

# Određivanje Planckove konstante iz fotoelektričnog učinka

---

**Bradarić, Domagoj**

**Master's thesis / Diplomski rad**

**2023**

*Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj:* **Josip Juraj Strossmayer University of Osijek, Department of Physics / Sveučilište Josipa Jurja Strossmayera u Osijeku, Odjel za fiziku**

*Permanent link / Trajna poveznica:* <https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:160:320079>

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

*Download date / Datum preuzimanja:* **2024-12-03**

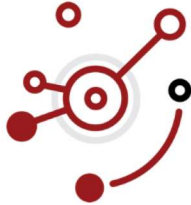


*Repository / Repozitorij:*

[Repository of Department of Physics in Osijek](#)



**SVEUČILIŠTE JOSIPA JURJA STROSSMAYERA U OSIJEKU**  
**ODJEL ZA FIZIKU**



**DOMAGOJ BRADARIĆ**

**Određivanje Planckove konstante iz fotoelektričnog  
učinka**

**Diplomski rad**

**Osijek, 2023.**

**SVEUČILIŠTE JOSIPA JURJA STROSSMAYERA U OSIJEKU**  
**ODJEL ZA FIZIKU**



**DOMAGOJ BRADARIĆ**

**Određivanje Planckove konstante iz fotoelektričnog  
učinka**

**Diplomski rad**

Predložen Odjelu za fiziku Sveučilišta Josipa Jurja Strossmayera u Osijeku  
radi stjecanja akademskog naziva **MAGISTRA EDUKACIJE FIZIKE I INFORMATIKE**

**Osijek, 2023.**

**"Ovaj diplomski rad je izrađen u Osijeku pod vodstvom mentora doc. dr. sc. Denisa Stanića u sklopu Sveučilišnog diplomskog studija Fizike i informatike na Odjelu za fiziku Sveučilišta Josipa Jurja Strossmayera u Osijeku".**

## Sadržaj

1. Uvod.....	1
2. Povijesni pregled.....	2
3. LED dioda.....	8
3.1. Princip rada i karakteristike.....	8
3.2. Povijesni razvoj.....	12
3.3. Građa LED diode.....	15
3.4. Prednosti i nedostaci LED diodi:.....	16
4. Ogib.....	18
5. Spektrometar.....	22
5.1. USB2000 spektrometar.....	22
6. Eksperimentalno određivanje Planckove konstante.....	24
6.1. Pokus 1: Određivanje napona praga iz strujno-naponske karakteristike diode.....	24
6.2. Pokus 2: Određivanje valne duljine svjetlećih dioda pomoću spektrometra.....	37
6.3. Pokus 3: Određivanje valne duljine svjetlećih dioda pomoću optičke rešetke.....	41
6.4. Određivanje Planckove konstante iz pokusa 1. i pokusa 2.....	46
6.5. Određivanje Planckove konstante iz pokusa 1. i pokusa 3.....	48
7. Metodička obrada:.....	52
8. Zaključak.....	63
9. Literatura.....	64

Određivanje Planckove konstante iz fotoelektričnog učinka

**DOMAGOJ BRADARIĆ**

**Sažetak**

Pojavu fotoelektričnog učinka prvi je primijetio njemački fizičar Heinrich Hertz 1887. godine, a objasnio Albert Einstein tek 1905. godine uvođenjem teorije fotona u kojoj opisuje foton kao najmanju nedjeljivu količinu svjetlosti čija je energija jednaka umnošku frekvencije i Planckove konstante koju je Max Planck predložio prilikom opisivanja zračenja crnog tijela. Ruski znanstvenik i izumitelj, Oleg Losev u svojim radovima iznosi tvrdnju da prilikom emisije svjetlosti svjetleće diode dolazi do inverznog fotoelektričnog efekta. Kada je LED dioda propusno polarizirana, elektroni iz n-tipa rekombiniraju sa šupljinama iz p-tipa materijala pri čemu zbog razlike u njihovim energijama dolazi do emisije svjetlosti. Određivanjem napona koljena svjetleće diode i frekvencije emitirane svjetlosti, odnosno valne duljine svjetlosti moguće je odrediti vrijednost Planckove konstante.

**Ključne riječi:** fotoelektrični učinak, Planckova konstanta, LED dioda

(65 stranica, 22 slike, 25 literaturnih navoda)

**Rad je pohranjen u knjižnici Odjela za fiziku.**

**Mentor:**

**Ocjenjivač:**

**Rad prihvaćen:**

Determination of Planck's constant using the photoelectric effect

**DOMAGOJ BRADARIĆ**

## **Abstract**

The occurrence of photoelectric effect was first noticed by German physicist Heinrich Hertz in 1887 and explained by Albert Einstein in 1905 in his photon theory in which a photon is described as quantum whose energy is equal to the product of frequency and the Planck constant proposed by Max Planck which he used for describing black-body radiation. Russian scientist and inventor, Oleg Losev in his publications speculates that an inverse photoelectric effect occurs during the emission of light from a light-emitting diode. When the LED is forward biased, electrons from the n-type recombine with holes from the p-type material and due to the difference in their energies light is emitted. By determining the knee voltage of the light-emitting diode and the frequency of the emitted light, i.e. the wavelength of the light, it is possible to determine the value of Planck's constant.

**Keywords:** photoelectric effect, Planck's constant, LED diode

(65 pages, 22 figures, 25 references)

**Thesis is deposited in Department of Physics library.**

**Supervisor:**

**Reviewer:**

**Thesis accepted:**

## 1. Uvod

Kroz povijest ideje o fizikalnim karakteristikama svjetlosti su se konstantno razvijale i mijenjale što nas je konačno dovelo do ideje o dualnoj prirodi svjetlosti. Osim što svjetlost, odnosno elektromagnetsko zračenje pokazuje valna, pokazuje i čestična svojstva koja se mogu dokazati pomoću fotoelektričnog učinka.

Prema Einsteinu, prilikom fotoelektričnog učinka svjetlost se ne ponaša kao val, već kao roj sitnih čestica nazvanih fotoni. Koristeći Planckove ideje o zračenju crnog tijela Einstein objašnjava fotoelektrični efekt i povezuje energiju fotona s frekvencijom elektromagnetskog zračenja i Planckovom konstantom.

Jedan od načina određivanja Planckove konstante je pomoću LED dioda koje emitiraju energiju u obliku svjetlosti prilikom rekombinacije slobodnih elektrona i šupljina. Samu vrijednost konstante moguće je odrediti iz poznavanja napona koljena i frekvencije svjetleće diode (LED).

Korišteni pribor za ovaj eksperiment može se pronaći u gotovo svakoj učionici fizike. Cilj ovog diplomskog rada je pokazati učiteljima i učenicima srednjih škola kako pomoću svjetleće diode odrediti vrijednost jedne od temeljnih konstanti u fizici.



## 2. Povijesni pregled

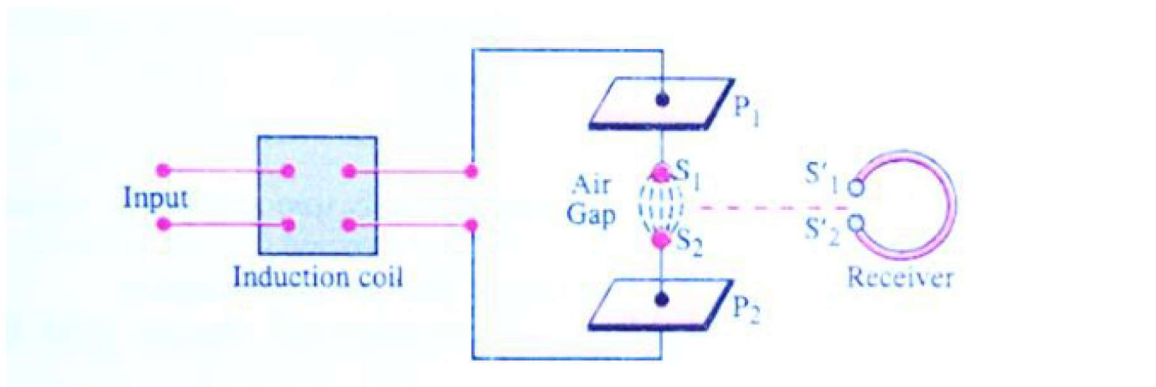
Otkriće fotoelektričnog efekta povezujemo s njemačkim fizičarom Heinrichom Rudolfom Hertzom koji je taj efekt otkrio izvođeci pokuse za dokazivanje elektromagnetskih valova 1887. godine. U to vrijeme Hertz je radio kao profesor fizike na Sveučilištu u Karlsruheu, a mentor mu je bio njegov bivši profesor Hermann von Helmholtz. Još dok je bio student, Helmholtz je imao velike ambicije za Hertza te je nastojao da Hertz osvoji nagradu koju je tada dijelila Berlinska akademija znanosti. Nagrada se dijelila za eksperimentalnu potvrdu Maxwellovih teorija i jednažbi povezanih uz elektromagnetizam. Hertza je zanimalo kako se elektromagnetski valovi, točnije radiovalovi kreću kroz prostor te je kako bi potvrdio Maxwellova predviđanja osmislio eksperiment. [1]



*Slika 1. Heinrich Rudolf Hertz [2]*

U svojem eksperimentu Hertz je postavio na jedan kraj prostorije emiter, a na drugi prijemnik. Kao prijemnik Hertz je koristio kružno savijenu bakrenu žicu debljine 1 mm čiji je promjer bio 7,5 cm. Emiter se sastojao od indukcijske zavojnice koja je bila spojena s dvije metalne ploče

(na slici označene s  $P_1$  i  $P_2$ ) koje su na krajevima imale dvije metalne kuglice (na slici označene sa  $S_1$  i  $S_2$ ). [3]



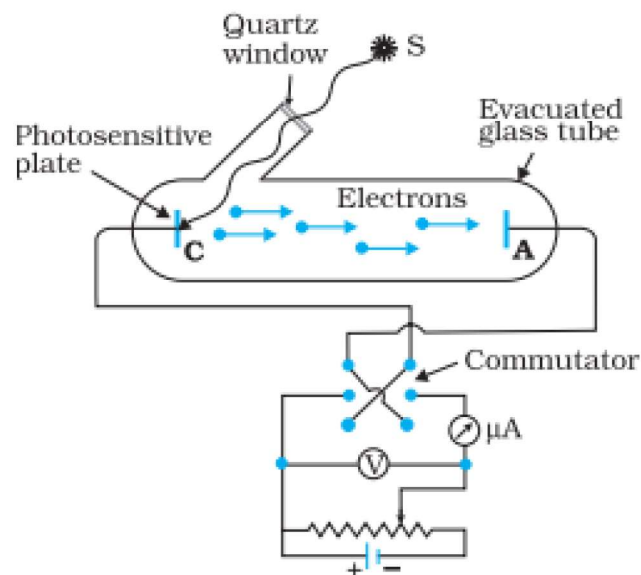
Slika 2. Hertzov eksperimentalni postav [3]

Hertzova ideja bila je da inducira iskrenje pomoću emitera, a da se na prijemniku koji se nalazi na drugom kraju prostorije također između krajeva žica stvore iskre. Svojim eksperimentom Hertz bi potvrdio Maxwellovu teoriju o postojanju elektromagnetskih valova.

Kako bi bolje uočio iskrenje, Hertz je prijemnik postavio u kutiju, misleći da će se iskra bolje vidjeti u mraku. Na njegovo iznenađenje rezultat je bio suprotan od očekivanog. Isto je ponovio i s komadom stakla kojeg je postavio ispred prijemnika te je opet uočio da se iskra slabije vidi. Potaknut svojim zapažanjima, Hertz je eksperiment ponovio s raznim preprekama koje bi postavljao između prijemnika i emitera. Koristeći kvarc kao prepreku uočio je da je iskra ista kao i u slučaju kada prepreka ne postoji, a razlog tome je što kvarc ne apsorbira ultraljubičasto zračenje. Hertz je objavio rezultate svojih istraživanja, ali u njima nije teorijski objasnio gore navedeni fenomen. [1]

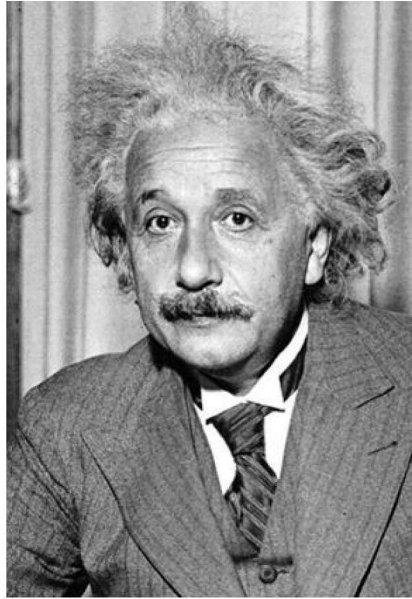
Tijekom svojih istraživanja Hertz su pomagali njegovi studenti među kojima se najviše isticao Wilhelm Hallwachs. S ciljem da teorijski objasni Hertzova opažanja, Hallwachs je osmislio jednostavni pokus u kojem je pločicu cinka povezo s elektroskopom. Zatim je elektroskop negativno nabio te je uočio da kada pločicu obasja ultraljubičastim zračenjem dolazi do gubitka naboja. Isti pokus ponovio je i s pozitivno nabijenim elektroskopom, ali u ovom slučaju, na svoje iznenađenje elektroskop je postao još više nabijen kada bi bio obasjan istom ultraljubičastom svjetlošću. Iz svojih istraživanja Hallwachs je zaključio da prilikom obasjavanja pločice od cinka ultraljubičastom svjetlošću dolazi do emisije negativno nabijenih čestica, odnosno elektrona.

Osim Wilhelma Hallwachsa, jedan od istaknutijih studenata Heinricha Hertza bio je Philipp Lenard. On je u svojim istraživanjima koristio uređaj koji se sastojao od vakuumske cijevi s prozorom koji je vodio do metalne ploče. Kada bi metalnu ploču kroz prozor načinjen od kvarca obasjali ultraljubičastim svjetlom, elektroni izlijeću iz obasjanog metala i dolaze do druge metalne ploče koja se nalazi na suprotnom kraju. Ploča na koju su pali elektroni spojena je s ampermetrom pomoću kojeg se mjeri jakost struje. Lenard je zapazio da se sa povećanjem intenziteta svjetlosti povećava i vrijednost dobivene struje te da za kraće valne duljine izbačeni elektroni imaju veće energije. Zaključio je da za svaki materijal postoji određena minimalna vrijednost frekvencije koja određuje hoće li doći do izbijanja elektrona ili neće. Do pojave izbijanja elektrona doći će samo ako je frekvencija upadnog zračenja veća od minimalne, odnosno granične frekvencije metala. [1]



*Slika 3. Lenardov eksperimentalni postav za ispitivanje fotoelektričnog efekta [4]*

Potaknut istraživanjima svojih prethodnika Albert Einsteina zanimalo je kako svjetlost, odnosno elektromagnetski val može međudjelovati s atomom koji se nalazi u točno određenoj točki.



*Slika 4. Albert Einstein [5]*

U svojim razmišljanjima koja je objavio 1905. godine naveo je da se energija koju imaju zrake svjetlosti nije kontinuirano distribuirana, nego se sastoji od konačnog broja kvanta energije, odnosno fotona. Također, navodi da se ti kvanti energije mogu proizvesti ili apsorbirati samo kao cijeli paketići. Energiju koju imaju kvanti svjetlosti povezo je s frekvencijom zračenja i Planckovom konstantom ( $h = 6,62607015 \cdot 10^{-34} \text{ Js}$ ).

$$E = h \cdot f$$

Ovime je Einstein postavio temelje o ideji da svjetlost nema samo valna svojstva, već i čestična. Svoju hipotezu pokušao je objasniti pomoću fotoelektričnog učinka. Einstein je tvrdio da jedan kvant svjetlosti može biti apsorbiran od strane elektrona, pri čemu će sva energija biti predana upravo tom elektronu. Dio te energije će elektron potrošiti na otrgnuće iz metala, a preostali dio biti će njegova kinetička energija. Ako se pak elektron ne nalazi na površini metala, dio energije će potrošiti da dođe do nje. Energija koju pritom ima elektron umanjena je za iznos izlaznog rada  $\phi$  koji ovisi o vrsti metala. Stoga jednačina fotoelektričnog učinka koju je Einstein predložio glasi:

$$E = hf - \phi$$

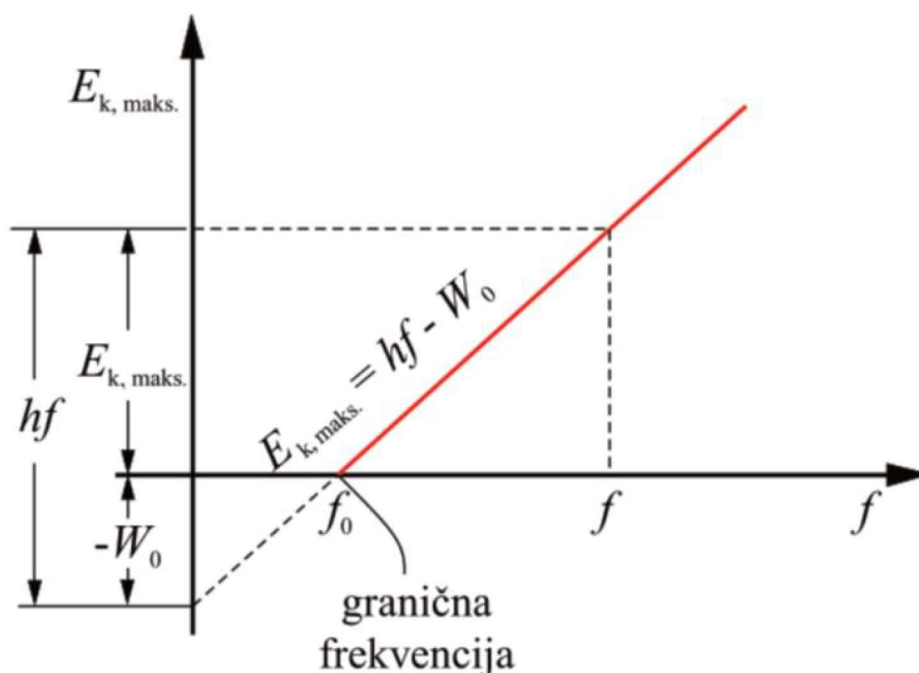
U prethodno navedenom izrazu  $E$  označava kinetičku energiju izbačenih elektrona, a  $h$  označava Planckovu konstantu koju je Max Planck koristio u tumačenju zračenja crnog tijela. Upravo je Max Planck 1913. godine nominirao Alberta Einsteina za člana Pruske akademije

znanosti u Berlinu. Iako su prvotno Einsteinove ideje o tumačenju fotoelektričnog efekta bile odbačene, 1921. godine Kraljevska Švedska Akademija znanosti dodijelila mu je Nobelovu nagradu za fiziku.

