



Co-funded by
the European Union

Fotovoltinė kelionė: Saulės fiksavimas

(DiFC) – Palermo universitetas



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."





Turinys

1. Fotovoltinė kelionė: Saulės gaudymas	3
Energijos konversija saulės elementuose; iš fotonų į elektronus; fotovoltinių sistemų fizika	3
2. Tyrinėjimas	4
Įsitraukimo etapas	4
Minčių generavimo veikla klasėje	5
Pagrindinis lygis	6
Saulės energijos konversijos fizika	6
Nuo fotonų iki elektronų: PN sandūra	8
Sluoksniuota struktūra ir krūvio surinkimas	9
Nuo sandūros iki grandinės: srovė ir įtampa	10
Nuo teorijos iki kasdienių daiktų	10
Žiniatinklio ištekliai	11
Pažengęs lygis	11
Apverstas mokymasis:	13
3. Taikymas	14
Pagrindinis lygis	14
Pažengęs lygis	16
Veikla:	17
4. Literatūra	19





Bendra mokymosi kelio tema	Fotovoltinė kelionė: Saulės gaudymas
Konkretus mokymosi vieneto pavadinimas	Energijos konversija saulės elementuose; iš fotonų į elektronus; fotovoltinių sistemų fizika
Tikslinių vartotojų amžius	17–19 metų
Reikalavimai besimokančiajam	Pagrindinės fizikos žinios (elektromagnetinės bangos, energija, elektros srovė ir įtampa), chemijos žinios (atominė sandara, elektronai, cheminiai ryšiai) ir įvadinės elektros bei energijos virsmo sąvokos.
Mokymosi vieneto aprašymas	Šis modulis veda mokinius ir mokytojus tarpdisciplininiu keliu, integruodamas fiziką, chemiją ir technologijas, siekiant suprasti, kaip saulės energija yra surenkama ir paverčiama elektros energija fotovoltinių elementų pagalba. Mokiniai tyrinės fotonų kelią nuo saulės šviesos iki elektros srovės generavimo, analizuodami saulės elementų sluoksniuotą struktūrą (PN sandūra, puslaidininkiai), fotovoltinį efektą ir elektronų srauto mechanizmus. Skaitmeninių ir papildytosios realybės įrankių naudojimas skirtas kitaip nematomiems procesams (fotonų absorbcijai, elektronų ir skylių porų generavimui, elektriniam laukui sandūroje, srovės tekėjimui) padaryti matomus, aiškiai ir palapysniui susiejant fizikinius principus su technologiniais pritaikymais tvariai energijos gamybai.
Tema: Dalyvaujančios šalys	Fizika (optika, elektromagnetizmas), chemija (puslaidininkinės medžiagos), technologijos (fotovoltinė inžinerija), tvarumas (atsinaujanti energija)





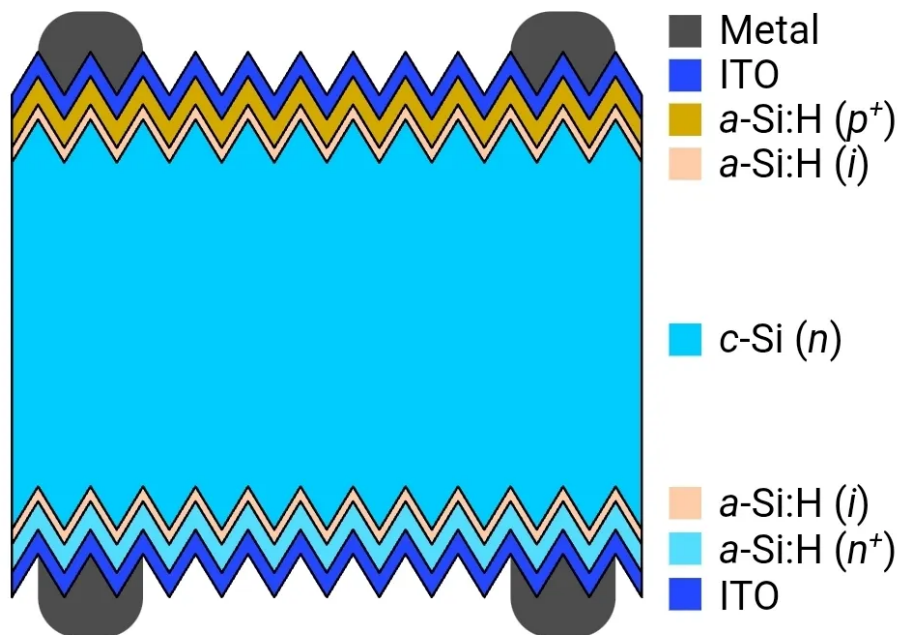
Raktiniai žodžiai	Saulės energija; Fotovoltinis elementas; Fotonai; Elektronai; PN sandūra; Puslaidininkiai; Energijos konversija; Elektros srovė; Atsinaujinanti energija; AR; Scenomis pagrįstas mokymasis
Pagrindinės kvalifikacijos, įgūdžiai ir žinios, kurias galima įgyti	• Energijos konversijos procesų samprotavimai ir problemų sprendimas • Dizaino mąstymas, taikomas nuosekliam fizinių reiškinių vizualizavimui • Praktinės žinios: fotovoltinis efektas, puslaidininkių fizika, saulės elementų sandara, elektros grandinės • Skaitmeniniai / papildytosios realybės įgūdžiai: atominio masto procesų 3D vizualizavimas, interaktyvios diagramos, scenos navigacija
Naudoti ištekliai ir didaktinės priemonės	AR platformos (pvz., „Delightex Studio – Spaces“, „Marker“), patikimi internetiniai ištekliai ir mokomieji vaizdo įrašai apie saulės energiją ir fotovoltinę energiją, moksliniai straipsniai ir duomenų bazės; diagramos ir 3D modeliai (saulės elementų sluoksniai, PN sandūra, elektronų srautas, fotovoltinės sistemos) ir tekstinės pagrindinių duomenų perdangos.
Vertinimo kriterijai ir vertinimas	Žinių (fotonų, elektronų ir srovių seka), įgūdžių (priežasties ir pasekmės ryšiai tarp fotonų sugerties ir elektros energijos generavimo) ir kompetencijų (sąmoningas papildytosios realybės įrankių naudojimas, tarpdisciplininė fizikos ir tvariosios energijos technologijų integracija) vertinimas.



1. Fotovoltinė kelionė: Saulės gaudymas

Energijos konversija saulės elementuose; iš fotonų į elektronus; fotovoltinių sistemų fizika

Saulės energijos konversija kyla iš kvantinės fizikos ir medžiagų inžinerijos sankirtos. Saulės šviesa, sudaryta iš fotonų, pernešančių atskirus energijos paketus, atsitrenkia į fotovoltinės baterijos paviršių ir sąveikauja su puslaidininkinėmis medžiagomis.



1 pav. Silicio heterosandūros saulės elemento skerspjūvio struktūra su sluoksniuota architektūra. N tipo kristalinis silicis (c-Si) sudaro pagrindinį sugeriamąjį sluoksnį su plonais amorfinio silicio (a-Si:H) pasyvavimo sluoksniais ir skaidriais ITO kontaktais. (Šaltinis: „Wikimedia Commons“, CC BY-SA 4.0)

Čia fotonai yra sugeriami, susidarant elektronų ir skylių poroms, kurios, veikiamos vidinio elektrinio lauko, atsiskiria ir teka išorine grandine. Saulės energijos panaudojimas nereiškia pasyvaus šilumos rinkimo, o aktyvaus šviesos pavertimo naudinga elektros srove per tiksliai sukonstruotas atominio mastelio struktūras.

