

Fotolektrični učinak

Mamlić, Adriana

Undergraduate thesis / Završni rad

2024

Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj: **University of Zagreb, Faculty of Chemical Engineering and Technology / Sveučilište u Zagrebu, Fakultet kemijskog inženjerstva i tehnologije**

Permanent link / Trajna poveznica: <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:149:483990>

Rights / Prava: [In copyright](#)/[Zaštićeno autorskim pravom.](#)

Download date / Datum preuzimanja: **2025-03-15**



Repository / Repozitorij:

[Repository of Faculty of Chemical Engineering and Technology University of Zagreb](#)



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET KEMIJSKOG INŽENJERSTVA I TEHNOLOGIJE
SVEUČILIŠNI PREDDIPLOMSKI STUDIJ

Adriana Mamlić

ZAVRŠNI RAD

Zagreb, rujan 2024.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU

FAKULTET KEMIJSKOG INŽENJERSTVA I TEHNOLOGIJE POVJERENSTVO ZA
ZAVRŠNE ISPITE

Kandidatkinja Adriana Mamlić

Predala je izrađen završni rad dana: 9. rujna 2024.

Povjerenstvo u sastavu:

doc. dr. sc. Iva Movre Šapić, Sveučilište u Zagrebu Fakultet kemijskog inženjerstva i tehnologije

doc. dr. sc. Andrej Vidak, Sveučilište u Zagrebu Fakultet kemijskog inženjerstva i tehnologije

izv. prof. dr. sc. Vesna Očelić Bulatović, Sveučilište u Zagrebu Fakultet kemijskog inženjerstva i tehnologije

prof. dr. sc. Helena Otmačić Ćurković, Sveučilište u Zagrebu Fakultet kemijskog inženjerstva i tehnologije (zamjena)

povoljno je ocijenilo završni rad i odobrilo obranu završnog rada pred povjerenstvom u istom sastavu.

Završni ispit održat će se dana: 12. rujna 2024.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET KEMIJSKOG INŽENJERSTVA I TEHNOLOGIJE
SVEUČILIŠNI PREDDIPLOMSKI STUDIJ

Adriana Mamlić

FOTOELEKTRIČNI UČINAK

ZAVRŠNI RAD

Mentor: doc. dr. sc. Iva Movre Šapić

Zagreb, rujan 2024.

SAŽETAK

U ovom radu prikazan je teorijski opis pojave fotoelektričnog učinka. Dan je povijesni pregled dostignuća, pokusa i objašnjenja istaknutih svjetskih fizičara koji su teorijski i praktično istraživali fotoelektrični učinak. Prikazana je primjena fotoelektričnog učinka koji je u velikoj mjeri prisutna na industrijskoj razini i svakodnevnom životu čovjeka. U radu je dan naglasak na primjenu fotoelektričnog učinka putem solarnih ćelija kao uređaja u kojima se energija sunčevog zračenja pretvara u električnu energiju. Dan je opis primjene fotoelektričnog učinka u fotomultiplikatorima i foto-detektorima. Prikazani su najznačajniji predstavnici foto-detektora kao što su foto-otpornici, foto-diode, foto-tranzistori i foto-tiristori. Objasnjena je primjena fotoelektričnog učinka u foto-elektronskoj spektroskopiji i svjetlomjerima. U radu su također prikazani senzori slike i uređaji za noćni vid, čiji se rad zasniva na fotoelektričnom učinku.

Ključne riječi: fotoelektrični učinak, foto-ćelija, foto-detektori, fotoni

ABSTRACT

This paper presents a theoretical description of the appearance of the photoelectric effect. Paper also present a historical overview of the achievements, experiments and explanations of word-renowned physicist who theoretically and practically investigated the photoelectric effect. This work show the application of the photoelectric effect, which is largely present at the industrial area and in everyday human life. Paper emphasizes the application of the photoelectric effect through solar cells devices in which the energy of solar radiation is converted into electrical energy. The application of the photoelectric effect in photomultipliers and photodetectors is described. The most important representatives of photo-detectors such as photo-resistors, photo-diodes, photo-transistors and photo-thyristors are presented. The application of the photoelectric effect in photo-electron spectroscopy and light meters is explained. The paper also presents image sensors and devices for night vision, whose operation is based on the photoelectric effect.

Key words: photoelectric effect, photo-cell, photo-detectors, photons

SADRŽAJ

SAŽETAK	4
ABSTRACT	5
1. UVOD	1
2. FOTOELEKTRIČNI UČINAK	2
2.1. Povijesni razvoj	3
3. PRIMJENA FOTOELEKTRIČNOG UČINKA	7
3.1. Solarne ćelije	7
3.2. Foto-multiplikatori	12
3.3. Foto-detektori	14
3.3.1. Foto-diode.....	14
3.3.2. Foto-tranzistori	17
3.3.3. Foto-tiristori.....	19
3.3.4. Foto-otpornici	21
3.4. Foto-elektronska spektroskopija	23
3.5. Svjetlomjer	25
3.6. Senzori slike	26
3.7. Uređaji za noćni vid	30
4. ZAKLJUČAK	32
5. LITERATURA	33
POPIS SIMBOLA I KRATICA	37

1. UVOD

Pojavu izbijanja elektrona iz metala uz pomoć svjetla koja se naziva fotoelektrični učinak objasnio je Albert Einstein 1905. godine. Opaženi fotoelektrični učinak nije mogla objasniti valna priroda svjetlosti. Einstein se nadovezao na Planckovu pretpostavku o kvantiziranosti energije atoma (kojom je Planck objasnio zračenje crnog tijela) i pretpostavio da iz izvora svjetlosti izlaze kvanti svjetlosti [1]. Ti kvanti su nazvani fotonima. Einsteinova pretpostavka čestične prirode svjetlosti bila je ključna za objašnjenje fotoelektričnog učinka, ali i drugih pojava koje se nisu mogle objasniti valnom prirodom svjetlosti (npr. Comptonovo raspršenje) te je pokrenula razvoj jedne nove šire slike prirodnih zakonitosti, kvantne fizike. Einstein je za objašnjenje fotoelektričnog učinka dobio Nobelovu nagradu.

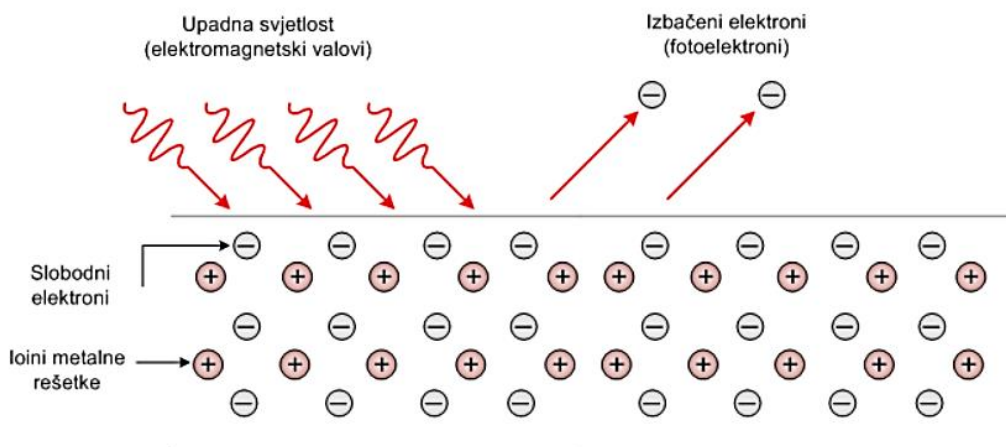
Ovaj je rad strukturiran u dva dijela. U prvom dijelu rada dan je opći prikaz pojma fotoelektričnog učinka kao pojave izbijanja elektrona s površine metala obasjanog elektromagnetskim zračenjem. Dan je povijesni pregled rada i dostignuća istaknutih fizičara kao što je Heinrich Hertz, Wilhelm Halwachs, Phillip Lenard, Albert Einstein i Robert Andrew Milikan.

U drugom dijelu ovog rada prikazuje se primjena fotoelektričnog učinka koji je najčešće u praksi zastupljen putem foto-ćelija. Najširu primjenu u ljudskim životima imaju solarne ćelije i u njima se vrši pretvaranje energije sunca u električnu energiju. U ovom su dijelu opisani fotoelektrični multiplikatori koji su zapravo posebne staklene cijevi u kojima se na jednom kraju nalazi katoda koja je napravljena od materijala koji je osjetljiv na svjetlo. Prikazan je opis foto-detektora u kojima se svjetlosna veličina pretvara u električnu veličinu. Dan je teorijski opis osnovnih predstavnika foto-detektora kao što su foto-otpornici, foto-diode, foto-tranzistori i fototiristori. Opisan je rad foto-elektronske spektroskopije koja prati elektrone koje pod djelovanjem elektromagnetskog zračenja ispušta molekula. Definirani su svjetlomjeri kao uređaji uz pomoć kojih se može izmjeriti kontrast i intenzitet svjetlosti. Prikazani su senzori slike i opisani osnovni principi rada temeljeni na fotoelektričnom učinku. Opisan je princip rada uređaja za noćni vid koji pretvara infracrveno svjetlo koje je reflektirano od objekta u vidljive slike.

Na kraju rada se nalazi zaključak u kojem se sažimaju svi rezultati i daje osobni osvrt autorice na temu i cjelokupni sadržaj ovog rada.

2. FOTOELEKTRIČNI UČINAK

Fotoelektrični učinak opisuje proces izbacivanja elektrona s površine metala pod utjecajem elektromagnetskog zračenja (Slika 1). Primjerice, materijali poput cinka, natrija ili bakra mogu pokazivati fotoelektrični učinak kada svjetlost pada na njihovu metalnu površinu, što rezultira emitiranjem elektrona. Ti emitirani elektroni nazivaju se fotoelektroni [2].

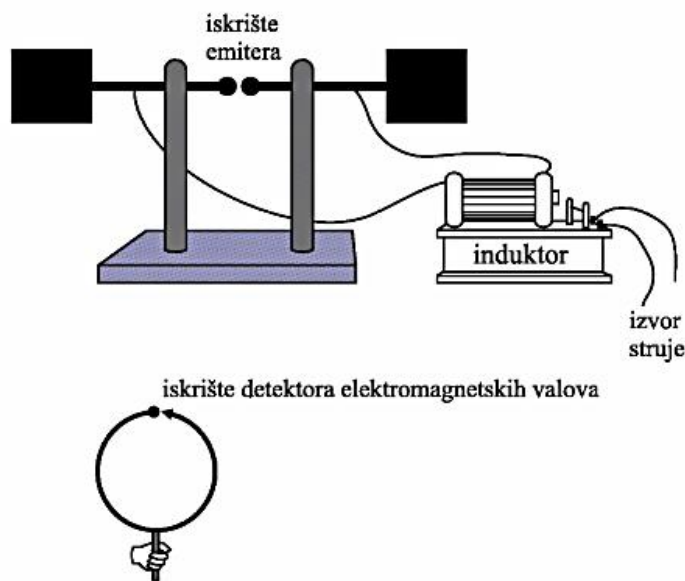


Slika 1. Fotoelektrični učinak [3]

Unutar metala je svaki pojedinačni elektron povezan s određenom energijom. U metalu se elektroni koji nisu vezani ponašaju kao da su slobodni, ali jedino unutar metala. U slučaju da je površina metala izložena svjetlu ili zračenju iz elektromagnetskog izvora, određeni slobodni elektron može potrošiti dovoljno energije da poveća svoju kinetičku energiju u odnosu na energiju vezanja. Nakon toga, on je u stanju nadvladati električnu vučnu silu, koju uzrokuju metalni ioni, te odleti s površine metala [4].

