

Izgradnja i karakterizacija optičkog pojačala za ultrastabilni diodni laserski sustav

TOMA PETRINOVIĆ

Fizički odsjek, PMF, Bijenička cesta 32, 10000 Zagreb

Mentor: doc. dr. sc. Damir Aumiler

25. siječnja 2020.

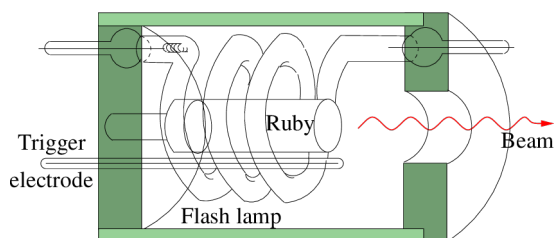
Sažetak

U radu je promatrana metoda za pojačanje intenziteta zrake diodnog lasera poznata kao injection locking. Promatrala su se svojstva diodnog lasera bez difrakcijske rešetke pri različitim strujama i temperaturama. Mjerena su svojstva lokirane zrake te je izračunata spektralna širina lokiranog diodnog lasera. Za kraj je promatrana vremenska stabilnost procesa, te je određen tip šuma pomoću Allan devijacija.

I. TEORIJSKI UVOD

Laser

Laser je uređaj koji emitira koherentnu i usmjerenu svjetlost, a temelji se na procesu stimulirane emisije. Laser je akronim za *light amplification by stimulated emission of radiation*. Prvi laser je izgrađen 1960. te mu je aktivni laserski medij bio cilindrični kristal rubina sa zrcalima na krajevima koji je bio obasjan lampom (Slika 1).



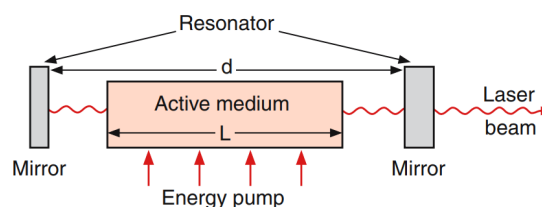
Slika 1: Rubinski laser [1].

Komponente lasera

Postoje razni tipovi lasera gdje aktivni medij može biti plin, tekućina ili čvrsta tvar. Svim laserima je zajednička osnovna građa koja uključuje:

1. **Aktivni medij** koji omogućava emisiju svjetlosti stimuliranom emisijom.
2. **Energetska pumpa** koja će dovesti energiju u sistem i koja će proizvesti tu inverziju naseljenosti.
3. **Optički rezonator** koji zarobljava fotona emitirane stimuliranom emisijom in time povećava energiju unutar rezonatora.

Na slici 3 prikazana je shema općenitog lasera s tri osnovne komponente.



Slika 2: Shema općenitog lasera [2].

Inverzija naseljenosti i princip rada

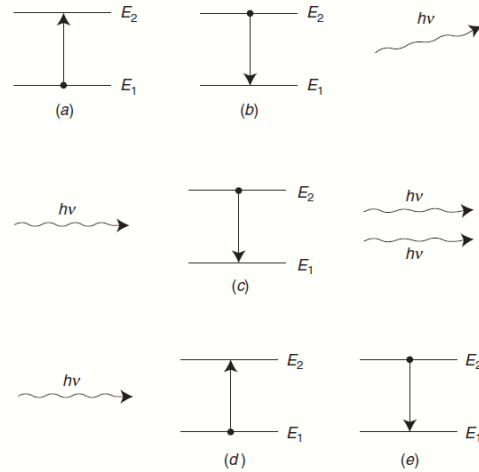
Atomi laserskog medija, koji mogu biti u plinovitom, tekućem ili krutom stanju, mijenjaju svoje kvantno stanje tijekom procesa laseriranja. Prvi korak je pobuđenje atoma apsorpcijom energije iz vanjske pumpe. Pumpa može unositi energiju na različite načine npr. emisijom svjetlosti iz žarulje ili direktno iz električne struje. Pobuđeni atom se potom nakon nekog vremena, koje zovemo vrijeme života, deeksitira u osnovno stanje emisijom fotona čija je frekvencija jednaka razlici osnovnog i pobuđenog stanja. Spontano emitirani fotoni ostaju zarobljeni u rezonatoru te mogu uzrokovati stimuliranu emisiju drugih atoma. U procesu stimulirane emisije, jedan fotona frekvencije ν može uzrokovati deeksitaciju atoma uz emisiju dodatnog fotona frekvencije ν . Na ovaj način se povećava broj fotona u komori. Na slici 3 su prikazani procesi izmjene energije za najjednostavniji slučaj kada postoje samo dva energetska nivoa. Da bi medij mogao laserirati, mora se uspostaviti inverzija naseljenosti tj. mora broj pobuđenih atoma biti veći od atoma u osnovnom nivou.

U najjednostavnijem slučaju kada imamo samo dva nivoa,

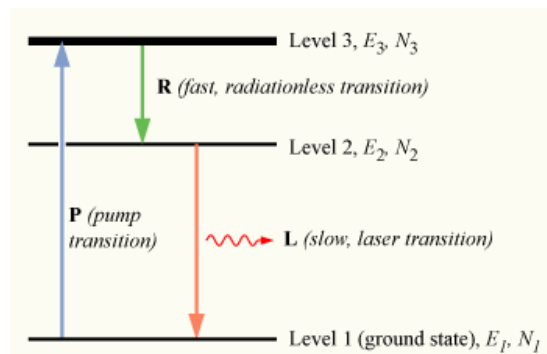
$$N_1 + N_2 = N,$$

$$\Delta E = h\nu = E_2 - E_1,$$

ne može se uspostaviti inverzija populacije, već možemo samo postići izjednačenje $N_1 = N_2$. Kako bi postigli inverziju naseljenosti, potreban nam je barem još jedan nivo koji je metastabilan. Na slici 4 je prikazan ovakav sistem. Energetska pumpa pobuđuje atome iz osnovnog stanja direktno u nivo 3. Ovaj nivo ima kratko vrijeme života i relaksira se u nivo 2 bez emisije fotona. Na ovaj način možemo uspostaviti inverziju populacije $N_2 > N_1$.