Energijos konversijos efektyvumas priklauso nuo medžiagos savybių ir saulės elemento architektūros. Silicis, dažniausiai naudojamas puslaidininkis, yra „legiruojamas“ priemaišomis, kad būtų sukurti du skirtingi regionai: N tipo sluoksnis (prisotintas elektronais) ir P tipo sluoksnis (prisotintas skylėmis). Šių sluoksnių sąsajoje – PN sandūroje – natūraliai susidaro elektrinis laukas. Šis laukas yra būtinas: jis sukuria varomąją jėgą, kuri atskiria fotogeneruotus elektronus ir skyles, neleisdama jiems rekombinuotis ir užtikrindama, kad krūvininkai tekėtų tam tikra kryptimi, kad susidarytų srovė.





Fotovoltinis efektas prasideda, kai pakankamai energijos turintis fotonas atsitreikia į puslaidininkinę medžiagą. Jei fotono energija viršija draudžiamąją juostą – minimalią energiją, reikalingą elektronui išlaisvinti iš atominio ryšio – elektronas iš valentinės juostos perkeliamas į laidumo juostą, palikdamas teigiamai įkrautą „skylę“. Ši elektrono ir skylės pora yra pagrindinis saulės energijos konversijos vienetas: šviesos energija paverčiama krūvio atskyrimu atominame lygmenyje.

PN sandūra veikia kaip vienpusiai vartai krūvininkams. Įmontuotas elektrinis laukas stumia elektronus link N tipo srities, o skylės link P tipo srities. Kai metaliniai kontaktai pritvirtinami prie abiejų pusių ir sujungiami per išorinę grandinę, elektronai teka iš N pusės per grandinę į P pusę, generuodami elektros srovę. Vieno silicio elemento sukuriama įtampa yra maždaug 0,5–0,6 volto; keli elementai yra sujungti nuosekliai, kad būtų pasiekta aukštesnė įtampa, tinkama praktiniam pritaikymui.

Energijos išeigai ir efektyvumui įtakos turi keli veiksniai: įeinančios šviesos intensyvumas ir spektras, puslaidininkinių medžiagų kokybė, elemento temperatūra ir antirefleksinių dangų, kurios maksimaliai padidina fotonų absorbciją, konstrukcija. Šiuolaikiniai silicio saulės elementai pasiekia 15–22 % efektyvumą, o tai reiškia, kad tik dalis krintančios saulės energijos paverčiama elektra. Pažangios medžiagos, tokios kaip perovskitai ir daugiasandariai elementai, padidina efektyvumą, tačiau kompromisai dėl kainos, stabilumo ir gamybos sudėtingumo išlieka aktyviomis tyrimų sritimis. Edukaciniu požiūriu labai svarbu išsiaiškinti nuoseklią įvykių grandinę: (1) fotonai pasiekia ląstelės paviršių ir jį prasiskverbia; (2) pakankamai energijos turintys fotonai puslaidininkyje sukuria elektronų ir skylių poras; (3) elektrinis laukas PN sandūroje atskiria šiuos krūvininkus; (4) elektronai teka išorine grandine, sukurdami elektros srovę; (5) energija tiekama į apkrovą (lempą, bateriją, tinklą). Šių žingsnių pateikimas tvarkingai padeda mokiniams susieti kvantinio masto reiškinius su makroskopine energijos generacija.

Tikslingas skaitmeninių ir papildytos realybės įrankių naudojimas leidžia vizualizuoti kitaip nematomus procesus, tokius kaip fotonų absorbcija atominame lygmenyje, išieškojimo srities susidarymas PN sandūroje ir elektronų srauto kryptis grandinėje. Vizualizacija kiekvienoje scenoje palengvina mikroskopinės fizikos ir didelio masto atsinaujinančios energijos sistemų ryšių supratimą.

Apmąstykite kartu.

Kodėl negalime išgauti elektros energijos iš saulės šviesos be puslaidininkių? Kaip PN sandūra transformuoja atsitiktinę fotonų absorbciją į nukreiptą elektronų srautą? Kokį vaidmenį draustminės juostos energija atlieka nustatant, kuriuos šviesos bangos ilgius galima paversti elektra? Šie klausimai padeda susieti stebimus saulės energijos reiškinius su pagrindiniais kvantiniais ir elektriniais mechanizmais.

2. Tyrinėjimas

Įsitraukimo etapas

Pagrindinis klausimas. *Ar galime išgauti elektrą iš saulės šviesos be judančių dalių?*

Pamoka pradedama trumpa demonstracija: maža saulės baterija, prijungta prie šviesos diodo arba skaičiuotuvo. Apšviesta šviesa, prietaisas veikia; uždegta – nustoja veikti. Tikslas ne tik parodyti, kad





„saulės baterijos veikia“, bet ir pristatyti idėją, kad šviesos energiją galima tiesiogiai paversti elektros energija taikant kietojo kūno fiziką – nereikia jokių turbinų, degimo, mechaninio judėjimo.

Pradiniai stimulai (vaizdo įrašai ir trumpi ištekliai)

Kaip veikia saulės baterijos? TED-Ed : aiški animuota fotovoltinių elementų, PN sandūros ir elektronų srauto apžvalga.

<https://www.youtube.com/watch?v=xKxrkt7CpY>

Saulės energijos pagrindai – JAV Energetikos departamentas : prieinamas įvadas į fotovoltinę technologiją ir atsinaujinančios energijos sistemas.

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

Fotoelektrinis efektas : interaktyvus fotonų, sąveikaujančių su metaliniais paviršiais ir išstumiančių elektronus, tyrimas, demonstruojant šviesos kvantines savybes.

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

Įžanginė veikla (5–10 min.).

Trumpa demonstracija arba vaizdo įrašas, kuriame parodyta, kaip saulės baterija maitina nedidelį variklį arba įkrauna bateriją, skatina mokinius paklausti: „*Kaip šviesa tampa elektra nejudinant laidų ar nereaguojant cheminėms medžiagoms?*“

Tikslas – pabrėžti, kad **energijos konversija yra kvantinis procesas**, vykstantis atominame lygmenyje puslaidininkinėse medžiagose, o ne makroskopinė mechaninė ar terminė transformacija.

Siūlomas vaizdo įrašas: Kaip veikia saulės baterijos (SciShow)

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

Minčių generavimo veikla klasėje

Pagrindinis klausimas. Be šviesos nėra fotovoltinės srovės: kas nutinka fotonams, kai jie patenka į saulės elementą, ir kaip jie generuoja elektrinį signalą, galintį maitinti įrenginius?

Provokuojantys klausimai

Kas lemia, ar fotonas gali generuoti elektrą saulės elemente?

Fotono energija turi viršyti puslaidininkio draudžiamąją juostą; silicio draudžiamoji juosta (~1,1 eV) reiškia, kad tik fotonai, kurių bangos ilgis trumpesnis nei ~1100 nm (matoma ir artimoji infraraudonoji šviesa), gali išlaisvinti elektronus ir generuoti srovę.

Kodėl negalime panaudoti visos saulės šviesos, krintančios ant saulės baterijos?

Nes fotonai, kurių energija yra mažesnė už draustosios juostos energiją, praeina pro ją nesukurdami





krūvininkų, o fotonai, kurių energija yra daug didesnė, perteklinę energiją eikvoja kaip šilumą. Štai kodėl vienos sandūros silicio elementų teorinis maksimalus efektyvumas yra ~33 % (Shockley- Queisser riba).

Ar saulės elementas „kaupia“ elektrą kaip baterija?

Ne; saulės elementas generuoja srovę tik tada, kai yra apšviestas. Fotovoltinis efektas sukuria krūvio atskyrimą ir srautą realiuoju laiku; energijai kaupti reikalinga išorinė baterija arba kondensatorius.

Kodėl kai kurie saulės elementai veikia geriau tiesioginiuose saulės spinduliuose nei pavėsyje?

Nes šviesos intensyvumas (fotonų srautas) tiesiogiai veikia susidarančių elektronų ir skylių porų skaičių. Mažesnis intensyvumas reiškia mažiau fotonų, mažiau krūvininkų ir mažesnę srovės išvestį. Įtampa išlieka santykinai stabili, tačiau srovė gerokai sumažėja.

