



Univerza v Mariboru

Fakulteta za elektrotehniko,
računalništvo in informatiko

Doktorska disertacija

**OPTIČNOVLAKENSKI SENZORJI ZA TOČKOVNE IN
KVAZIPORAZDELJENE MERITVE ROTACIJ IN KOTOV
ZASUKA Z ENOJNIM DOVODNIM VLAKNOM**

Maribor, november 2017

Vedran Budinski, univ. dipl. inž. el.



Univerza v Mariboru

Fakulteta za elektrotehniko,
računalništvo in informatiko

Doktorska disertacija

**OPTIČNOVLAKENSKI SENZORJI ZA TOČKOVNE IN
KVAZIPORAZDELJENE MERITVE ROTACIJ IN KOTOV
ZASUKA Z ENOJNIM DOVODNIM VLAKNOM**

Maribor, november 2017

Vedran Budinski, univ. dipl. inž. el.

Mentor: red. prof. ddr. Denis Đonlagić

Zahvala

Rad bi se zahvalil svojemu mentorju, profesorju Denisu Donlagiću za izredno vodenje po ovinkasti poti doktorskega študija, polni izzivov, zahtevnih odločitev, vzponov in padcev. Profesor, hvala Vam za vse nasvete, ideje, nova spoznanja, obilico potrpljenja in podpore!

Velika zahvala gre tudi enim in edinim sodelavcem-kolegom iz Laboratorija za elektro-optične in senzorske sisteme, kateri so mi z znanjem, izkušnjami in karizmo pomagali pri izvedbi doktorske naloge in pobarvali marsikateri dan.

Hvala najboljšemu referatu na celotni univerzi - Referatu FERi za vso administrativno pomoč tekom študija.

Zahvaljujem se tudi tebi, moja moja Irena za ljubezen, toplino, razumevanje in podporo. Stala si mi ob strani ko sem te najbolj potreboval.

Na koncu bi se rad zahvalil tudi Agenciji za raziskovalno dejavnost Republike Slovenije (ARRS), ki mi je v sklopu programa mladih raziskovalcev omogočila in so-financirala študij ter raziskovalno dejavnost.

HVALA!

V spomin moji mami Božici (1960-2015)

Kazalo

1	UVOD.....	1
1.1	Pomen meritev kotov, zasukov in torzije	2
1.2	Pričakovani izvirni znanstveni prispevki	3
1.3	Teza disertacije.....	3
1.4	Pregled obstoječih rešitev na področju optičnih vlakenskih senzorjev zasukov/rotacij/torzije	4
1.5	Kratek opis nerešenih problemov in motivacija za delo.....	26
1.6	Cilji doktorske disertacije	27
1.7	Struktura disertacije	27
2	ZASNOVA, NAČRTOVANJE IN ANALIZA REZULTATOV OPTIČNEGA POLARIMETRIČNEGA VLAKENSKEGA SENZORJA ZA MERITEV ROTACIJE/ZASUKOV NA ENOJNEM DOVODNEM VLAKNU	28
2.1	Uvod	28
2.2	Predstavitev senzorja	28
2.3	Analiza s pomočjo Jonesovih matrik	30
2.4	Zasnova optoelektronskega sklopa	38
2.5	Eksperimentalni rezultati	39
2.6	Povzetek	42
3	ZASNOVA, NAČRTOVANJE IN ANALIZA REZULTATOV KVAZIPORAZDELJENEGA POLARIMETRIČNEGA OPTIČNEGA VLAKENSKEGA SENZORJA ZA MERITEV ROTACIJE/ZASUKOV.....	43
3.1	Uvod	43
3.2	Predstavitev senzorja	43
3.3	Zgradba senzorja	47
3.3.1	Delovanje senzorja	56
3.4	Eksperimentalni rezultati	58
3.5	Povzetek	73
4	ZASNOVA, NAČRTOVANJE IN ANALIZA REZULTATOV FP-OPTIČNEGA VLAKENSKEGA SENZORJA ZA MERITEV ROTACIJE/ZASUKOV, TEMPERATURE IN RAZTEZKOV NA OSNOVI ŠTIRIJEDRNEGA OPTIČNEGA VLAKNA	75
4.1	Uvod	75
4.2	Predstavitev senzorja	75
4.3	Model senzorja.....	80
4.4	Razločitev merilne vrednosti.....	83
4.5	Postopek izdelave senzorja	91
4.6	Ekperimentalni rezultati.....	95
4.7	Povzetek	98
5	ZAKLJUČEK.....	99
5.1	Potrditev teze in izvirni znanstveni prispevki k znanosti	101
	LITERATURA	102
	PRILOGA.....	117
	Elektronske sheme in načrti merilnih sistemov za merjenje rotacij/zasukov.....	117

Kazalo slik

Slika 1-1: Orientacija polarizacijske ravnine, ko optično vlakno ni zasukano in (b) ko je optično vlakno zasukano za kot 100° , pride do zasuka polarizacijske ravnine za kot približno 7° v nasprotni smeri.	4
Slika 1-2: Senzor rotacije na osnovi zanke iz optičnega vlakna.....	5
Slika 1-3: Simulacija z uporabo metode končnih elementov za prikaz porazdelitve napetosti vzdolž vlakna zaradi torzije. (a) Krožno simetrično vlakno, ko ni zasukano; (b) Porazdelitev napetosti pri zasuku krožno simetričnega vlakna; (c) Krožno nesimetrično vlakno, ko ni zasukano; (d) Porazdelitev napetosti pri krožno nesimetričnem vlaknu – opazna področja napetosti ob jedru vlakna.	6
Slika 1-4: Senzor rotacije na osnovi zanke Sagnacovega interferometra.	7
Slika 1-5: Senzor rotacije na osnovi Sagnacovega interferometra z uporabo dveh vlakenskih delilnikov...	8
Slika 1-6: Senzor rotacije na osnovi Mach-Zehnderjevega interferometra z vijačno strukturo.....	9
Slika 1-7: Porazdelitev strižnih napetosti vzdolž palice/vlakna.....	10
Slika 1-8: Senzor zasuka/torzije na osnovi mehansko izdelanih Braggovih rešetk z dolgo periodo.	11
Slika 1-9: Senzor zasuka/torzije na osnovi jedkanih Braggovih rešetk z dolgo periodo.	12
Slika 1-10: Standardna proga s senzorjem zasuka/torzije, zgrajenim iz Braggovih rešetk z dolgo periodo.	13
Slika 1-11: Prikaz neenakomerne porazdelitve lomnega količnika vzdolž preseka optičnega vlakna z Braggovimi rešetkami z dolgo periodo, narejenimi z uporabo laserskih pulzov CO ₂	13
Slika 1-12: Senzor zasuka/torzije na osnovi Mach-Zehnderjevega interferometra.	15
Slika 1-13: (a) Senzor zasuka/torzije na osnovi Mach-Zehnderjevega interferometra, izvedenega s spiralnim jedrom; (b) Senzor zasuka/torzije na osnovi večjedrnega spiralnega vlakna.	17
Slika 1-14: Postavitve senzorjev zasuka/torzije, ki temeljijo na spremembi položaja vektorja električne poljske jakosti.	19
Slika 1-15: Senzor zasuka/torzije na osnovi spremembe položaja vektorja električne poljske jakosti z uporabo Braggove rešetke, vpisane v vlakno, ki ohranja polarizacijo.	21
Slika 1-16: Vlakno z vpisano nagnjeno Braggovo rešetko.	21
Slika 1-17: Smer sklopljanja rodov v odvisnosti od kota nagiba nagnjene Braggove rešetke. (a) Širjenje sklopljenih rodov v nasprotni smeri po oblogi; (b) Širjenje sklopljenih rodov naprej po oblogi; (c) Širjenje sklopljenih rodov izven obloge.	22
Slika 1-18: Sklopni resonančni valovni dolžini, ki jima pripadata stanji polarizacije E_x in E_y	23
Slika 1-19: Senzor rotacije/zasuka, zgrajen z nagnjeno Braggovo rešetko.	23
Slika 1-20: Postavitev za zaznavanje rotacije/zasuka z zunanjim delovanjem.....	25
Slika 1-21: Senzor rotacije/torzije na osnovi diferencialnega para Braggovih rešetk, postavljenih na površino merjenca (posredna meritev).	25
Slika 2-1: Osnovna zgradba polarimetričnega senzorja rotacije/zasuka.....	28
Slika 2-2: Vzbujanje vertikalnega in horizontalnega rodu, ko senzor ni izpostavljen zasuku, ter orientacija vpadnega in odbitega vektorja električne poljske jakosti med dovodnim vlaknom in ČVP, ko senzor ni zasukan.	31
Slika 2-3: Vzbujanje vertikalnega in horizontalnega rodu, ko je senzor zasukan za kot Φ ; a) Orientacija vektorja električne poljske jakosti, njegove horizontalne in vertikalne komponente na prehodu iz enorodovnega vlakna v ČVP; b) Smer vektorja električne poljske jakosti, njegove horizontalne in vertikalne komponente v prehodu iz enorodovnega vlakna v dovodno vlakno, ko je senzor zasukan za kot Φ	32

Slika 2-4: Izris modulacije optičnih moči posameznih LP-rodov pri zasuku sensorja za mehanski kot Φ 0 do $\pi/2$ (od 0° do 90°).....	34
Slika 2-5: Zgradba temperaturno neobčutljive ČVP.	35
Slika 2-6: Napetostno krmiljen tokovni generator za SLED.....	38
Slika 2-7: Sprejemni del za zajemanje in pretvorbo optične moči enega LP-roda.	39
Slika 2-8: Merilna proga sensorja rotacije/zasuka s ČVP.....	40
Slika 2-9: Izmerjena modulacija polarizacijskih rodov LPx in LPy ter izračunan kot zasuka.....	40
Slika 2-10: Prikaz ločljivosti sensorja pri sukanju rotacijske mize za $0,03^\circ$	41
Slika 2-11: Odziv sensorja na spremembo temperature pri prednastavljenih kotih 0° , 45° in 90°	41
Slika 2-12: Primerjava lezenja kota med ČVP, izdelanimi samo iz vlakna PANDA ali samo iz HB1500QW ter kombinacije (PANDA + HB1500QW) vlaken zaradi spremembe temperature.	42
Slika 3-1: Delovanje segmenta, ko ni izpostavljen zasuku/rotaciji.....	44
Slika 3-2: Delovanje segmenta, ko je izpostavljen zasuku/rotaciji.....	44
Slika 3-3: Zgradba MOS-a.	45
Slika 3-4: Izgube pri posameznem senzorskem segmentu.....	47
Slika 3-5: a) Senzorski segment vstavljen v aluminijast U-profil; b) Komponente za vgradnjo MOS-a v aluminijast U-profil.	48
Slika 3-6: Postavitev kvaziporazdeljenega sensorja rotacij/zasukov.....	49
Slika 3-7: Sistem OTDR za senzor.	50
Slika 3-8: Merilna proga za meritve transmisijskih lastnosti na senzorskem segmentu.	50
Slika 3-9: Programirljivo zakasnilno vezje DS1023-100.....	51
Slika 3-10: Vezje s PIN fotodiodo in transimpedančnim ojačevalnikom AD8015.	53
Slika 3-11: Vezje z nastavljivim operacijskim ojačevalnikom (AD8375).	54
Slika 3-12: Svetlobni pulz, posnet z optičnim vzorčevalnim osciloskopom HP 83480A.	55
Slika 3-13: Zajet signal s sensorja v okolju LabView.	55
Slika 3-14: Postavitev merilne proge kvaziporazdeljenega sensorja rotacij/zasukov.	58
Slika 3-15: Umerjanje sensorja – določitev korekcijskega faktorja k za posamezni senzorski segment. Vse osi polarizatorjev so poravnane.	59
Slika 3-16: Začetni položaj sensorja – celotno polje je poravnano.	60
Slika 3-17: Zasuk petega segmenta – S5.	60
Slika 3-18: Zasuk segmentov S3 in S7.....	61
Slika 3-19: Zasuk segmentov S1, S3, S5, S7 in S9.	62
Slika 3-20: Zasuk vseh segmentov.....	63
Slika 3-21: Prednastavljen šesti MOS za kot 15°	64
Slika 3-22: Sprememba razmerja vrhov na petem segmentu pri zasuku v a) nasprotni smeri urinega kazalca in b) v smeri urinega kazalca ter c) izračunan kot zasuka.	65
Slika 3-23: Zajet signal, ko so vsi MOS-i prednastavljeni za kot 5°	66
Slika 3-24: Zajeti signal, ko so segmenti zasukani za kot 5° v nasprotni smeri urinega kazalca (rumene zastavice) in v smeri urinega kazalca (modre zastavice).	67

Slika 3-25: (a-f) Zasuk posameznih segmentov iz začetnega položaja za 10° v nasprotni smeri urinega kazalca, nato zasuk posameznega segmenta v smeri urinega kazalca za 10° v začetni položaj; (j) Izračunani koti posameznih zasukanih segmentov.	68
Slika 3-26: a) Testna postavitve senzorskega segmenta za preizkus učinka makroukrivljenosti (povesa) in b) Sprememba kota v odvisnosti od povesa optičnega vlakna.	69
Slika 3-27: a) Testna postavitve realnega senzorskega segmenta za preizkus mikroukrivljenosti ter b) Referenčna postavitve senzorskega segmenta z uporabo polprepustnih zrcal.	70
Slika 3-28: Sprememba kota pri preizkusu mikroukrivljenosti za segment, sestavljen iz dveh MOS-ov (X) in dveh polprepustnih zrcal (Y).	71
Slika 3-29: a) Prikaz statične karakteristike senzorja in b) ločljivosti na zadnjem, devetem senzorskem segmentu.	72
Slika 3-30: Odziv petega segmenta (S5) v primeru sukanja segmentov S4, S3, S2 in S1 za kot 45° v obe smeri.	73
Slika 4-1: Zgradba mikrostrukture.	76
Slika 4-2: Zgradba senzorja rotacije/zasuka na osnovi večjedrnega optičnega vlakna.	76
Slika 4-3: Prečni prerez štirijedrnega optičnega vlakna.	77
Slika 4-4: Princip delovanja senzorja rotacije/zasuka z FP-interferometrom – relaksiran senzor.	78
Slika 4-5: Princip delovanja senzorja rotacije/zasuka z FP-interferometrom – zasuk/rotacija senzorja za mehanski kot 180°	78
Slika 4-6: Skica delovanja senzorja rotacije/zasuka z FP-interferometrom.	80
Slika 4-7: Izris modulacije optične poti interferometrov za dva para diametralnih jeder j_1 in j_3 ter j_2 in j_4 pri zasuku senzorja za »mehanski« kot Φ , ki je 0 do 2π (od 0° do 360°). V simulaciji so za izračun modulacije optične poti interferometrov uporabljeni podatki za senzor z diagonalno razdaljo med jedri ($d = 70,7 \mu\text{m}$) in kotom poliranja ($\delta_p = 15^\circ$).	83
Slika 4-8: Izris odbite optične moči optičnega spektra v odvisnosti od valovne dolžine idealnega vira. ...	84
Slika 4-9: (a) Spektralna karakteristika v frekvenčnem prostoru in (b) amplitudni spekter DFT brez Gaussovega oknjenja in (c) spektralna karakteristika in (d) amplitudni DFT-spekter z Gaussovimi oknjenjem.	86
Slika 4-10: (a) Sprememba faze FP-interferometra pri zasuku za »mehanski« kot π (180°) oz. pri spremembi optične poti FP-interferometra za $8,3 \mu\text{m}$ in (b) pripadajoči premik frekvenčnih komponent.	87
Slika 4-11: Uporabniški vmesnik, izdelan v okolju LabView.	89
Slika 4-12: a) Izris spremembe razlike optičnih poti diametralnih jeder (model senzorja) in b) modulacija razlike optičnih poti diametralnih jeder (črtkani krivulji) pri zasuku realnega senzorja za mehanski kot 180°	90
Slika 4-13: a) Optični odbiti spektri posameznih jeder, pomnoženi z Gaussovo funkcijo, in b) pripadajoči amplitudni spektri DFT.	91
Slika 4-14: Steklena kapilara z ustreznim notranjim premerom ($128 \mu\text{m}$).	92
Slika 4-15: Končna oblika mikrostrukture.	94
Slika 4-16: Senzorski sestav.	94
Slika 4-17: Merilna proga senzorja rotacije/zasuka na osnovi štirijedrnega vlakna.	95
Slika 4-18: Izmerjena sprememba faze interferometrov za jedri j_1 in j_3 ter izračunan kot zasuka pri zasuku za mehanski kot $\pm 90^\circ$	95
Slika 4-19: Prikaz minimalne ločljivosti senzorja pri sukanju rotacijske mize za $0,02^\circ$	96

Slika 4-20: Prikaz spremembe dolžine interferometra pri raztegotvanju za 4 μm	96
Slika 4-21: Sprememba kota zasuka kot posledica raztezka senzorja.....	97
Slika 4-22: Prikaz meritve temperature s senzorjem rotacije/zasuka.....	97
Slika 4-23: Modulacija kota zasuka zaradi spremembe temperature.....	98

Vedran Budinski

Optičnovlakenski senzorji za točkovne in kvaziporazdeljene meritve rotacij in kotov zasuka z enojnim dovodnim vlaknom

UDK: 535:681.7.068(043.3)

KLJUČNE BESEDE:

- optično vlakno
- senzor
- zasuk
- torzija
- rotacija
- polarizacijski senzor
- kvaziporazdeljen senzor
- polje senzorjev
- multipleksirani senzorji
- porazdeljene meritve
- valovna plošča
- temperaturna kompenzacija

POVZETEK:

Uporaba optičnih vlakenskih senzorjev rotacij/zasukov se je pokazala kot robustna in učinkovita tehnologija na področju nadzora v panogah, kjer je pomembno aktivno spremljanje rotacij/zasukov (geofizika, navigacija, letalska industrija, vojaška industrija ipd.). Močnejši preboj na druga področja pa največkrat omejuje konfiguracija senzorja, kjer so dosedanje rešitve zgrajene z uporabo posebnih vlaken v linijski konfiguraciji, pri kateri je potreben dostop do senzorja tako s strani svetlobnega vira, tj. vhodnega dela optičnega vlakna, kot s strani detektorskega dela. Takšna konfiguracija lahko omeji področja uporabe senzorja v aplikacijah, kjer so zahteve po kompaktnosti in majhnih dimenzijah bistvenega pomena. Sicer obstajajo rešitve, ki ne zahtevajo linijske postavitve, kot so sistemi na osnovi Braggovih sit, pa vendar, tako kot pri sistemih v linijski konfiguraciji, temeljijo takšne rešitve na kompleksnih metodah za signalno razločanje z visoko ločljivostjo, kar jih naredi nepriljubljene za praktično uporabo. Veliko takšnih sistemov izkazuje tudi temperaturno odvisnost. V doktorski disertaciji smo se posvetili raziskavam optičnih vlakenskih senzorjev za meritve na področju rotacij/zasukov, s pomočjo katerih bi snovali sisteme v konfiguraciji z enojnim dovodnim vlaknom, ki so grajeni iz majhnega števila optičnih komponent, imajo preprosto konfiguracijo, omogočajo enostavno signalno razločanje merilnih vrednosti in so cenovno ugodni.

Za namen meritev rotacij/zasukov smo v enorodovnem optičnem vlaknu raziskali obnašanje polarizacijskih stanj, možnosti, ki jih ponuja standardno optično vlakno v kombinaciji s polarizacijskimi komponentami, vpliv temperature na spremembo polarizacije in možnost vključitve posebnih optičnih vlaken z ohranjanjem polarizacije za snovanje senzorjev zasukov/rotacij. Prav tako smo raziskali možnosti, ki jih ponuja Fabry-Perotova (FP) interferometrija z uporabo posebnih večjedrnih optičnih vlaken, ter možnost gradnje mikrovlakenskih komponent/struktur za namen izdelave senzorjev rotacij/zasukov. Na osnovi opisanih raziskav smo v disertaciji predstavili načrtovanje in rezultate optičnih vlakenskih senzorjev rotacij/zasukov. Podrobno smo opisali miniaturni polarimetrični vlakenski senzor rotacije/zasukov na enojnem dovodnem vlaknu s temperaturno kompenzirano četrtvalovno ploščo, ki v refleksijskem načinu

omogoča razločanje kota rotacije/zasuka iz razmerja optičnih moči posameznih linearno polariziranih rodov. Prav tako smo predstavili kvaziporazdeljen senzor rotacije/zasuka, pri katerem delovanje omogoča standardno enorodovno vlakno, vzdolž katerega se ob rotaciji/zasuku smer vektorja električne poljske ne spreminja in ki je zgrajen iz serije zaporedno postavljenih linearnih polarizatorjev z vgrajenimi polprepustnimi zrcali, ki služijo za razločanje merilnih vrednosti senzorskega segmenta z optičnim reflektometrom v časovnem prostoru (OTDR).

Naposled smo predstavili Fabry-Perotov optični vlakenski senzor za meritev rotacije/zasukov na osnovi dovodnega štirijedrnega optičnega vlakna, pri katerem posebna centronesimetrična mikrostruktura omogoča modulacijo optične poti FP-interferometrov senzorja, ki je določena s fizično razdaljo med zrcaloma, lomnim količnikom mikrostrukture ter kotom rotacije/zasuka mikrostrukture glede na posamezna jedra dovodnega vlakna. Fizikalni vplivi, kot so zasuk/rotacija, sprememba dolžine ali sprememba temperature, modulirajo dolžine optičnih poti vseh štirih FP-interferometrov vsak na svojevrsten način in s tem omogočajo ločeno zaznavanje spremembe zasuka/rotacije, raztezkov in temperature. Skupne lastnosti opisanih senzorjev so delovanje na enojnem dovodnem vlaknu, kompakten dizajn, nizka temperaturna občutljivost in zgradba iz majhnega števila cenovno učinkovitih optičnih komponent. Opisani senzorji so načrtovani tako, da omogočajo izdelavo in uporabo enostavnih sistemov za razločanje merilnih vrednosti iz pridobljenih optičnih signalov.

Vedran Budinski

**Fiber optic sensors for point and quasi-distributed twist/rotation measurements,
constructed on a single lead fiber**

UDK: 535:681.7.068(043.3)

KEY WORDS:

- Optical fiber
- Sensor
- Twist
- Torsion
- Rotation
- Polarimetric sensor
- Quasi-distributed sensor
- (Sensor) array
- Multiplexed (sensor)
- Distribute measurements
- Waveplate
- Temperature compensation

ABSTRACT:

Implementation of fiber optic twist/rotation sensors proved to be a robust and efficient technology in several industrial fields (geophysics, navigation, aeronautic and military industry) where active monitoring of twist/rotation parameters is essential. However, a greater breakthrough of this technology is restrained due to current fiber optic sensor twist/rotation solutions, employing different configurations of specialty fibers, which either depend on in-line configurations or a combination of specialized gratings. In-line configuration is often limiting in various applications, as it requires physical access to the measurement location from two opposite directions using two lead fibers. Limited fiber bend diameter thus limits the minimum size of the device to impractical dimensions in the cases of applications requiring small sizes or volumes. Sensing systems that depend on (specialized) gratings can be configured for operating in simpler and more compact back-reflection modes, however alike in-line configurations, they employ complex and cost-prohibitive signal interrogation methods which also experience limited temperature stability. Our focus in this dissertation was the research for new approaches in the area of fiber optic twist/rotation measurements to yield a single lead sensor configurations, which are built from a small quantity of optical components, have a straightforward design, which allow simple and cost-efficient signal interrogation methods.

In that manner, we conducted our research in the field of polarization behavior in single mode optical fibers in arrangement with other polarization components. Since temperature is a significant factor in industrial applications, we also studied temperature influences on polarization behavior, where we examined available specialty polarization maintaining fibers as a prospect for fabricating fiber optic twist/rotation sensors. For the purpose of miniaturization and simplification, specialty multicore fibers with Fabry-Perot interferometry is also presenting itself as a technology for constructing micro components/structures for exploitation in new twist/rotation sensor designs.

Based on the research carried out in this dissertation, we presented three novel designs of fiber optic twist/rotation sensors. First proposed sensor consist of

polarization maintaining lead-in fiber (PMF), a short section of standard single-mode fiber, which is exposed to twist/axial rotation, an all-fiber quarter-wave wave plate. Sensor exploits the inability of a short-section circular symmetric single-mode fiber to change the polarization state or spatial E-field vector orientation of an optical wave when exposed to mechanical twist/rotation. Thus, the twisting of a single-mode fiber in the proposed configuration causes displacement of the lead-in PMF and wave-plate axis. This enables encoding of the twist angle into a power ratio of the lead-in PMF LP modes that is propagated in a backward direction by the application of a wave plate, which can be straightforwardly measured by a simple interrogation system. The second proposed sensor is a fiber-optic quasi-distributed in-line twist/rotation configuration, which consists of a polarization maintaining lead-in fiber and series of in-line fiber polarizers with integrated semi-reflective mirrors that are interconnected by a standard single mode fiber. Sections of interconnecting single mode fiber define multiple twist/rotation sensitive sensor segments, which can be interrogated individually by an OTDR system. The presented system exploits the inability of the standard single mode fiber to change the E-field vector orientation of a wave propagating down twisted/rotated fiber. The third twist/rotation sensor consists out of a single led in multicore fiber, which has four eccentrically positioned cores, a special asymmetrical microstructure, similar to truncated cylinder and an inline semi reflective mirror, all packed in an glass capillary housing. Straight cut of the lead in multicore fiber and the inline semi reflective mirror form Fabry-Perot cavities. The optical path length of each Fabry-Perot interferometer is expressed by the distance between mirrors, refractive index and twist/rotation angle of the microstructure in relation to the core positions in the lead in multicore fiber. The modulation of the optical path of the Fabry-Perot interferometer is instigated by twist/rotation, change of length or change of the temperature. Each of those parameters modulate the optical path length of the interferometers in their own separate fashion, thus allowing independent measurements of twist/rotation, length and temperature.

Common properties of all described twist/rotation sensors is the single lead fiber configuration, compact design with small count of cost efficient optical components, low temperature sensitivity and simple signal interrogation systems

Sklep o odobritvi teme doktorske disertacije



Univerza v Mariboru

Slomškovo trg 15
2000 Maribor, Slovenija

Maribor, 20. 12. 2016

Številka: 414/2016/71/416-MGM

Na osnovi 287., 140., 142. in 144. člena Statuta Univerze v Mariboru (Statut UM-UPB11, Ur. l. RS, št. 44/2015, 92/2015) ter sklepa 17. redne seje Senata Univerze v Mariboru, ki je potekala 20. 12. 2016 v zvezi z vlogo doktorskega kandidata Vedrana Budinskega za sprejem odločitve o predlagani temi doktorske disertacije in mentorja

izdajam naslednji

SKLEP

Odobri se tema doktorske disertacije Vedrana Budinskega s Fakultete za elektrotehniko, računalništvo in informatiko z naslovom »Optičnovlakenski senzorji za točkovne in kvaziporazdeljene meritve rotacij in kotov zasuka z enojnim dovodnim vlaknom«. Za mentorja se imenuje red. prof. dr. Denis Đonlagić. Kandidat mora članici predložiti izdelano doktorsko disertacijo v zadostnih izvodih najpozneje do 19. 12. 2020.

Obrazložitev:

Kandidat Vedran Budinski je 17. 10. 2016 na Fakulteti za elektrotehniko, računalništvo in informatiko vložil vlogo za potrditev teme doktorske disertacije z naslovom »Optičnovlakenski senzorji za točkovne in kvaziporazdeljene meritve rotacij in kotov zasuka z enojnim dovodnim vlaknom«. Za mentorja je bil predlagan red. prof. dr. Denis Đonlagić.

Senat Fakultete za elektrotehniko, računalništvo in informatiko je na osnovi pozitivnega mnenja komisije za oceno teme doktorske disertacije, ki je ugotovila, da kandidat izpolnjuje pogoje za pridobitev doktorata znanosti, in ocenila, da je predlagana tema ustrezna, sprejel pozitivno mnenje in poslal predlog teme doktorske disertacije s predlogom mentorja v odobritev Senatu univerze.

Senat Univerze v Mariboru je po proučitvi vloge in na osnovi določil Statuta Univerze v Mariboru sprejel svojo odločitev o predlagani temi doktorske disertacije in imenoval mentorja, kot izhaja iz izreka.

V skladu s 144. členom Statuta Univerze v Mariboru mora kandidat za pridobitev doktorata znanosti najpozneje v štirih letih od dneva izdaje tega sklepa članici predložiti izdelano doktorsko disertacijo v zadostnih izvodih. Kandidatu je bil določen rok za oddajo izdelane doktorske disertacije glede na datum sprejetja teme na pristojnem organu.

Pouk o pravnem sredstvu:

Zoper ta sklep je možna pritožba na Senat Univerze v Mariboru v roku 8 dni od prejema tega sklepa.

Obvestiti:

1. Kandidata.
2. Fakulteto.
3. Arhiv.



Rektor Univerze v Mariboru:
Prof. dr. Igor Tičar

Uporabljeni simboli

<i>Simbol</i>	<i>Osnovna enota</i>	<i>Pomen simbola</i>
λ	[m]	valovna dolžina svetlobnega valovanja
c	[m/s]	hitrost svetlobe v vakuumu
n	[-]	lomni količnik snovi
f	[Hz]	frekvenca
Φ	[rad]	kot rotacije/zasuka
g	[-]	elastooptični koeficient stekla
τ	[-]	zasuk
λ_{res}	[m]	resonančna valovna dolžina Braggovih rešetk z dolgo periodo
n_{ef_osn}	[-]	efektivni lomni količnik osnovnega rodu Braggovih rešetk z dolgo periodo
n_{ef_obl}	[-]	efektivni lomni količnik višjega rodu (v oblogi optičnega vlakna) Braggovih rešetk z dolgo periodo
Λ	[m]	perioda Braggovih rešetk z dolgo periodo
$\Delta \lambda_{res}$	[m]	resonančna valovna dolžina Braggovih rešetk z dolgo periodo
n_{eff_FM}	[-]	efektivni lomni količnik osnovnega rodu nagnjenih Braggovih rešetk
n_{eff_CLM}	[-]	efektivni lomni količnik rodu v oblogi nagnjenih Braggovih rešetk
θ	[°]	kot nagiba med Braggovo rešetko in normalo osi optičnega vlakna
λ_{FM-CLM}	[m]	resonančna valovna dolžina pri nagnjenih Braggovih rešetkah
E_0	[-]	vektor električne poljske jakosti
E_x	[-]	horizontalna komponenta vektorja električne poljske jakosti
E_y	[-]	vertikalna komponenta vektorja električne poljske jakosti
$\Delta\varphi$	[rad]	fazni zamik med horizontalnim in vertikalnim rodom
P_x	[W]	moč horizontalno-linearno polariziranega rodu
P_y	[W]	moč vertikalno-linearno polariziranega rodu
k	[-]	korekcijski faktor zaradi pojava krožne dvolomnosti
Δn_x	[-]	dvolomnost
L_x	[m]	dolžina vlakna
L_b	[m]	utripna dolžina visokodvolomnega optičnega vlakna
k_x	[-]	koeficient, ki določa odvisnost dvolomnosti od spremembe temperature vlakna
ΔT	[°C]	sprememba temperature

$\Delta\Phi_T$	[rad]	sprememba faze v četrtvalovni plošči zaradi temperaturne spremembe
I	[W]	intenziteta izhodne moči iz analizatorja
I_0	[W]	intenziteta vhodne moči v polarizator
Φ_{Pol}	[°]	kot med osema polarizatorjev
I_{N+1}	[Im]	svetlobni tok, odbit od naslednjega MOS-a (analizatorja)
I_N	[Im]	svetlobni tok, odbit od predhodnega MOS-a
R_{N+1}	[%]	koeficient refleksije polprepustnega zrcala naslednjega MOS-a
R_N	[%]	koeficient refleksije polprepustnega zrcala predhodnega MOS-a
k_{MOS}	[-]	korekcijski faktor vstavitvenih izgub MOS-ov in povezovalnih vlaken
$\alpha_{(N)}$	[dB]	izgube kolimatorja v polarizatorju senzorskega segmenta
α_{SMF}	[dB]	izgube v enorodovnem optičnem vlaknu senzorskega segmenta
$\alpha_{R(N)}$	[dB]	izgube zrcala v polarizatorju senzorskega segmenta
α_{seg}	[dB]	faktor optičnih izgub na senzorskem segmentu
α_{seg_proga}	[dB]	faktor optičnih izgub v senzorski progi
j_x	[-]	jedra v štirijedrnem optičnem vlaknu
d	[m]	diagonalna razdalja med jedri štirijedrnega optičnega vlakna
x_N	[m]	odklon jeder iz začetne lege
l_{nx}	[m]	dolžina opravljene poti svetlobnega vala v mediju z lomnim količnikom n
δ_p	[rad]	kot med vzdolžno osjo vlakna mikrostrukture in polirano ravnino mikrostrukture
N_x	[-]	FP-interferometer v štirijedrnem optičnem vlaknu
l_r	[Im]	gostota svetlobnega toka FP-interferometra
$\Delta\Phi_N$	[rad]	sprememba faze FP-interferometra
OPL	[m]	dolžina optične poti FP-interferometra
ΔOPL_N	[m]	sprememba dolžine optične poti FP-interferometra
R_x	[%]	reflektivnost površine
ξ	[dB]	sklopni faktor (izgube)
σ	[-]	varianca
μ	[-]	srednja vrednost spektra

Uporabljene kratice

<i>Kratica</i>	<i>SLO</i>	<i>ANG</i>
<i>GPS</i>	globalni sistem pozicioniranja	global positioning system
<i>PDL</i>	polarizacijsko odvisno slabljenje	polarization dependent loss
<i>SMF</i>	standardno enorodovno vlakno	single mode fiber
<i>PMF</i>	vlakno, ki ohranja polarizacijo	polarization-maintaining Fiber
<i>PCF</i>	fotonsko-kristalno vlakno	photonic crystal fiber
<i>OSA</i>	optični spektralni analizator	optical spectrum analyzer
<i>DBR</i>	porazdeljen Braggov reflektor	Distributed Bragg reflector
<i>LPFBG</i>	Braggove rešetke z dolgo periodo	long period fiber Bragg gratings
<i>DSF</i>	vlakno s premaknjeno disperzijo	dispersion-shifted fibers
<i>FMF</i>	nekajrodovno vlakno	few mode fiber
<i>ULPFBG</i>	Braggove rešetke z ultra dolgo periodo	ultra-long-period fiber Bragg gratings
<i>KZNP</i>	krmilnik za nadzor polarizacije	polarization controller (PC)
<i>SLED</i>	superluminescenčna dioda	super-luminescence diode
<i>TFBG</i>	nagnjene Braggove rešetke	tilted fiber Bragg gratings
<i>ČVP</i>	četrtovalovna plošča	quarter-wave plate (QWP)
<i>OTDR</i>	optični reflektometer v časovnem prostoru	optical time-domain reflectometer
<i>TIA</i>	transimpedančni ojačevalnik	trans-impedance amplifier
<i>SPI</i>	serijska digitalna komunikacija	serial peripheral interface bus
<i>ILP</i>	vlakenski polarizator	in-line fiber optic polarizer
<i>MOS</i>	mikrooptični segment	micro-optic segment
<i>PWM</i>	pulzno-širinska modulacija	pulse-width modulation
<i>DAC</i>	digitalno-analogni pretvornik	digital-to-analog converter
<i>PGA</i>	programsko nastavljen ojačevalnik	programmable-gain amplifier
<i>VI</i>	virtualni instrument	virtual instrument
<i>DFT</i>	diskretna Fourierjeva transformacija	discrete Fourier transform

1 UVOD

Optična vlakna so povzročila nesluten razvoj na področju telekomunikacij, ki se je pričel z vse večjimi potrebami po hitrosti in prepustnosti, kar optična vlakna vsekakor nudijo; po eni strani z vedno nižjimi stroški izdelave, po drugi pa s konstantnimi izboljšavami, ki botrujejo vrhunskim zmogljivostim. Konstantne izboljšave in vedno nižji proizvodni stroški optoelektronskih komponent so omogočili prodor fotonih izdelkov tudi na področja masovne izdelave ter tako omogočili razvoj in izdelavo široko potrošniških komponent, kot so na primer CD-predvajalniki, laserski tiskalniki ipd. Z razvojem vlaken in optoelektronskih komponent so se odprle tudi možnosti za uporabo optičnih vlakenskih senzorjev na področjih aplikacij, kjer trenutno prevladujejo »klasični« (električni) senzorji. Optični vlakenski senzorji nudijo veliko novih možnosti in s tem prodirajo na nova tržišča, kjer ne obstajajo rešitve s »klasičnimi« pristopi. Poglavitne prednosti optičnih vlaken so popolna dielektrična zgradba (optično vlakno je izdelano iz kremenčevega stekla – SiO_2), majhne dimenzije (standardno telekomunikacijsko optično vlakno ima premer 125 μm), električna pasivnost (elektromagnetne motnje iz okolice ne vplivajo na svetlobo, ki je nosilec informacije v optičnem vlaknu), široko temperaturno območje, možnost uporabe v eksplozijsko nevarnih in radioaktivnih območjih ter kemična obstojnost. Optični vlakenski senzorji so danes zmožni izmeriti praktično vse fizikalne in kemijske veličine preko različnih merilnih principov [1-5]. Optično vlakno opravlja ne samo vlogo nosilca informacije, ampak tudi vlogo zaznavanja fizikalne ali kemijske veličine. Optični vlakenski senzorji so zastopani v mnogih industrijskih panogah, kot je gradbeništvo, kjer je potreben nadzor stavb ter drugih infrastrukturnih objektov (tuneli, mostovi, jezovi ipd). Pri slednjih igra pomembno vlogo detekcija razpok [6-8], zaznavanje premikov [9, 10], raztezkov [11-15], deformacij [16-18], torzije, zasukov [19-22] ipd. Uporaba vlakenskih senzorjev je prav tako smiselna v kemijski in petrokemijski industriji [23-28], v medicinskih [29-35] in biomedicinskih aplikacijah [36-39], kjer so zahteve po majhnih dimenzijah bistvenega pomena, v elektroenergetiki, v proizvodni industriji ter v mnogih drugih panogah.

