

Dubravka Kotnik-Karuza

Mariza Sarta Deković

Nataša Erceg

FIZIČKI PRAKTIKUM IV



Odjel za fiziku Sveučilišta u Rijeci

Rijeka, listopad 2013.

Predgovor

Ova skripta dio je obvezne literature potrebne za izvođenje kolegija *Fizički praktikum IV* na trećoj godini preddiplomskog studija *Fizike*. Služi studentima za pripremu i izvođenje laboratorijskih vježbi koje sadržajem prate kolegij *Moderna fizika I*. Koncipirana je tako da je svaki sadržaj dan kroz teorijske osnove i popraćen odgovarajućim laboratorijskim vježbama. Zajedno s udžbenikom *Osnove elektronike s laboratorijskim vježbama* čini cjelinu koja pokriva sve vježbe sadržane u Fizičkom praktikumu IV. Ova skripta je interni, još nedovršeni i nerecenzirani materijal, a kako se budu razvijale i postavljale nove vježbe, bit će proširena novim sadržajima.

U ovoj skripti obuhvaćene su laboratorijske vježbe *Hallov efekt*, *Franck-Hertzov eksperiment* i *Zeemanov efekt*. Prvobitna motivacija za uvođenje ovih vježbi u program preddiplomskog studija fizike bila je olakšati studentima razumijevanje i usvajanje sadržaja i pojmova atomske fizike koji su nedostupni zornim predodžbama. Njihova je osnovna karakteristika da su idejno složene, a u postavi relativno jednostavne, mjerenja su reproducibilna i daju numeričke rezultate usporedive s teorijski poznatim fizikalnim veličinama. Ulaženjem u strukturu tvari ovi eksperimenti pridonose boljem razumijevanju sadržaja moderne fizike.

Mnogi pojmovi obuhvaćeni u opisanim laboratorijskim vježbama zastupljeni su i u udžbenicima četvrtog razreda gimnazije i srodnih škola četverogodišnjih programa fizike, često samo deskriptivno i bez dubljeg ulaženja u suštinu. Vježbe se mogu djelomično ili u cijelosti pojednostavniti i prilagoditi i za izvođenje u školi, bilo kao individualne laboratorijske vježbe ili kao demonstracijski pokusi. Ova skripta može stoga poslužiti i nastavnicima fizike u srednjim školama kao pomoćni materijal u praktičnim radu s učenicima.

Autori

Kazalo

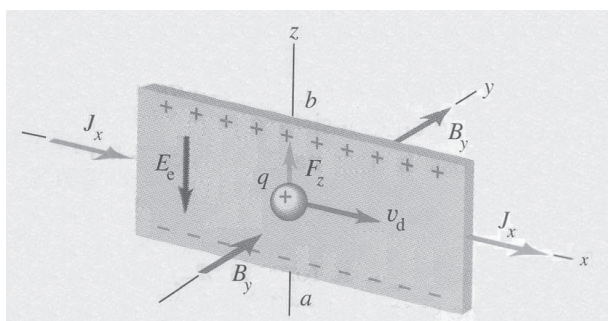
Hallov efekt u germaniju p – tipa.....	7
Hallov efekt	7
Metoda određivanja širine zabranjene zone u poluvodiču.....	10
Zadaci.....	11
 Franck-Hertzov eksperiment.....	 14
Zadaci.....	16
 Zeemanov efekt.....	 20
Zadaci.....	22
Upute.....	23
Elektromagnet i baždarna krivulja.....	23
Optička klupa.....	24
Fabry-Perotov etalon.....	25
Opažanje i mjerenje.....	26
 Literatura	 32

Hallov efekt u germaniju p - tipa

Hallov efekt

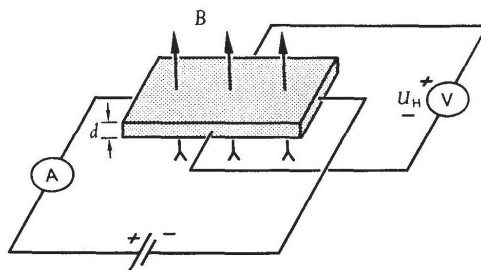
Hallov efekt nazvan je prema američkom fizičaru Edwinu Hallu koji ga je otkrio 1879. godine na elektronima kao nosiocima električne struje u metalu. U poluvodiču efekt se očituje na oba tipa nosilaca tako da opažen u p-tipu poluvodiča predstavlja eksperimentalnu potvrdu postojanja šupljina kao pozitivnih nosilaca elektriciteta.

Ako kroz pravokutnu pločicu poluvodiča p-tipa prolazi struja u pozitivnom smjeru x-osi a vanjsko magnetno polje magnetne indukcije $\mathbf{B}$ orijentirano je okomito na ravninu uzorka u pozitivnom smjeru y-osi, na naboje q koji se gibaju driftnom brzinom $\mathbf{v}_d$ djeluje Lorentzova sila $\vec{F} = q \cdot (\vec{v}_d \times \vec{B})$ (Slika 1.). Zbog te sile dolazi do nakupljanja većinskih, pozitivnih, nosilaca naboja uz gornji rub poluvodiča. To ima za posljedicu uspostavljanje elektrostatskog polja $\mathbf{E}_e$ i Hallova napona kao razlike potencijala između nasuprotnih rubova poluvodiča. Polaritet Hallova napona ovisi o predznaku naboja većinskih nosilaca elektriciteta. U eksperimentu s metalom ili n-tipom poluvodiča u kojima su većinski nosioci naboja negativni, uz gornji rub pločice bi se nakupio negativni naboj i Hallov napon bi imao suprotan predznak.



Slika 1. Hallov efekt u p-poluvodiču.

Uz poznate smjerove struje i magnetnog polja, iz predznaka Hallova napona može se odrediti tip nosilaca naboja u ispitivanom uzorku. Predznak Hallova napona u primjeru na slici 2. kazuje da je predznak naboja nosilaca električne struje negativan. U slučaju poluvodiča radi se o n-tipu u kojem su većinski nosioci elektroni.



Slika 2. Hallov efekt u n-poluvodiču i metalu

U eksperimentu se ispituje Hallov efekt na germaniju p-tipa s orijentacijom struje i magnetnog polja kao na slici 1. Lorentzova sila otklanja pozitivan naboj prema gornjem rubu pločice što ima za posljedicu stvaranje električnog polja $\vec{E}_e$ koje na taj naboj djeluje silom usmjerenom suprotno od Lorentzove. U ravnoteži je rezultanta tih sila jednaka nuli:

$$q\vec{E}_e + q\vec{v}_d \times \vec{B} = 0 \quad (1)$$

Budući da je gustoća struje $\vec{J} = nq\vec{v}_d$, gdje je n koncentracija nosilaca naboja q , a v_d njihova driftna brzina, uvrštavanjem $q\vec{v}_d$ u (1) slijedi:

$$\vec{E}_e = -\frac{1}{nq} \vec{J} \times \vec{B} \quad (2)$$

Skalarna veličina uz vektorski produkt definira Hallovu konstantu R_H :

$$R_H = \frac{1}{nq} \quad (3)$$

U poluvodiču p-tipa na sobnoj temperaturi su većinski nosioci šupljine čiji je naboj $q > 0$ ($R_H > 0$), a za orijentaciju struje i magnetnog polja kao na Sl.1 vrijedi $J_x > 0$, $B_y > 0$, pa iz (2) slijedi:

$$E_{ez} = -\frac{1}{nq} J_x B_y = -R_H J_x B_y \quad (4)$$

odnosno $E_{ez} < 0$. Uz $J_x \equiv J$, $B_y \equiv B$, $E_{ez} \equiv E_H$

$$R_H = -\frac{E_H}{JB} \quad (5)$$

Za uzorak p-Ge pločicu duljine l , visine h i debljine d vrijedi

$$E_H = -\frac{U_H}{h}, \quad J = \frac{I}{d \cdot h} \Rightarrow \quad (6)$$

$$R_H = \frac{U_H d}{BI}$$

$$U_H = \frac{R_H B}{d} I \quad (7)$$

Pokretljivost nosilaca μ koja je definirana relacijom $\vec{v}_d = \mu \vec{E}$ može se uz $\vec{J} = \sigma \vec{E}$ izraziti pomoću Hallove konstante i provodnosti σ :

$$\mu = \frac{v_d}{E} = \frac{v_d \sigma}{J} = \frac{v_d \sigma}{nq v_d} = R_H \sigma \quad (8)$$

$$\mu = R_H \sigma$$

U struji kroz poluvodič sudjeluje oba tipa nosilaca pa je provodnost

$$\sigma = e(n\mu_n + p\mu_p). \quad (9)$$

Može se pokazati da je Hallova konstanta općenito jednaka

$$R_H = \frac{p\mu_p^2 - n\mu_n^2}{e(p\mu_p + n\mu_n)^2} \quad (10)$$

Ako se u ekstrinzičnom poluvodiču zanemari utjecaj manjinskih nosilaca i uzme u obzir samo doprinos većinskih, onda u p-tipu za kojeg je $p \gg n$, zbog (9) vrijedi

$$\sigma = \sigma_p \approx ep\mu_p,$$

a (10) prelazi u

$$R_H = \frac{p\mu_p^2}{\frac{\sigma_p^2}{e}} = \frac{\sigma_p\mu_p}{\sigma_p^2} = \frac{\mu_p}{\sigma_p}. \quad (11)$$