Mikroužduotis.

Pažymėkite saulės elemento sluoksnius (antirefleksinė danga, N tipo silicis, PN sandūra, P tipo silicis, galinis kontaktas) naudodami darbalapį arba interaktyvią diagramą.

Siūlomas šaltinis: Saulės elemento struktūros schema - Encyclopædia Britannica

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

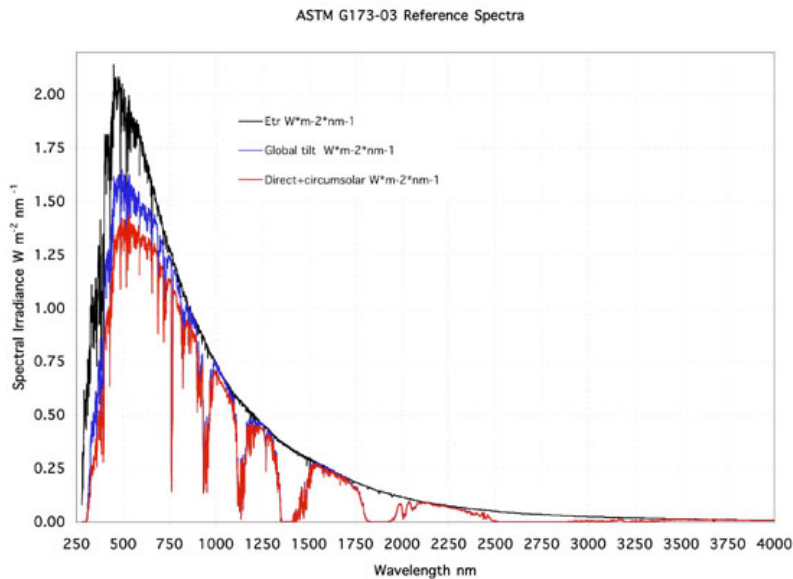
Pagrindinis lygis

Saulės energijos konversijos fizika

Šviesa, absorbcija ir fotonų energija

Saulės energija pradeda virsti, kai saulės šviesos fotonai atsitrenkia į fotovoltinio elemento paviršių. Saulės šviesa yra elektromagnetinių bangų, apimančių ultravioletinių, matomų ir infraraudonųjų spindulių bangas, mišinys. Kiekvienas fotonas neša atskirą energijos paketą, kurį lemia jo bangos ilgis: trumpesni bangos ilgiai (mėlyna šviesa) neša daugiau energijos nei ilgesni bangos ilgiai (raudona šviesa).

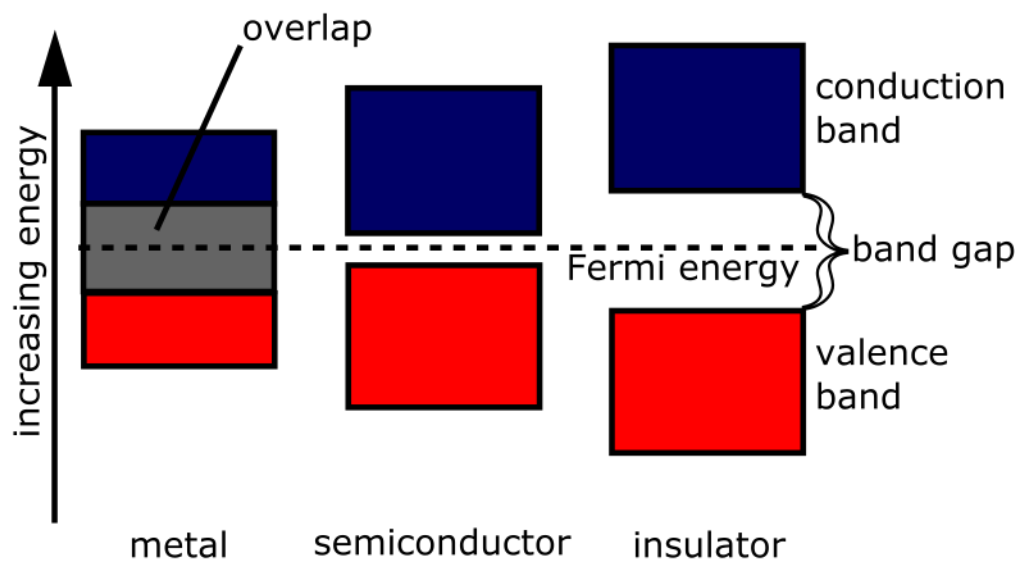




2 pav. Saulės spektrinis apšvitos stipris (ASTM G173-03 etaloniniai spektrai), rodantis fotonų energijos pasiskirstymą pagal bangos ilgius. Silicio saulės elementai, kurių draudžiamasis tarpas yra $\sim 1,1$ eV (atitinkantis ~ 1100 nm bangos ilgį), gali konvertuoti tik matomus ir artimojo infraraudonojo spektro fotonus. (Šaltinis: NREL)

Kai fotonas patenka į puslaidininkinę medžiagą, tokią kaip silicis, jis gali būti absorbuojamas, atspindėtas arba praleistas.

Absorbicija yra esminis dalykas : jei fotono energija lygi arba viršija medžiagos draudžiamosios juostos energiją (minimalią energiją, reikalingą elektronui išlaisvinti iš atominio ryšio), elektronas perkeliamas iš valentinės juostos į laidumo juostą.



3 pav. Energijos juostų struktūrų palyginimas metaluose, puslaidininkiuose ir izoliatoriuose. Pusalaidininkiuose, tokiuose kaip silicis, draudžiamoji zona (pvz., $\approx 1,1$ eV) yra pakankamai maža, kad fotonai galėtų sužadinti





elektronus iš valentinės juostos (raudona) į laidumo juostą (mėlyna), taip sudarydami sąlygas fotovoltinei energijos konversijai. (Šaltinis: „Wikimedia Commons“, viešoji nuosavybė)

Tai sukuria **elektronų ir skylių porą** – mobilių neigiamą krūvį (elektroną) ir atitinkamą teigiamą vakansiją (skylę).

Kas lemia, ar fotonas yra absorbuojamas, ar praeina?

Fotonų energijos ir puslaidininkio draustinio tarpo sąryšis. Silicio draustinio tarpo plotas yra $\sim 1,1$ eV, tai atitinka infraraudonųjų spindulių šviesą, kurios bangos ilgis yra ~ 1100 nm. Mažesnės energijos fotonai praeina; daug didesnės energijos fotonai, išlaisvinę elektronus, generuoja šilumą.

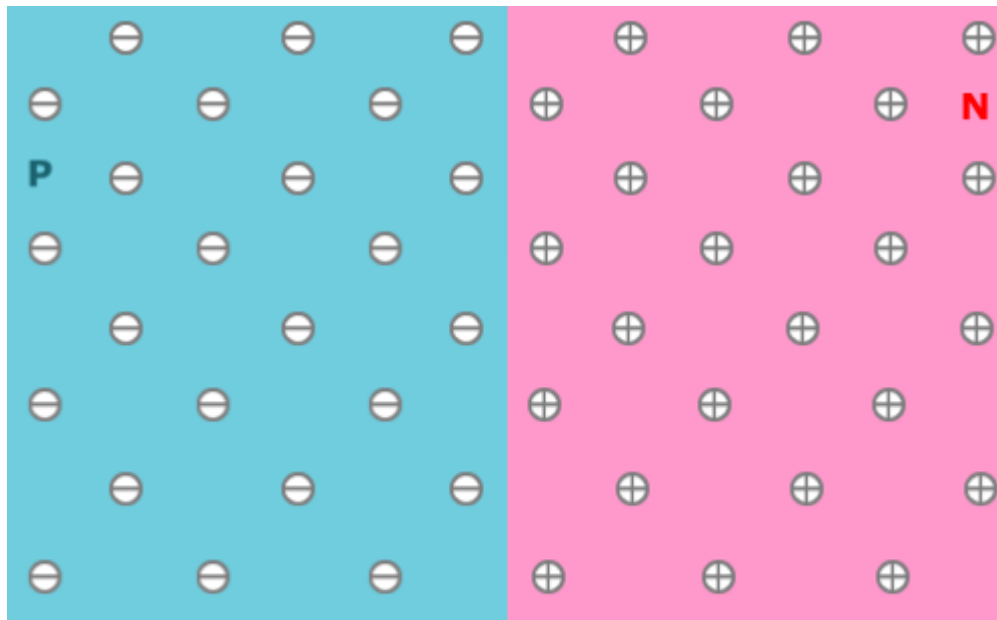
Nuo fotonų iki elektronų: PN sandūra

Sugertas fotonas sukuria elektronų ir skylių porą, tačiau be vidinio elektrinio lauko šie krūviai greitai rekombinuotųsi, išskirdami energiją šilumos, o ne elektros pavidalu. Čia būtina **PN sandūra**.