Slika 3: *Procesi izmjene energije u laseru: a) apsorpcija energije ΔE iz neke pumpe; b) spontana emisija fotona energije $h\nu$; c) stimulirana emisija fotona; d) apsorpcija fotona energije $h\nu$ i pobuđenje atoma; e) neradijativna deeksitacija atoma [3].*

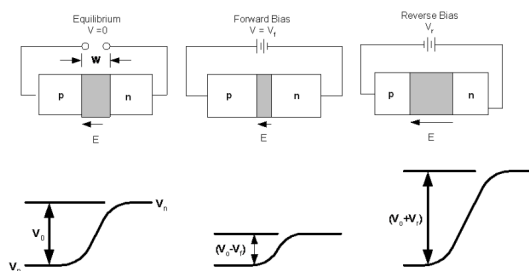


Slika 4: *Laser s tri energetska nivoa [4].*

PN spoj i LED

LED ili *light emitting diode* je poluvodički izvor svjetlosti koji pomoću efekta rekombinacija elektrona i šupljina pretvara električnu energiju u svjetlosnu. Dioda funkcionira na temelju *pn* spoja gdje dva tipa poluvodiča jedan s viškom elektrona i drugi s viškom šupljina dođu u kontakt. Ako spojimo ovakav sustav na vanjski napon, struja će moći protjecati samo u jednom smjer (eng. *forward bias*). Pojedini

dijelovi spoja n i p dobro vode struju međutim na granici dva tipa poluvodiča stvara se područje osiromašenja gdje postoji manjak nosioca naboja. Dok nema napona na krajevima, područje osiromašenja će biti konstantno na nekoj temperaturi T . Kada se postavi napon u jednom smjeru, područje osiromašenja će se smanjiti i struja će teći. Ako invertiramo napon, područje osiromašenja će narasti i struje kroz diodu neće biti. Na slici 5 je prikazan pn spoj u tri moda rada.

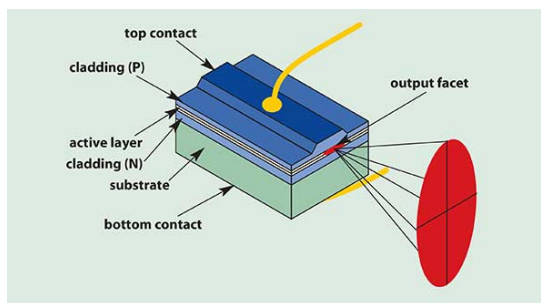


Slika 5: PN spoj u stacionarnom stanju, prilikom forward bias napona i reverse bias napona [3].

Energija koja nastaje pri rekombinaciji elektrona i šupljina se oslobađa u obliku fotona čija energija i time valna duljina ovisi o razlici energije vodljive i valentne vrpce, zvanog *band gap*, te širini vrpce.

Laserska dioda

Laserska dioda funkcionira na istom principu kao LED dioda, gdje se pumpanjem direktno s vanjskom strujom može proizvesti svjetlost. Razlika između obične LED diode i laserske diode je ta da kod laserske diode postoji rezonantna komora sa zrcalima na krajevima koja reflektira emitiranu svjetlost nazad u komoru što uzrokuje stimuliranu emisiju. Većina današnjih laserskih dioda su PIN tipa gdje je I intrinzična (ne dopirana) regija. Kod PIN diode, elektroni i šupljine su pumpani u tu regiju. Na ovaj način se maksimizira vjerojatnost za rekombinaciju i emitiranje svjetlosti. Za razliku od normalne diode, kod laserske diode želimo veliku većinu električne energije pretvoriti u svjetlosnu. Na slici je prikazana GaAs laserska dioda.

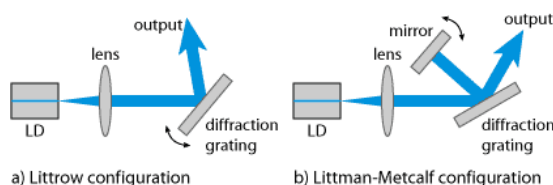


Slika 6: Shema GaAs laserske diode [5].

II. MJERENJA I REZULTATI

i. Injection locking

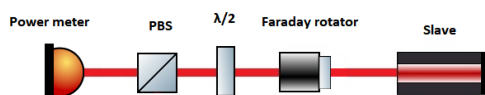
Cilj eksperimenta je demonstrirati pojačanje laserske svjetlosti upotrebom tehnike eng. *injection lock*, te ispitati svojstva pojačane svjetlosti. Metoda se temelji na pretpostavci da slaba laserska zraka, čija je emisijska širina vrlo uska, prilikom obasjavanja druge laserske diode koja može emitirati veliku snagu ali s većom emisijskom širinom, uzrokuje određenu rezonanciju te natjera jaču diodu da laserira s istom širinom linije kao i slabija. Diodni laseri koji se koriste u eksperimentima vrlo često imaju vanjsku rezonantnu komoru eng. *external-cavity diode laser* koja uključuje difrakcijsku rešetku te zrcalo. Kada ne bi imali zrcalo, morali bi rotirati difrakcijsku rešetku međutim to nam mijenja smjer zrake. U Littman-Metcalf konfiguraciji koja je prikazana na slici 7, difrakcijska rešetka je fokusirana i rotiramo zrcalo. Korištenjem ove konfiguracije smjer zrake je konstantan i širina emisijske krivulje je uža zbog dodatne rezonantne komore, međutim snaga lasera zamjetno padne zbog gubitka drugih komponenta.



Slika 7: Shema ECDL konfiguracije [6].

ii. Karakterizacija diodnog lasera

Prije same uspostave i karakterizacije pojačanog lasera, mjerila se snaga emitiranog zračenja laserske diode, bez vanjske rezonantne komore, u ovisnosti o iznosu struje koja prolazi kroz diodu. Mjerenje je izvedeno s postavom prikaznom na slici 9. Između uređaja za mjerenje snage i lasera, postavljena su četiri optička elementa. Oni su nam potrebni kako bi mogli koristiti *injection lock* metodu. Za optičko pojačanje koriste se dva lasera. Jedan se naziva glavni laser (eng. *master laser*) a drugi se naziva pomoćni (eng. *slave laser*). Glavni laser je diodni laser s istom GaAs diodom kao i pomoćni. Za razliku od pomoćnog lasera, glavni laser ima i vanjsku rezonantnu komoru ali i dodatnu stabilizaciju od spektroskopije rubidijevih atoma. Snop glavnog lasera se propusti kroz plin rubidijevih atoma u komori te se promatra apsorpcija svjetla na svjetlosnoj diodi ovisno o struji kroz laser. Na ovaj način se može uspostaviti povratna veza koja aktivno stabilizira glavni laser te mu smanjuje emisijsku širinu.

