

7 Lastnosti in merjenje svetlobe

Pri tej vaji se bomo seznanili z valovno in delčno naravo svetlobe ter s pojmi spekter, uklon in interferenca. Spoznali bomo, kako se določi valovne dolžine in izmeri gostoto svetlobnega toka. Povedali pa bomo tudi nekaj o biofizikalnih osnovah zaznavanja svetlobe z očesom.

Svetloba ima v živalskem in rastlinskem svetu pomembno vlogo (fotosinteza, zaznavanje s fotoreceptorji, poškodbe zaradi ultravijolične svetlobe). Uporabljamo jo tudi pri številnih kliničnih, biofizikalnih in biokemijskih meritvah, kot tudi pri zdravljenju. Pri tem ni pomembna le jakost svetlobnega toka, ampak tudi, kako je svetlobni tok porazdeljen po valovnih dolžinah (barvah) in kakšno površino obseva. Gostota svetlobnega toka, ali natančneje gostota energijskega toka svetlobe (j), je po definiciji enaka energiji, ki pade v časovni enoti na enoto površine pravokotno na smer razširjanja valovanja.

7.1 Spekter

Porazdelitev gostote svetlobnega toka po valovnih dolžinah oziroma frekvencah imenujemo spekter svetlobe. Spekter lahko izmerimo, če se usmerjen svetlobni curek svetlobe iz izvora razkloni pri prehodu skozi optično prizmo ali uklonsko mrežico. Spekter je lahko zvezen ali črtast. V zveznem spektru so v nekem področju valovnih dolžin zastopane vse valovne dolžine. Predstavimo ga tako, da nanašamo na eno os valovno dolžino (λ), na drugo os pa delež gostote energijskega toka, ki pade v majhen interval valovnih dolžin ($dj/d\lambda$). Gostota energijskega toka svetlobe z valovnimi dolžinami med λ in $\lambda + d\lambda$ je

$$dj = \frac{dj}{d\lambda} d\lambda . \quad (7.1)$$

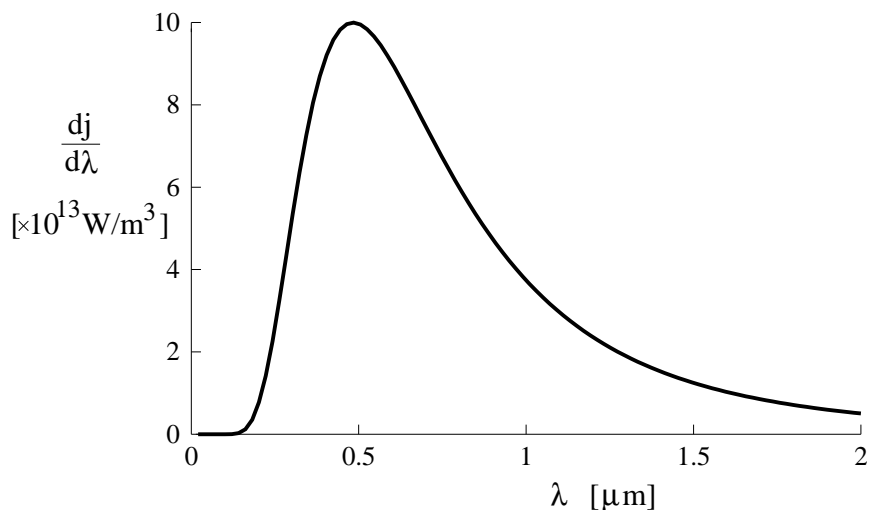
Primer zveznega spektra je narisano na sliki 7.1.

Celotno gostoto svetlobnega toka dobimo, če seštejemo prispevke vseh valovnih dolžin v spektru

$$j = \int_0^{\infty} \frac{dj}{d\lambda} d\lambda . \quad (7.2)$$

Na sliki 7.1 je torej celotna gostota svetlobnega toka enaka ploščini pod krivuljo. Primeri zveznega spektra so spekter sončne svetlobe ali spektri volframovih in halogenskih žarnic.

Črtast pa je spekter, v katerem nastopajo le nekatere valovne dolžine. Predstavimo ga tako, da nanašamo na eno os valovno dolžino, na drugo pa gostoto svetlobnega toka. Višina črte predstavlja gostoto svetlobnega toka z določeno valovno dolžino (slika 7.2). Črtasti spektri so značilni za svetlobo, ki jo izsevajo atomi pri prehodu iz vzbujenih stanj v nižja energijska stanja. Atomi elementov imajo svoje značilne spektre. Spektre svetlobe določenih svetil lahko razložimo kot superpozicijo črtastega in zveznega spektra. Take sestavljene spektre imajo neonske (varčne žarnice) in obločne žarnice. Zelo poznan sestavljen spekter je spekter "svetlobe", ki jo seva rentgenska cev.



Slika 7.1: Primer zveznega spektra, ki ga seva sonce, katerega površina ima temperaturo 6000 K.