Silicis yra „legiruotas“ priemaišomis, kad būtų sukurti du skirtingi regionai:

- **N tipo silicis** : legiruotas fosforu (papildomi elektronai → neigiamas krūvininkas)
- **P tipo silicis** : legiruotas boru (elektronų deficitas → teigiamos „skylės“)

Riboje tarp N ir P tipų sričių **natūraliai susidaro išėjimo zona**. Elektronai iš N pusės difunduoja ir užpildo skylės P pusėje, palikdami teigiamai įkrautus atomus N pusėje ir neigiamai įkrautus atomus P pusėje. Šis krūvių atskyrimas sukuria **vidinį elektrinį lauką**, nukreiptą iš N į P.

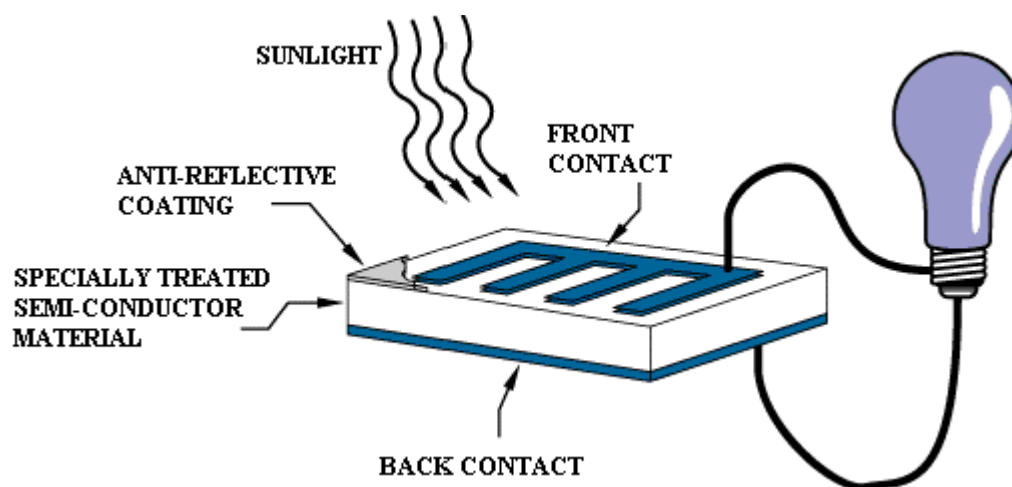


4 pav . Scheminis PN sandūros vaizdas prieš pusiausvyrą. P tipo srityje (kairėje, žydra) yra skylių perteklius (teigiami krūvininkai), o N tipo srityje (dešinėje, rožinė) – elektronų perteklius (neigiami krūvininkai). Kai šios dvi sritys susiliečia, krūvininkai difunduoja per sandūrą. (Šaltinis: PVEducation.org, edukacinis naudojimas)

Kai fotonas šalia sandūros sukuria elektrono ir skylės porą, elektrinis laukas stumia elektroną link N pusės, o skylę – link P pusės. **Šis atsiskyrimas užkerta kelią rekombinacijai** ir varo krūvininkus priešingomis kryptimis, sukurdamas įtampos skirtumą tarp dviejų ląstelės pusių.

Kodėl elektronų ir skylių poros atsiskiria, o ne iš karto susijungia?

Nes PN sandūros elektrinis laukas sukuria varomąją jėgą, stipresnę nei atsitiktinis šiluminis judėjimas, nukreipiančią elektronus ir skyles tolyn vieną nuo kito, kol jie dar nespėjo rekombinuoti.



5 pav . Visas saulės elemento veikimas, rodantis saulės šviesos virsmą elektros srove. Fotonai prasiskverbia pro neatspindinčią dangą į puslaidininkinę medžiagą, sukurdami elektronų ir skylių poras, kurias skiria vidinis elektrinis laukas. Elektronai teka per išorinę grandinę (kurią vaizduoja lemputė), o tada grįžta ir rekombinuoja, sukurdami naudojamą elektros energiją. (Šaltinis: „Wikimedia Commons“, viešojo nuosavybė)

Sluoksniuota struktūra ir krūvio surinkimas

Tipiškas silicio saulės elementas turi kelis sluoksnius, optimizuotus šviesos absorbcijai ir krūvio surinkimui:

Antirefleksinė danga (viršuje): sumažina atspindžius, maksimaliai padidindama fotonų patekimą

N tipo silicis (plonas sluoksnis): elektronų turtinga sritis, kurioje surenkami elektronai

PN sandūra (sąsaja): vieta, kur elektrinis laukas atskiria krūvininkus

P tipo silikonas (storesnis pagrindas): kur surenkamos skylės

Metaliniai kontaktai (viršuje ir apačioje): veda elektronus į išorinę grandinę

Priekinis kontaktas yra tinklelio formos, kad būtų sumažintas šešėliavimas surenkant srovę. Galinis kontaktas dengia visą galinį paviršių, kad būtų užtikrintas maksimalus laidumas.





Kodėl N sluoksnis yra plonesnis nei P sluoksnis?

Kadangi dauguma fotonų yra sugeriami netoli paviršiaus, plonas N sluoksnis užtikrina, kad fotogeneruoti krūvininkai būtų arti sandūros elektrinio lauko, kad būtų galima efektyviai juos atskirti, o storesnis P sluoksnis sugeria ilgesnio bangos ilgio fotonus giliau į medžiagą.

Nuo sandūros iki grandinės: srovė ir įtampa

Kai ląstelę apšviečia apšviesti saulės spinduliai, nuolatinė fotonų absorbcija sukuria nuolatinį elektronų ir skylių porų tiekimą. Sandūros elektrinis laukas nuolat atskiria šiuos krūvius, stumdamas elektronus link N pusės, o skylės – link P pusės.

Kai metaliniai kontaktai prijungiami ir sujungiami per išorinę grandinę, **elektronai teka iš N pusės per grandinę (maitindami apkrovą) ir grįžta į P pusę**, kad rekombinuotųsi su skylėmis. Šis srautas sudaro **fotovoltinę srovę**.

Vieno silicio elemento sukuriamą įtampą yra maždaug **0,5–0,6 voltu**, kurią lemia draudžiamosios juostos energija ir sandūros charakteristikos. Srovė priklauso nuo šviesos intensyvumo ir elemento ploto: daugiau fotonų → daugiau elektronų ir skylių porų → didesnė srovė.

Jei vienas elementas gamina tik ~0,5 V, kaip saulės baterijos generuoja naudingą įtampą?

Keli elementai yra sujungti **nuosekliai** (vieno elemento teigiamas polius su kito neigiamu poliumi), kad būtų sukurta įtampa. Įprastoje saulės baterijoje yra 60–72 elementai, sujungti nuosekliai, kurie standartinėmis sąlygomis gamina 30–40 voltų.