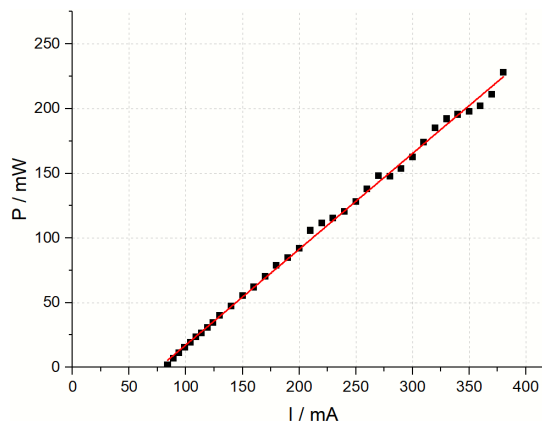


Slika 8: Shema mjernog postava za računanje intenziteta laser ovisno o struji.

Da bi se pomoćni laser mogao stabilizirati s glavnim, polarizacija glavne zrake, prilikom ulaska u pomoćni laser, mora biti jednaka kao i polarizacija pomoćnog. Radi tog razloga koristimo kombinaciju optičkih elementa prikaznih na slici 8. Ulazna zraka koja početno ima okomitu polarizaciju se reflektira na polarizacijskoj kocki (eng. *partial beam splitter*) koji propušta horizontalnu polarizaciju a reflektira okomitu. Ova zraka zatim prolazi kroz $\lambda/2$ pločicu koja rotira polarizaciju zrake u smjeru kazaljke na sat za 45° . Nakon toga zraka prolazi kroz Faraday rotator, optički element koji zraku rotira uvijek u istom smjeru neovisno da li zraka ide kroz njega u jednom ili drugom smjeru. Rota-

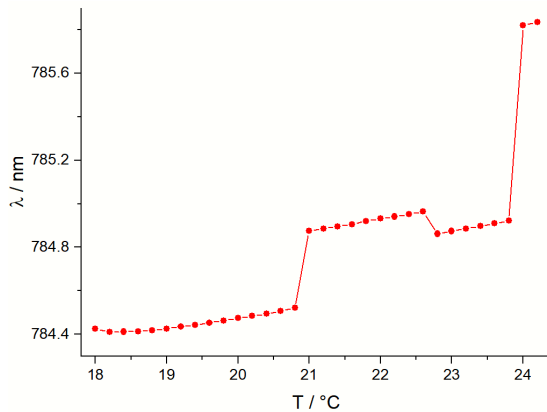
tor je tako baždaren da prolaskom kroz njega, polarizacija zrake bude ponovo okomita tj. ista kao polarizacija pomoćnog lasera (Slika 13). Nakon rotatora nalazi se još jedan polarizator postavljen na 0° koji sprječava refleksiju zrake pomoćnog lasera nazad u lasersku komoru što bi moglo izazvati kvar lasera.

Laserska dioda ima određenu kritičnu struju na danoj temperaturi kada započinje laseriranje. U ovom slučaju dioda je postavljena na 25°C i kritična struja iznosi oko 80mA (Slika 9). Snaga ovisi o struji linearno uz nagib pravca 0.74W/A uz lagano odstupanje pri većim strujama što je posljedica fluktuacija snage lasera zbog skokova između različitih modova emisije.

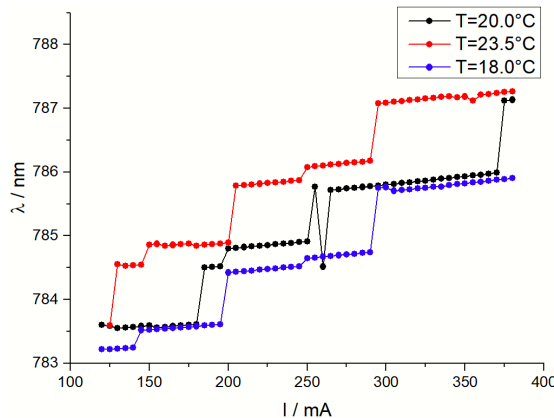


Slika 9: Snaga lasera ovisno o struji kroz diodu.

Drugo svojstvo lasera koje je promatrano je njegova valna duljina. Valna duljina emitiranog zračenja će ovisiti i o temperaturi diode i o struji kroz diodu budući da povećanje struje dovodi do zagrijavanja. Prvo je mjerena valna duljina pomoćnog lasera o temperaturi za konstantnu struju (Slika 10). Potom je izmjerena ovisnost valne duljine o struji kroz diodu za tri različite temperature diode (Slika 11).



Slika 10: Ovisnost valne duljine lasera o temperaturi diode za konstantnu struju $I = 220\text{mA}$.



Slika 11: Ovisnost valne duljine lasera o struji za konstantnu temperaturu.

U oba grafa na slikama 10 i 11, uočavamo skokovito ponašanje na određenim valnim duljinama te linearni rast na pojedinim stepenicama. Laserska komora je duljina par stotina mikrometara te su unutar nje dopušteni modovi koji zadovoljavaju njene rubne uvjete. Kako se povećava struja i/ili temperatura, laserska dioda će mijenjati svoju duljinu zbog termalne ekspanzije po relaciji

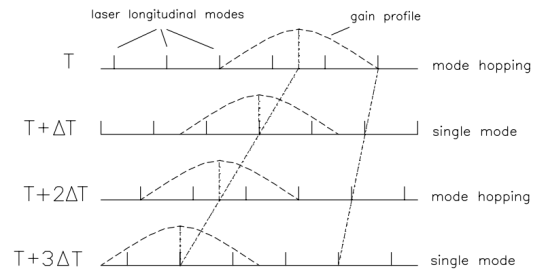
$$\Delta L = \alpha L_0 \Delta T.$$

Promjenom duljine diode, mijenjat će se dozvoljeni modovi u laseru i doći će do promjene valne duljine. Osim duljine, mijenjat će se i još indeks loma diode te gain lasera koji ovisi

o procjepu između valentne i vodljive vrpce. Ovaj procjep ovisi o temperaturi kao:

$$E_g = E_g(0) - \frac{\alpha T^2}{T + \beta}.$$

Modovi lasera će se zbog termalne ekspanzije i promjene indeksa loma pomicati prema većim valnim duljinama s porastom temperature i to s $0.06\text{ nm}/^\circ\text{C}$. Isto tako postojat će i promjena valne duljine s temperaturom u iznosu od $0.002\text{nm}/\text{mA}$. Obje vrijednosti su određene prilagodbom pravca na pojedine stepenice grafova na slikama 10 i 11. S druge strane gain lasera će se zbog promjene energije procijepa također mijenjati s temperaturom i to brže nego pojedini modovi. Preskakivanje moda će se dogoditi kada vrh gaina bude bliže jednom modu nego drugom (slika 12).