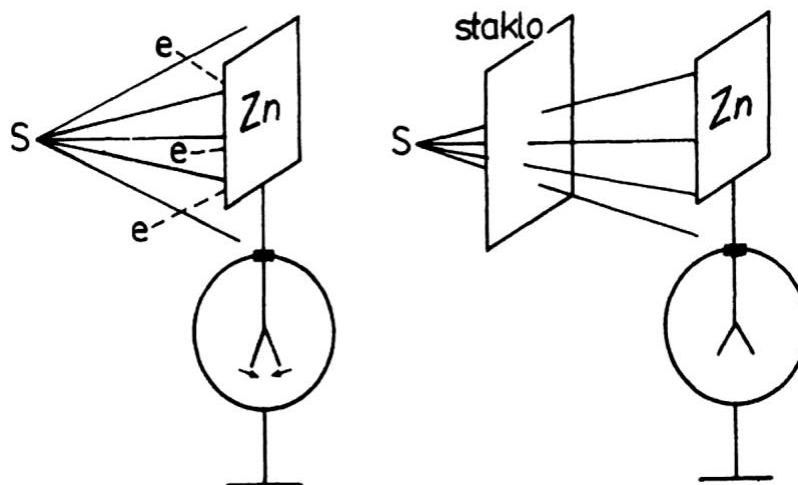
2.1. Povijesni razvoj

Njemački fizičar Heinrich Hertz dokumentirao je emisiju elektrona s površine metala 1887. godine [5]. Zabilježio je fotoelektrični učinak tijekom provođenja i primanja valova električne energije. Zavojnica emitera imala je iskrište. Držeći odašiljač u kutiji, zamijetio je da se iskrenje umanjilo, a dodatno se povećala svjetlost [6]. Primijetio je da je fotoelektrični učinak uočljiviji kada su elektrode izložene ultraljubičastom svjetlu, kao rezultat toga, iskra je vidljivija. Ovim pokusom Hertz je pokazao postojanje elektromagnetskih valova, osim toga, otkrio je fotoelektrični učinak (Slika 2).



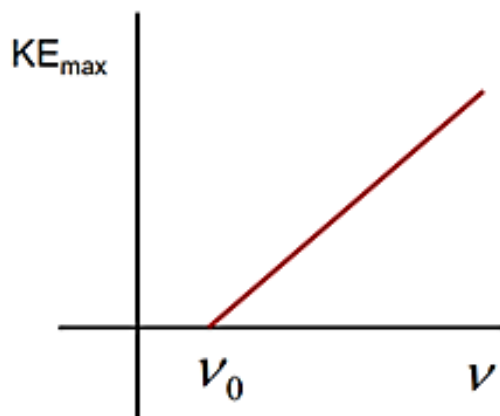
Slika 2. Hertzov uređaj za detekciju elektromagnetskih valova [7]

Godine 1888. njemački fizičar Wilhelm Halwachs proveo je eksperiment koji je uključivao spajanje negativno nabijene ploče od cinka na elektroskop. Kad je ploča obasjana svjetlošću koja sadrži UV zrake, dolazi do izbijanja (skupljaju se listići elektroskopa). Kad se stavi staklo (apsorbira UV zrake) između izvora svjetlosti i ploče od cinka, pri obasjavanju svjetlošću ne dolazi do izbijanja ploče (Slika 3). Nakon ovog eksperimenta pokazalo se u fotoelektričnom učinku, kada je prisutno ultraljubičasto svjetlo, negativni elektricitet izbija iz metala [8].



Slika 3. Shema Halwachsovog Pokusa [1]

Godine 1899. Philipp Lenard je eksperimentima s katodnim cijevima dokazao da su negativno nabijene čestice koje se oslobađaju pri fotoelektričnom učinku zapravo elektroni [9]. Zabilježio je da elektroni oslobođeni iz metala ultraljubičastim osvjetljenjem imaju različite brzine putovanja. Također je iz eksperimenta izveo zaključak da je za svaku pojedinu tvar prisutna određena frekvencija svjetlosti, neophodna za izazivanje fotoelektričnog učinka. Ako je frekvencija viša od frekvencije praga, učinak će se pojaviti (Slika 4). Eksperimenti su pokazali da kinetička energija izbačenih elektrona ne ovisi o intenzitetu svjetlosti koja obasjava metal, nego o frekvenciji te svjetlosti.



Slika 4. Ovisnost kinetičke energije elektrona o frekvenciji svjetlosti [2]

Godine 1905. Albert Einstein je postavio teoriju fotoelektričnog učinka. Prema njegovoj teoriji, svjetlost se sastoji od sitnih energetske paketa poznatih kao fotoni ili kvanti. Energija svakog kvanta svjetlosti definirana je Planckovom relacijom [10]:

$$E = h\nu \tag{1}$$

pri čemu je h Planckova konstanta, ν frekvencija svjetlosti. Kada elektron koji je slobodan na metalu koji je osvijetljen apsorbira foton, on mijenja svoju energiju. Dio energije iz fotona posvećen je prevladavanju potencijalne energije povezane s metalom (W_i - izlazni rad), ostatak je posvećen kinetičkoj energiji elektrona [10]:

$$E_k = h\nu - W_i \tag{2}$$

$$h\nu = W_i + \frac{1}{2} m_e v_{max}^2 \tag{3}$$

pri čemu m_e predstavlja masu elektrona, v_{max} najveću brzinu emitiranih elektrona. Izlazni rad W_i označava minimalnu količinu energije potrebnu za izbacivanje elektrona van metala, a u stvarnosti je to minimalna količina energije za koju je elektron zatvoren u metalu [11]. Za slučaj da vrijedi: $h\nu < W_i$ ne postoji fotoelektrični učinak jer elektron nije u mogućnosti izaći van metala. Tablica 1 daje prikaz izlaznog rada pojedinih metala poput željeza, bakra, aluminija.

Tablica 1. Izlazni rad za pojedine metale [11]

Metal	W_i (eV)
Na	2.46
Al	4.08
Cu	4.70
Zn	4.31
Ag	4.73
Pt	6.35
Pb	4.14
Fe	4.50

Einsteinovo objašnjenje fotoelektričnog efekta dovelo je do novog razumijevanja svjetlosti. On je vjerovao da se svjetlost sastoji od fotona ili čestica.

Količina gibanja fotona/čestica:

$$p = \frac{E}{c} = \frac{h\nu}{c} \quad (4)$$

pri čemu je c brzina gibanje fotona, a E energija fotona [12].

Robert Andrew Millikan potvrdio je Einsteinovu teoriju fotoelektričnog učinka godine 1916. jer je provodio niz znanstvenih istraživanja kako bi dokazao da Einstein nije imao pravo [2].

3. PRIMJENA FOTOELEKTRIČNOG UČINKA

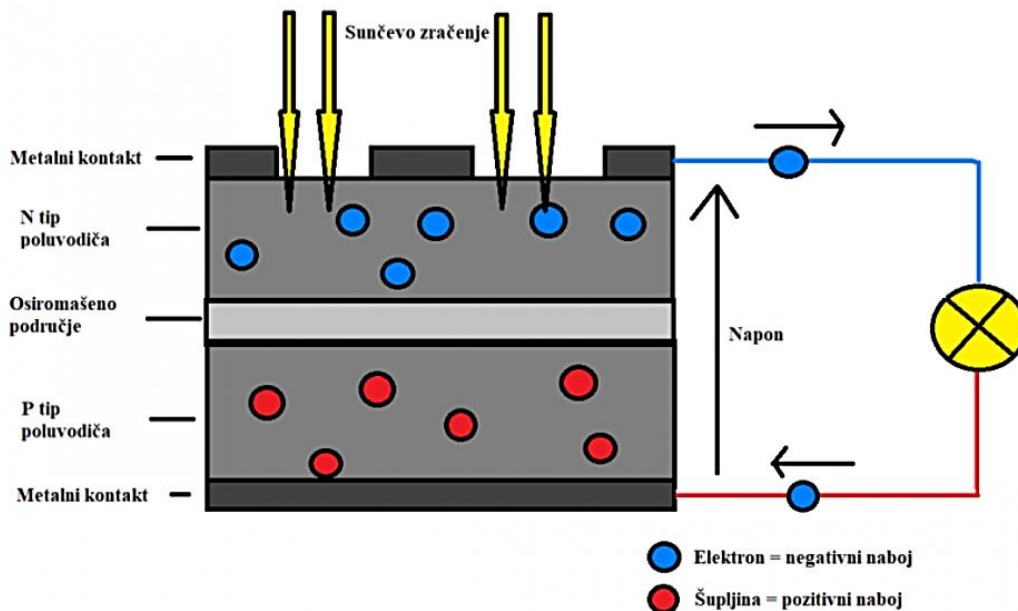
Danas se fotoelektrični učinak često koristi u životu ljudi i industriji. Primjena fotoelektričnog učinka najčešće je kod foto-ćelija. Fotoelektrični učinak može se podijeliti na vanjski, unutarnji i fotoelektrični učinak sloja barijere. Vanjski fotoelektrični učinak javlja se kada elektroni napuštaju površinu materijala pod utjecajem svjetlosti [13]. Unutarnji fotoelektrični učinak odnosi se na promjenu električnog otpora materijala pod utjecajem svjetlosti. Postoje dvije glavne vrste uređaja koji koriste unutarnji fotoelektrični učinak: foto-elementi i foto-otpornici [14].

Fotoelektrični učinak sloja barijere opisuje pojavu gdje materijal pod utjecajem svjetlosti proizvodi napon određenog smjera, a primjer takvog učinka su fotonaponske ćelije [15]. Solarne ćelije, koje su vrsta fotonaponskih ćelija, imaju široku primjenu u današnjem svijetu, pretvarajući sunčevu energiju u električnu energiju [13].

3.1. Solarne ćelije

Fotonaponska ćelija je elektronički uređaj koji pretvara energiju elektromagnetskog zračenja u električnu pomoću fotoelektričnog učinka. Po svojoj strukturi to je poluvodička dioda tj. PN spoj [5].

Danas se fotonaponske ćelije uglavnom izrađuju od silicijevih poluvodiča. Nastaju spajanjem dvaju tankih slojeva poluvodiča, označenih P-tipom i N-tipom poluvodiča na donjem dijagramu (Slika 5). Poluvodiči tipa P dobivaju se dodavanjem male količine fosfornog dopanta silicijskoj rešetki. Poluvodiči N-tipa dobivaju se dodavanjem određene male količine uglavnom bora unutar kristalne strukture materijala. Ukoliko se promatra ovaj spoj na sobnoj temperaturi od 26,85°C, koncentracija šupljina na P strani je visoka, a koncentracija elektrona na N strani je također visoka. [16].



