

Nadogradnja jednoosnog mjernog uređaja laserskim interferometrom

Bulat, Petar

Master's thesis / Diplomski rad

2017

Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj: **University of Zagreb, Faculty of Mechanical Engineering and Naval Architecture / Sveučilište u Zagrebu, Fakultet strojarstva i brodogradnje**

Permanent link / Trajna poveznica: <https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:235:996727>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2025-02-24**

Repository / Repozitorij:

[Repository of Faculty of Mechanical Engineering and Naval Architecture University of Zagreb](#)



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

DIPLOMSKI RAD

Petar Bulat

Zagreb, 2017.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

DIPLOMSKI RAD

Mentor:

Doc. dr. sc. Marko Katić, dipl. ing.

Student:

Petar Bulat

Zagreb, 2017.

Izjavljujem da sam ovaj rad izradio samostalno koristeći stečena znanja tijekom studija i navedenu literaturu.

Zahvaljujem se doc. dr. sc. Marku Katiću na prilici, strpljenju i ukazanom povjerenju pri izradi rada.

Petar Bulat



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE



Središnje povjerenstvo za završne i diplomske ispite
Povjerenstvo za diplomske ispite studija strojarstva za smjerove:
procesno-energetski, konstrukcijski, brodstrojarski i inženjersko modeliranje i računalne simulacije

Sveučilište u Zagrebu	
Fakultet strojarstva i brodogradnje	
Datum	Prilog
Klasa:	
Ur broj:	

DIPLOMSKI ZADATAK

Student: Petar Bulat

Mat. br.: 0035181750

Naslov rada na hrvatskom jeziku: **Nadogradnja jednoosnog mjernog uređaja laserskim interferometrom**

Naslov rada na engleskom jeziku: **Retrofitting 1D measurement machine with a laser interferometer**

Opis zadatka:

Mjerenje duljine s najvišom razinom točnosti provodi se upotrebom laserskih interferometara, za što se u Nacionalnom laboratoriju za duljinu RH koristi komercijalno dostupni sustav. Laboratorij raspolaže većinom komponenti potrebnih za izradu vlastitog laserskog interferometra, osim sustava za detekciju signala interferometra. Stoga će u okviru diplomskog rada student:

- Objasniti princip rada interferometara za mjerenje pomaka,
- Prikazati funkcionalne cjeline interferometra za mjerenje pomaka,
- Predložiti izvedbu optoelektroničkog sustava za detekciju signala interferometra,
- Povezati aktivnu površinu fotodiode s dopuštenom tolerancijom oblika (odstupanje od pravocrtnosti) pomičnog kraka interferometra,
- Predložiti konstrukcijska rješenja za integraciju dijelova interferometra u postojeći jednoosni mjerni uređaj u Nacionalnom laboratoriju za duljinu,
- Nakon instaliranja interferometra, provesti preliminarna mjerenja na nadograđenom jednoosnom mjernom uređaju.

U radu je potrebno navesti svu korištenu literaturu, kao i eventualnu pomoć

Zadatak zadan:

7. ožujka 2017.

Rok predaje rada

11. svibnja 2017.

Predviđeni datumi obrane:

17., 18. i 19. svibnja 2017.

Zadatak zadao:

Doc. dr. sc. Marko Katić

Predsjednika Povjerenstva:

Prof. dr. sc. Tanja Jurčević Lulić

SADRŽAJ

SADRŽAJ	I
POPIS SLIKA	III
POPIS TABLICA.....	IV
POPIS GRAFOVA.....	V
POPIS TEHNIČKE DOKUMENTACIJE	VI
POPIS OZNAKA	VII
SAŽETAK.....	VIII
SUMMARY	IX
1. UVOD.....	1
1.1. Povijest.....	2
1.2. SI sustav	5
1.2.1. Osnovne mjerne jedinice.....	5
1.3. Kategorije mjeriteljstva.....	6
2. INTERFEROMETRIJA POMAKA	7
2.1. Osnovna načela	7
2.2. Homodina i heterodina tehnika	8
2.3. Michaelsonov interferometar	9
2.3.1. Konfiguracija	10
2.3.2. Michaelson – Morleyev pokus.....	11
3. AKVIZICIJA INTENZITETA INTERFERENCIJSKOG POLJA	14
3.1. Uvod.....	14
3.1.1. Metodologija	15
3.1.2. DAS / DAQ hardver.....	15
3.1.3. DAS / DAQ softver.....	16
3.2. Detektori intenziteta svjetlosti	17
3.2.1. Princip rada	17
3.2.1.1. Fotonaponski način rada	18
3.2.1.2. Fotovodljivi način rada	19
3.2.2. Materijali	19
3.2.3. Neželjene posljedice	19
3.2.4. Značajke	20
3.2.4.1. Odziv.....	20
3.2.4.2. Tamna struja.....	20
3.2.4.3. Vrijeme odziva.....	20
3.2.4.4. NEP (Noise – equivalent power)	20
3.2.5. Primjeri	20
4. OPTOELEKTRIČNI SUSTAV DETEKCIJE SIGNALA FOTODIODE	22
4.1. Spajanje	23
4.2. Fotodiode	26
4.3. Postavljanje modula	27
4.4. Zasićenje dnevnim svjetlom.....	29
4.5. DAQ.....	31

5. PRORAČUN ODSTUPANJA OD PRAVOCRTNOSTI POMIČNOG KRAKA INTERFEROMETRA	33
5.1. Vertikalna ravnina.....	33
5.2. Horizontalna ravnina.....	36
6. RJEŠENJE INTEGRACIJE NA POSTOJEĆI UREĐAJ.....	39
6.1. Postojeći uređaj.....	39
6.2. Ograničenja	41
6.3. Razgradnja po funkcijama	42
6.4. Rješenje.....	44
7. MJERENJA	46
7.1. Mjerenja pri razvoju optoelektroničkog sustava	46
7.2. Testiranje na postojećem jednoosnom uređaju	47
7.3. Mjerenje na postojećem uređaju	51
8. ZAKLJUČAK.....	53
LITERATURA.....	54
PRILOZI.....	55

POPIS SLIKA

Slika 1 Što sve mjerimo?.....	1
Slika 2 Egipatske mjere.....	2
Slika 3 Egipatski kraljevski lakat	3
Slika 4 Magna carta, 1215.....	3
Slika 5 Prvi etalon metra	4
Slika 6 Osnovne mjere	5
Slika 7 Elektromagnetski spektar	7
Slika 8 Albert Abraham Michaelson	9
Slika 9 Michaelsonov interferometar bez izvora zrake i detektora.....	10
Slika 10 Shema rada Michaelsonovog interferometra	11
Slika 11 Michaelsonov i Morleyev interferometar	12
Slika 12 Shema rada digitalnog sistema akvizicije signala.....	14
Slika 13 Arduino	16
Slika 14 DAQ softveri.....	16
Slika 15 Fotodioda	17
Slika 16 p - n spoj.....	18
Slika 17 PIN dioda	18
Slika 18 Solarne ploče.....	18
Slika 19 Eksperimentalna pločica E-CALL tip EIC-404-3.....	22
Slika 20 5V adapter	22
Slika 21 Shema spajanja komponenti na eksperimentalnu pločicu (ref [9]).....	23
Slika 22 ČIP ICL7660A	24
Slika 23 ČIP TL081.....	25
Slika 24 Spojena pločica	25
Slika 25 Fotodioda BPW34.....	26
Slika 26 Fotodioda BPW34 - radionički crtež	26
Slika 27 THORLABS-ova ploča za prihvata optomehaničkih elemenata	27
Slika 28 Laser, razdjelnik zrake i zrcalo 1	28
Slika 29 Zrcalo 2 i objektiv	28
Slika 30 Fotodioda sa zaštitom od dnevnog svjetla	29
Slika 31 Kompletno postavljeni moduli.....	29
Slika 32 Zaštita od dnevnog svjetla.....	30
Slika 33 MC Measurement Computing USB-1208LS	31
Slika 34 Put laserske zrake u horizontalnoj ravnini.	33
Slika 35 Kutovi za trigonometrijski proračun	34
Slika 36 Put laserske zrake u horizontalnoj ravnini	36
Slika 37 Refleksija prema fotodiodi.....	37
Slika 38 Postojeći mjerni uređaj - pogled A	39
Slika 39 Postojeći mjerni uređaj - pogled B.....	40
Slika 40 3D model postojećeg jednoosnog mjernog uređaja	40
Slika 41 Model interferometra	44
Slika 42 Model interferometra i pomičnog kraka	45

POPIS TABLICA

Tablica 1 Materijali fotodioda.....	19
Tablica 2 Primjeri komercijalnih fotodioda	21
Tablica 3 Dimenzije ploča s pripadnim masama	27
Tablica 4 Morfološka matrica rješenja.....	43
Tablica 5 Tablični prikaz prvih 100 točaka.....	46
Tablica 6 Tablični prikaz prvih 100 točaka.....	48

POPIS GRAFOVA

Graf 1 Grafički prikaz svih očitanih točaka pri mjerenju pomaka servo motora.....	47
Graf 2 Grafički prikaz prvih 100 točaka pri mjerenju pomaka servo motora	47
Graf 3 Grafički prikaz svih očitanih točaka pri mjerenju na jednoosnom uređaju	49
Graf 4 Grafički prikaz 2700 točaka pri mjerenju	49
Graf 5 Grafički prikaz prvih 100 točaka pri mjerenju.....	50
Graf 6 Krivulja promjene napona pri prebrzom pomicanju pomičnog kraka interferometra ..	51
Graf 7 Snimljeni signal interferometra - period od 0.32 sekundi.....	51
Graf 8 Detalj signala interferometra - period od 0,20 do 0,21 sekunde uzorkovanja	52

POPIS TEHNIČKE DOKUMENTACIJE

Broj crteža	Naziv iz sastavnice
PB-DR-01-00-00	Sklop 1
PB-DR-01-01-00	Držač objektiva
PB-DR-01-01-01	Zaštita od svjetla
PB-DR-01-02-00	Držač lasera
PB-DR-01-03-00	Razdjelnik zrake
PB-DR-01-04-00	Držač zrcala
PB-DR-02-00-00	Sklop 2

POPIS OZNAKA

Oznaka	Jedinica	Opis
x	mm	Pomični krak interferometra
l	mm	Udaljenost fotodiode od razdjelnika zrake
α	radijan	Početni kut zakreta u vertikalnoj ravnini
β	radijan	Početni kut zakreta u horizontalnoj ravnini
z	mm	Refleksija od pomičnog kraka interferometra
o	mm	Ukupan pomak od centra fotodiode u vertikalnoj ravnini
p	mm	Dio refleksijskog pomaka od centra diode
s	mm	Dio refleksijskog pomaka od centra diode
n	mm	Ukupan pomak od centra fotodiode u horizontalnoj ravnini
c	mm	Dio refleksijskog pomaka od centra diode
f	mm	Dio refleksijskog pomaka od centra diode

SAŽETAK

U ovom radu dana je teorijska podloga rada interferometra. Opisana je povijest mjeriteljstva i njezina važnost u razvoju ljudske civilizacije. Sustav akvizicije signala opisan je na način na koji radi, prihvaća i obrađuje podatke da bi dobili mjerljive rezultate. Razvijen je optoelektronički sustav s fotodiodom za detektiranje promjene napona kod izmjene konstruktivne i destruktivne interferencije svjetlosti. Nakon razvijanja sustava, od gotovih optomehaničkih elemenata izrađen je interferometar te postavljen na postojeći jednoosni mjerni uređaj u Nacionalnom laboratoriju za duljinu. Izračunato je dozvoljeno odstupanje od pravocrtnosti pomičnog kraka interferometra u odnosu na aktivnu površinu diode.

Nakon instaliranja interferometra provedena su i preliminarna mjerenja. Rezultati su prikazani u grafičkom i tabličnom obliku.

Ključne riječi: Interferometar, fotodioda, optoelektronički sustav, akvizicija, duljina

SUMMARY

In this scientific work (article) is given theoretical background of interferometer. It is described history of measurement and its importance in evolution of human civilization. Data Acquisition System is described how it works, accepts and process information so we can get measurable results. It is developed optoelectronic system with photodiode to detect voltage change with changes of constructive and destructive interference of light. After system being developed, from finished modules interferometer was made and set on existing 1D measurement device in the National Laboratory for Length. It is calculated tolerance of straightness of moving arm compared to active surface of photodiode.

After interferometer being installed measurements were carried out. Results are shown in graphic and tabular form.

Key words: Interferometer, photodiode, optoelectronic system, data acquisition system, length

1. UVOD

Messen ist Wissen

(Measurement is knowledge)

(Mjerenje jest znanje)

Georg Simon Ohm

Tim je riječima Nacionalni laboratorij za fiziku (*NPL – National Physical Laboratory*) započeo svoj vodič za mjeriteljstvo.

Svi mjerimo. Svaki dan. Cijelog života. Zamislimo samo koliko često pogledamo na sat ili na brzinomjer automobila. Okruženi smo izlaznim mjernim uređajima: od brzinomjera vjetra na vremenskim prognozama do brojčanika na benzinskim crpkama. A to su i ona mjerenja koja često i zaboravimo: mjerenja nužna da tableta sadrži dozu koju mora ili mjerenja hrane za pripremu obroka u restoranu.



Slika 1 Što sve mjerimo?

Neki svakodnevni uređaji za mjerenje su vrlo točni, a neki i nisu. I najjeftiniji digitalni satovi su točni unutar nekoliko sekundi godišnje dok termometri na kuhinjskoj pećnici griješe i do nekoliko stupnjeva. Da su satovi jednako točni kao termometri na kuhinjskoj pećnici greška bi bila preko sat tjedno. To je u redu, zato što potreba za točnošću mjerenja nije ista ako se ne želi zakasnuti na sastanak i ako se želi ispeći kolač. Stoga možemo zaključiti da točnost mjerenja ovisi o primjeni koja nam je potrebna.

Mnoga mjerenja na kojima počiva moderan život su sakrivena. Na primjer, precizna mjerenja dimenzija i elektronička svojstva dijelova automobila ili računala nas ne zanimaju iako su nužna hoće li nešto raditi ili ne. Prije nekog vremena kad su auti bili ručno rađeni, precizne mjere nisu toliko značile – svaki dio rađen je kako bi se upario s drugim dijelovima koji su već bili tamo s mnogo „dorade“ ili „prisile“.

Naravno, sve je to bilo jako skupo što je potaklo Henryja Forda i ljude poput njega da potaknu ideju standardnih dijelova.

Danas, ovakav pristup je ključan: preko 80% dijelova korištenih u bilo kojoj proizvodnji izrađeni su u drugim kompanijama – često inozemnim. To tjera proizvođače da svojim dobavljačima dostavlja prihvatljive vrijednosti dimenzija, elektroničkih karakteristika i drugih parametara tih komponenata. U protivnom puno proizvoda bi se raspalo ili se jednostavno ne bi uklapalo u postojeće komponente.

1.1. Povijest

Ljudi mjere od kada su počeli kupovati, posjedovati i prodavati stvari što znači da je povijest mjeriteljstva stara isto kao i civilizacija. Zapravo, mnogo aspekata civilizacije ne bi bila moguća bez mjeriteljstva: znanost, na primjer. Kroz povijest, znanost i mjeriteljstvo su radili u vrlo krugu, u kojem je tehnološki napredak koji je znanost proizvela omogućila precizna mjerenja, koji su onda vraćani u testiranje i pročišćavanje novih znanstvenih teorija.

Smrtna kazna čekala je one koji su zaboravili ili zanemarili svoju dužnost umjeravanja standardne jedinice duljine kada je pun mjesec. To je bila presuda kraljevih arhitekata koji su odgovorni za izgradnju palača i piramida faraona u drevnom Egiptu, 3000 godina pr. n. e. Prvi



Slika 2 Egipatske mjere

kraljevski lakat bio je definiran kao duljina podlaktice od lakta do vrha ispruženog srednjeg prsta vladajućeg faraona, plus širina njegove ruke.



Slika 3 Egipatski kraljevski lakat

Ta je mjera prenesena i urezana u crni granit. Radnicima na gradilištu je dana kopija od granita ili drva, a dužnost arhitekata je bila da se održava.

U Engleskoj, 1196. godine prvi je dokumentirani poziv za standardizaciju jedinica tzv. Uredbene mjere (*Assize of Measures*). Primarni interes tog dokumenta bio je da se pivo i vino ispravno mjere. Magna Carta, 1215. zahtjeva jedinstvene mjere širom Engleske, navodeći:

„Standardno će se mjeriti vino, pivo i kukuruz ... kroz cijelo kraljevstvo. Također bit će standardna širina obojene tkanine i baršuna. Težine će biti slično standardizirane.“



Slika 4 Magna carta, 1215.

U Nizozemskoj, 1657. klatni sat patentirao je Christiaan Huygens te ga sagradio ubrzo nakon toga. Bio je precizan u 10 sekundi po danu što je veliko unapređenje u odnosu na 6 minuta po danu kod prijašnjih mehaničkih satova.

U Parizu, 1791. Francuska nacionalna skupština normira metar kao jedan deset milijunti dio četvrtine Zemljinog promjera iako nitko ne zna koliko je to zapravo. Mnogi znanstvenici angažirani su u potrazi su za tim rezultatom, ali i prije nego su rezultati dostavljeni Francuska fiksira standardni metar za koji se potom ustanovilo da je petinu milimetra prekratak. To, također, znači da je opseg Zemlje (kroz polove) dulji od 40 000 000 metara kao što su svi očekivali da će biti. Osam godina kasnije u istom gradu metrički sustav je osnovan kroz dva standarda legura platine i iridija: metar – duljina, kilogram – masa.



Slika 5 Prvi etalon metra

U Londonu, 1824. parlamentarnim dekretom postao je poznat rašireniji i poboljšani sustav mjera – imperijalni standard jard. Jard je pohranjen u Kući Parlamenta da bi mogao biti strogo čuvan, što se nije pokazalo točnim jer je 10 godina poslije izgorio. Nakon toga napravljen je novi, pohranjen u nezapaljivi sef i zazidan u zid. Svakih 20 godina je izvađen kako bi se usporedio sa standardnim kopijama.

U Parizu, 1875. g. Konvenciju o metru potpisuje 17 država te je time ustoličen Međunarodni ured za utege i mjere.

U Engleskoj, 1955. g. Louis Essen konstruirao je prvi atomski sat u NPL-u; bio je točan u milijunti dio sekunde po danu.

U SAD-u 1960. g. Theodore Maiman konstruirao je prvi funkcionalni laser u Kaliforniji. Laser je ubrzo postao ključan za precizno mjerenje vremena, duljine i svjetlosne jakosti.

1.2. SI sustav

1960. SI sustav je utemeljen, a uključivao je masu, duljinu, vrijeme, temperaturu, jakost struje i svjetlosnu jakost. 1971. dodana je količina tvari.

1.2.1. Osnovne mjerne jedinice

- Duljina (l): metar (m) – duljina puta koju u vakuumu prijeđe svjetlost u trajanju $1/299\,792\,458$ sekunde.
- Masa (m): kilogram (kg) – masa međunarodne pramjere mase, koja je izrađena u obliku valjka iz slitine platine i iridija i koja je odredila 1. generalna konferencija za utege i mjere 1889. u Parizu. Nova definicija mase preko Avogadrovog broja je u izradi.
- Vrijeme (t): sekunda (s) – je trajanje $9\,192\,631\,770$ perioda zračenja koje odgovara prijelazu između dviju hiperfina razina osnovnog stanja atoma cezija-133.



Slika 6 Osnovne mjere

- Jakost električne struje (I): amper (A) – jakost istosmjerne električne struje koja u vakuumu između dvaju ravnih i metar udaljenih beskonačno dugih usporednih vodiča

zanemarivo malog kružnog presjeka prouzroči silu od $2 \cdot 10^{-7}$ Njutna po metru duljine vodiča.

- Termodinamička temperatura (T): kelvin (K) – definira se kao 273,16-ti dio temperature trojne točke vode.
- Količina tvari (n): mol (mol) – predstavlja količinu tvari onog sustava koji sadrži broj jedinki koliko se nalazi atoma u 12 grama ugljika C-12 (taj broj jedinki jednak je Avogadrovom broju $N_A=6,0221412 \cdot 10^{23}$).
- Svjetlosna jakost (I): kandela (cd) – predstavlja onu svjetlosnu jakost zračenja izvora jednobojnog svjetla koja u danom smjeru frekvencije $540 \cdot 10^{12}$ Hz iznosi $1/683$ W/sr.

1.3. Kategorije mjeriteljstva

Mjeriteljstvo je podijeljeno u 3 kategorije s različitim razinama složenosti i preciznosti:

1. Znanstveno mjeriteljstvo – bavi se organizacijom i razvojem mjernih standarada i njihovim održavanjem.
2. Industrijsko mjeriteljstvo – osigurava adekvatno funkcioniranje mjernih instrumenata korištenih u industriji, proizvodnji i ispitivanju za kvalitetu života građana i akademsko istraživanje.
3. Zakonsko mjeriteljstvo – bavi se mjerenjem koje utječe na transparentnost ekonomskog trgovanja i transakcija, pogotovo gdje je zahtjev za pravnu potvrdu mjernog instrumenta.

Fundamentalno mjeriteljstvo nema internacionalnu definiciju, ali najčešće se odnosi na najveću točnost u danom području, odnosno realizaciju najviše razine etalona ili samu definiciju mjerne veličine. Fundamentalno mjeriteljstvo stoga može biti opisano kao sam vrh znanstvenog mjeriteljstva.

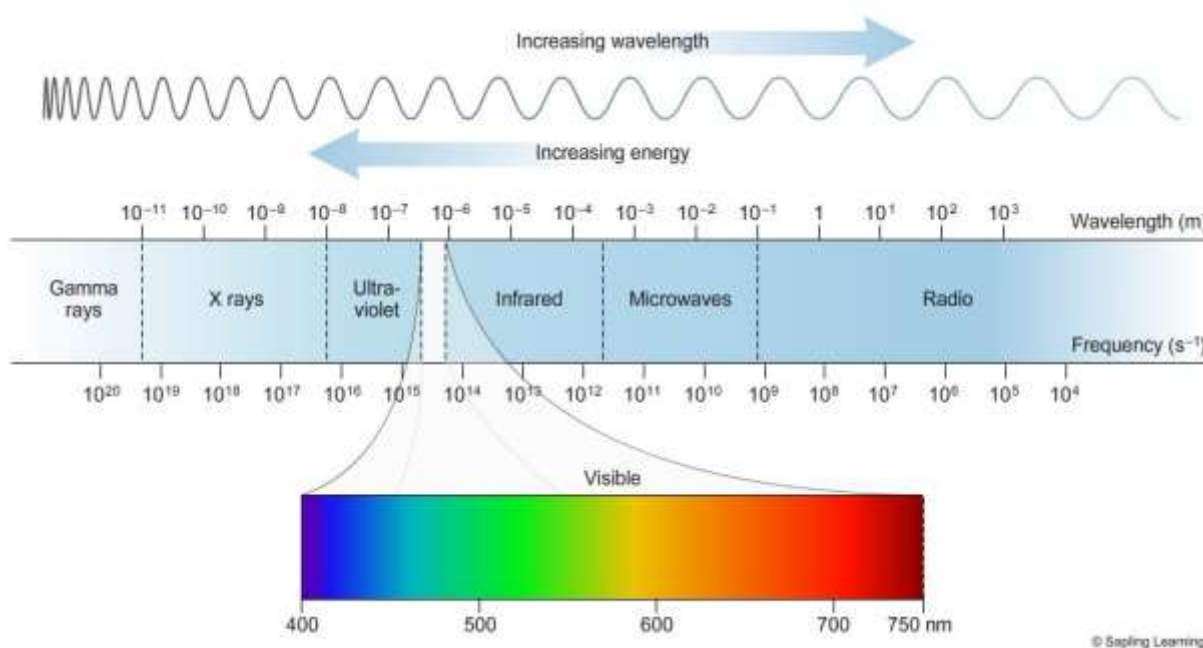
2. INTERFEROMETRIJA POMAKA

Interferometrija je skupina tehnika u kojima se valovi, najčešće elektromagnetski, superponiraju kako bi se dobile informacije. Interferometrija je važna istražna metoda u znanstvenim poljima kao što su astronomija, optika, mjeriteljstvo, oceanografija, seizmologija, spektroskopija, kvantna mehanika, nuklearna i čestična fizika, optometrija i mnoge druge.

Interferometri su u širokoj upotrebi u znanosti i industriji za mjerenje malih pomaka, indeksa loma i hrapavosti površine. U analitičkoj znanosti, interferometri su korišteni u spektroskopiji neprekidnog vala Fourierove transformacije kako bi se analizirala svojstva svjetlosti – apsorpcija i emisija. Astronomski interferometri sastoje se od dva ili više odvojenih teleskopa koji kombiniraju svoje signale, pružajući rezoluciju jednaku teleskopu promjera najveće udaljenosti između ta dva elementa.

2.1. Osnovna načela

Svjetlost je elektromagnetsko zračenje u određenom dijelu elektromagnetskog spektra. Često se koristi izraz vidljiva svjetlost, koja je vidljiva ljudskom oku i zaslužna za osjetilo vida. Vidljiva svjetlost često je definirana kao svjetlost s valnom duljinom u rasponu od 350 do 750 nm ili 4.00×10^{-7} do 7.00×10^{-7} m, između infracrvenog (veća valna duljina) i ultraljubičastog (manja valna duljina). Te valne duljine pripadaju rasponu frekvencije od otprilike 430 do 750 THz.



Slika 7 Elektromagnetski spektar

Budući da zrake svjetlosti pokazujemo kao pravocrtne linije koje izlaze iz izvora, definirali smo nekoliko zakona geometrijske optike:

1. Zakon pravocrtnog širenja svjetlosti – svjetlost se u homogenom izotropnom sredstvu širi pravocrtno.
2. Zakon nezavisnosti snopova (skup svjetlosnih zraka) svjetlosti – dva snopa svjetlosti se u prostoru šire potpuno nezavisno, bez međudjelovanja.
3. Zakon refleksije svjetlosti – kad svjetlost dolazi do granice 2 prozirnog sredstva ona se djelomično reflektira, a djelomično ulazi u drugo sredstvo. Kad se svjetlost reflektira na granici dva sredstva, onda upadna zraka, reflektirana zraka i okomica na granicu dva sredstva leže u istoj ravnini, a upadni kut jednak je kutu refleksije.
4. Zakon loma svjetlosti – pri prelasku zrake svjetlosti iz jednog u drugo sredstvo dolazi do njenog loma zato što je brzina svjetlosti različita u tim sredstvima

Neke optičke pojave kao što su ogib ili difrakcija svjetlosti, interferencija svjetlosti i polarizacija svjetlosti ne mogu se opisati modelom zrake svjetlosti, nego za tumačenje tih pojava treba stvoriti pretpostavke o prirodi svjetlosti, a to znači pripisati svjetlosti određena valna svojstva kao što su valna duljina, frekvencija i amplituda.