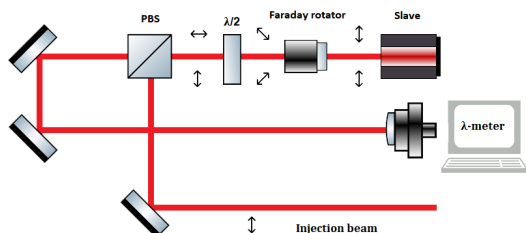


Slika 12: Shematski prikaz efekta preskakivanja modova [7].

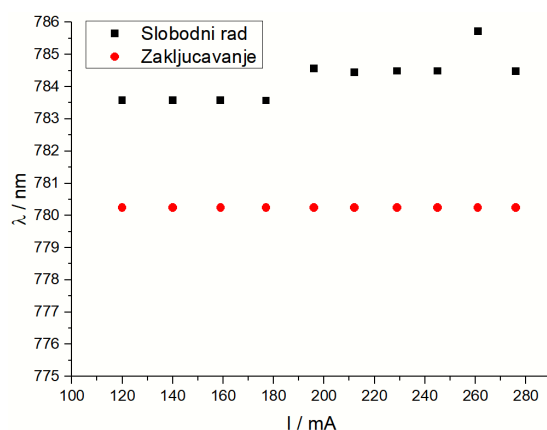
iii. Mjerenje injection lock metode s mjeračem valne duljine

Zaključavanje pomoćnog lasera se postiže tako da se zraka koja dolazi od master lasera, reflektira na polarizacijskoj kocki i usmjeri u diodu slave lasera. Nakon zaključavanja, izlazna zraka se usmjeri na optičko vlakno koje vodi do instrumenta za mjerenje valne duljine. Na slici 13 prikazana je shema postava te odgovarajuće polarizacije ulazne i izlazne zrake (gornja izlazna, donja ulazna). Na slici 14 prikazana je valna duljina laserske diode u slobodnom modu radu te u zaključanom modu rada. Sa slike je vidljivo da je valna duljina

izlazne zrake nakon zaključavanja na glavni laser uistinu konstanta.



Slika 13: Shema postava za mjerenja valne duljine izlazne zrake.



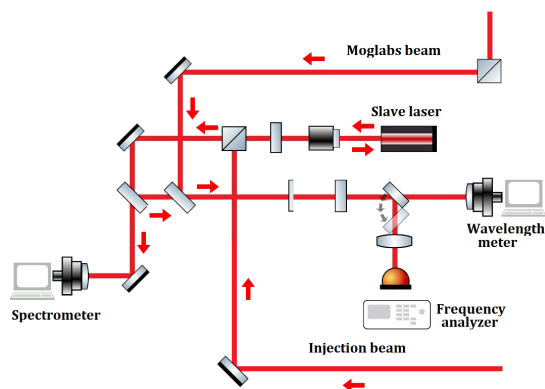
Slika 14: Valna duljina pomoćnog laser u slobodnom radu te nakon zaključavanja na glavni laser.

Prilikom mjerenja s uređajem za mjerenje valne duljine uočeno je da se laser ne zaključava na svim strujama, već samo nekim određenima. Kasnije se utvrdilo da je ovo bilo svojstvo samog uređaja budući da on mjeri samo položaj maksimuma. Ovo ukazuje na postojanje dvije emisijske komponente laserske zrake, one na prirodnoj valnoj duljini lasera i one na valnoj duljini glavnog lasera. Ovisno o struji kroz diodu pomoćnog lasera, može dominirati ili slobodna komponenta ili zaključana komponenta. Ovakvo ponašanje je bilo potvrđeno sa spektrometrom rezolucije oko 1 nm. Takva rezolucija je bila dovoljna da se vide dvije različite komponente koje mijenjaju relativnu snagu ovisno o struji kroz diodu pomoćnog lasera.

iv. Mjerenje spektralne širine pojačanog lasera

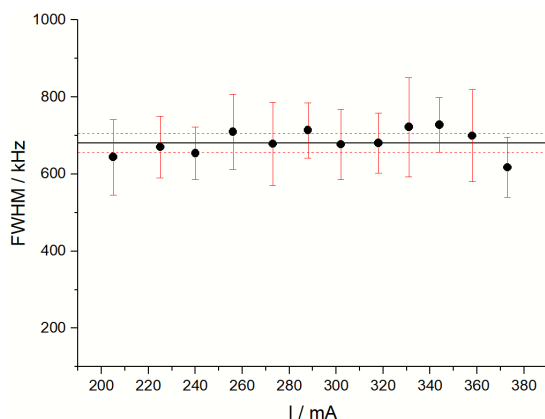
U eksperimentu hlađenja atoma rubidija, kako bi se postigle vrlo niske temperature, laserska zraka koji služi za Doppler hlađenje mora imati malu širinu linije kako druge komponente ne bi donosile dodatnu energiju u sistem tj. zagrijavale oblak atoma. Zbog toga je vrlo bitno da zaključana zraka koju smo proizveli ima malu širinu linije. Kako bi to provjerili, složili smo postav za heterodinnu spektroskopiju te promatrali frekvencije udara između pojačane zrake nepoznate širine i druge laserske zrake poznate širine. Poznata zraka u eksperimentu je bila zraka iz ECDL lasera firme Moglabs koja ima širinu linije oko 100 kHz. Druga zraka je ona iz pomoćnog lasera nakon zaključavanja čiju širinu želimo odrediti. Zrake se moraju vrlo dobro poklopiti te propustiti kroz polarizator kako bi im polarizacije bile iste. Drugi razlog korištenja polarizatora je da intenzitet obje zrake bude približno jednak što daje najbolji signal. Zrake se fokusiraju lećom na fotodiodu koja je spojena na analizator spektra. Mjerenje se provodi na sljedeći način; struja na pomoćnom laseru se namjesti tako laser emitira samo u modu zaključanom s glavnim laserom. Na analizatoru spektra se pojavljuje signal u obliku Lorentziana s centrom na frekvenciji udara. Analizator ima opciju vremenskog usrednjavanja signala koja izgladi oblik krivulje radi rješavanja šuma. Mjerenje se spremi na USB te se u programu za obradu podataka izvrši prilagodba Lorentz funkcije na mjerenja te se odredi širina krivulje, tj. FWHM (eng. *full width at half maximum*).

