

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
PRIRODOSLOVNO-MATEMATIČKI FAKULTET
FIZIČKI ODSJEK

PETRA MUNK

PRIMJENA NOVIH ULTRALJUBIČASTIH
SVJETLEĆIH DIODA U ATOMSKOJ
SPEKTROSKOPIJI

DIPLOMSKI RAD

ZAGREB, 2007.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
PRIRODOSLOVNO-MATEMATIČKI FAKULTET
FIZIČKI ODSJEK

SMJER: DIPL. ING. FIZIKE

Petra Munk

Diplomski rad

PRIMJENA NOVIH
ULTRALJUBIČASTIH SVJETLEĆIH
DIODA U ATOMSKOJ
SPEKTROSKOPIJI

Voditelj diplomskog rada: Dr.sc. Goran Pichler

Ocjena diplomskog rada: _____

Povjerenstvo: 1. _____

2. _____

3. _____

Zagreb, 2007.

Ovaj je diplomski rad izrađen na Institutu za fiziku, unutar grupe za atomsku fiziku pod vodstvom dr. sc. Gorana Pichlera.

Voditelj ovog rada je dr. sc. Goran Pichler.

Od strane Fizičkog odsjeka Prirodoslovno-matematičkog fakulteta Sveučilišta u Zagrebu, rad je vodio prof. dr. sc. Damir Veža.

Mojoj obitelji i Vedranu, s puno ljubavi.

Velika, velika hvala mom mentoru dr. sc. Goranu Pichleru na beskrajnom strpljenju i razumijevanju, iznimnoj pomoći i potpori, kao i mnogim vrijednim savjetima, posvećenom vremenu, mudrosti, te neizmjereno jakim živicima i snazi volje koje je nesebično uložio pomažući mi da ovaj rad ugleda svjetlo dana.

Hvala i dipl. ing. Silviju Vdoviću na pomoći koju mi je pružio prilikom izrade ovog rada, kada god mi je trebala, te pogotovo strpljenju koje mi je posvetio.

Također, zahvaljujem cijeloj grupi dr. sc. Gorana Pichlera na nebrojenim savjetima, pomoći, pažnji, lijepim trenutcima i gestama, te prijateljstvu koji su obilježili vrijeme koje sam provela na Institutu za fiziku. Posebno hvala dr. sc. Ticijani Ban i dr. sc. Damiru Aumileru na pruženoj podršci i bezrezervnoj pomoći u svakoj prilici kada sam ih trebala.

Zahvaljujem i dipl. ing. Nikši Krstuloviću na trajnoj spremnosti da mi pomogne i nadasve na prijateljstvu još iz studentskih dana.

Hvala i djelatnicima Instituta Gogi, Ivi i Darku, na njihovom prijateljskom odnosu i brizi.

Konačno, neizmjerena hvala mojim roditeljima, bratu, baki i dedi te Vedranu na svemu što su za mene učinili da mi olakšaju ovaj studij, na beskrajnom strpljenju, razumijevanju, stalnoj potpori i pomoći, te ljubavi i povjerenju koje su mi pružili tokom ovog dugačkog putovanja.

SADRŽAJ

1. TEORIJSKA PODLOGA EKSPERIMENTA

1.1. Elektronska spektroskopija

1.1.1. Kvantni brojevi, osnovni zakoni i kvantizacija strukture atoma

1.1.2. Elektronska konfiguracija atoma

1.1.3. Atomska spektroskopija

1.2. Alkalijski metali

1.2.1. Svojstva alkalijskih metala

1.2.2. Spektri alkalijskih metala

1.2.3. *Grotrian dijagrami* alkalijskih metala značajnih za ovaj eksperiment i
Edlénova jednadžba

1.3. Svjetleće diode

1.3.1. Osnovne značajke principa rada svjetlećih dioda ovisno o njihovoj strukturi

1.3.2. *InGaN* (Indij-Galij-Nitrid) svjetleće diode

1.3.3. Osvrt na karakterističnost svjetlećih dioda korištenih u ovom eksperimentu

2. EKSPERIMENTALNI POSTAV I OPIS METODE MJERENJA

2.1. Eksperimentalni postav

2.2. Opis metode mjerenja i komentar pritom nastalih zapažanja

3. REZULTATI

3.1. Kratka interpretacija početno dobivenih rezultata mjerenja

3.2. Opis matematičke obrade dobivenih rezultata mjerenja

3.3. Grafovi dobiveni iz rezultata mjerenja u ovom eksperimentu i njihova interpretacija

3.4. Tablični prikaz prijelaza među podnivoima viših energijskih nivoa rubidija, cezija i francija

4. ZAKLJUČAK

5. LITERATURA

1. TEORIJSKA PODLOGA EKSPERIMENTA

1.1. Elektronska spektroskopija

Prijelazima između elektronskih stanja kako atoma, tako i molekula, bavi se elektronska spektroskopija. U usporedbi s molekulama, atomi su u spomenutom kontekstu specifični po tome što imaju samo elektronske stupnjeve slobode, izuzevši nuklearni spin i translaciju. Molekule s druge strane imaju, samom svojom strukturom uvjetovane, dodatne, vibracijske i rotacijske stupnjeve slobode. Upravo su iz tog razloga elektronski spektri atoma puno jednostavniji od molekulskih, kako u teorijskim, tako i u eksperimentalnim aspektima.

Za analizu određenog spektra, bio to atomski ili molekulski spektar, potrebno je poznavanje određenih pojmova koji su usko vezani uz notaciju atomskih i molekulskih stanja te time automatski opisuju spektar, kao što su elektronska konfiguracija, elektronsko stanje, multiplicitet, razna izborna pravila, itd.

1.1.1. Kvantni brojevi, osnovni zakoni i kvantizacija strukture atoma

Kvantni brojevi opisuju vrijednosti određenih konstantnih brojeva u dinamici danog kvantnog sistema. Često služe za određivanje energija elektrona u atomima, dok ostale mogućnosti uključuju angularni moment, spin, itd. Važno je naglasiti da bilo koji kvantni sistem može u svrhu svog opisa trebati bilo koji broj i vrstu kvantnih brojeva, te je stoga sama sistematizacija potonjih upravo velikim dijelom stvar područja fizike kojem određeni kvantni sistem pripada.

Od četiri osnovna kvantna broja, za definiciju njih troje odgovorna je sama geometrija atomskog sustava, dok je četvrti kvantni broj direktno vezan uz *Paulijevo pravilo isključenja*. Naime, osnovna četiri kvantna broja su:

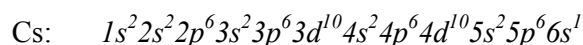
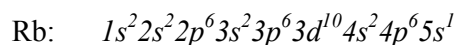
naziv	simbol	značenje	interval vrijednosti	Primjer
Glavni	n	ljuska	$1 \leq n$	$n = 1, 2, 3$
Orbitalni(angularni moment),(sporedni)	l	podljuska	$0 \leq l \leq n$	za $n = 3$: $l = 0, 1, 2$
Magnetski(projekcija angularnog momenta)	m_l	energijski pomak	$-l \leq m_l \leq l$	za $l = 2$: $m_l = -2$
spinski	m_s	spin	$-1/2, 1/2$	uvijek samo: $-1/2, 1/2$

U atomskoj fizici, baš kao i u ovom eksperimentu, iznimno je važan i kvantni broj $\mathbf{J} = \mathbf{L} + \mathbf{S}$, koji predstavlja ukupni angularni moment, odnosno ukupni moment impulsa jer u sebi objedinjuje utjecaje i orbitalnog gibanja elektrona i njegove spinske orijentacije. Naime, vrijednost ovog kvantnog broja, tj. preciznije rečeno razlika vrijednosti J dvaju nivoa između kojih se promatra mogućnost prijelaza, određuje, prema izbornom pravilu koje dozvoljava prijelaze između nivoa čija razlika iznosi $\Delta J = 0, \pm 1$, da li će do određenog prijelaza moći doći ili ne.

1.1.2. Elektronska konfiguracija atoma

Elektronska konfiguracija atoma, promatranog u svom osnovnom stanju (sufiks I je oznaka da se atom nalazi u osnovnom stanju, tj. nije ioniziran, npr. RbI i CsI koji su kao takvi proučavani u ovom eksperimentu, dok stoga nadalje oznaka II stoji za jednostruko ionizirani atom (ion istoimenog atoma), III označava dvostruku ionizaciju itd.), jest jedna od najvažnijih njegovih karakteristika, budući da o njoj ovise ponašanje i uvjeti interakcije danog atoma sa svim ostalim postojećim objektima (česticama). Lokacija danog elementa u periodnom sustavu elemenata uvjetuje njegovu elektronsku konfiguraciju, te određuje kvantne brojeve atoma.

Što se tiče alkalijskih metala korištenih u ovom eksperimentu, dakle rubidija i cezija, osnovna stanja ovih atoma imaju sljedeće elektronske konfiguracije:



1.1.3. Atomska spektroskopija

U atomu elektroni popunjavaju orbitale tako da slijede tzv. *aufbau princip* (princip izgradnje) i zadovoljavaju *Paulijevo pravilo isključenja* koje nalaže da dva elektrona ne mogu imati jednake vrijednosti kvantnih brojeva n , l , m_l , m_s . Budući da m_l može imati $(2l+1)$ različitih vrijednosti, a m_s ili vrijednost $+1/2$ ili vrijednost $-1/2$, slijedi da atomska orbitala okarakterizirana određenim vrijednostima kvantnih brojeva n i l , može primiti $2(2l+1)$ elektrona. Na primjer, ns orbitala s vrijednošću $l=0$ može primiti dva elektrona, np orbitala koja ima vrijednost $l=1$ može primiti šest elektrona, a nd orbitala s vrijednošću $l=2$ prima deset elektrona itd.

Dok se atomska orbitala odnosi na točno određene vrijednost n i l , ljuska se odnosi na sve orbitale koje imaju istu vrijednost n . Za $n = 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7$, ljuske imaju oznaku K, L, M, N, O, P, Q . Prema sličnom principu, vrijednostima $l = 0, 1, 2, 3, 4, 5$ pridružuju se oznake podljusaka, odnosno orbitala koje glase s, p, d, f, g, h .

Važno je naglasiti razliku između elektronske konfiguracije i elektronskog stanja. Naime, elektronska konfiguracija opisuje način na koji su elektroni raspoređeni u različite atomske orbitale, te njoj može odgovarati više stanja koja se razlikuju u energiji. Osnovna je razlika u stanjima koja pripadaju istoj elektronskoj konfiguraciji to da se ona međusobno razlikuju prema ukupnim orbitalnim i impulsnim momentima $\mathbf{L}$ i $\mathbf{S}$, koji su vezani uz gibanje elektrona po stazi i uz spin. Također, elektronska konfiguracija određuje sam iznos vektora orbitalnog momenta l za pojedini elektron.

Pošto svaki elektron u atomu posjeduje dva momenta impulsa, može se očekivati njihova interakcija odnosno sprezanje, i ona ovisi o jačini magnetskih momenata. Također, neka su sprezanja toliko slaba da se mogu zanemariti. Spin-orbit sprezanje koje podrazumijeva interakciju spinskog i orbitalnog gibanja ovisi o konkretnom atomu.

Spin jednog elektrona može biti u interakciji sa:

- (1) spinovima drugih elektrona
- (2) vlastitim orbitalnim gibanjem
- (3) orbitalnim gibanjem drugih elektrona

Posljednja interakcija je vrlo slaba i može se zanemariti, dok su interakcije (1) i (2) su mnogo važnije i one uključuju dva tipa aproksimacija, koje u stvari predstavljaju dva ekstrema sprezanja.

Tako je *jj sprezanje* aproksimacija koja pretpostavlja da je interakcija između spinskih momenata dovoljno mala da se može zanemariti. Isto vrijedi i za orbitalne momente. Međutim interakcija između spina elektrona i njegovog vlastitog kutnog momenta impulsa, a koja daje rezultatni kutni moment impulsa $\mathbf{j}$, je vrlo jaka. Opisana aproksimacija je ograničena samo na nekoliko stanja težih atoma pa nije često od velike koristi.

Druga, što se tiče ovog rada, puno važnija aproksimacija je tzv. *Russel-Saundersovo sprezanje*, koje služi za opisivanje većine atomskih stanja. Ono uzima u obzir da je sprezanje između spina elektrona i orbitalnog momenta zanemarivo, između orbitalnih momenata jako (*ℓℓ sprezanje*) između spinskih momenata relativno slabo, ali ipak postojano (*ss sprezanje*). Posljedica *ℓℓ sprezanja* je rezultatni vektor $\mathbf{L}$ iznosa

$$\hbar \cdot \sqrt{L(L+1)} = L^* \hbar,$$

$$L = \ell_1 + \ell_2, \ell_1 + \ell_2 - 1, \dots, |\ell_1 - \ell_2|$$

gdje je L ukupni orbitalni kutni moment impulsa.

Kako za različite prostorne raspodjele elektrona postoje različita međudjelovanja, a time i različita energijska stanja, za očekivati je da će doći do cijepanja energijskog nivoa u nekoliko termova različitih po energiji. Termovi atoma označavaju se s $S, P, D, F, G, \dots$, što odgovara vrijednostima $L = 0, 1, 2, 3, 4, \dots$. Dakle, to je u analogiji s notacijom elektronskih orbitala $s, p, d, f, g, \dots$ za dane vrijednosti ℓ .

Atomi alkalijskih metala imaju po jedan s -elektron u vanjskoj ljusci i ne uzimajući u obzir popunjene podljuske slijedi da je njihov orbitalni moment impulsa L jednak nuli, a spinski moment impulsa S je jednak $1/2$. Tako će osnovna stanja alkalijskih metala biti S stanja sa sfernom raspodjelom naboja.

Posljedica *ss sprezanja* je rezultatni vektor $\mathbf{S}$ iznosa

$$\hbar \cdot \sqrt{S(S+1)} = S^* \hbar,$$

$$S=s_1+s_2, s_1+s_2-1, \dots, |s_1-s_2|$$

gdje je S ukupni spinski kvantni broj.

Ako se na kratko razmotri slučaj dva elektrona, uočava se da vrijednost S može biti ili nula ili jedan. Termovi koji ukazuju na vrijednost S sami imaju vrijednost $2S+1$ kao lijevi gornji indeks na S , P , D , F , ... oznakama. Vrijednost $2S+1$ se zove multiplicitet i to je broj koji može poprimiti vrijednosti

$$M_S=S, S-1, \dots, -S$$

Kako u slučaju dva elektrona vrijednost S može biti jedan ili nula, slijedi da je vrijednost $2S+1$ jednaka jedan ili tri. Rezultirajući se termovi prema tome nazivaju singlet (1S_0) ili triplet (3S_1).

Konačno, također postoji i sprezanje između rezultatnih orbitalnih i rezultatnih spinskih momenata, a poznato je kao *LS sprezanje* ili spin-orbit interakcija (LS ili *Russel-Saundersovo sprezanje*). Posljedica te interakcije je vektor ukupnog kutnog momenta $\mathbf{J}$ iznosa

$$\hbar \cdot \sqrt{J(J+1)} = J^* \hbar,$$

$$J=L+S, L+S-1, \dots, |L-S|$$

iz čega slijedi da J može imati $2S+1$ vrijednosti ako je $L > S$, odnosno može imati $2L+1$ vrijednosti ako je $L < S$.

Kako ukupni moment impulsa sadrži i spinski doprinos, kvantni broj J je polucijeli broj kada je broj elektrona neparan. Iz toga slijedi da je za jedan elektron u 2S termu moguća samo jedna vrijednost ukupnog momenta impulsa, te je pripadni kvantni broj stoga

$$J = L + S = 1/2$$

Promatrajući pak slučaj kada postoji jedan elektron u 2P termu, moguće su dvije vrijednosti

$$J = L + S = 1 + 1/2 = 3/2$$

$$J = L + S = 1 - 1/2 = 1/2$$

Dakle, uslijed spin-orbit interakcije, ovdje je došlo do cijepanja na dva terma $^2P_{1/2}$ i $^2P_{3/2}$. Vrijednost kvantnog broja ukupnog momenta impulsa dodaje se simbolu terma kao desni donji indeks.

