

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
PRIRODOSLOVNO-MATEMATIČKI FAKULTET
FIZIČKI ODSJEK

Nino Čutić

**AUTOMATIZACIJA
SPEKTROSKOPSKE ANALIZE
LASERSKI INDUCIRANE PLAZME
S DVA LASERSKA PULSA**

Diplomski rad

Zagreb, 2006.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
PRIRODOSLOVNO-MATEMATIČKI FAKULTET
FIZIČKI ODSJEK

SMJER: DIPL. ING. FIZIKE

Nino Čutić

Diplomski rad

**AUTOMATIZACIJA
SPEKTROSKOPSKE ANALIZE
LASERSKI INDUCIRANE PLAZME
S DVA LASERSKA PULSA**

Voditelj diplomskog rada: dr. sc. Slobodan Milošević

Suvoditelj diplomskog rada: prof. dr. sc. Damir Veža

Ocjena diplomskog rada: _____

Povjerenstvo 1. _____

2. _____

3. _____

Datum polaganja: _____

Zagreb, 2006.

Ovaj rad je izrađen na Institutu za fiziku u Zagrebu, u Laboratoriju za nanosekundnu lasersku spektroskopiju, u sklopu rada na projektu "Laserska priprema, upravljanje i spektroskopija novih molekula" #0035003 kojeg financira Ministarstvo znanosti, obrazovanja i sporta RH.

Najtoplije zahvaljujem

voditelju diplomskog rada dr. sc. Slobodanu Miloševiću na strpljenju, pomoći tijekom izrade i odabira rada, i energiji uloženoj u čitav projekt,

dipl. ing. Nikši Krstuloviću i Nataši Glavan na podršci, velikodušnoj pomoći i ugodnom i vedrom druženju u laboratoriju,

suvoditelju prof. dr. sc. Damiru Veži na savjetima,

cjelokupnom osoblju Instituta za fiziku i osoblju Ureda za studente Fizičkog odsjeka

svojim prijateljima i kolegama sa studija i iz studentskog doma, ma gdje god bili,

svojoj obitelji, poglavito roditeljima i sestri, kojima posvećujem ovaj rad, za vašu ljubav, podršku i strpljenje kroz cijeli studij.

Sažetak

U ovom radu složen je eksperimentalni postav za lasersku ablaciju s dva pulsa (Nd:YAG, 532 nm, 1064 nm), kombinirano s apsorpcijskom dijagnostičkom metodom (Cavity Ring-down Spectroscopy). U tu svrhu razvijena je LabVIEW aplikacija za kontrolu lasera i drugih instrumenata. Primjena LabVIEW razvojnog okruženja značajno je unaprijedila izvođenje i analizu eksperimenta. Detaljno je prikazana arhitektura programa. Napravljena su probna mjerenja spektra dvopulsno ablatiranog mangana u vakuumu koja pokazuju značajno povećanje koncentracije pobuđenih manganovih atoma u plazmi u odnosu na ablaciju s jednim pulsom.

Sadržaj

1	Uvod	2
2	Eksperimentalna tehnika i laboratorijski postav	4
2.1	Eksperimentalna tehnika	4
2.2	Laboratorijski postav	6
2.3	Bitnije karakteristike opreme	8
2.4	Vremensko odvijanje eksperimenta	9
2.5	Program za kontrolu eksperimenta	12
3	Rezultati i diskusija	15
3.1	Valna forma	15
3.2	Veza spektra i područja prilagodbe	17
3.3	Laserska ablacija s dva pulsa	19
4	Zaključak	20
A	Što je LabVIEW?	21
B	Arhitektura programa	25
B.1	Inicijalizator	27
B.2	Proizvođač	28
B.3	Kontrolor	29
B.4	Potrošač	29
	Popis slika	45
	Bibliografija	47

Poglavlje 1

Uvod

CRDS Dolaskom lasera pojavile su se mnoge laserske spektroskopske tehnike poput: *Laser Induced Fluorescence (LIF)*, *Resonance Enhanced Multiphoton Ionisation (REMPI)*, *Degenerate Four-Wave Mixing (DFWM)* i *Photoacoustic Spectroscopy*.^[1] Ove metode zasnivaju se na mjerenju popratnih efekata laserskog pobuđivanja uzorka, i pokazale su se kao osjetljivi spektroskopski alati. Preostalo je mjesto za lasersku apsorpcijsku spektroskopiju jer ona nudi mogućnost kvantitativnih mjerenja. Veliki problem apsorpcijske spektroskopije je detekcija slabih apsorpcija zbog velikih fluktuacija u svjetlosnom intenzitetu izvora. Cavity ring-down spectroscopy (CRDS), ili u slobodnom prijevodu, laserska apsorpcijska spektroskopija pomoću optičkog rezonatora (LASPOR)¹, zbog svoje neosjetljivosti na fluktuacije u laserskoj snazi i jako dugih optičkih puteva kroz uzorak (kakvi se lako mogu postići), postala je metoda izbora za ultraosjetljiva kvantitativna apsorpcijska mjerenja.^{[2]-[9]}

Dva pulsa Noviji trend u istraživanjima pomoću LIBS (*Laser Induced Breakdown Spectroscopy*) tehnike je dvopulsna ablacija.^{[10]-[13]} Primjenjuje se laserski puls dva puta na isto mjesto na uzorku u vremenskom razmaku od nula do nekoliko desetaka mikrosekundi. Spektralna analiza vrši se nakon drugog pulsa. Ovaj proces povećava osjetljivost LIBS tehnike i smanjuje greške zbog različite isparivosti elemenata (npr. cink u usporedbi s bakrom

¹tijekom ovoga rada biti će korištena isključivo kratica engleskog porijekla CRDS jer je to općeprihvaćena oznaka tehnike.

u mjedi). Primjećena su povećanja signala desetak do sto puta zbog drugog pulsa. Sam proces nije još dovoljno razjašnjen. Vjeruje se da prvi puls lasera služi za predionizaciju a drugi uglavnom međudjeluje s oblakom već stvorene pare vršeći dodatnu ionizaciju, odnosno atomizaciju. Mjerenja nad takvom plazmom s CRDS metodom, do sada, nisu napravljena. Nadamo se da će takva mjerenja upotpuniti sliku o tome što se zapravo događa prilikom isparavanja mete, kao i da će pokazati nove efekte unutar ablacijskog oblaka i prilikom interakcije ablacijskog oblaka s pozadinskim plinom ili tekućinom.

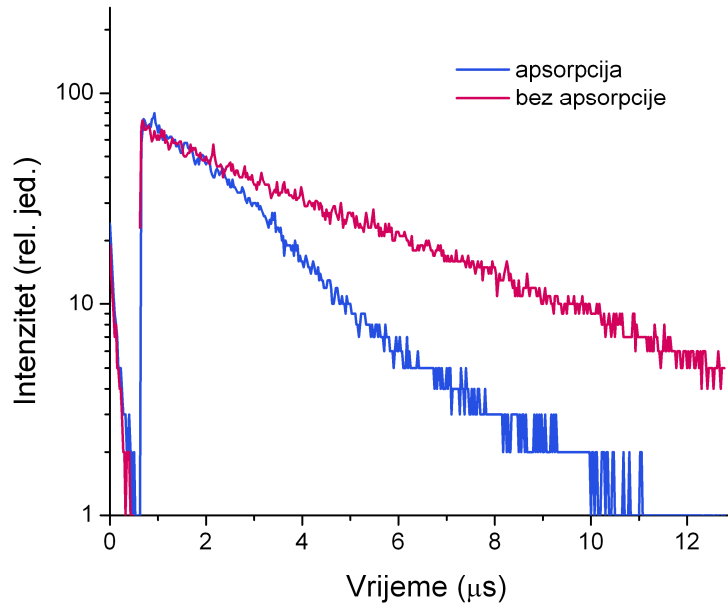
Ideja je dvopulsno ablatirati plazmu, te je potom spektroskopski proanalizirati pomoću CRDS-a. Za to nam je u laboratoriju bio potreban novi program, koji će moći ispuniti zadaću kontroliranja povećanog broja uređaja koji sudjeluju u mjerenju. S obzirom da se prelazilo i na novo računalo, odlučeno je da software bude napravljen u LabVIEWu. Novo računalo moglo je s lakoćom obaviti sve zadaće tijekom mjerenja, te je stoga u program dodan i dio za analizu, program računa spektar tijekom mjerenja, prikazuje ga grafički, te snima podatke za obradu a posteriori.

Poglavlje 2

Eksperimentalna tehnika i laboratorijski postav

2.1 Eksperimentalna tehnika

Osnovni eksperimentalni uvjeti za CRDS metodu su laser s mogućnošću mijenjanja valne duljine, dva visokoreflektivna (više od 99.9 %) konkavna zrcala (obično s dielektričnim slojem), brzi fotoosjetljivi detektor (fotodioda ili fotomultiplikator), oprema za mjerenje (osciloskop ili AD konverter) i oprema za kontrolu eksperimenta i pohranu podataka (računalo najčešće). Laserski snop usmjeren je u smjeru optičke osi rezonatora kog definiraju dva zrcala (ulazno i izlazno). Snop se reflektira između ulaznog i izlaznog zrcala. Na taj način, laserski puls može se zadržati unutar rezonatora i po nekoliko desetaka mikrosekundi. Nekoliko mikrosekundi znači tisuće odbijanja naprijed-nazad između zrcala, a to opet znači produljenje optičkog puta kroz apsorber na kilometarske duljine prije nego li signal oslabi zbog gubitaka u rezonatoru. Fotoosjetljivi detektor smješten iza izlaznog zrcala bilježi mali intenzitet svjetlosti koji do njega prođe. Detektor “vidi” eksponencijalno opadanje intenziteta pulsa u vremenu, zbog toga što se svjetlosni intenzitet smanjuje za određeni postotak prilikom svakog prolaska naprijed-nazad među zrcalima. Treba spomenuti da će vrlo brzi detektor vidjeti niz pulseva s eksponencijalnom anvelopom. Ali ukoliko je detektor sporiji, vidjeti će se samo eksponencijalna anvelopa. Signal sa detektora digitalizira se i predaje računalu na obradu. Računalo onda određuje vrijeme poluživota u rezonatoru za tu valnu duljinu pulsa.



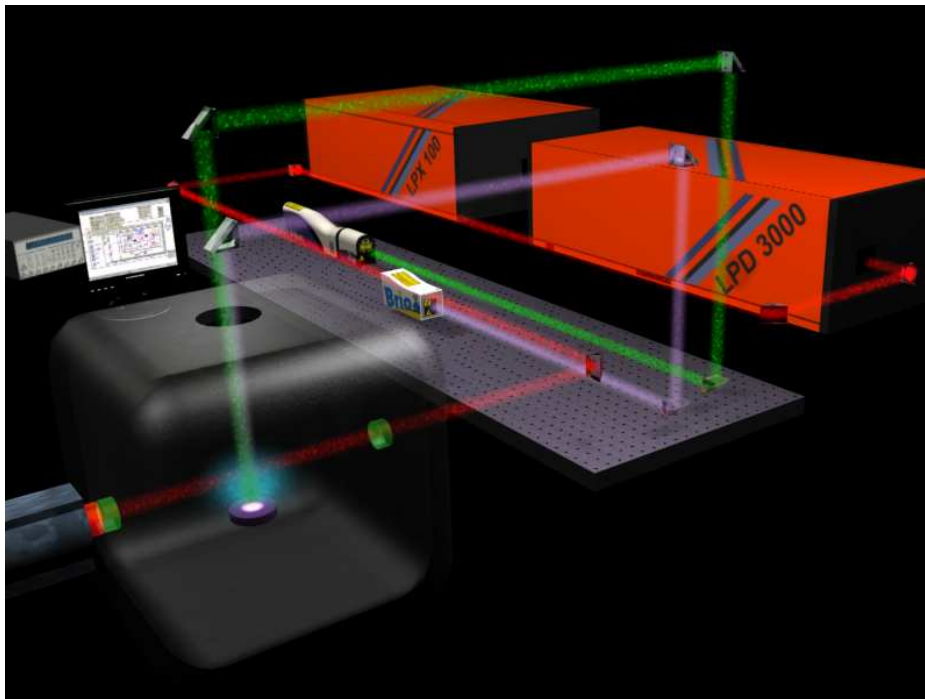
Slika 2.1: Dvije valne forme. Jedna dobivena kada valna duljina lasera nije na liniji uzorka pa nema apsorpcije. Druga forma je kada je laser bio na valnoj duljini linije. Forme su iste u početku dok uzorak nije doputovao na optičku os rezonatora.

Vrijeme poluživota određuju dva faktora: reflektivnost zrcalâ i prigušenje laserskog pulsa zbog apsorbirajućeg medija u rezonatoru. Ukoliko se dio intenziteta pri prolasku izgubi zbog apsorpcije medija između zrcala onda puls brže trne. Ako detektor nije dovoljno brz, i vidi samo envelopu intenziteta pulsa, tada je vremenska ovisnost intenziteta pulsa dana s

$$I(t) = I_0 e^{-\left[\frac{1}{\tau_0} + \alpha c\right]t} \quad (2.1)$$

gdje je τ_0 vrijeme potrebno za opadanje intenziteta na $1/e$ početnog u praznom rezonatoru, α je apsorpcijski koeficijent apsorbirajućeg medija (uzorka), a c je brzina svjetlosti u vakuumu. Kada nema apsorpcije unutar rezonatora ($\alpha = 0$) eksponent je jednostavno $1/\tau_0$. Kada je u rezonatoru prisutan i nekakav apsorber svjetlosti eksponent je $1/\tau_0 + \alpha c$. Usporedbom eksponenta u ovisnosti o laserskoj valnoj duljini kada je rezonator prazan, i eksponenta kada je apsorptivni medij prisutan, dobivamo da je njihova razlika upravo αc , tj. dobivamo apsorpcijski spektar u ovisnosti o valnoj duljini.[9]

2.2 Laboratorijski postav



Slika 2.2: Shema laboratorijskog postava. Detaljniji opis u tekstu.