Mjerenje je provedeno za 12 različitih struja, s 8 mjerenja za svaku struju. Kako bi se izbjegao drift se mjerilo prvo od najviše do najniže pa nazad i tako 8 puta. Za svaku struju je izračunata srednja vrijednost i odstupanje širine linije te na kraju ukupna srednja vrijednost koja iznosi $\Delta f = (681 \pm 25)$ kHz. Budući da širina udarne frekvencije ovisi o korijenu zbroja kvadrata širina spektralnih linije pojedinih zraka $\sim \sqrt{\Delta f_1^2 + \Delta f_2^2}$, može se zaključiti



Slika 15: Shema postava za računanje udarne frekvencije između Moglabs lasera i pomoćnog lasera.

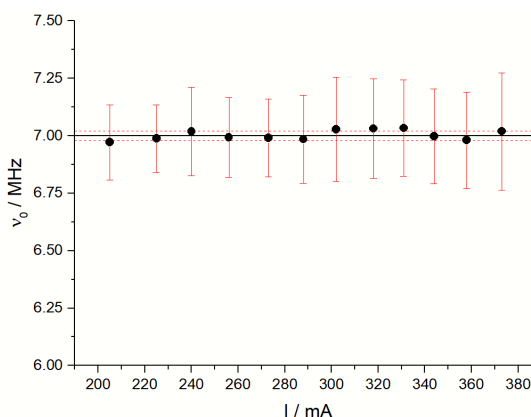
da je izmjerena vrijednost skoro u potpunosti širina spektralne linije zaključanog lasera te da Moglabs zraka samo malo modificira tu vrijednost. Kada se izmjeri udarna frekvencija između Moglabs lasera i zrake glavnog lasera koji se koristi za pojačanje, dobiva se isti rezultat, tj. proces zaključavanja ne doprinosi širenju spektralne linije lasera.



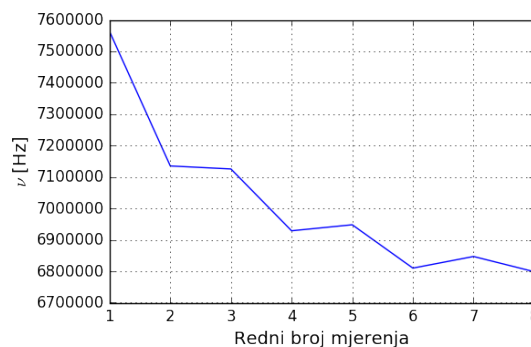
Slika 16: Spektralna širina frekvencije udara između Moglabs i zaključane zrake.

Osim širine krivulje, iz prilagodbe podataka se može izračunati i centralna frekvencija udara te ispitati kako ona ovisi o struji. Budući da su uzastopna mjerenja za istu struju razmaknuta u vremenu za 10 – 15 min, srednja vrijednost frekvencije udara koja je izračunata za svaku struju je u stvari vremenski usrednjen budući da postoji lagani drift frekvencije udara tijekom

kom procesa mjerenja (Slika 18). Međutim sa slike 17 vidimo da se frekvencija udara između Moglabs zrake i zaključane zrake ne mijenja s promjenom struje kroz diodu pomoćnog lasera.



Slika 17: Položaj centra frekvencije udara između Moglabs i zaključane zrake ovisno o struji kroz pomoćni laser.

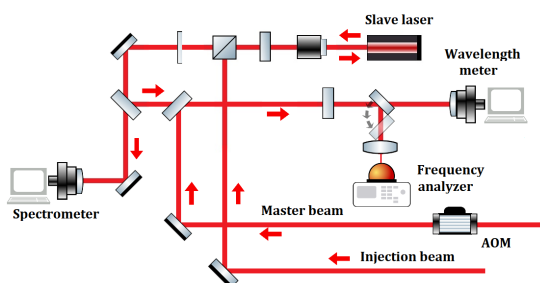


Slika 18: Položaj centra frekvencije udara između Moglabs i zaključane zrake ovisno o vremenu za konstantnu struju $I=373\text{mA}$. Jedan korak na apscisi odgovara otprilike 15min.

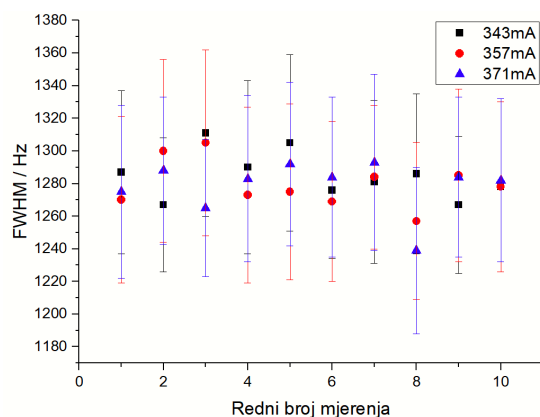
v. Frekvencija udara između pomoćnog i glavnog lasera

Kako bi se provjerilo da li pomoćni laser savršeno prati glavni laser, mjerila se frekvencija udara između zaključanog pomoćnog lasera i glavnog lasera (slika 21.) koji je s AOM-om (akusto optičkim modulatorom) pomaknut za 76.86 MHz. Mjerenje je slično kao u prošlom

dijelu, međutim ovaj put je mjereno za tri različite struje tako da se prvo izmjerilo 10 puta za jednu struju pa za drugo i na kraju za treću. U ovom mjerenju, odstupanje za svako mjerenje je preuzeto iz samo prilagodbe Lorentz krivulje na podatke mjerenja. U programu za obradu podataka se nalazi srednja vrijednost širine spektralne linije za svako mjerenje te odstupanje od srednje vrijednosti. Na slici 20 je širina spektralne linije za tri različite struje kroz diodu pomoćnog lasera. Budući da je redni broj mjerenje pomaknut u vremenu, možemo tu os smatrati vremenom gdje jedan koraka iznosi otprilike 45 s koliko je potrebno za jedno mjerenje.



Slika 19: Eksperimentalni postav za mjerenje širine frekvencije udara između zrake glavnog lasera i zrake zaključanog pomoćnog lasera.