Jedan od fizičara koji i dalje nije vjerovao u Einsteinovo objašnjenje fotoelektričnog učinka bio je američki fizičar Robert Millikan. On je 1916. godine suprotno svojoj namjeri dokazao da je Einstein uistinu bio u pravu. Millikan je 1914. godine odredio kinetičku energiju izlaznih elektrona tako što je mijenjajući električni napon na anodi mijenjao i dobivenu struju. Maksimalnu kinetičku energiju izbačenih elektrona dobio je iz umnoška naboja elektrona i najmanjeg električnog napona koji onemogućavao elektronima da dosegnu anodu. Napon pri kojemu elektroni ne uspijevaju doći do druge elektrode naziva se zaustavni napon  $U_Z$ .

$$E_{k,max} = eU_Z = hf - \phi$$

Iz dobivenih grafičkih podataka Millikan je bio u mogućnosti iz nagib dobivenog pravca izračunati vrijednost Planckove konstante, odrediti graničnu frekvenciju te vrijednost izlaznog rada.



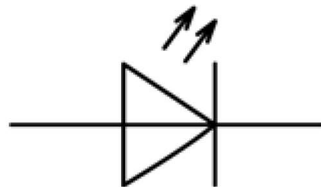
Slika 5. Graf ovisnosti kinetičke energije elektrona o frekvenciji svjetlosti [6]

Vrijednost Planckove konstante koju je Millikan dobio odstupala je za 0,5 % od vrijednosti koju je Max Planck predložio. Ovim pokusom Millikan je potvrdio ispravnost Einsteinovog tumačenja fotoelektričnog učinka te točnost Planckove konstante. Za svoj rad Millikan je 1923. godine nagrađen Nobelovom nagradom za fiziku. [1]

Prethodno opisanu pojavu, odnosno fotoelektrični učinak nazivamo još i vanjski fotoelektrični učinak. Unutrašnji fotoelektrični efekt odnosi se na pojavu pri kojoj elektroni prelaze iz valentne u vodljivu vrpcu pri čemu dolazi po povećanja električne vodljivosti. [7]

### 3. LED dioda

Svjetleća dioda ili LED (light-emitting diode) je poluvodički element, odnosno pn spoj koji pretvara električni signal u vidljivo ili nevidljivo svjetlo u slučaju kada je propusno polarizirana. [8]



Slika 6. Simbol LED diode [9]

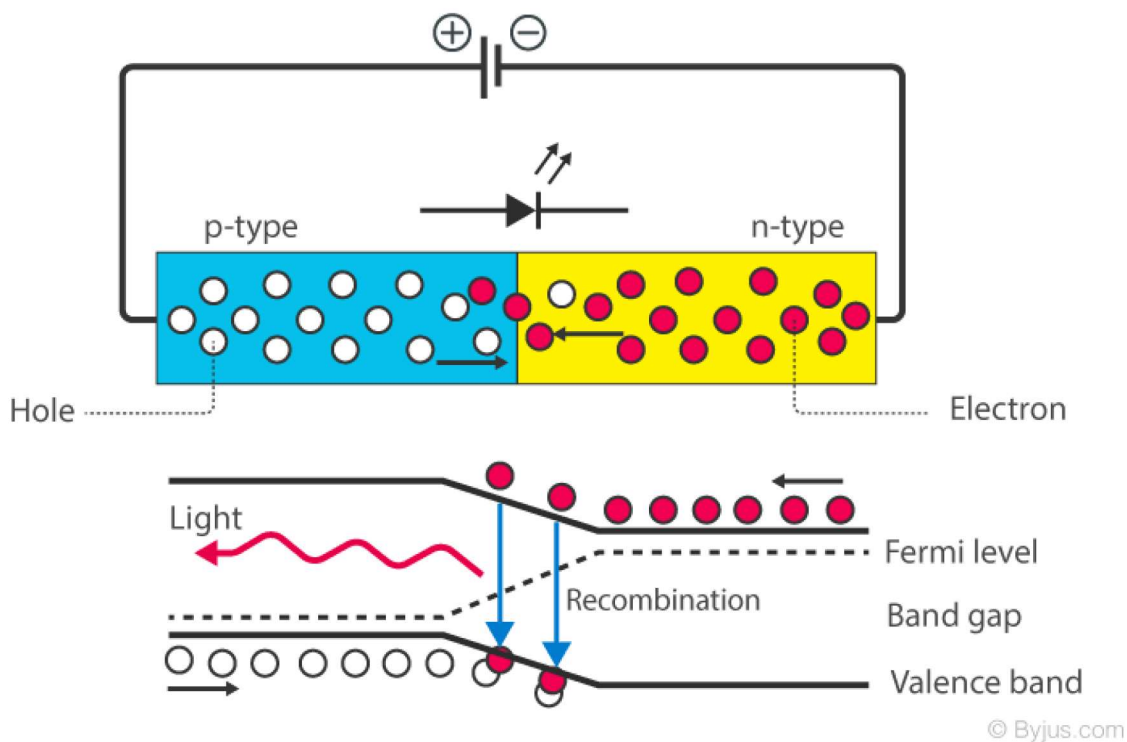
#### 3.1. Princip rada i karakteristike

Dovođenjem električne energije na diodu dolazi do kretanja elektrona. Kada se elektroni iz n-tipa rekombiniraju sa šupljinama iz p-tipa materijala svjetleća dioda će biti propusno polarizirana. Slobodni elektroni u vodljivom pojasu imaju veću energiju od šupljina u valentnom pojasu pa pri njihovoj rekombinaciji se otpušta energija u obliku svjetlosti. Taj se proces naziva elektroluminiscencija. Energija koja se pritom oslobodi dana je jednadžbom:

$$E_g = hf = \frac{hc}{\lambda},$$

gdje  $E_g$  predstavlja energiju zabranjenog pojasa,  $h$  Planckovu konstantu,  $c$  brzinu svjetlosti u vakuumu, a  $\lambda$  valnu duljinu svjetlosti. [10]

Ovaj proces temeljen na unutrašnjem fotoelektričnom efektu detaljnije je proučavao ruski znanstvenik Oleg Vladimirovich Losev između 1927. i 1942. godine te ga je nazvao inverznim fotoelektričnim efektom. [11]



Slika 7. Princip rada LED diode [12]

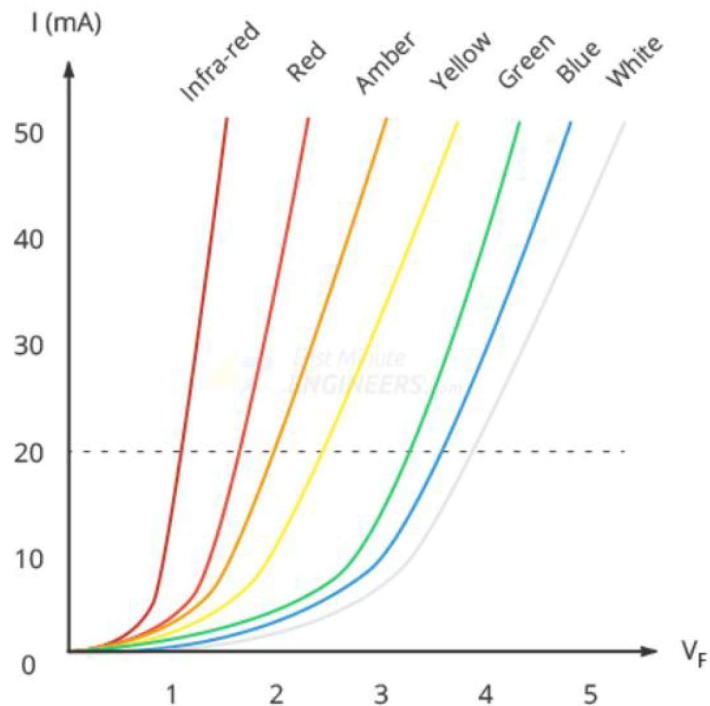
Valna duljina emitirane svjetlosti obrnuto je proporcionalna širini zabranjenog pojasa. Za veće valne duljine širina zabranjenog pojasa će biti manja, a za manje valne duljine širina zabranjenog pojasa će biti veća. Dakle, valna duljina emitirane svjetlosti ovisi o širini zabranjenog pojasa, odnosno o poluvodičkim materijalima. Danas su dostupne diode koje obuhvaćaju cijeli vidljivi, ultraljubičasti i infracrveni dio spektra. Svjetleće diode najčešće se izrađuju od galija, arsena i fosfora, gdje se njihovim omjerom određuje širina zabranjenog pojasa (energetskog procjepa)  $E_g$  i energija fotona, tj. valna duljina emitirane svjetlosti  $\lambda$ . [13]



Color	Wavelength (nm)	Forward Voltage (V)	Material
 Ultraviolet	<400	3.1-4.4	Aluminium nitride(ALN) Aluminium gallium nitride (AlGaN)
 Violet	400-450	2.8-4.0	Indium gallium nitride (InGaN)
 Blue	450-500	2.5-3.7	Indium gallium nitride (InGaN) Silicon carbide (SiC)
 Green	500-570	1.9-4.0	Gallium phosphide (GaP) Aluminium gallium phosphide (ALGaP)
 Yellow	570-590	2.1-2.2	Gallium arsenide phosphide (GaAsP) gallium phosphide (GaP)
 Orange	590-610	2.0-2.1	Gallium arsenide phosphide(GaAsP) gallium phosphide (GaP)
 Red	610-760	1.6-2.0	Aluminium gallium arsenide (AlGaAs) Gallium arsenide phosphide (GaAP) Gallium phosphide (GaP)
 Infrared	>760	>1.9	Gallium arsenide(GaAs) Aluminium gallium arsenide (ALGaAs)

*Slika 8. Tablica s podacima o boji, valnoj duljini emitirane svjetlosti, naponu koljena i materijalima od kojeg su LED diode izrađene [14]*

Također, svjetleće diode različitih boja imaju različite napone koljena kao što je prikazano u tablici. Povećanjem valne duljine emitirane svjetlosti smanjuje se napon koljena svjetleće diode, odnosno napon propusne polarizacije pri kojemu dioda postaje vodljiva.



Slika 9. Strujno-naponska karakteristika LED dioda različitih boja [14]

Veza između napona koljena  $U_K$  i valne duljine emitirane svjetlosti  $\lambda$  dana je izrazom:

$$E = qU_K = hf = \frac{hc}{\lambda}$$

Intenzitet svjetlosti diode ovisi o jakosti struje koja prolazi kroz nju. Što je veća struja koja prolazi kroz diodu, biti će veći i intenzitet emitirane svjetlosti. Prilikom primjene svjetlećih dioda visokih intenziteta treba imati na umu da one brže prazne baterije, odnosno koriste veću količinu energije. Stoga je preporučeno kontrolirati struju koja prolazi kroz LED diodu.

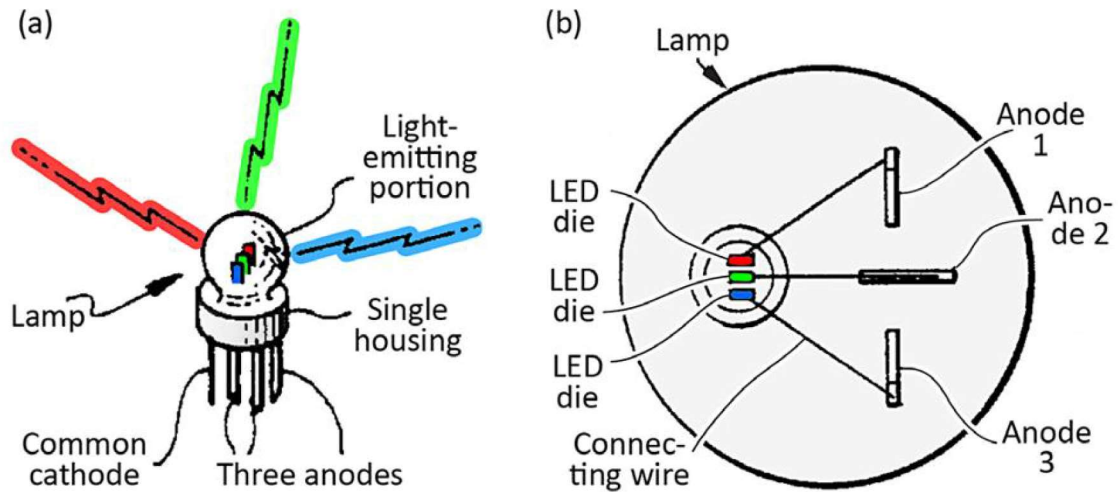
Prolaskom prevelike struje kroz diodu može doći do njenog uništenja pa je također potrebno ograničiti struju kroz nju. Upravo zato u strujni krug se dodaju otpornici kako bi se ograničila struja i zaštitila LED dioda.

### 3.2. Povijesni razvoj

Dva najčešće korištena poluvodička elementa, silicij i germanij općenito se ne koriste prilikom izrade LED dioda zbog toga što proizvode velike količine topline te su njihove razine emisije vidljive i infracrvene svjetlosti niske. [13]

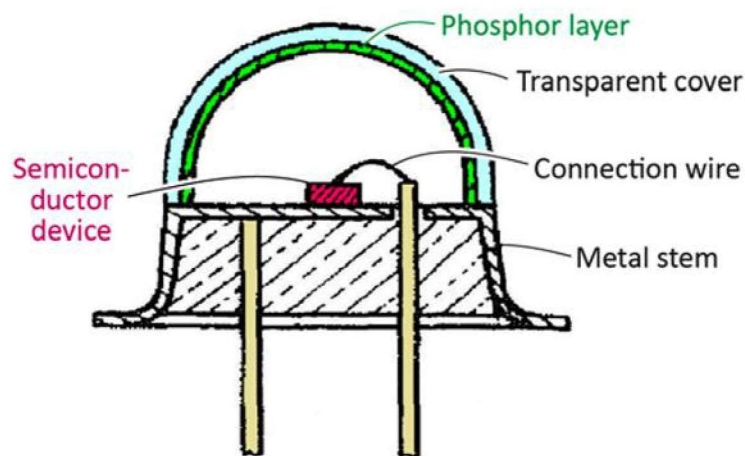
Prve svjetleće diode bile su izrađene od Ga i As te su emitirale infracrvenu svjetlosti malog intenziteta. Koristile su se u detektorima, daljinskim uređajima, sigurnosnim sustavima. Prve svjetleće diode s vidljivom svjetlošću bile su crvene te su također bile malog intenziteta. Prvu crvenu svjetlosnu diodu razvio je Nick Holonyak Jr., a svoje otkriće objavio je 1962. godine u časopisu Applied Physics Letters. Deset godina nakon izuma crvene diode George Craford izumio je žutu svjetleću diodu. Sredinom 1970-ih izumljena je i zelena dioda koja je bila izrađena od galijeva fosfida (GaP). Prvu plavu LED diodu razvili su Herb Maruska i Vally Rhims na Sveučilištu Stanford. Međutim tadašnje plave LED diode bile su malog intenziteta sve do 1993. godine. Izum plavih dioda visokog intenziteta pripisuje se Shuji Nakamuri, Hiroshi Amanu i Isamu Akasaki koji su za svoj rad dobili Nobelovu nagradu za fiziku 2014. godine. [10]

Ubrzo nakon razvoja plave LED diode, došlo je i do razvoja bijele svjetleće diode. Najčešće danas korištene LED diode su upravo one koje emitiraju bijelu svjetlost, a postoje tri načina kako se ona dobiva. Prvi način odnosi se na istovremeno korištenje triju različitih LED dioda u istom kućištu koje emitiraju crvenu, zelenu i plavu svjetlost. Takav pristup zahtjeva da bijela LED dioda ima četiri elektrode, odnosno tri anode i jednu zajedničku katodu s ciljem da se kontrolira jakost struje kroz svaku od tri diode. Ovakve diode često se nazivaju i RGB diode, a s obzirom da ravnoteža boja ovisi o kutu gledanja rijetko se koriste za dobivanje bijele svjetlosti. Osim što omogućava da se dobije bijela svjetlost, koristi se i za dobivanje boja iz cijelog spektra. Točnije, upotrebom sklopa koji neovisno pokreće ove tri diode može se dobiti 256 različitih boja.



Slika 10. RGB dioda [15]

Kod druge metode koristi se ljubičasta ili ultraljubičasta LED dioda i fosforni premaz. Fosfor apsorbira zračenje koje emitira LED dioda te dobivenu energiju pretvara u bijelu svjetlost.

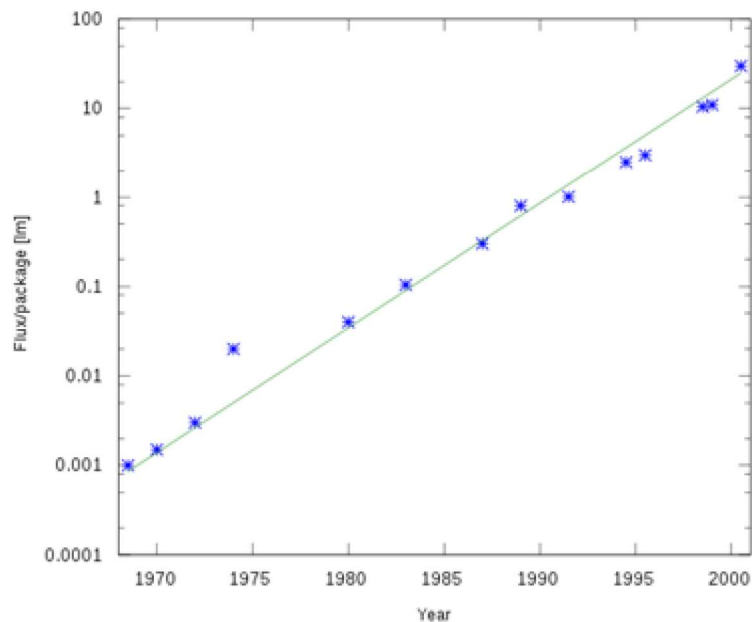


Slika 11. Poprečni presjek LED diode s fosfornim premazom [15]

Treći i najuspješniji način dobivanja bijele svjetlosti je pomoću plave LED diode i fosfornog premaza. Dio emitirane svjetlosti djelomično je apsorbiran, a ostatak je transmitiran kroz fosfor. Kombinacijom transmitirane plave svjetlosti te zelene i crvene svjetlosti dobivene pomoću fosfora dobiva se bijela svjetlost. [15]

Bijele LED diode mnogo su energetske učinkovitije od klasičnih izvora svjetlosti sa žarnom niti. Izvori svjetlosti koje najčešće koristimo u kućanstvu prosječno imaju snagu od 15 do 100 lm/W, dok se za bijelu LED diodu predviđa da će dostići vrijednost od 300 lm/W.