Slika 2.2 prikazuje shemu kako je postavljen eksperiment u laboratoriju. Uzorak (meta) se nalazi unutar vakuumske komore (na slici poluprozirna šuplja kocka). Položaj mete može se podešavati po visini u odnosu na optičku os rezonatora. U komori se postiže vakuum manji od 10^{-3} Torr¹, ili se stavljaju plinovi (vodik, metan, kisik, dušik) na tlakovima do nekoliko Torr s kojima ablacijska plazma interagira. Laserski snopovi do komore se dovode pomoću prizmi. Snopovi pri ulasku prolaze kroz leću koja ih fokusira na metu (fokalne duljine 33 cm). Leća se također može pomicati u odnosu na metu pomoću step motora. Dva su Nd:YAG lasera zadužena za lasersku ablaciju mete. Ablacijski snopovi dolaze okomito na metu. Brilliantov snop (zeleni na slici) jako malo odstupa od pravog kuta. Za CRDS se snop dye lasera (crveni na slici) dovodi dužim putem. Pri tome puls prolazi kroz teleskop i

¹ 1 Torr = 1 mmHg = 133.33 Pa, ova jedinica za tlak je u standardnoj uporabi u laboratorijima iako nije SI; ime je dobila u čast E. Torricellija, otkrivača barometra

nekoliko pukotina (nema ih na slici) kako bi se što bolje isfiltrirao osnovni TEM_{00} mod. Viši modovi u rezonatoru se vide kao deformacije eksponencijalne anvelope. Optička os rezonatora za CRDS prolazi točno iznad mete kroz ablacijsku plazmu. Zrcala su na slici označena zelenom bojom. Iza izlaznog zrcala nalazi se fotomultiplikator. Između fotomultiplikatora i zrcala nalazi se interferencijski filter (na slici crvenkast). Filter uklanja svu svjetlost koja dolazi do fotomultiplikatora, a pritome propušta lasersku svjetlost. Interferencijski filter se odabere tako da što bolje propušta valne duljine na kojima se radi mjerenje. Napon s fotomultiplikatora se vodi na osciloskop. Podatke s osciloskopa skida računalo i obrađuje ih. Presudnu ulogu u eksperimentu ima delay generator. Delay generator ima BNC ulaz za eksterni okidač (trigger). U odnosu na taj ulazni TTL signal, može na druga 4 neovisna izlazna kanala slati TTL signal sa zadanim vremenskim kašnjenjem. Najčešći postav koji smo koristili je kada interno okidani Q-switch Brio lasera okida delay generator, a onda se s različitim vremenima pomoću delay generatora okidaju Q-switch Brilliant lasera i egzimerni laser (egzimerni laser pumpa dye laser). Izlaz iz egzimernog lasera promatra fotoosjetljiva dioda. Signalom s te diode okida se osciloskop. Tako je kašnjenje osciloskopa u odnosu na CRDS (dye) puls fiksno, ali se razmak između ablativnih pulseva i CRDS pulsa može mijenjati. Radili smo i s drugim postavima u kojima bi se, na primjer, osciloskop okidao odmah na Q-switch Brio lasera. U tom slučaju bi se na osciloskopu vidjelo pristizanje sva tri pulsa (Brio, Brilliant, dye, tim redom), pa su se točnije mogla izmjeriti vremena pristizanja pulseva na metu, jer ta vremena nikad nisu upravo ona koja su namještena na delay generatoru. Naravno, redoslijed lasera se može promijeniti prespajanjem BNC kablova ili podešavanjem vremena kašnjenja na delay generatoru. Razlike mimoilaženja pulseva u vremenu uzrokovane su: različitim duljinama optičkih puteva, različitim vremenima odgovora elektronike laserâ, različitim duljinama kablova itd. Prilikom mijenjanja područja mjerenja potrebno je mijenjati tri stvari: visokorefektivna zrcala (trebaju što bolje reflektirati u željenom području), interferencijski filter (treba što bolje propuštati željeno područje, i što bolje uklanjati sve izvan tog područja) i boje u dye laseru (pri prelasku na novo područje biraju se druge kemikalije za kivetu u dye laseru).

2.3 Bitnije karakteristike opreme

Za stvaranje vakuuma u komori koriste se dvije pumpe. Rotacijska se koristi za postizanje tlakova do otprilike 0.01 Torr, a roots pumpa se koristi za niže tlakove (do 10^{-4} Torr). Roots pumpa postavljena je zbog velike brzine pumpanja ($500 \text{ m}^3/\text{h}$). Na komoru je postavljena i difuziona pumpa (s njom se može postići do 10^{-6} Torr), ali ona nije bila korištena u izradi rada.

U eksperimentu se koriste ukupno četiri lasera, i svi su pulsni. Za ablaciju se koriste dva Nd:YAG lasera: manji, Quantel Brio (1064 nm, energije pulsa 100 mJ, trajanja pulsa 5 ns; na slici 2.2 svijetloljubičasti snop) i veći Quantel Brilliant (532 nm, 160 mJ, 4 ns; 1064 nm, 350 mJ, 3 ns; na slici 2.2 zeleni snop). Oba lasera imaju maksimalnu repeticiju od 20 Hz jer im je to takt bljeskalica (flashlamp). Frekvencija Q-switcha može se mijenjati podešavanjem cjelobrojnog djelitelja na: 1 Hz, 2 Hz, 4 Hz, 5 Hz, 10 Hz i 20 Hz. Brilliantov osnovni harmonik je, kao i Briov, na 1024 nm, ali Brilliant ima i generator drugog harmonika (SHG - second harmonic generator) pa može lasirati na 532 nm. Tijekom izrade ovog rada na Brilliant je bio postavljen SHG. Bitna razlika između ova dva lasera je Q-switch delay. To je vrijeme koje treba proteći od bljeska bljeskalice do otvaranja Q-switcha. Za Brio Q-switch delay iznosi $140 \mu\text{s}$, a za Brilliant $190 \mu\text{s}$. S takvim kašnjenjima u odnosu na bljeskalicu laseri daju pulseve najveće snage. Vanjskim upravljanjem (*external triggering*) se Q-switch može otvoriti i s drukčijim vremenom kašnjenja, ali tada snaga laserskog pulsa nije maksimalna. Nažalost, trenutni postav ne omogućava mijenjanje vremena ispaljivanja pulseva na laserima a da se pritome očuva navedeno kašnjenje za bljeskalicama kod oba lasera. Drugim riječima, svako mijenjanje vremena ispaljivanja pulsa Brillianta u odnosu na Brio je “zadiranje” u Brilliantovih $190 \mu\text{s}$. Tom problemu može se doskočiti s još jednim delay generatorom koji bi onda davao kašnjenje od $50 \mu\text{s}$, tako da se i bljeskalice i Q-switch drugog lasera mogu neovisno pomicati. Komunikacija računala i Nd:YAG lasera je putem RS232 protokola.

Druga dva lasera koji se koriste za CRDS metodu su egzimerni XeCl laser Lambda Physik LPX 100 (308 nm, 150 mJ) i dye laser Lambda Physik LPD 3000 (punjen Rhodamin organskom bojom, energije pulsa oko 10 mJ). Egzimerim laserom ultraljubičastim pulsom se pumpa dye laser, koji kao izlaz daje puls željene valne duljine. Komunikacija dye lasera i računala je putem GPIB protokola.

Delay generator je Stanford Research Systems DG535 (4 kanalni, delay/puls generator); komunikacija s ovim uređajem također ide putem GPIB protokola. Korišten je dvokanalni storage osciloskop Hameg Instruments HM1507 (150 MHz, 200 MS/s). Osciloskop je obično namješten na uprosječivanje nekoliko mjerenja za svaku valnu duljinu. Komunikacija s ovim uređajem je preko RS232 protokola. Sporost komunikacije s osciloskopom i trajanje ablacije su najuža grla u brzini izvođenja eksperimenta. Skidanje četvrtine valne forme (512 točaka od 2048 mogućih) traje oko pola sekunde. Ispaljivanje osam pulseva pri frekvenciji od 5 Hz¹ i namještanje dye lasera traje oko 1.6 sekundi. Korišteno računalo (AMD Athlon 64 3000+, 1GB DDR, 160 GB HDD SATA, GPIB kartica) i više je nego dovoljno brzo za sve potrebe eksperimenta.

2.4 Vremensko odvijanje eksperimenta

Postupak mjerenja obično je sljedeći:

- računalo namješta parametre rada svih uređaja (postavlja osciloskop u daljinski (remote) način rada, resetira ga, postavlja uprosječivanje osciloskopa na isti broj pulseva koji će postaviti i Brio laser, postavlja osciloskop na uprosječivanje (average mode), postavlja mod rada Bria, postavlja željena vremena kašnjenja na sva 4 kanala delay generatora,
- računalo naređuje postavljanje dye lasera na novu valnu duljinu,
- računalo naređuje Bria ispaljivanje određenog broja pulseva (internal triggering),
- signal s Q-switcha i bljeskalice Bria vodi se na delay generator,
- delay generator s kašnjenjem prenosi signal na Brilliantu, tj. naređuje ispaljivanje pulsa Brilliantu (external triggering),
- delay generator naređuje ispaljivanje pulsa egzimernom laseru, koji pumpa dye laser,

¹Zbog štednje egzimernog i dye lasera ne rade se mjerenja na višim frekvencijama, premda sve komponente, uključujući i njega, dopuštaju rad na 20 Hz.

- snop iz egzimernog lasera na fotoosjetljivoj diodi stvara signal koji okida osciloskop (ili se i osciloskop okida pomoću jednog od kanala na delay generatoru),
- snop od dye lasera prolazi kroz niz pukotina i teleskop kako bi se profilirao od nepoželjnih modova, ulazi u rezonator (višestruko prolazi kroz plazmu), i pri svakoj refleksiji od izlaznog zrcala dio prolazi kroz interferencijski filter u fotomultiplikator,
- računalo čeka vrijeme koje je potrebno da Brio ispuca svoj broj pulseva, plus još neko dodatno vrijeme koje se da podesiti u programu,
- računalo skida uprosječenu valnu formu s osciloskopa, resetira osciloskop ukoliko nije došlo do greške pri primanju podataka, analizira skinutu valnu formu, pohranjuje dosadašnje rezultate, prikazuje grafove, te, ukoliko nije kraj mjerenja, postavlja dye laser na novu valnu duljinu i naređuje ispaljivanje pulseva Briu, tj. ponavlja ciklus.

U sljedećoj tablici naveden je detaljnije, i kronološki je opisan, postupak realizacije jednog ciklusa mjerenja. Pod ciklusom mjerenja mislim na sve radnje koje će se obaviti kako bi se izmjerila apsorpcija za jednu valnu duljinu. Mjerenje za drugu valnu duljinu je drugi ciklus. Brojevi u zagradama označavaju vremena trajanja pojedinih faza. U trećem stupcu nalazi se ime isprogramiranih sub-via koji sudjeluju u obavljanju navedene radnje.

vrijeme (ms) ($\approx$ trajanje)	radnja	sub-vi
0 (1)	dye laser se postavlja na željenu valnu duljinu.	postavi_dye_na_lambda2
1 (100)	osciloskop se postavlja u "reference mode".	strmode58
101 (100)	osciloskop se postavlja u "average mode"; skupa s prethodnom naredbom zapravo se obavilo resetiranje memorije osciloskopa.	strmode5C
nastavak na sljedećoj stranici		

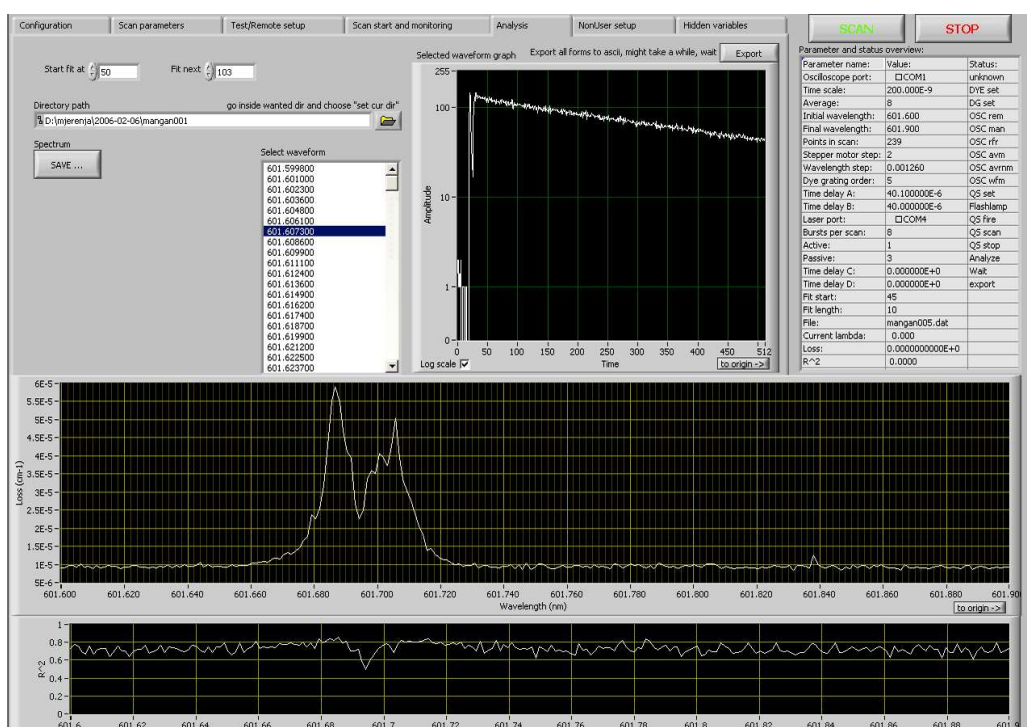
nastavak s prethodne stranice		
vrijeme ($\approx$ trajanje)	radnja	sub-vi
201 (100)	naređuje se laseru ispaljivanje bursta. Signal s bljeskalica direktno se prenosi Brilliant laseru. 140 μ s nakon prvog okidanja bljeskalice po primitku naredbe otvara se Briov Q-switch (na 100 μ s). U slučaju da je vrijeme kašnjenja Brilliantovog Q-switcha namješteno na nula, Brilliantov Q-switch se otvara kada i Briov. Brilliantov puls stiže u komoru 780 ns nakon Briovog. Ako se i osciloskop triggerira s delay generatorom na nula, onda njegov puls stiže u fotomultiplikator 40 ns prije Brillianta, tj. 740 ns poslije Bria.	Qopenfire
301 (1700)	čeka se ispaljivanje pulsa, vrijeme čekanja ovisi o broju pulseva koji se ispaljuju i njihovoj frekvenciji (1600 ms za 8 pulseva na 5 Hz), vrijeme se dodatno poveća 100 ms (čisto da budemo sigurni kako je mjerenje gotovo).	/
2001 (500)	skida se valna forma s osciloskopa. Nakon naredbe osciloskopu za slanje prvih 512 bytea forme čeka se 500 ms kako bi on odgovorio.	citanje_pola_forme; fitplotform

Tablica 2.1: Detaljno vremensko odvijanje jednog ciklusa mjerenja s osam pulseva u burstu na frekvenciji lasera 5Hz. Triggeriranje svih lasera je preko delay generatora (bez fotodiode). Kod slučaja u 201. milisekundi navedena su vremena kašnjenja u komoru jednog pulsa iz bursta (od njih 8) za oba lasera (Brilliant i dye u odnosu na Brio) kada je na delay generatoru namješteno kašnjenje na nula.