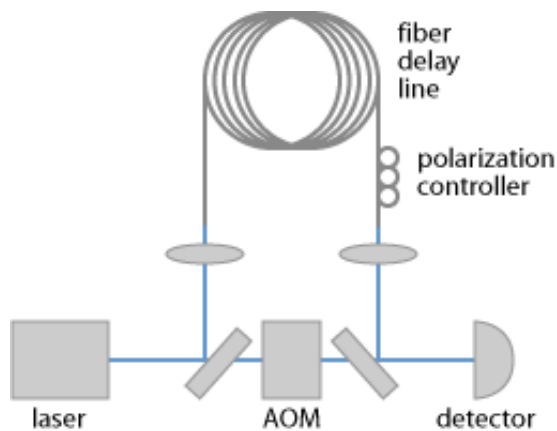
Slika 20: Širina frekvencije udara između zrake glavnog lasera i zrake zaključanog pomoćnog lasera.

U rezultatima se pojavljuje problem, a to je da širina spektralne linije frekvencije udara nije jednaka korijenu zbroja kvadrata pojedinih.

U ovom slučaju znamo da i zraka glavnog lasera i zraka zaključanog pomoćnog lasera imaju istu poluširinu oko 680 kHz, i po formuli bi očekivali da je onda širina beat frekvencije $\sim 680\sqrt{2}$ kHz. Problem može biti u tome da su to dva međusobno povezana signala i vrlo je vjerojatno da su zrake koherentne što uzrokuje grešku u mjerenju pomoću analizatora spektra. Metoda koja se koristi za mjerenje spektralne širine laserske zrake je tzv. *Self-heterodyne Linewidth Measurement*, gdje se laserska zraka odvoji na dva dijela te se jedan dio pošalje kroz AOM kao u našem slučaju a drugi dio se propusti kroz dugački optički kabel. Optički kabel je postavljen kako bi zraka koja prolazi kroz njega izgubila koherenciju s prvom. Na ovaj način može se točno mjeriti spektralna širina zrake. Problem je u tome što duljina dekoherencije ovisi o širini linije, tako da u slučaju gdje laser ima valnu duljinu 780nm i širinu 680kHz, kada uvrstimo u formulu za duljinu koherencije

$$L_{coh} = \frac{c}{\pi \Delta \nu}$$

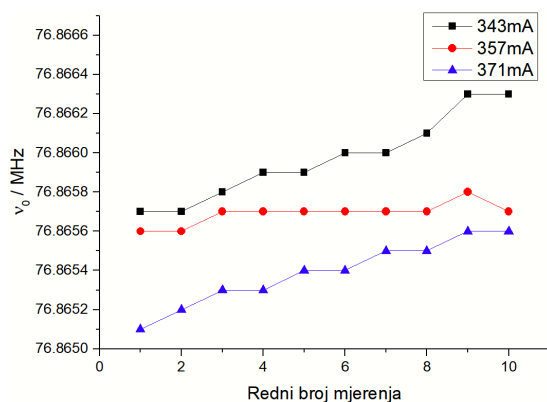
gdje je c brzina svjetlosti, optički kabel bi morao biti dugačak oko 140 m kako bi se mogla pravilno izračunati širina beat frekvencije. Budući da takav kabel nije bio dostupan, nije bilo dalje testirano.



Slika 21: Eksperimentalni postav za određivanje spektralne širine laserske zrake uporabom optičkog kabela [8].

Isto kao i u prošlom dijelu izračunat je položaj

beat frekvencije za tri različite struje. U ovom slučaju mjerenje započinje s donjom lijevom točkom (prvo mjerenje na struji 371 mA) i završava s gornje desnom (zadnje mjerenje na struji 343 mA). Vidimo da se centralna frekvencija udara tijekom mjerenja oko 45 min pomaknuo sam na trećoj decimali. Ovakva vremenska ovisnost može ukazivati na činjenicu da zaključani pomoćni laser savršeno prati glavni laser, tj. da se promjena u valnoj duljini glavnog lasera, koja može dolaziti od lagane varijacije struje ili temperature, direktno uočava i u pomoćnom laseru. Ovakvo ponašanje je vrlo dobro za eksperiment hlađenja atoma budući da sam proces zaključavanja ne unosi dodatnu nepouzdanost u valnoj duljini.

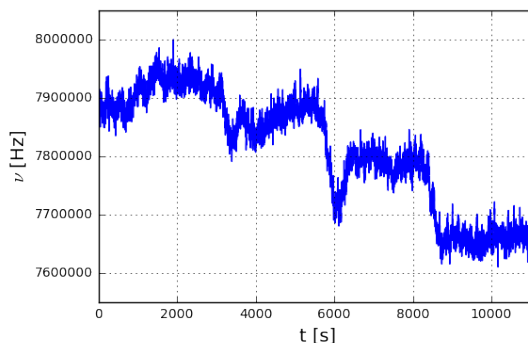


Slika 22: Centralna frekvencija udara između zrake glavnog lasera i zrake zaključanog pomoćnog lasera za tri različite struje.

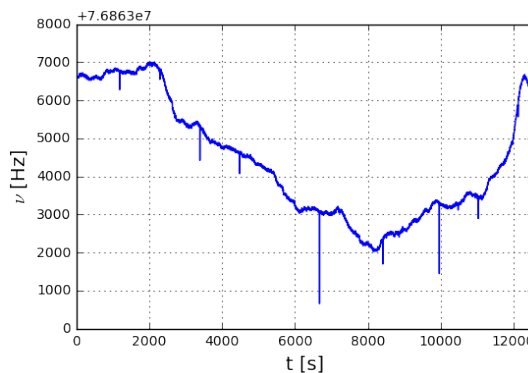
vi. Vremenska stabilnost i Alan devijacija

Za kraj eksperimenta, mjerena je vremenska stabilnost procesa zaključavanja lasera. Za hlađenje atoma rubidija putem Doppler efekta, valna duljina lasera mora biti unutar Doppler krivulje atoma. Zbog toga je vrlo bitna vremenska stabilnost lasera. Mjerenje vremenske stabilnosti vršimo s mjerачem frekvencije (eng. *frequency counter*) koji mjeri centralnu frekvenciju udara svakih ~ 1.2 s. Mjerenje smo proveli prvo za frekvenciju udara između Moglabs lasera i zaključanog pomoćnog lasera (Slika 23)

a potom za udarnu frekvenciju glavnog lasera i zaključanog pomoćnog lasera (Slika 24).