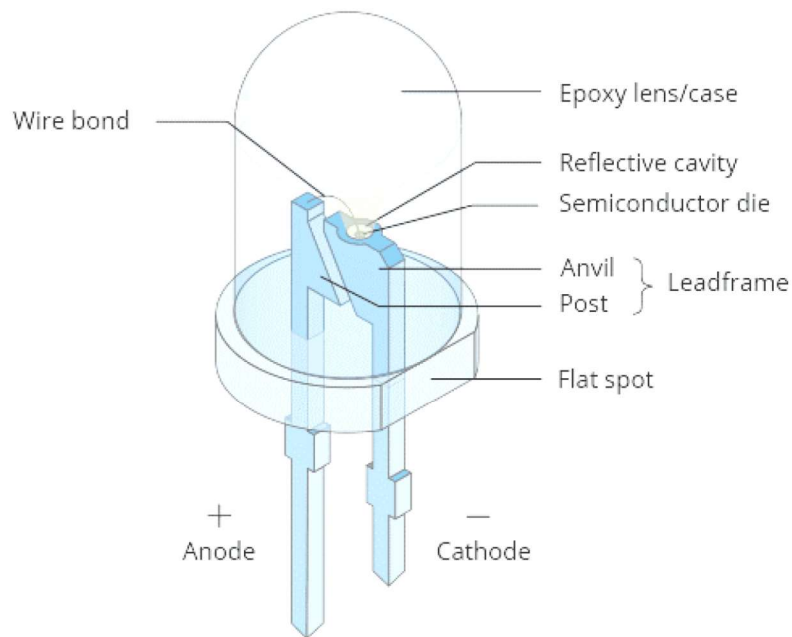
Brzinu razvoja LED dioda možemo usporediti s brzinom razvoja mikroprocesora. Kao što je suosnivač tvrtke Intel Corporation, Gordon Earle Moore predvidio da će se broj tranzistora na računalnom čipu udvostručiti svake dvije godine, tako je i američki znanstvenik Roland Haitz predvidio slično u slučaju LED dioda. On je pomoću grafikona opisao ovisnost svjetlosnog toka o vremenu. Uočljivo je da se svjetlosni tok povećava eksponencijalno s vremenom te da svake tri godine dolazi do njegovog udvostručenja. S razvojem svjetlećih dioda sve su se manje upotrebljavali izvori sa žarnom niti, a glavni razlozi bili su manja potrošnja energije i dulji rok trajanja. [15]



Slika 12. Haitzov zakon [16]

### 3.3. Građa LED diode

Kao i svaka dioda, svjetleća dioda ima pozitivnu i negativnu stranu, odnosno anodu i katodu. P-tip poluvodiča povezan je s anodom, a n-tip s katodom. Sa slike je vidljivo da duža nožica prikazuje anodu, a kraća nožica katodu.



*Slika 13. Građa LED diode [14]*

Kako bi svjetleća dioda svijetlila potrebno ju je ispravno spojiti. Anodu treba spojiti na pozitivnu stranu, a katodu na negativnu stranu strujnog kruga. Također, na LED diodi možemo uočiti da na dnu kućišta postoji ravni dio koji se nalazi kod katode.

Reflektirajući sloj i pn spoj nalaze se na katodi koja je s anodom spojena pomoću žice. Kućište svjetleće diode često se izrađuje u istoj boji kao i emitirana svjetlost te diode. [17]

### 3.4. Prednosti i nedostaci LED diodi:

LED diode su u kratkom vremenu zamijenile tradicionalnu rasvjetu poput žarulja sa žarnom niti i halogenih žarulja te su ubrzo postale pouzdanija i efikasnije opcija. Osim što su korištene u svrhu rasvjete one imaju puno širu primjenu, koriste se u mobilnim uređajima televizorima, detektorima, itd. Prednosti LED su brojne, a među njima vrijedi najviše spomenuti slijedeće:

- Visoka energetska učinkovitost: LED svjetla koriste do 90% manje energije u usporedbi sa žaruljama sa žarnom niti. Energija žarulja sa žarnom niti nije samo svjetlosna već i toplinska što predstavlja značajan gubitak energije. LED svjetla pretvaraju gotovo svu energiju u svjetlost, stoga možemo reći da su energetski učinkovite te nam pritom štede novac.
- Zbog svojeg kompaktnog oblika LED diode omogućavaju učinkovitu isporuku svjetlosti pri čemu ne dolazi do toga da svjetlost ide u neželjenim smjerovima kao kod žarulja sa žarnom niti
- Vijek trajanja LED dioda može doseći i više od 100 000 radnih sati pa ne dolazi do potrebe za čestim izmjenama i održavanjem. Stoga se često koriste na udaljenijim i manje pristupačnim mjestima.
- LED diode su robusnije od tradicionalnih izvora svjetlosti jer nema opasnosti od razbijenog stakla. Izrađene su od čvršćih materijala te su zato otpornije na udarce i vibracije.
- U slučaju rasvjete sa žarnom niti dokazano je da privlače više kukaca i insekata prilikom primjene nego LED diode. Iz toga razloga LED diode sve se češće koriste na otvorenom.
- LED svjetla ekološki su prihvatljivije rješenje s obzirom na konvencionalne izvore svjetlosti jer ne sadrže tvari poput žive. Osim toga, kao što smo već naveli energetski su učinkovitije što također smanjuje utjecaj na okoliš.
- Omogućuje nam veću kontrolu rasvjete, poput mogućnosti podešavanja intenziteta svjetlosti i boje.
- Tradicionalni izvori svjetlosti osim vidljivog spektra svjetlosti proizvode i infracrveno ili ultraljubičasto zračenje. Upravo su infracrvene i ultraljubičaste zrake odgovorne za promjenu boje na slikama, sušenje povrća i voća u trgovinama i sl. LED tehnologija nam omogućuje da dobijemo zračenje točno određenih valnih duljina pa su LED svjetla prikladnija za korištenje u muzejima, galerijama, trgovinama i sl.

- Za razliku od tradicionalnih izvora svjetlosti koji sadrže volframovu nit koja se zagrijava, LED diode predstavljaju sigurniju opciju što se tiče mogućnosti izbijanja požara.
- Niske temperature nemaju utjecaja na pokretanje LED diode te su zato pronašle svoju primjenu u osvjetljivanju hladnjaka, zamrzivača, hladnjača i sl.
- Pružaju mogućnost kompatibilnosti sa Smart Home aplikacijama koje omogućavaju da ih se precizno kontrolira.

Prilikom odabira LED rasvjete, osim brojnih prednosti treba uzeti u obzir i određene nedostatke. Najistaknutiji nedostaci LED rasvjete su:

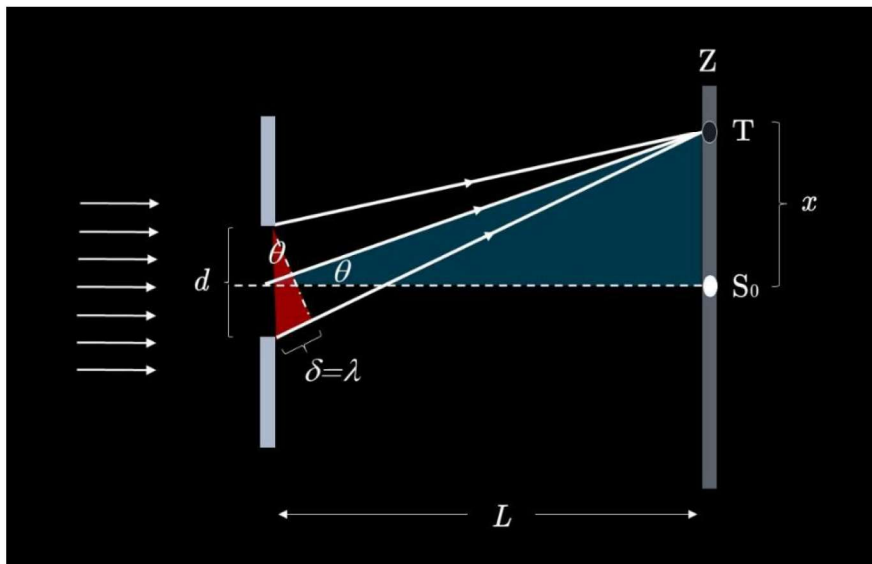
- ovisnost o temperaturi: rad LED dioda ovisi o temperaturi okoline, odnosno radnog okruženja. Zato treba uzeti u obzir da pri visokim temperaturama okoline može doći do pregrijavanja LED dioda, što za krajnjem slučaju može dovesti do kvara. Kako bi se smanjila temperaturna ovisnost potrebno je sustav odvoda topline. S obzirom da se LED koriste u automobilskoj, medicinskoj i vojnoj industriji odvođenje topline je od velike važnosti jer LED mora raditi u velikom rasponu temperatura okoline.
- Opasnost od plave svjetlosti koja nepovoljno utječe na ljudsko zdravlje, točnije na ljudsko oko. Također, plava svjetlost utječe na kvalitetu sna, a samim time i na kvalitetu života te se zato preporučuje da se koriste izvori bijele svjetlosti koji nemaju temperaturu boje iznad 3000 K.
- Osjetljivost na napon: napon i struju LED rasvjete treba regulirati i održavati je na optimalnoj radnoj razini. Odstupanje od optimalnih vrijednosti napona i struje utječe na njihov radni vijek.
- Previsoka cijena: LED rasvjeta skuplja je od uobičajenih izvora svjetlosti koji se koriste u kućanstvu pa taj dodatan trošak često odbija kupce. [18] [19]



## 4. Ogib

Ogib ili difrakcija je pojava širenja vala iza prepreke. Do pojave ogiba dolazi kod svih vrsta valova (svjetlosnih, radiovalova, zvučnih, itd.), a pojavu možemo objasniti pomoću Huygensovog načela - svaka točka valne fronte može se smatrati izvorom novog vala. Ovim načelom Huygens je postavio temelj valne teorije svjetlosti. Dolaskom svjetlosti do pukotine dolazi do ogiba na rubovima i u području sjene. S obzirom da pritom dobivamo koherentne izvore svjetlosti doći će do interferencije valova koji dolaze s jednog i drugog ruba zapreke. U ovisnosti o razlici hoda, na zastoru se može uočiti pojava svijetlih i tamnih pruga.

Razmotrimo ogib svjetlosti na pukotini širine  $d$ .



Slika 14. Ogib svjetlosti na pukotini [20]

Zrake s gornje i donje polovine pukotine interferiraju te nastaje središnja svijetla pruga ( $S_0$ ).

Razlika hoda tih dviju zraka je jednaka nuli:

$$\delta = 0$$

Zrake s rubova pukotine sa središnjom zrakom interferiraju destruktivno pa točka T predstavlja prvi minimum. Na prethodnoj slici možemo uočiti dva pravokutna trokuta iz kojih vidimo da vrijedi:

$$\sin \theta = \frac{\lambda}{d}$$

$$\operatorname{tg} \theta = \frac{x}{L}$$

$$\operatorname{tg} \theta \approx \sin \theta$$

Iz dvaju gornjih izraza dobivamo:

$$\frac{\lambda}{d} = \frac{x}{L}$$

Za k-ti red tamne pruge općenito vrijedi:

$$\frac{xd}{L} = k\lambda$$

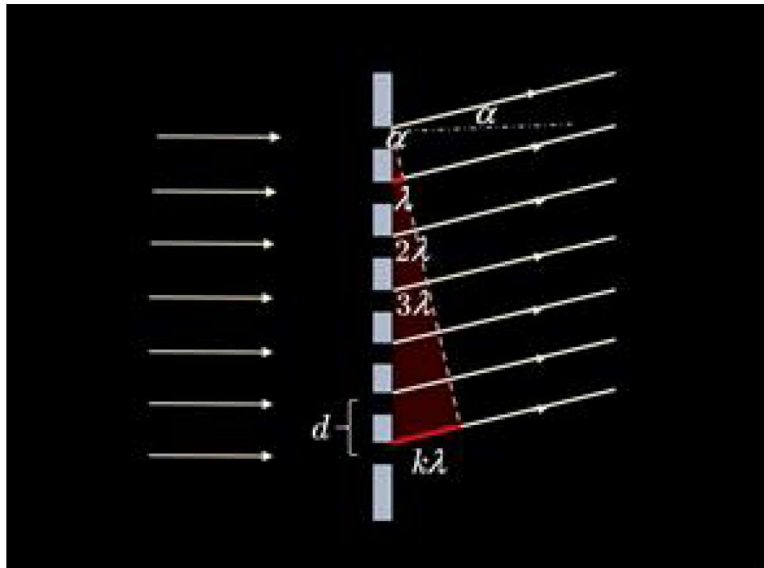
A za k-ti red svijetle pruge:

$$\frac{xd}{L} = (2k + 1) \frac{\lambda}{2}$$

### Optička rešetka

Optička naprava na kojoj se nalazi niz jednakih, paralelnih i ekvidistantnih pukotina naziva se optička rešetka. Izrađuje se najčešće od plastike, stakla ili metala, a dobiva se urezivanjem linija na podlogu tog materijala. Fizikalna veličina koja nam ukazuje koliki je razmak između dviju susjednih pukotina naziva se konstanta rešetke  $d$ . Kada svjetlost upadne na optičku rešetku, svaka pukotina pritom postaje izvor koherentnog vala. Zrake koje izlaze iz rešetke će međusobno interferirati te ćemo na zastoru dobiti sliku, odnosno svijetle i tamne pruge. U središtu slike interferencije na zastoru se nalazi nulti maksimum, prvi maksimum je prva svijetla pruga od središta, drugi je druga svijetla pruga od središta, itd. [20]

Na slici je shematski prikazan paralelni snop monokromatske svjetlosti koji upada na optičku rešetku. Zrake koje izlaze iz rešetke ogibaju se pod nekim kutom  $\alpha$  te su međusobno paralelne.

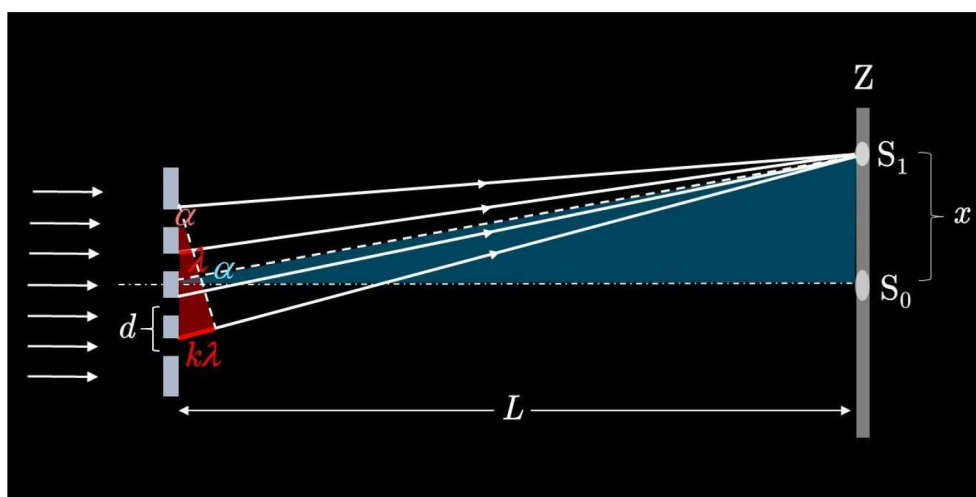


Slika 15. Ogib svjetlosti na optičkoj rešetki [20]

Ako je razlika hoda između zraka jednaka cjelobrojnom višekratniku valnih duljina, na zastoru ćemo dobiti maksimumu, odnosno pojavu svijetlih pruga. Tada vrijedi izraz:

$$d \sin \alpha_k = k\lambda$$

Iz prethodno navedenog izraza uz poznavanje ogibnog kuta  $\alpha$ , može se odrediti valna duljina upadnog snopa svjetlosti.



Slika 16. Ogib svjetlosti na optičkoj rešetki [20]

Na prethodnoj slici iz sličnosti trokuta možemo očitati da vrijedi:

$$\sin \alpha = \frac{k\lambda}{d}$$

$$\sin \alpha = \frac{x}{L}$$

Iz čega slijedi izraz:

$$\lambda = \frac{xd}{kL}$$

pomoću kojeg možemo odrediti valnu duljinu emitirane svjetlosti poznajući udaljenost između svijetlih  $k$ -tog reda  $x$ , konstantu optičke rešetke  $d$  i udaljenost između rešetke i zaslona  $L$ . [20]

## 5. Spektrometar

Spektroskopija je znanost koja proučava interakciju elektromagnetskog zračenja s materijom, odnosno s elektronima, protonima i drugim česticama. [21]

Neizostavni je dio brojnih grana znanosti jer nam omogućuje dobivanje velikog broja informacija o zadanom uzorku. Pomoću uređaja koji se naziva spektrometar dobiva se spektar koji je zatim predmet proučavanja.

Ako uzorak emitira zračenje, on se ujedno smatra i izvorom zračenja. Zračenje dolazi do monokromatora, najčešće optičke prizme ili rešetke te se zatim propušta samo jedna valna duljina. Zračenje zatim dolazi do detektora gdje se pretvara u signal pomoću kojeg se dobiva spektar. Spektar smatramo vizualnim prikazom elektromagnetskog zračenja. [22]

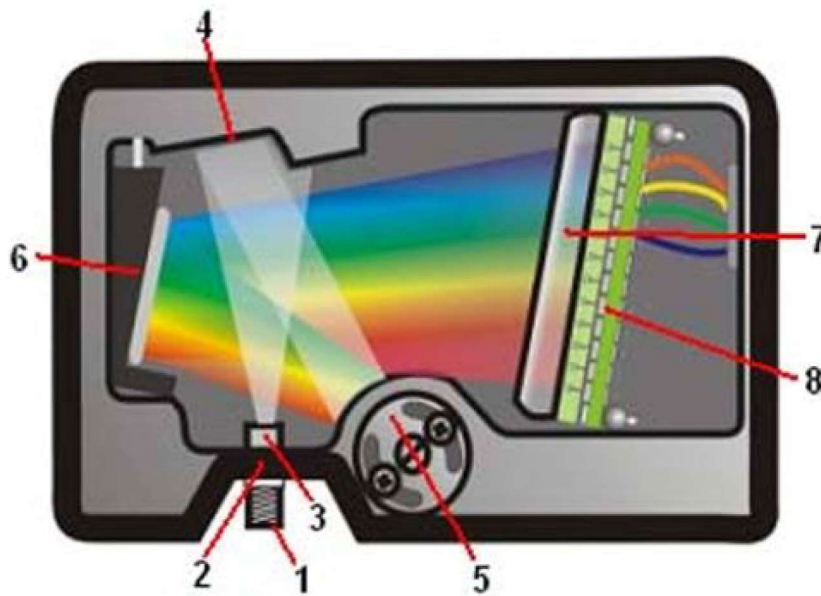
### 5.1. USB2000 spektrometar

Spektrometar USB2000, proizvod kompanije OceanOptics ima raspon detekcije od 200 nm do 1100 nm, odnosno obuhvaća ultraljubičasti, vidljivi i infracrveni dio spektra. Njegove dimenzije su 89.1 mm x 63.3 mm x 34.4 mm, a spaja se na računalo pomoću USB priključka. Spektrometar analizira svjetlost, pretvara informacije u digitalni signal koji se zatim vizualizira u pripadajućem softwreu pri čemu se dobiva spektar.



