

# Zakretanje ravnine polarizacije svjetlosti pomoću Faradayevog efekta

---

Popović, Luka

Master's thesis / Diplomski rad

2021

Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj: **University of Zagreb, Faculty of Science / Sveučilište u Zagrebu, Prirodoslovno-matematički fakultet**

Permanent link / Trajna poveznica: <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:217:855588>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2024-11-04**



Repository / Repozitorij:

[Repository of the Faculty of Science - University of Zagreb](#)



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
PRIRODOSLOVNO-MATEMATIČKI FAKULTET  
FIZIČKI ODSJEK

Luka Popović

ZAKRETANJE RAVNINE POLARIZACIJE  
SVJETLOSTI POMOĆU FARADAYEVOG  
EFEKTA

Diplomski rad

Zagreb, 2021.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
PRIRODOSLOVNO-MATEMATIČKI FAKULTET  
FIZIČKI ODSJEK

SMJER: FIZIKA - NASTAVNIČKI

**Luka Popović**

Diplomski rad

# **Zakretanje ravnine polarizacije svjetlosti pomoću Faradayevog efekta**

Voditelj diplomskog rada: izv. prof. dr. sc. Mario Novak

Ocjena diplomskog rada: \_\_\_\_\_

Povjerenstvo: 1. izv. prof. dr. sc. Mario Novak

2. izv. prof. dr. sc. Željko Skoko

3. doc. dr. sc. Maja Planinić

Datum polaganja: 30.9.2021.

Zagreb, 2021.

*(Zahvaljujem se mentoru izv. prof. . dr. sc. Mariju Novaku što mi je predložio dotičnu temu kao izbor diplomskog rada te na svim korisnim savjetima koje mi je dao prilikom same izrade rada. Također, zahvaljujem se asistentu Bruni Gudcu na korisnim savjetima prilikom mjerenja te na mnogobrojnom otključavanju praktikuma bez kojeg ne bi bila moguća mjerenja.)*

## Sažetak

Neke optički neaktivne tvari mogu postati optički aktivne u prisustvu magnetskog polja. Elektromagnetsko zračenje se prolaskom kroz transparentne tvari s velikom dielektričnom permitivnošću u prisustvu vanjskog magnetskog polja, kao posljedica optičke aktivnosti, očituje u zakretanju ravnine polarizacije što je poznato kao Faradayev efekt. Mjereni su kutovi zakretanja ravnine polarizacije svjetlosti valnih duljina 405 nm, 450 nm, 532 nm i 650 nm za kristale optičkog stakla (kvarc), kalcijevog klorida (KCl), natrijevog klorida (NaCl) i kalijevog bromida (KBr) te za maslinovo ulje Olivenöl – Roth. Kut zakreta ravnine polarizacije svjetlosti proporcionalan je s magnetskim poljem, duljinom uzorka te konstantom poznatom kao Verdetova konstanta. Cilj rada bio je izmjeriti Verdetovu konstantu za gore spomenute materijale te usporediti eksperimentalno dobivene vrijednosti s eventualnim teorijskim vrijednostima.

Ključne riječi: optička aktivnost, polarizacija svjetlosti, zakretanje ravnine polarizacije, Faradayev efekt, Verdetova konstanta, optičko staklo (kvarc), kalijev klorid (KCl), natrijev klorid (NaCl), kalijev bromid (KBr), maslinovo ulje

# Rotation of light polarization plane by Faraday effect

## Abstract

Some optically inactive substances can become optically active in the presence of a magnetic field. Electromagnetic radiation, by passing through transparent substances with a high dielectric permittivity in the presence of an external magnetic field, as a consequence of optical activity, is manifested in the rotation of the plane of polarization known as the Faraday effect. The angles of rotation of the plane of polarization of light of wavelengths 405 nm, 450 nm, 532 nm and 650 nm were measured for the crystals made of flint glass, calcium chloride (KCl), sodium chloride (NaCl) and potassium bromide (KBr), and for olive oil Olivenöl - Roth. The angle of rotation of the plane of polarization of light is proportional to the magnetic field, the length of the sample, and a constant known as the Verdet constant. The goal of this thesis was to measure the Verdet constant for the above-mentioned materials and to compare the experimentally obtained values with possible theoretical values/models.

Keywords: optical activity, light polarization, polarization plane rotation, Faraday effect, Verdet constant, flint glass, potassium chloride (KCl), sodium chloride (NaCl), potassium bromide (KBr), olive oil

## Sadržaj

1	Uvod .....	8
2	Teorijski dio .....	11
2.1	Magnetsko-optički efekt (uvod) .....	12
2.2	Interakcija elektromagnetskog vala i tvari u odsustvu magnetskog polja .....	12
2.3	Interakcija elektromagnetskog vala i optički transparentne tvari .....	14
2.4	Interakcija elektromagnetskog vala i tvari u prisustvu magnetskog polja .....	16
2.5	Interakcija magnetskog polja i tvari .....	18
3	Eksperimentalne metode .....	22
3.1	Eksperimentalni postav .....	22
3.2	Mjerenje magnetskog polja .....	24
3.2.1	Baždarne krivulje .....	24
3.2.2	Saturacija (zasićenje) elektromagneta .....	30
3.2.3	Numeričke prilagodbe .....	32
3.3	Mjerenje kuta zakrivljenosti ravnine polarizacije .....	33
3.3.1	Opis lasera .....	33
3.3.2	Opis polarizatora .....	35
3.3.3	Opis fotootpornika .....	38
3.3.4	Opis materijala .....	39
4	Rezultati i diskusija .....	44
4.1	Rezultati .....	44
4.1.1	Ovisnost kuta zakreta polarizirane svjetlosti i srednjeg magnetskog polja .....	44
4.1.2	Ovisnost Verdetove konstante o valnoj duljini svjetlosti .....	48
4.2	Diskusija .....	53
4.2.1	Kut zakreta polarizirane svjetlosti .....	53
4.2.2	Efekt promjene smjera kuta zakreta polarizirane svjetlosti za maslinovo ulje .....	54
4.2.3	Verdetova konstanta .....	55
4.2.4	Ovisnost Verdetove konstante o vrsti materijala – modeli kroz povijest ...	57
4.2.4.1	Verdetov model .....	57
4.2.4.2	Mawxellova teorija vrtloga .....	58

4.2.4.3	Bennett – Stern model .....	59
4.2.5	Lantanoidi i Verdetova konstanta .....	59
5	Metodički dio .....	62
5.1	Uvod .....	62
5.2	Fizikalne ideje i nastavne metode .....	63
5.3	Predmetni i međupredmetni ishodi učenja .....	64
5.4	Tijek nastavnog sata .....	64
6	Zaključak .....	69
	Literatura .....	72



## 1. Uvod

Interakcija svjetla i tvari jedan je od primarnih sudionika u ljudskoj percepciji. Svjetlost interagira s tvari i kad izgleda da slobodno prolazi kroz nju, te pritom može doći do renormalizacije brzine svjetlosti u tvari što je posljedica interakcije elektromagnetskog vala i elektronskog oblaka atoma ili efekta ogiba i refleksije što je također posljedica interakcije fotona (elektromagnetskog vala) i elektrona u materijalu. Svjetlost pokazuje zanimljivo svojstvo u interakciji s tvari putujući kroz optički aktivne materijale u kojima dolazi do rotacije ravnine polarizacije oko optičke osi. Optička aktivnost vezana uz promjenu polarizacije svjetlosti javlja se u kiralnim materijalima, onima kojima nedostaje mikroskopska zrcalna simetrija [1]. Jedan od takvih spojeva je i kvarc ( $\text{SiO}_2$ ). Međutim, efekti rotacije polarizirane svjetlosti nisu ograničeni samo na strukturno kiralne spojeve. Brojni znanstvenici su kroz povijest željeli istražiti utjecaj električnog tj. magnetskog polje na svjetlost, pa je tako i Michael Faraday 13. rujna 1845. došao do jednog od svojih temeljnih otkrića. Stavivši komad teškog stakla u jako magnetsko polje, propustio je linearno polariziranu zraku svjetlosti kroz staklo paralelno sa smjerom magnetskog polja i otkrio da je ravnina polarizacije svjetlosti malo zakrenuta [2]. Taj se fenomen od tada naziva različitim imenima, poput magnetsko-optičke rotacije ili magnetske kružne polarizacije, ali je sada poznat jednostavno kao *Faradayev efekt*. Otkriće nije došlo Faradayu iz vedra neba. Jedanaest godina prije toga prethodio je niz pokušaja otkrivanja neke veza između električne struje i svjetlosti [3]. Faradayevo temeljno uvjerenje u jedinstvo različitih sila prirode ostalo je nepokolebljivo godinama pa ga je u kolovozu 1845. pismo Williama Thomsona navelo da ponovi svoje stare eksperimente [4]. Kako je i dalje bio u nemogućnosti otkrivanja bilo kakvog djelovanja električne struje na svjetlost odlučio je pronaći rješenje u magnetskom djelovanju, a uspjeh je uslijedio gotovo odmah [5]. Bio je očito svjestan velike teorijske važnosti novog fenomena i njegova legendarna skromnost nije ga spriječila da to kaže: [6]

*„Tako se, po prvi put mislim, uspostavlja pravi, izravan odnos i ovisnost između svjetla i magnetske i električne sile; i time je učinjen veliki dodatak činjenicama i razmatranjima koja nastoje dokazati da su sve prirodne sile povezane zajedno i da imaju zajedničko podrijetlo.“*

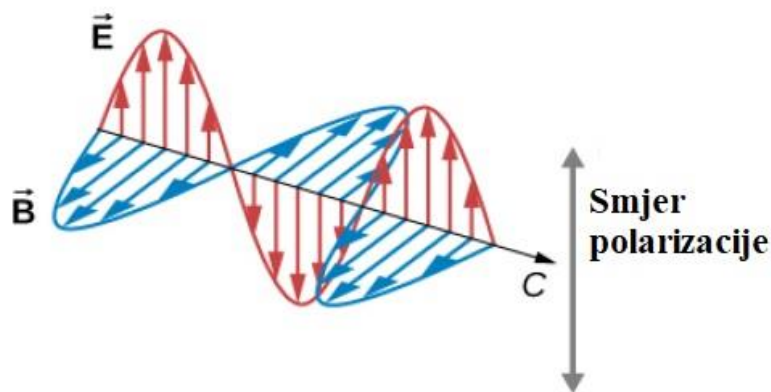
Faradayevo je otkriće doista bilo važno. Uspostavio je novu temeljnu interakciju između elektromagnetizma, svjetla i materije, a imao je također i sugestivan utjecaj na umove ljudi koji će biti odlučujući za razvoj elektromagnetske teorije.

Iz klasične elektrodinamike znamo da je naboj okružen električnim poljem koji u pokretu stvara magnetsko polje. Osim toga, ubrzani naboji emitiraju elektromagnetsko zračenje, dok zračenje ubrzava nabijene čestice. Maxwellove jednadžbe ujedinjuju sve te pojave opisujući dinamiku slobodnih naboja i struja stvarajući pritom temelj klasične elektromagnetske teorije i interakcije svijetlosti i tvari [7]. Mehanizam interakcije između elektromagnetskog zračenja i tvari temelji se na interakciji između oscilirajućeg električnog i magnetskog polja elektromagnetskog zračenja s električnim ili magnetskim dipolnim momentom atoma ili molekule u tvari. Dakle, molekularni sustav može osjetiti silu kao posljedicu elektrostatične interakcije između njegovog električnog dipolnog momenta i oscilirajućeg električnog polja elektromagnetskog zračenja. S druge strane, interakcije između permanentnog magnetskog momenta jezgre ili elektrona i magnetskog polja elektromagnetskog zračenja temelj je nuklearne magnetske rezonancije, rezonancije elektronskog spina i srodne spektroskopske tehnike. Prema tome, interakcija između atoma ili molekula i elektromagnetskog zračenja zahtjeva postojanje permanentnog električnog ili magnetskog dipola ili trenutno stvaranje električnog dipola uslijed unutarnjih gibanja. Magnituda ove interakcije ovisi o veličini molekularnog dipolnog momenta [8].

*Spektroskopija* je znanstvena djelatnost koja se bavi proučavanjem interakcije elektromagnetskog zračenja i tvari koje uključuju apsorpciju, emisiju ili raspršenje zračenja za sustav koji se proučava. Atomski i molekularni spektri mogu pružiti detaljne informacije o strukturi i kemijskim svojstvima sustava. Spektroskopske tehnike su jedan od glavnih izvora informacija u molekularnoj geometriji koja uključuje dobivanje duljina veza, kutova veza te torziju kutova, a također mogu dati značajne informacije o molekularnoj simetriji, raspodjeli energetske razine, gustoćama elektrona ili električnim i magnetskim svojstvima [9]. Spektroskopija je bila bitan alat u razvoju modela za atomsku i molekularnu strukturu, što je potaknulo znanstvenike da oplemene postojeće modele kako bi mogli precizno reproducirati eksperimentalno promatran razmak između energetske stanja. Dramatičan primjer toga je rađanje kvantne teorije (koja objašnjava diskretne prijelaze elektrona u atomima) ili otkriće elementa helija u spektru Sunca, znatno prije nego što je pronađen na Zemlji [10]. Danas se spektroskopski alati rutinski koriste u kvantitativnoj i kvalitativnoj kemijskoj analizi i u karakterizaciji novih molekula i materijala te igraju bitnu ulogu u različitim područjima kao što je razrada i provjera teorijskih modela, kemija sinteze, proučavanje mehanizma reakcije ili biokemija i znanost o materijalima [11].

Svjetlost je jedna vrsta elektromagnetskih valova. Elektromagnetski valovi su transverzalni valovi koji se sastoje od električnog i magnetskog polja koje osciliraju okomito

na smjer širenja vala ([slika 1.](#)). Međutim, općenito, nema specifičnih smjerova oscilacija električnog i magnetskog polja; vibriraju u bilo kojoj nasumično orijentiranoj ravnini okomitoj na smjer širenja u kojoj su električno i magnetsko polje uvijek međusobno okomiti. *Polarizacija* je atribut koja daje oscilacijama vala određeni relativni smjer na smjer širenja vala. Za valove koji imaju takav smjer kaže se da su polarizirani [12].



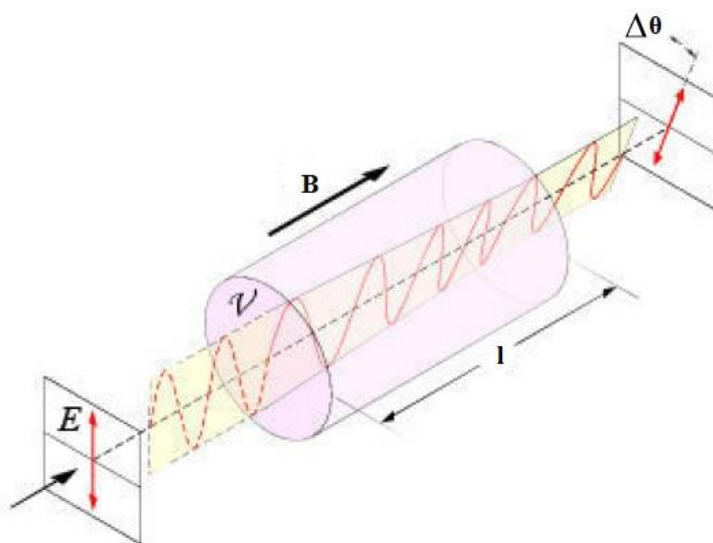
**Slika 1.** Elektromagnetski val, poput svjetlosti, transverzalan je val. Električno ( $\vec{E}$ ) i magnetsko ( $\vec{B}$ ) polje su okomiti na smjer širenja vala. Smjer polarizacije vala je u ravnini titranja električnog polja.[12]

*Faradayev efekt* ima širok raspon primjena uključujući filtriranje [13] i ograničavanje povratnih informacija u optičkim sustavima [14]; također utječe na svjetlost koja se širi međuzvezdanim medijem [15]. Efekt se javlja kad magnetsko polje paralelno sa smjerom širenja svjetlosti izaziva kružnu dvolomnost u mediju koja uzrokuje rotaciju linearne polarizirane svjetlosti koja putuje kroz medij [16]. Veličina ove rotacije ( $\theta$ ) može se izraziti kao  $\Delta\theta = V(\lambda)\bar{B}l$ , gdje je  $\bar{B}$  srednja jakost magnetskog polja,  $l$  duljina puta koju svjetlost prođe kroz materijal, a  $V$  je faktor poznat kao *Verdetova* konstanta koja zapravo nije konstanta već ovisi o valnoj duljini svjetlosti[16]. Verdetova konstanta je specifična za svaki pojedini materijal te je obično mala, svega nekoliko rad/Tm, no postoje materijali kao što je  $Tb_3Ga_5O_{12}$  (TGG) koji ima Verdetovu konstantu veću od 100 rad/Tm te se koriste u optičkoj fizici, fizici lasera te za mjerenje vrlo jakih impulsnih magnetskih izboja [17].

## 2. Teorijski dio

### 2.1. Magnetsko-optički efekt (uvod)

Elektromagnetski val međudjeluje s tvari pod utjecajem magnetskog polja. Magnetsko polje mijenja optička svojstva sredstva [18]. Jedan od najbitnijih magnetsko-optičkih efekata jest Faradayev efekt kojeg definira rotacija ravnine polarizacije optičkog snopa pod utjecajem magnetskog polja paralelnog sa smjerom širenja optičkog snopa u sredstvu (slika 2.).



**Slika 2.** Shematski prikaz Faradayevog efekta. Linearno polarizirana svjetlost u smjeru električnog polja  $\vec{E}$ , frekvencije  $\nu$  prolazi kroz transparentno sredstvo dužine  $l$ . Na sredstvo djeluje magnetsko polje  $\vec{B}$  u smjeru paralelno sa širenjem elektromagnetskog vala. Zbog djelovanja magnetskog polja dolazi do rotacije ravnine polarizacije te je na zaslonu prikazan otklon kuta rotacije  $\Delta\theta$ . [18]

Polarizacija je jedan od najpoznatijih fenomena koji podržava valni karakter svjetlosti. U skladu s tim, svjetlost je transverzalni elektromagnetski val koji može biti linearno ili eliptično/kružno polariziran. Linearno polarizirana svjetlost je val s vektorom električnog polja  $\vec{E}$  koji oscilira uz zadani smjer okomit na smjer širenja vala. U eliptičnoj polariziranoj svjetlosti, električno polje se rotira tijekom širenja opisujući elipsu u ravnini okomitoj na smjer širenja vala [18].

Elektromagnetski val sastoji se od električne i magnetske komponente koje titraju okomito jedna na drugu i okomito na smjer širenja vala čije se titranje može opisati sinusoidalnim funkcijama:

$$E(z, t) = E_0 \cos(kz - \omega t + \delta) \hat{x} \quad (1)$$

$$B(z, t) = B_0 \cos(kz - \omega t + \delta) \hat{y} \quad (2)$$

$\mathbf{E}$  i  $\mathbf{B}$  su vektorske funkcije električnog odnosno magnetskog polja. Jednadžbe (1) i (2) pretpostavljaju širenje vala u  $+z$  smjeru gdje električno polje titra u  $+x$ , a magnetsko u  $+y$  smjeru.  $E_o$  i  $B_o$  predstavljaju amplitude titranja električnog tj. magnetskog polja,  $k$  je valni vektor ( $k = \frac{2\pi}{\lambda}$ , gdje je  $\lambda$  valna duljina vala),  $\omega$  predstavlja kružnu frekvenciju titranja vala ( $\omega = \frac{2\pi}{T}$ , gdje je  $T$  period titranja vala) i  $\delta$  predstavlja fazni pomak vala [18].

Koristeći *Eulerovu* formulu,

$$e^{i\theta} = \cos\theta + i\sin\theta \quad (3)$$

električno polje možemo zapisati u kompleksnom izrazu kao:

$$\mathbf{E} = E_o[e^{i(kz-\omega t)}] \hat{x} \quad (4)$$

Bilo koji linearno polarizirani val može se promatrati kao superpozicija dviju kružno polariziranih komponenti, lijevo-kružno polarizirane (LCP – eng. *left circular polarization*) i desno-kružno polarizirane (RCP – eng. *right circular polarization*), amplitude  $E_L = E_R = \frac{E}{2}$ .

Pretpostavimo linearno polariziranu svjetlost koja prolazi kroz sredstvo formirano od slobodnih elektrona i fiksnih pozitivnih centara, čija distribucija ispunjava lokalni uvjet neutralnosti naboja [18]. Linearno polarizirani val može se promatrati kao superpozicija dviju gore spomenutih kružno polariziranih komponenti, LCP i RCP:

$$\mathbf{E} = E_o[e^{i(k+z-\omega t)}] \hat{x}_r + E_o[e^{i(k-z-\omega t)}] \hat{x}_l \quad (5)$$

Očigledno, električno polje LCP tjerat će elektrone u lijevo kružno gibanje oko fiksnog pozitivnog centra, dok će električno polje RCP tjerati elektrone u desno kružno gibanje (alternativno, oscilacije elektrona pod utjecajem linearne polarizirane svjetlosti mogu se rastaviti na dvije suprotne kružne komponente). Polumjer kružne putanje uspostavljen je ravnotežom sila koje djeluju na elektron uz pretpostavku da par elektron-pozitivan centar tvori rotirajući električni dipol s privlačnom povratnom silom (nametnutom uvjetom neutralnosti),  $F_a$ , proporcionalnom s polumjerom  $r$  ( $F_a = -kr$ ) gdje je  $k$  konstanta povratne sile [18].

## 2.2 Interakcija elektromagnetskog vala i tvari u odsustvu magnetskog polja

U odsutnosti magnetskog polja, jednadžba gibanja glasi:

$$e\mathbf{E}_{L,R} + k\mathbf{r}_{L,R} = m\omega^2\mathbf{r}_{L,R} \quad (6)$$

gdje izraz  $e\mathbf{E}_{L,R}$  odgovara električnom polju elektromagnetskog vala koju osjećaju elektroni,  $-k\mathbf{r}_{L,R}$  je izraz za privlačnu povratnu silu dok je  $m\omega^2\mathbf{r}_{L,R}$  izraz za *centripetalnu silu*.  $E$  predstavlja amplitudu električnog polja,  $e$  elementarni naboj elektrona, a  $\mathbf{r}_{L,R}$  radijus orbite elektrona za LCP i RCP svjetlost [18].

$$\text{Uz izraz } \frac{k}{m} = \omega_0^2, \quad (7)$$

što predstavlja prirodnu frekvenciju, konstantu ovisnu o vrsti materijala, dobiva se izraz za radijus koji je isti za LCP i RCP:

$$\mathbf{r}_{L,R} = \frac{eE/2m}{(\omega^2 - \omega_0^2)}, \quad (\omega > \omega_0) \quad (8)$$

Također, zbog utjecaja električnog polja na neutralni atom *dielektrika* (izolatora) dolazi do induciranja *dipolnog momenta*  $\mathbf{p}_i$  ( $i$  predstavlja  $i$ -ti elektron) koji je proporcionalan s radijusom kružne orbite:

$$\mathbf{p}_i = e\mathbf{r}_{L,R} \quad (9)$$

Takvi atomi postaju *polarizirani* te je izraz za *polarizaciju* definiran kao:

$$\mathbf{P} = N\mathbf{p}_i \quad (10)$$

gdje  $N$  predstavlja broj dipola po jedinici volumena. Također, polarizacija se može zapisati kao:

$$\mathbf{P} = \varepsilon_0\chi_e\mathbf{E} \quad (11)$$

gdje je  $\varepsilon_0$  (*električna*) *permitivnost vakuuma*, a  $\chi_e$  *električna susceptibilnost*.

$$\text{Električna permitivnost vakuma se definira kao } \varepsilon_0 \equiv \frac{1}{c^2\mu_0} \quad (12)$$

gdje je  $c$  brzina svjetlosti, a  $\mu_0$  (*magnetska*) *permeabilnost vakuuma*, te iznosi [18]

$$\varepsilon_0 = \frac{1}{3 \cdot 10^8 \frac{\text{m}}{\text{s}} \cdot 4\pi \cdot 10^{-7} \frac{\text{H}}{\text{m}}} = 8.85 \cdot 10^{-12} \frac{\text{C}^2}{\text{N} \cdot \text{m}^2}$$

Preko Gaussovog zakona dolazi se do izraza za *električni pomak*:

$$\mathbf{D} = \varepsilon_0\mathbf{E} + \mathbf{P} = \varepsilon_0\mathbf{E} + \varepsilon_0\chi_e\mathbf{E} = \varepsilon_0(1 + \chi_e)\mathbf{E} \quad (13)$$

$$\text{koji se definira kao } \mathbf{D} \equiv \varepsilon\mathbf{E} \quad (14)$$

$$\text{gdje je } \varepsilon = \varepsilon_0(1 + \chi_e), \quad (15)$$

pri čemu  $\varepsilon$  označava (*električnu*) *permitivnost*.

$$\text{Uz definiciju } \textit{relativne permitivnosti} \varepsilon_r \equiv 1 + \chi_e \quad (16)$$

$$\text{dolazi se do izraza: } \varepsilon = \varepsilon_0\varepsilon_r \quad (17)$$

Nadalje, preko jednadžbe (13), (10), (9) i (8) električni pomak može se zapisati kao

$$\mathbf{D} = \varepsilon_0\mathbf{E} + \mathbf{P} = \varepsilon_0\mathbf{E} + N\mathbf{p}_i = \varepsilon_0\mathbf{E} + Ne\mathbf{r}_{L,R} = \varepsilon_0\mathbf{E} + \frac{Ne^2\mathbf{E}/2m}{(\omega^2 - \omega_0^2)} \quad (18)$$

te se dolazi do izraza za *dielektričnu funkciju*:

$$\varepsilon(\omega) = \varepsilon_0 \left( 1 + \frac{Ne^2 E / 2m\varepsilon_0}{(\omega^2 - \omega_0^2)} \right) \quad (19)$$

Dielektrična funkcija ista je za LCP i RCP kružno polarizirani val.

Pritom se *indeks loma* može definirati kao:

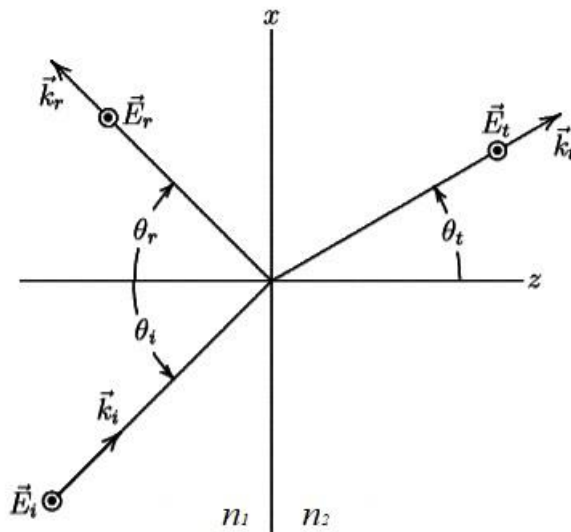
$$n^2 \equiv \varepsilon_r \mu_r \quad (20)$$

gdje  $\mu_r$  predstavlja *relativnu (magnetsku) permeabilnost* koja za nemagnetične materijale iznosi 1, te izraz za indeks loma postaje:

$$n_{L,R}^2 = \varepsilon_r = \frac{\varepsilon}{\varepsilon_0} = 1 + \frac{Ne^2 E / 2m\varepsilon_0}{(\omega^2 - \omega_0^2)} \quad (21)$$

### 2.3. Interakcija elektromagnetskog vala i optički transparentne tvari

Na slici 3. prikazan je prijelaz elektromagnetskog vala (svjetlost) između dva sredstva. Prilikom prijelaza dolazi do refleksije i loma svjetlosti.



**Slika 3.** Upadni elektromagnetski val dolazi na granicu dva sredstva.  $X$  os predstavlja granicu, a  $n_1$  i  $n_2$  predstavljaju indeks loma prvog odnosno drugog sredstva. Dio vala se pritom reflektira u smjeru drugog kvadranta, dok se drugi dio lomi u smjeru prvog kvadranta. Pritom  $E_i$ ,  $E_r$ ,  $E_t$  označavaju električno polje upadnog, reflektiranog i lomljenog vala, a  $k_i$ ,  $k_r$ ,  $k_t$  označavaju valne vektore upadnog, reflektiranog i lomljenog vala. Kutevi  $\theta_i$ ,  $\theta_r$ ,  $\theta_t$  prikazuju upadni, reflektirani i lomljeni kut. [19]

Val se na granici između dva sredstva reflektira po *zakonu o refleksiji* koji glasi [19]

$$\theta_i = \theta_r \quad (22)$$

te lomi po Snellovom zakonu [19]:

$$n_1 \sin \theta_i = n_2 \sin \theta_t \quad (23)$$

Pritom *koeficijent refleksije* (reflektancija eng. *reflectance*)  $R$  opisuje intenzitet reflektiranog vala u odnosu na upadni val:  $R = \frac{I_r}{I_0}$  (24)

*Koeficijent transmisije* (transmitancija eng. *transmittance*)  $T$  opisuje intenzitet transmitiranog (propuštenog) vala u odnosu na upadni val:  $T = \frac{I_t}{I_0}$  (25)

*Koeficijent apsorpcije* (eng. *absorption*)  $A$  opisuje intenzitet apsorbiranog vala u odnosu na upadni val:  $A = \frac{I_a}{I_0}$  (26)

*Amplitude* reflektiranog i transmitiranog električnog polja opisane su *Fresnelovim* jednadžbama, gdje se amplitude refleksije odnosno transmisije definiraju:

$$r = \frac{E_r}{E_i} \quad \text{i} \quad t = \frac{E_t}{E_i} \quad (27)$$

$$\text{Pritom vrijedi: } R = r^2 \quad \text{i} \quad T = t^2 \quad (28)$$

Fresnelova jednadžba za s-polariziranu svjetlost:

$$R_s = \left( \frac{n_1 \cos \theta_i - n_2 \cos \theta_t}{n_1 \cos \theta_i + n_2 \cos \theta_t} \right)^2 \quad (29)$$

gdje s-polarizacija predstavlja svjetlost koja je polarizirana okomito na ravninu kojom prolazi.

