

Seminar iz eksperimentalne fizike

FROG metoda i njena primjena na istraživanje alkalijskih para

Mentor: Hrvoje Skenderović, Laboratorij za lasersku spektroskopiju, IFS Zagreb

Nikola Baran

U Zagrebu, 17.6.2008.

Sažetak

Proučena je primjenjivost FROG (Frequency resolved optical gating) metode za karakterizaciju femtosekundnih pulseva korištenih za analizu svojstava uzorka plinovitog rubidija na raznim temperaturama. Pokazano je slaganje predviđanja prijelaza u rubidiju proizašlih iz FROG mjerenja sa spektrografskim mjerenjima i teorijom.

1. Uvod

1.1 Metoda FROG

Motivacija koja vodi do potrebe za fizikom lasera je, među ostalim, i potreba za proučavanjem procesa na vrlo kratkoj vremenskoj skali - reda veličine stotina, desetaka femtosekundi ili manje. To je skala brzih kemijskih reakcija te rotacijskih i vibracijskih spektara molekula^[1].

U fizici lasera dugo je opstajao problem mjerenja vrlo kratkih vremenskih intervala. Mjerenje kratkog intervala zahtjeva još kraći interval s kojim se dulji može usporediti. Budući da su femtosekundni laserski pulsevi prevelik izazov i za najbrže elektroničke uređaje, bez inovativnih metoda autokorelacije, cross korelacije te FROG-a ne bi bilo moguće proučavati procese na toj vremenskoj skali. FROG metoda je modifikacija autokorelacije i može odrediti fazu pulsa^[2]. Konačni signal je spektar. Puls se, kao u interferometru podijeli te rekombinira na nelinearnom mediju koji omogućuje interakciju dviju zraka. Općenito, FROG-ova snimka je spektrogram oblika:

$$I_{sig}(\omega, \tau) = \left| \int_{-\infty}^{\infty} P^{SHG}(t) G^{SHG}(t - \tau) e^{-i\omega t} dt \right|^2, \quad (0.1)$$

gdje je $I_{sig}(\omega, \tau)$ spektrogram, $P^{SHG}(t)$ je vremenski ovisno električno polje probe pulsa (second harmonic), $G^{SHG}(t - \tau)$ je vremenski ovisno električno polje gate pulsa zakašnjelog za τ (second harmonic).

Oblik probe i gate pulsa ovisi o tipu nelinearne interakcije, a to ujedno i karakterizira tip FROG metode. Za ovaj eksperiment korištena je second harmonic generation (SHG) FROG metoda koja je određena odnosom^[1]:

$$P^{SHG}(t) = G^{SHG}(t) = E(t) \quad (0.2)$$

pa tako jednadžba (0.1) postaje:

$$I_{sig}(\omega, \tau) = \left| \int_{-\infty}^{\infty} E(t) E(t - \tau) e^{-i\omega t} dt \right|^2 \quad (0.3)$$

Pretpostavljen je Gaussov vremenski oblik vremenski ovisnog električnog polja pulsa

$$E(t) = E_0 e^{-i\omega_1 t} e^{-\frac{t^2}{T^2}},$$

u kome je T trajanje pulsa, a ω_1 središnja frekvencija pulsa.

1.2 FROG algoritam

Ključan dio FROG metode je njen algoritam ^[3]. Laboratorijsko FROG mjerenje nam daje intenzitet $I_{sig}(\omega, \tau)$, no ne i fazu mjerenog pulsa. Iterativnim algoritmom moguće je pronaći fazu, a time i puls $E(t)$.

Definirajmo:

$$E(t) = P(t)G(t - \tau), \text{ i}$$

$$\tilde{E}(t) = \int_{-\infty}^{\infty} E_{sig}(t, \tau) e^{-i\omega t} dt,$$

time dolazimo do

$$I_{sig}(\omega, \tau) = |\tilde{E}_{sig}(\omega, \tau)|^2$$

$$|\tilde{E}_{sig}(\omega, \tau)| = \sqrt{I_{sig}(\omega, \tau)}.$$

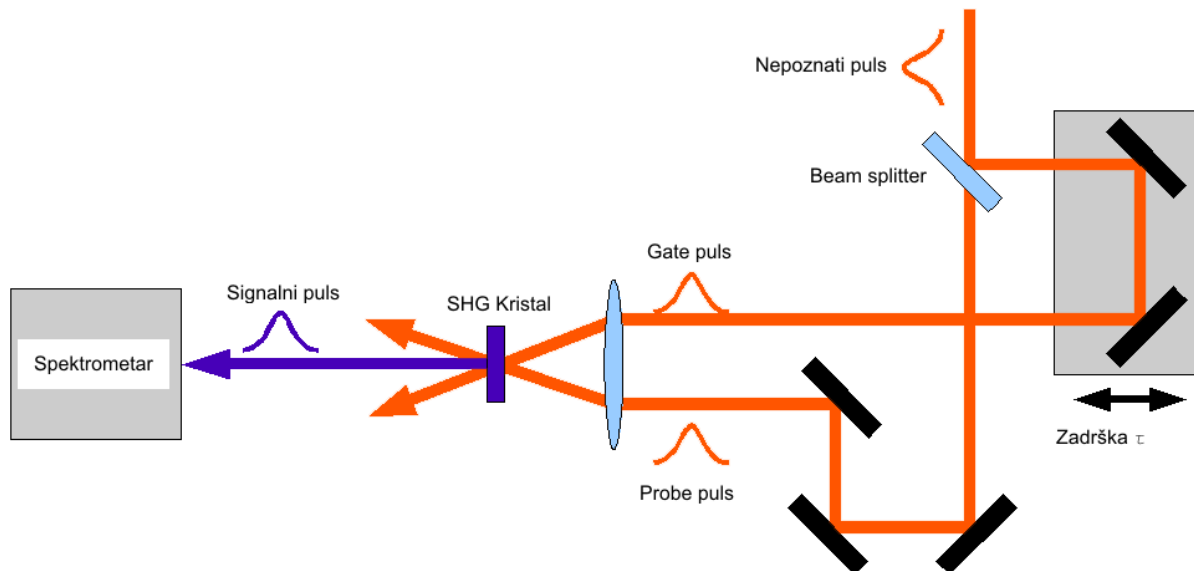
Dakle, poznata nam je amplituda $\tilde{E}_{sig}(\omega, \tau)$, no ne i faza.

Algoritam ima sljedeće korake:

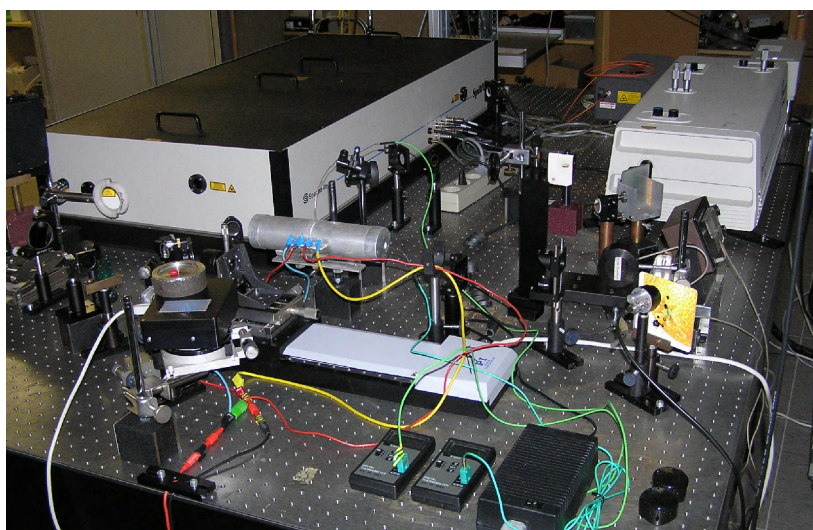
1. Pogodi $E(t)$
2. Sintetiziraj $E(t, \tau)$ iz $E(t)$
3. Fourier transformiraj vremensku os u frekvencijsku domenu, dajući $\tilde{E}(\omega, \tau)$
4. Čuvajući fazu, zamijeni amplitudu $\tilde{E}_{sig}(\omega, \tau)$ sa izmjerenom amplitudom $I_{sig}(\omega, \tau)$ i nazovi to $\tilde{E}'_{sig}(\omega, \tau)$
5. Uzmi $\tilde{E}'_{sig}(\omega, \tau)$ i inverzno ga Fourier transformiraj nazad u vremensku domenu $E'_{sig}(t, \tau)$
6. Izvuci najbolji $E(t)$ iz $E'_{sig}(t, \tau)$
7. Sintetiziraj $E(t)$ iz $E'_{sig}(t, \tau)$
8. Fourier transformiraj vremensku u frekvencijsku domenu, dajući $\tilde{E}_{sig}(\omega, \tau)$
9. Usporedi $|\tilde{E}_{sig}(\omega, \tau)|$ sa $I_{sig}(\omega, \tau)$ (rms razliku). Nazovi to greškom G . Ako je G dovoljno mali izađi iz petlje, ako nije:
10. Iđi na 4.