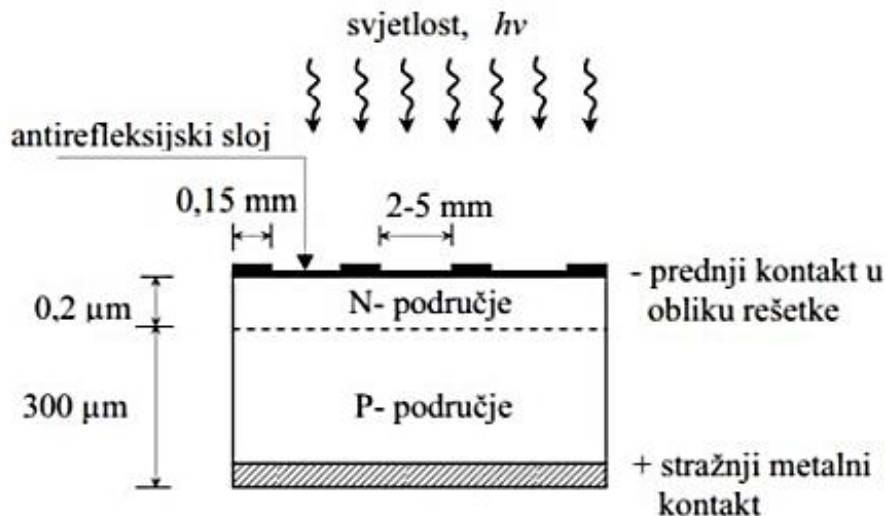
Slika 5. Procesi unutar fotonaponske ćelije [17]

Kada se solarna ćelija osvjetli, sunčevo zračenje se apsorbira i javlja se fotonaponski učinak. Zbog pojave fotonaponskog učinka na stezaljkama baterije javlja se napon (elektromotorna sila). Ako se trošilo postavi na kraj baterije, struja će teći i proizvodit će se električna energija. Kada se prati apsorpcija i emisija sunčevog zračenja, zračenje se promatra kao snop čestica koje se naziva fotonima. Ti fotoni ne posjeduju masu i putuju brzinom jednakom brzini svjetlosti. Da bi se izračunala fotostruja ćelije, mora se znati protok fotona koji ulaze u ćeliju [18].

Energija fotona može se izračunati po Einsteinovoj jednadžbi:

$$E = h\nu = h \frac{c}{\lambda} \quad (5)$$

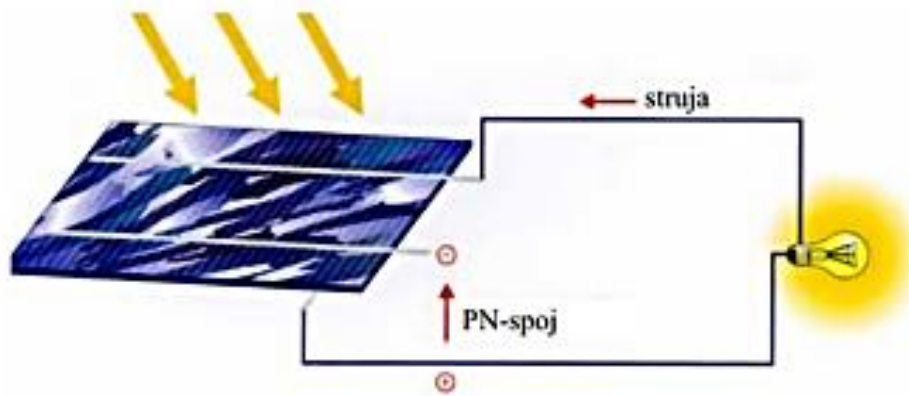
Unutar prethodno navedene jednadžbe Planckova konstanta iznosi $6,626 \cdot 10^{-34}$ Js te je označena s h , frekvencija fotona s ν , dok je brzina svjetlosti koja iznosi $3 \cdot 10^8$ m/s označena s c .



Slika 6. Silicijska solarna ćelija [19]

Slika 6. prikazuje silicijsku solarnu ćeliju. Nečistoće kao što je fosfor raspršene su na površini ploče P-tipa kako bi oblikovale područje poluvodiča N-tipa na površinskom tankom sloju. Na dnu se nalaze metalni kontakti za njihovo prikupljanje. Naboj generiran prednjom apsorpcijom fotona skuplja se na metalnoj rešetki (mrežnom kontaktu) koja zauzima do 5% površine i nema značajan utjecaj na proces apsorpcije. Kako bi se povećala učinkovitost ćelije, na prednju površinu može se nanijeti prozirni antirefleksni sloj kako bi se smanjila refleksija sunčeve svjetlosti [18].

Ako se želi postići određeni napon (tj. snaga), baterije se mogu povezati paralelno i serijski. Tako nastaje modul solarne ćelije oblika ploče ili panela, na koji su ćelije pričvršćene i zaštićene od vanjskih utjecaja. Moduli se postavljaju jedan pored drugog u fotonaponski kolektor. Fotonaponski kolektori, zajedno s ostalim potrebnim komponentama poput regulatora, pretvarača i baterija, čine fotonaponski sustav [18].



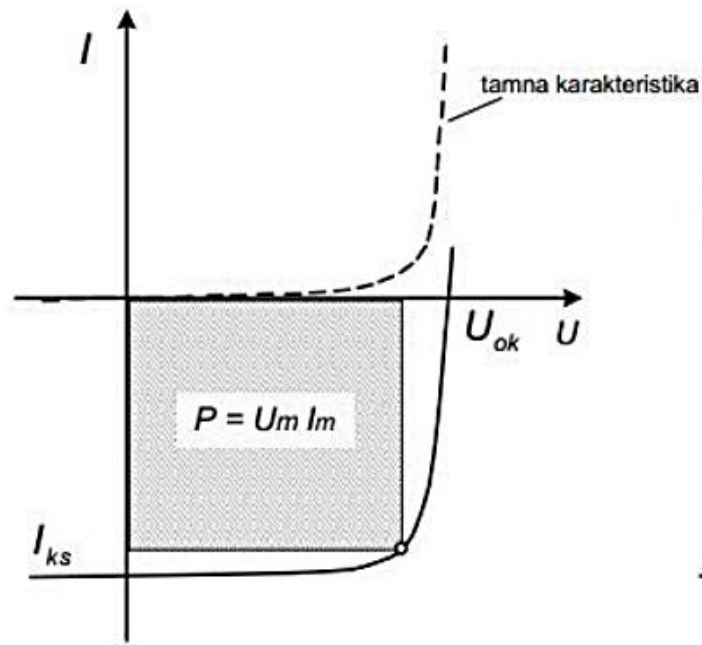
Slika 7. Solarna ćelija za proizvodnju električne energije [20]

Slika 7. prikazuje solarnu ćeliju koja se koristi kao izvor struje. Kao što se može vidjeti sa slike, kontaktna točka koja se nalazi u P području postaje pozitivna elektroda zbog kretanja šupljina i elektrona, dok kontaktna točka koja se nalazi u N području postaje negativna elektroda. Trošilo je spojeno između metalne rešetke na gornjoj strani tiskane ploče i metalnih kontakata na donjoj strani. Napon se generira u procesu upijanja sunčeve svjetlosti. Budući da solarne ćelije funkcioniraju poput poluvodičke diode, mogu propuštati struju samo u jednom smjeru. Ako se želi povećati napon baterije, spaja se u seriju. Ovako će struja ostati ista, a ako je potrebna jača struja onda se spaja baterija paralelno.

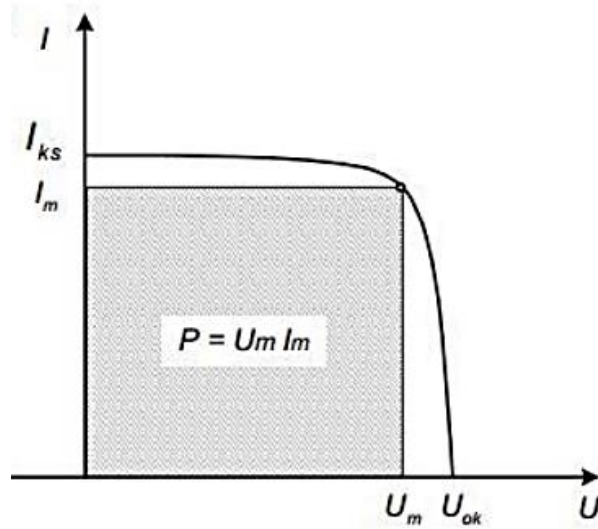
Na slici 8, za opis solarne ćelije, prikazane su strujno-naponske karakteristike osvijetljenih i neosvijetljenih solarnih ćelija. Ukoliko se promatra tamna karakteristika solarne ćelije (neosvijetljene), možete se vidjeti da je ista kao karakteristika dioda. U slučaju kada je solarna ćelija osvijetljena, strujno-naponska karakteristika ima pomak u IV. kvadrant. Nakon što fotostruju I_l generira osvijetljena solarna ćelija, jednadžba struje koja teče kroz električnu opremu u izlaznom krugu je:

$$I = I_0 \left(e^{\frac{qU}{nkT}} - 1 \right) - I_l \quad (6)$$

Unutar prethodno navedene jednadžbe T označava temperaturu, k Boltzmannovu konstantu, I_0 struju mraka, U napon ćelije, q naboj elektrona i n diodni faktor idealnosti.



Slika 8. Strujno-naponska karakteristika solarne ćelije pod osvjetljenjem i bez osvjetljenja [21]



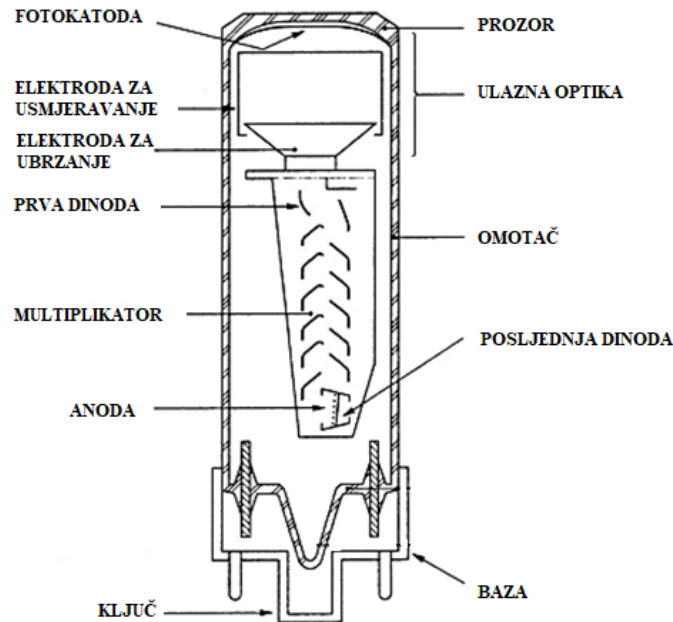
Slika 9. U-I karakteristika solarne ćelije [21]

Slika 9. prikazuje osnovne parametre te strujne i naponske karakteristike solarne ćelije. Strujno-naponska karakteristika prolazi kroz tri značajne točke, koje su naznačene kao bitni faktori solarne ćelije, kao što je prikazano na gornjoj slici. Tri bitne točke su [18]:

- I_{ks} – struja koja teče kada je napon na stezaljci nula (struja kratkog spoja),
- U_{ok} – napon kontakata solarne ćelije kad je strujni krug otvoren i struja nula (napon otvorenog kruga/prazan hod),
- P_m – maksimalna točka snage solarne ćelije, koja je jednaka maksimalnoj mogućoj površini pravokutnika. Kada je snaga najveća, napon je U_m i struja je I_m (vidljivo na slici 9).