7.2 Uklon in interferenca

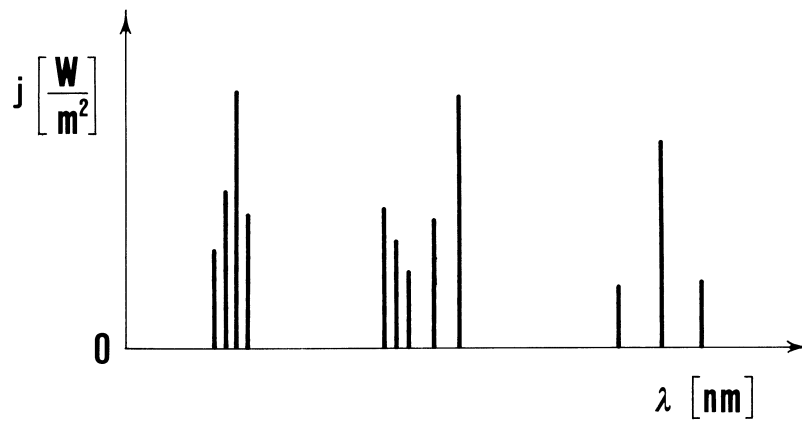
O uklonu govorimo, kadar se valovanje širi v geometrijsko senco za oviro. Pojav opazimo, če je velikost ovire ali odprtine primerljiva z valovno dolžino valovanja ali manjša od nje. Valovne dolžine vidne svetlobe so zelo majhne v primerjavi z dimenzijami predmetov iz vsakdanjega življenja, zato uklona svetlobe na njih ne opazimo. Z zvokom je drugače, saj so valovne dolžine primerljive, zato slišimo zvok za drevesom, čeprav zvočila ne vidimo.

Valovanja, ki se širijo iz več izvorov, med seboj interferirajo, kar pomeni, da je trenutni odmik v posamezni točki vsota trenutnih odmikov valovanj iz vseh izvorov, ki so dosegla to mesto. Valovanja iz izvorov se na določenih področjih prostora ojačujejo, na drugih pa oslabijo. Kadar dva izvora nihata z isto frekvenco in v fazi (hkrati dosegata maksimume in minimume), se valovanja iz takih izvorov najbolj ojačita na mestih, kjer je razlika poti obeh valovanj enaka celemu večkratniku valovne dolžine. Najbolj pa se valovanje oslabi na mestih, kjer se poti razlikujeta za lih večkratnik polovične valovne dolžine (fazi valovanj sta na tem mestu nasprotni).