1.1 Pomen meritev kotov, zasukov in torzije

Skupina optičnih vlakenskih senzorjev za merjenje rotacij/zasukov predstavlja zanimivo področje v panogah, kjer je pomembno aktivno spremljanje rotacij/zasukov. Področja, kjer so že uveljavljeni optični vlakenski senzori rotacij/zasukov, so civilna uporaba (geofizika, navigacija, letalska industrija, ostale industrijske aplikacije, npr. inkrementalni optični dajalniki ipd.), vojaška industrija (vodenje, upravljanje in stabilizacija letal ter raket), avtomobilska industrija ter vesoljska tehnologija [40, 41]. Trend širjenja uporabe optičnih vlakenskih senzorjev rotacij/zasukov je opazen tudi na drugih področjih, kjer so do sedaj delovali le električni senzori. Kot primer lahko navedemo gradbeništvo in energetski sektor (petrokemijska industrija), ki sta panogi, v katerih pridobivajo optični vlakenski senzori rotacij/zasukov vedno večji pomen. Tehnološki napredki v gradbeništvo (naprednejši materiali, konstrukcije) omogočajo po eni strani izvedbe vedno bolj »drznih« projektov, po drugi pa s seboj prinašajo kopico novih težav. Kot primer navedimo torzijsko upogibanje, ki predstavlja perečo težavo pri visokih stavbah (nebotičnikih) in je posledica nepravilne strukturne razporeditve (ki je pri gradnji neizogibna) ter posledično vodi do ekscentričnosti pri porazdelitvi mase objekta [42]. Pogosto težavo pri visokih gradnjah predstavljajo tudi turbulentni vetrovi [43, 44]. Pojav torzijskega upogibanja je prisoten v konstrukcijah mostov [45] ter v kompozitnih materialih [46, 47]. Želja za doseganjem vedno večjih globin pri vrtanju, tj. pri globinskem vrtanju nafte ali plina, pa na dolгих predelih vrtin prinaša težave s torzijskimi vibracijami, ki v takšnem okolju predstavljajo resno varnostno težavo [48, 49].

Za nekatere izmed omenjenih težav so bile v preteklosti že izvedene raziskave in izdelane rešitve, ki so ponudile načine za spremljanje rotacij/zasukov, kot je na primer z uporabo koherentnega radarja [50, 51], pospeškometrov, globalnih sistemov pozicioniranja (GPS) [52-55], porazdeljenih laserskih senzorjev premika [56] ipd. Imajo pa naštetih principi pomanjkljivosti v smislu temperaturne nestabilnosti, visoke cene in odvisnosti od naravnih procesov (meteorološki pojavi).

1.2 Pričakovani izvirni znanstveni prispevki

V sklopu disertacije bomo poskušali potrditi naslednje hipoteze:

- Realizacija in ovrednotenje novih kompaktnih, cenovno učinkovitih, popolnoma optičnih vlakenskih polarizacijskih senzorjev za merjenje kotov rotacij/zasukov in torzijskih zasukov.
- Zasnova, realizacija in eksperimentalno ovrednotenje cenovno učinkovitih, kompaktnih, vlakenskih polarizacijskih senzorskih sistemov za večsegmentno merjenje kotov rotacij/zasuka.
- Zasnova, realizacija in eksperimentalno ovrednotenje novih kompaktnih, cenovno učinkovitih, popolnoma optičnih vlakenskih senzorjev za merjenje kotov rotacij/zasukov z nizko temperaturno občutljivostjo, primernih za vgradnjo v visokotemperaturna območja delovanja.
- Zasnova, realizacija in eksperimentalno ovrednotenje kompaktnih, popolnoma optičnih vlakenskih senzorjev za merjenje kotov rotacij/zasukov na osnovi Fabry-Perotovih vlakenskih interferometrov.
- Uporaba obstoječih optičnih (optoelektronskih) komponent, ki so že razvite za uporabo v telekomunikacijah in jih je mogoče izrabiti za razvoj in snovanje novih optičnih vlakenskih senzorjev, ki so primerni za merjenje rotacij/zasukov.

1.3 Teza disertacije

Z enostavno konfiguracijo in majhnim številom optičnih komponent je mogoče zasnovati cenovno učinkovite optične vlakenske senzore rotacij/zasukov, ki temeljijo na spremembi stanja polarizacije ali na vlakenskih Fabry-Perotovih interferometrih z enojnim dovodnim vlaknom, imajo možnost razširitve na večje število senzorskih segmentov, imajo nizko temperaturno občutljivost in omogočajo izdelavo enostavnih sistemov za razločanje merilnih vrednosti iz pridobljenih optičnih signalov.

1.4 Pregled obstoječih rešitev na področju optičnih vlakenskih senzorjev zasukov/rotacij/torzije

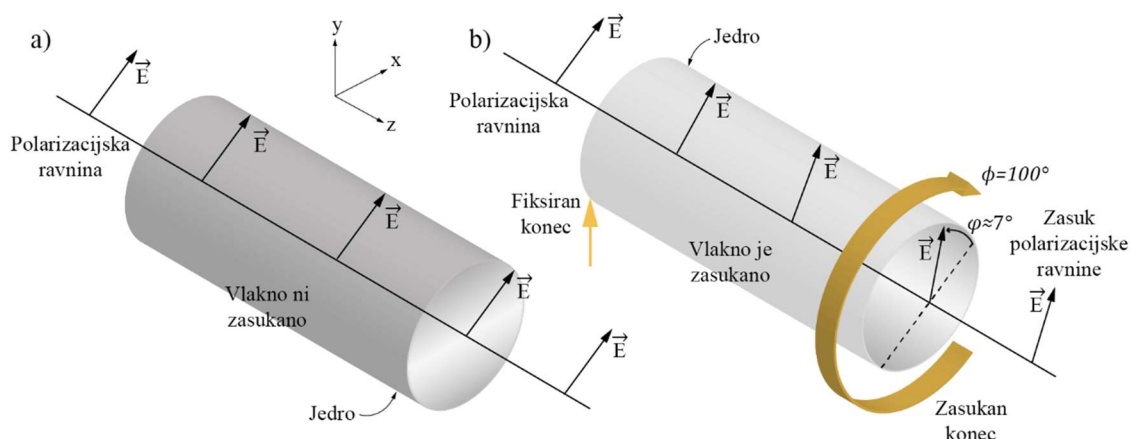
Po pregledu obstoječih optičnih vlakenskih senzorjev zasukov/rotacij/torzije jih lahko glede na princip delovanja razdelimo v naslednje skupine:

1. senzorji, ki temeljijo na spremembi dvolomnosti zaradi zasuka optičnega vlakna;
2. senzorji, ki temeljijo na spremembi lomnega količnika zaradi nastanka strižnih napetosti ob zasuku optičnega vlakna;
3. senzorji, ki temeljijo na zaznavanju položaja vektorja električne poljske jakosti;
4. ostali senzorji zasukov/rotacij/torzije.

V prvi skupini senzorjev povzroči zunanja perturbacija, tj. zasuk optičnega vlakna, spremembo krožne dvolomnosti ali linearne dvolomnosti.

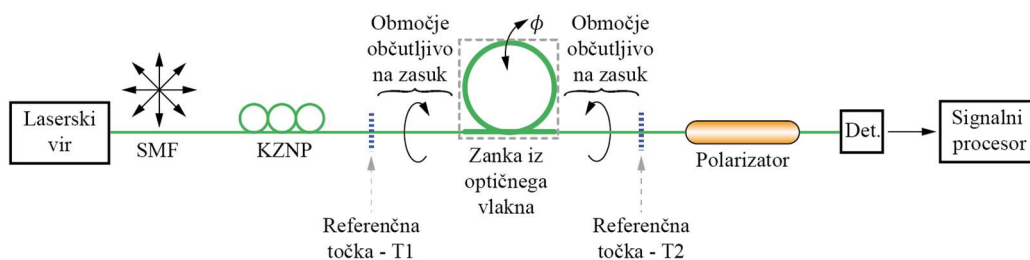
Krožna dvolomnost:

Krožna dvolomnost v optičnem vlaknu je povezana z elastooptičnim pojavom, ki se pojavi ob rotaciji (torziji) vlakna in je proporcionalna z elastooptičnim koeficientom g stekla in zasukom τ vlakna, zaradi česar popolnoma krožno simetrično vlakno ob rotaciji (torziji) postane krožno dvolomno [57-59]. V primeru, da skozi takšno optično vlakno vodimo linearno polarizirano svetlobo, se z zasukom vlakna stanje polarizacije ne spremeni, pride pa do rotacije polarizacijske ravnine (Slika 1-1).



Slika 1-1: Orientacija polarizacijske ravnine, ko optično vlakno ni zasukano in (b) ko je optično vlakno zasukano za kot 100° , pride do zasuca polarizacijske ravnine za kot približno 7° v nasprotni smeri.

Polarizacijska ravnina je majhna in znaša 0.069° na mehansko stopinjo zasuka optičnega vlakna [57]. Opisan pojav je sicer mogoče izrabljati za izdelavo senzorjev rotacij, je pa praktična izvedba kompleksna. Poleg nizke občutljivosti je ob zasuku potrebno zagotoviti sklapanje svetlobe med zasukanim vlaknom in odvodnim optičnim vlaknom, kar pa je v vlakenski izvedbi trenutno mogoče doseči z dragimi in kompleksnimi rotacijskimi sklopniki. Kljub temu pa lahko v literaturi zasledimo izvedbe senzorjev, ki temeljijo na pojavu krožne dvolomnosti. Tako obstajajo izvedbe senzorjev rotacije, kjer so nameščene Braggove rešetke, pri katerih se ob zasuku meri polarizacijsko odvisno slabljenje (ang.: »Polarization Dependent Loss« – PDL) pri centralni valovni dolžini rešetke [20]. Drugačna izvedba senzorja rotacije je prikazana na sliki 1-2, kjer je med vpeta konca napeljana enorodovno optično vlakno, ki je na sredini oblikovano v zanko.



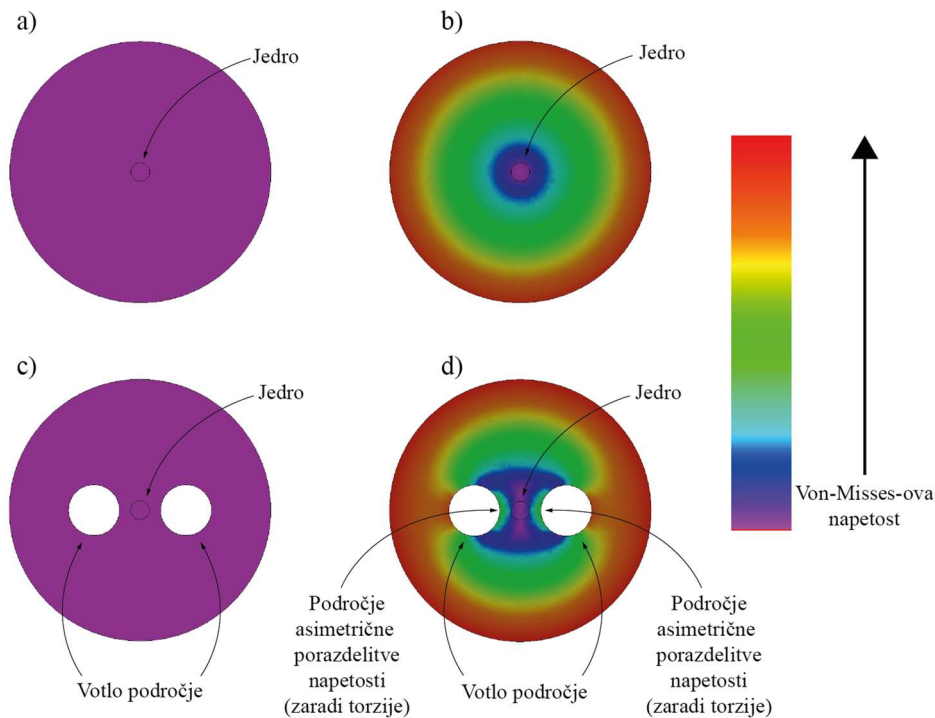
Slika 1-2: Senzor rotacije na osnovi zanke iz optičnega vlakna.

Območji zasuka, ki sta pred in za zanko, ter zanka povzročijo pojav krožne dvolomnosti, ki je sorazmeren s kotom zasuka ravnine zanke. Na odseku vlakna, ki je oblikovan v zanko, pa zaradi upogiba pride do pojava linearne dvolomnosti. Pri zasuku zanke tako oba pojava privedeta do spremembe stanja polarizacije, kar se odraža kot sprememba intenzitete svetlobe na izhodu senzorja [60].

Senzorji na osnovi modulacije linearne dvolomnosti

Pri vlaknu z začetno visoko linearno dvolomnostjo povzroči zasuk vlakna modulacijo linearne dvolomnosti. Modulacija dvolomnosti je posledica krožne nesimetrije, ki v različnem obsegu vpliva na elastooptični učinek vzdolž hitre in počasne osi linearne dvolomnega vlakna (Slika 1-3(c)). Sprememba linearne dvolomnosti je tako sorazmerna z velikostjo samega zasuka vlakna ter krožne nesimetrije vlakna, tj. začetne linearne dvolomnosti vlakna (Slika 1-3(d)). Zasuk krožno simetričnega vlakna, kot je na primer standardno enorodovno optično vlakno (SMF-28), ne povzroči linearne dvolomnosti

(Slika 1-3(b)). Takšna vlakna imajo zelo nizko začetno linearno dvolomnost. Zasuk/rotacija zato ne povzroča dovolj velike modulacije linearne dvolomnosti, da bi lahko opazno vplivala na spremembe polarizacije v vlaknu. V tem primeru prevladujejo v vlaknu učinki polarizacije zaradi krožne dvolomnosti.

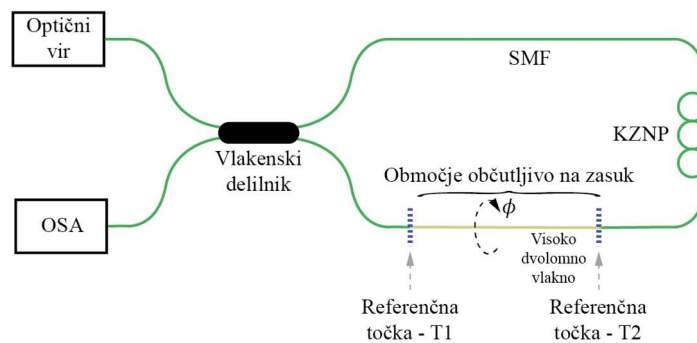


Slika 1-3: Simulacija z uporabo metode končnih elementov za prikaz porazdelitve napetosti vzdolž vlakna zaradi torzije. (a) Krožno simetrično vlakno, ko ni zasukano; (b) Porazdelitev napetosti pri zasuku krožno simetričnega vlakna; (c) Krožno nesimetrično vlakno, ko ni zasukano; (d) Porazdelitev napetosti pri krožno nesimetričnem vlaknu – opazna področja napetosti ob jedru vlakna.

Poleg vlaken, ki izkazujejo visoko in zelo nizko linearno dvolomnost, so znana vlakna s šibko, a ne zanemarljivo linearno dvolomnostjo. Primer šibko dvolomnih vlaken so nekatera močno dopirana optična vlakna, ki kljub načelni simetriji že izkazujejo začetno nizko linearno dvolomnost. Tako se ob zasuku poleg linearne dvolomnosti pojavi še krožna dvolomnost, ki povzroči pojav eliptične dvolomnosti, kar posledično prinese kompleksnejše spremembe polarizacije vzdolž optičnega vlakna [61, 62].

Pojav krožne dvolomnosti v linearno visoko dvolomnem vlaknu je v primerjavi z modulacijo linearne dvolomnosti, ki nastane zaradi torzije, neznaten. Visoka linearna dvolomnost prav tako preprečuje sukanje polarizacijske ravnine zaradi torzije vlakna, zaradi česar, ko je vzbujen en linearno polariziran rod, vektor električne poljske jakosti, neglede na zasuk vlakna, sledi hitri ali počasni osi vlakna [59]. To je razlog, da so senzorstvi

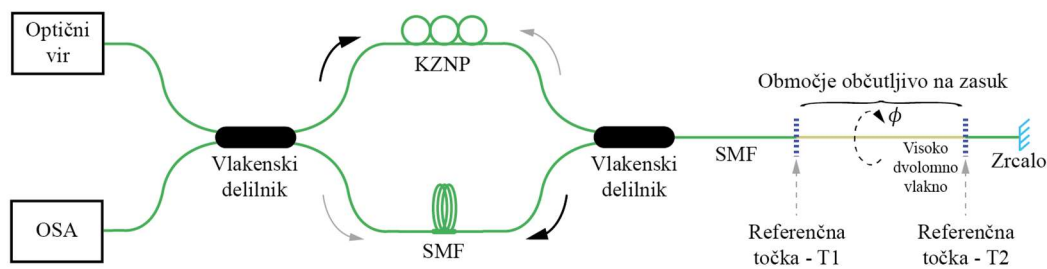
zasuka/rotacije, ki temeljijo na modulaciji dvolomnosti, v največjem številu zasnovani prav okoli visoko linearno dvolomnih vlaken. Meritve modulacije linearne dvolomnosti vključujejo uporabo interferometričnih metod, v največ primerih Sagnacov interferometer/zanko, s katerim je mogoče na preprost način izmeriti dvolomnost optičnega vlakna. Ko v zanko vstavimo visokodvolomno optično vlakno, le-to povzroči fazni zamik med valovoma, ki se širita v nasprotnih smereh po zanki [63, 64] (Slika1-4). Rezultat je interferenčni vzorec s specifično periodo in fazo, ki sta odvisni od dvolomnosti in dolžine visoko dvolomnega optičnega vlakna. Kontrast interferenčnega vzorca je najboljši, kadar sta oba polarizacijska roda, ki se širita vzdolž dvolomnega vlakna, enakomerno vzbujena.



Slika 1-4: Senzor rotacije na osnovi zanke Sagnacovega interferometra.

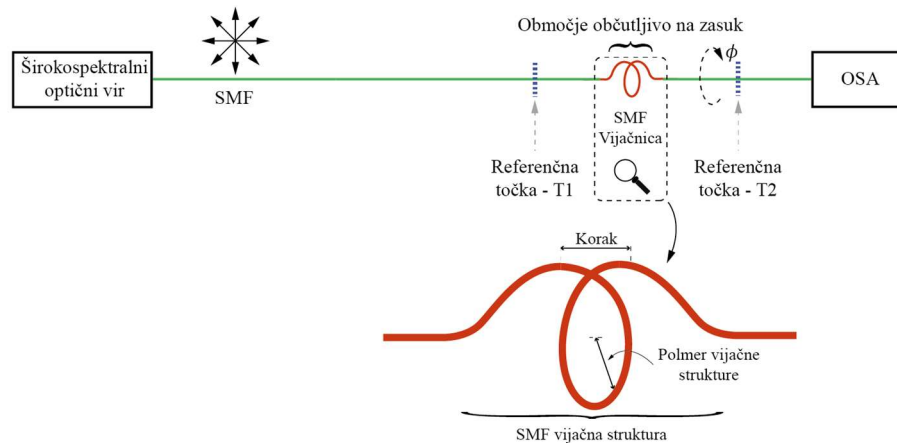
Izdelava senzorjev rotacij/zasukov z uporabo Sagnacovega interferometra omogoča uporabo standardnih in posebnih optičnih vlaken (na primer PCF – »Photonic Crystal Fiber«), ki izkazujejo visoko ali nizko začetno dvolomnost. Če želimo uporabiti nizko dvolomno vlakno za izdelavo senzorja rotacije/zasuka, mora le-to imeti dovolj visoko raven začetne dvolomnosti. Zato je pri uporabi standardnega enorodovnega optičnega vlakna potrebno sprožiti linearno dvolomnost, kar je mogoče izvesti z zunanjimi vplivi na optično vlakno, kot je na primer stiskanje vlakna [65]. Po drugi strani pa visoko dvolomna in posebna (PCF) vlakna izkazujejo dovolj visoko raven dvolomnosti [66], zato je njihova uporaba smotrnejša in omogoča izdelavo visoko občutljivih senzorjev rotacij/zasukov [21, 67-69]. Temperaturni vpliv, ki pesti navedene rešitve, je mogoče omiliti s pravilno zasnovo senzorskega sistema [70]. Uporaba Sagnacovih interferometrov (zank) za izdelavo senzorjev rotacij/zasukov prav tako omogoča implementacijo vlakenskih laserjev z uporabo aktivnih optičnih vlaken in optičnih črpalnih sistemov, kjer je izhodna

frekvenca laserja odvisna od zasuka/rotacije [71, 72]. Pomanjkljivost postavitve s Sagnacovim interferometrom je potreba po dostopu senzorskega vlakna z vhodne in izhodne strani, kar predstavlja dokajšno težavo v primerih, ko je potrebno senzor namestiti na težje dostopna mesta, saj smo omejeni z velikostjo in kompleksnostjo celotne postavitve. V konfiguraciji z dodatnim vlakenskim delilnikom v Sagnacovi zanki je mogoče doseči, da se senzorski del nahaja izven zanke (Slika 1-5) [73, 74].



Slika 1-5: Sensor rotacije na osnovi Sagnacovega interferometra z uporabo dveh vlakenskih delilnikov.

S tem ukrepom se ne poveča samo kompaktnost sensorja, ampak tudi kompleksnost celotnega sistema. Kompaktnost je prav tako mogoče doseči z implementacijo Sagnacove zanke, sestavljene z delilnikom, narejenim z zožitvijo vlaken v zanki [75]. Ob senzorjih zasukov/rotacije z uporabo Sagnacovih interferometrov je mogoče v literaturi zaslediti izvedbo drugih interferometričnih metod z uporabo visoko dvolomnih vlaken. Z zamikom vektorja električne poljske jakosti za 45° glede na optično os visoko dvolomnega vlakna je mogoče vzbuditi oba roda, kar vodi v medrodovno interferenco vzdolž optičnega vlakna. Interferenca je odvisna od dvolomnosti vlakna, informacijo o zasuku/rotaciji pa je mogoče zajeti s polarizacijskim analizatorjem. Na opisanem principu delujeta sensorja, kjer je uporabljeno PCF-senzorsko vlakno [76, 77]. Zaradi zasuka/torzije prihaja do modulacije dvolomnosti v PCF-vlaknu, ki se meri preko interference obeh polarizacijskih rodov. Implementacija Mach-Zehnderjevega interferometra predstavlja zanimiv primer sensorja rotacije/zasuka na osnovi modulacije dvolomnosti, kjer je začetno dvolomnost povzročilo oblikovanje standardnega enorodovnega vlakna v vijačnico [78] (Slika 1-6). Ko skozi takšno vijačnico potuje linearno polariziran val, povzroči dvolomnost vzbujanje dveh pravokotno polariziranih rodov, ki se po prehodu čez vijačno strukturo rekombinirata. Nastala razlika optične poti na koncu strukture povzroči interferenco med rodovoma.



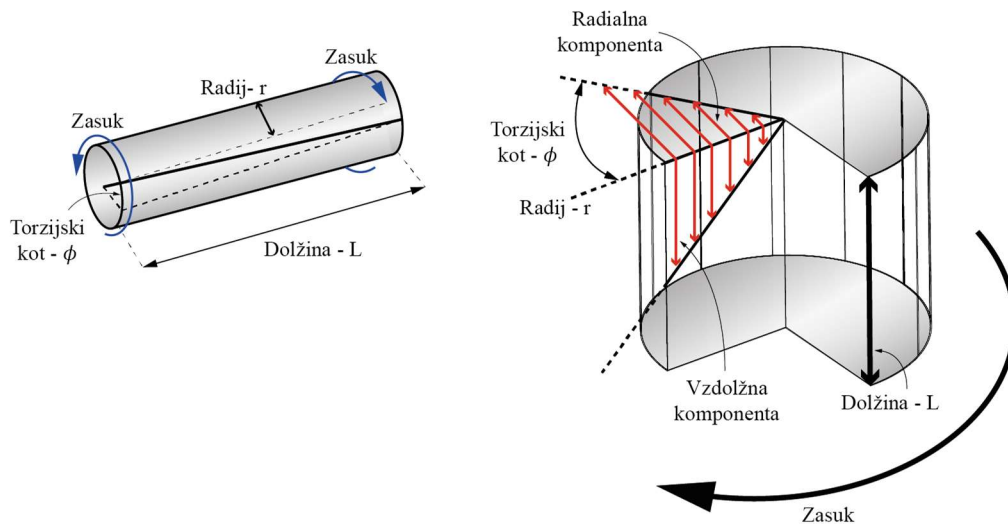
Slika 1-6: Senzor rotacije na osnovi Mach-Zehnderjevega interferometra z vijačno strukturo.

Slabost rešitev na osnovi linearno dvolomnih optičnih vlaken je njihova temperaturna občutljivost. Sprememba temperature povzroči spremembo linearne dvolomnosti, ki je posledica procesa izdelave visoko linearno dvolomnih optičnih vlaken (t. i. »Panda« ali »Bow-Tie«), pri katerih dvolomnost povzročajo mehanske napetosti vgrajenih elementov. Težave s temperaturno občutljivostjo se poskuša omiliti z uporabo posebnih optičnih vlaken – PCF-vlaknen, ki imajo namesto dodatkov v oblogi luknjičaste strukture za doseganje visoke dvolomnosti.

Poleg interferometričnih metod je v literaturi mogoče zaslediti tudi neinterferometrične metode za merjenje modulacije dvolomnosti zaradi zasuka, kot je uporaba DBR-vlakenskega laserja [79].

Druga večja skupina senzorjev rotacij/zasukov so senzori, ki temeljijo na spremembi lomnega količnika zaradi strižne napetosti ob zasuku optičnega vlakna.

Ko je optično vlakno izpostavljeno zasuku/torziji, nastanejo vzdolž osi vrtenja strižne napetosti [80]. Vektor strižne napetosti lahko razdelimo na dve komponenti, in sicer na vzdolžno in radialno komponento (Slika 1-7).



Slika 1-7: Porazdelitev strižnih napetosti vzdolž palice/vlakna.

Na območjih, kjer pride do strižnih napetosti, prihaja do sprememb lomnega količnika zaradi optoelastičnega pojava v steklu. V središču vrtenja (v osi vrtenja) je strižna napetost nič in raste sorazmerno s polmerom do roba vlakna, kar pomeni, da je sprememba lomnega količnika v središču optičnega vlakna majhna v primerjavi s spremembo lomnega količnika na robu optičnega vlakna, tj. rodovi, ki se širijo v centru vlakna, so v primerjavi z rodovi, ki se širijo v oblogi tik do roba optičnega vlakna, deležni mnogo manjše spremembe efektivnega lomnega količnika. Zasuk vlakna zato povzroči nastanek fazne razlike med centralnim rodom (rod najnižjega reda) in višjimi rodovi v oblogi, kar omogoča zaznavanje spremembe rotacije/torzije.

Senzorji na osnovi Braggovih rešetk z dolgo periodo

Opisan princip je implementiran v senzorjih rotacij/zasukov, ki so zgrajeni iz Braggovih rešetk z dolgo periodo (ang.: »Long Period Fiber Bragg Grating« – LPFBG), pri katerih prihaja do sklapljanja med osnovnim rodom in višjimi rodovi (ki se širijo po oblogi optičnega vlakna). Sklapljanje se zgodi pri resonančnih valovnih dolžinah in je podano z izrazom [81, 82]:

$$\lambda_{res} = (n_{ef_osn} - n_{ef_obl}) \Lambda \quad (1.1)$$

kjer so:

n_{ef_osn} – efektivni lomni količnik osnovnega rodu,

n_{ef_obl} – efektivni lomni količnik višjega reda (v oblogi optičnega vlakna),

Λ – perioda Braggove rešetke.

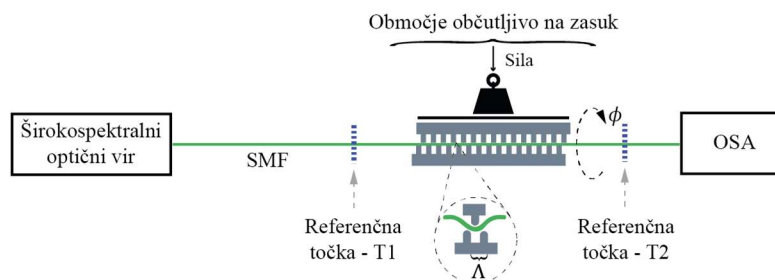
Strižne napetosti, ki nastanejo zaradi zasuka/torzije, povzročijo v optičnem vlaknu modulacijo lomnega količnika, ki pa ima večji učinek na rodove višjega reda. Glede na to, da je pri zasuku/torziji sprememba efektivnega lomnega količnika osnovnega rodu zanemarljiva, lahko izraz 1.1 zapišemo kot:

$$\Delta\lambda_{res} \approx -\Delta n_{ef_obl} \Lambda \quad (1.2)$$

Modulacija lomnega količnika vpliva na spremembo resonančne valovne dolžine, modulacija krožne dvolomnosti (podobno kot modulacija linearne dvolomnosti) pa na spremembo stanja polarizacije, ki povzroči razdelitev ali združitvev resonančnih vrhov in je sorazmerna z zasukom optičnega vlakna. Dejanski spektralni odziv vlakna na zasuk/torzijo pa je odvisen od načina izdelave Braggove rešetke z dolgo periodo.

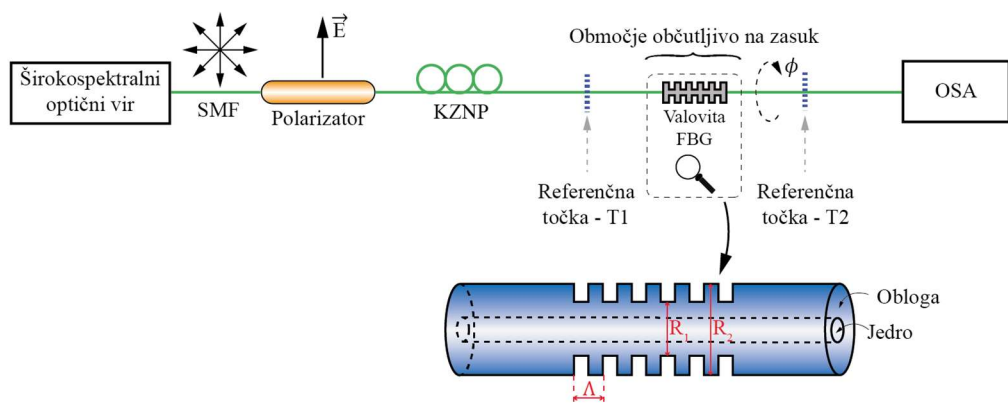
Tehnike vpisovanja Braggovih rešetak z dolgo periodo imajo velik vpliv na pojav linearne dvolomnosti. Spektralni odziv na zasuk/torzijo je tako močno odvisen od načina vpisovanja in postavitve rešetak. Za izdelavo senzorja na osnovi Braggovih rešetak z dolgo periodo lahko uporabimo katero koli znano metodo za vpisovanje, npr. vpisovanje z UV-svetlobo [83, 84], z uporabo električnega obloka [85], z jedkanjem v fluorovodikovi kislini (HF-kislini) [86], z mehanskimi perturbacijami [87-90] in s CO₂-laserjem [91-102].

Mehansko izdelane Braggove rešetke so v preteklosti zaradi preprostega načina izdelave in enostavnega principa delovanja vzbujale precejšen interes raziskovalcev. Pri senzorjih zasuka/rotacije, grajenih iz mehansko izdelanih Braggovih rešetak z dolgo periodo, je senzorski del vlakna vstavljen med valoviti plošči s periodo Λ [103, 104] (Slika 1-8).



Slika 1-8: Senzor zasuka/torzije na osnovi mehansko izdelanih Braggovih rešetak z dolgo periodo.

Takšne rešetke izkazujejo linearno dvolomnost, ki je posledica tlaka valovitih plošč [105]. Mehanske Braggove rešetke z dolgo periodo je mogoče izdelati iz enorodovnih optičnih vlaken s stopničnim lomnim likom [87], iz vlaken s premaknjeno disperzijo (ang.: »Dispersion-shifted Fibers« – DSF) [106], iz PCF-vlaknen [89, 107] in posebej dopiranih optičnih vlaken [90]. Senzorje rotacij/zasukov z mehansko Braggovo rešetko z dolgo periodo je prav tako mogoče izdelati s periodičnim jedkanjem obloge optičnega vlakna v fluorovodikovi kislini (HF-kislini) [106], s čimer dosežemo periodično spremembo (Δ) lomnega količnika (Slika 1-9) [86, 108].

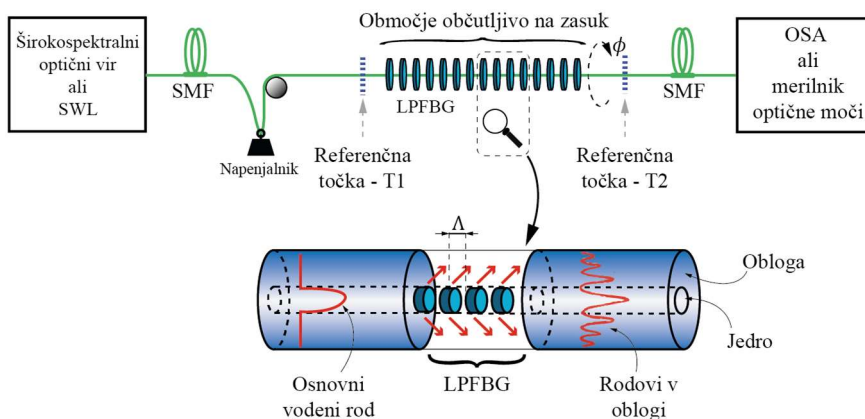


Slika 1-9: Senzor zasuka/torzije na osnovi jedkanih Braggovih rešetk z dolgo periodo.

Prednost mehanskih Braggovih rešetk z dolgo periodo je enostaven proces izdelave in relativno nizka temperaturna občutljivost.

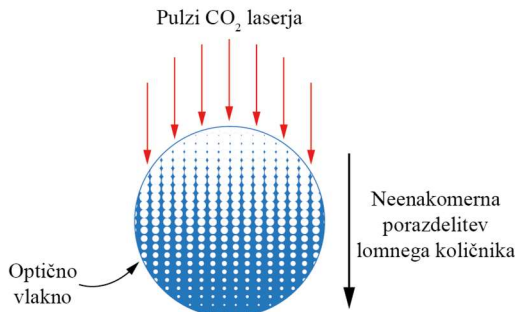
Ob senzorjih, grajenih iz mehanskih Braggovih rešetk z dolgo periodo, obstajajo senzorji rotacij/zasukov na osnovi Braggovih rešetk z dolgo periodo [83, 84], izdelanih s pomočjo UV-laserja. Pri le-teh se linearna dvolomnost ne pojavi ali pa je zaradi majhnega učinka na oblogo zelo šibka. V procesu izdelave rešetke povzroči ultravijolično (UV) sevanje le modulacijo lomnega količnika (dopiranega) jedra, meritve zasuka/torzije pa izhajajo iz modulacije učinkovitih lomnih količnikov rodov višjega reda, ki nastanejo zaradi strižnih napetosti in pojava krožne dvolomnosti, in so sorazmerni z zasukom/torzijo. V primerjavi z mehansko izdelanimi Braggovimi rešetkami imajo Braggove rešetke, izdelane s pomočjo UV-laserja, nižjo občutljivost, tj. manjše spremembe resonančnih valovnih dolžin. Prednost z UV-laserjem izdelanih Braggovih rešetk je njihova trdnost, saj zaradi brezkontaktnega posega ne pride do morebitnih mehanskih poškodb optičnega vlakna.

V najbolj zastopano skupino senzorjev zasuka/rotacije, grajenih iz Braggovih rešetk z dolgo periodo, spadajo rešetke, izdelane s pomočjo visokofrekvenčnih CO₂-laserjskih pulzov (Slika 1-10) [91-96, 98-102].



Slika 1-10: Standardna proga s senzorjem zasuka/torzije, zgrajenim iz Braggovih rešetk z dolgo periodo.

Izdelava Braggovih rešetk z dolgo periodo s CO₂-laserjem zaradi neenakomerne porazdelitve lomnega količnika po preseku optičnega vlakna povzroči pojav znatne linearne dvolomnosti (Slika 1-11).



Slika 1-11: Prikaz neenakomerne porazdelitve lomnega količnika vzdolž preseka optičnega vlakna z Braggovimi rešetkami z dolgo periodo, narejenimi z uporabo laserskih pulzov CO₂.