2. Mjerni postav

Za ispitivanje primjenjivosti FROG metode za proučavanje plinovitog Rb postavljen je principijelno jednostavan (Slika 2.1), no izvedbeno kompleksan postav (Slika 2.2). Osnovni dijelovi su laser, beam splitter, klizač, uzorak (s grijačem), nelinearni kristal te spektrometar.



Slika 2.1: Shema SHGFROG mjernog postava



Slika 2.2: Izgled SHGFROG mjernog postava

Korišten je Spectra-Physics Tsunami Ti-safir laser koji ima sljedeće karakteristike:

- $< 90\text{ fs}$ pulsevi
- srednja izlazna snaga na 800 nm je 800 mW
- prilagodljiva srednja valna duljina $750\text{--}900\text{ nm}$
- frekvencija repeticije 80 MHz
- $\Delta\lambda_{FWHM} \in [12\text{ nm}, 13\text{ nm}]$

Njegov snop je razdvojen, jedna zraka je prolazila kroz uzorak, a druga je bila zakašnjela za τ produljenjem optičkog puta. τ je bilo moguće precizno namjestiti korištenjem motoriziranog klizača (korak $0.1\mu\text{m}$).

Kao nelinearni medij korišten je $100\mu\text{m}$ deo $\beta\text{-BaB}_2\text{O}_4$ (beta-barij borat, BBO). Njime je postignuto udvostručenje frekvencije SHG procesom.

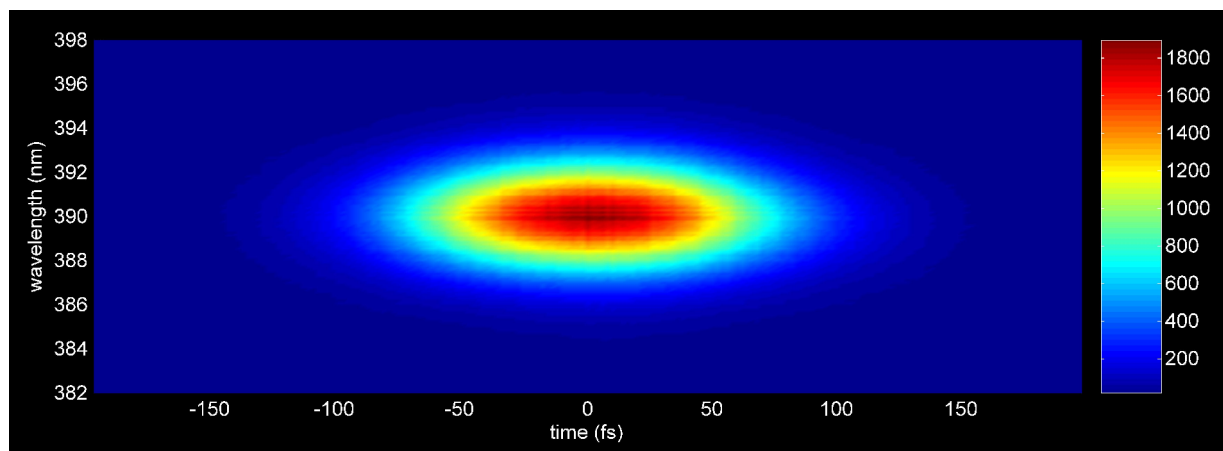
Spektrometar HR4000 ($\Delta\lambda \approx 0.2\text{nm}$) je bio spojen na PC koji je ujedno bilježio mjerenja (Software: Frog 3, Femtosoft Technologies) i kontrolirao pomoću programa LabView.