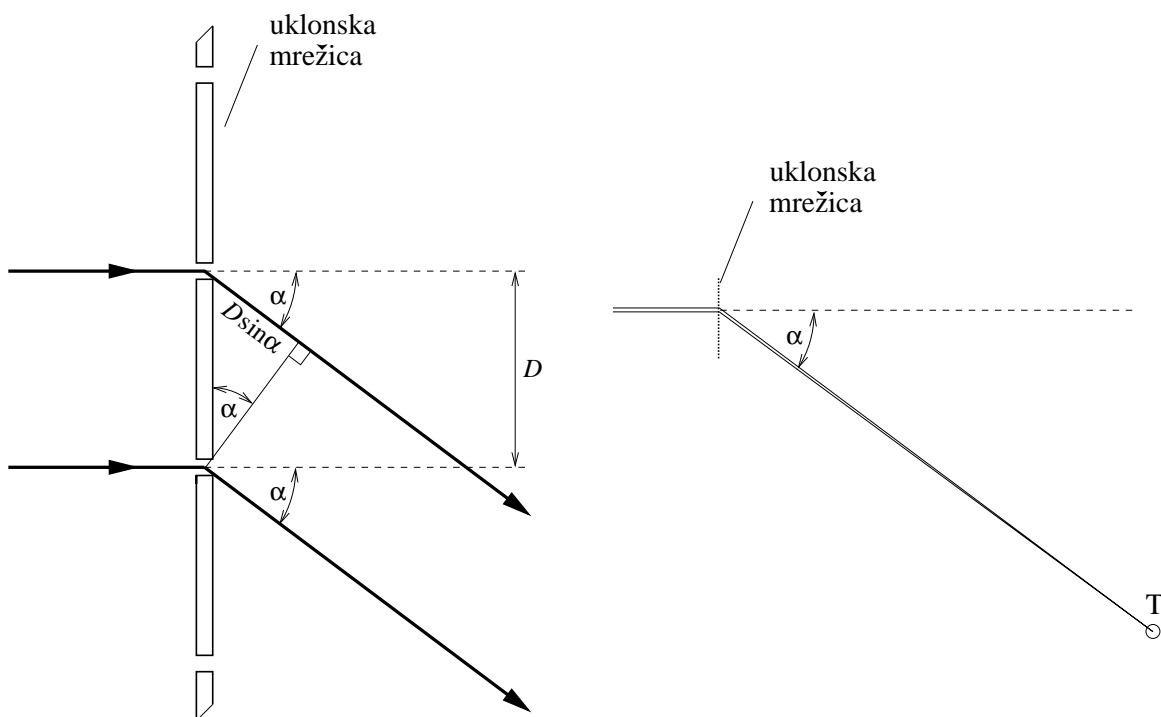
7.3 Uklonska mrežica

Mislimo si, da pade enobarvna svetloba z valovno dolžino λ pravokotno na ozki reži, ki sta med seboj oddaljeni za D . Zaradi pravokotnega vpada svetlobe sta odmika v režah v fazi. Svetloba se na zelo ozki reži razkloni in izhaja iz nje kot iz točkastega izvora. Valovanja, ki izhajata iz rež, interferirata. Iz slike 7.3 je razvidno, da se dolžini optičnih poti valovanj zelo daleč za režama, ko lahko obravnavamo, da sta poti vzporedni, razlikujeta za

$$d = D \sin \alpha . \quad (7.3)$$



Slika 7.2: Primer črtastega spektra.



Slika 7.3: Razlika poti vzporednih žarkov, uklonjenih na sosednjih režah (levo). Če sta dolžini poti valovanj do izbrane točke (točka T) mnogo večji od razdalje med režama, lahko obravnavamo, da sta poti vzporedni (desno).

Če se poti žarkov razlikujeta ravno za večkratnik valovne dolžine, se valovanji najbolj ojačujeta, na takem mestu nastane interferenčni vrh. Ti vrhovi ležijo v smereh (α), za katere velja pogoj

$$d = D \sin \alpha = N \lambda , \quad (7.4)$$

kjer je N celo število. To število pove, za koliko valovnih dolžin se razlikujeta poti žarkov iz dveh sosednjih rež, in označuje uklonski red. Če se poti valovanj razlikujeta za lih večkratnik polovične valovne dolžine, se valovanji oslabita, kar se zgodi v smereh, za katere velja

$$d = D \sin \alpha = \left(N + \frac{1}{2}\right) \lambda . \quad (7.5)$$

Vidimo, da se na danih režah pri istem uklonskem maksimumu (N) svetloba z daljšo valovno dolžino bolj ukloni kot svetloba s krajšo valovno dolžino.

Smeri uklonskih maksimumov so enake, če imamo namesto dveh v enakih razmakih rež več, maksimumi pa so izrazitejši. Tako pripravo imenujemo optična ali uklonska mrežica in uporabljamo jo pri določanju spektrov.

Če na režo ali optično mrežico pada svetloba, v kateri so zastopane različne valovne dolžine (na primer bela svetloba), se le v smeri, ki je nadaljevanje vpadnega žarka, zopet sestavijo prispevki vseh valovnih dolžin – ničti uklonski maksimum je zato enake barve kot vpadna svetloba. Ostali maksimumi so za različne valovne dolžine v različnih smereh, kar pomeni, da se svetloba razkloni. Če optični mrežici dodamo še umerjen zaslon, dobimo preprost spektrometer na uklonsko mrežico. V spektrometrih, ki se uporabljajo pri preiskavah in v raziskovalne namene, so vgrajene še dodatne enote, kot so detektorji svetlobe, merilci premika, izvori svetlobe. Da bi bili uklonski koti dovolj veliki, mora biti razdalja med zarezi primerljiva z valovno dolžino svetlobe, kar pomeni, da mora imeti uklonska mrežica od 100 do 800 zarez na milimeter.

7.4 Svetlobni kvanti, fotoni

Lastnosti svetlobe, kot sta uklon in interferenca, lahko enostavno razložimo, če opisujemo svetlobo kot elektromagnetno valovanje. Po drugi strani pa lahko pojave, kot je fotoelektrični pojav, razložimo, če privzamemo, da je svetloba sestavljena iz “delčkov z določeno energijo” – fotonov. Pravimo, da ima svetloba dvojno naravo: valovno in delčno. Fotone si lahko predstavljamo kot energijske delce brez mase, ki se gibljejo s svetlobno hitrostjo c . Energija fotona je sorazmerna frekvenci svetlobe ν

$$W = h\nu = h \frac{c}{\lambda} , \quad (7.6)$$

kjer je sorazmernostni koeficient Planckova konstanta ($h = 6,6 \times 10^{-34}$ Js).

Gostoto svetlobnega toka lahko izrazimo z gostoto energije, $w = nh\nu$, pomnoženo s svetlobno hitrostjo:

$$j = nhvc , \quad (7.7)$$

kjer je n število fotonov na prostorninsko enoto.