*Slika 17. OceanOptics USB2000 spektrometar [23]*

Na slici 18. prikazan shematski prikaz spektrometra OceanOptics USB2000 na koji se priključuje optički kabel koji svjetlost dovodi do pukotine. Pukotina se nalazi neposredno iza SMA konektora na koji smo priključili kabel, a ona nam kontrolira količinu svjetlosti koja upada u spektrometar. Svjetlost dolazi do filtera koji propušta samo određene valne duljine koje je proizvođač prepisao, a zatim i do kolimatora koji usmjerava svjetlost prema rešetki spektrometra. Na rešetki se svjetlost ogiba te se dalje šalje preko fokusirajućeg zrcala i cilindrične leće na CCD detektor. Detektor pretvara optički signal u digitalni signal te se dobiva spektar na računalu. [24]



Slika 18. Poprečni presjek USB2000 spektrometra [24]

Tablica 1. Komponente USB2000 spektrometra

Broj	Komponenta
1	SMA konektor
2	Pukotina
3	Filter
4	Kolimator
5	Optička rešetka
6	Fokusirajuće zrcalo
7	Cilindrična leća
8	CCD detektor

## 6. Eksperimentalno određivanje Planckove konstante

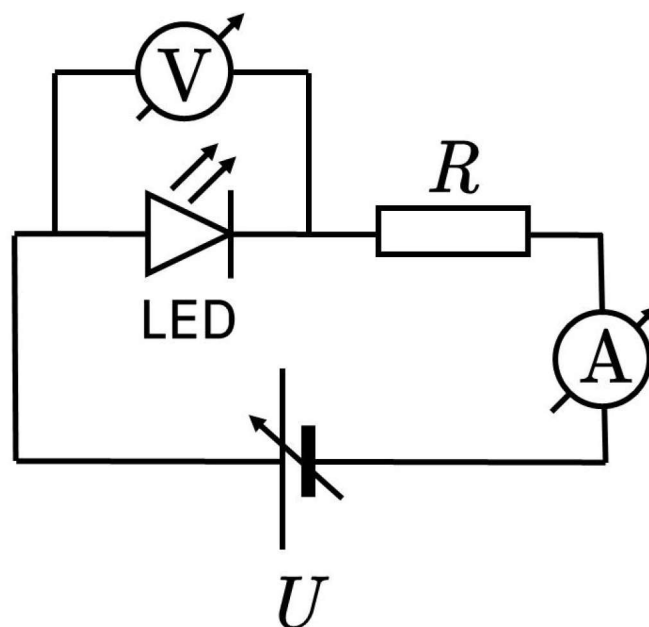
U eksperimentalnom dijelu diplomskog rada određivali Planckovu konstantu pri čemu smo se koristili različitim metodama kako bismo odredili valnu duljinu korištenih svjetlećih dioda. Kako bismo odredili Planckovu konstantu najprije smo odredili napone koljena ili praga za svaku pojedinu diodu. Zatim smo odredili valne duljine istih tih dioda koristeći se spektrometrom i optičkom rešetkom.

### 6.1. Pokus 1: Određivanje napona praga iz strujno-naponske karakteristike diode

Zadatak: Iz strujno – naponske karakteristike diode odrediti napon praga za svaku od ponuđenih dioda.

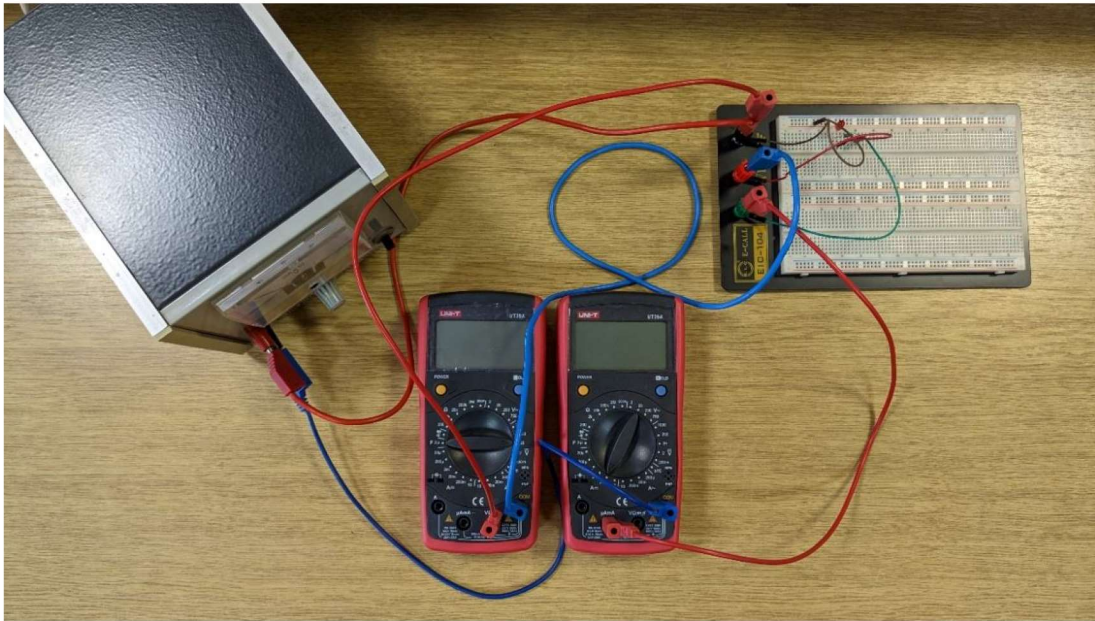
Pribor: LED diode (crvena, narančasta, žuta, zelena, plava), spojne žice, dva multimetra, ispitna pločica (engl. *breadboard*), izvor napona, otpornik od 100 ohma.

Shema:



Slika 19. Shema strujnog kruga [25]

Slika pokusa:



*Slika 20. Eksperimentalni postav za određivanje strujno-naponske karakteristike LED diode*

Postupak izvođenja pokusa:

Aparaturu smo spojili kao na slici. Postepeno smo povećavali napon te istovremeno bilježili vrijednosti dobivene na ampermetru i voltmetru. Iz dobivenih parova vrijednosti nacrtali smo graf ovisnosti struje i napona i iz njega odredili napon koljena ili praga za svaku od pet različitih LED dioda. Vrijednost napona praga određuje se određivanjem parametara jednadžbe pravca, točnije određivanjem vrijednosti nagiba pravca. Odsječak na osi x označava nam napon praga LED diode.

Rezultati:

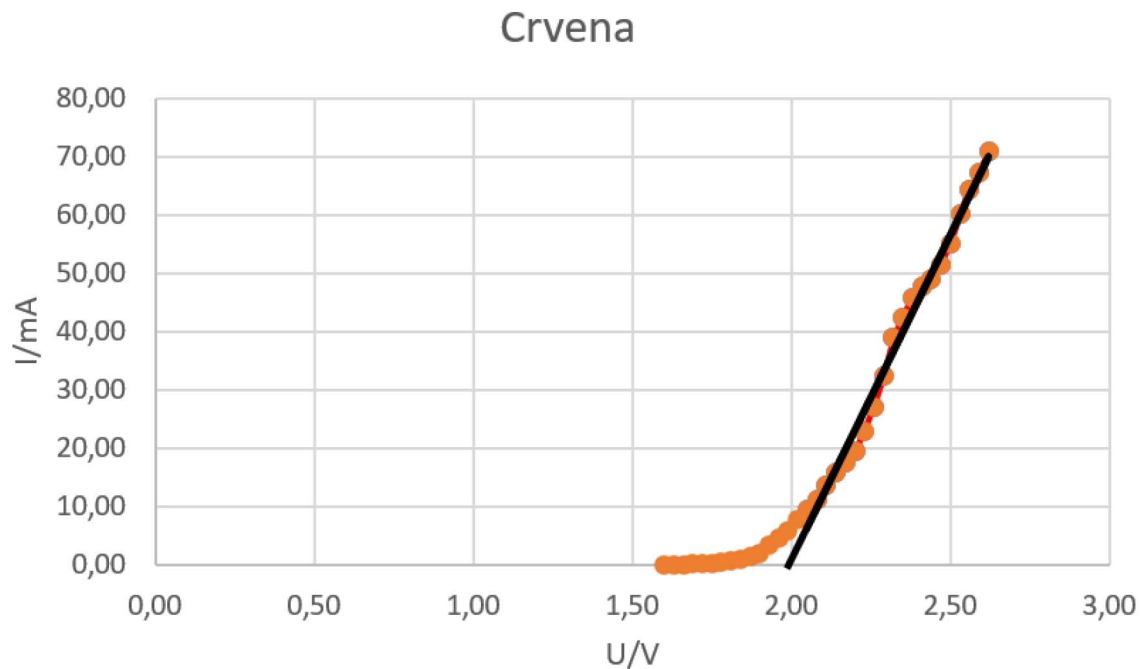
*Tablica 2. Rezultati mjerenja napona i struje*

Plava		Zelena		Crvena		Žuta		Narančasta	
U/V	I/mA	U/V	I/mA	U/V	I/mA	U/V	I/mA	U/V	I/mA
2,40	0,01	2,04	0,01	1,60	0,01	1,63	0,01	1,59	0,01
2,43	0,03	2,07	0,02	1,63	0,02	1,66	0,02	1,60	0,02
2,46	0,07	2,10	0,04	1,66	0,03	1,69	0,03	1,63	0,03
2,49	0,16	2,13	0,07	1,69	0,07	1,72	0,04	1,66	0,05
2,52	0,36	2,16	0,12	1,72	0,12	1,75	0,07	1,69	0,10
2,55	0,46	2,19	0,22	1,75	0,25	1,78	0,10	1,72	0,20



2,58	1,11	2,22	0,40	1,78	0,42	1,81	0,17	1,75	0,36
2,61	1,76	2,25	0,60	1,81	0,67	1,84	0,26	1,78	0,86
2,64	2,50	2,28	0,89	1,84	1,00	1,87	0,44	1,81	1,88
2,67	3,27	2,31	1,21	1,87	1,42	1,90	0,78	1,84	3,08
2,70	4,01	2,34	1,55	1,90	1,88	1,93	1,46	1,87	5,71
2,73	5,24	2,37	1,89	1,93	3,46	1,96	2,28	1,90	9,70
2,76	6,20	2,40	2,38	1,96	4,52	1,99	3,73	1,93	15,19
2,79	6,40	2,43	2,80	1,99	5,80	2,02	5,73	1,95	12,00
2,82	8,68	2,46	3,39	2,02	7,72	2,05	6,43	1,96	24,60
2,85	10,10	2,49	3,93	2,05	9,40	2,08	7,22	1,99	28,20
2,88	11,70	2,52	4,36	2,08	11,13	2,11	8,13	2,01	31,40
2,91	13,20	2,55	5,70	2,11	13,71	2,14	9,55	2,02	33,80
2,94	14,80	2,58	5,92	2,14	15,85	2,17	10,80	2,05	38,10
2,97	15,80	2,61	6,19	2,17	17,50	2,20	13,43	2,08	40,70
3,00	18,00	2,64	6,93	2,20	19,47	2,23	15,61	2,09	43,70
3,03	19,60	2,67	7,63	2,23	22,80	2,26	18,01	2,11	50,10
3,06	21,10	2,70	8,44	2,26	27,00	2,29	20,30	2,14	57,00
3,09	23,10	2,73	9,20	2,29	32,30	2,32	23,10	2,15	66,20
3,12	24,70	2,76	10,09	2,32	39,00	2,35	26,80		
3,15	26,60	2,79	10,82	2,35	42,40	2,38	29,90		
3,18	29,10	2,82	11,88	2,38	45,70	2,41	32,00		
3,21	30,50	2,85	12,67	2,41	47,80	2,44	33,20		
3,24	32,40	2,88	13,61	2,44	48,90	2,47	37,40		
3,27	34,50	2,91	14,96	2,47	51,50	2,50	40,70		
3,30	36,70	2,94	15,99	2,50	55,10	2,53	43,40		
3,33	38,00	2,97	17,26	2,53	60,10	2,56	46,90		
3,36	40,30	3,00	18,69	2,56	64,20	2,59	50,10		
3,39	42,70	3,03	20,30	2,59	67,30	2,62	52,50		
3,42	44,30	3,06	21,60	2,62	70,80	2,65	55,20		

## Crvena LED dioda



Graf 1. Strujno-naponska karakteristika crvene LED diode

Iz grafa je očito da postoji linearna ovisnost opisana jednačbom  $y = ax + b$ , čije koeficijente  $a$  i  $b$  određujemo metodom najmanjih kvadrata. Koeficijenti  $a$  i  $b$  za  $n$  parova točaka koje pokazuju linearnu ovisnost određeni su formulama:

$$a = \frac{n \sum x_i y_i - \sum x_i \sum y_i}{n \sum x_i^2 - (\sum x_i)^2} = 112,44 \frac{\text{mA}}{\text{V}}$$

$$b = \frac{\sum x_i^2 \sum y_i - \sum x_i \sum x_i y_i}{n \sum x_i^2 - (\sum x_i)^2} = -224,44 \text{ mA}$$

Nepouzdanosti, odnosno pogreške koeficijenata  $a$  i  $b$  određuju se iz relacija:

$$M_a = \sqrt{\frac{1}{n-2} \left( \frac{n \sum y_i^2 - (\sum y_i)^2}{n \sum x_i^2 - (\sum x_i)^2} - a^2 \right)} = 2,73 \frac{\text{mA}}{\text{V}}$$

$$M_b = M_a \sqrt{\frac{\sum x_i^2}{n}} = 6,40 \text{ mA}$$

Rezultat mjerenja za koeficijente  $a$  i  $b$  uzimajući u obzir nepouzdanost glasi:

$$a = 112 \pm 3 \frac{\text{mA}}{\text{V}}$$

$$b = -224 \pm 6 \text{ mA}$$

Iz dobivenih vrijednosti  $a$  i  $b$  možemo zapisati jednadžbu pravca koja glasi:

$$y = 112x - 224$$

Uvrštavanjem vrijednosti nula za  $y$ , dobivamo vrijednost napona praga ili koljena, odnosno odsječak na osi  $x$ :

$$x = -\frac{b}{a}$$

$$x = 2,00 \text{ V}$$

$$U_K = 2,00 \text{ V}$$

Nepouzdanost dobivene vrijednosti napona koljena određujemo iz izraza:

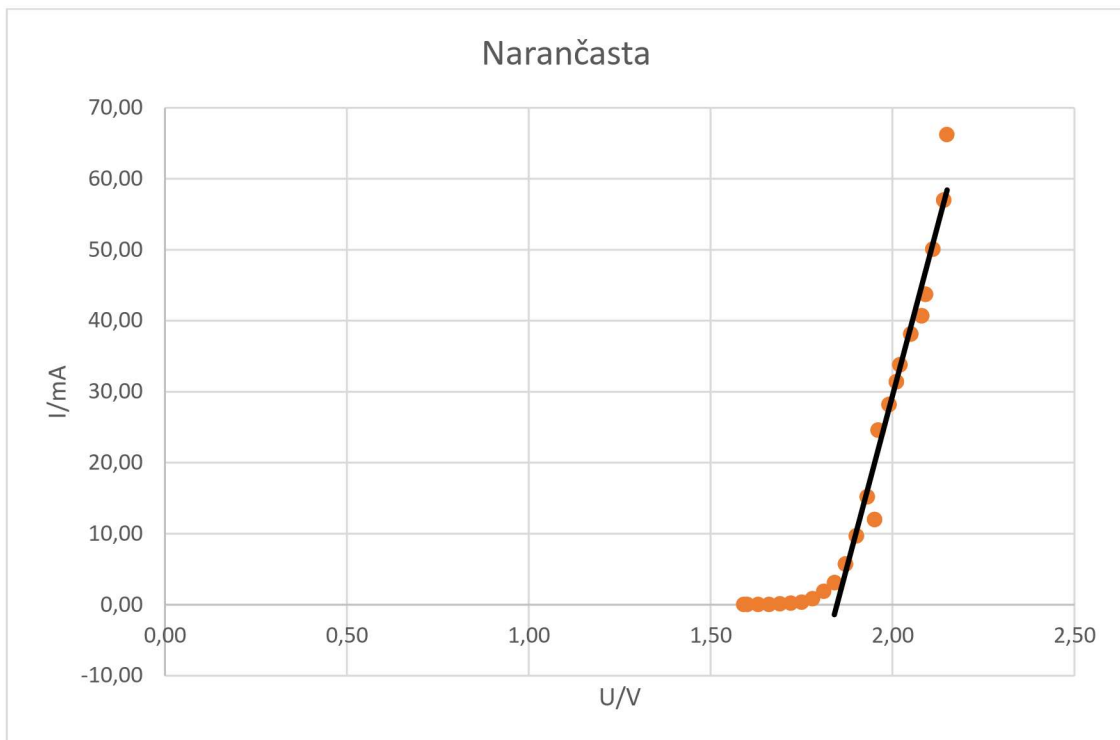
$$M_x = \sqrt{\left(\frac{\partial x}{\partial a} M_a\right)^2 + \left(\frac{\partial x}{\partial b} M_b\right)^2} = \sqrt{\left(-\frac{b}{a^2} M_a\right)^2 + \left(\frac{1}{a} M_b\right)^2}$$

$$M_x = 0,08 \text{ V}$$

Rezultat mjerenja napona koljena izražen pomoću nepouzdanosti je:

$$U_K = 2,00 \pm 0,08 \text{ V}$$

## Narančasta LED dioda



Graf 2. Strujno-naponska karakteristika narančaste LED diode

Iz grafa je očito da postoji linearna ovisnost opisana jednadžbom  $y = ax + b$ , čije koeficijente  $a$  i  $b$  određujemo metodom najmanjih kvadrata. Koeficijenti  $a$  i  $b$  za  $n$  parova točaka koje pokazuju linearnu ovisnost određeni su formulama:

$$a = \frac{n \sum x_i y_i - \sum x_i \sum y_i}{n \sum x_i^2 - (\sum x_i)^2} = 198,16 \frac{\text{mA}}{\text{V}}$$

$$b = \frac{\sum x_i^2 \sum y_i - \sum x_i \sum x_i y_i}{n \sum x_i^2 - (\sum x_i)^2} = -366,82 \text{ mA}$$