Plinoviti rubidij nalazio se u 12cm dugoj kiveri spojenoj na grijač od Peltierovih elemenata sa finom regulacijom (0.1K).

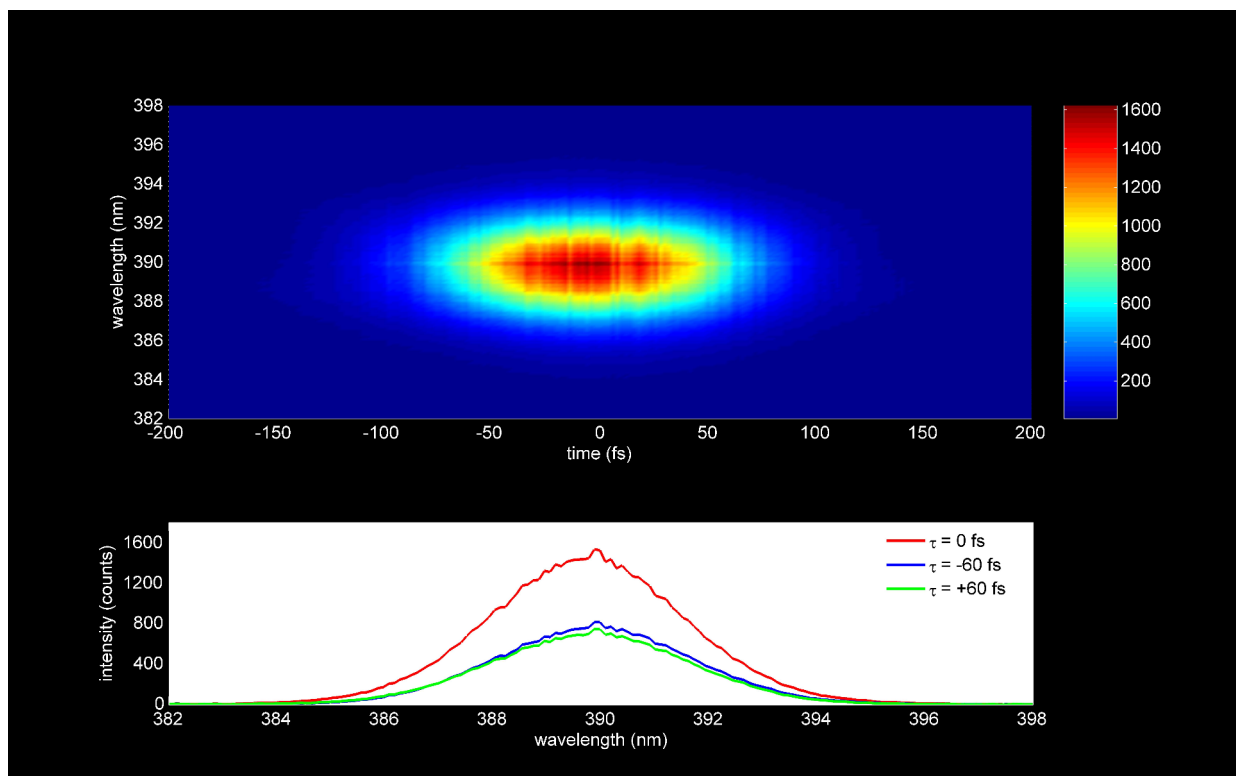
Ostali optički elementi sa slike 2.2 imaju funkciju usmjerenja zrake te ne sudjeluju u istraživanim fizikalnim procesima.

