

DRŽAVNO NATJECANJE IZ FIZIKE 2021/2022

Srednje škole - 4. grupa

VAŽNO: Tijekom ispita ne smijete imati nikakav pisani materijal (knjige, bilježnice, formule...). Za pisanje koristite kemijsku olovku ili nalivpero. Ne smijete imati mobitele ni druge elektroničke uređaje. Dozvoljeno je korištenje kalkulatora.

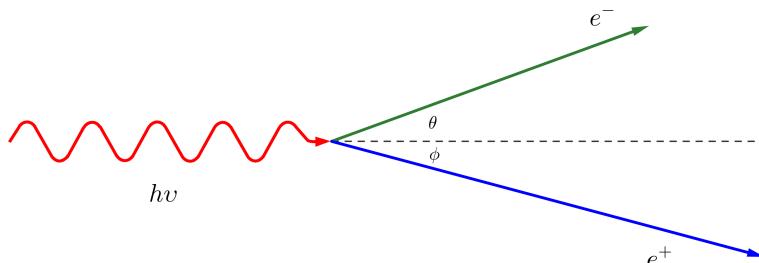
1. zadatak (16 bodova)

Elektron se može slobodno gibati unutar efektivno dvodimenzionalnog volumena oblika pravokutnika dimenzija $a = 6 \text{ nm}$ i $b = 4 \text{ nm}$. Koje su energije fotona potrebne da elektron iz najnižeg energetskog stanja prijeđe direktno u prva tri pobuđena stanja? Rezultate izrazite u meV-ima!

2. zadatak (14 bodova)

Na slici 1. prikazan je raspodjeljenje fotona na elektron-pozitron par. Pozitron i elektron imaju jednake mase, ali suprotne naboje.

- Napišite zakone očuvanja energije i impulsa za ovaj proces i pokažite da on nije moguć u vakuumu!
- Ovakvi procesi raspada fotona mogući su u blizini atomske jezgre čime i ona putem elektromagnetske interakcije dobije dio impulsa upadnog fotona. Komadić olova dimenzija $5 \text{ cm} \times 5 \text{ cm} \times 5 \text{ mm}$ izlažemo γ -zračenju valne duljine $1.24 \times 10^{-2} \text{ pm}$ intenziteta 0.1 W m^{-2} tako da je upadna površina zračenja na olovu maksimalna. Koliki je intenzitet γ -zračenja iza komadića olova ako on slijedi ovisnost $I = I_0 e^{-\mu x}$, gdje je $\mu = 1.05 \text{ cm}^{-1}$ linearni koeficijent atenuacije zračenja kroz olovu, a x put koji zračenje prođe kroz materijal? Za ovako energetično zračenje snop gubi intenzitet gotovo isključivo zbog produkcije elektron-pozitron parova u olovu, tj. drugi efekti kao fotoelektrični efekt ili Comptonov efekt su zanemarivi.
- Odredi ukupnu deponiranu energiju u tom komadiću olova ako je bio izložen zračenju 5 h. Prepostavite da su svi nastali elektroni i pozitroni ostali vezani u materijalu!



Slika 1: Raspodjeljenje fotona na elektron-pozitron par.

3. zadatak (20 bodova)

Dana je trostrana prizma kao na slici 2. Ona je usmjerena tako da su joj baze paralelne s $x-y$ ravninom, te najveća stranica plašta gleda u pozitivnom smjeru x -osi. Ishodište koordinatnog sustava je u točki O . Baza je jednakokračni trokut čija je najveća duljina dana sa $2h$, a kutevi uz tu stranicu jednaki su α . Visina prizme je v , gustoća ρ i indeks loma n , a indeks loma sredstva u kojem se prizma nalazi je 1. Jedna od dvije manje stranice plašta (ona koja je donja na prikazanoj slici) obasjana je monokromatskim zračenjem koje putuje duž pozitivnog smjera x -osi. Intenzitet zračenja dan je sa:

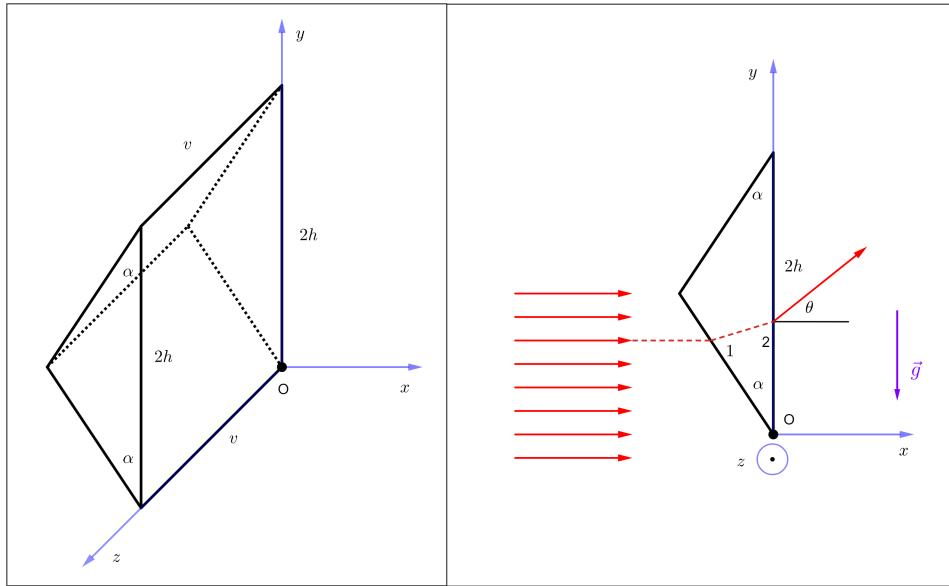
$$I(y, z) = \begin{cases} (h - y)k, & \text{kada je } -h/5 < y < h \text{ i } 0 < z < v \\ 0, & \text{inače,} \end{cases}, \quad (1)$$

gdje je k konstanta koja ima dimenzije intenziteta po duljini.

- Pronadite kut izlazne zrake θ (označen na slici) koja nastaje nakon dva uzastopna loma upadne svjetlosti na prizmi u ovisnosti o α i n !
- Prepostavite da je koeficijent transmisije na granici "1" prizme i zraka jednak η , a na granici "2" jednak 1. Odredite ukupnu silu na prizmu (zbog obasjavanja) u ovisnosti o h , v , η , α , θ i k . Zanemarite apsorpciju zračenja!
- Kolika mora biti snaga izvora koje provodi zračenje čiji intenzitet ima ovisnost iz (1), uz uvjet da

nema gibanja prizme u y smjeru, ako se ona nalazi u gravitacijskom polju Zemlje? Uzmite da je $\alpha = 20^\circ$, $\rho = 2.5 \text{ gcm}^{-3}$, $v = 80 \mu\text{m}$, $h = 30 \mu\text{m}$ i $\eta = 0$ (nema transmisije). Najveća stranica plašta prizme (ona koja leži u $y - z$ ravnini) položena je na optički proziran "zid" po kojemu može kliziti bez trenja i koji sprječava gibanje u x smjeru i bilo kakve rotacije prizme.

d) Obrazložite kakva je stabilnost uvjeta ravnoteže na male pomake prizme! Kakva bi bila stabilnost uvjeta ravnoteže na male pomake da nema zračenja u području od $-h/5 < y < 0$?



Slika 2: Trostrana prizma obasjana monokromatskim zračenjem u gravitacijskom polju duž $-y$ smjera.