Nepouzdanosti, odnosno pogreške koeficijenata  $a$  i  $b$  određuju se iz relacija:

$$M_a = \sqrt{\frac{1}{n-2} \left( \frac{n \sum y_i^2 - (\sum y_i)^2}{n \sum x_i^2 - (\sum x_i)^2} - a^2 \right)} = 17,96 \frac{\text{mA}}{\text{V}}$$

$$M_b = M_a \sqrt{\frac{\sum x_i^2}{n}} = 37,01 \text{ mA}$$

Rezultat mjerenja za koeficijente  $a$  i  $b$  uzimajući u obzir nepouzdanost glasi:

$$a = 200 \pm 20 \frac{\text{mA}}{\text{V}}$$

$$b = -370 \pm 40 \text{ mA}$$

Iz dobivenih vrijednosti  $a$  i  $b$  možemo zapisati jednadžbu pravca koja glasi:

$$y = 200x - 370$$

Uvrštavanjem vrijednosti nula za  $y$ , dobivamo vrijednost napona praga ili koljena, odnosno odsječak na osi  $x$ :

$$x = -\frac{b}{a}$$

$$x = 1,85 \text{ V}$$

$$U_K = 1,85 \text{ V}$$

Nepouzdanost dobivene vrijednosti napona koljena određujemo iz izraza:

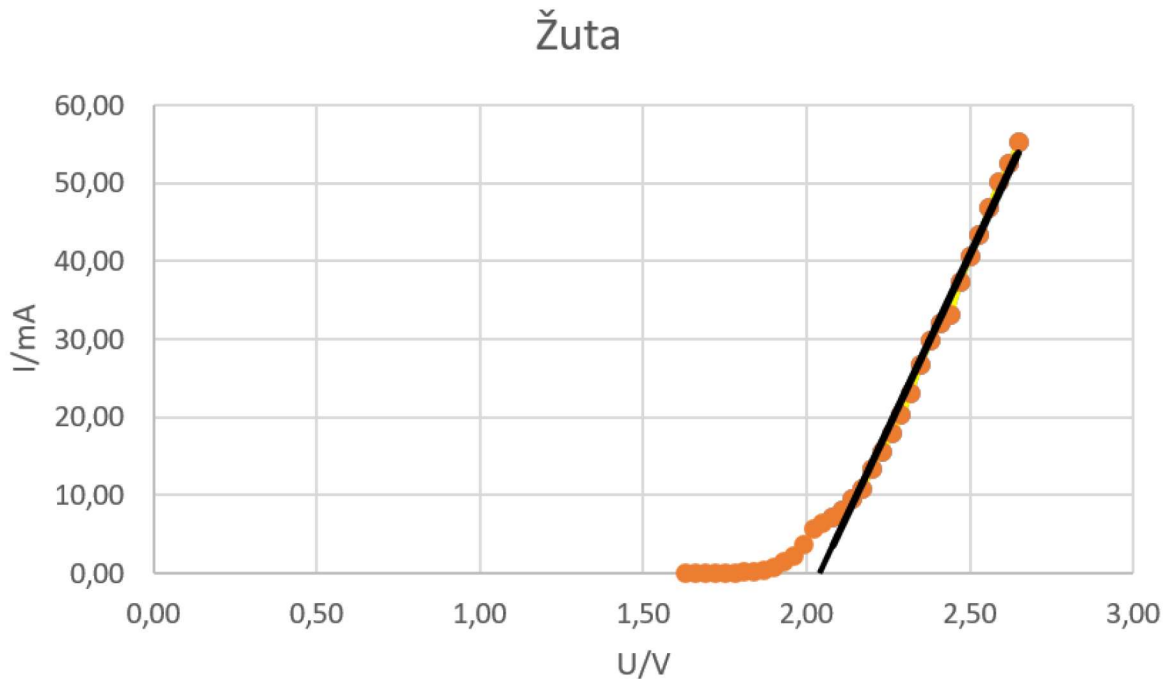
$$M_x = \sqrt{\left(\frac{\partial x}{\partial a} M_a\right)^2 + \left(\frac{\partial x}{\partial b} M_b\right)^2} = \sqrt{\left(-\frac{b}{a^2} M_a\right)^2 + \left(\frac{1}{a} M_b\right)^2}$$

$$M_x = 0,24 \text{ V}$$

Rezultat mjerenja napona koljena izražen pomoću nepouzdanosti je:

$$U_K = 1,9 \pm 0,2 \text{ V}$$

## Žuta LED dioda



Graf 3. Strujno-naponska karakteristika žute LED diode

Iz grafa je očito da postoji linearna ovisnost opisana jednačbom  $y = ax + b$ , čije koeficijente  $a$  i  $b$  određujemo metodom najmanjih kvadrata. Koeficijenti  $a$  i  $b$  za  $n$  parova točaka koje pokazuju linearnu ovisnost određeni su formulama:

$$a = \frac{n \sum x_i y_i - \sum x_i \sum y_i}{n \sum x_i^2 - (\sum x_i)^2} = 88,45 \frac{\text{mA}}{\text{V}}$$

$$b = \frac{\sum x_i^2 \sum y_i - \sum x_i \sum x_i y_i}{n \sum x_i^2 - (\sum x_i)^2} = -180,46 \text{ mA}$$

Nepouzdanosti, odnosno pogreške koeficijenata  $a$  i  $b$  određuju se iz relacija:

$$M_a = \sqrt{\frac{1}{n-2} \left( \frac{n \sum y_i^2 - (\sum y_i)^2}{n \sum x_i^2 - (\sum x_i)^2} - a^2 \right)} = 1,94 \frac{\text{mA}}{\text{V}}$$

$$M_b = M_a \sqrt{\frac{\sum x_i^2}{n}} = 4,59 \text{ mA}$$

Rezultat mjerenja za koeficijente  $a$  i  $b$  uzimajući u obzir nepouzdanost glasi:

$$a = 88 \pm 2 \frac{\text{mA}}{\text{V}}$$

$$b = -180 \pm 5 \text{ mA}$$

Iz dobivenih vrijednosti  $a$  i  $b$  možemo zapisati jednadžbu pravca koja glasi:

$$y = 88x - 180$$

Uvrštavanjem vrijednosti nula za  $y$ , dobivamo vrijednost napona praga ili koljena, odnosno odsječak na osi  $x$ :

$$x = -\frac{b}{a}$$

$$x = 2,05 \text{ V}$$

$$U_K = 2,05 \text{ V}$$

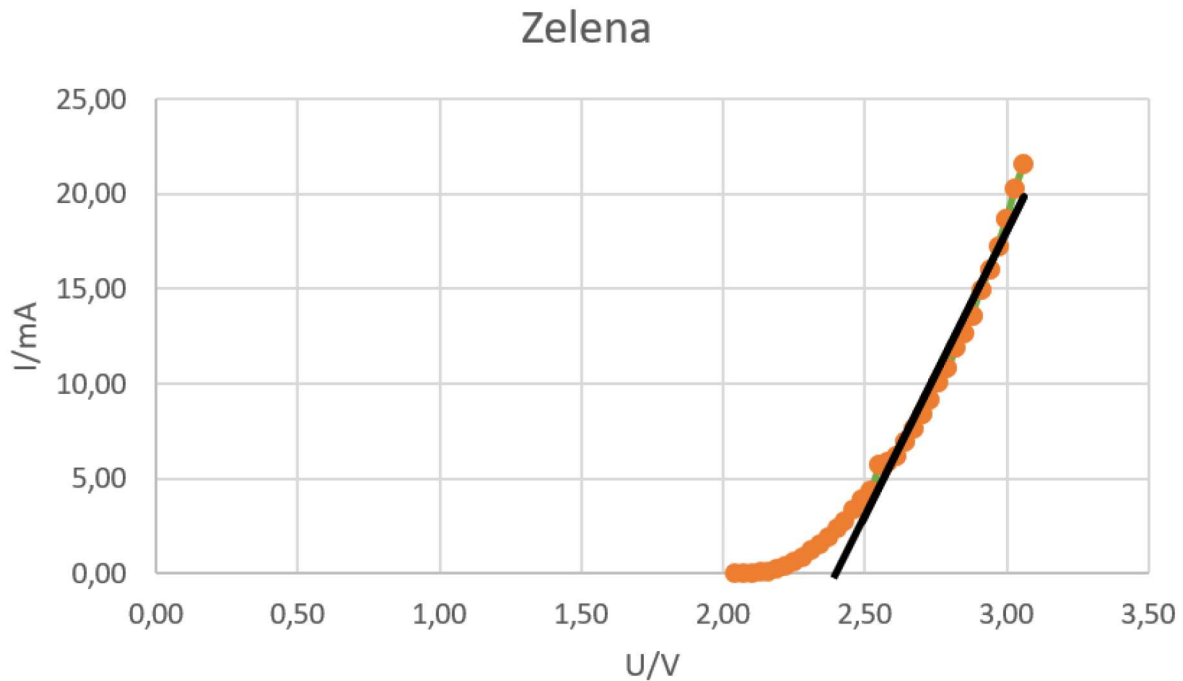
Nepouzdanost dobivene vrijednosti napona koljena određujemo iz izraza:

$$M_x = \sqrt{\left(\frac{\partial x}{\partial a} M_a\right)^2 + \left(\frac{\partial x}{\partial b} M_b\right)^2} = \sqrt{\left(-\frac{b}{a^2} M_a\right)^2 + \left(\frac{1}{a} M_b\right)^2}$$

$$M_x = 0,07 \text{ V}$$

Rezultat mjerenja napona koljena izražen pomoću nepouzdanosti je:

$$U_K = 2,05 \pm 0,07 \text{ V}$$



Graf 4. Strujno-naponska karakteristika zelene LED diode

Iz grafa je očito da postoji linearna ovisnost opisana jednačbom  $y = ax + b$ , čije koeficijente  $a$  i  $b$  određujemo metodom najmanjih kvadrata. Koeficijenti  $a$  i  $b$  za  $n$  parova točaka koje pokazuju linearnu ovisnost određeni su formulama:

$$a = \frac{n \sum x_i y_i - \sum x_i \sum y_i}{n \sum x_i^2 - (\sum x_i)^2} = 30,10 \frac{\text{mA}}{\text{V}}$$

$$b = \frac{\sum x_i^2 \sum y_i - \sum x_i \sum x_i y_i}{n \sum x_i^2 - (\sum x_i)^2} = -72,21 \text{ mA}$$

Nepouzdanosti, odnosno pogreške koeficijenata  $a$  i  $b$  određuju se iz relacija:

$$M_a = \sqrt{\frac{1}{n-2} \left( \frac{n \sum y_i^2 - (\sum y_i)^2}{n \sum x_i^2 - (\sum x_i)^2} - a^2 \right)} = 1,13 \frac{\text{mA}}{\text{V}}$$

$$M_b = M_a \sqrt{\frac{\sum x_i^2}{n}} = 3,15 \text{ mA}$$

Rezultat mjerenja za koeficijente  $a$  i  $b$  uzimajući u obzir nepouzdanost glasi:



$$a = 30 \pm 1 \frac{\text{mA}}{\text{V}}$$

$$b = -72 \pm 3 \text{ mA}$$

Iz dobivenih vrijednosti  $a$  i  $b$  možemo zapisati jednadžbu pravca koja glasi:

$$y = 30x - 72$$

Uvrštavanjem vrijednosti nula za  $y$ , dobivamo vrijednost napona praga ili koljena, odnosno odsječak na osi  $x$ :

$$x = -\frac{b}{a}$$

$$x = 2,40 \text{ V}$$

$$U_K = 2,40 \text{ V}$$

Nepouzdanost dobivene vrijednosti napona koljena određujemo iz izraza:

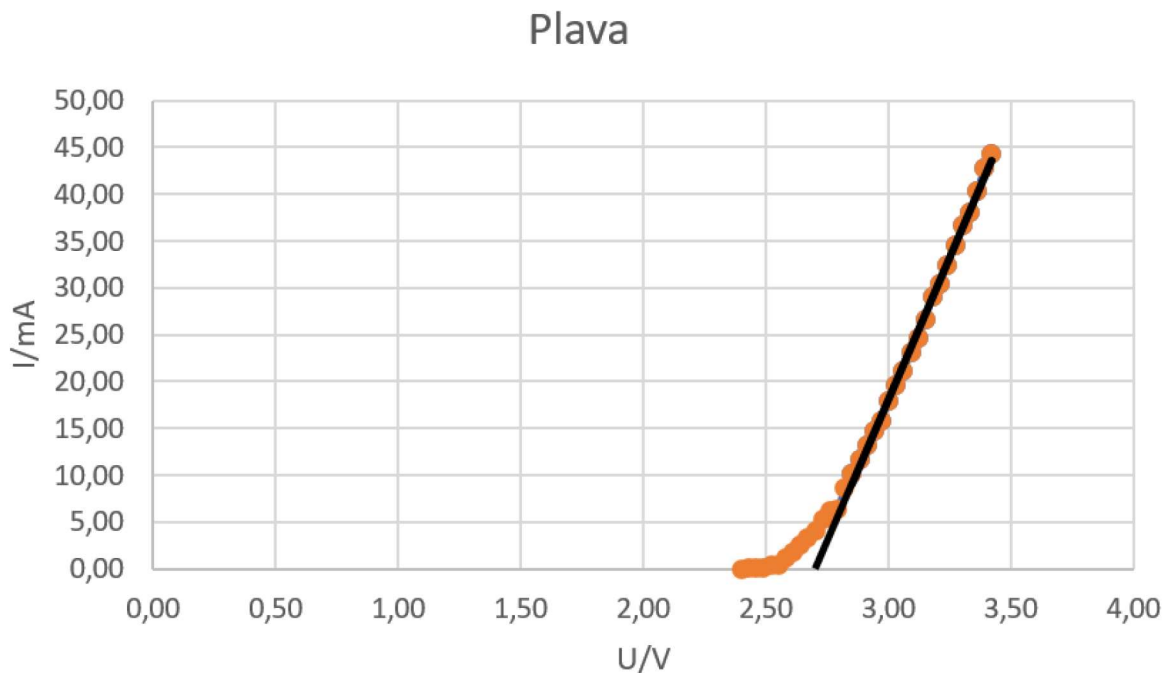
$$M_x = \sqrt{\left(\frac{\partial x}{\partial a} M_a\right)^2 + \left(\frac{\partial x}{\partial b} M_b\right)^2} = \sqrt{\left(-\frac{b}{a^2} M_a\right)^2 + \left(\frac{1}{a} M_b\right)^2}$$

$$M_x = 0,13 \text{ V}$$

Rezultat mjerenja napona koljena izražen pomoću nepouzdanosti je:

$$U_K = 2,4 \pm 0,1 \text{ V}$$

## Plava LED dioda



Graf 5. Strujno-naponska karakteristika plave LED diode

Iz grafa je očito da postoji linearna ovisnost opisana jednačbom  $y = ax + b$ , čije koeficijente  $a$  i  $b$  određujemo metodom najmanjih kvadrata. Koeficijenti  $a$  i  $b$  za  $n$  parova točaka koje pokazuju linearnu ovisnost određeni su formulama:

$$a = \frac{n \sum x_i y_i - \sum x_i \sum y_i}{n \sum x_i^2 - (\sum x_i)^2} = 60,65 \frac{\text{mA}}{\text{V}}$$

$$b = \frac{\sum x_i^2 \sum y_i - \sum x_i \sum x_i y_i}{n \sum x_i^2 - (\sum x_i)^2} = -163,77 \text{ mA}$$

Nepouzdanosti, odnosno pogreške koeficijenata  $a$  i  $b$  određuju se iz relacija:

$$M_a = \sqrt{\frac{1}{n-2} \left( \frac{n \sum y_i^2 - (\sum y_i)^2}{n \sum x_i^2 - (\sum x_i)^2} - a^2 \right)} = 0,75 \frac{\text{mA}}{\text{V}}$$

$$M_b = M_a \sqrt{\frac{\sum x_i^2}{n}} = 2,34 \text{ mA}$$

Rezultat mjerenja za koeficijente  $a$  i  $b$  uzimajući u obzir nepouzdanost glasi:

$$a = 60,7 \pm 0,8 \frac{\text{mA}}{\text{V}}$$

$$b = -164 \pm 2 \text{ mA}$$

Iz dobivenih vrijednosti  $a$  i  $b$  možemo zapisati jednadžbu pravca koja glasi:

$$y = 60,7x - 164$$

Uvrštavanjem vrijednosti nula za  $y$ , dobivamo vrijednost napona praga ili koljena, odnosno odsječak na osi  $x$ :

$$x = -\frac{b}{a}$$

$$x = 2,70 \text{ V}$$

$$U_K = 2,70 \text{ V}$$

Nepouzdanost dobivene vrijednosti napona koljena određujemo iz izraza:

$$M_x = \sqrt{\left(\frac{\partial x}{\partial a} M_a\right)^2 + \left(\frac{\partial x}{\partial b} M_b\right)^2} = \sqrt{\left(-\frac{b}{a^2} M_a\right)^2 + \left(\frac{1}{a} M_b\right)^2}$$

$$M_x = 0,05 \text{ V}$$

Rezultat mjerenja napona koljena izražen pomoću nepouzdanosti je:

$$U_K = 2,70 \pm 0,05 \text{ V}$$

**Zaključak:**

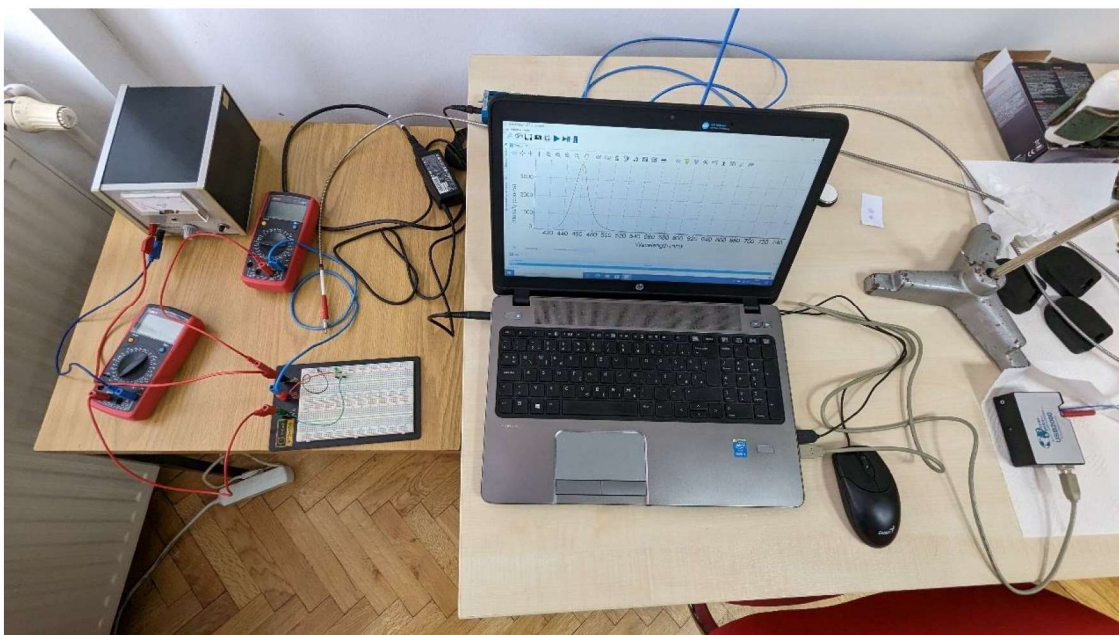
U ovom dijelu eksperimenta određivali smo napone koljena za svaku od pet dostupnih svjetlećih dioda. Za crvenu LED diodu dobili smo vrijednost od 2,00 V, za narančastu 1,85 V, za žutu 2,05 V, za zelenu 2,40 V i za plavu 2,70 V. Iz rezultata možemo uočiti da se sa smanjenjem valne duljine svjetlosti povećava napon koljena, osim u slučaju narančaste LED diode. Jedan od mogućih uzroka ove pogreške je taj što je upravo narančasta proizvedena od strane drugog proizvođača za razliku od preostale četiri LED diode. Također, pogreška je mogla nastati zbog nepažnje prilikom mjerenja, zbog nepreciznosti mjernih uređaja ili zbog oštećenja same LED diode.