Neenakomerna porazdelitev lomnega količnika v kombinaciji s pojavom krožne dvolomnosti povzroči dodatno eliptično dvolomnost, ki je sorazmerna z zasukom/torzijo. Smer vektorja dvolomnosti je pogojena s smerjo zasuka/torzije. Zasuk senzorja v smeri urinega kazalca povzroči premik resonančnih valovnih dolžin proti nižjim valovnim dolžinam, zasuk senzorja v nasprotni smeri urinega kazalca pa povzroči premik resonančnih valovnih dolžin proti višjim valovnim dolžinam. Prednost senzorjev z Braggovimi rešetkami, izdelanimi s CO₂-laserjem, je visoka ponovljivost in nizka

občutljivost na temperaturo in raztezek [91-93, 95, 98, 102]. Poleg uporabe standardnega enorodovnega vlakna za vpisovanje Braggovih rešetk je s CO₂-laserjem mogoče vpisovati tudi v nekajrodovno optično vlakno (ang.: »Few Mode Fiber« – FMF) [97]. Zasuk/rotacija takšnega vlakna povzroči večjo nesimetrično modulacijo lomnega količnika dopiranega jedra z večjim premerom in s tem izrazitejše sklapanje linearno polariziranih rodov LP_{01} in LP_{11} . Posebna skupina Braggovih rešetk z dolgo periodo, vpisanih s CO₂-laserjem, so Braggove rešetke z ultradolgo periodo (ang.: »Ultra-Long-Period Fiber Bragg Grating« – ULPFBG), ki po poročanjih izkazujejo tudi do štirikrat večjo občutljivost na zasuk/torzijo [101]. V drugo skupino posebnih Braggovih rešetk z dolgo periodo spadajo izvedbe, ki na istem področju optičnega vlakna, na katerem se vpisujejo rešetke, z mehanskimi postopki (sukanje in navijanje) dodatno spreminjajo obliko vlakna. Sukanje ali navijanje vlakna privede do pojava krožne dvolomnosti, ki poveča občutljivost sensorja in zmanjša medsebojne vplive lomnega količnika, temperature ter raztezkov. Med procesom vpisovanja Braggovih rešetk se s sukanjem optičnega vlakna vzdolž osi vrtenja v območju rešetk ustvarijo torzijske napetosti, ki privedejo do krožne modulacije lomnega količnika [94, 109]. Navijanje vlakna v vijačnico povzroči periodično vijačno modulacijo lomnega količnika vzdolž osi vrtenja vlakna [110-113]. Vijačna struktura pa povzroči različno spremembo periode Braggove rešetke $\Delta\Lambda$ glede na smer mehanske rotacije/zasuka, zaradi česar ima sprememba periode $\Delta\Lambda$ glavni vpliv na resonančno valovno dolžino [96], ki jo lahko izrazimo kot:

$$\lambda_{res} = (n_{ef_osn} - n_{ef_obl})\Delta\Lambda - \Delta n_{ef_obl}\Lambda \quad (1.3)$$

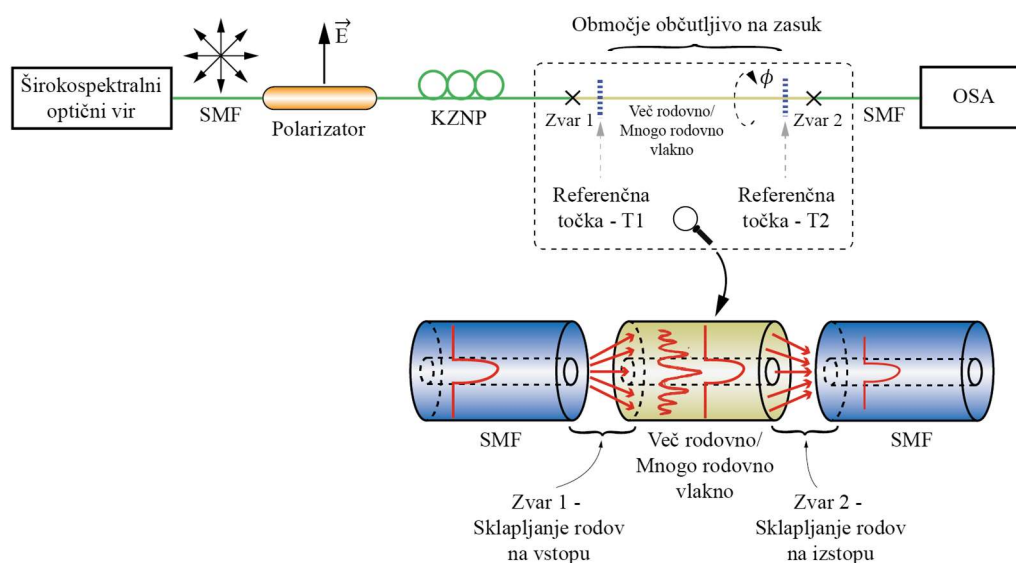
Pri zasuku/torziji se $\Delta\Lambda$ in Δn_{ef_obl} spreminjata obratnosorazmerno, kar poveča valvnodolžinski zamik. Vijačne strukture z različnimi periodami je mogoče medsebojno nizati in s tem dodatno pridobiti na občutljivosti na zasuk/torzijo [99] ter omogočiti meritve dodatnih parametrov (npr. temperatura) [112].

Naslednja metoda za izdelavo senzorjev rotacij/zasukov na osnovi Braggovih rešetk z dolgo periodo je uporaba električnega obloka, pri kateri je vpisovanje mogoče v standardna optična vlakna [114], v dopirana in luknjičasta vlakna [115, 116]. Poglavitna slabost te metode je nesimetrično delovanje električnega obloka, kar vodi do

neenakomerno inducirane dvolomnosti, ki povzročata polarizacijsko odvisno slabljenje [117]. Zanimiv senzor je predstavljen v [85], kjer je namesto spektralne metode razločanja postavitev z Mach-Zehnderjevim interferometrom, pri čemer je modulacija rotacije/zasuka opravljena v radiofrekvenčni domeni.

Senzorji na osnovi interference rodov

V skupino senzorjev rotacije/zasuka na osnovi spremembe krožne strižne napetosti zaradi zasuka optičnega vlakna sodijo tudi senzorji rotacij/zasukov, ki temeljijo na interferenci rodov in sestavljajo vlakenski Mach-Zehnderjev interferometer, pri katerem se sklapljajo rodovi v dveh ločenih točkah vzdolž vlakna. Do sklapljanja rodov lahko prihaja na zvarih (Slika 1-12) med različnima optičnima vlaknoma [118-124], z zamikom med jedri vlaken [123], z ostrimi zožitvami optičnih vlaken [125], ali z uporabo Braggovih rešetk z dolgo periodo.



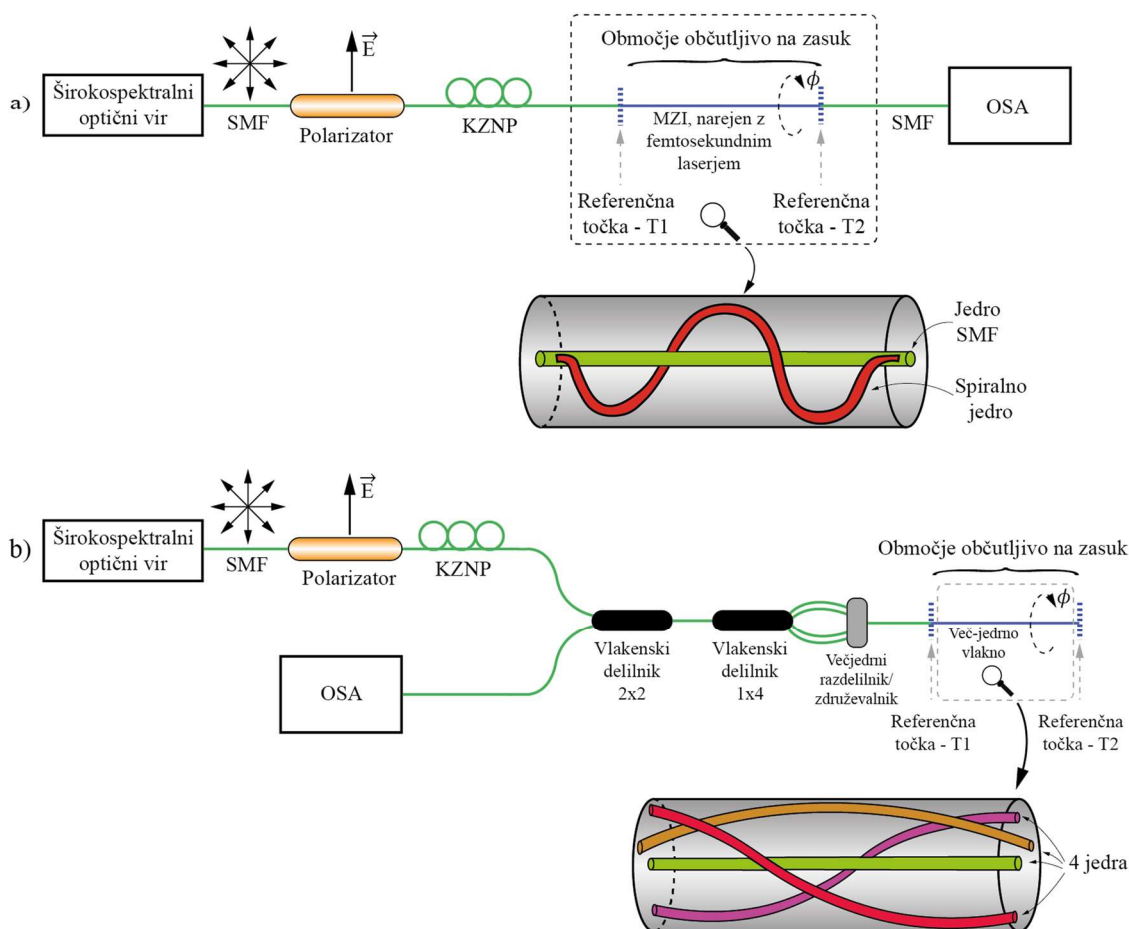
Slika 1-12: Senzor zasuka/torzije na osnovi Mach-Zehnderjevega interferometra.

Namesto Mach-Zehnderjeve postavitve je za gradnjo senzorskega dela na enojnem dovodnem vlaknu mogoče uporabiti Michelsonov interferometer, kjer je eno točko sklapljanja mogoče nadomestiti z zrcalom [119]. Senzorji rotacij/zasukov na osnovi interference rodov lahko sklapljajo svetlobo med vodenimi rodovi [118], med vodenimi rodovi in rodovi v oblogi optičnega vlakna [119, 121-123], ali pa v kombinaciji obeh pristopov [120]. Za izdelavo na rotacijo/zasuk občutljivih rodovnih interferometrov je

mogoče uporabiti standardna optična vlakna [123], posebna mnogorodovna optična vlakna [124], ali vlakna, ki ohranjajo polarizacijo [126] ali konfiguracijo z uporabo Braggovih rešetk z dolgo periodo [100, 127, 128]. Večinoma pa se za gradnjo rodovnih interferometrov uporablja PCF-vlakno [118-122, 129], s katerim je mogoče doseči nizko temperaturno občutljivost.

Senzorji na osnovi večjedrnih vlaken

Implementacija večjedrnih optičnih vlaken predstavlja preprosto osnovo za senzorje rotacij/zasukov. Jedri, ki sta postavljeni na različnih lokacijah v preseku optičnega vlakna, bosta zaradi strižnih napetosti ob zasuku/rotaciji deležni različnih sprememb lomnega količnika. Najbolj optimalna postavitev jeder je, ko se eno jedro nahaja v središču vlakna, drugo pa ob njegovem robu. Občutljivost na rotacijo/zasuk je mogoče povečati s sukanjem večjedrnega vlakna v spiralno strukturo (Slika 1-13(b)), pri čemer je z vpisovanjem več Braggovih rešetk mogoče izločiti temperaturni vpliv in vpliv raztezka [130, 131].

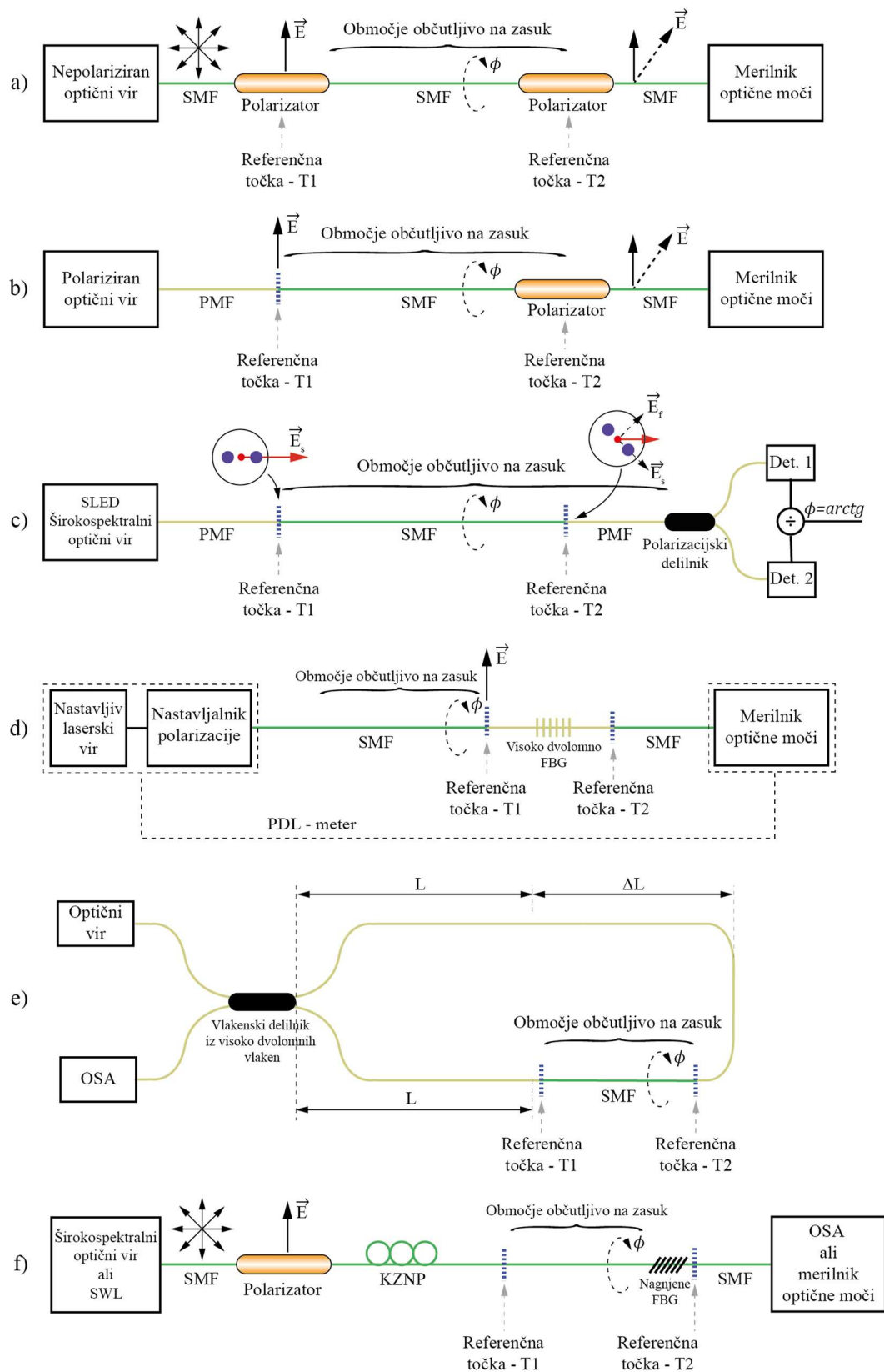


Slika 1-13: (a) Senzor zasuka/torzije na osnovi Mach-Zehnderjevega interferometra, izvedenega s spiralnim jedrom; (b) Senzor zasuka/torzije na osnovi večjedrnega spiralnega vlakna.

Spiralno jedro je v standardno enorodovno optično vlakno mogoče »vpisati« tudi s femtosekundnim laserjem (Slika 1-13(a)), kot je to opisano v [132], kjer je senzor rotacije/zasuka na osnovi Mach-Zehnderjevega interferometra realiziran tako, da je jedro standardnega enorodovnega optičnega vlakna sklopljeno s spiralnim jedrom, ustvarjenim s femtosekundnim laserjem. Izdelava vlakenskega Mach-Zehnderjevega interferometra je prav tako mogoča s kombinacijo PFC-vlaken in standardnih enorodovnih optičnih vlaken. Jedra v PCF-optičnem vlaknu imajo majhne premere ter kratko medsebojno razdaljo. Zvar tako majhnih in blizu postavljenih jedr PCF-vlakna ter »velikega« jedra enorodovnega vlakna tvorijo Mach-Zehnderjev interferometer. Zasuk/rotacija povzroči v PCF-vlaknu razliko optičnih poti med centralnim jedrom in bližnjimi stranskimi jedri [133, 134].

V tretjo skupino sodijo senzorji, ki temeljijo na zaznavanju položaja vektorja električne poljske jakosti.

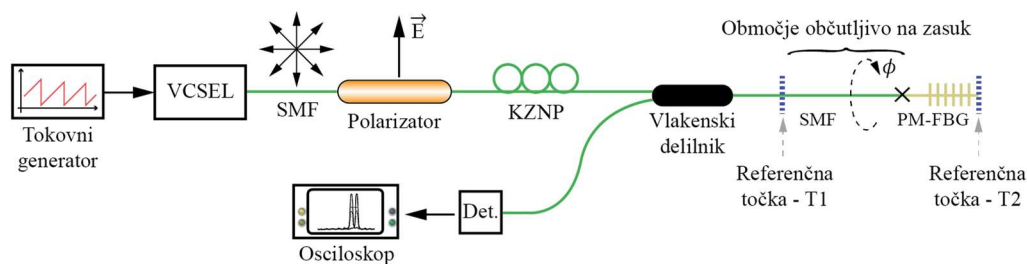
Senzorji zasukov/torzije v tej skupini »izkoriščajo« nezmožnost ravnega krožno simetričnega optičnega vlakna (npr. standardno telekomunikacijsko enorodovno vlakno (SMF-28)), da bi sukalo ali na kakšen drug način vplivalo na stanje polarizacije. Zasuk ravnega kosa standardnega enorodovnega vlakna ne poruši krožne simetrije, zato ne povzroči spremembe stanja polarizacije, pojavi pa se šibka krožna dvolomnost, ki vpliva na zasuk polarizacijske ravnine vzdolž optičnega vlakna [22]. Ta zasuk je v primerjavi z mehanskim zasukom majhen (mehanski zasuk za 1° povzroči zasuk polarizacijske ravnine za 0.069° v nasprotni smeri mehanskega zasuka) in ga je potrebno upoštevati pri izračunu dejanskega kota. Pojav šibke dvolomnosti prav tako vpliva na temperaturno občutljivost, ki pa je majhna, (mehanski zasuk vlakna za kot 90° pri spremembi temperature 50°C pridelala pogrešek mehanskega kota zasuka $0,4^\circ$ [22]). Opisan princip je implementiran v različne senzorske postavitve za meritve zasukov/rotacije (Slika 1-14).



Slika 1-14: Postavitve senzorjev zasuka/torzije, ki temeljijo na spremembi položaja vektorja električne poljske jakosti.

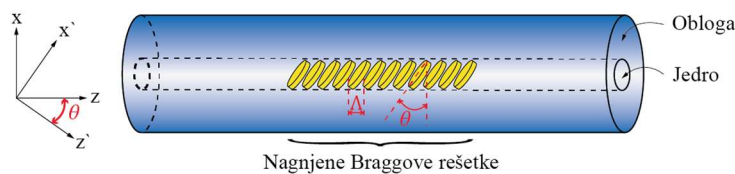
Preprosta implementacija senzorja je prikazana na sliki 1-14(a) in (b), kjer se zasuk/rotacija meri med referenčnima točkama (T_1) in (T_2). Ko ni zasuka/rotacije, je prenesena moč maksimalna, v primeru kota zasuka/rotacije 90° pa je prenesena moč enaka nič. Predstavljena postavitve je enaka Malusovi postavitvi. Kot zasuka/rotacije je določen kot \cos^2 razmerja vhodne in izhodne moči na polarizatorjih [135]. Izboljšana različica opisane rešitve je predstavljena na sliki 1-14(c), kjer je svetloba iz širokospektralnega optičnega vira (SLED) vodena po dovodnem vlaknu, ki ohranja polarizacijo do točke (T_1). Na dovodno vlakno je v dolžini do točke (T_2) privarjeno standardno enorodovno vlaknoje ki predstavlja na zasuk občutljiv segment. V točki (T_2) je na standardno enorodovno vlakno privarjen kos vlakna, ki ohranja polarizacijo, na katerega je privarjen polarizacijski delilnik. V primeru zasuka v točki (T_2) (na zvaru med standardnim enorodovnim vlaknom in vlaknom, ki ohranja polarizacijo) se zasučje polarizacijska ravnina glede na dovodno vlakno iz točke (T_1) in vzbudi oba polarizacijska roda na izhodnem vlaknu (T_2). Svetloba potuje preko polarizacijskega delilnika, ki usmeri svetlobo hitre in počasne osi na posamezna detektorja. Kot zasuka, tj. odklik osi vrtenja med (T_1) in (T_2), je določen kot $v^2(ArcTan)$ razmerja moči hitre in počasne osi [22]. Slika 1-14(d) predstavlja konfiguracijo, kjer senzor rotacije/zasuka za zaznavanje spremembe stanja polarizacije izrablja spektralno razločanje [19]. Senzor za demoduliranje kota rotacije/zasuka uporablja visokodvolomno optično vlakno, v katero je zapisana Braggova rešetka, ki povzroči v spektru dva vrha, od katerih vsak pripada določenemu (polarizacijskemu) rodu visoko dvolomnega optičnega vlakna. Tako se pri zasuku/rotaciji zaradi vrtenja vektorja električne poljske jakosti spreminja odbit spekter in s tem s spreminjanjem razmerja vrhov polarizacijsko odvisnih izgub določa kot zasuka/rotacije. Naslednja rešitev za merjenje rotacije/zasuka prav tako temelji na spektralnem razločanju in izrablja Sagnacov neuravnovešen interferometer/zanko [136] (Slika 1-14(e)). Različni dolžini rok v zanki interferometra povzročita fazno razliko. Zaradi lastnosti visoko dvolomnega vlakna pride do interference štirih valov, pri katerih vsak val ustreza optičnima osema v obeh rokah zanke. Enorodovno vlakno ob zasuku/rotaciji povzroči medsebojno izmenjavo polarizacijsko odvisnih rodov in s tem interferenco štirih optičnih valov, kar formira dvojni interferometer, pri katerem nastanejo

interferenčni vzorci, ki tvorijo spektralni vzorec, iz katerega je mogoče demodulirati zasuk. Poleg opisanih so znane še druge spektralne metode za določanje smeri vektorja električne poljske jakosti, in sicer bodisi z uporabo polarizacijsko občutljivega Mach-Zehnderjevega interferometra [137] bodisi z Malusovo postavitvijo (podobni kot na sliki 1-14(a)) in Fabry-Perotovimi zrcali [138]. Vse do sedaj opisane rešitve zahtevajo dostop do senzorskega segmenta iz vhodne in iz izhodne strani optičnega vlakna. Izjema je senzor, opisan v [139], ki omogoča dostop to senzorskega vlakna samo iz vhodne strani (Slika 1-15). Zasnova je podobna rešitvi, opisani v [19], kjer zasuk vektorja električne poljske jakosti v visoko dvolomnem vlaknu z vpisano Braggovo rešetko zaradi zasuka povzroči spremembo amplitud karakterističnih valovnih dolžin rešetke, pri čemer se iz njihovega razmerja določa kot rotacije/zasuka.



Slika 1-15: Senzor zasuka/torzije na osnovi spremembe položaja vektorja električne poljske jakosti z uporabo Braggove rešetke, vpisane v vlakno, ki ohranja polarizacijo.

Druga večja skupina senzorjev rotacij/zasuka, ki izkoriščajo nezmožnost sukanja polarizacijske ravnine, so senzori na osnovi nagnjenih Braggovih rešetk (ang.: »Tilted Fiber Bragg Gratings« – TFBG). Nagnjene Braggove rešetke so vlakenska struktura, pri kateri so rešetke vpisane pod kotom glede na os optičnega vlakna (Slika 1-16).



Slika 1-16: Vlakno z vpisano nagnjeno Braggovo rešetko.

Struktura nagnjenih rešetk omogoča sklapljanje osnovnega roda z rodovi, ki se širijo po oblogi vlakna [140]. Do sklapljanja pride, ko so faze osnovnega roda in višjih rodov v oblogi usklajene. Tedaj velja [141, 142]:

$$\lambda_{FM-CLM} = \frac{\Lambda}{\cos \theta} (n_{eff_FM} \pm n_{eff_CLM}) \quad (1.4)$$

kjer so:

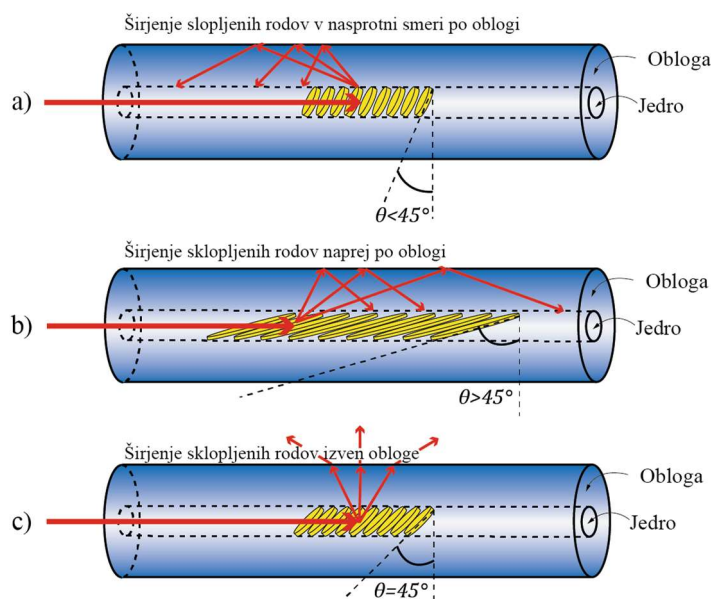
n_{eff_FM} – efektivni lomni količnik osnovnega rodu,

n_{eff_CLM} – efektivni lomni količnik roda v oblogi,

θ – kot nagiba Braggove rešetke in normale osi optičnega vlakna in

λ_{FM-CLM} – resonančna valovna dolžina, pri kateri pride do sklapljanja rodov.

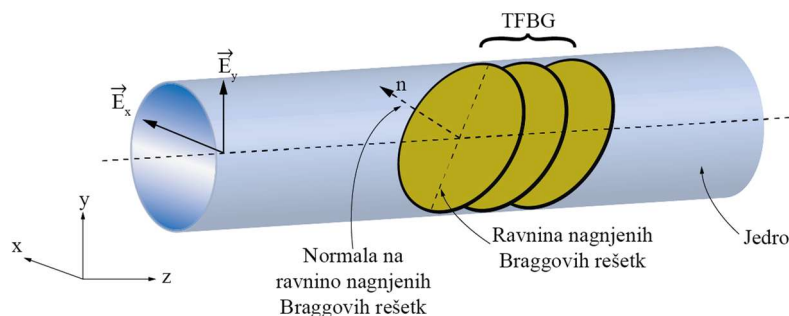
Glede na kot nagiba Braggovih rešetk je mogoče smer sklapljanja rodov razdeliti v tri skupine [140]. Ko je nagib manjši od 45° , se rodovi sklapljajo z rodovi, ki se širijo v nasprotni smeri po oblogi (Slika1-17(a)). Ko je nagib večji od 45° , se rodovi sklapljajo z rodovi, ki se širijo naprej po oblogi (Slika1-17(b)). Ko pa je kot nagiba enak 45° , se svetloba sklaplja izven optičnega vlakna (Slika1-17(c)) [143].



Slika 1-17: Smer sklapljanja rodov v odvisnosti od kota nagiba nagnjene Braggove rešetke. (a) Širjenje sklopljenih rodov v nasprotni smeri po oblogi; (b) Širjenje sklopljenih rodov naprej po oblogi; (c) Širjenje sklopljenih rodov izven obloge.

Nagnjena Braggova rešetka poruši krožno simetrijo optičnega vlakna, zaradi česar je resonančno sklapljanje osnovnega roda z višjimi rodovi, ki se širijo po oblogi, odvisno od orientacije vektorja električne poljske jakosti. To definira dve sklopni resonančni valovni dolžini, in sicer prvo, ko je vektor električne poljske jakosti vzporeden z ravnino Braggove

rešetke, in drugo, ko je vektor električne poljske jakosti pravokoten z ravnino Braggove rešetke, tj. vzporeden z normalo n ravnine Braggove rešetke (Slika 1-18).



Slika 1-18: Sklopni resonančni valovni dolžini, ki jima pripadata stanji polarizacije E_x in E_y .

Sklopna resonančna valovna dolžina se zato razcepi na dve bližnji resonančni valovni dolžini, kjer vsaka pripada določenemu stanju polarizacije. Ob pojavu rotacije/zasuka, tj. rotacije vektorja električne poljske jakosti, pride do periodičnega sklapljanja pri resonančnih valovnih dolžinah. Paru bližnjih resonančnih valovnih dolžin se tako z rotacijo/zasukom spreminja razmerje resonančnih vrhov, kar omogoča snovanje dokaj preprostih senzorjev rotacij/zasuka [142-144] (Slika 1-19).



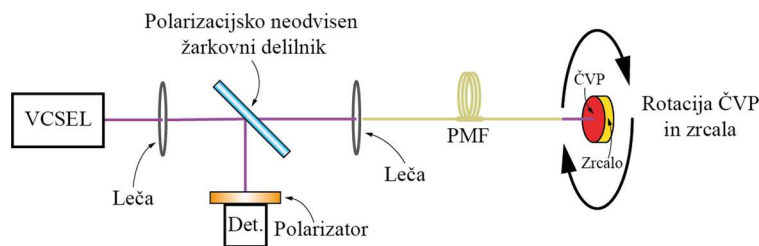
Slika 1-19: Senzor rotacije/zasuka, zgrajen z nagnjeno Braggovo rešetko.

Ob že opisanih konfiguracijah je senzor mogoče zgraditi v obliki vlakenskega laserja, ki mu je vpisana nagnjena Braggova rešetka. Zasuk povzroči modulacijo izgub resonatorja, kar spreminja časovno konstanto laserskega oscilatorja, iz katere se določi kot rotacije/zasuka [145]. Senzor, opisan v [146], ima nagnjeno Braggovo strukturo vpisano v mnogorodovno optično vlakno, kar povzroči vzbujanje rodov višjega reda, zaradi česar nastajajo v spektru medsebojno dobro definirani pari resonančnih vrhov, od katerih vsak pripada svoji sklopni resonančni valovni dolžini. Pri tem en vrh v paru pripada sklapljanju polarizacijsko neobčutljivih rodov, drugi pa polarizacijsko občutljivim rodovom. Pri zasuku/rotaciji tako prihaja le do modulacije določenih vrhov. Vrhovi, ki niso modulirani zaradi rotacije/zasuka, služijo za temperaturno kompenzacijo. Posebna

izvedenka sensorja z uporabo nagnjenih Braggovih rešetk je opisana v [147], kjer je področje rešetke prevlečeno s tanko plastjo zlata in potopljeno v vodo. Postavitev omogoča zbujanje površinskih plazmonov, kjer ob rotaciji/zasuku pri določeni orientaciji vektorja električne poljske jakosti prihaja do sklapljanja osnovnega roda z rodovi višjega reda (v oblogi).

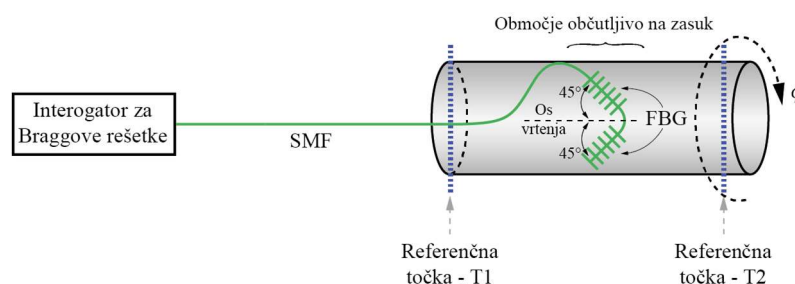
Ostali senzorji rotacij/zasukov

V skupino ostalih senzorjev rotacij/zasukov lahko združimo senzorje, kjer je razmerje med zasukom in povzročeno linearno dvolomnostjo dovolj visoko, da lahko prav zasuk povzroči sklapljanje med polarizacijskimi rodovi v vlaknu z ohranjanjem polarizacije, kar je možno zaznati preko spektralnega odziva vpisane Braggove rešetke [148]. Na podobnem principu deluje senzor rotacije/zasuka, opisan v [149], kjer je v vlakno z ohranjanjem polarizacije najprej vpisana Braggova rešetka, zatem je vlakno zožano z namenom kreiranja linearne spremembe periode vpisane rešetke. Zasuk na zožanem odseku povzroči dodatne napetosti, zaradi česar je takšna struktura dovzetnejša za sklapljanje polarizacijskih rodov, saj zožitev zmanjša fazno razliko med obema polarizacijskima rodovoma. V [150] je opisan senzor rotacije/zasukov, pri katerem je vpisana Braggova rešetka v vlakno z ohranjanjem polarizacije, po kateri se iz širokospektralnega vira po odboju svetloba odbije pri dveh določenih valovnih dolžinah, ki jima pripadata pravokotni stanji polarizacije. Svetloba nato potuje do senzorskega dela, kjer je v drugo visoko dvolomno optično vlakno vpisana druga Braggova rešetka, ki na izhodu preko polarizatorja na spektralni analizator prikazuje odziv sensorja. Odziv na spektralnem analizatorju prikazuje razmerje moči med obema Braggovima rešetkama ob zasuku/torziji. Vlakna, zasukana v vijačnico, ki delujejo na podobnem principu, kot že opisane zasukane Braggove rešetke, je prav tako mogoče uporabiti za detekcijo rotacije/zasukov [151]. Zasuk/rotacijo je mogoče izmeriti z izvedbo sensorja z zunanjim delovanjem, pri katerem je pred vlakno, ki ohranja polarizacijo, postavljena četrtvalovna plošča (ČVP) v kombinaciji z zrcalom (Slika 1-20). Zasuk/rotacija ČVP in zrcala povzroči zasuk optične osi ČVP glede na optično os vlakna ter s tem vpliva na modulacijo optičnih moči obeh polariziranih rodov [152].



Slika 1-20: Postavitev za zaznavanje rotacije/zasuka z zunanjim delovanjem.

Uporaba že uveljavljenih vlakenskih senzorjev za meritve raztezkov (Braggovih rešetk) prav tako omogoča posredne meritve rotacije/zasuka/torzije (meritve strižnih napetosti na površini teles različnih oblik – cilindri, kvadri, palice ipd.). V tem primeru se na površino merjenca v diferencialni konfiguraciji pod kotom 45° glede na rotacijsko os telesa merjenca namestijo pari Braggovih rešetk (Slika 1-21) [153-158]. Lahko pa se tudi zgradijo namenski sistemi za posredno merjenje rotacij/zasuka/torzije [159].



Slika 1-21: Senzor rotacije/torzije na osnovi diferencialnega para Braggovih rešetk, postavljenih na površino merjenca (posredna meritev).

Zanimiv način posredne meritve zasuka/torzije preko raztezka je opisan v [160], kjer je vzdolž optičnega vlakna okoli merjenca navita veriga nanizanih Fabry-Perotovih votlin (zrcal). Meritve zasuka/torzije je mogoče posredno izmeriti iz linearnega pomika [161], ki se prenese na površino Braggove rešetke z linearno spremembo vpisane periode (ang. »Chirped Fiber Bragg Grating«) in s spektralnim razločanjem določi kot zasuka/rotacije. Omeniti je še treba komercialno dostopne rešitve na osnovi mnogorodovnih ali plastičnih optičnih vlaken, ki na osnovi Moirejevega efekta dekodirajo zasuk/torzijo [162, 163].

1.5 Kratak opis nerešenih problemov in motivacija za delo

Po opravljeni analizi trenutnega stanja na področju optičnih vlakenskih senzorjev zasukov/rotacij/torzije bomo v tem poglavju na kratko opisali težave, ki po našem mnenju onemogočajo trenutnim rešitvam intenzivnejši prodor v praktično uporabo.

Senzorji, ki temeljijo na krožni dvolomnosti, zaradi nizke občutljivosti zahtevajo kompleksne mehanske sestave, ki lahko naredijo senzor dimenzijsko velik ter posledično nepraktičen za uporabo in drag.

Pri senzorjih, ki izrabljajo linearno dvolomnost optičnih vlaken, implementacija visoko dvolomnih optičnih vlaken vnaša v sistem dodatne temperaturne občutljivosti, ki so posledica postopka izdelave samega vlakna (mehansko doseganje visoke dvolomnosti pri »Panda« ali »Bow-Tie« visokodvolomnih vlaknih). Težave s povečano temperaturno občutljivostjo je sicer mogoče nekoliko omiliti z uporabo posebnih visoko dvolomnih optičnih vlaken, kjer se za doseganje visoke dvolomnosti uporablja nesimetrična struktura zračnih lukenj, kot je na primer PCF-vlakno. A takšna vlakna so nepraktična za rokovanje, poleg tega pa je potrebno izpostaviti še težave z doseganjem kvalitetnega reza in kompleksnejši postopek varjenja, ki privede do visokih optičnih izgub.

Večina opisanih senzorjev temelji na spektralnem razločanju, ki je uveljavljena, a draga metoda v industrijskih senzorskih aplikacijah. Omejitev za večino senzorjev predstavlja njihova konfiguracija, saj je dostop do senzorskega optičnega vlakna potreben tako z vhodne kakor tudi z izhodne strani. Takšen pristop predstavlja omejitve za praktično uporabo predvsem v industrijskih, gradbenih, strojnih in drugih panogah, kjer so potrebe po spremljanju rotacij/zasukov/torzije na lokacijah, ki največkrat onemogočajo dostop do sensorja z vhodne in izhodne strani (vrtine, rotacijske osi ipd.) Rešitve, zgrajene na enojnem dovodnem vlaknu, pa uporabljajo drago spektralno razločanje. Težava senzorjev, ki do senzorskega vlakna potrebujejo dostop z obeh strani, je prav tako nezmožnost veriženja, tj. nezmožnost gradnje porazdeljenega ali kvaziporazdeljenega senzorskega sistema.