4. zadatak (20 bodova)

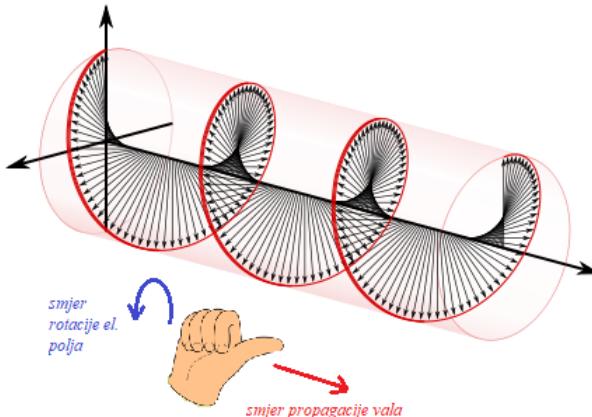
Električno polje kružno polariziranog vala koji se prostire u $+z$ smjeru je:

$$\vec{E}_\pm = E [\cos(\omega t - kz) \hat{x} \pm \sin(\omega t - kz) \hat{y}], \quad (2)$$

gdje za \vec{E}_- kažemo da polarizacija slijedi pravilo desne ruke (ako je palac desne ruke smjer propagacije vala, onda se električno polje zakreće u smjeru ostalih prstiju, kao što je prikazano na slici 3.). Analogno, \vec{E}_+ je električno polje lijevo kružno polariziranog vala. Lijevo i desno kružno polarizirani val imaju različite fazne brzine prilikom prolaska kroz plazmu (ioniziranu tvar koja sadrži slobodne elektrone) kada je prisutno dodatno statičko magnetsko polje u smjeru propagacije elektromagnetskog vala. Indeksi refrakcije lijevog/desnog kružno polariziranog vala kroz plazmu tada su:

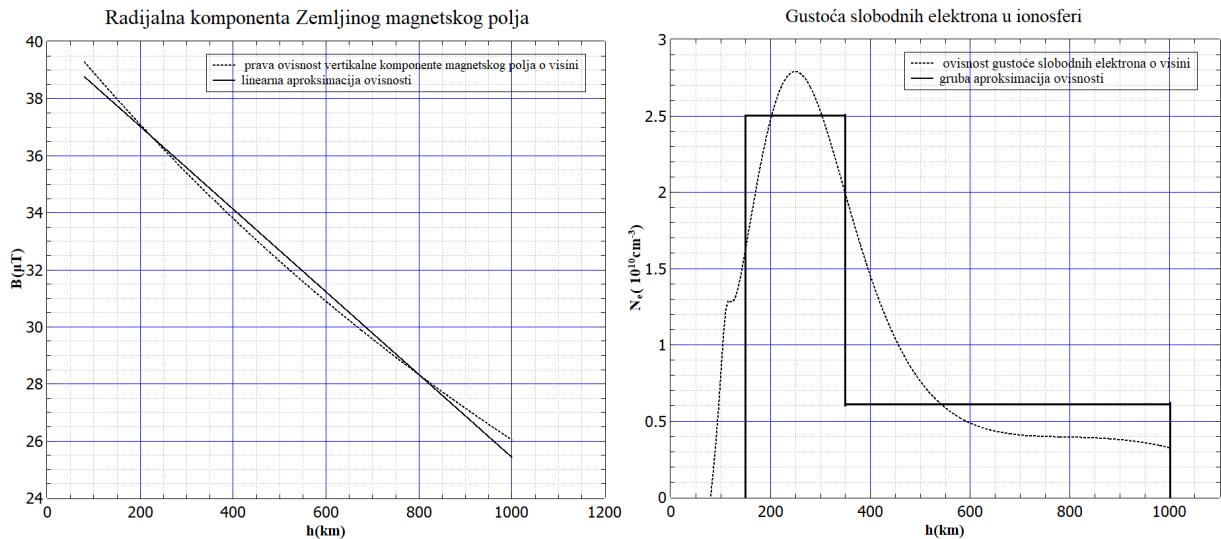
$$n_\pm^2 = 1 - \frac{\omega_p^2}{\omega(\omega \pm \omega_c)}, \quad \omega_p^2 = \frac{4\pi Ne^2}{m}, \quad \omega_c = \frac{eB}{mc}, \quad (3)$$

gdje je N gustoća slobodnih elektrona u plazmi, e naboj elektrona, m masa elektrona i B statičko magnetsko polje. Frekvencije ω_p i ω_c redom opisuju "prirodnu" frekvenciju titranja slobodnih elektrona u plazmi, te ciklotronsku frekvenciju.



Slika 3: Električno polje desno kružno polariziranog vala.

- a) Odredi faznu razliku lijevo i desno kružno polariziranog vala frekvencija ω nakon propagacije za Δz kroz plazmu koja sadrži uniformnu gustoću slobodnih elektrona, u uniformnom magnetskom polju koje je paralelno sa smjerom propagacije valova. Rezultat izrazite kao funkciju ω , ω_p , ω_c i Δz . Vrijedi da je $\omega \gg \omega_c, \omega_p$. Možete koristiti $(1+x)^{-1} \approx 1 - x$ za $x \ll 1$ i $n_+ + n_- \approx 2$.
- b) Prolaskom linearne polarizirane zračenja kroz isti segment plazme duljine Δz u istom statičkom magnetskom polju dolazi do zakreta kuta polarizacije zračenja (taj efekt naziva se Faradayeva rotacija). Odredi kut zakreta polarizacije u ovisnosti o ω , N , B i Δz .
- c) Izračunavanjem Faradayeve rotacije (na temelju promatrana polariziranog zračenja dalekih izvora, npr. pulsara) mogu se dobiti neka saznanja o gustoći slobodnih elektrona i magnetskim poljima u međuzvezdanom prostoru. Efekt Faradayeve rotacije događa se i pri prolasku polariziranog zračenja kroz Zemljinu ionosferu. U grafovima na slici 3. iscrtkanom linijom su zabilježene izračunate vrijednosti radijalne komponente magnetskog polja Zemlje i izmjerene vrijednosti gustoće slobodnih elektrona u ionosferi. Odredite kut zakreta linearne polarizirane zračenja frekvencije $f = 20$ MHz zbog prolaska kroz ionosferu koristeći podatke označene punom linijom (koje su gruba aproksimacija). Prepostavite da je smjer propagacije zračenja okomit na Zemlju.



Slika 4: Izračunati/izmjereni podaci magnetskog polja Zemlje i gustoće slobodnih elektrona u ovisnosti o nadmorskoj visini - iscrtkana linija, i aproksimirane ovisnosti - puna linija.

Vrijednosti potrebnih fizikalnih konstanti:

brzina svjetlosti - $c = 3 \times 10^8 \text{ ms}^{-1}$

gravitacijsko ubrzanje Zemlje - $g = 9.81 \text{ ms}^{-2}$

masa elektrona - $m = 9.109 \times 10^{-31} \text{ kg}$

naboj elektrona - $e = 1.602 \times 10^{-19} \text{ C}$

Planckova konstanta - $h = 6.626 \times 10^{-34} \text{ m}^2 \text{kg} \text{s}^{-1}$

Državno natjecanje iz fizike

26. do 29. travnja 2022., Podgora

EKSPEKMENTALNI ZADATAK

4. skupina

Pribor: svjetleće diode (po dvije crvene, žute, zelene, plave i bijele), spojne žice, dvije velike spajalice, potenciometar (trimer) $1\text{k}\Omega$, odvijač, otpornici (330Ω), multimetri, baterija 9V, mjerna traka na letvici, mjerna traka, optička rešetka (500 pukotina po mm), pločica za LED, gumeni tamni cjevčica, arak papira sa obojanim pravokutnicima, milimetarski papir, gumice.

Upute:

Pri izvođenju eksperimentalnog zadatka kao indikatori se koriste posebne vrste izvora svjetlosti – LED diode. Tijekom prolaza električne struje poluvodičkom diodom u dodirnom NP – sloju stalno se rekombiniraju slobodni elektroni i šupljine. Pritom se u nekim poluvodičima, pri rekombinaciji, oslobođena energija pretvara u svjetlost. Takve se diode nazivaju svjetleće diode. LED (Light Emitting Diode) rade na načelu unutarnjeg fotoelektričnog učinka. Na frekvenciju zračenih elektromagnetskih valova, odnosno na boju emitirane svjetlosti, može se utjecati odabirom odgovarajućeg poluvodičkog materijala te odabirom i koncentracijom točno određenih primjesa.