1.2. Alkalijski metali

Ukratko, alkalijski metali čine skupinu elemenata koja zauzima prvu grupu ("grupa IA") periodnog sustava elemenata, uz izuzetak vodika koji je nemetal ali se zbog svoje strukture nalazi na samom vrhu grupe IA. Upravo iz razloga što imaju jednaku elektronsku konfiguraciju kao vodik, koji je najjednostavniji element periodnog sustava te je time o njemu dostupno najviše informacija, i alkalijski se metali često u mnogo aspekata mogu proučavati lakše od ostalih elemenata baš zahvaljujući toj sličnosti sa vodikom, posebice kada se radi o strukturi vanjske ljuske. Kako se nalaze upravo u prvoj grupi periodnog sustava, to znači da ovi metali posjeduju samo jedan elektron u svojoj vanjskoj, valentnoj, ljusci. Zbog toga imaju afinitet da otpuste taj elektron pri ionskom vezanju s ostalim elementima, koji pak (u većini slučajeva) imaju veći broj elektrona u valentnoj ljusci te stoga i tendenciju da popune tu ljusku do stanja ravnoteže primanjem elektrona od atoma s kojima se vežu, a sve u svrhu uzajamnog postizanja optimalnog broja elektrona u valentnoj ljusci, koji iznosi osam kao kod plemenitih plinova, i osigurava stanje najniže energije atoma, a time i njegovu ravnotežu. Nadalje, slijedi da su alkalijski metali vrlo reaktivne prirode, te se iznimno rijetko nalaze u svom elementarnom obliku u prirodi. Kao i ostali metali, alkalijski su metali pogodni za kovanje ("kovni"), te se na taj način mogu lako oblikovati po potrebi. Također su dobri vodiči topline i elektriciteta. Za razliku od ostalih metala, alkalijski su metali puno mekši. Od cijele grupe IA, cezij i francij su najreaktivniji.

1.2.1. Svojstva alkalijskih metala

Kao što je već navedeno, alkalijski metali elementi su prve grupe, "grupa IA", periodnog sustava elemenata (nova oznaka prema *IUPAC-u* glasi "Grupa 1"), čiji je prvi član vodik, a zatim redom slijede alkalijski metali prema stupnju složenosti svoje strukture, dakle rastućem broju periode, a time i ljusaka koje posjeduju, tj. atomskog i masenog broja Z i M , koji su redom odgovorni za broj elektrona, odnosno nukleona, osnovnog stanja atoma pojedinog elementa (a time naravno i za spomenuti broj ljusaka, odnosno sam radijus, atoma). Alkalijski su metali redom, od druge do sedme periode, litij (*Li*), natrij (*Na*), kalij (*K*), rubidij (*Rb*), cezij (*Cs*) i francij (*Fr*). Broj grupe u kojoj se nalaze prema teoriji (tj. uređenju periodnog sustava elemenata) automatski je jednak broju elektrona koji se nalazi u njihovoj valentnoj (vanjskoj) ljusci, te time određuje način na koji ova skupina elemenata interagira sa svojom okolinom, odnosno objektima koji dolaze s njima u kontakt. Dakle posjedovanjem samo jednog elektrona u valentnoj ljusci, elektronska konfiguracija njihove vanjske ljuske stoga glasi ns^1 , gdje n označava glavni kvantni broj, tj. broj ljusaka koje određeni element posjeduje i jednak je ujedno broju periode periodnog sustava u kojoj se dani element nalazi, dok je s u ovom kontekstu oznaka podljuske koja se nalazi u danoj ljusci. Sufiks 1 označava da broj elektrona prisutnih u ovdje spomenutoj podljusci s iznosi jedan.

S obzirom na broj grupe alkalijskih metala, dakle činjenicom da u valentnoj ljusci imaju samo jedan elektron, jedno je od važnijih njihovih obilježja, općenito gledano, to da posjedovanjem samo jednog elektrona u valentnoj ljusci po svojoj strukturi sliče vodik, dakle najjednostavnijem kemijskom elementu, te je baš zbog toga, između ostalog, njihovo istraživanje u mnogim aspektima puno pristupačnije nego kod svih ostalih složenijih elemenata, budući da je upravo vodik zbog svoje jednostavne građe element o kojem je skupljeno najviše informacija, koristeći sve za to prikladne, raspoložive metode.

Nadalje razmatrajući elektronsku konfiguraciju alkalijske grupe metala, još je važnija posljedica njihovog posjedovanja samo jednog elektrona u vanjskoj, odnosno valentnoj, ljusci ta, da imaju afinitet otpuštanja upravo tog jednog elektrona kako bi time postigli energetski optimalno stanje, koje podrazumijeva da vanjska ljuska elementa posjeduje točno 8 elektrona, što je maksimalni broj elektrona koji vanjska ljuska elementa (koji ima veći broj ljusaka od jedne) može sadržavati, te je dakle posjedujući osam elektrona vanjska ljuska u potpunosti

popunjena i time je promatrani element postigao stanje najniže energije te se nalazi u ravnotežnom stanju. Otpuštanjem tog jednog elektrona iz vanjske ljuske, alkalijski metali postaju jednostruko ionizirani, pozitivno nabijeni ioni, odnosno kationi. Uzimajući gore navedeno u obzir, očito je da se alkalijski metali često vežu sa halogenom grupom elemenata, koju čine nemetali grupe VIIA, što je logično za očekivati budući da halogeni elementi imaju točno sedam elektrona u valentnoj ljusci te stoga i tendenciju da popune tu ljusku do stanja ravnoteže primanjem jednog elektrona od atoma s kojima se vežu, a sve u svrhu uzajamnog postizanja optimalnog broja elektrona u valentnoj ljusci, koji iznosi osam i time ju popunjava, kao kod plemenitih plinova (grupa VIIIA), te osigurava stanje najniže energije atoma, a tako i njegovu ravnotežu. Ionskim vezanjem alkalijskih metala s halogenim nemetalima (fluor (*F*), klor (*Cl*), brom (*Br*), jod (*I*), astat (*At*)) nastaju halogene (ionske) soli. Također, alkalijski metali često reagiraju i s vodom tvoreći jako alkalijske (osnovne) hidrokside.

Još jedna važna posljedica posjedovanja samo jednog elektrona u vanjskoj ljusci je ta da alkalijski metali imaju najmanji ionizacijski potencijal u usporedbi s ostalim elementima koji se nalaze u istoj periodu kao i pripadni joj, pojedini, alkalijski metal. Razlog tome je što uklanjanjem tog jednog elektrona koji posjeduju u svojoj vanjskoj ljusci alkalijski metali postižu energijski stabilnu konfiguraciju inertnih (plemenitih) plinova postajući jednostruko, pozitivno, nabijeni ioni, što je energetski najmanje zahtjevno baš u slučaju kada se iz vanjske ljuske treba izbaciti samo jedan elektron. U slučaju elemenata sa, npr., dva elektrona u vanjskoj ljusci potrebna je veća energija, dakle veći ionizacijski potencijal, za uklanjanje dva elektrona iz vanjske ljuske kako bi se postigla stabilna konfiguracija plemenitih plinova, pa je zbog toga i ionizacijski potencijal alkalijskih metala (tj. elemenata grupe IA) najniži. Međutim, govoreći o njihovom drugom (po redu) ionizacijskom potencijalu, kada je potrebno od jednostruko ioniziranog kationa napraviti dvostruko ionizirani, taj je ionizacijski potencijal alkalijskih metala vrlo visok, budući da jednostruko ionizirani atom alkalijskog metala već posjeduje elektronsku konfiguraciju plemenitih plinova u svojoj vanjskoj ljusci, te je stoga izuzetno teško odvojiti jedan elektron iz ljuske s takovom elektronskom strukturom.

Opet zahvaljujući većinom svojoj elektronskoj konfiguraciji, alkalijski su metali poznati kao vrlo reaktivni elementi, pa se zbog toga najčešće drže u spremnicima s mineralnim uljima. Pogotovo je poznat njihov afinitet da jako burno reagiraju u kontaktu s vodom, s time da je spomenuta reakcija to snažnija što se položaj danog elementa nalazi niže u grupi, tj. što je element složeniji. Tako se na primjer kod reakcije kalija s vodom ($2K(s) +$

$2H_2O(l) \rightarrow 2KOH(aq) + H_2(g)$, čiji su produkti kalijev hidroksid i vodik, koji se pri tome oslobađa u plinovitom stanju, proizvodi dovoljno energije kako bi se proizvedeni vodik zapalio, što stvara plamen ljubičaste boje iznad samoga kalija. Promatrajući nadalje reakcije s vodom alkalijskih metala složenije strukture od kalija, kao što su rubidij ili cezij, uočava se da već pri samom dodiru alkalijskog metala i vode odmah dolazi do vrlo snažne, eksplozivne reakcije.

Ostala važnija svojstva alkalijskih metala su da imaju srebrnastu boju, s time da cezij posjeduje zlatni odsjaj, mekani su, niske gustoće, te se iznimno rijetko mogu naći u svom elementarnom stanju u prirodi. Natrij i kalij imaju mnoge primjene u najrazličitijim područjima upotrebe, dok su cezij i francij poznati kao vrlo reaktivni elementi. Sam francij je iznimno rijedak element, te su njegove kemijske i fizikalne karakteristike još nepoznate. Vjeruje se da u svakom danom trenutku u vremenu, na Zemlji postoji čak manje od jednog ounce-a ovog elementa. Njegov najstabilniji izotop ima poluživot koji traje nešto manje od 23 minute. Na sobnoj temperaturi alkalijski se metali nalaze u krutom stanju, dok pri višim temperaturama prelaze u tekuće stanje, a time i stanje pare, kao što je slučaj u ovom eksperimentu.

Konačno, općenito gledano, alkalijski metali daju jedan od najboljih primjera kada se radi o praćenju trenda karakteristika elemenata neke grupe unutar periodnog sustava, promatrajući danu grupu od najjednostavnijeg prema najsloženijem njenom članu. Tako se, na primjer, krećući se u smjeru od vrha prema dnu grupe alkalijskih metala, uočava da elektronegativnost elemenata pada, reaktivnost raste, dok se temperature tališta i vrelišta smanjuju. Gustoća se, u načelu, povećava s povećanjem atomskog broja, s primjetnim izuzetkom kalija koji je manje gustoće od natrija, te mogućom iznimkom francija koji izgleda da ima manju gustoću od cezija, s time da treba imati na umu da je za sada znanje o samom franciju dosta ograničeno.

Uzimajući u obzir alkalijske metale korištene u ovom eksperimentu, dakle rubidij i cezij, iz periodnog sustava elemenata poznato je da je atomski broj Z , tj. ukupni broj elektrona, navedenih elemenata $Z(Rb) = 37$, dok je $Z(Cs) = 55$. Maseni broj M , odnosno broj nukleona određenog elementa, za korištene atome iznosi $M(Rb) = 85$ i $M(Cs) = 133$. Nadalje, rubidij se nalazi u petoj periodi periodnog sustava elemenata, što znači da posjeduje pet

ljusaka, dok se cezij nalazi jednu periodu niže od rubidija, dakle je u šestoj periodu, te time elektroni koje posjeduje popunjavaju ukupno šest ljusaka.

1.2.2. Spektri alkalijskih metala

Razmatrajući spektre, odnosno spektralne linije koje nastaju prilikom prijelaza elektrona između energijskih nivoa (ili, gledano sa stajališta uvriježenog ustrojstva atoma, između ljuski/staza koje zauzimaju), općenito što se tiče elemenata s većim brojem elektrona primjećuje se da su za optičke spektre zaslužni elektroni vanjskih staza. S druge strane, upravo prijelazi elektrona na unutrašnjim stazama proizvode spektralne linije manjih valnih duljina (dakle viših frekvencija, što je u suglasnosti s činjenicom da su unutrašnji energijski nivoi na višoj energiji), te se time nalaze izvan područja vidljivog zračenja i pripadaju ultraljubičastom i röntgenskom dijelu elektromagnetskog zračenja. Nadalje, dobivaju se ekscitacijama elemenata sa složenijom strukturom elektronskog omotača, dakle elemenata većih rednih brojeva (atomske i masene brojeve Z i M , koji su redom odgovorni za broj elektrona, odnosno nukleona, osnovnog stanja atoma pojedinog elementa).

Navedeno je korisno napomenuti kao teorijski podsjetnik, budući da su u ovom radu razmatrani upravo ultraljubičasto zračenje u kombinaciji s alkalijskim metalima, koji prema svojim atomskim brojevima spadaju upravo u spomenutu skupinu elemenata sa većim brojem elektrona. Također, promatrajući kasnije dobivene rezultate mjerenja, prema dobivenim apsorpcijskim linijama rubidija i cezija podvrgnutih pozadinskom zračenju valnih duljina u UV dijelu spektra, bit će očito da dobivene apsorpcijske linije predstavljaju prijelaze između nivoa u atomima rubidija i cezija, za koje se s obzirom na njihovu dosta složenu strukturu, može reći da već u neku ruku odgovaraju unutrašnjim stazama navedenih atoma, kao što je i predviđeno teorijom.

Kao što je već poznato, atomi alkalijskih metala imaju jedan valentni elektron u vanjskoj ns orbitali, gdje je $n = 2, 3, 4, 5, 6$, za atome Li , Na , K , Rb i Cs . Ako se promatraju samo orbitalne promjene vanjskog elektrona, za očekivati je ponašanje slično vodikovu atomu. Međutim, dok vodikov atom u svojem spektru ima samo jednu seriju linija, tzv. *Balmerovu seriju*, u vidljivom dijelu spektra alkalijski metali pokazuju najmanje tri serije

linija, pa prema tome razlikujemo *glavnu* seriju linija (engl. *principal*) koja se opaža prilikom apsorpcije kroz alkalijsku paru, te *oštru* (engl. *sharp*) i *difuznu* (engl. *diffuse*) seriju linija, koje su karakteristične po svom specifičnom izgledu u spektru. U nekim slučajevima se može opaziti i četvrta, *fundamentalna* serija linija (engl. *fundamental*).

Karakterizacija spektra odnosno atomskih prijelaza usko je vezana uz dijagrame energijskih stanja, tzv. *Grotrianove* ili *Term dijagrame*, (Slike 1.1., 1.2., 1.3.). Najniži energijski nivo Grotrianova dijagrama odgovara konfiguraciji osnovnog stanja atoma. U slučaju rubidija radi se o konfiguraciji $1s^2 2s^2 2p^6 3s^2 3p^6 3d^{10} 4s^2 4p^6 5s^1$, a u slučaju cezija o $1s^2 2s^2 2p^6 3s^2 3p^6 3d^{10} 4s^2 4p^6 4d^{10} 5s^2 5p^6 6s^1$ konfiguraciji. Viši energijski nivoi označavaju se prema orbitali u koju je valentni elektron pobuđenjem promoviran.

Pri svakoj je analizi važno u obzir uzeti izborna pravila koja određuju prijelaz elektrona iz niže u višu orbitalu i obrnuto, te su spomenuta pravila definirana sa:

(1) moguće su sve promjene glavnog kvantnog broja

$$\Delta n = 0, \pm 1, \pm 2, \pm 3, \dots$$

(2) orbitalni kvantni broj može se mijenjati samo za jedan

$$\Delta \ell = \pm 1$$

Ovdje navedena izborna pravila upućuju na četiri serije spektralnih linija spomenute ranije u tekstu.