3. Mjerenja i rezultati

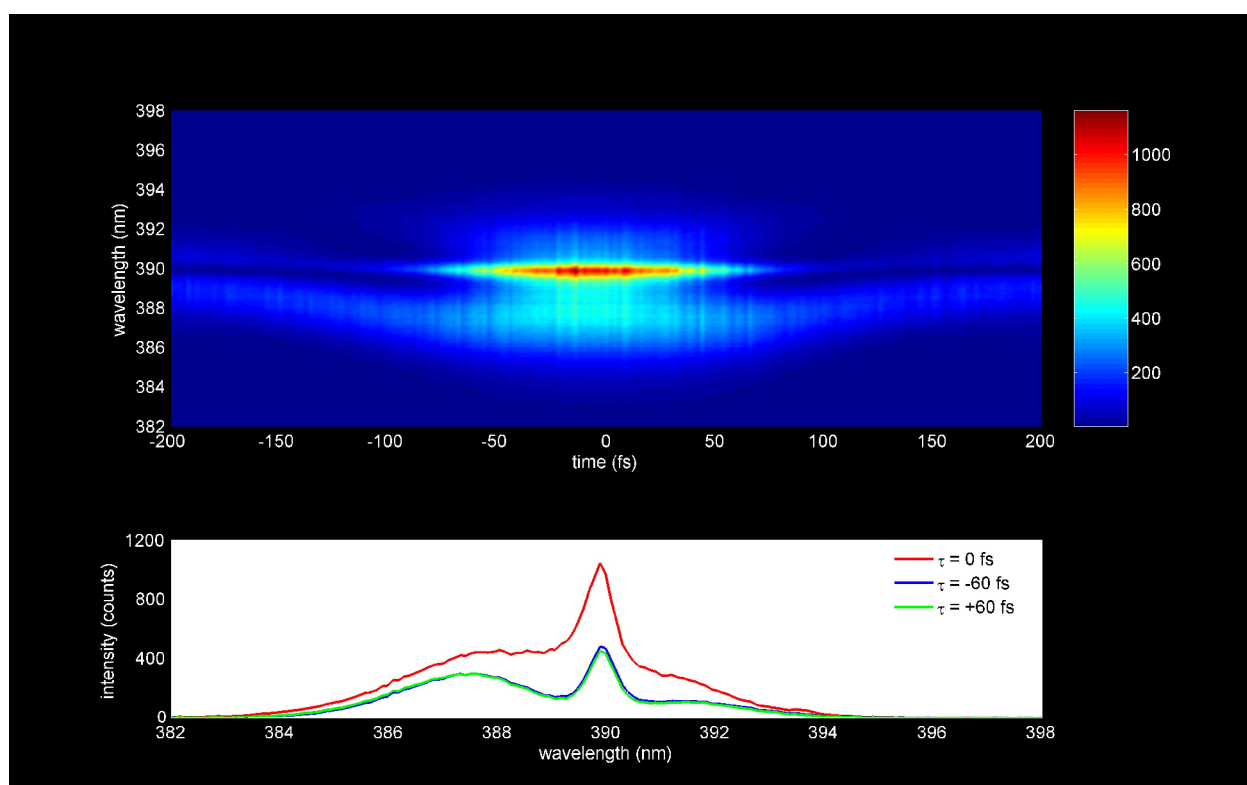
Laser je namješten da emitira valnu duljinu od 780nm , $\Delta\lambda = 12\text{nm}$. Prolaskom jedne zrake kroz (grijani) uzorak, drugoj je mijenjano vrijeme dolaska u nelinearni kristal u intervalu od -200fs (požurivanje) do $+200\text{fs}$ (kašnjenje). Nakon mjerenja na sobnoj temperaturi i snimljenog spektra (Slika 3.1), snimljena su još dva FROGa: na 74°C (Slika 3.2) i 106°C (Slika 3.3).



Slika 3.1: FROG snimka na sobnoj temperaturi, 25°C

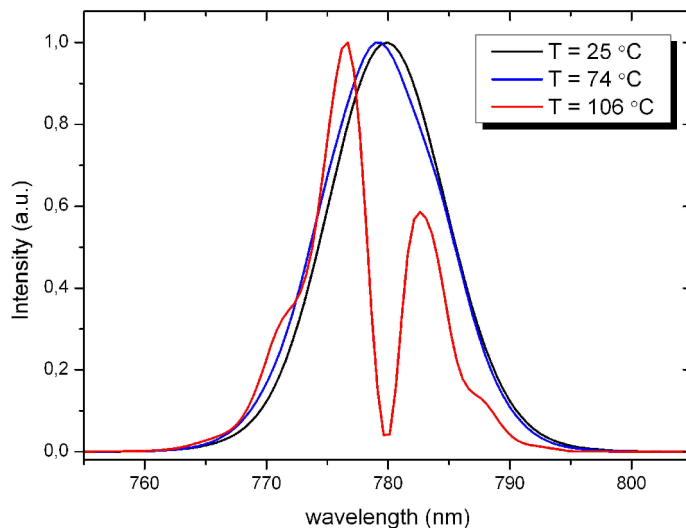


Slika 3.2: FROG snimka na 74°C i tri karakteristična spektra.