Nuo teorijos iki kasdienių daiktų

Tie patys saulės baterijų veikimo principai yra ir šiose baterijose:

- **Saulės skaičiuotuvai** : maži elementai, tiekiantys milivatų galią mažai energijos naudojančioms prietaisams
- **Stoginės saulės baterijos** : nuosekliai sujungtų elementų masyvai, generuojantys kilovatus namams
- **Saulės jėgainės** : didelio masto įrenginiai, gaminantys megavatus elektros tinklui
- **Kosminiai palydovai** : didelio efektyvumo daugiasandrės ląstelės, maitinančios erdvėlaivius, kur patikimumas yra labai svarbus

Kvantinės fizikos perteikimas ne tik padeda studentams suprasti, *kaip* veikia fotovoltinė energija, bet ir *kodėl* projektavimo pasirinkimai (draudžiamosios juostos pasirinkimas, antirefleksinės dangos, elementų storis) tiesiogiai veikia realų energijos vartojimo efektyvumą.

Apmąstykite kartu.

Saulės šviesos pavertimas elektra reikalauja tikslaus valdymo atominiu lygmeniu. Jei PN sandūra yra būtina krūvio atskyrimui, kodėl negalime naudoti jokio puslaidininkio? Kokį vaidmenį legiravimas atlieka kuriant





vidinį elektrinį lauką? Kaip temperatūra, šėšėliavimas ir medžiagos kokybė veikia energijos konversijos efektyvumą?

Žiniatinklio ištekliai

Kaip veikia saulės baterijos? – TED-Ed

<https://www.youtube.com/watch?v=xKxrkt7CpY>

Animuotas fotovoltinių elementų ir elektronų srauto paaiškinimas.

Saulės fotovoltinės technologijos pagrindai – JAV Energetikos departamentas

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

FV technologijos ir saulės energijos konversijos apžvalga.

PhET – fotoelektrinis efektas

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

Interaktyvus fotonų energijos ir elektronų išstūmimo tyrimas.

Pažengęs lygis

Fotovoltinės konversijos kvantinė mechanika.

Fotovoltinis efektas iš esmės yra kvantinis reiškinys. Kai fotoną sugeria silicio atomas, jo energija turi įveikti **draustminės juostos energiją** (pvz., $\approx 1,1$ eV kristaliniam siliciui), kad elektronas būtų perkeltas iš valentinės juostos į laidumo juostą. Šis procesas sukuria **elektrono ir skylės porą**, kurios tikimybę lemia medžiagos sugerties koeficientas ir fotono energija.

Energijos nuostoliai vyksta keliais etapais:

- **Fotonai, kurių $E < E_g$** , praeina nesukurdami krūvininkų (pralaidumo nuostoliai)
- **Fotonai su $E \gg E_g$** generuoja „karštus“ krūvininkus, kurie greitai praranda energijos perteklių šilumos pavidalu dėl terminio **atšilimo**.
- **Paviršiaus atspindys** (be antirefleksinės dangos prarandama ~ 30 % krintančios šviesos)
- **Rekombinacija** (elektronų ir skylių poros rekombinuojasi prieš pasiekdamos kontaktus, išskirdamos energiją kaip šilumą arba šviesą)

Shockley - **Quesser riba** nustato teorinį maksimalų vienos sandūros saulės elemento efektyvumą, kuris esant standartiniam saulės spektrui (AM1.5G) yra apie 33 %. Realiuose silicio elementuose šis rodiklis pasiekia 15–22 % dėl papildomų nuostolių dėl varžos, netobulų medžiagų ir neidealių sandūros savybių.

Efektyvumas, spektrinis atsakas ir medžiagų optimizavimas.

Saulės elementų efektyvumas labai priklauso nuo to, kaip gerai puslaidininkio draudžiamasis tarpas atitinka Saulės spektrą. Silicio 1,1 eV draudžiamasis tarpas yra kompromisas: jis efektyviai sugauna matomą ir artimą infraraudonąją šviesą, tačiau negali panaudoti mažesnės energijos infraraudonųjų spindulių fotonų ar pilnai išnaudoti didelės energijos ultravioletinių fotonų.





Išplėstinės strategijos, kaip įveikti Shockley- Quesser ribą:

- **Daugiasandorės (tandeminės) ląstelės** : sudėkite puslaidininkius su skirtingais draudžiamaisiais tarpais (pvz., GaInP/GaAs/Ge), kad kiekvienas sluoksnis sugertų tam tikrą spektro dalį. Laboratorijos efektyvumas viršyti 47 % koncentruotoje saulės šviesa .
- **Perovskito ląstelės** : hibridinės organinės-neorganinės medžiagos su reguliuojamais draudžiamaisiais tarpais, greitu krūvio pernešimu ir tirpale apdorojama gamyba. Dabartinis tyrimas. efektyvumas artėja prie 26 %, bet stabilumas ir mastelio keitimas iššūkių išlieka .
- **Karštųjų nešiklių elementai** (eksperimentiniai): iš karštųjų nešiklių prieš terminizavimą išgaunama energija, kurios efektyvumas gali viršyti 66 %. Reikalingas itin greitas mokestis išgavimas mechanizmai ne dar komerciškai gyvybingas .

Kodėl didelės energijos fotonai sumažina bendrą efektyvumą?

Nes energijos perteklius virš draudžiamosios juostos greitai prarandamas kaip šiluma dėl fononų emisijos (termizacijos) per pikosekundes. 3 eV fotonas (UV) generuoja tokią pačią elektronų ir skylių porą kaip ir 1,2 eV fotonas (raudonas), iššvaistydamas 1,9 eV šilumos.

Kodėl negalime tiesiog panaudoti labai mažo draustinio tarpo visiems fotonams pagauti?

Nes mažesni draustiniai tarpai sukuria mažesnę įtampą ($V \propto E_g$), o šiluminė krūvininkų generacija padidėja, padidindama „tamsiąją srovę“, kuri sumažina grynąjį efektyvumą. Yra optimalus draustinis tarpas (~1,1–1,4 eV), kuris subalansuoja fotonų absorbciją ir įtampos išvestį.

Krūvio pernaša, rekombinacija ir prietaisų fizika

Po generavimo sandūroje krūvininkai turi keliauti iki kontaktų be rekombinacijos . **mechanizmai** riba efektyvumas :

- **Spinduliavimo rekombinacija** : elektronų ir skylių poros rekombinuojasi, spinduliuodamos fotonus (reikšminga tiesioginio draudžiamojo tarpo medžiagose, tokiose kaip GaAs, minimali silicyje)
- **Augerio rekombinacija** : trijų dalelių sąveika, kai energija perduodama trečiajam nešėjui, o ne spinduliuoja kaip šviesa (didėja esant dideliame nešėjų tankiui)
- **Šoklio-Redo-Holo (SRH) rekombinacija** : kristalinės gardelės gaudyklių nešėjų defektai ir priemaišos, palengvinančios rekombinaciją (vyrauja žemesnės kokybės silicyje)

Aukštos kokybės **kristalinis silicis** sumažina SRH rekombinaciją dėl kontroliuojamos gamybos. **Pasivavimo sluoksniai** (pvz., silicio nitridas, aliuminio oksidas) ant paviršių sumažina sąsajos rekombinaciją.

Legiravimo profiliai yra optimizuoti taip, kad elektrinis laukas apimtų visą aktyviąją sritį, užtikrinant greitą krūvininkų atskyrimą.

Kodėl temperatūra mažina saulės elementų efektyvumą?

Nes aukštesnė temperatūra padidina gardelės vibracijas (fononus), kurios išsklaido krūvininkus, sumažina judrumą ir padidina rekombinacijos greitį. Be to, draudžiamasis tarpas šiek tiek mažėja kylant





temperatūrai ($\sim -0,3$ meV /K siliciui), todėl sumažėja išėjimo įtampa. Tipinis efektyvumo sumažėjimas: $\sim 0,4$ % kiekvienam $^{\circ}\text{C}$, kai temperatūra viršija 25°C .