Spin-orbit interakcija razdvaja dvije komponente od 2P , 2D , 2F , ... termova, pri čemu se taj efekt smanjuje s vrijednostima ℓ i n , a povećava s atomskim brojem.

Uobičajeno je označavati stanja za dane vrijednosti n kao $n^2P_{1/2}$ i $n^2P_{3/2}$. Glavna serija linija u spektru neke alkalije sastavljena je od parova prijelaza $^2S_{1/2} - ^2P_{1/2}$, te $^2S_{1/2} - ^2P_{3/2}$. Navedeni parovi poznati su kao jednostavni dubleti. Često se prvi član u seriji linija označava kao $D1$, a drugi kao $D2$.

1.2.3. *Grotrian dijagrami* alkalijskih metala značajnih za ovaj eksperiment i *Edlénova jednadžba*

Uzimajući u obzir navedene činjenice o spektrima alkalijskih metala, izrađeni su *Grotrianovi dijagrami* (tzv. "*Term dijagrami*") rubidija, cezija i francija, te su istim redom kao najniži energijski nivoi uzeti $5s$, $6s$ i $7s$. Valne duljine odabranih prijelaza izračunate su za slučaj kada je medij u kojem se vrši eksperiment zrak (λ_{zrak}), a njihove su vrijednosti (u nm) dobivene iz razlike energija dvaju promatranih nivoa koristeći *Edlénovu jednadžbu* koja služi za računanje vrijednosti valnih duljina prijelaza u zraku. Zbog iznimne preciznosti vezane uz uvjete u kojima se koristi, *Edlénova jednadžba* obično je podložna mnogim modifikacijama, tako da je od izuzetne važnosti prilagoditi samu jednadžbu danim uvjetima. Stoga je originalni oblik jednadžbe sveden na aproksimaciju specifičnu uvjetima koji vladaju u ovom eksperimentu, dakle relaciju modificiranu specijalno prema uvjetima kakovi su prisutni u ovom eksperimentu, te se dana modifikacija zove *Sellmeierova jednadžba* i glasi:

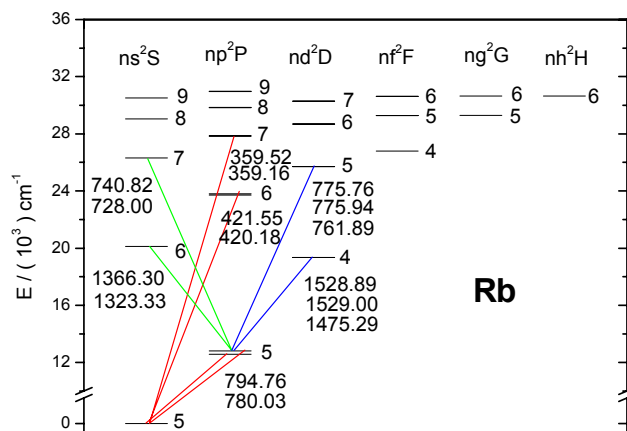
$$\lambda(\sigma) = \left[\sigma \cdot \left(1 + 6432,8 \cdot 10^{-8} + \frac{2949810}{146 \cdot 10^8 - \sigma^2} + \frac{25540}{41 \cdot 10^8 - \sigma^2} \right) \right]^{-1} \cdot 10^8 \quad (1)$$

gdje je $\sigma(\lambda)$ jednaka energiji prijelaza između dva energijska nivoa u cm^{-1} , a λ je valna duljina linije u zraku, dana u nm , koja ukazuje na pripadni prijelaz na spektralnom dijagramu.

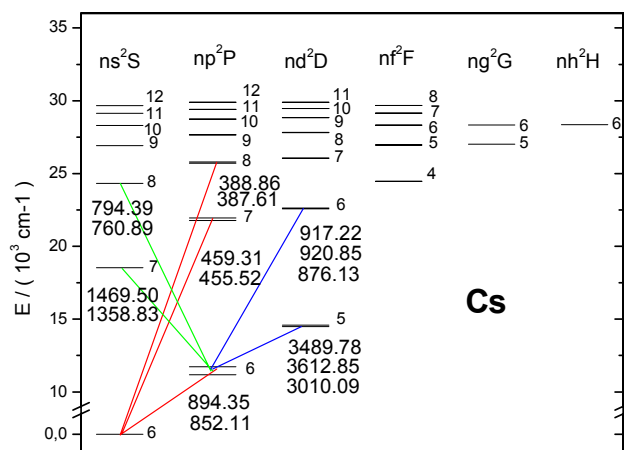
Razmatrajući *Term dijagrame* elemenata, također treba imati na umu ranije navedeno izborno pravilo koje određuje finu strukturu spektra atoma i opisano je relacijom

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

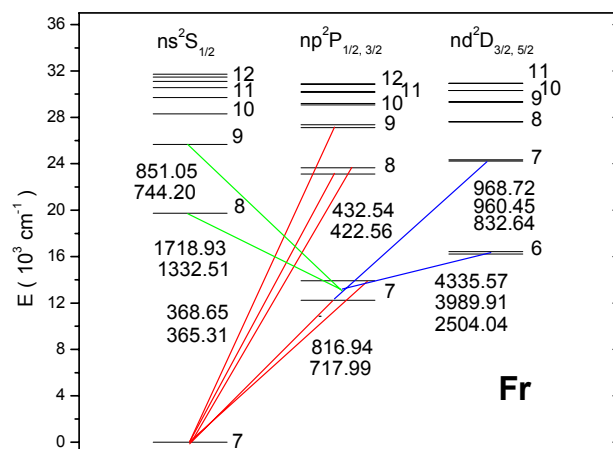
koja dakle upućuje na činjenicu da je razlika između kvantnih brojeva J dvaju energijskih nivoa između kojih treba doći do prijelaza unaprijed definirana gornjim ograničenjem, tako da neki od prijelaza nisu mogući. Osim što ovo pravilo definira koji su prijelazi među podnivoima dozvoljeni a koji nisu, poznato je da stanje sa najnižom vrijednošću J ima i najnižu energiju.



Slika 1.1. Term dijagram rubidija. Prikazane valne duljine prijelaza izračunate su za zrak te su dane u nm.



Slika 1.2. Term dijagram cezija. Prikazane valne duljine prijelaza izračunate su za zrak te su dane u nm.



Slika 1.3. Term dijagram francija. Prikazane valne duljine prijelaza izračunate su za zrak te su dane u nm.

1.3. Svjetleće diode

Svjetleća dioda (engl. "*LED - light-emitting diode*") je poluvodička dioda koja emitira inkohherentno svjetlo uskog spektralnog područja kada je njezin p-n spoj električki propusno polariziran (engl. "*forward bias*"). Ovaj je efekt poznat kao jedan od oblika elektroluminescencije. LED je uglavnom izvor male emisijske površine, često opremljen dodatnim optičkim elementima koji se dodaju čipu kako bi se moglo utjecati na oblik slike koju stvara zračenje. Veliku ulogu u njihovoj uporabi ima istaknuto svojstvo svjetlećih dioda da mogu zračiti svjetlost različitih boja, dakle moguće je pri njihovoj proizvodnji utjecati na to u kojem će dijelu spektra (vidljivog i nevidljivog ljudskom oku) zračiti odabrana dioda. Pri tome boja emitirane svjetlosti ovisi o kompoziciji i stanju poluvodičkog materijala korištenog za izradu same diode, te može biti u infracrvenom, vidljivom, blisko - ultraljubičastom te ultraljubičastom dijelu spektra.

1.3.1. Osnovne značajke principa rada svjetlećih dioda ovisno o njihovoj strukturi

Jednostavno fizikalno objašnjenje rada svjetleće diode počinje, kao i kod bilo koje druge diode, činjenicom da se LED sastoji od čipa načinjenog od poluvodičkog materijala koji je impregniran, odnosno dopiran određenim nečistoćama kako bi nastao p-n spoj. Sličnost sa ostalim diodama je ta da struja neometano teče od p-strane, ili anode, prema n-strani, ili katodi, dok je razlika u tome da je tok u suprotnom smjeru kod svjetleće diode zabranjen. Time nosioci naboja, elektroni i šupljine, stižu do spoja sa elektrodama koje imaju različite vrijednosti potencijala. Konačno, kada elektron naiđe na šupljinu, on time pada na nižu energijsku razinu, te pri tome uzrokuje oslobađanje energije u formi fotona.

Kako je već napomenuto, valna duljina emitirane svjetlosti, a time i njezina boja, ovisi o vrsti materijala korištenih za izradu p-n spoja, tj. preciznije rečeno, valna duljina ovisi o energiji odnosno prirodi energijskog procijepa (engl. "band gap") materijala koji čine p-n spoj. Slijedi da se za izradu LED koriste materijali koji imaju direktan energijski procijep, s vrijednostima energija koje odgovaraju blisko-IR, vidljivom, ili blisko-UV svjetlu. S druge strane, kod materijala kojima je svojstven indirektan energijski procijep, što se npr. susreće kod silicijevih ili germanijevih dioda, elektroni i šupljine se rekombiniraju tako da ne dolazi do radijativne tranzicije (engl. "non-radiative transition") među energijskim nivoima, što stoga ne rezultira produkcijom optičke emisije, pa se materijali sa indirektnim energijskim procijepom stoga ne koriste za izradu svjetlećih dioda.

1.3.2. *InGaN* (Indij-Galij-Nitrid) svjetleće diode

Indij-Galij-Nitrid (*InGaN*, $In_xGa_{1-x}N$) je poluvodički materijal koji se sastoji od mješavine galij-nitrida (*GaN*) i indij-nitrida (*InN*). Samim time dakle spada u značajnu skupinu materijala koji sadrže, uporabno gledano, kao svoj najvažniji dio nitride III.-V. grupe elemenata. Preciznije rečeno, to je poluvodič trećeg reda grupe III/V s direktnim energijskim procijepom (engl. "Ternary group III/group V direct bandgap semiconductor"), za razliku od poluvodiča kod kojih je energijski procijep indirektan. Vezano uz spomenuti energetski procijep, jedna od najvažnijih osobina promatranog *InGaN* poluvodiča jest upravo činjenica

da se taj njegov energetski procijep može po volji fino podesiti promjenom količine indija u InGaN materijalu. Sam omjer indija i galija, In/Ga, uobičajeno iznosi između 0.02/0.98 i 0.3/0.7.

Upravo je InGaN sloj koji emitira svjetlost kod čestih, plavih i zelenih LED, te se često proizvodi tako da se potakne njegov rast na GaN buffer-u, na nekoj prozirnoj tvari, kao što su safir ili silicijev karbid (silicon carbide, SiC). InGaN posjeduje visoki toplinski kapacitet, dok je njegova osjetljivost na ionizirajuće zračenje niska, kao uostalom i kod ostalih nitrida III grupe, što ga, između ostalog, čini potencijalno prikladnim materijalom za izradu solarnih ploča za satelite.

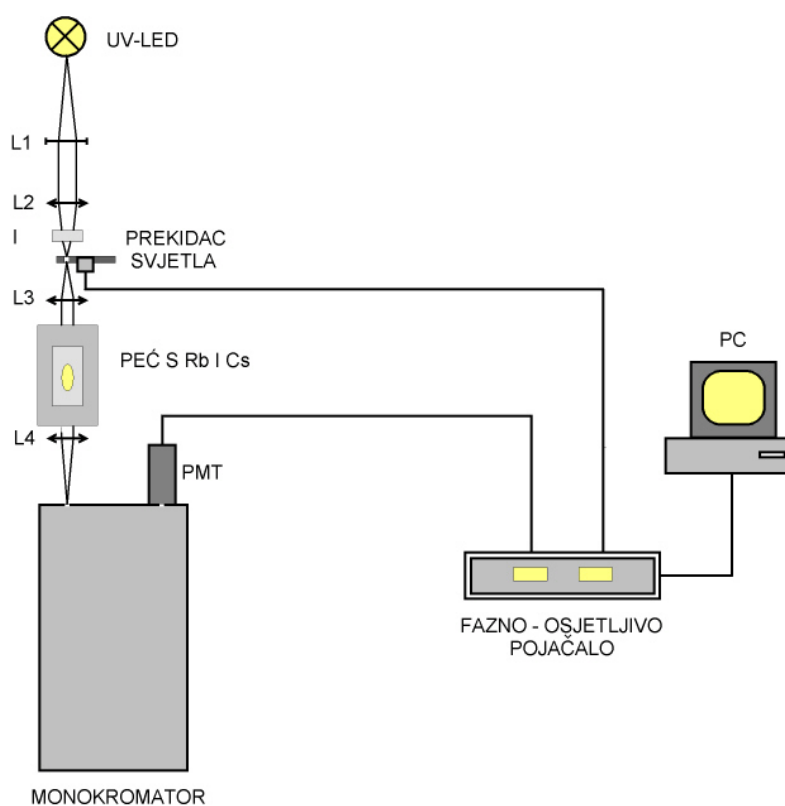
1.3.3. Osvrt na karakterističnost svjetlećih dioda korištenih u ovom eksperimentu

Svjetleće diode korištene u ovom eksperimentu kao izvor pozadinskog zračenja po svom se ustrojstvu baziraju upravo na InGaN poluvodičkom materijalu, i time su specifične po tome što zrače u ultraljubičastom dijelu spektra. Samim su time i po svojoj izvedbi, ustrojstvu, te načinu proizvodnje drugačije od ostalih svjetlećih dioda koje se mogu naći na tržištu. Posebnim metodama proizvodnje svjetlećih dioda u vidljivom dijelu spektra već se bavio priznati stručnjak Shuji Nakamura, bivši zaposlenik japanske tvrtke *Nichia*, te je pri proizvodnji pogotovo vođeno računa o isplativosti metoda proizvodnje te njihovim produktima, kako bi time bili pristupačnim za široko, te vrlo zahtjevno, tržište. Upravo je Nakamura bio taj koji je osmislio strukturu i metodu proizvodnje, te time i samo postojanje, prvih LED dioda koje su imale sposobnost zračenja u ultraljubičastom dijelu spektra. Njegovo je otkriće imalo golem utjecaj na nebrojena područja u kojima je uporaba UV LED dioda postala od suštinske važnosti, te je time *Nichia* postala jedan od vodećih proizvođača svjetlećih dioda u svijetu uopće, a posebna se važnost pridaje iznalaženju načina proizvodnje LED dioda sa sve manjom i manjom valnom duljinom, čiji se temelji nalaze u Nakamurinu prvobitnom otkriću metode dobivanja UV svjetleće diode.

2. EKSPERIMENTALNI POSTAV I OPIS METODE MJERENJA

2.1. Eksperimentalni postav

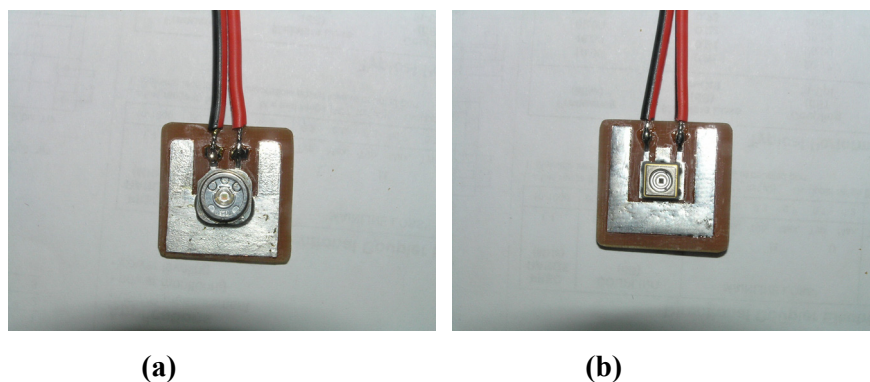
Shema eksperimentalnog postava nalazi se na **Slici 2.1.**:



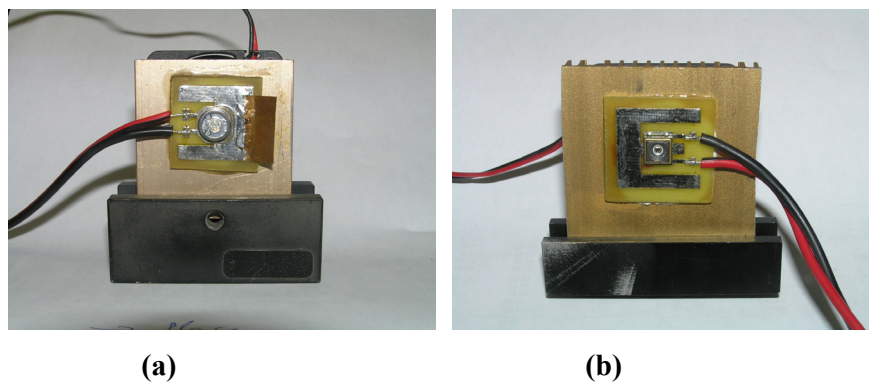
Slika 2.1. Shema eksperimentalnog postava za apsorpciju, i detekciju, UV zračenja proizvedenog LED diodom pri prolasku kroz paru mješavine atoma *Rb* i *Cs* na visokim temperaturama.