Fresnelova jednadžba za p-polariziranu svjetlost:

$$R_p = \left( \frac{n_1 \cos \theta_t - n_2 \cos \theta_i}{n_1 \cos \theta_t + n_2 \cos \theta_i} \right)^2 \quad (30)$$

gdje p-polarizacija predstavlja svjetlost koja je polarizirana paralelno s ravinom kojom prolazi.

$$\text{Pritom vrijedi: } T_s = 1 - R_s, \quad (31)$$

$$T_p = 1 - R_p \quad (32)$$

$$\text{te } R = \frac{R_s + R_p}{2} \quad (33)$$

Uz izraz za Snellov zakon (jednadžba (23)), Fresnelove jednadžbe poprimaju oblik

- za amplitudu koeficijenta refleksije

$$r_s = - \frac{\sin(\theta_i - \theta_t)}{\sin(\theta_i + \theta_t)} \quad (34)$$

$$r_p = - \frac{\text{tg}(\theta_i - \theta_t)}{\text{tg}(\theta_i + \theta_t)} \quad (35)$$

- za koeficijent refleksije

$$R_s = \frac{\sin^2(\theta_i - \theta_t)}{\sin^2(\theta_i + \theta_t)} \quad (36)$$



$$R_p = \frac{tg^2(\theta_i - \theta_t)}{tg^2(\theta_i + \theta_t)} \quad (37)$$

#### 2.4. Interakcija elektromagnetskog vala i tvari u prisustvu magnetskog polja

Ukoliko je primijenjeno magnetsko polje u smjeru širenja svjetlosti, dodatna Lorentzova sila djelovat će na elektrone. Lorentzova sila djelovat će drugačije za elektrone koji rotiraju u lijevo i elektrone koji rotiraju u desno. Jednanažba gibanja tada glasi:

$$eE_{L,R} + kr_{L,R} \pm e\omega Br_{L,R} = m\omega^2 r_{L,R} \quad (38)$$

gdje je  $e\omega Br_{L,R}$  izraz za Lorentzovu silu (+ predznak za LCP, - za RCP) [18].

U prisustvu magnetskog polja, dobiva se različit izraz za radijus elektrona za LCP i RCP.

$$r_{L,R} = \frac{eE/2m}{(\omega^2 - \omega_0^2 \mp \frac{\omega Be}{m})} \quad (39)$$

Zbog različitog radijusa za LCP i RCP, dobiju se i različiti izrazi za dipolni moment  $p_i$  (jednanažba (9)), polarizaciju  $P$ , električni pomak  $D$  te na kraju i dielektričnu funkciju  $\varepsilon(\omega)$ .

Izraz za dielektričnu funkciju u prisustvu magnetskog polja glasi:

$$\varepsilon(\omega) = \varepsilon_0 \left( 1 + \frac{Ne^2 E / 2m\varepsilon_0}{(\omega^2 - \omega_0^2 \mp \frac{\omega Be}{m})} \right) \quad (40)$$

Iz jednanažbe (21) također se vidi da će indeks loma u prisustvu magnetskog polja biti različit za LCP i RCP te iznosi:

$$n_{L,R}^2 = 1 + \frac{Ne^2 E / 2m\varepsilon_0}{(\omega^2 - \omega_0^2 \mp \frac{\omega Be}{m})} \quad (41)$$

Promjena  $n_r$  uzrokovana uključivanjem magnetskog polja  $B$  jednaka je promjeni  $n_r$  kada se frekvencija svjetla promijeni iz  $\omega$  u  $\omega + \Delta\omega_r$ , gdje je  $\Delta\omega_r$  definirana kao kvadratna jednanažba:

$$\omega^2 + \frac{\omega Be}{m} = (\omega + \Delta\omega_r)^2 \quad (42)$$

gdje je rješenje jednanažbe:

$$\Delta\omega_r = \frac{Be}{2m} \quad (43)$$

Isto vrijedi i za  $n_l$ , pri čemu kvadratna jednanažba ima oblik:

$$\omega^2 - \frac{\omega Be}{m} = (\omega + \Delta\omega_l)^2 \quad (44)$$

s rješenjem:

$$\Delta\omega_l = -\frac{Be}{2m} \quad (45)$$

Promjene  $\Delta\omega$  vrlo su male u usporedbi s  $\omega$ . Stoga se razlika u indeksima loma može napisati s velikom točnošću kao:

$$n_l - n_r = \left(\frac{dn}{d\omega}\right)(\Delta\omega_l - \Delta\omega_r) = \left(\frac{dn}{d\lambda}\right)\left(\frac{\lambda^2}{2\pi c}\right)\left(\frac{Be}{m}\right) \quad (46)$$

gdje je  $\lambda = \frac{2\pi c}{\omega}$  valna duljina svjetlosti u vakuumu.

Kao posljedica primijenjenog magnetskog polja dolazi do efekta *dvolomnosti* [18], gdje različiti  $n_l$  i  $n_r$  uzrokuju različite brzine propagacije lijeve i desne kružno polarizirane svjetlosti te kao posljedica toga dolazi do otklona ravnine polarizacije gdje kut otklona iznosi:

$$\theta = kL(n_l - n_r) = \frac{\omega L}{c}(n_l - n_r) = \frac{\pi L}{\lambda}(n_l - n_r) \quad (47)$$

te je  $k$  valni broj, a  $L$  duljina propagacije magnetskog polja.

Kombinacijom jednadžbi (46) i (47) dolazi se do izraza za kut otklona *Faradayeve rotacije* [18]:

$$\theta = \frac{e}{2mc} \lambda BL \frac{dn}{d\lambda} \quad (48)$$

gdje je se konstanta koja povezuje interakciju među česticama zove *Verdetova konstanta* dana je formulom:

$$V = \frac{e}{2mc} \lambda \frac{dn}{d\lambda} \quad (49)$$

Jednadžbu (49) izveo je *Henri Bequerel* 1897. [18] te pokazao da Verdetova konstanta ovisi o valnoj duljini, disperziji  $\frac{dn}{d\lambda}$  te omjeru naboja i mase elektrona.

Iz jednadžbi (48) i (49) dolazi se do Faradayeve jednadžbe za eksperimentalno dobiven kut otklona pri rotaciji polarizirane svjetlosti uz primjenu magnetskog polja:

$$\theta = VBL \quad (50)$$

Također, indeks loma iz jednadžbe (49) može se izračunati preko *Cauchyve* jednadžbe za disperziju:

$$n(\lambda) = A + \frac{B}{\lambda^2} + \frac{C}{\lambda^4} \quad (51)$$

gdje su  $A$ ,  $B$  i  $C$  koeficijenti koji se mogu odrediti za materijal prilagodbom jednadžbe (51) za izmjerene indekse loma za poznate valne duljine.

## 2.5. Interakcija magnetskog polja i tvari

Na mikroskopskom nivou, svi magnetski materijali sastoje se od sitnih strujnih petlji u kojima se elektroni kreću (slika klasične elektrodinamike). Takvo gibanje može biti ili u obliku vrtnje elektrona oko njihove osi ili okretaja elektrona u njihovim orbitama oko pozitivno nabijene jezgre. Također i vrtnja jezgre oko svoje osi može biti uzrok takvom gibanju, ali taj učinak je iznimno malen i zanemariv [20]. Na makroskopskom nivou te strujne petlje mogu se smatrati magnetskim dipolima. Atomi u bilo kojem materijalu nalaze se u nasumičnoj orijentaciji pa se magnetski dipoli poništavaju i materijal se prikladno smatra nemagnetskim. Kada se na materijal primjeni vanjsko magnetsko polje, tada na elektrone djeluje sila. Ovisno o atomskoj i molekularnoj strukturi i veličini primijenjenog magnetskog polja, različiti materijali različito reagiraju i magnetiziraju se u različitom stupnju. Mikroskopski magnetski dipoli prisiljeni si poravnati se u zadanom smjeru, koji može biti paralelan ili antiparalelan primijenjenom magnetskom polju [20].

Kad god se na materijal primjeni vanjsko magnetsko polje, on postaje magnetski polariziran ili *magnetiziran*. Taj se fenomen naziva magnetiziranje. Budući da su svi materijali sastavljeni od atoma, učinak magnetskog polja prvenstveno se očituje na dva glavna načina. Primijenjeno magnetsko polje prvenstveno djeluje na:

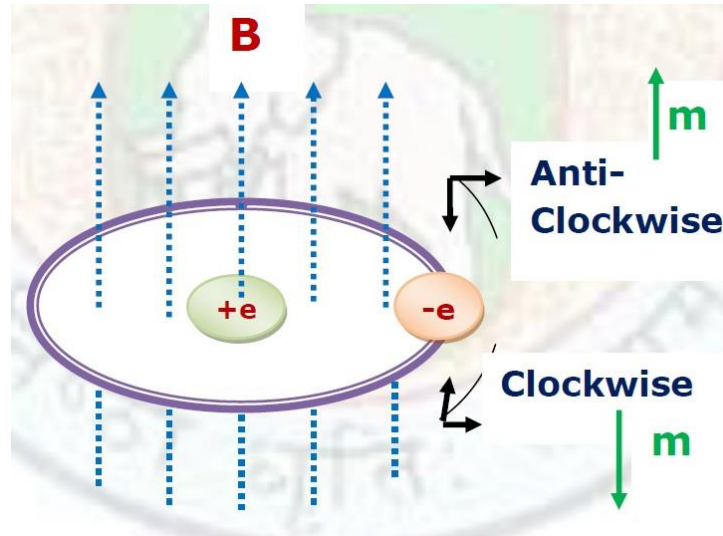
1. orbitalno kretanje elektrona oko pozitivne nabijene jezgre,
2. spinsko gibanje elektrona oko vlastite osi rotacije

Prema Paulijevom principu isključenja, dva elektrona u atomu ne mogu imati isti kvatni broj. Ako su elektroni prisutni u istoj energetske ljusci, moraju imati suprotan spin. Svi atomi koji imaju paran broj elektrona nemaju spinski dipolni moment jer se njihovi spinovi poništavaju u parovima. Osim rotacije oko svoje osi, elektroni se okreću oko pozitivno nabijene jezgre i stoga imaju orbitalni dipolni moment [20]. Kad se primijeni vanjsko magnetsko polje, brzina elektrona u njihovim orbitama se promijeni tako da se dipolni momenti poravnaju u smjeru suprotnom od smjera primijenjenog magnetskog polja. Ako elektron kruži u smjeru kazaljke na satu (slika 4.), tada će njegov magnetski moment biti prema dolje. To podrazumijeva:

1. smjer magnetskog momenta suprotan je smjeru  $B$ ,
2.  $v$  je pozitivan i brzina elektrona raste.

U drugom slučaju (slika 4.), ukoliko elektron kruži u smjeru suprotnom od kazaljke na satu, tada će njegov magnetski moment biti prema gore. To podrazumijeva:

1. smjer magnetskog momenta paralelan je sa smjerom  $B$ ,
2.  $v$  je negativan i brzina elektrona se smanjuje.



**Slika 4.** Elektron  $e^-$  kruži oko pozitivno nabijene jezgre  $e^+$ . Isprekidane plave strelice prikazuju smjer primijenjenog vanjskog magnetskog polja  $B$  dok crne strelice prikazuje smjer gibanja elektrona u smjeru kazaljke na satu ili suprotno od smjera kazaljke na satu. Magnetski moment  $m$  prikazan je u dva smjera, gore i dolje. [20]

Pretpostavimo površinu nemagnetnog materijala volumena  $V$ . Površina se sastoji od mnoštva dipola od kojih svaki ima dipolni moment  $m$ . Kada se primijeni vanjsko magnetsko polje, tada će *vektorski potencijal*  $A$  na konačnoj udaljenosti  $r$  udaljenoj od svakog dipola biti:

$$A(\mathbf{r}) = \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{\mathbf{m} \times \mathbf{r}}{r^2} \quad (52)$$

gdje je  $\mu_0$  magnetska permeabilnost vakuuma te iznosi  $4\pi \cdot 10^{-7} \frac{\text{N}}{\text{A}^2}$  [20].

*Magnetizacijski vektor*  $\mathbf{M}$  ukupni je magnetski dipolni moment po jedinici volumena, stoga ukoliko se uzme infinitezimalno mali element volumena  $d\tau$ , tada je

$$\mathbf{m} = \mathbf{M} d\tau \quad (53)$$

Stoga će ukupni vektorski potencijal na konačnoj udaljenosti  $r$  od površine biti jednak zbroju magnetskih vektorskih potencijala svih dipola.

$$A(\mathbf{r}) = \frac{\mu_0}{4\pi} \int \frac{\mathbf{M}(\mathbf{r}') \times \mathbf{r}}{r^2} d\tau' \quad (54)$$

$$= \frac{\mu_0}{4\pi} \left[ \int_V \frac{\mathbf{J}_b(\mathbf{r}')}{r} d\tau' \right] + \frac{\mu_0}{4\pi} \left[ \oint_S \frac{\mathbf{K}_b(\mathbf{r}')}{r} da' \right] \quad (55)$$

Jednadžba (55) podrazumijeva, zbog magnetiziranja materijala, stvaranje vezane struje koja postoji unutar materijala (volumna gustoća struje  $\mathbf{J}_b = \nabla \times \mathbf{M}$ ) kao i na njegovoj površini (površinska gustoća struje  $\mathbf{K}_b = \mathbf{M} \times \hat{\mathbf{n}}$ ). Ove vezane struje povezane su s unutarnjim

magnetskim momentima atoma i ne mogu se kontrolirati vanjskim izvorom električnog polja. Stoga ukupna gustoća struje  $J$  kroz materijal postaje jednaka zbroju vezane gustoće struje  $J_b$  i gustoće struje slobodnih elektrona  $J_f$  koji teku zbog primijenjenog električnog polja.

$$\mathbf{J} = \mathbf{J}_b + \mathbf{J}_f \quad (56)$$

Nadalje, iz *Amperovog* zakona slijedi:

$$\frac{1}{\mu_0}(\nabla \times \mathbf{B}) = \text{ukupna struja po jedinici volumena} \quad (57)$$

$$\begin{aligned} &= \mathbf{J}_b + \mathbf{J}_f \\ &= (\nabla \times \mathbf{M}) + \mathbf{J}_f \end{aligned} \quad (58)$$

$$\mathbf{J}_f = \nabla \times \left( \frac{1}{\mu_0} \mathbf{B} - \mathbf{M} \right) \quad (59)$$

$$\mathbf{J}_f = \nabla \times \mathbf{H} \quad (61)$$

$$\oint \mathbf{H} \cdot d\mathbf{l} = I_f \quad (62)$$

gdje je  $I_f$  ukupna struja slobodnih elektrona.

$$\nabla \cdot \mathbf{B} \text{ uvijek je nula i} \quad (63)$$

$$\mathbf{H} = \frac{1}{\mu_0} (\mathbf{B} - \mathbf{M}) \quad (64)$$

gdje je  $\mathbf{H}$  pomoćno magnetsko polje, a  $\mathbf{M}$  magnetizacija.

Također iz jednadžbe (64) slijedi da je

$$\mathbf{B} = \mu_0(\mathbf{H} + \mathbf{M}) \quad (65)$$

Magnetizacija bilo kojeg predmeta događa se zbog primjene vanjskog magnetskog polja.

Magnituda koja opisuje magnetizaciju predmeta naziva se *susceptibilnost* ( $\chi$ ) i iznosi:

$$\mathbf{M} = \chi \mathbf{H} \quad (66)$$

$$\mathbf{B} = \mu_0(\mathbf{H} + \chi \mathbf{H}) \quad (67)$$

$$\mathbf{B} = \mu_0(1 + \chi) \mathbf{H} \quad (68)$$

$$\mathbf{B} = \mu_0 \mu_r \mathbf{H} \quad (69)$$

$$\mathbf{B} = \mu \mathbf{H} \quad (70)$$

pri čemu je  $\mu = \mu_0 \mu_r$  ( $\mu$  je magnetska permeabilnost, a  $\mu_r$  je relativna magnetska permeabilnost). Za nemagnetne materijale  $\mu_r$  iznosi 1.

Materijali mogu biti, po stupnju magnetizacije, dijamagneti, paramagneti i feromagneti.

*Dijamagnetizam* se obično javlja u svim vrstama materijala i univerzalan je fenomen. U dijamagnetnim materijalima atomi/molekule nemaju neto spinski magnetni moment. Stoga je dijamagnetizam prvenstveno posljedica orbitalnog gibanja elektrona. To je slab magnetizam koji postoji u atomima/molekulama s parnim brojem elektrona gdje nema drugih vrsta magnetizma (paramagnetizam i feromagnetizam). Ti su materijali manje osjetljivi na vanjska magnetska polja i stoga imaju negativnu susceptibilnost. Ti se materijali odbijaju od vanjskog magnetskog polja i magnetske se domene poravnavaju u smjeru suprotnom (antiparalelnom) od smjera magnetskog polja. Magnetska domena je područje unutar magnetskog materijala u kojem je magnetizacija u uniformnom smjeru. To znači da su pojedinačni magnetski momenti atoma međusobno poravnati i usmjereni u istom smjeru [20].

*Paramagnetizam* se obično javlja u atomima/molekulama s neparnim brojem elektrona gdje orbitalne ljuske imaju nesparene elektrone. To je tako jer, kao što je slučaj s Paulijevim načelom isključenja, dva elektrona u istoj ljusci imaju suprotne spinove. Stoga, u slučaju atoma/molekula s neparnim brojem elektrona, postoji neto spinski moment. U nedostatku vanjskog magnetskog polja, magnetske su domene nasumično orijentirane i ne postoji doživljaj magnetizma. U slučaju primijene vanjskog magnetskog polja, ono blago privlači (paramagnetične) materijale te se magnetske domene poravnavaju u smjeru magnetskog polja. Kada se magnetsko polje ukloni, tada se svi magnetski dipoli nastoje nasumično poravnati te se magnetizam izgubi. Relativna magnetska permeabilnost paramagneta iznosi nešto iznad 1 [20].

*Feromagnetizam* se javlja kod željeza, nikla, kobalta i gadolinija. Feromagnetične tvari imaju izrazitu relativnu magnetsku permeabilnost, znatno veću od 1. Feromagnetizam nastaje kao posljedica jakih međudjelovanja magnetskih momenata atoma, zbog čega nastaje kolektivno magnetsko uređenje, tzv. spontana magnetizacija, koja se s porastom temperature smanjuje. Zbog toga feromagnetične tvari pokazuju jaku magnetičnost, u vanjskome magnetskom polju postaju inducirani magneti koje zatim to polje privlači. To inducirano polje mogu zadržati neko vrijeme, pa i stalno [20].

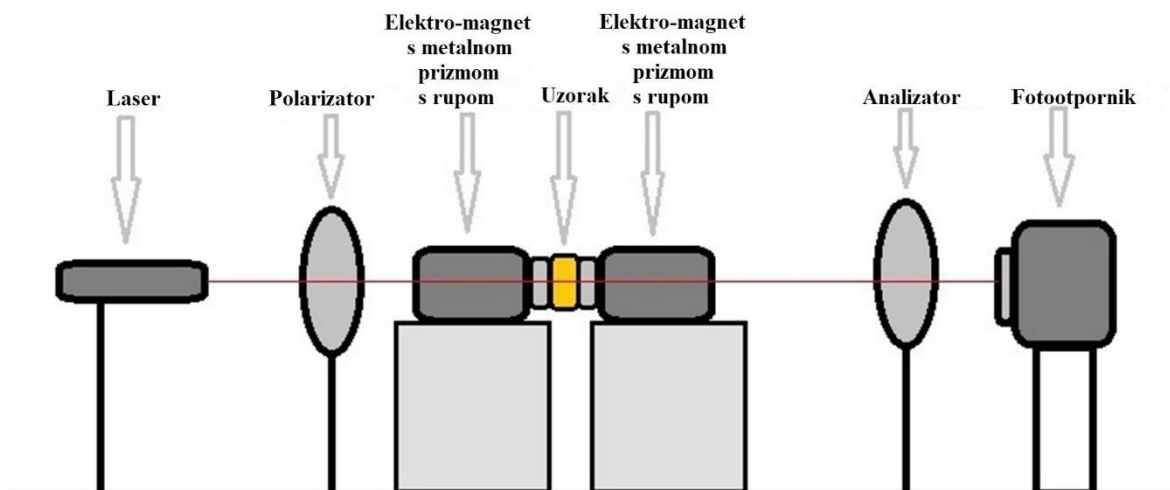
### 3. Eksperimentalne metode

#### 3.1. Eksperimentalni postav

Pojednostavljen shematski prikaz eksperimentalnog postava prikazan je na [slici 5](#). Na shemi su prikazani samo elementi koji se nalaze na optičkoj klupi. Istraživanje je napravljeno na Prirodoslovno-matematičkom fakultetu u Zagrebu, na fizičkom odsjeku u prostoriji u kojoj se odvijaju vježbe iz kolegija „Napredni fizički praktikum 2“.

Sva oprema koje se koristila pri eksperimentalnom mjerenju Faradayevog efekta:

Optička klupa, 1000 mm	1
Zavojnica D 900, 3B	2
Željezna jezgra	2
Magnet s probušenom rupom	2
Strujni izvor Peak Tech, 32 V, 20 A, DC	1
Teslametar (digitalni), Phywe	1
Multimetar Peak Tech, digitalni	1
Hallova sonda, aksijalna	1
Fotootpornik PFW-1051 10 MM, 200 mW, 5-10 k $\Omega$ , 1 M $\Omega$	1
Laser, monokromatski, 405 nm	1
Laser, monokromatski, 450 nm	1
Laser, monokromatski, 532 nm	1
Laser, monokromatski, 650 nm	1
Polarizator	2
Držač za optičku klupu, pomični	4
Stalak za laser	1
Stalak za Hallovu sondu	1
Stalak za kućište s fotootpornikom	1
Kućiče za fotootpornik, ručno izrađen	1
Priključni kabel, 750 mm, crveni	2
Priključni kabel, 750 mm, plavi	2
Priključni kabel, 750 mm, crni	4
Kabel za napajanje, 1000 mm	2
Napajanje 6-12V, 1000 mm	2
Pomično mjerilo	1



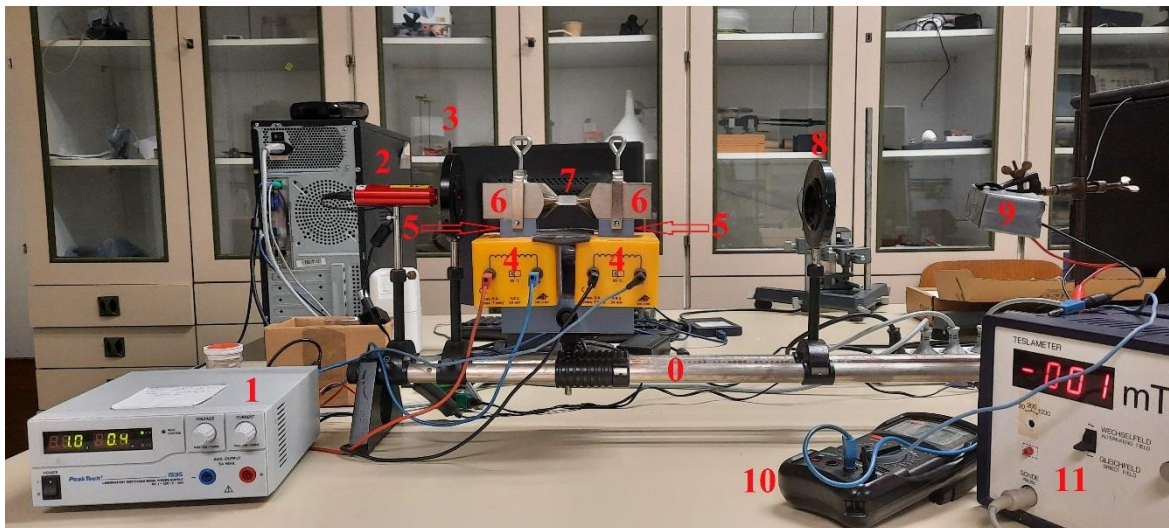
**Slika 5.** Pojednostavljen shematski prikaz eksperimentalnog postava. Na shemi su prikazani samo elementi koji se nalaze na optičkoj klupi. Smjer izvođenja mjerenja je s lijeva na desno. Laseri 650 nm i 532 nm su priključeni na napajanje od 12 V, dok se laseri 450 nm i 405 nm napajaju preko dvije baterije od 1,5V. Svaki elektromagnet se sastoji od zavojnice s jezgrom i metalnom prizmom s rupom na vrhu jezgre. Zavojnice su spojene (paralelno) na strujni izvor (DC). Na fotooptpornik je spojen (paralelno) digitalni multimeter na kojem se iščitava otpor. Duljina uzorka koji se mjeri točno odgovara udaljenosti između polova elektromagneta.

Na [slici 6.](#) prikazan je eksperimentalni postav sa [slike 5.](#) u trenutku izvođenja mjerenja. Za određivanje Verdetove konstante korištena su četiri monokromatska lasera valnih duljina: 405 nm (ljubičasta svjetlost), 450 nm (plava svjetlost), 532 nm (zelena svjetlost) i 650 nm (crvena svjetlost), čija je svjetlost propuštana kroz sljedeće materijale: *kristali (optičko staklo (kvarc) -  $\text{SiO}_2$ , kalijev klorid (KCl), natrijev klorid (NaCl) i kalijev bromid (KBr))* te maslinovo ulje (*Olivenöl – Roth*). Držać za laser fiksiran je za optičku klupu zbog brze i efikasne izmjene lasera bez pomicanja njihovog početnog položaja. Polarizator i analizator nalaze se na stalku koji je učvršćen na optičku klupu. Zavojnice se nalaze na postolju koje je također pričvršćeno za optičku klupu. U svaku zavojnicu umetnuta je željezna jezgra te se na vrhu svake jezgre nalazi po jedna metalna prizma s probušenom rupom kroz sredinu kroz koju prolazi monokromatska svjetlost. Metalne prizme su pomične te su okrenuti jedan prema drugome na udaljenosti koja ovisi o materijalu koji se stavlja između njih. Udaljenost između rubova prizmi jednaka je duljini materijala kroz koju prolazi monokromatska svjetlost. Fotooptpornik se nalazi u kućištu koji je učvršćen za stalak. Svi navedeni elementi nalaze se na istoj ravnini paralelnoj s optičkom klupom.

Faradayev efekt očituje se djelovanjem magnetskog polja na linearno polariziranu monokromatsku svjetlost koja prolazi uzorkom koji se nalazi između magneta. Elektromagneti ne stvaraju uniformno magnetsko polje između dva pola te je zbog toga potrebno, prije mjerenja kuta zakrivljenosti ravnine polarizacije, izmjeriti jakost magnetskog



polja između polova elektromagneta u nekoliko točaka čime se dobiva usrednjena vrijednost jakosti magnetskog polja koju se kasnije može koristiti pri izračunu Verdet-ove konstante [16]. Stoga se eksperimentalni proces može podijeliti na dva dijela: mjerenje magnetskog polja i mjerenje kuta zakrivljenosti ravnine polarizacije.



**Slika 6.** Eksperimentalni postav korišten pri mjerenju kuta rotacije ravnine polarizacije monokromatske svjetlosti. (0) optička klupe, (1) naponski izvor istosmjerne struje, (2) monokromatski laser (532 nm), (3) polarizator, (4) par zavojnica s ugrađenim termalnim preklopnikom (bimetal), (5) par željeznih jezgri, (6) metalne prizme s prolaznom rupom, (7) uzorak (optičko staklo - kvarc), (8) analizator, (9) fotooptornik u kućištu kućne izrade, (10) digitalni multimetar i (11) digitalni teslametar. Svi elementi 2-9 nalaze se na optičkoj klupi. Metalne prizme (6) koje su spojene s jezgrom imaju rupu po sredini koja omogućuje prolazak monokromatske svjetlosti do fotooptornika (9) na kraju optičke klupe.

## 3.2. Mjerenje magnetskog polja

### 3.2.1. Baždarne krivulje

Magnetsko polje stvaraju dvije zavojnice od 900 zavoja koje su paralelno spojene na istosmjerni strujni izvor ([slika 7. \(a\)](#)). U svaku je zavojnicu umetnuta željezna jezgra koja služi kao „pojačalo“ magnetskog polja. Prolaskom struje kroz zavojnicu dolazi do zagrijavanja zavojnice te je iz sigurnosnih razloga u zavojnicama ugrađen termalni preklopnik (bimetal) koji se aktivira na  $85^{\circ}\text{C}$  te isključuje zavojnicu iz kruga i na taj način sprječava daljnje zagrijavanje zavojnice ([slika 7. \(b\)](#)).



