute eraldumiseks kvantneeldumise kaudu ja seejärel nende





eraldatud laengute eraldamine vooluna metalliliste kontaktide kaudu – tahkisenergia muundamine ilma mehaaniliste või keemiliste muutusteta.

Vastused selguvad rühmaarutelu ja kvantmõõtmelise laengukandjate genereerimise ning makroskoopiliste elektriliste mõõtmiste võrdlemise kaudu.

Tund lõpeb mõtisklusega teemal **fotogalvaanilise tehnoloogia areng**. Õpilased võrdlevad esimese põlvkonna kristallilise räni elemente uute tehnoloogiatega:

Tehnoloogia	Tõhusus	Eelised	Väljakutsed
Kristalliline räni	15–22%	Küps, stabiilne, skaleeritav	Ressursimahukas, jäik
Õhuke kile (CdTe, CIGS)	10–15%	Paindlik, kerge	Madalam efektiivsus, mürgised materjalid
Perovskiit	20–26% (labor)	Kõrge efektiivsus, odav töötlemine	Stabiilsus, lagunemine, pliisisaldus
Mitmeühendus (GaAs)	30–47%	Ülikõrge efektiivsus	Kallis, kasutatakse kosmoses/kontsentraatorites

Mõtiskleme koos. Kas tänapäevased päikeseenergia tehnoloogiad lähenevad tõepoolest fundamentaalsetele füüsikalistele piiridele või on materjaliteaduses ja seadmete arhitektuuris ruumi läbimurreteks? Kas me saame konstrueerida elemente, mis muundavad tõhusalt kõiki päikeseenergia lainepikkusi, või piirab spektraalne mittevastavus alati ühe ühenduskohaga süsteeme? Kuidas mõjutavad majanduslikud ja keskkonnategurid (tootmisenergia, haruldased materjalid, ringlussevõtt), millised tehnoloogiad globaalselt levivad?

Tegevused:

Lõputegevuste eesmärk on õpitu kinnistamine ja eakaaslaste koostöö ergutamine.

Tegevus 1: Mõistekaart

Õpilased loovad **kontseptsioonikaart** kujutab fotogalvaanilise muundamise täielikku järjestust footonist elektrienergiaks, näidates iga faasi kohta:

- **Seefüüsikaline nähtus** (neeldumine, ergastamine, eraldamine, vool)
- **Seekaasatud materjal/struktuur** (pooljuht, P-N-siire, kontaktid, vooluring)
- **Seeenergia tüüp** (footon → kineetiline → potentsiaal → elektriline)

Tegevus 2: Liitreaalsuse kogemus





Õpilased kogeavad Delightex Studio – Spaces (Marker) abil täielikku liitreaalsuse teekonda läbi fotogalvaanilise muundamise protsessi. Liitreaalsuse harjutus juhendab õpilasi läbi viie järjestikuse stseeni, mis visualiseerivad päikeseenergia muundamise iga etappi:

1. **stseen** Sissejuhatus animeeritud päikese ja START-nupuga
2. **stseen** Footonite saabumine ja energiavajadus (keeldumisriba lävi)
3. **stseen** P-N-siirde struktuur ja laengute eraldumine
4. **stseen** Voolu liikumine läbi välise vooluahela ja energia edastamine koormusele
5. **stseen** Lõplik hindamine järjestikuste kontseptuaalsete viktoriinidega

Iga stseen sisaldab visuaalseid elemente (diagrammid, animeeritud osakesed, värvikoodiga sfäärid elektronide/aukude jaoks), selgitavaid tekstikihte ja interaktiivseid viktoriine kohese tagasisidega. Õpilased navigeerivad järjestikku nuppe puudutades, jälgides visuaalseid tagajärgi (värvide küllastumine valede vastuste korral, ilutulestikuefektid õnnestumise korral) ja vastates küsimustele footonite energialävede, p-n-siirde funktsiooni ja vooluringi käitumise kohta. Kogu teekond võtab aega umbes 5-7 minutit ja seda saab läbida individuaalselt või väikestes gruppides koostööks aruteluks.