Slika 3.3: FROG snimka na 106°C i tri karakteristična spektra.

Nadalje, spektrografom su pronađene ovisnosti (Slika 3.4) intenziteta o valnoj duljini i temperaturi.



Slika 3.4: Ovisnost intenziteta o valnoj duljini za tri mjerene temperature

4. Rasprava

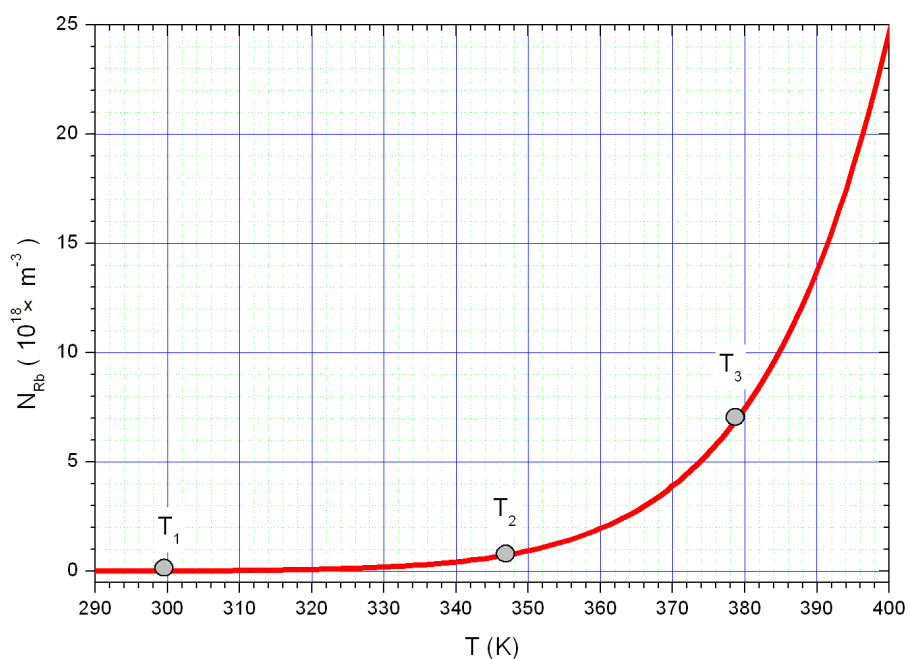
Kao što je spomenuto, ovdje se radi o preliminarnom eksperimentu čiji je cilj provjeriti mogu li se FROG metodom efikasno raditi karakterizacije pulsa modificiranog prolaskom kroz plin rubidija. Na mjerenjima izloženim u poglavlju 3 očite su promjene FROG slike i spektra rubidija u ovisnosti o temperaturi.

Povišenjem temperature uzorka javlja se sve oštriji vrh u FROG spektru rubidija centriran na 390nm (second harmonic) što je objašnjeno apsorpcijskom linijom rubidija koja postaje to izraženija što je više atoma u pari N_i (Slika 4.1).

Za slabe lasere koeficijent apsorpcije pokazuje proporcionalnost :

$$P_{aps} \sim I(\nu) \cdot N_i,$$

gdje je $I(\nu)$ intenzitet zračenja, a N_i koncentracija atoma u pari.