2.5 Program za kontrolu eksperimenta

U ovom poglavlju ukratko je opisano korisničko sučelje programa razvijenog za mjerenje. Namjerno se izbjegavaju veći detalji u funkcioniranju programa (koji se nalaze u dodatku pod nazivom Arhitektura programa).

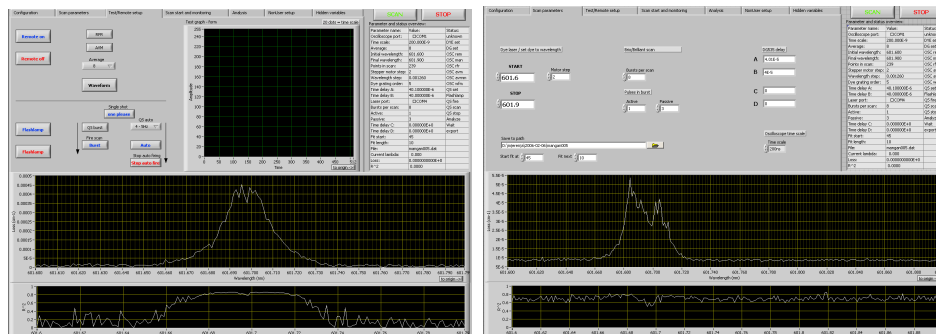
Korisničko sučelje u LabVIEWu dio je *virtual instrumenta* tj. samog programa kao prednji panel (Front panel). Pri programiranju se svaka kontrola, indikator ili graf smjesti na željeno mjesto. U ovom programu prednji panel podijeljen je na dva dijela. Jedan dio je stalno vidljiv, to su: grafički prikazi



Slika 2.3: Korisničko sučelje. Odabrana je stranica za analizu. Na desnoj strani panela nalaze se tipke SCAN i STOP, a ispod njih je tabela trenutno namještenih parametara (*Parameter and status overview*)

izmjereneog spektra i R^2 parametra linearne regresije te tabela parametara (tabela koja prikazuje sve trenutno namještene parametre te stanje u kojem se nalazi program). Kontrole i indikatori su razmješteni na sedam stranica tab izbornika. Pet od sedam stranica namjenjeno je korisniku, a zadnje dvije

omogućavaju intervenciju u vrijednosti internih parametara. Parametri su unaprijed određeni i korisnik ih ne bi trebao mijenjati ukoliko nije dobro upućen u njihovu ulogu i moguće posljedice njihovog mijenjanja. Oni reguliraju vremena čekanja pri komunikaciji s uređajima, ekstenzije datoteka koje program zapisuje isl.



(a) Kontrola uređaja i pojedinačno testiranje (“Test/Remote setup”) (b) Unos parametara (“Scan parameters”)

Slika 2.4: Dvije bitne stranice korisničkog sučelja.

Stranice na tab strukturi su:

- Configuration - kontrole (dva “drop down” menua) kojima se biraju serijski portovi lasera i osciloskopa.
- Scan parameters - kontrole budućeg mjerenja, početna i konačna valna duljina, korak step motora, adresa datoteke u koju će se snimati, parametri za obradu tijekom mjerenja kako bi se vidio “preview” rezultata, postavke lasera (Q-switch parametri), vremenska kašnjenja za sva četiri kanala delay generatora, vremenska skala na osciloskopu (kako bi program mogao računati gubitke u rezonatoru tijekom mjerenja).
- Test/Remote setup - omogućava trenutnu kontrolu nad laserom i osciloskopom; slanje raznih naredbi, skidanje trenutne valne forme s osciloskopa, eksport u *Microcal Origin*, postavljanje lasera u free run, ili ispaljivanje samo jednog pulsa. Ova stranica korisna je pri naštimavanju eksperimentalnog postava jer omogućava slanje pojedinačnih komandi.

- Scan start and monitoring - na ovoj stranici nalaze se samo dva grafa; lijevi prikazuje skinutu valnu formu u linearnoj skali, a desni prikazuje logaritamske vrijednosti samo onih podataka koji su odabrani za linearnu prilagodbu, te pravac koji najbolje opisuje te točke.
- Analysis - omogućava analizu prije snimljenih rezultata s drugim parametrima, njihovo učitavanje, ponovnu obradu, eksport u ASCII datoteke, eksport u *Origin*; omogućava odabiranje pojedine valne forme snimljene tijekom mjerenja i njen prikaz na grafu.
- NonUser setup - omogućava izmjenu parametara koji nisu direktno potrebni korisniku, poput brzina komuniciranja s uređajima, interne delay vrijednosti i slično.
- Hidden variables - isprva zamišljen kao tab na kom će se nalaziti sve varijable potrebne u izvršavanju programa a koje nisu potrebne korisniku tj. korisnik ih ne mora pratiti (razni brojači isl.). Pokazalo se na kraju da arhitektura programa omogućava obavljanje mnogo toga uz jako mali broj takvih varijabli. Tako da ih na ovom tabu ima prilično malo.

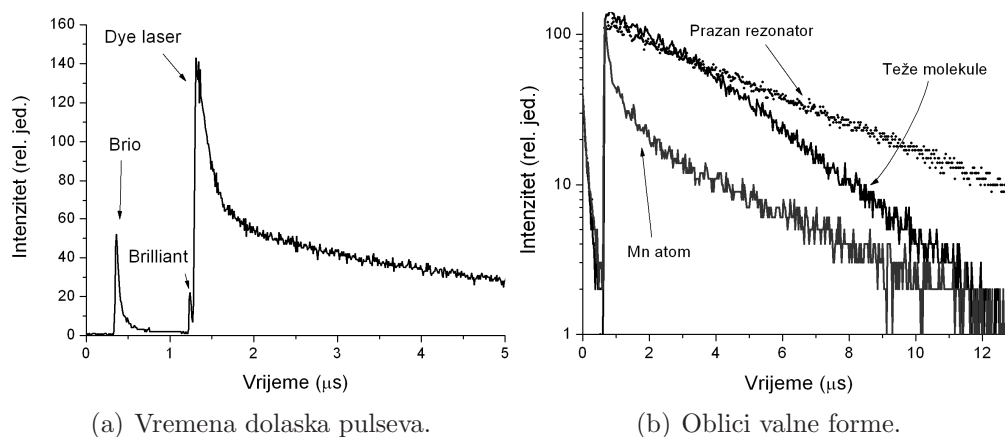
Poglavlje 3

Rezultati i diskusija

U ovom poglavlju izneseni su rezultati mjerenja apsorpcijskog spektra laserski ablatirane plazme s dva pulsa pomoću CRDS metode. Uzorak je bio mangan u vakuumu (tlak oko 10^{-3} Torr). Napravljeno je više takvih mjerenja kako bi se dobili preliminarni rezultati, provjerila praktičnost i pouzdanost programa; kao i da bi se uočile moguće greške, nepraktičnosti ili nove potrebne opcije u programu.

3.1 Valna forma

Slika 3.1(a) prikazuje valnu formu s osciloskopa u slučaju ablacije s oba lasera. Vremena kašnjenja na slici su 880 ns ($= 780 \text{ ns} + 100 \text{ ns}$ od delay generatora) za Brilliantu u odnosu na Brio; i 940 ns ($= 740 \text{ ns} + 200 \text{ ns}$ od delay generatora) za dye laser. Ono što se vidi kao signal od Bria i Brilliantu zapravo je emisija ablatirane plazme. Ta emisija je u području koje propušta interferencijski filter (oko 600 nm). U formi dye lasera vidi se apsorpcija (tj. valna forma je uzeta na valnoj duljini na kojoj postoji apsorpcija). Tipični oblici apsorpcije vide se na slici 3.1(b). Na ordinati su točke raspoređene logaritamski kako bi se lakše vidjela razlika. Prikazana je valna forma praznog oscilatora i dvije forme u kojima ima apsorpcije. Kako se meta nalazi ispod optičke osi rezonatora na konačnoj udaljenosti ($d = 1.5 \text{ mm}$), česticama iz plazme je potrebno određeno vrijeme da stignu do te osi. Što je čestica teža trebat će joj više vremena. Rađeni su radovi u kojima se mijenjanjem udaljenosti meta - optička os, određivala brzina čestica.[4, 5, 6] Na taj način primjena CRDS metode omogućava time-of-flight analizu sastava oblaka plazme; po-



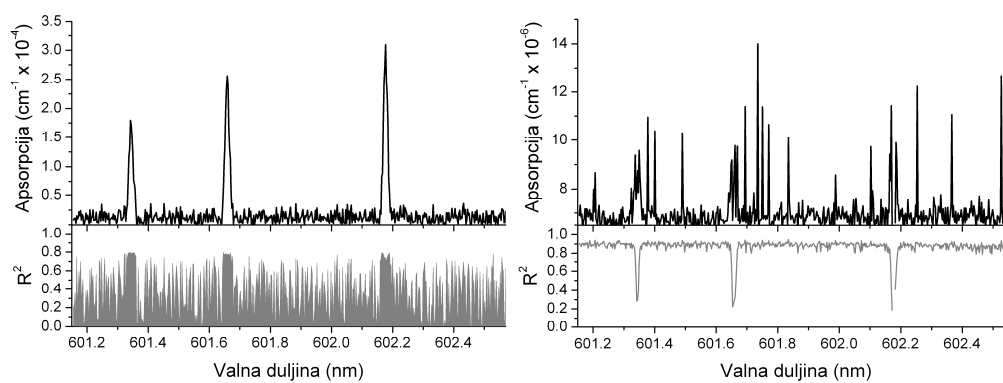
Slika 3.1: Valne forme. Slika (a) prikazuje oblik valne forme kada je okidanje osciloskopa postavljeno na Q-switch Brio lasera. Vide se vremena dolaska pulseva. Slika (b) prikazuje tri različita oblika valne forme: prazan rezonator, slučaj kasnije apsorpcije zbog sporih čestica i slučaj jake apsorpcije zbog lake čestice.

moću takvih mjerenja može se odrediti i ugrubo raspodjela brzina u plazmi. Na slici 3.1(b) jedna valna forma trne kao prazan rezonator sve do nekog vremena. Tada u os rezonatora ulaze teže čestice iz plazme i počinje apsorpcija (promijeni se nagib na logaritamskom prikazu). Druga valna forma prikazuje apsorpciju koju je uzrokovala lakša čestica (tj. ona s većom brzinom koja je jako brzo došla do optičke osi).

U ovim primjerima je bio slučaj da je lakša čestica uzrokovala veću apsorpciju, a teža manju, što naravno ovisi o atomskim (molekulskim) svojstvima čestice (Einsteinovi koeficijenti, naseljenost nivoa...), a ne o njenoj masi. Želim reći da je lako mogao biti slučaj da čestica koja kasnije stiže ima veću apsorpciju. Ovdje to nije bio slučaj zato jer je kao primjer odabrana vrlo jaka apsorpcija na atomskoj liniji mangana (601.664 nm). Treba uočiti i da je atom mangana jako brzo prošao kroz optičku os rezonatora pa je valna forma nakon njegovog prolaska nastavila trnuti istim tempom kao i za prazan rezonator. U slučaju laserske ablacije radi se o mjerenju apsorpcija koje se mijenjaju u vremenu tijekom boravka fotona unutar optičkog rezonatora. Radi se o tome da je vrijeme zadržavanja fotona u rezonatoru dugo (deseci mikrosekundi), a tijekom tolikog vremena gustoća apsorbirajućih čestica na osi rezonatora varira. Pokazano je da se takav slučaj može analizirati primjenom metode od-

abira kratkih vremenskih segmenata.[8] Dolazimo do novog problema: Kako odabrati područje u kojem ćemo raditi prilagodbu ako se pogodno područje premješta, i po dužini i po početku, za svaku česticu drukčije? Kako znati da je odabrano područje dobro?

3.2 Veza spektra i područja prilagodbe



(a) Kratko vrijeme prilagodbe na početku forme. (b) Dugo vrijeme prilagodbe na sredini forme.

Slika 3.2: Apsorpcijski spektri manganove plazme za različita područja prilagodbe. Slika (a) prikazuje spektar ako je odabrano područje prilagodbe 0 ns nakon dolaska pulsa dye lasera i područje traje 250 ns (10 točaka). Vide se atomske manganove linije.[14] Slika (b) prikazuje spektar manganove plazme za područje prilagodbe od 4375. nanosekunde u trajanju od 2500 ns (100 točaka). Apsorpcija molekula je dva reda veličine manja! (skala na ordinati). Prikazani su i R^2 parametri za svaku prilagodbu.

