



2007–2013 m. Žmogiškųjų išteklių plėtros veiksnių programos 2 prioriteto „Mokymasis visą gyvenimą“ VP1-2.2-ŠMM-09-V priemonės „Studijų programų plėtra Nacionalinėse kompleksinėse programose“

Projektas

„I ir II pakopos studijų modernizavimas medžiagotyros, nano- ir šviesos technologijų proveržio kryptimis (LaMeTech studijos)“

Projekto numeris VP1-2.2-ŠMM-09-V-01-005

IŠORINIO FOTOEFEKTO DĖSNINGUMŲ TYRIMAS

Praktinio užsiėmimo konspektas
magistrantūros programos
„Saulės elementų ir modulių inžinerija“
studentams

Parengė
doc., dr. D. Jasaitis
prof., dr. A. Jukna
dr. V. Valuntaie

Vilnius 2012

Projektas „I ir II pakopos studijų modernizavimas medžiagotyros, nano- ir šviesos technologijų
proveržio kryptimis (LaMeTech studijos)“

Saulės elementų praktinių pritaikymų spektras kasdien vis plėtėja. Saulės energijos sąskaita jau eilę metų šildomi/aušinami gyvenamieji namai, varomi automobiliai, laivai ir lėktuvai. Šviesos kvantai (fotonai) sąveikauja su kietaisiais kūnais, tuo tarpu ir su Saulės elementais, todėl *Saulės elementų ir modulių inžinerijos* studentai privalo suprasti šviesos sąveikos su Saulės elementais fizinius procesus. Vienas iš šviesos sąveikos su Saulės elementais rezultatų – elektronų iš elementų išmušimas, t.y. išorinio fotoefekto reiškiny.

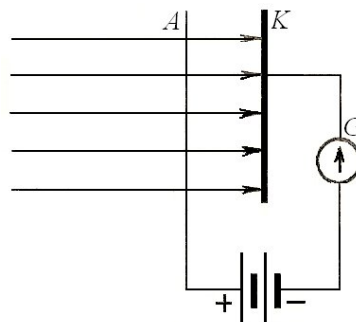
Atlikę šį praktinius įgūdžius formuojantį darbą, studentai turės žinių apie išorinį fotoefektą, supras ir mokės paaiškinti šios fotosrovės priklausomybę nuo katodo apšvietimo. Šio praktinio užsiėmimo metu bus tobulinami gebėjimai interpretuoti gautus išorinio fotoefekto tyrimo rezultatus, juos surūšiuoti ir daryti apibendrinančias išvadas.

Fotoefekto, šviesos slėgio ir kai kurių kitų reiškinių tyrimas iš esmės pakeitė požiūrį į šviesos prigimtį. Kvantinė optika nagrinėja šviesą, kaip ypatingų dalelių – fotonų (šviesos energijos kvantų) – srautą.

Korpuskulinės ir banginės šviesos savybės papildo vienas kitas ir išreiškia jos sklidimo bei sąveikos su medžiaga dėsnį. Šviesos banginės savybės išryškėja interferencijos, difrakcijos ir poliarizacijos reiškinuose, o korpuskulinės (dalelių) savybės – spinduliavimo ir absorbcijos, t.y. sąveikos su medžiaga, reiškinuose. Kuo mažesnis šviesos bangos ilgis, tuo ryškesnis jos kvantinis pobūdis.

Fotoelektriniu efektu (fotoefektu) vadinamas šviesos dalelių (fotonų) energijos perdavimas medžiagos elektronams, kurie dėl to arba išlekia iš jos (*išorinis fotoefektas*), arba joje tampa laisvi (*vidinis fotoefektas*). Tai būdinga šviesos ir kietųjų bei skystųjų medžiagų sąveikai. Apšvietus dujas, vyksta fotojonizacija – elektronai išplėšiami iš dujų atomų ar molekulių.