Eksperimentalni postav, kako je prikazano na **Slici 2.1.** (Shema eksperimentalnog postava), sastoji se redom od sljedećih elemenata:

LED – LED proizvodnje "*NICHIA*" koje služe kao izvori pozadinskog zračenja te daju zračenje u UV dijelu spektra - u zasebnim mjerenjima korištene su dvije svijetleće UV-diode čije su vrijednosti valne duljine maksimuma različite, i iznose 365 i 380 nm, što znači da su im maksimumi zračenja pomaknuti za 15 nm. Važno je naglasiti da se tokom trajanja eksperimenta, odnosno dok je potrebno da proizvode zračenje, diode jako zagrijevaju te je stoga vrlo važno osigurati što bolje konstantno hlađenje dioda kako ne bi pregorijele. Sama je dioda specijalnim ljepilom zalijepljena na podlogu i povezana s metalnim nastavcima koji se također nalaze na istoj podlozi, a sve u svrhu što boljeg hlađenja diode, tj. odvođenja topline s nje preko spomenutih dodanih metalnih nastavaka, specijalnog vodljivog ljepila te same podloge (izgled opisane podloge s diodom u sredini i metalnim nastavcima može se dobro vidjeti na fotografijama (**Slika 2.2.**) niže, dok se fotografije samih izvora zračenja nalaze na **Slikama 3.1.-3.4.** smještenim u poglavlje s rezultatima eksperimenta). Svaka od dioda, zajedno s opisanom podlogom, pričvršćena je na prilagođeno kućište, na čijoj se pozadini nalazi ventilator koji dodatno osigurava stalno hlađenje dioda tokom trajanja eksperimenta. Stoga treba napomenuti da korišteno napajanje (V1) ima zasebne ulaze za napajanje diode i napajanje ventilatora koji ju hladi. Uzimajući u obzir redoslijed izvođenja mjerenja, korištene su diode obilježene oznakama *LED1* (ili LED380nm) za onu čija valna duljina maksimuma (vrha) profila spektralne linije koju daje zračenje iznosi 380 nm, a sa *LED2* (ili LED365nm) nadalje za onu sa $\lambda_{\max} = 365$ nm.



Slika 2.2. Fotografije UV-LED korištenih kao izvora zračenja u ovom eksperimentu - **(a)** LED380nm, **(b)** LED365nm.



Slika 2.3. Fotografije UV-LED korištenih kao izvora zračenja u ovom eksperimentu, pričvršćenih na za njih specijalno konstruirane stalke - **(a)** LED380nm, **(b)** LED365nm.

L_1 – leća za proizvodnju paralelnog snopa zračenja duž cijele putanje – osigurava jednaki izgled slike izvora (LED) duž putanje snopa zračenja koje daje izvor (UV-LED). Važno je naglasiti da su sve leće i prozirne površine korištene u ovom eksperimentalnom postavu napravljene od kvarca jer on, za razliku od mnogo učestalije korištenog stakla, propušta UV-zračenje.

L_2 – konvergentna leća – služi za fokusiranje nadolazećeg paralelnog (iz L_1) snopa svjetlosti izvora, te ga takovog dalje prosljeđuje prema iris (I).

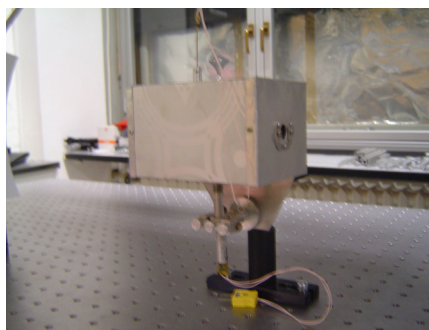
I – "iris" – optički element kojim se regulira, po volji, kolika će biti količina zračenja, tj. širina snopa, ovisno o poprečnom presijeku kružne pukotine irisa. Ovim se optičkim elementom osigurava da snop zračenja bude što oštiji, te napose to da prilikom korištenja različitih izvora zračenja, a ako je na iris u kružna pukotina fiksne veličine u slučaju svakog od izvora, za svaki izvor površina kroz koju se propušta zračenje izvora uvijek bude jednaka, a time je i zračenje samog izvora uvijek jednako ograničeno za različite izvore.

C – prekidač svjetla (engl. "chopper") – osigurava konstantnu vrijednost faze EM-zračenja izvora. Na taj način se osigurava da detektor zračenja, tj. fazno osjetljivo pojačalo spojeno na detektor te na prekidač svjetlosti, kada se na njemu namjesti da uzima u obzir samo zračenje one faze koja je jednaka fazi zračenja izvora koju smo fiksirali chopperom, maksimalno detektira zračenje izvora, odnosno ignorira sve ostalo sporadično zračenje koje pristiže na njega iz različitih izvora zračenja u okolini detektora jer je namješten tako da detektira samo

zračenje odabrane faze, tj. one kakovu ima izvor, a ostala sporadična zračenja nemaju točno određenu fazu. Time se osigurava da je detektirano zračenje izvora maksimalno.

L₃ – konvergentna leća – služi za fokusiranje nadolazećeg snopa svjetlosti izvora koje je prethodno prošlo kroz "chopper", te ga dalje prosljeđuje na otvor na peći kroz koji sada takav dobro izoštrani snop konačno upada na bočni prozor safirne kivete smještene unutar peći.

P - peć u kojoj je smještena safirna kiveta s promatranim uzorkom *Rb* i *Cs* – specijalno konstruirana peć (**Slika 2.4.**) služi za zagrijavanje promatranog uzorka rubidija i cezija, koji se nalaze izolirani u safirnoj kiveti (**Slika 2.5.**, **Slika 2.10.**) smještenoj unutar peći. Sama kiveta ima u ovom eksperimentu višestruku primjenu, odnosno osim što služi kao spremnik za izolaciju ispitivanog uzorka, njeni specifični oblik i građa također igraju iznimno važnu ulogu u samom procesu prolaska snopa zračenja izvora kroz uzorak, te time, gledano u mehaničkom smislu, osiguravaju pojavu u konačnici anticipirane apsorpcije upadnog zračenja od strane promatranog uzorka. Detaljniji opis mehanizma procesa zagrijavanja i praćenja temperature uzorka unutar same kivete te, naravno, peći, nalazi se u daljnjem tekstu, budući da je sam način zagrijavanja uzorka vrlo osjetljiv, kako i fizikalno zanimljiv proces.



Slika 2.4. Fotografija peći specijalno konstruirane u svrhu izvođenja ovog eksperimenta. Unutar peći nalazi se safirna kiveta, koja služi kao spremnik za rubidij i cezij koji su korišteni kao uzorci za apsorpciju pozadinskog zračenja proizvedenog od strane UV-LED diode.

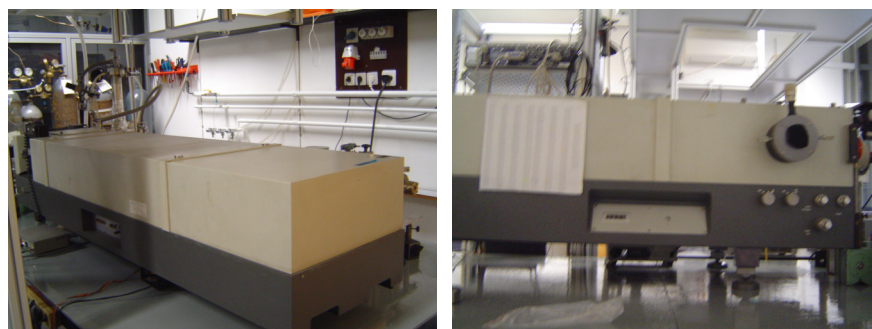


Slika 2.5. Fotografija safirne kivete koja služi kao specijalni spremnik za izolaciju uzoraka *Rb* i *Cs*, korištenih u ovom eksperimentu. Kiveta je napravljena od safira jer ovaj kristal može podnijeti dosta visoku temperaturu, kakva je potrebna da bi se mogao detektirati UV dio spektra rubidija i cezija.

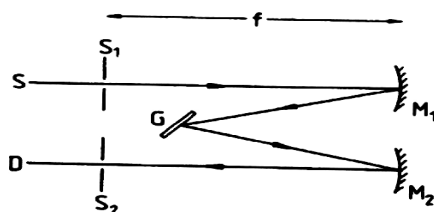
L₄ – cilindrična kvarcna leća – služi za sužavanje snopa zračenja koji izlazi kroz otvor na peći kako bi, tako sužen, što bolje bio namješten za prolaz kroz pukotinu monokromatora, koja je također vertikalno izdužena i vrlo uska, čime se osigurava daljnje željeno fizikalno ponašanje (lom svjetlosti na pukotini, itd.). Cilindrični oblik leće osigurava da je upadni snop ne samo sužen, već je istovremeno i jačina snopa također svedena na veću vrijednost, budući da je ovom lećom prije kružno oblikovana poprečna površina snopa sada svedena na puno manju, vertikalno izduženu površinu, dok je pri tome svo zračenje sačuvano, pa time ono automatski ima veći intenzitet.

M – monokromator – koristi se za spektralnu analizu zračenja po valnim duljinama. U ovom eksperimentu korišten je "*Jobin-Yvon THR*" monokromator (**Slika 2.6.**) s fokalnom duljinom 1.5 m, koji u svojstvu disperzivnog elementa ima holografsku rešetku s 1200 zareza po mm, s primjenom u intervalu valnih duljina od 200 do 1300 nm. Najveća spektralna razlučivost monokromatora iznosi 0.041 nm za pukotinu od 50 μm . Korišteni monokromator radi na principu *Czerny-Turner* konfiguracije (**Slika 2.7.**): upadna zraka iz izvora označenog S prolazi kroz apsorpcijsku ćeliju i ulazi kroz pukotinu S_1 , koja je svojom žarišnom daljinom udaljena od konkavnog zrcala M_1 . Ono je podešeno tako da reflektira zračenje, sada paralelnu zraku, na rešetku G, koja zatim zraku raspršuje i reflektira na drugo zrcalo M_2 . To je zrcalo također konkavno te stoga fokusira upadno raspršeno zračenje na izlaznu pukotinu S_2 , te ga usmjerava na detektor. Sam spektar se skenira jednostavno polaganim rotiranjem rešetke, tako da bivaju uhvaćene sve unaprijed odabrane valne duljine. Naime, može se odrediti po volji

udaljenost između susjednih točaka (koje su, naravno, uvijek sve jednako udaljene), tj. vrijednosti valnih duljina, uz koje će se očitavati korespondentna jačina zračenja na detektoru koji se nalazi netom nakon monokromatora, kako bi ta dva uređaja u paru u stvari u konačnici dali tražene rezultate mjerenja, a to su dakle parovi točaka valnih duljina i pripadnih im vrijednosti intenziteta detektiranog zračenja.

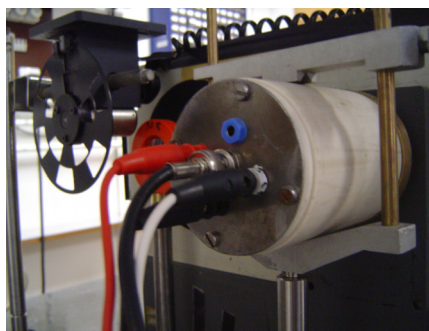


Slika 2.6. Fotografije "Jobin-Yvon THR" monokromatora korištenog u ovom eksperimentu.



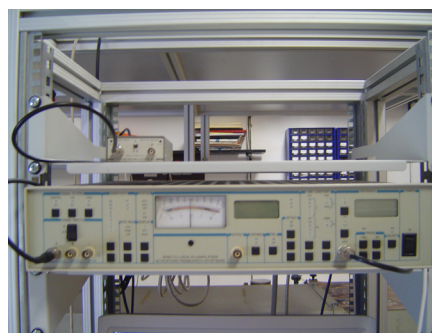
Slika 2.7. Shema Czerny-Turner konfiguracije na čijem principu radi korišteni monokromator.

PMT – fotomultiplikator – detektor zračenja, koji radi na principu pojačanja ulaznog signala (upadnog snopa detektiranog zračenja). Kao takav, sastoji se od fotokatode koja je presvučena materijalom malog izlaznog rada, iz koje pristigli fotoni izbijaju elektrone. Glavna funkcija ovog instrumenta i time njegove strukture jest da se izbijeni elektroni nadalje ubrzavaju te multipliciraju na nizu dinoda, pa se na izlazu iz njega dobiva pojačani signal. U ovom eksperimentu korišten je "Hamamatsu Module H6780-02" fotomultiplikator, koji se nalazi unutar specijalno konstruiranog cilindra u funkciji njegovog kućišta, što je posebno smješten na samom izlaznom otvoru monokromatora, kako ne bi došlo do eventualnog gubitka te šumom onečišćenja netom izmjerenog, izlaznog signala.



Slika 2.8. Fotografija cilindričnog kućišta s *"Hamamatsu Module H6780-02"* fotomultiplikatorom u svojoj unutrašnjosti, korištenih u ovom eksperimentu.

PSA – fazno osjetljivo pojačalo – fazno osjetljivo uskopojasno pojačalo (engl. "Lock-in amplifier") ima važnu funkciju u cijelom eksperimentalnom postavu time što omogućuje pojačanje signala samo određene, unaprijed odabrane frekvencije. Do toga se dolazi na taj način da je fazno osjetljivo pojačalo povezano sa već spomenutim prekidačem svjetla (engl. "Chopper") kojeg se podesi na određenu, odabranu frekvenciju, tako da lock-in "vidi" samo onu frekvenciju koja je modulirana sa frekvencijom choppera. Time, kao što je već navedeno pri opisu samog choppera, se osigurava da se uzima u obzir samo zračenje one faze koja je jednaka fazi zračenja izvora koju smo fiksirali chopperom, te se stoga i maksimalno detektira zračenje samog izvora jer su tako kod detekcije izuzeti svi ostali izvori zračenja u prostoriji, koji naravno nisu od interesa za dani eksperiment već tvore šum koji korištenjem ove tehnike biva zanemariv, odnosno sam je mjereni signal tako pojačan. U ovom su eksperimentu korišteni usko pojasno pojačalo *"Stanford Research Systems SR510"*, povezano s prekidačem svjetla *"Stanford Research Systems SR540 Chopper"* (**Slika 2.9.**).



(a)



(b)

Slika 2.9. Fotografije usko-pojasnog pojačala "*Stanford Research Systems SR510*" **(a)**, povezanog s prekidačem svjetla "*Stanford Research Systems SR540 Chopper*" **(b)**, korištenih u ovom eksperimentu.