3.2. Foto-multiplikatori

Razvoj foto-multiplikatora omogućila su dva važna povijesna postignuća, a to je sekundarna emisija elektrona i fotoelektrični učinak. Fotoelektrični učinak je opisan u prethodnom dijelu ovoga rada, a sekundarna emisija elektrona predstavlja pojavu prema kojoj elektroni unutar vakumske cijevi udaraju o elektrodu i time prouzrokuju emisiju novih elektrona [22].

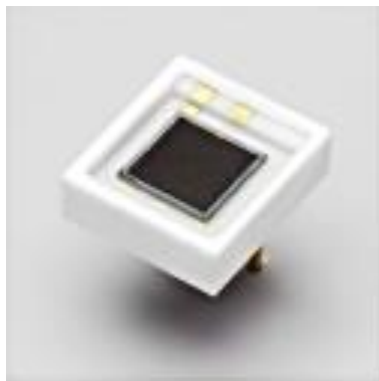


Slika 10. Shema foto-multiplikatora [23]

Foto-multiplikator ili fotoelektrični multiplikator je posebna staklena cijev u kojoj se na jednom kraju nalazi katoda koja je napravljena od materijala koji je osjetljiv na svjetlo (Slika 10). Na tom je kraju spojen scintilator. Fotoelektričnim učinkom fotoni koji dolaze iz scintilatora na katodu generiraju elektrone. Nakon toga se nastavlja sustav za nakupljanje generiranih elektrona koji ide do dijela za multipliciranje elektrona. Do sustava dinoda i završava s anodom s koje se uzima generirani električni impuls. Za vrijeme rada foto-multiplikatora među anodama, pojedinim dinodama i katodama je postavljen visoki napon kojim se ubrzava elektrone te prigodom naleta elektrona na pojedinu dinodu nastaju sekundarni elektroni. Ovim se načinom dobiva snažniji električni impuls na anodi. Foto-katoda ima karakteristiku efikasnog pretvaranja fotona koji upada u elektron. U ovisnosti je o frekvenciji upadne svjetlosti te strukturi materijala koji je se koristi kao foto-katoda. Ova se odzivnost izražava s kvantnom efikasnošću, $n(\lambda)$ [23]:

$$n(\lambda) = \frac{\text{broj nastalih fotoelektrona}}{\text{broj upadnih fotona } (\lambda)} \quad (7)$$

U praksi su foto-diode uglavnom napravljene od materijala poluvodiča te se njihova kvantna efikasnost nalazi u intervalu od 10 do 30%. Prijašnje metalne foto-katode imale su efikasnost manju od 1%. Količina generiranih foto-elektrona u multiplikacijskom segmentu se povećava sa sklopom dinoda. Među određenim brojem dinoda uključen je željeni napon kojim se ubrzavaju elektroni u tome dijelu, pa ti brzi elektroni udaraju u sljedeću dinodu i proizvode nove elektrone. Porast brojnosti elektrona na pojedinoj dinodi opisan je faktorom sekundarne emisije (δ). Iz razloga što postoji potreba uključivanja elektromotorne sile među dinodama emisijski materijal se u današnje vrijeme izrađuje od poluvodiča te se zatim nanosi na vodljivi materijal. Elektromotorna sila na dinodama se postavlja uz pomoć visokonaponskog izvora i naponskog razdjelnika te se na taj način osigurava dovoljan potencijal na dinodama [23]. Na sljedećoj slici (Slika 11) nalazi se prikaz silicijskog foto-multiplikatora.



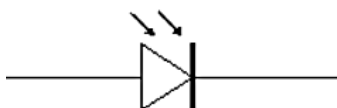
Slika 11. Silicijski foto-multiplikator [24]

3.3. Foto-detektori

Foto-detektori su tip elektroničkih elemenata u kojima se svjetlosna veličina pretvara u električnu veličinu. Drugim riječima to su elementi u kojim se svjetlosna energija konvertira u električnu energiju. Osnovni predstavnici foto-detektora su foto-otpornici, foto-diode, foto-tranzistori i foto-tiristori.

3.3.1. Foto-diode

Foto-dioda predstavlja poluvodički elektronički element unutar kojeg svjetlo izaziva unutarnji foto učinak u zapornom sloju poluvodičkog kristala odnosno na PN-prijelazu (Slika 12). Najbitniji faktori foto-diode su kvantna efikasnost, osjetljivost (koeficijent konverzije), ukupna ekvivalentna snaga šuma i odzivnost [25].



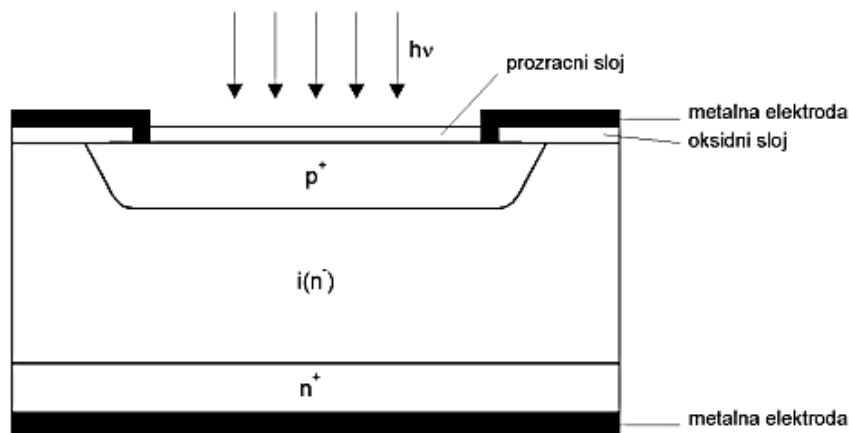
Slika 12. Simbol foto-diode [26]

Kada foto-dioda ima linearnu odzivnost, njena osjetljivost (koeficijent konverzije) proporcionalna je kvantnoj efikasnosti, što znači da su osjetljivost i kvantna efikasnost linearno povezane, odnosno promjena u kvantnoj efikasnosti rezultira proporcionalnom promjenom u osjetljivosti. Međutim, kada je odzivnost foto-diode nelinearna, osjetljivost zavisi od kvantne

efikasnosti i drugih svojstava foto-diode. U ovom slučaju, osjetljivost se ne može jednostavno opisati linearnom funkcijom kvantne efikasnosti, već je potrebna složenija funkcija koja uzima u obzir različite faktore koji utječu na rad foto-diode.

Prethodno navedeni faktori ovise o vrsti foto-diode i poluvodičkom materijalu od kojeg je načinjena foto-dioda. Odzivnost i ukupna ekvivalentna snaga šuma trebaju biti što manji, a kvantna efikasnost i koeficijent konverzije što je moguće veći [25].

Na sljedećoj slici (Slika 13) prikazan je uzdužni presjek PIN foto-diode koja ima znatno bolju kvantnu efikasnost od foto-diode s bazom od PN spoja. Prikazana dioda se sastoji od p+ i n+ područja koji su odvojeni s unutarnjim i-područjem. Kao što je vidljivo na slici i-područje puno je šire od p i n područja. S ovakvim rasporedom apsorpcija zračenja pretežno se izvršava u i-području. Za vrijeme normalnog režima rada korišten je dostatno visoki nelinearni napon napajanja što je dovelo do potpuno osiromašenog i-područja [25].



Slika 13. PIN foto-dioda – uzdužni presjek [25]

Valna duljina diktira iznos koeficijenta apsorpcije. Iz tog razloga poluvodički materijal se može koristiti samo u definiranom rasponu valnih duljina. Brzina odziva i kvantna efikasnost ovise o sastavu i širini i, p i n područja, valnoj duljini svjetlosti, energetskom presjeku materijala.

Kvantna efikasnost η je definirana kao odnos količine proizvedenih parova elektron-šupljina i količine upadnih fotona koji imaju energiju $h\nu$ [25]:

$$\eta = \frac{I_p/q}{P_0/h\nu} \quad (8)$$

gdje je I_p foto-struja, P_0 upadna optička snaga. Iskustva govore da će 100 fotona proizvesti 30 do 95 parova elektron-šupljina te je stoga kvantna efikasnost u intervalu od 30 do 95 posto. Kako bi se ostvarila velika kvantna efikasnost potrebno je da i-područje bude dostatno široko kako bi što više upadnog svjetla bilo apsorbirano. Osjetljivost ili koeficijent konverzije foto-diode \mathcal{R} je jedna od karakteristika vezana s kvantnom efikasnosti narednim odnosom [25]:

$$\mathcal{R} = \frac{I_p}{P_0} = \eta \frac{q}{h\nu} \quad (9)$$

Odzivnost je sljedeća jako bitna značajka koja ovisi o sljedećim čimbenicima [25]:

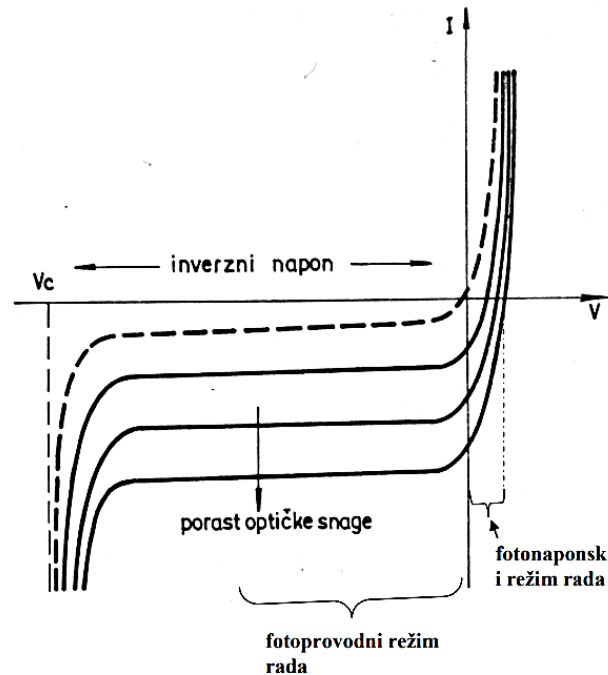
- vrijeme prolaska foto-generiranih nosioca preko osiromašenog područja,
- vrijeme apsorpcije foto-nosioca generiranih izvan osiromašenog područja,
- RC vremenska konstanta foto-diode i strujnog kruga.

Struja foto-diode definira se standardom jednadžbom polariziranog PN spoja [25]:

$$I = I_d \left[\exp\left(\frac{qV}{k_B T}\right) - 1 \right] - I_p \quad (10)$$

pri čemu je I_d struja mraka koja teče kroz diodu, V je napon, k_B je Boltzmannova konstanta iznosa $8,617343 \cdot 10^{-5}$ eV/K, T je apsolutna temperatura, I_p je intenzitet generirane foto-struje, a I ukupna struja foto-diode.

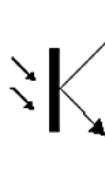
Na sljedećoj slici (Slika 14) prikazana je strujno-naponska karakteristika foto-diode za slučaj kad ona nije osvjetljena (ispresijecana linija) i za slučaj kada je osvjetljena svjetlom različite jakosti. Na slici je uočljivo da se jakost inverzne struje povećava s povećanjem jakosti svjetlosnog toka [27].