Slika 3.2 prikazuje koliko se mogu razlikovati dobiveni spektri u ovisnosti o području na kojem se radi prilagodba. Vidi se (slika 3.2(a)) da u početku valne forme dominiraju tri manganove linije (601.350 nm, 601.664 nm i 602.180 nm). S obzirom da u rezonator ne dolazi čisti TEM_{00} mod, ostali modovi u pravilu kvare valnu formu. Kada dođe do apsorpcije, uzorak pokupi i neodgovarajuće modove, ali najjači preživi. Zbog toga se na područjima gdje dolazi do apsorpcije valna forma popravi (ima manje nepravilnosti tj. sve više

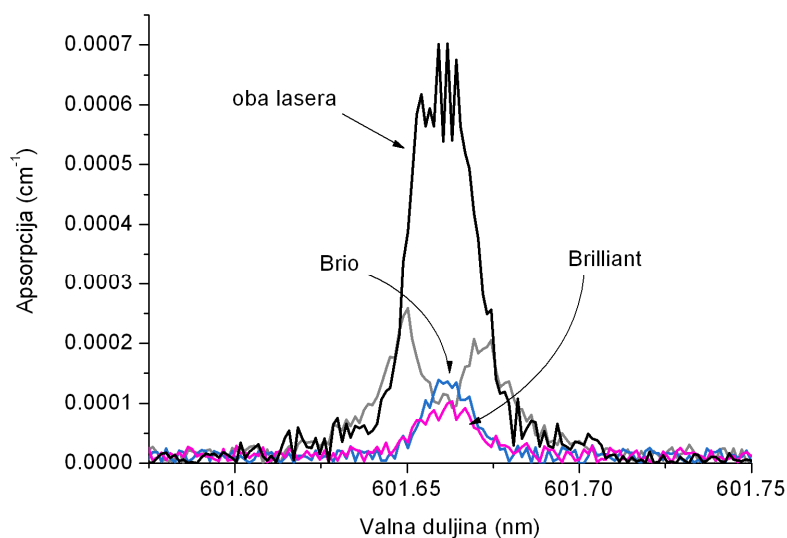
liči na eksponencijalu). Poboljšana valna forma znači bolji korelacijski koeficijent (R^2), što se na donjem grafu slike 3.2(a) lijepo vidi. Promatranjem ponašanja korelacijskog koeficijenta može se odrediti optimalna širina vremenskog segmenta.

Na slici 3.2(b) prikazan je spektar koji se dobije ukoliko se promatra valna forma u kasnijim trenucima. Na valnim duljinama na kojima su bile atomske linije korelacijski koeficijent je znatno pokvaren (pada u vrijednosti), što je i razumljivo jer je apsorpcija u centru atomske linije “pojela” valnu formu prije ovog područja prilagodbe. Stoga se na tim valnim duljinama u biti uglavnom radi o prilagodbi parametara na šum. Zato R^2 pokazuje “minimum” vezan uz centar linije. Interesantno je da se taj minimum u R^2 može iskoristiti za određivanje centra atomske linije (i time kalibraciju spektra) u trenutku kada atoma koji su proizveli apsorpciju više nema u rezonatoru (vidi sliku 3.1(b)). Zbog atomskih linija ne možemo znati imaju li možda molekule na tim valnim duljinama linije (posebno ukoliko su atomske linije jako široke). Ovaj problem može se lako zaobići tako da se dye puls ispali na početku područja prilagodbe u kojem se promatraju molekule (tj. maknemo dye puls na malo kasnije vrijeme kada već prođu atomi čije bi linije “pojele” signal, onda možemo vidjeti imaju li molekule linije na tom mjestu jer one tek stižu u os rezonatora). U tom slučaju bilo bi potrebno ponoviti mjerenje za svaki bitno različiti početak intervala prilagodbe na mjestima gdje je u ranijim vremenima bilo apsorpcije.

Moram napomenuti da je običaj prije mjerenja na uzorku napraviti čišćenje mete ablacijom, što ovdje nije bilo napravljeno. Gotovo je sigurno da je spektar na slici 3.2(b) posljedica raznih molekula i atoma iz nečistoća (iako je moguća i Mn_2 molekula). Naravno, mjerenje je ponovljeno nakon čišćenja i tada ovakvog spektra nije bilo, ali ovdje je kao ilustracija važnosti intervala prilagodbe namjerno izabran ovaj primjer. Uočljiva je znatno manja apsorpcija na desnom grafu (skala na ordinati je prešla iz 10^{-4} cm^{-1} na 10^{-6} cm^{-1}) što pokazuje raspon u osjetljivosti CRDS metode.

3.3 Laserska ablacija s dva pulsa

Na slici 3.3 vidi se razlika u spektru oko manganove linije (601.664 nm) za slučajeve laserske ablacije s po jednim laserom i s oba lasera. Uočljivo je značajno pojačanje apsorpcije pri ablaciji s oba lasera, za razliku od ablacija samo s po jednim pulsom. Apsorpcija je bila toliko jaka da je bilo potrebno skratiti područje prilagodbe (vremensko usrednjavanje). Siva linija na grafu prikazuje profil atomske linije s oba pulsa ukoliko područje prilagodbe ostavimo isto kao i kada se radi o ablaciji samo jednim pulsom. U prikazanom slučaju vrijeme kašnjenja 532 nm lasera (Brilliant) u odnosu na Brio bila je 780 ns (Q-switchevi su bili direktno spojeni), a CRDS mjerenje je obavljeno neposredno nakon drugog pulsa. Treba imati na umu da je snaga Brilliant lasera bila znatno smanjena (Q-switch mu je okidan 140 μ s nakon bljeskalica, umjesto optimalnih 190 μ s).



Slika 3.3: Usporedba profila manganove linije o vrsti ablacije. Siva linija prikazuje oblik linije s dva laserska pulsa s loše odabranim (preširokim) područjem prilagodbe

Poglavlje 4

Zaključak

U ovom radu opisana je ukratko CRDS metoda. Napravljen je program u LabVIEW okruženju zadužen za automatizaciju mjerenja i analizu CRD spektroskopije laserski ablatirane plazme s dva laserska pulsa. Napravljen je kraći osvrt na probleme koji se mogu pojaviti pri izvođenju takvog eksperimenta. Sam program je prevelik da bi u ovom radu bio objašnjen do svih detalja (sub-vievi), no dat je pregled osnovne arhitekture programa koja je izložena u dodatku rada. Program omogućava po prvi puta kontrolu i vremensko usklađivanje tri laserska pulsa. Također, u odnosu na dosadašnje programe za upravljanje eksperimentom[2], implementacija LabVIEWa omogućila je istovremeno uključivanje analize valnih formi tokom mjerenja. Usprkos dodavanju radnji program radi brže nego prije. Analiza je sada nekoliko puta brža i preglednija, a već su uočene dodatne opcije koji bi trebalo dodati programu kako bi se još olakšao rad i interpretacija rezultata, koje ipak na kraju, kao i uvijek, mora provoditi čovjek. U radu je također predstavljen i CRD spektar dvopulsno ablatirane plazme (prvi takav, koliko znamo). Uočeno je pojačanje linije uslijed dvopulsne ablacije kao i kod emisije i to za otprilike iste faktore (desetak puta). Sasvim sigurno će ovakvo promatranje fenomena pojačanja linija u spektru dati dodatna pojašnjenja procesa koji se javljaju u eksperimentima s dva laserska pulsa. Eksperimenti s dvopulsnom ablacijom osim što poboljšavaju emisijsku LIBS metodu pokazuju i značajno pojačanje proizvodnje nanočestica u laserskoj ablaciji, a procesi koji do toga dovode i razlozi za to nisu još dovoljno poznati. Analiza laserski inducirane plazme apsorpcijskom metodom dat će novi uvid u dvopulsnu ablaciju, a nadamo se i neke nove rezultate.

Dodatak A

Što je LabVIEW?

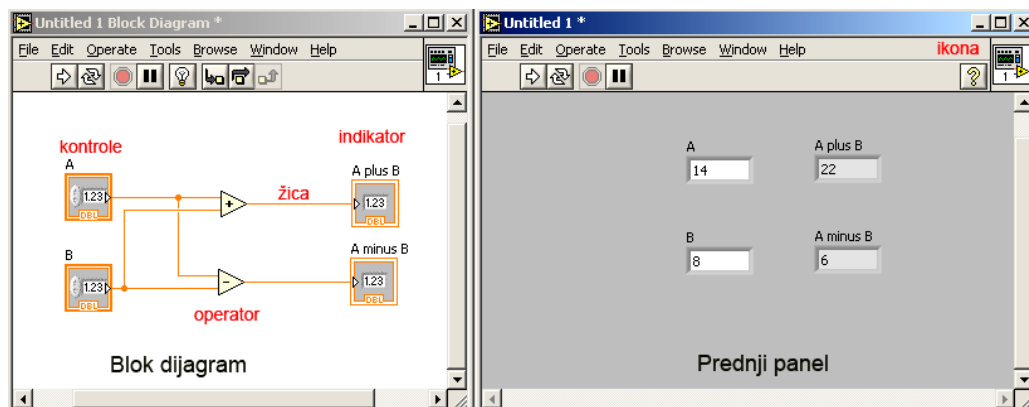
LabVIEW (*Laboratory Virtual Instrumentation Engineering Workbench*) je platforma i razvojno okruženje za vizualni programski jezik *National instrumentsa* nazvan G.[15] Originalno se pojavio za Macintosh platformu 1986. godine, koristi se za pribavljanje, obradu i pohranu podataka, kontrolu instrumenata i industrijsku automatizaciju na mnoštvu platformi (MS Windows, UNIX, Linux, Mac OS). U distribuciju LabVIEWa uključeno je mnoštvo alata i programskih biblioteka, koje bitno olakšavaju rad. Alati olakšavaju komunikaciju s hardverom putem mnoštva protokola koje korisnik ne mora poznavati u detalje, ili alati rade jednostavne stvari koje su potrebne gotovo svakom ozbiljnijem programu pa se korisnik ne mora zamarati s programiranjem alata nego jednostavno iskoristi već gotove.[16]

G je programski jezik toka podataka (dataflow language). To je zapravo njegovo možda najbitnije svojstvo i razlika u odnosu na druge jezike, a znači kolokvijalno rečeno: “stvari se ne izvršavaju dok svi potrebni parametri nisu dostupni čvoru”. To je bitno drukčija paradigma od sekvencijalnog izvršavanja naredbi. Kao svaki drugi jezik, tako i G zahtjeva vrijeme i iskustvo kako bi se naučilo “razmišljati u njemu”. [17] Kako se može dogoditi da više čvorova istovremeno ima dostupno sve potrebne parametre G je inherentno sposoban za paralelno izvršavanje zadataka. Za svaki takav čvor LabVIEW koristi hardverski raspoloživa sredstva (multi-threading, multi-processing). Programeri skloniji programiranju u konvencionalnim sekvencijalnim programskim jezicima tvrde kako je stoga LabVIEW sklon neželjenim utrkama (race conditions), smatraju da do problema može doći lako jer u nekim slučajevima se dio koda koji bi se trebao izvršavati poslije nekog drugog može izvršiti prije

samo zato što ima dostupne sve parametre, tj. može doći do slučajnog izokretanja poretka izvršavanja određenih čvorova zbog toga što je neki čvor svoj posao obavio ranije. U stvarnosti ta miskoncepcija o G-u dolazi od nerazumijevanja paradigme toka podataka. Problem utrke se obično rješava spajanjem ulaza i izlaza za greške. Jednostavnijim riječima, svaki čvor ima (može, ne mora) kao ulazni i izlazni podatak varijablu povezanu s greškom. Ukoliko izlaz jednog čvora spojimo s ulazom drugog, tada ne može doći do izvršavanja drugog ukoliko prvi ne javi tom linijom da li se pri njegovom izvršavanju dogodila greška. Takvim povezivanjem paradigma s tokom podataka ekvivalentna je sekvencijalnom izvršavanju u drugim jezicima (C, Fortran, Visual Basic, Python).

Glavna prednost toka podataka je grafička reprezentacija: čvorovi su obično grafičke ikone, podaci teku žicama od jednog čvora do drugog. U biti, dvodimenzionalno predstavljanje bolje iskorištava ljudsku mogućnost vizualizacije. Čvorovi se u LabVIEW terminologiji nazivaju virtualnim instrumentima (**vi**). Dio koda može se po potrebi skupiti u sub-vi, tj. veći dio koda predstavimo jednom ikonom, i program postaje pregledniji. Svaki **vi** ima dvije komponente, blok dijagram (block diagram) i prednji panel (front panel). Kontrole i indikatori na panelu omogućavaju korisniku unos podataka i kontrolu izvršavanja, te mu pružaju informacije o izlaznim varijablama (vrijednosti, grafički prikaz i sl.). Panel je kontrolna ploča za korisnika i korisnik u biti jedino s njom i radi. Blok dijagram je shematski prikaz programa (na njemu se nalaze sub-vievi i žice). U njemu programer konstruira algoritam a ulaz (input) i izlaz (output) uredno prikazuje na prednji panel. To znači da se svaki **vi** može samostalno izvršiti i isprobati kao mali program, prije negoli ga ugradimo u veći program kao sub-vi.

Grafički pristup omogućava neprogramerima da jednostavno izgrade program samo dovlačeći **vieve** i spajajući ih žicama. Za kompleksne algoritme ograničavajuća je mogućnost G-ove apstrakcije i statička priroda (G je ekvivalentan C programu s memorijskim menadžmentom ali bez pokazivača (pointera)). To može sputavati izradu programa za programera koji je vješt u programiranju s na primjer C++ programskim jezikom, nenaviklom i nepoznatom s načinima rješavanja problema u G-u. Čest prigovor je da je i održavanje programa nadljudski napor čak i za osobu koja je program razvila, a kamoli za drugog programera, ali to vrijedi za praktički sve jezike. Jedna od najčešćih arhitektura aplikacija je proizvođač/potrošač arhitektura. Izm-



Slika A.1: Primjer jednostavnog **via**. Lijevo je blok dijagram, a desno prednji panel s dvije kontrole i dva indikatora

jenjeni oblik te arhitekture korišten je i u ovom radu. Takve arhitekture lako je konstruirati u LabVIEWu, a daleko su preglednije i lakše se debugiraju i testiraju od ekvivalentnih sekvencijalnih arhitektura.