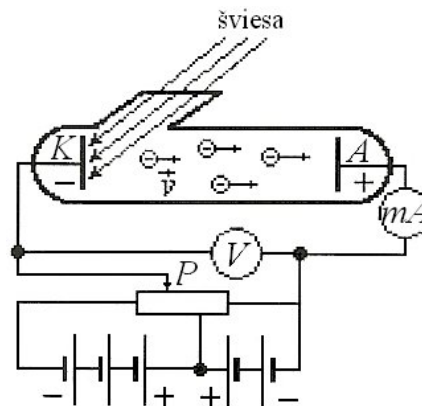
Vidinis fotoefektas būdingas puslaidininkiams. Apšviestame puslaidininkyje atsiranda papildomų krūvio nešėjų, vadinasi, padidėja jo elektrinis laidumas. Vidinį fotoefektą gali sukelti ir infraraudonieji spinduliai.



1 pav. Stoletovo įrenginio schema

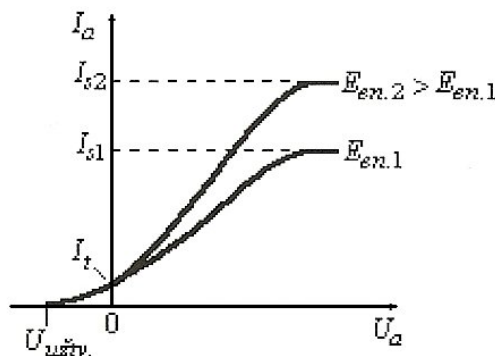
H. Hercas 1887 m. tyrinėdamas elektromagnetinių bangų generavimą, nustatė, kad veikiant šviesai iš medžiagos paviršiaus išlekia elektronai, t.y. atrado išorinį fotoefektą, o detaliau jį ištyrė rusų mokslininkas A. Stoletovas. Stoletovo įrenginio schema pateikta 1 paveiksle. Metalinė plokštelė K apšviečiama pro metalinį tinklelį A . Nors grandinė atvira (tarp A ir K yra oro tarpas), galvanometras G parodo ja tekančią elektros srovę. Prijungus metalinę plokštelę prie teigiamojo baterijos poliaus, elektros srovės grandinėje nėra. Vadinasi, šviesa išmuša iš plokštelės elektronus, kurie sujungia elektros srovės grandinę.

Išorinio fotoefekto tyrimo schema pavaizduota (2 pav.). Vakuumuotame inde (*vakuuminiam fotoelemente*) yra fotokatodas K ir anodas A . Įtampa tarp jų reguliuojama potenciometru P ir matuojama voltmetru V . Indo langelis – kvarco stiklas, praleidžiantis tiek regimąją, tiek ultravioletinę šviesą. Apšvietus fotokatodą, fotonai išmuša iš jo laisvuosius elektronus, šie *fotoelektronai* juda elektrostatiniame lauke tarp anodo ir katodo. Kryptingas fotoelektronų judėjimas sudaro elektros srovę (fotosrovę) I_a . Ji matuojama miliampermetru mA.



2 pav. Išorinio fotoefekto tyrimo schema

Fotosrovės priklausomybė nuo anodo įtampos vadinama fotoefekto *voltamperine charakteristika* (3 pav.).



3 pav. Išorinio fotoefekto voltamperinė charakteristika

Projektas „I ir II pakopos studijų modernizavimas medžiagotyros, nano- ir šviesos technologijų
proveržio kryptimis (LaMeTech studijos)“

Kai $U_a = 0$, grandinėje teka silpna fotoelektronų, pasiekiančių anodą nesant anodinės įtampos, tamsinė srovė I_f . Didėjant anodinei įtampai fotosrovė didėja. Esant tam tikrai fotokatodo energiniam apšvietimui E_{en} , teka stipriausia nekintanti srovė (soties fotosrovė I_s), nes visi per laiko vienetą iš fotokatodo išmušti elektronai pasiekia anodą. Nustačius anode neigiamą fotokatodo atžvilgiu užtvarinę įtampą U_{uztv} , anodinė srovė nutrūksta, nes fotoelektronų kinetinės energijos neužtenka darbui prieš stabdantį elektrostatinį lauką atlikti.