1.6 Cilji doktorske disertacije

Cilji doktorske disertacije so zasnovati sisteme, ki so primerni za merjenje rotacij/zasukov, so grajeni iz majhnega števila optičnih vlakenskih komponent, so cenovno ugodni, imajo enostavno konfiguracijo ter možnost razširitve sensorja za kvaziporazdeljene meritve. Ugotovili smo, da senzori rotacij/zasukov, ki temeljijo na principu spremembe stanja polarizacije, ponujajo možnosti za zasnovo kompaktnih nizkotemperaturno občutljivih, popolnoma optičnih sistemov, ki jih je mogoče razširiti na večje število senzorskih segmentov ter jih naslavljeni z metodo OTDR. Fabry-Perotova (FP) metoda interferometrije je ponudila nove možnosti za izdelavo sensorjev rotacij/zasukov, kjer smo z ustrežno geometrijo vlakenskega interferometra in uporabo vlakna z več jedri zasnovali občutljiv sistem za merjenje rotacij/zasukov.

Za vse opisane senzore smo izdelali ustrezne enote za razločanje merilne vrednosti.

1.7 Struktura disertacije

Disertacija je razdeljena na pet poglavij in eno prilogo

V uvodnem poglavju smo poudarili pomen meritev kotov zasukov/rotacij in podali tezo disertacije. Opravili smo pregled obstoječih rešitev na področju vlakenskih sensorjev zasukov/rotacij. Iz pregleda smo izpostavili težave obstoječih vlakenskih sensorjev rotacij/zasukov, za katere smo v ciljih doktorske disertacije predlagali rešitve.

V drugem poglavju smo predstavili miniaturni optični polarimetrični senzor za meritev rotacije/zasukov na enojnem dovodnem vlaknu.

V tretjem poglavju smo predstavili optični vlakenski senzor, ki predstavlja rešitev za kvaziporazdeljene meritve rotacij/zasukov.

Četrto poglavje predstavlja FP-optični vlakenski senzor za meritev rotacije/zasuka na osnovi štirijedrnega optičnega vlakna, s katerim je mogoče meriti tudi temperaturo in raztezke.

V zaključnem, petem poglavju, smo naredili povzetek celotnega dela, predlagali dodatne izboljšave za predstavljene senzore rotacij/zasukov in potrdili tezo disertacije.

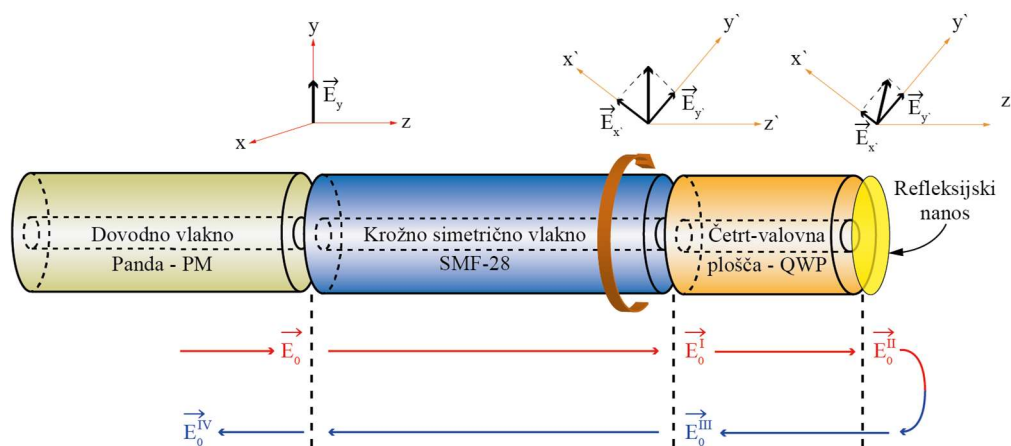
2 ZASNOVA, NAČRTOVANJE IN ANALIZA REZULTATOV OPTIČNEGA POLARIMETRIČNEGA VLAKENSKEGA SENZORJA ZA MERITEV ROTACIJE/ZASUKOV NA ENOJNEM DOVODNEM VLAKNU

2.1 Uvod

V tem poglavju bomo predstavili kompakten polarimetrični optični vlakenski senzor za merjenje rotacij/zasukov na enojnem dovodnem optičnem vlaknu. Na zasuk/rotacijo občutljiv del predstavlja standardno enorodovno (krožno simetrično) optično vlakno. Delovanje sensorja omogoča njegova lastnost, da ob zasuku/rotaciji vektor električne poljske jakosti, ki potuje vzdolž vlakna, ne spremeni svojega položaja. Za zaznavanje orientacije vektorja električne poljske jakosti ob rotaciji/zasuku in s tem razločanje kota zasuka skrbi kot analizator ČVP, zgrajena iz optičnih vlaken.

2.2 Predstavitev sensorja

Senzor je zgrajen iz dovodnega vlakna, ki ohranja polarizacijo (visoko dvolomno optično vlakno vrste »Panda«), kosa standardnega enorodovnega optičnega vlakna (SMF-28), ki tvori na zasuk občutljiv del, ČVP, zgrajene iz optičnih vlaken, ter zrcala (Slika 2-1).



Slika 2-1: Osnovna zgradba polarimetričnega sensorja rotacije/zasuka.

Delovanje sensorja lahko razložimo s primerom, kjer se v homogenem in izotropnem mediju širi linearno polariziran elektromagnetni val med kolinearно postavljenim virom ter detektorjem. V takšnem mediju ostane smer vektorja električne poljske jakosti

nespremenjena vzdolž celotne poti, tj. homogen in izotropen medij ne more spremeniti stanja polarizacije elektromagnetnega vala. V primeru zasuka/rotacije detektorja pride do spremembe položaja koordinatnega sistema vektorja električne poljske jakosti na detektorju, iz česar je mogoče zaznati spremembo/zasuk položaja med virom in detektorjem.

Kratek kos standardnega enorodovnega krožno simetričnega optičnega vlakna (SMF-28) lahko predstavlja dober približek homogenega in izotropnega medija, po katerem potuje svetloba od vira do detektorja, kjer ne pride do sukanja polarizacijske ravnine. Zasuk ravnega kosa vlakna ne poruši krožne simetrije, pride pa do pojava šibke krožne dvolomnosti, ki povzroči zasuk polarizacijske ravnine vzdolž optičnega vlakna. Ta zasuk je majhen v primerjavi z mehanskim zasukom in v primeru mehanskega zasuka za 1° povzroči zasuk polarizacijske ravnine za $0,069^\circ$, ki pa je v nasprotni smeri mehanskega zasuka, zaradi česar je potrebno izmerjeno vrednost kota na detektorju (analizatorju) pomnožiti s faktorjem 1,069 [22].

Če torej na eno stran kratkega in zravnanega kosa standardnega enorodovnega optičnega vlakna postavimo linearno polariziran svetlobni vir, na drugo stran pa analizator polarizacije, lahko določimo rotacijski premik med virom in analizatorjem z meritvijo orientacije vektorja električne poljske jakosti na analizatorju polarizacije. Na tem principu zasledimo senzorje, pri katerih je kot rotacije/zasuka mogoče določiti iz spremembe intenzitete optične moči med virom in analizatorjem polarizacije [22] (Slika 1-14(a) in (b)), ali senzorje, pri katerih je mogoče določiti kot rotacije/zasuka iz razmerja intenzitete moči v hitri in počasni optični osi vlakna, ki ohranja polarizacijo [135] (Slika 1-14(c)), senzorje, ki za demoduliranje kota rotacije/zasuka izrabljajo spektralno razločanje in so grajeni na osnovi Braggovih rešetak (Slika 1-14(f)), nagnjenih Braggovih rešetak, vpisanih v enorodovna vlakna [142-144], ter senzorje, ki so grajeni na osnovi interferometrov [136, 137].

Slabosti navedenih rešitev so kompleksne metode za razločanje, velike dimenzije ter zahteva po dostopu do senzorskega dela tako z vstopne kakor tudi z izstopne strani, kar pa omejuje področja praktične uporabe senzorja. Naš cilj je bil zasnova senzorja rotacije/zasuka, zgrajenega na enojnem dovodnem optičnem vlaknu, po katerem bosta

potovala tako vhodni kot izhodni modulirani signal. V ta namen smo zgradili enostavno in cenovno ugodno rešitev, pri čemer smo dosedanje rešitve nadgradili tako, da senzor lahko deluje na enojnem dovodnem vlaknu. Osnovna zgradba senzorja je prikazana na sliki 2-1. Kot dovodno vlakno smo uporabili visoko dvolomno vlakno, ki ohranja polarizacijo (»Panda«), nato kot senzorsko vlakno kos standardnega enorodovnega vlakna ter na koncu ČVP z zrcalom. ČVP se obnaša v odbojnem načinu delovanja kot polvalovna plošča, ki zasučje polarizacijsko ravnino za 90°, pri čemer omogoča razločanje smeri rotacije vektorja električne poljske jakosti in s tem določanje kota zasuka senzorja. ČVP je eden izmed vitalnih delov senzorja, saj omogoča zaznavanje mehanskega zasuka/rotacije (omogoča zaznavanje spremembe orientacije vektorja električne poljske jakosti glede na vhodno orientacijo dovodnega (visoko dvolomnega) vlakna). ČVP smo zgradili iz optičnih vlaken. Ker smo za izdelavo uporabili visokodvolomna optična vlakna, je bil glavni izziv njihova temperaturna občutljivost, zato smo ČVP zgradili iz različnih vrst visoko dvolomnih optičnih vlaken z različnimi temperaturnimi koeficienti ter tako dosegli temperaturno kompenzacijo.

2.3 Analiza s pomočjo Jonesovih matrik

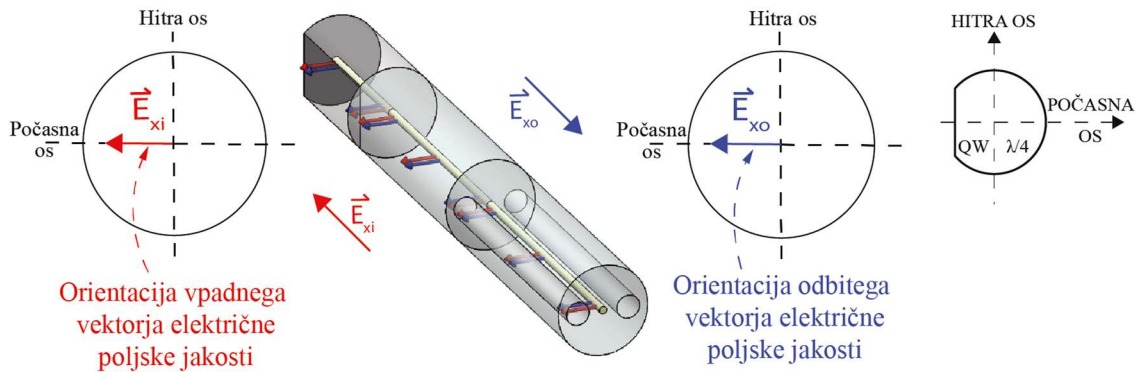
Senzor je možno dokaj enostavno opisati analitično s pomočjo Jonesovih matrik tako, da opazujemo stanje oz. transformacijo stanja polarizacije v posameznih segmentih senzorja. Začeli bomo s predpostavko, da je v dovodnem vlaknu vzbujen linearno polariziran val z amplitudo E_0 in usmerjenostjo vektorja v smeri y , kar opišemo z Jonesovo matriko.

$$\vec{E}_0 = \begin{bmatrix} 0 \\ E_0 \end{bmatrix} \quad (2.1)$$

Linearno polariziran val E_0 potuje po dovodnem visoko dvolomnem vlaknu (PM-vlakno) preko standardnega enorodovnega vlakna (SMF-28) in vstopi v ČVP – E'_0 (Slika 2-2). V primeru rotacije/zasuka senzorja pride do spremembe orientacije optične osi valovne plošče glede na optično os dovodnega vlakna. Torej, zasuk senzorskega sklopa povzroči spremembo vpadnega kota, ki ga oklepata vektor električne poljske jakosti in os ČVP

(Slika 2-3(a)) in ki ga lahko izrazimo kot: $E'_o = R \cdot E_o$, pri čemer ima rotacijska matrika R obliko:

$$R = \begin{bmatrix} \cos \alpha & \sin \alpha \\ -\sin \alpha & \cos \alpha \end{bmatrix} \quad (2.2)$$

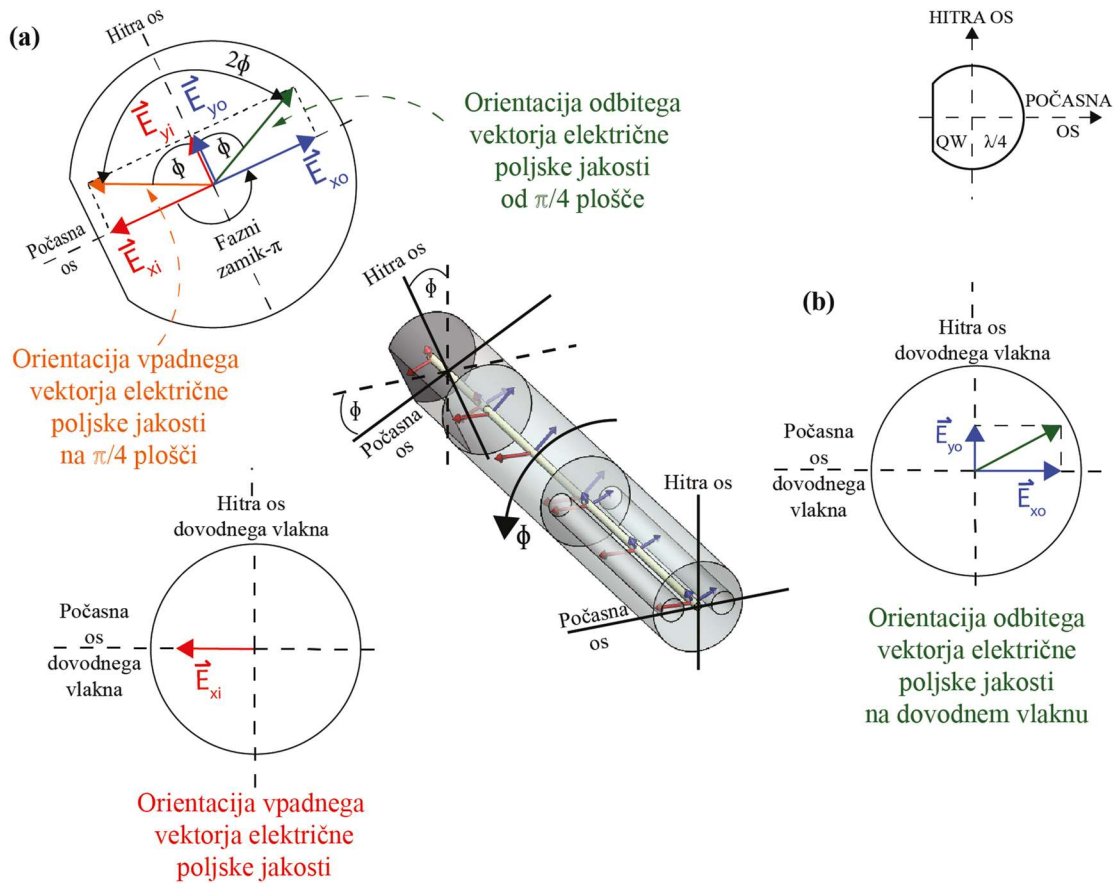


Slika 2-2: Vzbujanje vertikalnega in horizontalnega rodu, ko senzor ni izpostavljen zasuku, ter orientacija vpadnega in odbitega vektorja električne poljske jakosti med dovodnim vlaknom in ČVP, ko senzor ni zasukan.

Val potuje dalje čez ČVP, zgrajeno iz visoko dvolomnih vlaken, kar povzroči fazni zamik $\Delta\varphi = \pi/2$ med horizontalnim (E_x) in vertikalnim (E_y) rodом $E''_o = E'_o \cdot F$, pri čemer F predstavlja zakasnilno matriko, podano kot:

$$F = e^{i\varphi y} \begin{bmatrix} e^{i\Delta\varphi} & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2.3)$$

Svetlobni val se nato odbije od refleksijskega nanosa ter potuje nazaj po isti ČVP, kar povzroči dodatni fazni zamik $\Delta\varphi = \pi/2$ med E_x in E_y komponento vala $E'''_o = E''_o \cdot F$. ČVP in refleksijski sloj delujeta v postavitvi kot polvalovna plošča s skupno fazno zakasnitvijo $\Delta\varphi = \pi$, pri čemer slednja zasučje polarizacijsko ravnino za kot 2Φ , kjer je Φ kot med optično osjo ČVP in vpadnega vektorja električne poljske jakosti (Slika 2-3(a)).



Slika 2-3: Vzbujanje vertikalnega in horizontalnega rodu, ko je senzor zasukan za kot Φ ; a) Orientacija vektorja električne poljske jakosti, njegove horizontalne in vertikalne komponente na prehodu iz enorodovnega vlakna v ČVP; b) Smer vektorja električne poljske jakosti, njegove horizontalne in vertikalne komponente v prehodu iz enorodovnega vlakna v dovodno vlakno, ko je senzor zasukan za kot Φ .

Tako zasukana linearno polarizirana svetloba potuje nazaj preko senzorskega vlakna (SMF-28) do dovodnega optičnega vlakna (»Panda«), kjer se razdeli na dva medsebojno pravokotna LP-roda (E_x in E_y) (Slika 2-3(b)), podana z $E^{IV}_0 = E^{III}_0 \cdot R^{-1}$, kjer R^{-1} predstavlja inverzno rotacijsko matriko:

$$R^{-1} = \begin{bmatrix} \cos \Phi & -\sin \Phi \\ \sin \Phi & \cos \Phi \end{bmatrix} \quad (2.4)$$

Končno stanje E^{IV}_0 lahko zapišemo kot:

$$\vec{E}_0^{IV} = R^{-1} \cdot F \cdot F \cdot R \cdot \vec{E}_0 \quad (2.5)$$

Enačbo (2.5) poenostavimo tako, da vse spremembe stanja polarizacije zamenjamo z matriko:

$$M = R^{-1} \cdot F \cdot F \cdot R \quad (2.6)$$

Enačba (2.6) dobi obliko, kjer matrika M predstavlja spremembe stanja polarizacije v senzorju:

$$\vec{E}_0^{IV} = M \cdot \vec{E}_0 \quad (2.7)$$

Rešitev matrike M lahko zapišemo kot:

$$M = e^{i\varphi y} \begin{bmatrix} \sin^2(\Phi) + \cos^2(\Phi)e^{i\Delta\varphi} & \sin(\Phi) \cdot \cos(\Phi)(e^{i\Delta\varphi} - 1) \\ \sin(\Phi) \cdot \cos(\Phi)(e^{i\Delta\varphi} - 1) & \cos^2(\Phi) + \sin^2(\Phi)e^{i\Delta\varphi} \end{bmatrix} \quad (2.8)$$

Iz enačbe (2.8) nato izrazimo vertikalno in horizontalno (hitro in počasno) komponento vektorja električne poljske jakosti:

$$\begin{aligned} E_x &= E_0 \sin(\Phi) \cdot \cos(\Phi)(e^{i\Delta\varphi} - 1)e^{i\varphi y} \\ E_y &= E_0 (\cos^2(\Phi) + \sin^2(\Phi)e^{i\Delta\varphi})e^{i\varphi y} \end{aligned} \quad (2.9)$$

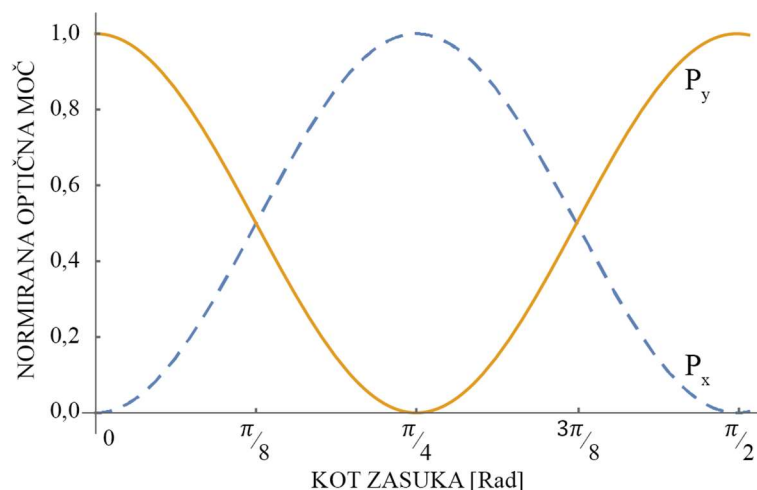
Kvadrat velikosti posameznih komponent je sorazmeren moči posameznega linearno polariziranega rodu $P_x \approx E_x^2$ in $P_y \approx E_y^2$, iz česar sledi:

$$\begin{aligned} P_x &\propto E_x^2 = \frac{1}{2} E_0^2 \sin^2(2\Phi) \cdot \sin^2\left(\frac{\Delta\varphi}{2}\right) \\ P_y &\propto E_y^2 = \frac{1}{2} E_0^2 \left(1 - \sin^2(2\Phi) \cdot \sin^2\left(\frac{\Delta\varphi}{2}\right)\right) \end{aligned} \quad (2.10)$$

V enačbi (2.10) velja $\Delta\varphi = \pi$ (fazni zamik polvalovne plošče), zato lahko končno obliko enačb za moči horizontalne in vertikalne komponente polarizacije izrazimo kot:

$$\begin{aligned} P_x &\propto \frac{1}{2} E_0^2 \sin^2(2\Phi) \\ P_y &\propto \frac{1}{2} E_0^2 \cos^2(2\Phi) \end{aligned} \quad (2.11)$$

Izris funkcij iz (2.11) je prikazan na sliki 2-4, kjer vidimo sinusno modulacijo optične moči horizontalne in pravokotne komponente pri »mehanskem« zasuku senzorskega vlakna za kot 90° ($\pi/2$).



Slika 2-4: Izris modulacije optičnih moči posameznih LP-rodov pri zasuku senzorja za mehanski kot Φ 0 do $\pi/2$ (od 0° do 90°).

Kot zasuka izračunamo iz izmerjenega razmerja optičnih moči dveh posameznih linearno polariziranih rodov, ki potujeta v povratni smeri kot:

$$\Phi = \frac{1}{2}k \cdot \arctan\left(\sqrt{\frac{P_x}{P_y}}\right) \quad (2.12)$$

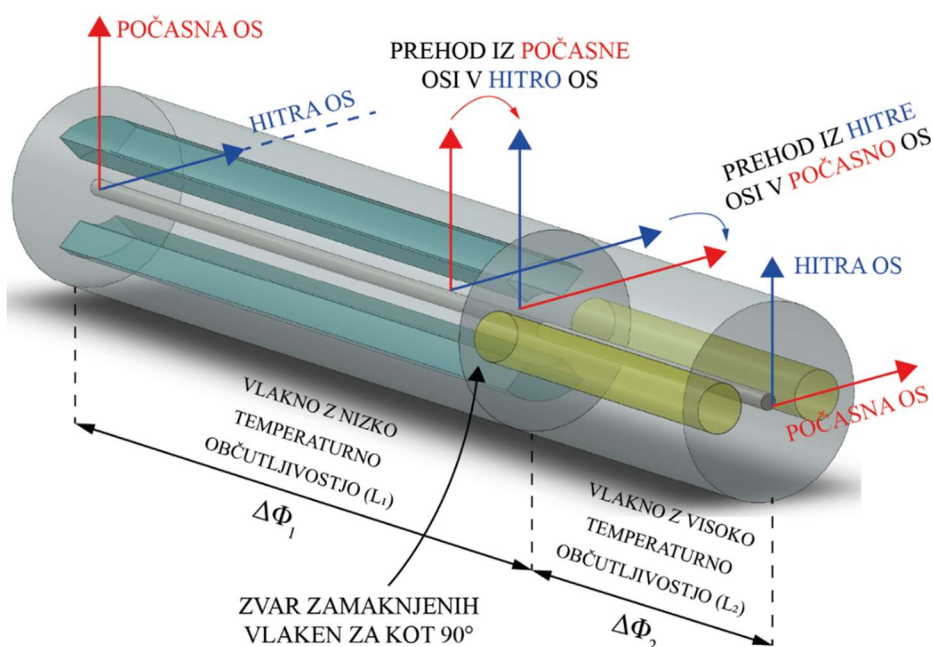
kjer so:

P_x in P_y – optični moči pripadajočih LP_x in LP_y rodov v dovodnem vlaknu,

k – korekcijski faktor zaradi pojava krožne dvolomnosti in posledično rotacije polarizacijske ravnine v standardnem enorodovnem optičnem vlaknu pri rotaciji/zasuku zasuka senzorskega vlakna, ki znaša 1,069 [57].

Slabost senzorja, zgrajenega iz valovne plošče iz visoko dvolomnega vlakna, je visoka temperaturna občutljivost, saj je koeficient spremembe lomnega količnika (dvolomnosti) takšnega vlakna (vlakno »Panda«) okoli 10 Rad/mK [164] pri utripni dolžini 4,5 mm, ki je definirana kot dolžina, pri kateri pride do zamika faze med horizontalnim in vertikalnim polarizacijskim valom za 2π . Našemu vlaknu »Panda« smo izmerili koeficient spremembe lomnega količnika 8,97 Rad/mK; iz podatkovnega lista vlakna pa smo razbrali, da je utripna dolžina 4,4 mm. Temperaturno občutljivost je mogoče znižati (ne pa popolnoma izničiti) z uporabo posebnih vlaken z luknjičasto strukturo (PC-vlakna) [165, 166]. Z njihovo uporabo se pojavijo težave z varjenjem, visokimi vstopnimi izgubami ter povratnimi odboji na zvaru med PC-vlakni in

standardnimi vlakni. Zaradi tega smo izbrali vlakna, ki se uporabljajo za izdelavo tokovnih senzorjev, kjer ima uporaba valovne plošče pri meritvah velik pomen. Komercialno dobavljivi vlakni za izdelavo valovnih plošč (ČVP) sta HB1500QW (proizvajalec »Fibercore«) in PME1300-5 (proizvajalec »IVG Fiber«). Takšna vlakna izkazujejo v primerjavi s standardnimi visoko dvolomnimi vlakni, kot je vlakno »Panda«, veliko nižjo, a ne zanemarljivo temperaturno občutljivost, ki bi vplivala na točnost našega senzorja. Izmerjeni koeficient spremembe lomnega količnika vlakna HB1500QW je pri utripni dolžini 9,08 mm znašal 3,14 Rad/mK. Tako smo se lotili reševanja težave s temperaturno občutljivostjo z izdelavo ČVP iz dveh različnih visoko dvolomnih optičnih vlaken (Slika 2-5).



Slika 2-5: Zgradba temperaturno neobčutljive ČVP.

Prvi, daljši kos je iz optičnega vlakna HB1500QW z nižjim koeficientom spremembe dvolomnosti zaradi temperature. Drugi, krajši kos pa je iz vlakna »Panda«, ki ima zaradi temperature višji koeficient spremembe dvolomnosti. Vlakni smo zvarili tako, da je bil zamik med njunima počasnima osema enak 90°, kar je povzročilo izmenjavo moči med hitrim in počasnim rodod v obeh kosih vlaken, tj. horizontalno polariziran rod je opravil večino poti po počasni osi vlakna z nižjo temperaturno občutljivostjo in krajšo pot po hitri osi vlakna z višjo temperaturno občutljivostjo. Obratno se je zgodilo z vertikalno polariziranim rodod, ki je opravil večino poti po hitri osi vlakna z nižjo temperaturno

občutljivostjo in krajšo pot po počasni osi vlakna z višjo temperaturno občutljivostjo.

Zamik faze zaradi dolžine v posameznem kosu lahko izrazimo kot:

$$\begin{aligned}\varphi_1 &= \frac{2\pi}{\lambda} \cdot \Delta n_1 \cdot L_1 \\ \varphi_2 &= \frac{2\pi}{\lambda} \cdot \Delta n_2 \cdot L_2\end{aligned}\tag{2.13}$$

kjer so:

Δn_1 – dvolomnost v vlaknu z nižjo temperaturno občutljivostjo,

L_1 – dolžina kosa vlakna z nižjo temperaturno občutljivostjo,

Δn_2 – dvolomnost v vlaknu z višjo temperaturno občutljivostjo,

L_2 – dolžina kosa vlakna z višjo temperaturno občutljivostjo.

Za realizacijo ČVP mora veljati, da skupni fazni zamik ($\Delta\varphi = \varphi_1 + \varphi_2$) med posameznima kosoma vlaken znaša $\pi/2$. Če v (2.13) upoštevamo enakost $\Delta n = \lambda/L_b$, pri čemer je L_b utripna dolžina posameznega optičnega vlakna, lahko izraz za skupni fazni zamik $\Delta\varphi$ zapišemo kot:

$$\Delta\varphi = 2\pi \left(\frac{L_1}{L_{b1}} + \frac{L_2}{L_{b2}} \right)\tag{2.14}$$

Za pravilno zasnovano ČVP je potrebno uporabiti pravilno razmerje dolžin L_1 in L_2 optičnih vlaken. Če iz (2.10) še upoštevamo, da velja $\Delta\varphi/2 = \pi/2$, lahko izraz (2.14) zapišemo z:

$$\frac{1}{4} = \frac{L_1}{L_{b1}} + \frac{L_2}{L_{b2}}\tag{2.15}$$

Za določitev ustreznega razmerja dolžin L_1 in L_2 optičnih vlaken je prav tako potrebno upoštevati spremembo faze zaradi spremembe temperature. Pri tem lahko izrazimo fazni zamik zaradi spremembe temperature za posamezni kos ČVP kot:

$$\begin{aligned}\varphi_{T1} &= k_1 \cdot L_1 \cdot \Delta T \\ \varphi_{T2} &= k_2 \cdot L_2 \cdot \Delta T\end{aligned}\tag{2.16}$$

kjer so:

k_1 – koeficient, ki določa odvisnost dvolomnosti od spremembe temperature
vlakna z nižjo temperaturno občutljivostjo,

L_1 – dolžina kosa vlakna z nižjo temperaturno občutljivostjo,

k_2 – koeficient, ki določa odvisnost dvolomnosti od spremembe temperature
vlakna z višjo temperaturno občutljivostjo,

L_2 – dolžina kosa vlakna z višjo temperaturno občutljivostjo,

ΔT – sprememba temperature.

Skupno spremembo faze $\Delta\Phi_T$ v ČVP zaradi temperaturne spremembe lahko iz (2.16) izrazimo kot:

$$\Delta\Phi = k_1 \cdot L_1 \cdot \Delta T + k_2 \cdot L_2 \cdot \Delta T \quad (2.17)$$

Iz (2.17) sledi, da bo temperaturna občutljivost enaka nič, kadar velja:

$$k_1 \cdot L_1 + k_2 \cdot L_2 = 0 \quad (2.18)$$

Za doseganje temperaturne kompenzacije ČVP morata biti dolžini vlaken (L_1 in L_2), proporcionalni razmerju njunih temperaturnih občutljivosti (k_1 in k_2). Iz izraza (2.18) tako izrazimo L_1 in L_2 :

$$L_1 = -\frac{k_2 \cdot L_2}{k_1} \quad (2.19)$$

$$L_2 = -\frac{k_1 \cdot L_1}{k_2}$$

Izraženi dolžini L_1 in L_2 vstavimo v izraz (2.15), kjer potem izrazimo posamezni dolžini z upoštevanjem faktorja spremembe dvolomnosti zaradi spremembe temperature:

$$L_1 = \frac{1}{4} \left(\frac{1}{\frac{1}{L_{b1}} - \frac{k_1}{k_2 \cdot L_{b2}}} \right) \quad (2.20)$$

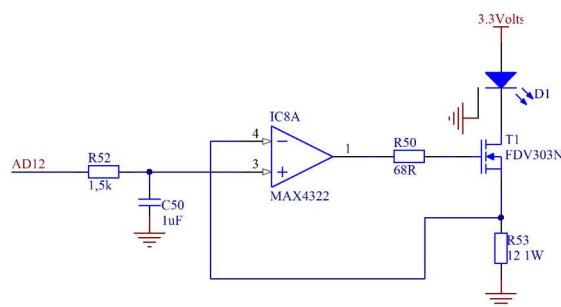
$$L_2 = \frac{1}{4} \left(\frac{1}{\frac{1}{L_{b2}} - \frac{k_2}{k_1 \cdot L_{b1}}} \right)$$

Iz posameznih dolžin vlaken lahko razložimo princip temperaturne kompenzacije ČVP. Vlakno z nižjo temperaturno občutljivostjo je daljše od vlakna z višjo temperaturno občutljivostjo, zaradi česar ČVP za pravilno delovanje ustvari večjo fazno razliko med rodovoma, kot je potrebna. Presežek fazne razlike izravna krajše vlakno z višjo temperaturno občutljivostjo, kjer zaradi zamaknjenih optičnih osi za 90° pride do izmenjave moči med počasnim in hitrim polarizacijskim rodom. Krajše vlakno z višjo temperaturno občutljivostjo tako nadomesti fazni zamik v daljšem kosu vlakna z nižjo temperaturno občutljivostjo. Naša ČVP je bila zgrajena iz vlakna z nizko temperaturno občutljivostjo (HB1500QW) dolžine 12,3 mm in iz vlakna z visoko temperaturno občutljivostjo (»Panda«) dolžine 4,2 mm.

2.4 Zasnova optoelektronskega sklopa

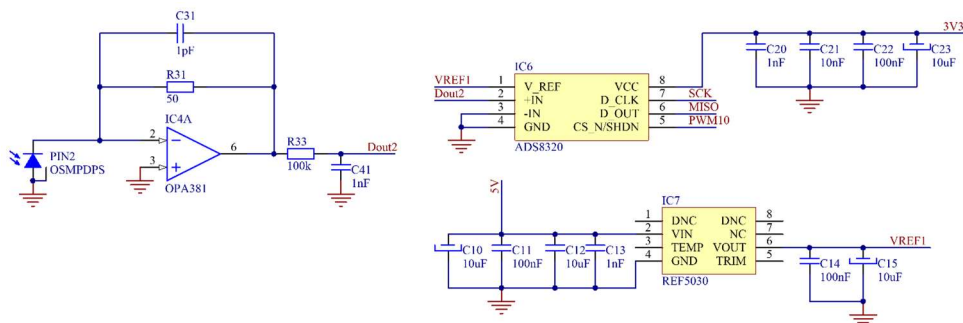
Enostaven in učinkovit princip delovanja našega senzorja je omogočil zasnovo preprostega optoelektronskega sklopa za razločanje merilne vrednosti pri predlaganem senzorju. Optoelektronski sistem smo zgradili iz majhnega števila cenovno učinkovitih ter na trgu dostopnih komponent.

Pri načrtovanju oddajnega dela sistema smo uporabili širokospektralno diodo (SLED) DL-US55036D-FS (proizvajalec »DenseLight«) [167], ki je sklopljena z visoko dvolomnim vlaknom vrste »Panda«. Izhodna moč diode pri maksimalnem toku 200 mA znaša približno 350 μ W. Diodo smo napajali s konstantnim tokom preko napetostno krmiljenega tokovnega generatorja, zgrajenega iz operacijskega ojačevalnika MAX4322 (proizvajalec »Maxim Intergrated«) [168], ter N-kanalnega MOSFET tranzistorja FDV303N (proizvajalec »Fairchild Semiconductor«) [169]. (Slika 2-6).



Slika 2-6: Napetostno krmiljen tokovni generator za SLED.

Ker sta nas zanimali spremembi moči obeh linearno polariziranih rodov, smo sprejemni del zgradili iz dveh PIN-diod OSMPDPS-2101BFSO (proizvajalec »Osemos«) [170] z odzivnostjo 0,90 A/W in kapacitivnostjo 0,7 pF in iz dveh transimpedančnih ojačevalnikov OPA381, (proizvajalec »Texas Instruments«) [171]. Ojačana napetostna signala smo pripeljali na dva 16-bitna analogno-digitalna pretvornika ADS8320 (proizvajalec »Texas Instruments«) [172], ki podpirata komunikacijo SPI, frekvenco vzorčenja 100 kHz in napajanje +3,3 V (Slika 2-7). Za obdelavo in prikaz rezultatov smo uporabili razvojno ploščo z mikrokrmilnikom SAM3X8E (jedro ARM Cortex-M3) (proizvajalec »Atmel«) [173].

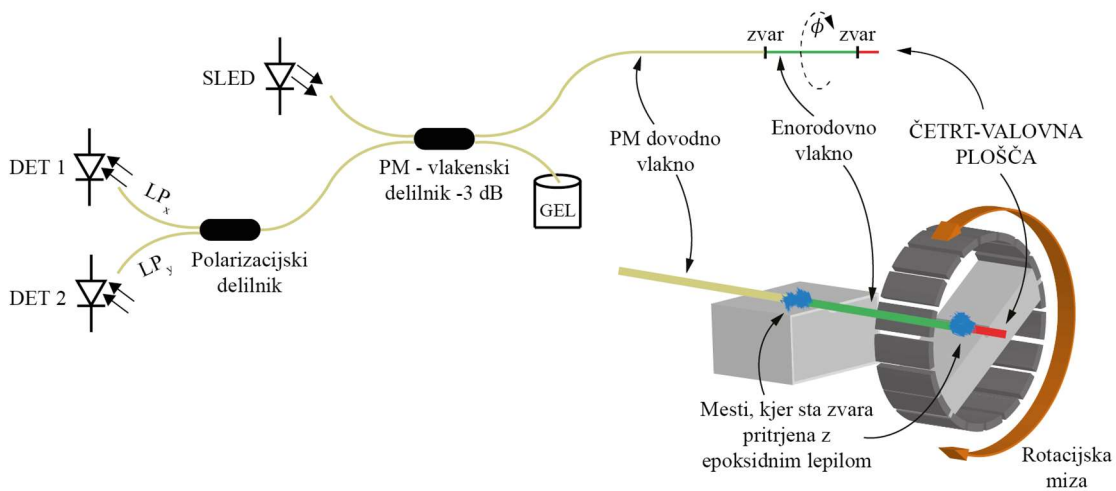


Slika 2-7: Sprejemni del za zajemanje in pretvorbo optične moči enega LP-roda.