Glavna prednost LabVIEWa pred drugim razvojnim okruženjima je podrška pristupanju instrumentima. Driveri i komandni **vievi** za mnoge instrumente dolaze s LabVIEWom ili se mogu skinuti sa internet stranica proizvođača uređaja. Tako, na primjer, da biste neki osciloskop postavili na drugu vremensku skalu, nerijetko je dovoljno otići na stranice proizvođača osciloskopa, skinuti **vieve**, postaviti željeni **vi** na blok dijagram i spojiti na njega željeni parametar te pokrenuti program. Glavni cilj je da osoba s malo iskustva u programiranju može konstruirati program koji komunicira s njenim instrumentom za relativno kratko vrijeme.

Što se tiče performansi, LabVIEW ima compiler koji izrađuje stvarni kod za računalu tj. grafički kod se ne interpretira već compileira. Compileiranje se odvija prilikom spremanja željenog **via** ili prilikom njegovog pokretanja. Izvršni kod može biti neznatno sporiji od ekvivalentnog napravljenog u C-u i to uglavnom zbog reduciranih mogućnosti optimizacije, no to je zapravo mala cijena s obzirom na razliku u lakoći izrade programa.

Najveće kritike LabVIEWu su te da je on vlasništvo *National Instrumentsa*, za razliku od uobičajenih zajedničkih programskih jezika (C, FOR-

TRAN). LabVIEW standard ne propisuje nikakva treća strana (poput ANSI), pa nabavljanje potpuno kompatibilne LabVIEW platforme zahtjeva kupnju proizvoda od *National Instrumentsa*. Distribucija programa stvaranih pod LabVIEWom je nezgodna i ograničena licencama. U novije vrijeme LabVIEW zahtjeva za pokretanje run-time engine i distribucija samostalne izvršne datoteke (.exe) nije moguća. LabVIEW kod se može compileirati koristeći “Application builder” i tako stvorena izvršna datoteka može se slobodno distribuirati neograničen broj puta, ali resultantni program u pravilu zahtjeva run-time verziju LabVIEWa na ciljnom računalu. Iako se i run-time engine i potrebne biblioteke mogu slobodno koristiti i distribuirati s izvršnom datotekom, ne postoji jednostavan način za distribucije samostojeće, nezavisne izvršne datoteke.

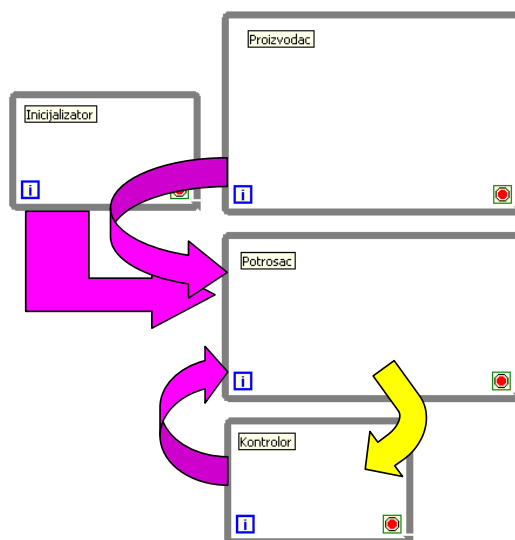
Dodatak B

Arhitektura programa

Program za kontrolu uređaja, vršenje mjerenja i analizu podataka izrađen je u spomenutoj proizvođač/potrošač arhitekturi.¹ Shema je prikazana na slici B.1. Petlje ću zvati imenima kao i na slici: Proizvođač, Potrošač, Inicijalizator i Kontrolor. Naravno, njihova imena povezana su s njihovom ulogom. Sve petlje komuniciraju s Potrošačem. Potrošač je zapravo jedini koji obavlja posao. Sve petlje naređuju Potrošaču da nešto obavi. Komunikacija se obavlja preko Reda (Queue). Proizvođač, Inicijalizator i Kontrolor mogu na Red staviti zadatak. Potrošač se izvršava samo kada netko od te tri petlje stavi zadatak na Red. Potrošač uzima zadatak s Reda i izvršava ga. U ovom programu Potrošaču se šalju nizovi riječi (Strings). Tip podatka koji se šalje na Red može se proizvoljno odabrati (može biti složen). Ovdje je zbog jednostavnosti odabran string. Petlje koje stavljaju naredbe na Red mogu poslati koliko god žele naredbi. Potrošač će ih izvršavati onim redoslijedom kojim su stavljanje na Red (FIFO - First In First Out) i onom brzinom kojom on to može. Sve petlje mogu natrpati Red s onim što treba obaviti, a Potrošač će ih obavljati jednu po jednu i skidati s Reda.

Za sada sve izgleda jednostavno. Imamo četiri petlje; jedna izvršava naredbe koje se nalaze na nekom Redu, a ostale tri popunjavaju Red sa

¹Ovo poglavlje više je zamišljeno kao referenca u slučaju da nešto programu treba dodati, izmijeniti ili zaključiti zbog čega se javlja greška (ukoliko nekakva iskrasne). Nisam zamislio da bi netko trebao ovo poglavlje pročitati i iz njega potpuno shvatiti način funkcioniranja programa. To je unatoč brojnim slikama, bez otvorenog blok dijagrama u LabVIEWu ispred čitatelja, uzaludan posao. Potrudio sam se da poglavlje ima tok misli i ocrta ugrubo što se zapravo događa na većoj skali programa.

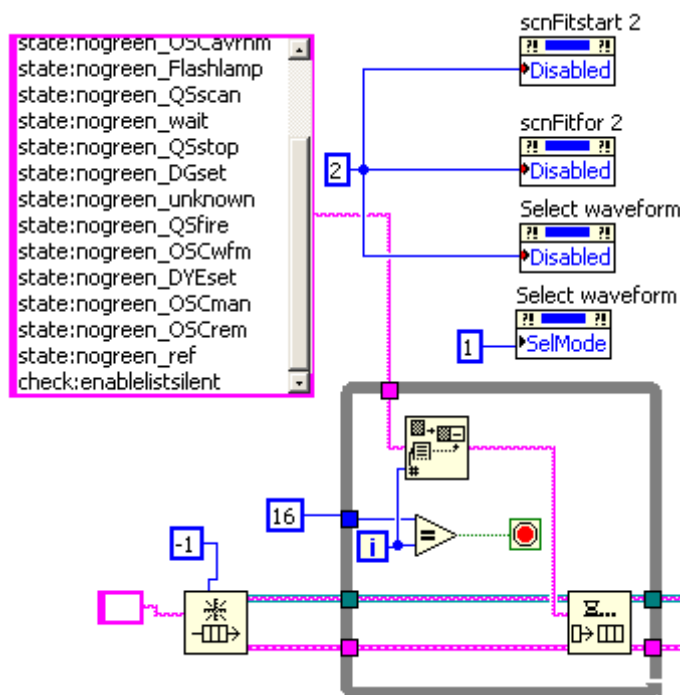


Slika B.1: Shema arhitekture programa. Klasična proizvođač/potrošač arhitektura s dvije dodatne petlje. Označeni su smjerovi komunikacije među petljama. Rozom bojom string, žutom bojom double precision float.

zadacima. Prva petlja, Inicijalizator, pošalje početne naredbe prilikom pokretanja programa, a kada korisnik unosi podatke Proizvođač šalje zadatke Potrošaču. Postavlja se pitanje: kada korisnik naredi pokretanje mjerenja, zašto ne bismo natrpali Red sa svim zadacima koje će u tom mjerenju trebati obaviti Potrošač i gotovo? Ako to možemo, koja je onda uloga Kontrolora? Postoji još jedna komplikacija. Nažalost, iako se na Red može staviti neograničen broj događaja, iskustva programera u LabVIEWu su pokazala da nije najsretnije rješenje zatrpavati Red (Queue strukturu). Kontrolor stoga ima ulogu zaobilazanja mogućih problema tijekom izvršavanja programa. Postoji još jedan red, zovimo ga Red2. Red2 su zadaci koje treba obaviti Kontrolor, a zadaje ih Potrošač. Zamisao je sljedeća. Kako se ne bi zatrpavao Red, Potrošač će Kontroloru javiti kad je spreman za sljedeći korak u mjerenju, tako što će mu zadati zadatak na Red2 (kao da “kaže”: “Evo tebi zadatak: Što sada da radim?”), a Kontrolor će onda na Red poslati niz zadataka koje Potrošač treba obaviti. Kao zadnji zadatak Potrošaču, poslati će da se opet javi Kontroloru kad bude obavio sve. Tako Red nikad nije veći od broja zadataka koje treba obaviti u jednom koraku mjerenja.

B.1 Inicijalizator

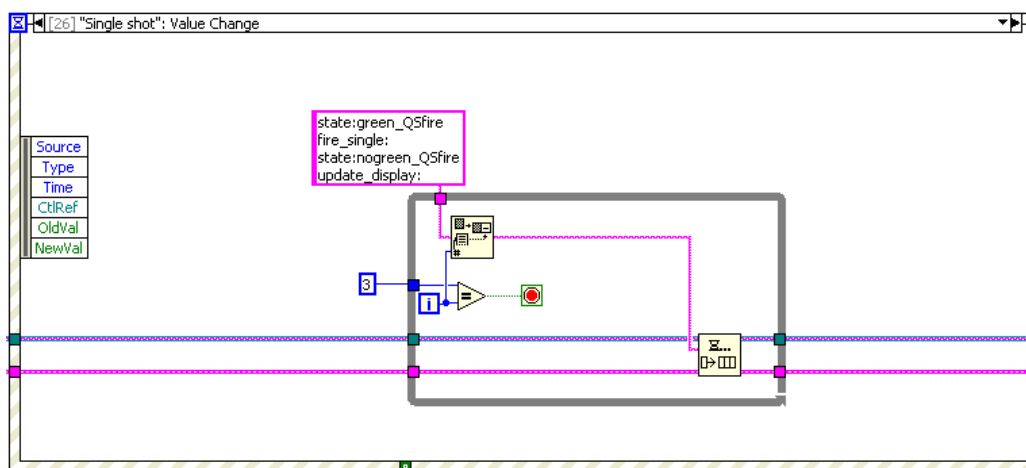
Najjednostavnija petlja Inicijalizator (slika B.2) ima jednostavnu ulogu postavljanja programa u početno stanje. Inicijalizator se izvršava samo jednom. Kreira se Red (definira se neograničen broj mogućih naredbi u Redu te da su članovi Reda stringovi). Petlja se izvršava 17 puta (brojač i ide od 0 do 16) i svaki puta se stavlja neki string u Red. Naredbe su uglavnom da se u tabeli parametara postave sve oznake stanja na normalnu boju (state:nogreen...), a zadnja naredba (check:enablelistsilent) naređuje Potrošaču da provjeri ima li u direktoriju odabranom za analizu datoteka tipa *.frm* i da, ako ima, omogući izbornike parametara za obradu rezultata mjerenja, a ako nema neka o tome ne obavještava korisnika. Dio vidljiv na slici koji se ne nalazi u petlji također se izvršava samo jednom. Taj dio postavlja (u dijelu za analizu) parametre za prilagodbu i listu datoteka onemogućenima za mijenjanje/selektiranje, inače dolazi do pokušaja čitanja nepostojeće datoteke. Isto tako zadaje da je na listi datoteke moguće selektirati samo jednu datoteku (ne može se s tipkama Control ili Shift odabrati više od jedne).



Slika B.2: Blok dijagram Inicijalizatora.

B.2 Proizvođač

Proizvođač je petlja zadužena za tzv. GUI (Graphical User Interface) i u sebi sadrži *Event structure* (slika B.3). Ta struktura se izvrši samo kada korisnik



Slika B.3: Blok dijagram od *Event structure* koja se nalazi unutar petlje i koja je u biti Proizvođač jer *Event structure* mora biti unutar petlje.

nešto promijeni na panelu. Na primjer, ako korisnik unese novu valnu duljinu za dye laser izvršava se slučaj: “Initial wavelength: Vaule Change”. *Event structure* u petlji donosi jednu ogromnu prednost, petlja se izvršava samo (!) kada se dogodi jedan od slučajeva na koje pazi *Event structure*. Time se štedi procesorsko vrijeme, jer se ništa ne događa dok korisnik nešto ne napravi. *Event structure* nadzire pomoću ukupno 28 raznih blok dijagram shema sve što je predviđeno da korisnik može napraviti. Sve sheme su slične i šalju Potrošaču pripadne naredbe ovisne o tome koju tipku je kliknuo korisnik, ili koji parametar je promijenio. Na slici B.3 se vidi primjer kada korisnik klikne tipku “Single shot”. Na Red se stavljaju četiri naredbe:

- state:green_QSfire - Potrošač zazeleni natpis QSfire u tabeli parametara
- fire_single: - Potrošač će poslati naredbu laseru za ispaljivanje jednog pulsa
- state:nogreen_QSfire - Potrošač zazeleni natpis QSfire u tabeli parametara

- `update_display`: - Potrošač ispiše ponovno sve parametre u tabeli parametara

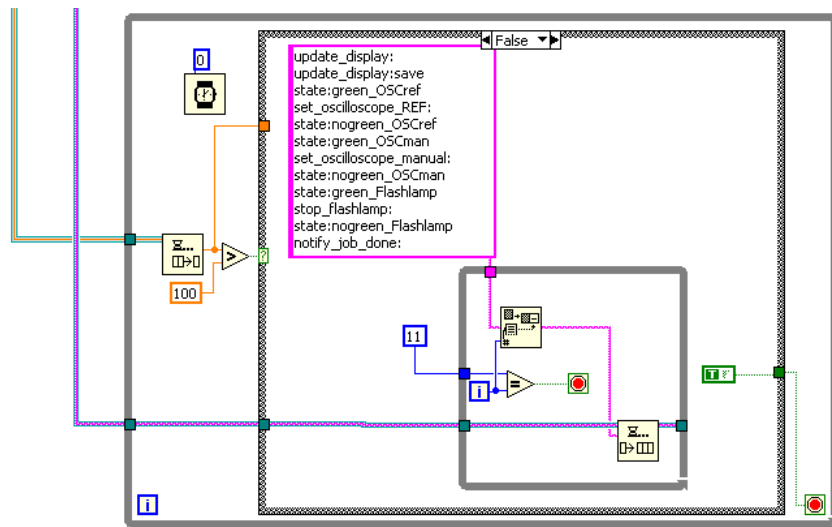
U nekim slučajevima Proizvođač prije slanja naredbi obavi neke provjere ili sitne račune, da bi odredio koje naredbe treba poslati. To su uglavnom jednostavne stvari, poput zbrajanja ili množenja. Sve kompliciranije stvari prepuštene su Potrošaču jer on ima “uvid” u sve parametre.