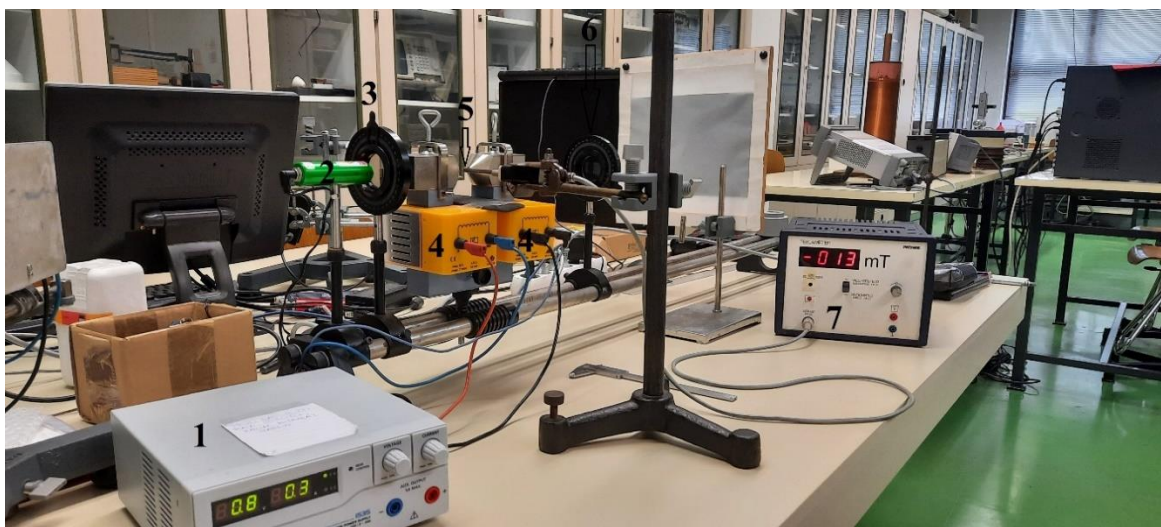
a)



b)

**Slika 7.** (a) Strujni izvor istosmjerne struje. Zavojnice su spojene paralelno na stražnje ulaze izvora. Na početku mjerenja oba potencijometra potrebno je namjestiti na nulu te s desnim potencijometrom namjestiti maksimalnu struju u krugu. Serijskim spajanjem zavojnica maksimalna dozvoljena struja iznosi 5 A, dok se paralelnim spajanjem smije povisiti do 10 A. Nakon što se namjesti maksimalna struja, lijevim potencijometrom se određuje napon na izlazu kojeg se očitava na lijevom prikazu na ekranu. Napon je direktno koreliran s jakosti struje tako da regulirajući napon samim time se regulira i jakost struje na izlazu koju se očitava na desnom prikazu na ekranu. (b) Zavojnice s ugrađenim termalnim preklopnikom (bimetal). Bimetal se aktivira čim se zavojnica zagrije na 85°C.

Prolaskom struje kroz zavojnice dolazi do stvaranja magnetskog polja između polova elektromagneta. Magnetsko polje nije uniformno u prostoru te je zbog toga potrebno mjeriti jakost magnetskog polja u više točaka prostora između polova elektromagneta odnosno metalnih prizama. Eksperimentalni postav za mjerenje jakosti magnetskog polja u točkama prostora prikazan je na [slici 8](#). Magnetsko polje mjeri se Hallovom sondom ([slika 9](#)) koja je spojena aksijalnim kabelom na digitalni teslametar koji očitava jakost magnetskog polja u mT. Svaki je uzorak različite duljine te je za svaki uzorak uzet različit broj točaka u prostoru za mjerenje magnetskog polja. Cilj je bio uzeti takav broj točaka da bude zadovoljena pravilna prostorna distribucija, tj. da razmak između točaka bude jednak te da udaljenost krajnjih mjerenih točaka bude jednaka od lijevog odnosno desnog pola elektromagneta.



**Slika 8.** Eksperimentalni postav za mjerenje jakosti magnetskog polja. Za mjerenje jakosti magnetskog polja potrebni su: (1) strujni izvor, (4) par zavojnica s jezgrom i prizme s prolaznom rupom, (5) Hallova sonda i (7) digitalni teslametar.



**Slika 9.** Hallova sonda između magneta. Vrh Hallove sonde nalazi se na pravcu koji spaja rupe elektro-magneta te se svako mjerenje pomiče od lijeva ka desno za zadanu udaljenost. Udaljenost i broj točaka ovisi o uzorku za koji se mjeri magnetsko polje.

Za svaku odabranu točku u prostoru potrebno je izračunati jakost magnetskog polja za različite vrijednosti jakosti struja. Paralelnim spajanjem zavojnica maksimalna dozvoljena jakost struje iznosi 10 A. Magnetsko se polje zbog toga mjerilo za sveukupno osam jakosti struja; korištene su cjelobrojne vrijednosti jakosti struja s razlikom između svake vrijednosti jakosti struje od 1 A (1 A, 2 A, 3 A, ... 8 A). Minimalna jakost struje iznosi 1 A, dok maksimalna iznosi 8 A.<sup>1</sup> Magneti se mogu pomicati u dvije ravnine uz pomoć navoja koji pritisne odnosno otpusti metalnu prizmu od jezgre na zavojnici. Navoj se opusti tako da se prizme mogu pomicati, uzorak se stavi između magneta nakon čega se magneti lagano pritisnu uz sam uzorak tako da uzorak bude u zraku pritisnut između dvije prizme. Uzorak se ukloni nakon čega se Hallovom sondom mjeri jakost magnetskog polja u nekoliko točaka duž pravca između rupa magneta. Postupak se ponavlja za svaki uzorak.<sup>2</sup>

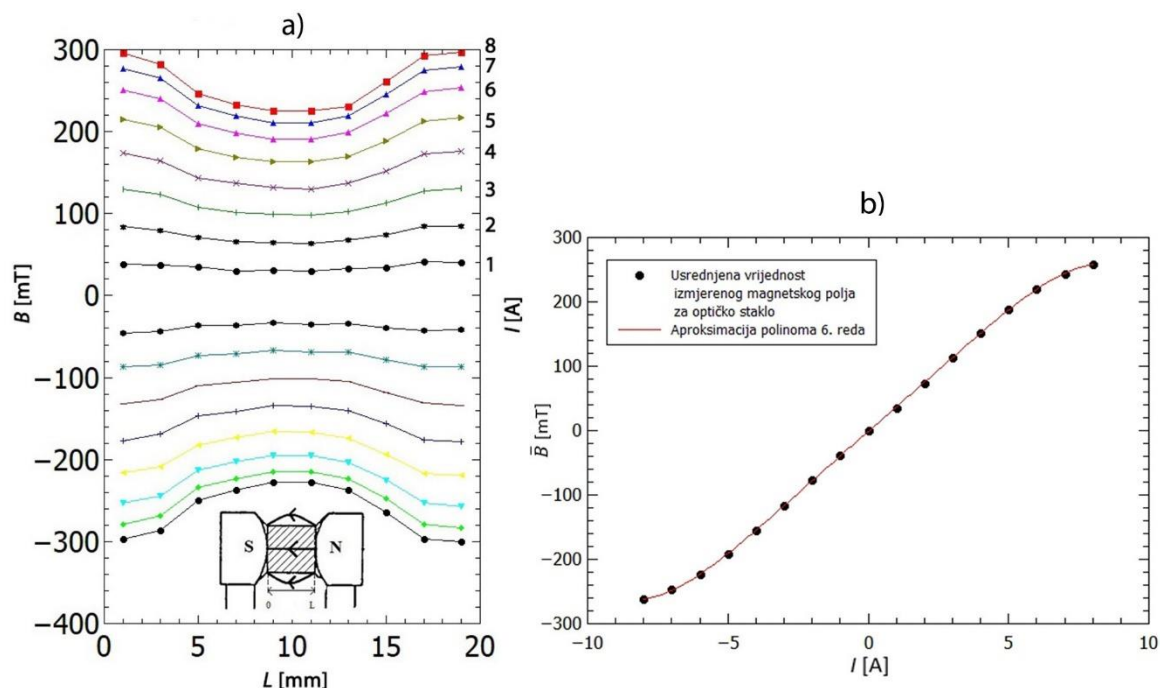
Mjerenjem jakosti magnetskog polja u više točaka duž pravca između polova elektro-magneta dobiva se prostorna distribucija jakosti magnetskog polja. Iz prostorne distribucije jakosti magnetskog polja potrebno je izračunati srednju vrijednost jakosti magnetskog polja koja je potrebna pri izračunu Verdetove konstante [16]. U programu QtiPplot napravljena je grafička analiza distribucije magnetskog polja za sljedeće materijale: *optičko staklo (kvarc)*, *KCl*, *NaCl*, *KBr*, *maslinovo ulje* (grafovi 1-5 (a)). Također, u QtiPlot-u izračunata je srednja vrijednost jakosti magnetskog polja te je grafički prikazana ovisnost jakosti struje i srednjeg

<sup>1</sup> Izmjerena vrijednost magnetskog polja pri jakosti struje od 0 A iznosi 0 mT.

<sup>2</sup> Postupak se ponavlja za drugi uzorak tek kad je završeno kompletno mjerenje za prvi uzorak, npr. nakon što je izmjereno magnetsko polje za optičko staklo (kvarc), prelazi se na mjerenje kuta zakreta ravnine polarizacije za isti uzorak (optičko staklo) nakon čega se mijenja uzorak (stavlja se kristal KCl) te se ponavlja postupak.

magnetskog polja (grafovi 1-5 (b)). Nakon dobivanja točaka koje prikazuju ovisnost jakosti struje i srednjeg magnetskog polja, u QtiPlot-u korištena je prilagodba polinoma šestog reda za optičko staklo (kvarc) i maslinovo ulje te trećeg reda za KCl, NaCl i KBr. Prilagodbe su prikazane crvenom linijom na svakom od grafova (*Polynomial fit*).

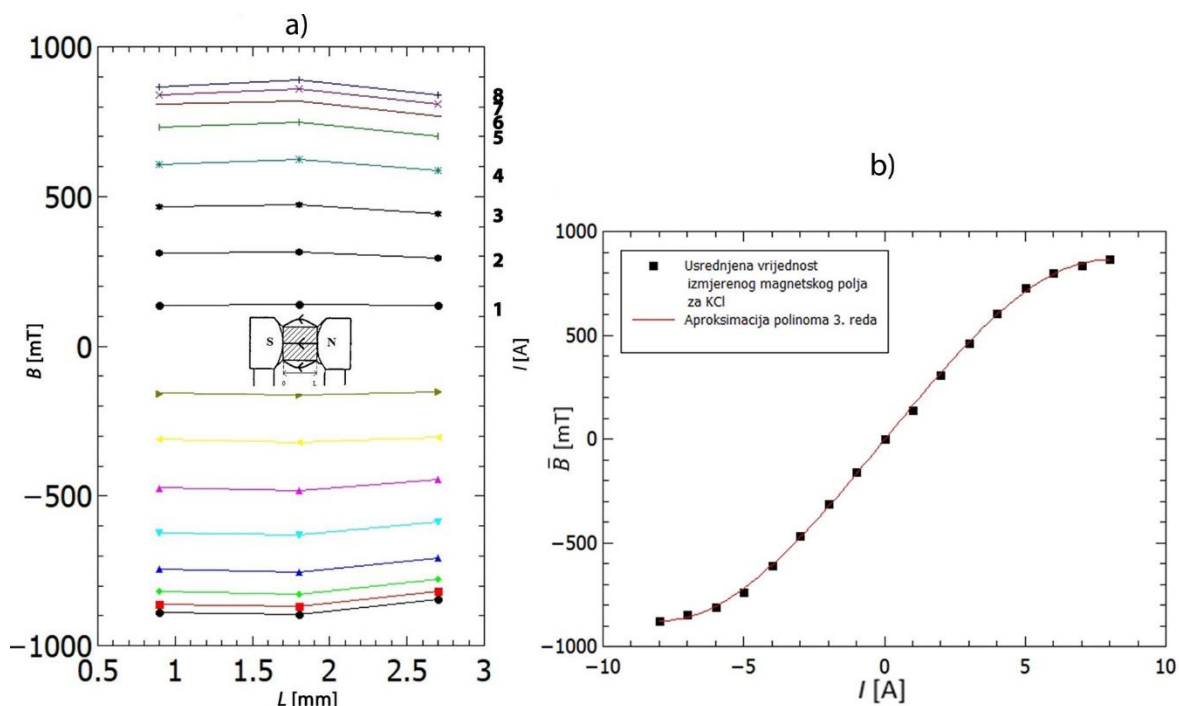
Mjerenje magnetskog polja u svakoj točki obavlja se za oba smjera struje (polaritet) tako da se nakon svakog mjerenja magnetskog polja u određenoj točki za određenu jakost struje obrnu žice na izlazu naponskog izvora te se ponove mjerenja za drugi smjer struje.<sup>3</sup> Polaritet se očitava na teslametru – za pozitivan smjer struje uređaj mjeri pozitivnu vrijednost magnetskog polja, dok za negativan smjer mjeri negativnu vrijednost.



**Graf 1.** (a) Ovisnost jakosti magnetskog polja za osam jakosti struja (1-8 A) o udaljenosti za *optičko staklo* (kvarc). Duljina uzorka optičkog stakla iznosi 20 mm te je time i duljina pravca po kojoj se mjeri jakost magnetskog polja također 20 mm. Izabrano je deset točaka u kojima se mjeri magnetsko polje tako da os apscise predstavlja udaljenost od lijevog magneta (0 mm predstavlja kraj lijevog, a 20 mm početak desnog magneta). Točke u kojima se mjeri magnetsko polje redom su udaljene od kraja lijevog magneta: 1 mm, 3 mm, 5 mm, 7 mm, 9 mm, 11 mm, 13 mm, 15 mm, 17 mm, 19 mm. Lijeva os ordinate predstavlja jakost magnetskog polja u mT za oba polariteta struje. Na desnoj osi ordinate prikazane su jakosti struje (redom od 1 A do 8 A) koje odgovaraju svojstvenim distribucijama magnetskog polja. Krivulje na gornjoj polovici grafa odgovaraju jakosti struje od (+) 1 do 8 A (pozitivan smjer struje), dok krivulje na donjoj polovici grafa odgovaraju jakosti struje od (-) 1 do 8 A (negativan smjer struje). Skica ispod krivulja slikovito prikazuje magnete s uzorkom između njih te pripadnom udaljenosti 0-L. Na skici je također naznačen proizvoljan smjer magnetskog polja. (b) Ovisnost srednje vrijednosti magnetskog polja o jakosti struje za oba smjera struje za *optičko staklo* (kvarc). U programu QtiPlot izračunate su srednje vrijednosti jakosti magnetskog polja (sa [grafa 1. \(a\)](#)) za svojstvene jakosti struje (*Statistics on columns -> Mean Y*)

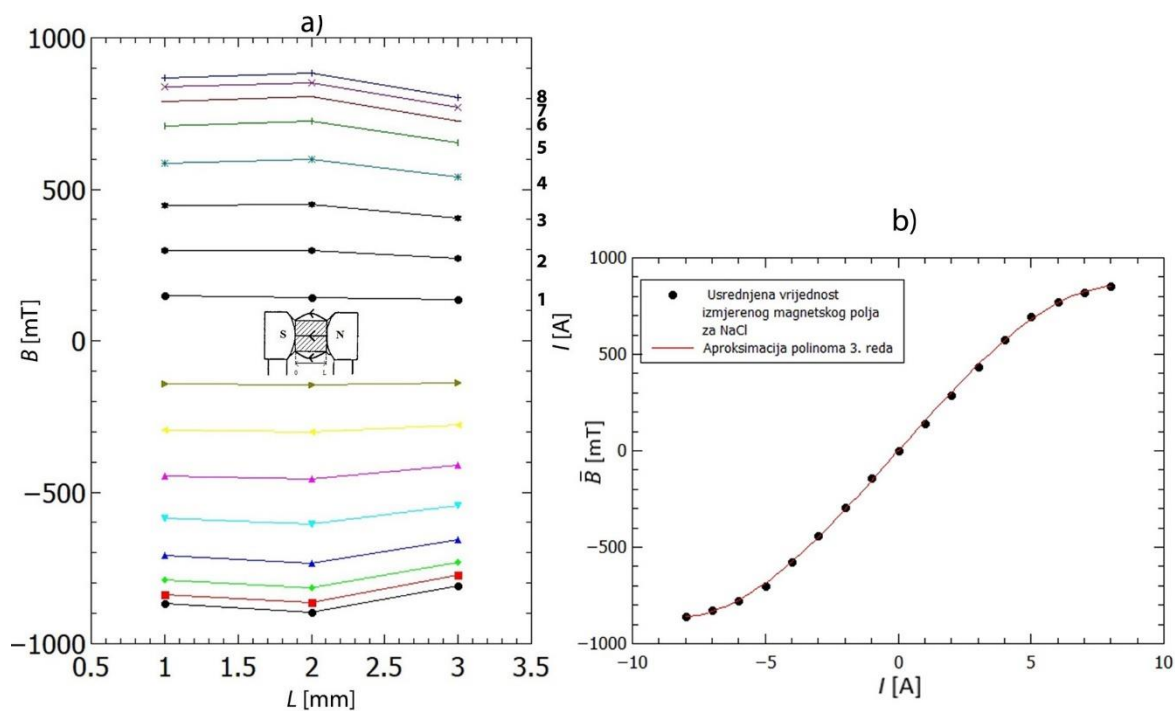
<sup>3</sup> Nakon svakog očitavanja magnetskog polja za određenu jakost struje potrebno je spustiti lijevi potenciometar na nulu prije nego se nastavi mjerenje za obrnuti polaritet struje. Postupak se ponavlja za svako očitavanje magnetskog polja svojstvene jakosti struje.

nakon čega je ovisnost prikazana na [grafu 1. \(b\)](#). Na grafu su prikazane točke za pozitivan i negativan smjer struje. Na osi apscisi prikazana je jakost struje za oba smjera (u A), dok je na osi ordinati prikazana srednja vrijednost jakosti magnetskog polja (u mT) također za oba smjera struje. Korištena je prilagodba polinoma 6. reda (*Polynomial fit*) koja je prikazana na grafu u obliku crvene linije.

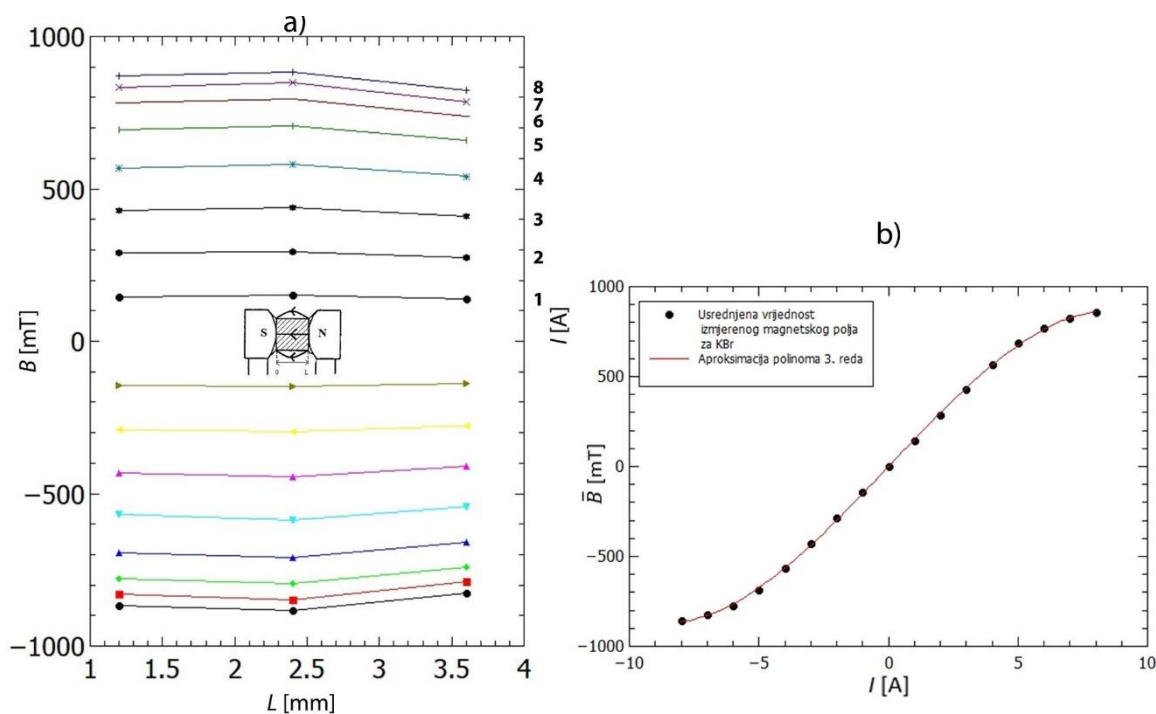


**Graf 2.** (a) Ovisnost jakosti magnetskog polja za osam jakosti struja (1-8 A) o udaljenosti za kristal *KCl*. Duljina uzorka kristala *KCl* iznosi 3.6 mm. Izabrane su tri točke u prostoru između magneta u kojima se mjeri magnetsko polje tako da je na osi apscisi predstavljena udaljenost od lijevog magneta. Točke u kojima se mjeri magnetsko polje redom se udaljene od kraja lijevog magneta: 0.9 mm, 1.8 mm i 2.7 mm.<sup>4</sup> (b) Ovisnost srednje vrijednosti magnetskog polja o jakosti struje za oba smjera struje za *KCl*. Korištena je prilagodba polinoma 3. reda (*Polynomial fit*) koja je prikazana na grafu u obliku crvene linije.

<sup>4</sup> Opis grafova jednak je za sve materijale (uzorke). Razlika je u duljini uzorka, tj. udaljenost između magneta je različita za pojedini uzorak pa je samim time i broj točaka u kojima se mjeri magnetsko polje svojstven za svaki uzorak kao i udaljenost pojedine točke od lijevog (referentnog) magneta.

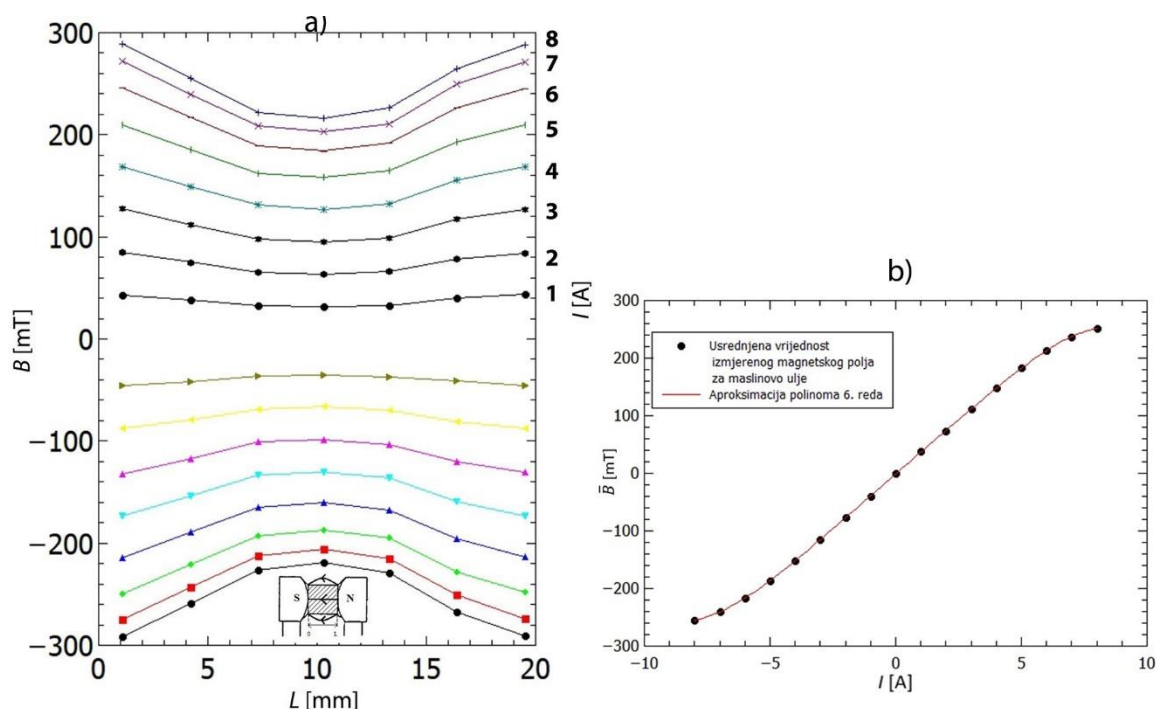


**Graf 3.** (a) Ovisnost jakosti magnetskog polja za osam jakosti struja (1-8 A) o udaljenosti za kristal  $NaCl$ . Duljina uzorka kristala  $NaCl$  iznosi 4 mm. Izabrane su tri točke u prostoru između magneta u kojima se mjeri magnetsko polje tako da je na osi apscisi predstavljena udaljenost od lijevog magneta. Točke u kojima se mjeri magnetsko polje redom se udaljene od kraja lijevog magneta: 1 mm, 2 mm i 3 mm. (b) Ovisnost srednje vrijednosti magnetskog polja o jakosti struje za oba smjera struje za  $NaCl$ . Korištena je prilagodba polinoma 3. reda (*Polynomial fit*) koja je prikazana na grafu u obliku crvene linije.



**Graf 4.** (a) Ovisnost jakosti magnetskog polja za osam jakosti struja (1-8 A) o udaljenosti za kristal  $KBr$ . Duljina uzorka kristala  $KBr$  iznosi 4.8 mm. Izabrane su tri točke u prostoru između magneta u kojima se mjeri magnetsko polje tako da je na osi apscisi predstavljena udaljenost od lijevog magneta.

Točke u kojima se mjeri magnetsko polje redom se udaljene od kraja lijevog magneta: 1.2 mm, 2.4 mm i 3.6 mm. (b) Ovisnost srednje vrijednosti magnetskog polja o jakosti struje za oba smjera struje za *KBr*. Korištena je prilagodba polinoma 3. reda (*Polynomial fit*) koja je prikazana na grafu u obliku crvene linije.

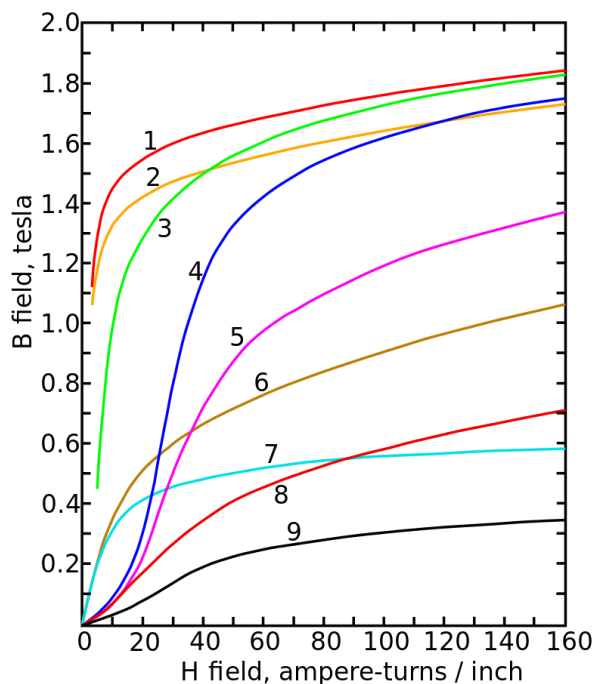


**Graf 5.** (a) Ovisnost jakosti magnetskog polja za osam jakosti struje (1-8 A) o udaljenosti za uzorak s *maslinovim uljem*. *Maslinovo ulje* stavljeno je u plastičnu kutijicu duljine 20.6 mm. Debljina stijenke kutijice iznosi 0.6 mm. Duljina samog uzorka maslinovog ulja u kojem se mjeri magnetsko polje tada iznosi 19.4 mm. Izabrano je sedam točaka u prostoru između magneta u kojima se mjeri magnetsko polje tako da je na osi apscisi predstavljena udaljenost od lijevog magneta. Točke u kojima se mjeri magnetsko polje redom se udaljene od kraja lijevog magneta: 1.1 mm, 4.2 mm, 7.3 mm, 10.3 mm, 13.3 mm, 16.4 mm i 19.5 mm. (b) Ovisnost srednje vrijednosti magnetskog polja o jakosti struje za oba smjera struje za *maslinovo ulje*. Korištena je prilagodba polinoma 6. reda (*Polynomial fit*) koja je prikazana na grafu u obliku crvene linije.

### 3.2.2. Saturacija (zasićenje) elektromagneta

Izgled krivulje na grafovima [1-5 (b)] posljedica je saturacije (zasićenja) elektromagneta. Gledano u nekim magnetskim materijalima, saturacija je stanje kada povećanje primijenjenog vanjskog magnetskog polja  $H$  ne može dodatno povećati magnetizaciju materijala  $M$  pa se ukupna gustoća magnetskog toka  $B$  više ili manje izravnava (iako se magnetizacija nastavlja povećavati vrlo sporo s poljem zbog paramagnetizma) [21]. Saturacija je karakteristika feromagnetnih i ferimagnetskih materijala, poput željeza, nikla, kobalta i njihovih legura [21]. Zasićenje se najjasnije vidi na krivulji magnetizacije tvari ( $B$ - $H$  krivulja ili krivulja histereze) što se vidi kao savijanje desno od krivulje ([slika 10.](#)). S povećanjem polja  $H$ , polje  $B$  asimptotski se približava maksimalnoj vrijednosti, razini zasićenja tvari. Tehnički, iznad zasićenja, polje  $B$  nastavlja rasti, ali paramagnetskom

brzinom, koja je nekoliko redova veličine manja od brzine feromagneta koja se vidi ispod zasićenja [21].



**Slika 10.** Krivulja magnetizacije za devet feromagnetnih materijala, koja pokazuje zasićenje. (1) čelični lim, (2) silikonski čelik, (3) lijevani čelik, (4) volframov čelik, (5) magnetni čelik, (6) lijevano željezo, (7) nikal, (8) kobalt i (9) magnetit. Na osi apscisi prikazano je vanjsko magnetsko polje  $H$  u mjernim jedinicama „amperski okret/inč“, dok je na osi ordinati prikazano ukupno magnetsko polje u materijalu  $B$  u mjernim jedinicama T.[22]

Feromagnetni materijali (poput željeza) sastavljeni su od mikroskopskih područja koja se nazivaju magnetne domene, a koje djeluju kao mali permanentni magneti koji mogu promijeniti smjer magnetizacije. Prije nego što se vanjsko magnetsko polje primjeni na materijal, magnetska polja domena orijentirana su u svim smjerovima, poništavajući se, tako da je ukupno vanjsko magnetsko polje zanemarivo malo. Kad se vanjsko magnetsko polje  $H$  primjeni na materijal, ono prodire u materijal i poravnava domene, uzrokujući da se njihova sitna magnetska polja okreću i poravnaju paralelno s vanjskim poljem, zbrajajući se tako da stvore veliko magnetsko polje  $B$  koje se proteže iz materijala. To se naziva *magnetizacija*. Što je vanjsko magnetsko polje  $H$  jače, domene se više poravnavaju što daje veću gustoću magnetskog toka  $B$ . Na kraju su se, pri određenom vanjskom magnetskom polju, domene poravnale koliko im je kristalna struktura materijala dopustila pa je promjena u strukturi domena zanemariva pri povećanju vanjskog magnetskog polja iznad toga. Magnetizacija ostaje gotovo konstantna, a za nju se kaže da je zasićena [23].