Kristal poluvodiča sastoji se od velikog broja pravilno razmještenih atoma čiji se energijski nivoi cijepaju u niz bliskih susjednih stanja koja se zovu vrpcama. One su odijeljene energijskim procjepom. U slučaju unutarnjeg fotoelektričnog učinka, kod poluvodiča, valentni elektroni koji apsorbiraju foton prelaze u vodljivu vrpcu. Ako je energija apsorbiranih fotona veća od energije energijskog procjepa, elektroni na račun dobivene energije mogu prijeći iz valentne vrpce u vodljivu vrpcu i postati pokretni i mogu biti nositelji električne struje u kristalu.

Svaki materijal ima različitu širinu energijskog procjepa i zato emitira svjetlost različitih valnih duljina. Za LED crvene boje to svojstvo ima (GaAsP), LED plave boje (GaN) i LED zelene boje (GaP).

Ako kroz svjetleću diodu prolazi prevelika struja, dolazi do oštećenja. Struju treba ograničiti pomoću otpornika! Svjetleća dioda ima pozitivan i negativan pol. Na kućištu je negativan pol označen, tako da je kućište sa strane gdje je negativan pol lagano zaravnato. Dioda vodi kada joj je anoda spojena na pozitivni pol izvora, a katoda na negativni pol izvora. Ako se dioda spoji u suprotnom smjeru, neće svijetliti.

Napomena: ne skraćujte ili savijajte izvode na svjetlećim diodama!

Zadaci:

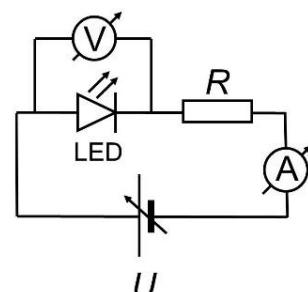
1. dio:

- a) Odredite strujno-naponske karakteristike svjetlećih dioda.

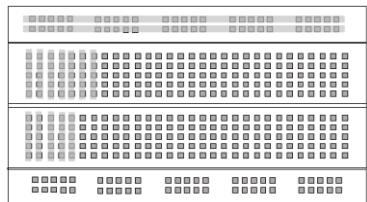
Za crvenu, žutu, zelenu, plavu i bijelu svjetleću diodu nacrtajte, na milimetarskom papiru (prilog 1), strujno naponske karakteristike, na istom grafu.

Osnovni se strujni krug sastavlja prema shemi:

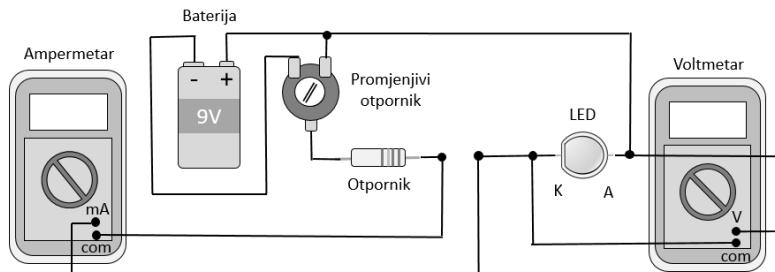
Umjesto laboratorijskog izvora napona kao izvor napona koristite bateriju od 9V. Kako bi za vrijeme mjeranja mogli mijenjati napone dodaje se promjenjivi otpornik (trimer od $1\text{k}\Omega$). Zakretanjem okretnog dijela s utorom na sredini trimera, mijenja se vrijednost napona na diodi. Koristite priloženi odvijač za zakretanje. Potrebno je dodati i otpornik od 330Ω u seriju.



Strujni se krug sastavlja na eksperimentalnoj pločici. Ova se pločica sastoji od plastičnog kućišta na čijoj se gornjoj strani nalazi mnoštvo rupica namijenjenih umetanju nožica različitih komponenti. Rupice su u unutrašnjosti pločice međusobno povezane prema određenom pravilu. Na slici su označene međusobno povezane rupe. One predstavljaju mjesta jednakog potencijala. Na slici je označen dio međusobno spojenih rupa.



Primjer spajanja vašeg eksperimentalnog postava prikazan je na slici. Svjetleća dioda, promjenjivi otpornik i otpornik trebaju biti postavljeni na eksperimentalnu pločicu.



Prije mjerena, na multimetru kojim se mjeri napon, odaberite odgovarajuće mjerno područje na zakretnom dijelu (DCV, 20.). Na multimetru kojim mjerite struju odaberite mjerno područje DCA .200mA. Spojne žice se spajaju na COM ulaz multimetra (-) i VΩmA ulaz (+).

Mjerite parove vrijednosti napona i struje. Očitajte barem 10 parova napona i struje počevši od trenutka kad je LED tek zasvjetlila. Mjerena provodite isključivo u propusnom smjeru diode! Struja ne smije premašiti 20 mA!!!

Mjerenja i rezultate prikažite tablično i grafički!

- b)** Usporedite dobivene grafove. O kakvima se karakteristikama radi?
- c)** LED pri određenom istosmjernom naponu počinje emitirati svjetlost. Izmjerite napon na svakoj pojedinoj diodi upravo kada počne svijetliti (napon praga U_0). Iz dobivenih mjerena za svaku svjetleću diodu odredite energiju koja se pri rekombinaciji pretvorila u svjetlost. Energije izrazite u eV! Obrazložite postupke svojih izračuna! Navedite primijenjene izraze i imenujte sve veličine.
- d)** Povucite pravac duž linearног dijela strujno naponske karakteristike. Očitajte vrijednost napona na naponskoj osi kroz koji pravac prolazi (U_0'). Ponovite postupak za svaku svjetleću diodu i očitajte pripadne napone. Ove se vrijednosti razlikuju od vaših prethodnih očitovanja. Obrazložite.
- e)** Diskutirajte napon praga bijele LED u odnosu na ostale svjetleće diode.

Konstante: brzina svjetlosti u vakuumu $c=3 \cdot 10^8 \text{ ms}^{-1}$, Planckova konstanta $h=6,626 \cdot 10^{-34} \text{ Js}$.

2. dio:

Da bi odredili valnu duljinu emitirane svjetlosti upotrijebit ćete optičku rešetku koja ima 500 pukotina po jednom milimetru. Na slici je shematski prikaz pokusa u kojem treba odrediti valnu duljinu izvora svjetlosti.



Optičku rešetku (u plastičnom okviru) postavite u veliku spajalicu za papir. Eksperimentalnu pločicu koju ste koristili u prvom dijelu vježbe okrenite okomito. Neka je LED postavljena u gornjem dijelu pločice (na skici nije prikazan električni sklop iz prethodog dijela zadatka, potreban za napajanje diode!). Pričvrstite letvicu s mjernom trakom pomoću gumica, neposredno iznad LED kako je prikazano na slici.

Uključite LED i promotrite njezinu svjetlost kroz optičku rešetku, tako da vam je oko vrlo blizu rešetke. Promotrite dobiveni spektar. Udaljenosti namjestite tako da dobro vidite spektar prvog reda.

- Usporedite i opišite dobivene spekture pojedinih svjetlećih dioda, uključujući i svjetleću diodu koja emitira bijelu svjetlost.
- Odredite valne duljine crvene, žute, zelene i plave svjetleće diode. Za svaku diodu izvršite seriju od 5 mjerena i procijenite točnost mjerena. Što je sve uvjetovalo točnost vaših mjerena? Rezultate prikažite tablično! Na skici označite mjerene veličine. Navedite sve izraze koje ste koristili za izračune!
- Iz dobivenih mjerena (koristite srednje vrijednosti dobivenih rezultata u b) dijelu) odredite energije emitiranih fotona. Energije izrazite u eV!
- Usporedite dobivene energije s energijama dobivenima u 1. dijelu zadatka. Obrazložite rješenja.