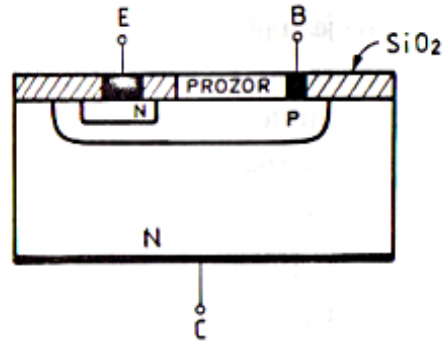
Slika 14. Strujno – naponska karakteristika foto-diode [27]

3.3.2. Foto-tranzistori

Foto-tranzistori su tranzistori čija se struja kolektora mijenja u ovisnosti o intenzitetu upadne svjetlosti. On je troslojni poluvodički element čije je područje baze osjetljivo na svjetlost. Kada baza osjeti svjetlost konvertira ga u električnu struju te ona poteče između područja emitera i kolektora. Simbol foto-tranzistora gotovo je isti kao simbol klasičnog tranzistora s time da se razlikuje za dvije strelice koje sugeriraju svjetlost koja se javlja pri bazi foto-tranzistora (Slika 15).

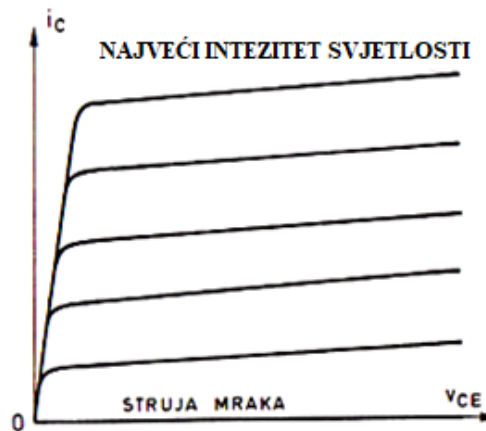


Slika 15. Simbol foto-tranzistora [26]



Slika 16. Poprečni presjek foto-tranzistor [28]

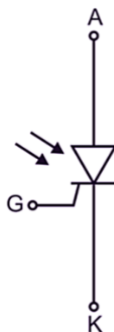
Na prethodnoj slici (Slika 16) nalazi se prikaz poprečnog presjeka foto-tranzistora. Princip rada foto-tranzistora identičan je kao princip rada foto-diode s tim da se kod foto-tranzistora dobiva β veća struja (kolektorska struja $I_c = \beta I_\phi$). Emitterski spoj se ne polarizira, akolektorski spoj polarizira se inverzno. S obzirom da je potrebno preusmjeriti cijelu foto-struju prema bazi nju je potrebno ostaviti nepriključenu. U cilju dobivanja što većeg iznosa struje kolektora za zadanu jakost svjetlosti potrebno je osvijetliti što više plohe spoja kolektora. S ovakvim načinom dešava se usporavanje rada i povećanje kapacitivnosti. Na sljedećoj slici (Slika 17) prikazana je strujno-naponska karakteristika foto-tranzistora, gdje je i_c struja kolektora, a v_{ce} napon između kolektora i emitera [28].



Slika 17. Strujno-naponska karakteristika foto-tranzistora [28]

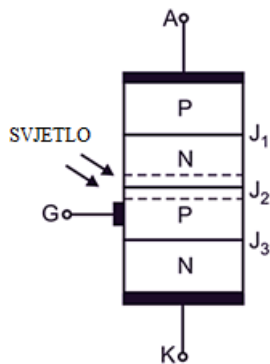
3.3.3. Foto-tiristori

Foto-tiristori su komponente koje su po svojim fizičkim i električnim značajkama apsolutno jednake standardiziranim tiristorima koji su pobuđeni električnim signalima. Jedina je razlika u pobudi. Uglavnom, foto-tiristori koriste gate priključak za kontrolu prolaska struje. Taj priključak služi za upravljanje, s njim se regulira osjetljivost (koeficijent konverzije) na željenu razinu signala svjetlosti. Na sljedećoj slici (Slika 18) prikazan je simbol foto-tiristora.



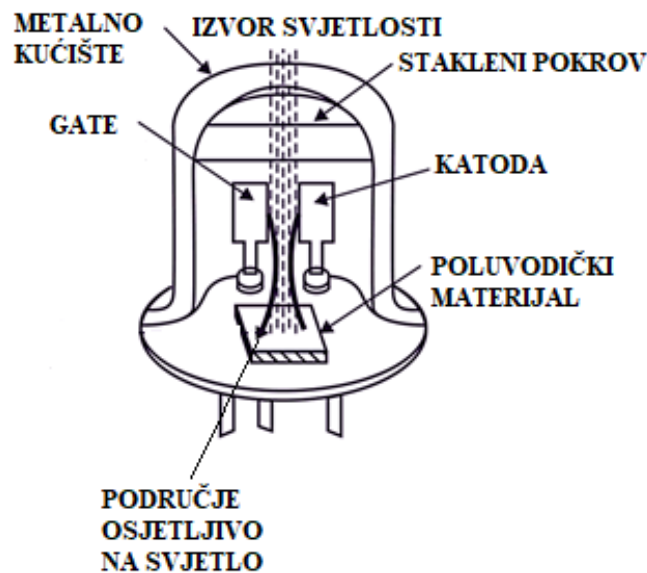
Slika 18. Simbol foto-tiristora [29]

Foto-tiristor se sastoji od tiristora koji je osjetljiv na svjetlo (Slika 19). Jednako diodama tiristor propušta struju u slučaju da je napon na anodi veći od napona na katodi. Preko *gate*-a se vrši kontrola je li tiristor sprovodi struju. Prije nego što tiristor bude vodljiv *gate* treba biti napojen s odgovarajućim naponom i strujom. *Gate* nema utjecaj na rad tiristora nakon što on postane vodljiv. To znači, da u slučaju prekida dotoka svjetlosti, tiristor će nastaviti provoditi struju. Jedini način kojim se može ugasi foto-tiristor je prekid struje dovoda ili dovođenjem odgovarajućeg napona katodi foto-tiristora.



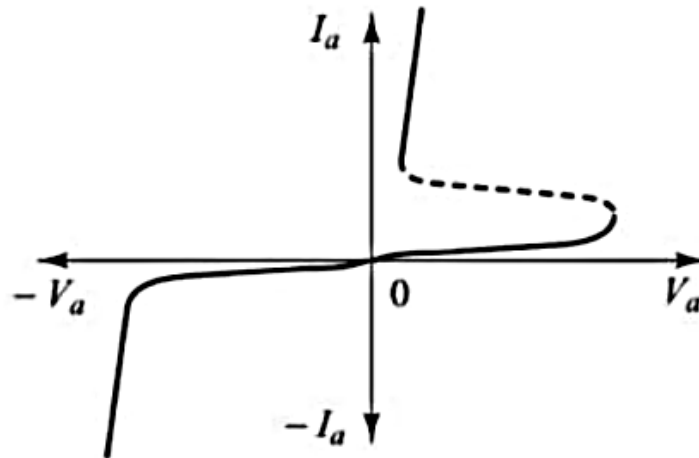
Slika 19. Struktura foto-tiristora [29]

Djelovanje foto-tiristora (Slika 20) se zasniva na radu jednosmjernog triodnog tiristora, ali se u vodljivo stanje može uvesti na način da se osvijetli PN-spoj elektrode upravljanja. Izlazna struja foto-tiristora, za razliku od ostalih foto-detektora, ne ovisi o jačini svjetlosti. Sa osvjjetljenjem se foto-tiristor doprema u vodljivo stanje. Zatim struja anode foto-tiristora ne ovisi o svjetlosti. Uglavnom foto-tiristorski spojevi traže spajanje otpora s vanjske strane među katode i upravljače elektrode te se uz pomoć njega može moguće samo-pobuđivanje uzrokovano rezervnom strujom i regulirati foto-tiristorska osjetljivost (koeficijent konverzije).



Slika 20. Konstrukcija foto-tiristora [29]

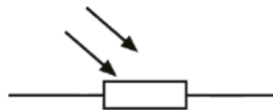
Na sljedećoj slici (Slika 21) prikazana je strujno-naponska karakteristika foto-tiristora gdje se zapažaju tri područja rada, a to je I. kvadrant u kojem se nalazi područje blokiranja i područje vođenja te III. kvadrant u kojem se nalazi područje zapiranja. U području blokiranja je na anodu uključen pozitivni, a na katodu negativni izvor napona, teče vrlo mala struja i tiristor je blokiran. Kad napon postane veći od napona blokiranja, foto-tiristor prelazi u stanje vođenja. Foto-tiristor se nalazi u području zapiranja kad je priključen negativni napon.



Slika 21. Strujno-naponska karakteristika foto-tiristora [30]

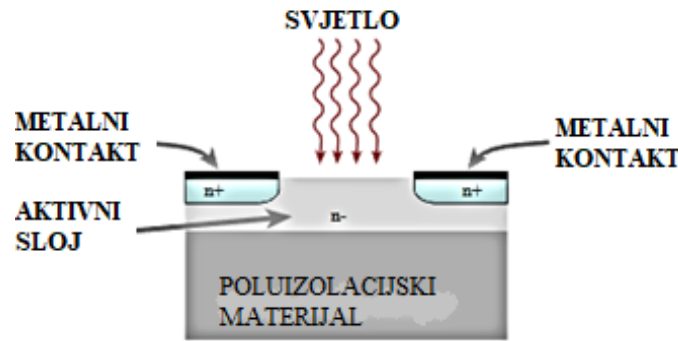
3.3.4. Foto-otpornici

Foto-otpornici su otpornici kod kojih se električni otpor snižava s povišenjem jakosti upadne svjetlosti. Rade se od poluvodičkog materijala koji imaju vrlo veliki električni otpor. U praksi je prisutno mnogo vrsta foto-otpornika. Njihova primjena je u vanjskim i radio satovima, uličnim lampama, kamerama i alarmima. Na sljedećoj slici nalazi se prikaz foto-otpornika (Slika 22).



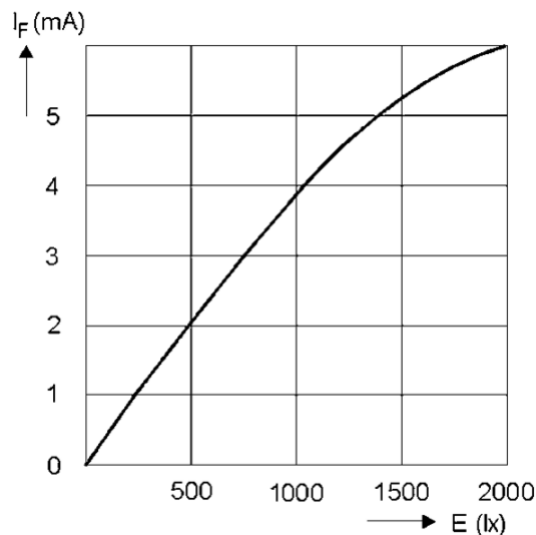
Slika 22. Simbol foto-otpornika [31]

Kad svjetlost dopre do foto-otpornika on apsorbira fotone i krene s izbacivanjem elektrona koji generiraju struju. U foto-otporniku se dešava linearno opadanje električnog otpora s povećanjem osvjetljenja. Iz toga proizlazi da se osvjetljenjem uz konstantan napon linearno povećava električna struja. Na sljedećoj slici (Slika 23) nalazi se prikaz strukture foto-otpornika.