2.2. Homodina i heterodina tehnika

Kod homodine detekcije interferencija se događa između dvije zrake iste valne duljine (ili frekvencije). Fazni pomak između dvije zrake rezultira u promjeni intenziteta svjetla na detektoru. Rezultirajući intenzitet svjetla se nakon interferencije zraka mjeri ili se uzorak promatra i snima. Najviše oblika interferometra su upravo ovakvi.

Heterodine tehnike koriste se za:

- pomak ulaznog signala u drugi frekvencijski opseg;
- pojačavanje slabog ulaznog signala.

Slabi ulazni signal frekvencije f_1 miješa se s jačom frekvencijom f_2 iz lokalnog oscilatora. Nelinearna kombinacija ulaznih signala stvara dva nova signala, jedan kao zbroj frekvencija f_1 i f_2 , a drugi kao razliku f_1 i f_2 . Te nove frekvencije nazivaju se heterodinim frekvencijama. Najčešće, samo je jedna od frekvencija potrebna, a drugi signal je filtriran iz miksera. Izlazni signal imaće intenzitet proporcionalan produktu amplituda ulaznog signala.

Najvažnija i najpoznatija upotreba heterodinske tehnike je u superheterodinskom prijemniku koji je izumio američki inženjer Edwin Howard Armstrong 1918. U tom strujnom krugu ulazni signal s antene je miješan sa signalom lokalnog oscilatora i pretvaran heterodinskom tehnikom

u niži frekvencijski signal zvana među frekvencija. Ta među frekvencija je pojačana i filtrirana prije nego odlazi na detektor koji izvlači audio signal i šalje ga na zvučnik.

2.3. Michaelsonov interferometar

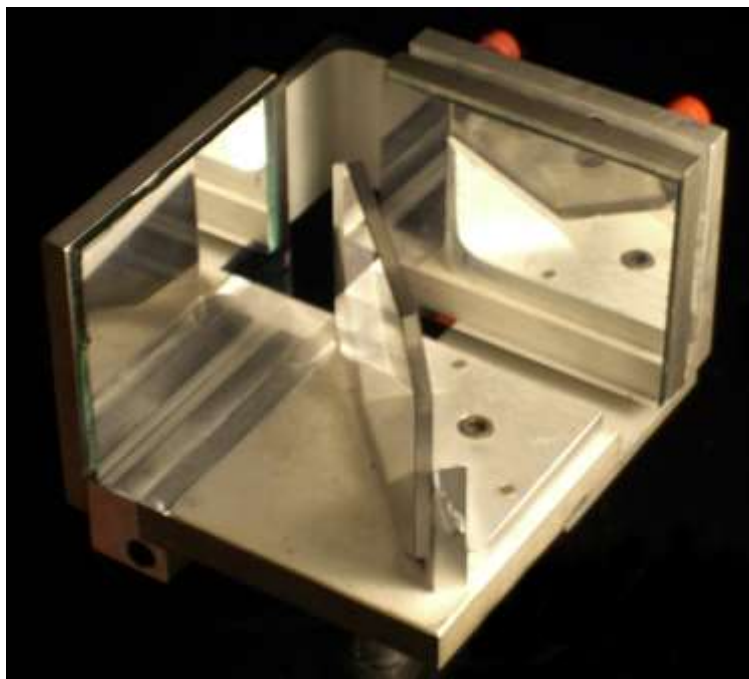
Michaelsonov interferometar je najpoznatiji interferometar kojeg je konstruirao Albert Abraham Michaelson.



Slika 8 Albert Abraham Michaelson

Izvor svjetlosti je, koristeći razdjelnik zrake, podijeljen je na dvije zrake. Svaka od njih je reflektirana natrag na razdjelnik zrake čije se amplitude potom interferiraju. Interferirani uzorak usmjeren je u određeni fotoelektrički detektor ili kameru. U ovisnosti o primjeni, putevi mogu biti različite duljine ili uključivati optičke materijale ili komponente koje se ispituju.

Michaelsonov interferometar korišten je za mnoge znanstvene eksperimente te je postao jako dobro poznat koristeći ga Albert Michaelson i Edward Morley u slavlrenom Michaelson – Morley eksperimentu 1887. Konfiguracija koja je trebala otkriti navodno Zemljino gibanje kroz eter za koji su mnogi fizičari vjerovali da je medij kroz koji se svjetlost širi. Negativan rezultat eksperimenta na koncu je opovrgnuo postojanje etera, što je dovelo do specijalne teorije relativnosti i revolucije u fizici početkom 20. stoljeća. 2016. godine primjenom

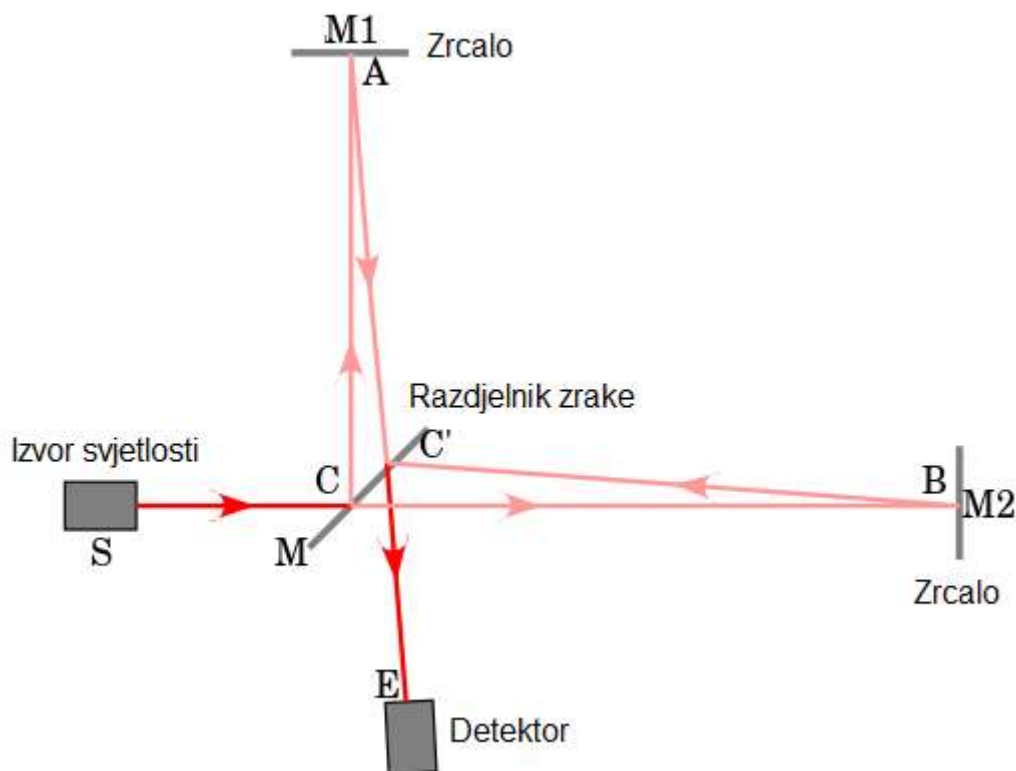


Slika 9 Michaelsonov interferometar bez izvora zrake i detektora

Michaelsonovog interferometra prvi puta su zapaženi gravitacijski valovi. To je zapažanje potvrdilo pretpostavku opće teorije relativnosti o distorziji prostora i vremena na skali velikih kozmičkih događaja.

2.3.1. Konfiguracija

Michaelsonov interferometar sastoji se od minimalno dva zrcala (M1 i M2) i razdjelnika zrake (M). Koherentni izvor (S) emitira svjetlost koja upada na razdjelnik zrake. Razdjelnik zrake je djelomično reflektirajući stoga nakon upada na točku (C) jedan dio prolazi prema jednom zrcalu (A), a drugi dio prema drugom zrcalu (B). Obe zrake ponovno se spajaju u točki C' kako bi proizveli uzorak interferencije koji očitava detektor (E). Ako postoji mali kut između dvije zrake, tada će detektor očitati resni uzorak. Ako je između dvije zrake savršen razmak, tada takav uzorak neće postojati već će biti konstantan intenzitet ili svjetla ili tame, ovisno o duljini puta. To je vrlo težak posao, zahtijevajući vrlo preciznu kontrolu putanje zrake.

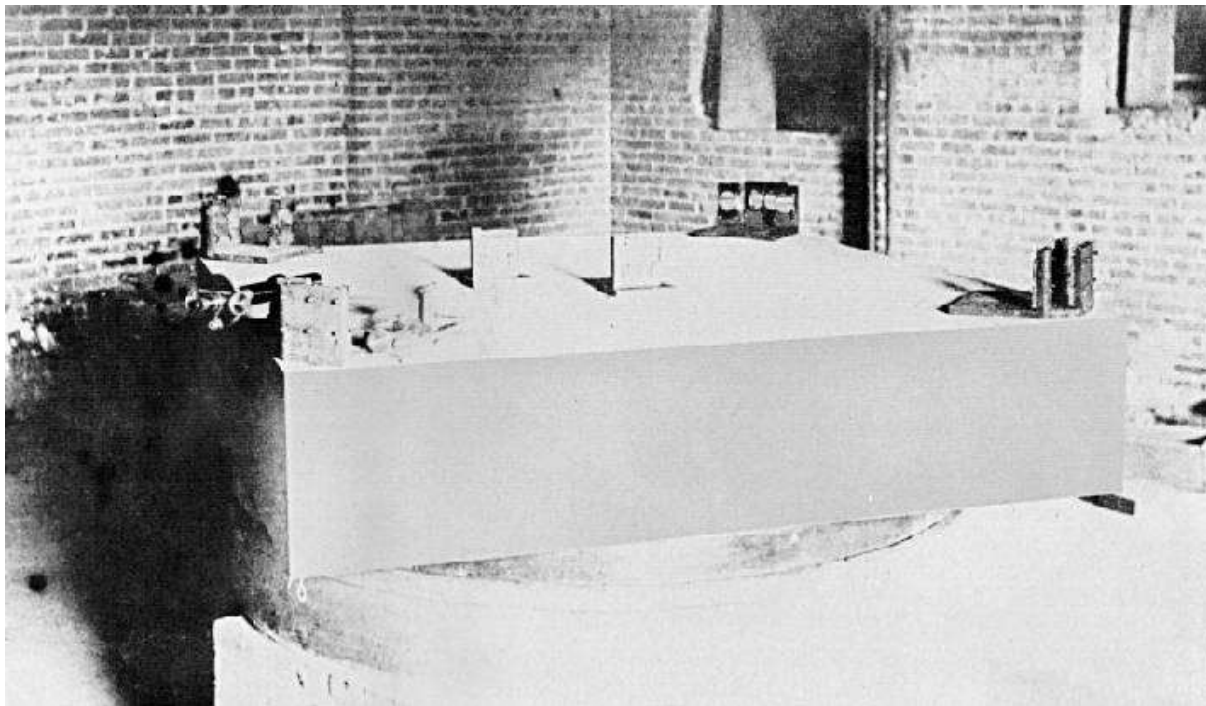


Slika 10 Shema rada Michaelsonovog interferometra

2.3.2. *Michaelson – Morleyev pokus*

Michelson je zajedno s Edwardom Morleyem nakon povratka iz Berlina i prvih pokusa s interferometrom, ponovio pokus u kojem su htjeli ispitati utjecaj Zemljina gibanja kroz eter na brzinu rasprostiranja svjetlosti. Znanstvenici toga doba su bili upoznati s gibanjem valova uz pomoć nekoga medija; zvučnih valova zrakom, površinskih valova na vodi vodom; pa su tragali za medijem kroz koji bi se kretala svjetlost. Kako nisu uspjeli pronaći taj medij, znanstvenici i filozofi su jednostavno izmislili medij koji su kasnije nazivali eter. Eter je zamišljena tvar koja bi ispunjavala vakuum. Za njega se smatralo kako omogućuje rasprostiranje svjetlosti i drugog elektromagnetskog zračenja. Eter je tvar elastičnih svojstava, ali bez mjerljive mase. U grčkoj teoriji je bio peti prirodni element, uz vodu, vatru, zemlju i zrak. Hipotezu etera kao fine i nevidljive supstancije između vidljivih tijela, deformiranjem i titranjem koje prenosi svjetlost ili gravitacija, razradili su Rene Descartes i Christian Huygens. Nakon njih teoriju etera ponovo oživljava valna teorija koju su razvijali Thomas Young i Augustin Jean Fresnel. Na temelju tih postavki Michelson je zamislio pokus i interferometar kojim je htio dokazati postojanje etera. Trebalo je izvesti precizna mjerenja brzine svjetlosti na Zemlji po različitim putevima, paralelno i okomito na gibanje Zemlje te mjerenja po orbiti oko Sunca i usporediti rezultate.

Ako je Zemlja u pokretu, Zemljino gibanje kroz eter će uzrokovati vjetar etera. Iako su pretpostavljali jednako gibanje Zemlje i etera, smatrali su kako takvo stanje nije stalno moguće zbog mijenjanja i brzine i smjera gibanja Zemlje. Michelsonov interferometar u tom pokusu je bio postavljen na kamenoj ploči od $1,5 \text{ m}^2$ koja je plutala na živi kako bi se umanjile vibracije i deformacije uzrokovane naprezanjima tijekom rotacije interferometra. Kako bi usavršili finoću mjerenja, dodali su nekoliko dodatnih zrcala kako bi produljili put svjetlosti. Nakon toga se optički put interferirajućih zraka nakon odbijanja povećao do 11 metara.



Slika 11 Michaelsonov i Morleyev interferometar

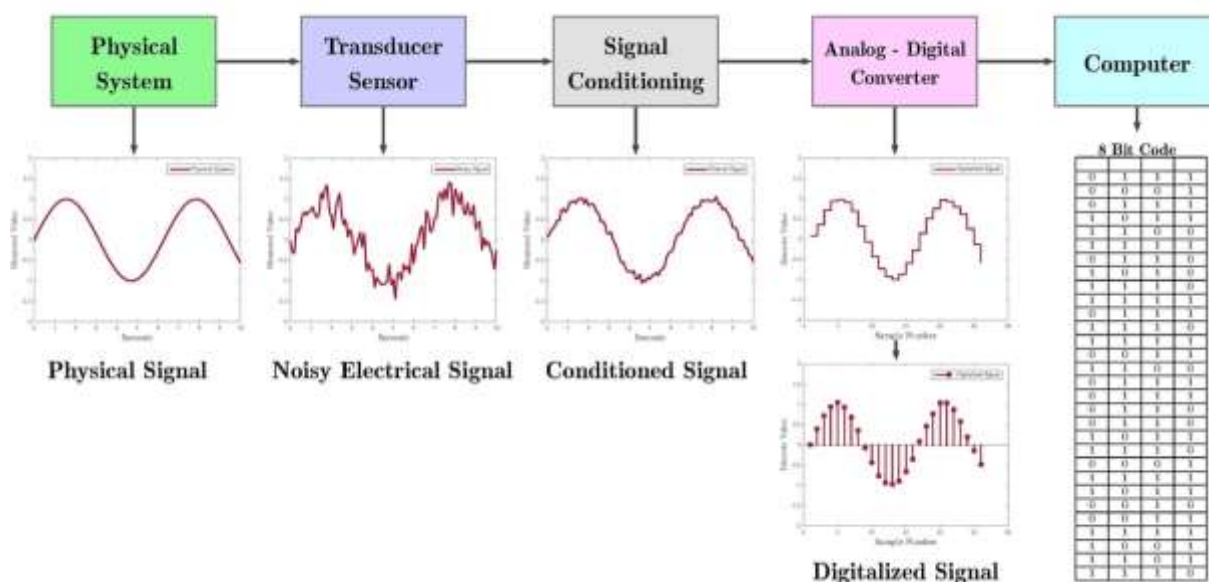
U tom pokusu, interferometar je korišten kao uređaj koji bi dokazao relativno gibanje Zemlje kroz pretpostavljeni eter. Važno je bilo postaviti interferometar tako da jedna zraka bude usmjerena okomito na smjer Zemljinog gibanja, a druga zraka bude postavljena paralelno sa smjerom gibanja Zemlje. Kada se interferometar gibao zajedno sa Zemljom u jednom pravcu, očekivao se pomak na figurama interferencije u jednom smjeru, a kad se interferometar zaokrenuo za 90° , očekivao se pomak figura u drugom smjeru. Očekivanje je bilo u skladu s hipotezom etera, to jest s pretpostavkom kako su brzine svjetlosti u ta dva slučaja različite. Međutim, njihov pokus nije dokazao promjene u iznosu brzine svjetlosti, a time i postojanje etera te su zaključili da se Zemlja nalazi u stanju mirovanja u odnosu na eter. Odlučili su ponavljati mjerenja svaka tri mjeseca kroz neko razdoblje. Kako i u ponovljenim pokusima nije bilo dokaza o postojanju

etera, Michelson je razočaran napustio istraživanja. Iako nije dokazan eter, Michelson-Morleyev pokus je najjača eksperimentalna komponenta za razvojne korake prema modernoj teorijskoj fizici.

3. AKVIZICIJA INTENZITETA INTERFERENCIJSKOG POLJA

Akvizicija podataka je proces uzorkovanja signala kojima mjerimo stvarne fizikalne pojave i pretvaranje u digitalne numeričke vrijednosti koji se onda mogu obrađivati na računalu. Sustav za prikupljanje podataka (*Data Acquisition Systems – DAS* ili *Data Acquisition – DAQ*) najčešće pretvara analogne valne oblike u digitalne vrijednosti. Komponente sustava za prikupljanje podataka su:

- Sensori, pretvaraju fizičke parametre u električne signale
- Sklop za modificiranje signala, pretvaranje senzornih signala u oblik koji se može pretvoriti u digitalne vrijednosti
- Pretvarači analognih u digitalne, pretvaranje modificiranih signala u digitalne vrijednosti



Slika 12 Shema rada digitalnog sistema akvizicije signala

3.1. Uvod

Aplikacije za prikupljanje podataka najčešće su pogonjene programskim paketima koji su razvijeni koristeći velik broj programskih jezika opće namjene, kao što su: *Assembly*, *BASIC*, *C*, *C++*, *C#*, *Fortran*, *Java*, *Lab VIEW*, *LISP*, *Pascal* i drugi. Samostalni sustavi za prikupljanje podataka nazivaju se i *zapisivači podataka (data loggers)*.

Postoje također i programi otvorenog koda (*open-source software*) koji imaju sve neophodne alate kako bi primili podatke s različite hardverske opreme. Ti alati dolaze iz znanstvene

zajednice gdje kompleksni pokusi zahtijevaju brze, fleksibilne i prilagodljive programske pakete. Ti su paketi najčešće prilagođeni, ali neki općeniti *DAQ* programski paket svakako je *MIDAS (Maximum Integrated Data Acquisition System)* koji se može lako prilagoditi te potom koristiti u raznim fizikalnim eksperimentima.

3.1.1. Metodologija

Prikupljanje podataka započinje nekim fizikalnim fenomenom ili fizikalnom značajkom koja se treba mjeriti. To može biti temperatura, svjetlost, tlak plina, protok fluida ili sila. Neovisno o tipu fizikalne značajke koja se mjeri, fizikalno stanje koje se mjeri mora prvo biti pretvoreno u jedinstvenu formu koja onda može biti uzorkovana sustavom za prikupljanje podataka. Uređaj koji je zadužen za obavljanje tog dijela posla naziva se senzor. Sustav za prikupljanje (akviziciju) podataka je zbir softvera i hardvera koji omogućuje mjerenje i kontrolu fizikalnih karakteristika nečega u realnom svijetu. Kompletni sustav za prikupljanje podataka sastoji se od *DAQ* hardvera, senzora i aktuatora, sklopa za kondicioniranje signala i računala s *DAQ* softverom.

Senzor, koji je tip pretvornika, je uređaj koji pretvara fizikalnu značajku u odgovarajući električni signal. Sustav za prikupljanje podataka koji mjeri različite značajke ovisi o senzoru koji su pogodni za očitavanje tih značajki. Uređaj za moduliranje može biti nužan ako signal iz pretvornika nije pogodan za *DAQ* hardver. Signal najčešće mora biti filtriran i pojačan. U svrhu prijenosa, analogni signal jedinstvenog završetka koji je mnogo osjetljiviji na buku može biti konvertiran na diferencijalni signal. Jednom kad je digitaliziran može biti kodiran kako bi se smanjile i ispravile greške

3.1.2. DAS / DAQ hardver

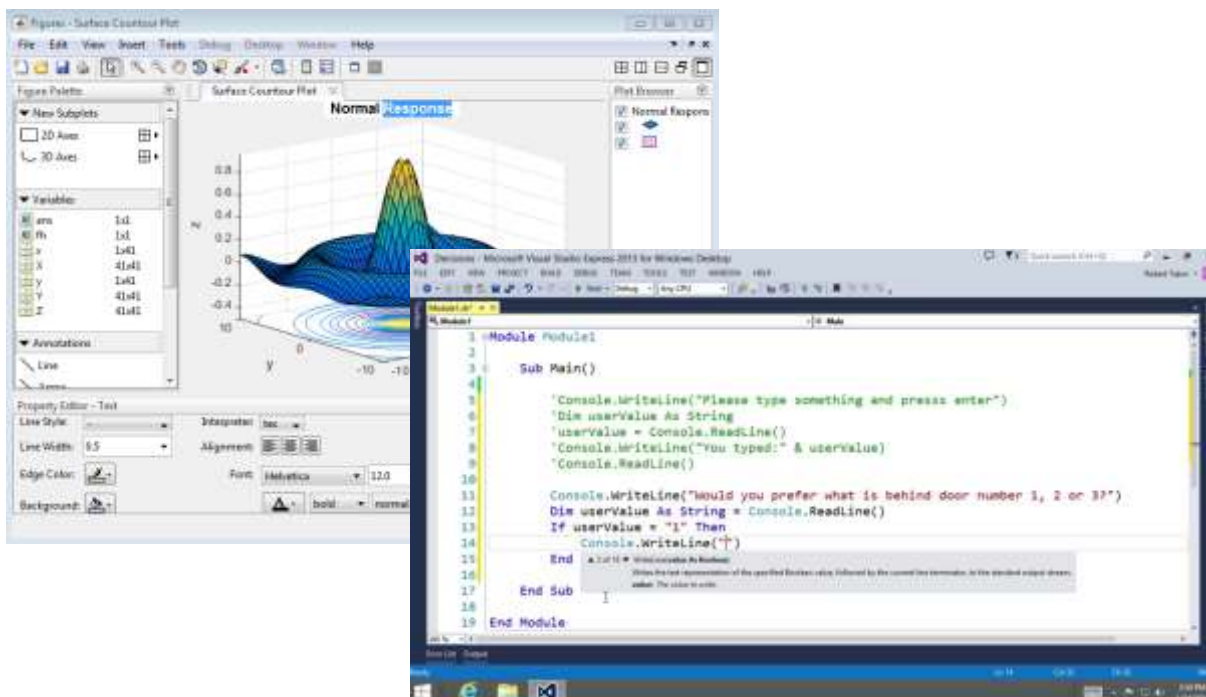
DAQ hardver je posrednik između signala i računala. Može biti u obliku modula koji se mogu spojiti na računalne portove (paralelni, serijski, USB, itd.) ili kartice spojene na utore (S-100 bus, AppleBus, ISA, MCA, PCI, PCI-E, itd.) na matičnoj ploči. *DAQ* kartice često sadrže različite komponente (multiplexer, ADC, DAC, TTL-IO, precizni mjerači vremena, RAM). One su dostupne preko busova i mikrokontrolera koji može pokretati male programe.



Slika 13 Arduino

3.1.3. DAS / DAQ softver

Specijalizirani DAQ softver često je dostavljen s DAQ hardverom. Softveri koji se koriste za gradnju velikih sistema prikupljanja podataka uključuju EPICS. Drugi programi, također su: ladder logic, Visual C++, Visual Basic, LabVIEW i MATLAB.



Slika 14 DAQ softveri

3.2. Detektori intenziteta svjetlosti

Fotodioda je poluvodički element koja pretvara svjetlost u struju. Struja je generirana apsorpcijom fotona u fotodiodu. Mala količina struje također je proizvedena i kad nema svjetlosti. Fotodiode mogu sadržavati optičke filtere, ugrađene leće te mogu biti malih ili velikih površina. Najčešće imaju sporije vrijeme odziva što su površine veće. Inače, tradicionalna solarna ćelija koja se koristi za generiranje električne struje je, zapravo, fotodioda s velikom površinom. Fotodiode su slične običnim poluvodičkim diodama s razlikom što mogu biti spojene optičkim vlaknima kako bi omogućile svjetlu da dođe od osjetilnog djela uređaja.



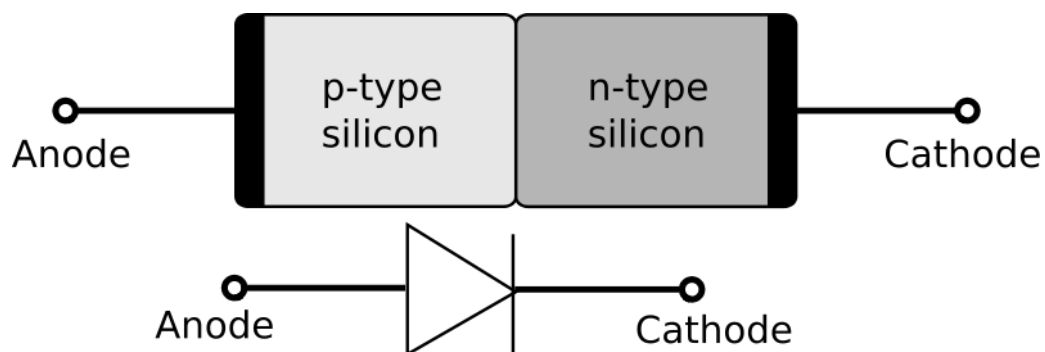
Slika 15 Fotodioda

3.2.1. Princip rada

Fotodioda se spaja PN priključkom ili PIN priključkom. Kada foton dovoljne energije udari diodu stvara se elektronska rupa. Taj se mehanizam zove fotoelektrički efekt. Ako se apsorpcija dogodi u zoni prostornog naboja nositelji su pomaknuti od spoja električnim poljem. Elektronske rupe tada se pomiču prema anodi, a elektroni prema katodi te je fotostruja proizvedena. Ukupna struja kroz fotodiodu je zbroj tamne struje (struja koja je generirana u odsustvu svjetla) i fotostruje, stoga tamna struja mora biti minimizirana kako bi se maksimizirala osjetljivost uređaja.