3. dio:

Namjena je svjetlećih dioda, u pravilu, emitiranje svjetlosti. Međutim, ako na svjetleću diodu spojite voltmetar, i pri dnevnoj svjetlosti, očitat ćete vrijednosti i od nekoliko mV, nekoliko desetaka mV i više. Vaš je zadatak istražiti ovisnost napona koji očitavate na svjetlećoj diodi o valnoj duljini svjetlosti koja na nju upada.

Sastavite eksperimentalni postav prikazan na slici.

LED 1 (predajnik) postavljena je na eksperimentalnoj pločici kao i u prvom i drugom dijelu zadatka. Spojite diodu na bateriju. Na pločici na kojoj se nalazi konektor s dva utora postavite LED 2 (prijemnik) i zatim diodu spojite na voltmetar (mjerno područje 200 mV).

Postavite prvo crvenu LED i osvjetljavajte redom svjetlošću crvene LED, zatim žute, zelene i plave LED.

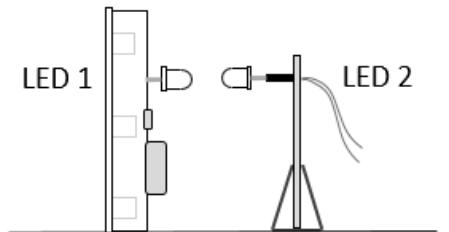
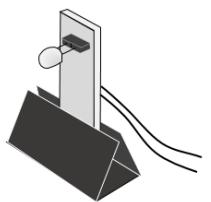
Nakon toga osvjetljavajte žutu LED redom svjetlošću crvene, žute, zelene i plave LED. Na isti način nastavite s osvjetljavanjem zelene i plave LED i očitavajte pripadne napone na LED 1.

LED 1 i 2 treba postaviti jednu naspram druge, vrlo blizu. Namještajte tako dugo dok nije očitan najveći napon na voltmetru. Ukoliko okolno osvjetljenje smeta, možete svjetleće diode postaviti na krajeve priložene gumene crne cjevčice. Cjevčicu možete skratiti kako bi dobili željenu duljinu.

- Sastavite tablicu u kojoj ćete prikazati izmjerene napone u ovisnosti o valnoj duljini primijenjene svjetlosti.
- Što možete zaključiti na osnovu dobivenih podataka?
- Obrazložite moguća odstupanja u svojim mjerenjima.
- Je li moguće koristiti svjetleće diode kao naponske ćelije? Obrazložite. Kako biste odredili maksimalnu snagu ovakve naponske ćelije?
- U 1. i 2. dijelu zadatka objašnjavali ste spekture bijele LED i ostalih svjetlećih dioda. Također ste razmatrali napone praga za bijelu i ostale svjetleće diode. Jeste li uspjeli povezati napon praga bijele i ostalih dioda? Usporedite strujno naponske karakteristike bijele i plave LED. Uzmite svaku od dobivenih svjetlećih dioda i pokušajte vidjeti poluvodički element (PN spoj) u unutrašnjosti svake diode. Usporedite pogled u unutrašnjost kućišta, npr. plave i bijele LED. Što opažate?

Zadatak je da pomoću jedne od svjetlećih dioda (crvene, zelene ili plave) i jednog od obojanih pravokutnika (prilog 2) dobijete bijelu svjetlost. U prilogu 2 otisnut je niz pravokutnika obojanih običnim bojama (tinta pisača) i niz pravokutnika obojanih fluorescentnim flomasterima. Obrazložite rezultat izvedenog pokusa.

Na osnovu svega prethodnog, pokušajte pojednostavljeni objasniti načelo rada vaše bijele LED.



DRŽAVNO NATJECANJE IZ FIZIKE 2021/2022

Srednje škole - 4. grupa

Rješenja i upute za bodovanje

VAŽNO: Ovdje je prikazan jedan način rješavanja zadatka. Ako učenici riješe zadatak drugačijim, a fizikalno ispravnim načinom, treba im dati puni broj bodova predviđen za taj zadatak. Ako učenici ne napišu posebno svaki ovdje predviđeni korak, a vidljivo je da su ga napravili, treba im dati bodove kao da su ga napisali.

1. zadatak (16 bodova)

Smjer dulje stranice pravokutnika možemo prozvati \hat{x} smjerom, a smjer kraće duljine \hat{y} smjerom. Zamislimo li prvo situaciju u kojoj se elektron može kretati samo u jednoj dimenziji duljine L znamo da je njegov impuls kvantiziran restrikcijom da je njegova De Brogljeva valna duljina jednaka $\lambda = 2L/n$, tj. impuls može poprimati vrijednosti:

$$p_n = \frac{h}{\lambda} = \frac{nh}{2L}, \quad n \in \mathbb{N}. \quad [3 \text{ boda}] \quad (1)$$

Generalizacijom na dvije dimenzije slijedi da su obje komponente impulsa kvantizirane, što znači da je i ukupni impuls kvantiziran i jednak:

$$p_{n_1, n_2} = \sqrt{p_x^2 + p_y^2} = \sqrt{\left(\frac{n_1 h}{2a}\right)^2 + \left(\frac{n_2 h}{2b}\right)^2}, \quad n_1, n_2 \in \mathbb{N}. \quad [3 \text{ boda}] \quad (2)$$

Energija je onda jednostavno:

$$E_{n_1, n_2} = \frac{p^2}{2m} = \frac{h^2}{8m} \left(\frac{n_1^2}{a^2} + \frac{n_2^2}{b^2} \right). \quad [2 \text{ boda}] \quad (3)$$

S obzirom da je $a = 1.5b$ prva tri pobuđena stanja su dana sa $(n_1, n_2) = \{(2, 1), (1, 2), (3, 1)\}$, a osnovno sa $(n_1, n_2) = (1, 1)$. **[2 boda]**

Potrebne energije fotona su tada:

$$E_1 = E_{2,1} - E_{1,1} = \frac{h^2}{8m} \cdot \frac{3}{a^2} = 31 \text{ meV}, \quad [2 \text{ boda}] \quad (4)$$

$$E_2 = E_{1,2} - E_{1,1} = \frac{h^2}{8m} \cdot \frac{3}{b^2} = 71 \text{ meV}, \quad [2 \text{ boda}] \quad (5)$$

$$E_3 = E_{3,1} - E_{1,1} = \frac{h^2}{8m} \cdot \frac{8}{a^2} = 84 \text{ meV}. \quad [2 \text{ boda}] \quad (6)$$

2. zadatak (14 bodova)

a.) Za impulse i ukupne energije pozitrona i elektrona vrijeti:

$$p_{\pm} = m\gamma_{\pm}v_{\pm} \rightarrow E_{\pm} = \sqrt{m^2c^4 + p_{\pm}^2c^2} = mc^2\gamma_{\pm}, \quad \gamma_{\pm} = \left(1 - \frac{v_{\pm}^2}{c^2}\right)^{-\frac{1}{2}}, \quad [2 \text{ boda}] \quad (7)$$

pa zbog zakona očuvanja energije i impulsa (po komponentama) vrijeti:

$$E_f = mc^2(\gamma_+ + \gamma_-), \quad [1 \text{ bod}] \quad (8)$$

$$p_f = \frac{E_f}{c} = m(v_+\gamma_+\cos\phi + v_-\gamma_-\cos\theta), \quad 0 = m(v_+\gamma_+\sin\phi - v_-\gamma_-\sin\theta), \quad [1 \text{ bod}] \quad (9)$$

gdje su E_f i p_f energija i impuls fotona. Uvrštavanjem (8) u prvi izraz iz (9) slijedi:

$$mc^2(\gamma_+ + \gamma_-) = mc(v_+\gamma_+ \cos\phi + v_-\gamma_- \cos\theta). \quad [1 \text{ bod}] \quad (10)$$