## 6.2. Pokus 2: Određivanje valne duljine svjetlećih dioda pomoću spektrometra

Zadatak: Pomoću Ocean Optics USB2000 spektrometra potrebno je odrediti valne duljine svjetlosnih dioda.

Pribor: Ocean Optics USB2000 spektrometar, računalo, LED diode (crvena, narančasta, žuta, zelena, plava), spojne žice, dva multimetra, ispitna pločica (breadboard), izvor napona, otpornik od 100 ohma.

Slika pokusa:

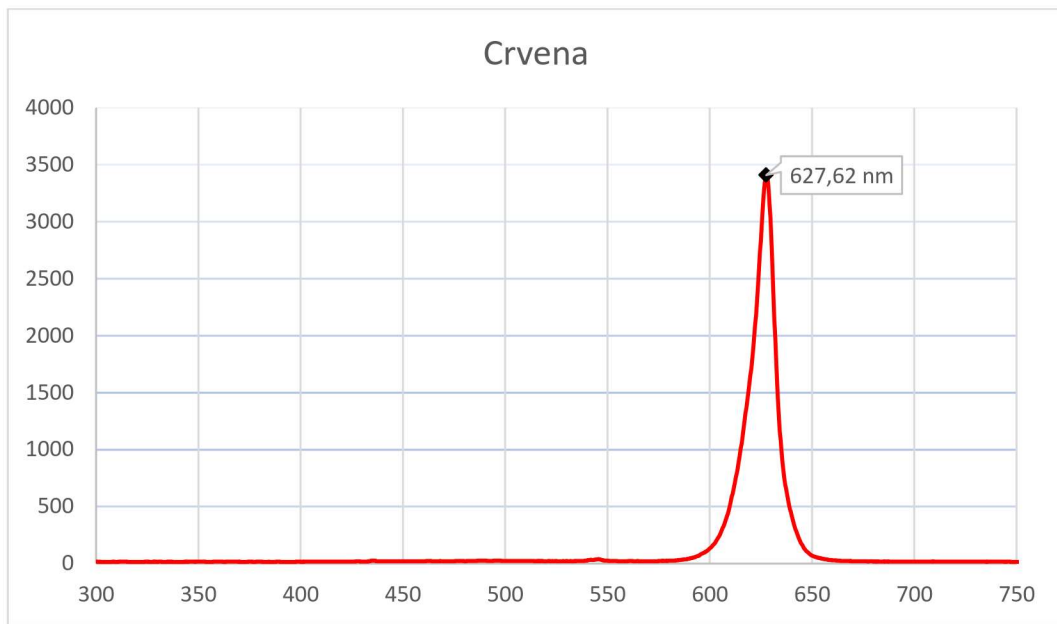


*Slika 21. Eksperimentalni postava za određivanje valne duljine pomoću spektrometra*

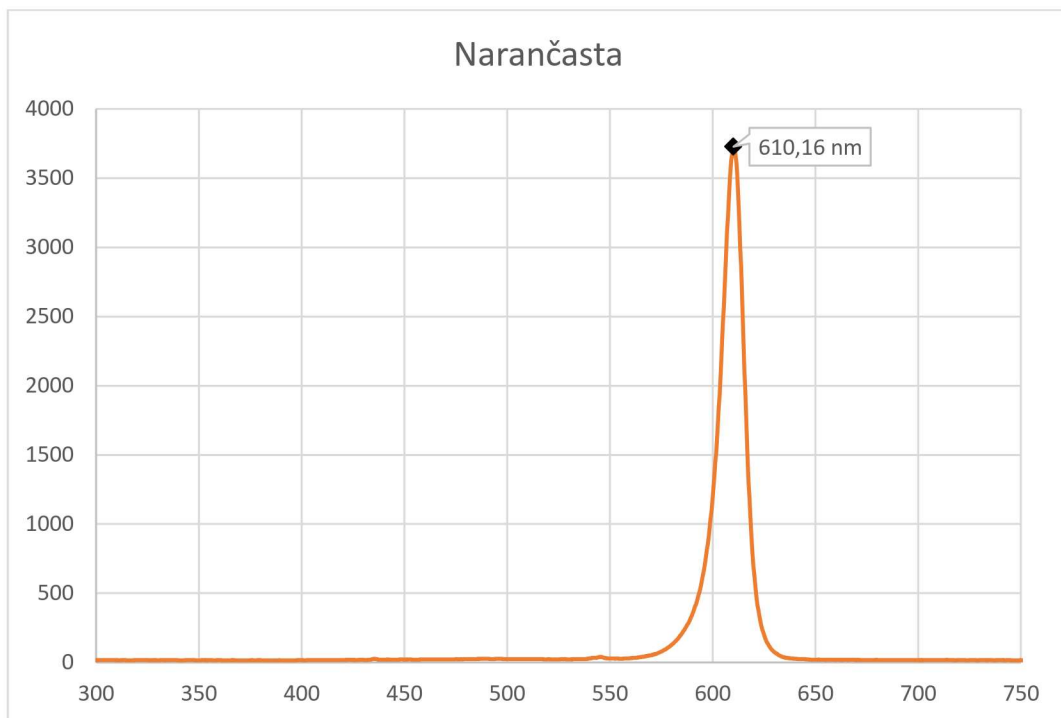
Postupak izvođenja pokusa:

Pribor smo spojili kao na slici te na računalo otvorili odgovarajući software. Usmjeravanjem optičkog vlakna prema LED diodi koja je spojena u strujni krug na računalo smo dobivali spektre. Za svaku od pet LED diodi smo zabilježili dobiveni spektar te iz njegovog „peaka“ odredili valnu duljinu emitirane svjetlosti.

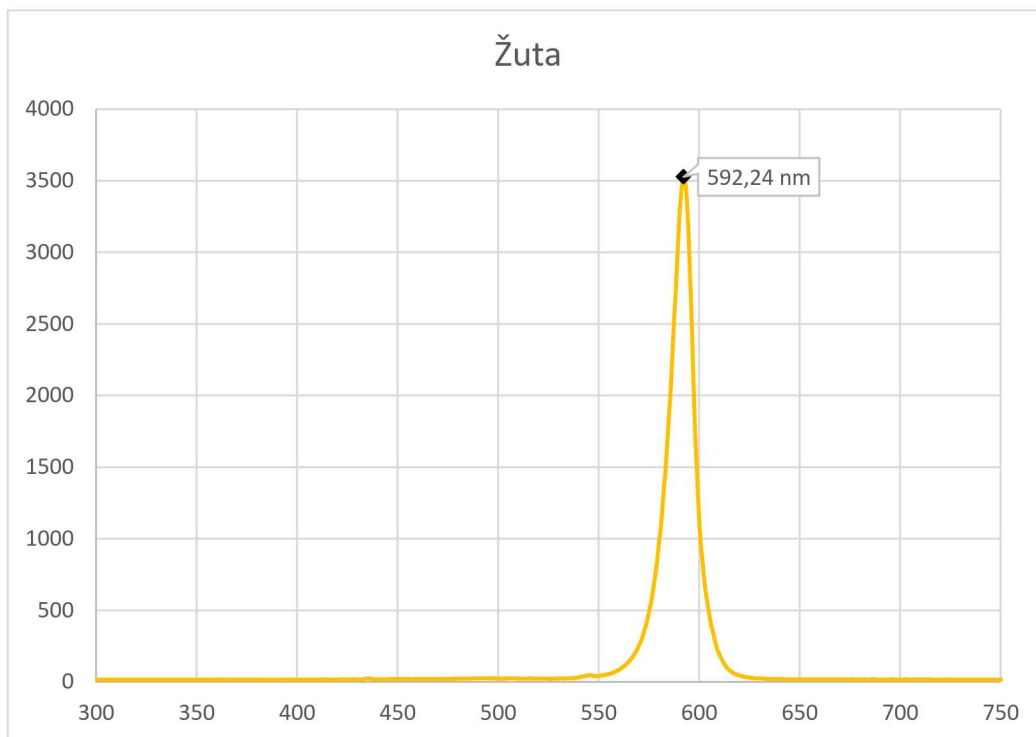
Rezultati:



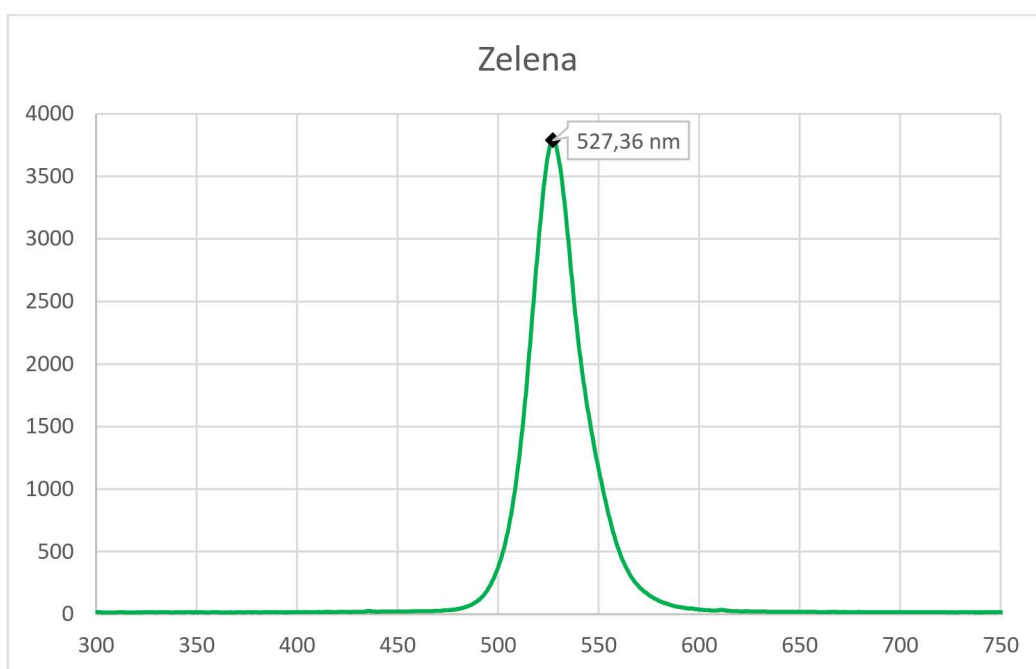
Graf 6. Emitirana svjetlost crvene LED diode



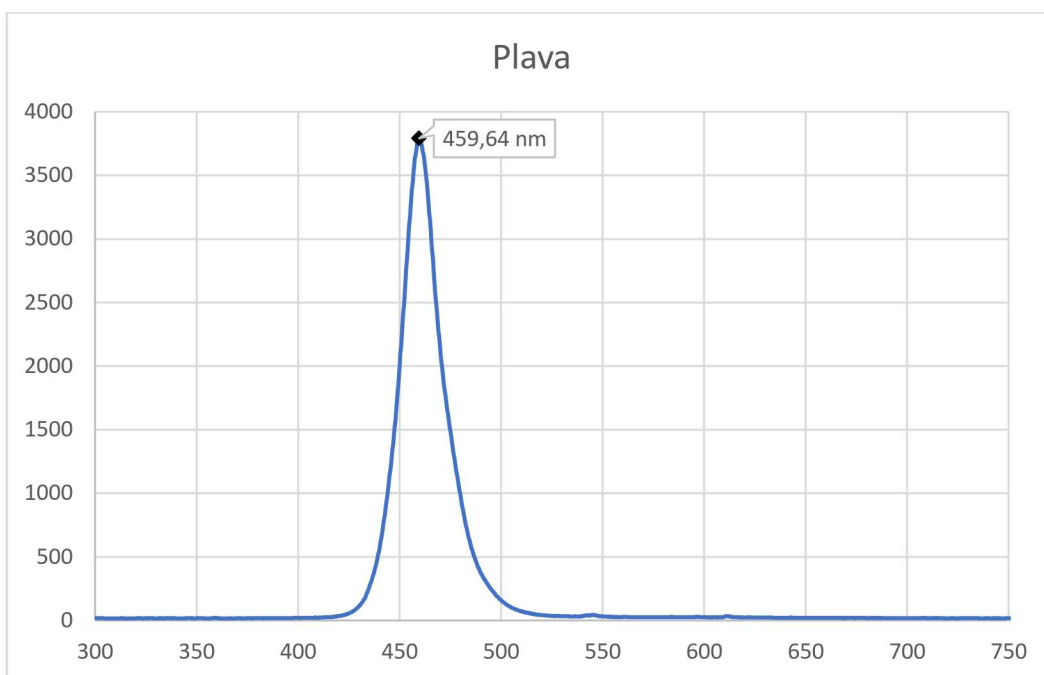
Graf 7. Emitirana svjetlost narančaste LED diode



*Graf 8. Emitirana svjetlost žute LED diode*



*Graf 9. Emitirana svjetlost zelene LED diode*



*Graf 10. Emitirana svjetlost plave LED diode*

#### Zaključak:

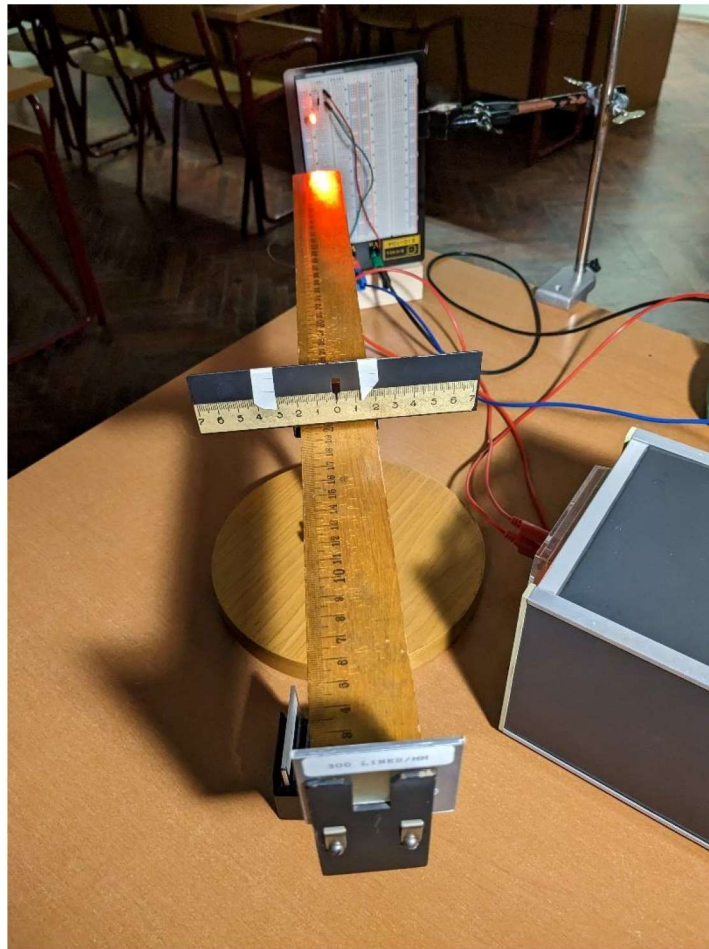
Iz maksimuma dobivenih grafova odredili smo valne duljine svjetlosti koje emitiraju korištene LED diode. Valna duljina crvene svjetlosti iznosi 627,62 nm, narančaste 610,16 nm, žute 592,24 nm, zelene 527,36 nm i plave 459,64 nm. Korištenjem spektrometra i pripadajućeg softwera vrlo precizno smo odredili valne duljine svjetlosti čije vrijednosti odgovaraju onima u teoriji.

### 6.3. Pokus 3: Određivanje valne duljine svjetlećih dioda pomoću optičke rešetke

Zadatak: Odrediti valne duljine svjetlećih dioda pomoću optičkih rešetki.

Pribor: optička rešetka (300 i 80 pukotina po mm), ravnala, dvije papirnate kazaljke, LED diode (crvena, narančasta, žuta, zelena, plava), spojne žice, dva multimetra, ispitna pločica (*breadboard*), izvor napona, otpornik od 100 ohma.

Slika pokusa:



*Slika 22. Eksperimentalni postav za određivanje valne duljine pomoću optičke rešetke*

Postupak izvođenja pokusa:

Pribor smo spojili kao na slici. Kroz dvije optičke rešetke promatramo izvore svjetlosti. Uređaj na čiji kraj postavljamo optičku rešetku se sastoji od dva ravnala međusobno spojena u oblik slova T. Gledanjem kroz rešetku te pomicanjem papirnatih kazaljki mjerimo udaljenost



centralne slike od prvog, drugog i trećeg reda ogibnog maksimuma. S  $L$  ćemo označiti udaljenost od poprečnog ravnala do optičke rešetke, s  $x$  udaljenost od sredine centralne slike do sredine ogibne slike te s  $k$  red ogibnog maksimuma.