Slika 17 PIN dioda



Slika 16 p - n spoj

3.2.1.1. Fotonaponski način rada

Kada se fotodiode koristi u fotonaponskom načinu rada, protok struje iz uređaja je ograničen, a napon raste. Ovaj način rada iskorištava fotonaponski efekt, što je temelj solarnih ćelija – tradicionalne solarne ćelije su fotodiode velikih površina.



Slika 18 Solarne ploče

3.2.1.2. Fotovodljivi način rada

U ovom načinu rada dioda je često obrnuto polarizirana (katoda je pozitivna za razliku od anode). To smanjuje vrijeme odziva zato što obrnuto polarizirana dodatno povećava širinu zone prostornog naboja što potom smanjuje kapacitet spoja. Također povećava tamnu struju bez puno promjene fotostruje. Za određenu spektralnu distribuciju, foto struje gotovo je proporcionalna osvjetljenju.

3.2.2. Materijali

Materijal od kojeg se rade fotodiode je kritičan za definiranje njezinih svojstava zato što samo protoni s dovoljno energije mogu pobuditi elektrone kroz pojasni razmak materijala da proizvedu značajniju količinu struje. Materijali koji se najčešće koriste za proizvodnju fotodiode prikazani su u sljedećoj tablici s pripadnim valnim duljinama.

Tablica 1 Materijali fotodiode

Materijal	Raspon valnih duljina [nm]
Silicij	190 – 1100
Germanij	400 – 1700
Indij, galij, arsen	800 – 2600
Olovov sulfid	1000 – 3500
Živa, kadmij	400 – 1400

3.2.3. Neželjene posljedice

Bilo koji PN priključak, ako se osvijetli, potencijalno postaje fotodiode. Poluvodički elementi kao što su tranzistori sadrže PN priključke te neće funkcionirati ispravno ako su osvijetljeni neželjenim elektromagnetskim zračenjem (svjetlom) valne duljine pogodnim za proizvesti struju. To se sprečava zatvaranjem elementa u neprozirno kućište. Ako kućišta nisu potpuno neprozirna za visoko energetska zračenja (ultraljubičasto, X-zrake i gama zrake) tranzistori mogu izazvati kvar zbog inducirane fotostruje. Pozadinska zračenja pakiranja, također nisu zanemariva. Zaštita od radijacije ublažava te efekte.

3.2.4. Značajke

3.2.4.1. Odziv

Spektralni odziv je omjer generirane fotostruje i vezane svjetlosne snage izražen u A/W kada se koristi u fotovodljivom načinu rada. Ovisnost valne duljine može biti izražena kao kvantna efikasnost ili omjer generiranih fotona i potaknutih fotona – bezdimenzijska veličina.

3.2.4.2. Tamna struja

Struja koja prolazi kroz fotodiodu kada nema svjetlosti u fotovodljivom načinu rada zove se tamna struja. Tamna struja se generira pozadinskim zračenjem i zasićenjem poluvodičkog priključka. Mora biti uračunata kod umjeravanja kada se fotodioda koristi za izradu preciznih optičkih mjernih instrumenata, također je izvor buke kada se fotodioda koristi u optičkim komunikacijskim sustavima.

3.2.4.3. Vrijeme odziva

Foton kojeg apsorbira poluvodički materijal generirat će šupljinu koja će se početi kretati u materijalu pod efektom električnog polja te tako stvarati struju. Konačno trajanje te struje je znano kao vrijeme prolaza i može se procijeniti Ramovim teoremom. Tim teoremom također možemo pokazati da je ukupan naboj jednak $e (1.6021766208(98) \cdot 10^{-19} \text{ C})$, a ne $2e$ kako bi se možda pomislilo.







3.2.4.4. NEP (Noise – equivalent power)

NEP je mjera osjetljivosti fotodetektora. Definirana je kao snaga signala koja daje omjer signala i šuma. Mjerna jedinica je vat po korijenu herca ($\text{W}/\sqrt{\text{Hz}}$).

3.2.5. Primjeri

Sljedeća tablica prikazuje neke komercijalne fotodiode koje se mogu pronaći na tržištu, sve su silicijeve jer najbolje odgovaraju valnoj duljini koju ćemo mi trebati. U tablici je i dana aktivna površina te vrijeme odziva

Tablica 2 Primjeri komercijalnih fotodioda

						
	FDS010	FDS10X10	FDS100	FDS025	FDS02	FDS1010
Valna duljina	200 - 1100 nm	340 - 1100 nm	350 - 1100 nm	400 - 1100 nm	400 - 1100 nm	350 - 1100 nm
Aktivna površina	0.82 mm ² (Ø1.02 mm)	100 mm ² (10 mm x 10 mm)	13 mm ² (3.6 mm x 3.6 mm)	0.049 mm ² (Ø0.25 mm)	0.049 mm ² (Ø0.25 mm)	100 mm ² (10 mm x 10 mm)
Vrijeme odziva	1 ns / 1 ns ^a @ 10 V	150 ns / 150 ns ^a @ 5 V	10 ns / 10 ns ^b @ 20 V	47 ps / 246 ps ^a @ 5 V	47 ps / 246 ps ^a @ 5 V	65 ns / 65 ns ^b @ 5 V
NEP (W/Hz^{1/2})	1.2 x 10 ⁻¹³ @ 830 nm, 10 V	1.50 x 10 ⁻¹⁴ @ 960 nm	1.2 x 10 ⁻¹⁴ @ 900 nm, 20 V	9.29 x 10 ⁻¹⁵ @ 850 nm, 20 V	9.29 x 10 ⁻¹⁵ @ 850 nm, 20 V	2.07 x 10 ⁻¹³ @ 970 nm, 5 V
Tamna struja	0.3 nA (Typ.) @ 10 V	200 pA @ 5 V	1.0 nA (Typ.); 20 nA (Max.) @ 20 V	35 pA (Typ.) @ 5 V	35 pA (Typ.) @ 5 V	600 nA (Max) @ 5 V
Kapacitet spoja	6 pF (Typ.) @ 10 V	380 pF @ 5 V	24 pF (Typ.) @ 20 V	0.94 pF (Typ.) @ 5 V	0.94 pF (Typ.) @ 5 V	375 pF (Typ) @ 5 V

4. OPTOELEKTRIČNI SUSTAV DETEKCIJE SIGNALA FOTODIODE

Shodno teorijskoj podlozi koja je gore opisana krenulo se u razvoj vlastitog sustava za detekciju signala i akviziciju istog. Korištene su osnovne komponente za razvoj elektroničkih sustava, kao što su otpornici, kondenzatori i čipovi. Svi elementi složeni su na eksperimentalnu pločicu tip EIC-404-3. Za napajanje koristio se obični 5 voltni (V), 1.2 amporni (A) adapter, a za spajanje komponenti prenosni, žičani vodiči.



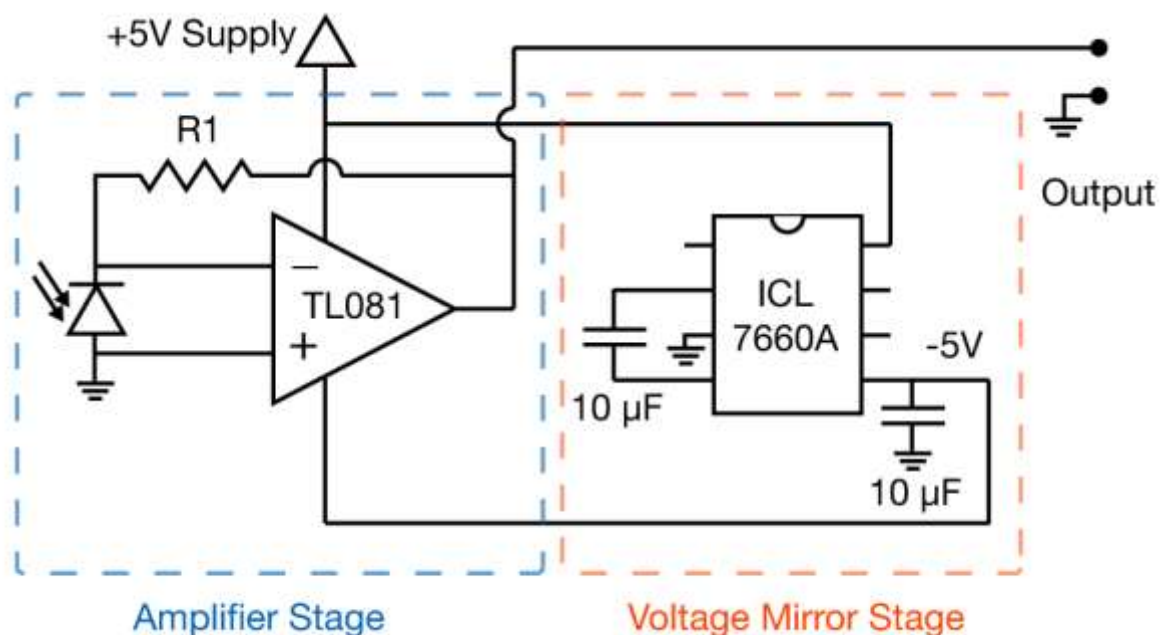
Slika 19 Eksperimentalna pločica E-CALL tip EIC-404-3



Slika 20 5V adapter

4.1. Spajanje

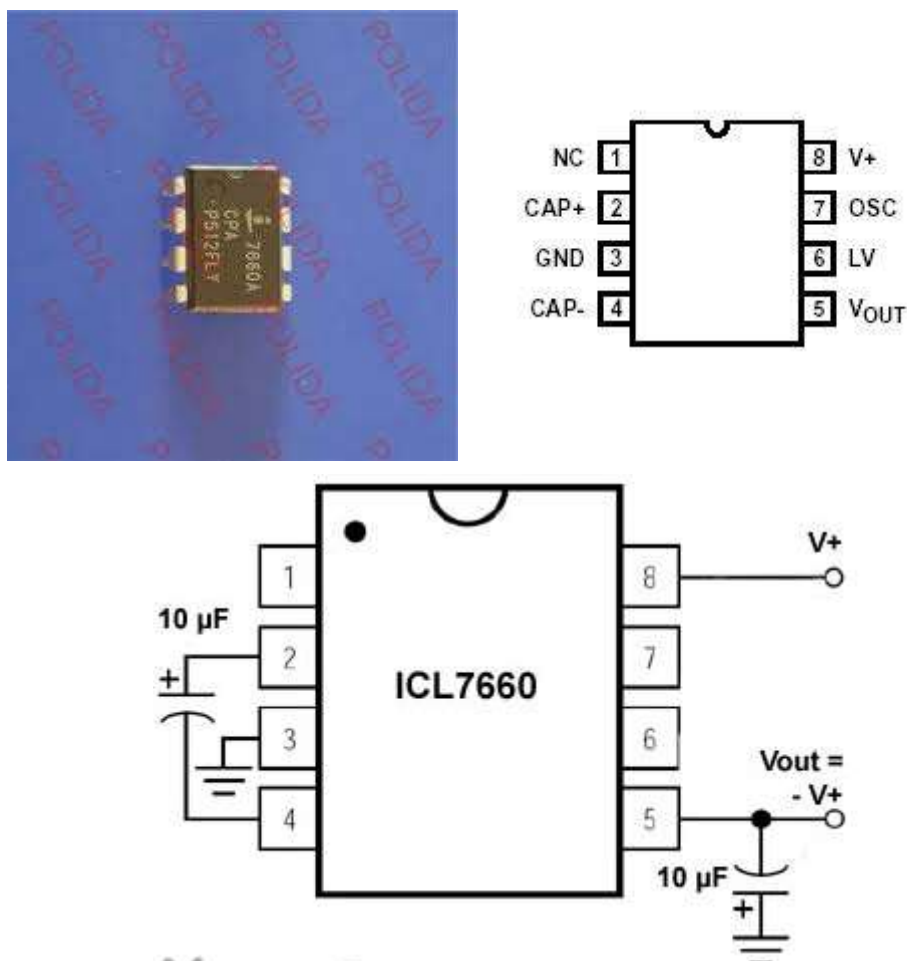
Spajanje je vršeno po sljedećoj shemi.



Slika 21 Shema spajanja komponenti na eksperimentalnu pločicu (ref [9])

Shema je podijeljena u dvije „faze“ rada, prva je *Voltage Mirror Stage*, tj. faza zrcaljenja napona, a druga *Amplifier stage* tj. faza pojačavanja.

Kako bi ovaj strujni krug radio, moramo stvoriti negativni napon. To nam je nužno zato što ako se nalazimo u savršeno tamnom mjestu, faza pojačavanja bi nam htjela pokazati 0 volti, a pojačivači, najčešće, ne mogu dosegnuti taj napon (npr. ako je opskrbeni napon 5 V i 0 V, faza bi radila između 100 mV i 4.9 V). Postoji puno načina na koji možemo načiniti negativni napon, ali kako bi stvar bila jednostavna i, što je još važnije, modularna korištena je faza koja mijenja predznak bilo kojem naponu koji dođe na njega. To se postiže čipom ICL7660A. Pozitivni napon dolazi u pin 8, uzemljenje u pin 3, jedan kondenzator od 10 µF između pinova 2 i 4, i jedan između pinova 5 i uzemljenja. Bilo koji napon koji se dovede na pin 8, dobije se isti, ali suprotnog predznaka na pinu 8. Sljedeća slika prikazuje čip ICL7660A i njegovu shemu spajanja u strujni krug.



Slika 22 ČIP ICL7660A

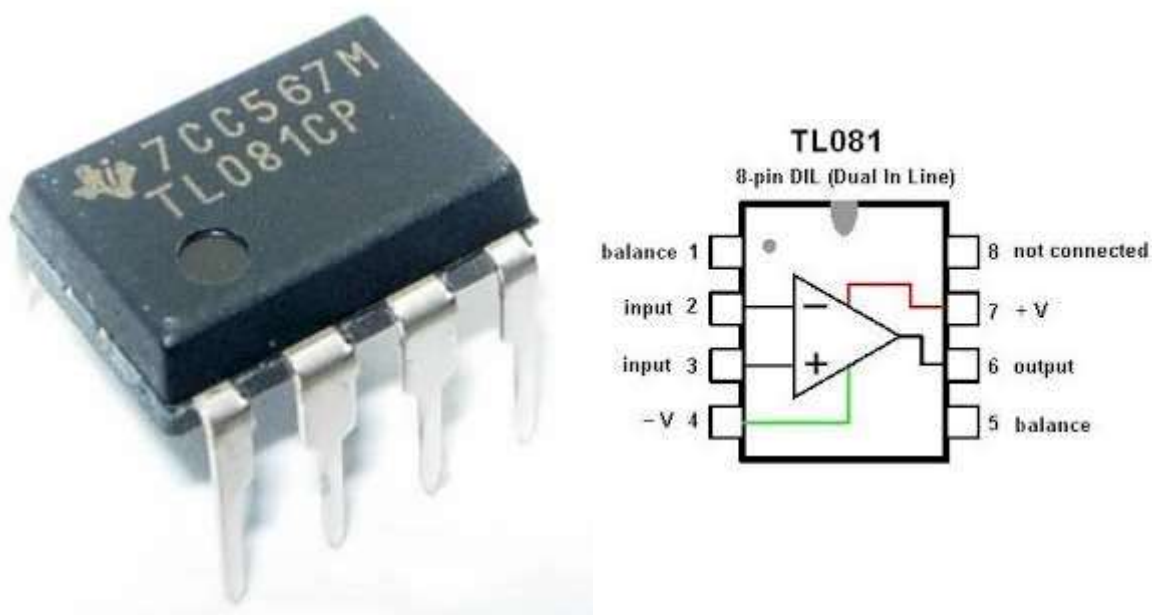
Sada kad imamo negativni napon, bit će lako raditi s fazom pojačavanja, ona će učiniti sve da izokrenuti i ne-izokrenuti ulaz imaju isti napon. Logika je sljedeća:

1. Svjetlost pada na fotodiodu, što prouzročava pozitivni naboj na katodi fotodiode.
2. Naboj izmjenjuje napon na ne-izokrenutom ulazu pojačivača.
3. Izlazni napon pojačivača se povećava dok struja koja prolazi kroz otpornik R1 ne bude dovoljno velika da se suprotstavi struji koju je generirala fotodioda.

Iz ovoga se vidi da kako se otpor na otporniku R1 povećava, pojačivač mora stvarati veće i veće napone kako bi bilo dovoljno struje koja bi se opirala struji fotodiode.

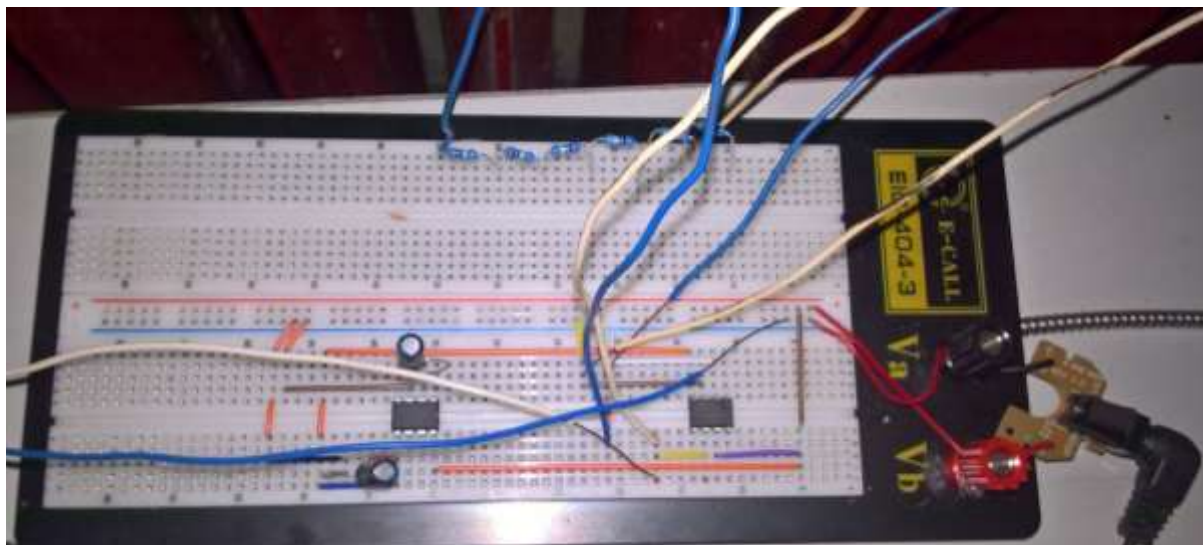
Ako je R1 jako velik, pojačivač će biti preosjetljiv, tj. zasitit će fotodiodu (davati veliki izlazni napon) i kad je malo svjetla, također izlazni napon bit će izrazito bučan.

Ako je R1 premali, neće biti moguće pojačati svjetlom izazvanu struju i stoga se neće moći detektirati ništa.



Slika 23 ČIP TL081

Cijela spojena pločica prikazana je na sljedećoj slici.



Slika 24 Spojena pločica

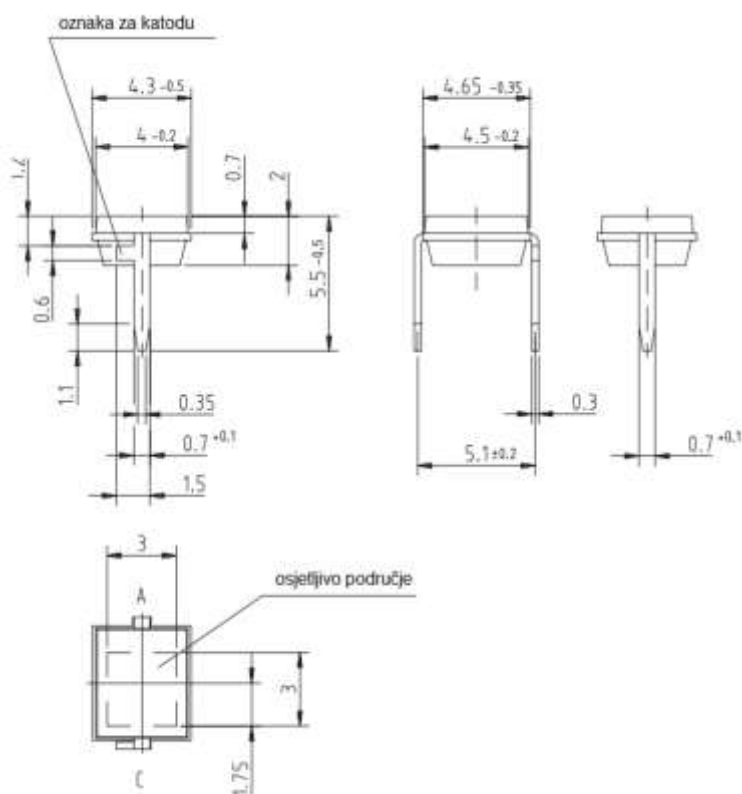
4.2. Fotodioda

Izabrana je fotodioda BPW34 od *Vishaya* nabavljena u čipoteci. Fotodioda ima osjetljivu površinu od 9 mm² od čega 7.5 mm² ima veliku osjetljivost, a ostatak poluosjetljivost s upadom zrake od ± 65° te oznaku za katodu.



Slika 25 Fotodioda BPW34

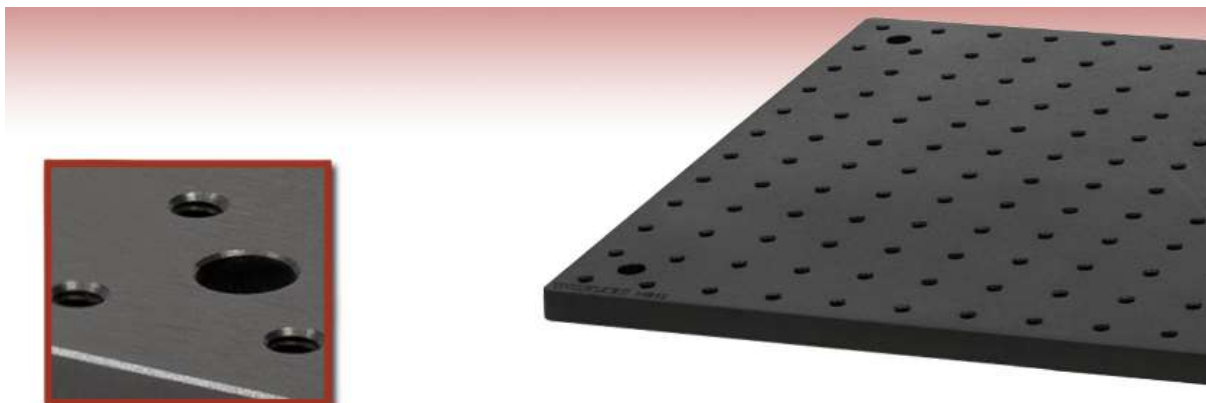
Sljedeća slika prikazuje radionički crtež s dimenzijama fotodiode.



Slika 26 Fotodioda BPW34 - radionički crtež

4.3. Postavljanje modula

Dok se razvijao sustav svi optomehanički elementi su se postavljali na *THORLABS*-ovu ploču.



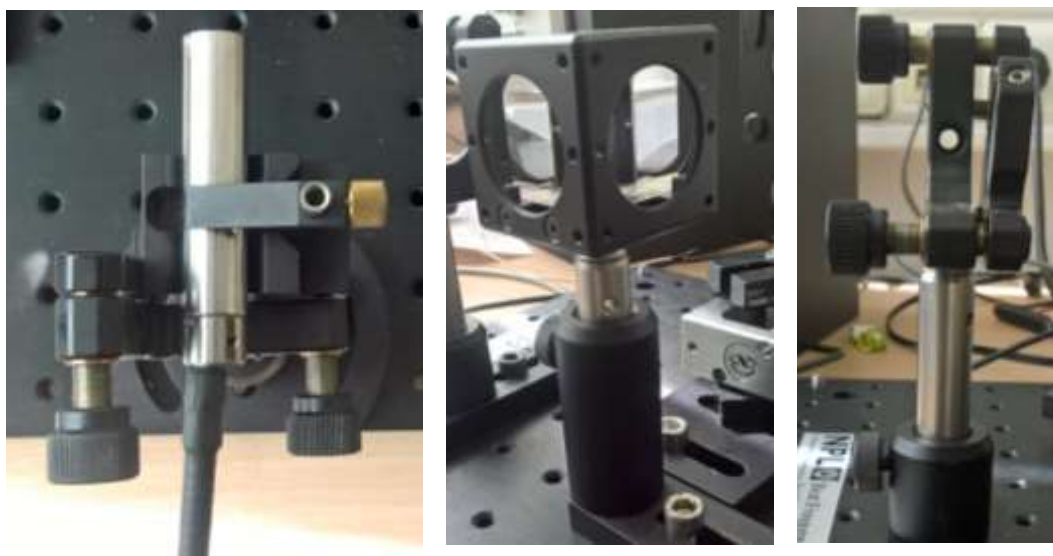
Slika 27 *THORLABS*-ova ploča za prihvat optomehaničkih elemenata

Ploča je zasebni proizvod i može se kupiti u raznim veličinama. Prikaz je u sljedećoj tablici.