To je u skladu s relacijom (8) koja je izvedena za samo jedan tip nosilaca. U intrinzičnom poluvodiču $n = p = n_i$ pa (10) prelazi u

$$R_H = \frac{(\mu_p - \mu_n)}{en_i(\mu_p + \mu_n)} \quad (12)$$

Uvažavanjem relacija (7), (10) i (11) može se rastumačiti ponašanje Hallova napona U_H s promjenom temperature pri određenoj vrijednosti magnetne indukcije B i struje kroz poluvodič I . U ekstrinzičnom temperaturnom području koje obuhvaća širok interval oko sobne temperature ($\sim 100 \text{ K} < T_{eks} < T$ na kojoj poluvodič prelazi u intrinzičan) U_H pada s porastom T jer se uz konstantne vrijednosti struje i magnetne indukcije to može desiti samo uz pad R_H (7) odnosno uz porast koncentracije slobodnih nosilaca naboja (3) i smanjenje njihove driftne brzine v_d zbog

$$J = \sigma E = ep\mu_p \frac{v_d}{\mu_p} = epv_d. \quad (13)$$

Pad v_d utječe na smanjenje Lorentzove sile koja rezultira padom U_H .

Na visokim temperaturama, izvan ekstrinzičnog temperaturnog područja, poluvodič prelazi u intrinzično stanje u kojem je $n \approx p$. Budući da je općenito $\mu_n > \mu_p$, zbog (12) je $R_H < 0$ pa U_H (7) mijenja polaritet, tj. postaje negativan.

U dosadašnjem je razmatranju pretpostavljeno da se nosioci naboja (u p-tipu šupljine) gibaju kroz poluvodič stalnom driftnom brzinom v_d , što je zapravo uprosječna vrijednost različitih brzina koje se vladaju po određenoj raspodjeli. Na nosioce koji imaju brzine manje ili veće od prosječne vrijednosti kompenzacijsko djelovanje Hallova polja nije dovoljno, odnosno za njih ne vrijedi (1) jer je zbroj sila $\neq 0$. Oni skreću s pravca x u čijem se smjeru gibaju samo nosioci s prosječnom brzinom v_d , dakle raspršuju se, što dovodi do promjene otpornosti materijala. Otpornost će rasti s porastom B jer s porastom B raste Lorentzova sila, a s njom i raspršenje.

Metoda određivanja širine zabranjene zone u poluvodiču

Mjereći pad napona duž uzorka poluvodiča u ovisnosti o temperaturi, $U = U(T)$, te uz stalnu vrijednost struje, može se odrediti širina zabranjene zone u poluvodiču.

$\sigma = \sigma(T)$, $\sigma_0 = \sigma(T_0)$, T_0 ... sobna temperatura

$$U = RI = \rho \frac{l}{S} I, \quad \rho = \frac{1}{\sigma}$$

ρ je otpornost, l duljina, a $S = d \cdot h$ presijek poluvodičkog uzorka (Sl.1)

$$U^{-1} = \frac{S}{lI} \sigma \quad (14)$$

$$\sigma = e(n\mu_n + p\mu_p)$$

Za intrinzičnu provodnost vrijedi $\sigma = \sigma_i$, $n = p = n_i \Rightarrow$

$$\sigma_i = en_i(\mu_n + \mu_p) \quad (15)$$

$$n_i^2(T) = CT^3 e^{-\frac{E_g}{kT}}$$

Na dovoljno visokoj temperaturi T_p dolazi do prijelaza iz ekstrinzičnog u intrinzičan tip poluvodiča, pa će za $T > T_p$ biti zadovoljeno $\sigma(T) \approx \sigma_i(T)$.

Budući da je $\mu \sim \frac{1}{T}$, ovisnost pokretljivosti o temperaturi puno je blaža nego $n_i(T)$ pa se

$(\mu_n + \mu_p)$ u (15) može uzeti približno konstantnim u odnosu na temperaturu, što znači da je

$$\begin{aligned} \sigma_i &\approx K \left(CT^3 e^{-\frac{E_g}{kT}} \right)^{\frac{1}{2}} \\ \frac{\sigma}{\sigma_0} &= \left(\frac{CT^3 e^{-\frac{E_g}{kT}}}{CT_0^3 e^{-\frac{E_g}{kT_0}}} \right)^{\frac{1}{2}} \\ \sigma &= \sigma_0 \left(\frac{T}{T_0} \right)^{\frac{3}{2}} e^{-\frac{E_g}{2kT}} e^{\frac{E_g}{2kT_0}} \end{aligned} \quad (16)$$

Uvrštavanjem (16) u (14) dobije se

$$\begin{aligned} U^{-1} &= \frac{S}{lI} \sigma_0 \left(\frac{T}{T_0} \right)^{\frac{3}{2}} e^{-\frac{E_g}{2kT}} e^{\frac{E_g}{2kT_0}} \\ \ln(U^{-1}) &= K_1 + \frac{3}{2} \ln T - \frac{E_g}{2kT} \end{aligned} \quad (17)$$

pri čemu je

$$K_1 = \ln \frac{S\sigma_0}{lI} - \frac{3}{2} \ln T_0 + \frac{E_g}{2kT_0}.$$

Relacija (17) može se zapisati u obliku

$$\ln \frac{U^{-1}}{T^{\frac{3}{2}}} = K_1 - \frac{E_g}{2kT} \quad (18)$$

što u prikazu $\ln \frac{U^{-1}}{T^{\frac{3}{2}}} = f(T^{-1})$ predstavlja pravac nagiba $-\frac{E_g}{2k}$, iz kojeg se može izračunati energija zabranjene zone E_g .

Zadaci:

Postavite eksperiment prema uputama:

- Uzorak poluvodiča umetne se u hall-efekt modul. Modul se s jedne strane spaja na izmjenični napon od 12 V, a s druge pomoću RS232 spojne žice na Analog In 2 ulaz na Cobra3Basic jedinici.
- Teslametar se spaja na odgovarajući ulaz na Cobra3Basic jedinici.
- Magnetno polje uspostavlja se pomoću dvije serijski spojene zavojnice koje se spajaju na izvor istosmjerne struje. Jakost polja regulira se mijenjanjem struje i napona, pri čemu treba paziti da struja ne prijeđe određenu vrijednost (lampica na potencijometru kojim se regulira struja ne smije svijetliti). Magnetno polje mjeri se teslametrom, pri čemu treba paziti da je sonda smještena u sredinu polja. Za mjerenje magnetnog polja koristimo uređaj Cobra3BasicUnit, Teslametar s Hallowom sondom i računalo.
- Cobra3Basic jedinica spaja se s računalom pomoću RS232 spojne žice.

Napomena 1: Prije pokretanja programa *Measure*, uređaji moraju biti spojeni i uključeni, inače ih program neće registrirati.

Napomena 2: Uz sve rezultate mora biti prikazana i standardna devijacija (pogreška, nepouzdanost) !

- Izmjerite pad napona na poluvodiču p-Ge u ovisnosti o temperaturi, počevši od sobne temperature do najviše 145°C. Mjerenja vršite pri stalnoj struji kroz poluvodič. Rezultate mjerenja prikažite grafički. Iz mjerenja odredite širinu zabranjene zone u p-germaniju.
- Izmjerite pad napona na poluvodiču u ovisnosti o magnetnoj indukciji B . Mjerenja vršite na sobnoj temperaturi i pri stalnoj struji kroz poluvodič. Grafički prikažite promjenu otpornosti uzorka p-Ge u ovisnosti o magnetnoj indukciji: $\frac{\rho - \rho_0}{\rho_0} = f(B)$, pri čemu je $\rho = \rho(B)$, $\rho_0 = \rho(B=0)$. Koja krivulja najbolje opisuje ponašanje mjerenih vrijednosti?

Mjereći pad napona u ovisnosti o magnetnoj indukciji, B mijenjati od -300 mT do 300 mT, u koracima od 20 mT. Magnetnu indukciju mjerite teslametrom. Održavajte stalnu vrijednost struje kroz poluvodič; proizvoljno odaberite neku vrijednost od 25-30 mA.

Napomena:

Prije određivanja ovisnosti $\frac{\rho - \rho_0}{\rho_0} = f(B)$, potrebno je odrediti otpornost uzorka ρ_0 u

odsutstvu magnetnog polja. Mjereći pad napona na uzorku za različite vrijednosti struje i poznavajući dimenzije uzorka, možete odrediti ρ_0 . Dimenzije uzorka: $l=2$ cm, $h=1$ cm, $d=1$ mm.

PAZITE DA NE DOĐE DO OŠTEĆENJA POLUVODIČA PRILIKOM UMETANJA UZORKA U MAGNETNO POLJE!