2.5 Eksperimentalni rezultati

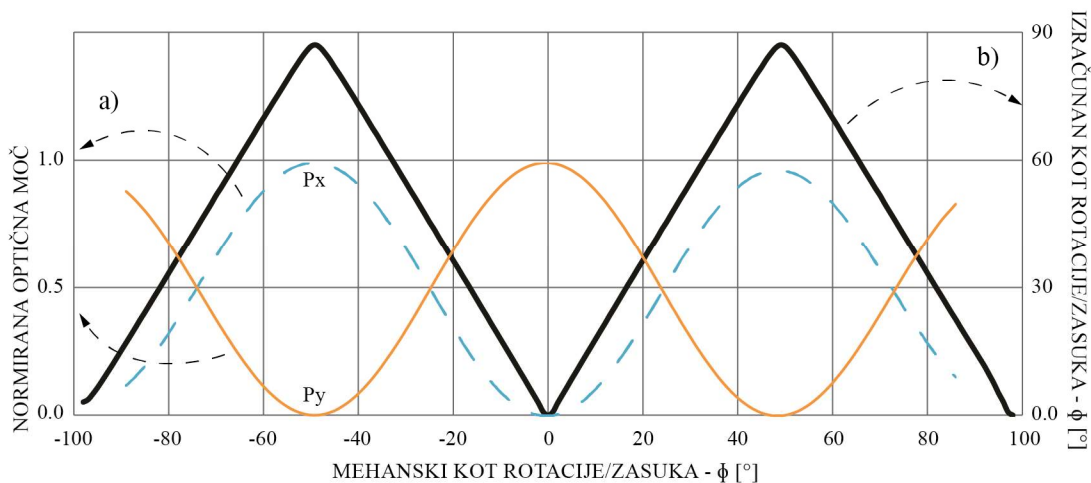
Merilna proga senzorskega sistema je predstavljena na sliki 2-8. Uporabili smo širokospektralni vir (SLED) s centralno valovno dolžino 1,535 μm , sklopljen z vlaknom, ki ohranja polarizacijo. Uporaba nizkokoherenčnega vira je potrebna za preprečevanje medrodovne interference v povratni smeri v visoko dvolomnem vlaknu. Svetloba je potovala do sensorja preko vlakenskega delilnika (-3 dB) po vlaknih, ki ohranjajo polarizacijo, v eno roko do sensorja. Drugo roko delilnika smo pomočili v optični gel F1-0001V z lomnim količnikom 1,463 in s tem preprečili pojav morebitnih povratnih odbojev. Na povratno roko sensorja smo privarili polarizacijski delilnik, s katerim smo posamično spremljali modulacijo optične moči horizontalno in vertikalno polariziranega vala. Iz razmerja moči smo po enačbi [2.12] določili kot zasuka. Senzorsko vlakno smo fiksirali v dveh točkah, najprej na mestu, kjer je bil zvar med dovodnim vlaknom, ki ohranja polarizacijo, in standardnim enorodovnim vlaknom. Drugi konec, kjer se je

nahajala tudi ČVP, pa smo namestili na motorizirano miniaturno rotacijsko mizo s minimalnim pomikom $0,01^\circ$.



Slika 2-8: Merilna proga senzorja rotacije/zasuka s ČVP.

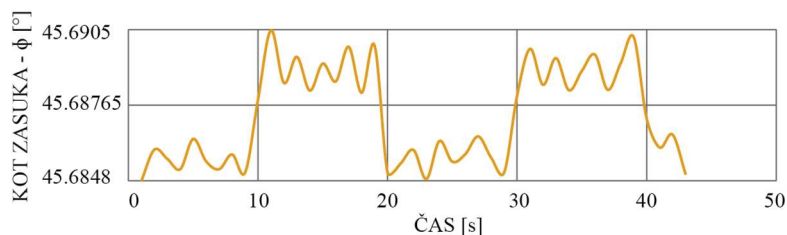
Opisan senzor je imel efektivno dolžino 10 mm, ki pa jo je mogoče podaljšati. Merilno območje senzorja zaradi zamika za kot 2Φ med vpadnim E-vektorjem in odbitim E-vektorjem znaša 90° , tj. $+45^\circ$ v smeri urinega kazalca in -45° v nasprotni smeri urinega kazalca. Kot smo napovedali z modelom, je zasuk/rotacija senzorja povzročila spremembo moči horizontalno in vertikalno polariziranih valov po sinusni karakteristiki (Slika 2-4), iz katerih smo po izrazu [2.12] izračunali pripadajoči kot zasuka (Slika 2-9).



Slika 2-9: Izmerjena modulacija polarizacijskih rodov LPx in LPy ter izračunan kot zasuka.

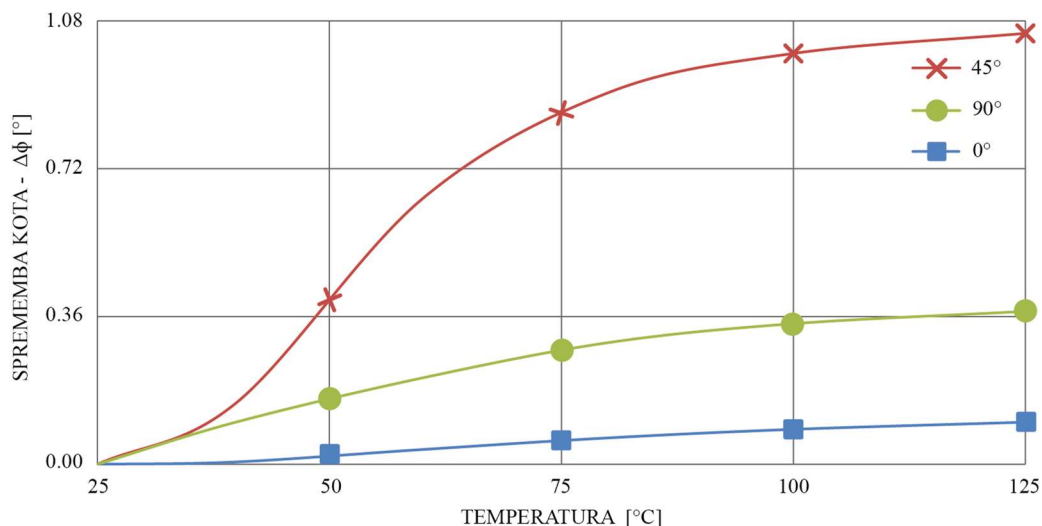
Pojav krožne dvolomnosti je znižal občutljivost senzorja za približno 7 %; torej, ko smo izračunali kot 45° , je bil mehanski kot približno 48° , kar ustreza korekcijskemu faktorju k

iz enačbe [2.12]. Ločljivost senzorja smo izmerili s ponovljivim periodičnim sukanjem senzorja najprej v smeri urinega kazalca in potem v nasprotni smeri urinega kazalca s povečevanjem pomika rotacijske mize od minimalnega (od $0,01^\circ$ po koraku $0,01^\circ$), vse dokler nismo izmerili spremembe signala, ki je ustrezal nivoju šuma. Tako smo pri nastavljenem kotu zasuka 45° , kjer sta bila oba roda približno enako vzbujena, določili minimalno ločljivost $0,03^\circ$ (Slika 2-10).



Slika 2-10: Prikaz ločljivosti senzorja pri sukanju rotacijske mize za $0,03^\circ$.

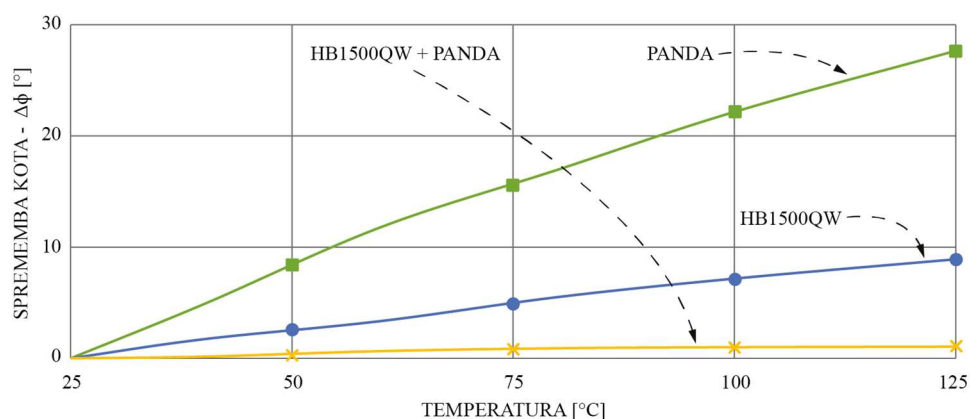
Kot smo že pisali, nas je zanimal temperaturni vpliv na senzor oz. predvsem odziv ČVP na spremembo temperature. V ta namen smo zgradili temperaturno komoro, v kateri smo s pomočjo temperaturno reguliranega grelnika ČVP izpostavili temperaturni spremembi in opazovali odziv senzorja. Izvedli smo temperaturne preizkuse pri treh različnih kotih zasuka: 0° , 45° in 90° (Slika 2-11).



Slika 2-11: Odziv senzorja na spremembo temperature pri prednastavljenih kotih 0° , 45° in 90° .

Po pričakovanjih je do največjega lezenja kota zaradi spremembe temperature prišlo pri kotu zasuka 45° , saj sta v tem primeru oba polarizacijska rodova v ČVP enakomerno vzbujena. Izmerjeno lezenje kota pri spremembi temperature za 100°C je okoli $1,04^\circ$ oz.

0,0104°/°C. Za primerjavo smo dodatno zgradili senzorja, kjer je bila ena ČVP narejena z uporabo visoko dvolomnega vlakna, ki ohranja polarizacijo (»Panda«), in druga ČVP iz vlakna z nižjetemperaturno občutljivostjo HB1500QW (proizvajalec »Fibercore«). Vse tri senzorje ČVP, zasukane za kot 45°, smo nato podvrgli enakemu temperaturnemu testu (spremembi temperature za 100 °C) (Slika 2-12). Senzorju s ČVP iz standardnega vlakna, ki ohranja polarizacijo (»Panda«), smo izmerili največje lezenje kota, tj. več kakor 27 stopinj. Senzorju s ČVP iz vlakna HB1500QW pa smo izmerili lezenje kota za 8 stopinj.



Slika 2-12: Primerjava lezenja kota med ČVP, izdelanimi samo iz vlakna PANDA ali samo iz HB1500QW ter kombinacije (PANDA + HB1500QW) vlaken zaradi spremembe temperature.

2.6 Povzetek

Predstavili smo miniaturni senzor rotacije/zasuka na enojnem dovodnem vlaknu s ČVP, ki za svoje delovanje izrablja nezmožnost sukanja vektorja električne poljske jakosti v standardnem krožno simetričnem optičnem vlaknu. ČVP v refleksijskem načinu omogoča razločanje kota rotacije/zasuka v razmerje optične moči posameznih LP-rodov, ki potujeta v povratni smeri visoko dvolomnega dovodnega vlakna. Senzor izkazuje visoko ločljivost na mehansko spremembo kota $-0,03^\circ$ na merilnem območju $90^\circ (\pm 45^\circ)$ in nizko temperaturno občutljivost – pod $0,011^\circ/\text{°C}$. Enostavni sistem za signalno razločanje merilnih vrednosti in majhne dimenzije omogočajo uporabo senzorja tudi na področjih s prostorskimi omejitvami, kjer so možne večje temperaturne spremembe.

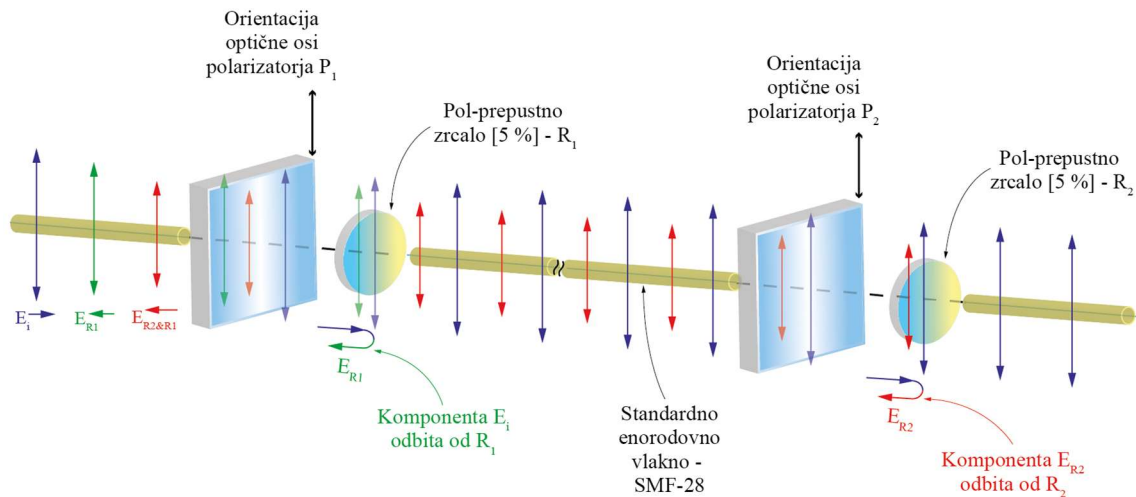
3 ZASNOVA, NAČRTOVANJE IN ANALIZA REZULTATOV KVAZIPORAZDELJENEGA POLARIMETRIČNEGA OPTIČNEGA VLAKENSKEGA SENZORJA ZA MERITEV ROTACIJE/ZASUKOV

3.1 Uvod

V tem poglavju bomo predstavili kvaziporazdeljen polarimetrični vlakenski senzor za merjenje rotacije/zasukov. Senzorski sistem je sestavljen iz niza kompaktnih vlakenskih polarizatorjev, ki so povezani s standardnim enorodovnim optičnim vlaknom. Pari polarizatorjev tvorijo na zasuk/rotacijo občutljive segmente, ki omogočajo detekcijo rotacije/zasuka s pomočjo optične reflektometrije. Senzor izkorišča nezmožnost ravnega enorodovnega optičnega vlakna, da bi ob zasuku/torziji spreminjalo stanje polarizacije oz. smer vektorja električnega polja svetlobnega vala. Zasuki/rotacije senzorskih segmentov, sestavljeni iz zaporedno povezanih polarizatorjev, povzročijo modulacijo prenesene optične moči vzdolž vsakega senzorskega segmenta. Spremljanje modulacije optične moči pa omogočajo polprepustna zrcala, vgrajena v vsak polarizator. Celotni senzorski sistem je grajen iz malega števila enostavnih in standardnih optičnih komponent.

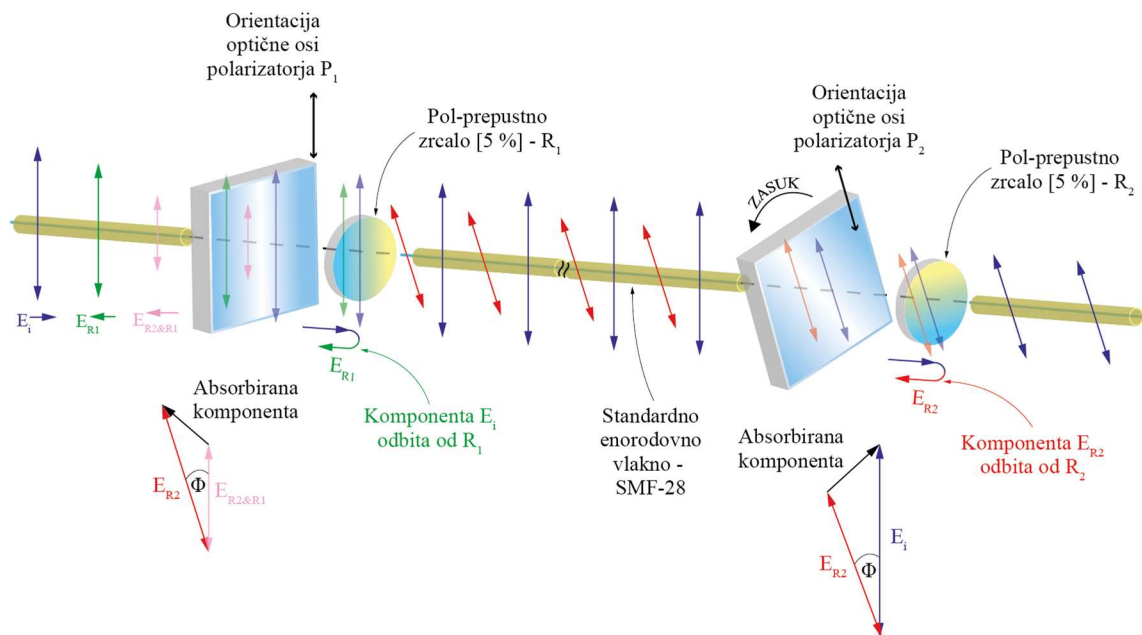
3.2 Predstavitev senzorja

Kvaziporazdeljen senzor je sestavljen iz niza na rotacijo občutljivih segmentov. Delovanje senzorja lahko razložimo na enem segmentu z opazovanjem položaja vektorja električne poljske jakosti, ki potuje skozi dvojico polarizatorjev (Slika 3-1). V osnovi je segment zgrajen in para linearnih polarizatorjev z vgrajenima polprepustnima zrcaloma, ki sta povezana s standardnim enorodovnim (krožno simetričnim) optičnim vlaknom. Ko po takšnem vlaknu potuje linearno polariziran val, se zaradi sukanja po vzdolžni osi vlakna vektorju električne poljske jakosti ne spreminja smer (orientacija) [57]. Kadar senzorski segment ni podvržen rotaciji/zasuku/torziji, ostane smer vektorja električne poljske jakosti vzporedna z optičnima osema obeh polarizatorjev, zaradi česar sta prenesena in odbita moč od drugega polarizatorja maksimalni – $E_{R2\&R1}$ (Slika 3-1).



Slika 3-1: Delovanje segmenta, ko ni izpostavljen zasuku/rotaciji.

Pri zasuku/rotaciji/torziji pride do premika med optičnima osema polarizatorjev senzorskega segmenta, kar zniža preneseno moč skozi drugi polarizator – $E_{R2\&R1}$ (Slika 3-2). Pri tem je potrebno poudariti, da idealno in ravno enorodovno optično vlakno ne vpliva na orientacijo ali translacijo vektorja električne poljske jakosti.



Slika 3-2: Delovanje segmenta, ko je izpostavljen zasuku/rotaciji.

Senzorski segment je sestavljen iz dveh linearnih vlakenskih polarizatorjev, ki sta povezana z enorodovnim optičnim vlaknom. Segment predstavlja valovodni ekvivalent Malusove postavitve v odprtem prostoru, zgrajenem iz diskretnih optičnih komponent. Zasuk enorodovnega optičnega vlakna skupaj z drugim polarizatorjem povzroči modulacijo prenesene optične moči v skladu z Malusovim zakonom:

$$I = I_0 \cdot \cos^2 \Phi_{Pol} \quad (3.1)$$

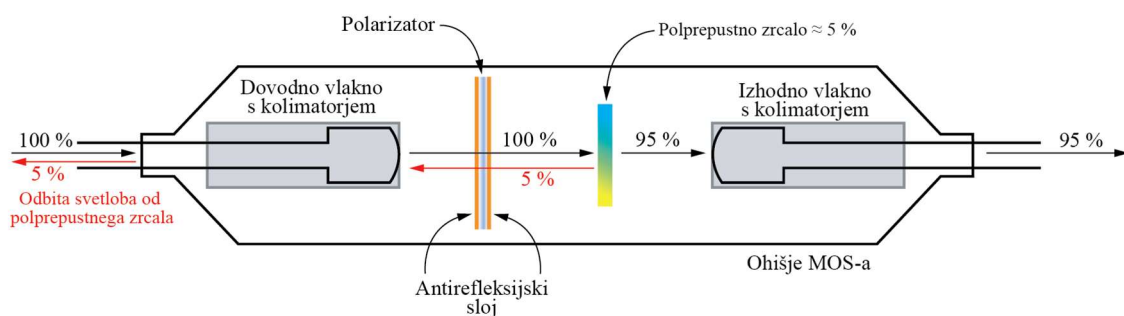
kjer so:

I – Intenziteta izhodne moči iz analizatorja,

I_0 – intenziteta vhodne moči v polarizator,

Φ_{Pol} – kot med osema polarizatorjev.

Polarizatorji za izdelavo predlaganega senzorja so imeli v primerjavi s standardnimi izvedenkami dodatno vgrajena polprepustna zrcala s koeficientom refleksije $R \approx 0,045$ (Slika 3-3). Polarizator in polprepustno zrcalo sta bila sklopljena s standardnim enorodovnim optičnim vlaknom preko ustreznih vlakenskih miniaturnih kolimatorjev. Vse to je bilo vgrajeno v cevasto ohišje s premerom 3 mm in dolžino 60 mm. Takšne linearne polarizatorje z vgrajenim polprepustnim zrcalom smo poimenovali »mikrooptični segment (MOS)«. MOS-e je po naročilu izdelalo kitajsko podjetje Opneti Communications Co. Naloga vgrajenih polprepustnih zrcal za polarizatorjem v vsakem MOS-u je bila odbiti majhen iznos svetlobe v povratni smeri in tako poenostaviti gradnjo merilnega sistema (OTDR), zlasti v primeru krajših senzorskih segmentov.



Slika 3-3: Zgradba MOS-a.

Vloga polprepustnega zrcala v vsakem MOS-u je preusmeriti majhen delež optične moči v povratno smer za namen meritve zasuka/rotacije/torzije na posameznem segmentu.

Odbita moč potuje nazaj po enorodovnem optičnem vlaknu skozi prvi MOS, kjer pride do ponovne modulacije. Razmerje odbitih optičnih moči med sosednjima MOS-oma/zrcaloma lahko izrazimo kot:

$$\frac{I_{N+1}}{I_N} = \frac{R_N}{R_{N+1}} \cdot k_{MOS} \cdot \cos^4 \Phi \quad (3.2)$$

kjer so:

I_{N+1} – svetlobni tok, odbit od naslednjega MOS-a (analizatorja),

I_N – svetlobni tok, odbit od predhodnega MOS-a,

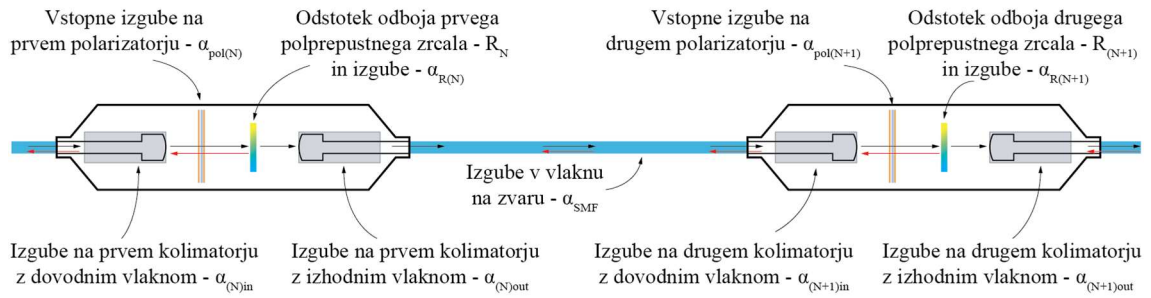
R_{N+1} – koeficient refleksije polprepustnega zrcala naslednjega MOS-a,

R_N – koeficient refleksije polprepustnega zrcala predhodnega MOS-a,

k_{MOS} – korekcijski faktor.

Izraz (3.2) opisuje opravljeno dvojno pot skozi dva zaporedna polarizatorja, enkrat v smeri prenesene moči, drugič pa zaradi polprepustnega zrcala v povratni smeri. Princip delovanja senzorskega segmenta je zato enak kot v primeru, kjer linearno polariziran val potuje skozi tri zaporedno povezane polarizatorje, medsebojno povezane z enorodovnim optičnim vlaknom. Ko ni zasuka, so osi vseh treh polarizatorjev poravnane, zato je prenesena moč največja. Pri rotaciji srednjega segmenta (polarizatorja) pride do zamika njegove optične osi glede na prvi in tretji polarizator, kar povzroči modulacijo prenesene optične moči, najprej skozi drugi in nato skozi tretji polarizator.

Korekcijski faktor k zajema vpliv vstavitvenih izgub, ki so posledica neidealnosti optičnih sklopov MOS-ov in povezovalnih vlaken. Vpliv vstavitvenih izgub zajemajo vhodne izgube izhodnega kolimatorja prvega polarizatorja ($\alpha_{(N)out}$), izgube v enorodovnem optičnem vlaknu, ki nastanejo zaradi zvara med dvema polarizatorjema (α_{SMF}), vhodne izgube vhodnega kolimatorja drugega polarizatorja ($\alpha_{(N+1)in}$), vhodne izgube drugega polarizatorja ($\alpha_{(N+1)pol}$) ter izgube zrcala v prvem ($\alpha_{R(N)}$) in v drugem polarizatorju ($\alpha_{R(N+1)}$) (Slika 3-4).



Slika 3-4: Izgube pri posameznem senzorskem segmentu.

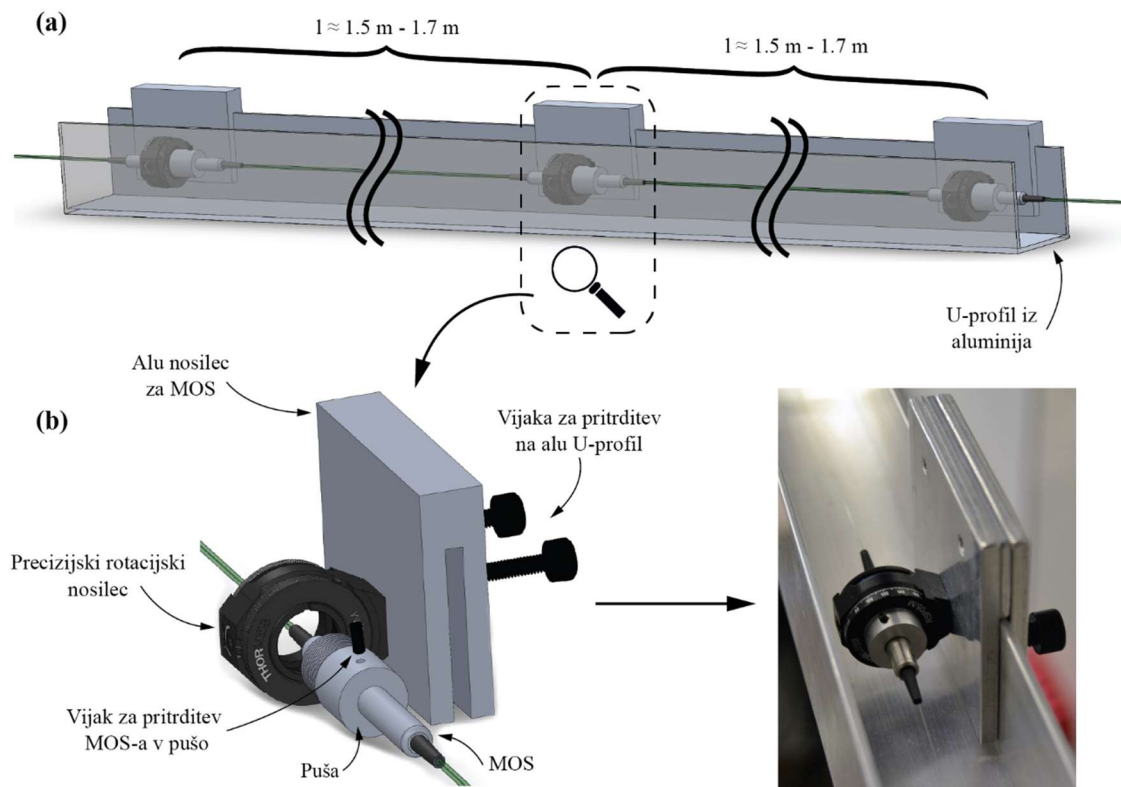
Korekcijski faktor smo za vsak segment določili eksperimentalno, ko so bile osi vseh segmentov (polarizatorjev) vzporedno poravnane. Enačbo (3.2) preoblikujemo tako, da izrazimo kot Φ :

$$\Phi = \arccos \sqrt{\frac{I_{N+1} \cdot k}{I_N}} \quad (3.3)$$

Kot zasuka posameznega senzorskega segmenta tako po izrazu (3.3) izračunamo iz razmerja amplitud odbitih optičnih moči sosednjih zrcal (N in $N+1$) v MOS-ih.

3.3 Zgradba senzorja

Preizkusni senzor je bil zgrajen iz niza desetih mikrooptičnih struktur (MOS-ov), povezanih s standardnim enorodovnim optičnim vlaknom. Senzor smo vgradili v U-profil iz aluminijeve zlitine 6060 z merami 40 mm x 40 mm x 2 mm (Slika 3-5(a)). Za montažo MOS-ov v U-profil smo konstruirali posebne nosilce, ki so bili narejeni iz blokov aluminijeve zlitine 6075 z merami 40 mm x 9,5 mm (Slika 3-5(b)) in ki smo jim zastružili utor, širok 2,1 mm, da se je prilegal na rob U-profila. Končno pričvrstitev nosilca na U-profil smo izpeljali z vijačenjem dveh vijakov M4 na hrbtni strani nosilca. Na vsak nosilec smo namestili precizen rotacijski nosilec RSP05 (proizvajalec »Thorlabs«) [174]. Ker je notranji premer nosilca znašal 12,7 mm in navoj 0,5 mm, premer MOS-a pa 3 mm, smo za pravilno prileganje izdelali pušo z ustreznim navojem in notranjim premerom za pravilno pritrditev MOS-a (Slika 3-5(b)).



Slika 3-5: a) Senzorski segment vstavljen v aluminijast U-profil; b) Komponente za vgradnjo MOS-a v aluminijast U-profil.

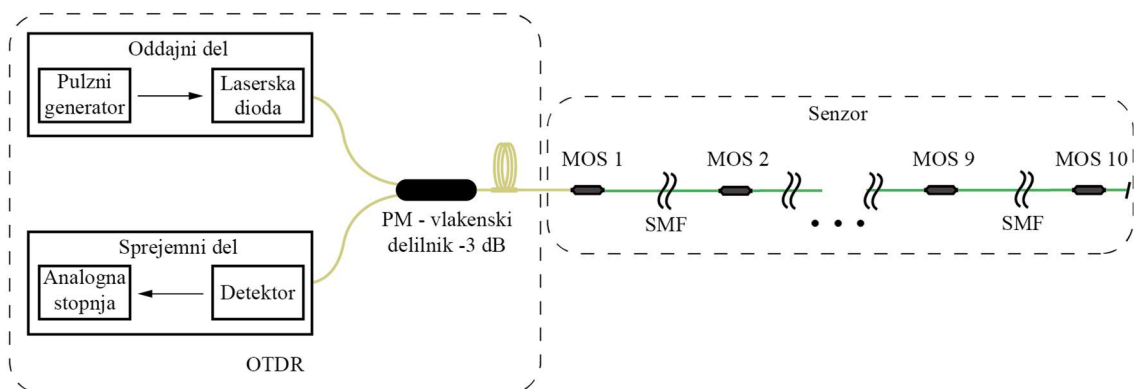
Pozornost smo posvetili načrtovanju nosilca, pri čemer smo želeli zagotoviti, da je senzor (MOS-i in vlakna) nameščen čim bolj v horizontalni osi vrtenja U-profila. MOS-e smo razporedili na medsebojni razdalji med 1,5 m in 1,7 m. Celoten senzor je tako v dolžino meril približno 16 m. Vlakna med MOS-i smo zvarili, pri čemer smo bili pozorni na čim manjše izgube na zvarih. Segmente smo med seboj napeli s silo približno 1 N. Za lažje rokovanje s senzorjem smo celotno postavitve (prek drsni puš) namestili na enajst stebričkov (Slika 3-6). Uporaba drsni puš je omogočila kontroliran zasuk/rotacijo celotnega senzorja ali posameznih segmentov. Izhodno vlakno iz zadnjega, desetega MOS-a smo pomočili v optični gel F1-0001V z lomnim količnikom 1,463 in s tem preprečili neželeni odboj.



Slika 3-6: Postavitev kvaziporazdeljenega senzorja rotacij/zasukov.

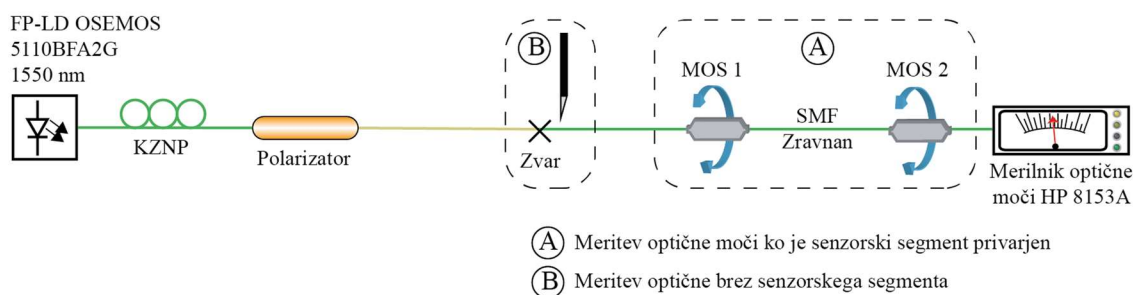
Niz MOS-ov v senzorju, povezanih s standardnim enorodovnim optičnim vlaknom, je postavljen na različnih razdaljah, zaradi česar smo za razločanje uporabili enostavni reflektometer v časovnem prostoru (OTDR). Pri meritvi v vlakno (senzor) pošljemo niz kratkih pulzov. Svetlobni pulzi se delno odbijejo od vsakega polprepustnega zrcala v MOS-ih. Posamezne odbite signale smo ločili po času prihoda v sprejemnik.

Za naš senzor smo zgradili preprost reflektometrični merilni sistem za generiranje in zajemanje (pretvorbo) optičnih signalov. Sistem OTDR je sestavljen iz oddajnega in sprejemnega dela, pri čemer sta le-ta povezana vsak z eno roko optičnega delilnika (Slika 3-7).



Slika 3-7: Sistem OTDR za senzor.

Iz rezultatov pri meritvah transmisije za senzorski segment, sestavljen iz dveh MOS-ov, smo lahko ocenili zalogo optične moči oddajnega dela sistema OTDR in potrebno minimalno občutljivost sprejemnega dela merilnega sistema OTDR. Po metodi vzratnega reza smo na merilni progi, prikazani na sliki 3-8, preverili transmissijske lastnosti senzorskega segmenta; tj. merili smo preneseno optično moč čez senzorski segment P_x (črtkano območje A) in optično moč pred senzorskim segmentom P_y (črtkano območje B) ter tako določili optične izgube za posamezni senzorski segment.

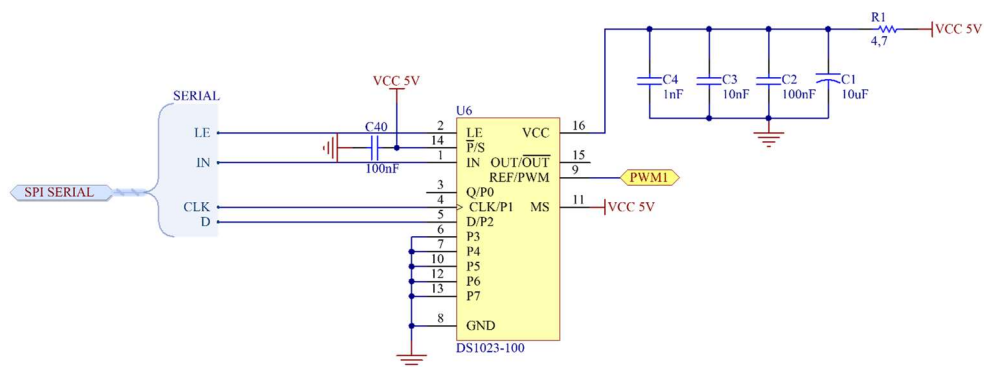


Slika 3-8: Merilna proga za meritve transmissijskih lastnosti na senzorskem segmentu.

Kot optični vir smo uporabili FP-lasersko diodo, ki smo ji z nastavljivim tokovnim virom nastavili tok 16,1 mA, pri katerem smo neposredno izmerili izhodno optično moč 1 mW. Ker laserska dioda ni bila sklopljena z vlaknom, ki ohranja polarizacijo, smo nepolarizirano svetlobo linearno polarizirali z zaporedno vezavo krmilnika za nadzor polarizacije (KZNP) in linearnega polarizatorja. Iz razmerja izmerjenih moči P_x/P_y so izgube na posameznem segmentu znašale $\alpha_{seg} = -1,05$ dB. Ob upoštevanju 9 segmentov v senzorski progi ter opravljeni dvojni poti je vsota izgub za vse segmente znašala $\alpha_{seg_proga} = -18,9$ dB. V primeru, ko sta osi sosednjih MOS-ov premaknjeni (v primeru

zasuka za kot manj kot 90°), smo določili zalogo optične moči, pri kateri bo dovolj visoko razmerje signal/šum omogočalo razločanje preostalih senzorskih segmentov ($\alpha_{rot} = -18,28$ dB). Pri določanju zaloge optične moči smo prav tako upoštevali izgube v optičnem delilniku, ki je del reflektometričnega merilnega sistema (Slika 3-7). Zaradi dvojnega preleta skozi delilnik smo upoštevali izgube $\alpha_d = -6.42$ dB. Skupne izgube v senzorju so tako znašale $\alpha_{sens} = \alpha_{seg_proga} + \alpha_{rot} + \alpha_d = -43,57$ dB.