### 3.2.3. Numeričke prilagodbe

Na gore prikazanim grafovima [1-5 (b)] korištene su numeričke prilagodbe u programu QtiPlot. Cilj numeričkih prilagodbi, tzv. fit krivulja, je konstrukcija krivulje ili matematičke funkcije koja najbolje odgovara nizu podatkovnih točaka [24]. U gore navedenim grafovima korištene su prilagodbe koje najbolje opisuju eksperimentalno dobivena mjerenja (magnetskog polja) te je tako za optičko staklo (kvarc) i maslinovo ulje korištena prilagodba polinoma šestog reda dok je za ostale materijale (KCl, NaCl i KBr) korištena prilagodba polinoma trećeg reda (*Polynomial fit*). U statistici, regresija polinoma je oblik regresijske analize u kojoj se odnos između neovisne varijable  $x$  i ovisne varijable  $y$  modelira kao polinom  $n$ -tog stupnja u  $x$  [25].

Funkcija koja opisuje *polinom prvog stupnja* je pravac:

$$y = a_1x + a_0 \quad (71)$$

gdje je  $a_1$  nagib pravca, a  $a_0$  koeficijent polinoma. Linija će spojiti bilo koje dvije točke, pa je jednadžba polinoma prvog stupnja točno uklapanje kroz bilo koje dvije točke s različitim  $x$  koordinatama.

Ako se stupanj polinoma poveća za jedan, dobiva se funkcija *polinoma drugog stupnja*:

$$y = a_2x^2 + a_1x + a_0 \quad (72)$$

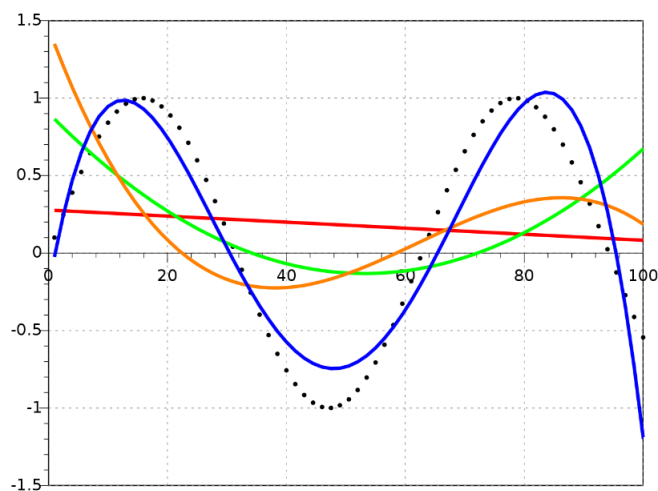
To će točno odgovarati jednostavnoj krivulji od tri točke.

Ako se stupanj polinoma poveća za još jedan, dobiva se funkcija *polinoma trećeg stupnja*:

$$y = a_3x^3 + a_2x^2 + a_1x + a_0 \quad (73)$$

To će točno odgovarati krivulji od četiri točke.

Na [slici 11](#), prikazan je odnos polinomskih krivulja prva četiri stupnja i „pravih“ podataka.



**Slika 11.** Točke uklapanja polinomskih krivulja generirane sinusnom funkcijom. Crna isprekidana linija prikazuje „prave“ podatke, crvena linija je polinom prvog stupnja, zelena linija drugog stupnja, narančasta linija trećeg stupnja, a plava linija četvrtog stupnja.[26]

Korištena prilagodba u grafovima [1 i 5 (b)], polinom šestog stupnja, najbolje opisuje srednje vrijednosti izmjerenog magnetskog polja za jakosti struje od (-) 8A do (+)8A za optičko staklo (kvarc) i maslinovo ulje. Funkcija polinoma šestog stupnja u QtiPlot-u dana je izrazom:

$$y = a_6x + a_5x^2 + a_4x^3 + a_3x^4 + a_2x^5 + a_1x^6 + a_0 \quad (74)$$

gdje su  $a_6, a_5, a_4, a_3, a_2, a_1$  i  $a_0$  koeficijenti polinoma dobiveni numeričkom prilagodbom.

Korištena prilagodba u grafovima [2-4 (b)], polinom trećeg stupnja, najbolje opisuje srednje vrijednosti izmjerenog magnetskog polja za jakosti struje od (-) 8A do (+)8A za KCl, NaCl i KBr. Funkcija polinoma trećeg stupnja u QtiPlot-u dana je izrazom:

$$y = a_3x + a_2x^2 + a_1x^3 + a_0 \quad (75)$$

gdje su  $a_3, a_2, a_1$  i  $a_0$  koeficijenti polinoma dobiveni numeričkom prilagodbom.

### 3.3. Mjerenje kuta zakrivljenosti ravnine polarizacije

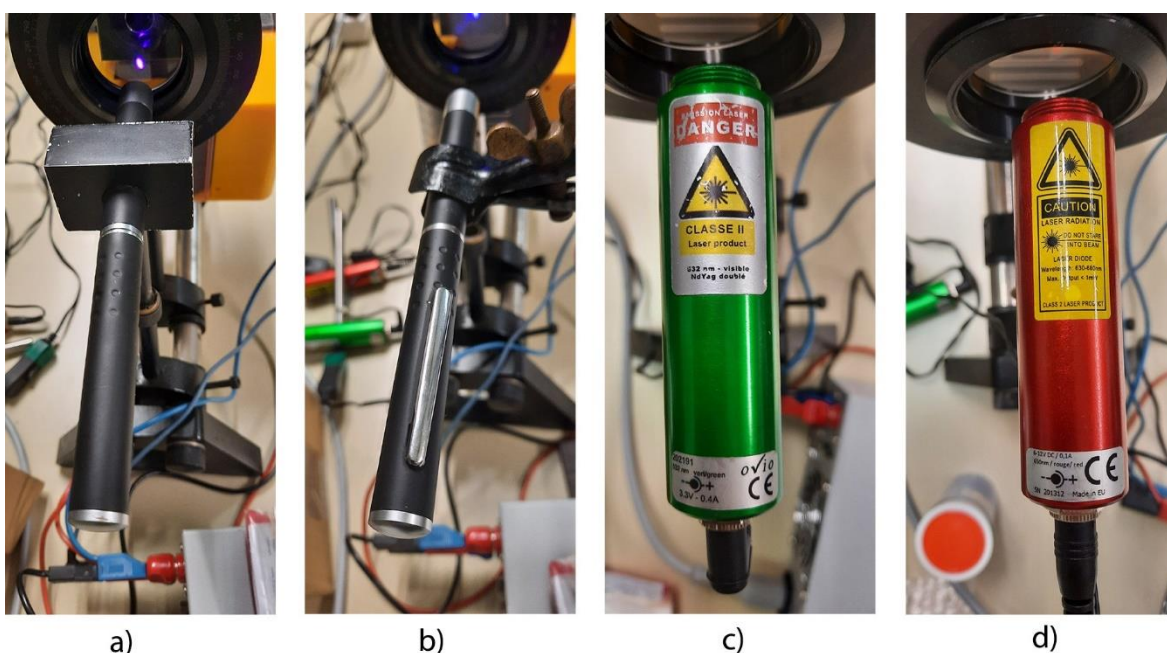
#### 3.3.1. Opis lasera

Nakon što je izmjerena jakost magnetskog polja u prostoru između magneta za zadani materijal, potrebno je prijeći na drugi dio mjerenja. Mjerenje kuta zakrivljenosti ravnine polarizacije započinje s umetanjem materijala između magneta za koje se izmjerilo magnetsko polje. Hallova sonda i digitalni teslametar nisu potrebni za ovaj dio mjerenja. Za svaki materijal vrši se mjerenje kuta zakrivljenosti ravnine polarizacije s četiri lasera različitih valnih duljina ([slika 12.](#)). Laser je uređaj za stvaranje i pojačavanje koherentnog elektromagnetskog, monokromatskog, usko usmjerenog zračenja [27]. Princip rada se osniva na kvantnim pojavama pri prijenosu energije zračenjem [27]. Izmjena energije zračenja s atomima ili molekulama aktivnog medija u laseru (plin, kristal, plazma), umjesto apsorpcijom i spontanom emisijom zračenja, odvija se stimuliranom emisijom. To se zbiva kada se na atom ili molekulu u pobuđenom stanju djeluje dodatnim izvorom energije (bijelom svjetlošću ili elektromagnetskim poljem). Uvjet za stimuliranu emisiju, odnosno za rad lasera, je veći broj atoma u pobuđenom stanju od broja atoma u nepobuđenom stanju. Laserski dobiveni fotoni imaju jednak smjer, frekvenciju, polarizaciju i energiju. Time se dobiva monokromatsko elektromagnetsko zračenje uskog paralelnog snopa praktički identičnih fotona i velike gustoće energije po širini spektralne linije [27]. To znači da za razliku od svjetlosti koju emitiraju uobičajeni izvori, kao što su žarulje, laserska je svjetlost monokromatska, to jest samo jedne valne duljine (boje) i usmjerena je u uskom snopu. Snop je koherentan, što znači da su elektromagnetski valovi međusobno u istoj fazi i šire se u

istom smjeru [27]. Zbog činjenice da Verdetova konstanta ovisi o valnoj duljini, u mjerenjima su laseri bili prijeko potrebni zbog svojih monokromatskih karakteristika (s običnom bijelom svjetlošću ne bi se mogla dobiti ovisnost o određenoj valnoj duljini). Laseri kao izvori svjetlosti izabrani su u mjerenjima zbog dva primarna razloga:

- 1) monokromatsko zračenje omogućava mjerenje kuta zakreta ravnine polarizacije te dobivanje Verdetove konstante za određenu valnu duljinu,
- 2) uski snop svjetlosti pogodan je za mjerenje otpora na fotootporniku jer prolaskom kroz materijal (kristal, maslinovo ulje) ne dolazi do prevelikog raspršenja snopa svjetlosti.

Laseri korišteni u svim mjerenjima sljedećih su valnih duljina i pripadnih boja: (405 nm – ljubičasta svjetlost, 450 nm – plava svjetlost, 532 nm – zelena svjetlost i 650 nm crvena svjetlost).

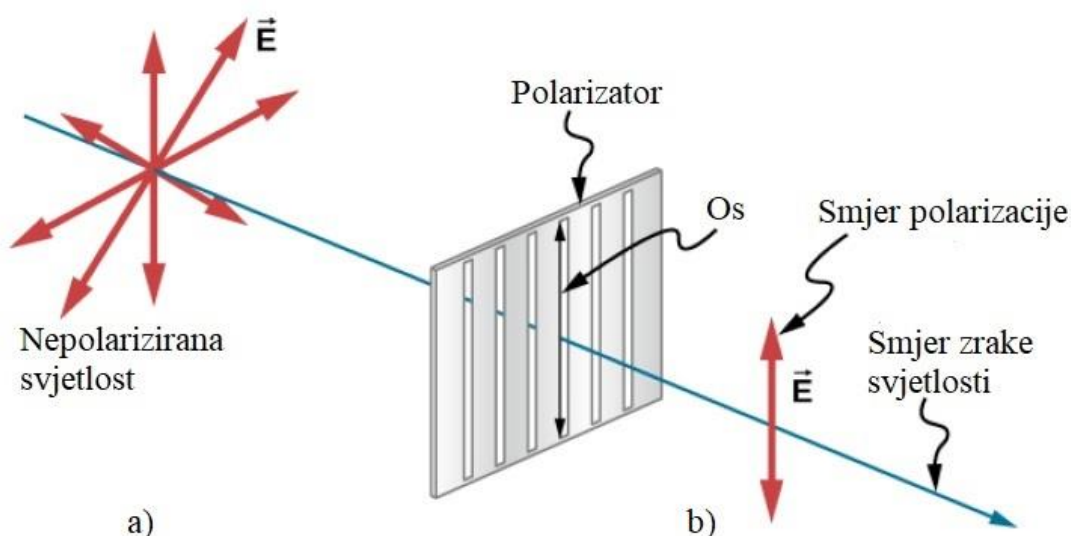


**Slika 12.** Monokromatski laseri različitih valnih duljina. (a) 405 nm – ljubičasta svjetlost, (b) 450 nm – plava svjetlost, (c) 532 nm – zelena svjetlost, (d) 650 nm – crvena svjetlost.

Snaga ljubičastog i plavog lasera iznosi 5 mW te su za rad potrebne dvije AAA baterije napona 1.5 V. Zeleni i crveni laser imaju vlastito kabelsko napajanje od 6 V te su iz tog razloga njihovi snopovi svjetlosti jači nego kod ljubičastog i plavog lasera. Plavi laser kupljen je preko internet trgovine dok su preostala tri lasera standardna oprema fakulteta na kojem je vršeno mjerenje. Zbog fotosenzibilnog otpornika sva mjerenja su izvršena u mraku.

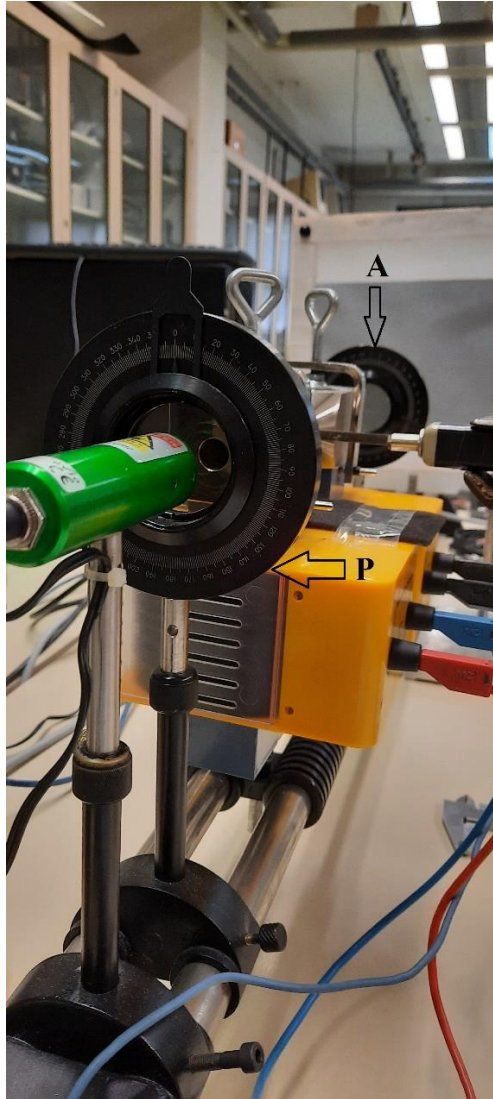
### 3.3.2. Opis polarizatora

Sunce i mnogi drugi izvori svjetlosti proizvode elektromagnetske valove koji imaju električna polja u nasumičnim smjerovima [12]. Za takvo se svjetlo kaže da je nepolarizirano, jer se sastoji od mnogih valova sa svim mogućim smjerovima polarizacije. Polaroidni materijali – koje je izumio osnivač Polaroid korporacije, Edwin Land – djeluju kao polarizirajuća pukotina za svjetlost, dopuštajući samo polarizaciju u jednom smjeru (slika 13.). Polarizacijski filteri, zvani još i *polarizatori*, sastavljeni su od dugih molekula poravnatih u jednom smjeru. Os polarizatora je smjer koji filter propušta električno polje elektromagnetskog vala [12].



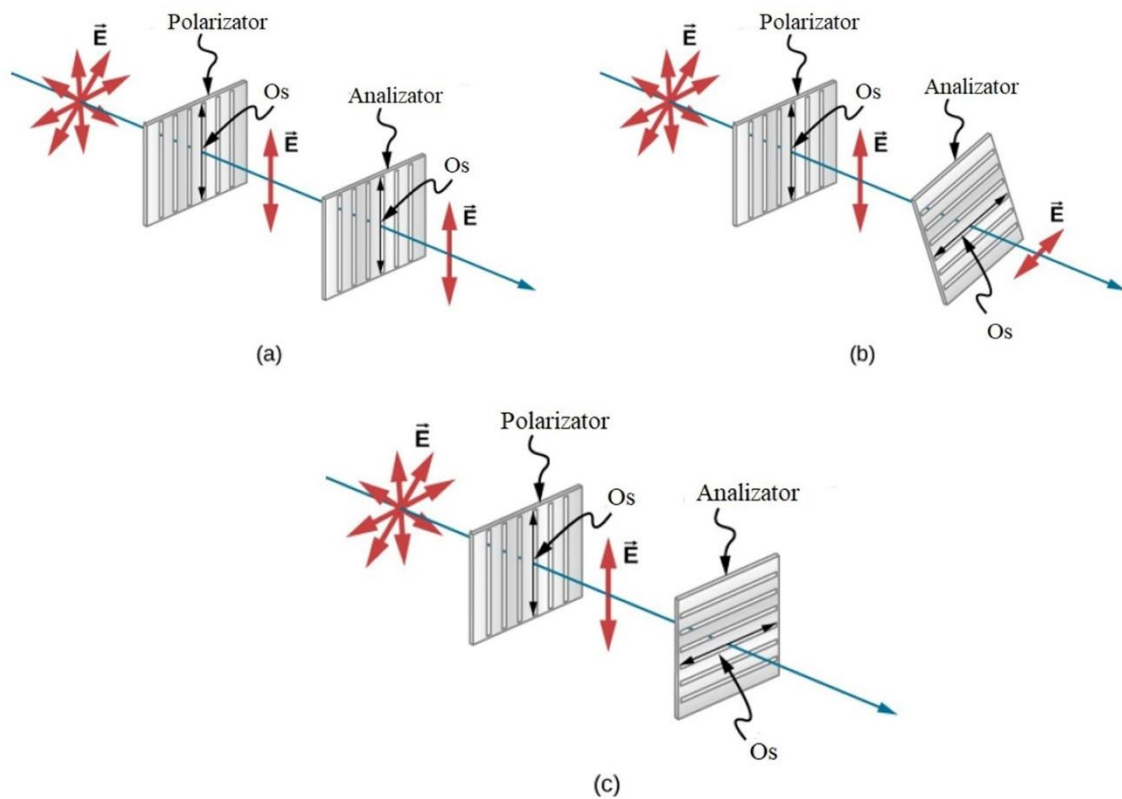
**Slika 13.** Tanka strelica predstavlja zraku nepolarizirane svjetlosti. Podebljane strelice predstavljaju smjer polarizacija pojedinih valova koji tvore zraku. (a) Ako je svjetlo nepolarizirano, strelice pokazuju u svim smjerovima. (b) Polarizator ima polarizacijsku os koja djeluje kao pukotina kroz koju prolaze električna polja paralelna sa smjerom osi. Smjer polarizacije elektromagnetskog vala definira se kao smjer njegovog električnog polja.[12]

Za mjerenje kuta zakreta polarizacije svjetlosti potrebna su dva polarizatora. Prvi polarizator nalazi se odmah nakon lasera te je njegova svrha produkcija ravne polarizirane svjetlosti [28]. Nakon uzorka kroz koji se propušta polarizirana svjetlost, nalazi se drugi polarizator koji se naziva *analizator*, a njegova svrha je provjera polariziranosti svjetla. Jedina razlika između polarizatora i analizatora je njihova primjena. Oba uređaja imaju pomičnu kazaljku koja se može zakretati oko ruba uređaja. Položaj kazaljke određuje smjer polarizacije svjetla te se na rubu polarizatora može iščitati kut zakreta polarizacije (slika 14.). Cijeli krug podijeljen je na 360 stupnjeva. Ukoliko je kazaljka postavljena na  $0^\circ$ , smjer polarizacije je u smjeru  $0^\circ - 180^\circ$  (kako je prikazano na slici 13.).



**Slika 14.** (P) polarizator – kazaljka se može zakretati za  $360^\circ$ . Kazaljka je na položaju  $0^\circ$  – svjetlost iz lasera se polarizira u smjeru  $0^\circ - 180^\circ$  (gore-dolje). (A) analizator – služi za ispitivanje polarizirane svjetlosti.

Na [slici 15.](#) prikazan je učinak polarizatora i analizatora na izvorno nepolarizirano svjetlo. Prvi polarizator polarizira svjetlost duž svoje osi. Kad su osi polarizatora i analizatora poravnate (paralelne) tada analizator propušta svu polariziranu svjetlost iz polarizatora. Ako se analizator zakrene (pomakne se kazaljka), samo će komponenta svjetla paralelna s osi analizatora proći. Kad su osi okomite jedna na drugu, analizator ne propušta svjetlo [12].



**Slika 15.** Učinak rotiranja polarizatora i analizatora, pri čemu polarizator polarizira svjetlost. (a) Sva polarizirana svjetlost prolazi kroz analizator jer mu je os paralelna s osi polarizatora. (b) Kako se analizator okreće, prolazi samo dio svjetla. (c) Kad je analizator okomit na polarizator, ne prolazi svjetlo.[12]

Tijekom mjerenja kazaljka na polarizatoru je uvijek na položaju  $0^\circ$  te se kroz polarizator propušta svjetlost polarizirana u smjeru  $0^\circ - 180^\circ$ . Ukoliko je kazaljka na analizatoru također namještena na položaj  $0^\circ$ , maksimalni intenzitet svjetla se propušta kroz analizator te se na fotootporniku očitava maksimum (svjetlo najjačeg intenziteta). Ukoliko je kazaljka na analizatoru namještena na  $90^\circ$ , kroz analizator se ne propušta svjetlo te se na fotootporniku očitava minimum (svjetlo najslabijeg intenziteta). To vrijedi za slučaj kad se električna struja ne primjenjuje na elektromagnete te kad uzorak nije stavljen između polova elektro-magneta. Ukoliko se stavi uzorak između polova elektro-magneta te se na elektromagnete primjeni električna struja koja generira magnetsko polje, maksimum više neće biti na položaju  $0^\circ$  (kazaljka na analizatoru), već će biti pomaknut za neki kut lijevo ili desno od  $0^\circ$  (ovisno o smjeru struje, vrsti materijala, te boji lasera). Interval maksimuma polarizirane svjetlosti nije pogodan za mjerenje zbog svoje širine (fotootpornik očitava istu vrijednosti za interval i do  $10^\circ$ ) te su zbog toga mjereni minimumi polarizirane svjetlosti (širinu minimuma bilo je moguće precizno odrediti uz pogrešku od  $0.25^\circ$ ). Za svaku jakost

struje očitana su dva minimuma, jedan desno od  $0^\circ$ , drugi lijevo od  $0^\circ$ . Maksimum se izračunava kao polovica kuta između dva minimuma preko formule:

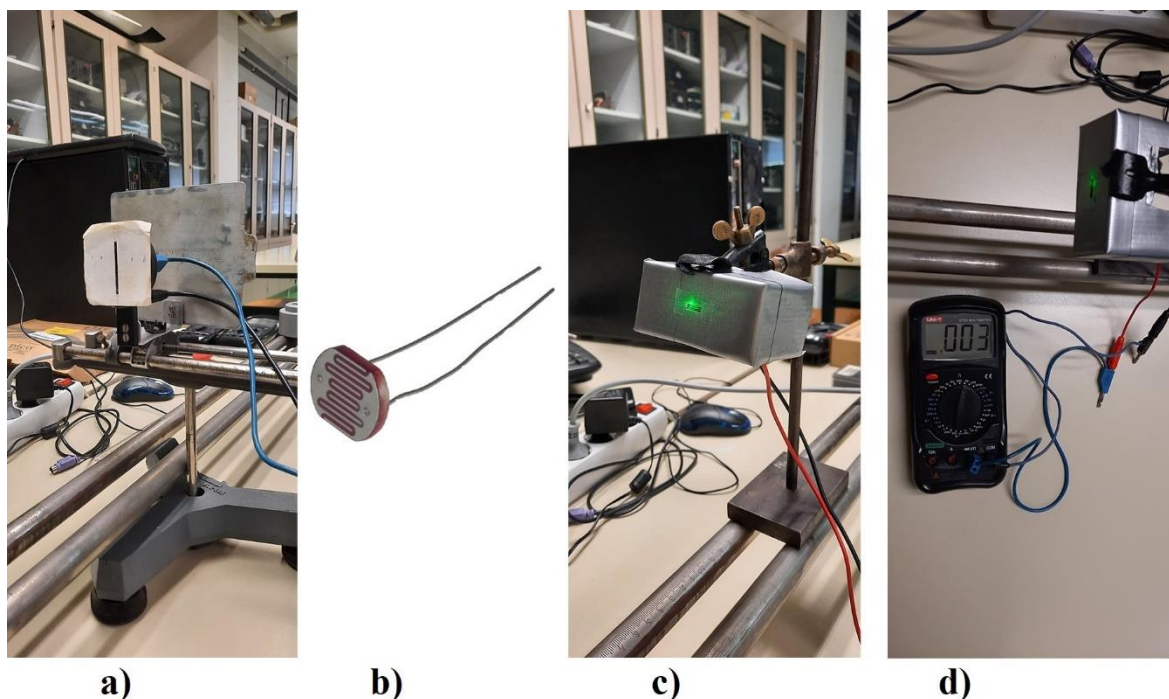
$$\theta_{max} = \frac{\theta_{min D} + \theta_{min L} - 360^\circ}{2}, \quad (76)$$

gdje je  $\theta_{max}$  - kut maksimuma polarizirane svjetlosti,  $\theta_{min D}$  – kut desnog minimuma (od  $0^\circ$ ) polarizirane svjetlosti, a  $\theta_{min L}$  – kut lijevog minimuma (od  $0^\circ$ ) polarizirane svjetlosti. Za svaki materijal mjere se kutovi zakreta ravnine polarizacije svjetlosti za četiri lasera (405 nm, 450 nm, 532 nm i 650 nm), osam jakosti struje (od 1 A do 8 A) te dva smjera struje (pozitivni [(+)1 A - (+)8 A] i negativni [(-)1 A - (-)8 A]).

### 3.3.3. Opis fotootpornika

Fotootpornik (također poznat kao otpornik ovisan o svjetlu, LDR ili fotovodljiva ćelija) pasivan je element čiji se otpor smanjuje u odnosu na primanje svjetlosti na osjetljivoj površini elementa [29]. Otpor fotootpornika opada s povećanjem intenziteta upadne svjetlosti; drugim riječima, pokazuje fotovodljivost. Fotootpornik se izrađuje od poluvodiča s velikim električnim otporom. U mraku, fotootpornik može imati otpor čak do nekoliko megaoma ( $M\Omega$ ), dok u svjetlu fotootpornik može imati otpor čak do nekoliko stotina oma [29]. Ako svjetlo koje upada na fotootpornik prelazi određenu frekvenciju, fotoni koje apsorbira poluvodič daju vezanim elektronima dovoljnu energiju za skok u vodljivu zonu. Rezultirajući slobodni elektroni (i šupljine) provode električnu energiju, čime se smanjuje otpor. Raspon otpora i osjetljivost fotootpornika mogu se značajno razlikovati među različitim uređajima [29].

Fotootpornik dostupan na fakultetu ([slika 16. \(a\)](#)) (iz prostorija praktikuma) nije se pokazao najboljim rješenjem; osjetljivost na svjetlo premala je za ovu vrstu mjerenja. Prilikom mjerenja minimuma polarizirane svjetlosti, preciznost očitavanja otpora na multimetru nije bila zadovoljavajuća unatoč podešavanju otpora na osjetljivije skale. Iz tog je razloga kupljen fotootpornik PFW-1051 10 MM ([slika 16. \(b\)](#)), snage 200mW [29]. Raspon svjetlosnog otpora je 5 - 10  $k\Omega$  dok otpor na tamno iznosi 1  $M\Omega$  [29]. Na fotootpornik su zalemljena dva priključna kabela te je napravljeno kućište s prednjim otvorom na koje pada svjetlost iz lasera ([slika 16. \(c\)](#)). Fotootpornik s kućištem stavljen je na stalak koji je stavljen na optičku klupu. Multimetar UT-51 spojen je paralelno na fotootpornik ([slika 16. \(d\)](#)) te je namješten za mjerenje otpora. Mjerno područje namješteno je na 2 $M\Omega$  (multimetar mjeri otpor u rasponu od 1 do 10  $M\Omega$ ).



**Slika 16.** (a) Fotootpornik iz prostorija praktikuma, nezadovoljavajuća osjetljivost na svjetlo. (b) Fotootpornik PFW-1051 10 MM, snage 200 mW, svjetlosni otpor: 5 - 10 k $\Omega$ , otpor na tamno: 1 M $\Omega$ . (c) Kućište ručne izrade s prednjim otvorom za upadno svjetlo. Priključni kablovi su zalemljeni na fotoopornik te se nalaze sa stražnje strane kućišta. Na slici je prikazana upadna svjetlost iz zelenog lasera (532 nm). (d) Multimetar UT-51 spojen paralelno na fotootpornik. Jedan priključni kabel spojen je u u multimetar u označeni ulaz za otpor, dok je drugi spojen u označeno uzemljenje „COM“. Na multimetru se očitava vrijednost otpora te je mjerno područje namješteno na 2M $\Omega$ .