3. Izmjerite Hallov napon U_H u ovisnosti o magnetnoj indukciji B . Mjerenja prikažite grafički. Odredite tip većinskih nosilaca naboja, Hallovu konstantu R_H , pokretljivost μ_H i koncentraciju p većinskih nosilaca.

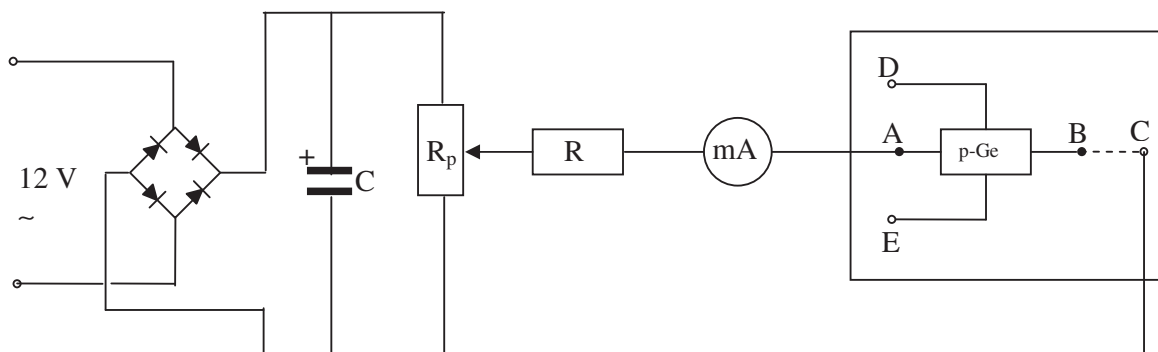
Napomena:

Mjerenja izvršiti pri sobnoj temperaturi i stalnoj struji; proizvoljno odaberite neku vrijednost struje od 25-30 mA. Magnetnu indukciju mijenjati od -300 mT do 300 mT, u koracima od 20 mT. Dimenzije uzorka: $l=2$ cm, $h=1$ cm, $d=1$ mm.

4. Izmjerite Hallov napon za različite vrijednosti struje kroz poluvodič, pri sobnoj temperaturi i stalnoj magnetnoj indukciji $B=250$ mT. Mjerenja prikažite grafički te iz grafa odredite vezu između Hallova napona i struje. Iz grafa odredite Hallovu konstantu R_H i dobivenu vrijednost usporedite s onom iz prethodnog zadatka. Struju mijenjati od -30 mA do 30 mA u koracima od 5 mA.
5. Izmjerite Hallov napon za različite vrijednosti temperature počevši od sobne temperature do oko 145°C . Grafički prikažite ovisnost Hallova napona o temperaturi i objasnite dobivenu krivulju.. Mjerenja izvršiti pri stalnoj struji (proizvoljno odaberite neku vrijednost od 25-30 mA) i stalnoj magnetnoj indukciji od 250 mT.

PRI ZAGRIJAVANJU UZORKA, HALLOVU SONDU (TESLAMETAR) UKLONITE IZ PODRUČJA ZAGRIJAVANJA!

6. Sklopite spoj prema shemi na slici 3. (Koristite drugu pločicu s ugrađenim poluvodičem!). Opažajte utjecaj promjene jakosti i smjera magnetnog polja i struje na Hallow napon.



Slika 3. Shema spoja

Zadano: $C = 2000 \mu F$, $R_p = 560 \Omega$, $R = 330 \Omega$.

INVENTAR:

Naziv	Količina
Ispravljač 0-12 VDC / 6 V, 12 VAC	1
Hallow modul	1
Spojna ploča s uzorkom p-Ge	1
Zavojnice	2
Jezgra U oblika	1
Jezgra, 30x30x48 mm	2
Teslametar	1
Hallowa sonda	1
Cobra 3-Basic Unit	1
Ispravljač za Cobra3BasicUnit 12 VDC / 2A	1
Kabel za prijenos podataka (RS232)	2
Računalo	1
Software Measure	1
Tronožac	1
Klema	1
Spojne žice	
Za 6. zadatak:	
Greatzov ispravljač	1
Kondenzator 2000 μF	1
Promjenjivi otpornik 560 Ω	1
Otpornik 330 Ω	1
Kutija za spajanje	1
Spojna ploča s uzorkom p-Ge, na nosaču s priključkom za grijanje	1
Digitalni multimetar	3

Franck-Hertzov eksperiment

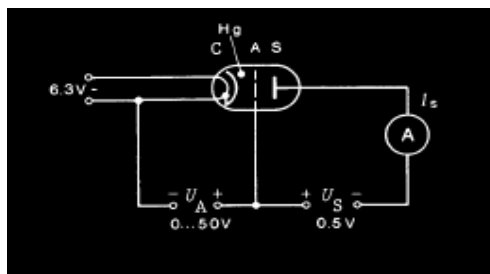
Franck i Hertz su 1913. g. izveli eksperiment koji je potvrdio osnovne tvrdnje Bohrove teorije. Iste je godine Bohr predstavio svoj model atoma u kojem daje vezu između energije pobuđenja i emisije (apsorpcije) spektralne linije valne duljine λ :

$$E_a - E_0 = h\nu = hc\bar{\nu} = \frac{hc}{\lambda}$$

Spektralna linija nastaje u prijelazu između diskretnih stacionarnih stanja predodređenih kružnim putanjama elektrona oko jezgre za koje vrijedi 1. Bohrov postulat da je orbitalna kutna količina gibanja elektrona cjelobrojni višekratnik od $h/2\pi$:

$$mvr = n \frac{h}{2\pi}$$

U eksperimentu se elektroni ubrzavaju u električnom polju unutar cijevi koja je ispunjena živinim parama pomoću uređaja shematski prikazanog na slici 1a i slici 1b. Po izlasku iz užarene katode (termionska emisija) oni se nađu u ubrzavajućem električnom polju između katode C i anode A koje je određeno naponom U_A i raspršuju se u elastičnim sudarima s atomima Hg. Za $U_A = 4.9$ V elektron je dobio kinetičku energiju od 4.9 eV koja je dovoljna da neelastičnim sudarom dovede valentni elektron atoma Hg u prvo pobuđeno stanje 6^3P_1 . Time je elektron izgubio energiju pa ne može svladati retardirajuće polje između A i S koje je određeno naponom U_S . Struja I_S pada na minimum. Daljnjim povećanjem napona U_A kinetička energija elektrona postaje dovoljna da on svlada retardirajuće polje i daje doprinos struji I_S . Struja raste porastom U_A sve dok on ne dosegne vrijednost $U_A = 2 \cdot 4.9$ V pri kojoj je elektron u tolikoj mjeri ubrzan da može uzastopce pobuditi dva atoma. Struja ponovo padne na minimum. Razmak minimuma koji odgovara razlici napona ΔU_A na grafu $I_S(U_A)$ odgovara energiji prvog pobuđenog stanja Hg-atoma. Daljnje povećavanje U_A rezultira sukcesijom ekvidistantnih minimuma, tako da graf $I_S(U_A)$ predstavlja potvrdu kvantne teorije. Primjer Franck-Hertzove krivulje $I_S=f(U_A)$ dan je na slici 2.

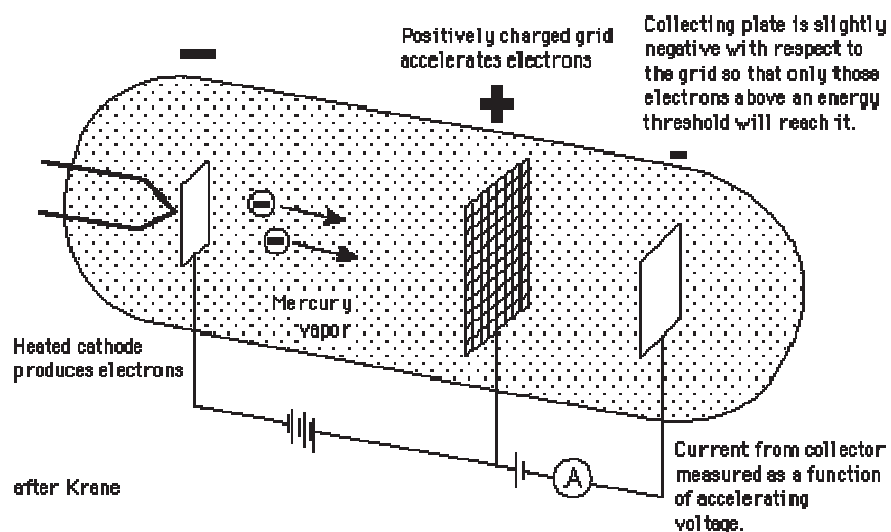


Slika 1a. Shematski prikaz eksperimenta.