Pri zasnovi oddajnega dela smo želeli zagotoviti preprosto integracijo s standardnimi mikrokrmilniki, zato smo za generiranje kratkih (ns) pulzov uporabili programirljivo zakasnilno vezje DS1023-100 (proizvajalec »Maxim«) [175]. Vezje glede na vhodni signal, ki je napetostno združljiv z večino mikrokrmilnikov (od 3,3 V do 5 V), omogoča programsko nastavljanje izhodne zakasnitve ali časa trajanja pulza med 1 ns in 255 ns po koraku 1 ns (Slika 3-9).

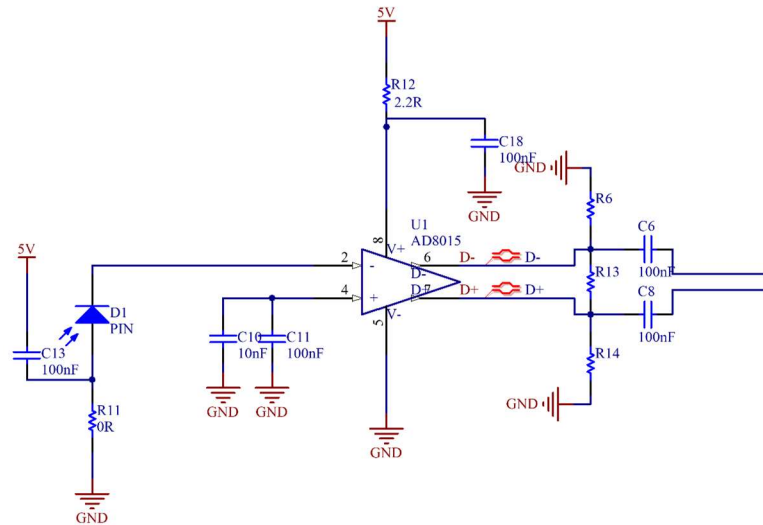


Slika 3-9: Programirljivo zakasnilno vezje DS1023-100.

Za programiranje preko serijskega vodila (SPI) in v PWM-načinu delovanja smo načrtovali zakasnilno vezje, ki generira pulz na vsako pozitivno fronto vhodnega signala. Čas trajanja pulza je programsko nastavljen od 1 ns do 255 ns, po koraku 1 ns. Naslednja komponenta oddajne enote je laserski gonilnik LMH6526 proizvajalca »Texas Instruments« [176], ki smo ga izbrali zaradi kratkih preklonih časov (1 ns), visokih izhodnih tokov (skupno do 600 mA), nizkega izhodnega šuma in napajanja (+5 V). Laserski gonilnik LMH6526 ima štiri neodvisne tokovne kanale, katerih maksimalni izhodni tokovi znašajo 150 mA in 300 mA. Izhodni tok na posameznem kanalu je sorazmeren z vhodnim tokom, ki ga nastavimo na posebnem pinu čipa. Maksimalni tok, ki še lahko steče po tem pinu, je 1 mA. Za nastavljanje toka na posameznem kanalu smo

izbrali 12-bitni štirikanalni digitalno-analogni pretvornik (DAC) MAX5842 proizvajalca »Maxim Integrated« [177]. Njegovo programiranje oz. nastavljanje izhodov poteka preko vodila I2C. Najvišja izhodna napetost na posameznem izhodu, nastavljena preko referenčnega vhoda, znaša 3,3 V. Z nastavljanjem napetosti na izhodih iz DAC od 0 V do 3,3 V oz. z nastavljanjem toka od 0 mA do 1 mA smo lahko precizno nastavljali maksimalne izhodne tokove na laserskem gonilniku. Razlog uporabe laserskega gonilnika z visokimi izhodnimi tokovi je v kratkih (ns) pulzih, s katerimi napajamo lasersko diodo. Za doseganje višje izhodne optične moči v pulznem režimu delovanja je potreben večji tok kot v režimu s konstantnim delovanjem. Ker DS1023-100 generira PWM-TTL-signal (5 V), laserski gonilnik pa za krmiljenje zahteva na vhode pripeljane nizkonapetostne diferencialne signale (LVDS), smo za konverzijo TTL- v LVDS-signal uporabili gonilnik SN75LVDS391 proizvajalca »Texas Instruments« [178]. Le-ta ima štiri TTL-vhode, ki podpirajo signale 5 V, štiri LVDS-izhode, preklopni čas 1.6 ns in napajanje +3.3 V. Kot optični vir smo uporabili FP-lasersko diodo OSMFLP-5110BFA2G proizvajalca »Osemos« [179] z valovno dolžino 1,55 μm in izhodno močjo 1,8 mW pri konstantnem toku 30 mA.

Pri načrtovanju analogne stopnje sprejemnega dela merilnega sistema OTDR smo upoštevali zahteve po zadostni občutljivosti, ki smo jo določili preko izračuna zaloge optične moči in pasovne širine, potrebne za učinkovit zajem celotne senzorske proge. Ob upoštevanju nastavljene širine pulza laserskega vira (približno 3 ns) ter povprečne razdalje 1,6 m med posameznimi MOS-i, kar skupno znese približno 200 ns, zadostuje pasovna širina nekaj 100 MHz. Kot fotodetektor smo uporabili PIN-fotodiodo OSMPDPS-1102ANS0 proizvajalca »Osemos« [180] z občutljivostjo 0,9 A/W ter nizko kapacitivnostjo (0,6 pF). PIN-fotodiodo smo nato povezali na transimpedančni ojačevalnik AD8015 proizvajalca »Analog Devices« [181] (Slika 3-10).



Slika 3-10: Vežje s PIN fotodiode in transimpedančnim ojačevalnikom AD8015.

Le-ta ima odzivnost -36 dBm (pri BER 10^{-10}), fiksno nastavljeno notranje ojačenje, vzponski čas $1,5$ ns ter nizki vhodni tokovni šum $3,0$ pA/vHz. Karakteristika izhodne napetosti v odvisnosti od vhodnega toka pri AD8015 je linearna po celotnem področju, razen v bližini zasičenja. Ker ima AD8015 pri delovni temperaturi 25 °C linearno karakteristiko v področju med -40 μ A in 40 μ A, smo iz podatka odzivnosti PIN-fotodetektorja in faktorja optičnih izgub v senzorski progi s pomočjo izraza (3.4) izračunali najvišjo dopustno optično moč oddajnega dela (P_{opt_max}), pri kateri transimpedančni ojačevalnik ne pride v zasičenje.

$$P_{opt_max} = \frac{I_{IN_AD8015}}{R_{O_PIN}} \cdot \alpha_{sens} = 12,22 \text{ dBm} \quad (3.4)$$

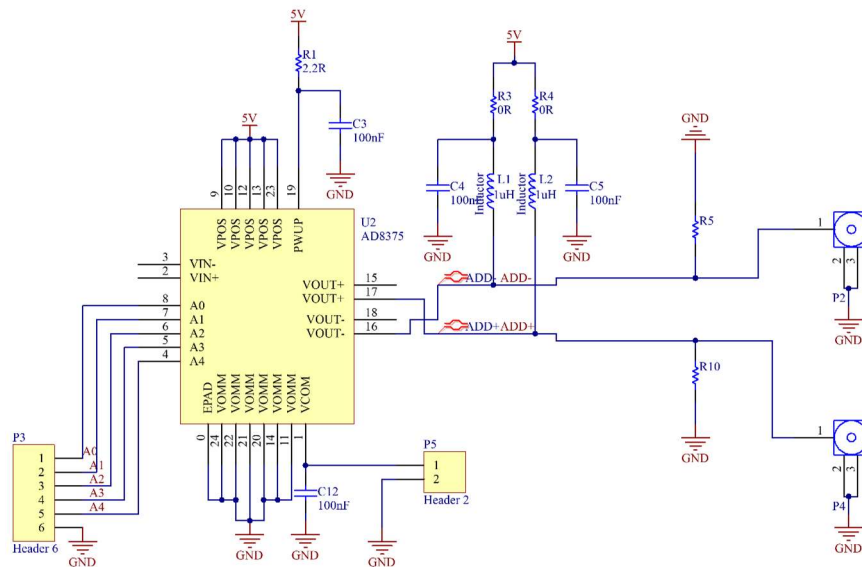
kjer so:

I_{IN_AD8015} – maksimalni vhodni tok na AD8015,

R_{O_PIN} – odzivnost PIN-fotodiode,

α_{sens} – faktor optičnih izgub v senzorski progi.

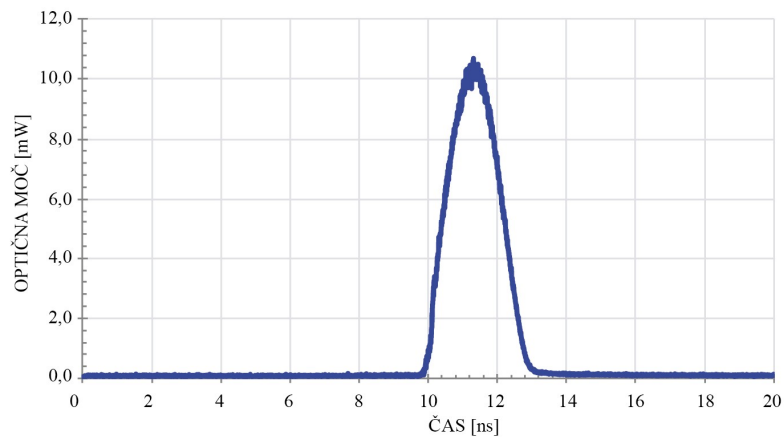
Napetost iz transimpedančnega ojačevalnika smo nato še dodatno ojačali z uporabo programsko nastavljivega ojačevalnika AD8375 proizvajalca »Analog Devices« [182] s pasovno širino 630 MHz in nastavitvijo ojačenja od -4 dB do $+20$ dB po koraku 1 dB preko pet bitnega paralelnega vmesnika s standardnimi TTL-nivoji in napajanjem $+5$ V (Slika 3-11).



Slika 3-11: Vežje z nastavljivim operacijskim ojačevalnikom (AD8375).

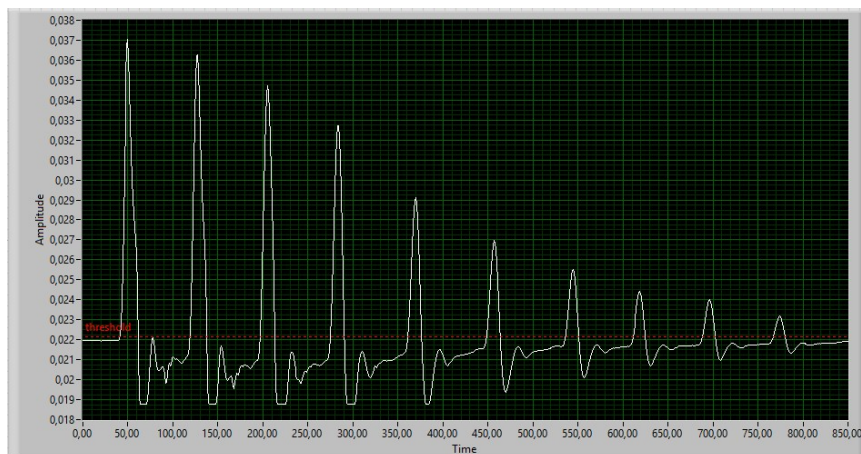
Analogno stopnjo sprejemnega dela OTDR-a smo priključili na digitalni osciloskop »Tektronix« MDO4104B-6 s pasovno širino 1 GHz, hitrostjo vzorčenja 5 GS/s, enajst bitno vertikalno ločljivostjo in omrežnim (LAN) vmesnikom s podporo za LXI-standard (ang. »LAN eXtensions for Instrumentation«). Osciloskop smo preko omrežnega (LAN) vmesnika priključili na računalnik z nameščenim LabView okoljem, s katerim smo zajemali in obdelovali signale iz senzorskega sistema.

Iz podatkov o izgubah v senzorju ($-43,57$ dB), ki smo jim dodali še 1 dB rezerve, smo določili potrebno izhodno moč iz optičnega vira +10 dBm. Ker smo optični vir pulzno modulirali, smo z laserskim gonilnikom povečali izhodno moč iz nazivnih 1,8 mW na slabih 11 mW (10,42 dBm). Širino pulza smo nastavili približno na 2 ns. Jakost in širino optičnega pulza smo preverili z optičnim vzorčevalnim osciloskopom HP 83480A (Slika 3-12).



Slika 3-12: Svetlobni pulz, posnet z optičnim vzorčevalnim osciloskopom HP 83480A.

Signale iz osciloskopa smo obdelali s pomočjo razvojnega okolja LabView, v katerem smo napisali aplikacijo za obdelavo zajetih signalov. Z uporabo posebnih knjižnic smo z osciloskopom vzpostavili povezavo preko omrežnega vmesnika. Sprotno zajet signal (Slika 3-13 – zajeti surov signal odbitih vrhov) smo obdelovali z uporabo integriranih virtualnih inštrumentov za signalno procesiranje. V naši aplikaciji je bil najpomembnejši virtualni inštrument za iskanje vrhov (ang.: »Peak Detector VI«), ki za iskanje vrhov uporablja napredne algoritme, s katerimi v zajetem signalu poišče lokacijo in amplitudo vrha.



Slika 3-13: Zajet signal s senzorja v okolju LabView.

Za potrebe preizkusa/testiranja senzorja smo aplikacijo načrtovali tako, da njen zagon/inicializacija deluje v treh korakih. Prvi korak omogoča precizno, mehansko nastavljanje in sprotno spremljanje amplitud posameznih vrhov z uporabo rotacijskih nosilcev, s čimer je senzor/senzorske segmente mogoče prednastaviti v dva načina

delovanja, in sicer v način delovanja senzorja, v katerem ni mogoče zaznati smeri zasuka/rotacije, in v način, v katerem je mogoče zaznati smer zasuka/rotacije. Oba načina bomo podrobneje opisali v poglavju 3.3.1. Po končani prednastavitvi sledi korak, v katerem aplikacija iz amplitud sosednjih vrhov izračuna korekcijske faktorje za posamezne senzorske segmente, ki se shranijo v delovni spomin in se uporabljajo pri izračunu kota rotacije/zasuka. Zadnji, tretji korak pa je namenjen izvajanju meritev s senzorjem, kjer je mogoče spremljati modulacijo amplitude vrhov ter izračunane kote zasukov za posamezni senzorski segment.

3.3.1 Delovanje senzorja

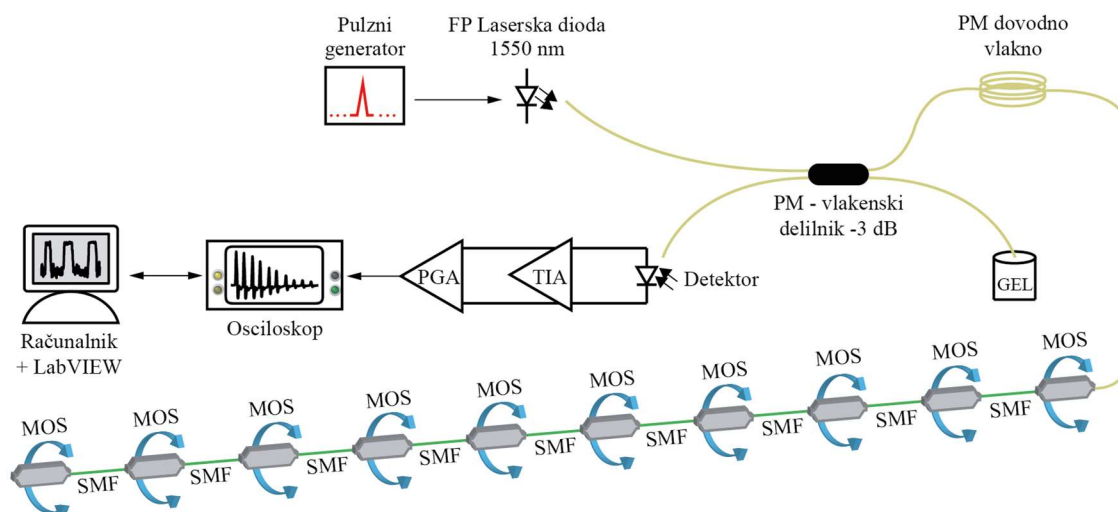
Senzor je mogoče nastaviti tako, da deluje v dveh načinih, in sicer v načinu, v katerem ni mogoče zaznati smeri rotacije/zasuka, ter v načinu, v katerem je mogoče zaznati smer rotacije/zasuka. V načinu, ko ni mogoče zaznati smeri rotacije/zasuka, so optične osi MOS-ov poravnane oz. vzporedne. Ta način omogoča maksimalno preneseno optično moč skozi vse segmente, ko je senzor poravnan. Zasuk/rotacija posameznega segmenta povzroči enako modulacijo optične moči, kar pomeni, da se razmerje odbite moči med sosednjima vrhovoma (segmenta) se spremeni za enak iznos, ne glede na to, ali je zasuk/rotacija v smeri urinega kazalca ali v nasprotni smeri urinega kazalca, iz česar lahko določimo le velikost zasuka posameznega segmenta. V takšni konfiguraciji skupni zasuk/rotacija vseh senzorskih segmentov znaša do približno 80° . Pri kotih, večjih od 80° , upade odbit signal na nič; skratka, amplituda prenesene optične moči na posameznih segmentih (predvsem tistih na koncu senzorja) je prenizka za kvalitetno razločanje. V načinu, pri katerem lahko določimo smer rotacije/zasuka, je potrebno MOS-e prednastaviti oz. optične osi spraviti iz vzporedne poravnave za znan (prednastavljen) kot rotacije/zasuka. Prednastavitev lahko opravimo v smeri urinega kazalca ali v nasprotni smeri urinega kazalca. S prednastavitvijo pride do spremembe začetnega razmerja med sosednjima vrhovoma segmenta, ki se potem ob zasuku/rotaciji v eni smeri povečuje, ob zasuku/rotaciji v drugi smeri pa zmanjšuje. S tem lahko iz spremembe razmerja sosednjih vrhov (segmenta) glede na prednastavljeno začetno razmerje določimo smer rotacije/zasuka. Prednastavitev lahko opravimo na vsakem senzorskem segmentu ali na le izbranih segmentih. S prednastavljanjem na senzorju/senzorskem

segmentu zmanjšamo merilno območje senzorja/segmenta za prednastavljen kot oz. za vsoto prednastavljenih kotov.

Zasnova senzorja pri zasuku segmentov vzdolž optičnega vlakna, ki povezuje MOS-e, zagotavlja enakomerno porazdelitev torzijske napetosti in s tem preprečuje lokalizirana makroukrivljanja vlakna, ki bi lahko vplivala na spremembe stanja polarizacije kot posledica nepričakovanih in nekontroliranih rotacij merjenca. Pri zasuku/rotaciji enorodovnega optičnega vlakna nastopi v njem elastooptični pojav, kar privede do nastajanja krožne dvolomnosti, ki povzroči zasuk vektorja električne poljske jakosti. Zasuk vektorja električne poljske jakosti, ki je majhen za kote mehanskega zasuka do 45° [124], se v primeru našega senzorja zaradi opravljene dvojne poti svetlobnega vala po vseh povezovalnih vlaknih izniči in ne vpliva na delovanje senzorja.

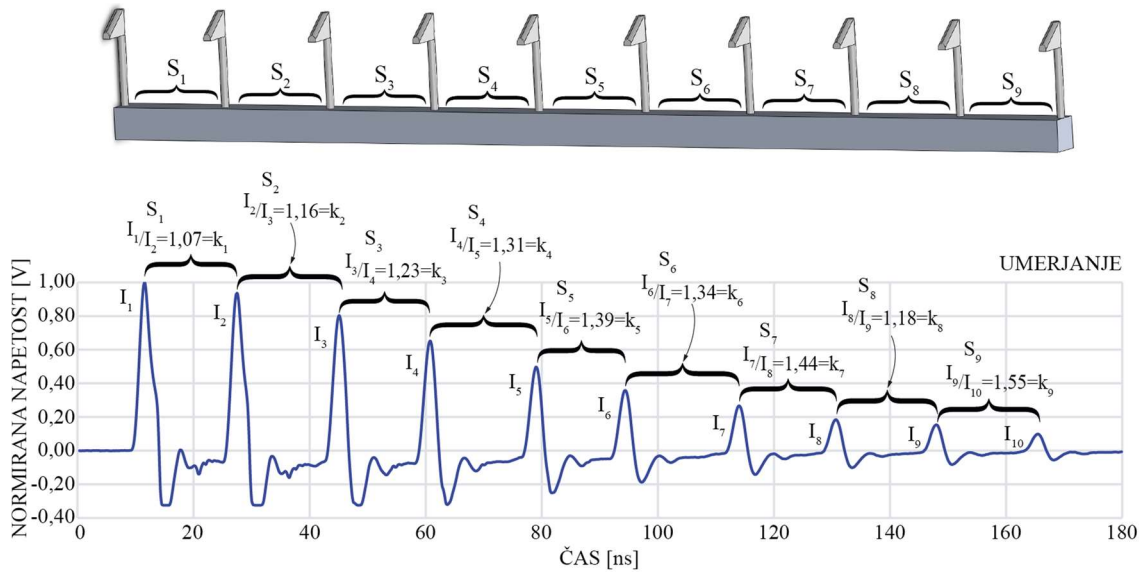
3.4 Eksperimentalni rezultati

Postavitev merilne proge kvaziporazdeljenega senzorja rotacije/zasuka/torzije je prikazana na sliki 3-14.



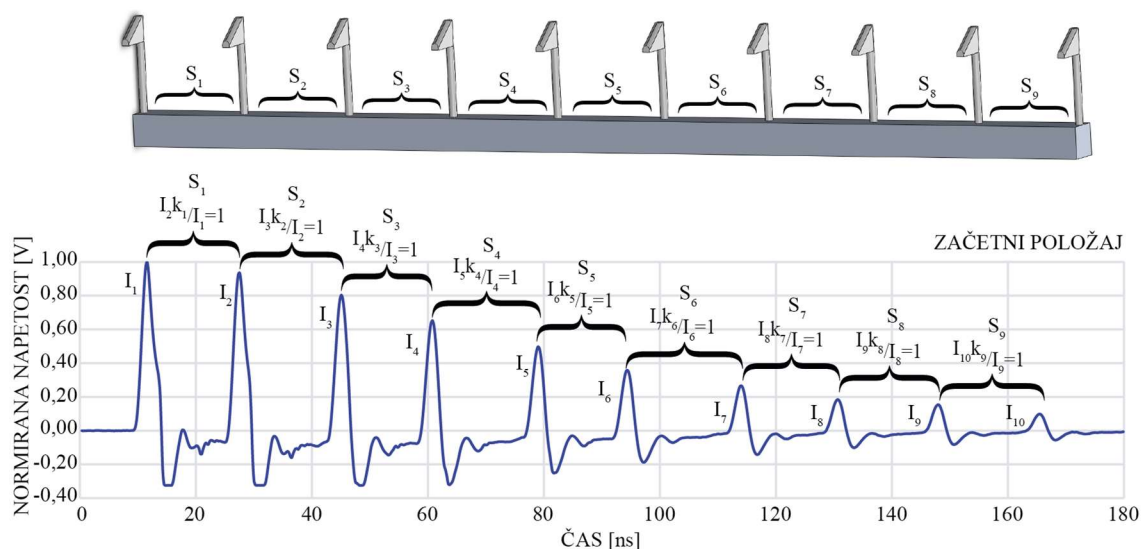
Slika 3-14: Postavitev merilne proge kvaziporazdeljenega senzorja rotacij/zasukov.

Senzor je zgrajen iz desetih MOS-ov, ki tvorijo devet senzorskih segmentov, občutljivih na zasuk/rotacijo. Prvi MOS v senzorski progi je povezan preko vlakna, ki ohranja polarizacijo, in vlakenskega delilnika (-3 dBm) z optičnim virom na eni roki in sistemom za meritev odbojev/amplitud posameznih polprepustnih zrcal (vgrajenih v MOS-e) na drugi roki vlakenskega delilnika. Pred pričetkom meritev smo senzor umerili tako, da smo vzporedno poravnali optične osi vseh MOS-ov; skratka, na vseh segmentih smo nastavili kot zasuka na 0° ter stanje zajeli s sistemom za razločanje. Prikaz po opravljenem umerjanju je predstavljen na sliki 3-15, kjer lahko vidimo vrhove, ki predstavljajo odboje svetlobe od posameznih polprepustnih zrcal, vgrajenih v MOS-e. Posledice vstopnih izgub, izgub na zvarih ter variacij odbojnosti polprepustnih zrcal so vidne, ko se amplitude posameznih vrhov neenakomerno znižujejo z oddaljevanjem od svetlobnega vira (detektorja). V umerjenem stanju senzorja smo nato iz razmerij sosednjih vrhov določili korekcijske faktorje k za vsak posamezni senzorski segment ter jih shranili v podatkovno polje programa, kjer smo jih potrebovali, da smo po enačbi (3.3) računali kote zasukov posameznih segmentov.



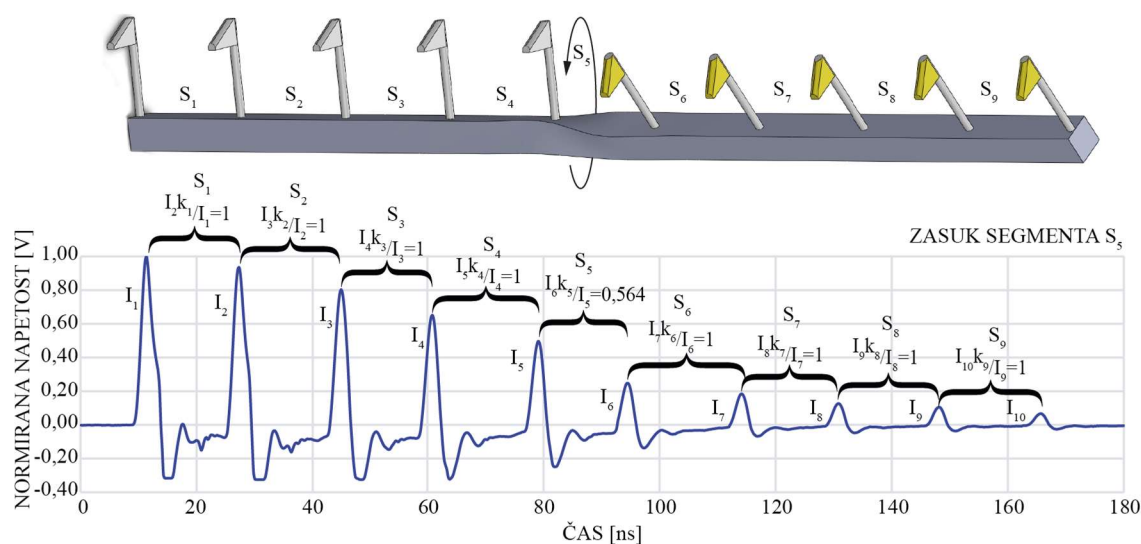
Slika 3-15: Umerjanje senzorna – določitev korekcijskega faktorja k za posamezni senzorski segment. Vse osi polarizatorjev so poravnane.

Z opisanim načinom umerjanja smo senzor nastavili za delovanje v načinu, pri katerem ni mogoče določiti smeri rotacije/zasuka. Da bi čim nazorneje prikazali možnost merjenja zasuka posameznih segmentov, smo senzor izpostavili različnim situacijam, pri katerih smo sukali različne senzorske segmente. Na slikah 3-17 do 3-25 so prikazani časovni odzivi (OTDR) senzorna pri različno zasukanih senzorskih segmentih. Prav tako so vidna izračunana razmerja med sosednjimi vrhovi, pri katerih smo upoštevali korekcijski faktor k . Z vstavljanjem izračunanih (in korigiranih) razmerij v enačbo (3.3) lahko neposredno izračunamo kot zasuka/rotacije posameznega senzorskega segmenta. V prvem primeru (Slika 3-16) ni bil noben senzorski segment izpostavljen zasuku/rotaciji, zato so razmerja sosednjih vrhov enaka 1, kar je enako kotu rotacije/zasuka 0° .



Slika 3-16: Začetni položaj senzorja – celotno polje je poravnano.

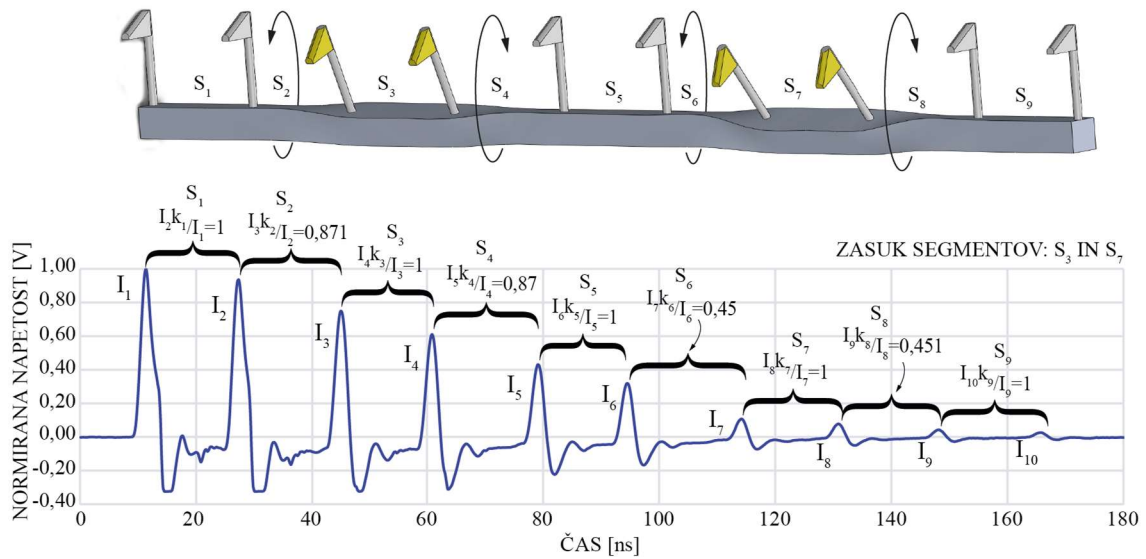
V naslednjem primeru (Slika 3-17) smo zasukali le peti senzorski segment za mehanski kot 30° , preostale segmente pa nismo izpostavili rotaciji/zasuku. Razmerje vrhov, ki niso bili podvrženi rotaciji/zasuku, je ostalo na 1, razmerje sosednjih vrhov petega segmenta pa je padlo na 0,564. Iz tega razmerja smo po enačbi (3.3) izračunali $29,94^\circ$, kar se ujema z nastavljenim mehanskim kotom (30°).



Slika 3-17: Zasuk petega segmenta – S5.

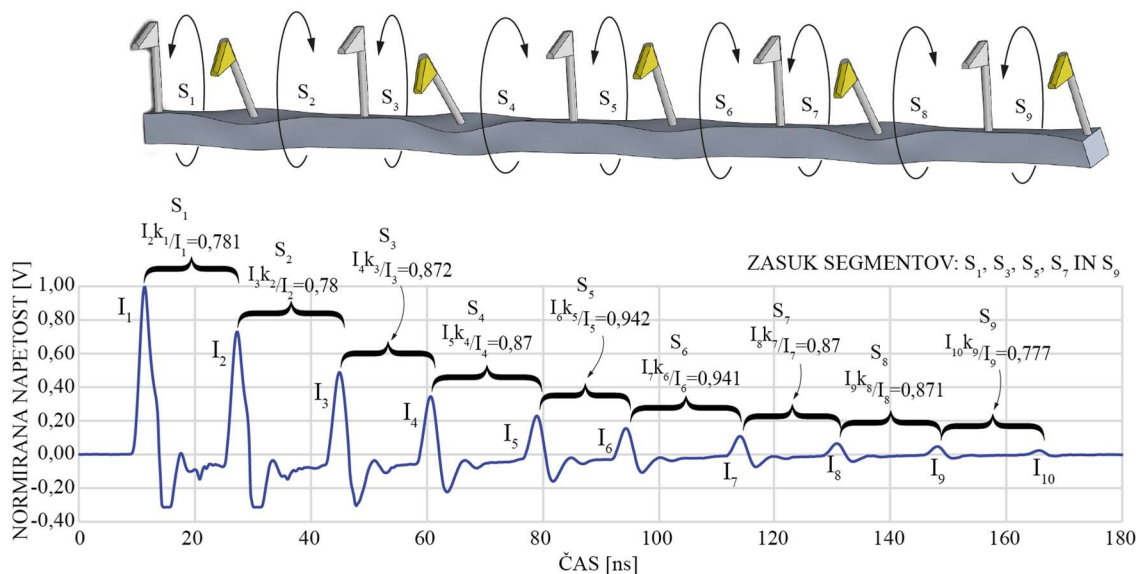
Primer na sliki 3-18 kaže situacijo, ko smo v celoti zasukali tretji in sedmi segment, kar je povzročilo zasuk/rotacijo drugega, četrtega, šestega in osmega segmenta. Celotni tretji segment smo zasukali za mehanski kot 15° , kar je povzročilo spremembo razmerja pri drugem segmentu (z 1 na 0,871) ter na četrtem segmentu (z 1 na 0,87). Če

spremenjeni razmerji vstavimo v enačbo (3.3), izračunamo kota $14,97^\circ$ in $15,03^\circ$. Pri sedmem segmentu, ki smo ga zasukali za mehanski kot 35° , pa je prišlo do spremembe razmerij z 1 na 0,45 pri šestem segmentu in z 1 na 0,451 pri osmem segmentu, kar ob upoštevanju enačbe (3.3) poda izračunana kota $35,01^\circ$ in $34,97^\circ$. Pri tem primeru je prišlo med drugim in četrtem ter med šestim in osmim segmentov do zasukov v obratnih smereh, ki pa jih v opisanem načinu delovanja ni mogoče določiti.



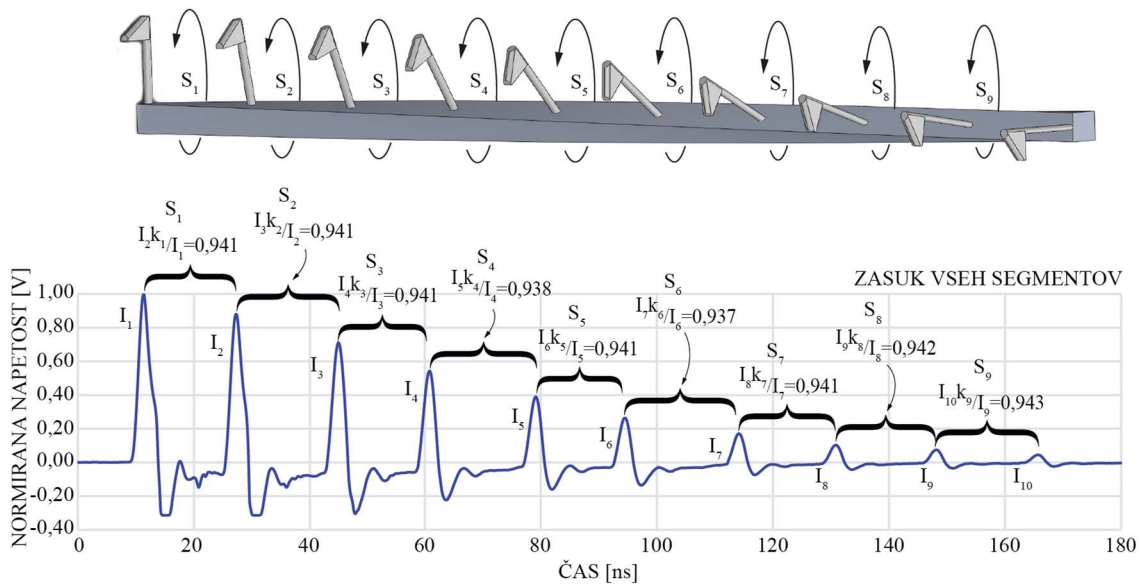
Slika 3-18: Zasuk segmentov S₃ in S₇.

Naslednji primer (Slika 3-19) kaže zaporedno sukanje segmentov, kjer sta sosednja segmenta izpostavljena enakemu zasuku, vendar v nasprotnih smereh. Smeri zaradi načina začetne postavitve senzorja ni mogoče določiti, na kar kažejo tudi enake spremembe razmerij med sosednjima segmentoma. Tako smo za mehanske zasuke – 20° , $+20^\circ$, -15° , $+15^\circ$, -10° , $+10^\circ$, -15° , $+15^\circ$ in -20° na posameznih segmentih odčitali spremembe razmerij prvega segmenta z 1 na 0,781, z 1 na 0,78 na drugem segmentu, z 1 na 0,872 na tretjem segmentu, z 1 na 0,87 na četrtem segmentu, z 1 na 0,942 na petem segmentu, z 1 na 0,941 na šestem segmentu, z 1 na 0,87 na sedmem segmentu, z 1 na 0,871 na osmem segmentu ter sprememba z 1 na 0,777 na devetem segmentu. Po vstavljanju dobljenih razmerij v enačbo (3.3) smo izračunali kote $19,93^\circ$, $19,98^\circ$, $14,91^\circ$, $15,03^\circ$, $9,88^\circ$, $9,97^\circ$, $15,03^\circ$, $14,97^\circ$ in $20,13^\circ$.