Rezultati:

**Optička rešetka s 80 zarez po mm  $\rightarrow d = 1,25 \cdot 10^{-5}m$**

Crvena LED dioda

k	x/m	L/m	$\tan \alpha = \frac{x}{L}$	$\lambda/\text{nm}$	$\bar{\lambda}/\text{nm}$	$ \Delta\lambda /\text{nm}$	$ \Delta\lambda_{max} /\text{nm}$	$r_{max}/\%$
1	0,01	0,2	0,05	624,74	627,22	2,48	5,74	0,92
2	0,02	0,2	0,1	623,96		3,26		
3	0,0305	0,2	0,1525	632,96		5,74		

$$\bar{\lambda} = 627 \pm 6 \text{ nm}$$

Narančasta LED dioda

k	x/m	L/m	$\tan \alpha = \frac{x}{L}$	$\lambda/\text{nm}$	$\bar{\lambda}/\text{nm}$	$ \Delta\lambda /\text{nm}$	$ \Delta\lambda_{max} /\text{nm}$	$r_{max}/\%$
1	0,01	0,2	0,05	624,74	615,17	9,57	9,57	1,56
2	0,0195	0,2	0,0975	608,41		6,76		
3	0,0295	0,2	0,1475	612,36		2,81		

$$\bar{\lambda} = 620 \pm 10 \text{ nm}$$

### Žuta LED dioda

k	x/m	L/m	$\tan \alpha = \frac{x}{L}$	$\lambda/\text{nm}$	$\bar{\lambda}/\text{nm}$	$ \Delta\lambda /\text{nm}$	$ \Delta\lambda_{\max} /\text{nm}$	$r_{\max}/\%$
1	0,0095	0,2	0,0475	593,53	601,33	7,80	7,80	0,01
2	0,0195	0,2	0,0975	608,41		7,08		
3	0,029	0,2	0,145	602,05		0,72		

$$\bar{\lambda} = 601 \pm 8 \text{ nm}$$

### Zelena LED dioda

k	x/m	L/m	$\tan \alpha = \frac{x}{L}$	$\lambda/\text{nm}$	$\bar{\lambda}/\text{nm}$	$ \Delta\lambda /\text{nm}$	$ \Delta\lambda_{\max} /\text{nm}$	$r_{\max}/\%$
1	0,0085	0,2	0,0475	531,09	527,06	4,03	7,58	0,01
2	0,017	0,2	0,085	530,61		3,55		
3	0,025	0,2	0,125	519,48		7,58		

$$\bar{\lambda} = 527 \pm 8 \text{ nm}$$

### Plava LED dioda

k	x/m	L/m	$\tan \alpha = \frac{x}{L}$	$\lambda/\text{nm}$	$\bar{\lambda}/\text{nm}$	$ \Delta\lambda /\text{nm}$	$ \Delta\lambda_{\max} /\text{nm}$	$r_{\max}/\%$
1	0,0075	0,2	0,0375	468,64	464,79	3,58	7,38	1,59
2	0,015	0,2	0,075	468,31		3,52		
3	0,022	0,2	0,11	457,41		7,38		

$$\bar{\lambda} = 465 \pm 7 \text{ nm}$$

**Optička rešetka s 300 zarezů po mm  $\rightarrow d = 3,33 \cdot 10^{-6}m$**

Crvena LED dioda

k	x/m	L/m	$\tan \alpha = \frac{x}{L}$	$\lambda/\text{nm}$
1	0,039	0,2	0,195	645,89

Narančasta LED dioda

k	x/m	L/m	$\tan \alpha = \frac{x}{L}$	$\lambda/\text{nm}$
1	0,0385	0,2	0,1925	637,71

Źuta LED dioda

k	x/m	L/m	$\tan \alpha = \frac{x}{L}$	$\lambda/\text{nm}$
1	0,036	0,2	0,18	596,77

Zelena LED dioda

k	x/m	L/m	$\tan \alpha = \frac{x}{L}$	$\lambda/\text{nm}$
1	0,032	0,2	0,16	531,06

Plava LED dioda

k	x/m	L/m	$\tan \alpha = \frac{x}{L}$	$\lambda/\text{nm}$	$\bar{\lambda}/\text{nm}$	$ \Delta\lambda /\text{nm}$	$ \Delta\lambda_{max} /\text{nm}$	$r_{max}/\%$
1	0,028	0,2	0,14	465,14	468,87	3,72	3,72	0,79
2	0,0575	0,2	0,2875	472,59		3,72		

$$\bar{\lambda} = 469 \pm 4 \text{ nm}$$

Zaključak:

U ovom dijelu eksperimenta pomoću dvije optičke rešetke od 80 i 300 zarez po milimetru smo odredili valne duljine svjetlosti emitirane svjetlećim diodama. Vrijednosti koje smo dobili približno odgovaraju onima u teoriji te onima dobivenim pomoću spektrometra.

#### 6.4. Određivanje Planckove konstante iz pokusa 1. i pokusa 2.

Tablica 3. Tablica dobivenih vrijednosti iz podataka dobivenih pokusom 1. i pokusom 2.

Boja	$\lambda/\text{nm}$	$U_K/\text{V}$	$h/\text{Js}$	p	f/Hz
crvena	627,62	2,00	$6,70836 \cdot 10^{-34}$	1,24 %	$4,77666 \cdot 10^{-14}$
narančasta	610,16	1,85	$6,03261 \cdot 10^{-34}$	8,96 %	$4,91334 \cdot 10^{-14}$
žuta	592,24	2,05	$6,48845 \cdot 10^{-34}$	2,08 %	$5,06201 \cdot 10^{-14}$
zelena	527,36	2,40	$6,76407 \cdot 10^{-34}$	2,08 %	$5,68478 \cdot 10^{-14}$
plava	459,64	2,70	$6,63241 \cdot 10^{-34}$	0,10 %	$6,52233 \cdot 10^{-14}$

$$h = \frac{eU_K\lambda}{c}$$

Poznata vrijednost Planckove konstante:

$$h_{\text{tab}} = 6,62607015 \cdot 10^{-34} \text{ Js}$$

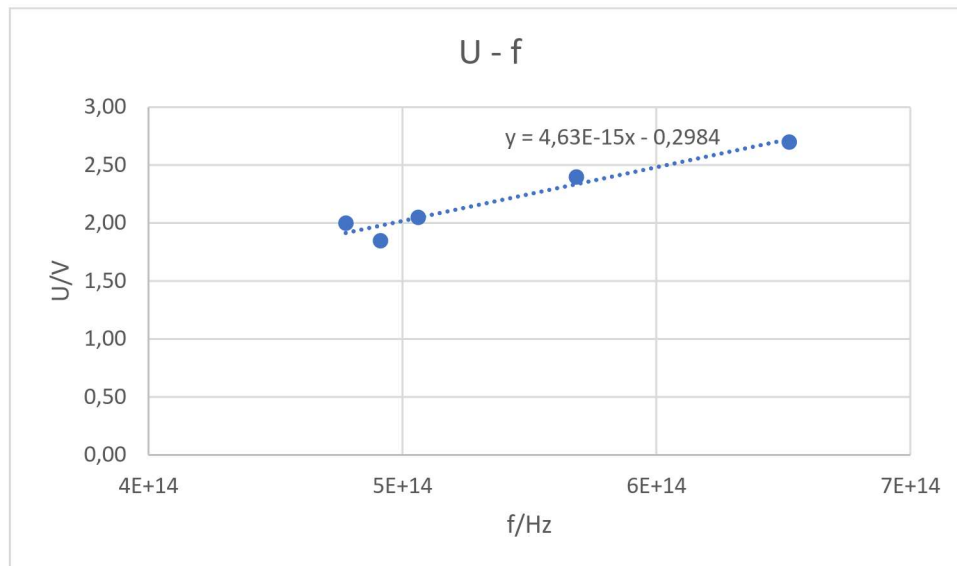
$$p = \frac{|h_{\text{tab}} - h|}{h_{\text{tab}}} * 100\%$$

$$y = ax + b, y = U, x = f$$

$$a = \frac{h}{e}$$

$$h = a \cdot e, e = 1,602176487 \cdot 10^{-19} \text{ C} - \text{elementarni naboj}$$

$$f = \frac{c}{\lambda}, c = 299792458 \text{ m/s} - \text{brzina svjetlosti}$$



Graf 11. U-f graf

$$y = a \cdot x + b$$

$$a = 4,63 \cdot 10^{-15} \text{ Js/C}$$

$$h = 7,42 \cdot 10^{-34} \text{ Js}$$

$$h_{\text{tab}} = 6,62607015 \cdot 10^{-34} \text{ Js}$$

$$p = \frac{|h_{\text{tab}} - h|}{h_{\text{tab}}} * 100\% = 12,04 \%$$

Zaključak:

Pomoću vrijednosti napona koljena koje smo dobili u pokusu 1. i vrijednosti valnih duljina iz pokusa 2. odredili smo vrijednost Planckove konstante i usporedili je s poznatom vrijednosti. Vrijednost smo računali za svaku od dioda te smo najmanju pogrešku dobili za plavu (0,10 %), a najveću za narančastu LED diodu (8,96 %). Pomoću vrijednosti valnih duljina odredili smo frekvenciju te nacrtali graf ovisnosti napona i frekvencije. Iz parametara jednadžbe pravce i poznatih vrijednosti brzine svjetlosti i elementarnog naboja ponovno smo odredili vrijednost Planckove konstante čija je postotna pogreška čak 12,04 %. Pogreška je nastala zbog razloga navedenih u pokusu 1. Vrijednost pogreške za Planckovu konstantu u slučaju kada bi zanemarili mjerenja za narančastu LED diodu bila bi 1,70 %.

## 6.5. Određivanje Planckove konstante iz pokusa 1. i pokusa 3.

### 1) Optička rešetka s 80 zarez po mm

Tablica 4. Tablica dobivenih vrijednosti iz podataka dobivenih pokusom 1. i pokusom 3.

Boja	$\lambda/\text{nm}$	$U_K/\text{V}$	$h/\text{Js}$	$p$	$f/\text{Hz}$
crvena	627,22	2,00	$6,70409 \cdot 10^{-34}$	1,18 %	$4,77970 \cdot 10^{-14}$
narančasta	615,17	1,85	$6,08214 \cdot 10^{-34}$	8,21 %	$4,87333 \cdot 10^{-14}$
žuta	601,33	2,05	$6,58804 \cdot 10^{-34}$	0,57 %	$4,98549 \cdot 10^{-14}$
zelena	527,06	2,40	$6,76022 \cdot 10^{-34}$	2,03 %	$5,68801 \cdot 10^{-14}$
plava	464,79	2,70	$6,70672 \cdot 10^{-34}$	1,22 %	$6,45006 \cdot 10^{-14}$

$$h = \frac{eU_K\lambda}{c}$$

Poznata vrijednost Planckove konstante:

$$h_{\text{tab}} = 6,62607015 \cdot 10^{-34} \text{ Js}$$

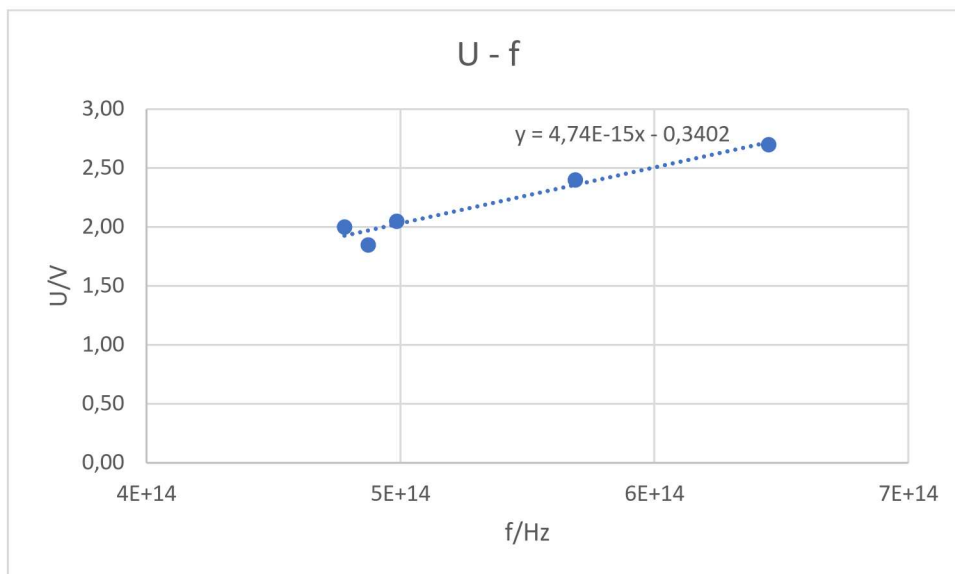
$$p = \frac{|h_{\text{tab}} - h|}{h_{\text{tab}}} * 100\%$$

$$y = ax + b, y = U, x = f$$

$$a = \frac{h}{e}$$

$$h = a \cdot e, e = 1,602176487 \cdot 10^{-19} \text{ C} - \text{elementarni naboj}$$

$$f = \frac{c}{\lambda}, c = 299792458 \text{ m/s} - \text{brzina svjetlosti}$$



Graf 12. U-f graf

$$y = a \cdot x + b$$

$$a = 4,74 \cdot 10^{-15} \text{ Js/C}$$

$$h = 7,60 \cdot 10^{-34} \text{ Js}$$

$$h_{\text{tab}} = 6,62607015 \cdot 10^{-34} \text{ Js}$$

$$p = \frac{|h_{\text{tab}} - h|}{h_{\text{tab}}} * 100\% = 14,69 \%$$

2) Optička rešetka s 300 zarezima po mm

Tablica 5. Tablica dobivenih vrijednosti iz podataka dobivenih pokusom 1. i pokusom 3.

Boja	$\lambda/nm$	$U_K/V$	$h/Js$	p	$f/Hz$
crvena	645,88	2,00	$6,90353 \cdot 10^{-34}$	4,19 %	$4,64161 \cdot 10^{-14}$
narančasta	637,71	1,85	$6,30499 \cdot 10^{-34}$	4,84 %	$4,70108 \cdot 10^{-14}$
žuta	596,76	2,05	$6,53798 \cdot 10^{-34}$	1,33 %	$5,02367 \cdot 10^{-14}$
zelena	531,06	2,40	$6,81153 \cdot 10^{-34}$	2,80 %	$5,64517 \cdot 10^{-14}$
plava	468,86	2,70	$6,76545 \cdot 10^{-34}$	2,10 %	$6,39407 \cdot 10^{-14}$



$$h = \frac{eU_K\lambda}{c}$$

Poznata vrijednost Planckove konstante:

$$h_{\text{tab}} = 6,62607015 \cdot 10^{-34} \text{ Js}$$

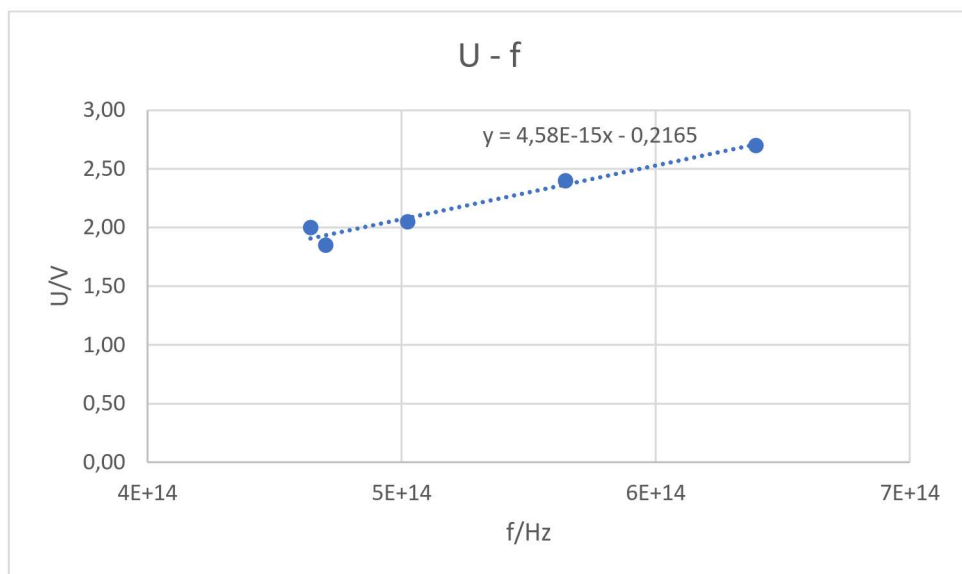
$$p = \frac{|h_{\text{tab}} - h|}{h_{\text{tab}}} * 100\%$$

$$y = ax + b, y = U, x = f$$

$$a = \frac{h}{e}$$

$$h = a \cdot e, e = 1,602176487 \cdot 10^{-19} \text{ C} - \text{elementarni naboj}$$

$$f = \frac{c}{\lambda}, c = 299792458 \text{ m/s} - \text{brzina svjetlosti}$$



Graf 13. U-f graf

$$y = a \cdot x + b$$

$$a = 4,58 \cdot 10^{-15} \text{ Js/C}$$

$$h = 7,33 \cdot 10^{-34} \text{ Js}$$

$$h_{\text{tab}} = 6,62607015 \cdot 10^{-34} \text{Js}$$

$$p = \frac{|h_{\text{tab}} - h|}{h_{\text{tab}}} * 100\% = 10,64 \%$$

Zaključak:

Iz vrijednosti dobivenih u pokusu 1. i pokusu 3. odredili smo vrijednost Planckove konstante za svaku od svjetlećih dioda. Najmanju pogrešku dobili smo kod računanja vrijednosti za žutu diodu (0,57%), a najveću kod računanja vrijednosti za narančastu diodu (8,21%). Iz vrijednosti valnih duljina odredili smo frekvenciju, nacrtali U-f graf te pomoću nagiba pravca odredili vrijednost Planckove konstante. Dobivene vrijednosti odstupaju od poznate za 14,69 % i 10,64 %. Ne uzimajući u obzir narančastu LED diodu postotne pogreške bile bi prihvatljivije te bi iznosile 4,41% i 2,23 %.

## 7. Metodička obrada:

U sklopu nastavne jedinice Fotoelektrični učinak koja se obrađuje u četvrtom razredu srednje škole moguće je nakon teorijske obrade eksperimentalno potvrditi prethodno navedene spoznaje. Kako bi se učenike potaklo na razmišljanje i istraživanje fizičkih pojava tijekom dva školska sata predviđeno je da učenik primijeni prethodno stečena znanja sa ciljem određivanja vrijednosti Planckove konstante.

### PRIPREMA ZA IZVOĐENJE NASTAVNOG SATA

#### Fotoelektrični učinak

STUDENT: Domagoj Bradarić

ŠKOLA:

MJESTO:

MENTOR:

DATUM:

Školska godina:

Razred: 4..