7.5 Fotoelektrični pojav

V kovini je oblak prevodnih elektronov. Ti se prosto gibljejo po kristalni mreži, ki jo tvorijo ioni kovine, vendar nimajo dovolj energije, da bi premagali mrežni privlak in kovino zapustili. Elektron, ki je blizu površine, lahko zapusti kovino, če dobi iz okolice dovolj energije. Energijo, ki jo potrebuje elektron, da premaga mrežni privlak in zapusti kovino, imenujemo izstopno delo (A_{iz}). Pri fotoelektričnem pojavu (fotoefektu) dobijo elektroni energijo z absorpcijo fotona. Nekaj je porabijo za izstopno delo, ostalo pa gre v kinetično energijo elektrona (W_{kin}). Velja

$$h\nu = A_{iz} + W_{kin}. \quad (7.8)$$

Do fotoelektričnega pojava pride v kovini le, če je energija fotona vpadle svetlobe večja od izstopnega dela za to kovino ($h\nu > A_{iz}$), kar pomeni, da mora imeti svetloba dovolj veliko frekvenco oziroma dovolj majhno valovno dolžino.

7.6 Polprevodniški merilniki svetlobe

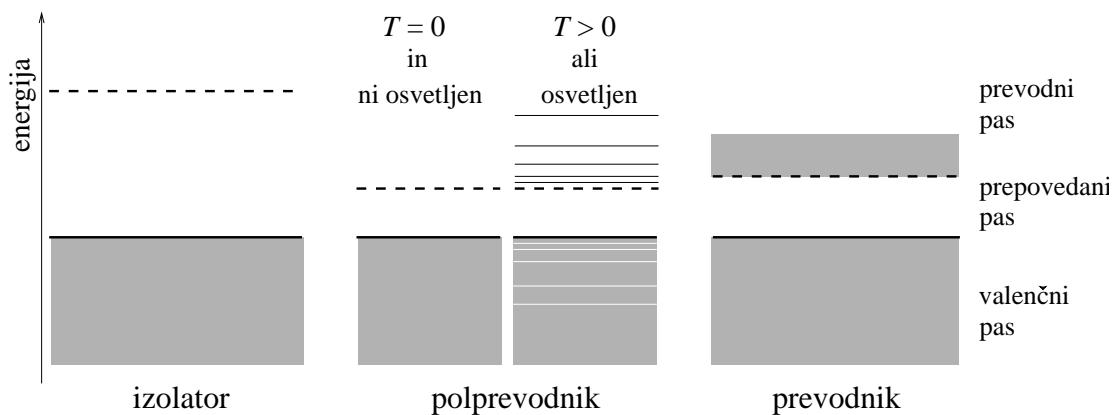
V trdni snovi so elektroni razporejeni po energijskih pasovih. V vsakem energijskem pasu je ogromno število energijskih nivojev za elektrone. Posamezni energijski pasovi so ločeni s prepovedanimi pasovi. Zadnjemu popolnoma zasedenemu energijskemu pasu pravimo valenčni pas, prvemu naslednjemu pa prevodni pas (slika 7.4). Fizikalne lastnosti snovi – nas zanima predvsem prevodnost – pa so odvisne od lege in zasedenosti energijskih pasov. Snov prevaja električni tok, če se elektroni lahko gibljejo, kar pomeni, da morajo biti na razpolago nezasedeni nivoji. Popolnoma prazen prevodni pas in energijsko širok prepovedani pas (10 eV ali več) dajeta snovi lastnosti izolatorja. Če je prepovedani pas ožji, je snov polprevodnik, v prevodnikih pa je prevodni pas delno zaseden z elektroni.

Če polprevodnik ni osvetljen, je pri nizkih temperaturah prevodni pas popolnoma prazen, valenčni pas pa popolnoma zaseden. Ker v valenčnem pasu ni na razpolago praznih mest, se elektroni ne morejo gibati tako, da bi prevajali električni tok. Če pa dobijo nekaj energije iz okolice (termično vzbujanje ali pa absorpcija fotona), lahko preidejo v prevodni pas, zato se polprevodnikom upor zmanjšuje s temperaturo in osvetljenostjo. Verjetnost, da bo posamezen foton “izbil” elektron v prevodni pas, je odvisna od širine prepovedanega pasu in energije (valovne dolžine) fotona.

Najpogosteje uporabljamo polprevodniške merilnike (fotoupore, fotodiode, fototranzistorje) iz silicija ali svena ter iz svinčevega in kadmijevega sulfata. Za njihovo napajanje potrebujemo nizko napetost (od 3 V do 30 V). Spektralna občutljivost (η) polprevodniškega merilnika svetlobe, ki ga uporabljamo pri vaji, je prikazana na sliki 7.5.