Očito je da gornja jednakost ne može biti zadovoljena zbog $v_\pm < c$ i $\cos\theta, \cos\phi < 1$, pa zaključujemo da se proces ne može ostvariti u vakuumu. **[2 boda]**

b.) Intenzitet zračenja nakon prolaska kroz olovu debljine 5 mm je jednostavno:

$$I = I_0 \exp(-\mu x) = 0.1 \text{ Wm}^{-2} \cdot \exp(-1.05 \text{ cm}^{-1} \cdot 0.5 \text{ cm}) = 0.059 \text{ Wm}^{-2}. \quad [3 \text{ boda}] \quad (11)$$

c.) Energija deponirana u olovu je jednaka umnošku površine olovnog komada, razlike početnog i krajnjeg intenziteta, te vremenu izloženosti zračenju:

$$E = (I_0 - I) \cdot S \cdot t = (0.1 - 0.059) \text{ Wm}^{-2} \cdot (0.05 \text{ m})^2 \cdot 18000 \text{ s} = 1.84 \text{ J}. \quad [4 \text{ boda}] \quad (12)$$

3. zadatak (20 bodova)

a.) Iz priložene slike vidimo da mora vrijediti:

$$n \sin \beta = \sin \alpha, \quad [1 \text{ bod}] \quad (13)$$

$$n \sin(\alpha - \beta) = \sin \theta. \quad [1 \text{ bod}] \quad (14)$$

Raspisivanjem lijeve strane u (14) dolazimo do:

$$n \sin \alpha \cos \beta - n \sin \beta \cos \alpha = \sin \theta. \quad (15)$$

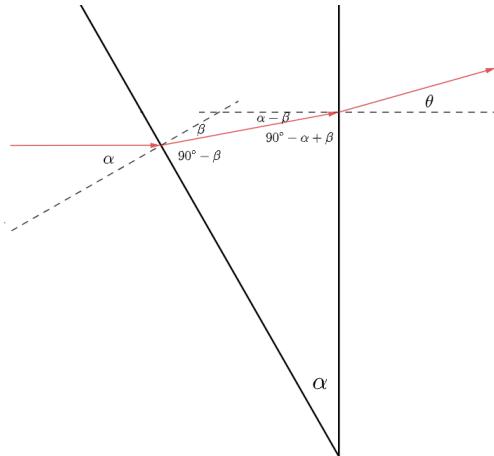
Koristeći (13) i $\cos \beta = (1 - \sin^2 \beta)^{-1/2}$ slijedi:

$$\sin \theta = \sin \alpha \left(\sqrt{n^2 - \sin^2 \alpha} - \cos \alpha \right), \quad (16)$$

tj. za θ vrijedi:

$$\theta = \arcsin \left[\sin \alpha \left(\sqrt{n^2 - \sin^2 \alpha} - \cos \alpha \right) \right]. \quad (17)$$

[2 boda]



Slika 1: Skica koja prikazuje dva uzastopna loma upadne zrake na prizmi.

b.) Možemo promotriti sliku 2. Impuls fotona (iznos) u reflektiranoj i lomljenoj zraci jednak je početnom (koji iznosi E/c gdje je E energija fotona), pa slijedi da je:

$$\Delta \vec{p}_r = \frac{E}{c} [(-1 - \cos 2\alpha) \hat{x} - \sin 2\alpha \hat{y}], \quad \Delta \vec{p}_l = \frac{E}{c} [(\cos \theta - 1) \hat{x} + \sin \theta \hat{y}]. \quad [2 \text{ boda}] \quad (18)$$

Sila na prizmu je jednostavno dana ukupnom promjenom impulsa u vremenu. Promjena impulsa prizme suprotna je promjeni impulsa fotona, pa vrijedi:

$$\vec{F} = \frac{N(\Delta t) \Delta \vec{p}_{\text{prizma}}}{\Delta t} = \frac{N(\Delta t) E}{c \Delta t} \{ [(1 - \eta)(1 + \cos 2\alpha) + \eta(1 - \cos \theta)] \hat{x} + [(1 - \eta) \sin 2\alpha - \eta \sin \theta] \hat{y} \}, \quad (19)$$

gdje je $N(\Delta t)$ broj fotona koji udari prizmu u vremenu Δt . **[1 bod]**

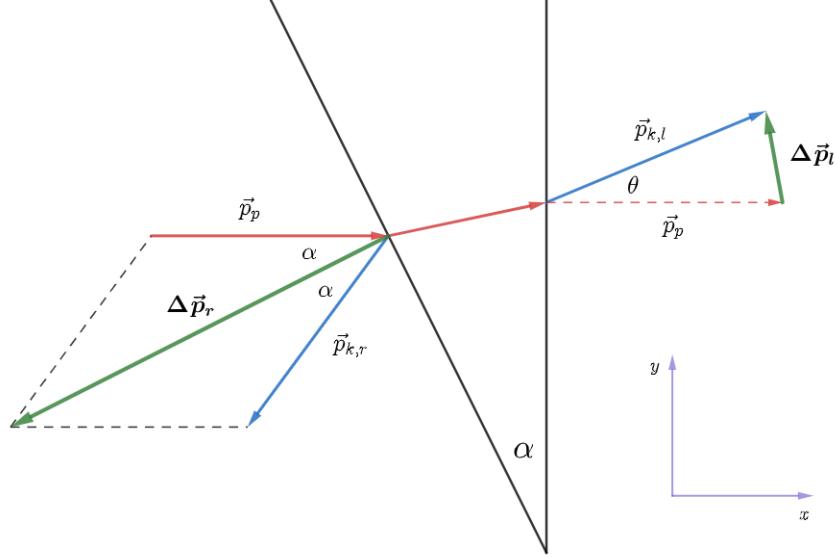
Također vrijedi da je ukupna snaga zračenja koje upada na prizmu jednaka:

$$P = \frac{N(\Delta t) E}{\Delta t} = \bar{I} S = \frac{k h^2 v}{2}, \quad [3 \text{ boda}] \quad (20)$$

gdje je \bar{I} srednji intenzitet zračenja na prizmu.

Iz ovoga možemo dobiti omjer $N(\Delta t)/\Delta t$ koji možemo ubaciti u (7). Sređivanjem konačno slijedi izraz za silu:

$$\vec{F} = \frac{kh^2v}{2c} \{ [1 + (1 - \eta) \cos 2\alpha - \eta \cos \theta] \hat{x} + [(1 - \eta) \sin 2\alpha - \eta \sin \theta] \hat{y} \}. \quad [\mathbf{1 \, bod}] \quad (21)$$



Slika 2: Promjena impulsa jednog fotona usred refleksije na prvoj ravnini ($\Delta\vec{p}_r$) i promjena impulsa jednog fotona nakon dva uzastopna loma ($\Delta\vec{p}_l$).

c.) Izjednačavanjem iznosa y -komponente sile na prizmu zbog obasjavanja sa gravitacijskom silom dolazimo do:

$$\frac{kh^2v}{2c} [(1 - \eta) \sin 2\alpha - \eta \sin \theta] = \rho V g, \quad [\mathbf{1 \, bod}] \quad (22)$$

a s obzirom da je volumen prizme $V = h^2v \tan \alpha$ slijedi (uz $\eta = 0$):

$$k = \frac{\rho g c}{\cos^2 \alpha}. \quad [\mathbf{2 \, boda}] \quad (23)$$

Snaga izvora jednaka je:

$$P = \bar{I}_{-h/5,h} \cdot \frac{6hv}{5} = k \cdot \frac{3h}{5} \cdot \frac{6hv}{5} = \frac{18kh^2v}{25}, \quad [\mathbf{2 \, boda}] \quad (24)$$

gdje je $\bar{I}_{-h/5,h}$ srednji intenzitet za cijelo površinu za koju je intenzitet različit od nule. Uvrštavanjem (23) u (24) se dobije konačan izraz za P :

$$P = \frac{18h^2v\rho c}{25 \cos^2 \alpha} = 0.43 \text{ W}. \quad [\mathbf{1 \, bod}] \quad (25)$$

d.) Malim pomakom prizme u $+\hat{y}$ smjeru smanji se sila uzrokovana obasjavanjem, pa je ukupna sila na prizmu u $-\hat{y}$ smjeru. Malim pomakom prizme u $-\hat{y}$ smjeru ukupna sila je u $+\hat{y}$ smjeru jer intenzitet zračenja monotono raste u $-\hat{y}$ smjeru sve do $y = -h/5$. Dakle, uvjet ravnoteže je stabilan na male pomake. **[2 boda]**