Slika 23: Centralna frekvencija udara između referentnog Moglabs lasera i zaključanog pomoćnog lasera u ovisnosti o vremenu.



Slika 24: Centralna frekvencija udara između glavnog lasera i zaključanog pomoćnog lasera u ovisnosti o vremenu.

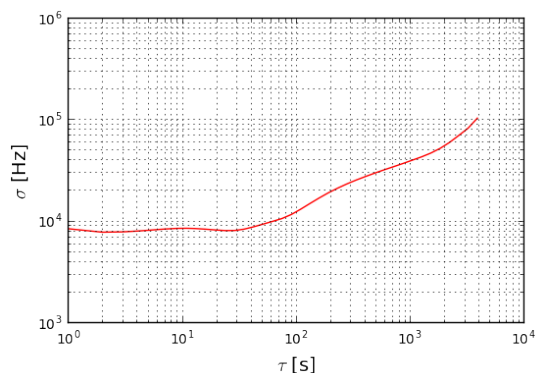
Kod vremenske stabilnosti Moglabs-pomoćni laser, položaj centra frekvencije udara se pomaknuo otprilike 300kHz u tri sata, što je dovoljno malo za eksperiment. Kod vremenske stabilnosti glavni laser-pomoćni laser, promjena frekvencije je značajno manja te iznosi samo 5 kHz. Ovo nam potvrđuje prijašnju pretpostavku da pomoćni laser direktno prati glavni laser, te promjena te frekvencije može biti od drugih izvora kao npr. stabilnost AOM-a s kojim pomičemo frekvenciju master zrake. Isto tako uočavamo puno manje šuma u drugom slučaju što i očekujemo budući da mala promjene valne duljine glavne zrake direktno

mijenja valnu duljinu pomoćne zrake. Kod frekvencije udara Moglabs-pomoćni laser uočavamo vidljiv šum koji je posljedica relativne promjene valne duljine lasera, odnosno struje kroz lasersku diodu. Također uočavamo stepeničasto ponašanje s periodom od otprilike 45 minuta. Kako bi mogli saznati nešto o tipu šuma koji je prisutan u mjerenim frekvencijama udara, izračunata je tzv. Allan devijacija. Ona nam daje informaciju o šumovima u sistemu ili mjernom uređaju a ne pogreškama koje se javljaju zbog sistematskih greški ili *drift*-a frekvencije i temperaturne promjene. Allan devijacija je uvedena zbog činjenice da u električnim uređajima ne postoji samo bijeli šum koji ne ovisi o frekvenciji, već i drugačiji tipovi šuma kao rozi šum (eng. *flicker noise*) koji ovisi o frekvenciji kao $1/\nu$.

Allan devijacija nam mjeri razliku srednjih vrijednosti dva uzastopna koraka, odnosno srednju vrijednost n -tog i $n+1$ -og gdje je τ vrijeme sumacije koraka

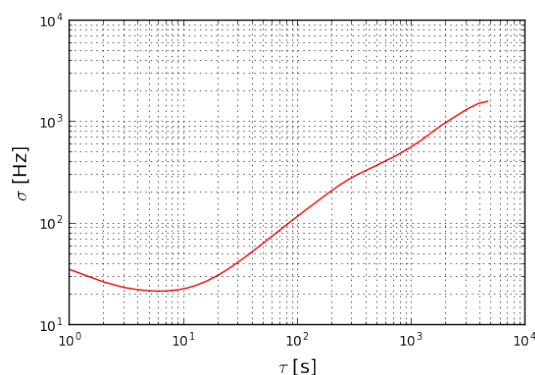
$$\sigma_v(\tau) = \sqrt{\frac{1}{2} \langle (\bar{v}_{n+1} - \bar{v}_n)^2 \rangle}.$$

Na slikama 28 i 29 su prikazane Allan devijacije za frekvencije udara Moglabs-pomoćni laser te glavni laser-pomoćni laser.



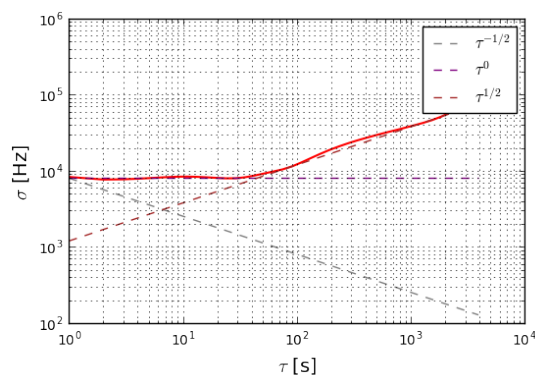
Slika 25: Allan devijacija za frekvenciju udara Moglabs-pomoćni laser.

Allan devijaciju možemo promatrati na više dijelove ovisno o vremenu τ . Na najmanjim vremenskim skalama od 10^{-2} s i manje, dominirat će tzv. fazni šum koji dolazi od malih



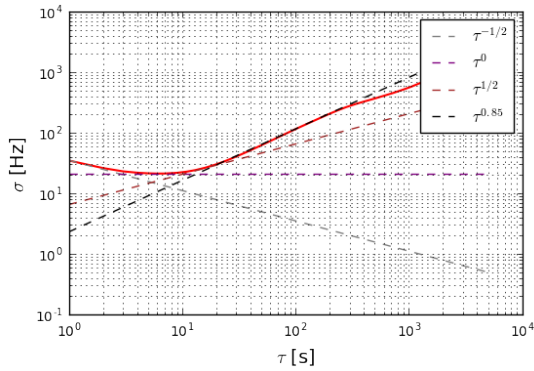
Slika 26: Allan devijacija za frekvenciju udara glavni laser-pomoćni laser.

fluktuacija faze vala. Fazni šum će doprinosti devijaciji kao τ^{-1} te budući da uređaj s kojim smo mjerili nije mjerio tom rezolucijom, na grafovima ne uočavamo ovaj doprinos. Na vremenskim skala od par sekundi, dominantno će doprinosti bijeli šum koji nema frekvijsku ovisnost i u grafu će odgovarati krivulji $\tau^{-1/2}$. U rasponu do nekoliko desetaka sekundi, dominirat će rozi šum ili *flicker noise* koji je, za razliku od bijelog šuma, obrnuto proporcionalan frekvenciji. Na grafu Allan devijacije, rozi šum će imati nagib τ^0 .