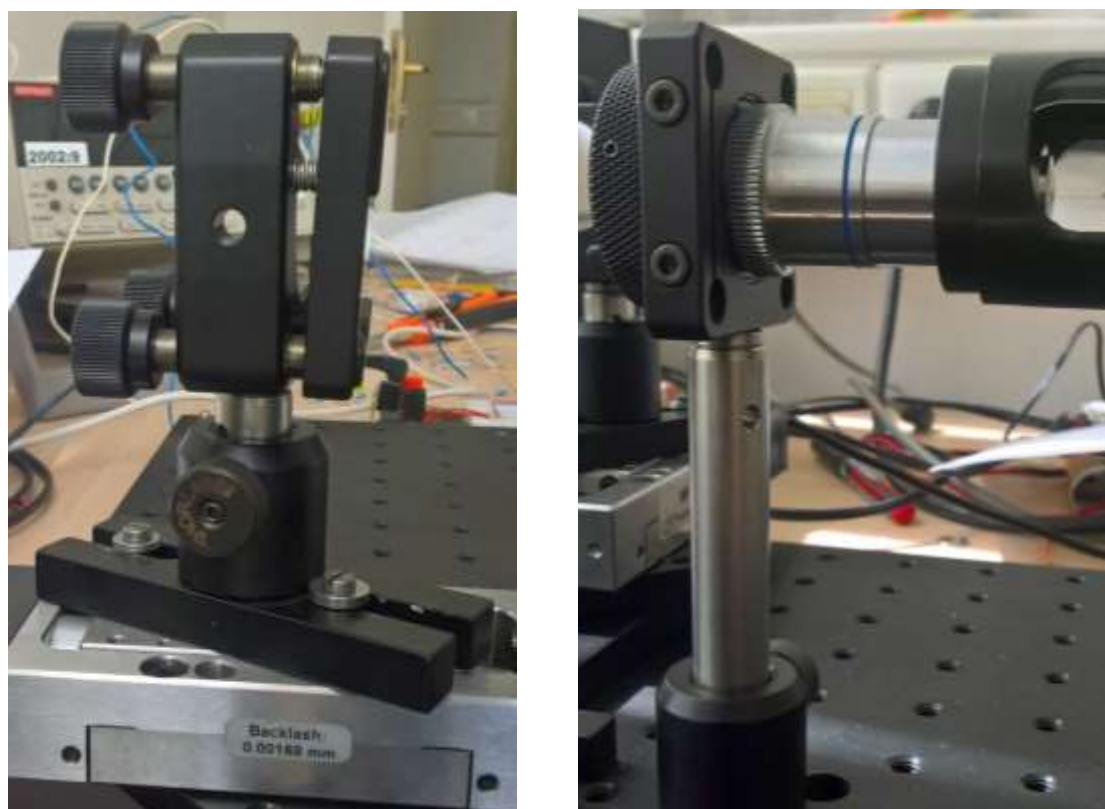
Tablica 3 Dimenzije ploča s pripadnim masama

Proizvod	Dimenzije	Masa (kg)
MB1030/M	100 mm x 300 mm x 12.7 mm	1.0
MB1515/M	150 mm x 150 mm x 12.7 mm	0.75
MB1530F/M	150 mm x 300 mm x 12.7 mm	1.5
MB1545/M	150 mm x 450 mm x 12.7 mm	2.3
MB1560/M	150 mm x 600 mm x 12.7 mm	3.00
MB1590/M	150 mm x 900 mm x 12.7 mm	4.50
MB15120/M	150 mm x 1200 mm x 12.7 mm	6.00
MB2020/M	200 mm x 200 mm x 12.7 mm	1.33
MB2025/M	200 mm x 250 mm x 12.7 mm	1.66
MB2530/M	250 mm x 300 mm x 12.7 mm	2.50
MB3030/M	300 mm x 300 mm x 12.7 mm	3.00
MB3045/M	300 mm x 450 mm x 12.7 mm	4.50
MB3060/M	300 mm x 600 mm x 12.7 mm	6.00
MB3090/M	300 mm x 900 mm x 12.7 mm	9.00
MB30120/M	300 mm x 1200 mm x 12.7 mm	12.00
MB35115/M	350 mm x 1150 mm x 12.7 mm	13.0
MB35142/M	350 mm x 1425 mm x 12.7 mm	16.2
MB4545/M	450 mm x 450 mm x 12.7 mm	6.70
MB4560/M	450 mm x 600 mm x 12.7 mm	9.00
MB4575/M	450 mm x 750 mm x 12.7 mm	11.20
MB4590/M	450 mm x 900 mm x 12.7 mm	13.5
MB6060/M	600 mm x 600 mm x 12.7 mm	12.00
MB6090/M	600 mm x 900 mm x 12.7 mm	18.00
MB60120/M	600 mm x 1200 mm x 12.7 mm	23.00
MB7575/M	750 mm x 750 mm x 12.7 mm	18.60

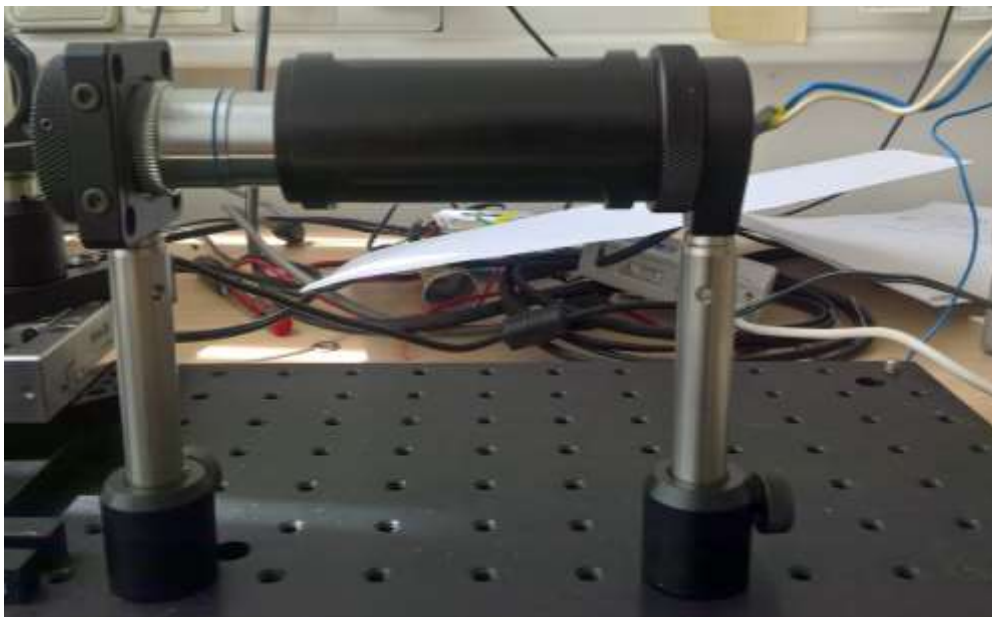
Ostali moduli pričvršćeni su vijčanim spojem za tu istu ploču.



Slika 28 Laser, razdjelnik zrake i zrcalo 1



Slika 29 Zrcalo 2 i objektiv



Slika 30 Fotodioda sa zaštitom od dnevnog svjetla



Slika 31 Kompletno postavljene moduli

4.4. Zasićenje dnevnim svjetlom

Zasigurno najveći problem koji se pojavio pri razvoju sustava za mjerenje laserskim interferometrom je zasićenje dnevnim svjetlom. Naime, kao što znamo, svaka fotodioda „prima“ određenu svjetlost i, poznatim načinom rada koji je objašnjen u tekstu gore, tu svjetlost pretvara u napon. Međutim, kako se cijeli sustav razvija u uredu gdje ne postoji zaštita od dnevnog svjetla dolazi do zasićenja fotodiode.

Naš je cilj omogućiti fotodiodi da prepozna razliku između konstruktivne i destruktivne interferencijske pruge. Konstruktivna interferencijska pruga manifestirat će se kao svjetla pruga te će fotodioda, obzirom na tu svjetlost, dati veći napon. Destruktivna interferencijska pruga manifestirat će se kao tamna pruga i, u idealnom slučaju, neće dati nikakav napon. U praksi, zbog toga što ne možemo točno razdvojiti konstruktivnu i destruktivnu interferencijsku prugu te ne možemo apsolutno izolirati osjetljivo područje fotodiode, nećemo dobivati napon od 0V, ali se moramo pobrinuti da je znatno manji od svijetle pruge.

Prvo nahođenje je bilo da treba dobro izolirati fotodiodu od dnevnog svjetla. Za sami razvoj koristili su se papirnati tuljci, pokrivanje jaknom pa čak i razne kartonske kutijice kako bi se spriječio dovod dnevnog svjetla. Razmišljalo se i o preseljenju u tamnu sobu, čak, i o radu po noći, međutim to nije bilo praktično jer je tako tamnu sobu vrlo teško osigurati (računalo svijetli, a nekakva svjetlost potrebna je i za rad).

Pa kao što je mnogo puta rečeno: *najbolje rješenje najčešće je ono najjednostavnije*. Za zaštitu od dnevnog svjetla uzeo se optomehanički element crne metalne cijevi koji dobro štiti fotodiodu od dnevnog svjetla, a sljedeća slika ga prikazuje.



Slika 32 Zaštita od dnevnog svjetla

Međutim, to nije bio jedini problem. Kao što je napomenuto, bilo je potrebno i ograničiti osjetljivost fotodiode, tj. upad svjetlosti na osjetljivo područje fotodiode. To se napravilo sužavanjem otvora blende – također kupovnog optomehaničkog elementa koji se spoji na metalnu cijev.

Zadnje, osjetljivost faze pojačavanja (lijevi dio gornje sheme) regulira se promjenom otpora. Iterativnom metodom došlo se do zaključka da je optimalna količina otpora, da bi se dobio

lijepi „sinusni“ val koji je lagano očitati, 500 000 Ω , tj. 500 k Ω . Korišteni su otpori od po 100 k Ω koji su spojeni u seriju.

4.5. DAQ

Teorija akvizicije signala objašnjena je u prethodnim poglavljima, tako da ju ovdje nećemo ponovno obrađivati već ćemo se bazirati na praktičnoj obradi sustava. Za spajanje na računalo korišten je optomehanički element akvizicije signala *MC Measurement Computing USB-1208LS*.

Iako taj model nije dovoljno jak da zaprima količinu signala koja nam je potrebna (zaprima tisuću uzoraka po sekundi), odlučili smo koristiti njega za probu, budući da ga imamo na Fakultetu i bio je raspoloživ tijekom provedbe pokusa. Ukoliko eksperiment bude uspješan (a sada znamo da jest) planira se nabaviti model s mogućnošću uzorkovanja između 500 kS i 1 MS (između 500 000 i 1 000 000 uzoraka po sekundi) koji će onda biti dostatan za nesmetano mjerenje.



Slika 33 MC Measurement Computing USB-1208LS

Frekvencijom uzimanja uzoraka zapravo određujemo maksimalnu brzinu pomaka pomičnog kraka interferometra. Iz jednadžbi za jednoliku brzinu dobivamo brzine za frekvenciju uzimanja uzorka od 1 kS/s i od 1 MS/s

$$v = \frac{s}{t} = \frac{\frac{\lambda}{2}}{\frac{1}{1000}} = \frac{\frac{632.8}{2}}{\frac{1}{1000}} = 316400 \frac{\text{nm}}{\text{s}} \cdot 10^{-6} = 0.3164 \frac{\text{mm}}{\text{s}} \quad (1)$$

$$v = \frac{s}{t} = \frac{\frac{\lambda}{2}}{\frac{1}{1000}} = \frac{\frac{632.8}{2}}{\frac{1}{1000000}} = 316400000 \frac{\text{nm}}{\text{s}} \cdot 10^{-6} = 316.4 \frac{\text{mm}}{\text{s}} \quad (2)$$

Vidimo da se u prvom slučaju moramo pomicati jako sporo, izvedivo jedino nekim motorom. U drugom slučaju i ručno pomicanje će biti dostatno.

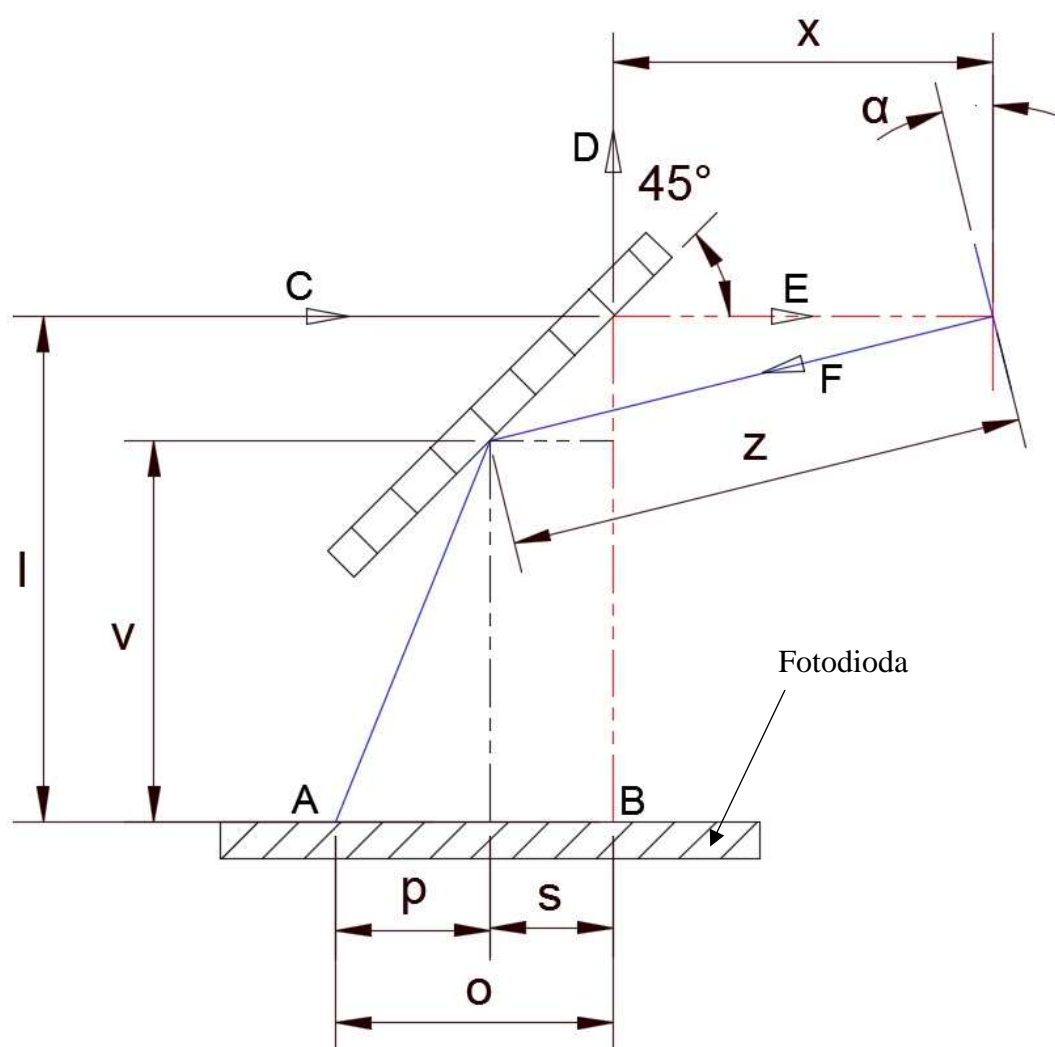
Ovdje je važno napomenuti još jednu stvar. Naime, u mjerenjima tj. detekciji koju će fotodioda prihvaćati mi ćemo dobivati informaciju o pomaku, ali ne i o smjeru. Brojanjem vrhova poluvalova dobivamo isključivo količinu pomaka. U ovom slučaju fotodioda ne zna u kojem se smjeru pomični krak interferometra pomaknuo.

5. PRORAČUN Odstupanja od pravocrtnosti pomičnog kraja interferometra

Kao što je i gore već bilo rečeno, zrake svjetlosti se gibaju pravocrtno te time podliježu zakonima i formulacijama trigonometrije. I mali kut zakreta na zrcalu mijenja mjesto upada na fotodiodi. U ovom poglavlju razrađen je proračun ovisnosti kuta zakreta o upadu na zrcalo na pomičnom kraju interferometra. Proračun je obavljen za dvije ravnine, vertikalnu i horizontalnu.

5.1. Vertikalna ravnina

Slika prikazuje put zrake nakon dijeljenja i odbijanja od zrcala pa dolaska do fotodiode.

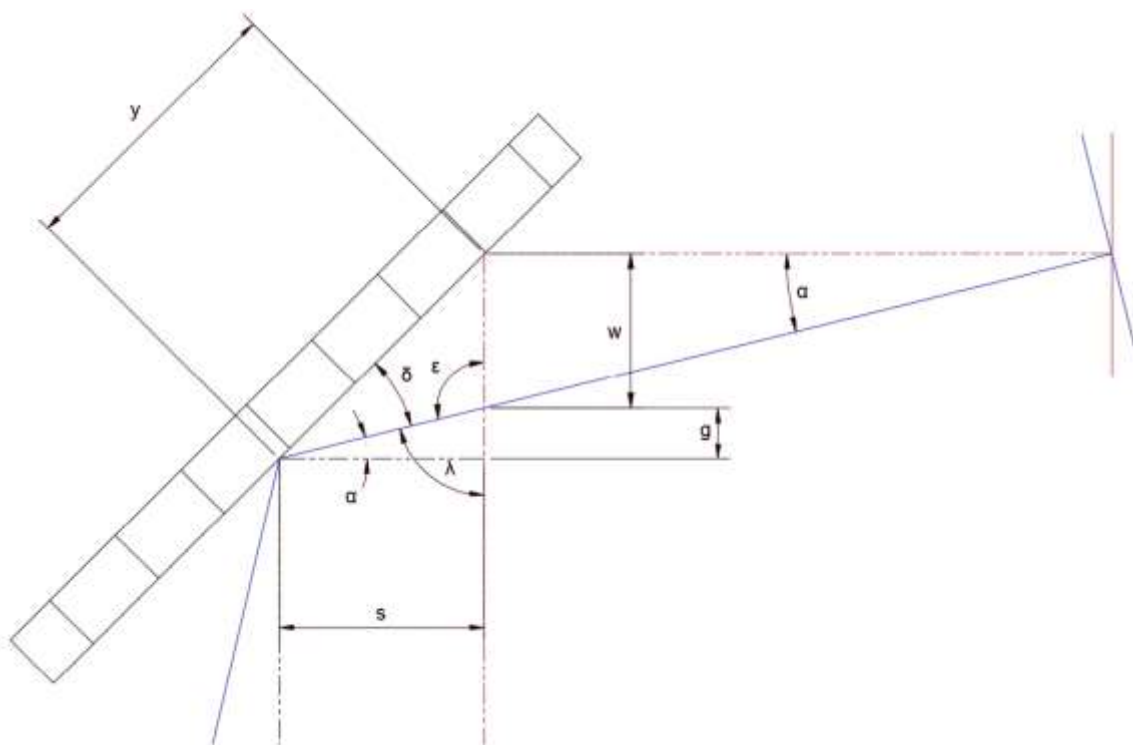


Slika 34 Put laserske zrake u horizontalnoj ravnini.

Laserska zraka dolazi iz točke C. Na razdjelniku zrake dijeli se na D i E (detaljno objašnjeno u poglavlju Michaelsonov interferometar) te se odbija putem strelice F, potom prati plavu liniju

dok ne dođe do točke A na fotiodiodi. Crvena, isprekidana linija pokazivala bi idealan slučaj, kada nikakvo odstupanje od kuta zakreta ne bi postojalo.

Shema je karikirana. Udaljenost x bitno je veća od l i v , a kutovi zakreta su prikazani većima nego što uistinu jesu.



Slika 35 Kutovi za trigonometrijski proračun

Sama konstrukcija ima početna ograničenja, a ona glase:

$$\beta = \frac{3\pi}{4} \quad (3)$$

$$\delta = \frac{\pi}{4} - \alpha \quad (4)$$

$$\varepsilon = \frac{\pi}{2} + \alpha \quad (5)$$

$$\lambda = \frac{\pi}{2} - \alpha \quad (6)$$

dok je α početni kut zakreta zrcala, a x pomični kraj interferometra koji varira od nekoliko do 1000 mm, vrijednost l , je udaljenost fotiodiode od razdjelnika zrake i iznosi oko 100 mm.

Iz sinusnog poučka za trokut:

$$\frac{x}{\sin(\delta)} = \frac{z}{\sin(\beta)} = \frac{y}{\sin(\alpha)} \quad (7)$$

dobivamo y , odstupanje na razdjelniku zrake kod upada:

$$y = x \cdot \frac{\sin(\alpha)}{\sin(\delta)} \quad (8)$$

Iz sinusnog poučka za trokut:

$$\frac{y}{\sin(\varepsilon)} = \frac{w}{\sin(\delta)} = \frac{q}{\sin(45^\circ)} \quad (9)$$

dobivamo w i q :

$$w = y \cdot \frac{\sin(\delta)}{\sin(\varepsilon)} \quad (10)$$

$$q = y \cdot \frac{\sqrt{2}}{2 \cdot \sin\left(\frac{\pi}{2} + \alpha\right)} \quad (11)$$

Nadalje, g :

$$g = q \cdot \sin(\alpha) \quad (12)$$

Udaljenost od fotodiode, v , računamo:

$$v = l - (g + w) \quad (13)$$

Konačno,

$$p = v \cdot \tan(\alpha) \quad (14)$$

i

$$s = q \cdot \sin\left(\frac{\pi}{2} - \alpha\right) \quad (15)$$

ili

$$s = w + g \quad (16)$$

Zbroj p i s daje ukupnu udaljenost od centra fotodiode (točke u koju bi laserska zraka došla u idealnom slučaju).

$$o = p + s \quad (17)$$

U programskom paketu *Mathematica* uvrstili su se svi izrazi te izračunala inverzija funkcije jer nam je potrebna ovisnost kuta o promjeni pomičnog kraka interferometra.

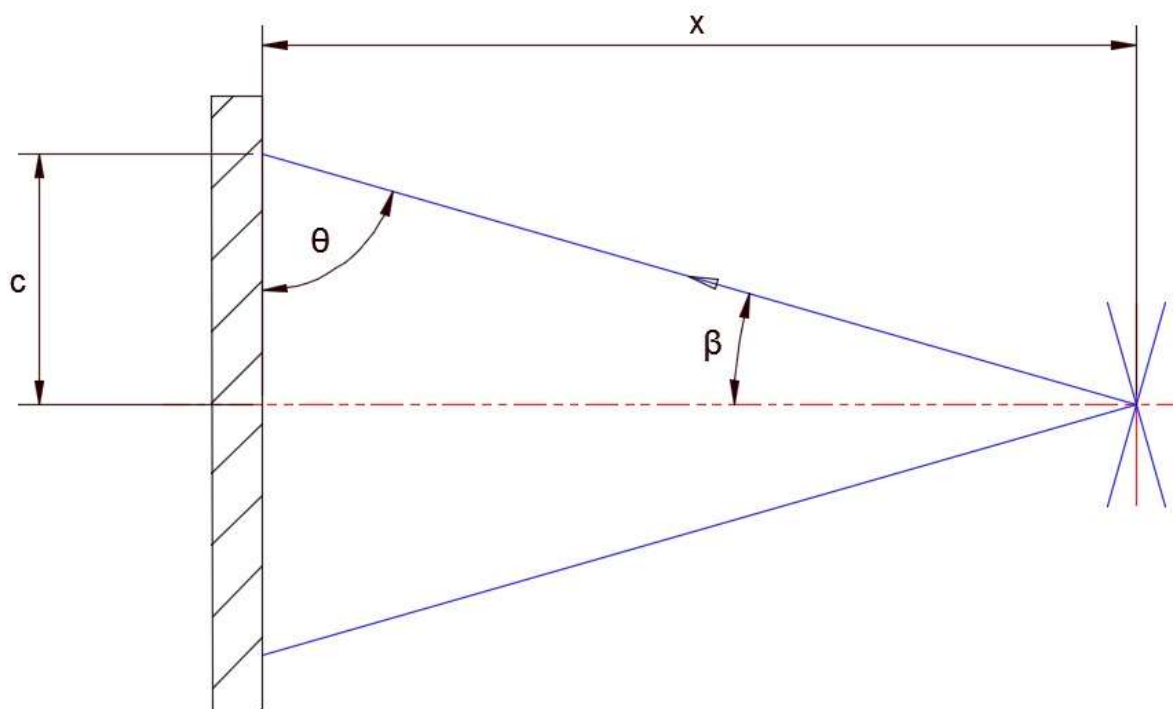
$$\alpha = \tan^{-1}\left(\frac{o}{x + l}\right) \quad (18)$$

Posebno za naš slučaj, osjetljivo područje fotodiode je 3×3 mm, tj. 9 mm^2 . Udaljenost od osi diode stoga je 1.5 mm, na skici to je vrijednost o . Uvrštavajući početne uvjete u jednadžbu za kut zakreta dobivamo:

$$\alpha = \tan^{-1}\left(\frac{1.5}{1000 + 100}\right) = 0.00136364 \text{ rad} \quad (19)$$

5.2. Horizontalna ravnina

Kao i u vertikalnoj ravnini, odstupanje postoji i u horizontalnoj. U ovoj ravnini β je početni kut zakreta zrcala.



Slika 36 Put laserske zrake u horizontalnoj ravnini

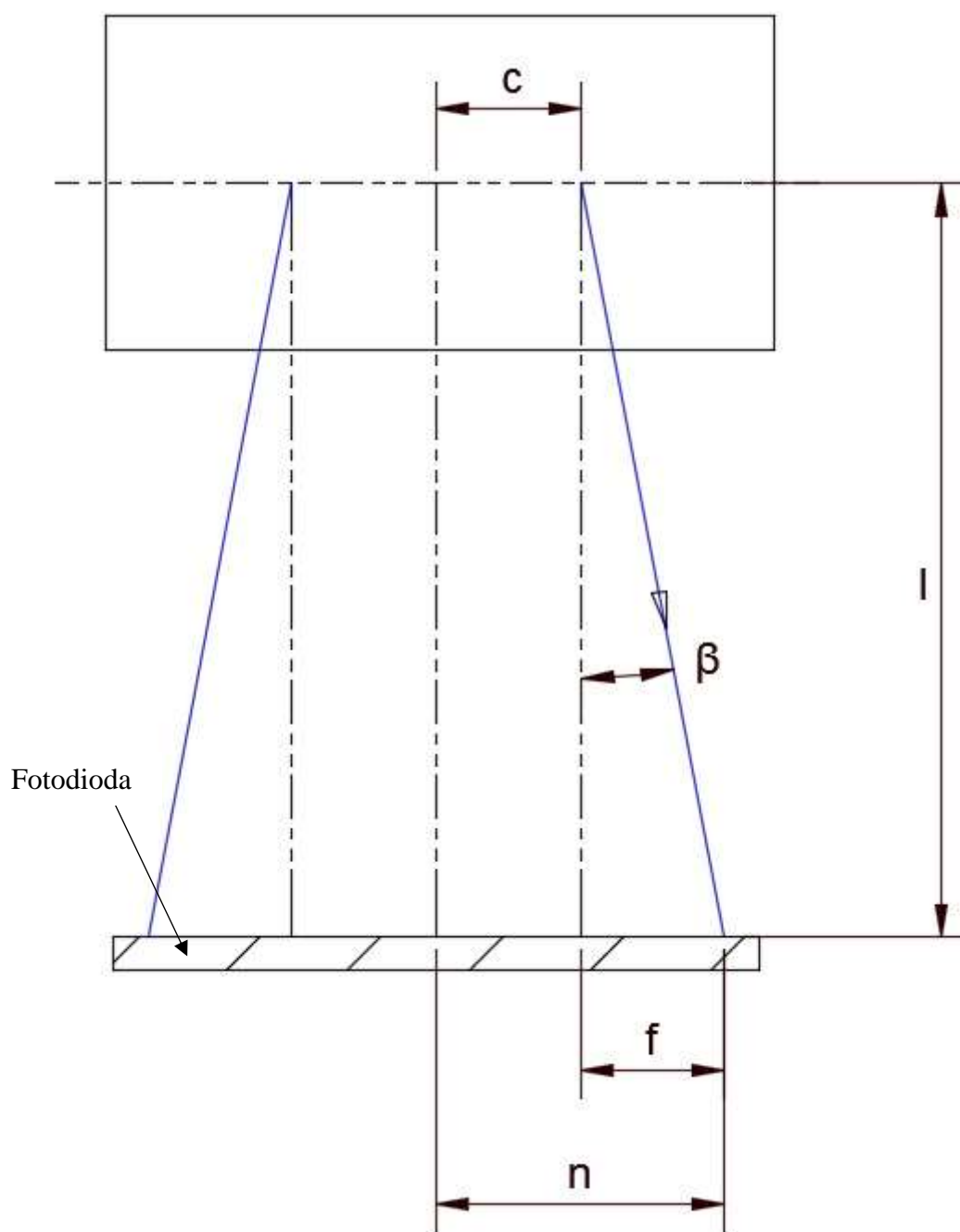
Iz osnovnog trigonometrijskog izraza:

$$\tan(\beta) = \frac{c}{x} \quad (20)$$

dobivamo:

$$c = x \cdot \tan(\beta) \quad (21)$$

Za razliku od prethodnog poglavlja gdje se cijeli put laserske zrake odvija u jednoj, vertikalnoj, ravnini ovdje se matematička formulacija mora promatrati kroz dvije.