Eksperimentais nustatyti trys išorinio fotoefekto dėsniai:

1. didžiausias fotoelektronų pradinis greitis priklauso nuo šviesos dažnio ir nepriklauso nuo jos intensyvumo;
2. soties fotosrovė tiesiogiai proporcinga fotokatodo energiniam apšvietimui: $I_s \sim E_{en}$;
3. yra kiekvienos medžiagos raudonoji fotoefekto riba, t.y. mažiausias (ribinis) šviesos dažnis ν_0 (arba didžiausias bangos ilgis λ_0), kuriam esant dar vyksta fotoefektas.

Išorinio fotoefekto dėsnius paaiškino A. Einšteinas, remdamasis kvantų (fotonų) sąvoka ir energijos tvermės dėsniu. Elektronui perduota fotono energija virsta elektrono išlaisvinimo darbu ir fotoelektrono kinetine energija. *Išorinio fotoefekto Einšteino lygtis:*

$$h\nu = A_{isl} + \frac{m_e v_{\max}^2}{2}, \quad (1)$$

čia: $h\nu$ – fotono energija, A_{isl} – elektrono išlaisvinimo darbas, $\frac{m_e v_{\max}^2}{2}$ – ν dažnio šviesos kvanto išmušamo fotoelektrono didžiausioji kinetinė energija.

Kai fotono energija $h\nu$ didesnė už elektrono išlaisvinimo darbą, tas elektronas gali išlėkti iš medžiagos. Taigi dalis sugeriamos energijos eikvojama išlaisvinimo darbui A_{isl} atlikti, visa kita sudaro elektrono kinetinę energiją. Didžiausią kinetinę energiją įgyja tie fotoelektronai, kurie sugeria fotonus arti paviršiaus. Kuo didesnis šviesos srautas, t.y. kuo daugiau krintančių fotonų, tuo daugiau fotoelektronų jie išlaisvina.

Einšteino lygtis fotoefektui išreiškia energijos išsilaikymo dėsnį. Einšteino lygtimi galima paaiškinti ir tiesinę fotosrovės priklausomybę nuo šviesos srauto. Kuo didesnis šviesos srautas, tuo daugiau fotonų per laiko vienetą krinta į paviršių, taigi daugiau išlaisvinama elektronų; spinduliavimo dažnumas fotosrovės stiprumui neturi reikšmės.

Išorinio fotoefekto Einšteino lygtis paaiškina visus empirinius išorinio fotoefekto dėsnius: ν_{\max} priklausomybę nuo šviesos dažnio ν , soties srovės priklausomybę nuo fotokatodo energetinės apšvietos E_{en} , t.y. nuo fotonų krintančių per laiko vienetą į fotokatodą, skaičiaus.

Projektas „I ir II pakopos studijų modernizavimas medžiagotyros, nano- ir šviesos technologijų
proveržio kryptimis (LaMeTech studijos)“

Mažiausias šviesos dažnis ν (arba didžiausias bangos ilgis λ), kuriam esant dar vyksta fotoefektas vadinamas medžiagos *raudonąja fotoefekto riba*.

$$\nu_0 = \frac{A_{isl.}}{h}, \quad (2)$$

$$\text{nes } \frac{m_e v_{\max}^2}{2} = 0.$$

Taigi ν_0 priklauso tik nuo $A_{isl.}$, kuris savo ruožtu priklauso nuo medžiagos cheminės sudėties ir paviršiaus kokybės. Daugelio metalų raudonoji fotoefekto riba yra ultravioletinėje spektro srityje ($\nu_0 > 7,9 \cdot 10^{14}$ Hz, $\lambda_0 < 3,8 \cdot 10^{-7}$ m).

Iš fotoefekto dėsnų, kad išlėkusių elektronų per laiko vienetą skaičius proporcingas katodo apšviestumui, kai nesikeičia krintančios šviesos spektrinė sudėtis, plaukia, kad voltamperinėje fotoefekto charakteristikoje stebima sotes srovė yra proporcinga katodo apšviestumui, t.y.