Nastavni predmet: Fizika

Nastavna tema (domena): A – struktura tvari, B – međudjelovanje, D - energija

Nastavna jedinica: Fotoelektrični učinak

## I. Sadržajni plan

Podjela nastavne teme na jedinice (prema Godišnjem izvedbenom kurikulumu) :

1. **Fotoelektrični učinak**
2. Primjene fotoelektričnog učinka
3. Elektromagnetsko zračenje – čestica i val
4. Elektromagnetsko zračenje zagrijanih tijela

## OČEKIVANI ISHODI UČENJA UČENIKA I NJIHOVO VRJEDNOVANJE

<b>Cilj nastavne jedinice:</b>	Osposobiti učenika da eksperimentalno odredi vrijednost Planckove konstante pomoću LED diode
--------------------------------	--

<b>Ključni pojmovi:</b>	Fotoelektrični učinak, Planckova konstanta, LED dioda
-------------------------	---

	<i>Način provjere ishoda učenja:</i>
<b>Ishodi učenja obrazovne (spoznajne, kognitivne) domene:</b>	<p>Učenik će biti sposoban:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• odrediti vrijednost planckove konstante</li> <li>• objasniti princip rada svjetleće diode</li> </ul>
<b>Ishodi učenja funkcionalne (psihomotoričke) domene:</b>	<p>Učenik će biti sposoban:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• spojiti strujni krug</li> <li>• demonstrirati pokus izveden na satu</li> </ul>
<b>Ishodi učenja odgojne (afektivne) domene (vrijednosti, stavovi, navike) :</b>	<p>Učenik će biti sposoban:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• poticati interes za istraživanje</li> <li>• razvijati naviku prihvaćanja tuđih ideja tijekom rasprave</li> </ul>

### Oblici vrednovanja:

Vrednovanje za učenje:	Vrednovanje kao učenje:	Vrednovanje naučenoga:
Promatranje interesa i aktivnosti učenika, izražavanje zaključaka i mišljenja prilikom izvođenja pokusa	Radni listić	-

**ORGANIZACIJA NASTAVNOG SATA**

<b>Tip nastavnog sata:</b>	Obrada nastavne jedinice – blok sat		
<b>Oblici rada:</b>	<b>Nastavne metode:</b>	<b>Nastavna sredstva i pomagala:</b>	<b>Korelacija s ostalim predmetima:</b>
Frontalni Grupni	Metoda usmenog izlaganja Metoda razgovora Metoda istraživačkog pokusa	Računalo, projektor, ploča, pribor za pokuse	Kemija, matematika, informatika
<b>Očekivanja međupredmetnih tema</b>	uku D.4/5.2. Suradnja s drugima ikt C.5.4. Učenik samostalno i odgovorno upravlja prikupljenim informacijama.		
<b>Literatura za učitelja:</b>			
1. Vladimir Paar, Anica Hrlec, Karmena Vadjla Rešetar, Melita Samboleč: FIZIKA oko nas 4, udžbenik fizike u drugom razredu gimnazije, Školska knjiga, Zagreb, 2021. 2. Jakov Labor: Fizika 4, udžbenik za četvrti razred gimnazije; ALFA, Zagreb, 2005.			
<b>Literatura za učenike:</b>			
1. Vladimir Paar, Anica Hrlec, Karmena Vadjla Rešetar, Melita Samboleč: FIZIKA oko nas 4, udžbenik fizike u drugom razredu gimnazije, Školska knjiga, Zagreb, 2021.			

### **TIJEK NASTAVNOG PROCESA**

AKTIVNOST UČITELJA	AKTIVNOST UČENIKA
<p><u>Uvodni dio sata</u></p> <p>Pripremam radno mjesto i pozdravljam učenike prisutne na satu s ciljem uvida atmosfere u razredu. Upisujem sat i učenike koji nisu prisutni te pokrećem prezentaciju na kojoj se nalaze pitanja za ponavljanje prošlotjednog gradiva.</p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1. Što je fotoelektrični učinak i tko ga je prvi primijetio?</li> <li>2. Čemu je jednaka energija fotona?</li> <li>3. Kako glasi Einsteinova jednadžba fotoelektričnog efekta?</li> <li>4. Koliko iznosi vrijednost Planckove konstante?</li> </ol> <p>Najavljujem koju ćemo eksperimentalno odrediti vrijednost Planckove konstante koristeći svjetleće diode (LED) s kojima ćemo se također pobliže upoznati.</p> <p><u>Središnji dio sata</u></p>	<p>Učenici pozdravljaju.</p> <p>Učenici odgovaraju na postavljena pitanja.</p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1. Fotoelektrični učinak je pojava izbijanja elektrona s površine metala ukoliko je metal obasjan elektromagnetskih zračenjem, a pojavu je prvi primijetio njemački fizičar Heinrich Hertz.</li> <li>2. Energija fotona frekvencije svjetlost <math>f</math> jednaka je: <math>E = h \cdot f</math>, gdje <math>h</math> predstavlja vrijednost Planckove konstante.</li> <li>3. Einsteinova jednadžba fotoelektričnog učinka glasi: <math>E_{k,max} = hf - W_i</math>.</li> <li>4. Vrijednost Planckove konstante iznosi: <math>h = 6,62607015 \cdot 10^{-34} \text{Js}</math>.</li> </ol> <p>Učenici zapisuju naslov u bilježnice.</p>

<p>Objašnjavam učenicima da je svjetleća dioda ili LED dioda poluvodički element koji električni signal pretvara u vidljivo svjetlo. Također, prikazujem kako se u strujnom krugu simbolom označava LED dioda.</p> <p>Na prezentaciji prikazujem njen poprečni presjek i objašnjavam njezinu građu. Navodim da LED dioda ima dvije elektrode, anodu i katodu. Naglašavam da je dulja nožica anoda, a kraća katoda. Također, ukazujem učenicima da jedan dio kućišta nije zaobljen, odnosno da postoji ravan dio koji se nalazi na istoj strani kao i katoda. Na katodi koja je s anodom spojena metalnom žicom nalazi se pn spoj i reflektirajući sloj.</p> <p>Zatim objašnjavam princip rada LED diode, govorim da slobodni elektroni u vodljivom pojasu imaju veću energiju od šupljina u valentnom pojasu pa se prilikom njihove rekombinacije otpušta energija u obliku svjetlosti. Širina zabranjenog pojasa određuje valnu duljinu svjetlosti.</p> <p>Objašnjavam učenicima što je napon praga te da je on ovisi o boji LED diode i materijalu od kojeg je ona izrađena. Povećanjem valne duljine svjetlosti smanjuje se napon koljena LED diode. Na prezentaciji prikazujem strujno-naponsku karakteristiku različitih LED dioda.</p>	<p>Učenici zapisuju što je LED dioda.</p> <p>Učenici skiciraju LED diodu i zapisuju od čega je ona građena.</p> <p>Učenici zapisuju princip rada LED diode.</p> <p>Učenici skiciraju strujno-naponsku karakteristiku LED dioda.</p>
--	---



<p>Najavljujem učenicima da će eksperiment raditi u grupama te im zatim dijelim radni listić s uputama i potrebnu aparaturu. S učenicima zajedno prolazim kroz upute koje se nalaze na radnom listiću i po potrebi odgovaram na postavljena pitanja.</p> <p>Promatram tijek izvođenja pokusa i aktivnost učenika.</p> <p><u>Završni dio sata</u></p> <p>U završnom dijelu sata učenici prezentiraju svoje rezultate, uspoređuju dobivenu vrijednost s poznatom vrijednosti Planckove konstante i iskazuju svoje mišljenje o pokusu.</p>	<p>Učenici se dijele u grupe i postavljaju pitanja ukoliko ima nejasnoća.</p> <p>Učenici prate upute s radnog listića, izvode eksperiment te zapisuju i obrađuju rezultate.</p> <p>Učenici prezentiraju svoje rezultate te sudjeluju u diskusiji.</p>
---	---

## Određivanje Planckove konstante iz fotoelektričnog učinka

Zadatak:

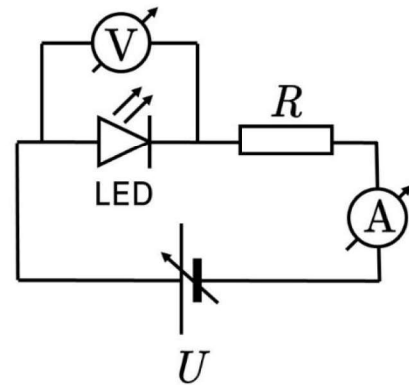
1. Određivanje napona koljena LED diode
2. Određivanje valne duljine LED diode pomoću optičke rešetke
3. Određivanje vrijednosti Planckove konstante

### 1. Određivanje napona koljena LED diode

Pribor: LED dioda (crvena, narančasta, žuta, zelena ili plava), spojne žice, dva multimetra, ispitna pločica (engl. breadboard), izvor napona, otpornik od 100 ohma, računalo

Upute:

- Spojiti aparaturu prema shemi
- Povećavajte napon i bilježite parove vrijednosti dobivene na ampermetru i voltmetru
- Pomoću računalnog programa Microsoft Excel grafički prikažite strujno-naponsku karakteristiku LED diode i odredite napon praga iz parametara jednadžbe pravca



Korištene formule:

$$y = ax + b, y = I, x = U$$

$$\text{Napon koljena: } U_K = -\frac{b}{a}$$

Rezultati:

$U/V$	$I/mA$

Jednadžba pravca:

\_\_\_\_\_

Napon koljena:

\_\_\_\_\_

## 2. Određivanje valne duljine LED diode pomoću optičke rešetke

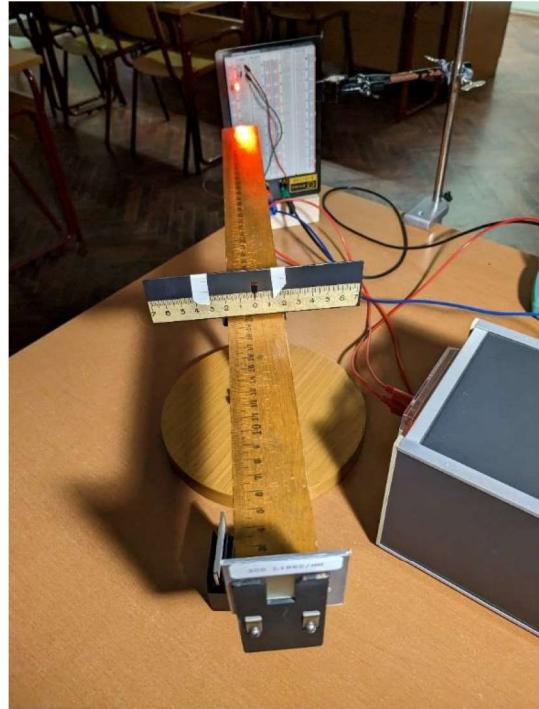
Pribor: optička rešetka, ravnala, dvije papirnate kazaljke, LED diode (crvena, narančasta, žuta, zelena ili plava), spojne žice, dva multimetra, ispitna pločica (breadboard), izvor napona, otpornik od 100 ohma

Upute:

- Spojite aparaturu kao na slici
- Odredite konstantu optičke rešetke  $d$
- Kroz optičku rešetku promatrajte izvor svjetlosti
- izmjerite udaljenost  $x$  centralne slike od prvog, drugog i trećeg reda oštrih maksimuma  $k$  i udaljenost optičke rešetke do poprečno postavljenog ravnala  $L$
- Odredite valnu duljinu

Korištene formule:

$$\lambda = \frac{xd}{kL}$$



Rezultati:

Boja LED diode	d/m	L/m	k	x/m	$\lambda/m$	$\bar{\lambda}/m$
			1			
			2			
			3			

## 3. Određivanje vrijednosti Planckove konstante

Upute:

- Iz dobivenih rezultata iz prva dva dijela eksperimenta odredite vrijednost Planckove konstante
- Usporedite dobivenu vrijednost s poznatom vrijednosti ( $h_{\text{tab}} = 6,62607015 \cdot 10^{-34}$  Js)

Korištene formule:

$$f = \frac{c}{\lambda}$$

$$E = hf$$

$$E = eU_K$$

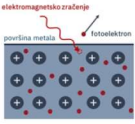
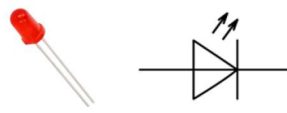
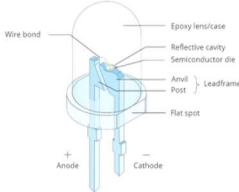
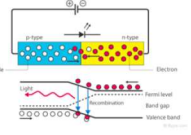
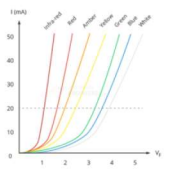
$$h = \frac{eU_K}{f}$$

$$p = \frac{|h_{\text{tab}} - h|}{h_{\text{tab}}} * 100\%$$

Rezultati:

Zaključak:

# Plan projekcijskog platna:

<p><b>Pitanja za ponavljanje!</b></p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1. Što je fotoelektrični učinak i što ga je prvi primijetio?</li> <li>2. Čemu je jednaka energija fotona?</li> <li>3. Kako glasi Einsteinova jednačina fotoelektričnog učinka?</li> <li>4. Koje su jedinice vrijednost Planckove konstante?</li> </ol> 	<p><b>Određivanje Planckove konstante iz fotoelektričnog učinka</b></p>	<p>LED (Light-emitting diode)</p> <p>• poluvodički element koji pretvara električni signal u svjetlost</p> 
1	2	3
	<p><b>Princip rada LED</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• elektromagnetsko zračenje od fotoelektričnog učinka</li> <li>• fotoni elektromagnetskog zračenja imaju energiju jednaku energiji fotona</li> <li>• fotoni elektromagnetskog zračenja imaju energiju jednaku energiji fotona</li> <li>• Otkrivena energija: <math>E_f = hf = \frac{hc}{\lambda}</math></li> <li>• <math>E_f</math> = brzina zakrivljenog anoda</li> </ul> 	<p>Strujno-naponska karakteristika LED</p> 
4	5	6

## 8. Zaključak

Prilikom rekombinacije elektrona iz n-tipa materijala sa šupljinama iz p-tipa materijala pri, čemu elektroni iz vodljivog pojasa imaju veću energiju od šupljina iz valentnog pojasa, dolazi do emisije svjetlosti LED diode čija je energija jednaka širini zabranjenog pojasa. Boja emitirane svjetlosti, napon koljena i širina zabranjenog pojasa ovise od čega su LED diode izrađene. Vezom između relacija  $E = qU_K$  i  $E = hf$ , u kojima  $q$  predstavlja naboj elektrona,  $U_K$  napon koljena LED diode, a  $f$  frekvenciju svjetlosti moguće je odrediti vrijednost Planckove konstante  $h$ .

LED dioda je poluvodički element koji pretvara električni signal u vidljivu svjetlost kada dosegne napon pri kojemu naglo počinje voditi struju, odnosno napon koljena. Napon koljena LED diode odredili smo iz njene strujno-naponske karakteristike, a frekvenciju, odnosno valnu duljinu na dva različita načina, pomoću optičke rešetke i spektrometra. Iz dobivenih podataka izračunali smo vrijednost Planckove konstante te usporedili je s poznatom vrijednosti.

Kako bi nastava fizike bila kvalitetnija i zanimljivija nužno je koristiti pokuse, odnosno eksperimente. Ovaj eksperiment vrlo je lako reproducirati u školskoj učionici te stoga može biti vrlo koristan alat za poticanje na razmišljanje i motivaciju učenika prema istraživačkom radu. Teorija koja se koristi za opisivanje pojava navedenih u ovom radu često je učenicima apstraktna te im upravo ovaj eksperiment može pomoći u njezinom boljem razumijevanju.

## 9. Literatura

[1] Klassen, Stephen. (2008). The Photoelectric Effect: Rehabilitating the Story for the Physics Classroom.

[https://www.researchgate.net/publication/241381155\\_The\\_Photoelectric\\_Effect\\_Rehabilitating\\_the\\_Story\\_for\\_the\\_Physics\\_Classroom](https://www.researchgate.net/publication/241381155_The_Photoelectric_Effect_Rehabilitating_the_Story_for_the_Physics_Classroom) (14.4.2023.)

[2] <https://cdn.britannica.com/18/1218-004-ECA9F94F/Heinrich-Hertz.jpg?w=400&h=300&c=crop> (14.4.2023.)

[3] <https://www.themegaguide.com/2020/05/Hertz-Experiment.html> (14.4.2023.)

[4] NCERT, Dual Nature of Radiation and Matter, <https://ncert.nic.in/ncerts/l/leph203.pdf> (15.4.2023.)

[5] <https://enciklopedija.hr/natuknica.aspx?ID=17257> (15.3.2023.)

[6] Vladimir Paar, Anica Hrlec, Karmena Vadlja Rešetar, Melita Sambolek: FIZIKA oko nas 4, udžbenik fizike u drugom razredu gimnazije, Školska knjiga, Zagreb, 2021.

[7] <https://www.physics-and-radio-electronics.com/blog/photoelectric-effect/> (17.4.2023.)

[8] Milan S. Kovačević, Marko M. Milošević, Strujno-naponska karakteristika LED diode [https://fizika.pmf.kg.ac.rs/pages/srednje%20skole/skolski-eksperiment-iz-fizike/2020\\_UV%20karakteristika%20LED%20diode.pdf](https://fizika.pmf.kg.ac.rs/pages/srednje%20skole/skolski-eksperiment-iz-fizike/2020_UV%20karakteristika%20LED%20diode.pdf) (17.4.2023.)

[9] [https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/thumb/d/d6/Symbol\\_LED.svg/1280px-Symbol\\_LED.svg.png](https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/thumb/d/d6/Symbol_LED.svg/1280px-Symbol_LED.svg.png) (17.4.2023.)

[10] <http://hr.panasystech.com/info/light-emitting-diode-led-emitting-light-whe-20245557.html> (17.4.2023.)

[11] <https://advancedlab.physics.gatech.edu/labs/photoelectric/photoelectric-3.html> (18.4.2023.)

[12] <https://byjus.com/physics/light-emitting-diode/> (18.4.2023.)

[13] Švedek, Poluvodičke komponente i osnovni sklopovi, Svezak I, Poluvodičke komponente, Graphis, Zagreb, 2001 (19.4.2023.)

- [14] <https://lastminuteengineers.com/light-emitting-diode-led/> (19.4.2023.)
- [15] Cho, J., Park, J. H., Kim, J. K., & Schubert, E. F. (2017). White light-emitting diodes: history, progress, and future. *Laser & photonics reviews*, 11(2), 1600147. (19.4.2023.)
- [16] [https://www.sedna.lighting/wp-content/uploads/2016/02/Haitz\\_law.png](https://www.sedna.lighting/wp-content/uploads/2016/02/Haitz_law.png) (19.4.2023.)
- [17] <https://soldered.com/learn/led-light-emitting-diode-explained/> (19.4.2023.)
- [18] <https://www.berkeys.com/2016/11/16/advantage-disadvantage-led-lights/> (19.4.2023.)
- [19] <https://rclite.com/blog/advantages-and-disadvantages-of-led-lighting/> (19.4.2023.)
- [20] <https://edutorij.e-skole.hr/share/proxy/alfresco-noauth/edutorij/api/proxy-guest/fa4cd5a4-17e1-47c2-a2db-545721e1cce5/ogib-svjetlosti.html>(21.4.2023.)
- [21] <https://www.britannica.com/science/spectroscopy> (19.4.2023.)
- [22]  
[https://www.phy.uniri.hr/files/nastava/stranice\\_kolegija/fizicki\\_praktikum\\_IV\\_ECTS\\_6/8%20Spektroskopija.pdf](https://www.phy.uniri.hr/files/nastava/stranice_kolegija/fizicki_praktikum_IV_ECTS_6/8%20Spektroskopija.pdf) (19.4.2023.)
- [23] <https://spectraservices.com/product/USB2000.html> (20.4.2023.)
- [24] <https://photos.labwrench.com/equipmentManuals/9443-3596.pdf> (20.4.2023.)
- [25] <https://edutorij.e-skole.hr/share/proxy/alfresco-noauth/edutorij/api/proxy-guest/a985a697-8949-410e-af32-bfd69b605dd6/aktivnosti-za-samostalno-ucenje-3.html>  
(13.6.2023.)