Slika 37 Refleksija prema fotodiodi

Iz druge ravnine (što je zapravo vertikalna, ali drugi pogled) imamo:

$$\tan(\beta) = \frac{f}{l} \quad (22)$$

a iz toga dobivamo:

$$f = l \cdot \tan(\beta) \quad (23)$$

Ukupno odstupanje n , zatim napišemo:

$$n = c + f = x \cdot \tan(\beta) + l \cdot \tan(\beta) = (x + l) \cdot \tan(\beta) \quad (24)$$

A budući da nam je potrebna ovisnost kuta o pomaku, a ne obratno, gornji izraz preoblikujemo da dobijemo kut β :

$$\beta = \tan^{-1}\left(\frac{n}{x + l}\right) \quad (25)$$

Iz toga vidimo da kut β direktno ovisi o n , dozvoljenom odstupanju; x , mjernom kraku i l , udaljenosti fotodiode od razdjelnika zrake.

Ponovno, za ovaj konkretni slučaj, n uzimamo 1.5 mm, a sve ostale vrijednosti kao i u prethodnom slučaju:

$$\beta = \tan^{-1}\left(\frac{1.5}{1000 + 100}\right) = 0.00136364 \text{ rad} \quad (26)$$

6. RJEŠENJE INTEGRACIJE NA POSTOJEĆI UREĐAJ

U Nacionalnom laboratoriju za duljinu nalazi se jednoosni mjerni uređaj, ukupnog mjernog pomaka 1 m, koji nije u upotrebi jer više ne sadrži mjerni sustav. Zadatak je module modernog interferometra integrirati na postojeće postolje kako bi se ponovno mogao koristiti prenamijenjen za moderne tehnologije mjerenja.

6.1. Postojeći uređaj

Postojeći, jednoosni, mjerni uređaj, na koji ćemo postaviti module za modernu tehnologiju mjerenja, grubih je dimenzija 1860 x 460 x 240 milimetara, mase oko 300 kg. Uređaj je proizvođača Carl Zeiss iz sredine 20. stoljeća.

Grubi model uređaja napravljen je u *SolidWorks-u*, radi lakšeg razvoja i konstruiranja ideja za prihvata. Sljedeće slike prikazuju stvarni uređaj.



Slika 38 Postojeći mjerni uređaj - pogled A

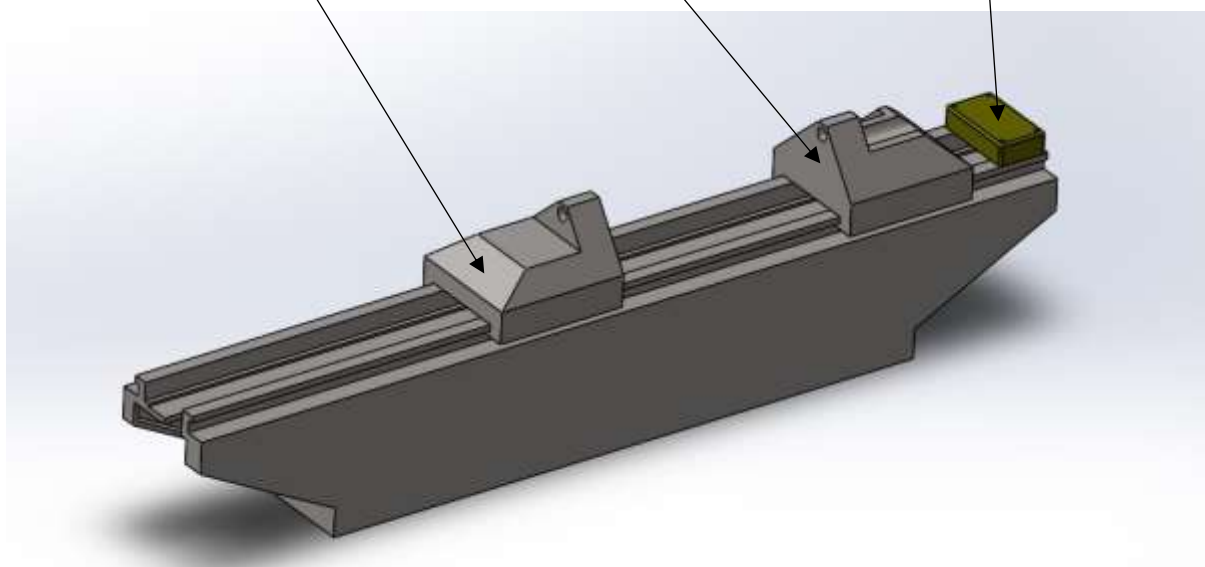


Slika 39 Postojeći mjerni uređaj - pogled B

Pomični krak – grubi pomak

Mjesto za montažu interferometra

Pomični krak – fini pomak



Slika 40 3D model postojećeg jednoosnog mjernog uređaja

6.2. Ograničenja

Kod razvoja proizvoda, svako konstrukcijsko rješenje ima početna ograničenja koja moramo ispoštivati, tako i kod nadogradnje jednoosnog mjernog uređaja.

Ograničenja:

1. Moduli su definirani i postojeći.

Zbog toga što je za pozicioniranje modula potrebna vrlo velika točnost koju konvencionalnim elementima nebi mogli dobiti, a proizvodnja tih elemenata i te točnosti bila bi izrazito skupa, najisplativije rješenje je te module kupiti.

2. Svi moduli se neovisno, fino ugađaju

Moduli su od proizvođača *THORLABS* te se njihovi moduli za izgradnju interferometra neovisno, fino ugađaju. Zbog velike potrebne točnosti, neovisno pozicioniranje je, maltene, jedino moguće rješenje.

3. Svi moduli moraju biti u istoj ravnini.

Kako se laserska zraka giba pravocrtno i odbija pravocrtno, svi moduli trebaju biti u približno istoj ravnini. Budući da i razdjelnik i zrcala imaju veću površinu nego što je laseru uistinu potrebno, savršena točnost ravnine nije potrebna, već onolika da ne ispadne iz ograničenog polja.

4. Postolje je definirano dimenzijama i oblikom.

Kao što je napomenuto, module treba implementirati u postojeći uređaj čije su dimenzije i oblik, dakako, zadani.

5. Držać lasera (laser), razdjelnik zrake, zrcalo 1, leća (objektiv) i fotodioda kruto su vezani.

Preporučeno je da ti elementi budu kruto vezani. Niti jedan od tih modula, nakon što se postave i pozicioniraju, ne treba više mijenjati.

6. Laser je cilindričnog oblika.

Za razvoj se koristi helijsko – neonski laser (*Helium – Neon Tunable Laser*) od *THORLABS-a*.

Model: HTPS – EC – 1

Serijski broj: 13712 – 3409 – 93

Proizveden: KOLOVOZ, 2009.

Napajanje: 230 V

Dodatno, uz laser je korišteno i optičko vlakno (unutar fleksibilne metalne zaštite) koje je dovodilo lasersku zraku od lasera do držača optičkog vlakna. Na držaču optičkog vlakna je kolimator zrake dimenzija Φ 12 mm x 60 mm.

7. Mogućnost demontaže.

Mogućnost demontaže je potrebna iz dva razloga. Prvi, moduli su prilično skupi i ponekad će ih trebati koristiti i za druga sastavljanja ili ideje. Drugi, uvijek postoji mogućnost razvoja sklopa, unaprjeđenja nekih njegovih dijelova ili jednostavno, nadogradnja. Tada je dobro da se moduli mogu posložiti i na drugi način.

6.3. Razgradnja po funkcijama

- SKLOP 1 : držač lasera (laser), razdjelnik zrake, zrcalo 1, leća (objektiv) i fotodioda
- SKLOP 2: zrcalo 2 (pomično zrcalo interferometra)

Sklop 1 je podijeljen na ovaj način zato što je preporučeno da elementi toga sklopa budu kruto vezani. Niti jedan od tih modula, nakon što se postave i pozicioniraju, ne treba više mijenjati. Uz pojednostavljenje rješenja, to će i smanjiti mogućnost greške i odstupanja.

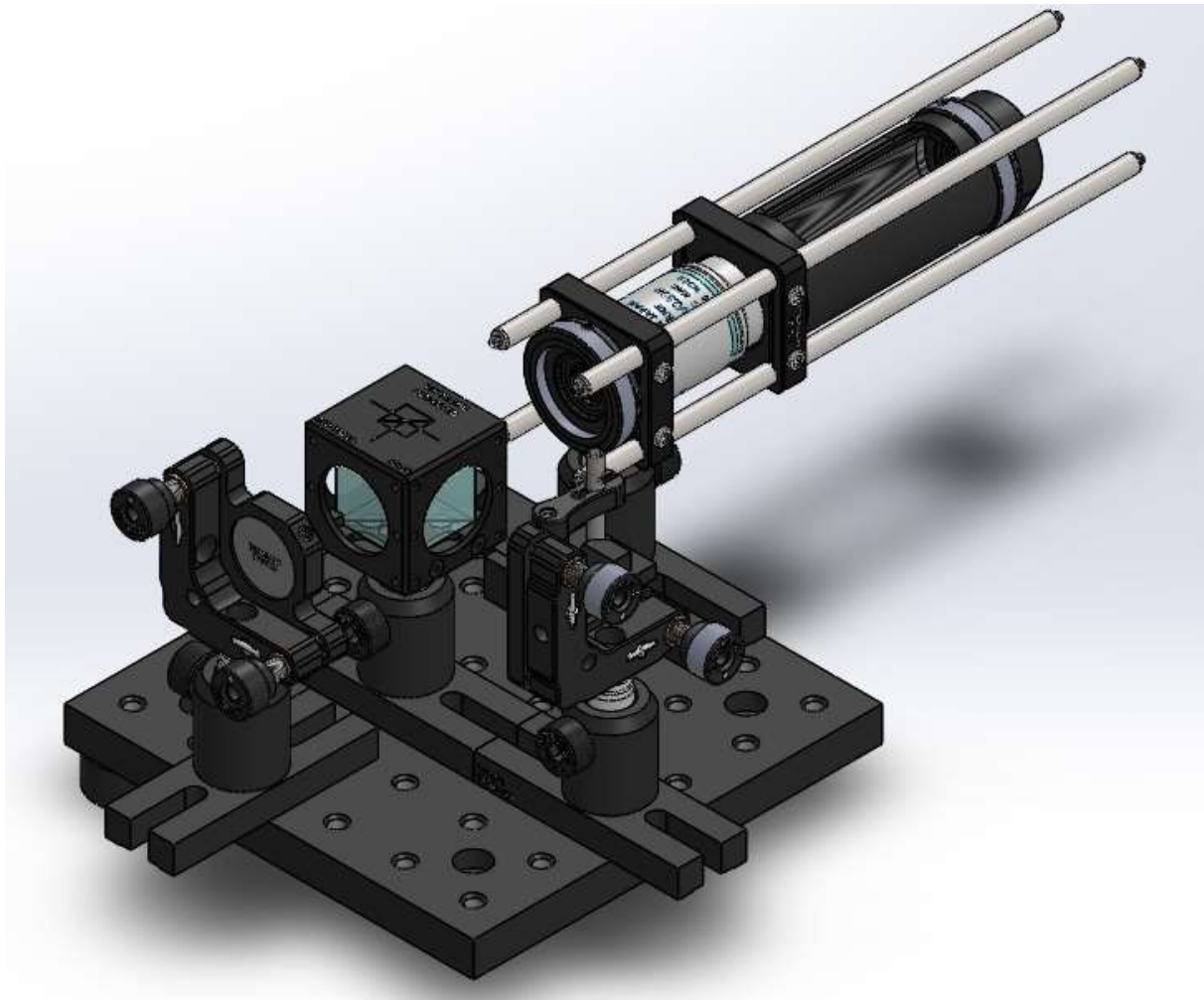
Za prihvat sklopa 1 preporučeno je sve module postaviti na *THORLABS*-ovu ploču. Ona je opremljena provrtima za postavljanje modula i cijelu montažu pojednostavljuje na najveći mogući način. Slika je prikazana u gornjem poglavlju, samo je za montiranje na postojeći uređaj uzeta manja, dimenzija 150x150 mm.

Tablica 4 Morfološka matrica rješenja

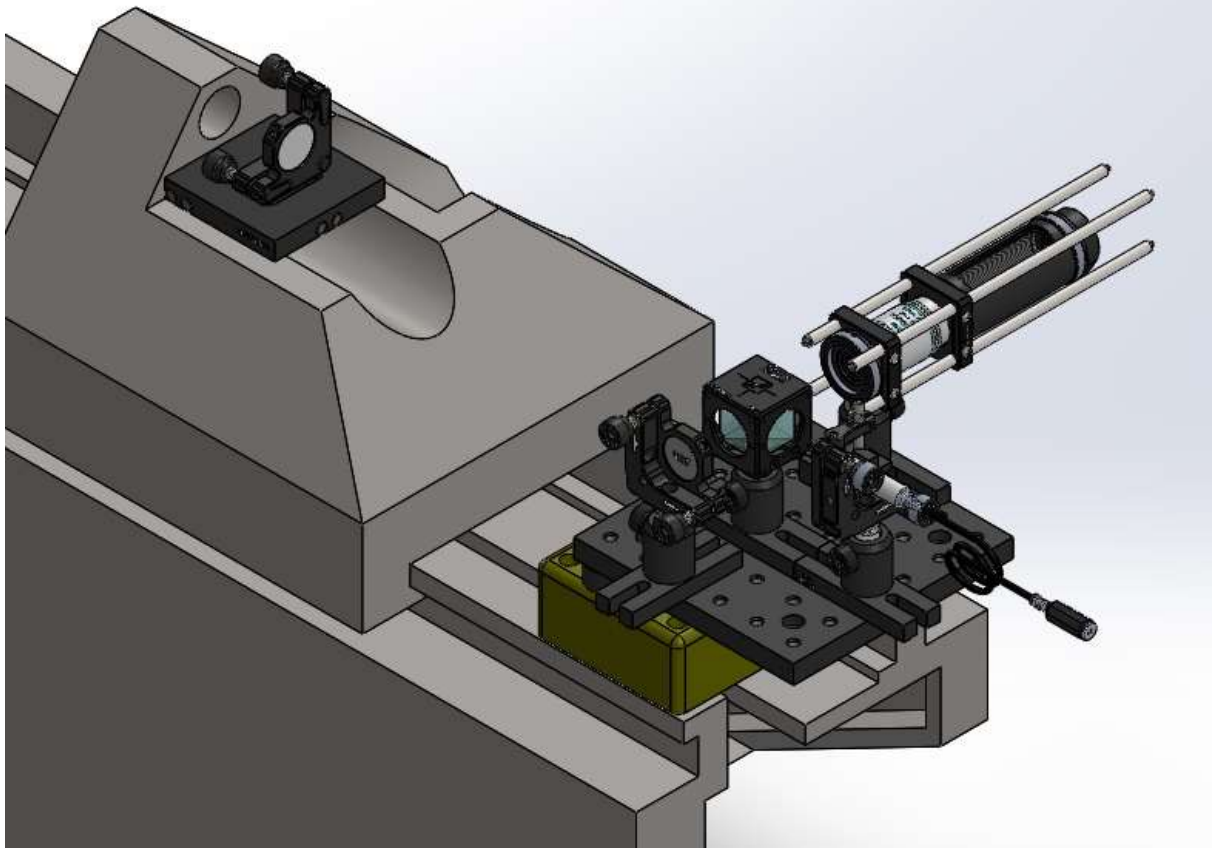
	FUNKCIJA	RJEŠENJA			
1	Prihvat SKLOPA 1 omogućiti (THORLABS-ova ploča)	Mehanička stezaljka	Vijcima	Magnetno	Lijepiti
a)	Prihvat držača lasera omogućiti	Vijcima			
b)	Prihvat razdjelnika zrake omogućiti	Vijcima			
c)	Prihvat Z1 omogućiti	Vijcima		Kruto vezati za razdjelnik zrake vodilicama	
d)	Prihvat leće (objektiva) omogućiti	Vijcima		Kruto vezati za razdjelnik zrake vodilicama	
e)	Prihvat fotodiode omogućiti	Vijcima		Kruto vezati za prihvat objektiva vodilicama	
f)	Zaštitu fotodiode od vanjskog svjetla omogućiti	Vijcima		Kruto vezati za prihvat objektiva vodilicama	
2	Prihvat SKLOPA 2 (Z2) omogućiti	Mehanička stezaljka	Vijcima	Magnetno	Lijepiti

6.4. Rješenje

Iz THORLABS-ove baze s njihovih stranica pronađeni su modeli koji odgovaraju onome s čim mi raspolažemo i što je korišteno u slaganju interferometra. Sklopni crteži i dokumentacija nalaze se kao prilog ovom radu.



Slika 41 Model interferometra



Slika 42 Model interferometra i pomičnog kraka

7. MJERENJA

7.1. Mjerenja pri razvoju optoelektroničkog sustava

Dok se razvijao sustav vršila su se mjerenja radi kontrole pomaka i provjeravanja ispravnosti prototipa interferometra. Za zadavanje pomaka koristio se servo motor, a sustav s fotodiodom mjerio je taj isti pomak. U nastavku su prikazani preliminarni rezultati, u tabličnom i grafičkom obliku.

Tablica 5 Tablični prikaz prvih 100 točaka

Točka	Napon (V)	Točka	Napon (V)	Točka	Napon (V)	Točka	Napon (V)
0	1,02808	25	2,1221	50	1,12576	75	0,97924
1	1,01832	26	1,93651	51	1,26252	76	0,79365
2	0,9011	27	2,21978	52	1,6044	77	0,98901
3	1,34066	28	1,88767	53	1,61416	78	0,81319
4	1,61416	29	1,68254	54	1,8486	79	1,34066
5	1,71184	30	1,32112	55	2,08303	80	1,25275
6	1,71184	31	1,50672	56	2,20024	81	1,34066
7	1,88767	32	1,29182	57	2,30769	82	1,51648
8	1,71184	33	1,6337	58	1,88767	83	1,72161
9	2,337	34	1,6337	59	2,08303	84	1,97558
10	2,30769	35	1,12576	60	2,3956	85	2,27839
11	2,03419	36	1,12576	61	2,46398	86	2,21001
12	2,47375	37	0,8718	62	2,337	87	1,65324
13	2,45421	38	0,72528	63	2,21001	88	2,54212
14	2,56166	39	1,26252	64	2,23932	89	2,14164
15	2,35653	40	0,75122	65	2,21978	90	2,10256
16	2,23932	41	0,75458	66	2,35653	91	2,20024
17	2,5812	42	1,15507	67	2,5812	92	1,89744
18	2,35653	43	0,76435	68	1,78999	93	2,11233
19	2,37607	44	0,78388	69	1,54579	94	1,96581
20	2,22955	45	0,89133	70	1,22344	95	1,57509
21	1,96581	46	1,06716	71	1,08669	96	1,35043
22	2,43468	47	0,72528	72	1,1453	97	0,94994
23	2,20024	48	0,94994	73	0,85226	98	1,15507
24	2,1514	49	0,80342	74	1,04762	99	1,39927

Od ukupnog uzorka minimalna vrijednost napona je:

$$U_{\min} = 0.00244 \text{ V} \quad (27)$$

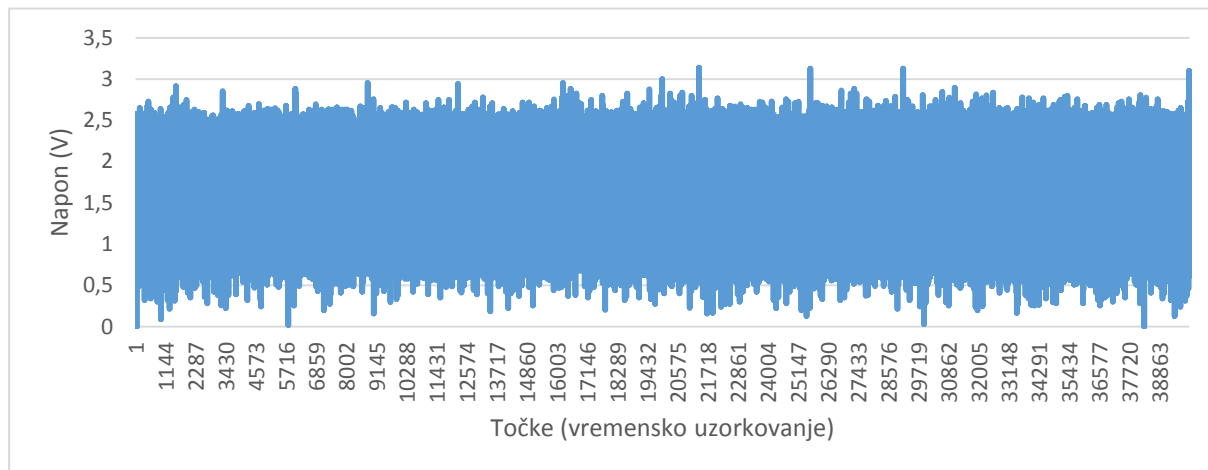
maksimalna:

$$U_{\max} = 3.13797 \text{ V} \quad (28)$$

srednja vrijednost:

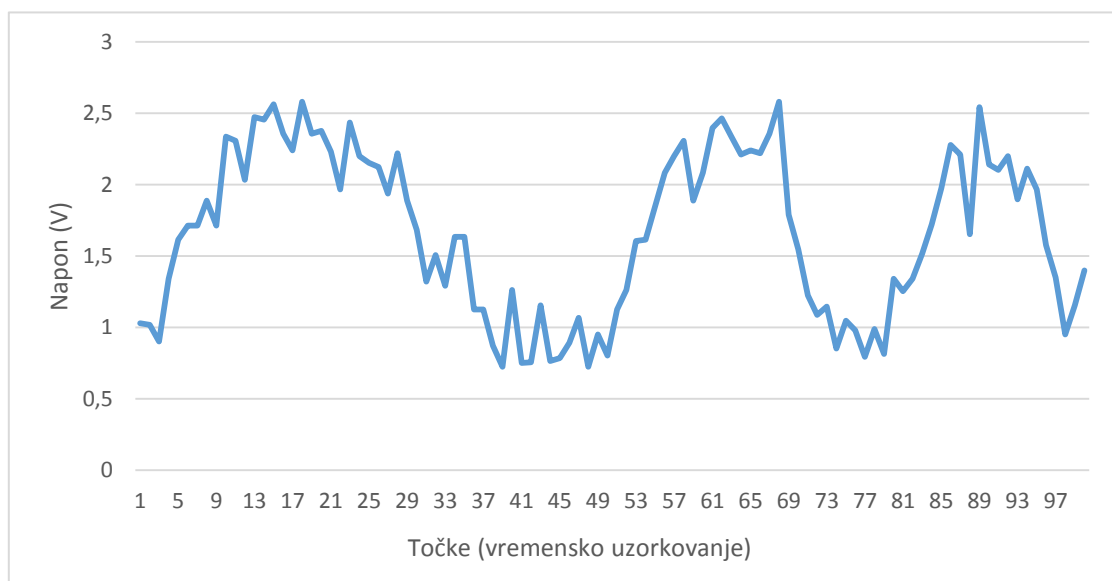
$$\bar{U} = 1.627085 \text{ V} \quad (29)$$

Graf 1 Grafički prikaz svih očitanih točaka pri mjerenju pomaka servo motora



Kako bi se bolje vidjela krivulja, prikazano je i prvih 100 točaka.

Graf 2 Grafički prikaz prvih 100 točaka pri mjerenju pomaka servo motora



7.2. Testiranje na postojećem jednoosnom uređaju

Nakon postavljanja elemenata interferometra na jednoosni uređaj odrađeno je više preliminarnih mjerenja. Za akviziciju podataka više se nije koristio gornji uređaj već *PCI-DAS 6034* s frekvencijom od 100 kS/s (100 000 uzoraka po sekundi) prelazeći svega nekoliko milimetara. Cilj ovog mjerenja nije bilo dobiti točno prijedenu udaljenost već vidjeti kakvo će

se uzorkovanje dobiti, tj. vidjeti odgovara li dobivena krivulja onome što smo očekivali. Podaci su prikazani u tabličnom i grafičkom obliku.