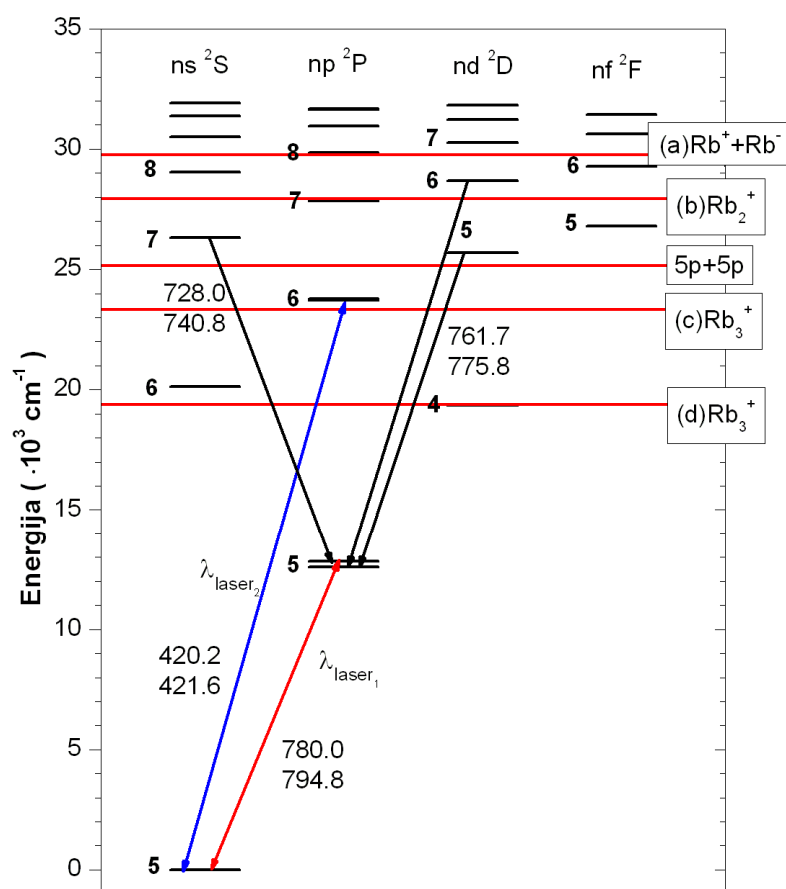


Slika 4.1: Koncentracija rubidijevih atoma u pari u ovisnosti o temperaturi (Prema [4]) sa istaknutim mjerenim točkama.

Time se elipsa u FROG slici sužava. Dakle, potvrđeno je da spektroskopska svojstva para rubidija ovise o temperaturi ^[4].

Posebno je zanimljivo uočiti nagli pad intenziteta pulsa (Slika 3.4) na 780nm. Dekonvolucijom vertikalnih presjeka FROG slike i normiranjem intenziteta (Slika 3.2 i Slika 3.3) moguće je potvrditi spektrogram (Slika 3.4). Iz svega navedenog, jasno je da rubidij na toj temperaturi snažno apsorbira, i to u prijelazu $5s_{\frac{1}{2}} \rightarrow 5p_{\frac{3}{2}}$

^[5] (Slika 4.2).



Slika 4.2: Shema energijskih (atomskih) prijelaza u rubidiju. Prema [5].

5. Zaključak

Cilj ovog pokusa je postignut, tj. FROG metoda na ovom eksperimentalnom postavu funkcionira i daje dobre rezultate ^[6]. Slaganje klasičnog spektrograma sa FROG mjerenjima to i potvrđuje. Time je u ovom laboratoriju otvorena mogućnost daljnjih i detaljnijih istraživanja interakcije femtosekundnih pulseva s alkaljskim parama iz čega se mogu izvesti zaključci o svojstvima tih para i atoma od kojih su sačinjene.

6. Literatura

- [1]: <http://en.wikipedia.org/wiki/Femtosecond>
- [2]: Rick Trebino (2002). *Frequency-Resolved Optical Gating: The Measurement of Ultrashort Laser Pulses*. Springer. [ISBN 1-4020-7066-7](#).
- [3]: FROG algorithm: K. W. DeLong and R. Trebino, Journ. Optical Society of America A, 11, 2429 (1994)
K. W. DeLong, D. N. Fittinghoff, R. Trebino, B. Kohler, and K. Wilson, Opt. Lett., 19, 2152 (1994).
- [4]: A.N. Nesmeyanov: Vapor pressures of Chemical Elements (Elsevier New York 1963)
- [5]: <http://physics.nist.gov/PhysRefData/ASD/>
- [6]: Ping Zhou, Harald Schultz, Peter Kohns, Atomic spectroscopy with ultrashort laser pulses using frequency-resolved optical gating, Optics Communications 123 (1996) 501-504