Slika 23. Struktura foto-otpornika [22]

Osjetljivost foto-otpornika puno je manja u odnosu na foto-diodu i foto-tranzistor i u ovisnosti je o valnoj duljini svjetlosti. Za slučaj da se jakost svjetla drži stalnim otpor može imati varijacije zbog temperaturnih promjena. Iz toga proizlazi da su osjetljivi na temperaturne promjene. Zbog ovih karakteristika foto-otpornik nije primjeren za precizno mjerenje svjetlosne jakosti.



Slika 24. Svjetlosna karakteristika foto-otpornika [32]

Na prethodnoj slici (Slika 24) prikazana je svjetlosna karakteristika foto-otpornika na kojoj je prikazana zavisnost foto-struje I_f o osvjetljenosti E za vrijeme konstantnog napona. Foto-struja određuje se sljedećom jednačinom [32]:

$$I_f = A \cdot E^\lambda \quad (11)$$

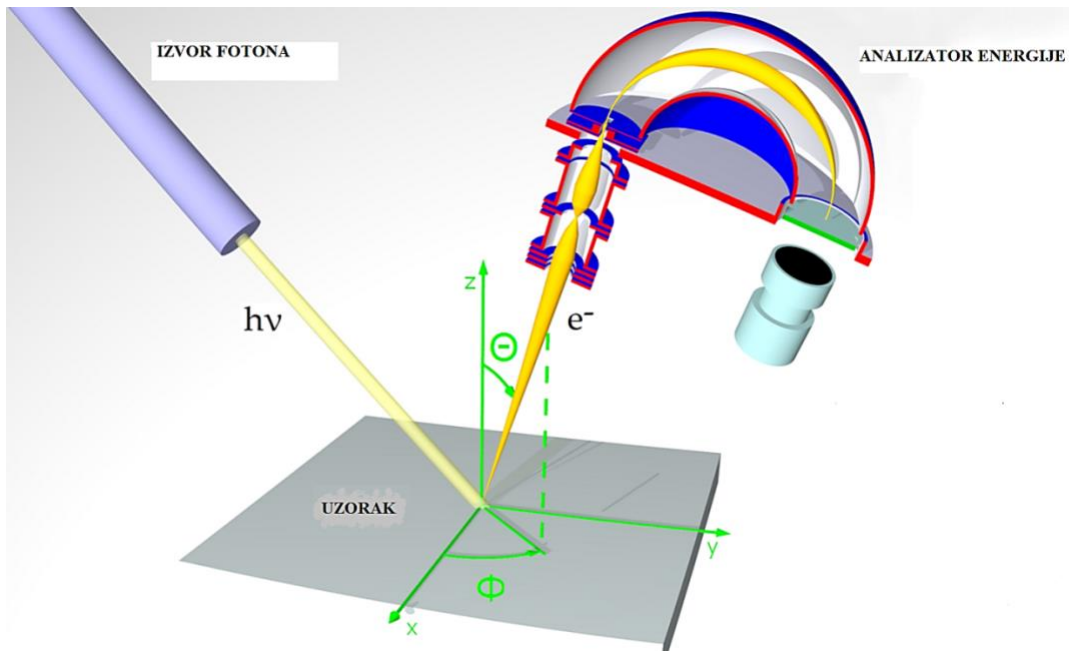
gdje je χ konstanta koja ovisi o vrsti otpornika i valnoj dužini svjetlosti, A konstanta koja ovisi o vrsti foto-otpornika i E je oznaka za osvijetljenost.

3.4. Foto-elektronska spektroskopija

Foto-elektronska spektroskopija (*engl. photo electron spectroscopy*) motri elektrone koje pod djelovanjem elektromagnetskog zračenja ispušta molekula. Potrebno je da elektromagnetsko zračenje ima dostatnu energiju kako bi se ionizirala molekula, te se u tu svrhu upotrebljava vakumsko UV zračenje. Potrebno je da zračenje bude monokromatsko odnosno ograničeno na jednu valnu duljinu. Koriste se i rendgenska zračenja, ali rijetko. Kako bi se ionizirali valentni elektroni vakuumsko UV zračenje posjeduje dostatnu energiju, te je aplikacijom ovog zračenja moguće uočiti ionizaciju valentnih elektrona i utvrditi energiju orbitala elektrona.

Ukoliko primijenimo rendgensko zračenje, moguće je izazvati ionizaciju elektrona unutarnje ljuske, odnosno elektrona koji nisu valentni i koji su bliže jezgri. Primjenjivanjem rendgenskog zračenja nije moguće postignuti razlučivanje kao što je to slučaj kod primjene vakumskog UV zračenja. S obzirom na međusobni utjecaj elektrona, energija elektrona u unutarnjim ljuskama atoma smanjuje se zbog prisutnosti drugih elektrona, kako vanjskih tako i onih u bližem okruženju jezgre [33].

ESCA (*engl. Electron Spectroscopy for Chemical Analysis*) je foto-elektronska spektroskopija kojom se upotrebljava rendgensko zračenje. Foto-elektronska spektroskopija je bazirana na fotoelektričnom učinku. Elektron koji je izbačen iz molekule ima energiju ekvivalentnu energiji elektromagnetskog zračenja, umanjenu za energiju potrebnu za izbacivanje elektrona, te energije rotacije i vibracije molekula [34].



Slika 25. Prikaz rada kutne foto-elektronske spektroskopije [35]

Na prethodnoj slici (Slika 25) dan je prikaz rada kutne foto-elektronske spektroskopije koja je jedna od najčešće primjenjivanih metoda kod proučavanja elektronske vrpce od čvrstih tijela. Kako bi se prikupile informacije o gustoći gibanja i energiji elektrona koji se kreću u kristalu potrebno je mjeriti kutne raspodjele i kinetičke energije elektrona koji su emitirani iz uzorka osvijetljenog zračenjem dostatno velike energije. Nužno je da uzorak bude fino orijentiran monokristal kako bi se mogle dobiti informacije o tome kako energija ovisi o količini gibanja uzduž pojedinog od pravaca simetričnosti u kristalu. Najčešće se mjeri kinetička energija foto-elektrona koji su emitirani u pojedinom pravcu. Ti foto-elektroni se sakupljaju odgovarajućim analizatorom za određeni prihvatni kut.

3.5. Svjetlomjer

Svjetlomjer predstavlja uređaj uz pomoć kojeg se može izmjeriti kontrast i intenzitet svjetlosti te odrediti ekspozicija. To je zapravo fotometar koji je sastavni element današnjih fotoaparata ili je zaseban uređaj. S obzirom na vrstu foto-osjetljivog elementa, možemo razlikovati dva tipa svjetlomjera. U prvom se koristi foto-ćelija, uglavnom od selena, u kojoj se pod djelovanjem svjetlosti proizvodi struja koja je razmjerna svjetlosnoj jakosti. Navedena foto-ćelija je spojena na mikro-ampermetar koji omogućuje izravno očitavanje rezultata. U drugom tipu koristi se foto-otpornik, elektronička komponenta kod koje se pod djelovanjem svjetlosti mijenja električna vodljivost. Kod ovog tipa nužna je upotreba baterije kao izvora električne struje. Baterija osigurava električnu struju koja se mjeri uz pomoć mikro-ampermetra, dok se struja mijenja usklađeno s ponašanjem foto-otpornika. Kadmij sulfidska ćelija (*CdS*) se uglavnom upotrebljava kao foto-otpornik. Selenski svjetlomjeri su bolji od *CdS* svjetlomjera jer ne postoji potreba za izvorom električne struje. Prednost *CdS* svjetlomjera je što su u mogućnosti izmjeriti značajno manje razine svjetlosti te je ta karakteristika izražena za vrijeme mjerenja svjetla za fotografije [36]. Međutim, potrebno je naglasiti da se u današnje vrijeme umjesto analognih mikro-ampermetara (očitanje preko kazaljki) pojavljuje svjetlomjer kojem se vrijednosti očitavaju putem digitalnog zaslona, te je takav primjer prikazan na sljedećoj slici (Slika 26).



Slika 26. Digitalni svjetlomjer Minolta [37]

S obzirom na način korištenja svjetlomjeri se mogu podijeliti na one koji mjere intenzitet:

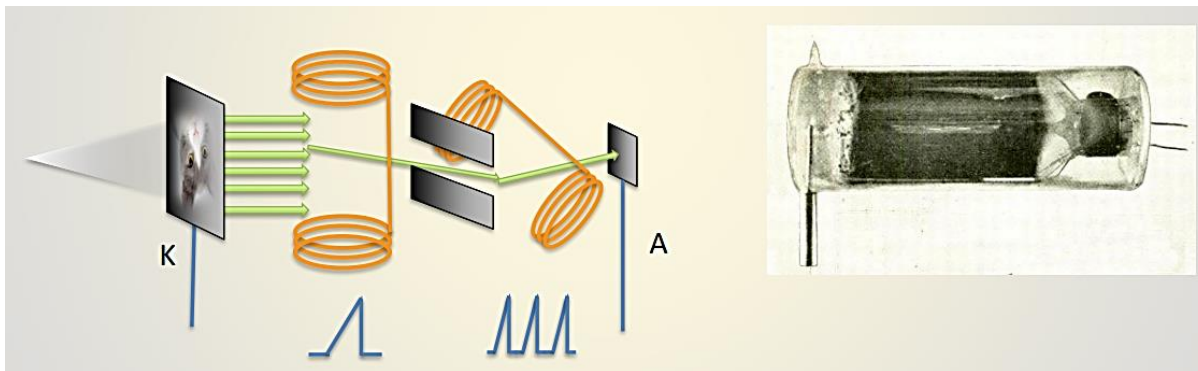
- upadnog svjetla,
- reflektiranog svjetla.

Upadno svjetlo je svjetlo koje upada na plohu objekta. Reflektirano svjetlo je ono koje se odbija od spomenute plohe. Jačina, tip i udaljenost izvora diktiraju intenzitet upadnog svjetla. Intenzitet reflektiranog je osim navedenih parametara u ovisnosti o stupnju refleksije plohe objekta.

Kako bi se izmjerilo reflektirano svjetlo svjetlomjer se usmjerava ka objektu. U svrhu sakupljanja zraka svjetlosti za vrijeme manjih svjetlosnih razina ispod foto-osjetljivog elementa pozicioniran je optički kolektor. Namještanjem svjetlomjera u položaj objekta i pozicioniranjem u smjeru kamere mjeri se upadno svjetlo. Svjetlomjer koji služi kako bi se izmjerilo upadno svjetlo sadrži disk od identičnog materijala kojim je omogućeno očitavanje intenziteta određenih izvora. Svjetlomjer koji mjeri upadno svjetlo dominantan je u filmskoj industriji. Određene verzije svjetlomjera imaju mogućnost da postavljanjem nastavka istim instrumentom izmjere reflektiranu i upadnu svjetlost. Svaki pojedini model se razlikuje po pitanju očitavanja izmjerenih rezultata i utvrđivanja ekspozicije [36].