B.3 Kontrolor

Kontrolor je prilično jednostavna petlja. Kao zadatak na Red2 on ne dobiva string nego realan broj (double precision floating point). Taj broj je zapravo valna duljina koju treba preskenirati. Istu tu valnu duljinu Kontrolor vraća Potrošaču unutar stringa u posljednjoj naredbi nakon što je na Red stavio sve što Potrošač treba obaviti. Ukoliko se na Redu2 nalazi broj manji od 100 (proizvoljno odabrano) onda Kontrolor zna da je zapravo kraj mjerenja (jer dye laser ne može ići tako nisko) i naređuje izvršavanje naredbi poput gašenja flashlampi lasera, vraćanje osciloskopa iz daljinskog moda, obavješćivanje korisnika da je mjerenje gotovo i sl. Umjesto realnog broja Kontroloru se uz manje dodatne modifikacije mogla slati i obična logička varijabla (true ako treba nastaviti sken, false ukoliko ne treba). No, onda bi se negdje morala pamtit i varijabla koja je trenutna valna duljina preskenirana. Ovako se ta valna duljina proslijedi od Potrošača Kontroloru, a Kontrolor je vrati nazad nakon što je prije toga Potrošaču naredio još neke zadatke.

B.4 Potrošač

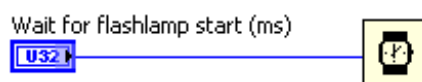
Potrošač je bez sumnje najkompliciraniji dio programa, i ujedno najbitniji. On uzima naredbe s Reda, izdvaja dijelove naredbi i izvršava ih. Također, ukoliko se radi mjerenje, na kraju svakog ciklusa javlja Kontroloru do kuda je došao. Naredbe su podijeljene na dva dijela. Riječi prije prve dvotočke, i riječi poslije prve dvotočke. Svaka naredba trebala bi imati dvotočku barem negdje. Ukoliko to nije slučaj onda će Potrošač izvršiti predodređeni (default) slučaj, a to je obnavljanje ispisa na tabeli parametara. U trenutnoj verziji Potrošač razlikuje 31 naredbu koju može primiti. S obzirom da su one bitne, svaka će biti pojedinačno obrađena. Vrijedi spomenuti da se unutar Potrošača i Kontrolora nalaze dvije Wait naredbe. Naredbe imaju zadatak čekati nula



Slika B.4: Blok dijagram Kontrolora za slučaj kada je Proizvođač poslao vrijednost manju od 100.

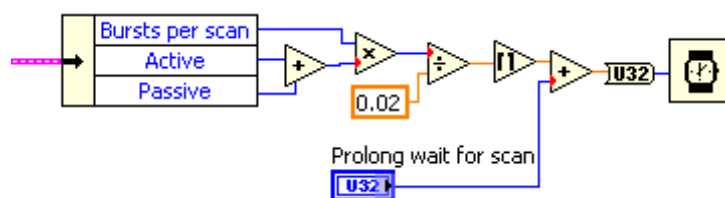
milisekundi. Možda izgleda zbunjujuće stavljati čekanje od nula, ali to je standardni trik u LabVIEWu za prepuštanje kontrole. Ukoliko netko drugi čeka na procesorsko vrijeme petlja koja ima čekanje od nula pri izvršenju te naredbe miče se na “kraj reda” za izvršavanje. Ukoliko je netko drugi čekao na red onda se on izvršava. Ukoliko nije, tada je petlja s čekanjem opet prva u prioritetnom redu i obavlja svoje. Potrošač i Kontrolor imaju čekanje nula kako bi Proizvođaču dopustili da napravi ono što treba kada korisnik klikne na neku tipku. Ovo je posebno bitno ukoliko korisnik želi zaustaviti izvršavanje kompletnog programa, a inače bi se moralo čekati da Proizvođač i Kontrolor obave svoje i potom prepuste kontrolu. Slijedi popis naredbi koje može primiti Potrošač. Sve ove naredbe mogu primiti dodatne podnaredbe koje dolaze nakon dvotočke. Primanje naredbi realizirano je preko Reda. Naredbe stižu kao stringovi (koji sadrže dvotočku). Program pogleda dio stringa prije prve dvotočke i to šalje na Case strukturu koja onda izvršava pripadni blok dijagram.

wait_for_flashlamp naredba za čekanje nakon starta bljeskalice. Prije prvog pulsa obično mora proći 8 sekundi zbog termalizacije rezonatora, ovaj dio Potrošača izvršava čekanje. Nažalost, kontrola izvršavanja ostaje cijelo vrijeme na Potrošaču tijekom izvršavanja ove naredbe.



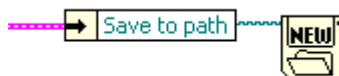
Slika B.5: Blok dijagram naredbe wait_for_flashlamp.

wait_for_laser_scan naredba za čekanje za vrijeme pucanja lasera. Na osnovu parametara Q-switcha izračuna se koliko traje ispaljivanje pulseva, tom vremenu se doda još neko malo vrijeme kako bismo bili sigurni.



Slika B.6: Blok dijagram naredbe wait_for_laser_scan.

create_directory naredba Potrošaču da kreira direktorij u kojem će biti spremeni rezultati mjerenja tj. valne forme za svaku valnu duljinu. Ime direktorija je isto kao i ime datoteke u koju se spremaju preliminarni rezultati obrade.



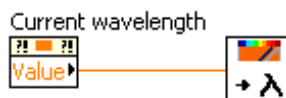
Slika B.7: Blok dijagram naredbe create_directory.

notify_job_done naredba za otvaranje poruke (messagebox) s tekстом "Done!" i jednom tipkom na kojoj piše "OK". Ova naredba poziva se na kraju mjerenja, a njeno izvršenje naredi Kontrolor.



Slika B.8: Blok dijagram naredbe notify_job_done.

set_dye_to_current naredba za postavljanje dye lasera na valnu duljinu koju ima varijabla *current wavelength*. Vrijednost varijable *current wavelength* mijenja naredba tell_up_proceed_to.



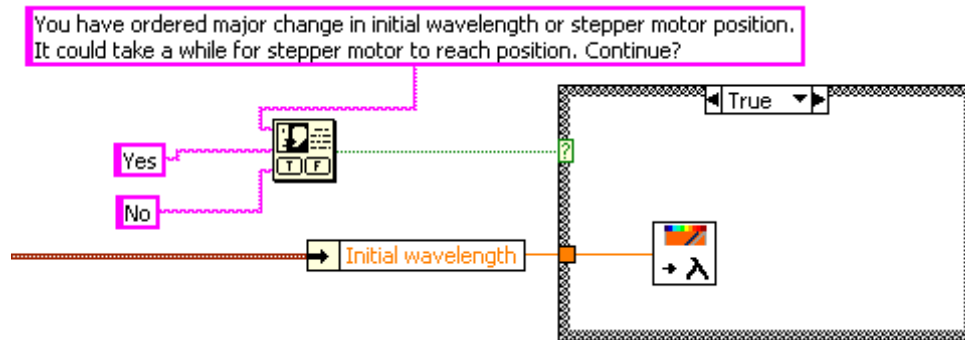
Slika B.9: Blok dijagram naredbe set_dye_to_current.

initial_wavelength_change_low naredba za postavljanje dye lasera na početnu valnu duljinu koja je odabrana. Ova naredba izvršava se čim korisnik promijeni vrijednost početne valne duljine. Ukoliko je korisnik napravio veću promjenu (šta znači da će laseru trebati više vremena) onda se poziva naredba initial_wavelength_change_high.



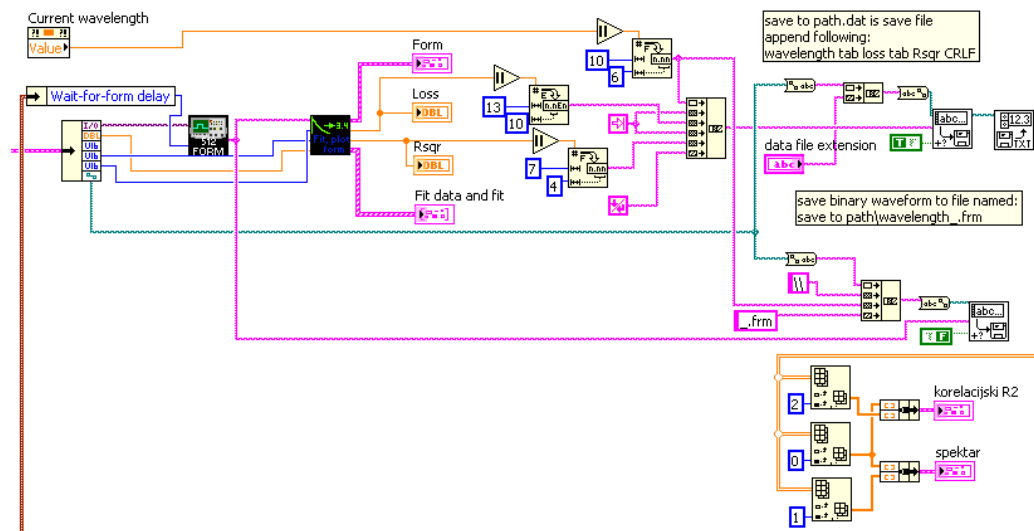
Slika B.10: Blok dijagram naredbe initial_wavelength_change_low.

initial_wavelength_change_high naredba upozorava korisnika da bi promjena početne veličine mogla potrajati i pita ga želi li ipak nastaviti. Ukoliko korisnik potvrdi promjenu dye laser se postavlja na željenu valnu duljinu, a ako korisnik kaže da ne želi nastaviti vraća se sve na prethodnu valnu duljinu (u ovom slučaju laseru se ne šalje nikakva naredba).



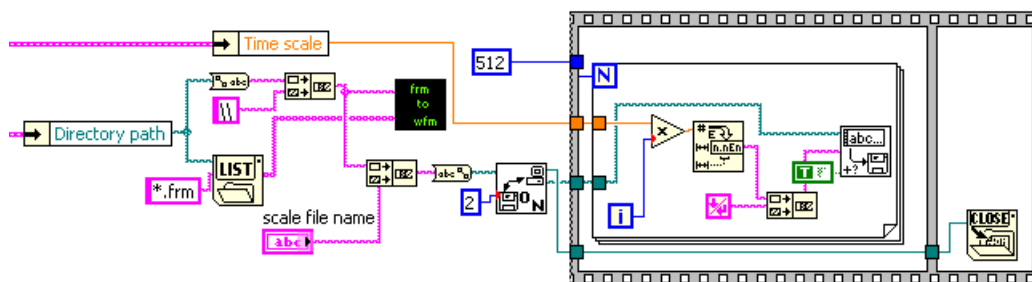
Slika B.11: Blok dijagram naredbe initial_wavelength_change_high.

get_scanned_waveform naredba skida valnu formu s osciloskopa, obavlja analizu sa zadanim parametrima, crta na grafove valnu formu i logaritamski prikaz podataka nad kojima se radi prilagodba, konvertira vrijednosti u stringove, zapisuje u datoteku rezultat, snima valnu formu u pripadni direktorij kao datoteku s nastavkom *.frm* (prije toga kreira ime za datoteku), crta trenutni i dosadašnje rezultate na grafove spectrum i Rsqr (dosadašnji rezultati pročitaju se iz datoteke s rezultatima u koju se netom dodala nova vrijednost).



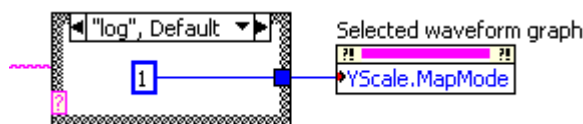
Slika B.12: Blok dijagram naredbe get_scanned_waveform.

Exportformsascii naredba konvertira sve valne forme iz binarnog zapisa (*.frm*) u ASCII zapis (*.wfm*) te kreira datoteku “Oskala.wfm” u kojoj se nalazi kolona s vremenskom skalom. Pri konverziji se uzima da je vremenska skala mjerenja bila ista kao i ona koja je trenutno namještena!