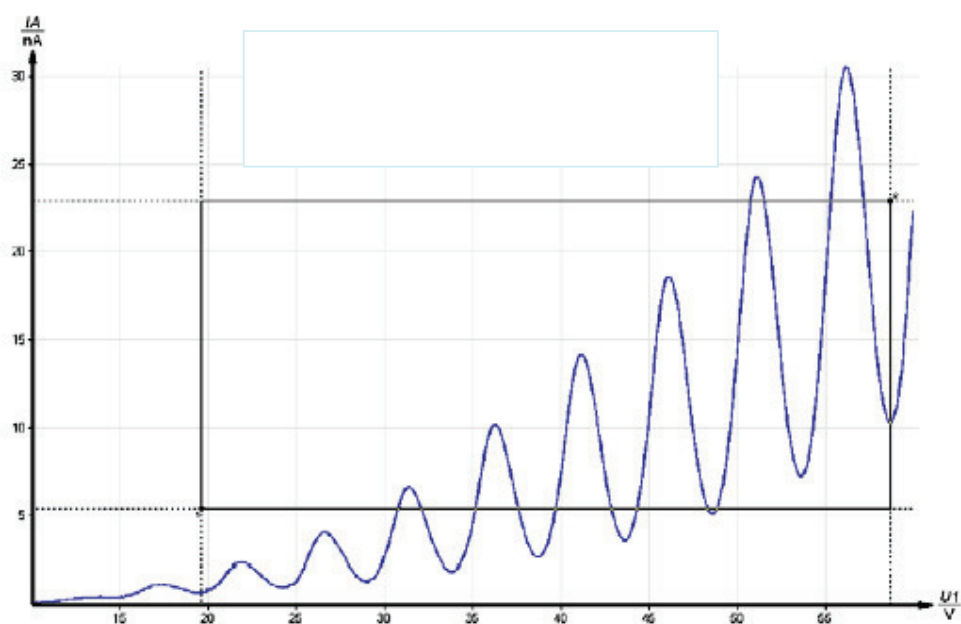
U skladu s 1. Bohrovim postulatom bi pobuđeni atom nakon vrlo kratkog vremena trebao povratkom u osnovno stanje izgubiti tu energiju pobuđenja od 4.9 eV i to emisijom zračenja valne duljine $\lambda = 253.7$ nm. Franck i Hertz su usmjerili spektrograf u prostor između K i A i zaista vidjeli UV liniju te valne duljine.

Time je izravno dokazan 1. Bohrov postulat: elektroni su sudarima prenijeli atomima Hg energiju pobuđenja, koju su ovi izgubili zračenjem svjetlosti upravo te energije.

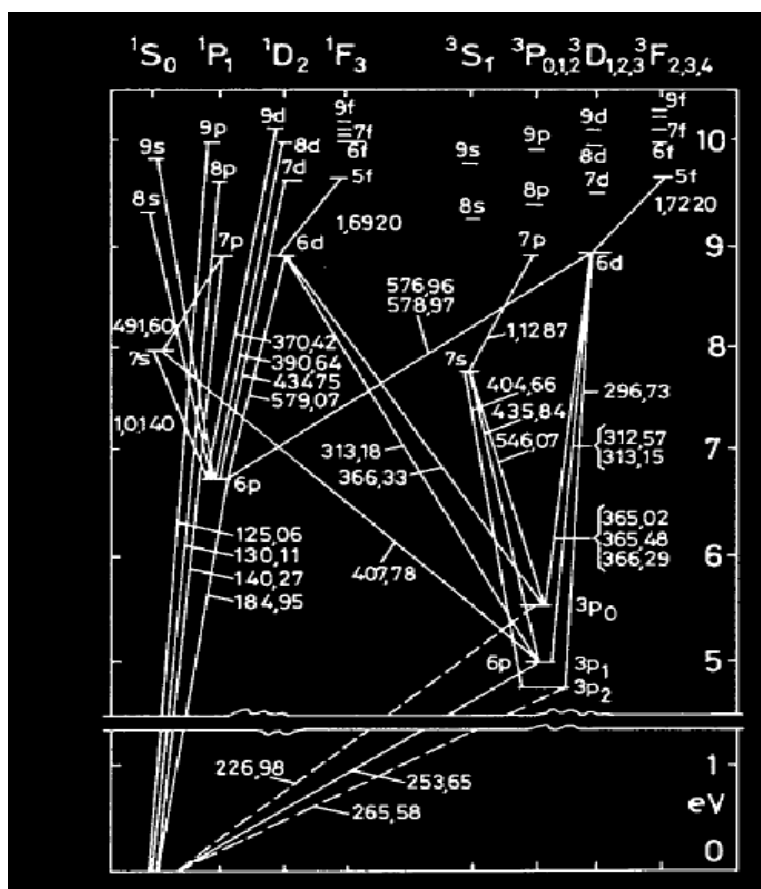
Minimumi nisu oštro definirani zbog termičke raspodjele početnih brzina elektrona.



Slika 1b. Shematski prikaz eksperimenta.



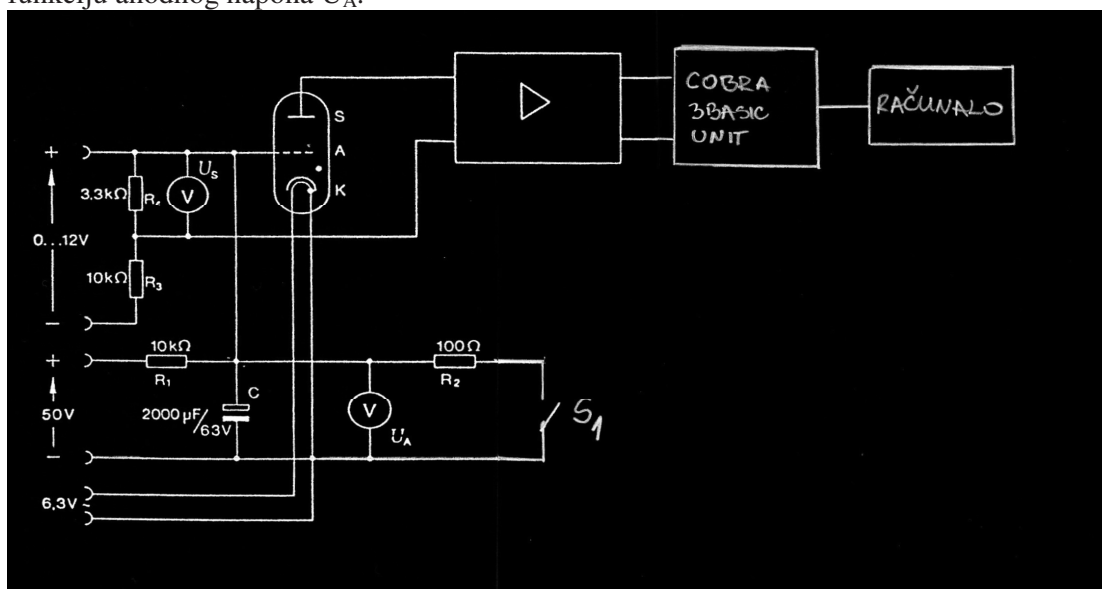
Slika 2. Primjer Franck-Hertzove kruvulje.



Slika 3. Grotrian dijagram Hg atoma (djelomično).

Zadaci:

1. Sklopite spoj prema shemi na slici 3. Snimite struju I_S u Franck-Hertzovoj cijevi kao funkciju anodnog napona U_A .



Slika 3. Shema spoja.

2. Odredite energiju pobuđenja.

Upute:

Dok je sklopka S_1 zatvorena, anodni napon je $U_A(t=0) = \frac{U_0}{R_1 + R_2} \cdot R_2 \approx 0,5V$.

Otvaranjem sklopke S_1 napon raste u skladu s izrazom $U_A(t) = U_0(1 - e^{-\frac{t}{R_1 C}})$. Preko ulaza "Analog in 2" na uređaju Cobra3BasicUnit mjerimo polovicu anodnog napona, $\frac{1}{2}U_A(t)$. Tako je potrebno učiniti zbog ograničenog mjernog područja uređaja.

Napon od 0-12 V koji se dobiva iz jedinice za napajanje prevelik je za U_S ; stoga je reduciran djeliteljem napona R_3/R_4 .

Kada je $U=12V$, onda je $U_S = \frac{U}{R_3 + R_4} \cdot R_4 \approx 3V$.

Napon U_S postavljamo na vrijednost između 0 i 3 V, a za početno mjerenje odaberemo $U_S=0,5V$. Napon U_S mjerimo multimetrom. Mjerenje se može ponoviti za nekoliko različitih vrijednosti napona U_S .

Kako je struja I_S reda veličine $10^{-9}A$, potrebno ju je prvo pojačati kao što je prikazano na slici 3, a potom snimiti pomoću Cobra3BasicUnit i računala. Pri tome na pojačalu odabiremo opciju 10nA.

S obzirom na specifičnosti i mogućnosti uređaja Cobra3BasicUnit i pripadajućeg mu programa, izlazni signal koji se iz pojačala preko Cobra3BasicUnit prenosi na računalo prikazuje se kao napon $U_{Is}(t)$, a ne kao struja. Izlazni signal iz pojačala spaja se na ulaz "Analog in 1" na uređaju Cobra3BasicUnit.