7.7 Oko

V očeh višjih živalskih vrst preslikata roženica in očesna leča predmet na mrežnico, v kateri so za svetlobo občutljive celice, fotoreceptorji. Fotoreceptorsko celico sestavljata del, ki skrbi za energijsko preskrbo celice in električni prenos signala do živca, in del, v katerem se svetloba absorbira in se svetlobni dražljaj preko kemične pretvorbe spremeni v



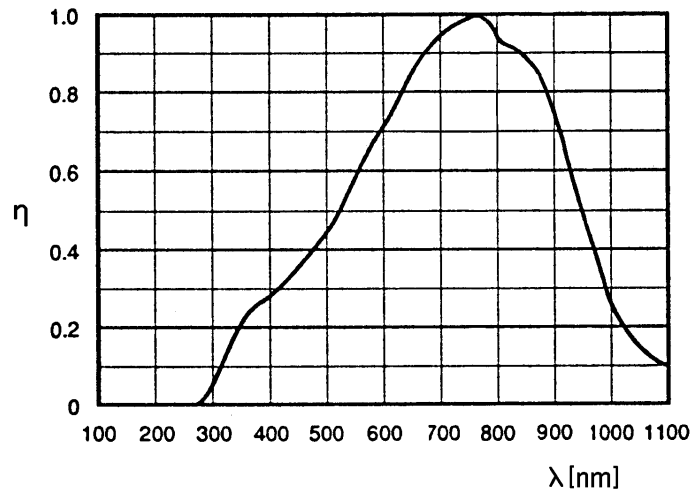
Slika 7.4: Razporeditev elektronov po energijskih pasovih. Sivo so označeni zasedeni elektronski nivoji v energijskem pasu. Meja med valenčnim ter prepovedanim pasom je označena z debelo polno črto in meja med prepovedanim ter prevodnim pasom je označena z debelo črtkasto črto. Če je temperatura polprevodnika večja od nič ali če je polprevodnik osvetljen, nekaj elektronov preide v prevodni pas (tanke črte), zato v valančnem pasu nastanejo vrzeli, ki so označene z belo črto.

električnega. Bistveni sestavni del tega dela je membrana z veliko površino. V membrani so kromoproteini (pri človeku je to rodopsin), ki se ob absorpciji fotona kemično spremenijo (rodopsin razpade na opsin in retinal), kar sproži še druge kemijske reakcije, ki povzročijo spremembo prevodnosti celične membrane. Ravnovesna porazdelitev anionov in kationov na obeh straneh membrane se poruši, kar lahko opišemo kot napetostni sunek, ki se preko sinapse prenese na očesni živec.

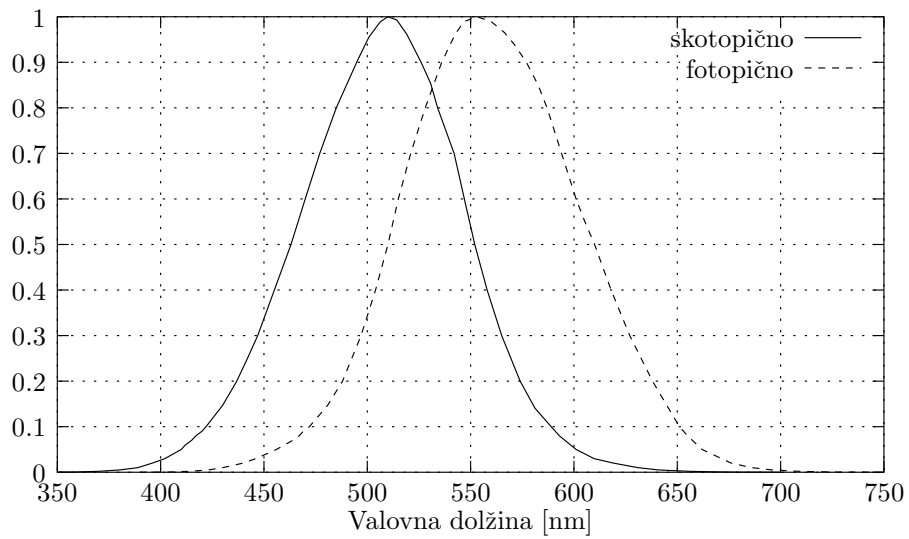
Za razcep kromoproteinske molekule je potrebna energija, ki jo prinese foton. Ker mora biti energija fotona dovolj velika, je oko občutljivo le za fotone z valovno dolžino, manjšo od približno 700 nm. Oko po drugi strani ne zazna fotonov z valovno dolžino, manjšo od 410 nm, ker se absorbirajo v očesni leči in roženici. Glede na to imenujemo območje elektromagnetnega valovanja med 410 nm in 700 nm vidna svetloba. Daljše valovne dolžine kot vidna ima infrardeča svetloba, krajše pa ultravijolična. Del ultravijolične svetlobe z valovnimi dolžinami blizu vidne svetlobe opazimo kot rumenkasto meglico zaradi fluorescence flavina v roženici. Ultravijolična svetloba poškoduje roženico, zaščitimo se lahko s filtri (dobra sončna očala ne prepuščajo valovnih dolžin pod 400 nm), delno pa že s steklom, saj prepušča le svetlobo z valovnimi dolžinami nad 320 nm.