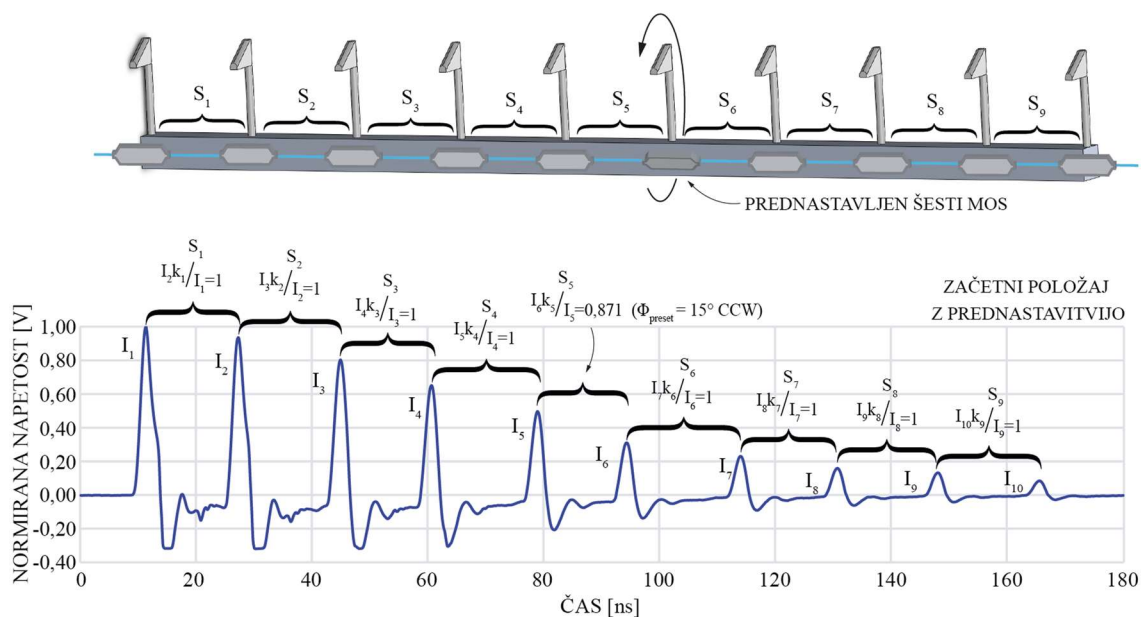
Slika 3-19: Zasuk segmentov S₁, S₃, S₅, S₇ in S₉.

Nazadnje smo v načinu brez možnosti določitve smeri rotacije/zasuka izvedli še zasuk celotnega senzorja, tj. enakomeren zasuk po celotni dolžini, pri čemer je na posameznem segmentu prišlo do spremembe povprečno 0,941, kar pri vstavljanju v enačbo (3.3) vrne vrednost 9,996° na segment. Vsota rotacij/zasukov vseh devetih senzorskih segmentov senzorja je tako znašala približno 90° po celotnem senzorju (Slika 3-20). Odstopanja med razmerji (vrhov) so nastala zaradi majhnih razlik v rotaciji/zasuku med posameznimi segmenti, ki so nastale zaradi različnih razdalj med segmenti (MOS-i). Tako sta četrty in šesti segment zaradi večje razdalje izkazala večjo spremembo zasuka/rotacije kot preostali segmenti.



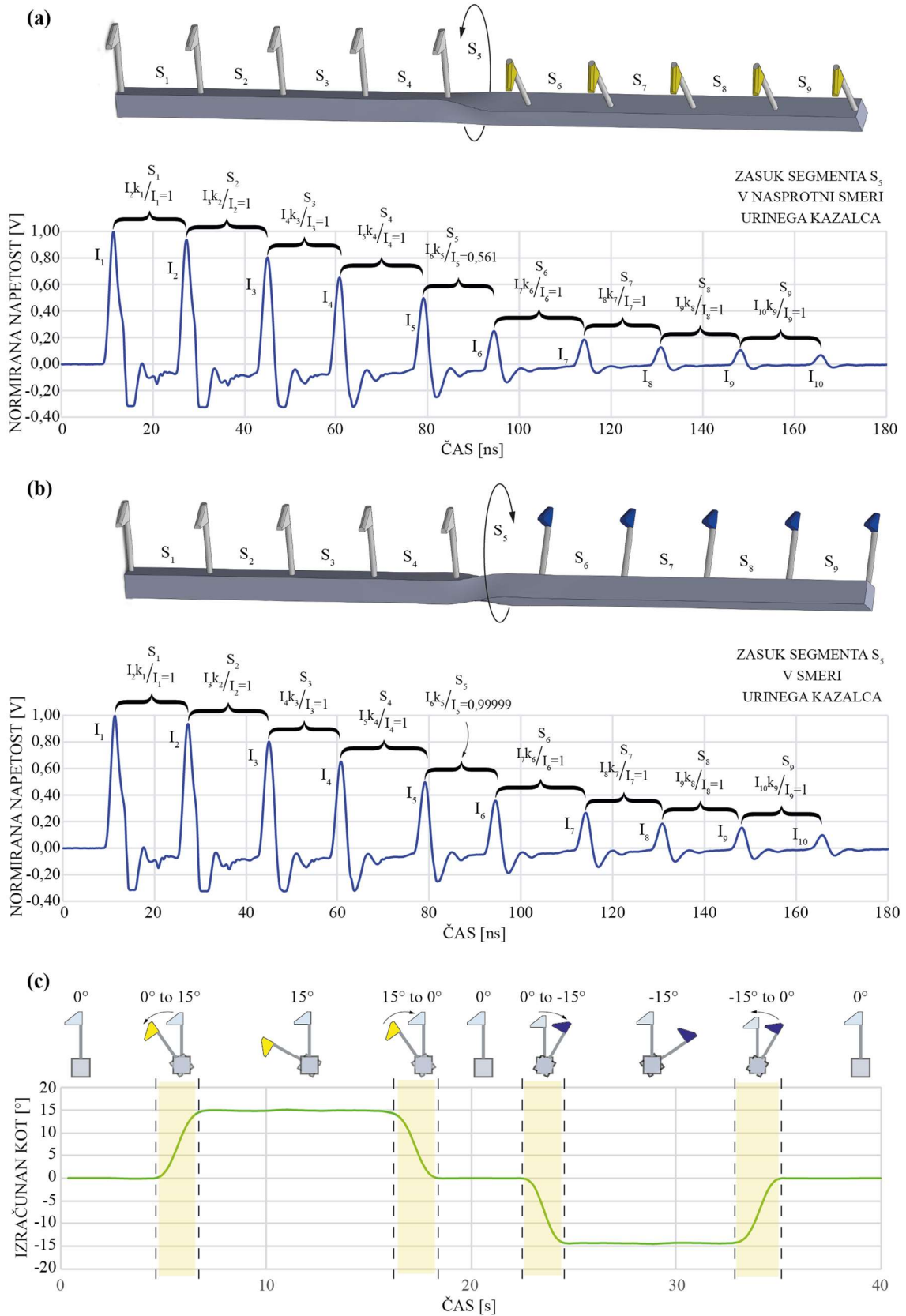
Slika 3-20: Zasuk vseh segmentov.

V naslednjem koraku smo kvaziporazdeljen senzor rotacije/zasukov nastavili za delovanje v načinu, v katerem je mogoče zaznavati smer rotacije/zasuka. Kot pri načinu, kjer ni mogoče zaznati smeri rotacije/zasuka, smo najprej poravnali optične osi vseh MOS-ov ter izračunali korekcijske faktorje k za posamezni vrh/segment. V naslednjem koraku smo prednastavili oz. zasukali željene segmente za znani kot. Pri tem sta pomembna smer zasuka prednastavljenega kota bodisi v smeri urinega kazalca bodisi v nasprotni smeri urinega kazalca in prednastavljen kot zasuka. Oboje določa merilno območje, v katerem je mogoče določiti smer rotacije/zasuka. Prav tako vsota kotov prednastavljenih segmentov ne more presegati 80° – 90° . Prvi preizkus senzorja v načinu, v katerem je mogoče zaznati smer rotacije/zasuka, smo najprej izvedli na petem segmentu (Slika 3-21).



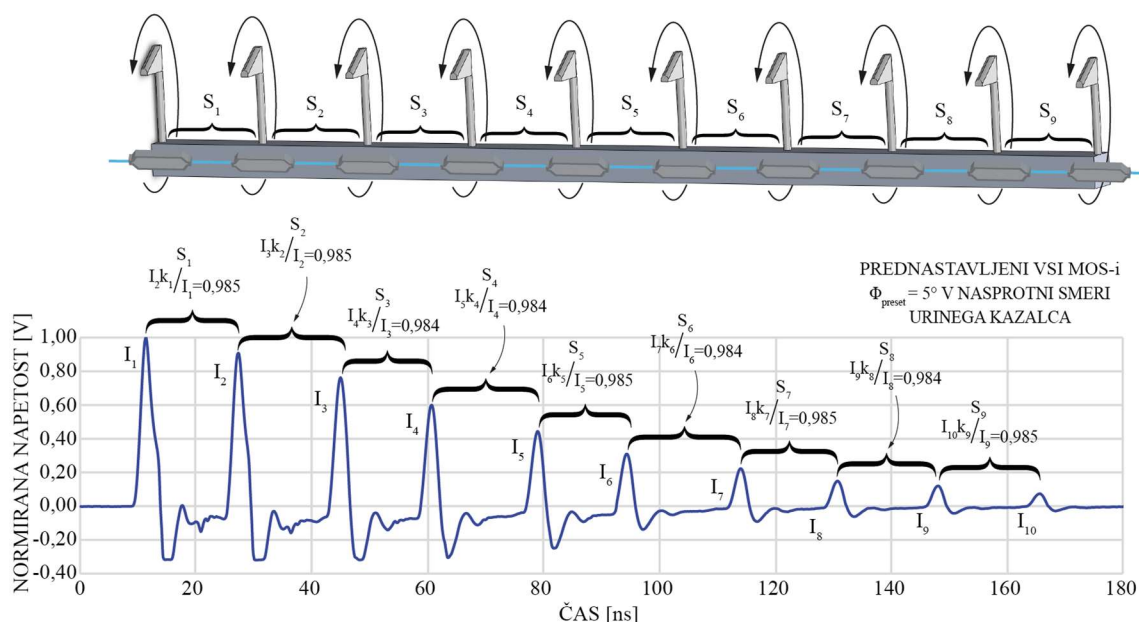
Slika 3-21: Prednastavljen šesti MOS za kot 15°.

Pri tem smo optično os šestega MOS-a zasukali v nasprotni smeri urinega kazalca za mehanski kot 15°. S tem se je razmerje med petim in šestim vrhom spremenilo z 1 na 0,871, kar je z enačbo (3.3) izračunan kot 14,97°. Tako smo peti segment nastavili/pripravili za delovanje v načinu, kjer lahko zaznamo smer rotacije/zasuka za 15° v smeri urinega kazalca in 75° v nasprotni smeri urinega kazalca. Ko smo peti segment zasukali v smeri urinega kazalca za mehanski kot 15°, je razmerje vrhov zrastle z 0,871 na 0,99999, iz česar smo po enačbi (3.3) izračunali kot zasuka 0,12°. (Slika 3-22(a)) Pri zasuku petega segmenta v nasprotni smeri urinega kazalca za mehanski kot 15° je razmerje med petim in šestim vrhom padlo z 0,871 na 0,561, kar z izračunom (enačba (3.3)) poda kot 30,06° (Slika 3-22(b)). Dejansko vrednost mehanskega (izračunanega) kota in smeri zasuka nato izračunamo kot razliko med nastavljenim in prednastavljenim kotom. Kot v smeri urinega kazalca smo tako določili s $\varphi_{SS_CW} = 0,12^\circ - 15^\circ = -14,88^\circ$, kot v nasprotni smeri urinega kazalca pa s $\varphi_{SS_CCW} = 30,06^\circ - 15^\circ = 15,06^\circ$. Spremembo kota smo zajeli še z aplikacijo LabVIEW pri postopnem zasuku/rotaciji petega segmenta iz prednastavljenega začetnega položaja v nasprotni smeri urinega kazalca za 15°, zatem nazaj v prednastavljeni položaj, iz katerega v smeri urinega kazalca za 15° ter naposled nazaj v prednastavljeni začetni položaj (Slika 3-22(c)).



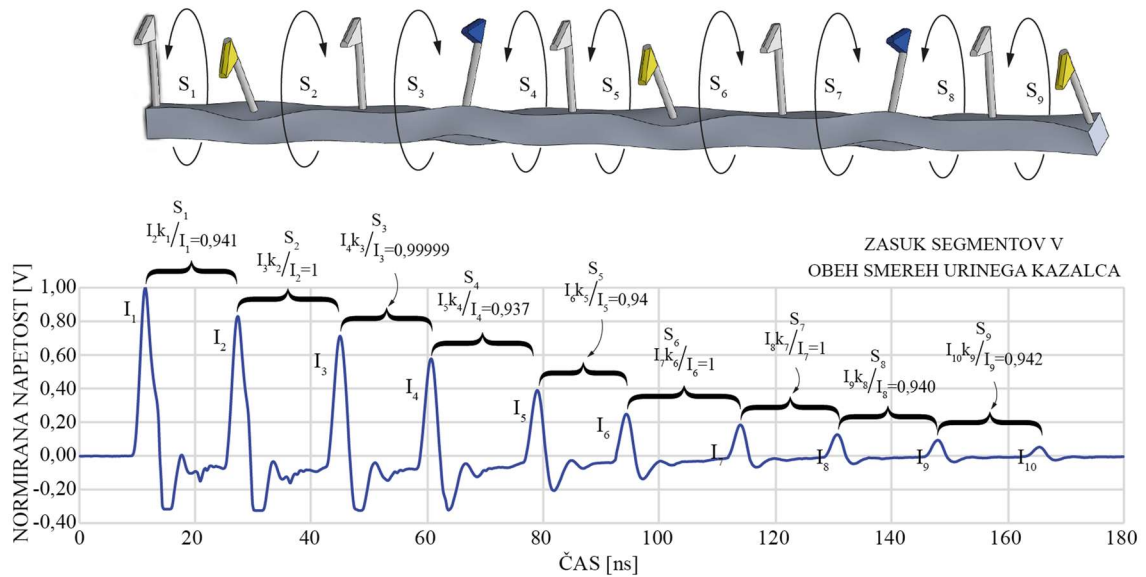
Slika 3-22: Sprememba razmerja vrhov na petem segmentu pri zasuku v a) nasprotni smeri urinega kazalca in b) v smeri urinega kazalca ter c) izračunan kot zasuka.

V drugem preizkusu delovanja senzorja v načinu, v katerem je mogoče zaznati smer rotacije/zasuka, smo prednastavili vse segmente v nasprotni smeri urinega kazalca za 5° , pri čemer je prišlo do spremembe razmerij vrhov z 1 na povprečno vrednost 0,985 (Slika 3-23).



Slika 3-23: Zajet signal, ko so vsi MOS-i prednastavljeni za kot 5° .

Nato smo za mehanski kot 5° zasukali v nasprotni smeri urinega kazalca prvi, peti in deveti segment, tretji in sedmi segment pa za mehanski kot 5° v smeri urinega kazalca. Zasuki so na prvem, tretjem in devetem segmentu povzročili dodatno znižanje razmerja z 0,985 na 0,941, na tretjem in sedmem segmentu pa zvišanje razmerja z 0,985 na približno 1. Omenjeni zasuki so na drugem, četrtem šestem in osmem segmentu povzročili rotacije v nasprotnih smereh (drugi in šesti segment sta se v nasprotju s prvim in petim zasukala v smeri urinega kazalca, četrta in osmi segment pa sta se v nasprotju z tretjim in sedmim zasukala v nasprotni smeri urinega kazalca) (Slika 3-24).



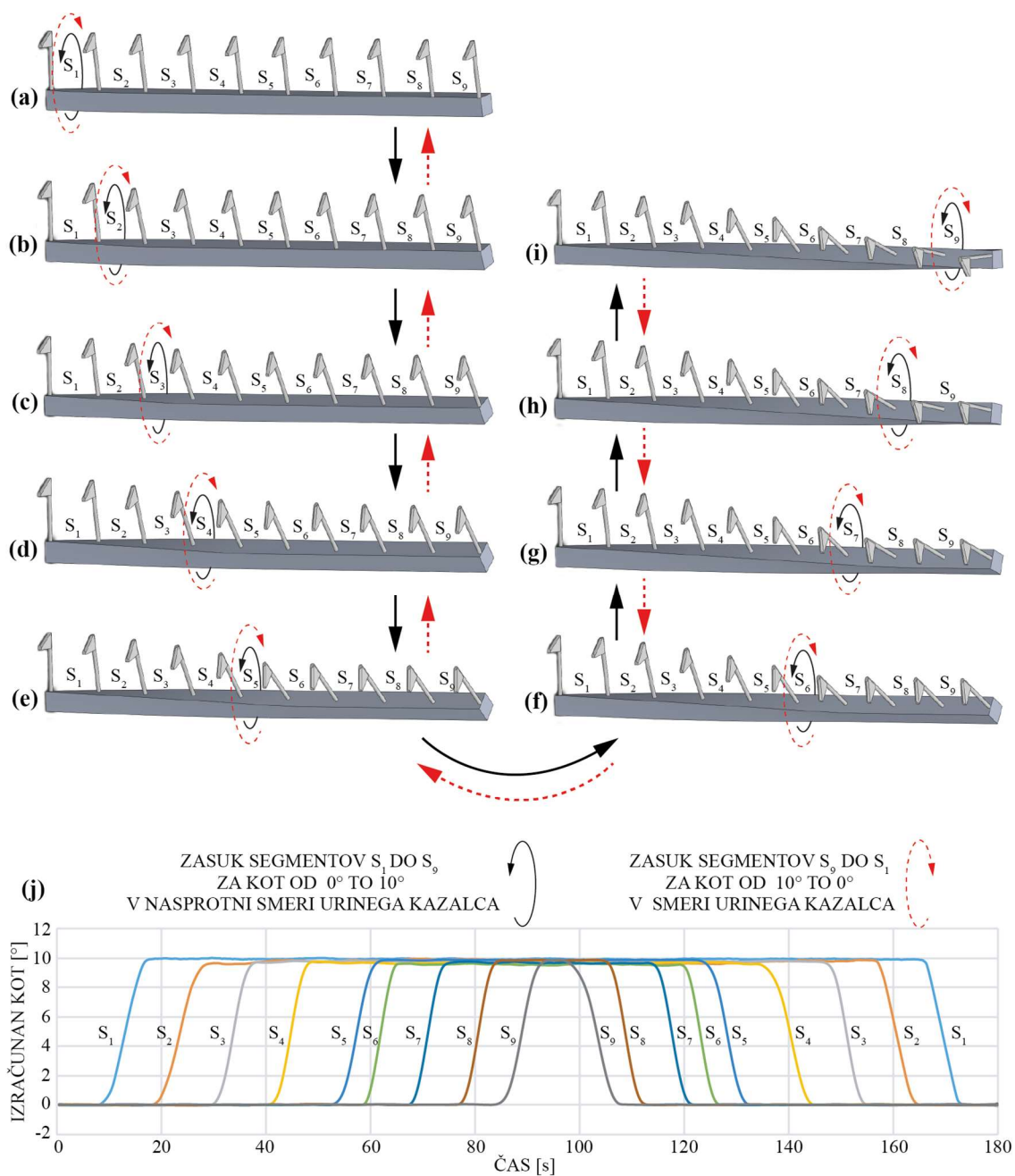
Slika 3-24: Zajeti signal, ko so segmenti zasukani za kot 5° v nasprotni smeri urinega kazalca (rumene zastavice) in v smeri urinega kazalca (modre zastavice).

Izračunani koti (po enačbi (3.3)) so tako imeli vrednosti 4,98°, -4,97°, -5,02°, 5,16°, 5,07°, -5,14°, -4,98°, 4,91°, 4,94°, ki se skladajo z mehanskim zasukom na posameznem senzorskem segmentu.

Razlika med mehanskimi in izračunanimi koti v predstavljenih poskusih ni presegala 0,15°. Če ob tem upoštevamo merilno negotovost kotomera v iznosu 0,2°, lahko trdimo, da absolutni pogrešek senzorja ni presegel 0,4°.

Zanimiv prikaz delovanja senzorja je predstavljen v naslednjem primeru. Senzor smo nastavili v način delovanja, pri katerem ni mogoče zaznati smeri rotacije/zasuka. Segmente smo sukali zaporedno enega po enega za mehanski kot 10° v nasprotni smeri urinega kazalca, začenši s prvim segmentom. Tako smo celotni sensor zasukali za skupni kot 90° (Slika 3-25(a) do (i) – smer zasuka v nasprotno smer urinega kazalca je označena s črnimi puščicami). Zatem smo postopek ponovili, a tokrat v obratni smeri, začenši s sukanjem/rotacijo zadnjega segmenta za mehanski kot 10° v smeri urinega kazalca, in tako zaporedoma z vsakim segmentom do prvega senzorskega segmenta, dokler senzorja nismo postavili v začetno stanje (Slika 3-25(i) do (a) – smer zasuka v smeri urinega kazalca je označena z rdečimi črkanimi puščicami). Sproti smo s pomočjo aplikacije LabVIEW opazovali spremembo kota za vsak posamezni senzorski segment,

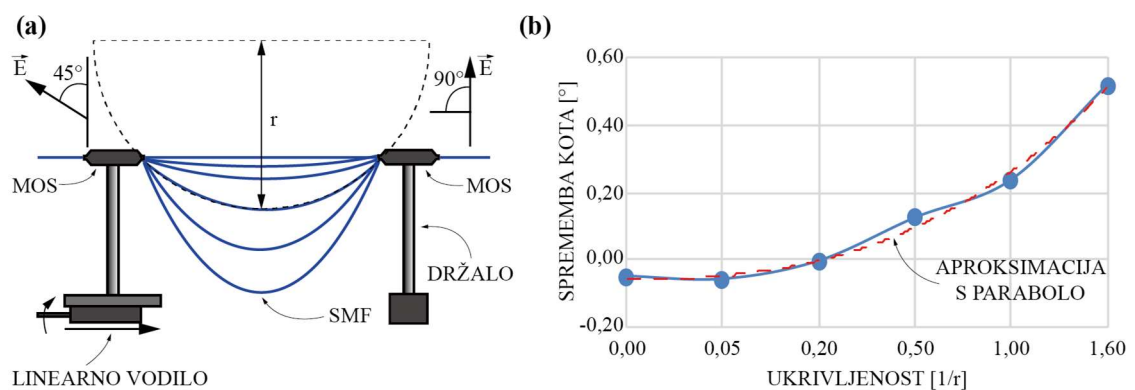
najprej pri zasuku v nasprotni smeri urinega kazalca (do skupnega zasuka 90°), zatem pa pri zasuku v smeri urinega kazalca, tj. do začetnega stanja (Slika 3-25(j)).



Slika 3-25: (a-f) Zasuk posameznih segmentov iz začetnega položaja za 10° v nasprotni smeri urinega kazalca, nato zasuk posameznega segmenta v smeri urinega kazalca za 10° v začetni položaj; (j) Izračunani koti posameznih zasukanih segmentov.

V uvodu smo že omenili, da pride pri upogibanju standardnega enorodovnega optičnega vlakna do pojava linearne dvolomnosti, ki lahko povzroči spremembo stanja polarizacije in s tem dodatne pogreške pri merjenju kotov rotacije/zasuka. Zato smo na

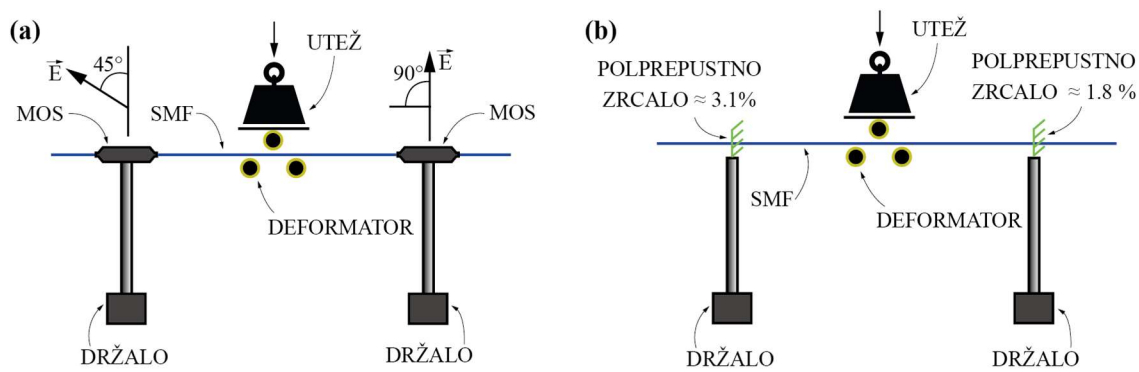
enem segmentu (med dvema MOS-oma) raziskali vpliv upogiba optičnega vlakna na spremembo izmerjenega kota. En MOS smo pritrdili na fiksni nosilec, drugega pa na nosilec, ki je bil nameščen na linearno vodilo. Usmerjenost vektorja električnega polja na vhodnem MOS-u smo s pomočjo polarimetra usmerili pod kot 45° glede na ravnino ukrivljenosti optičnega vlakna, pri čemer je optična os vzporedna z ravnino ukrivljenosti, kar lahko zaradi linearne dvolomnosti povzroči največje spremembe stanja polarizacije. Preizkus smo izvedli tako, da smo postopoma zmanjševali razdaljo med dvema MOS-oma in s tem povečevali ukrivljenost optičnega vlakna. Polmer ukrivljenega vlakna smo izračunali iz povesa optičnega vlakna (Slika 3-26(a)). Izvedli smo meritve pri napetem optičnem vlaknu ter pri polmerih 20 m, 5 m, 2 m, 1 m in 0,625 m. S slike 3-26(b) je razvidno, da upogibi s polmeri, večjimi od 2 m, nimajo velikega vpliva na spremembo kota zasuka.



Slika 3-26: a) Testna postavitve senzorskega segmenta za preizkus učinka makroukrivljenosti (povesa) in b) Sprememba kota v odvisnosti od povesa optičnega vlakna.

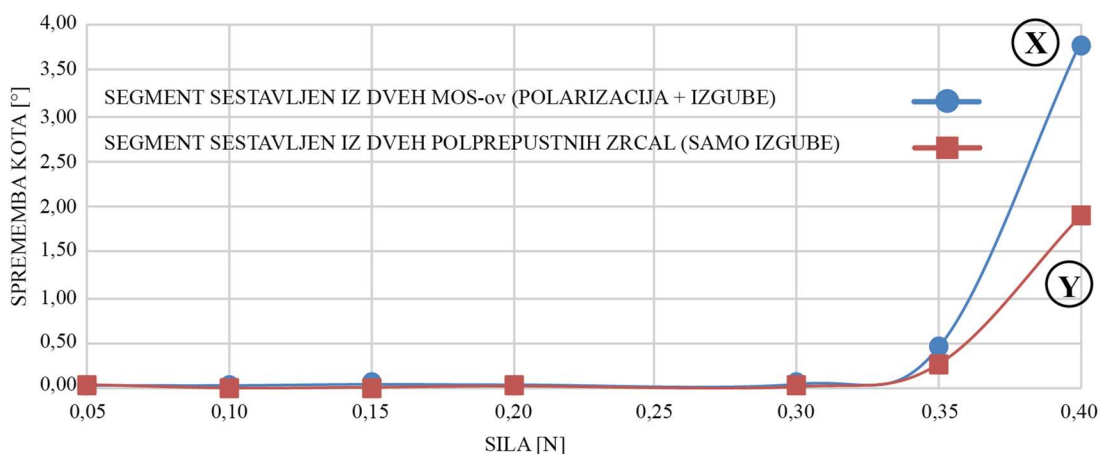
Pogrešek zaradi upogiba ima obliko kvadratne funkcije in je skladen s pojavom (eskalacijo) dvolomnosti, nastale zaradi upogiba optičnega vlakna [183].

Prav tako smo raziskali vpliv mikroukrivljenosti na spremembo polarizacije in posledično na spremembo (pogreške) pri meritvah kotov. Preizkus smo izvedli tako, da smo z različno silo stiskali optično vlakno enega senzorskega segmenta s posebnim deformatorjem, sestavljenim iz treh palčk s premerom 0,8 mm (prikazano na sliki 3-27(a)).



Slika 3-27: a) Testna postavitve realnega senzorskega segmenta za preizkus mikroukrivljenosti ter b) Referenčna postavitve senzorskega segmenta z uporabo polprepustnih zrcal.

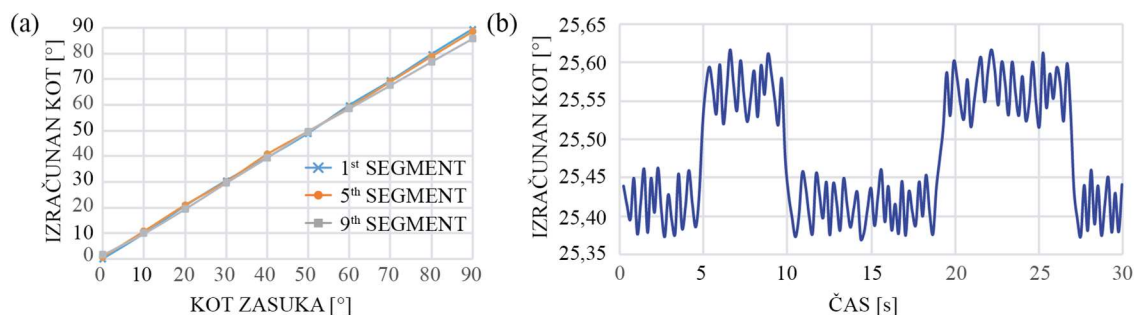
Vektor električne poljske jakosti smo s polarimetrom usmerili pod kotom 45° glede na vzdolžno os deformatorja ter zasukali senzorski segment za mehanski kot 45° . Deformator smo nato obtežili z različnimi utežmi (5 g, 10 g, 15 g, 20 g, 30 g, 35 g in 40 g). Rezultati, prikazani na sliki 3-28 – »Ukrivljenost X«, kažejo da se spremembe kota, večje kot $0,2^\circ$, pojavljajo pri silah, večjih od 0,3 N (30 g). Da bi raziskali vzroke za nastale spremembe kota, smo zasnovali navidezni senzorski segment. Zgradili smo ga tako, da smo oba MOS-a nadomestili s polprepustnimi zrcali (Slika 3-27(b)). Refleksiji smo nastavili tako, da smo iz razmerja vrhov po enačbi (3.3) izračunali kot 45° (drugo zrcalo v zaporedju je imelo za ustrezen odstotek nižjo refleksijo kot prvo). Z uporabo polprepustnih zrcal smo iz postavitve izločili polarizatorja in s tem minimalizirali učinke polarizacije ter poudarili nastanek izgub zaradi mikroukrivljenosti senzorskega segmenta, ki smo jih merili kot spremembo kota zasuka/rotacije. Preizkus smo ponovili z utežmi enakih mas v enakem zaporedju kot pri testu z dejanskim senzorskim segmentom. V primerjavi z dejanskim senzorskim segmentom na sliki 3-28 – »Ukrivljenost Y« vidimo podoben trend do sile 0,3 N. Pri sili 0,35 N pride do spremembe kota pri obeh segmentih, le da je naklon krivulje navideznega senzorskega segmenta (Slika 3-28 – »Ukrivljenost X«) položnejši v primerjavi z naklonom dejanskega senzorskega segmenta (Slika 3-28 – »Ukrivljenost Y«).



Slika 3-28: Sprememba kota pri preizkusu mikroukrivljenosti za segment, sestavljen iz dveh MOS-ov (X) in dveh polprepustnih zrcal (Y).

V obeh primerih pride pri uporabi enake sile (0,35 N) zaradi mikroukrivljenosti do opazne spremembe kota zasuka. Eksperiment je pokazal, da deformator, obtežen s 35-gramsko utežjo, predstavlja izdaten pritisk na optično vlakno ter povzroča tolikšno perturbacijo, da pri istem vlaknu hkrati sproži spremembo stanja polarizacije in izgube zaradi mikroukrivljenosti, kar povzroči pomembnejši pogrešek v spremembi kota zasuka. Opisanim deformacijam se je z ustreznim ohišjem za senzor mogoče izogniti, zato ne predstavljajo omejitev na področju uporabe.

V nadaljnjih preizkusih so nas zanimala statična karakteristika, ločljivost ter presluh med posameznimi segmenti senzorja. Za meritev statične karakteristike smo senzor nastavili za delovanje v načinu, v katerem ni mogoče zaznati smeri rotacije/zasuka, in s tem zagotovili merilni doseg posameznega segmenta na območju 90°. Preverili smo odzive senzorja na prvem, petem in devetem segmentu. Izbrane segmente smo posamezno sukali od 0° do 90° po koraku 10°, medtem ko so ostali segmenti ostali v začetnih položajih (0°). Rezultati testa so prikazani na sliki 32 in kažejo na dobro ujemanje z mehanskim kotom zasuka pri prvem in petem segmentu na vseh korakih. Pri zasuku devetega segmenta pa je prihajalo do manjših odstopanj na korakih, ki so se približevali kotu 90°. Odstopanja so posledica slabšega razmerja signal/šum, saj postane amplituda zadnjega vrha pri zasuku za mehanski kot 90° zelo nizka.

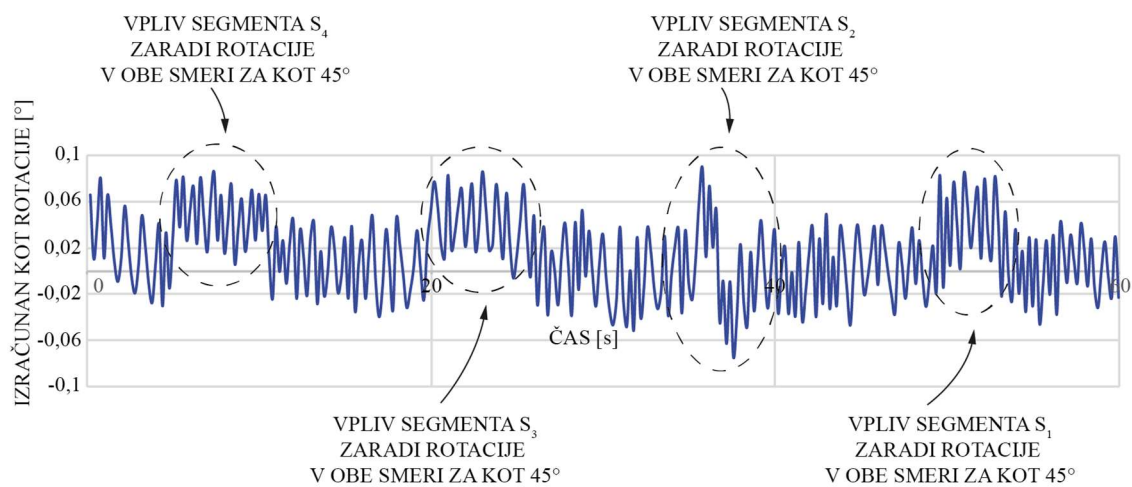


Slika 3-29: a) Prikaz statične karakteristike senzorja in b) ločljivosti na zadnjem, devetem senzorskem segmentu.

Zaradi izgub na posameznih senzorskih segmentih (vključno z deležem odbite svetlobe od polprepustnih zrcal) ter modulacije moči, ki nastane zaradi sukanja senzorskih segmentov, prihaja do postopnega upadanja moči odbitih pulzov z oddaljenostjo MOS-ov (polprepustnih zrcal) od svetlobnega vira (bolj oddaljeni segmenti prejmejo manj moči, kar povzroči slabše razmerje signal/šum sprejetega signala). Posledično se ločljivost na posameznih segmentih ob delovanju senzorja spreminja. Ločljivost posameznega senzorskega segmenta je tako odvisna od skupka parametrov vira in sprejemnega dela, ki skupaj tvorijo sestav OTDR (tj. od intenzitete optične moči pulzov, dolžine (časa trajanja) pulzov, pasovne širine sistema za zajemanje ter od optične moči pulzov na senzorskem segmentu (odvisne od stanja senzorja – kateri senzorski segmenti so relaksirani in kateri zasukani, za kolikšen mehanski kot ipd). Na ločljivost vpliva tudi nelinearnost enačbe (3.3), zaradi česar pri izračunu kota prihaja do nižje občutljivosti pri majhnih (od 0° do 5°) in pri velikih kotih (med 70 in 90°). Za doseganje višjih ločljivosti oz. za povečanje občutljivosti na zasuk/rotacijo je potrebno senzor prednastaviti na kot za delovanje v linearnem področju enačbe (3.3), tj. med mehanskima kotoma 5° in 70°. Oceno dosegljive ločljivosti smo izvedli na najbolj oddaljenem (devetem) senzorskem segmentu, ki smo ga prednastavili na mehanski kot 25°. Preostale senzorske segmente smo nastavili na skupni mehanski kot 60°. Skupaj smo tako celotni senzor zasukali za mehanski kot 85°, s čimer smo se približali meji uporabnega merilnega območja. S tem smo želeli zagotoviti praktično najneugodnejše pogoje za razmerje signal/šum med zadnjima polprepustnima zrcaloma, saj sta bili amplitudi vrhov v tem primeru nizki. Preizkus smo opravili z uporabo precizijske rotacijske mize, s katero smo periodično sukali deseti MOS (deveti senzorski segment) v smeri urinega kazalca in nazaj v nasprotni

smeri. Pri zajemu signala smo na osciloskopu uporabili filtriranje z drsečim povprečenjem 128 vzorcev pri frekvenci vzorčenja osciloskopa 1 GHz. Slika 3-29(b) prikazuje odziv devetega senzorskega segmenta, ko smo deseti MOS zasukali za mehanski kot $0,28^\circ$, amplituda temenskega šuma pa je znašala med $0,08^\circ$ in $0,09^\circ$.

Zanimal nas je tudi presluh med senzorskimi segmenti, tj. medsebojni vpliv spremembe zasuka/rotacije med senzorskimi segmenti. Fiksirali smo peti segment, nato smo zaporedoma in periodično sukali prvi, drugi, tretji in četrti senzorski segment za mehanski kot 45° v nasprotni smeri urinega kazalca in nazaj.



Slika 3-30: Odziv petega segmenta (S_5) v primeru sukanja segmentov S_4 , S_3 , S_2 in S_1 za kot 45° v obe smeri.

Rezultati na sliki 3-30 kažejo, da je presluh med petim in katerim koli drugim segmentom (od prvega do četrtega) pod $0,1^\circ$ izračunanega mehanskega kota. Presluh lahko pripišemo nelinearnosti v elektronskih vezjih ter izgubam zaradi vzkižnega sklapanja polarizacijskih rodov v polarizatorju.