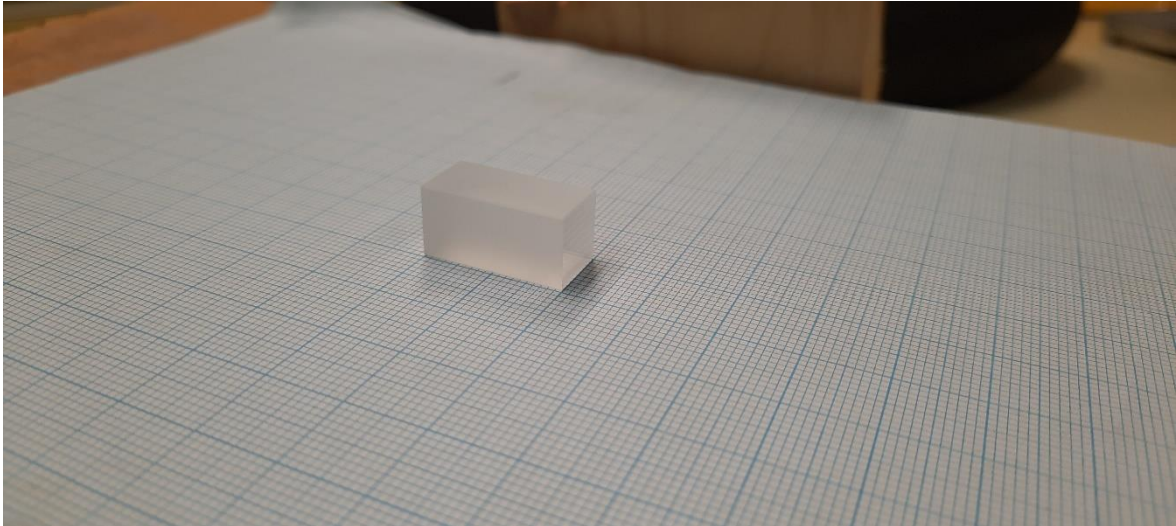
### 3.3.4. Opis materijala

Za mjerenje kuta zakreta ravnine polarizacije svjetlosti korišteno je pet uzoraka. Uzorci se mogu podijeliti na dvije skupine po vrsti strukture i agregatnog stanja:

- 1) kristali,
- 2) tekućine.

Iz skupine kristala korišteni su sljedeći materijali: *optičko staklo* (kvarc, SiO<sub>2</sub>) ([slika 17.](#)), *kalijev klorid* (KCl), *natrijev klorid* (NaCl) i *kalijev bromid* (KBr) ([slika 18.](#)). Dimenzije svih uzoraka izmjereni su preciznim pomičnim mjerilom ([slika 19.](#)) s preciznošću 0.1 mm. Svi uzorci posuđeni su iz prostorija fakulteta namijenjenih za laboratorijske vježbe. Iz skupine tekućina korišteno je maslinovo ulje *Olivenöl – Roth* ([slika 20.](#)). Svi materijali su transmisivni (propuštaju svjetlo).





**Slika 17.** Kristal *optičkog stakla (kvarca)*. Dimenzije kristala su:  $x = 20$  mm,  $y = 10$  mm,  $z = 10$  mm ( $x =$  duljina,  $y =$  širina,  $z =$  visina). Uzorak je postavljen između magneta tako da svjetlost prolazi najdužom stranicom od 20 mm.



**Slika 18.** Kristali *KCl*, *NaCl* i *KBr*. Dimenzije kristala *KCl* su:  $x = 3.6$  mm,  $y = 3.9$  mm,  $z = 3.4$  mm. Dimenzije kristala *NaCl* su:  $x = 4.0$  mm,  $y = 3.9$  mm,  $z = 4.8$  mm. Dimenzije kristala *KBr* su:  $x = 4.8$  mm,  $y = 5.3$  mm,  $z = 4.9$  mm ( $x =$  duljina,  $y =$  širina,  $z =$  visina). Kristali su postavljeni između magneta tako da su duljine stranice kroz koje prolazi svjetlost za *KCl* = 3.6 mm, za *NaCl* = 4.0 mm, a za *KBr* = 4.8 mm.



**Slika 19.** Pomično mjerilo s preciznošću 0.1 mm.



**Slika 20.** Maslinovo ulje visoke kakvoće *Olivenöl* (Roth). Maslinovo ulje koristi se za različita mjerenja ovisno o potrebi fakulteta.

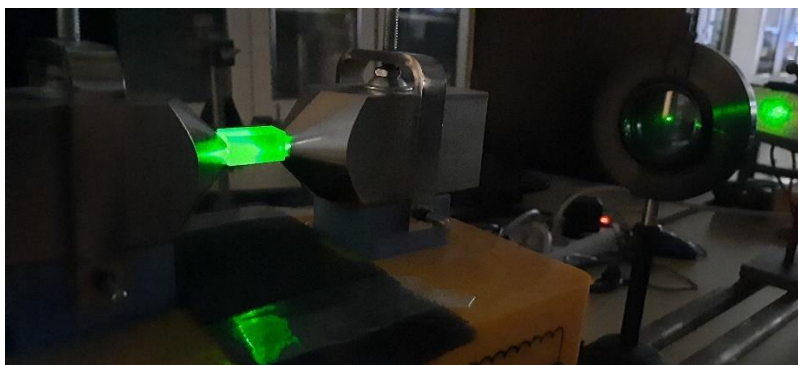
*Kvarcno staklo (flint glass)* vrsta je optičkog stakla koje se sastoji većinom od silicijeva dioksida ( $SiO_2$ ) s primjesama olova i kalija [30]. Glavna komponenta kvarcnog stakla je kvarc koji je polimorfna modifikacija (kristalni oblik) silicijeva dioksida i jedan je od najrasprostranjenijih minerala u prirodi [30]. Kvarc ima relativno visok indeks loma u rasponu od 1.45 do 2.00 [30]. Transmisivnost (propuštanje svjetla) kod optičkog stakla može biti i do 95% za uzorak debljine 10 mm za valnu duljinu 350-360 nm [31].

*Natrijev klorid (NaCl)*, poznat i kao kuhinjska sol, ionski je spoj natrija i klora u omjeru 1:1 [32]. Dolazi u obliku prozirnih kristala dobro topljivih u vodi. U prirodi je vrlo rasprostranjen i najrašireniji spoj je natrija, a njegov najvažniji izvor je morska voda u kojoj mu je maseni udio oko 2.8 – 3% [32]. U Zemljinoj kori nalazi se u naslagama kao kamena sol, halit, a u manjim količinama ima ga u svakom tlu. Čisti natrijev klorid bezbojni je ionski kristal slana okusa. Kristalizira se u kubičnom sustavu. Građevne jedinice kristalne strukture su natrijevi i kloridni ioni. Kristal je sastavljen od plošno centriranih struktura natrijevih i kloridnih iona međusobno pomaknutih za polovicu duljine brida elementarne ćelije. Koordinacijski broj natrijevog i kloridnog iona je šest. Za takav je koordinacijski broj najčešći oktaedarski prostorni raspored iona. Gustoća iznosi  $5.65 \text{ g/cm}^3$ , a talište mu je na  $414.5^\circ$ . Indeks loma za valnu duljinu od 532 nm iznosi 1.5484 [33], dok mu je transmisivnost na uzorku od 4 mm 90% za infracrveni spektar (od 200 nm do 20  $\mu\text{m}$ ). [34].

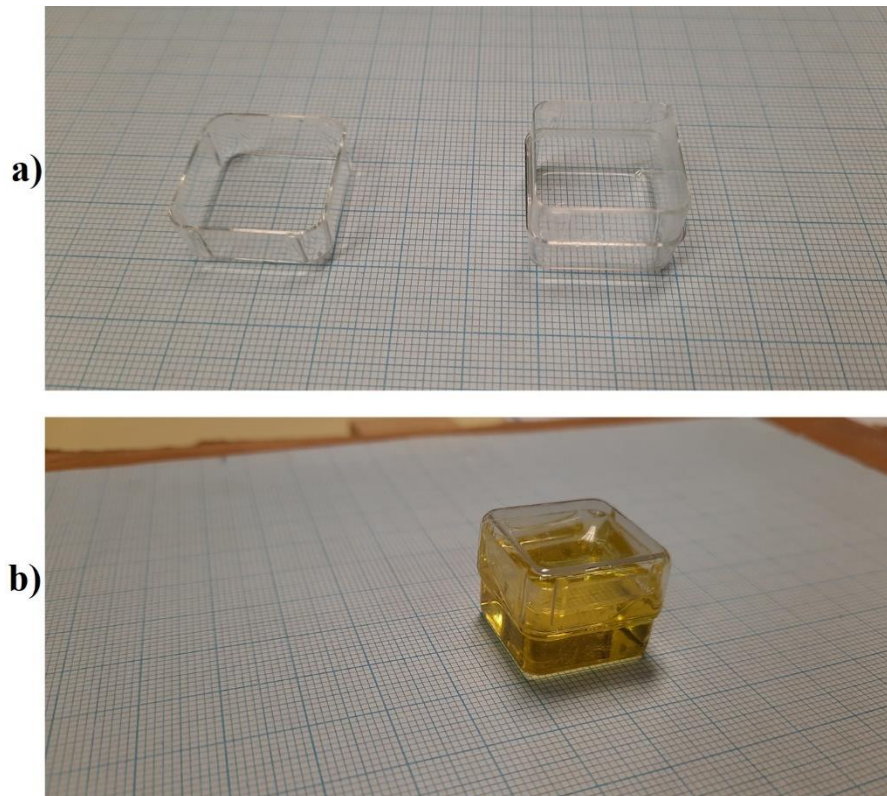
*Kalijev klorid (KCl)* najvažnija je kalijeva sol. U prirodi se nalazi kao mineral silvin ili kao sastojak karnalita. Kalijev klorid je bjelkasto-bezbojan kristal izuzetno slana okusa, topljiv u vodi [35]. Najčešće se upotrebljava kao umjetno gnojivo [35]. Kristalna struktura kalijevog klorida ista je kao i kod natrijevog klorida [35]. Gustoća kalijevog klorida iznosi  $1.984 \text{ g/cm}^3$ , dok mu je talište na  $770^\circ$ . Indeks loma iznosi 1.494 pri valnoj duljini od 532 nm [36]. Transmisivnost kod kalijevog klorida može biti i do 92% pri valnoj duljini od 450 nm [37].

*Kalijev bromid (KBr)* u standardnim uvjetima nalazi se u obliku bijelog kristalnog praha [38]. Koristi se u veterini kao lijek za epilepsiju. Kbr je transparentan u širokom spektru vidljive svjetlosti, od ultraljubičastih do dugih infracrvenih valova. Nema značajnijih optičkih apsorpcijskih linija u svom transmisijskom dijelu. Koristi se za optičke prozore i prizme. Mora se čuvati u suhom okruženju zbog svoje higroskopske prirode. Kristalna struktura kalijevog klorida ista je kao i kod natrijevog i kalijevog klorida. Gustoća kalijevog bromida iznosi  $2.74 \text{ g/cm}^3$ , dok mu je talište na  $734^\circ$  [38]. Indeks loma iznosi 1.5655 pri valnoj duljini od 532 nm [39].

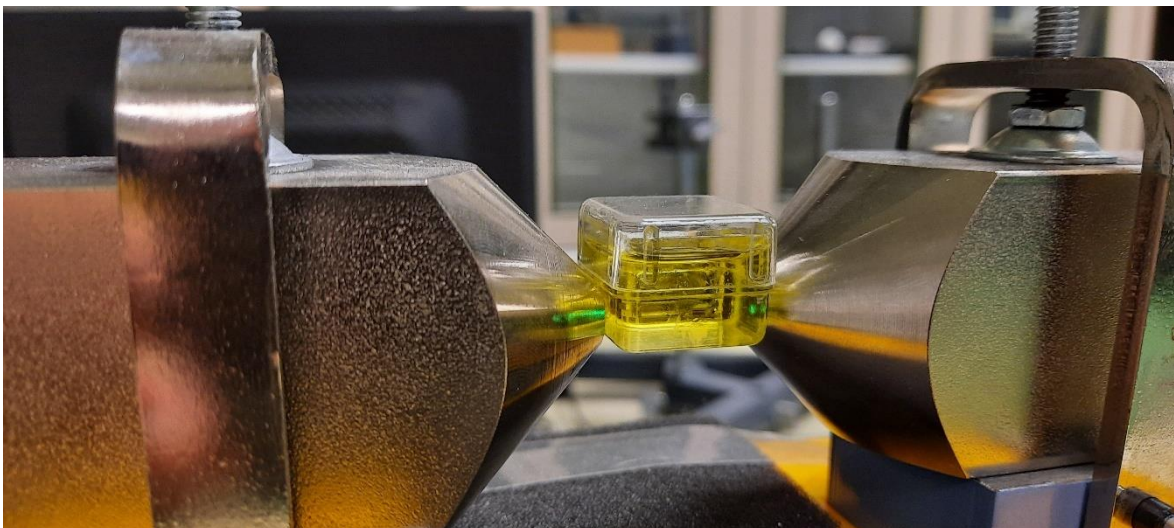
*Maslinovo ulje* vrsta je masnog ulja dobivena iz plodova maslina. Sastav maslinovog ulja ovisi o kultivaru, nadmorskoj visini, vremenu berbe i procesu ekstrakcije. Sastoji se uglavnom od oleinske kiseline (do 83%), s manjim količinama drugih masnih kiselina uključujući linolnu kiselinu (do 21%) i palmitinsku kiselinu (do 20%). Ekstra djevičansko maslinovo ulje ne smije imati kiselost veću od 0,8% (slobodne masne kiseline) [40]. Transmisivnost maslinovog ulja je oko 44% za valnu duljinu od 532 nm [41]. Uzorak s maslinovim uljem stavljen je u plastičnu posudicu ([slika 22.](#)) koja je zatim postavljena između magneta ([slika 23.](#)) pri čemu je vršeno mjerenje kuta zakreta ravnine polarizacije svjetlosti. Nije primijećen nikakav otklon ravnine polarizacije same plastične posude (bez maslinovog ulja) čak ni pri jakosti struje od 8 A.



**Slika 21.** Svjetlo iz lasera valne duljine 532 nm prolazi kroz kristal kvarca te pada na fotootpornik.



**Slika 22.** (a) Plastična posudica dimenzija:  $x = 20.6 \text{ mm}$ ,  $y = 20.6 \text{ mm}$ ,  $z = 16.8 \text{ mm}$ . Rub posudice kroz koji prolazi svjetlost debljine je  $0.6 \text{ mm}$ , stoga je ukupna dužina uzorka kroz koju prolazi svjetlost  $19.4 \text{ mm}$ . (b) Plastična posudica s maslinovim uljem.



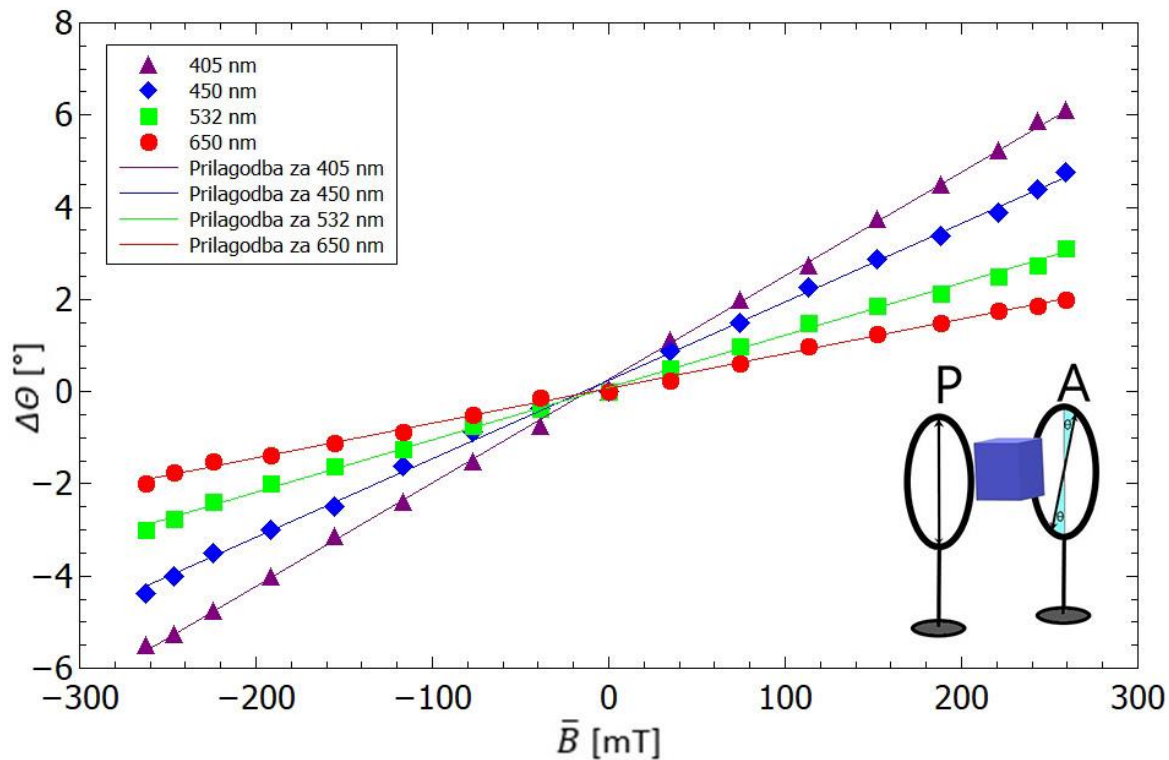
**Slika 23.** Uzorak maslinovog ulja u plastičnoj posudici postavljen između metalnih prizama. Polovi prizama su naslonjeni na dio plastične posudice na kojoj debljina stijenke iznosi  $0.6 \text{ mm}$  sa svake strane. Kroz uzorak prolazi zeleni laser valne duljine  $532 \text{ nm}$ .

## 4. Rezultati i diskusija

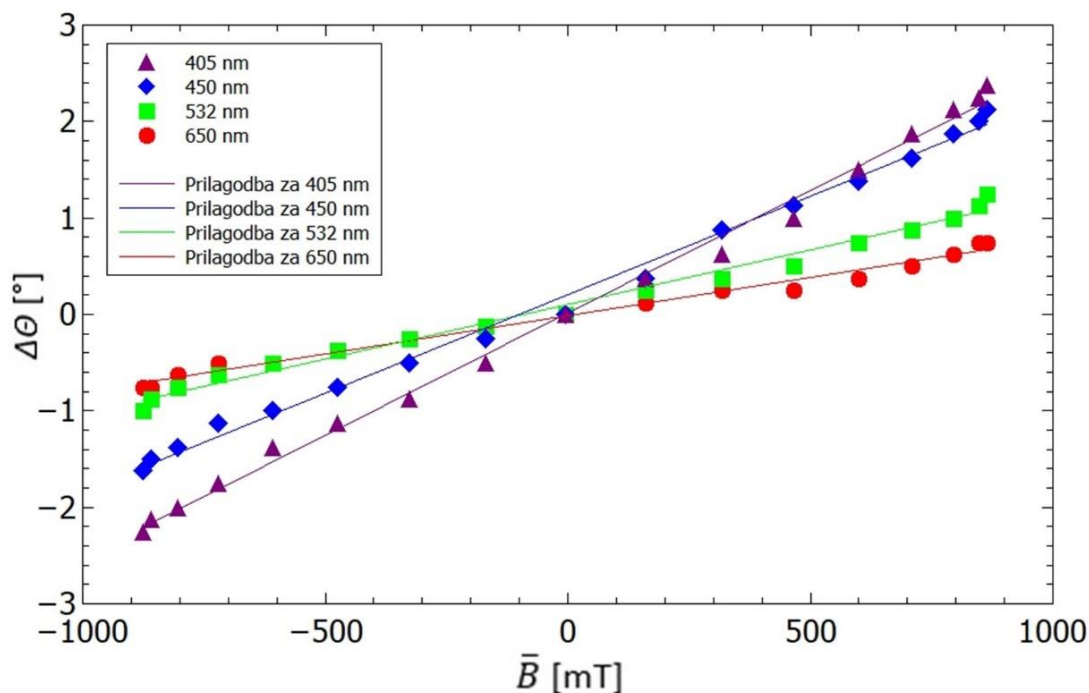
### 4.1. Rezultati

#### 4.1.1. Ovisnost kuta zakreta polarizirane svjetlosti i srednjeg magnetskog polja

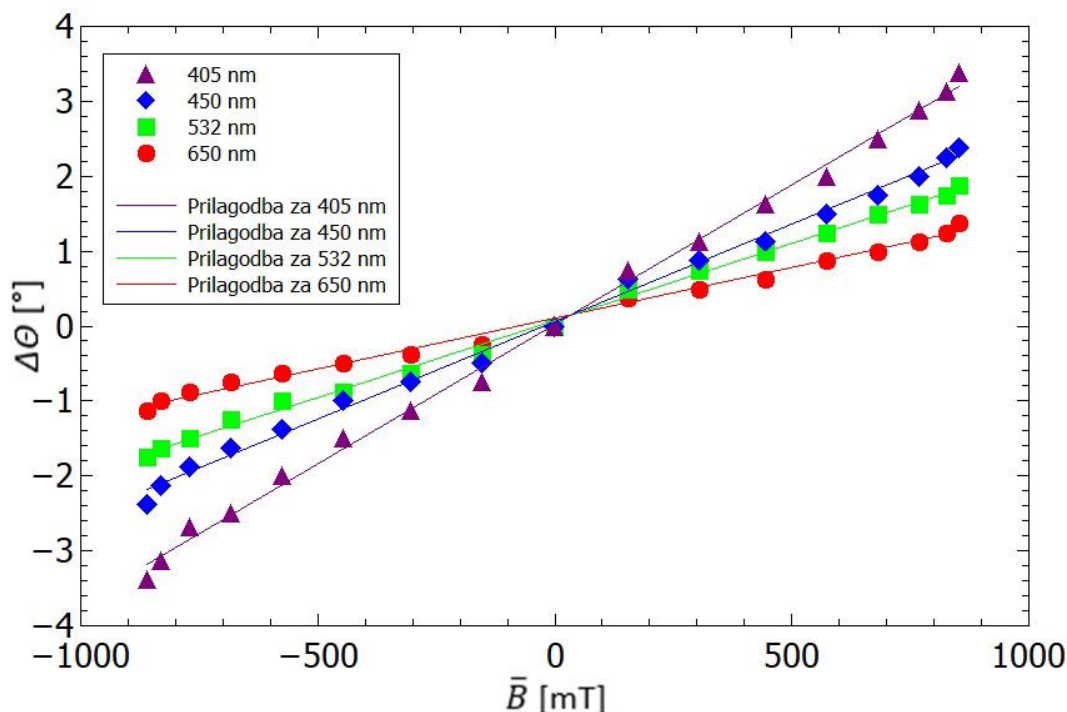
Za svaki pojedini materijal izmjeren je kut zakreta polarizirane svjetlosti za četiri lasera valnih duljina: 405 nm, 450 nm, 532 nm i 650 nm. Kut zakreta polarizirane svjetlosti mjerio se za osam jakosti struja za svaki smjer struje (od -8 A do + 8 A). Kut zakreta polarizirane svjetlosti mogao se mjeriti s preciznošću od  $0.5^\circ$ . Ovisnost kuta zakreta polarizirane svjetlosti  $\Delta\theta$  i srednjeg magnetskog polja  $\bar{B}$  prikazana je u grafovima [6-10] za sljedeće materijale: optičko staklo (*kvarc*), kalijev klorid (*KCl*), natrijev klorid (*NaCl*), kalijev bromid (*KBr*) i maslinovo ulje (*Olivenöl – Roth*). Na svakom grafu, karakterističnom za svojstveni materijal, prikazana su mjerenja za sva četiri lasera kao i njihove linearne prilagodbe. Na osi apscisi u grafovima [6-10] nalazi se srednje magnetsko polje koje se dobilo direktnim uvrštavanjem vrijednosti jakosti struja u numeričke prilagodbe korištene u grafovima [1-5]. Numeričke prilagodbe korištene u potonjim grafovima su prilagodbe polinoma trećeg ili šestog reda, ovisno o izmjerenim vrijednostima magnetskog polja za zadani materijal. Kalibracija očitavanja kuta zakreta polarizirane svjetlosti određena je na sljedeći način: očitavan je kut polarizacije svjetlosti određenog materijala za laser određene valne duljine za jakost struje od 0 A. Svim kutovima koji se očitavaju desno od tog kuta pridaje se pozitivna vrijednost kuta dok se kutovima koji se očitavaju lijevo od tog kuta pridaje negativna vrijednost kuta. Kutovi se očitavaju u stupnjevima.



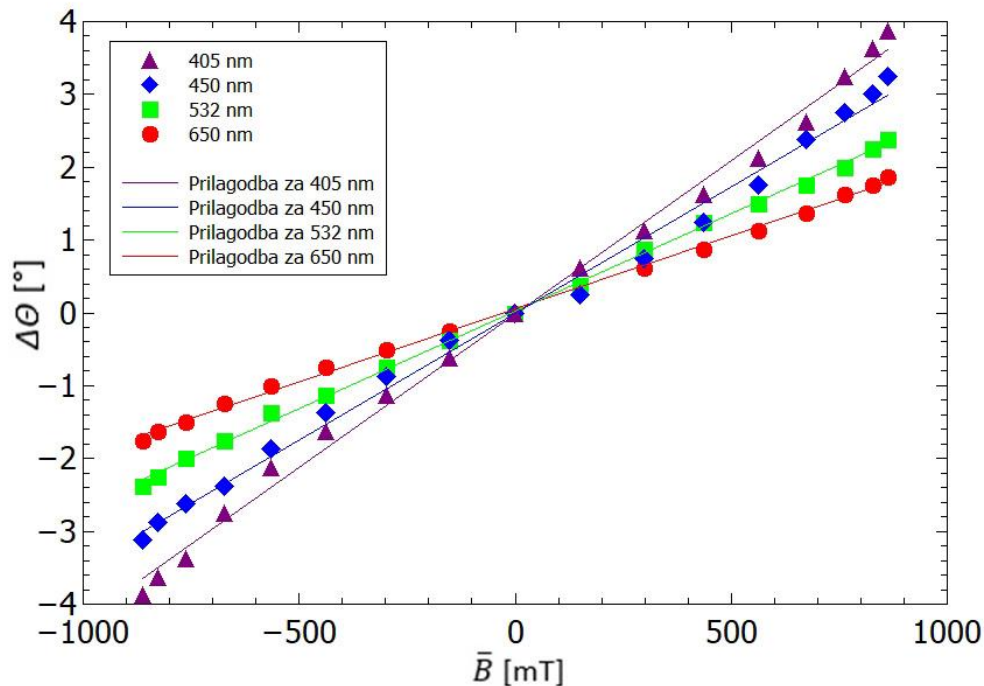
**Graf 6.** Ovisnost kuta zakreta polarizirane svjetlosti o srednjem magnetskom polju za optičko staklo (*kvarc*). Na osi apscisi prikazana je srednja vrijednost jakosti magnetskog polja u mT koja je korelirana s jakosti struje. Na osi ordinati prikazan je kut zakreta polarizirane svjetlosti u stupnjevima. Na skici u donjem desnom kutu prikazan je kut zakreta ravnine polarizacije kojeg se očitava na analizatoru. Polarizator je namješten na nulu te je svjetlost koja prolazi kroz njega polarizirana u smjeru 0-180°. Između polarizatora i analizatora nalaze se elektro-magneti te uzorak kroz koji prolazi polarizirana svjetlost. Na analizatoru je prikazan kut zakreta polarizirane svjetlosti  $\theta$  nakon što svjetlost prođe kroz uzorak koji se nalazi u magnetskom polju. Geometrijski likovi na grafu prikazuju eksperimentalno dobivene vrijednosti kuta zakreta svjetlosti pojedinih valnih duljina s time da svaka boja na grafu prezentira boju lasera u stvarnom mjerenju. Pravci prikazuju linearnu prilagodbu za eksperimentalno dobivene vrijednosti kuta zakreta ravnine polarizacije.



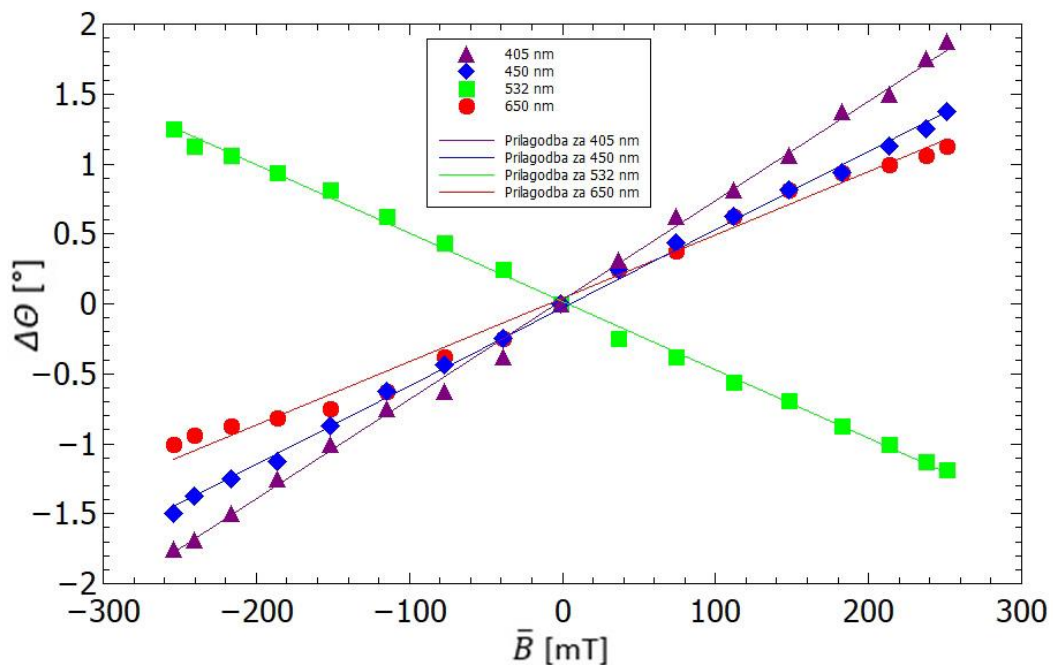
**Graf 7.** Ovisnost kuta zakreta polarizirane svjetlosti o srednjem magnetskom polju za *KCl*. Na osi apscisi prikazana je srednja vrijednost jakosti magnetskog polja u mT koja je korelirana s jakosti struje. Na osi ordinati prikazan je kut zakreta polarizirane svjetlosti u stupnjevima. Geometrijski likovi na grafu prikazuju eksperimentalno dobivene vrijednosti kuta zakreta za svjetlosti pojedinih valnih duljina s time da svaka boja na grafu prezentira boju lasera u stvarnom mjerenju. Pravci prikazuju linearnu prilagodbu za eksperimentalno dobivene vrijednosti kuta zakreta ravnine polarizacije.