Valikuline pikendus Väikestes rühmades saavad õpilased kujundada järeltegevusi, mis keskenduvad edasijõudnutele teemadele, nagu peegeldusvastased katted, mitme ühenduskohaga elemendid või reaalsed päikesepaneelide paigaldused, lisades oma selgitavaid tekste ja visuaalseid indikaatoreid.

Tegevus 3: Interaktiivne viktoriin

Igas etapis arusaamise kontrollimiseks hõlmab liitreaalsuse kogemus järgmist: **integreeritud viktoriinid kohese visuaalse tagasisidega** Õpilased vastavad järjestikuste stseenide sees olevatele valikvastustega küsimustele:

2. stseeni viktoriin:

- Mis määrab, kas footon suudab elektrit genereerida?
(Õige: footoni energia vs keelutsoon)

3. stseeni viktoriin:

- Mis tekitab elektrivälja, mis eraldab laengukandjaid?
(Õige: P-N-siirde doping)

4. stseeni viktoriin:

- Miks vool peatub, kui päikesepaneel kinni katame?
(Õige: footoneid pole = elektron-auk paare pole tekkinud)

5. stseen Lõpphindamine (3 järjestikust viktoriini):





1. Kuidas me suurendame väljundpinget?
(Parandatud: Ühendage rakud järjestikku)
2. Miks ei saa infrapunased footonid ränis voolu tekitada?
(Õige: $E_{\text{energia}} < \text{keelutsoon } 1,1 \text{ eV juures}$)
3. Mis takistab elektronaugu rekombinatsiooni?
(Õige: P-N-siirde elektriväli)

Iga viktoriin pakub **visuaalne tagasiside** Õiged vastused säilitavad erksad värvid ja võimaldavad edasiliikumist järgmisele stseenile, samas kui valed vastused käivitavad visuaalsed tagajärjed (desaturation, animatsiooni peatamine) ja võimaldavad piiramatul hulgal uuesti proovimisi, julgustades arutlema ilma karistusteta

Valikulised aruteluküsimused edasijõudnute uurimiseks:

- Miks varjutus vähendab jadamisi ühendatud elementides voolutugevust, aga mitte pinget?
- Mis piirab ühe ristmikuga päikesepatareide maksimaalset efektiivsust?
- Kuidas ületavad mitme ühenduskohaga rakud Shockley-Queisseri piiri?

Tegevus 4: Plenaarne arutelu

Moodul sulgub a-gap **plenaaristung**us õpilased:

- Analüüsige kriitiliselt simulatsioonide ja liitreaalsuse kogemuste tulemusi
- Võrdle fotogalvaanilist muundamist teiste energiatehnoloogiatega (fossiilkütused, tuul, hüdroenergia)
- Mõelge päikeseenergia rollile globaalses dekarboniseerimises ja jätkusuutlikkuses
- Arutage kompromisse efektiivsuse, kulude, keskkonnamõju ja skaleeritavuse vahel

Oodatav väljund

Operatsioonimooduli lõpuks peaksid õpilased olema võimelised:

- Kirjeldage teaduskeeles fotogalvaanilise muundamise täielikku järjestust alates footonite neeldumisest kuni elektrivoolu tekkimiseni.
- Seostada kvantfüüsika (keeldumisriba, footonienergia, laengukandjad) makroskoopilise elektrilise käitumisega (pinge, vool, võimsus)
- Kasutage digitaalseid ja liitreaalsuse tööriistu keerukate aatomiskaala nähtuste kujutamiseks ja energiavoo visualiseerimiseks fotogalvaaniliste süsteemide kaudu
- Arendada kriitilist lähenemist päikeseenergia tehnoloogiatele, mõistes nende füüsikalisi piire, tehnilisi kompromisse ja ühiskondlikke tagajärgi taastuvenegiale üleminekul