Slika 27: Doprinosi različitih šumova nagibu pravca za frekvenciju udara Moglabs-pomoćni laser.

Na velikim vremenskim skala, dominira smeđi šum (*random walk*). Ime dobiva od Brownovog gibanja te ovisi o frekvenciji kao $1/f^2$. Na slici 28 uočavamo da postoji i dio koji ima arbitrarnu ovisnost $\sim \tau^{0.85}$. Točan razlog ovakvog



Slika 28: Doprinosi različitih šumova nagibu pravca za frekvenciju udara glavni laser-pomoćni laser.

ponašanja nije jasan, međutim u oba grafa vidimo da ovisnost nije uvijek $\tau^{1/2}$ već se malo mijenja unutar tog raspona.

III. DISKUSIJA REZULTATA

U ovom radu proučavan je proces pojačanja snage lasera putem *injection lock* metode. Mjerenje su karakteristike GaAs diodnog lasera bez vanjske rezonantne komore (ECDL) te je promatrano njegovo ponašanje na različitim temperaturama i strujama. Detaljnom analizom temperaturnog ponašanja valne duljine, određen je +uzrok preskakivanja modova lasera te linearnog ponašanja temperature o struji, koji su posljedica promjene energije procijepa, termalne ekspanzije laserske diode te promjene indeksa loma GaAs s temperaturom.

Nakon karakterizacije diodnog lasera, započeto je testiranje metode zaključavanja lasera. Mjerena su svojstva procesa zaključavanja s četiri različita uređaja; uređaj za mjerenje valne duljine, spektrometar, analizator spektra i mjerač frekvencije. Prvo mjerenje je provedeno s uređajem za mjerenje valne duljine, te se uočilo da se laser zaključava na određenim strujama. Nakon toga se mjerio spektar pomoću spektrometra rezolucije oko 1 nm te se potvrdilo da postoje dvije komponente lasera, ona koja je zaključana na valnoj duljinu glavnog lasera i ona koja je svojstvena za diodni laser bez vanjske komore. Finim ugađanjem šarafa na zrcalima,

stabilnost zaključavanja se vidljivo povećala.

Nakon stabilizacije postava i nakon što je ustanovljeno da proces funkcionira pravilno, započeto je mjerenje širine spektralne krivulje zaključanog pomoćnog lasera. Kako bi se izračunala spektralna širina, mjerena je frekvencija udara između lasera poznate širine spektralne linije i zaključanog pomoćnog lasera. Prilagodnom Lorentz funkcije na podatke, određena je srednja vrijednost širine za različite struje te potom opća srednja vrijednost koji iznosi 681 ± 25 kHz što je dobar rezultat za hlađenje atoma u magneto optičkoj stupici. Budući da se sve točke nalaze unutar pogreške od drugih, zaključeno je da struja kroz diodu pomoćnog lasera ne utječe na širinu spektralne linije. Također je određen i centralni položaj udarne frekvencije za različite struje. Izračunata je vremenski usrednjena centralna frekvencija udara za različite struje kako bi se provjerilo da li ovisi o struji neovisno o tome što ovisi o vremenu kao što se vidi na slici 18. Kada je napravljeno mjerenje za udarnu frekvenciju između Moglabs lasera i zaključanog pomoćnog lasera, na sličan način je mjerena frekvencija udara između pomoćnog lasera i glavnog lasera koji je pomaknut u frekvenciji s AOM-om. Uočeno je da je širina frekvencije udara vrlo mala te da se ne slaže s teorijskim očekivanjem. Detaljnom analizom zaključeno je da je to posljedica koherencije između zraka glavnog lasera i pomoćnog lasera. Kako bi se mogla pravilno izmjeriti širina, moralo bi se koristiti optičko vlakno duljine 140 m kako zrake ne bi bile koherentne. Za razliku od širine spektralne linije, mjerenje centralne udarne frekvencije je korisna i ukazuje na činjenicu da pomoćni laser direktno prati promjene glavnog lasera te da su vremenske devijacije rezultat drugih električnih uređaja u postavu.

Pri kraju rada, mjerena je vremenska stabilnost procesa zaključavanja pomoću mjerača frekvencije. Mjerenje je napravljeno za oba slučaja frekvencije udara te je uočen drift frekvencije s vremenom. Kod frekvencije udara s Moglabs laserom, centralna udarna frekvencija se pomaknula za otprilike 300 kHz unutar tri sata

što je prihvatljivo za stabilno hlađenje. U slučaju frekvencije udara s glavnim laserom, vremenska promjena centralne udarne frekvencije je značajno manja te iznosi samo 5 kHz unutar 3 i pol sata što je ponovo potvrdilo pretpostavku da pomoćni laser vrlo dobro prati glavni laser. Za obje frekvencije udara, izmjerena je Allan devijacija koja daje dobar opis vremenske stabilnosti satova, oscilatora i pojačala. Allan devijacija opisuje stabilnost sustava ovisno o prisustvu različitih šumova a ne o *drift*-u struje ili sistematske pogreške. U oba slučaja, za vremenske skale od nekoliko desetaka sekundi nadalje, na kojima bi se vršilo mjerenje, uočeno je da dominantnu ulogu igra smeđi šum s ovisnošću $\tau^{1/2}$.

LITERATURA

- [1] Wenceslao González-Viñas: *Science of Materials: An Introduction*.
- [2] Wolfgang Demtroeder: *Atoms, molecules and photons*.
- [3] Peter W. Milonni, Joseph H. Eberly: *Laser physics*.
- [4] Bob Mellish: *Population inversion*.
- [5] Photonics: *Semiconductor Lasers: An overview of Commercial Devices*.
- [6] RP Photonics Encyclopedia: *External-cavity Diode Lasers*
- [7] T. A. Heumier, J. L. Carlsten: *Mode Hopping in Semiconductor Lasers*
- [8] RP Photonics Encyclopedia: *Self-heterodyne Linewidth Measurement*
- [9] M. S. Shahriar, A. V. Turukhin, T. Liptay, Y. Tan, P.R. Hemer: *Demonstration of injection locking a diode laser using a filtered electro-optic modulator sideband*.
- [10] Brendan Saxberg, Benjamin Plotkin-Swing, Subhadeep Gupta: *Active stabilization of a diode laser injection lock*.
- [11] C. J. H. Pagget, P. H. Moriya, R. Celistrino Teixeira, R. F. Shiozaki, M. Hemmerling, Ph. W. Courteille: *Injection locking of a low cost high power laser diode at 461nm*.