Kada ne bi bilo zračenja u intervalu $-h/5 < y < 0$ onda bi malim pomakom prizme u $-\hat{y}$ smjeru ukupna sila bila u $-\hat{y}$ smjeru, tj. ravnoteža bi se bespovratno narušila. **[1 bod]**

4. zadatak (20 bodova)

a.) Fazna razlika se javlja zbog različitog indeksa refrakcije dvaju valova kroz plazmu, i dana je sa:

$$\Delta\phi = (k_+ - k_-) \Delta z = \frac{\omega \Delta z}{c} (n_+ - n_-). \quad [\mathbf{1 \, bod}] \quad (26)$$

Iz zadatka možemo vidjeti da je:

$$n_+^2 - n_-^2 = (n_+ + n_-)(n_+ - n_-) = \frac{\omega_p^2}{\omega} \left(\frac{1}{\omega - \omega_c} - \frac{1}{\omega + \omega_c} \right). \quad [1 \text{ bod}] \quad (27)$$

Također koristeći $(1+x)^{-1} \approx 1-x$ za $x \ll 1$ slijedi:

$$\frac{1}{\omega \pm \omega_c} = \frac{1}{\omega} \frac{1}{1 \pm \frac{\omega_c}{\omega}} \approx \frac{1}{\omega} \left(1 \mp \frac{\omega_c}{\omega} \right), \quad [1 \text{ bod}] \quad (28)$$

pa zajedno sa $n_+ + n_- \approx 2$ slijedi:

$$n_+ - n_- = \frac{\omega_p^2}{2\omega} \cdot \frac{1}{\omega} \left(1 + \frac{\omega_c}{\omega} - 1 + \frac{\omega_c}{\omega} \right) = \frac{\omega_p^2 \omega_c}{\omega^3}, \quad [2 \text{ boda}] \quad (29)$$

iz čega onda napokon dobivamo izraz za faznu razliku:

$$\Delta\phi = \frac{\omega_p^2 \omega_c \Delta z}{\omega^2 c} \quad [1 \text{ bod}] \quad (30)$$

b.) Električno polje linearne polariziranog vala je dano sa $\vec{E} = A \cos(\omega t - kz) \hat{n}$, gdje je \hat{n} smjer polarizacije. Radi jednostavnosti možemo definirati koordinatni sustav tako da je $\hat{n} = \hat{x}$. Tada možemo linearne polarizirane val rastaviti na lijevo i desno polarizirani kružni val, tj.:

$$A \cos(\omega t - kz) \hat{x} = \frac{A}{2} [\cos(\omega t - kz) \hat{x} + \sin(\omega t - kz) \hat{y}] + \frac{A}{2} [\cos(\omega t - kz) \hat{x} - \sin(\omega t - kz) \hat{y}]. \quad [3 \text{ boda}] \quad (31)$$

Iz a.) dijela zadatka znamo da prolaskom kroz plazmu u magnetskom polju ova dva vala imaju razliku faza danu sa (30), pa je nakon prolaska kroz plazmu jednadžba za \vec{E} dana sa:

$$\vec{E} = \frac{A}{2} \{ [\cos(\omega t - kz + \Delta\phi) \hat{x} + \sin(\omega t - kz + \Delta\phi) \hat{y}] + [\cos(\omega t - kz) \hat{x} - \sin(\omega t - kz) \hat{y}] \}. \quad [3 \text{ boda}] \quad (32)$$

Korištenjem identiteta $\cos x + \cos y = 2 \cos \frac{x+y}{2} \cos \frac{x-y}{2}$ i $\sin x - \sin y = 2 \cos \frac{x+y}{2} \sin \frac{x-y}{2}$ dobivamo:

$$\vec{E} = \frac{A}{2} \left[2 \cos \left(\omega t - kz + \frac{\Delta\phi}{2} \right) \cos \left(\frac{\Delta\phi}{2} \right) \hat{x} + 2 \cos \left(\omega t - kz + \frac{\Delta\phi}{2} \right) \sin \left(\frac{\Delta\phi}{2} \right) \hat{y} \right]. \quad [2 \text{ boda}] \quad (33)$$

Jednadžba (33) se može preuređiti u oblik:

$$\vec{E} = A \cos \left(\omega t - kz + \frac{\Delta\phi}{2} \right) \left[\cos \left(\frac{\Delta\phi}{2} \right) \hat{x} + \sin \left(\frac{\Delta\phi}{2} \right) \hat{y} \right], \quad (34)$$

iz kojeg se jasno vidi da je prolaskom kroz plazmu zračenje i dalje linearne polarizirano, ali je kut polarizacije zakrenut za $\frac{\Delta\phi}{2}$ u odnosu na početno zračenje, tj. za kut zakreta $\Theta = \frac{\Delta\phi}{2}$ vrijedi:

$$\Theta = \frac{\omega_p^2 \omega_c \Delta z}{2\omega^2 c} = \frac{2\pi N e^3 B}{m^2 c \omega^2} \Delta z. \quad [2 \text{ boda}] \quad (35)$$

d.) S grafa vidimo da je $N_1 = 2.5 \times 10^{10} \text{ cm}^{-3}$ između 150 – 350 km, i $N_2 = 6 \times 10^9 \text{ cm}^{-3}$ između 350 – 1000 km. Srednje vrijednosti magnetskog polja u tim područjima su otprilike $B(250 \text{ km}) = 36.3 \mu\text{T}$ i $B(675 \text{ km}) = 30 \mu\text{T}$, pa je ukupni kut zakreta:

$$\Theta = \frac{e^3}{2\pi m^2 c f^2} [N_1 \cdot B(250 \text{ km}) \cdot 200 \text{ km} + N_2 \cdot B(675 \text{ km}) \cdot 650 \text{ km}] = 1.98 \times 10^{-3} \text{ rad.} \quad [4 \text{ boda}] \quad (36)$$

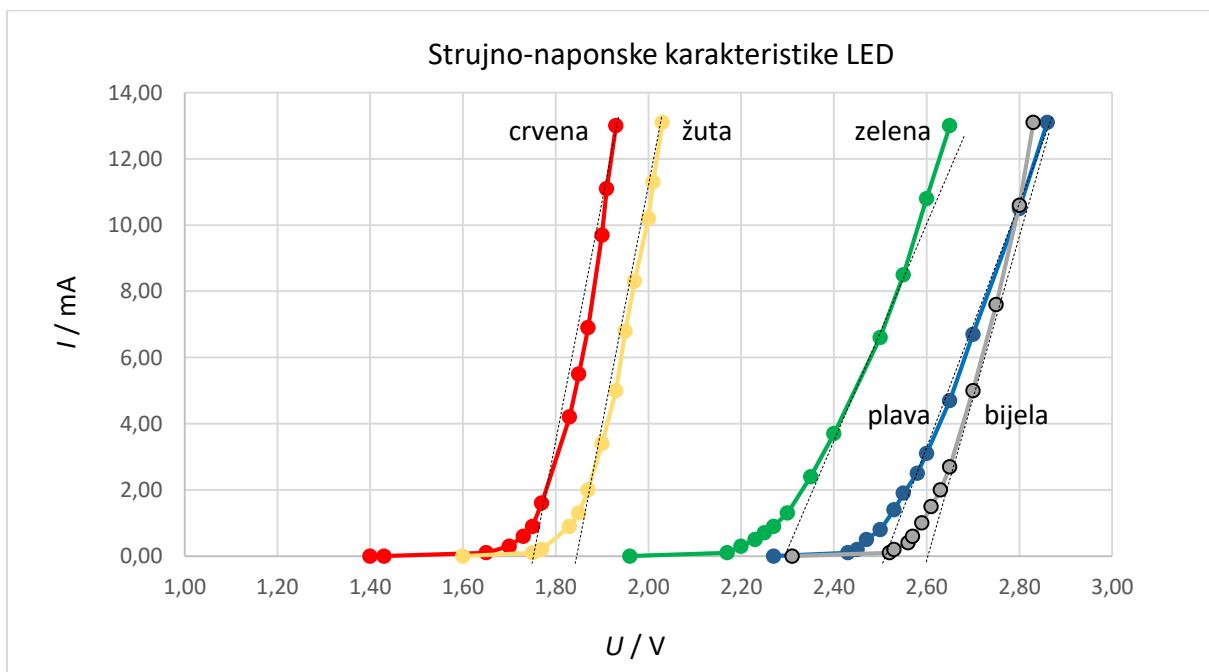
Državno natjecanje iz fizike
26. do 29. travnja 2022., Podgora
RJEŠENJE EKSPERIMENTALNOG ZADATKA
4. skupina