4. Viited

TED-Ed, Kuidas päikesepaneelid töötavad? (animeeritud video) Fotogalvaaniliste elementide, p-n-siirde ja elektronide voo selge selgitus. Saadaval aadressil: <https://www.youtube.com/watch?v=xKxrkt7CpY>

USA energeetikaministeerium (DOE), päikeseenergia fotogalvaanika tehnoloogia

alused Energiatõhususe ja taastuvenergia büroo. Saadaval aadressil: <https://www.energy.gov/eere/solar/solar-photovoltaic-technology-basics>

Colorado Ülikool Boulderis - PhET Interaktiivsed simulatsioonid, fotoelektriline efekt Valguse footonenergia, elektronide väljutamise ja kvantomaduste interaktiivne uurimine. Saadaval aadressil: <https://phet.colorado.edu/en/simulations/photoelectric>

Encyclopædia Britannica, päikeseplatari Päikeseplatari struktuuri, tööpõhimõtte ja materjalide põhjalik ülevaade. Saadaval aadressil: <https://www.britannica.com/technology/solar-cell>

Riiklik taastuvenergia labor (NREL), fotogalvaanika uuringud USA energeetikaministeerium. Saadaval aadressil: <https://www.nrel.gov/pv/>

Riiklik taastuvenergia labor (NREL), parimate uurimisrakkude efektiivsuse diagramm Erinevate fotogalvaaniliste tehnoloogiate ajakohastatud rekordilised efektiivsusnäitajad. Saadaval aadressil: <https://www.nrel.gov/pv/cell-efficiency.html>

NASA, kuidas NASA päikeseenergiat kasutab ja täiustab Saadaval aadressil: <https://science.nasa.gov/sun/how-nasa-uses-and-improves-solar-power>

Delightex Studio - Spaces (Marker), hariduslik AR-platvorm interaktiivsete stseenide loomiseks Saadaval aadressil: <https://edu.delightex.com/Studio/Spaces>

Shockley, W. ja Queisser, H. J. (1961). P-n-siirdega päikeseplatari efektiivsuse detailne tasakaalupiir. Journal of Applied Physics, 32(3), 510-519. Saadaval aadressil: <https://doi.org/10.1063/1.1736034>

Green, M. A. jt (2024) Päikeseplatari efektiivsuse tabelid (versioon 63). Progress in Photovoltaics: Research and Applications, 32(1), 3-13. Saadaval aadressil: <https://doi.org/10.1002/pip.3750>

MIT OpenCourseWare, fotogalvaanika alused Loengukonspektid ja videomaterjal pooljuhtide füüsikast ja päikeseplatari disainist. Saadaval aadressil: <https://ocw.mit.edu/courses/2-627-fundamentals-of-photovoltaics-fall-2013/>

Rahvusvaheline Energiaagentuur (IEA), päikesepaneelide tehnoloogia aruanne Globaalsed trendid, prognoosid ja tehnoloogiaanalüüs. Saadaval aadressil: <https://www.iea.org/reports/solar-pv>



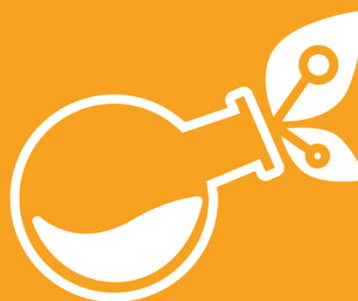


Pildi autorid: Wikimedia Commons (CC BY-SA / Avalik omand), Riiklik Taastuvenergia Laboratoorium (NREL), USA Energeetikaministeerium, Encyclopædia Britannica ja NASA õppematerjalid – hariduslik kasutus.





Co-funded by
the European Union



BIOS4YOU AR 2.0

BIO-INSPIRED STEM TOPICS FOR ENGAGING YOUNG GENERATIONS
THANKS TO THE USE OF AUGMENTED REALITY



Project Number: KA220-BW-23-30-126516

Funded by the European Union. Views and opinions expressed are however those of the author(s) only and do not necessarily reflect those of the European Union or the European Education and Culture Executive Agency (EACEA). Neither the European Union nor EACEA can be held responsible for them.