PC – osobno računalo – na kraju se dobiveni signal preko analogno-digitalnog pretvarača sprema na disk osobnog računala. Naime, računalo je direktno spojeno na fazno osjetljivo pojačalo tako da se tokom vršenja eksperimenta podaci zaprimljeni na detektoru automatski prikazuju na ekranu računala i to već na taj način da odmah imaju grafički izgled, dakle postepeno se crta graf ovisnosti na detektoru izmjerenog intenziteta zračenja izvora koje prolazi kroz uzorak o pripadnim vrijednostima valnih duljina za koje je taj intenzitet izmjeren, a čiji se interval i gustoća susjednih točaka određuju prethodno prema teorijskom očekivanju na samom monokromatoru. Ovdje je važno naglasiti da samu pretvorbu pristiglih rezultata mjerenja na računalo iz čistih brojevnih vrijednosti u pregledan i za kasniju obradu podataka vrlo praktičan grafički prikaz omogućuje specijalan kompjuterski program "*MathLab*", koji, uz to što pristigle rezultate mjerenja prebacuje u grafički prikaz, prvenstveno služi i za samo pokretanje mjerenja, tj. upravlja cijelom procedurom rada samog detektora i fazno osjetljivog pojačala, te služi za odabir određenih varijabli i konstanti koje je potrebno definirati tokom samog mjerenja kako bi se u stvari odredile glavne značajke koje utječu na sam način izvođenja mjerenja. Npr. to su određivanje konstantnog razmaka susjednih točaka valnih duljina pri mjerenju pripadnih im vrijednosti detektiranog intenziteta, dakle određivanje gustoće točaka samog mjerenja; zatim određivanje jedinica u kojima će se izraziti izmjerene valne duljine- naime u slučaju korištenog monokromatora postoje dvije vrste jedinica dostupnih za izražavanje valnih duljina, i to su jedinice specifične baš ovom uređaju (M) te uobičajene jedinice u kojima se izražavaju valne duljine ovog područja elektromagnetskog spektra, a to su nanometri. Korištenjem jednostavne jednadžbe može se provesti pretvorba monokromatorskih mjernih jedinica M u nm, dok se pomoću spomenutog kompjuterskog programa jednostavno izaberu mjerene jedinice za λ koje se žele koristiti. Također, program služi i za pohranu izmjerenih podataka (izmjereni podatci prvenstveno se za svako zasebno mjerenje za različiti temperaturni interval pohranjuju u .dat datoteke, te se kao takvi prebacuju u kompjuterski program *Origin* koji služi za daljnju, složeniju obradu dobivenih rezultata.

Kao dodatni dijelovi ovog eksperimentalnog postava mogu se navesti zasebni, donekle specifični, izvori napajanja za određene elemente korištene u ovom postavu, a to su:

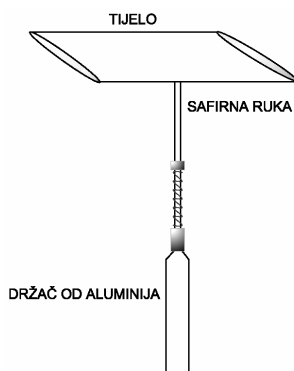
V_1 – izvor napajanja za LED i ventilator – izvor napajanja sa zasebnim ulazom za LED i zasebnim ulazom za pridruženi joj ventilator koji služi za konstantno hlađenje LED, specijalno izrađenu termo-konduktivnu bazu na kojoj se LED nalazi, kao i cijelo kućište za LED.

V_2 – izvor napajanja za peć – unaprijed odabranom promjenom napona, ovim se izvorom napajanja za peć može po želji kontrolirati promjena temperature peći, te brzina kojom se ta temperatura mijenja (budući da je ovaj uređaj napravljen sa ciljem da promjena temperature ovisi o promjeni napona).

2.2. Opis metode mjerenja i komentar pritom nastalih zapažanja

UV-LED proizvodnje "*NICHIA*" imaju spektar prikazan na **Slikama 3.1.,3.2.,3.3.** Radi se o dvije svjetleće diode kojima je maksimum zračenja međusobno pomaknut za 15 nm. Svaka od svjetlećih dioda upotrijebljena je kao pozadinsko zračenje za dobivanje apsorpcijskog spektra atoma cezija i rubidija. Do apsorpcije UV zračenja od strane atoma *Rb* i *Cs* dolazi prilikom prolaska upadnog snopa zračenja izvora kroz safirnu kivetu u kojoj se navedeni uzorci nalaze, te je smještena unutar peći koja služi za zagrijavanje same kivete a time i promatranih uzoraka.

Važno je naglasiti da sam položaj safirne kivete (**Slika 2.5., Slika 2.10.**) u odnosu na upadni smjer snopa, a time i njen smještaj u peći (safirna cijev kivete paralelna je sa horizontalnom osi peći), ima veliki utjecaj na učinak koji sam materijal od kojeg je kiveta proizvedena ima na transmitirano zračenje, budući da je materijal od kojeg je kiveta načinjena safir, dakle kristal, i time je automatski potrebno paziti na neizbježan učinak koji kristal ima na upadno (nepolarizirano) zračenje, a to je upravo njegova polarizacija. Naime, kako bi se izbjegla polarizacija transmitiranog zračenja pri upadu ulaznog snopa zračenja na površinu bočnih prozora kivete, oni se nalaze pod *Brewsterovim kutem* u odnosu na safirnu cijev, te je pri tome os safira orijentirana tako da se izbjegne refleksija transmitiranog zračenja.



Slika 2.10. Shema safirne kivete korištene u ovom eksperimentu. Specijalnim uređenjem postava osigurano je važno svojstvo koje se tiče raspodjele temperature unutar kivete, a time i samog uzorka u njoj sadržanog, odnosno agregatnog stanja u kojem se uzorak nalazi. Naime, uređeno je da je temperatura na dnu kivete (T_{K1}) uvijek i obavezno niža od temperature na njenom vrhu (T_{K2}), što automatski utječe na raspored dvaju različitih agregatnih stanja uzorka duž vertikalne osi kivete. Kao što je poznato, rubidij i cezij na sobnoj temperaturi nalaze se u krutom stanju, ali na višim temperaturama, koje nas zbog tog njihovog svojstva i zanimaju u ovom eksperimentu, oni prelaze u tekuće stanje, te je time omogućeno da unutar kivete, upravo zbog spomenutog rasporeda temperature duž njene vertikalne osi, oni pređu u stanje pare koja se nalazi iznad kondenzata uzoraka na dnu kivete. Na taj je način dakle uređeno da pri vrhu kivete, na putu prolaska snopa pozadinskog zračenja, uzorak uvijek u obliku pare, dok je na njenom dnu uzorak u tekućem stanju te je upravo zbog niže temperature osigurano da se kondenzacija uzorka događa na dnu kivete, pa time nije u mogućnosti predstavljati smetnju prolasku ispitivanog snopa zračenja eventualnim produktima kondenzacije u gornjem dijelu.

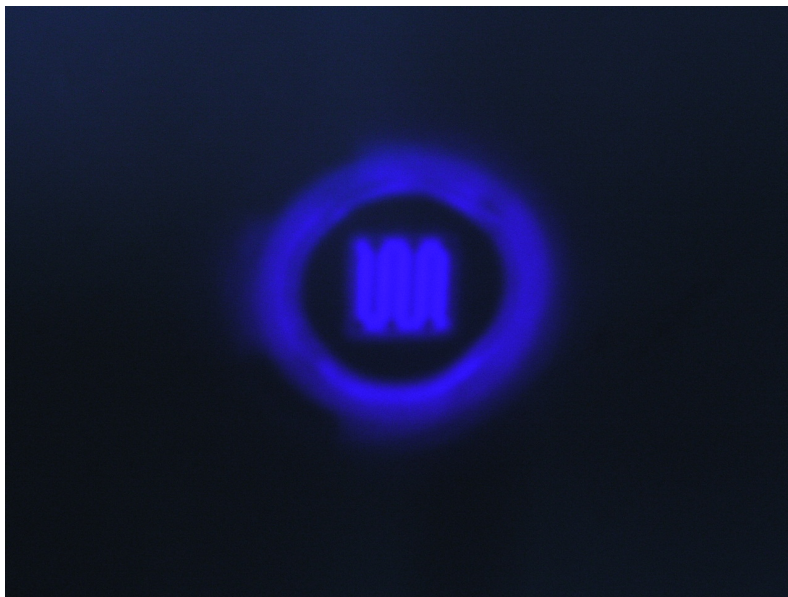
Na sobnoj temperaturi *Rb* i *Cs* nalaze se u krutom stanju te su time smješteni u donji dio kivete tj. njeno tijelo koje ima duljinu oko 0,03 mm, te je to stoga ujedno i duljina alkalijskog uzorka. Kada promatrane uzorke zagrijavamo, oni pri dovoljno visokoj temperaturi prelaze iz krutog u tekuće stanje, te time iznad tekućeg uzorka dobivamo paru atoma *Rb* i *Cs* (*RbI* i *CsI*, *I* je oznaka da se atom nalazi u svom osnovnom stanju – nije ioniziran) koja se nalazi u gornjem dijelu, odnosno cijevi kivete (duljina bočne safirne ruke kivete je oko 0,3 mm). Uzevši navedeno u obzir, bitno je napomenuti da je upravo zbog afiniteta tvari koja se nalazi u obliku pare da kondenzira pri vrhu izoliranog spremnika u kojem je smještena (u uobičajenim uvjetima), načinjena posebna prilagodba što se tiče

raspodijele temperature duž vertikalne osi kivete, a sve u cilju da se dobiju precizniji rezultati mjerenja. Naime, eksperimentalni postav u slučaju same kivete je takav da je posebno namješteno da temperatura pri dnu kivete (T_{K1}) uvijek bude niža od one pri njenom vrhu (T_{K2}), sve u cilju da atomi uzorka koji kondenziraju iz pare natrag u tekuće stanje tokom mjerenja na visokim temperaturama ne bi stvarali kapljice kondenzata u gornjem dijelu kivete, dakle onom kroz koji prolazi snop zračenja, te time ugrozili preciznost rezultata mjerenja, nego se kondenzacija ovime automatski dešava na dnu kivete, gdje se inače i nalaze uzorci kada su u tekućem stanju (tokom vršenja mjerenja, na visokim temperaturama), budući da je uređeno da je temperatura na dnu niža. Kako bi se ove dvije različite temperaturne vrijednosti mogle zabilježiti, za njihovo su mjerenje korištena dva tanka zasebna termočlanka. Uzimajući u obzir navedeno, prilikom svakog zasebnog mjerenja apsorpcijskog spektra, zabilježene su obje temperaturne vrijednosti – ona sa dna (T_{K1} , niža) i ona sa vrha (T_{K2} , viša) kivete, te upravo te dvije vrijednosti daju temperaturni interval za koji je snimljen pripadni mu spektar. U slučaju oba izvora pozadinskog UV zračenja, apsorpcijski su spektri snimani za četiri različita temperaturna intervala ($T_{K1}-T_{K2}$) unutar kivete, uzimajući pri tome u obzir da su za oba izvora zabilježeni rezultati dobiveni mjerenjima izvedenim za jednake, korespondentne, temperaturne intervale, kako bi bila moguća precizna usporedba spektara dobivenih koristeći se dvama različitim izvorima UV pozadinskog zračenja (tzv. LED380nm i LED365nm).

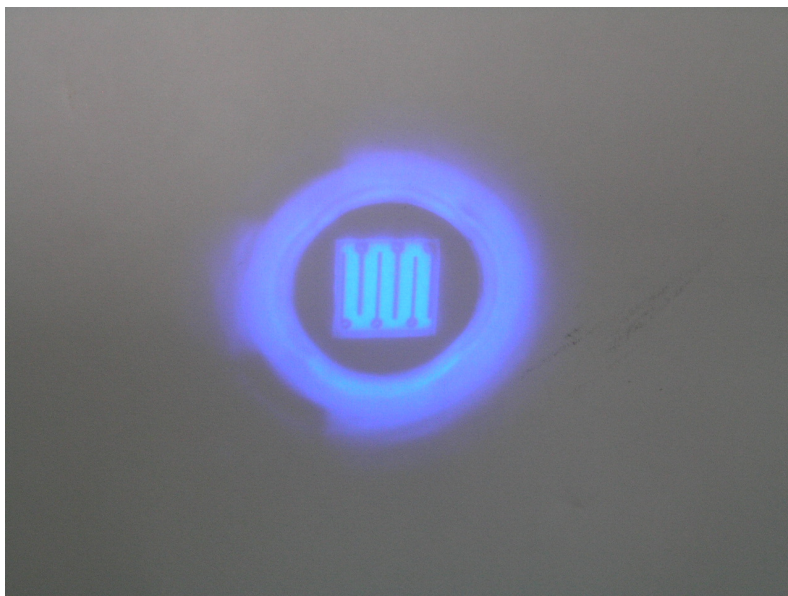
Zabilježena je promjena temperature u intervalu od 20 °C (~sobna temperatura) do 511 °C, te je važno napomenuti da postoji nekoliko poveznica između visoke vrijednosti mjerene temperature i materijala od kojeg je napravljena ovdje korištena kiveta, dakle safira. Naime, već sam safir kao materijal, te specijalno ljepilo korišteno za sastavljanje kivete, nameću ograničenje na maksimalnu moguću mjerenu temperaturu, budući da ne podnose temperaturne vrijednosti veće od navedene maksimalne temperature u ovom eksperimentu. Također, sam način podizanja i spuštanja temperature peći, gdje se promjena temperature kontrolirala proporcionalno naponu dovedenom na peć (uočeno je da maksimalna temperatura od oko 500 °C odgovara naponu od oko 36 V), isto je bio ovisan o materijalu od kojeg je izrađena kiveta, tj. bolje rečeno njegovoj toleranciji na brzinu promjene temperature. Naime, safir ne podnosi dobro brze promjene temperature, i to pogotovo kada je temperatura vrlo visoka, te je sukladno tome trebalo prilikom zagrijavanja i hlađenja peći, kada nisu vršena nikakva mjerenja apsorpcijskih spektara dioda, obratiti posebnu pažnju na ovaj problem kako

ne bi došlo do oštećenja kivete. Stoga je prilikom zagrijavanja peći do maksimalne temperature, temperatura povećavana u tri odvojena koraka za redom, dok je prilikom hlađenja, kada je početno temperatura maksimalne visine, trebalo hlađenje peći vršiti vrlo pažljivo, u koracima od 1 V, jer je kod visoke (150 °C – 500 °C) temperature puno veća osjetljivost safira na promjene temperature nego na nižim temperaturama (20 °C – 150 °C). Može se još napomenuti da je primijećeno da na višim temperaturama temperatura same kivete brže opada nego kada se vrijednost temperature znatno smanji, te je stoga prilikom hlađenja bilo dovoljno u koracima od po 1 V za svake 3 min ohladiti kivetu do 150 °C, te je zatim bilo sigurno dovod temperature peći u potpunosti ukloniti, dakle u jednom koraku smanjiti temperaturu na 20 °C.