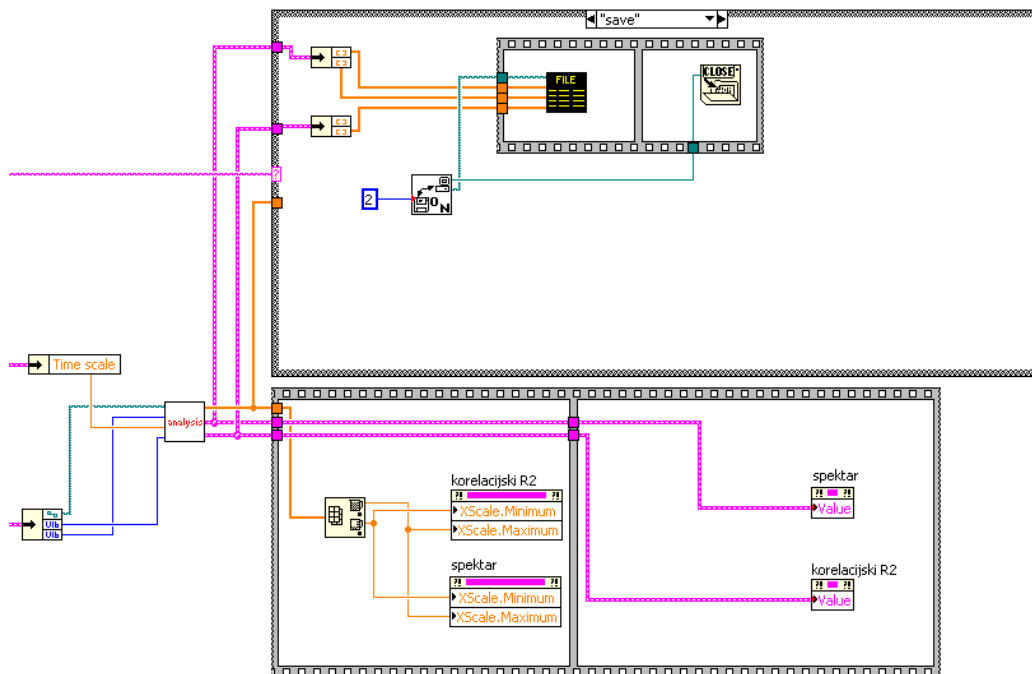
Slika B.13: Blok dijagram naredbe Exportformsascii.

set_waveform_scale naredba mijenja skalu na grafu koji prikazuje valnu formu na logaritamski iz linearne ili obratno. Gleda se dio poslan iza dvotočke, ukoliko je taj dio glasio “lin” graf se postavlja na linearnu skalu (naredba: set_waveform_scale:lin), a ukoliko je on “log” (naredba: set_waveform_scale:log) graf se postavlja na logaritamsku.



Slika B.14: Blok dijagram naredbe set_waveform_scale.

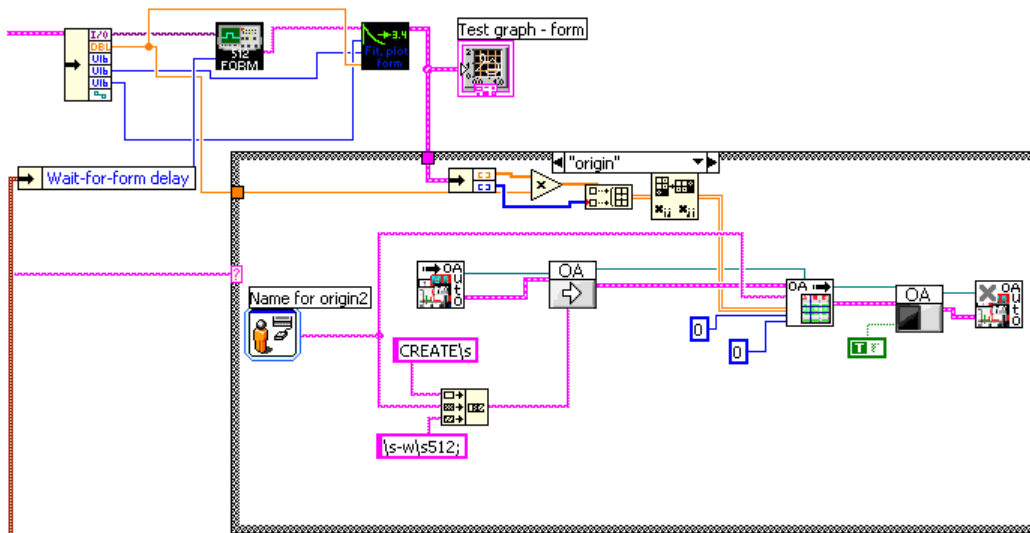
Analyze ovo je jedna od kompliciranijih naredbi koje izvršava Potrošač. Naredba prima još parametara iza dvotočke, i ovisno o njima (save, updatelistbox, origin) radi više zadataka. Ukoliko dodatna naredba nije une-sena tada se obrade sve valne forme u zadanom direktoriju pomoću zadanih parametara. Grafovima koji prikazuju spektar i R^2 zadaju se najmanja i najveća valna duljina i crtaju se rezultati. Ako je naredba pozvana s Analyze:save tada se rezultat analize snima u tekstualnu datoteku (otvori se prozor koji pita korisnika gdje želi i pod kojim imenom spremiti rezultate). Ako je naredba pozvana s Analyze:updatelistbox tada se obnavlja popis valnih duljina za koje postoji valna forma. Ako je naredba pozvana s Analyze:origin valna forma se eksportira u Origin program kao novi worksheet. Proračun vremenskog stupca odvija se s trenutnom vremenskom skalom osciloskopa!



Slika B.16: Blok dijagram naredbe Analyze:save.

get_waveform naredba za skidanje trenutne valne forme s osciloskopa i prikazivanje na grafu. Ukoliko je dodana opcija “origin” onda se valna forma skida s osciloskopa i eksportira u Origin. Ova naredba se ne koristi tijekom mjerenja. Poziva se s prednjeg panela na stranici “Test/Remote setup”.

Ova naredba koristi trenutnu postavku vremenske skale (u programu, ne osciloskopa). Ukoliko se eksportira u Origin, otvara se upit za ime nove stranice (worksheet) koja će biti napravljena u programu.



Slika B.17: Blok dijagram naredbe get_waveform.

set_oscilloscope_AVM postavljanje osciloskopa u “average mode”.



Slika B.18: Blok dijagram naredbe set_oscilloscope_AVM.

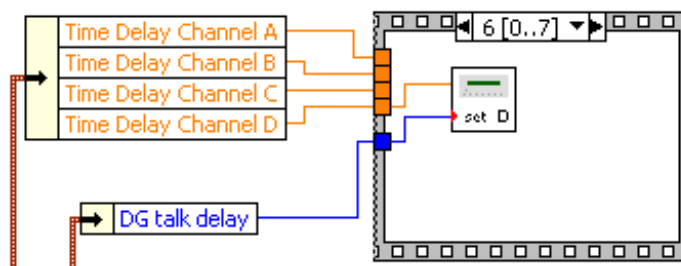
set_oscilloscope_REF ova naredba naređuje postavljanje osciloskopa u “reference mode”; gotovo je identična prethodnoj, jedina razlika je u stringu koja se šalje osciloskopu. Tijekom mjerenja se često koristi jer postavljanje u “reference mode” i vraćanje u “average mode” resetiraju memoriju osciloskopa.

Stop_QS naredba za zaustavljanje Q-switcha lasera. Ova naredba izvršava se kada laser slobodno puca. Tj kada je preko naredbi na stranici “Test/Remote setup” stavljeno da laser puca i želi ga se prekinuti. Laseru se šalje string “CS” + “\r\n” (koji su “carriage return” i “line feed”). Naredba pretpostavlja da je serijski port za komunikaciju s laserom otvoren.



Slika B.19: Blok dijagram naredbe Stop_QS.

delay naredba postavlja vremena kašnjenja na delay generatoru za sva četiri kanala. Postoji pauza između slanja naredbi za pojedini kanal. Ovu naredbu potrebno je raskomadati ukoliko bi se češće (tijekom mjerenja) slale naredbe za mijenjanje vremena samo jednom kanalu, jer nema potrebe namještati sva četiri kanala i čekati na izvršenje naredbe.



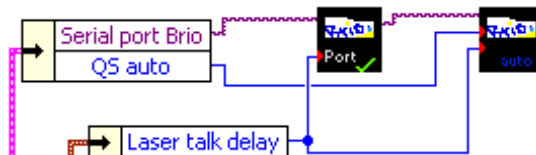
Slika B.20: Blok dijagram naredbe delay.

Fire_scan naredba naređuje laseru ispaljivanje pulsa u zadanom modu Q switcha. ASCII naredbe koje se šalju laseru se razlikuju ovisno o tome radi li se o vanjskom (external) i unutarnjem (internal) okidanju bljeskalica i Q-switcha, pa se ovdje mora intervenirati u tom slučaju. Točnije, mora se intervenirati unutar pripadajućeg **via**.



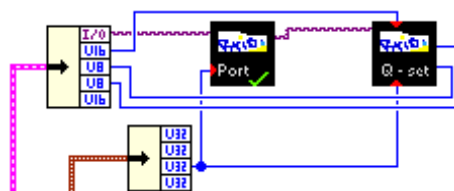
Slika B.21: Blok dijagram naredbe Fire_scan.

set_QS_autoF naredba postavlja laser u “Auto mode”. U takvom modu okidanje Q-switcha odvija se sve dok se laseru ne naredi prestanak. Ovaj način rada lasera pogodan je za naštimanja prije početka mjerenja. Ova naredba samo postavlja laser u taj način rada, ali puls ne izlazi kod se ne pošalje naredba za start. Bljeskalice ne moraju biti startane (ali mogu).



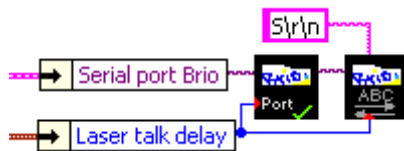
Slika B.22: Blok dijagram naredbe set_QS_autoF.

set_QS_scan naredba postavlja laser u “Scan mode” s parametrima koji su zadani u programu.



Slika B.23: Blok dijagram naredbe set_QS_scan.

stop_flashlamp naredba laseru šalje string “S\r\n” (zaustavlja flashlampe lasera).



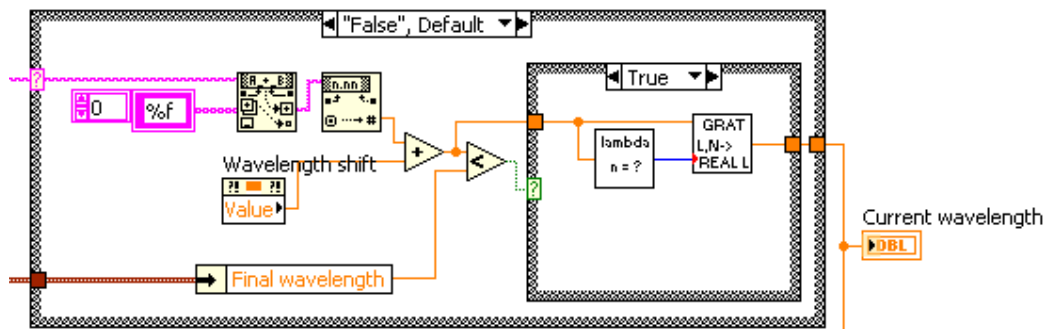
Slika B.24: Blok dijagram naredbe stop_flashlamp.

set_graph_scale naredba postavlja raspon ordinata grafova koji prikazuju spektar i R^2 na najveću i najmanju valnu duljinu. Ovo je zbog toga da se prilikom mjerenja ne mijenja raspon koji prikazuje graf i razmak među točkama. Ima jednostavan i intuitivan blok dijagram.

fire_single naredba naređuje laseru ispaljivanje jednog pulsa. Ova naredba se laseru može poslati neovisno o modu u kojem se on nalazi (*Auto*, *Burst*, *Scan*). Bitno je samo da je okidanje Q-switcha unutarne. Naredba izgleda potpuno isto kao i naredba stop_flashlamp (slika B.24) samo što laseru šalje naredbu “OP\r\n”.

start_flashlamp naredba laseru za start bljeskalica. Blok dijagram naredbe izgleda isto kao i naredba stop_flashlamp (slika B.24) samo što laseru šalje naredbu “A\r\n”.

tell_up_proceed_to Ova naredba prima dodatni parametar poslije dvotočke. Ukoliko je taj parametar “start” računa se prava valna duljina i stavlja se na Red2 (javlja se Kontroloru da na Red postavi sve što treba Potrošač obaviti za tu valnu duljinu). Pod računanjem *prave* valne duljine misli se na to da se dye laser zbog diskretnih koraka koje obavlja step motor ne može postaviti na svaku valnu duljinu, pa se računa ona koja je najbliža zadanoj (prema formuli zadanoj iz priručnika lasera) i na nju se postavlja laser. Spektar se crta (i u rezultate se zapisuje) samo s pravim valnim duljinama. No, i *prave* valne duljine naravno kasnije treba kalibrirati prema poznatim linijama. Ukoliko se, kao druga naredba, ne pošalje “start” nego bilo što drugo izvršava se predodređeni (default) slučaj, tada iza dvotočke Kontrolor šalje valnu duljinu koja je obavljena. Ova naredba toj valnoj duljini



Slika B.25: Blok dijagram naredbe tell_up_proceed_to.

doda vrijednost koliko vrijedi korak step motora. Ukoliko ta, resultantna, vrijednost prelazi konačnu valnu duljinu onda se Kontroloru na Red2 stavlja vrijednost nula (on u tom slučaju vrši završne radnje: obaviještava korisnika, gasi bljeskalice...). Ukoliko resultantna vrijednost ne prelazi konačnu valnu duljinu onda se mjerenje nastavlja (još se nije došlo do konačne valne duljine) tj. Kontroloru se šalje ta resultantna vrijednost. Na taj način zapravo Potrošač uvećava valnu duljinu na kojoj se trenutno mjeri (sve dok nova vrijednost ne bi prelazila finalnu), a Kontrolor javlja Potrošaču što sve treba obaviti za trenutnu valnu duljinu. Ovu naredbu s parametrom "start" obično poziva Proizvođač, a s valnim duljinama (u obliku stringa iza dvotočke) Kontrolor.

set_average naredba zadaje osciloskopu koliki je broj pulseva koje treba uprosječivati. Osciloskop mora biti u daljinskom modu ("remote mode").



Slika B.26: Blok dijagram naredbe set_average.

set_oscilloscope_manual naredba osciloskop vraća iz daljinskog načina rada.