Tablica 6 Tablični prikaz prvih 100 točaka

Točka	Napon (V)	Točka	Napon (V)	Točka	Napon (V)	Točka	Napon (V)
0	1,114268	25	1,503448	50	1,172943	75	1,274109
1	1,117859	26	1,412506	51	1,239471	76	1,284027
2	1,103821	27	1,422882	52	1,244659	77	1,282806
3	1,124725	28	1,369629	53	1,319275	78	1,20697
4	1,112823	29	1,398773	54	1,31012	79	1,226044
5	1,136169	30	1,356659	55	1,383667	80	1,147156
6	1,09436	31	1,34491	56	1,4328	81	1,159821
7	1,130524	32	1,314392	57	1,478271	82	1,118469
8	1,140442	33	1,292877	58	1,490631	83	1,113281
9	1,203308	34	1,253052	59	1,50528	84	1,11145
10	1,222382	35	1,226959	60	1,523438	85	1,10611
11	1,278229	36	1,244659	61	1,523743	86	1,057129
12	1,292114	37	1,229553	62	1,54007	87	1,066437
13	1,356049	38	1,173859	63	1,539764	88	1,092834
14	1,37146	39	1,168518	64	1,543274	89	1,11908
15	1,399536	40	1,14212	65	1,538391	90	1,151886
16	1,491241	41	1,110229	66	1,46347	91	1,181946
17	1,493835	42	1,128235	67	1,412964	92	1,22818
18	1,539154	43	1,087952	68	1,430664	93	1,244659
19	1,506653	44	1,128693	69	1,384583	94	1,304016
20	1,567841	45	1,095581	70	1,40976	95	1,304932
21	1,519928	46	1,087799	71	1,361847	96	1,425171
22	1,558838	47	1,074829	72	1,374664	97	1,425018
23	1,543274	48	1,12381	73	1,321411	98	1,474152
24	1,525574	49	1,153564	74	1,313171	99	1,476593

Od ukupnog uzorka minimalna vrijednost napona je:

$$U_{\min} = 0.897675 \text{ V} \quad (30)$$

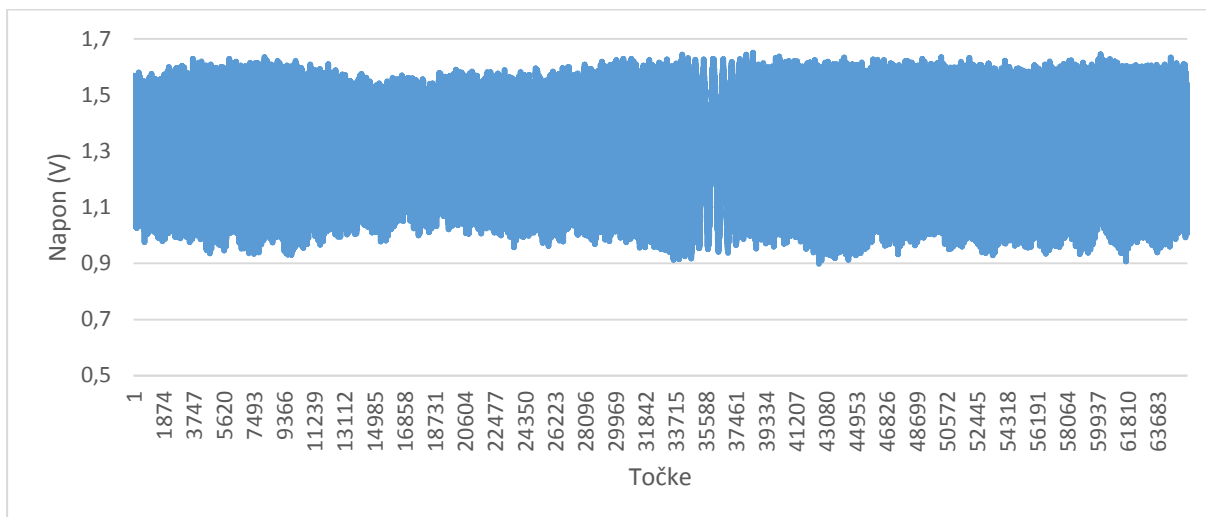
maksimalna:

$$U_{\max} = 1.650696 \text{ V} \quad (31)$$

srednja vrijednost:

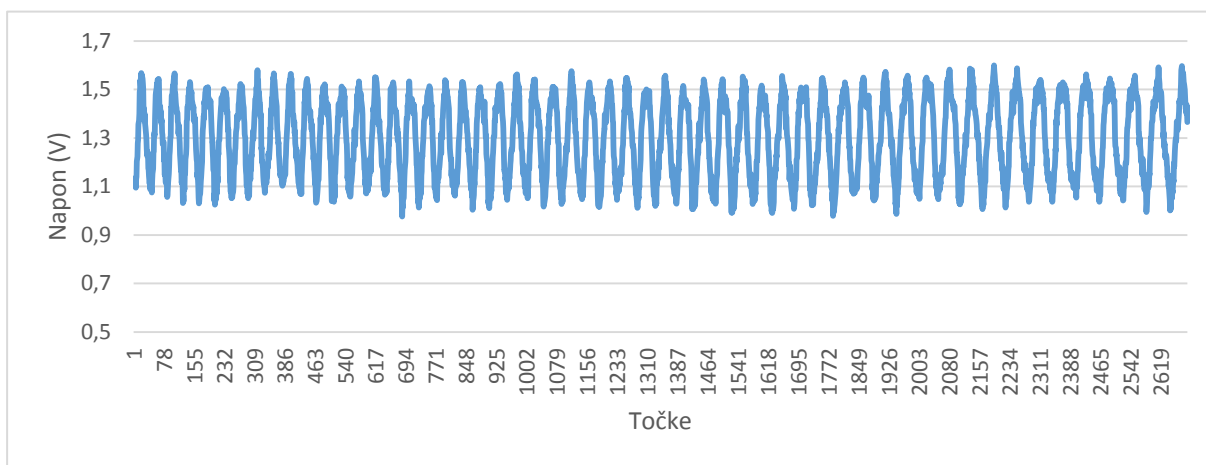
$$\bar{U} = 1.302272 \text{ V} \quad (32)$$

Graf 3 Grafički prikaz svih očitanih točaka pri mjerenju na jednoosnom uređaju



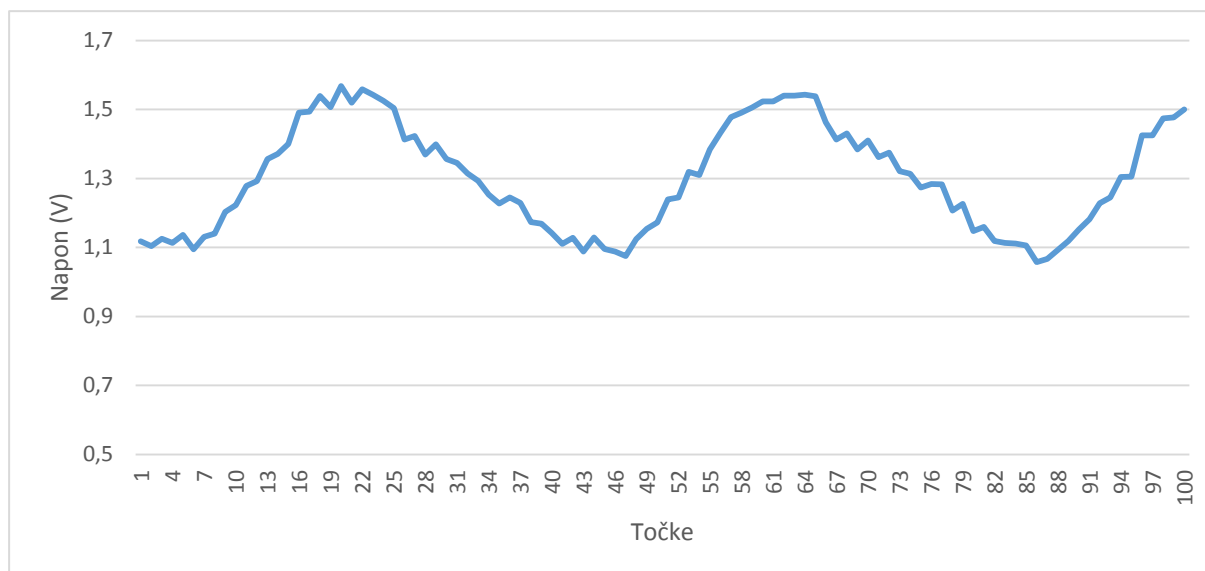
Zbog velikog broja točaka koje su očitane, pri čemu su pređene prilično male udaljenosti, u grafu su prikazane jako gusto. Radi preglednijeg prikaza uzet ćemo manji broj točaka, kako bi vidjeli izgled krivulje koja se dobije.

Graf 4 Grafički prikaz 2700 točaka pri mjerenju



Konačno, prikazano je i grafički i tablično uzorkovanje od samo 100 točaka da se vidi sinusoidni oblik grafa.

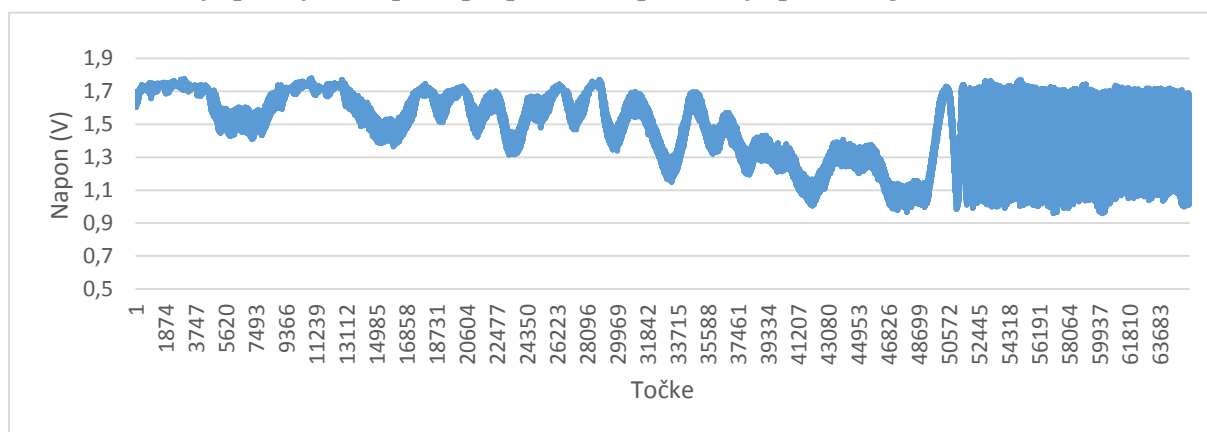
Graf 5 Grafički prikaz prvih 100 točaka pri mjerenju



Uspoređujući rezultate koje smo dobili mjerenjem pri razvoju optoelektroničkog sustava u kabinetu i mjerenjem na jednoosnom mjernom uređaju vidimo zamjetne razlike.

Prvo, minimalni napon u kabinetu bio je skoro 0 V dok je na mjernom uređaju bio skoro 0.9 V. Znatnu razliku možemo pripisati ambijentalnom svjetlu i zaštićenosti diode. U kabinetu su uvjeti bili puno pogodniji nego na jednoosnom mjernom uređaju. Ista stvar dogodila se i kod maksimalnog napona gdje je razlika od skoro 1.5 V. Zanimljivo, srednja vrijednost odstupa „tek“ oko 0.3 V što je relativno malo uspoređujući s minimalnim i maksimalnim. To nam je još jedna potvrda viška dnevnog svjetla na fotiodiodi.

Sljedeći graf prikazuje što se dogodi kada se pomični krak interferometra pomiče prevelikom brzinom. Naime, zbog određene (zadane uređajem) frekvencije uzorkovanja koju smo u prethodnim poglavljima opisali i brzina pomicanja je zadana. Ukoliko krak pomičemo brzinom većom nego što nam to frekvencija dopušta akvizicijski sustav neće moći dovoljno brzo očitavati točke. Na grafu do negdje 50 000. točke brzina je prevelika, nakon toga brzina je bila dovoljno spora da akvizicija može očitati točke.

Graf 6 Krivulja promjene napona pri prebrzom pomicanju pomičnog kraka interferometra

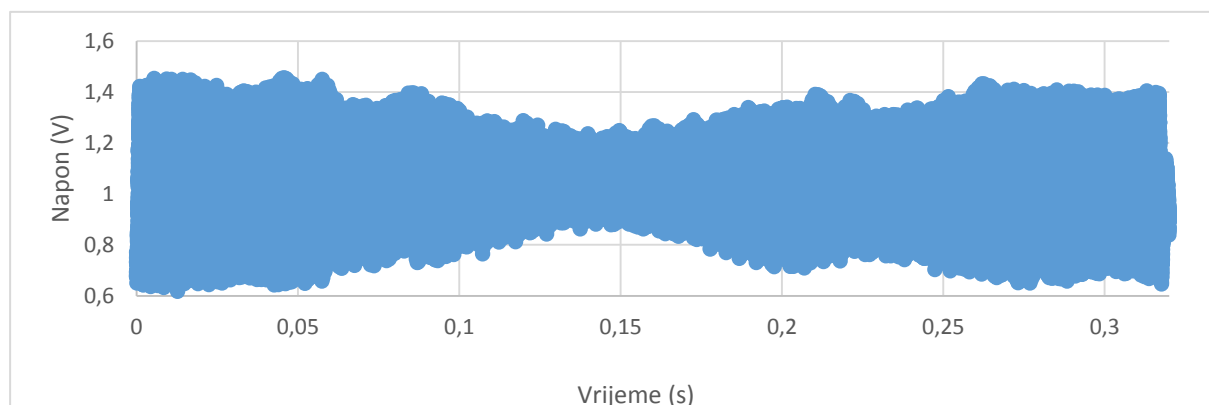
7.3. Mjerenje na postojećem uređaju

Završno, na nadograđeni jednoosni mjerni uređaj interferometrom postavljen je referentni interferometar, za koji pouzdano znamo koliku je udaljenost izmjerio. Uspoređujući te rezultate vidimo koliko je novo razvijeni sustav točan.

1. *HP*-ov interferometar je pokazao pomak od 0.6474 mm.
2. Eksperimentalni sustav je, nakon obrade signala, dao 2023 maksimuma u sinusoidnom signalu koji odgovaraju pomacima od $\lambda/2$.

$$l = \frac{\lambda}{2} \cdot 2023 = \frac{632.8}{2} \cdot 2023 \cdot 10^{-6} = 0.640097 \text{ mm} \quad (33)$$

Sljedeći graf prikazuje vremenski interval od 0.32 sekunde gdje je očitano 2023 maksimalnih točaka koje su nam, na posljetku, dale pomak koji smo načinili pomičnim krakom interferometra.

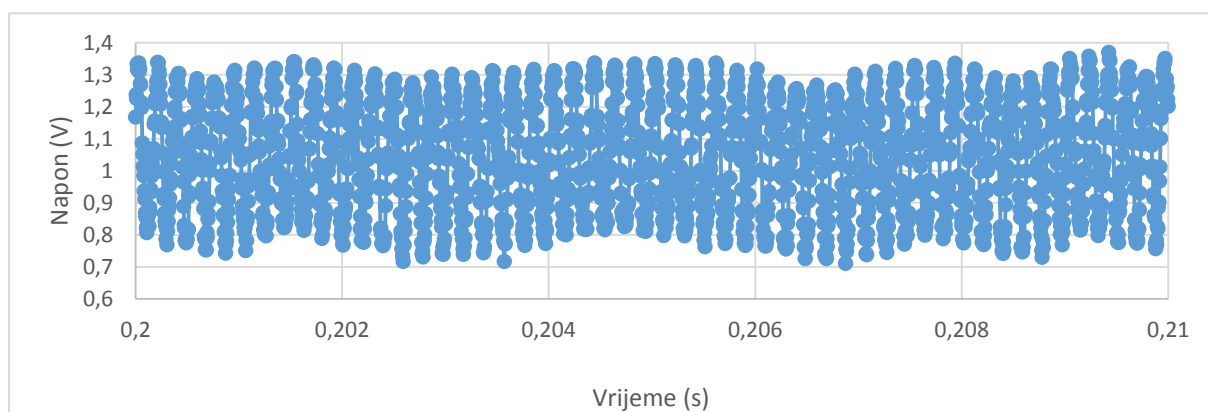
Graf 7 Snimljeni signal interferometra - period od 0.32 sekundi

Kao i u prethodnim poglavljima, prikazan je i kraći vremenski period kako bi se bolje vidio sinusoidni val. Nakon uspoređenih duljina dobivamo razliku od 0.007303 mm.

Kod ovih rezultata treba imati nekoliko stvari na umu:

1. Valna duljina lasera koji je korišten nije kompenzirana na uvjete okoliša. Što to znači? Iako je poznat iznos valne duljine korištenog lasera u vakuumu, u okolišnim uvjetima znatno se mijenja. Na nju utječe temperatura, vlaga, tlak, koncentracija ugljikovog dioksida i drugi faktori. Korekcija valne duljine je moguća računanjem korigiranog indeksa loma zraka prema Edlenovoj jednadžbi. (ref [10]) Navedena korekciju u ovom radu nije napravljena, jer je fokus istraživanja bio na razvoju optoelektroničkog sustava.
2. Budući da brojimo samo pune vrijednosti poluvalova ne možemo dobiti veću točnost od vrijednosti pola valne duljine svjetlosti, što je u našem slučaju oko 0,3 μm .
3. Sama fotodioda nije bila adekvatno zaštićena od vanjskog svjetla, pa je ambijentalna razina svjetla bila promjenjiva.
4. Interferometar s laserom i pomični krak interferometra nalazili su se na istom jednoosnom mjernom uređaju te su se sve vibracije prenosile s jednog na drugi krak. U idealnom slučaju to je trebalo biti odvojeno i bolje izolirano.

Graf 8 Detalj signala interferometra - period od 0,20 do 0,21 sekunde uzorkovanja



8. ZAKLJUČAK

Rad je bio zadan da se u potpunosti razumije i izradi interferometar. Od općih stvari i upoznavanja s teorijskom pozadinom do konačne montaže i mjerenja duljine. Prošao se svaki korak pri razvoju. Zasiurno najzahtjevniji dio zadatka bio je složiti optoelektronički sustav s fotodiodom za detekciju konstruktivne i destruktivne interferencije svjetlosti. Upoznati se s elektroničkim elementima i njihovim zadaćama u sustavu. Zasićenje ambijentalnim svjetlom stvaralo je dosta poteškoća dok se dioda nije dobro zaštitila. Također i tada, zbog nesavršene razlike između konstruktivne i destruktivne interferencije i intenzitetu laserskog snopa, nije se dobivala očekivana krivulja. Konačno, iteracijom otpora došlo se do očekivanih rezultata.

Iako su moduli kupljeni i postojeći, postaviti ih u ispravan redosljed i istu ravninu bio je zahtjevan posao. Vanjski faktori nemalo su utjecali na poziciju zrcala i ostalih elemenata. Nakon razvoja sustava cijelog je trebalo postaviti na postojeći jednoosni mjerni uređaj u Nacionalnom laboratoriju za duljinu. Moduli su kompaktnije složeni te pričvršćivani stezaljkama, magnetima i vijčanim spojevima.

Logično, nakon truda uloženog u razvoj nekog sustava – on se treba i testirati, a to je najbolje učiniti preliminarnim mjerenjem duljine. Možemo reći da smo s obzirom na sve uvjete i vanjske faktore s rezultatima zadovoljni. Naravno, uvijek može bolje. Što?

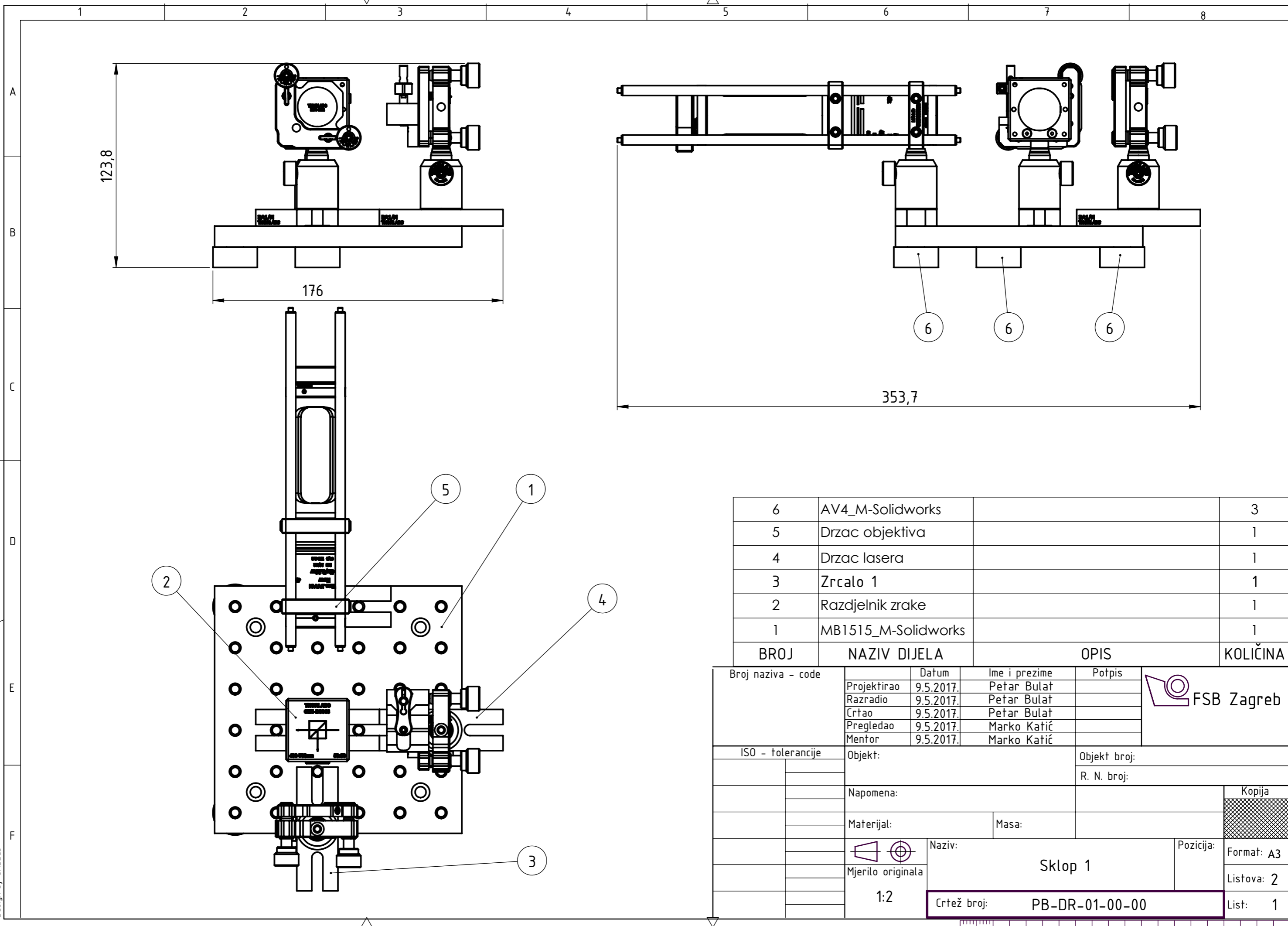
Sljedeći korak bi bio kompenzacija valne duljine lasera na temperaturu, vlagu i ostale faktore koji utječu na promjenu valne duljine kada se ne mjeri u vakuumu. Također, spajanjem još jedne fotodiode mogli bi dobiti i smjer, a ne samo pomak, tj. znali bi pomiče li se pomični krak interferometra u pozitivnom ili negativnom smjeru. Izolacijom radnog mjesta od vibracija i strujanja zraka dobili bi se kvalitetniji rezultati s manje šumova.