Sistemų integracija ir našumas realiame pasaulyje

Fotovoltinė sistema apima ne tik saulės elementus, bet ir:

- **Inverteriai** : konvertuoja nuolatinę srovę į kintamąją, kad būtų suderinami su tinklu
- **Maksimalios galios taško sekimas (MPPT)** : nuolat reguliuoja apkrovą, kad būtų išgaunama maksimali galia, keičiantis apšvietimo sąlygoms
- **Energijos kaupimas** (neprivaloma): baterijos kaupia perteklinę energiją nakties ar debesuotoms dienoms
- **Tinklo prijungimas** : perteklinės energijos tiekimas į elektros tinklą, dažnai taikant grynojo matavimo politiką

galios koeficientas (faktinė energijos išeiga / teorinė maksimali vertė) paprastai yra 15–25 %, kurį riboja:

- Dienos / nakties ciklai
- Orų kintamumas
- Sezoninis saulės kampo pokyčiai
- Sistemos nuostoliai (laidų varža, keitiklio neefektyvumas, šešėliavimas)

Kodėl saulės baterijos laikui bėgant susidėvi?

UV spindulių poveikis, drėgmės patekimas, terminiai ciklai ir potencialiai sukelta degradacija (PID) palaipsniui mažina efektyvumą. Aukštos kokybės moduliai praranda $\sim 0,5$ % efektyvumo per metus; garantijos paprastai garantuoja 80 % našumą po 25 metų.

Apmąstykite kartu

Kodėl šiuolaikiniai saulės elementai vis dar veikia gerokai žemiau Shockley- Queisser ribos?

Nes realiose medžiagose yra defektų, paviršiai sukelia rekombinaciją, o krūvio ištraukimas nėra idealiai efektyvus. Atotrūkio tarp teorinio ir praktinio veikimo mažinimas skatina nuolatinius medžiagų mokslo ir prietaisų inžinerijos tyrimus.

Kodėl net ir su tobulomis medžiagomis negalime pasiekti 100 % efektyvumo?

Nes galioja esminiai termodinaminiai ir kvantinės mechanikos apribojimai: ne visi fotonai gali būti absorbuojami (spektrinis neatitikimas), termizacija eikvoja didelės energijos fotonus, o įtamos išvesties palaikymui reikia tam tikros energijos išsklaidymo. Antrasis termodinamikos dėsnis galiausiai riboja konversijos efektyvumą.

Apverstas mokymasis:

Tikslas. Pasiruoškite diskusijai klasėje, suprasdami seką *fotonas* → *absorbicija* → *krūvio atskyrimas* → *srovės tekėjimas* ir fizikinius/inžinerinius ryšius fotovoltinėse sistemose.





Užduotys (pateikiamos kaip 1–2 puslapių ataskaita arba 6–8 skaidrės):

1. **Trumpas** silicio saulės elemento struktūros ir fotonų kelio aprašymas. Svarbiausi aspektai: antirefleksinė danga, N tipo sluoksnis, PN sandūra, P tipo sluoksnis, metaliniai kontaktai.
2. **Darbalapis „N tipo ir P tipo silicis“** : užpildykite lentelę:
 - Leguojantis elementas (fosforas / boras)
 - Daugumos krūvininkas (elektronai/skylės)
 - Atsakingas vaidmuo išsiskyrimas
 - Padėtis ląstelės struktūroje (viršuje/apačioje)
3. **PhET puslaidininkių modeliavimas** : sukurkite du ekrano vaizdus –
 - a. **Savasis (nelegiruotas) silicis** : stebėkite energijos juostas ir laisvųjų krūvininkų nebuvimą
 - b. **Legiruotas silicis (N+P sandūra)** : stebėkite juostos lenkimąsi, vidinį elektrinį lauką ir krūvio atskyrimą apšvietus
4. **Trumpas aprašymas (daugiausia 120 žodžių)** : savais žodžiais paaiškinkite, kaip saulės elementas „nesurenka“ saulės šviesos kaip šiluminė plokštė, o **fotonų energiją paverčia atskirtais elektros krūviais**, naudodamas kvantinę absorbciją ir sandūrų fiziką.
5. **Trys aptarimo klausimai** :
 - Vienas iš **kvantinės fizikos** : kodėl fotonų energija turi viršyti draudžiamąją juostą?
 - Vienas iš **medžiagų mokslo** : Kaip legiravimas sukuria elektrinį lauką?
 - Vienas apie **sistemų inžineriją** : kodėl saulės baterijos gamina nuolatinę srovę , o namai naudoja kintamąją?

Pateikimas. Prieš pamoką įkelkite PDF failą arba skaidres į klasės kanalą.

3. Taikymas

Pagrindinis lygis

Fotovoltinės konversijos proceso supratimą galima pagilinti atliekant praktinių užsiėmimų seriją, leidžiančią mokiniams stebėti tiek kvantinius, tiek elektrinius reiškinius, susijusius su saulės energijos surinkimu. Šio skyriaus tikslas – pritaikyti teorinėje dalyje nagrinėjamas fotonų sugerties, krūvio atskyrimo ir srovės generavimo sąvokas, susiejant **puslaidininkių fiziką** su **realaus pasaulio energetikos sistemomis** .

Kai šviesa trenkia į puslaidinikinę medžiagą, pakankamai energijos turintys fotonai sužadina elektronus iš surišųjų būsenų į mobilius krūvininkus – tai kvantinis reiškinys, nematomas tiesiogiai stebint, bet išmatuojamas elektriniais prietaisais. Studentai gali stebėti šį elgesį atlikdami paprastą eksperimentą: prijunkite mažą saulės elementą prie multimetrom ir palaikykite jį skirtingais šviesos šaltiniais (saulės šviesa, LED lempa, žibintuvėliu). Didėjant šviesos intensyvumui, srovė didėja proporcingai, o įtampa išlieka santykinai stabili. Šis tiesioginis matavimas iliustruoja, kaip fotonų srautas virsta elektros išvestimi.





Modeliavimo metu mokiniai gali stebėti energijos juostų diagramas, taikyti legiravimą N tipo ir P tipo sritims sukurti ir vizualizuoti, kaip PN sandūra sukuria vidinį elektrinį lauką. Įjungus šviesą, mokiniai mato sandūros lauko generuojamas ir atskirtas elektronų ir skylių poras, sukuriančias srovę. Ši veikla padeda mokiniams suprasti, kaip **legiravimas ir sandūros fizika įgalina kryptingą krūvio pernašą** – fotovoltinės sistemos veikimo pagrindą.

Iš šių stebėjimų kyla esminiai klausimai: koks yra ryšys tarp fotonų energijos ir elektronų sužadavimo? Kodėl legiravimas sukuria vidinį elektrinį lauką be išorinės įtampos? Palyginus imituojamą puslaidininkį su realia saulės elemento struktūra, paaiškėja, kaip medžiagų inžinerija atominiu mastu lemia makroskoppines elektrines charakteristikas.

Tada dėmesys perkeliamas į **saulės elementų sluoksniuotą architektūrą**. Studentai analizuoja funkcinių sluoksnių – antirefleksinės dangos, N tipo spinduolio, PN sandūros, P tipo pagrindo, metalinių kontaktų – išdėstymą ir jų vienas kitą papildančius vaidmenis:

- Antirefleksinė **danga** maksimaliai padidina fotonų patekimą, sumažindama paviršiaus atspindžius
- Plonas **N sluoksnis** sugauna elektronus, susidarančius šalia paviršiaus.
- PN **sandūra** sukuria elektrinį lauką, kuris atskiria krūvininkus.
- Storas **P sluoksnis** sugeria ilgesnio bangos ilgio fotonus giliau medžiagoje.
- **Metaliniai kontaktai** surenka ir praleidžia srovę į išorines grandines

Klasės diskusija tęsiama analizuojant elementų elgseną kintančiomis apšvietimo sąlygomis. Kodėl srovės stipris smarkiai pasikeičia kartu su šešėliavimu, o įtampa išlieka santykinai stabili? Atsakymas slypi tiesioginiame **fotonų srauto ir krūvininkų generavimo proporcingume**. Šis kolektyvinis atspindys padeda mokiniams suprasti, kaip projektuojant Saulės sistemą reikia atsižvelgti į dalinį šešėliavimą, orientaciją ir paros laiko pokyčius.