3.6. Senzori slike

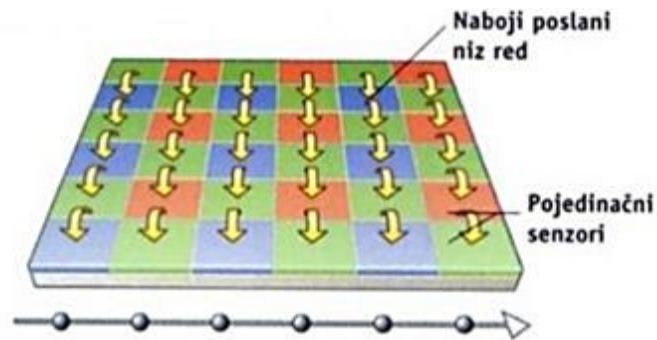
Prvi senzori slike (*engl. Image sensors*) bili su elektronske cijevi koje su radile na principu fotoelektričnog učinka. Primjer je uređaj „Disektor slike“ koji je elektronska cijev od video kamere te se u njoj uz pomoć fotoelektričnog učinka transformirala optička slika u skenirani električni signal. Ovakvi uređaje izrađivali su izumitelji kao što je Max Dieckmann, Rudolf Hell i Philo Farnsworth tijekom dvadesetih i tridesetih godina prošlog stoljeća i koristili su se kratko vrijeme. Na sljedećoj slici (Slika 27) prikazan je „Disektor slike“ koji predstavlja prvi elektronički senzor slike [38].



Slika 27. Disektor slike [38]

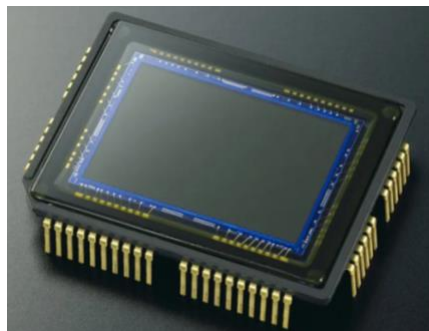
Današnji senzori slike sastoje se foto-osjetljivih ćelija koje čine mrežu. Senzor slike nakon što na njega padne svjetlost generira električni impuls. Jakost impulsa zavisi o dozi svjetlosti koja upada na senzor. Električni impuls pojedine ćelije je proporcionalan jakosti upadnog svjetla. Kako bi se spomenuti impulsi mogao evidentirati u digitalnom formatu, impuls je potrebno kvantizirati te pojedinom impulsu dodijeliti bročanu oznaku. Zatim signali putuju na obrađivanje softveru digitalnog foto-aparata. Tu se vrši povezivanje tri mreže razdvojenih boja u jednu sliku (interpolacija boja). Interpolacija predstavlja važan pomak jer se stavljanjem algoritam interpolacije poboljšava razina kvalitete fotografije digitalnog foto-aparata [39].

Osnovni princip rada svih senzora slike je fotoelektrični učinak. Ovdje će biti prikazane osnovne vrste današnjih senzora slike, a to su CCD senzori i CMOS senzori. To su senzori koji upotrebljavaju fotoelektrični efekt u foto-diodi da bi se svjetlo transformiralo u elektrone odnosno fotoni u naboj. CCD senzori (*engl. Charged Coupled Device*) su uređaji koji su izrađeni od silicijskog čipa gdje se jedne strane nalazi površina koja je osjetljiva na svjetlost. Sadrže više od stotinu tisuća foto-osjetljivih dioda kojima se bilježi primljena svjetlosna jakost te nakon toga transformira u električni naboj. Jačina naboja razmjerna je svjetlosnoj jakosti koju je primila dioda. Na kraju se izmjereni naboj transformira u piksel [39].



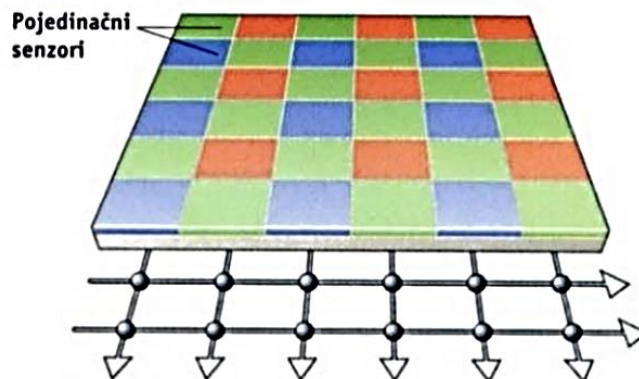
Slika 28. CCD senzorska mreža – serijsko očitavanje [39]

Kao što je vidljivo na prethodnoj slici (Slika 28) CCD senzor je matrica u obliku pravokutnika slična mozaiku. Sastoji se od milijuna ćelija u obliku kvarata i pravokutnika. Brojnost foto-osjetljivih ćelija ovisi o veličini plohe čipa. Na prethodnoj slici je također vidljivo da se izvodi serijsko očitavanje električnih impulsa tj. jedan poslije drugoga. Nužno je pojačanje električnih impulsa, a to se izvodi uz pomoć pojačivača CCD senzora (Slika 29) koji su pozicionirani na završetcima redova.



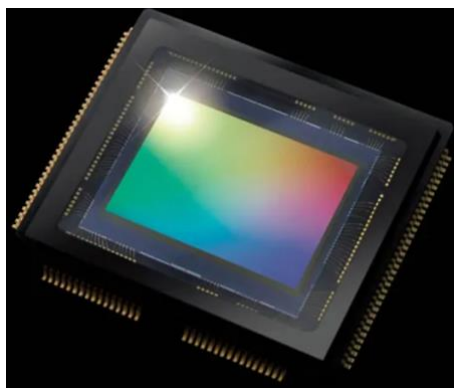
Slika 29. CCD senzor slike [39]

CMOS senzori (*engl. Complementary Metal-Oxide-Semiconductor*) slično kao CCD senzori rade na konceptu milijuna malih foto-osjetljivih ćelija koje čine mrežu. Kada na nju pada svjetlost svaka pojedina ćelija generira električni impuls. Snaga tog impulsa zavisi o koncentraciji svjetlosti. Temeljna razlika CCD senzora i odnosu na CMOS senzor je u principu kojim se električni impuls sakuplja iz ćelije. CCD senzor očitava električni impuls serijski odnosno jedan nakon drugog. Na sljedećoj slici (Slika 30) nalazi se prikaz CMOS senzorske mreže.



Slika 30. CMOS senzorska mreža – X-Y adresiranje [39]

CMOS senzor ima X-Y adresiranje što znači da se kod ovakvih senzora pojedina foto-osjetljiva ćelija može samostalno iščitati uz pomoć koordinata na mreži. S ovakvim načinom rada moguće je sve električne impulse odjedanput procesuirati te na taj način osloboditi senzor kako bi se mogla izvršiti naredna ekspanzija. Ovim je načinom rada omogućeno izmjeriti ekspanziju i auto-fokusiranje [39]. Na sljedećoj slici (Slika 31) nalazi se prikaz CMOS senzora slike.



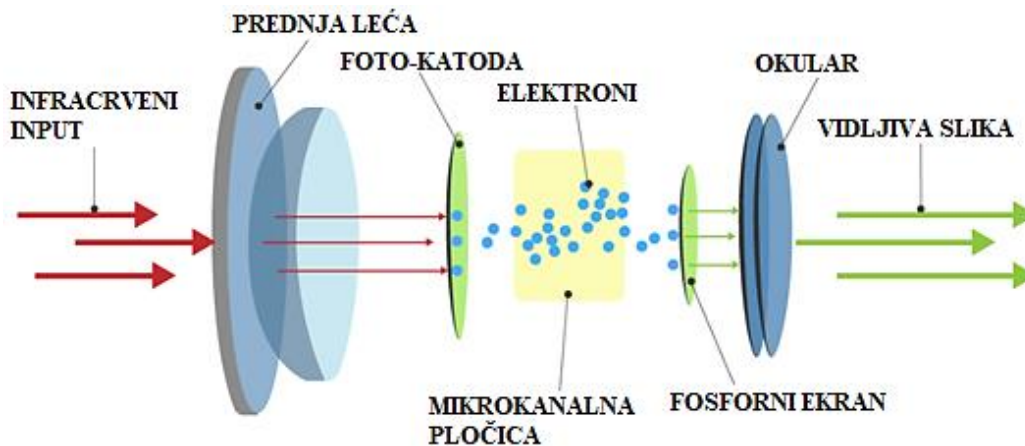
Slika 31. CMOS senzor slike [39]

CMOS senzor slike koriste puno manje energije od CCD senzora slike i njihov je rad brži. Glavni im je nedostatak niska kvaliteta fotografije zbog povećanog šuma, ali se taj nedostatak poprilično uspješno riješio korištenjem mikro-leća iznad foto-osjetljivih ćelija od senzora.

3.7. Uređaji za noćni vid

Rad uređaja za noćni vid također se zasniva na fotoelektričnom učinku. To su uređaji uz koje je moguće vizualizirati sliku kada imamo nisku razinu svjetlosti na način da se poboljšava noćni vid korisnika uređaja. Uređaji za noćni vid razvijeni su za vojnu uporabu, gdje je vidljivost u mraku očita taktička prednost. Ovakve uređaje također koristi policija u gradskim i ruralnim područjima.

Uređaj za noćni vid pretvara infracrveno svjetlo koje je reflektirano od objekta u vidljive slike. Srce ovih uređaja su pojačivačke cijevi izrađene od cijevi čiji je sastavni dio foto-katoda na jednom kraju, unutarnju anoda u sredini i fosforni ekran na drugom kraju. Između foto-katode i anode se primjenjuje visoki napon kako bi se stvorilo jako elektrostatičko polje. Kada infracrveno pogodi foto-katodu elektroni se emitiraju i ubrzavaju uz pomoć električnog polja prema fosfornom ekranu što proizvodi vidljivu sliku. Od samih početaka ovih uređaja njihov osnovni princip ostao je isti, ali su se poboljšali razlučivost, jasnoća i svjetlina slike tijekom godina [40]. Na sljedećoj slici (Slika 32) nalazi se prikaz principa uređaja za noćni vid.



Slika 32. Prikaz principa rada uređaja za noćni vid [40]

Cijev pojačivača slike koja je glavna radna komponenta uređaj za noćno gledanje sastoji se od milijuna optičkih staklenih vlakana. Staklo koje se koristi napravljeno je prema posebnoj formuli koja zadržava željene karakteristike kada se zagrijava i vuče. Staklo optičke kvalitete koristi se za okular i izlazni prostor. Izlazni prozor je okularna leća slično kao okular tradicionalnog dalekozora.

Ostali materijali korišteni za cijev za pojačivač slike su fosfor i galijevarsenid. Tijelo cijevi sastoji se od metala i keramike, a korišteni metali mogu biti aluminij, krom i indij.