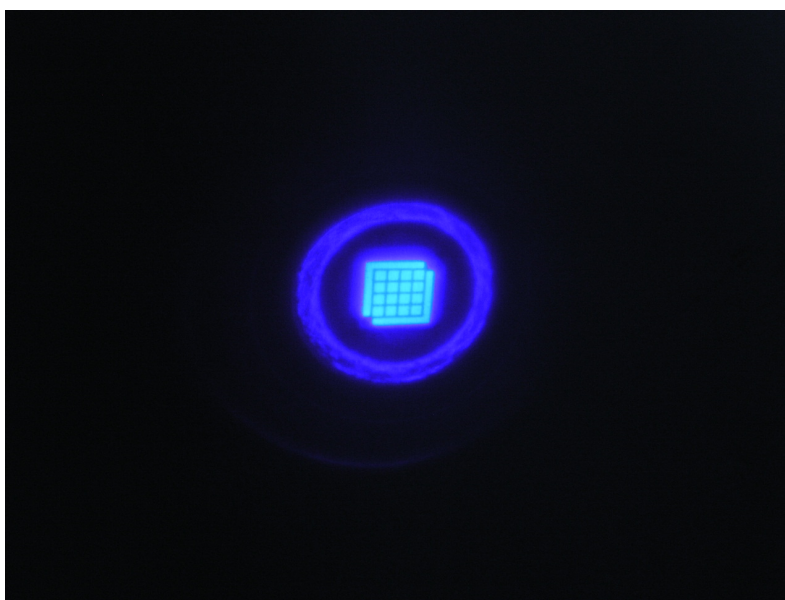
3. REZULTATI



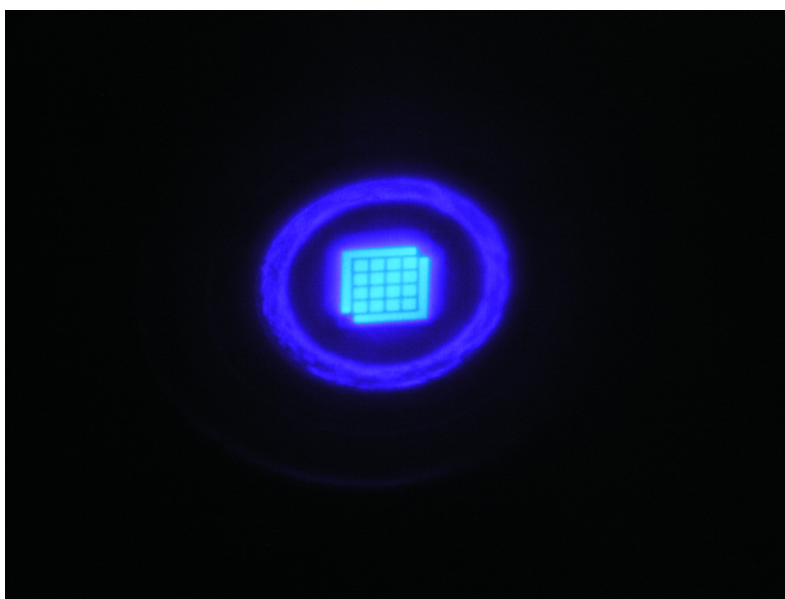
Slika 3.1. Fotografija slike izvora, kada je kao izvor zračenja korištena LED s valnom duljinom vrha od 380 nm



Slika 3.2. Fotografija slike izvora, kada je kao izvor zračenja korištena LED s valnom duljinom vrha od 380 nm



Slika 3.3. Fotografija slike izvora, kada je kao izvor zračenja korištena LED s valnom duljinom vrha od 365 nm



Slika 3.4. Fotografija slike izvora, kada je kao izvor zračenja korištena LED s valnom duljinom vrha od 365 nm

3.1. Kratka interpretacija početno dobivenih rezultata mjerenja

Rezultati dobiveni samim mjerenjem sastoje se primarno, za svaki interval temperatura posebno, od parova vrijednosti valnih duljina i fotomultiplikatorom izmjerenih pripadnih vrijednosti intenziteta zračenja koje nakon prolaska kroz paru rubidija i cezija stiže na njega. Same vrijednosti valnih duljina unaprijed su određene na monokromatoru odabirom za dano mjerenje prikladnog intervala valnih duljina, te određivanjem konstantnog razmaka između uzastopnih točaka u intervalu valnih duljina na kojima se vrši mjerenje pripadnog im intenziteta. Prikladan mjerni interval valnih duljina određuje se tako da se orijentira prema valnoj duljini maksimuma zračenja korištenog izvora kao središnjoj vrijednosti intervala, te se sukladno tome odabire potrebna širina intervala, imajući na umu da će profil linije emisijskog zračenja izvora imati oblik Gaussijana, čiji će se maksimum nalaziti točno na 'karakterističnoj' valnoj duljini odabranog izvora zračenja (to su u slučaju ovdje korištenih UV-LED izvora $\lambda = 380 \text{ nm}$ i $\lambda = 365 \text{ nm}$). Najprije se izvodi mjerenje intenziteta samog izvora (I_0), što se čini na sobnoj temperaturi, tako da njena vrijednost nije dovoljna da bi se u kivetu već stvorila para *Rb* i *Cs*, koja bi svojim prisustvom automatski uzrokovala pojavu apsorpcije zračenja izvora na valnim duljinama karakterističnim za uzorke te tada ne bi bilo moguće snimiti spektar samog zračenja izvora. Kada temperatura u peći postigne zadovoljavajuće visoke vrijednosti da se u spektru pozadinskog zračenja izvora vide apsorpcijske linije na određenim valnim duljinama karakterističnim za određene prijelaze među energijskim nivoima (podnivoima) promatranih uzoraka, vrše se snimanja spektara (u obliku odabranog intervala ovisnosti detektiranog intenziteta kroz paru propuštenog zračenja o valnoj duljini) za različite temperaturne intervale. Primijećeno je da na višim temperaturama dolazi do veće apsorpcije, što se na grafu ovisnosti intenziteta o valnoj duljini (Slike 3.1.-3.3.) očituje kao "dublji" apsorpcijski vrh.

3.2. Opis matematičke obrade dobivenih rezultata mjerenja

Koristeći *Beer-Lambertov zakon*, iz izmjerenih vrijednosti izračunat je apsorpcijski koeficijent $k(\lambda)$ za svaku pripadnu valnu duljinu, te je iz tih podataka konačno nacrtan graf ovisnosti apsorpcijskog koeficijenta o valnoj duljini, s time da treba imati na umu da je k proporcionalan energiji prijelaza (između ostalog, oboje imaju za jedinice cm^{-1}).

Osnovni oblik *Beer-Lambertovog zakona* opisuje funkcijsku ovisnost intenziteta detektiranog zračenja o valnoj duljini i glasi:

$$I(\lambda) = I_0(\lambda) \cdot e^{-kl} \quad (2)$$

Ovdje je I intenzitet "sveukupnog zračenja", λ je valna duljina (pripadna izmjerenoj vrijednosti intenziteta) u zraku, I_0 je intenzitet čistog zračenja izvora, k je apsorpcijski koeficijent promatranog uzorka, dok je l duljina ćelije, i ovdje iznosi 30 mm.

Jednostavnim matematičkim manipulacijama moguće je iz gornje jednadžbe izvesti relaciju koja opisuje koeficijent apsorpcije k , i glasi:

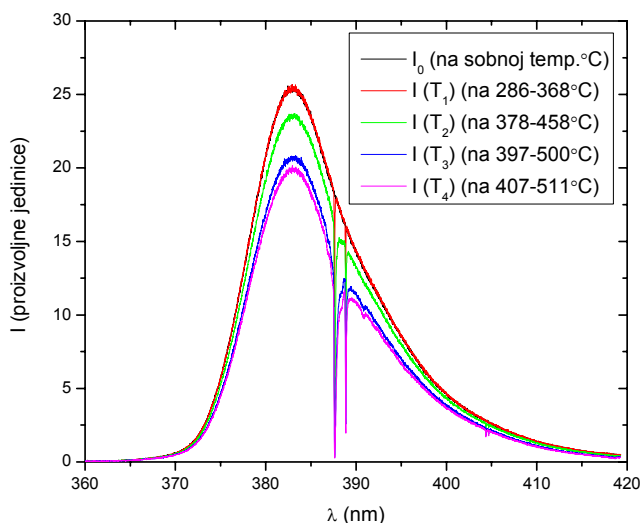
$$k(\lambda) = \frac{1}{l} \ln \left(\frac{I_0}{I} \right) \quad (3)$$

Vrijednost koeficijenta apsorpcije k računa se da bi se zatim, uz već dobiveni graf ovisnosti intenziteta I detektiranog zračenja o valnoj duljini λ , mogao nacrtati i graf ovisnosti apsorpcijskog koeficijenta k o valnoj duljini λ . Time se konačno dobivaju grafovi s apsorpcijskim linijama rubidija i cezija koje, određeno prema vrijednosti valne duljine koja odgovara njihovom maksimumu, upućuju na to koji su točno prijelazi prisutni među energijskim nivoima promatranih uzoraka rubidija i cezija na raznim temperaturama uzoraka tokom niza mjerenja.

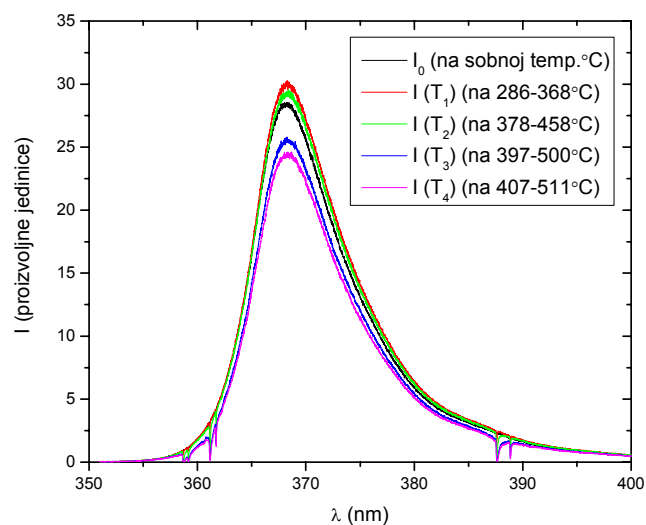
3.3. Grafovi dobiveni iz rezultata mjerenja u ovom eksperimentu i njihova interpretacija

Dobiveni grafički prikazi rezultata nalaze se u nastavku, s time da je za LED od 380 nm dobiven samo jedan set rezultata jer je u njenom slučaju vršeno samo mjerenje sa jednom širinom ulazne pukotine monokromatora, onom od 30 μm , dok je su za LED od 365 nm vršena dva različita mjerenja među kojima je jedina razlika bila upravo u širini spomenute ulazne pukotine monokromatora, i to tako što je prilikom izvođenja prvog mjerenja korištena

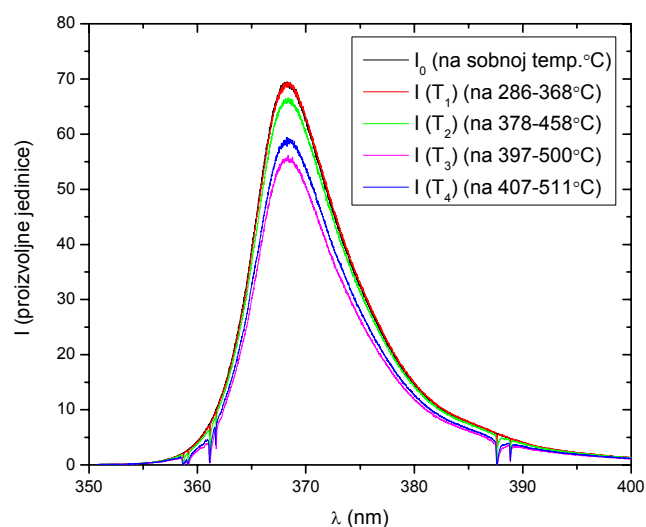
jednaka širina pukotine kao i za prvu diodu, dakle 30 μm , dok je u drugom mjeranju širina pukotine povećana na 40 μm . Direktna posljedica razlike u širini pukotine monokromatora za isti izvor odmah je uočljiva u zamjetnoj razlici vrijednosti intenziteta zračenja detektiranog nakon prolaska kroz monokromator. Naime, primjećuje se da se kod povećanja pukotine za samo 10 μm , intenzitet zračenja praktički udvostručio, što odmah ukazuje na nelinearnu ovisnost intenziteta zračenja o širini pukotine kroz koju je to zračenje prošlo (ovu se činjenicu može lako uočiti usporedbom **Slika 3.6.** i **3.7.**). Međutim, dodatna posljedica povećanja širine pukotine je automatsko slabljenje oštine signala koji prolazi kroz pukotinu, jer što je pukotina šira, to će oština detektiranog signala biti manja, tj. slabija.



Slika 3.5. Intenzitet zračenja detektiran nakon prolaska pozadinskog zračenja izvora, u UV dijelu spektra, kroz paru ispitivanog uzorka atoma rubidija i cezija u ovisnosti o valnoj duljini λ mjerenoj u zraku, dobiven za četiri različita temperaturna intervala. Također je prikazana i krivulja koja predstavlja detektirani intenzitet samo pozadinskog zračenja. U ovom je mjeranju kao izvor pozadinskog zračenja u UV dijelu spektra korištena LED sa valnom duljinom maksimuma od 380 nm, dok je širina pukotine monokromatora iznosila 30 μm .



Slika 3.6. Intenzitet zračenja detektiran nakon prolaska pozadinskog zračenja izvora, u UV dijelu spektra, kroz paru ispitivanog uzorka atoma rubidija i cezija u ovisnosti o valnoj duljini λ mjerenoj u zraku, dobiven za četiri različita temperaturna intervala. Također je prikazana i krivulja koja predstavlja detektirani intenzitet samo pozadinskog zračenja. U ovom je mjerenju kao izvor pozadinskog zračenja u UV dijelu spektra korištena LED sa valnom duljinom maksimuma od 365 nm, dok je širina pukotine monokromatora iznosila 30 μm .



Slika 3.7. Intenzitet zračenja detektiran nakon prolaska pozadinskog zračenja izvora, u UV dijelu spektra, kroz paru ispitivanog uzorka atoma rubidija i cezija u ovisnosti o valnoj duljini λ mjerenoj u zraku, dobiven za četiri različita temperaturna intervala. Također je prikazana i krivulja koja predstavlja detektirani intenzitet samo pozadinskog zračenja. U ovom je mjerenju kao izvor pozadinskog zračenja u UV dijelu spektra korištena LED sa valnom duljinom maksimuma od 365 nm, dok je širina pukotine monokromatora ovaj put iznosila 40 μm , što je važna razlika u pogledu rezultata mjerenja vrijednosti intenziteta prethodnog grafa koji je imao isti izvor pozadinskog zračenja.

Promatrajući gornja tri grafa ovisnosti intenziteta detektiranog zračenja o valnoj duljini, odmah se uočava važna razlika između krivulja koje prikazuju zračenje koje je, na različitim temperaturama, prošlo kroz paru atoma rubidija i cezija te se stoga na tim krivuljama uočavaju apsorpcijski vrhovi na mjestima (valnim duljinama) prijelaza do kojih dolazi između nekih energijskih nivoa atoma uzorka. Kako je na grafovima također prikazana krivulja intenziteta samo pozadinskog zračenja, time je još više naglašena apsorpcija upadnog UV zračenja od strane uzorka, do koje dakle dolazi kada zračenje izvora prolazi kroz paru *Rb* i *Cs*, te se na krivuljama očituje apsorpcijskim vrhovima koji valnom duljinom odgovaraju određenim prijelazima između energijskih nivoa navedenih atoma.