Franck-Hertzova cijev zagrijava se do približno 210^0C . Temperaturu mjerimo priloženim termometrom. Nakon 15-30 minuta nastat će dovoljno živinih para te mjerenje može započeti.

Otvaranjem sklopke S_1 kondenzator se počinje nabijati, U_A raste i snimaju se $U_{Is}=U_{Is}(t)$ i $U_A=U_A(t)$. Naponi $\frac{1}{2}U_A(t)$ i $U_{Is}(t)$ snimaju se istovremeno i prikazuju na istom grafu pomoću potprograma za mjerenje *UniversalWriter*. Prije pokretanja programa potrebno je uređaj Cobra3BasicUnit uključiti i na nj dovesti signale koji će se mjeriti. Naime, program naknadno ne registrira uređaj.

Pri određenom naponu $U_A=U_Z$, koji ovisi o temperaturi, dolazi do izboja između katode i anode. Smislena mjerenja dobivaju se stoga za napone $U_A < U_Z$.

Prilikom određivanja energije pobuđenja iz grafa, treba imati na umu da su na grafu prikazane vrijednosti jedne polovine anodnog napona!

Pokretanje programa:

Pokretanjem programa *Measure* otvara se prozor u kojem pod opcijom *Gauge* odbiremo potprogram *UniversalWriter*. Prije pokretanja potprograma, uređaj mora biti spojen i uključen, inače ga program neće registrirati. U programu se otvara prozor za kontrolu mjerenja u kojem postavljamo sljedeće opcije:

<i>Get value:</i>	<i>every 1 s</i>
<i>Start of measurement:</i>	<i>on key press</i>
<i>End of measurement:</i>	<i>on key press</i>
<i>Channels:</i>	<i>Analog in 1</i> <i>Analog in 2</i>
<i>X-data:</i>	<i>Time</i>
<i>Display:</i>	<i>Digital display 1</i> <i>Digital display 2</i> <i>Diagram</i> → Channel: Analog in 1 from -1 V to 35 V → Channel: Analog in 2 from 0 V to 35 V <i>X-band:</i> → 0-150 s
<i>Range: Analog in 1</i>	± 30 V
<i>Range: Analog in 2</i>	± 30 V
<i>Continue.</i>	

Mjerenja se počinju bilježiti pritiskom tipke *Enter* ili *Start measure* i u tom trenutku otvaramo i sklopku S_1 . Mjerenje se prekida kad krivulja koja prikazuje anodni napon prestane rasti, pri čemu zatvaramo sklopku S_1 .

Analiza krivulje:

Dobivene krivulje mogu se analizirati. Na grafu odaberemo krivulju koju želimo analizirati i pod opcijom *Analysis* odabiremo *Curve analysis*. Otvara se prozor u kojem odabiremo:

<i>Search for extrema</i> <i>Tolerance low</i> <i>Visualize results</i> <i>Calculate.</i>
--

INVENTAR:

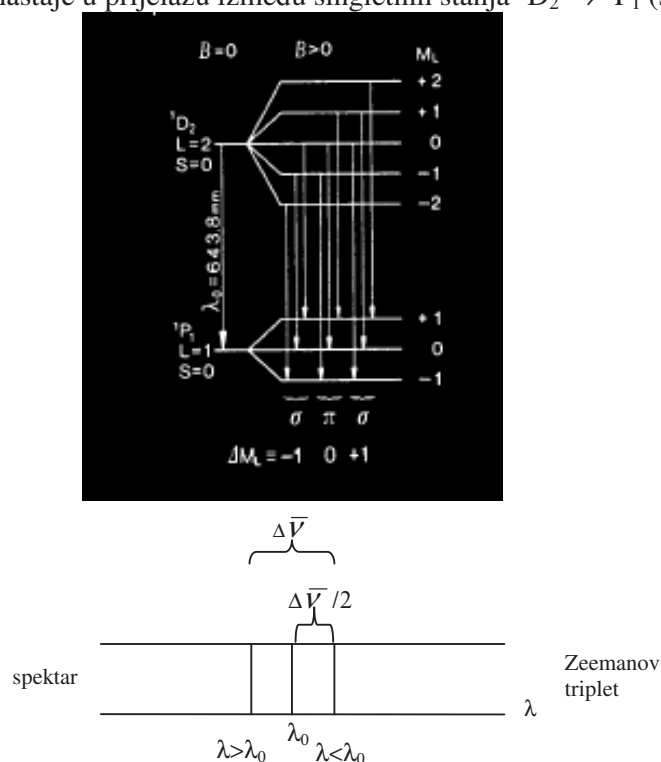
Naziv	Količina
Ispravljač 600 VDC	1
Spojna kutija s RC elementima	1
Utikač za kratki spoj	1
Franck-Hertzova cijev	1
Franck-Hertzov grijač	1
Tacna	1
Digitalni termometar	1
Termoelement NiCr-Ni	1
Istosmjerno pojačalo	1
Cobra 3-Basic Unit	1
Ispravljač za Cobra3BasicUnit 12 VDC / 2A	1
Kabel za prijenos podataka	1
Računalo	1
Software <i>Measure-UniversalWriter</i>	1
Kabel BNC	2
Digitalni multimetar	1
Spojne žice	

Zeemanov efekt

Zeemanov efekt je cijepanje spektralnih linija atoma u vanjskom magnetskom polju. Nazvan je po nizozemskom fizičaru Zeemanu. On je 1896. godine izveo eksperiment koji je dao značajan doprinos razvoju teorije atomske strukture.

Najjednostavniji slučaj cijepanja jedne spektralne linije u tri komponente zove se «normalni Zeemanov efekt» i predmet je izučavanja u ovoj vježbi. Efekt se opaža i mjeri pomoću Fabry-Perotovog interferometra i to na crvenoj kadmijevoj liniji ($\lambda=643.8$ nm) koja se cijepa pod utjecajem različitih gustoća magnetskog toka. Rezultati mjerenja Zeemanovog cijepanja omogućuju izračun Bohrova magnetona.

Linija kadmija (Cd) na kojoj se efekt opaža emitirana je iz kadmijeve lampe. Ima valnu duljinu od 643.8 nm i nastaje u prijelazu između singletnih stanja $^1D_2 \rightarrow ^1P_1$ (sl. 1)



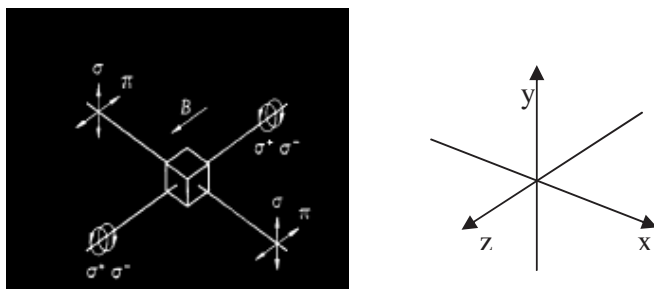
Slika 1. Cijepanje linija u magnetnom polju i dozvoljeni prijelazi.

što je uvjet za normalni Zeemanov efekt. U singletnom stanju je spin $S = 0$, što znači da je sva kutna količina gibanja sadržana u orbitalnoj KKG ($J=L$). Prijelaz se odvija iz stanja $L=2$ u stanje $L=1$, u skladu s izbornim pravilom $\Delta L = \pm 1$. U vanjskom magnetskom polju dolazi do otklanjanja degeneracije stanja ($2L+1$) u ovom prijelazu, tako da se gornje stanje «cijepa» na pet stanja različitih energija, a donje na tri. Prijelazi između tih stanja moraju zadovoljavati izborno pravilo

$$\Delta M = 0, \pm 1$$

što daje ukupno devet linija. Budući da su razmaci susjednih energijskih nivoa u višem i nižem stanju međusobno jednaki, po tri linije imaju istu energiju, tako da u spektru umjesto devet komponenata, vidimo samo tri. Linije sa $\Delta M = +1$ i $\Delta M = -1$ označene su kao σ -linije, dok linija nastala u prijelazima $\Delta M = 0$ nosi oznaku π -linija.

Normalni Zeemanov efekt može biti longitudinalni ili transverzalni ovisno o tome da li se opaža u smjeru magnetskog polja ili okomito na njega.



Slika 2. Longitudinalni i transverzalni Zeemanov efekt

transverzalni Zeeman: smjer opažanja $\rightarrow x$, $\pi \rightarrow z$, $\sigma \rightarrow y$

longitudinalni Zeeman: smjer opažanja $\rightarrow z$, σ^+ i σ^- kružno polarizirane

Postavljanjem analizatora ispred detektora pokazuje se različita polarizacija σ i π linija: u transverzalnom Zeemanovu efektu σ -linije se opažaju polarizirane okomito na smjer magnetskog polja, dok je π -linija polarizirana paralelno sa smjerom polja.

Fabry Perotov interferometar daje interferencijski uzorak koji se sastoji od niza koncentričnih prstenova. Kad nema magnetskog polja, radi se o kružnicama koje se u prisustvu magnetskog polja cijepaju u tri komponente Zeemanova tripleta, σ^+ , σ^- i π .