$$I_s \sim E. \quad (3)$$

Taškinio šviesos šaltinio sukuriamas apšviestumas:

$$E = \frac{I}{r^2} \cos \alpha, \quad (4)$$

čia I – šaltinio šviesos stiprumas, r – atstumas nuo šviesos šaltinio iki apšviečiamo paviršiaus, α – kampas tarp normalės ir krintančio į katodo paviršių šviesos spindulio. Jei spinduliai krinta statmenai į katodą ($\alpha = 0$), tai

$$E = \frac{I}{r^2}, \quad (5)$$

ir pagal (3):

$$I_s = \frac{I}{r^2}. \quad (6)$$

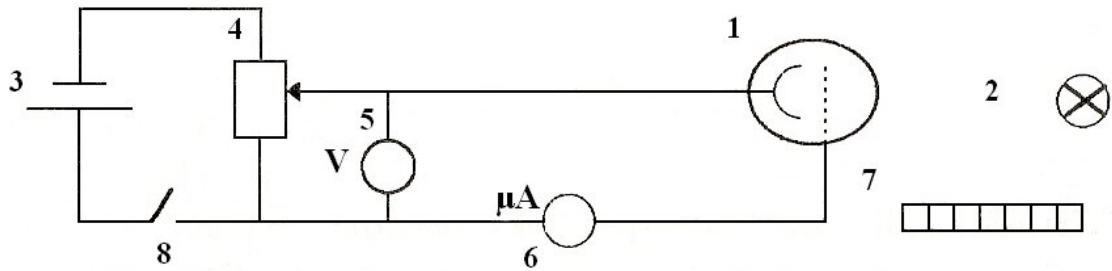
Pastoviam I (šviesos šaltinis ir jo maitinimo įtampa nekinta):

$$I_s \sim \frac{1}{r^2}, \quad (7)$$

t.y. sotes fotosrovės stipris atvirkščiai proporcingas šviesos šaltinio atstumo nuo katodo kvadratui.

Projektas „I ir II pakopos studijų modernizavimas medžiagotyros, nano- ir šviesos technologijų
 proveržio kryptimis (LaMeTech studijos)“

Eksperimentiškai (7) priklausomybę tikriname matavimo įrenginiu, kurio schema pavaizduota 4 pav.



4 pav.

1 – vakuuminis fotoelementas, 2 – šviesos šaltinis, 3 – nuolatinės įtampos šaltinis, 4 – įtampos daliklis, 5 –
 voltmetras, 6 – mikroampermetras, 7 – liniuotė, 8 – jungiklis.

Dauguma į fotokatodą krintančių ir jo sugertų fotonų neišmuša elektronų, o tik padidina fotokatodo vidinę energiją. Fotoelektronų skaičius $N_{el.}$ santykis su į fotokatodą kritusių fotonų skaičiumi $N_{fot.}$ vadinamas medžiagos kvantiniu našumu:

$$Y = \frac{N_{el.}}{N_{fot.}} \quad (8)$$

Kvantinis skaičius priklauso nuo medžiagos prigimties, jos paviršiaus švarumo ir išorinį fotoefektą sukeliančių fotonų energijos. Jei šviesos dažnis nedaug didesnis už ribinį, daugumos metalų $Y \approx 10^{-4}$. Dažniui didėjant kvantinis našumas didėja keliomis eilėmis. Kai kuriems metalams, ypač šarminiams, būdinga antrinis (selektyvusis) fotoefektas – jų kvantinis našumas yra didžiausias esant tam tikrai fotonų energijai, o vėliau mažėja.

Jeigu fotokatodo apšvieta labai didelė (apšviečiant lazerio šviesa), įvyksta *daugiafotonis išorinis fotoefektas*, kai vienas elektronas sugeria kelis ($N_{fot.} = 2,3,\dots$) fotonus. Tokiu atveju išorinio fotoefekto lygtis:

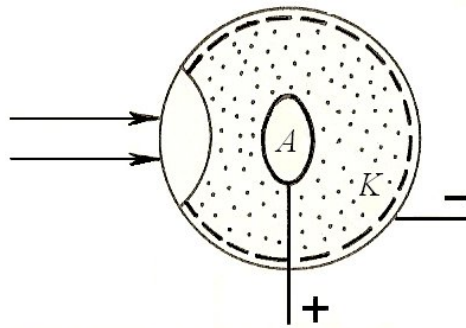
$$N_{fot.} h\nu = A_{isl.} + \frac{m_e v_{max}^2}{2} \quad (9)$$