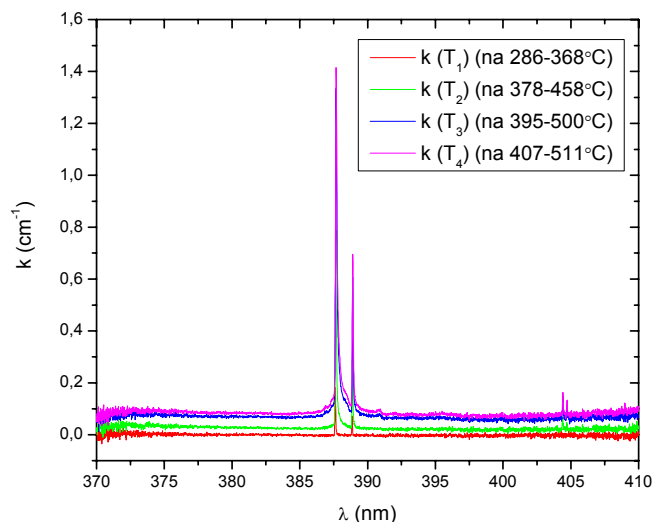
Kao što je već napomenuto, iz gore prikazanih grafova ovisnosti intenziteta zračenja izvora propuštenog kroz paru *Rb* i *Cs* o valnoj duljini, može se zaključiti da jakost apsorpcije, kao i sam propušteni intenzitet, ovisi o temperaturi na kojoj je vršeno mjerenje. Naime, što je temperatura viša, veća je i apsorpcija zračenja upadnog na paru uzorka, što je logično uzimajući u obzir da je pri većoj temperaturi uzorku dovedeno i više energije, te stoga dolazi do više prijelaza među određenim nivoima danog uzorka nego da je temperatura, a time i dostupna vanjska energija ekscitacije, manja. Dakle, što je temperatura viša, više je vanjske energije dovedeno sustavu uzorka, te je time omogućena veća učestalost određenog prijelaza među nivoima danog uzorka, što se na grafu očituje većom dubinom apsorpcijskih vrhova.

Viša temperatura također utječe da je maksimalna vrijednost zabilježenog intenziteta krivulje dobivene na višoj temperaturi manja, što se također lako objašnjava činjenicom da pri višoj temperaturi para *Rb* i *Cs* u kiveti biva gušća, pa je automatski intenzitet zračenja koje prolazi kroz paru manji.

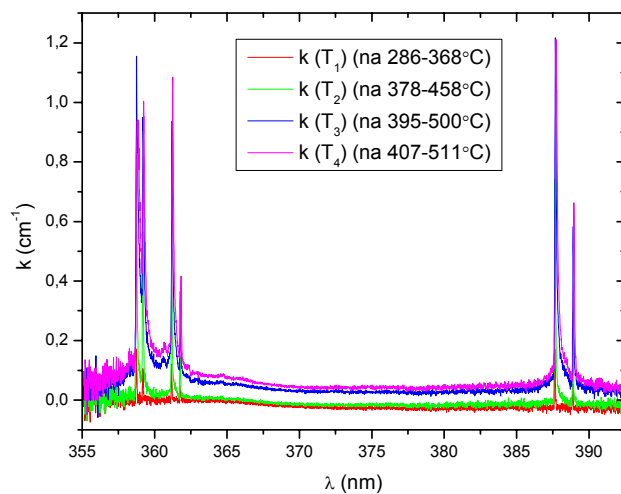
Promatrajući **Slike 3.5.** i **3.8.** za LED sa $\lambda_{max} = 380$ nm, na desnom kraju krivulja uočava se prisutnost dodatne apsorpcijske linije, vrlo slabo izražene u usporedbi s ostalim, tako reći teorijski očekivanim, apsorpcijskim linijama. Ovo dodatno opažanje nije očekivano gledano samo unutar konteksta izvedenog eksperimenta te stoga i njegovih rezultata, ali se njegova pojava mogla lako anticipirati s obzirom na osnovne spoznaje o elementima eksperimentalnog postava koji su korišteni, napose uzimajući u obzir sam ispitivani uzorak. Naime, u korištenoj safirnoj kivetu nalaze se izolirani rubidij i cezij u svojstvu uzorka namijenjenog ispitivanju u ovom eksperimentu. U početnom stanju, kada nisu zagrijani, *Rb* i *Cs* nalaze se u krutom stanju. Pojava dodatne apsorpcijske linije, koja je pri tome to izraženija što je temperatura na kojoj se vrši mjerenje viša, ukazuje na prisutnost dodatnog kemijskog elementa u uzorku, kako se, naravno, valna duljina te dodatne linije ne slaže sa mogućim valnim duljinama koje bi ukazivale da se i ovdje radi o prijelazima u *Rb* ili *Cs*. Kako je ranije navedeno, pojava ovakvog dodatnog apsorpcijskog vrha mogla se unaprijed očekivati te je u potpunosti opravdana jednostavnom činjenicom da je u korištenom *Rb-Cs* uzorku prisutna određena količina nečistoća, što je vrlo česta i gotovo neizbježna činjenica kod upotrebe uzoraka kao što je ovdje korišteni. Što se tiče identifikacije same nečistoće, automatski se nameće zaključak da se radi o kaliju, koji je također alkalijski element, kao i elementi samoga uzorka, ali je puno jednostavniji od *Rb* i *Cs*, te se kao takav lako veže i često pojavljuje kao nečistoća u uzorcima od alkalijskih elemenata višeg stupnja. Ovdje je važno napomenuti da prisutnost kalija ne utječe na točnost rezultata eksperimenta, te se usporedbom vrijednosti intenziteta nečistoće i samih elemenata uzorka, odmah uočava koliko je, obzirom na jako mali intenzitet kalija u odnosu na intenzitete ostalih linija, koncentracija same nečistoće naspram cijelog *Rb-Cs* uzorka mala, moglo bi se čak reći zanemariva. Također je zanimljivo napomenuti da ponašanje prisutne količine kalija u odnosu na promjenu temperature prati isti trend kao i kod samih uzoraka, što je vidljivo iz produbljivanja apsorpcijskih vrhova sa višom temperaturom, te time isto opravdava činjenicu da prisutnost *K* ne utječe na rezultate vezane uz ispitivani uzorak, niti na točnost eksperimenta. Utvrđene činjenice su unaprijed očekivane, jer je, kako je već spomenuto, gotovo nemoguće proizvesti pojedini uzorak bez određene, zanemarive, količine nečistoća, i ovaj rezultat to samo potvrđuje.

Primjenom *Beer-Lambertovog zakona* (jednadžba (2) u prethodnom tekstu) koji opisuje funkcijsku ovisnost intenziteta zračenja izvora koje je prošlo kroz ispitivani uzorak o valnoj duljini zračenja, moguće je iz originalnog oblika *Beer-Lambertove jednadžbe* izvesti izraz za apsorpcijski koeficijent korištenog uzorka (jednadžba (3) u tekstu iznad) u ovisnosti o

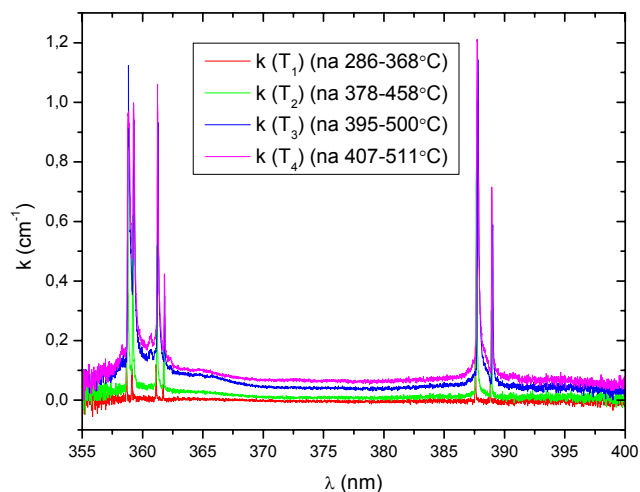
valnoj duljini zračenja. Koristeći se tim izrazom i podacima o intenzitetu zračenja samo izvora, uz poznatu vrijednost $l = 30$ mm, nacrtani su grafovi ovisnosti apsorpcijskog koeficijenta k promatranog uzorka o valnoj duljini zračenja za svaki pojedini od tri promatrana slučaja. Na svakom od grafova primjećuju se apsorpcijski vrhovi koji se, naravno, po valnim duljinama svojih maksimuma mogu pripisati određenim prijelazima između energijskih nivoa korištenih uzoraka.



Slika 3.8. Koeficijent apsorpcije k ispitivanog uzorka rubidija i cezija u ovisnosti o valnoj duljini λ mjerenoj u zraku, dobiven za četiri različita temperaturna intervala. Na ovom grafu su vidljive apsorpcijske linije određenih prijelaza samo u atomu Cs, u ultraljubičastom dijelu spektra, koji se na višim temperaturama pojavljuju u spektru izvora (pozadinskog) zračenja, čiju je ulogu u ovom mjerenju imala UV LED s valnom duljinom maksimuma od 380 nm, dok je širina pukotine monokromatora u ovom mjerenju iznosila 30 μm .



Slika 3.9. Koeficijent apsorpcije k ispitivanog uzorka rubidija i cezija u ovisnosti o valnoj duljini λ mjerenoj u zraku, dobiven za četiri različita temperaturna intervala. Na grafu su dakle vidljive apsorpcijske linije određenih prijelaza u atomima Rb i Cs , u ultraljubičastom dijelu spektra, koji se na višim temperaturama pojavljuju u spektru izvora (pozadinskog) zračenja, čiju je ulogu u ovom mjerenju imala UV LED s valnom duljinom maksimuma od 365 nm, dok je širina pukotine monokromatora u ovom mjerenju iznosila 30 μm .



Slika 3.10. Koeficijent apsorpcije k ispitivanog uzorka rubidija i cezija u ovisnosti o valnoj duljini λ mjerenoj u zraku, dobiven za četiri različita temperaturna intervala. Na grafu su dakle vidljive apsorpcijske linije određenih prijelaza u atomima Rb i Cs , u ultraljubičastom

dijelu spektra, koji se na višim temperaturama pojavljuju u spektru izvora (pozadinskog) zračenja, čiju je ulogu u ovom mjerenju imala UV LED s valnom duljinom maksimuma od 365 nm, dok je širina pukotine monokromatora u ovom mjerenju iznosila 40 μm .

Promatrajući grafički prikaz apsorpcijskog spektra uzorka kada je kao izvor pozadinskog UV zračenja korištena LED od 380 nm (tj. njena $\lambda_{\text{max}} = 380 \text{ nm}$), koji se nalazi na **Slici 3.8.**, uočava se da u ovom mjerenju nisu detektirani prijelazi u *Rb*, koji se pojavljuju u slučaju drugog korištenog izvora pozadinskog UV zračenja (dakle kod LED od 365 nm). Tome je vjerojatno glavni razlog interval valnih duljina u kojem je vršeno mjerenje, a koji je određen prema vrijednosti valne duljine maksimuma svjetlosne diode koja je korištena kao izvor pozadinskog UV zračenja. S druge strane, upravo zahvaljujući spomenutom intervalu valnih duljina u kojem je vršeno ovo mjerenje, na promatranom grafu je moguće primijetiti apsorpcijske linije kalija, koji je također alkalijski element i gotovo se neizbježno pojavljuje kao nečistoća u uzorku mnogo složenijih alkalijskih elemenata u usporedbi s njime, kao što su ovdje proučavani *Rb* i *Cs*. Apsorpcijske linije kalija su zanemarivo male u odnosu na linije eksperimentom proučavanih uzoraka cezija i rubidija, što samo potvrđuje činjenicu da se kalij u promatranom *Rb-Cs* uzorku nalazi samo u tragovima, te se njegova prisutnost pripisuje neizbježnoj pojavi nečistoća, koje obično čine elementi nižeg stupnja u odnosu na složenije elemente koji tvore razne uzorke.

Konačno, promatrajući grafove dobivene rezultatima mjerenja, može se zaključiti da se u slučajevima korištenja dvaju svjetlećih dioda sa različitim valnom duljinom maksimuma kao izvorima pozadinskog UV zračenja, dakle LED380nm i LED365nm, u odnosu na kontinuirani spektar izvora uočavaju apsorpcijske linije čije pripadne valne duljine odgovaraju upravo nekim od prijelaza između energijskih nivoa (odnosno podnivoa) atoma rubidija i cezija, koji su i predstavljali apsorpcijski uzorak u ovom eksperimentu. Identificirani prijelazi spadaju, prema pripadnim im valnim duljinama, naravno, u područje UV spektra.

Promatrajući valne duljine apsorpcijskih linija prisutnih na grafovima UV spektara dobivenim u ovom eksperimentu, identificirani su sljedeći prijelazi između energijskih nivoa, odnosno podnivoa, u atomima rubidija i cezija, uz to što izuzetak u ovom rezultatu predstavljaju apsorpcijske linije koje pripadaju kaliju, te su praktički zanemarive:

LED I – LED380nm

element	prijelaz	podnivoi	λ_{zrak} (nm)
Cs	$6s^2S - 8p^2P^0$	$6s_{1/2} - 8p_{3/2}$	387,615
		$6s_{1/2} - 8p_{1/2}$	388,861
K	$4s^2S - 5p^2P^0$	$4s_{1/2} - 5p_{3/2}$	404,414
		$4s_{1/2} - 5p_{1/2}$	404,723

LED II – LED365nm

element	prijelaz	podnivoi	λ_{zrak} (nm)
Rb	$5s^2S - 7p^2P^0$	$5s_{1/2} - 7p_{3/2}$	358,7050
		$5s_{1/2} - 7p_{1/2}$	359,1572
Cs	$6s^2S - 9p^2P^0$	$6s_{1/2} - 9p_{3/2}$	361,14
		$6s_{1/2} - 9p_{1/2}$	361,73
Cs	$6s^2S - 8p^2P^0$	$6s_{1/2} - 8p_{3/2}$	387,615
		$6s_{1/2} - 8p_{1/2}$	388,861

Imajući gore spomenuto na umu, valja naglasiti da se to u potpunosti slaže s teorijskom činjenicom da spektralne linije manjih valnih duljina, odnosno većih frekvencija (veća energija!), koje se stoga nalaze izvan područja vidljivog zračenja, nego upravo pripadaju ultraljubičastom i rendgenskom dijelu elektromagnetskog zračenja, zbog viših frekvencija odgovaraju prijelazima elektrona na unutrašnjim stazama, što identificirani prijelazi i potvrđuju. Naime, što je također u suglasju s eksperimentom, uočeni prijelazi nastaju ekscitacijama elemenata sa složenijom strukturom elektronskog omotača, dakle elemenata većih rednih brojeva baš kao što su ovdje korišteni rubidij i cezij.

3.4. Tablični prikaz prijelaza među podnivoima viših energijskih nivoa rubidija, cezija i francija

Prikazane su tablice nekih prijelaza između viših energijskih nivoa, odnosno podnivoa, alkalijskih metala *Rb*, *Cs* i *Fr*.

U obzir su uzeti prijelazi između viših energijskih nivoa navedenih elemenata, odnosno unutrašnjih staza elektrona u atomu, upravo iz razloga što navedeni alkalijski metali prema svojim atomskim brojevima spadaju upravo u skupinu elemenata složenije strukture elektronskog omotača, dakle elemenata s većim rednim brojeva (atomskim i masenim brojem Z i M , koji su redom odgovorni za broj elektrona, odnosno nukleona, osnovnog stanja atoma pojedinog elementa). Važnost navedenog leži u činjenici da, općenito što se tiče elemenata s većim brojem elektrona kao što je slučaj s ovdje promatranim *Rb*, *Cs* i *Fr*, uočeno je da su za optičke spektre zaslužni elektroni vanjskih staza, dok upravo prijelazi elektrona na unutrašnjim stazama proizvode spektralne linije manjih valnih duljina (dakle viših frekvencija, što je u suglasnosti s činjenicom da su unutrašnji energijski nivoi na višoj energiji), te se time nalaze izvan područja vidljivog zračenja i pripadaju ultraljubičastom i rendgenskom dijelu elektromagnetskog zračenja, a postižu se upravo ekscitacijama elemenata sa složenijom strukturom elektronskog omotača, među koje se ubrajaju i *Rb*, *Cs* i *Fr*.

Također, treba voditi računa o već spomenutom izbornom pravilu koje određuje finu strukturu spektra i dano je sa

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

Nadalje, osim što ovo pravilo definira koji su prijelazi među podnivoima dozvoljeni a koji nisu, zna se da stanje sa najnižom vrijednošću J ima i najnižu energiju (vidi Term dijagrame u teorijskom uvodu).