**Graf 8.** Ovisnost kuta zakreta polarizirane svjetlosti o srednjem magnetskom polju za *NaCl*. Na osi apscisi prikazana je srednja vrijednost jakosti magnetskog polja u mT koja je korelirana s jakosti struje. Na osi ordinati prikazan je kut zakreta polarizirane svjetlosti u stupnjevima. Geometrijski likovi na grafu prikazuju eksperimentalno dobivene vrijednosti kuta zakreta za svjetlosti pojedinih valnih duljina s time da svaka boja na grafu prezentira boju lasera u stvarnom mjerenju. Pravci prikazuju linearnu prilagodbu za eksperimentalno dobivene vrijednosti kuta zakreta ravnine polarizacije.



**Graf 9.** Ovisnost kuta zakreta polarizirane svjetlosti o srednjem magnetskom polju za *KBr*. Na osi apscisi prikazana je srednja vrijednost jakosti magnetskog polja u mT koja je korelirana s jakosti struje. Na osi ordinati prikazan je kut zakreta polarizirane svjetlosti u stupnjevima. Geometrijski likovi na grafu prikazuju eksperimentalno dobivene vrijednosti kuta zakreta za svjetlosti pojedinih valnih duljina s time da svaka boja na grafu prezentira boju lasera u stvarnom mjerenju. Pravci prikazuju linearnu prilagodbu za eksperimentalno dobivene vrijednosti kuta zakreta ravnine polarizacije.



**Graf 10.** Ovisnost kuta zakreta polarizirane svjetlosti o srednjem magnetskom polju za *maslinovo ulje*. Na osi apscisi prikazana je srednja vrijednost jakosti magnetskog polja u mT koja je korelirana s jakosti struje. Na osi ordinati prikazan je kut zakreta polarizirane svjetlosti u stupnjevima. Geometrijski likovi na grafu prikazuju eksperimentalno dobivene vrijednosti kuta zakreta za svjetlosti pojedinih valnih duljina s time da svaka boja na grafu prezentira boju lasera u stvarnom mjerenju. Pravci prikazuju linearnu prilagodbu za eksperimentalno dobivene vrijednosti kuta zakreta ravnine polarizacije. Za kut zakreta polarizirane svjetlosti iz lasera 532 nm valne duljine izmjerene su inverzne vrijednosti; za pozitivan smjer struje (magnetskog polja) izmjerene su negativne vrijednosti kuta zakreta polarizacije svjetlosti i obrnuto.



#### 4.1.2. Ovisnost Verdetove konstante o valnoj duljini svjetlosti

Linearne prilagodbe korištene u grafovima [6-10] su pravci oblika

$$y = a \cdot x + b \quad (77)$$

koji najbolje opisuju eksperimentalno dobivene vrijednosti kuta zakreta polarizirane svjetlosti. Parametar  $a$  odgovara nagibu pravca, dok je parametar  $b$  odsječak na  $y$  osi. Iz formule za izračunavanje kuta zakreta polarizirane svjetlosti:

$$\Delta\theta = V(\lambda) \cdot \bar{B} \cdot l \quad (78)$$

lako se dobije izraz za Verdetovu konstantu. Ako se jednačba (78) podijeli s  $\bar{B} \cdot l$ , dobija se:

$$V(\lambda) = \frac{\Delta\theta}{\bar{B}} \cdot \frac{1}{l} \quad (79)$$

što je izraz Verdetovu konstantu koja ovisi o valnoj duljini svjetlosti.  $\Delta\theta$  je kut zakreta polarizirane svjetlosti,  $\bar{B}$  je usrednjeno magnetsko polje dobiveno linearnom prilagodbom u grafovima [1-5], a  $l$  je duljina uzorka kroz koju se zakreće ravnina polarizacije svjetlosti.

Izraz  $\frac{\Delta\theta}{\bar{B}}$  odgovara nagibu pravca dobivenog linearnom prilagodbom u programu QtiPlot (za gore spomenute grafove [6-10]).

Nakon uvrštavanja  $\frac{\Delta\theta}{\bar{B}}$  te  $\frac{1}{l}$  u jednačbu (79) dobiju se vrijednosti Verdetove konstante za optičko staklo (*kvarc*) za četiri valne duljine prikazane u [tablici 1](#).

$\lambda$ [nm]	$V$ [ $\frac{\circ}{T \cdot m}$ ]	$V$ [ $\frac{\text{rad}}{T \cdot m}$ ]
405	$1124.1 \pm 2.9$	$19.62 \pm 0.05$
450	$852.6 \pm 3.2$	$14.88 \pm 0.06$
532	$566.3 \pm 2.3$	$9.88 \pm 0.04$
650	$376.8 \pm 1.8$	$6.57 \pm 0.03$

**Tablica 1.** Eksperimentalno dobivene vrijednosti Verdetove konstante za optičko staklo (*kvarc*) za četiri različite valne duljine svjetlosti. U prvom stupcu prikazane su valne duljine svjetlosti, u drugom stupcuprikazane su vrijednosti Verdetove konstante u jedinicama [ $\circ/(T \cdot m)$ ] dok su u trećem stupcu prikazane vrijednosti Verdetove konstante u jedinicama [ $\text{rad}/(T \cdot m)$ ]. Uz rezultate se nalaze i pripadne pogreške.

Ukupna pogreška mjerenja je kvocijent pogreške nagiba pravca koja se iščita iz programa QtiPlot i procijenjene pogreške pomičnog mjerila (pogreška je procijenjena na 0.05 mm).

Postoji nekoliko teorijskih modela koji reprezentiraju eksperimentalno ponašanje Verdetove konstante. Koristeći Druedov model dobivena je teorijska vrijednost Verdetove konstante

koja se najbolje slaže s eksperimentalno dobivenim vrijednostima za optičko staklo (kvarc) za četiri različite valne duljine svjetlosti [39]. Formula za izračun Verdetove konstante (Drude) glasi:

$$V(\lambda) = \frac{A^2}{\lambda^2 - \lambda_0^2}, \quad (80)$$

pri čemu su  $A$  i  $\lambda_0$  parametri koji ovise materijalu te iznose  $15.71 \cdot 10^{-7}$  rad/T odnosno 156.4 nm za kvarc[43]. Teorijske vrijednosti Verdetove konstante za optičko staklo (kvarc) za četiri valne duljine svjetlosti prikazane su u [tablici 2](#).

$\lambda$ [nm]	$V$ [ $\frac{\circ}{T \cdot m}$ ]	$V$ [ $\frac{\text{rad}}{T \cdot m}$ ]
405	1012.9	17.7
450	794.1	13.9
532	547.7	9.6
650	355.2	6.2

**Tablica 2.** Teorijske vrijednosti Verdetove konstante za optičko staklo (kvarc) za četiri različite valne duljine svjetlosti. U prvom stupcu prikazane su valne duljine svjetlosti, u drugom stupcu prikazane su vrijednosti Verdetove konstante u jedinicama [ $\circ/(T \cdot m)$ ] dok su u trećem stupcu prikazane vrijednosti Verdetove konstante u jedinicama [rad/(T·m)].

Način na koji se računa eksperimentalna vrijednost Verdetove konstante za ostale materijale (KCl, NaCl, KBr i maslinovo ulje) isti je kao i za optičko staklo (kvarc).

U [tablici 3](#), [tablici 4](#) i [tablici 5](#) prikazane su eksperimentalno dobivene vrijednosti za KCl, NaCl i KBr.

$\lambda$ [nm]	$V$ [ $\frac{\circ}{T \cdot m}$ ]	$V$ [ $\frac{\text{rad}}{T \cdot m}$ ]
405	$704.9 \pm 0.8$	$12.30 \pm 0.02$
450	$566.8 \pm 0.6$	$9.89 \pm 0.01$
532	$313.5 \pm 0.7$	$5.47 \pm 0.01$
650	$220.7 \pm 0.5$	$3.85 \pm 0.01$

**Tablica 3.** Eksperimentalno dobivene vrijednosti Verdetove konstante za kalijev klorid (KCl) za četiri različite valne duljine svjetlosti. U prvom stupcu prikazane su valne duljine svjetlosti, u drugom stupcu prikazane su vrijednosti Verdetove konstante u jedinicama [ $\circ/(T \cdot m)$ ] dok su u trećem stupcu prikazane vrijednosti Verdetove konstante u jedinicama [rad/(T·m)]. Uz rezultate se nalaze i pripadne pogreške.

$\lambda$ [nm]	$V$ [ $\frac{\circ}{T \cdot m}$ ]	$V$ [ $\frac{\text{rad}}{T \cdot m}$ ]
405	$930.6 \pm 0.9$	$16.24 \pm 0.02$
450	$650.2 \pm 0.8$	$11.35 \pm 0.01$
532	$514.9 \pm 0.5$	$8.98 \pm 0.01$
650	$338.8 \pm 0.6$	$5.91 \pm 0.01$

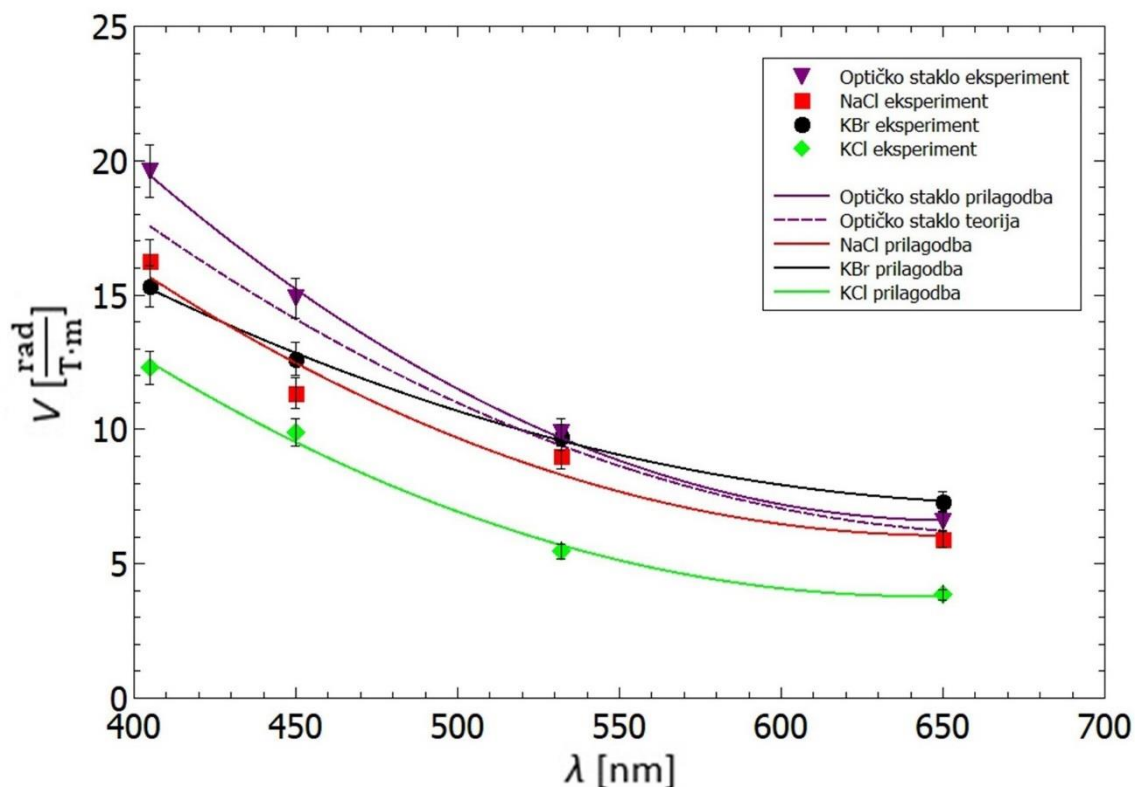
**Tablica 4.** Eksperimentalno dobivene vrijednosti Verdetove konstante za natrijev klorid (*NaCl*) za četiri različite valne duljine svjetlosti. U prvom stupcu prikazane su valne duljine svjetlosti, u drugom stupcu prikazane su vrijednosti Verdetove konstante u jedinicama [ $\circ/(T \cdot m)$ ] dok su u trećem stupcu prikazane vrijednosti Verdetove konstante u jedinicama [ $\text{rad}/(T \cdot m)$ ]. Uz rezultate se nalaze i pripadne pogreške.

$\lambda$ [nm]	$V$ [ $\frac{\circ}{T \cdot m}$ ]	$V$ [ $\frac{\text{rad}}{T \cdot m}$ ]
405	$878.8 \pm 1.5$	$15.33 \pm 0.03$
450	$723.3 \pm 1.4$	$12.62 \pm 0.02$
532	$556.5 \pm 0.5$	$9.71 \pm 0.01$
650	$418.9 \pm 0.5$	$7.31 \pm 0.01$

**Tablica 5.** Eksperimentalno dobivene vrijednosti Verdetove konstante za kalijev bromid (*KBr*) za četiri različite valne duljine svjetlosti. U prvom stupcu prikazane su valne duljine svjetlosti, u drugom stupcu prikazane su vrijednosti Verdetove konstante u jedinicama [ $\circ/(T \cdot m)$ ] dok su u trećem stupcu prikazane vrijednosti Verdetove konstante u jedinicama [ $\text{rad}/(T \cdot m)$ ]. Uz rezultate se nalaze i pripadne pogreške.

Teorijske vrijednosti Verdetove konstante za KCl, NaCl, KBr nije bilo moguće izračunati jer su parametri  $A$  i  $\lambda_0$  iz jednadžbe (80) svojstveni za svaki materijal te kao takvi nisu pronađeni u literaturi za gore navedene materijale.

Na [grafu 11.](#) grafički je prikazana ovisnost Verdetovih konstanti o valnoj duljini dobivenih iz tablica [1-5] za sljedeće kristale: optičko staklo (kvarc), KCl, NaCl i KBr.



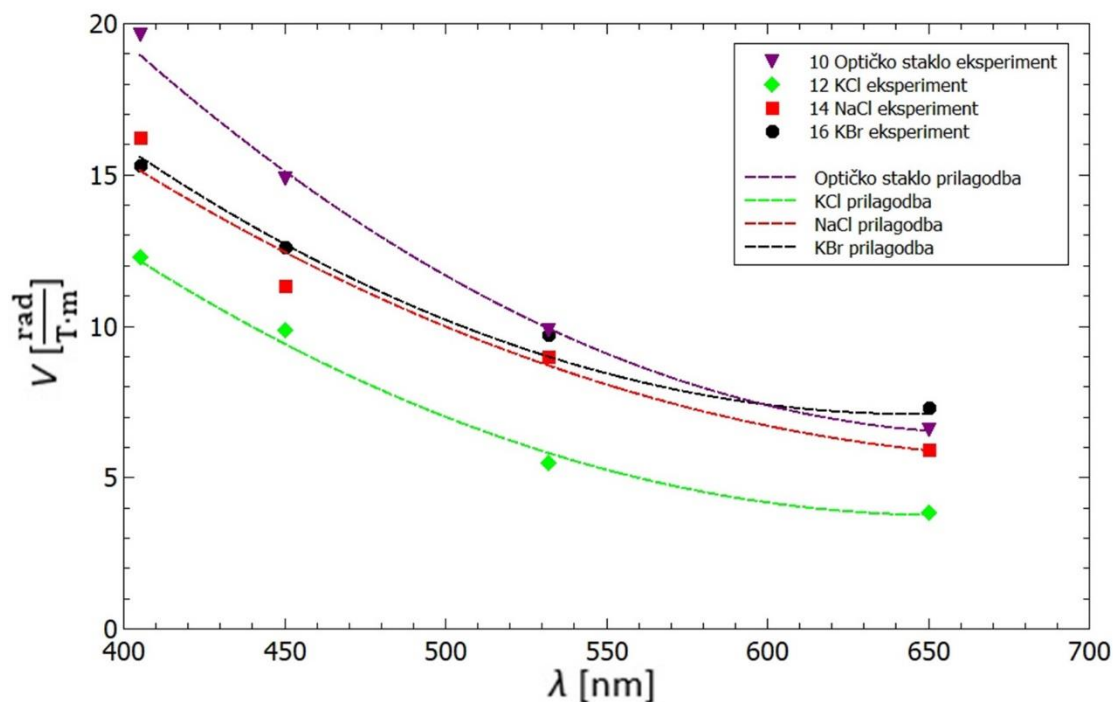
**Graf 11.** Ovisnost Verdetove konstante o valnoj duljini za optičko staklo (kvarc), NaCl, KCl i KBr. Na osi apscisi prikazane su valne duljine svjetlosti lasera (u nm) za koje se mjerio kut zakreta polarizirane svjetlosti. Na osi ordinati prikazane su vrijednosti Verdetove konstante u jedinicama [rad/(T·m)]. Geometrijski likovi predstavljaju eksperimentalno dobivene vrijednosti Verdetove konstante dok pune krivulje predstavljaju prilagodbu polinoma drugog stupnja te služi kao vodilja za oko. Isprekidana ljubičasta linija predstavlja teorijsku krivulju za optičko staklo (kvarc) dobivenu iz jednadžbe (80) s tabličnim vrijednostima konstanti  $A$  i  $\lambda_0$ . Uz svaku eksperimentalno dobivenu vrijednost Verdetove konstante označena je i pripadna pogreška.

Eksperimentalno dobivene vrijednosti Verdetove konstante za optičko staklo, KCl, NaCl i KBr uvrštene su u jednadžbu (80) te su linearnom prilagodbom u programu QtiPlot dobivene vrijednosti konstanta  $A$  i  $\lambda_0$  prikazane u [tablici 6](#).

materijal	$A$ [rad/T]	$\lambda_0$ [nm]
optičko staklo (kvarc)	$15.9 \pm 0.3$	$175.2 \pm 1.8$
KCl	$11.8 \pm 0.4$	$227.1 \pm 1.5$
NaCl	$15.7 \pm 0.4$	$36.4 \pm 1.5$
KBr	$15.9 \pm 0.4$	$24.9 \pm 1.1$

**Tablica 6.** Dobivene vrijednosti konstanta  $A$  i  $\lambda_0$  nakon uvrštavanja eksperimentalnih vrijednosti Verdetove konstante u jednadžbu (80) za optičko staklo, KCl, NaCl i KBr s pripadnim pogreškama.

Dobivene vrijednosti konstanta  $A$  i  $\lambda_0$  iz tablice 6. uvrštene su u jednadžbu (80) nakon čega su izračunate vrijednosti Verdetove konstante te dobivene prilagodbe polinoma drugog stupnja za optičko staklo, KCl, NaCl i KBr za četiri valne duljine svjetlosti (405 nm, 450 nm, 532 nm i 650 nm). Na grafu 12. prikazana je usporedba eksperimentalno dobivenih vrijednosti Verdetove konstante i pripadnih prilagodbi dobivenih na gore spomenuti način.



**Graf 12.** Usporedba eksperimentalnih vrijednosti Verdetove konstante i prilagodbi polinoma drugog stupnja dobivenih uvrštavanjem vrijednosti konstanta  $A$  i  $\lambda_0$  iz tablice 6. u jednadžbu (80) za optičko staklo, KCl, NaCl i KBr. Na osi apscisi prikazane su valne duljine svjetlosti lasera (u nm) dok su na osi ordinati prikazane vrijednosti Verdetove konstante u jedinicama [rad/(T·m)]. Geometrijski likovi prikazuju eksperimentalno dobivene vrijednosti Verdetove konstante, dok isprekidane linije prikazuju prilagodbe dobivene uvrštavanjem konstanta  $A$  i  $\lambda_0$  iz tablice 6. u jednadžbu (80) za četiri valne duljine svjetlosti (405 nm, 450 nm, 532 nm i 650 nm).

U tablici 7. prikazane su eksperimentalno dobivene vrijednosti Verdetove konstante za maslinovo ulje za četiri različite valne duljine svjetlosti. Postupak izračuna Verdetove konstante isti je kao i za kristale.

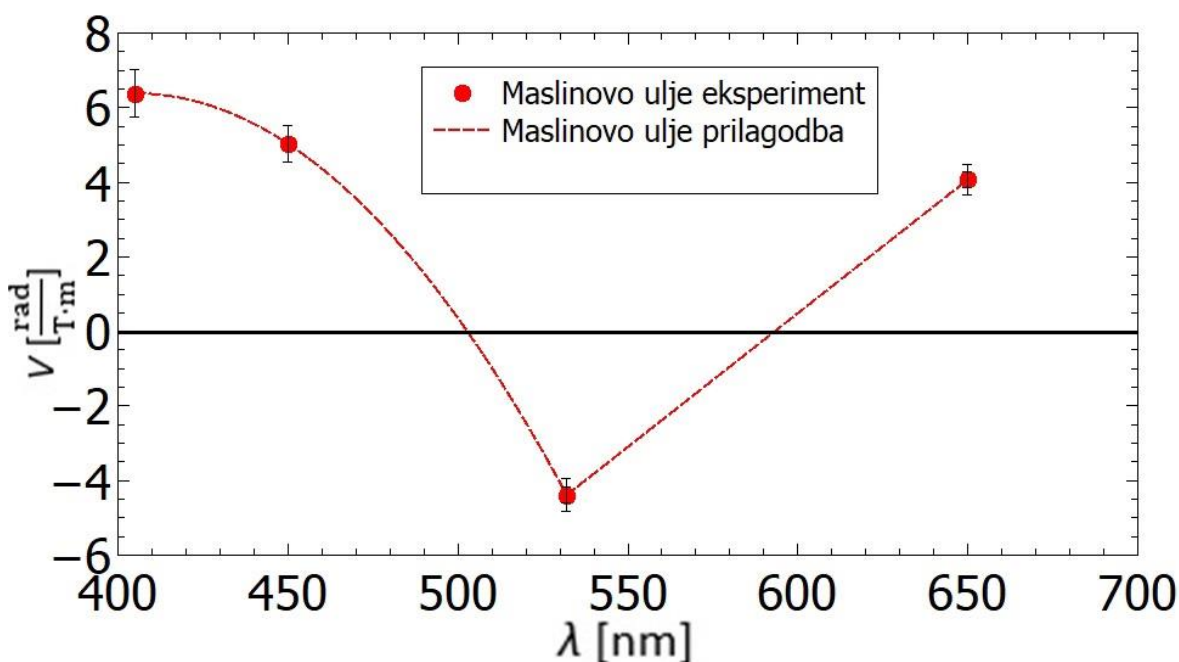
$\lambda$ [nm]	$V$ [ $\frac{\circ}{T \cdot m}$ ]	$V$ [ $\frac{\text{rad}}{T \cdot m}$ ]
405	$365.7 \pm 1.8$	$6.38 \pm 0.03$
450	$288.3 \pm 1.3$	$5.03 \pm 0.02$
532	$251.4 \pm 1.3$	$4.39 \pm 0.02$
650	$233.4 \pm 0.3$	$4.07 \pm 0.01$

**Tablica 7.** Eksperimentalno dobivene vrijednosti Verdetove konstante za maslinovo ulje (*Olivenöl - Roth*) za četiri različite valne duljine svjetlosti. U prvom stupcu prikazane su valne duljine svjetlosti,

u drugom stupcu prikazane su vrijednosti Verdetove konstante u jedinicama [ $^{\circ}/(\text{T}\cdot\text{m})$ ] dok su u trećem stupcu prikazane vrijednosti Verdetove konstante u jedinicama [ $\text{rad}/(\text{T}\cdot\text{m})$ ]. Uz rezultate se nalaze i pripadne pogreške.

Teorijsku vrijednost Verdetove konstante za maslinovo ulje nije bilo moguće izračunati jer su parametri  $A$  i  $\lambda_0$  iz jednadžbe (80) svojstveni za svaki materijal te kao takvi nisu pronađeni u literaturi.

Na [grafu 13](#), grafički je prikazana ovisnost Verdetove konstante o valnoj duljini dobivena iz [tablice 7](#), za maslinovo ulje (*Olivenöl – Roth*).



**Graf 13.** Ovisnost Verdetove konstante o valnoj duljini za maslinovo ulje (*Olivenöl – Roth*). Na osi apscisi prikazane su valne duljine svjetlosti lasera (u nm) za koje se mjerio kut zakreta polarizirane svjetlosti. Na osi ordinati prikazane se vrijednosti Verdetove konstante u jedinicama [ $\text{rad}/(\text{T}\cdot\text{m})$ ]. Crveni krugovi predstavljaju eksperimentalno dobivene vrijednosti Verdetove konstante dok isprekidana linija predstavlja vodilju za oko. Uz svaku eksperimentalno dobivenu vrijednost Verdetove konstante označena je i pripadna pogreška.

## 4.2. Diskusija

### 4.2.1. Kut zakreta polarizirane svjetlosti

U grafovima [6-10] primijećeno je dobro podudaranje izmjerenih vrijednosti kuta zakreta polarizirane svjetlosti s pripadajućim linearnim prilagodbama. Bolja slaganja primijećena su kod mjerenja kuta zakreta polarizirane svjetlosti za optičko staklo (kvarc) i maslinovo ulje nego kod kalijevog klorida (KCl), natrijevog klorida (NaCl) i kalijevog bromida (KBr) zbog toga što je duljina uzorka za optičko staklo (kvarc) i maslinovo ulje

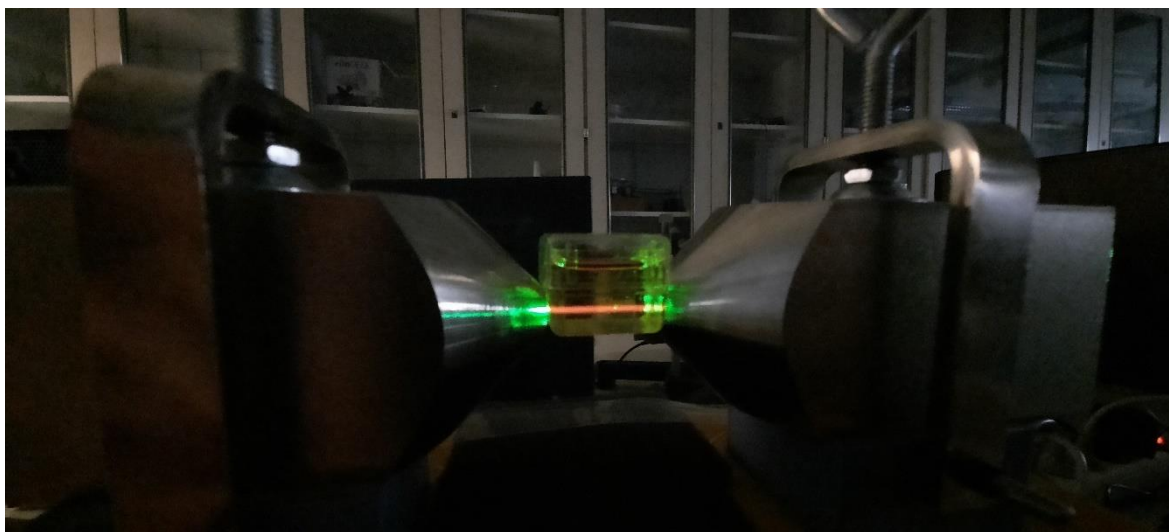
veća nego kod ostalih kristala. Naime, duljina uzorka za optičko staklo iznosi 20 mm te za maslinovo ulje u kutijici iznosi 19.6 mm, dok za KCl, NaCl i KBr iznosi redom 3.6 mm, 4 mm i 4.8 mm. Za potonje materijale s manjom duljinom uzorka primijećena su nešto veća odstupanja mjerenih točaka od linearne prilagodbe. Razlog tome je izlazni snop svjetlosti iz kristala koji se zbog male duljine uzorka i poprečnog presjeka uvjetno rečeno „deformira“ (snop iz lasera veći je od površine ravnine materijala na koji upada) te samim time fotootpornik postaje manje osjetljiv na takav snop što se u konačnici očituje većom pogreškom u očitavanju vrijednosti otpora na multimetru. Mjerenjem minimuma kuta zakreta polarizirane svjetlosti na analizatora za maslinovo ulje primijećeno je otežano očitavanje otpora na multimetru zbog tekućeg agregatnog stanja, gustoće i boje ulja pa je zbog toga izlazni snop iz uzorka bio također „razmrljan“ što objašnjava nešto veća odstupanja za crveni laser (650 nm) od linearne prilagodbe.

Iz grafova [6-10] proizlazi jedinstven zaključak: kut rotacije zakreta polarizirane svjetlosti veći je pri manjim valnim duljinama svjetlosti. Drugim riječima, kut zakreta polarizirane svjetlosti smanjuje se kako se mijenja svjetlost od ljubičaste prema crvenoj boji. Tako za optičko staklo (kvarc) kut zakreta polarizirane svjetlosti pri valnoj duljini od 405 nm za +8 A iznosi  $6^\circ$  dok kut zakreta pri valnoj duljini od 650 nm, za istu jakost struje iznosi  $2^\circ$ . Eksperimentalne opservacije dobro se slažu s teorijom; u jednadžbi (80), smanjenjem valne duljine  $\lambda$  pretpostavlja se povećanje Verdetove konstante  $V$  koja je proporcionalna kutu zakreta polarizirane svjetlosti  $\Delta\theta$  (jednadžba (78)). Obrnuta proporcionalnost između kuta zakreta i valne duljine polarizirane svjetlosti primijećena je za sve materijale za oba smjera struje.