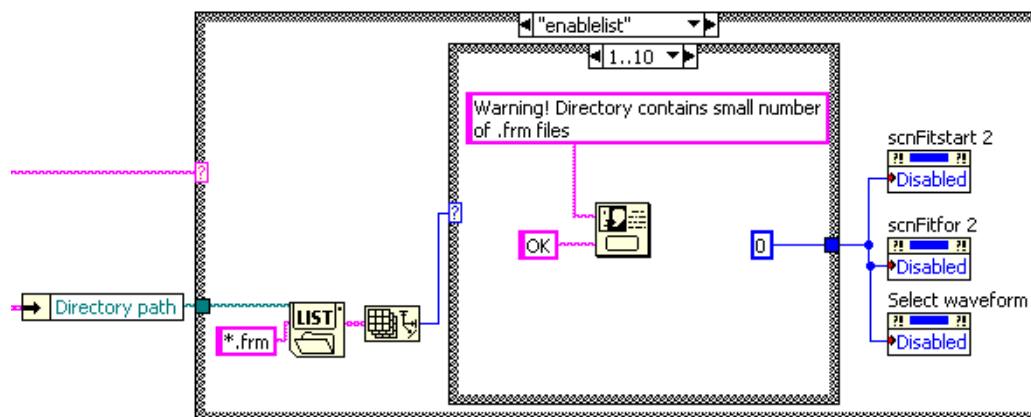
Slika B.27: Blok dijagram naredbe set_oscilloscope_manual.

set_oscilloscope_remote naredba osciloskop postavlja u daljinski način rada.



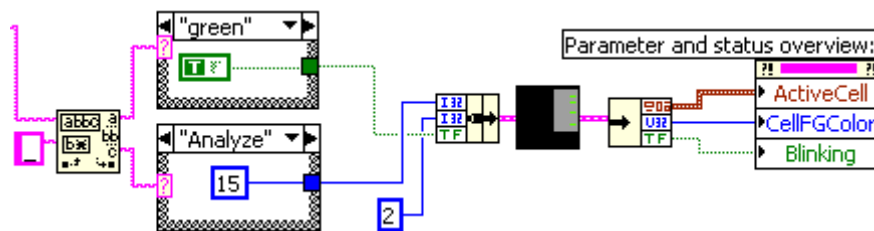
Slika B.28: Blok dijagram naredbe set_oscilloscope_remote.

check naredba isključuje mogućnost biranja valnih formi i mijenjanja parametara analize ukoliko nije odabran direktorij u kojem postoje datoteke tipa *.frm*. Ukoliko se pozove s `check:enable` obaviti će provjeru i obavijestiti će korisnika ako nema datoteka tog tipa, ili ih ima jako malo. Ukoliko se pozove s `check:enablesilent` obaviti će provjeru bez slanja obavijesti korisniku (ovo se obično izvrši pri inicijalizaciji).



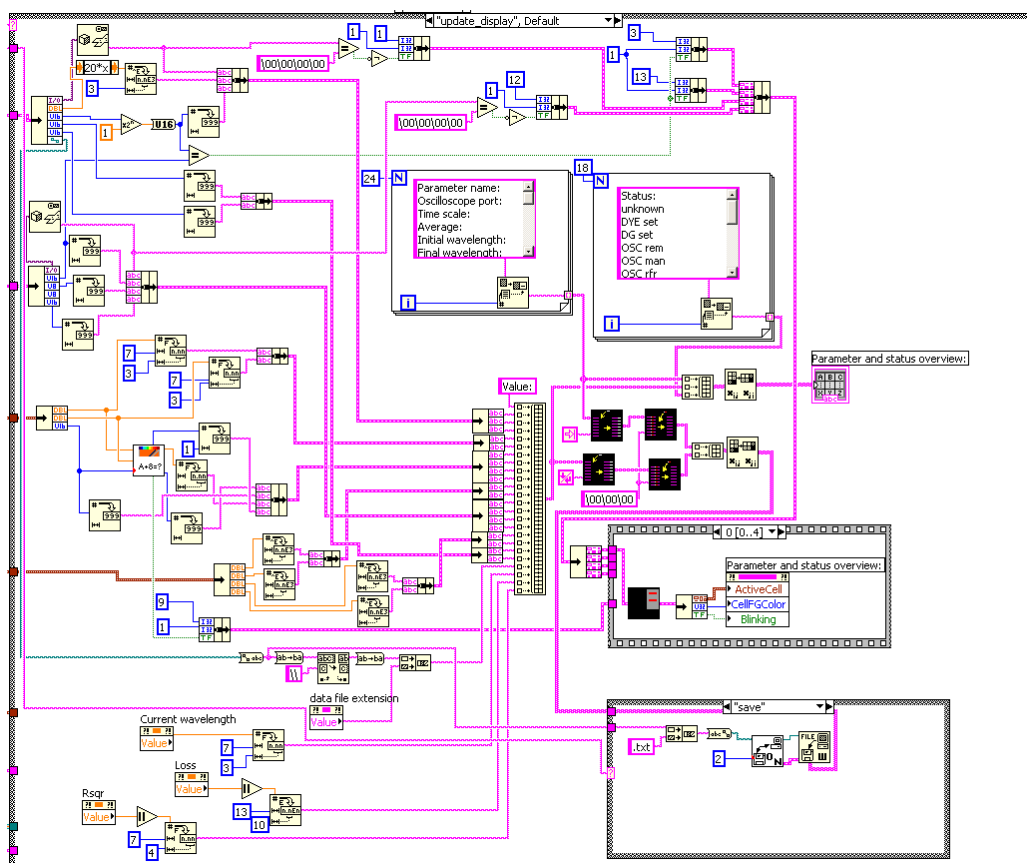
Slika B.29: Blok dijagram naredbe check.

state naredba mijenja boje objekata u tablici *Parameter and status overview*. Prima veći broj parametara u koje neću ovdje ulaziti detaljnije. Možda samo par primjera. Naredba state:green_OSCrem pozeleni natpis “OSCreM”. Naredba state:nogreen_OSCrem postavi crnu boju natpisu. Ovime se signalizira tijekom izvođenja mjerenja koji dio se trenutno odvija.



Slika B.30: Blok dijagram naredbe state.

update_display naredba ispisuje najnovije podatke na tablicu *Parameter and status overview*. Iako ima možda najkomliciraniji blok dijagram, sve što se u biti događa su raznorazne konverzije podataka u oblik pogodan za tablicu i smještanje svakog od parametara na svoje mjesto.



Slika B.31: Blok dijagram naredbe `update_display`.

Popis slika

2.1	Dvije valne forme. Jedna dobivena kada valna duljina lasera nije na liniji uzorka pa nema apsorpcije. Druga forma je kada je laser bio na valnoj duljini linije. Forme su iste u početku dok uzorak nije doputovao na optičku os rezonatora.	5
2.2	Shema laboratorijskog postava. Detaljniji opis u tekstu.	6
2.3	Korisničko sučelje. Odabrana je stranica za analizu. Na desnoj strani panela nalaze se tipke SCAN i STOP, a ispod njih je tabela trenutno namještenih parametara (<i>Parameter and status overview</i>)	12
2.4	Dvije bitne stranice korisničkog sučelja.	13
3.1	Valne forme. Slika (a) prikazuje oblik valne forme kada je okidanje osciloskopa postavljeno na Q-switch Brio lasera. Vide se vremena dolaska pulseva. Slika (b) prikazuje tri različita oblika valne forme: prazan rezonator, slučaj kasnije apsorpcije zbog sporih čestica i slučaj jake apsorpcije zbog lake čestice. .	16
3.2	Apsorpcijski spektri manganove plazme za različita područja prilagodbe. Slika (a) prikazuje spektar ako je odabrano područje prilagodbe 0 ns nakon dolaska pulsa dye lasera i područje traje 250 ns (10 točaka). Vide se atomske manganove linije.[14] Slika (b) prikazuje spektar manganove plazme za područje prilagodbe od 4375. nanosekunde u trajanju od 2500 ns (100 točaka). Apsorpcija molekula je dva reda veličine manja! (skala na ordinati). Prikazani su i R^2 parametri za svaku prilagodbu.	17
3.3	Usporedba profila manganove linije o vrsti ablacije. Siva linija prikazuje oblik linije s dva laserska pulsa s loše odabranim (preširokim) područjem prilagodbe	19

A.1	Primjer jednostavnog <i>via</i> . Lijevo je blok dijagram, a desno prednji panel s dvije kontrole i dva indikatora	23
B.1	Shema arhitekture programa. Klasična proizvođač/potrošač arhitektura s dvije dodatne petlje. Označeni su smjerovi komunikacije među petljama. Rozom bojom string, žutom bojom double precision float.	26
B.2	Blok dijagram Inicijalizatora.	27
B.3	Blok dijagram od <i>Event structure</i> koja se nalazi unutar petlje i koja je u biti Proizvođač jer <i>Event structure</i> mora biti unutar petlje.	28
B.4	Blok dijagram Kontrolora za slučaj kada je Proizvođač poslao vrijednost manju od 100.	30
B.5	Blok dijagram naredbe <i>wait_for_flashlamp</i>	31
B.6	Blok dijagram naredbe <i>wait_for_laser_scan</i>	31
B.7	Blok dijagram naredbe <i>create_directory</i>	31
B.8	Blok dijagram naredbe <i>notify_job_done</i>	32
B.9	Blok dijagram naredbe <i>set_dye_to_current</i>	32
B.10	Blok dijagram naredbe <i>initial_wavelength_change_low</i>	32
B.11	Blok dijagram naredbe <i>initial_wavelength_change_high</i>	33
B.12	Blok dijagram naredbe <i>get_scanned_waveform</i>	33
B.13	Blok dijagram naredbe <i>Exportformsascii</i>	34
B.14	Blok dijagram naredbe <i>set_waveform_scale</i>	34
B.15	Blok dijagram naredbe <i>showselectedwaveform</i>	35
B.16	Blok dijagram naredbe <i>Analyze:save</i>	36
B.17	Blok dijagram naredbe <i>get_waveform</i>	37
B.18	Blok dijagram naredbe <i>set_oscilloscope_AVM</i>	37
B.19	Blok dijagram naredbe <i>Stop_QS</i>	38
B.20	Blok dijagram naredbe <i>delay</i>	38
B.21	Blok dijagram naredbe <i>Fire_scan</i>	39
B.22	Blok dijagram naredbe <i>set_QS_autoF</i>	39
B.23	Blok dijagram naredbe <i>set_QS_scan</i>	39
B.24	Blok dijagram naredbe <i>stop_flashlamp</i>	40
B.25	Blok dijagram naredbe <i>tell_up_proceed_to</i>	41
B.26	Blok dijagram naredbe <i>set_average</i>	41
B.27	Blok dijagram naredbe <i>set_oscilloscope_manual</i>	42
B.28	Blok dijagram naredbe <i>set_oscilloscope_remote</i>	42
B.29	Blok dijagram naredbe <i>check</i>	42

B.30 Blok dijagram naredbe state.	43
B.31 Blok dijagram naredbe update_display.	44

Bibliografija

- [1] W. Demtröder, *Laser Spectroscopy*, Springer-Verlag Berlin, (2003) ISBN 3-540-65225-6.
- [2] N. Krstulović, *Spektroskopska analiza laserski inducirane plazme mangana u atmosferi metana*, Diplomski rad, Prirodoslovno-matematički fakultet, Zagreb (2003).
- [3] N. Krstulović, I. Labazan, S. Milošević, *Study of Mn laser ablation in methane atmosphere*, Eur. Phys. D, 37, (2006) 209-215.
- [4] I. Labazan, S. Milošević, *Determination of electron density in laser induced lithium plume using cavity ring-down spectroscopy*, J. Phys. D: Appl. Phys. 37, (2004) 2975-2980.
- [5] I. Labazan, N. Krstulović, S. Milošević, *Observation of C₂ radicals formed by laser ablation of graphite targets using cavity ring-down spectroscopy*, Journal of Physics D: Applied Physics, 36, issue 20, (2003) 2465 -2470.
- [6] I. Labazan, S. Milošević, *Laser vaporized Li₂, Na₂, K₂ and LiNa molecules observed by cavity ring-down spectroscopy*, Phys. Rev. A 68, (2003) 032901
- [7] I. Labazan, S. Milošević, *Observation of lithium dimers in laser produced plume by cavity ring-down spectroscopy*, Chem. Phys. Lett. 352, (2002) 226-233.
- [8] I. Labazan, S. Rudić, S. Milošević, *Nonlinear effects in cavity ringdown spectroscopy of lithium vapour*, Chem. Phys. Lett. 320, (2000) 613-622.

- [9] G. Berden, R. Peeters, Meijer G, *Cavity ring-down spectroscopy: experimental schemes and applications*, Int. Rev. Phys. Chem. 19, (2000) 565–607.
- [10] V. Hohreiter, D.W. Hahn, *Dual-pulse laser induced breakdown spectroscopy: time-resolved transmission and spectral measurements*, Spectrochimica Acta Part B 60, (2005) 968–974.
- [11] P.A. Benedetti, G. Cristoforetti, S. Legnaioli, V. Palleschi, L. Pardini, A. Salvetti, E. Tognoni, *Effect of laser pulse energies in laser induced breakdown spectroscopy in double-pulse configuration*, Spectrochimica Acta Part B 60, (2005) 1392–1401.
- [12] E. Tognoni, V. Palleschi, M. Corsi, G. Cristoforetti, *Quantitative micro-analysis by laser-induced breakdown spectroscopy: a review of the experimental approaches*, Spectrochimica Acta Part B 57, (2002) 1115–1130.
- [13] J. Gonzalez, C. Liu, J. Yoo, X. Mao, R. E. Russo, *Double-pulse laser ablation inductively coupled plasma mass spectrometry*, Spectrochimica Acta Part B 60, (2005) 27–31.
- [14] NIST Atomic Spectra Database,
http://physics.nist.gov/cgi-bin/AtData/main_asd, (2006).
- [15] Wikipedia, LabVIEW,
<http://en.wikipedia.org/wiki/Labview>, (2006).
- [16] National Instruments Labview,
<http://www.ni.com/labview/>, (2006).
- [17] LabVIEW Advanced Virtual Architects Forum,
<http://forums.lavausergroup.org/>, (2006).