LITERATURA

- [1] National Physical Laboratory: A Beginner's Guide to Measurement, Tedsington, UK, 2010.
- [2] Gray Cancer Institute: Getting the best out of photodiode detectors, 2005.
- [3] Euramet: Metrology in short, 2008.
- [4] Runje, B.: Predavanja iz kolegija mjeriteljstvo, Zagreb, 2013.
- [5] Himbert, M. E.: A brief history of measurement, 2009.
- [6] <https://www.thorlabs.com/>
- [7] <http://www.radio-electronics.com/>
- [8] Rodriguez Ornelas, J. J.: Photodiode Light Detector Calibration and Optical System Alignment Methods
- [9] <http://www.billconnelly.net/?p=105>
- [10] <http://emtoolbox.nist.gov/Wavelength/Documentation.asp#UncertaintyandRangeofValidity>
- [11] *SolidWorks* – model i dokumentacija
- [12] *AutoCAD* – crteži
- [13] *Mathcad Prime 3.1* – proračun
- [14] *Mathematica* – proračun

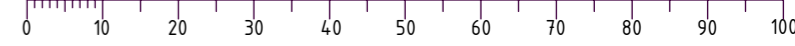
PRILOZI

- I. CD-R disc
- II. Tehnička dokumentacija

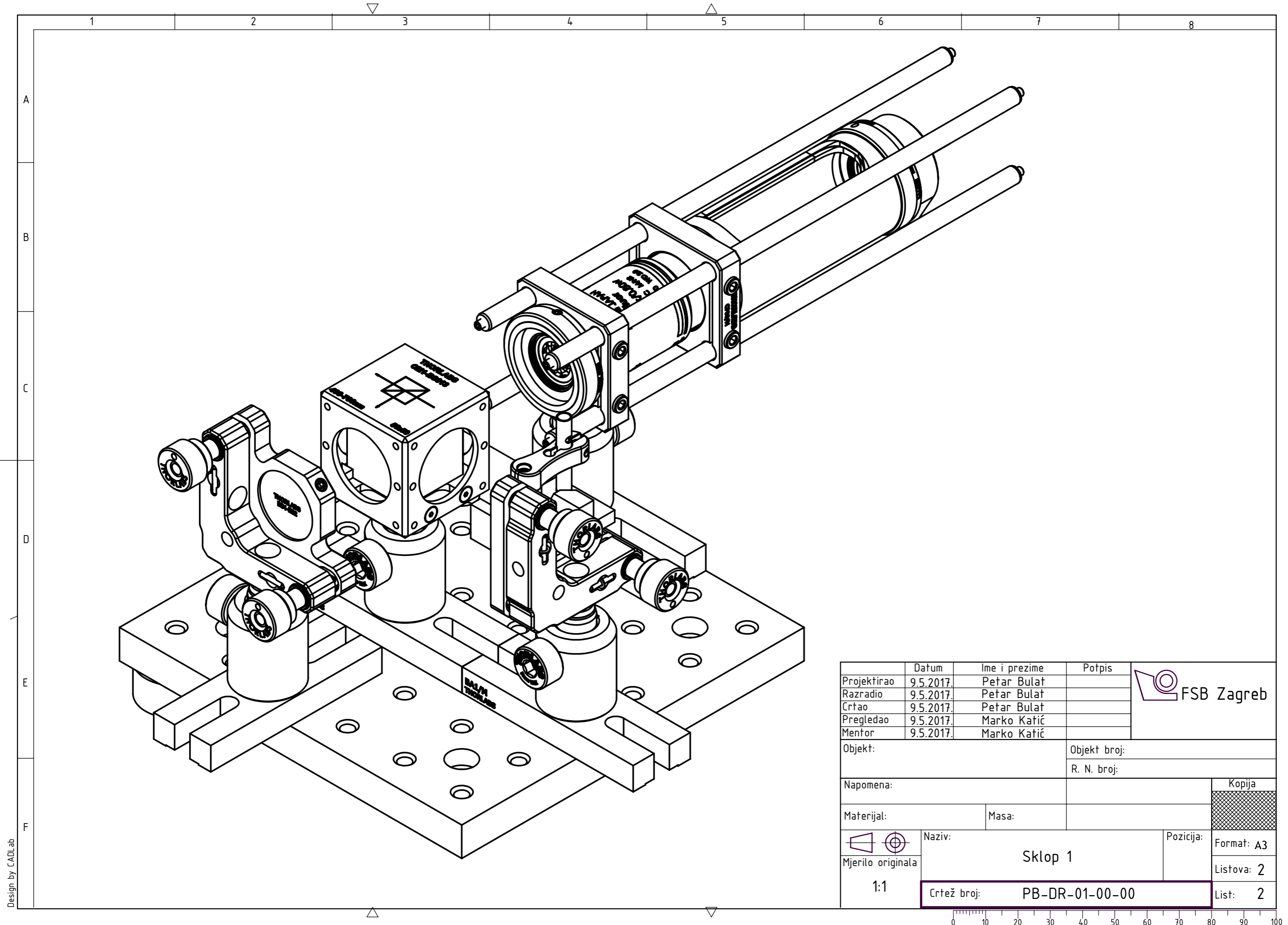


6	AV4_M-Solidworks		3
5	Drzac objektiva		1
4	Drzac lasera		1
3	Zrcalo 1		1
2	Razdjelnik zrake		1
1	MB1515_M-Solidworks		1
BROJ	NAZIV DIJELA	OPIS	KOLIČINA

Broj naziva - code	Projektirao	9.5.2017.	Ime i prezime	Petar Bulat	Potpis	
	Razradio	9.5.2017.	Petar Bulat			
	Crtao	9.5.2017.	Petar Bulat			
	Pregledao	9.5.2017.	Marko Katić			
	Mentor	9.5.2017.	Marko Katić			
ISO - tolerancije	Objekt:		Objekt broj:			
			R. N. broj:			
	Napomena:				Kopija	
	Materijal:		Masa:			
		Naziv:		Pozicija:		
	1:2	Sklop 1		Format: A3		
		Crtež broj: PB-DR-01-00-00		Listova: 2		
				List: 1		

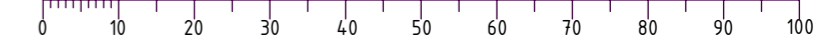


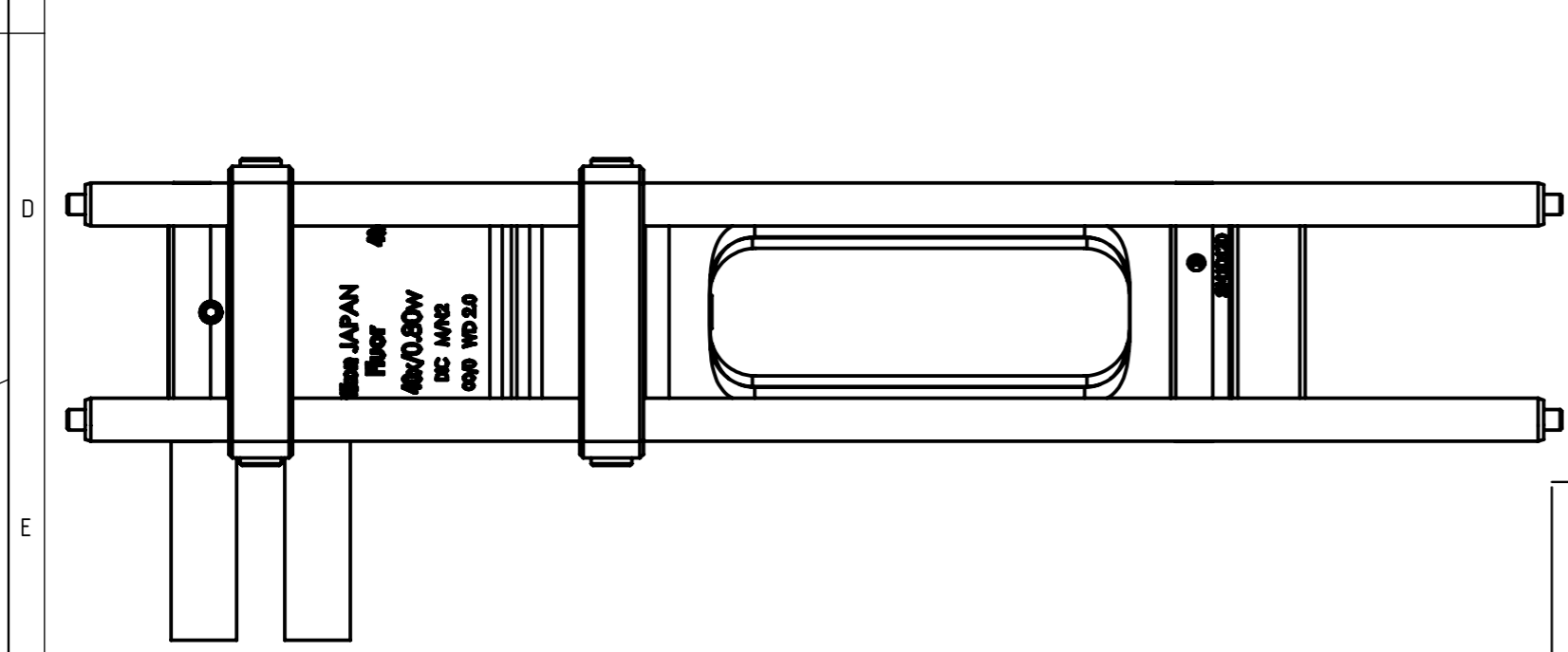
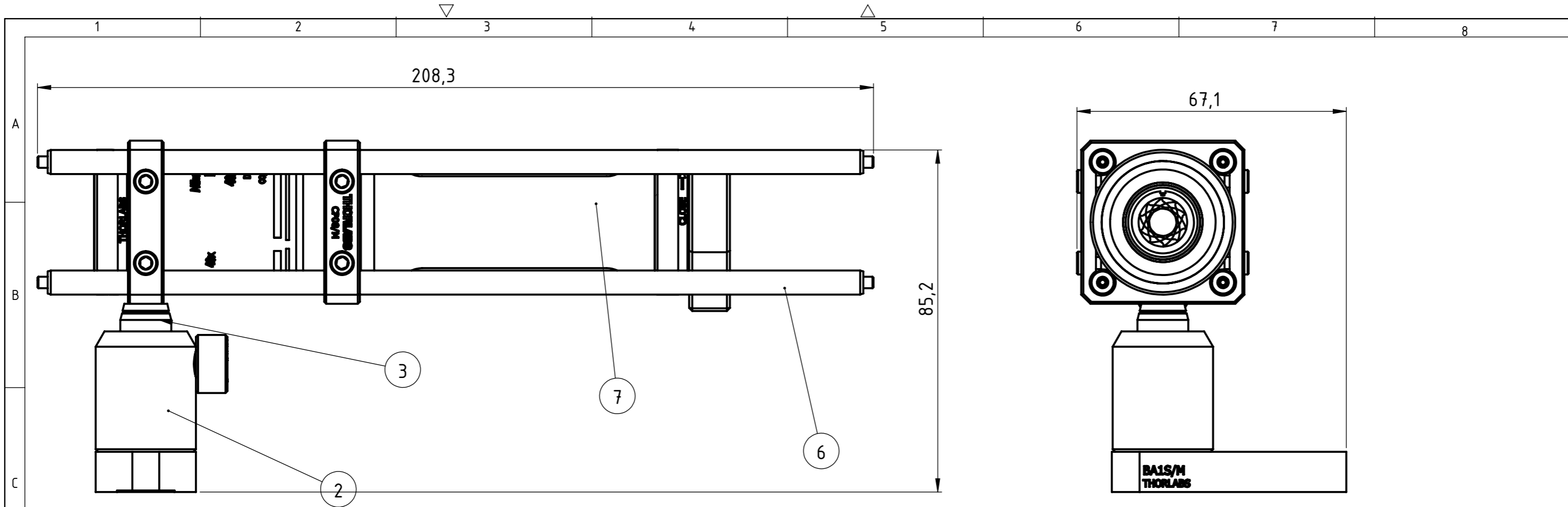
Design by CADLab



Design by CADLab

	Datum	Ime i prezime	Potpis	
Projektirao	9.5.2017.	Petar Bulat		
Razradio	9.5.2017.	Petar Bulat		
Crtao	9.5.2017.	Petar Bulat		
Pregledao	9.5.2017.	Marko Katić		
Mentor	9.5.2017.	Marko Katić		
Objekt:			Objekt broj:	
			R. N. broj:	
Napomena:			Kopija	
Materijal:			Masa:	
 Mjerilo originala	Naziv:		Pozicija:	Format: A3
1:1	Sklop 1			Listova: 2
Crtež broj:			PB-DR-01-00-00	List: 2



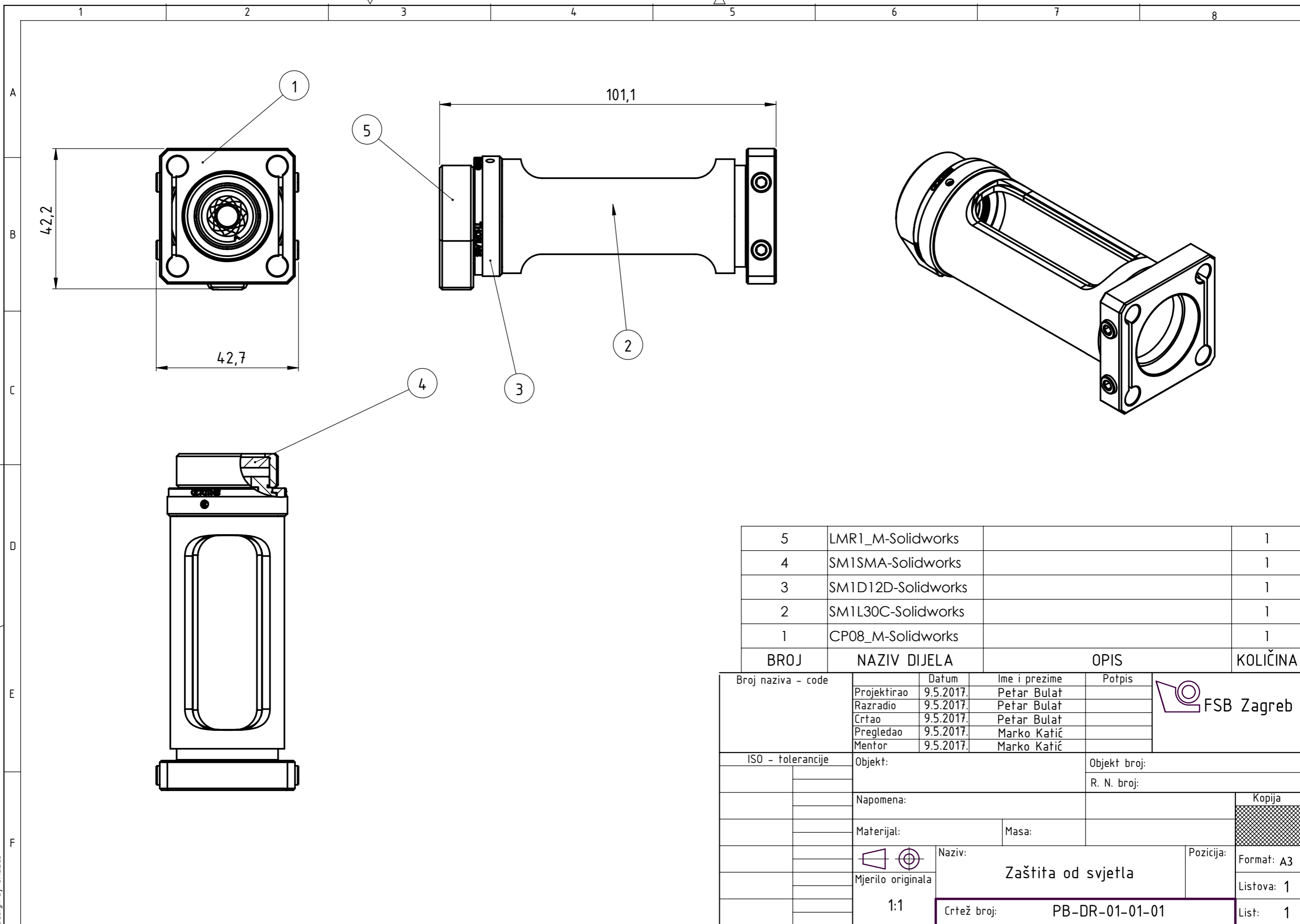


8	N40XW-PF-Solidworks		1
7	Zastita od svjetla		1
6	ER8-Solidworks		4
5	SM1D12D-Solidworks		1
4	CP08_M-Solidworks		1
3	TR30_M-Solidworks		1
2	PH30_M-P5-Solidworks		1
1	BA1S_M-Solidworks		1
BROJ	NAZIV DIJELA	OPIS	KOLIČINA

Broj naziva - code	Projektirao	Datum	Ime i prezime	Potpis	
	Razradio	9.5.2017.	Petar Bulač		
	Crtao	9.5.2017.	Petar Bulač		
	Pregledao	9.5.2017.	Marko Katić		
	Mentor	9.5.2017.	Marko Katić		
ISO - tolerancije		Objekt:		Objekt broj:	
				R. N. broj:	
		Napomena:			
		Materijal:		Masa:	
				Naziv:	
		1:1		Držać objektiva	
		Crtež broj:		PB-DR-01-01-00	
				Pozicija: Format: A3 Listova: 1 List: 1	

Design by CADlab



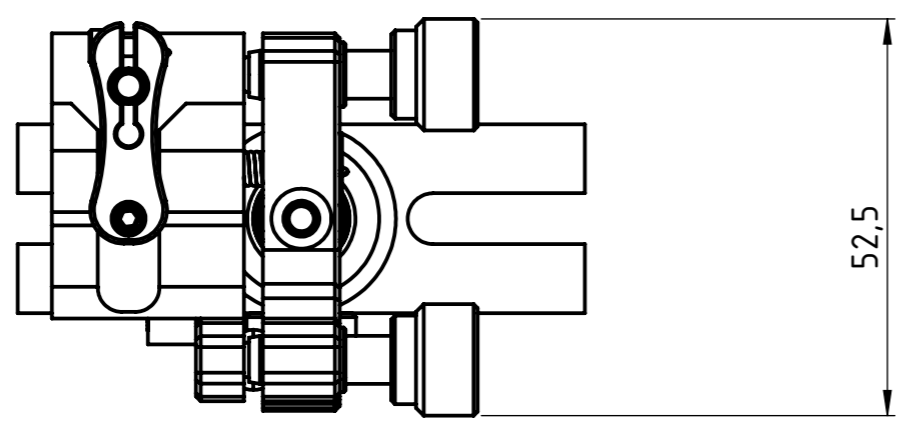
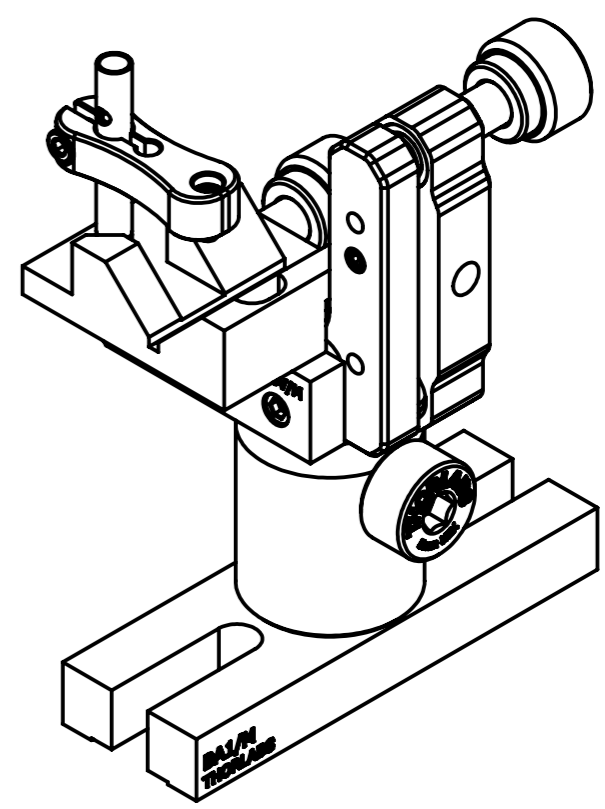
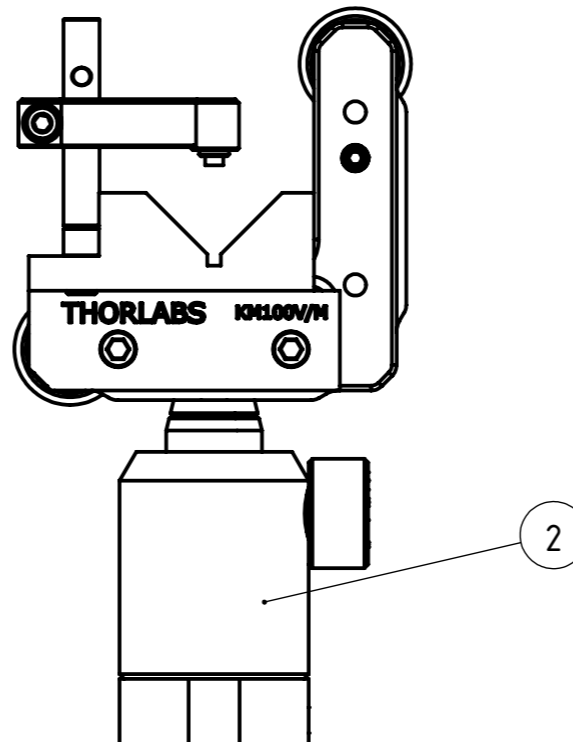
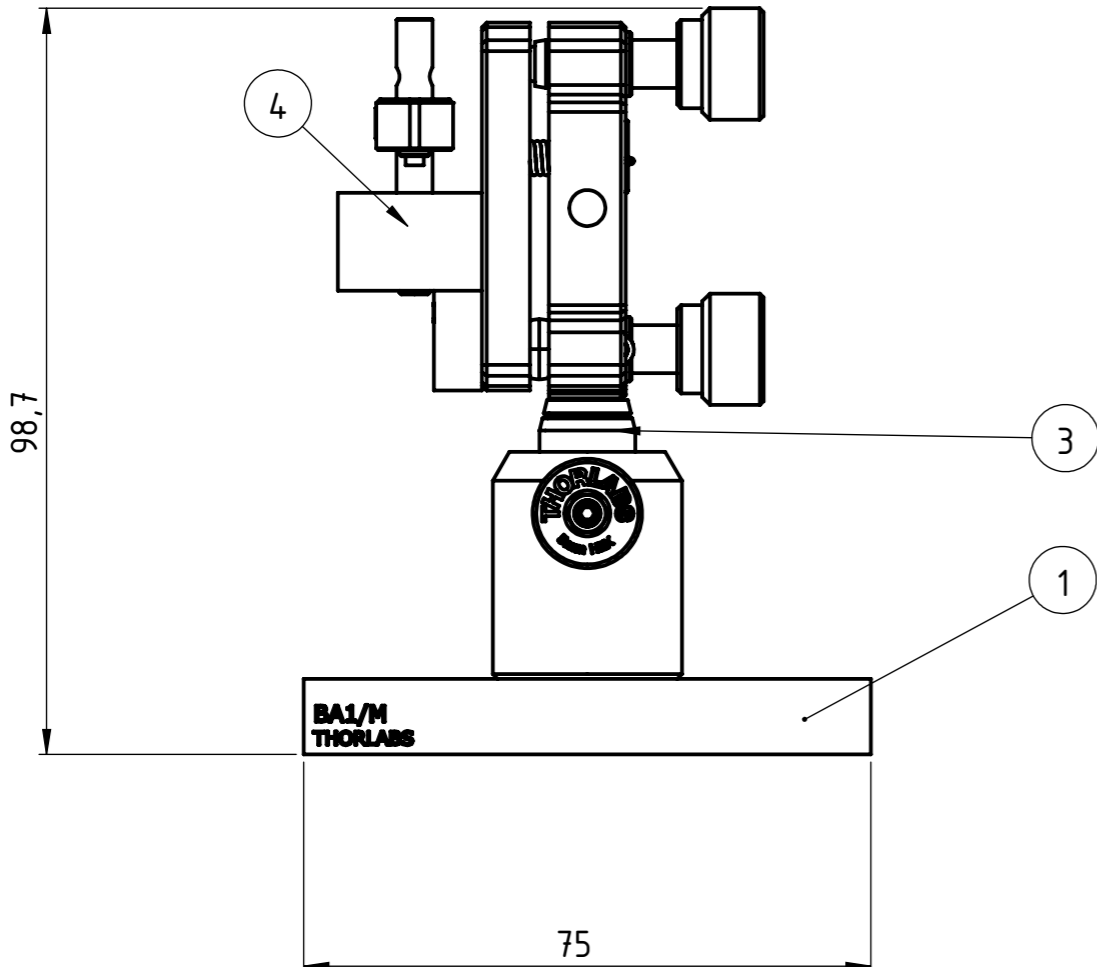
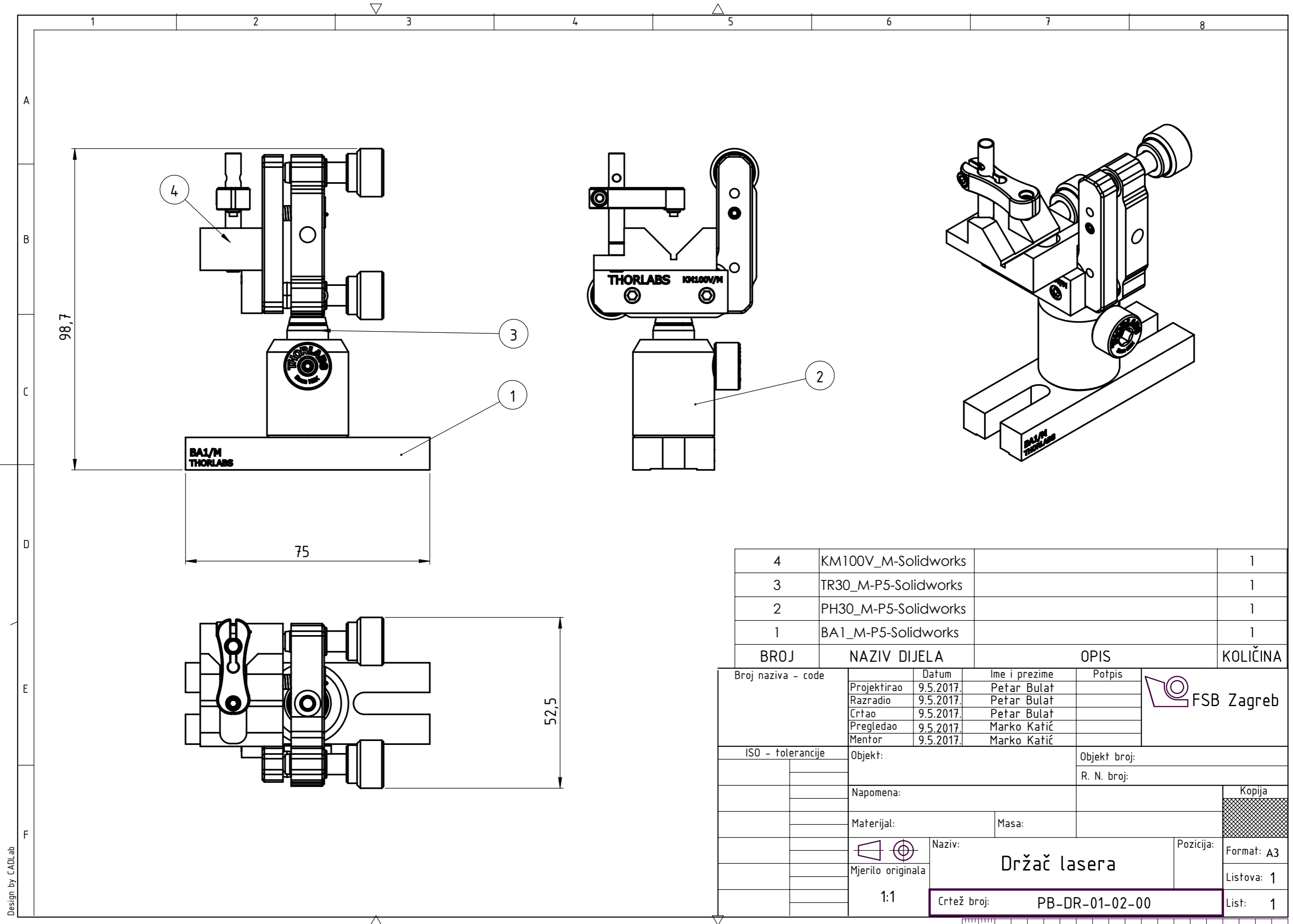


5	LMR1_M-Solidworks		1
4	SM1SMA-Solidworks		1
3	SM1D12D-Solidworks		1
2	SM1L30C-Solidworks		1
1	CP08_M-Solidworks		1
BROJ	NAZIV DIJELA	OPIS	KOLIČINA

Broj naziva - code	Projektirao	9.5.2017.	Ime i prezime	Petar Bulat	Potpis	
	Razradio	9.5.2017.	Petar Bulat			
	Crtao	9.5.2017.	Petar Bulat			
	Pregledao	9.5.2017.	Marko Katić			
	Mentor	9.5.2017.	Marko Katić			
ISO - tolerancije	Objekt:		Objekt broj:			
			R. N. broj:			
	Napomena:					Kopija
	Materijal:		Masa:			
	 Mjerilo originala	Naziv:		Zaštita od svjetla		Pozicija:
	1:1	Crtež broj:		PB-DR-01-01-01		Format: A3
						Listova: 1
						List: 1