1. dio

a) Mjerenja (strujno-naponske karakteristike svjetlećih dioda):

4 boda

crvena		žuta		zelena		plava		bijela	
U/V	I/mA	U/V	I/mA	U/V	I/mA	U/V	I/mA	U/V	I/mA
1,40	0,00	1,60	0,00	1,96	0,00	2,27	0,00	2,31	0,00
1,43	0,00	1,75	0,10	2,17	0,10	2,43	0,10	2,52	0,10
1,65	0,10	1,77	0,20	2,20	0,30	2,45	0,20	2,53	0,20
1,70	0,30	1,83	0,90	2,23	0,50	2,47	0,50	2,56	0,40
1,73	0,60	1,85	1,30	2,25	0,70	2,50	0,80	2,57	0,60
1,75	0,90	1,87	2,00	2,27	0,90	2,53	1,40	2,59	1,00
1,77	1,60	1,90	3,40	2,30	1,30	2,55	1,90	2,61	1,50
1,83	4,20	1,93	5,00	2,35	2,40	2,58	2,50	2,63	2,00
1,85	5,50	1,95	6,80	2,40	3,70	2,60	3,10	2,65	2,70
1,87	6,90	1,97	8,30	2,50	6,60	2,65	4,70	2,70	5,00
1,90	9,70	2,00	10,20	2,55	8,50	2,70	6,70	2,75	7,60
1,91	11,10	2,01	11,30	2,60	10,80	2,80	10,50	2,80	10,60
1,93	13,00	2,03	13,10	2,65	13,00	2,86	13,10	2,83	13,10



- b) Strujno-naponske karakteristike nisu linearne. Svjetleće diode su poluvodički elementi i za njih ne vrijedi Ohmov zakon. Napon na diodi nije proporcionalan struji. Otpor diode se promjenom napona na diodi mijenja. Kako se povećava napon na diodi, u određenom trenutku uočava se nagli porast struje. Ovaj dio karakteristike je linearan. **1 bod**

- c) Energija fotona proporcionalna je frekvenciji: $E=hf$, gdje je h Planckova konstanta.

LED pri određenom istosmjernom naponu počinje emitirati svjetlost. Energija (fotona) kod koje je svjetlost određene boje najintenzivnija, približno je jednaka:

$$E=eU_0,$$

U_0 je napon praga, napon na diodi pri kojem dioda počne svijetliti.

2 boda

LED	U_0 / V	E / eV
crvena	1,40	1,40
žuta	1,60	1,60
zelena	1,96	1,96
plava	2,27	2,27
bijela	2,31	2,31

d)

LED	U_0' / V
crvena	1,77
žuta	1,86
zelena	2,28
plava	2,53
bijela	2,62

Pri određivanju napona praga U_0 , točnost mjerjenja ovisi o očitavanju trenutka kad je uočeno da je LED počela svijetliti. Okolno osvjetljenje bi se pri očitavanju trebalo smanjiti što je više moguće.

Voltmetar pokazuje napon U koji sadrži i pad napona zbog unutarnjeg otpora voltmreta: $U=U_0+R_V I$.

Napon praga određen u c) dijelu zadatka nešto je manji od napona određenog u d) dijelu.

LED počinje svijetliti prije no što uočavamo na ampermetru da je dioda počela voditi. Uzrok je rezolucija mjernog uređaja.

Kod određivanja napona U_0' radi se o aproksimaciji. Pravac koji određuje odsječak na naponskoj osi trebao bi prolaziti linearnim dijelom strujno naponske karakteristike, ali je taj dio tek približno linearan.

Radi se o idealizaciji, zanemaruje se unutarnji otpor mjernog instrumenta.

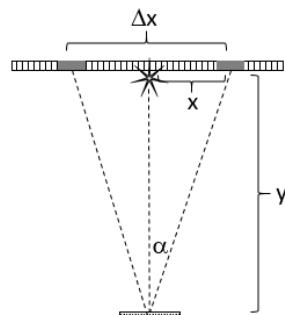
1 bod

- e) Napon praga ovisi o frekvenciji emitirane svjetlosti diode. Veće frekvencija odgovara većoj energiji emitiranih fotona. Diode koje emitiraju svjetlost manje valne duljine imaju veći napon praga. Svjetleća dioda koja emitira bijelu svjetlost ima najveći napon praga. Napon praga diode koja emitira plavu svjetlost vrlo blizu je naponu praga diode koja emitira bijelu svjetlost.

2. dio

- a) Spektri crvene, žute, zelene i plave boje su samo približno "monokromatski". Tako spektar crvene LED sadrži žuti i zeleni dio, žuta LED ima na krajevima i crveni i zeleni dio, spektar zelene LED se proteže s jedne strane i do žutog dijela, a s druge strane do plavog, dok se u spektru plave LED uočava i zeleni dio... Mi vidimo svjetlost diode one boje čija je valna duljina najvećeg intenziteta. Spektri "jednobojnih" svjetlećih dioda su u odnosu na spektar bijele LED uži, sadrže manji raspon valnih duljina. Spektar bijele led može se sastaviti preklapanjem spektara crvene, zelene i plave LED.

- b) Skica:



1 bod

$$d = \frac{10^{-3}m}{500} \Rightarrow d = 2 \cdot 10^{-6}m$$

$$k = 1$$

Uvjet maksimuma za optičku rešetku. $k \cdot \lambda = d \cdot \sin\alpha \Rightarrow \lambda = \frac{ds\sin\alpha}{k}$ **1 bod**

Mjerenja za crvenu LED:

$\Delta x/cm$	x/cm	y/cm	$\operatorname{tg}\alpha$	α/rad	$\sin\alpha$	λ/m	λ/nm	$\Delta\lambda /nm$
31,0	15,5	46,0	0,3370	0,3250	0,3193	6,3863E-07	638,6	-2,9
29,0	14,5	43,5	0,3333	0,3218	0,3162	6,3246E-07	632,4	3,3
29,0	14,5	43,0	0,3372	0,3252	0,3195	6,3906E-07	639,1	-3,4
29,5	14,75	44,0	0,3352	0,3235	0,3178	6,3569E-07	635,7	0,0
30,0	15	45,0	0,3333	0,3218	0,3162	6,3246E-07	632,5	3,2

$$\bar{\lambda} = 635,7 \text{ nm}, \quad r_m = 0,5\%, \quad \bar{\lambda} = (635,7 \pm 3,4) \text{ nm} \quad \mathbf{2 boda}$$

Mjerenja za žutu LED:

$\Delta x/cm$	x/cm	y/cm	$\operatorname{tg}\alpha$	α/rad	$\sin\alpha$	λ/m	λ/nm	$\Delta\lambda /nm$
27,0	13,5	44,0	0,3068	0,2977	0,2933	5,8664E-07	585,6	-4,9
29,0	14,5	47,0	0,3085	0,2992	0,2948	5,8960E-07	589,6	-8,9
26,0	13,0	43,0	0,3023	0,2936	0,2894	5,7878E-07	578,8	1,9
27,5	13,8	46,0	0,2989	0,2905	0,2864	5,7278E-07	572,8	7,9
28,0	14,0	46,5	0,3011	0,2924	0,2883	5,7658E-07	576,6	4,1

$$\bar{\lambda} = 580,7 \text{ nm}, \quad r_m = 1,5\%, \quad \bar{\lambda} = (580,7 \pm 8,9) \text{ nm} \quad \mathbf{1 bod}$$

Mjerenja za zelenu LED:

$\Delta x/cm$	x/cm	y/cm	$\operatorname{tg}\alpha$	α/rad	$\sin\alpha$	λ/m	λ/nm	$\Delta\lambda /nm$
16,2	8,1	29,0	0,2793	0,2724	0,2690	5,3803E-07	538,0	-5,6
16,6	8,3	30,0	0,2767	0,2699	0,2666	5,3330E-07	533,3	-0,9
15,8	7,9	28,5	0,2772	0,2704	0,2671	5,3424E-07	534,2	-1,8
16,8	8,4	30,5	0,2754	0,2687	0,2655	5,3105E-07	531,1	1,3
16,6	8,3	30,5	0,2721	0,2657	0,2626	5,2516E-07	525,2	7,2

$$\bar{\lambda} = 532,4 \text{ nm}, \quad r_m = 1,4\%, \quad \bar{\lambda} = (532,4 \pm 7,2) \text{ nm} \quad \mathbf{1 bod}$$

Mjerenja za plavu LED:

$\Delta x/cm$	x/cm	y/cm	$\operatorname{tg}\alpha$	α/rad	$\sin\alpha$	λ/m	λ/nm	$\Delta\lambda /nm$
13,2	6,6	28,0	0,2357	0,2315	0,2294	4,589E-07	458,9	-1,0
12,9	6,5	27,5	0,2345	0,2304	0,2283	4,567E-07	456,7	1,2
14,0	7,0	29,0	0,2414	0,2368	0,2346	4,693E-07	469,3	-11,4
13,2	6,6	28,5	0,2316	0,2276	0,2256	4,512E-07	451,2	6,7
14,2	7,1	30,5	0,2328	0,2287	0,2267	4,534E-07	453,5	4,4

$$\bar{\lambda} = 457,9 \text{ nm}, \quad r_m = 2,5\%, \quad \bar{\lambda} = (457,9 \pm 11,4) \text{ nm} \quad \mathbf{2 boda}$$

Diskusija rezultata mjerena:

Ogibni maksimumi predstavljaju spekture. Točnost mjerena ovisi o procjeni mesta u spektru gdje je najveći intenzitet. Osim toga mjerena je opterećeno i nepreciznošću očitavanja udaljenosti rešetke i izvora svjetlosti. Očitavaju se udaljenosti između dva simetrična maksimuma, pa je vrlo bitna paralelnost rešetke i letvice s mjernom trakom. Konstanta rešetke je dosta velika, posebno za mjerena sa diodama koje emitiraju svjetlost većih valnih duljina.

c) $E = hf = h \frac{c}{\lambda}$

1 bod

λ/m	$E/10^{-19}\text{J}$	E/eV
635,7	3,127	1,95
580,7	3,423	2,14
532,4	3,734	2,33
457,9	4,341	2,71

1 bod

- d) Kad je primijenjeni napon na diodi približno jednak naponu praga, struja može teći kroz PN spoj. Za vrijeme rekombinacije elektrona osobađa se energija u obliku fotona energije hf koja je približno jednaka širini energijskog procjepa (E_0) između valentne i vodljive vrpce u poluvodiču.

Veza između napona praga i energije fotona:

$$eU_0 = hf + \text{konst}$$

Konstanta u prethodnom izrazu sadrži i ovisnost o vrsti materijala od kojeg je napravljen PN spoj, ali je taj udio vrlo mali tako da se zanemaruje. Uzima se da je ova konstanta približno jednaka za svaku od svjetlećih dioda u zadatku.

Uvijek je $eU_0 < hf$. Dio energije elektrona (uslijed termičkih pobuđenja) može biti dostatan da nastane foton energije hf . Aproksimativno (radi se o vrlo maloj kinetičkoj energiji elektrona) uzimamo da je:

$$eU_0 \approx hf$$

2 boda

3. dio

a)

2 boda

		LED prijamnik				
		crvena	žuta	zelena	plava	bijela
LED predajnik	crvena	1,55 V	0,21 V	0	0	0
	žuta	1,54 V	1,64 V	0	0	0
	zelena	1,49 V	1,61 V	1,69 V	0	0
	plava	0,54 V	0,46 V	2,09 V	2,26 V	0,11 V
	bijela	1,51 V	1,63 V	2,05 V	2,28 V	0,38 V

- b) Uočava se da LED prijamnik daje najveće napona kada je obasjan svjetlošću valnih duljina približne onima koje i sam emitira.

LED ne emitira svjetlost kad je obasjana svjetlošću većih valnih duljina (manje energije) od svjetlosti koju emitira.

1 bod

- c) Dobiveni napon na LED prijamniku ovisi o valnoj duljini upadne svjetlosti i njezinom intenzitetu. Intenzitet svjetlosti je proporcionalan struji, tako da bi se za vrijeme mjerena trebalo uvjetovati jednakost struje u krugu predajnika.

Pojedine svjetleće diode tek su približno jednakih svjetlosnih jakosti.

1 bod

- d) Istražila se mogućnost uporabe LED-a kao izvora stalnog napona, ali se nije razmatralo može li osvjetljena LED biti i izvor stalne struje. Kako bi se to istražilo bilo bi potrebno dodati vanjski otpornik (na primjer promijenjivi) i vidjeti za koju vrijednost otpora je postignuta maksimalna snaga.

Mjeranjem napona i struje u strujnom krugu prijamnika može se prikazati njegova strujno naponska karakteristika.

Maksimalna snaga P_m odgovara najvećoj mogućoj površini pravokutnika koji se može upisati ispod grafa. U točki maksimalne snage vrijednost struje je I_m , a napon je U_m .

Maksimalna snaga je određena njihovim umnoškom: $P_m = I_m U_m$.

Kako se radi o vrlo maloj struci (reda veličina μA) sa danim priborom nije bilo moguće mjeriti struju. Dobivena snaga bila bi reda veličine μW .

2 boda

- e) Strujno naponske karakteristike bijele i plave svjetleće diode su u usporedbi sa karakteristikama ostalih dioda slične. Vrlo blizu im je i napon praga U_0 .

Rezultat pokusa:

Prekrijemo plavu LED dijelom papira koji je obojan običnom žutom bojom. Prolazna svjetlost plave svjetleće diode ostaje plava. Ako plava svjetlost diode prolazi kroz fluorescentno žuti dio, prolazna svjetlost izgleda bijela.

Ako se pogleda unutrašnjost kućišta svjetlećih dioda može se uočiti da se kod svih dioda može vidjeti poluvodoučki element, jedino kod diode koja emitira bijelu svjetlost se može uočiti nekakav zaslon iznad poluvodičkog elementa, bijelo žučkaste boje.

Pojednostavljeni, naša bijela LED sastavljena je od "jednobojne" LED (plave) prekrivene materijalom koji mijenja boju svjetlosti kad svjetlost diode prođe kroz taj materijal. Mi vidimo rezultantnu svjetlost kao bijelu.

Ova bijela LED emitira svjetlost na osnovu procesa fluorescencije.

4 bodova