Oku je za zmerno močno svetlobo (fotopično gledanje) najbolj občutljivo za svetlobo z valovno dolžino 560 nm. Če pa je svetloba šibka, gledamo z drugimi, za svetlobo občutljivimi celicami. Vrh občutljivosti se premakne na 510 nm (skotopično gledanje). Ustrezni spektralni občutljivosti očesa sta narisani na sliki 7.6.

Človeško oko je med najbolj občutljivimi merilniki svetlobe. Prilagodi se lahko na različne gostote svetlobnega toka. Po eni uri v temi zazna povprečno oko nanosekunden blisk z valovno dolžino 510 nm že, če je v njem vsaj petdeset fotonov. Občutljivost se od



Slika 7.5: Občutljivost polprevodniškega detektorja v odvisnosti od valovne dolžine. Občutljivost je prikazana v relativnih deležih glede na največjo občutljivost, ki je pri valovni dolžini 760 nm.



Slika 7.6: Spektralna občutljivost očesa, ki je podana v relativnih deležih glede na največjo občutljivost.

očesa do očesa razlikuje, tako da lahko sproži dražljaj v vidnem živcu v najboljšem primeru celo že pet fotonov. Časovna ločljivost očesa je približno $1/25$ s. Barve lahko ločimo le pri fotopičnemu gledanju, zato pri majhni gostoti svetlobnega toka barv ne ločimo.

- Naloge:**
1. Merjenje gostote svetlobnega toka v odvisnosti od oddaljenosti do žarnice.
 2. Določite razdaljo med zarezi mrežice, če poznate valovno dolžino svetlobe.
 3. Določite spekter svetlobnega toka, ki ga seva priloženo svetilo. Spektralna občutljivosti uporabljenega polprevodniškega detektorja je podana na sliki 7.5.

Potrebščine: optična klop
izvor svetlobe (žarnica)
detektor svetlobe (merilec svetlobnega toka)
merilo

Izvedba

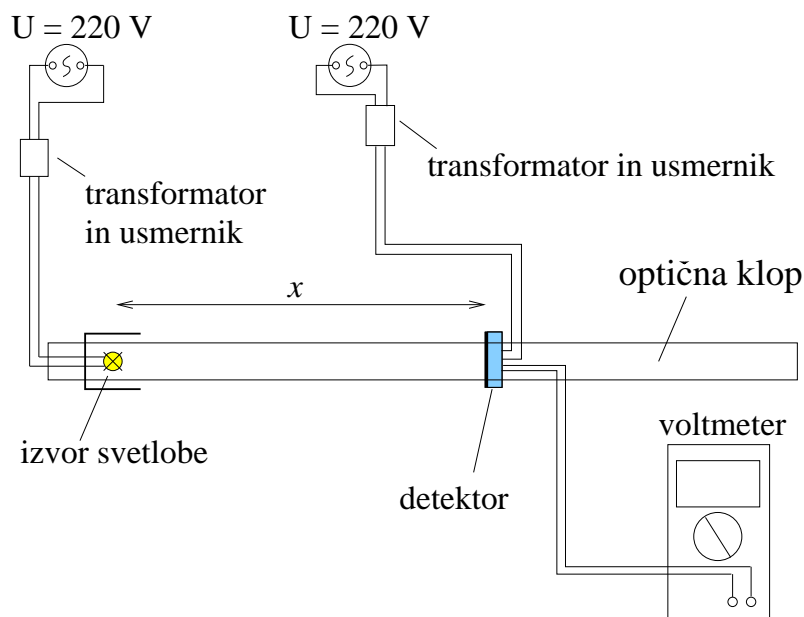
- 1) Merjenje svetlobnega toka v odvisnosti od razdalje med svetilom in detektorjem: Svetlobni izvor priključite na ustrezno napetost in ga postavite na optično klop. Ustrezno povežite tudi detektor, napajanje za detektor in voltmeter (slika 7.7). Preverite, če je napajanje detektorja vključeno.

Vse meritve naj potekajo v temi. Voltmeter naj bo nastavljen na istosmerno napetost (oznaka $\overline{\sim}$). Voltmeter ima vgrajeno lučko za odčitavanje, ki jo prižgemo z rumenim gumbom, pomagata pa si lahko tudi z baterijsko svetilko. Ne svetite z njo neposredno na detektor! Odziv polprevodniškega detektorja narašča z osvetljenostjo in temperaturo, zato izmerite napetost na detektorju, ko ni osvetljen. Dobljeno vrednost bomo vzeli kot referenčno napetost, saj privzamemo, da se temperatura med celotno meritvijo ne bo bistveno spreminjala. Pri vseh meritvah svetlobnega toka od izmerjene napetosti odštejte to referenčno napetost.

Gostoto svetlobnega toka, ki pade na detektor, spreminjajte tako, da spreminjate razdaljo med svetilom in detektorjem (x). Gostota svetlobnega toka, ki ga točkasto svetilo seva enakomerno v vse smeri, pada s kvadratom razdalje

$$j = \frac{C}{x^2} . \quad (7.9)$$

Zakaj pada ravno s kvadratom razdalje? Gostota toka je v katerikoli smeri na določeni razdalji enaka, ker svetilo seva enakomerno v vse smeri. Ker površina narašča kot



Slika 7.7: Shema vezave pri merjenju gostote svetlovnega toka v odvisnosti od razdalje med svetilom in detektorjem (x).