Daug didesnio jautrio yra fotoelektroniniai daugintuvai, kuriuose iš fotokatodo šviesos kvantų išmušami elektronai greitinami pirmojo, antrojoje, ir t. t. anodų (dinodų) link. Kaskart

kiekvienas iš pagreintų elektronų išmuša iš dinodo keletą elektronų. Šis reiškinys vadinamas *antrine elektronų emisija*. Elektronų griūtis didėja nuo kiekvieno kito dinodo. Kai antrinės emisijos koeficientas $\sigma = \frac{N_{el.}}{N_{0el.}} \approx 5-15$ (čia N_0 – į dinodą krintančių, N – iš dinodo išmušamų elektronų skaičius), fotosrovę galima padidinti milijardus kartų.

Fotoefektu pagrįstas fotoelemento veikimas. Šis prietaisas šviesos energiją paverčia elektros energija. Fotoelementą sudaro stiklinis balionas, kuriame yra vakuumas arba inertinės dujos. Dalis vidinio baliono paviršiaus padengta šviesai jautriu sluoksniu K . Bandinio centre yra vielinio žiedo arba disko formos anodas A (4 pav.). Katodą ir anodą prijungus prie įtampos šaltinio ir katodą apšvietus, atsiranda srovė, kurios stiprumas proporcingas apšvietumui.

Išorinis fotoefektas naudojamas *vakuuminuose* ir *dujiniuose fotoelementuose*. Jų principinė schema pateikta 5 paveiksle. Katodas padengtas medžiaga, kuriai būdingas mažas elektronų išlaisvinimo darbas. Regimajai spektro sričiai geriausiai tinka šarminiai metalai, ypač cezis. Vakuuminis fotoelementas praktiškai yra prietaisas be inercijos, t.y. fotoelektronai susidaro vos tik apšvietus katodą $\nu \geq \nu_r$ dažnio spinduliais. Vakuuminis fotoelementas praktiškai neineracinis, todėl naudojamas kaip fotoelektrinis keitiklis šviesos srautui keisti elektriniais signalais (pvz., garsiniame kine).

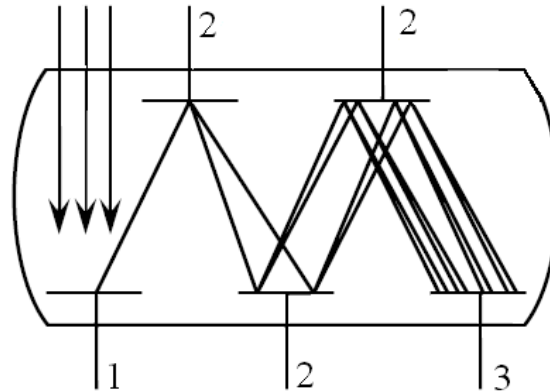


5 pav. Vakuuminio ar dujinio fotoelemento schema

Toki fotoelementą iki kelių šimtųjų mm Hg slėgio pripildžius argono ar neono, gaunamas dujinis fotoelementas. Iš katodo šviesos išlaisvinti ir elektrinio lauko pagreintinti fotoelektronai jonizuoja dujas, – taip generuojami nauji krūvininkai, todėl dujiniai fotoelementai jautresni už vakuuminius, tačiau jie inertiški ir aukštesniems kaip 10 kHz dažniams nenaudojami. Fotoelementai plačiai naudojami kaip fotoelektriniai keitikliai automatikoje. Fotoelementai naudojami kine garsui atkurti, televizijoje vaizdo signalams paversti elektriniais signalais, šviesos stiprumui ar šviesumui matuoti ir kt. Fotoelementai įmontuojami į *fotoreles*, kurios automatiškai įjungia ir išjungia gatvių

Projektas „I ir II pakopos studijų modernizavimas medžiagotyros, nano- ir šviesos technologijų
proveržio kryptimis (LaMeTech studijos)“

apšvietimo elektros srovės grandinę, saugo darbuotojus nuo gamybinių traumų, kontroliuoja gamybinį procesą ir pan.