4. ZAKLJUČAK

U ovom radu dan je teorijski opis fotoelektričnog učinka koji se odnosi na pojavu emitiranja elektrona iz metala koje je apsorbirao elektromagnetsko zračenje. Fizičar Albert Einstein objasnio je fotoelektrični učinak proširivši Planckovu ideju (za to doba prilično revolucionarnu) kvantizacije energije i na svjetlost. Einstein je pretpostavio da je svjetlosti i čestične prirode i upravo tom čestičnom prirodom objasnio fotoelektrični učinak, pojavu koja se nije mogla objasniti valnom prirodom svjetlosti. Takvo shvaćanje svjetlosti objašnjen je još niz drugih pojava i otvoren je put razvoju onoga što danas nazivamo modernom fizikom i kvantnom mehanikom. Nakon teorijskog opisa u ovom radu prikazani su praktični primjeri primjene fotoelektričnog učinka. Jedne od njih su foto-ćelije koje su u prošlosti korištene za pronalaženje svjetla uz pomoć vakumskih cijevi s katodama koje služe za emitiranje elektrona te anodu za sakupljanje ukupne struje. U današnjoj praksi prisutne su foto-diode čija je baza poluvodič i koriste u primjenama kao što su solarne ćelije. U ovom radu je prikazan princip rada foto-multiplikatora koji se koriste u spektroskopiji koja razdjeljuje svjetlo na drugačije valne duljine. Također, primjena foto-dioda i foto-multiplikatora je prisutna kod tehnologije obrade slike što se odnosi na pojačivače slike i cijevi koje su se koristile u prošlosti za televizijske kamere. Istraživanjem primjene fotoelektričnog učinka može se ustanoviti na koji način elektroni unutar atoma prelaze na druga energetska stanja. Vjerojatno, najbitnija primjena fotoelektričnog učinka je bila aktiviranje cijele kvantne revolucije koja je potakla znanstvenike na promišljanje o strukturama atoma i svjetlosti na sasvim drugačiji način.

5. LITERATURA

- [1] Kulišić, P., Lopac V., Elektromagnetske pojave i struktura tvari, Školska knjiga, Zagreb, 2003.
- [2] Prirodoslovni – matematički fakultet, Sveučilište u Splitu, Nastanak kvantne mehanike, <https://mapmf.pmfst.unist.hr/~agicz/Pred2017ModPhys4.pdf> (pristup 15. svibnja 2023.)
- [3] Begović N., Kvantna fizika, <http://nedeljko-begovic.com/teorija/kf.html> (pristup 10. svibnja 2023.)
- [4] Galović, S., Tuškan T., Valno-čestična priroda svjetlosti i tvari, Fotoelektrični učinak, <https://edutorij.e-skole.hr/share/proxy/alfresco-noauth/edutorij/api/proxy-guest/a985a697-8949-410e-af32-bfd69b605dd6/fotoelektricni-ucinak.html> (pristup 15. svibnja 2023.)
- [5] Kirin A., Žugčić F., Princip rada i primjena fotonaponskih ćelija, Veleučilište u Karlovcu, 2018, <https://www.bib.irb.hr/1251401> (pristup 16. svibnja 2023.)
- [6] "Report of the Bord of Regents By Smithsonian Institution", Smithsonian Institution.
- [7] Klabučar, D., Matematičko-fizički list, Zagreb, 2006, Vols LVI, 1-10.
- [8] Subašić, D., Einstein i kvant svjetlosti, Sveučilište u Zagrebu, Prirodoslovno-matematički fakultet, 2015.
- [9] Lenard, P., Über die lichtelektrische Wirkung, Annalen der Physik, vol. 313, no. 5, pp. 149-198, 1902. <https://doi.org/10.1002/andp.19023130510> (pristup 10.07.2024.)
- [10] Pred_12-13_Temelji suvremene kvantne fizike.pdf, Interni nastavni materijali, Sveučilište u Zagrebu Fakultet kemijskog inženjerstva i tehnologije, Movre Šapić I.
- [11] Dr. sc. Damir Lelas, Fizika 2, Predavanje 10, Kvantna priroda, <http://adria.fesb.hr/~zmiletic/Fizika%202/10.%20Kvantna%20priroda%20svjetlosti/10-Predavanje,%20Kvantna%20priroda%20svjetlosti.pdf> (pristup 15. svibnja 2023.)
- [12] Horvat, D., Fizika II, Element, Zagreb, 2018.
- [13] Photoelectric Materials and Devices: Introduction, World Scientific. <https://worldscientific.com> (pristup 10.07.2024.)
- [14] bog5.in.ua, Internal photoelectric effect. Photocells. Mass and the momentum of electrons, <https://bog5.in.ua> (pristup 10.07.2024.)
- [15] Photodetectors, CERN Indico. <https://indico.cern.ch> (pristup 10.07.2024.)

- [16] Elektronika, PN – spoj, <http://www.fpz.unizg.hr/ztos/EE/Elektro6.pdf> (pristup 1. lipnja 2023.)
- [17] Rebrović, D., Fizikalne osnove solarnih elektrana, 2019, <https://www.solarne-elektrane.hr/fizikalne-osnove-fotonaponskih-elektrana/> (pristup 1. lipnja 2023.)
- [18] Kulišić, P., Vuletin, J., Zulin, I., Sunčane ćelije, Školska knjiga, Zagreb 1994.
- [19] Majdandžić, Lj., Fotonaponski sustavi, Priručnik, Tehnička škola Ruđera Boškovića u Zagrebu, http://www.solarni-paneli.hr/pdf/01_handbook_fotonapon.pdf (pristup 1. lipnja 2023.)
- [20] Majdandžić Lj., SOLARNI SUSTAVI- Teorijske osnove, projektiranje, ugradnja i primjeri izvedenih projekata, Graphis d.o.o., Zagreb, 2010.
- [21] Stanković, A. T., Tehnologije solarnih ćelija, EIHP, 2017, https://aolab.fer.hr/download/repository/Tehnologije_solarnih_celija_20170127_ATS.pdf (pristup 27. svibnja 2023.)
- [22] Light Dependent Resistor LDR: Photoresistor, https://www.electronics-notes.com/articles/electronic_components/resistors/light-dependent-resistor-ldr.php (pristup 28. svibnja 2023.)
- [23] Scintilacijski detektori, <http://www.phy.pmf.unizg.hr/~bosnar/pfec/scintilator.pdf> (pristup 27. svibnja 2023.)
- [24] Makek, M., Praktikum iz moderne fizike, Silicijski fotomultiplikator, Zagreb, 2020, http://www.phy.pmf.unizg.hr/~makek/prakt_mf/vjezbe/SiPM.pdf (pristup 27. svibnja 2023.)
- [25] ETF Beograd, Katedra za mikroelektroniku i tehničku fiziku, Laboratorijske vježbe iz senzora i pretvarača, http://nobel.etf.bg.ac.rs/studiranje/kursevi/of3sp/materijali/2020/sip_vezba1_fotodioda_20_20.pdf (pristup 27. svibnja 2023.)
- [26] Pantić, M., Simboli i njihovo značenje u elektronici, <https://www.stem.ba/arduino-elektronika/tutorijali/item/310-simboli-i-njihovo-znacenje-u-elektronici> (pristup 27. svibnja 2023.)
- [27] Poluprovodnički izvori i detektori svetlosti, https://elektrotehnikamesbor.files.wordpress.com/2016/10/poluprvopvdni_ki_izvori_i_detektori_1449080541969.pdf (pristup 29. svibnja 2023.)

- [28] Optoelektronika, Materijal za pripremu ispita iz predmeta, Optoelektronika za studente smjera Primjenjene elektronike (4. godina), <https://pdfcoffee.com/optoelektronika-3-pdf-free.html> (pristup 28. svibnja 2023.)
- [29] Electrical Workbook, What is Light Activated SCR (LASCR)? Working, Symbol & Construction, <https://electricalworkbook.com/lascr/> (pristup 27. svibnja 2023.)
- [30] Patil, R., Light activated SCR, 2021, <https://www.slideshare.net/RashmeePatil/light-activated-scr-249854811> (pristup 29. svibnja 2023.)
- [31] Photoresistor – Symbol, Working, Types & Applications, <https://www.circuitstoday.com/photoresistor> (pristup 27. svibnja 2023.)
- [32] Pantić, D., 2018 – Predavanje 13, 2018, https://mikro.elfak.ni.ac.rs/wp-content/uploads/Lec_13_Optokomponente_2018.pdf (pristup 29. svibnja 2023.)
- [33] Goldstein, N., Scanning Electron Microscopy and X-Ray Microanalysis, Springer, New York, 2003, https://www.academia.edu/37560066/Scanning_electron_microscopy_and_x_ray_microanalysis_Goldstein_Newbury_pdf (pristup 28. svibnja 2023.)
- [34] Herbert, B. M., The work function of the elements and its periodicity, Journal of Applied Physics, 48, 1977.
- [35] Fotoelektrični efekt, https://www.wikiwand.com/sh/Fotoelektri%C4%8Dni_efekt#Media/Datoteka:ARPESgeneral.png (pristup 27. svibnja 2023.)
- [36] Leksikografski zavod Miroslav Krleža, Filmska enciklopedija, Svjetlomjer, <https://filmska.lzmk.hr/natuknica.aspx?ID=5023> (pristup 28. svibnja 2023.)
- [37] FOTOELEMENTAR, Predavanja, Svjetlo u fotografiji, Svjetlomjer, <http://fotoelementar.com/offsite-4/offsite-12/page-69/> (pristup 29. svibnja 2023.)
- [38] Rožić, M., Senzori slike, Mikroprojekt, https://www.fer.unizg.hr/download/repository/Senzori_Slike-171208-FER.pdf (pristup 28. svibnja 2023.)
- [39] SENZORI, Seminar – Odabrane teme iz računarstva, Senzori u fotoaparatu, <https://peytonbarbara.wixsite.com/otr-senzori/senzori-u-fotoaparatu> (pristup 27. svibnja 2023.)

[40] Sukhotin, M., Night Vision 101: Seeing in the Dark, 2016,

<https://www.bhphotovideo.com/explora/outdoors/buying-guide/night-vision-101-seeing-dark> (pristup 27. svibnja 2023.)

POPIS SIMBOLA I KRATICA

h	Planckova konstanta
ν	frekvencija svjetlosti
W_i	izlazni rad
m_e	masa elektrona
v_{max}	maksimalna brzina izbačenih elektrona
c	brzina gibanje fotona
E	energija fotona
Na	natrij
Al	aluminij
Cu	bakar
Zn	cink
Ag	srebro
Pt	platina
Pb	olovo
Fe	željezo
UV	ultraljubičasto zračenje
c_0	brzina svjetlosti
I_l	foto-struja
T	temperatura
K	Bolzmannova konstanta
I_0	struja mraka
U	napon ćelije
Q	naboj elektrona
N	faktor idealnosti diode
I_{ks}	struja kratkog spoja
U_{ok}	napon otvorenog kruga
P_m	maksimalna snaga solarne ćelije

U_m	maksimalni napon
I_m	maksimalna struja
$n(\lambda)$	odzivnost
λ	broj upadnih fotona
δ	faktor sekundarne emisije
P_0	upadna optička snaga
\mathcal{R}	koeficijent konverzije foto-diode
I_d	struja mraka foto-diode
V	napon foto-diode
k_B	Boltzmannova konstanta
T	apsolutna temperatura
I_p	intenzitet generirane foto-struje
I	ukupna struja foto-diode
I_c	kolektorska struja
v_{ce}	napon između kolektora i emitera
χ	konstanta koja ovisi o vrsti otpornika i valnoj dužini svjetlosti
A	konstanta koja ovisi o vrsti foto-otpornika
E	osvijetljenost
UV	ultraljubičasto (engl. <i>ultraviolet</i>)
CdS	kadmij-sulfidska ćelija