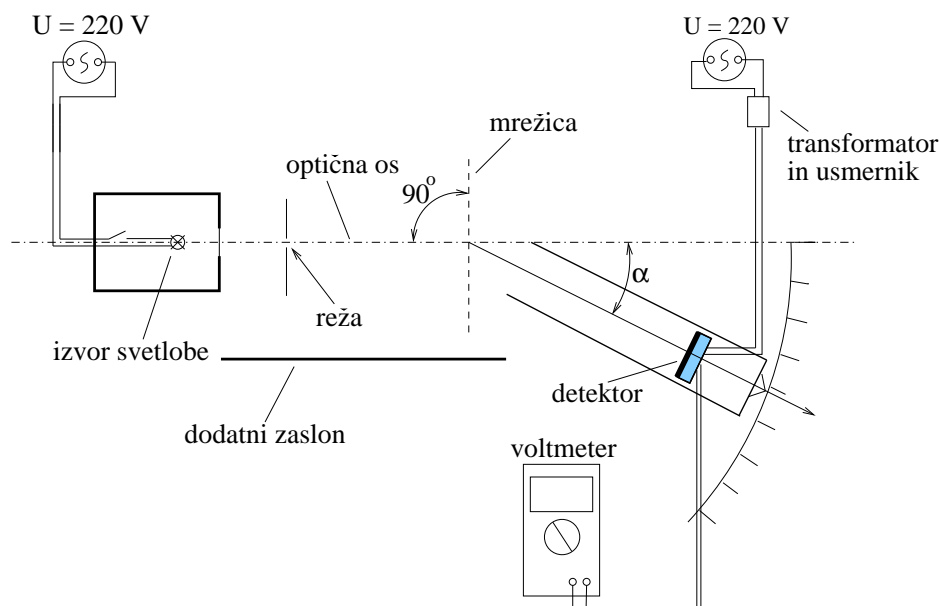
razdalja na kvadrat in ker se svetlobni tok ohranja, je njegova gostota obratno sorazmerna s kvadratom razdalje. Upoštevali smo, da je absorpcijski koeficient zraka za svetlobo tako majhen, da lahko absorpcijo v zraku zanemarimo. Pri linearnem odzivu detektorja pada s kvadratom razdalje izmerjena napetost tudi linearno.

Izmerite napetost na detektorju pri desetih oddaljenostih detektorja od svetila. Pazite, da merite na razdaljah, ki so velike v primerjavi z dimenzijami svetila. Upoštevajte, da odboji znotraj ohišja navidezno povečajo svetilo. Oddaljenosti izberite tako, da bodo točke v diagramu, ki bo prikazoval izmerjeno napetost v odvisnosti od recipročne vrednosti kvadrata razdalje, približno enakomerno porazdeljene (več točk pri manjših oddaljenostih). Narišite odvisnost napetosti U od $1/x^2$ in preverite, če leže dobljene točke na premici. Za območje, kjer ležijo izmerjene točke na premici, lahko zapišemo zvezo $j = \text{konst.} \cdot U$, ker je gostota svetlobnega toka obratnosorazmerna s kvadratom razdalje x (enačba 7.9).

- 2) Meritev razdalje med režami uklonske mrežice z merjenjem uklonskega kota laserske svetlobe z valovno dolžino 650 nm.

OPOZORILO: NIKOLI NE GLEJTE DIREKTNO V IZVOR SVETLOBE.

Najprej prestavite detektor iz optične klopi na sanke premične roke spektrometra in prižgite svetilo. Nato preverite, če je spektrometer pravilno nastavljen. To pomeni, da so izvor svetlobe, reža in uklonska mrežica na isti osi, kar preverite tako, da je mrežica osvetljena na sredini (slika 7.8). Preverite pravokotno postavitev uklonske



Slika 7.8: Shema vezave pri merjenju razdalje med režama pri uklonski mrežici in pri merjenju spektra.

mrežice: oznaka 0° mora biti na sredinski črti, gledano z vrha. Ko je vse na mestu, je sredina ničtega uklonskega maksimuma točno na mestu z oznako 0° . Ugasnite svetilo in prižgite laser. Laser imejte prižgan samo med meritvijo. Za valovno dolžino laserja vzemite 650 nm.

Sedaj ste vse pripravili za določitev smeri prvega uklonskega maksimuma. Premično roko z detektorjem premikate v smeri naraščanja kota α toliko časa, da je rdeča pika prvega uklonskega maksimuma točno na liniji, ki označuje sredino detektorja. Na skali odčitajte uklonski kot in izračunajte razdaljo med sosednjimi režami optične mrežice (enačba 7.4).