6 pav. Fotoelektrinio dauginuvo schema

Išorinis fotoefektas taikomas *fotoelektriniame dauginume*, kurio principinė schema parodyta 6 paveiksle. Čia iš fotokatodo 1 šviesos išlaisvinti elektronai greitinami elektrinio lauko ir paeiliui nukreipiami vis į naujus antrinės emisijos katodus 2, vadinamus *emiteriais*, arba *dinodais*. Jų paviršius padengtas medžiaga, kuriai būdinga didelė antrinių elektronų emisija. Kiekvienas pirminis elektronas iš dinodo išmuša keletą elektronų. Taip daugelį kartų sustiprintas elektronų srautas patenka į jų kolektorių 3. Fotoelektroniniai dauginuvai naudojami labai silpnoms šviesos signalams aptikti, jų intensyvumui matuoti. Jie taikomi šviesos matavimo technikoje, kosminiuose tyrimuose (Čerenkovo skaitiklis ir kitur).

Išorinis fotoefektas taikomas televizijoje. Perduodamą vaizdą objektyvas sufokusuoja į televizijos perdavimo vamzdžio fotokatodą. Tai – ant žėručio plokštelės sudarytas ir ceziu arba jo oksidu padengtas grūdėtas sidabro sluoksnis. Kitoje žėručio plokštelės pusėje yra metalinė plokštelė. Fotokatodo grūdėliai sudaro su ja miniatiūrinius kondensatorius. Iš apšviestos mozaikos grūdelių išsilaisvina elektronai, ir mikrokondensatoriai įsikrauna. Optinis atvaizdas transformuojamas į elektrinį. Kreipimo ričių magnetiniu lauku valdomas elektronų srautas periodiškai „apeina“ mozaikos elementus, ir apkrovos rezistoriuje susidaro įtampos signalai, atitinkantys kiekvieno mozaikos grūdėlio apšviestumą. Sustiprinus signalus, jais moduluojamos vaizdą perduodančios elektromagnetinės bangos.

Šio praktinio užsiėmimo metu bus naudojama: vakuuminis fotoelementas, šviesos šaltinis, mikroampermetras, voltmetras, liniuotė, nuolatinės įtampos šaltinis, jungiklis.

Projektas „I ir II pakopos studijų modernizavimas medžiagotyros, nano- ir šviesos technologijų
proveržio kryptimis (LaMeTech studijos)“

Esant didžiausiam apšviestumui (mažiausiam r) išmatuojama fotosrovės priklausomybė nuo įtampos tarp katodo ir anodo. Nubrėžiama voltamperinė charakteristika $i = f(V)$. Iš voltamperinės charakteristikos nustatoma įtampa, kuriai esant fotosrovė įsisotina, didumas. Sudarius tokią įtampą (arba šiek tiek didesnę) išmatuojama fotosrovės priklausomybė nuo atstumo r . Nubrėžiama grafinė priklausomybė $i_s = f\left(\frac{1}{r^2}\right)$.

Rekomenduojamos temos ir klausimai diskusijoms:

1. Išorinis fotoefektas.
2. Išorinio fotoefekto tyrimo schema.
3. Išorinio fotoefekto dėsningumai.
4. Einšteino lygties fotoefektui.
5. Elektronų išlaisvinimo darbas.
6. Fotoefekto raudonoji riba, jos nustatymo būdai.

Literatūra:

1. Jakimavičius, J.; Karpinskas, A.; Martinėnas, B.; Šatas, A. Fizikos laboratoriniai darbai. Kvantinė optika. Atominė fizika. Puslaidininkų fizika. Atomo branduolio fizika. Vilnius: VISI. 1984, 96 p.
2. Tamašauskas, A.; Vosylus, J.; Radvilavičius Č. Fizika 3. Vilnius: Mokslas. 1992, 180 p.
3. Bogdanovičius, A. Fizikos pagrindai inžinerijoje. II dalis. Vilnius: Technika. 2010, 323 p.
4. Ambrasas, A. Fizikos pagrindai. Kaunas: Šviesa. 1990, 286 p.
5. Kukšas, B; Šimkūnas, S. Fizika I. Vilnius: Mintis. 1973, 439 p.
6. Masnikovas, S.; Bosanova, T. Vadovas fizikai kartoti. Vilnius: Mokslas. 1987, 309 p.