#### ***4.2.2. Efekt promjene smjera kuta zakreta polarizirane zelene svjetlosti za maslinovo ulje***

Također, za (+) smjer struje primijećen je pomak kuta zakreta polarizirane svjetlosti u desno (po dogovoru u tom smjeru pomaka vrijednosti kuta zakreta su pozitivne), te u lijevo (negativne vrijednosti kuta zakreta) za (-) smjer struje za sve materijale pri svim valnim duljinama osim u slučaju maslinovog ulja za zeleni laser (532 nm). Neobičan i neočekivan efekt dogodio se pri mjerenju kuta zakreta polarizirane zelene svjetlosti za maslinovo ulje, valne duljine 532 nm, gdje je očekivani pomak kuta zakreta za (+) smjer struje bio u desno (pozitivan smjer), kao i što je bio slučaj u svim prethodnim mjerenjima za ostale materijale, no pomak se dogodio u suprotnom, lijevom smjeru. Manifestacija efekta može se vidjeti na [grafu 10](#), gdje zeleni kvadrati s pripadnim pravcem predstavljaju mjerene vrijednosti kuta

zakreta s pripadajućom prilagodbom za svjetlost valne duljine 532 nm. Na [grafu 10](#), uočeno je preslikavanje vrijednosti kuta zakreta polarizirane svjetlosti iz skupa  $R^+$  u  $R^-$  i obrnuto. Nakon što se efekt pojavio, napravljena su dodatna mjerenja za tri ekstra djevičanska maslinova ulja domaće proizvodnje te za jedno kupovno bučino ulje. Efekt je primijećen pri mjerenju kuta zakreta zelene polarizirane svjetlosti za tri dodatna maslinova ulja dok je izostao pri mjerenju kuta zakreta zelene polarizirane svjetlosti za bučino ulje (pomak kuta zakreta za bučino ulje dogodio se u istom smjeru kao i za svjetlosti ostalih valnih duljina). Moguće objašnjenje efekta leži u pojavi *fluorescencije* koja je primijećena u maslinovom ulju prilikom mjerenja kuta zakreta polarizirane svjetlosti valne duljine 532 nm ([slika 24](#)).



**Slika 24.** Promjena boje lasera iz zelene u žuto-crvenu prilikom prolaska kroz maslinovo ulje posljedica je fluorescencije.

Mehanizam fluorescencije je sljedeći: molekule maslinovog ulja apsorbiraju neke fotone zelene svjetlosti na višim energija pritom emitirajući fotone žuto-crvene svjetlosti na nižim energijama [41]. Također, efekt se manifestira negativnom Verdetovom konstantom što se može vidjeti na [grafu 13](#). Fizikalno objašnjenje gore spomenutog efekta izostaje u literaturama. Razlog može biti u složenoj dielektričnoj funkciji koja ima anomalno ponašanje na valnoj duljini oko 532 nm što se očituje u pojavi fluorescencije [42].

#### 4.2.3. Verdetova konstanta

Na [grafu 11](#), prikazana je ovisnost Verdetove konstante o valnoj duljini svjetlosti za sve kristalne materijale (optičko staklo, KCl, NaCl i KBr). Geometrijska tijela prikazuju eksperimentalno dobivene vrijednosti Verdetove konstante dok pune linije predstavljaju prilagodbu drugog reda za pojedina mjerenja. Iz [grafa 11](#), uočeno je dobro podudaranje



eksperimentalno dobivenih vrijednosti Verdetove konstante s prilagodbom drugog reda koja prati teorijsku pretpostavku ovisnosti Verdetove konstante o valnoj duljini kao ovisnost  $V \sim 1/\lambda^2$  (jednadžba (80)). Za NaCl uočeno je blago odstupanje eksperimentalno dobivene vrijednosti Verdetove konstante od prilagodbe polinoma drugog reda te se razlog tome smatra otežano mjerenje otpora na multimetru zbog „razmrljanog“ snopa svjetlosti lasera koji je padao na fotootpornik nakon interakcije s uzorkom. Isprekidana ljubičasta linija predstavlja teorijski model Verdetove konstante za optičko staklo (kvarc) gdje su parametri  $A$  i  $\lambda_0$  iz jednadžbe (80) pronađeni u literaturi [43]. Uočeno je dobro podudaranje eksperimentalnih vrijednosti s teorijskim modelom pri većim valnim duljinama (za 532 i 650 nm). Blago odstupanje eksperimentalnih vrijednosti od teorijskog modela uočeno je pri valnim duljinama od 405 i 450 nm. Razlog za takvo odstupanje mogao bi biti u vrsti lasera (laseri valnih duljina 405 i 450 nm napajaju se preko baterija i nisu isti model kao laseri valnih duljina 532 i 650 nm) koji producira snop svjetlosti manjeg intenziteta te samim time uzrokuje veću nepreciznost mjerenja otpora na multimetru.

Teorijski modeli za ostale kristale (KCl, NaCl i KBr) nisu pronađeni u literaturi te su zbog toga, osim prikazane usporedbe eksperimentalnih vrijednosti s prilagodbama drugog reda za potonje materijale, uvrštavanjem eksperimentalno dobivenih vrijednosti Verdetove konstante u jednadžbu (80) dobivene, linearnom prilagodbom u programu QtiPlot, vrijednosti konstanta  $A$  i  $\lambda_0$  nakon čega su, uvrštavanjem dobivenih konstanta iz [tablice 6.](#) u jednadžbu (80) dobivene vrijednosti Verdetove konstante i pripadne prilagodbe polinoma drugog stupnja za optičko staklo, KCl, NaCl i KBr za četiri valne duljine (405 nm, 450 nm, 532 nm i 650 nm). Na [grafu 12.](#) prikazana je usporedba eksperimentalno dobivenih vrijednosti Verdetove konstante i prilagodbi dobivenih na gore spomenuti način. Na grafu se uočavaju dobra slaganja eksperimentalno dobivenih vrijednosti Verdetove konstante i pripadne prilagodbe za optičko staklo, mala odstupanja za KCl i KBr, dok se zamjetna odstupanja uočavaju za NaCl. Razlog za takvo odstupanje moglo bi biti zbog različitih vrsta lasera, što je već gore spomenuto i objašnjeno te zbog otežanog očitavanja otpora na multimetru prilikom mjerenja minimuma kuta zakreta polarizirane svjetlosti. Uzrok otežanog očitavanja otpora, za kristal NaCl, mogao bi biti u raspršenju svjetlosti lasera prilikom interakcije s kristalom zbog specifičnog oblika, male duljine i poprečnog presjeka kristala te „razmrljanosti“ snopa svjetlosti prilikom upada na fotootpornik.

Na [grafu 13.](#) prikazana je ovisnost Verdetove konstante o valnoj duljini svjetlosti za maslinovo ulje (*Olivenöl - Roth*). Zbog efekta koji je uzrokovan fluorescencijom dobivana je negativna vrijednost Verdetove konstante pri valnoj duljini od 532 nm. U literaturi nije

pronađen teorijski model koji opisuje gore spomenuti efekt te zbog toga prikazane prilagodbe (polinom drugog reda i pravac) služe kao vizualna vodilja za eksperimentalno dobivene vrijednosti Verdetove konstante.

Iz eksperimentalno dobivenih vrijednosti Verdetove konstante za gore spomenute materijale uočeno je sljedeće: optičko staklo (*kvarc*) ima najveću vrijednost Verdetove konstante za svjetlost valne duljine 405 nm pri čemu ona iznosi  $(12.30 \pm 0.02) \frac{\text{rad}}{\text{T}\cdot\text{m}}$ , nakon kojeg slijedi *NaCl*  $(16.24 \pm 0.02) \frac{\text{rad}}{\text{T}\cdot\text{m}}$ , nakon kojeg slijedi *KBr*  $(15.33 \pm 0.03) \frac{\text{rad}}{\text{T}\cdot\text{m}}$ , te *KCl* s najmanjom vrijednosti Verdetove konstante među kristalima koja iznosi  $(12.30 \pm 0.02) \frac{\text{rad}}{\text{T}\cdot\text{m}}$ . Maslinovo ulje ima najmanju vrijednost Verdetove konstante od svih mjerenih materijala te ona iznosi  $(6.38 \pm 0.03) \frac{\text{rad}}{\text{T}\cdot\text{m}}$  za svjetlost valne duljine 405 nm.

#### 4.2.4. Ovisnost Verdetove konstante o vrsti materijala – modeli kroz povijest

Nakon eksperimentalnih mjerenja i analize dobivenih vrijednosti Verdetove konstante, zanimljivo je postaviti pitanje: zašto i na koji način Verdetova konstanta ovisi o materijalu? Odgovor na pitanje bit će razrađen kroz nekoliko različitih povijesnih pristupa.

##### 4.2.4.1. Verdetov model

*Michael Faraday* je, dva mjeseca nakon svog otkrića (1845.), predstavio svoj rad koji opisuje novi efekt te ga je također istražio na brojnim transparentnim krutim tvarima i tekućinama. Većina njih pokazala se sposobnim proizvesti efekt, iako s vrlo različitim intenzitetom. U onima koji su bili optički aktivni, učinak je jednostavno bio superponiran na prirodnu rotaciju. U plinovima, kao i u vakuumu, smatrao je nemogućim proizvesti bilo kakav efekt [46]. Prva osoba koje se značajnije počela baviti gore spomenutim efektom bio je francuski fizičar *Emile Verdet* koji je 1854. došao do sad već poznatog izraza za Verdetovu konstantu:

$$\theta = V \cdot \bar{B} \cdot l \quad (81)$$

On tada varijablu  $V$  naziva *magnetskom rotacijskom snagom* materijala koja jedino ovisi o vrsti materijala i valnoj duljini svjetlosti. Mjerenjem rotacijske snage jednakih količina otopina, Verdet je otkrio da se rotacija proizvedena makroskopskom količinom otopine uvijek može zamisliti kao zbroj rotacija koje neovisno proizvode pojedinačne molekule u otopini [46]. Drugim riječima, za otopinu koja sadrži tvari 1, 2, ...,  $i$ , u koncentracijama  $P_1, P_2, \dots, P_i$ ,  $V$  je dan kao:

$$V = \sum_i P_i Y_i \quad (82)$$

gdje je  $Y_i$  veličina karakteristična za molekulu  $i$ -te tvari te koju je Verdet nazvao *molekularnom magnetskom rotacijskom snagom*. Utvrdio je, međutim, da određene soli imaju negativnu vrijednost  $\gamma$ , pa je pretpostavio da molekule soli uzrokuju rotaciju koja je u obrnutom smjeru od one koje izazivaju molekule vode. Uvijek se pokazalo da takve soli sadrže magnetski (tj. para- ili feromagnetski) kemijski element, no nisu sve soli koje sadrže magnetske elemente imale negativnu molekulsku rotacijsku snagu. Sve soli koje nisu sadržavale magnetski element imale su, međutim, pozitivne vrijednosti  $\gamma$  i bile su dijamagneti [46].

#### 4.2.4.2. Maxwellova teorija vrtloga

*James Clerk Maxwell* objavljuje 1861. rad „O fizikalnim crtama polja“ gdje polazi od mehaničkog modela elektromagnetskog polja; sredstvo je zamišljao ispunjeno molekularnim vrtlozima čije dimenzije su usporedive s valnom duljinom svjetlosti [46]. Pokušavao je naći matematički najbolji opis onog što je Faraday eksperimentalno izmjerio te na kraju dolazi do izraza za Verdetovu konstantu:

$$V = m \cdot \frac{n^2}{\lambda^2} \left( n - \lambda \frac{dn}{d\lambda} \right) \quad (83)$$

gdje je  $m$  masa elektrona, a  $n$  je indeks loma koji je svojstvo materijala. Indeks loma  $n$  je funkcija koja ovisi o valnoj duljini svjetlosti te se može izračunati preko *Cauchyve* jednadžbe disperzije:

$$n(\lambda) = A + \frac{B}{\lambda^2} + \frac{C}{\lambda^4} \quad (84)$$

gdje su  $A$ ,  $B$  i  $C$  koeficijenti disperzije koji se mogu odrediti za materijal prilagođavanjem jednadžbe (84) izmjerenim indeksima lomova za poznate valne duljine svjetlosti. Maxwell je ustanovio proporcionalnost  $V \sim n/\lambda^2$  koja se slaže s Faradayevim eksperimentalnim rezultatima. Također, može se zaključiti sljedeće: indeks loma za optičko staklo (*kvarc*) iznosi 1.6257 [47] za valnu duljinu od 532 nm dok za kalijev klorid (*KCl*) indeks loma iznosi 1.4940 [36] za istu valnu duljinu te je stoga i Verdetova konstanta za optičko staklo (*kvarc*) veća nego za kalijev klorid (*KCl*). Također se može vidjeti korelacija između indeksa loma ostalih kristala i eksperimentalno dobivenih vrijednosti Verdetove konstante; za kristale s većim indeksom loma dobivene su i veće vrijednosti Verdetove konstante ([tablica 8.](#)).

Materijal	$n$ (532 nm)	$V$ (532 nm) [rad/Tm]
Optičko staklo (kvarc)	1.6257	$9.88 \pm 0.04$
KBr	1.5655	$9.71 \pm 0.01$
NaCl	1.5484	$8.98 \pm 0.01$
KCl	1.4940	$5.47 \pm 0.01$

**Tablica 8.** Korelacija između indeksa loma i eksperimentalno dobivene Verdetove konstante za kristale za svjetlost valne duljine 532 nm.

#### 4.2.4.3. Bennett – Stern model

Herbert S. Bennett i Edward A. Stern 1964. objavljuju model u kojem uvode pojam *tenzora vodljivosti* koji u svojoj formulaciji sadrži članove spin-orbit interakcije te članove para-, dija- i feromagnetizma. Tenzor vodljivosti koristi se za dobivanje nešto kompliciranije formulacije Verdetove konstante čija dublja analiza u ovom slučaju nije potrebna. Model također uvodi koncepte kvantne mehanike poput spina elektrona, vodljive i valentne vrpce, energetske nivoa, Fermijeve kugle te Paulijevog paramagnetizma [48]. Interakcija između elektromagnetskog vala i spina elektrona utječe na Faradayev efekt kod čvrstih materijala s kubičnom strukturom. U feromagnetnim metalima spin-orbit interakcija dominira i proizvodi veliki magnetooptički efekt feromagnetizma. Čak i u neferomagnetnim metalima, spin-orbit interakcija ima učinak na tenzor vodljivosti preko Paulijevog paramagnetizma. Paulijev paramagnetizam uzrokuje da elektroni u blizini Fermijeve površine imaju prosječnu vrijednost spina različitu od nule [48]. Spin-orbit interakcije prvog reda (za optički neaktivne materijale) proizvode efekte proporcionalne prosječnoj vrijednosti spina. Zbog toga što je spin-orbit doprinos tenzoru vodljivosti koncentriran na puno manji frekvencijski raspon nego što je magnetski doprinos, spin-orbit doprinos trebao bi pokazivati relativno brzu promjenu s frekvencijom. Ta brza promjena trebala bi se dogoditi čak i za metale s malim nuklearnim nabojem  $Z=10$ . Materijali s velikim  $Z$  pokazivat će odgovarajuće veće spin-orbit efekte jer je spin-orbit interakcija proporcionalna s  $Z^2$ . Prema tome može se zaključiti kako elementi s većim  $Z$  i samim time većim spin-orbit efektom povećavaju Faradayev učinak zakretanja polarizirane svjetlosti [48].

#### 4.2.5. Lantanoidi i Verdetova konstanta

Lantanoidi ili lantanidi su skupina od 15 elemenata koji zajedno s aktinoidima čine  $f$ -blok u periodnom sustavu elemenata s atomskim brojem od 57 do 71 ([slika 25.](#)). Ime su dobili po kemijskom elementu lantanu. Elementi koji spadaju u skupinu lantanoida su:

lantan (La), Cerij (Ce), Praseodimij (Pr), Neodimij (Nd), Prometij (Pm), Samarij (Sm), Europij (Eu), Gadolinij (Gd), Terbij (Tb), Disprozij (Dy), Holmij (Ho), Erbij (Er), Tulij (Tm), Iterbij (Yb) i Lutecij (Lu). Najčešći oksidacijski broj lantanoida iznosi +3. Lantanoidi i aktinoidi imaju slična svojstva. Lantanoidi popunjavaju  $4f$  orbitale dok aktinoidi popunjavaju  $5f$  orbitale. Svi aktinoidi su radioaktivni elementi [49].

The image shows the periodic table of elements. The lanthanide series (elements 57-71) and actinide series (elements 89-103) are shown as separate rows below the main periodic table. The lanthanide series starts with Lanthanum (La, 57) and ends with Lutetium (Lu, 71). The actinide series starts with Actinium (Ac, 89) and ends with Lawrencium (Lr, 103). The main periodic table shows elements from Hydrogen (H, 1) to Oganesson (Og, 118).

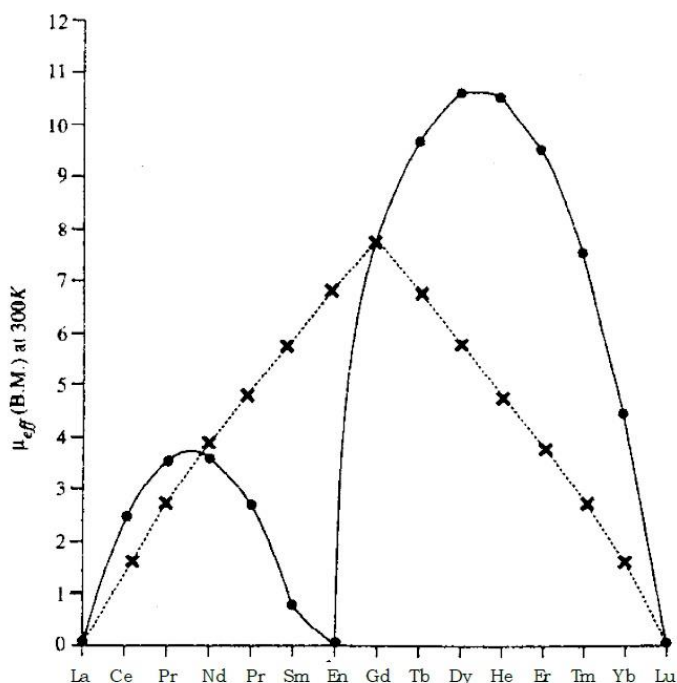
**Slika 25.** Periodni sustav elemenata. Označeni elementi spadaju u skupinu lantanoida koji zajedno s aktinoidima (elementi ispod lantanoida) čine tzv.  $f$ -blok. [50]

Paramagnetsko svojstvo iona ili atoma posljedica je prisutnosti nesparenih elektrona u njemu. Magnetska svojstva lantanoida slijede gore spomenuta načela, ali postoji razlika u odnosu na elemente  $d$ -bloka. Magnetski momenti  $d$ -blok elemenata posljedica su spin i orbitalnih učinaka od kojih se orbitalni učinci obično gase poljem liganda<sup>5</sup>. To se ne događa u lantanoidima gdje su  $f$  orbitale preduboko unutar atoma da bi se takvo gašenje dogodilo. Budući da  $La^{3+}$  ( $4f^0, 5d^0, 6s^0$ ),  $Ce^{4+}$  ( $4f^0, 5d^0, 6s^0$ ),  $Lu^{3+}$  ( $4f^{14}, 5d^0, 6s^0$ ) i  $Yb^{2+}$  ( $4f^{14}, 5d^0, 6s^0$ ) nemaju nesparene elektrone, oni su dijamagneti, ali svi ostali lantanoidi su paramagneti [49].

Kao što je gore spomenuto, paramagnetski momenti potječu od spinskih i orbitalnih momenata nesparenih elektrona u ionu ili atomu. Moguća su tri načina povezivanja između tih momenata: spin-spin, orbitalni-orbitalni i spin-orbitalni momenti. Za lantanoidne sve tri vrste spajanja su važne. Za ione  $Ln^{3+}$  postoje jako vezanje spin-orbitalnih momenata zbog

<sup>5</sup> Teorija polja liganda nastala je tridesetih godina prošlog stoljeća te opisuje vezivanje, orbitalni raspored i ostale karakteristike kompleksnih spojeva. Predstavlja primjenu molekularne orbitalne teorije na kompleksne spojeve prijelaznih metala.

nesparenih elektrona u  $f$  orbitali koji se nalaze vrlo duboko i dobro su zaštićeni s  $5p$  i  $5s$  elektronima [49]. Ukupni magnetski moment  $J$  zbroj je spinskog magnetskog momenta  $S$  i orbitalnog magnetskog momenta  $L$ . Konstante spajanja spin-orbitalnih momenata za lantanoide prilično su velike, reda veličine  $1000\text{ cm}^{-1}$ . To čini razdvajanje između energetske stanja s različitim  $J$  vrijednostima mnogo većim nego što je  $kT$  ( $-200\text{ cm}^{-1}$  pri sobnoj temperaturi). Razdvajanje između osnovnog i pobuđenog stanja ( $\Delta E$ ) za za ione  $Sm^{3+}$  i  $Eu^{3+}$  iznosi  $\frac{7}{2} \cdot 840\text{ cm}^{-1}$  odnosno  $230\text{ cm}^{-1}$  što uspoređujući s vrijednosti od  $-200\text{ cm}^{-1}$  pri sobnoj temperaturi dovodi do zaključka da će prva dva ili tri pobuđena stanja biti popunjena. Miješanje ovih stanja s većim vrijednostima  $J$  uzrokuje veći magnetski moment [49].



**Slika 26.** Magnetski momenti lantanoide. Krugovi prikazuju eksperimentalno dobivene vrijednosti dok  $x$  oznake predstavljaju teorijsku vrijednost magnetskih momenata. [49]

Dva maksimuma proizlaze iz sljedeće činjenice: u orbitalama popunjenim manje od polovice, komponente ( $S$  i  $L$ ) međusobno se suprotstavljaju dok se u orbitalama koje su popunjene više od polovice međusobno pojačavaju (treće Hundovo pravilo). Na  $7f$  nema orbitalnog momenta pa  $Gd^{3+}$  ima manji magnetski moment od  $Dy^{3+}$  i  $Ho^{3+}$  iako ima maksimalan broj nesporenih elektrona. U slučaju  $Eu^{3+}$ , postoje 6 nesporenih elektrona, ali kako su spinski i orbitalni momenti jednaki i suprotni, ukupan moment je nula kako je i prikazano na [slici 26](#). [49].

Zbog velikih magnetskih momenata, lantanoidi imaju uzročno-posljedičnom vezom i velike iznose Verdetove konstante. U [tablici 9.](#) prikazane su vrijednosti Verdetove konstante za neke spojeve lantanoida [51].

materijal	$\lambda$ (nm)	$V$ (rad/T·m)
TGG (terbij-galijev granit)	532	-190
TGG dopiran s $Dy^{3+}$	532	-256.8
TGG dopiran s $Tm^{3+}$	632	-178.6
TGG dopiran s $Ce^{3+}$	532	-242.2
TGG dopiran s $Pr^{3+}$	532	-264.5

**Tablica 9.** Verdotova konstanta za neke spojeve lantanoida. [51]

## 5. Metodički dio

### 5.1. Uvod

Tema diplomskog rada nije prilagodljiva nastavi srednje školi zbog nemogućnosti obrade istraživački usmjerene nastave na način na koji se tema obrađuje na praktikumu na fakultetu. Naime, u školi ne postoji potrebna oprema s kojom bi se obradio nastavni materijal, izvela mjerenja te prikazali kvalitativno i kvantitativno potrebni obrazovni ishodi. Iz tog razloga za temu metodičke obrade nastavne jedinice izabrana je tema: Brewsterov zakon. Izabrana tema nalazi se u kurikulumu kao dio nastavne jedinice „Polarizacija svjetlosti“ koja se obrađuje na početku četvrtog razreda srednje škole. Odabranu nastavnu jedinicu obrađuju kao izbornu temu svi tipovi četverogodišnjih srednjih škola koje ima fiziku kao dio kurikuluma. U odabranoj temi obrađuje se fizikalni koncept polarizacije svjetlosti u kojem se, kao jedan od načina dobivanja polarizirane svjetlosti, obrađuje metoda dobivanja potpuno polarizirane svjetlosti putem refleksije što je poznato kao *Brewsterov zakon*. Tema je izuzetno važna iz nekoliko razloga. U četvrtom razredu srednje škole obrađuju se zahtjevne teme poput valno-čestične prirode svjetlosti te je obrada polarizacije svjetlosti kao fizikalnog koncepta ključna za kompletiranje fizikalnih koncepata vezanih uz valnu prirodu svjetlosti. Bitno je kvalitetno rastumačiti klasične pogreške koje se javljaju kod učenika prilikom obrade nastavnih jedinica koja uključuju valnu prirodu svjetlosti. Učenici često miješaju smjer titranja polja i smjer širenja svjetlosti te je u ovoj nastavnoj jedinici potrebno obratiti pažnju na potonje razlučivanje. Također, bitno je naglasiti razlikovanje valne od geometrijske optike te dovoljno puta napomenuti kako polarizacijski filter nije pukotina na

kojoj dolazi do ogiba već se površina s prorezima uzima samo kao analogija pri objašnjenju načina rada polarizacijskog filtera. Također, bitnost usvajanja koncepta polarizacije svjetlosti jest u svakodnevnoj primjeni (polarizacijske naočale itd.)

## **5.2. Fizikalne ideje i nastavne metode**

U nastavnoj jedinici obrađuju se fizikalne ideje vezane za polarizaciju svjetlosti, poput nepolariziranog vala, djelomično polariziranog vala te potpuno polariziranog vala. Također se obrađuje zakon refleksije valova, loma valova kao i polarizacija svjetlosti putem refleksije. Također, obrađuje se fizikalni koncept indeksa loma. Nastavni sat započeo bih opservacijskim pokusom u kojem bih demonstrirao pojavu polarizacije svjetlosti refleksijom na staklu. Pokušaj bih izveo frontalno nakon čega bi učenici iznosili svoja opažanja te bi komentirali ključna svojstva pojave. Istraživački dio sata započeo bih istraživačkim pitanjem „Pri kojem upadnom kutu je odbijena svjetlost potpuno polarizirana?“ nakon čega bi učenici, podijeljeni u grupe, provodili istraživačke pokuse u kojima bi istraživali fizikalnu pojavu polarizacije svjetlosti refleksijom na staklu uz pomoć baterijske svjetiljke i polarizacijskog filtera te bi formulirali Brewsterov zakon. Za završni dio sata pripremio bih učenicima računalne tablete na kojima bi preko računalne simulacije mjerili Brewsterov kut za različite materijale. Učenici bi mjerili kutove između upadne zrake i okomice pri prijelazu iz nekoliko materijala (zrak, voda, staklo) te bi time usporedili izmjerene vrijednosti s vrijednostima koje pretpostavlja Brewsterov zakon. Na ovaj način bi učenici mogli evaluirati izmjerene vrijednosti te ih usporediti s teorijskim pretpostavkama. Također, tijekom nastavnog sata bih kod učenika, putem pitanja i odgovora, poticao ideje, razmišljanja i donošenje zaključaka te bih takvim pristupom, kao i korištenjem opservacijskog i istraživačkog pokusa, održavao zainteresiranost i motivaciju učenika na potrebnoj razini za praćenje i usvajanje gradiva nastavne jedinice.

Korištene nastavne metode pri istraživački usmjerenoj nastavi bile bi:

1. Demonstracija pokusa
2. Metoda razgovora - razredna rasprava
3. Metoda pisanja/crtanja
4. Istraživanje putem računalne simulacije
5. Izvođenje pokusa u skupinama



Oblik rada za obradu nastavne cjeline bio bi frontalni i rad u skupinama. Nastavna jedinica obradila bi se kroz jedan nastavni sat dok bi korelacija predmeta bila s matematikom (trigonometrijske funkcije).

### **5.3. Predmetni i međupredmetni ishodi učenja**

FIZ SŠ C.4.1 Analizira valnu prirodu svjetlosti.

- Razlikuje nepotpuno i potpuno polariziranu svjetlost putem refleksije.
- Opisuje potpuno polariziranu svjetlost putem refleksije.
- Formulira Brewsterov zakon.
- Primjenjuje Brewsterov zakon za računanje Brewsterovog kuta za različite materijale.

Od međupredmetnih ishoda:

- uku A.3.3. Učenik samostalno oblikuje svoje ideje i kreativno pristupa rješavanju problema.
- uku A.3.4. Učenik kritički promišlja i vrednuje ideje uz podršku učitelja.

Oprema koja je potrebna za nastavni sat: baterijske svjetiljke, komadi stakla, polarizacijski filteri, ravnala.

### **5.4. Tijek nastavnog sata**

Uvodni dio sata započeo bih opservacijskim pokusom. Ispred ploče, na svima vidljivo mjesto, postavio bih, horizontalno na stol, komad stakla debljine nekoliko centimetara. S jedne strane bih pod kutom uperio baterijsku svjetiljku u površinu stakla, dok bi s druge strane držao polarizacijski filter koji bih rotirao. Kroz polarizacijski filter prolazi reflektirana zraka. Po zraku bih posuo malo pudera radi bolje vidljivosti upadne i reflektirane zrake. *(Bitno je napomenuti da bi učenici, putem pitanja i odgovora, zapisivali vlastita opažanja, razmišljanja, ideje te zaključke).*

P: Upalio sam baterijsku svjetiljku. Koje sve zrake možete opaziti?

Učenici opažaju upadnu zraku, lomljenu zraku te reflektiranu zraku.

P: Imenujte sredstva kroz koja prolazi svjetlost iz svjetiljke?

Učenici prepoznaju zrak i staklo kao dva sredstva kroz koja prolazi svjetlost.

P: Rotirajte polarizacijski filter i gledajte kroz njega. Što opažate? (Učenici dolaze jedan po jedan promatrati sliku žaruljice na staklu.)

Učenici opažaju kako se prilikom rotacije filtera intenzitet reflektirane zrake smanjuje, ali ne i nestaje.

P: Kakva je svjetlost koje dolazi iz baterijske svjetiljke? Gledajte kroz filter direktno u žaruljicu i rotirajte ga.

Svjetlost iz baterijske svjetiljke je nepolarizirana.

P: Kakvu svjetlost polarizacijski filter ne propušta prilikom rotacije od  $90^\circ$ ?