- 3) Merjenje spektra svetlobe, ki jo oddaja bela dioda: Ponovno prižgite svetilo. Enako kot pri točki 2 preverite, da je ničti uklonski maksimum res na oznaki 0° . Opazujte prvi uklonski maksimum. Kakšen je spekter svetlobe, ki ga seva svetilo? Pri katerem kotu pričakujete rdeči del spektra?

Z dodatnim zaslonom poskrbite, da na detektor pada res le svetloba, ki je prešla optično mrežico in ne tudi svetloba, ki bi do detektorja prišla neposredno od svetila – mimo mrežice. Pri vklopljenem izvoru svetlobe ponovno izmerite referenčno napetost, tako da postavite detektor v temen del med ničti in prvi uklonski maksimum. S to meritvijo boste določili ozadje za dano postavitev, to je odziv detektorja zaradi temperature in sipane svetlobe, ki ne pripada uklonskemu maksimumu. Zapišite si izmerjeno referenčno napetost (U_{oz}).

Z detektorjem izmerite svetlobni tok, ki pada na detektor v odvisnosti od kota. Meriti začnete tik pred začetkom prvega uklonskega maksimuma (zapisujte si kote α in ustrezne napetosti na izhodu detektorja (U_i)). Meritev ponavljate, s tem, da vsakokrat povečate kot α za eno stopinjo, tolikokrat, da pride detektor ponovno v temno področje. Za vsako odčitavanje z voltmetra ugasnite baterijsko svetilko!

Izmerite tudi širino detektorja (detektor je majhna črna ploščica, približno na sredini navpičnega nosilca) in razdaljo med uklonsko mrežico in detektorjem.

S poznavanjem razdalje med sosednjimi režami in kotov prvega uklonskega maksimuma izračunajte valovne dolžine pripadajoče svetlobe po enačbi 7.4. Pri določanju svetlobnega toka pri posamezni valovni dolžini upoštevamo ozadje (odštevamo referenčne napetosti) in različno občutljivost polprevodniškega detektorja za svetlobe različnih valovnih dolžin (slika 7.5). Občutljivost 0,25 pomeni, da detektor zazna le 25 % vpadne svetlobe, kot bi jo pri maksimalni občutljivosti. Električni tok preko detektorja je zato ustrezno manjši, kot bi bil, če bi zaznal vse fotone.

Za vsako izmerjeno valovno dolžino iz izmerjenih napetosti na izhodu detektorja in podane spektralne občutljivosti detektorja (slika 7.5) izračunajte napetost $(U_i - U_{oz})/\eta$, ki je sorazmerna z gostoto vpadnega toka. Narišite diagram odvisnosti gostote vpadnega toka od valovne dolžine, kjer na ordinato nanašate kar preračunane napetosti $((U_i - U_{oz})/\eta)$.

Da je gostota svetlobnega toka linearno odvisna od napetosti na izhodu detektorja, ste ugotavljali pri točki 1. V bistvu tako izmerjen spekter podaja odvisnost $\Delta j/\Delta\lambda$ od λ , a čim bolj je $\Delta\lambda$ majhna, tem bolj upravičeno lahko vrhove stolpcev povežemo z gladko krivuljo in to predstavimo kot odvisnost $dj/d\lambda$. Seveda se moramo zavedati, da lahko pri malo izmerjenih točkah zaradi tega izgubimo kakšno značilnost spektra (na primer črto pri sestavljenem spektru).

Dodatek za bolj natančne: Dejansko detektor izmeri celoten tok, ki pada nanj. Ker je končno širok, meri hkrati prispevke valovnih dolžin v ozkem pasu. Poglejmo, kakšno spremembo valovne dolžine pomeni majhna sprememba smeri uklonskega maksimuma. Po odvajanju enačbe 7.4 sledi

$$D \cos \alpha d\alpha = d\lambda, \quad (7.10)$$

kjer smo upoštevali, da gre za prvi uklonski maksimum ($n = 1$). Sedaj lahko zapišemo širino pasu valovnih dolžin ($\Delta\lambda$) v odvisnosti od širine intervala kotov α ($\Delta\alpha$): $\Delta\lambda = D \cos \alpha \Delta\alpha$. Bistvena ugotovitev je, da je širina pasu odvisna od uklonskega kota (α), zato moramo to pri natančnem risanju spektra upoštevati. Če za $\Delta\alpha$ vstavimo kar razmerje med širino detektorja in razdaljo med mrežico in detektorjem (pri majhnih kotih je tangens kota kar približno enak kotu), lahko izračunamo širino pasu ($\Delta\lambda$). Da narišemo bolj natančen spekter, že preračunane napetosti $(U_i - U_{oz})/\eta$ delimo še s širino pasu ($\Delta\lambda$) oziroma kar s $\cos \alpha$, ker so velikost detektorja, razdalja med mrežico in detektorjem ter razdalja med režami uklonske mrežice konstantne.