Određuju se razmaci linija u tripletu koji odgovaraju razmacima susjednih energijskih nivoa.

Razmak dviju σ komponenata izražen u valnim brojevima $\Delta \bar{\nu}$ računa se pomoću veličina dobivenih izravnim mjerenjem iz interferencijskog uzorka. Razmak susjednih energijskih nivoa jednak je razmaku susjednih linija u tripletu, tj. σ i π linije, a ovaj je jednak polovici razmaka dviju σ linija koji iznosi $\Delta \bar{\nu}/2$. Dakle, razmak susjednih energijskih nivoa izražen pomoću valnih brojeva je

$$(E = h\nu = hc/\lambda = hc\bar{\nu}) \quad \Delta E = hc\Delta \bar{\nu}/2 \quad (1)$$

Veza Zeemanovog cijepanja ΔE s magnetskim poljem B izvodi se na sljedeći način:

Potencijalna energija U elektrona u vanjskom magnetskom polju B ovisi o orijentaciji njegova dipolnog momenta u odnosu na smjer polja ($B = B_z$):

$$U = -\vec{\mu} \cdot \vec{B} = -\mu_z B \quad (2)$$

$\vec{\mu}$ je općenito komponenta ukupnog magnetnog momenta $\vec{\mu}_{tot} = \vec{\mu}_L + \vec{\mu}_S$ u smjeru kutne količine gibanja $\vec{J}$. $\vec{J}$ je očuvana veličina, tako da $\vec{\mu}_{tot}$ precesira oko nje.

$$|\vec{\mu}| = \sqrt{J(J+1)} g(L, S, J) \mu_B$$

gdje je

$$g(L, S, J) = \frac{3J(J+1) + S(S+1) - L(L+1)}{2J(J+1)} \quad (3)$$

Landé-ov faktor, a

$$\mu_B = \frac{e\hbar}{2m} \text{ Bohrov magneton.}$$

Iz (2) se vidi da različitim orijentacijama $\vec{\mu}$ prema $\vec{B}$ odgovaraju različite vrijednosti energije. Budući da su u skladu s kvantnom mehanikom komponente $\vec{\mu}$ u smjeru polja (z) kvantizirane,

$$|\vec{\mu}_H(L, S, J)| = M g(L, S, J) \mu_B \quad (4)$$

uz cjelobrojni M koji se zove magnetski kvantni broj, a može poprimiti $2J+1$ vrijednosti, od $-J, \dots, 0, \dots, +J$. Određeni energijski nivo (L, S, J) se u prisusvu magnetnog polja cijepa na $2J+1$ stanja različitih energija, a isto tako i spektralna linija koja nastaje prijelazom s tog nivoa.

Normalni Zeemanov efekt se opaža ako u prijelazu sudjeluju singletna stanja za koja je $S=0$. To znači da je $J=L$ pa u ovom efektu samo magnetizam staze dolazi do izražaja. Iz (3) se vidi da je u tom slučaju Landé-ov faktor $g=1$ pa je iz (4)

$$\begin{aligned} |\vec{\mu}_H| &= M \mu_B \\ U &= M \mu_B B \end{aligned}$$

Razlika energija dvaju susjednih nivoa dobije se za $\Delta M = 1$, pa je veličina cijepanja

$$\begin{aligned} \Delta E &= (M+1) \mu_B B - M \mu_B B \\ \Delta E &= \mu_B B \end{aligned} \quad (5)$$

Iz (1) i (5) slijedi izraz iz kojega se može izračunati vrijednost Bohrova magnetona μ_B :

$$\mu_B = hc \frac{\Delta \bar{\nu} / 2}{B}$$

Tako se mjerenjem razmaka linija u Zeemanovu tripletu nastalog cijepanjem energijskih nivoa u magnetskom polju B , može odrediti vrijednost Bohrova magnetona. Usporedba s teorijskom vrijednošću

$$\mu_B = \frac{e\hbar}{2m}$$

daje informaciju o kvaliteti eksperimentalne postavke i izvedenog mjerenja.

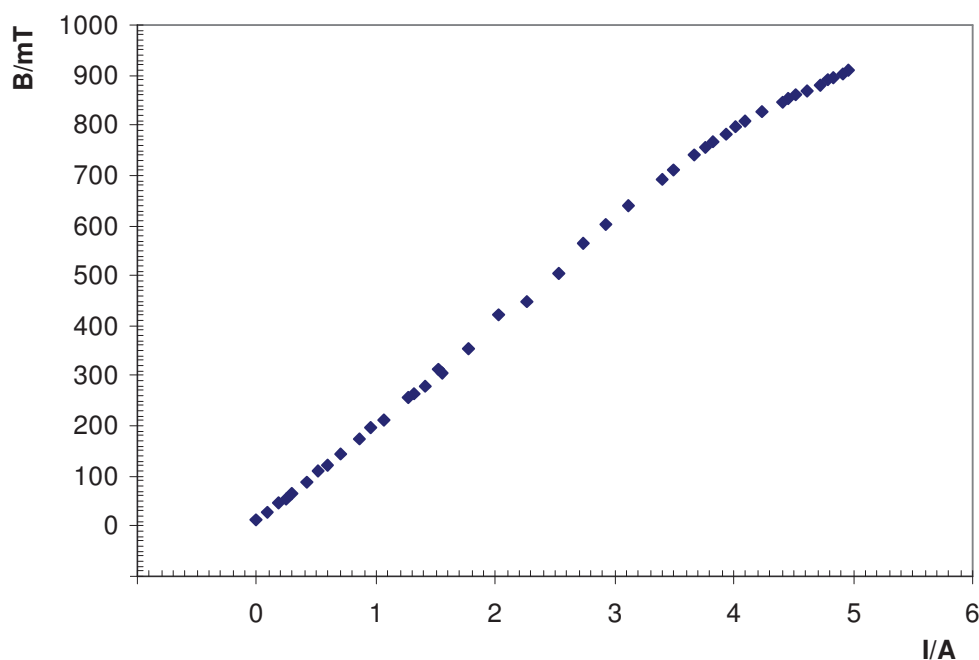
Zadaci:

1. Promatrajte transversalni Zeemanov efekt. Koristeći Fabry-Perotov interferometar izmjerite cijepanje centralne linije u dvije σ linije određivanjem razlike valnih brojeva linija u ovisnosti o magnetnoj indukciji. Grafički prikažite ovisnost razlike valnih brojeva linija o magnetnoj indukciji.
2. Na osnovu rezultata iz prethodnog zadatka, odredite vrijednost Bohrovog magnetona i pogrešku u odnosu na teorijsku vrijednost. Koji su uzroci pogreške?
3. Koji je fizikalni smisao Bohrova magnetona?

Upute:**Postava eksperimenta i podešavanje komponenata uređaja**Elektromagnet i baždarna krivulja

Elektromagnet (postavljen na rotacijski stolić) je načinjen od dviju zavojnica vezanih serijski. Unutar zavojnica umeću se probušene željezne jezgre. Jezgre se montiraju na način da se između njih ostavi razmak od 9 mm za Cd-lampu, te moraju biti dobro pričvršćene kako se ne bi pomaknule nakon uspostave magnetskog polja. Pomoću libele elektromagnet se podešava u horizontalni položaj. Cd-lampa se stavlja u procjep tako da ne dodiruje željezne jezgre i spaja se na izvor napajanja za spektralne lampe. Zavojnice elektromagneta su preko ampermetra spojene na izvor istosmjernog napona s mogućnošću njegove kontinuirane promjene. Kondenzator je vezan u paralelu s izvorom napajanja zbog izgladivanja istosmjernog napona.

Budući da se u pokusu izravno mjeri jakost struje kroz zavojnice elektromagneta, potrebno je uređaj baždariti tako da se svakoj vrijednosti struje pridruži odgovarajuća vrijednost magnetskog toka. Baždarna krivulja prikazana je na slici 3.

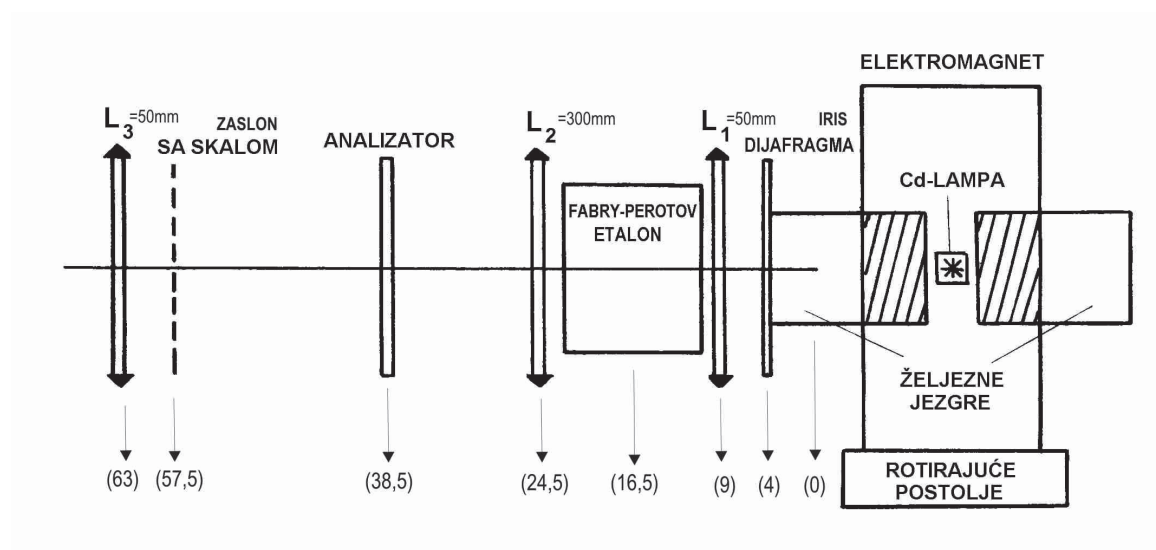


Slika 3. Gustoća magnetnog toka B u sredini procjepa (širina procjepa: 9 mm) bez Cd-lampe kao funkcija jakosti struje kroz zavojnicu.