Polarizacijski filter ne propušta potpuno polariziranu svjetlost prilikom rotacije od  $90^\circ$ .

P: Sprječava li u ovom slučaju polarizacijski filter propuštanje reflektirane zrake?

Učenici odgovaraju negativno.

P: Što možete zaključiti o polarizaciji reflektirane zrake?

Učenici zaključuju kako je reflektirana zraka tek djelomično polarizirana.

P: Zbog čega ste zaključili da je reflektirana zraka tek djelomično polarizirana?

Učenici, kao razlog djelomične polariziranosti zrake, navode taj što se prilikom rotacije polarizacijskog filtera intenzitet svjetla smanjio no svjetlost nije nestala.

Mijenjam kut upada lasera tako da kut između lomljene i reflektirane zrake bude  $90^\circ$ .

P: Rotiram polarizacijski filter. Što opažate?

Učenici opažaju kako prilikom rotacije reflektirana zraka nestaje.

P: Što možete zaključiti na temelju toga o reflektiranoj zraci?

Učenici zaključuju kako je reflektirana zraka potpuno polarizirana.

P: Što je prethodilo potpunoj polarizaciji reflektirane zrake?

Učenici zaključuju kako je promjena upadnog kuta prethodila potpunoj polarizaciji reflektirane zrake.

Postoji jedan upadni kut pri kojem je reflektirana zraka potpuno polarizirana, a o tom kutu govori Brewsterov zakon kojega ćemo danas istražiti.

U ovom trenutku postavljam istraživačko pitanje: „Pri kojem je upadnom kutu odbijena svjetlost potpuno polarizirana?“

Za odgovor na istraživačko pitanje potrebno je provesti istraživački pokus koji bi učenici radili podijeljeni u nekoliko grupa. Svakoj grupi bih podijelio komad stakla, baterijsku svjetiljku, ravnalo i polarizacijski filter.

P: Stavite komad stakla horizontalno na stol te s jedne strane uperite baterijsku lampu u komad stakla. S druge strane držite polarizacijski filter u kojeg je usmjerena reflektirajuća

zraka. Pronađite položaj kod kojeg potpuno nestaje reflektirana zraka. Izmjerite potrebne udaljenosti i odredite upadni kut svjetlosti.

Učenici u grupama pronalaze položaje u kojima potpuno nestaje reflektirana svjetlost.

P: Na koliko položaja ste uspjeli primijetiti potpuno nestajanje reflektirajuće zrake?

Učenici zaključuju kako su mogli primijetiti potpuno nestajanje reflektirajuće zrake samo na jednom položaju.

P: Koliki je bio upadni kut svjetlosti u tom slučaju?

Učenici očitavaju izmjereni upadni kut.

P: Kakva je reflektirana zraka za sve druge položaje?

Reflektirana zraka za sve druge položaje je tek djelomično polarizirana.

Brewster je uočio da je pri tom kutu lomljena zraka upravo okomita na reflektiranu. U tom trenutku na ploči skiciram situaciju iz pokusa ([slika 27.](#)) kod koje se reflektirana zraka potpuno polarizira te označim sve zrake, okomicu i pripadne kutove. Tražim od učenika, nakon postavljenog pitanja, da samostalno provode i zapisuju korak po korak izvoda u bilježnicu nakon čega obilazim učenike te im pomažem ukoliko negdje zapnu, a po potrebi provodimo frontalnu diskusiju pojedinog koraka.

P: Ako upadni kut  $\alpha$  označimo kut koji se nalazi između upadne zrake i okomice, a kut loma  $\beta$  označimo kut koji se nalazi između okomice i lomljene zrake, koliko mora iznositi zbroj ta dva kuta?

$$\alpha + \beta = 90^\circ = \frac{\pi}{2} \quad (1)$$

P: Prisjetite se Snellovog zakona. Kako glasi Snellov zakon?

Omjer sinusa kutova upadne zrake i lomljene zrake jednak je omjeru indeksa loma sredstva u kojem se zraka lomi i sredstva iz kojeg zraka upada u drugo sredstvo.

Tražim od učenika da zapišu u bilježnice Snellov zakon te da naprave skicu na kojoj će označiti sve potrebne kutove i indekse loma ([slika 28.](#)). Obilazim učenike i pomažem ukoliko negdje zapnu.

$$\frac{\sin \alpha}{\sin \beta} = \frac{n_2}{n_1} \quad (2)$$

P: Iz jednadžbe (1) odredite kut lomljene zrake.

$$\beta = 90^\circ - \alpha = \frac{\pi}{2} - \alpha \quad (3)$$

P: Uvrstite jednadžbu (3) u Snellov zakon.

$$\frac{\sin \alpha}{\sin \left(\frac{\pi}{2} - \alpha\right)} = \frac{n_2}{n_1} \quad (4)$$

P: Kako izraz  $\sin\left(\frac{\pi}{2} - \alpha\right)$  možemo zapisati koristeći trigonometrijske identitete svođenja na prvi kvadrant?

$$\sin\left(\frac{\pi}{2} - \alpha\right) = \cos\alpha \quad (5)$$

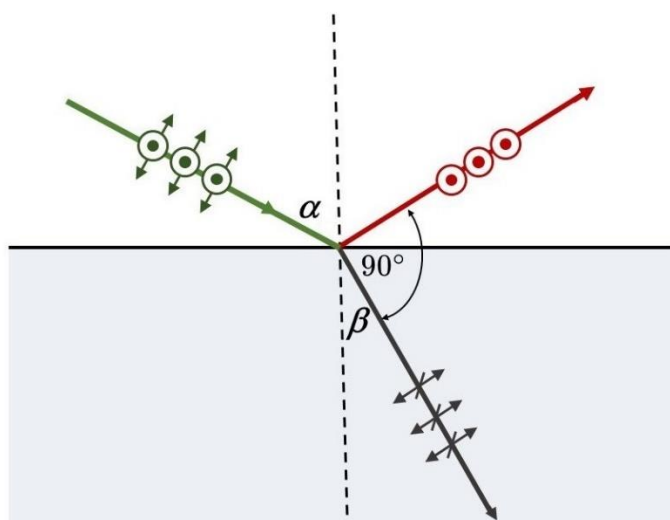
P: Kako izgleda jednačba (4) kad u nju uvrstimo jednačbu (5)?

$$\frac{\sin\alpha}{\cos\alpha} = \frac{n_2}{n_1} = \operatorname{tg}\alpha = \frac{n_2}{n_1} \quad (6)$$

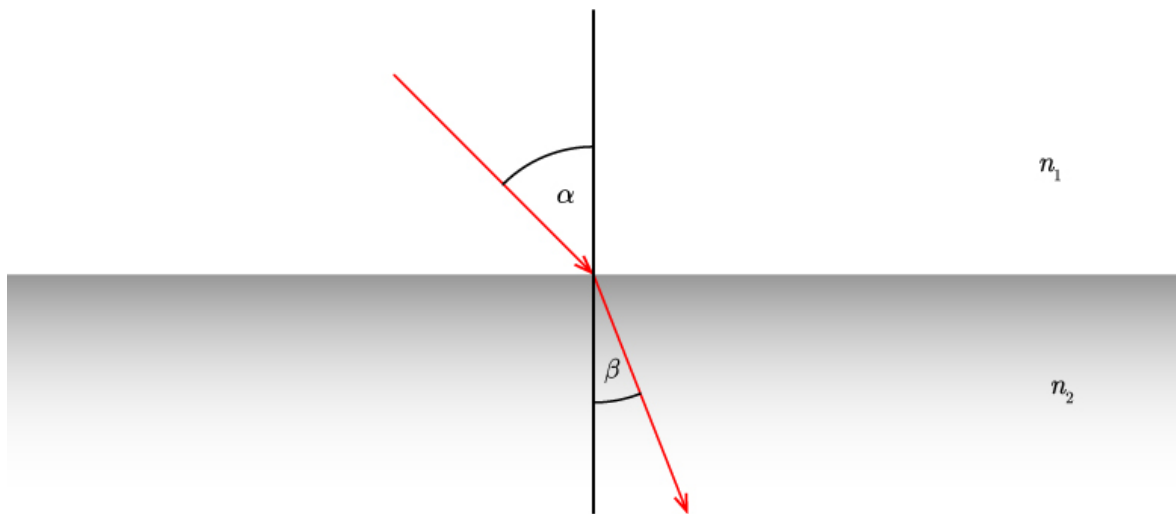
Dobivenu jednačbu opisuje *Brewsterov zakon*, a kut upada  $\alpha$  zove se Brewsterov kut. Svjetlost je potpuno polarizirana refleksijom od granicu dva sredstva jedino kada kut između lomljene i reflektirane zrake iznosi  $90^\circ$ . Za sve druge vrijednosti kuta reflektirana zraka je tek djelomično polarizirana.

U završnom dijelu nastavnog sata učenici uz pomoć računalne simulacije ([slika 29.](#)) određuju Brewsterov kut za sredstva zrak-voda, zrak-staklo, voda-zrak, voda-staklo, staklo-zrak i staklo-voda. U računalnoj simulaciji učenici kutomjerom mjere pravi kut između lomljene i reflektirane zrake te očitavaju upadni kut, nakon čega očitani kut uvrste u formulu za računanje Brewsterovog kuta. Indeksi loma su prikazani za svaki materijal na računalnoj simulaciji. Nakon uvrštavanja očitanih vrijednosti u jednačbu (6) s učenicima komentiram slaganja očitanih vrijednosti s teorijskom pretpostavkom.

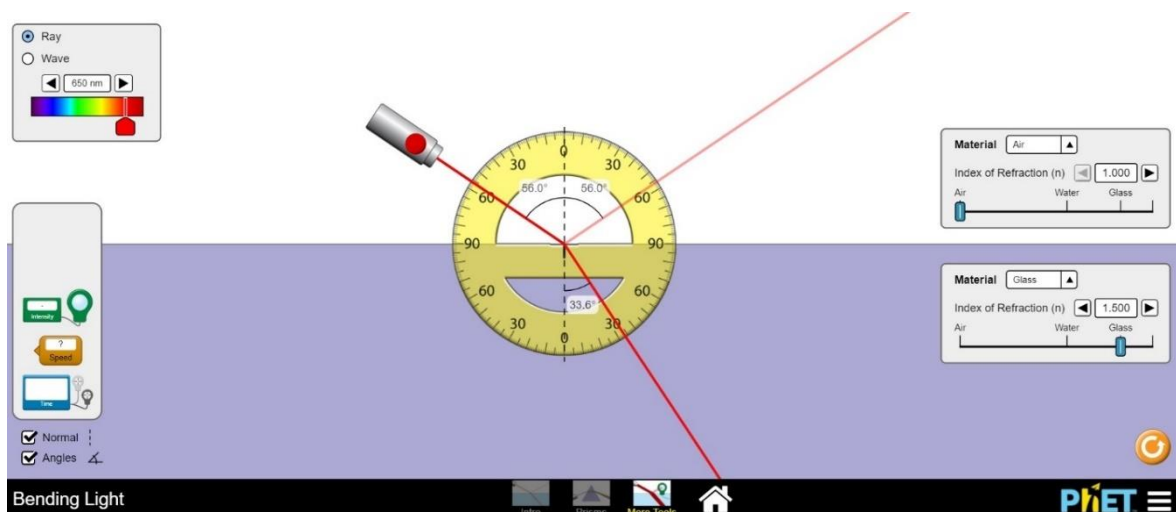
Plan ploče



**Slika 27.** Upadna zraka (zelena zraka) upada na granicu dva sredstva pod kutom  $\alpha$  s obzirom na okomicu (isprekidana linija). Jedan dio zrake se lomi (siva zraka) pod kutom  $\beta$  s obzirom na okomicu, dok se drugi reflektira (crvena zraka). Upadna zraka je nepolarizirana dok je lomljena zraka djelomično polarizirana. Reflektirana zraka je potpuno polarizirana. Kut između lomljene i reflektirane zrake iznosi  $90^\circ$ . Upadni kut pri kojem se reflektirana zraka potpuno polarizira zove se Brewsterov kut.



**Slika 28.** Upadna zraka upada pod kutom  $\alpha$  s obzirom na okomicu iz sredstva indeksa loma  $n_1$ . Zraka se lomi pod kutom  $\beta$  s obzirom na okomicu u sredstvu indeksa loma  $n_2$ .



**Slika 29.** Prikaz iz Phet-ove računalne simulacije u kojoj se može očitavati Brewsterov kut za materijale: zrak, voda, staklo. Upadnoj zraci može se mijenjati valna duljina te se postavljanjem kutomjera može izmjeriti pravi kut između lomljene i reflektirane zrake. Upadni kut se može namještati te je na slici namješten tako da je između lomljene i reflektirane zrake pravi kut. Upadna zraka dolazi iz zraka, dok se lomljena zraka lomi u staklu indeksa loma 1.5. Očitani Brewsterov kut za zrak-staklo iznosi  $56^\circ$ .

Računalna simulacija: [https://phet.colorado.edu/sims/html/bending-light/latest/bending-light\\_en.html](https://phet.colorado.edu/sims/html/bending-light/latest/bending-light_en.html)

Brewsterov zakon – pokus: <https://www.youtube.com/watch?v=ELVcR2B3Cno>

Nastavna jedinica obrađena je prateći gradivo nastavne jedinice „Polarizacija svjetlosti“ na online platformi „Edutorij“: <https://edutorij.e-skole.hr/share/proxy/alfresco-noauth/edutorij/api/proxy-guest/fa4cd5a4-17e1-47c2-a2db-545721e1cce5/polarizacija-svjetlosti.html>

## 6. Zaključak

Cilj diplomskog rada bio je istražiti utjecaj magnetskog polja na polarizirano elektromagnetsko zračenje u kristalnim materijalima za različite valne duljine u kojima dolazi do zakretanja kuta ravnine polarizacije svjetlosti što je poznato kao Faradayev efekt. Također, spomenuti efekt trebao se istražiti i na uzorku maslinovog ulja te se trebao izmjeriti kut zakretanja polarizirane svjetlosti za maslinovo ulje i za kristalne materijale. Mjereći kut zakreta polarizirane svjetlosti za gore spomenute materijale, dobiva se Verdetova konstanta koja se trebala usporediti s, eventualno postojećim, teorijskim modelima. Kut zakreta polarizirane svjetlosti mjerio se za četiri kristala: optičko staklo (kvarc), kalijev klorid (KCl), natrijev klorid (NaCl), kalijev bromid (KBr) te za maslinovo ulje (Olivenöl – Roth). Svaki uzorak stavljen je između dvije magnetske prizme s rupom koje se nalaze na vrhu zavojnica. Kut zakreta polarizacije svjetlosti mjereno je, za sve materijale, za četiri lasera valnih duljina: 405 nm, 450 nm, 532 nm i 650 nm od kojih su laseri valnih duljina 532 nm i 650 nm napajani preko strujnog kabela dok su laseri valnih duljina 405 nm i 450 nm napajani preko dvije baterije od 1.5 V. Kut zakreta polarizacije svjetlosti mjereno je također za osam jakosti struje, od 1A do 8A za oba smjera struje. Kako magnetsko polje koje stvaraju zavojnice nije homogeno, potrebno je bilo odrediti srednju jakost magnetskog polja. Kroz polarizator prolazi linearno polarizirana svjetlost za koju se na analizatoru očitava kut zakreta uz pomoću kojeg se, uz pripadnu jakost magnetskog polja i duljine uzorka, određuje Verdetova konstanta za mjereni materijal za svjetlost pripadne valne duljine. Svjetlost, nakon prolaza kroz analizator, pada na fotootpornik koji je spojen na multimeter na kojem se očitava otpor koji stvara upadna svjetlost. Kut zakreta polarizacije svjetlosti mjerio se tako što bi se na analizatoru odredila dva kuta pri kojima bi minimalna svjetlost prolazila do fotootpornika te bi kut zakreta, maksimum, bio određen kao kut koji se nalazi na polovici između dva izmjerena minimuma.

Izmjerene vrijednosti kutova zakreta polarizirane svjetlosti za kristal optičkog stakla (kvarc) duljine 20 mm dobro se slažu s linearnom prilagodbom za sve četiri valne duljine

svjetlosti. Dobro slaganje izmjerenih vrijednosti s prilagodbom posljedica je upravo dostatne duljine i poprečnog presjeka kristala. Naime, svjetlost bi nakon prolaska kroz kristal jasno padala na fotootpornik na kojem su se jasno mogli očitavati minimumi upadne svjetlosti. U literaturi je pronađena teorijska vrijednost Verdetove konstante za optičko staklo (kvarc) te su usporedbom mjerenih i teorijskih vrijednosti opažena dobra slaganja. Mala odstupanja uočena su pri valnim duljinama od 405 nm i 450 nm jer se laseri potonjih valnih duljina napajaju putem baterija te daju intenzitetom slabiji i „razmrljaniji“ snop svjetlosti. Izmjerene vrijednosti kutova zakreta polarizirane svjetlosti za ostale kristale, KCl, NaCl i KBr također se dobro slažu s pripadnim linearnim prilagodbama, no uočena su mala odstupanja zbog manje duljine uzoraka te manjeg poprečnog presjeka kristala. Naime, duljine kristala KCl, NaCl i KBr su redom: 3.6 mm, 4.0 mm i 4.8 mm. Zbog male duljine i malog poprečnog presjeka, svjetlost bi se raspršila na kristalu te je bilo zamjetno teže očitavati otpor na multimetru za pripadne minimume.

Teorijske vrijednosti Verdetove konstante za kristale KCl, NaCl i KBr nisu pronađene u literaturi te su dobivene vrijednosti Verdetove konstante uspoređene s prilagodbama drugog stupnja gdje su također, kao i kod optičkog stakla, uočena bolja slaganja za lasere koji su se napajali preko struje. Također, uvrštavanjem eksperimentalnih vrijednosti Verdetove konstante za optičko staklo (kvarc), KCl, NaCl i KBr u jednadžbu (80), linearnom prilagodbom u programu QtiPlot pronađene su vrijednosti konstanta  $A$  i  $\lambda_0$  koje su poslužile za dobivanje prilagodbi Verdetove konstante za potonje materijale. Pritom su uočena dobra slaganja za optičko staklo, mala odstupanja za KCl i KBr te zamjetna odstupanja za NaCl. Kao mogući razlog odstupanja također, kao gore spomenuto, leži u različitim vrstama lasera te u „razmrljanosti“ snopa svjetlosti prilikom interakcije s kristalom.

Maslinovo ulje stavljeno je u plastičnu kutijicu duljine 20.6 mm. Sama duljina uzorka maslinovog ulja iznosila je 19.4 mm. Pri mjerenju kuta zakreta polarizirane svjetlosti za maslinovo ulje uočena je neobična pojava pri valnoj duljini od 532 nm. Naime, za svjetlost valne duljine 532 nm uočena je promjena u smjeru zakretanja kuta polarizirane svjetlosti. Svjetlost se pri valnoj dulji od 532 nm za pozitivan smjer struje zakretala u negativnom smjeru dok se za sve druge materijale pri svim valnim duljinama svjetlost zakretala, za pozitivan smjer struje, u pozitivnom smjeru. Kao posljedica toga dobivena vrijednost Verdetove konstante za maslinovo ulje za 532 nm je negativna (za sve ostale materijale pri svim valnim duljinama vrijednost Verdetove konstante je pozitivna). Fizikalno objašnjenje efekta izostaje u literaturama te razlog najvjerojatnije leži u složenoj dielektričnoj funkciji koja ima

anomalno ponašanje na valnoj duljini oko 532 nm što se očituje u pojavi fluorescencije. Izmjerene vrijednosti kuta zakreta polarizirane svjetlosti za maslinovo ulje dobro se slažu s pripadnim linearnim prilagodbama za sve valne duljine. Mala odstupanja uočena su zbog činjenice što se svjetlost nakon prolaska kroz gustu tekućinu maslinovog ulja nije najjasnije vidjela na fotootporniku (kao što je to bio slučaj za optičko staklo) te je zbog toga bilo otežano očitavanje otpora na multimetru za pripadne minimume. Također, u literaturi izostaje teorijska vrijednost Verdetove konstante za maslinovo ulje te je zbog toga prikazana samo eksperimentalno dobivena vrijednost.

Eksperimentalno dobivene vrijednosti Verdetove konstante za sve materijale pokazale su dobra slaganja s teorijskim modelom u kojem se Verdetova konstanta smanjuje povećanjem valne duljine u ovisnosti polinoma drugog stupnja. Jedino odstupanje uočeno je za maslinovo ulje pri valnoj duljini od 532 nm gdje je dobivena negativna vrijednost Verdetove konstante.



## Popis literature:

- [1] L. Wade, *Organic Chemistry*, Fifth Edition, (Prentice Hall, Upper Saddle River, New Jersey, 2003.)
- [2] Michael Faraday: "On the magnetization of light and the illumination of magnetic lines of force", reprinted in M. Faraday: *Experimental Researches in Electricity*, vol. III, London 1855., Dover ed. 1965., ser. XIX, str. 2146-2242.
- [3] Faraday: *Experimental Researches*, vol. I, str. 951-955.
- [4] L. Pearce Williams: *Michael Faraday*, London 1965., str. 381.
- [5] Thomas Martin, ed.: *Faraday's diary*, vol. IV, London 1933., str. 256.
- [6] Faraday: *Experimental Researches*, III, str. 2221.
- [7] Hecht, E. (2002.) *Optics*, 4th edn, Addison-Wesley, San Francisco, CA.
- [8] Perez, I. (19. 12.2014.), *Interaction of radiation with matter*, <https://doi.org/10.1002/9783527664610.ch1>, 16.8.2021.
- [9] Herzberg, G. (1945.) *Molecular spectra and molecular structures*, D. Van Nostrand, NY.
- [10] Berry, R.S., Rice, S.A., Ross, J. (2000.) *Physical chemistry*, 2nd edition, Oxford press, Oxford.
- [11] Jensen, P., Bunker, P.R. (2000.) *Computational molecular spectroscopy*, John Wiley & Sons, Ltd, Chichester.
- [12] Samuel, J. Ling (2016.) *University physics*, vol. 3, Truman state university.
- [13] Öhman, Y. (1956.) *Stockholm Obs. Ann.* str. 19.
- [14] Weller, L. (2012.) *Opt. Lett.*, str 37.
- [15] Gardner, F. F., Whiteoak, J. B. (1963.) *Nature* str. 197.
- [16] Adams, C. S., Hughes, I. G. (2019.) *Optics f2f* (Oxford: Oxford University Press), poglavlje 4.
- [17] Weller, L.; Kleinbach, K. S.; Zentile, M. A.; Knappe, S.; Hughes, I. G.; Adams, C. S. (2012). *Optical isolator using an atomic vapor in the hyperfine Paschen–Back regime*, str. 37.
- [18] A review of magneto-optic effects and it's application. *International journal of electromagnetics and applications* (2017.), <http://article.sapub.org/10.5923.j.ijea.20170701.03.html>, 12.9.2021.

- [19] Fresnelove jednadžbe.  
[http://phy.grf.unizg.hr/media/download\\_gallery/13\\_Fresnelone%20jedad%C%BEbe.pdf](http://phy.grf.unizg.hr/media/download_gallery/13_Fresnelone%20jedad%C%BEbe.pdf), 14.9.2021.
- [20] Magnetic properties of matter. Deshbandhu College,  
[https://www.deshbandhucollege.ac.in/pdf/resources/1585301778\\_PHY\(H\)-II-ELECTRICITY\\_MAGNETISM\\_&\\_EMT-14.pdf](https://www.deshbandhucollege.ac.in/pdf/resources/1585301778_PHY(H)-II-ELECTRICITY_MAGNETISM_&_EMT-14.pdf), 17.9.2021.
- [21] Bozorth, Richard M. (1993.) [Reizdanje objave iz 1951.]. *Ferromagnetism*, Wiley
- [22] Saturation (magnetic). (18.4.2021.). Wikipedia.  
[https://en.wikipedia.org/wiki/Saturation\\_\(magnetic\)](https://en.wikipedia.org/wiki/Saturation_(magnetic)), 23.8.2021.
- [23] E. Y. Tsymbal, (16.3.2016.), *Magnetic properties of materials*,  
[https://unlcms.unl.edu/cas/physics/tsymbal/teaching/SSP-927/Section%2016\\_Magnetic\\_Properties\\_2.pdf](https://unlcms.unl.edu/cas/physics/tsymbal/teaching/SSP-927/Section%2016_Magnetic_Properties_2.pdf), 23.8.2021.
- [24] S.S. Halli, K.V. Rao. (1992.) *Advanced Techniques of Population Analysis.*, str. 165.
- [25] Sandra Lach Arlinghaus (1994.) *PHB Practical Handbook of Curve Fitting*, CRC Press.
- [26] Curve fitting. (1.8.2021.). Wikipedia, [https://en.wikipedia.org/wiki/Curve\\_fitting](https://en.wikipedia.org/wiki/Curve_fitting), 24.8.2021.
- [27] Gould, R. Gordon (1959). "The LASER, Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation". In Franken, P.A.; Sands R.H. (eds.). The Ann Arbor Conference on Optical Pumping, the University of Michigan. str. 128.
- [28] Polarizer and analyzer. QS Study,  
<https://qsstudy.com/physics/polarizer-and-analyzer>, 24.8.2021.
- [29] Photo resistor - Light Dependent Resistor (LDR). Resistor Guide,  
<https://eepower.com/resistor-guide/resistor-types/photo-resistor/#>, 24.8.2021.
- [30] Kurkjian, Charles R.; Prindle, William R. (1998.). "*Perspectives on the History of Glass Composition*". Journal of the American Ceramic Society. str. 795–813.
- [31] Yabluchanskii, O.E., Kozhevatin, S.G., Nedospasova, T.A. *et al.* Optical flint glass with enhanced transmission in the ultraviolet region. *Glass Ceram* **53**, 204–206 (1996). <https://doi.org/10.1007/BF01166385> (25.8.2021.)
- [32] Sodium Chloride (NaCl) Crystal.  
 PhysicsOpenLab. <https://physicsopenlab.org/2018/01/22/sodium-chloride-nacl-crystal/>, 25.8.2021.

- [33] Optical constants of NaCl (Sodium chloride). Refractiveindex.info.  
<https://refractiveindex.info/?shelf=main&book=NaCl&page=Li>, 25.8.2021.
- [34] NaCl Sodium Chloride technical data. Spectral systems. <https://www.spectral-systems.com/technical-data-sheet/nacl-sodium-chloride/>, 25.8.2021.
- [35] Potassium chloride. International Programme on Chemical Safety. 3.3.1 Properties of the substance. (17.1.2011.) <https://incem.org/documents/pims/pharm/potasscl.htm>, 25.8.2021
- [36] Optical constants of KCl (Potassium chloride). Refractiveindex.info.  
<https://refractiveindex.info/?shelf=main&book=KCl&page=Li>, 25.8.2021.
- [37] Potassium chloride. Surface net. <https://www.surfacenet.de/potassium-chloride.html>, 25.8.2021.
- [38] Potassium bromide. Merck.  
<https://www.sigmaaldrich.com/HR/en/product/sigald/221864>, 25.8.2021.
- [39] Optical constants of KBr (Potassium bromide). Refractiveindex.info.  
<https://refractiveindex.info/?shelf=main&book=KBr&page=Li>, 25.8.2021.
- [40] United States Department of Agriculture: Grading Manual for Olive Oil and Olive-Pomace Oil. <https://www.ams.usda.gov/AMSV1.0/getfile?dDocName=STELPRDC5098497>, 25.8.2021.
- [41] UV-VIS transmission of olive oil. Research gate.  
[https://www.researchgate.net/figure/UV-VIS-transmission-of-olive-oil\\_fig400\\_262326418](https://www.researchgate.net/figure/UV-VIS-transmission-of-olive-oil_fig400_262326418), 25.8.2021.
- [42] Measuring the Faraday effect in live oil using permanent magnets and Malus' law. European Journal of Physics. (13.1.2020.) <https://doi.org/10.1088/1361-6404/ab50dd>, 8.9.2021.
- [43] Faraday effect. Phywe.  
[https://www.nikhef.nl/~h73/kn1c/praktikum/phywe/LEP/Experim/2\\_6\\_01.pdf](https://www.nikhef.nl/~h73/kn1c/praktikum/phywe/LEP/Experim/2_6_01.pdf), 8.9.2021.
- [44] Fun with fluorescence in olive oil. The physics teacher. (rujan 2012.),  
<http://dx.doi.org/10.1119/1.4745700>, 9.9.2021.
- [45] The complex dielectric-constant tensor  $\epsilon_{ij}(\omega, k)$  and normal waves in a medium. Crystal optics with spatial dispersions, and excitons.  
[https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-662-02406-5\\_2](https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-662-02406-5_2), 17.9.2021.
- [46] The Faraday effect and physical theory. Archive for history of exact science, vol. 15., str. 235-281 <http://www.jstor.org/stable/41133451>, 9.9.2021.

- [47] Optical constants of flint glass. Refractiveindex.info.  
<https://refractiveindex.info/?shelf=glass&book=SCHOTT-F&page=F2>, 9.9.2021.
- [48] S. Bennet, A. Stern, *Faraday effects in solids*, Physical review, vol. 137.,  
Massachusetts institute of technology, Cambridge, Massachusetts, 1965.
- [49] Lanthanides and actinides. Msc chemistry paper 2.  
<http://www.nou.ac.in/econtent/Msc%20chemistry%20paper%202/MSc%20Chemistry%20Paper-II%20Unit-3.pdf>, 11.9.2021.
- [50] Lanthanides. Chemistry learner. <https://www.chemistrylearner.com/lanthanides>,  
11.9.2021.
- [51] Study of different magneto-optic materials for current sensing applications.  
Scientific Figure - ResearchGate. [https://www.researchgate.net/figure/Verdet-constants-of-various-MO-materials\\_tbl1\\_325751003](https://www.researchgate.net/figure/Verdet-constants-of-various-MO-materials_tbl1_325751003), 11.9.2021.