Tada mokiniai kviečiami palyginti saulės elementus su kasdieniais energijos prietaisais:

- **Saulės skaičiuotuvai**: mažos galios taikymas, kai maži elementai tiekia pakankamai energijos
- **Stogo plokštės**: nuosekliai sujungti elementai, generuojantys namų ūkių masto energiją
- **Tinklinio masto saulės jėgainės**: megavatų įrenginiai su keitikliais, transformatoriais ir kaupimo sistemomis
- **Kosminiai palydovai**: didelio efektyvumo daugiasankrėčiai elementai, kuriuose patikimumas ir svoris yra labai svarbūs

Remiantis šia analogija, fotovoltinė energija iš naujo interpretuojama kaip **kvantinės energijos konversijos į tinklą grandinė**, jungianti atominę fiziką, medžiagų inžineriją ir elektros sistemas.

Apmąstykite kartu. Saulės energijos konversija yra sudėtingas procesas, jungiantis kvantinę mechaniką, kietojo kūno fiziką ir elektrotechniką. Kaip puslaidininkių draudžiamasis tarpas riboja bangos ilgius, kuriuos galima paversti elektra? Kokios inžinerinės strategijos maksimaliai padidina fotonų absorbciją ir sumažina krūvio rekombinaciją? Kaip realaus pasaulio apribojimai – kaina, ilgaamžiškumas, mastelio keitimas – daro įtaką saulės elementų konstrukcijos pasirinkimams?





Pažengęs lygis

Pažengusiųjų lygis gilina ryšį tarp fotonų sugerties ir elektros srovės tekėjimo išorinėmis grandinėmis. Mokiniai stebi, kaip šviesos energija PN sandūroje paverčiama atskirais krūviais ir kaip šie krūvininkai sklinda per puslaidininkinius ir metalinius kontaktus, perduodami energiją.

juostos lenkimo PN sandūroje sąvoka : kai N tipo ir P tipo sritys susiduria, elektronai difunduoja iš N į P, o skylės difunduoja iš P į N, kol pasiekama pusiausvyra. Taip sukurama **išeikvojimo sritis**, kurioje nėra judriųjų nešėjų, su fiksuotais teigiamais krūviais N pusėje ir fiksuotais neigiamais krūviais P pusėje. Gautas elektrinis laukas ($\sim 10^5$ V/cm) yra pakankamai stiprus, kad atskirtų fotogeneruotus elektronų ir skylių poras prieš joms vėl susijungiant.

Krūvininkų sklidimas ir elektros srovės generavimas iliustruojamas **papildytosios realybės modeliavimu**, sukurtu naudojant „**Delightex Studio – Spaces**“ (Marker) :

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

Naudodamiesi mobiliaisiais įrenginiais, mokiniai tyrinėja trimatį saulės elemento modelį:

1. Stebėkite fotonus, atsitrenkiančius į paviršių ir prasiskverbiančius pro puslaidininkį
2. Vizualizuokite elektronų ir skylių porų generavimą, kai fotonų energija viršija draudžiamąją juostą
3. Sekite elektronus, judančius link N sluoksnio, ir skyles link P sluoksnio sandūros lauko
4. Matykite elektronus, tekančius per išorinę grandinę (laidą, apkrovą, grįžtamąjį kelią)
5. Stebėkite visą srovės kilpą nuo generavimo iki apkrovos ir atgal

Veiklos metu pateikiami pagrindiniai klausimai:

– **Kurioje ląstelės vietoje šviesa tampa atskirtais elektros krūviais?**

PN sandūroje, kur vidinis elektrinis laukas atskiria fotogeneruotus elektronus ir skyles prieš jiems vėl susijungiant.

– **Kodėl, apšviečiant elementą, išorine grandine teka srovė?**

Nes sandūra nuolat generuoja įtampos skirtumą (fotoįtampą) tarp N ir P pusių, varydama elektronus per grandinę, kad sumažintų potencialų skirtumą.

– **Kaip saulės elementas gamina energiją nevartodamas kuro ar judančių dalių?**

Tiesiogiai konvertuodamas fotonų energiją į krūvio atskyrimą per kvantinę absorbciją, o tada išgaudamas tuos atskirtus krūvius kaip srovę per metalinius kontaktus – tai kietojo kūno energijos konversija be jokių mechaninių ar cheminių transformacijų.

Atsakymai randami grupinės diskusijos metu ir lyginant kvantinio masto krūvininkų generavimą bei makroskopinius elektrinius matavimus.

Pamoka baigiama apmąstymais apie **fotovoltinių technologijų evoliuciją**. Mokiniai lygina pirmosios kartos kristalinio silicio elementus su naujomis technologijomis:





Technologijos	Efektyvumas	Privalumai	Iššūkiai
Kristalinis silicis	15–22 %	Subrendęs, stabilus , keičiamo dydžio	Reikalingas daug išteklių, nelankstus
Plonasluoksnės (CdTe , CIGS)	10–15 %	Lankstus , lengvas	Mažesnis efektyvumas , toksiškumas medžiagos
Perovskitas	20–26 % (laboratorija)	Didelis efektyvumas, mažos sąnaudos apdorojimui	Stabilumas , skaidymasis , švino kiekis
Daugiasankryžė (GaAs)	30–47 %	Itin didelis efektyvumas	Brangus, naudojamas kosmose / koncentratoriuose

Apmąstykite kartu. Ar šiuolaikinės saulės energijos technologijos iš tiesų artėja prie pagrindinių fizikinių ribų, ar dar yra vietos proveržiams medžiagų moksle ir įrenginių architektūroje? Ar galime sukurti elementus, kurie efektyviai konvertuoja visus saulės bangos ilgius, ar spektrinis neatitikimas visada apribos vienos sandūros sistemas? Kaip ekonominiai ir aplinkos veiksniai (gamybos energija, retos medžiagos, perdirbimas) daro įtaką tam, kurios technologijos plinta visame pasaulyje?

Veikla:

Baigiamosios veiklos tikslas – įtvirtinti žinias ir skatinti bendraamžių bendradarbiavimą.

1 veikla: sąvokų žemėlapis

Studentai sukuria **sąvokų žemėlapij**, vaizduojantį visą fotovoltinės konversijos seką – nuo fotono iki elektros energijos – kiekvienai fazei nurodydami:

- Fizinis **reiškinys** (absorbcija, sužadinimas, atskyrimas, tekėjimas)
- medžiaga / **struktūra** (puslaidininkis, PN sandūra, kontaktai, grandinė)
- **Energijos tipas** (fotonas → kinetinė → potencialas → elektrinė)

2 veikla: Papildytosios realybės patirtis

„Delightex Studio – Spaces (Marker)“, patiria pilną papildytosios realybės kelionę per fotovoltinės energijos konversijos procesą . AR pratimas veda mokinius per 5 nuoseklias scenas, kuriose vizualizuojamas kiekvienas saulės energijos konversijos etapas:

1 scena : Įvadas su animuota saule ir START mygtuku.

2 scena : Fotono atėjimas ir energijos poreikis (draudžiamosios juostos slenkstis).

3 scena : PN sandūros struktūra ir krūvių atskyrimas.

4 scena : Srovės tekėjimas išorine grandine ir energijos tiekimas apkrovai.

5 scena : Galutinis vertinimas su nuosekliais konceptualiais testais.





Kiekvienoje scenoje yra vaizdinių elementų (diagramų, animuotų dalelių, spalvomis koduotų elektronų/skylių sferų), aiškinamųjų tekstų perdangų ir interaktyvių viktorinų su tiesioginiu grįžtamuju ryšiu. Mokiniai nuosekliai naršo bakstelėdami mygtukus, stebėdami vizualines pasekmes (spalvų sodrumo sumažėjimą dėl neteisingų atsakymų, fejerverkų efektus dėl sėkmės) ir atsakinėdami į klausimus apie fotonų energijos slenksčius, PN sandūros funkciją ir grandinės elgseną. Visa kelionė trunka maždaug 5–7 minutes ir ją galima patirti individualiai arba mažose grupėse bendrai diskusijai.