Tablica1

Rb

prijelaz	podnivoi	$\Delta E = \sigma \text{ (cm}^{-1}\text{)}$	$\lambda_{\text{zrak}} \text{ (nm)}$
$5s^2S - 5p^2P^0$	$5s_{1/2} - 5p_{1/2}$	12578,96	794,76
	$5s_{1/2} - 5p_{3/2}$	12816,56	780,03
$5s^2S - 6p^2P^0$	$5s_{1/2} - 6p_{1/2}$	23715,19	421,55
	$5s_{1/2} - 6p_{3/2}$	23792,69	420,18
$5s^2S - 7p^2P^0$	$5s_{1/2} - 7p_{3/2}$	27870,14	358,7050
	$5s_{1/2} - 7p_{1/2}$	27835,05	359,1572
$5p^2P^0 - 6s^2S$	$5p_{1/2} - 6s_{1/2}$	7554,64	1323,33
	$5p_{3/2} - 6s_{1/2}$	7317,04	1366,30
$5p^2P^0 - 7s^2S$	$5p_{1/2} - 7s_{1/2}$	13732,50	728,00
	$5p_{3/2} - 7s_{1/2}$	13494,90	740,82
$5p^2P^0 - 4d^2D$	$5p_{1/2} - 4d_{3/2}$	6776,49	1475,29
	$5p_{3/2} - 4d_{5/2}$	6538,45	1529,00
	$5p_{3/2} - 4d_{3/2}$	6538,89	1528,89
$5p^2P^0 - 5d^2D$	$5p_{1/2} - 5d_{3/2}$	13121,60	761,89
	$5p_{3/2} - 5d_{3/2}$	12884,00	775,94
	$5p_{3/2} - 5d_{5/2}$	12886,96	775,76

Tablica 3.1. - Rb - Prijelazi između nekih energijskih nivoa, energije karakteristične za dane prijelaze, te valne duljine vezane uz navedene prijelaze u rubidiju

Tablica2

Cs

prijelaz	podnivoi	$\Delta E = \sigma \text{ (cm}^{-1}\text{)}$	$\lambda_{\text{zrak}} \text{ (nm)}$
$6s^2S - 6p^2P^0$	$6s_{1/2} - 6p_{1/2}$	11178,24	894,35
	$6s_{1/2} - 6p_{3/2}$	11732,35	852,11
$6s^2S - 7p^2P^0$	$6s_{1/2} - 7p_{1/2}$	21765,65	459,31
	$6s_{1/2} - 7p_{3/2}$	21946,66	455,52
$6s^2S - 8p^2P^0$	$6s_{1/2} - 8p_{1/2}$	25709,14	388,86
	$6s_{1/2} - 8p_{3/2}$	25791,78	387,61
$6p^2P^0 - 7s^2S$	$6p_{1/2} - 7s_{1/2}$	7357,27	1358,83
	$6p_{3/2} - 7s_{1/2}$	6803,16	1469,50
$6p^2P^0 - 8s^2S$	$6p_{1/2} - 8s_{1/2}$	13138,93	760,89
	$6p_{3/2} - 8s_{1/2}$	12584,82	794,39
$6p^2P^0 - 5d^2D$	$6p_{1/2} - 5d_{3/2}$	3321,25	3010,09
	$6p_{3/2} - 5d_{3/2}$	2767,14	3612,85
	$6p_{3/2} - 5d_{5/2}$	2864,73	3489,78
$6p^2P^0 - 6d^2D$	$6p_{1/2} - 6d_{3/2}$	11410,65	876,13
	$6p_{3/2} - 6d_{3/2}$	10856,54	920,85
	$6p_{3/2} - 6d_{5/2}$	10899,48	917,22

Tablica 3.2. - Cs - Prijelazi između nekih energijskih nivoa, energije karakteristične za dane prijelaze, te valne duljine vezane uz navedene prijelaze u ceziju

Tablica3

Fr

prijelaz	podnivoi	$\Delta E = \sigma \text{ (cm}^{-1}\text{)}$	$\lambda_{\text{zrak}} \text{ (nm)}$
$7s^2S - 7p^2P^0$	$7s_{1/2} - 7p_{3/2}$	13924,00	717,99
	$7s_{1/2} - 7p_{1/2}$	12237,41	816,94
$7s^2S - 8p^2P^0$	$7s_{1/2} - 8p_{3/2}$	23658,31	422,57
	$7s_{1/2} - 8p_{1/2}$	23112,96	432,54
$7s^2S - 9p^2P^0$	$7s_{1/2} - 9p_{3/2}$	27366,20	365,31
	$7s_{1/2} - 9p_{1/2}$	27118,21	368,65
$7p^2P^0 - 8s^2S$	$7p_{1/2} - 8s_{1/2}$	7502,57	1332,51
	$7p_{3/2} - 8s_{1/2}$	5815,98	1718,93
$7p^2P^0 - 9s^2S$	$7p_{1/2} - 9s_{1/2}$	13433,61	744,20
	$7p_{3/2} - 9s_{1/2}$	11747,02	851,05
$7p^2P^0 - 10s^2S$	$7p_{1/2} - 10s_{1/2}$	16073,21	621,98
	$7p_{3/2} - 10s_{1/2}$	14386,62	694,90
$7p^2P^0 - 6d^2D$	$7p_{1/2} - 6d_{3/2}$	3992,46	2504,04
	$7p_{3/2} - 6d_{5/2}$	2505,64	3989,91
	$7p_{3/2} - 6d_{3/2}$	2305,87	4335,57
$7p^2P^0 - 7d^2D$	$7p_{1/2} - 7d_{3/2}$	12006,62	832,64
	$7p_{3/2} - 7d_{5/2}$	10408,93	960,45
	$7p_{3/2} - 7d_{3/2}$	10320,03	968,72
$7p^2P^0 - 8d^2D$	$7p_{1/2} - 8d_{3/2}$	15363,25	650,72
	$7p_{3/2} - 8d_{5/2}$	13721,38	728,59
	$7p_{3/2} - 8d_{3/2}$	13676,66	730,97
$7p^2P^0 - 9d^2D$	$7p_{1/2} - 9d_{3/2}$	17079,09	585,35
	$7p_{3/2} - 9d_{5/2}$	15417,82	648,42
	$7p_{3/2} - 9d_{3/2}$	15392,50	649,49

Tablica 3.3. - Fr - Prijelazi između nekih energijskih nivoa, energije karakteristične za dane prijelaze, te valne duljine vezane uz navedene prijelaze u franciju

Dakle, priložene tablice predstavljaju neke od prijelaza među energetske nivoima, tj. njihovim podnivoima, alkalijskih metala *Rb*, *Cs*, i *Fr*. U tablicama su navedeni samo neki od prijelaza, mahom oni među višim nivoima, jer prijelazi u slučaju osnovnog i njemu najbližih, energijski najnižih nivoa, zahtijevaju puno veću energiju da bi došlo do njihovog ostvarenja, te se stoga mogu promatrati samo na izuzetno visokim temperaturama, dok u izvedenom

eksperimentu dostupni temperaturni maksimum iznosi $511\text{ }^{\circ}\text{C}$, što, kako se pokazuje promatranjem spektara dobivenih mjerenjem, odgovara prijelazima iznad $n = 6$ energijskog nivoa. To je ujedno i jedan od razloga zašto su na Term dijagrame promatranih elemenata ucrtani energijski nivoi s najnižim glavnim kvantnim brojem $n = 6$, a zatim i prijelazi među njima. Također, energijska razlika između osnovnog i njemu susjednog nivoa je jako velika, te se zatim sve više smanjuje kako kvantni broj n nivoa postaje veći, budući da je, promatrajući vertikalnu os u Term-dijagramu kao os promjene energije, najveća razlika u energiji upravo između osnovnog stanja/energijskog nivoa i razine ionizacije.

4. ZAKLJUČAK

U ovom eksperimentu proučavana je primjena novih ultraljubičastih svjetlećih dioda u atomskoj spektroskopiji. Sam eksperiment sastojao se načelno od većeg broja komponenti, od kojih je svaka imala važnu ulogu u izvedbi te osiguravanju što preciznijih rezultata mjerenja. Izvor pozadinskog zračenja predstavljale su dvije različite LED japanskog proizvođača "NICHIA", koje su davale pozadinsko zračenje u UV dijelu spektra. Proizvedeno zračenje zatim je pravocrtnom putanjom propušteno kroz niz leća i ostalih elemenata eksperimentalnog postava, kao što je npr. prekidač svijetla (engl. "Chopper"), nužnih za konačno stizanje tako unaprijed pripremljenog snopa zračenja izvora do peći u kojoj je smještena safirna kiveta koja u sebi sadrži uzorke alkalijskih metala, u ovom slučaju rubidija i cezija, čiji se utjecaj na pozadinsko UV zračenje očituje apsorpcijom određenih linija u originalnom spektru, i to onih koje odgovaraju energijama pripadnih prijelaza u atomima rubidija i cezija. Važna je uloga peći koja, ovisno o proizvoljnoj promjeni napona njenog napajanja i time zagrijavanjem safirne kivete smještene u svojoj unutrašnjosti, a tako finalno i atoma rubidija i cezija koji su na 0 °C u krutom stanju, ali na temperaturama iznad oko 350 °C prelaze u plinovito stanje, omogućava mjerenje spektara koji se dobiju prolaskom zračenja izvora kroz paru atoma *Rb* i *Cs* za različite temperaturne intervale, te se stoga može proučiti ovisnost jačine apsorpcije o različitim temperaturama apsorbirajućih uzoraka. Ovdje izlazi da je apsorpcija to veća, što je viša temperatura na kojoj se apsorbirajući uzorak nalazi (dubina apsorpcijskog vrha na spektralnom dijagramu je veća za veću temperaturu mjerenja), što je u potpunosti u skladu s teorijom, budući da viša temperatura apsorbirajućeg uzorka znači i više (termalne) energije dovedene atomima uzorka, što znači da može doći do većeg broja prijelaza između određenih energijskih nivoa (njihovih podnivoa), dakle sveukupno više prijelaza između dva određena energetska nivoa očituje se kao dublji apsorpcijski vrh na grafu spektra.

Prvotno se vrši mjerenje ovisnosti intenziteta zračenja koje napušta peć, dakle zračenja izvora s dodatnim utjecajem apsorbirajućih uzoraka rubidija i cezija, o valnoj duljini, te se stoga zračenje koje izlazi iz peći nadalje propušta kroz monokromator, kojim se određuje interval i razmak susjednih valnih duljina za koje se očitavaju pripadne vrijednosti intenziteta. Unaprijed znajući vrijednosti valnih duljina maksimuma za dvije LED upotrijebljene kao izvore pozadinskog zračenja, te uzimajući u obzir da se radi o UV dijelu spektra, na monokromatoru se prethodno samom mjerenju odabire odgovarajući interval valnih duljina

unutar kojega se očekuje pojava profila linije korištene LED. Intenzitet zračenja se pri samom izlasku iz monokromatora detektira fotomultiplikatorom, koji ima ulogu pojačala dobivenog signala, te zatim još prolazi kroz fazno osjetljivo uskopojasno pojačalo, povezano s prekidačem svjetla (engl. chopper), kako bi se osiguralo da je detektirano zračenje točno određene frekvencije, tj. one kakovu ima zračenje izvora, te se izbjegla moguća pojava šuma od strane ostalih zračenja u okolini eksperimentalnog uređaja, a koja su na ovaj način eliminirana točnom definicijom frekvencije zračenja izvora chopperom, pozicioniranim iz istog razloga na početku eksperimentalnog postava. Kako je na fazno osjetljivo pojačalo direktno spojeno osobno računalo, rezultati dobiveni mjerenjem automatski se očitavaju na njegovu ekranu, tako da se već tokom trajanja samog mjerenja, na ekranu u grafičkom obliku postepeno prikazuje izgled ovisnosti intenziteta detektiranog zračenja o valnoj duljini, uzimajući pritom u obzir da je pojedino mjerenje izvršeno za određeni temperaturni interval. Promatrajući samo krivulje $I_0(\lambda)$ intenziteta izvora pozadinskog UV zračenja, dakle dvaju korištenih LED, mjerenjem FWHM-a (engl. "Full Width Half Maximum", širina krivulje na polovici njenog maksimuma) krivulja dobivenih iz eksperimentalnih rezultata ustanovljeno je da se vrijednosti unaprijed predviđenih (od strane proizvođača), dakle očekivanih FWHM u potpunosti poklapaju u slučaju obje diode sa eksperimentalno dobivenim FWHM vrijednostima, dakle za LED380nm FWHM iznosi 15 nm, dok za LED365nm iznosi 10 nm, kako u teoriji, tako dobiveno i iz rezultata mjerenja.

Kao što je i očekivano, za sve različite temperaturne intervale u kojima je vršeno mjerenje, uvijek su dobivene iste apsorpcijske linije, tako da se uočava da razlika u temperaturi na kojoj se izvodi mjerenje utječe samo na intenzitet (odnosno apsorpcijski koeficijent k) detektiranog zračenja, i to na način da što je temperatura viša, to je i apsorpcija veća. Razlog tome je taj što na većoj temperaturi biva dovedeno više energije uzorku, te dolazi do većeg broja ekscitacija elektrona, a time automatski i do većeg broja prijelaza među određenim nivoima, karakterističnim za ovaj eksperiment. Time također dolazi i do veće apsorpcije zračenja upadnog na uzorak, što se na grafičkim prikazima spektara očituje većim apsorpcijskim vrhovima, što ukazuje na veći broj prijelaza, u slučaju mjerenja na višim temperaturama.

Također, promatrajući grafove dobivene rezultatima mjerenja, može se zaključiti da se u slučajevima korištenja dvaju svjetlećih dioda sa različitom valnom duljinom maksimuma kao izvorima pozadinskog UV zračenja, dakle LED380nm i LED365nm, u odnosu na

kontinuirani spektar izvora uočavaju apsorpcijske linije čije pripadne valne duljine odgovaraju upravo nekim od prijelaza između energijskih nivoa (odnosno podnivoa) atoma rubidija i cezija, koji su i predstavljali apsorpcijski uzorak u ovom eksperimentu. Identificirani prijelazi spadaju, prema pripadnim im valnim duljinama, naravno, u područje UV spektra, te su navedeni u tablici u rezultatima.

5. LITERATURA

1. Demtröder, W.; Laser spectroscopy: Basic Concepts and Instrumentation, Springer-Verlag, New York, 1996.
2. Nakamura, S., Fasol, G.; The Blue Laser Diode: GaN Based Light Emitters and Lasers, Springer-Verlag, Berlin, 1997.
3. Žukauskas, A., Shur, M.S., Gaska, R.; Introduction to Solid-state Lightning, John Wiley & Sons Inc., New York, 2002.
4. Pichler, G.; Skripta za predavanja iz kolegija 'Eksperimentalne metode atomske fizike' na PMF-u, Zagreb, 2002.
5. Millman, J., Grabel, A.; Microelectronics, McGraw-Hill Inc., New York, 1987.
6. Ban, T.; Diplomski rad, Primjena diodnih lasera i svjetlećih dioda u atomske i molekulske spektroskopiji, Sveučilište u Zagrebu, PMF, Zagreb, 1997.
7. Čopor, I.; Diplomski rad, Apsorpcija i laserom inducirana emisija RbCs molekule iz Rb:Cs mješavine para, Sveučilište u Zagrebu, PMF, Zagreb, 2005.
8. Valković, V.; Spektroskopija karakterističnih X-zraka, Školska knjiga, Zagreb, 1980.
9. Atkins, P.W.; Physical Chemistry, Oxford University Press, Oxford, 1982.