Optička klupa

Na optičku klupu postavljeni su sljedeći elementi (slika 4.):

Naziv:	Uloga:
Cd-lampa + iris dijafragma	Izvor svjetlost.
Leća L_1 ($f_1=+5$ cm) Fabry-Perotov etalon s ugrađenom lećom L ($f=10$ cm)	Leće L_1 i L služe za dobivanje paralelnog snopa zraka svjetlosti. Etalon sadrži zamjenjiv filter koji propušta crvenu kadmijevu liniju valne duljine 643,8 nm.
Leća L_2 ($f_2=+30$ cm)	Stvara interferencijski uzorak prstenova u ravnini zaslona.
Analizator	
Zaslon sa skalom na horizontalnom klizaču	Omogućava mjerenje s preciznošću od 1/100 mm.
Leća L_3 ($f_3=+5$ cm)	



Slika 4. Shema uređaja za opažanje Zeemanovog efekta.
(Približni položaji komponenata na optičkoj klupi dani su u zagradama u cm.)

Sustav prstenova se promatra kroz L_3 i mjere se položaji prstenova u odnosu na odabranu nulu. Očitavanje se vrši u potpuno zatamnjenoj prostoriji uz upotrebu ručne svjetiljke.

Određivanje Zeemanovog cijepanja pomoću Fabry-Perotovog etalona

Fabry-Perotov etalon

Sastoji se od dvije paralelne staklene ploče presvučene s unutarnje strane djelomično propusnim metalnim slojem tako da dio svjetlosti propuštaju, a dio reflektiraju. Te dvije djelomično propusne površine (1) i (2) na slici 5. međusobno su udaljene za t . Upadna zraka koja upada pod kutom θ prema okomici na površinu ploča višestruko se reflektira između ploča (1) i (2) cijepajući se time u paralelne zrake AB, CD, EF itd. koje međusobno interferiraju.

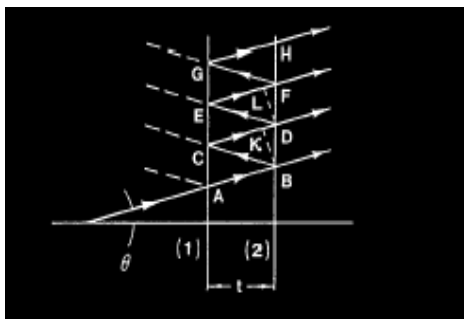
Paralelne snopove zraka koji izlaze iz etalona fokusira leća u svojoj žarišnoj ravnini (slika 6), pa se od kružnog izvora (iris dijafragma) na zaslonu dobiva kružni interferencijski uzorak (slika 7).

Za konstruktivnu interferenciju vrijedi uvjet:

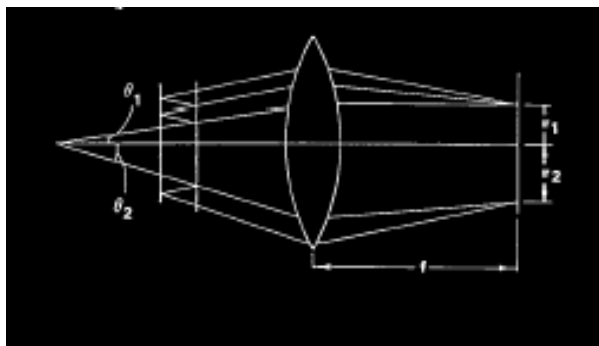
$$n\lambda = 2t \cos \theta$$

gdje je n cijeli broj. Ako je indeks loma sredstva između ploča $\mu \neq 1$, osnovna jednačba interferometra je:

$$n\lambda = 2\mu t \cos \theta$$



Slika 5. Odbijene i propuštene zrake na paralelnim površinama (1) i (2) etalona.

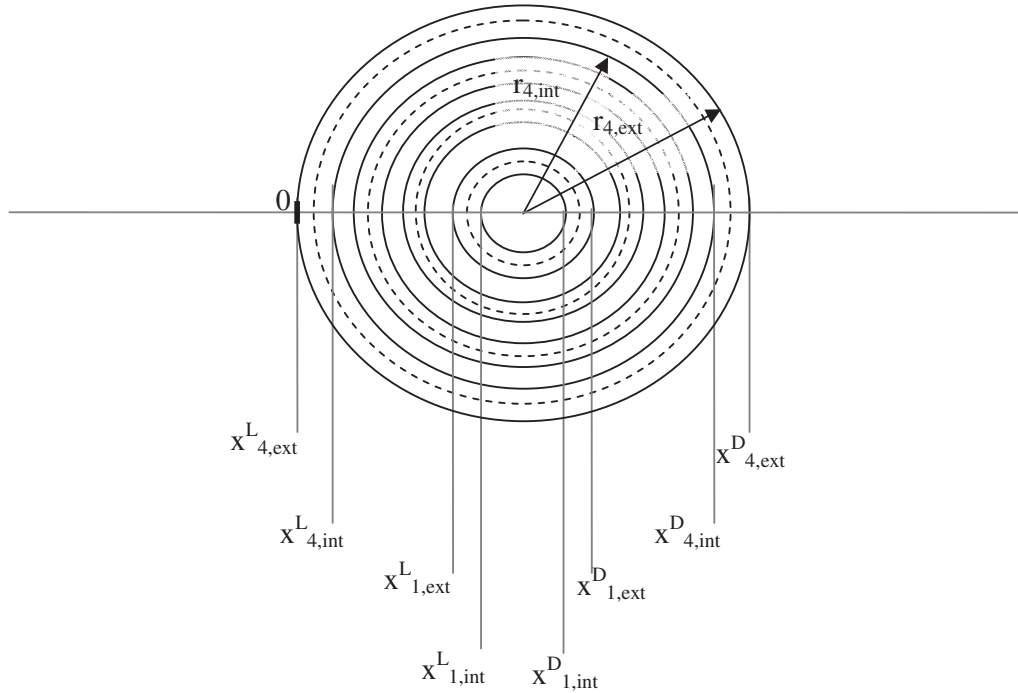


Slika 6. Fokusiranje svjetlosti koja izlazi iz Fabry-perotovog etalona. (Svjetlost koja ulazi u etalon pod kutom θ fokusira se u prsten polumjera $r=f\theta$ gdje je f žarišna daljina leće.)

U ovom eksperimentu koristimo Fabry-Perotov etalon razlučivanja od približno 300 000, što omogućava mjerenje λ do na 0,002 nm.

Opažanje i mjerenje

Uzorak interferencijskih prstenova promatra se kroz L_3 . Uzorak mora biti centriran i oštar što se konačno postiže laganim pomicanjem etalona (ulijevo ili udesno) i pomicanjem L_2 (vertikalno ili horizontalno). Jakost struje koja prolazi kroz zavojnice namjesti se neko vrijeme na 5 A. Analizator se zakreće sve dok π -linija potpuno ne nestane i pojave se dvije jasno vidljive σ -linije (slika 7). Mijenjajući jakost struje (od 0 do oko 5 A) može se vidjeti da veličina cijepanja raste s porastom jakosti magnetskog polja.



Slika 7. Uzorak interferencijskih prstenova promatran kroz leću L_3 . Pune kružnice predstavljaju σ linije, a isprekidane kružnice predstavljaju π linije koje nestaju postavljanjem analizatora u odgovarajući položaj. Dani su primjeri oznaka za prvi i četvrti prsten.

Zeemanovo cijepanje kvantitativno se izražava razlikom valnih brojeva $\Delta\bar{\nu}/2$ jedne σ linije u odnosu na centralnu liniju. Dvije σ linije (valnih duljina $\lambda > \lambda_0$ i $\lambda < \lambda_0$) razmaknute su za $\Delta\bar{\nu}$ (sl. 1., sl. 7), pri čemu iz teorije Fabry-Perotova etalona slijedi izraz za $\Delta\bar{\nu}$:

$$\Delta\bar{\nu} = \frac{1}{2\mu t} \left(\frac{r_{p+1,ext}^2}{r_{p+1,ext}^2 - r_{p,ext}^2} - \frac{r_{p+1,int}^2}{r_{p+1,int}^2 - r_{p,int}^2} \right).$$

Uzme li se u obzir da je indeks loma sredstva između ploča u etalonu $\mu=1$, slijedi

$$\Delta \bar{v} = \frac{1}{2t} \frac{\delta}{\Delta}.$$

Veličine Δ i δ su funkcije polumjera prstenova koji pripadaju različitim σ komponentama Zeemanovog tripleta i određuju se iz interferencijskog uzorka (sl. 7).
Udaljenost ploča je $t = 3 \text{ mm}$.