Papildomas užsiėmimas : mažose grupėse mokiniai gali kurti tolesnes scenas, kuriose daugiausia dėmesio skiriama sudėtingesnėms temoms, tokioms kaip antirefleksinės dangos, daugiasandariai elementai arba realaus pasaulio saulės baterijų įrengimas, pridėdami savo aiškinamuosius tekstus ir vaizdinius indikatorius.

3 veikla: Interaktyvi viktorina

Siekiant patikrinti supratimą kiekviename etape, AR patirtis apima **integruotus testus su tiesioginiu vaizdiniu grįžtamuju ryšiu**. Mokiniai atsako į klausimus su keliais atsakymų variantais, įterptus nuoseklioje scenose:

2 scenos viktorina:

- Kas lemia, ar fotonas gali generuoti elektrą?
(Teisingai: fotono energija ir draustminė juosta)

3 scenos viktorina:

- Kas sukuria elektrinį lauką, kuris atskiria krūvininkus?
(Teisingai: PN sandūros legiravimas)

4 scenos viktorina:

- Kodėl srovė nutrūksta, kai uždengiame saulės bateriją?
(Teisingai: nėra fotonų = nesusidaro elektronų ir skylių poros)

5 scenos galutinis vertinimas (3 nuoseklūs testai):

1. Kaip padidinti įtampos išvestį?
(Teisingai: sujunkite elementus nuosekliai)
2. Kodėl infraraudonųjų spindulių fotonai negali generuoti srovės silicyje?
(Teisingai: energija < draudžiamasis tarpas esant 1,1 eV)
3. Kas trukdo elektronų-skylių rekombinacijai?
(Teisingai: PN sandūros elektrinis laukas)





Kiekvienas testas pateikia **vaizdinį grįžtamąjį ryšį** : teisingi atsakymai išlaiko ryškias spalvas ir leidžia pereiti prie kitos scenos, o neteisingi atsakymai sukelia vaizdines pasekmes (sausėjimas, animacijos sustojimas) ir leidžia neribotą skaičių bandymų, skatinant samprotauti be nuobaudų.

Papildomi diskusijų klausimai pažengusiam tyrinėjimui:

- Kodėl šešėliavimas sumažina srovę, bet ne įtampą nuosekliai sujungtuose elementuose?
- Kas riboja maksimalų vienos sandūros saulės elementų efektyvumą?
- Kaip daugiasankryžės ląstelės įveikia Shockley-Queisser ribą?

4 veikla: Plenarinė diskusija

Modulis baigiamas **plenarine diskusija** , kurios metu studentai:

- Kitiškai išanalizuoti modeliavimo ir papildytosios realybės (AR) patirties rezultatus
- Palyginkite fotovoltinę konversiją su kitomis energijos technologijomis (iškastiniu kuru, vėjo, hidroenergija)
- Apmąstykite saulės energijos vaidmenį pasaulinėje dekarbonizacijoje ir tvarume
- Aptarkite kompromisus tarp efektyvumo, sąnaudų, poveikio aplinkai ir mastelio keitimo

Laukiamas rezultatas.

Pasibaigus operacijų moduliui, studentai turėtų gebėti:

- Mokslinė kalba apibūdinti visą fotovoltinės konversijos seką – nuo fotonų sugerties iki elektros srovės generavimo
- ; - Susieti kvantinę fiziką (draudžiamoji zona, fotonų energija, krūvininkai) su makroskopiniu elektriniu elgesiu (įtampa, srovė, galia)
- ; - Naudoti skaitmeninius ir papildytosios realybės įrankius sudėtingiems atominio masto reiškiniams pavaizduoti ir energijos srautui fotovoltinėse sistemose vizualizuoti
- ; - Sukurti kritišką požiūrį į saulės energijos technologijas, suprasti jų fizines ribas, inžinerinius kompromisus ir visuomenines pasekmes pereinant prie atsinaujinančiosios energijos.

4. Literatūra

TED-Ed, Kaip veikia saulės baterijos? (animacinis vaizdo įrašas) . Aiškus fotovoltinių elementų, PN sandūrų ir elektronų srauto paaiškinimas. Prieinama adresu:

<https://www.youtube.com/watch?v=xKxrkt7CpY>





JAV Energetikos departamentas (DOE), Saulės fotovoltinės technologijos pagrindai . Energijos vartojimo efektyvumo ir atsinaujinančios energijos biuras. Prieinama adresu: <https://www.energy.gov/eere/solar/solar-photovoltaic-technology-basics>

Kolorado Boulderio universitetas – PhET interaktyvios simuliacijos, fotoelektrinis efektas . Interaktyvus fotonų energijos, elektronų išstūmimo ir šviesos kvantinių savybių tyrimas. Prieinama adresu: <https://phet.colorado.edu/en/simulations/photoelectric>

„Encyclopædia Britannica“, Saulės elementai . Išsami saulės elementų struktūros, veikimo ir medžiagų apžvalga. Prieinama adresu: <https://www.britannica.com/technology/solar-cell>

Nacionalinė atsinaujinančios energijos laboratorija (NREL), Fotovoltiniai tyrimai . JAV Energetikos departamentas. Prieiga per internetą: <https://www.nrel.gov/pv/>

Nacionalinė atsinaujinančios energijos laboratorija (NREL), Geriausių tyrimų elementų efektyvumo diagrama . Atnaujintas įvairių fotovoltinių technologijų efektyvumo rekordas. Prieinama adresu: <https://www.nrel.gov/pv/cell-efficiency.html>

NASA, Kaip NASA naudoja ir tobulina saulės energiją . Prieiga per internetą: <https://science.nasa.gov/sun/how-nasa-uses-and-improves-solar-power>

„Delightex Studio“ – „Spaces“ (žymeklis), edukacinė papildytosios realybės platforma interaktyviam scenų kūrimui . Prieinama adresu: <https://edu.delightex.com/Studio/Spaces>

Shockley, W. ir Queisser , H.J. (1961) . Detali pn sandūros saulės elementų efektyvumo balanso riba. Taikomosios fizikos žurnalas, 32(3), 510–519. Prieinama adresu: <https://doi.org/10.1063/1.1736034>

Green, M.A. ir kt. (2024) . Saulės elementų efektyvumo lentelės (63 versija). „Progress in Photovoltaics: Research and Applications“, 32(1), 3–13. Prieinama adresu: <https://doi.org/10.1002/pip.3750>

MIT OpenCourseWare , Fotovoltinės technologijos pagrindai . Paskaitų užrašai ir vaizdo įrašai apie puslaidininkų fiziką ir saulės elementų projektavimą. Prieinama adresu: <https://ocw.mit.edu/courses/2-627-fundamentals-of-photovoltaics-fall-2013/>

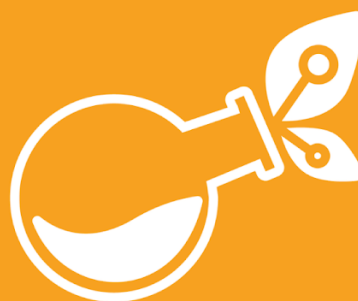
Tarptautinė energetikos agentūra (TEA), Saulės fotovoltinių technologijų ataskaita . Pasaulinės tendencijos, prognozės ir technologijų analizė. Prieinama adresu: <https://www.iea.org/reports/solar-pv>

Vaizdo įrašų kreditai: „Wikimedia Commons“ (CC BY-SA / Viešasis domenas), Nacionalinė atsinaujinančios energijos laboratorija (NREL), JAV Energetikos departamentas, „Encyclopædia Britannica“ ir NASA edukaciniai ištekliai – švietimo reikmėms.





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.