Design by CADLab

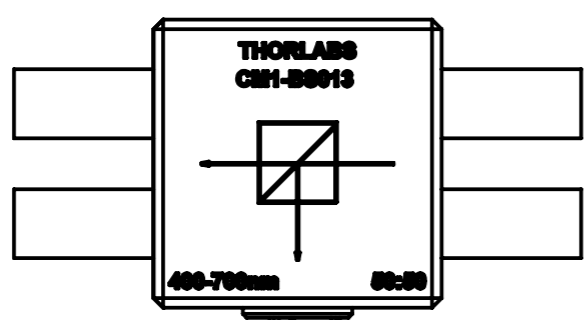
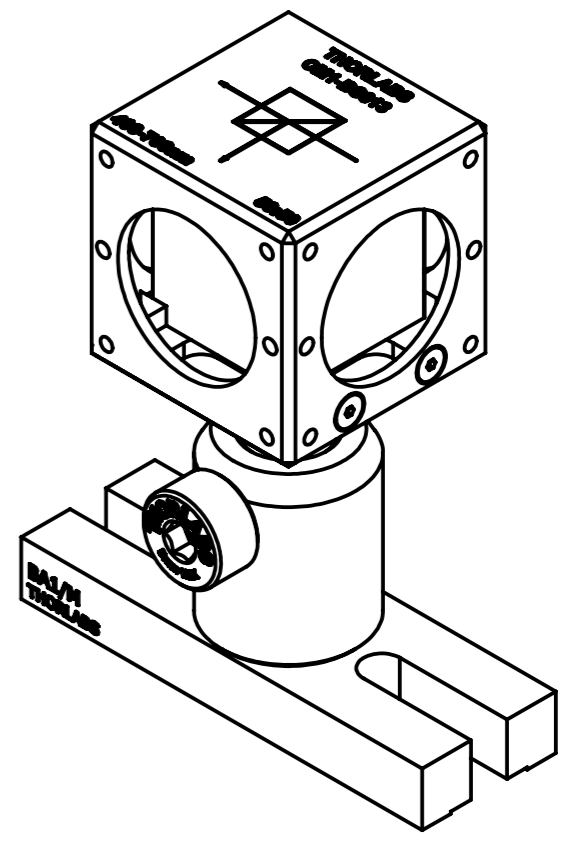
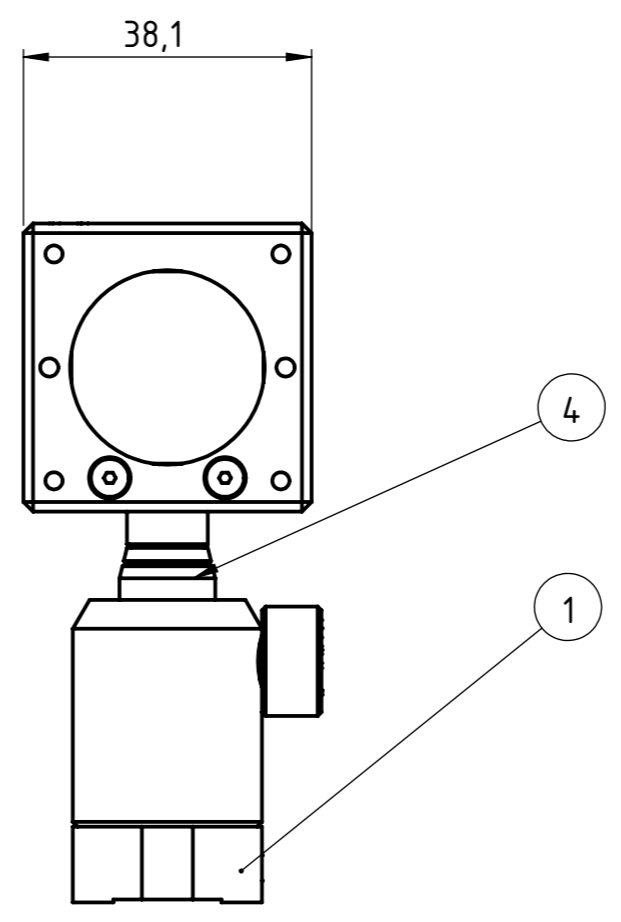
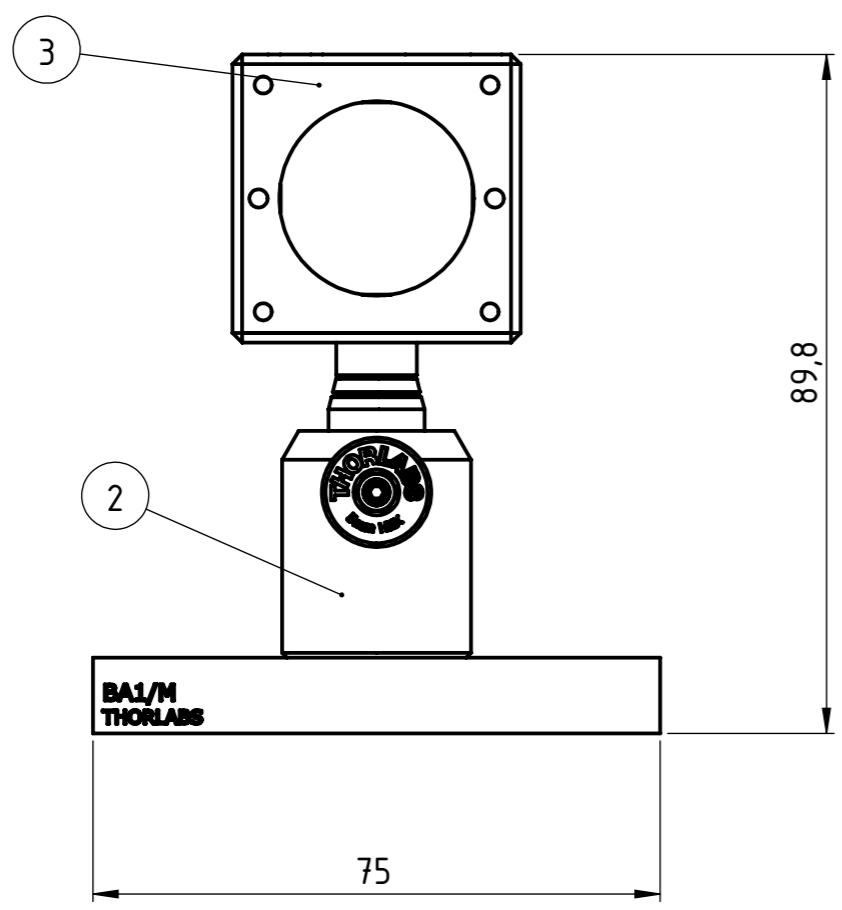
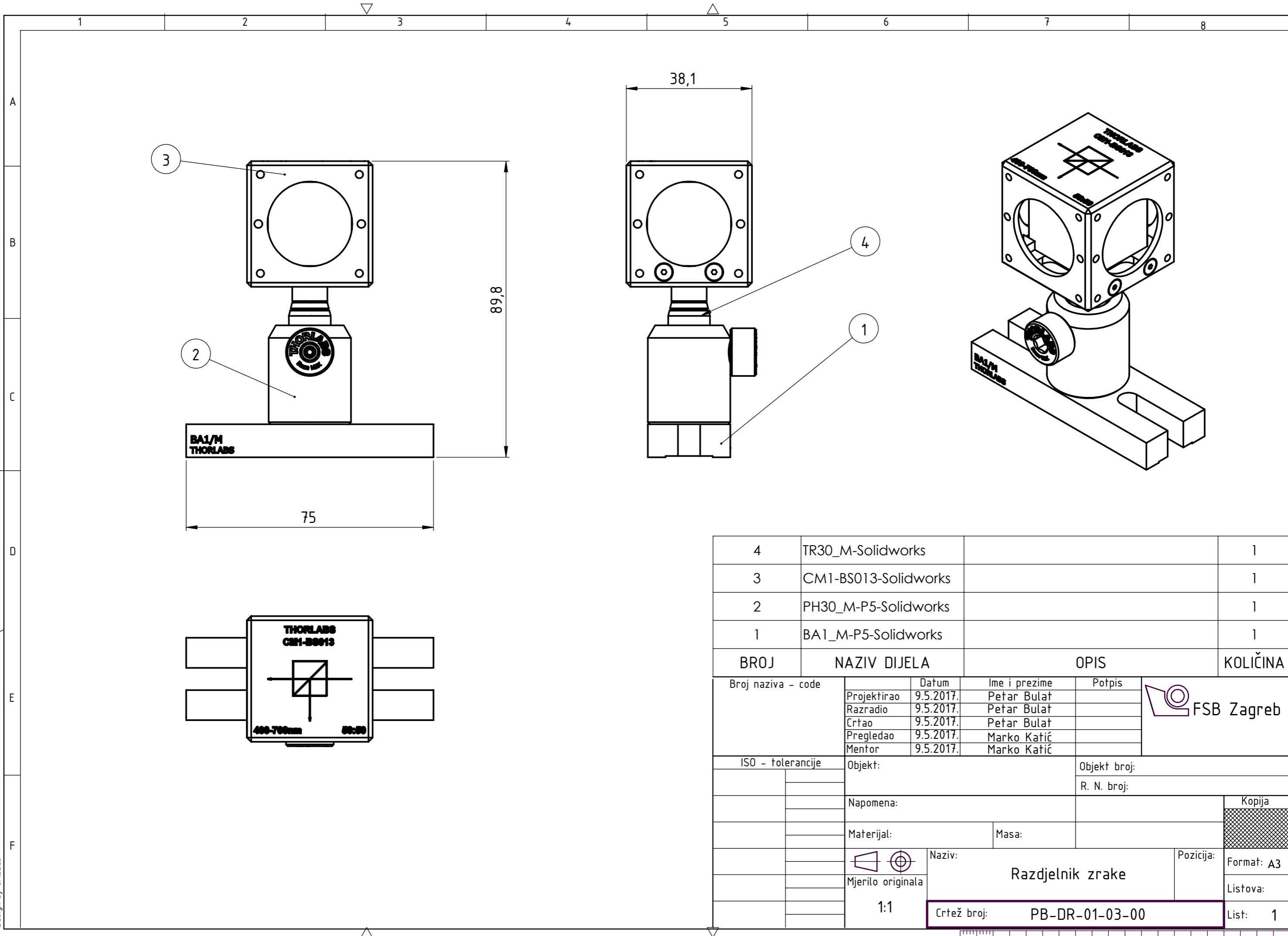


4	KM100V_M-Solidworks		1
3	TR30_M-P5-Solidworks		1
2	PH30_M-P5-Solidworks		1
1	BA1_M-P5-Solidworks		1
BROJ	NAZIV DIJELA	OPIS	KOLIČINA

Broj naziva - code	Projektirao	9.5.2017.	Ime i prezime	Petar Bulat	
	Razradio	9.5.2017.	Potpis		
	Crtao	9.5.2017.			
	Pregledao	9.5.2017.			
	Mentor	9.5.2017.			
ISO - tolerancije		Objekt:		Objekt broj:	
				R. N. broj:	
		Napomena:			
		Materijal:		Masa:	
				Naziv:	
		Mjerilo originala		Držač lasera	
		1:1		Pozicija:	
				Format: A3	
				Listova: 1	
				List: 1	
				Crtež broj: PB-DR-01-02-00	



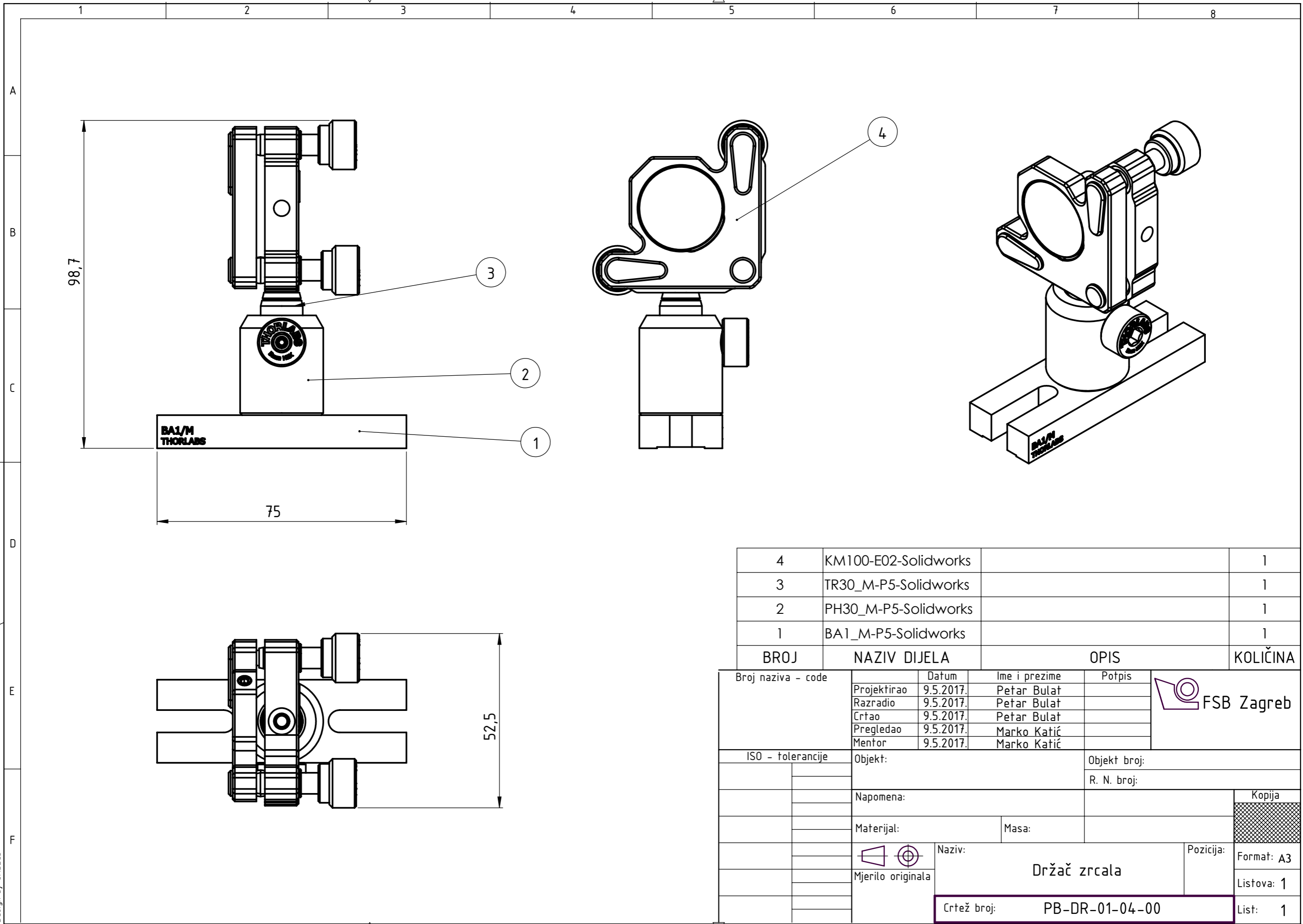
Design by CADLab



4	TR30_M-Solidworks		1
3	CM1-BS013-Solidworks		1
2	PH30_M-P5-Solidworks		1
1	BA1_M-P5-Solidworks		1
BROJ	NAZIV DIJELA	OPIS	KOLIČINA
Broj naziva - code	Datum	Ime i prezime	Potpis
Projektirao	9.5.2017.	Petar Bulat	
Razradio	9.5.2017.	Petar Bulat	
Crtao	9.5.2017.	Petar Bulat	
Pregledao	9.5.2017.	Marko Katić	
Mentor	9.5.2017.	Marko Katić	
ISO - tolerancije	Objekt:	Objekt broj:	
		R. N. broj:	
	Napomena:		Kopija
	Materijal:	Masa:	
	Mjerilo originala	Naziv:	Pozicija:
	1:1	Razdjelnik zrake	Format: A3
		Crtež broj: PB-DR-01-03-00	Listova:
			List: 1



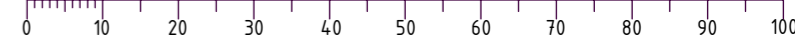
Design by CADLab

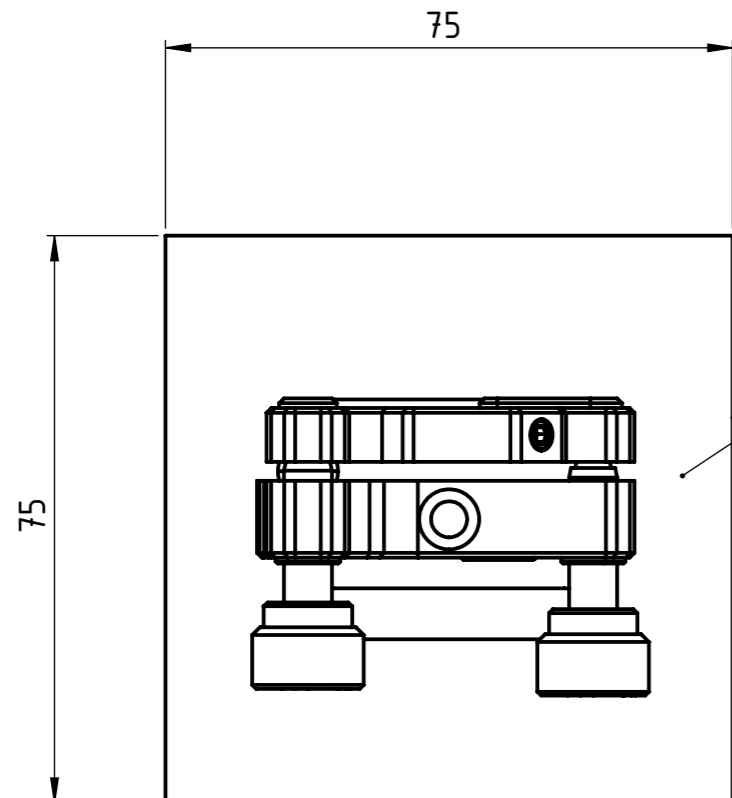
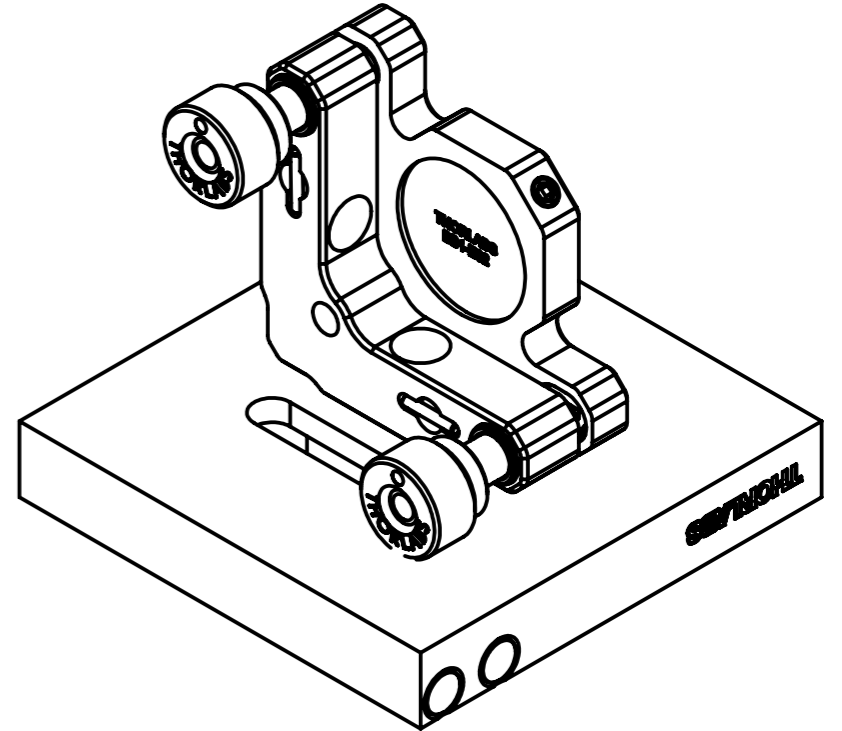
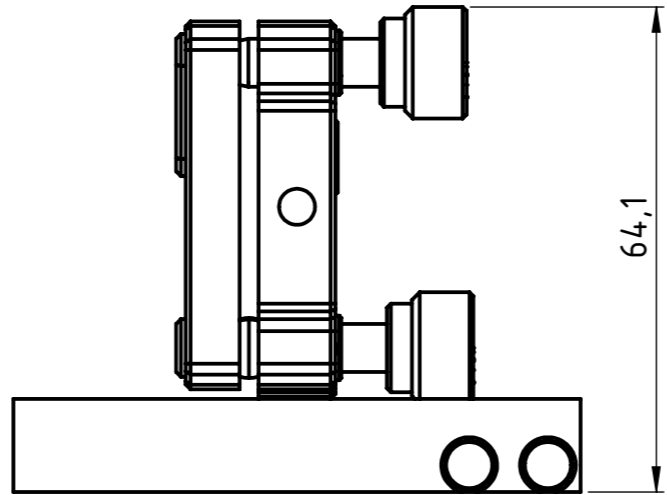
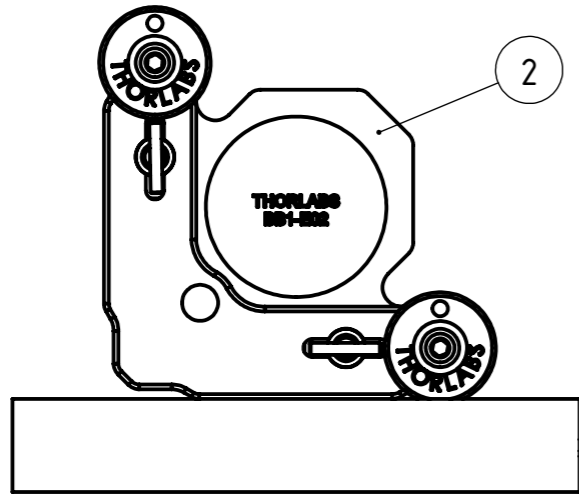
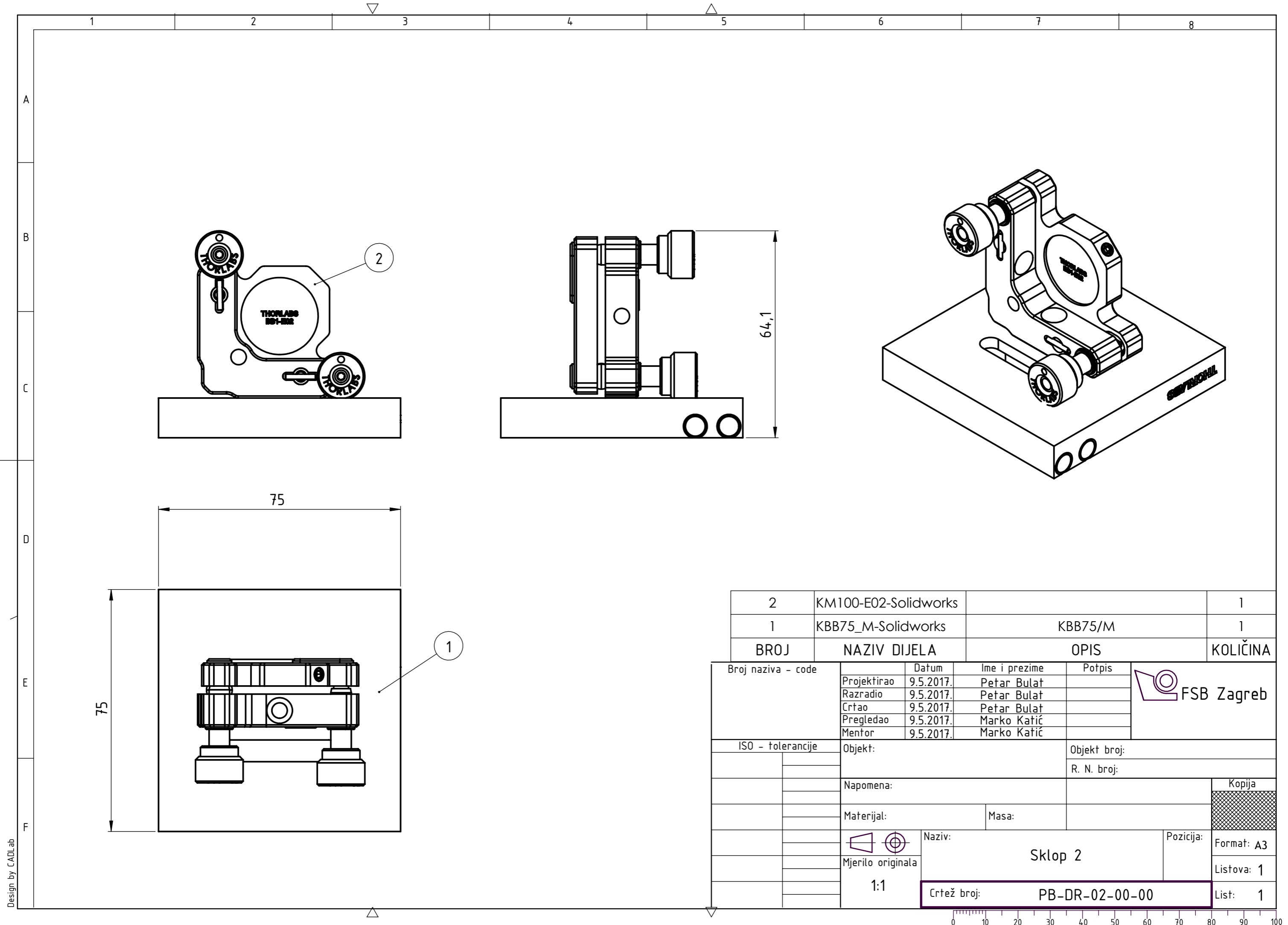


4	KM100-E02-Solidworks		1
3	TR30_M-P5-Solidworks		1
2	PH30_M-P5-Solidworks		1
1	BA1_M-P5-Solidworks		1
BROJ	NAZIV DIJELA	OPIS	KOLIČINA

Broj naziva - code	Projektirao	9.5.2017.	Ime i prezime	Petar Bulat	
	Razradio	9.5.2017.	Potpis		
	Crtao	9.5.2017.			
	Pregledao	9.5.2017.			
	Mentor	9.5.2017.			
ISO - tolerancije		Objekt:		Objekt broj:	
				R. N. broj:	
		Napomena:		Kopija	
		Materijal:		Masa:	
				Naziv:	
		Mjerilo originala		Držać zrcala	
		Crtež broj:		PB-DR-01-04-00	
				Pozicija: Format: A3 Listova: 1 List: 1	

Design by CADLab





2	KM100-E02-Solidworks		1
1	KBB75_M-Solidworks	KBB75/M	1
BROJ	NAZIV DIJELA	OPIS	KOLIČINA

Broj naziva - code	Projektirao	9.5.2017.	Ime i prezime	Potpis	
	Razradio	9.5.2017.	Petar Bulat		
	Crtao	9.5.2017.	Petar Bulat		
	Pregledao	9.5.2017.	Marko Katić		
	Mentor	9.5.2017.	Marko Katić		
ISO - tolerancije	Objekt:		Objekt broj:		Kopija
			R. N. broj:		
	Napomena:				
	Materijal:	Masa:			
			Naziv:	Pozicija:	
	Mjerilo originala		Sklop 2		Format: A3
	1:1		Crtež broj: PB-DR-02-00-00		Listova: 1
					List: 1



Design by CADLab