Određivanje veličina Δ i δ

U interferencijskom uzorku se opažaju četiri prstena, $p=1, 2, 3, 4$. Mjere se položaji prstenova x u odnosu na odabrani nulti položaj kao na sl. 7.

Značenje simbola:

$$x_{p,ext}^L \quad x_{p,int}^L \quad x_{p,int}^D \quad x_{p,ext}^D$$

p – redni broj prstena, brojeći od središta prema periferiji

ext – vanjska komponenta prstena (odgovara sigma komponenti manje valne duljine, $\lambda < \lambda_0$)

int – unutarnja komponenta prstena (odgovara sigma komponenti veće valne duljine, $\lambda > \lambda_0$)

L – lijeva strana u odnosu na središte prstenastog uzorka

D – desna strana u odnosu na središte prstenastog uzorka

Polumjeri prstena određuju se iz izmjerenih položaja na slijedeći način:

$$r_{p,int} = \frac{x_{p,int}^D - x_{p,int}^L}{2}$$

$$r_{p,ext} = \frac{x_{p,ext}^D - x_{p,ext}^L}{2}$$

Veličina Δ je razlika kvadrata vanjskih, odnosno unutarnjih komponenti susjednih prstenova:

$$\Delta_{ext}^{p+1,p}(r_{p+1}, r_p)_{ext} = r_{p+1,ext}^2 - r_{p,ext}^2$$

$$\Delta_{int}^{p+1,p}(r_{p+1}, r_p)_{int} = r_{p+1,int}^2 - r_{p,int}^2$$

Veličina δ je razlika kvadrata vanjske i unutarnje komponente p -tog prstena:

$$\delta_{ext,int}^p(r_{p,ext}, r_{p,int}) = r_{p,ext}^2 - r_{p,int}^2$$

Srednje vrijednosti Δ i δ za četiri prstena računaju se na sljedeći način:

$$\Delta = \frac{1}{4} (\Delta_{int}^{2,1} + \Delta_{ext}^{2,1} + \Delta_{int}^{4,3} + \Delta_{ext}^{4,3})$$

$$\delta = \frac{1}{4} (\delta_{ext,int}^1 + \delta_{ext,int}^2 + \delta_{ext,int}^3 + \delta_{ext,int}^4).$$

Mjerenja treba napraviti za nekoliko različitih vrijednosti jakosti struje. Za svaki skup mjerenja vrijednosti se unose u priložene tablice.

Tablica 1.

I/A	$\frac{r_{4,ext}}{mm}$	$\frac{r_{4,int}}{mm}$	$\frac{r_{3,ext}}{mm}$	$\frac{r_{3,int}}{mm}$	$\frac{r_{2,ext}}{mm}$	$\frac{r_{2,int}}{mm}$	$\frac{r_{1,ext}}{mm}$	$\frac{r_{1,int}}{mm}$

Tablica 2.

I/A	$\frac{r_{4,ext}^2}{mm^2}$	$\frac{r_{4,int}^2}{mm^2}$	$\frac{r_{3,ext}^2}{mm^2}$	$\frac{r_{3,int}^2}{mm^2}$	$\frac{r_{2,ext}^2}{mm^2}$	$\frac{r_{2,int}^2}{mm^2}$	$\frac{r_{1,ext}^2}{mm^2}$	$\frac{r_{1,int}^2}{mm^2}$

Tablica 3.

I/A	$\Delta_{ext}^{2,1} = r_{2,ext}^2 - r_{1,ext}^2$	$\Delta_{ext}^{3,2} = r_{3,ext}^2 - r_{2,ext}^2$	$\Delta_{ext}^{4,3} = r_{4,ext}^2 - r_{3,ext}^2$	$\Delta_{int}^{2,1} = r_{2,int}^2 - r_{1,int}^2$	$\Delta_{int}^{3,2} = r_{3,int}^2 - r_{2,int}^2$	$\Delta_{int}^{4,3} = r_{4,int}^2 - r_{3,int}^2$

Tablica 4.

I/A	$\delta_{ext,int}^1 = r_{1,ext}^2 - r_{1,int}^2$	$\delta_{ext,int}^2 = r_{2,ext}^2 - r_{2,int}^2$	$\delta_{ext,int}^3 = r_{3,ext}^2 - r_{3,int}^2$	$\delta_{ext,int}^4 = r_{4,ext}^2 - r_{4,int}^2$

Tablica 5.

I/A	$\Delta = \frac{1}{4}(\Delta_{\text{int}}^{2,1} + \Delta_{\text{ext}}^{2,1} + \Delta_{\text{int}}^{4,3} + \Delta_{\text{ext}}^{4,3})$	$\delta = \frac{1}{4}(\delta_{\text{ext,int}}^1 + \delta_{\text{ext,int}}^2 + \delta_{\text{ext,int}}^3 + \delta_{\text{ext,int}}^4)$

Konačni rezultati mogu se pregledno prikazati u tablici 7. Ovisnost $\Delta\bar{\nu}/2$ o gustoći magnetnog toka B može se prikazati i grafički iz čega se i nalazi vrijednost za $\Delta\bar{\nu}/2B$.

Tablica 6.

I/A	B/mT	$\Delta\bar{\nu} / m^{-1}$	$(\Delta\bar{\nu} / 2) / m^{-1}$

INVENTAR:

Naziv	Količina
Elektromagnet, bez jezgre	1
Željezna jezgra (probušena)	2
Rotacioni stolić	1
Regulacijski transformator 25VAC / 20 VDC, 12 A	1
Kondenzator, elektrolitski 22 mF	1
Ampermetar	1
Napajanje za spektralnu lampu 230 V / 50 Hz	1
Kadmijeva lampu	1
Optička klupa s nogicama	1
Nosači na optičkoj klupi	5
Nosač na optičkoj klupi	1
Iris dijafragma	1
Fabry-Perotov interferometar	1
Filtar za liniju 643,8 nm	1
Držači leća	4
Leća, $f = +50\text{mm}$	2
Leća, $f = +300\text{mm}$	1
Klizač	1
Zakretni nosač	1
Analizator	1
Zaslon sa skalom za mjerenje na držaču	1
Libela	1
Spojne žice	
Kamera + software	1
Računalo	1

Literatura

1. Erceg N., *Magistarski rad: Zeemanov efekt - metodičko oblikovanje eksperimenta*, Voditelj: Kotnik-Karuza D., Fakultet prirodoslovno-matematičkih znanosti i kineziologije Sveučilišta u Splitu, 2006.
2. Erceg N., Kotnik-Karuza D., *Zeemanov efekt - metodičko oblikovanje eksperimenta*, Zbornik radova VII. hrvatskog simpozija o nastavi fizike, HFD, 2005, str.49-54.
3. Haken H., Wolf H.C., *Atomic and Quantum Physics*, 2nd ed., Springer-Verlag, 1984.
4. Halliday D., Resnick R., Walker J., *Fundamentals of Physics*, 6th ed., J.Wiley and Sons Inc., New York, 2003.
5. Hugh D. Young, Roger A. Freedman, *University Physics*, 9th Edition, Addison-Wesley Publishing Company, Inc., 1996.
6. Sarta Dekovic M., Kosic C., Kotnik-Karuza D., *Hall effect as experimental proof of positive charge carriers in semiconductors*, GIREP-EPEC Conference: *Frontiers of Physics education* (CD)/ R. Jurdana-Šepic, V. Labinac, M. Žuvc-Butorac, A. Sušac (ur.)/ Opatija, 2007
7. Sarta Dekovic M., Kosic C., Kotnik-Karuza D., *Pozitivni nosioci elektriciteta u poluvodicu*, Osmi hrvatski simpozij o nastavi fizike: *Nastava fizike za prirodnoznanstvenu pismenost* / P. Pecina (ur.) / Novi Vinodolski, HFD, 2007. str.105-108
8. Seeger K., *Semiconductor Physics*, Springer 1991
9. Šips V., *Uvod u fiziku cvrstog stanja*, Šk. Knjiga Zagreb, 1991.
10. Thorne A., Litzén U., Johansson S., *Spectrophysics*, Springer-Verlag, 1999
11. University Laboratory Experiments PHYSICS 1-5, PHYWE AG, Göttingen, 1995 (PHYWE Laboratory Experiments: LEP 5.1.9; LEP 5.3.2; LEP 5.1.5)
12. <http://www.phywe.de/>(PHYWE Laboratory Experiments: LEP 5.1.03; LEP 5.3.01; LEP 5.1.10)