3.5 Povzetek

Predstavili smo kvaziporazdeljen senzor rotacije/zasuka, ki za svoje delovanje izrablja nezmožnost spremembe položaja vektorja električne poljske jakosti v zasukanem standardnem enorodovnem optičnem vlaknu. Senzor je zgrajen iz serije zaporedno postavljenih linearnih polarizatorjev z vgrajenimi polprepustnimi zrcali (MOS-i), ki so povezani s standardnim enorodovnim optičnim vlaknom in definirajo posamezni senzorski segment. Polprepustna zrcala v MOS-ih služijo za razločanje

posameznih senzorskih segmentov z enostavnim sistemom OTDR. Celotni senzorski sistem je zgrajen iz enostavnih in cenovno ugodnih optičnih in optoelektronskih komponent. Merilno območje senzorja je 90° (z ločljivostjo vsaj $0,3^\circ$) in presluh je manjši od $0,1^\circ$. Senzor je mogoče konfigurirati za delovanje v načinu, v katerem ni mogoče zaznati smeri rotacije/zasuka, ter v načinu, v katerem je mogoče zaznati smer rotacije/zasuka. Za delovanje v slednjem je senzor potrebno prednastaviti za kot, s katerim definiramo merilno območje, v katerem je mogoče zaznati smer rotacije/zasuka. Vzdlž senzorja je mogoče z zamenjavo standardnega optičnega vlakna z vlaknom, ki ohranja polarizacijo, ustvariti področja, neobčutljiva na zasuk/rotacijo. Točkovne obremenitve pod $0,35\text{ N}$, ki povzročajo mikroukrivljenosti, ne vplivajo na rezultate meritev. Senzor je prav tako neobčutljiv na spremembe raztezkov in temperature. Za nemoteno delovanje je potrebno zagotoviti, da so enorodovna optična vlakna, ki povezujejo MOS-e, čimbolj izravnana, pri čemer so dovoljeni polmeri ukrivljenosti nad dvema metroma.

4 ZASNOVA, NAČRTOVANJE IN ANALIZA REZULTATOV FP-OPTIČNEGA VLAKENSKEGA SENZORJA ZA MERITEV ROTACIJE/ZASUKOV, TEMPERATURE IN RAZTEZKOV NA OSNOVI ŠTIRIJEDRNEGA OPTIČNEGA VLAKNA

4.1 Uvod

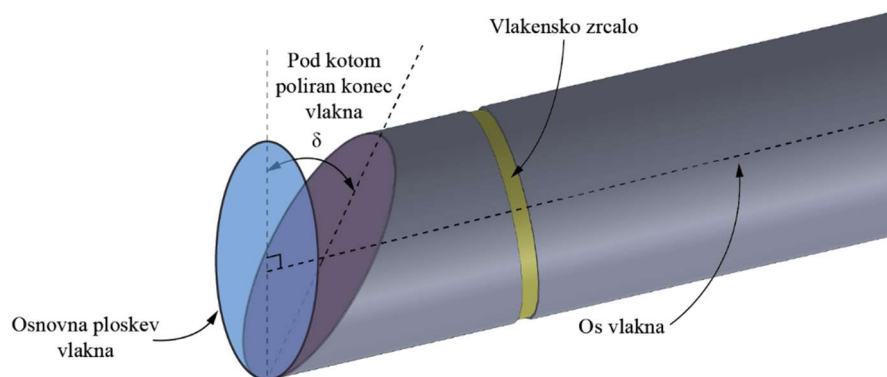
V tem poglavju bomo predstavili Fabry-Perotov optični vlakenski senzor za merjenje rotacij/zasukov na osnovi optičnega vlakna s štirimi jedri, ki so postavljena izven centra samega vlakna. Delovanje senzorja temelji na posebni mikrostrukturi, ki omogoča modulacijo optične poti, ko je senzor izpostavljen rotaciji/zasuku.

Uporaba vlakenskih Fabry-Perot interferometrov (v nadaljevanju FP-interferometrov) na področju senzorske tehnike se je že pokazala kot preizkušena metoda za izdelavo uporabnih in kompaktnih senzorjev tlaka [184], raztezkov [185, 186], temperature, mehanskih vibracij [187], akustičnega valovanja [187], pomikov [188] ipd. Izdelava vlakenskega senzorja rotacije/zasuka na principu FP-interferometra predstavlja svojevrsten izziv. Pri senzorjih tlaka, raztezkov, temperature, mehanskih vibracij in akustičnega valovanja povzročijo merjene veličine spremembo razdalje med zrcaloma FP-interferometra. V (idealnem) primeru rotacije/zasuka se vlakno suče vzdolž osi vrtenja, zato ne prihaja do linearne premika, ki bi v homogenem mediju (zgolj steklo ali zrak) povzročil spremembo dolžine FP-interferometra ter s tem spremembo optične poti.

4.2 Predstavitev senzorja

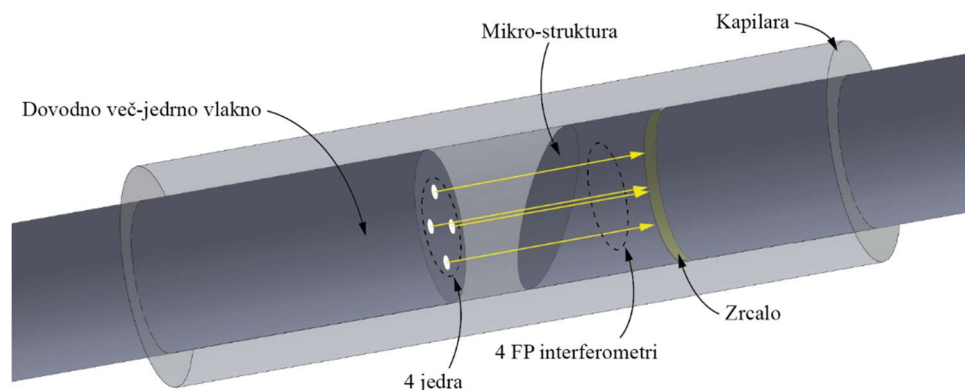
Pri zasnovi senzorja rotacije/zasuka je potrebno zagotoviti, da sukanje optičnega vlakna okoli osi vrtenja povzroči spremembo optične poti FP-interferometra. V ta namen je potrebno zasnovati posebno mikrostrukturo, ki bo v cilindričnem optičnem vlaknu porušila ortogonalno povezavo med osnovno ploskvijo in osjo vlakna (Slika 4-1); npr. pod kotom spoliran konec optičnega vlakna, podoben izrezanemu valju, lahko ustvari nesimetrično mikrostrukturo. Sukanje tako obdelanega vlakna okoli osi vrtenja v kombinaciji z dovodnim večjedrnim vlaknom z jedri izven centra povzroči spremembo

razmerja poti, ki ga opravi svetlobno valovanje FP-interferometra skozi steklo in zrak. Izvedba predlagane mikrostrukture je mogoča z uporabo mehanskih postopkov, kot je poliranje pod kotom ravno odrezanega konca optičnega vlakna.



Slika 4-1: Zgradba mikrostrukture.

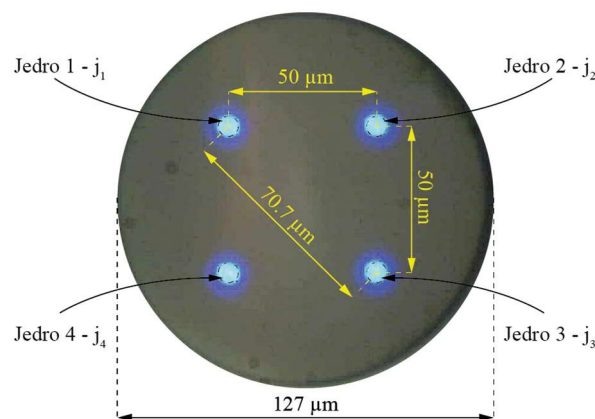
Predlagan senzorski sestav je predstavljen na sliki 4-2. Senzor je sestavljen iz štirijedrnega dovodnega optičnega vlakna, posebne mikrostrukture, ohišja, ki skrbi za optimalno poravnavo dovodnega vlakna, ter centronesimetrične mikrostrukture.



Slika 4-2: Zgradba senzora rotacije/zasuka na osnovi večjedrnega optičnega vlakna.

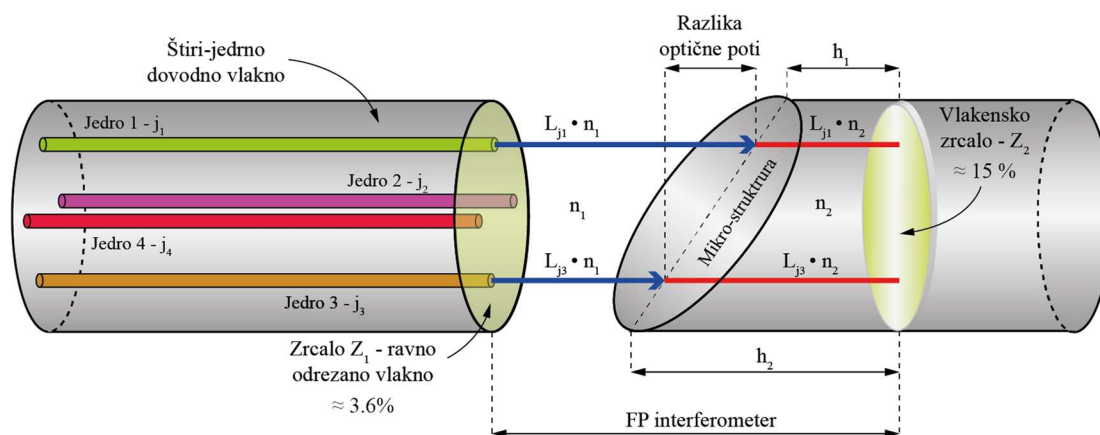
Senzorski sestav tako tvorijo štiri FP-interferometri, ki so definirani s položaji posameznih jeter v štirijedrnem dovodnem vlaknu ter z dvema polprepustnima zrcaloma. Prvo polprepustno zrcalo predstavlja ravno odrezan konec dovodnega štirijedrnega vlakna, drugo pa vgrajeno vlakensko zrcalo, postavljeno med pomožno vlakno in centronesimetrično mikrostrukuro, kot ponazarja slika 4-2. Svetlobno valovanje, ki potuje po jedrih, vstopi v resonatorje, kjer se deloma odbije od obeh zrcal, in interferira v povratni smeri prvotnega širjenja. Jedra štirijedrnega dovodnega vlakna so postavljena izven centra in tvorijo oglišča kvadrata s stranico $50 \mu\text{m}$, pri čemer znaša

izmerjena diagonalna razdalja med jedri $70,7 \mu\text{m}$ (Slika 4-3). Optična pot/dolžina posameznega FP-interferometra je določena s fizično razdaljo med zrcaloma, lomnim količnikom mikrostrukture ter kotom zasuka mikrostrukture glede na posamezna jedra dovodnega vlakna. Zasuk/rotacija strukture, sprememba dolžine ali temperature modulirajo optične dolžine vseh štirih FP-interferometrov, vendar vsak od naštetih parametrov na svojevrsten način, kar omogoča neodvisno merjenje rotacije/kota zasuka strukture.



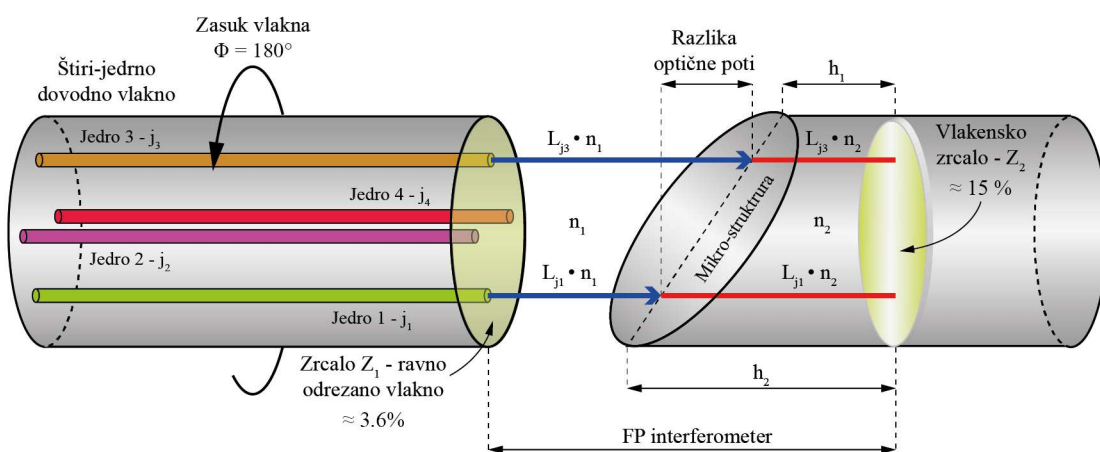
Slika 4-3: Prečni prerez štirijedrnega optičnega vlakna.

V nadaljevanju bomo opisali, kako se z rotacijo/zasukom mikrostrukture in štirijedrnega optičnega vlakna spreminjajo dolžine optičnih poti FP-interferometrov. Vsi štirje FP-interferometri so definirani med ravno odrezanim koncem štirijedrnega optičnega vlakna Z_1 in vlakenskim zrcalom Z_2 , ki je del mikrostrukture. Opazujemo diametralni jedri j_1 in j_3 (Slika 4-4). Ko je senzor sproščen, naj bo jedro j_1 postavljeno na stran krajše stranice izrezanega valja h_1 (mikrostrukture), zaradi česar svetlobni val opravi daljšo pot v mediju z lomnim količnikom n_1 (zrak) kot v mediju z lomnim količnikom n_2 (SiO_2). Jedro j_3 je v tem primeru postavljeno na stran daljše stranice mikrostrukture h_2 , kar pomeni, da svetlobni val opravi krajšo pot v mediju z lomnim količnikom n_1 (zrak) kot v mediju z lomnim količnikom n_2 (SiO_2). Ob upoštevanju, da velja $n_1 = 1$ in $n_2 = 1,444$, je optična pot svetlobnega vala v FP-interferometru, ki je osvetljen preko jedra j_1 , krajša kot preko jedra j_3 .



Slika 4-4: Princip delovanja senzorja rotacije/zasuka z FP-interferometrom – relaksiran senzor.

V primeru rotacije/zasuka mikrostrukture ali dovodnega štirijedrnega vlakna se spremeni položaj vseh jeter v štirijedrnem vlaknu glede na ravnino centronesimetrične mikrostrukture. Ko je štirijedro vlakno zasukano za mehanski kot 180° , preide jedro j_1 na položaj jedra j_3 in s tem se jedro j_1 postavi na stran daljše stranice mikrostrukture h_2 . Jedro j_3 pa preide na položaj jedra j_1 , s čimer se jedro j_3 postavi na stran krajše stranice mikrostrukture h_1 . Sedaj je optična pot svetlobnega vala v FP-interferometru, ki potuje po jedru j_1 , daljša kot v jedru j_3 (Slika 4-5).



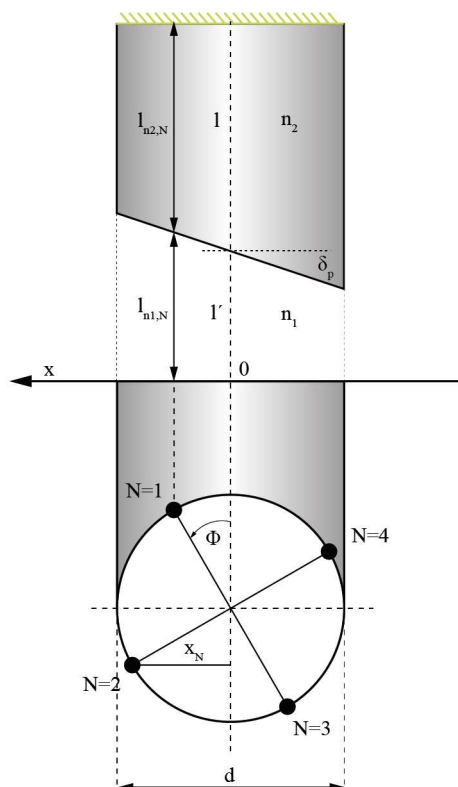
Slika 4-5: Princip delovanja senzorja rotacije/zasuka z FP-interferometrom – zasuk/rotacija senzorja za mehanski kot 180° .

Diametralno postavljenima jedroma v štirijedrnem vlaknu se ob rotaciji/zasuku optična pot pripadajočih FP-interferetrov spreminja obratnosorazmerno, in sicer ko se z rotacijo/zasukom v eni smeri (npr. v smeri urinega kazalca) optična pot v enem FP-interferometru povečuje, se optična pot v drugem FP-interferometru manjša ter obratno v nasprotni smeri rotacije/zasuka (npr. v nasprotni smeri urinega kazalca).

Poleg meritev rotacije/zasukov je s senzorjem mogoče zaznati raztezke, ki povzročajo spremembo razdalje med zrcaloma FP-interferometrov in temperaturo, kjer modulacija lomnega količnika mikrostrukture povzroča spremembo dolžine optične poti FP-interferometra. V primerjavi z meritvijo rotacije/zasuka povzročita raztezek in temperatura istoznačno spremembo dolžine optične poti za vse FP-interferometre, zaradi česar je mogoče izmeriti/določiti rotaciji/zasuk neodvisno od raztezka in temperature.

4.3 Model senzorja

Zasuk/rotacija mikrostrukture okoli vzdolžne osi povzroča spreminjanje optične poti med posameznimi zrcali FP-interferometrov zaradi svoje nesimetrične oblike in ekscentrične postavitve jeder dovodnega optičnega vlakna.



Slika 4-6: Skica delovanja senzorja rotacije/zasuka z FP-interferometrom.

Pri modeliranju senzorja si pomagajmo s sliko 4-6. Začetno stanje senzorja (položaj jeder) smo postavili v lego 0, kjer je del poti, ki jo opravi svetlobni val v mediju z lomnim količnikom n_1 , označen z l' , in del poti, ki jo svetlobni val opravi v mediju z lomnim količnikom n_2 , označen z l . V modelu smo upoštevali vse štiri FP-interferometre (jedra) in jih označili z $N = 1, 2, 3, 4$. Z zasukom/rotacijo »krožijo« jedra po krožnici s premerom d , ki ustreza dolžini diagonale med jedri. Jedra so na krožnici razporejena s kotnim zamikom $\pi/2$.

Najprej bomo opisali, kako vpliva zasuk mikrostrukture na spremembo razdalje $l_{n1,N}$ in $l_{n2,N}$. Relativni zasuk mikrostrukture glede na dovodno vlakno bomo označili s kotom (Φ). Zasuk mikrostrukture povzroči odklon jeder iz začetne lege (Slika 4-6), ki smo jo označili kot razdaljo x_N in jo lahko opišemo kot:

$$x_N = \frac{d}{2} \sin \left(\Phi + (N-1) \frac{\pi}{2} \right) \quad (4.1)$$

Relativni premik (zasuk) jeder glede na mikrostrukturo spremeni razmerje med dolžino opravljene poti svetlobnega vala v mediju z lomnim količnikom n_1 in dolžino opravljene poti v mediju z lomnim količnikom n_2 . Dolžino opravljene poti svetlobnega vala v mediju z lomnim količnikom n_1 lahko opišemo kot:

$$l_{n_1,N} = l' + x_N \tan \delta_p \quad (4.2)$$

kjer je δ_p kot med vzdolžno osjo vlakna mikrostrukture in polirano ravnino mikrostrukture. Izraz (4.2) vstavimo v (4.1), iz česar sledi:

$$l_{n_1,N} = l' + \frac{d}{2} \tan \delta_p \sin \alpha_N, \quad N = 1, 2, 3, 4 \quad (4.3)$$

Pri tem smo upoštevali, da velja:

$$\alpha_N = \Phi + (N-1) \frac{\pi}{2} \quad (4.4)$$

Pot, ki jo prečka svetlobni val v mediju z lomnim količnikom n_2 , je podana z:

$$l_{n_2,N} = l + l' - l_{n_1,N} \quad (4.5)$$

Dolžina optične poti posameznih FP-interferometrov, ki so osvetljeni z jedri ($N=1, 2, 3, 4$), je podana kot:

$$OPL_N = l_{n_1,N} \cdot n_1 + l_{n_2,N} \cdot n_2 \quad (4.6)$$

Ob združitvi izrazov (4.5) in (4.6) lahko dolžino optične poti posameznih FP-interferometrov podamo kot:

$$OPL_N = l_{n_1,N} (n_1 - n_2) + (l + l') n_2 \quad (4.7)$$

Zasuk iz začetnega stanja za mehanski kot Φ torej povzroči spremembo dolžine optične poti, ki jo lahko izrazimo kot:

$$\Delta OPL_N = OPL_{N,0} - OPL_{N,\Phi} \quad (4.8)$$

Če v izraz (4.8) vstavimo izraz (4.7) in pri tem upoštevamo še (4.3), lahko spremembo dolžine optične poti za posamezni interferometer ($N = 1, 2, 3, 4$) podamo kot:

$$\Delta OPL_N = \frac{d}{2} \tan \delta_p (n_1 - n_2) (\sin \alpha_{N,\Phi} - \sin \alpha_{N,0}) + (l'_\Phi - l'_0) n_1 \quad (4.9)$$

Sprememba optičnih poti diametralnih FP-interferometrov je ob rotaciji/zasuku senzorja obratnosorazmerna, pri spremembi dolžine ali temperature pa je modulacija optičnih poti vseh štirih FP-interferometrov premosorazmerna. Za enoumno določitev kota zasuka/rotacije senzorja in smeri zasuka (rotacije) sta potrebni informaciji o spremembi optične poti za dva diametralna FP-interferometra, npr. N_1 in N_3 ali N_2 in N_4 . Na ta način lahko iz informacije o spremembi optičnih poti dveh diametralnih interferometrov ločimo med rotacijo/zasukom ali spremembo dolžine in temperature, saj se pri rotaciji/zasuku optična pot enega FP-interferometra daljša, medtem ko se optična pot drugega FP-interferometra krajša. V primeru spremembe dolžine ali temperature pa se dolžini obeh optičnih poti FP-interferometrov daljšata/krajšata.

Za FP-interferometer N_1 je po izrazu (4.9) sprememba optične poti enaka:

$$\Delta OPL_1 = \frac{d}{2} \tan \delta_p (n_1 - n_2) (\sin \alpha_{1,\Phi} - \sin \alpha_{1,0}) + (l'_\Phi - l'_0) n_1 \quad (4.10)$$

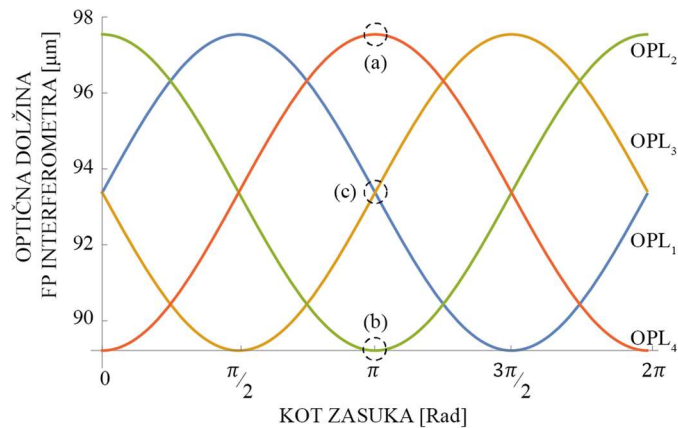
Za FP-interferometer N_3 pa je po izrazu (4.9) sprememba optične poti enaka:

$$\Delta OPL_3 = -\frac{d}{2} \tan \delta_p (n_1 - n_2) (\sin \alpha_{3,\Phi} - \sin \alpha_{3,0}) + (l'_\Phi - l'_0) n_1 \quad (4.11)$$

Če izraza (4.10 in 4.11) združimo in pri tem predpostavimo, da je začetni kot $\Phi_0 = \Phi_1$ in poljubni kot rotacije/zasuka $\Phi = \Phi_2$, dobimo zvezo za določitev kota zasuka/rotacije:

$$\sin \Phi = -\frac{\Delta OPL_3 - \Delta OPL_1}{d \tan \delta_p (n_1 - n_2)} + \sin \Phi_0 \quad (4.12)$$

Izris krivulj iz izraza (4.9) prikaže, da ima ob zasuku/rotaciji za »mehanski« kot $\Phi = 2\pi$ (360°) sprememba optične poti za posamezni par FP-interferometrov (N_1 in N_3 ter N_2 in N_4) periodično sinusno obliko (Slika 4-7).



Slika 4-7: Izris modulacije optične poti interferometrov za dva para diametralnih jeder j_1 in j_3 ter j_2 in j_4 pri zasuku senzorja za »mehanski« kot Φ , ki je 0 do 2π (od 0° do 360°). V simulaciji so za izračun modulacije optične poti interferometrov uporabljeni podatki za senzor z diagonalno razdaljo med jedri ($d = 70,7 \mu\text{m}$) in kotom poliranja ($\delta_p = 15^\circ$).

V izrazu (4.11) nastopa začetni kot Φ_0 , ki je odvisen od začetne poravnave jeder glede na naklon mikrostrukture (Slika 4-6). Ko velja $\Phi_0 = 0$, se prvi par diametralnih FP-interferometrov (N_1 in N_3) nahaja na sredini naklona mikrostrukture, zaradi česar je optična pot obeh interferometrov enaka (črtkano območje (c) na sliki 4-7). Drugi par diametralnih FP-interferometrov (N_2 in N_4) je glede na prvi par (N_1 in N_3) zamaknjen za kot $\pi/2$. Optična pot enega FP-interferometra je zato najdaljša (črtkano območje (a) na sliki 4-7), medtem ko je optična pot drugega FP-interferometra najkrajša (črtkano območje (b) na sliki 4-7). Merilno področje za par diametralnih FP-interferometrov (N_1 in N_3), ko je začetni kot Φ_0 enak nič, je tako $\pm 90^\circ$, za par diametralnih FP-interferometrov (N_2 in N_4) pa $\pm 180^\circ$. Začetni kot Φ_0 prav tako določa (omejuje) merilno področje senzorja.

4.4 Razločitev merilne vrednosti

Gostoto svetlobnega toka posameznega FP-interferometra z dvema reflektivnima površinama lahko izrazimo kot kosinusno funkcijo dolžine interferometra, valovne dolžine in lomnega količnika prenosnega medija [189]:

$$I_r = A + 2B \cos\left(4\pi n \frac{L}{\lambda}\right) \quad (4.13)$$

V izrazu (4.13) imata člena A in B obliko:

$$\begin{aligned} A &= R_1 + \xi(1 - R_1)^2 R_2 \\ B &= \sqrt{\xi R_1 R_2} (1 - R_1) \end{aligned} \quad (4.14)$$

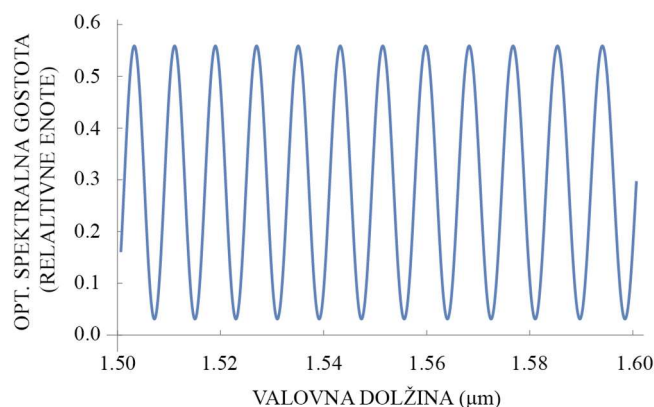
kjer so:

- R_1 – reflektivnost prve površine,
- R_2 – reflektivnost druge površine,
- ξ – sklopni faktor (izgube).

Če v izraz (4.13) namesto nL vstavimo izraz (4.9), dobimo zvezo med spremembo gostote svetlobnega toka posameznega FP-interferometra v odvisnosti od rotacije/zasuka mikrostrukture in valovne dolžine:

$$I_{rN} = A + 2B \cos\left(4\pi \frac{\Delta OPL_N}{\lambda}\right) \quad (4.15)$$

Za razločevanje dolžine FP-interferetrov smo uporabili metodo, ki temelji na obdelavi optičnega spektra. Na sliki 4-8 je prikazan izris optičnega spektra. V simulaciji smo predpostavili, da uporabljamo širokopasovni vir s spektralno širino 100 nm (med 1,5 μm in 1,6 μm) in interferometer z dolžino 100 μm .



Slika 4-8: Izris odbite optične moči optičnega spektra v odvisnosti od valovne dolžine idealnega vira.

Za opazovanje sprememb dolžin posameznih FP-interferetrov smo uporabili tehniko sledenja faze interferenčnega vzorca v spektralnem področju s pomočjo diskretne Fourierove transformacije (v nadaljevanju DFT):

$$X_k = \sum_{n=0}^{N-1} x_n e^{-\frac{2\pi knj}{N}}, \quad k \in \{0, \dots, N-1\} \quad (4.16)$$

Za določitev spremembe faze vnaprej določene frekvenčne komponente je potrebno izračunati k -to komponento, kjer pri množenju vhodnih podatkov x_n dobimo kompleksno število $x + iy$, iz katerega izračunamo vrednost faze po izrazu [190]:

$$\varphi = \arctg \frac{\text{Im} (y)}{\text{Re} (x)} \quad (4.17)$$

Za pravilno implementacijo DFT je potrebno pretvoriti spektralno karakteristiko iz valovnodolžinskega prostora v frekvenčni prostor [190]. Z zamenjavo valovne dolžine s frekvenco po enačbi $\lambda = c/f$, kjer je c hitrost svetlobe v vakuumu, f pa frekvenca, dobi izraz (4.15) obliko:

$$I_{rN} = A + 2B \cos \left(4\pi \frac{\Delta OPL_N f}{c} \right) \quad (4.18)$$

Spektralna karakteristika v frekvenčnem prostoru je prikazana na sliki 4-9(a) in pripadajoči spekter DFT na slika 4-9(b). Oknjenje z Gaussovo funkcijo:

$$P(x) = \frac{e^{-\frac{c/f - \mu}{2\sigma^2}}}{\sigma\sqrt{2\pi}}, \quad (4.19)$$

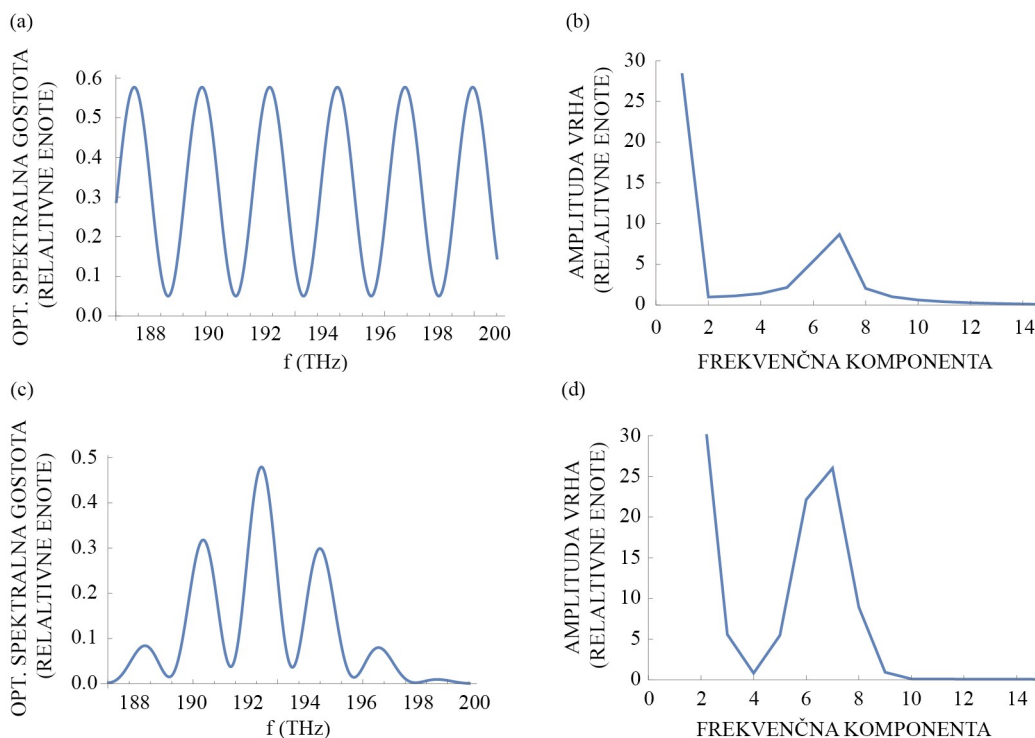
kjer so:

μ – srednja vrednost spektra,

f – frekvenca,

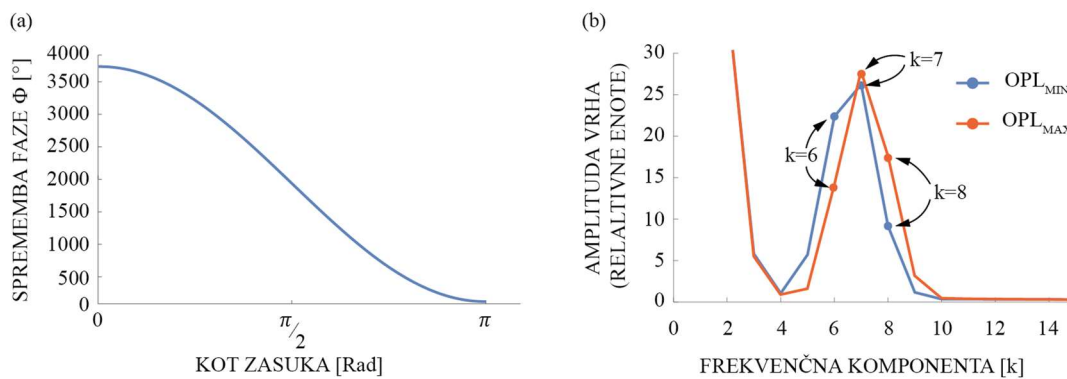
σ – varianca.

Oknjenje z Gaussovo funkcijo je prikazano na sliki 4-9(c) in (d), kjer smo z večjimi utežmi dodatno obtežili centralno področje opazovanja optičnega spektra, z manjšimi utežmi pa robove opazovanja spektra.



Slika 4-9: (a) Spektralna karakteristika v frekvenčnem prostoru in (b) amplitudni spekter DFT brez Gaussovega oknjenja in (c) spektralna karakteristika in (d) amplitudni DFT-spekter z Gaussovim oknjenjem.

V nadaljevanju smo analizirali spreminjanje faze spektralne karakteristike glede na spremembo optične poti. Izračune smo opravili s predpostavko, da imamo širokopasovni vir s spektralno širino 80 nm (med 1,51 μm in 1,59 μm) ter s korakom 4 pm. Izbira spektralne širine za potrebe izračunov je izhajala iz podatkov za značilni komercialni spektralni razločevalnik, ki smo ga dejansko uporabili za signalno razločanje praktično izdelanega senzorja in ga bomo podrobneje opisali v nadaljevanju. V izračunih smo predpostavili tudi, da imamo senzor rotacije/zasuka z dolžino FP-interferometra 97,5 μm in kotom δ_p ravnine centronesimetrične mikrostrukture 15°, kar pri zasuku senzorja za 180° ustvari spremembo optične poti FP-interferometrov za približno 8,3 μm (Slika 4-7). Tudi ti vhodni simulacijski podatki so značilni za kasneje opisane in izdelane senzorje.



Slika 4-10: (a) Sprememba faze FP-interferometra pri zasuku za »mehanski« kot π (180°) oz. pri spremembi optične poti FP-interferometra za $8,3 \mu\text{m}$ in (b) pripadajoči premik frekvenčnih komponent.

Pričakovana sprememba optične dolžine interferometra je približno $8,3 \mu\text{m}$. Pri dolžini interferometra okoli $100 \mu\text{m}$ in omejenem spektralnem področju praktičnega razločevalnika je to visoko ločljivo spremljanje dolžine interferometra možno tako, da sledimo fazi (premiku vrhov) v zajetem spektru. Neposredno spremljanje in meritve dominantne frekvence v spektralnem interferenčnem vzorci, ki nam sicer da neposreden podatek o dolžini interferometra žal zavrlo omejene frekvenčne ločljivost algoritma DFT in omejenega spektralnega področja razločevalnika ni mogoče. Kljub temu, pa sprememba dolžine interferometra na celotnem področju delovanja povzroča (zadosten) zdrs med sosednjimi diskretnimi frekvencami v DFT-spektru, da oteži enostavno uporabo DFT, kjer bi sicer sledili fazi le ene izbrane (dominantne) frekvenčne komponente. V nadaljevanju je podana podrobnejša razlaga pravkar opisanega problema in njegova rešitev za že opisan praktičen primer sensorja in razločevalnika.

Razmik med sosednjima frekvenčnima komponentama (ločljivost) je v spektru DFT podan s [190]:

$$\Delta k = \frac{2\Delta f n L}{c} \quad (4.20)$$

kjer so:

- L – dolžina FP-interferometra,
- Δf – frekvenčno področje spektra,
- c – hitrost širjenja svetlobe v vakuumu.

To ustreza spremembi dolžine 13,9 μm . Dominantna frekvenčna komponenta $k = 7$ tako pripada FP-interferometru z dolžino optične poti 97,5 μm (Slika 4-10(b)). Celotna sprememba dolžine interferometra, ki znaša približno 8,3 μm in ustreza spremembi faze za kot $3,800^\circ$ (Slika 4-10(a)) v DFT spektru, hkrati premika dominantno frekvenčno komponento med vrhom $k = 7$ in sosednjimi frekvenčnimi komponentami ($k = 6$ in $k = 8$) (Slika 4-10(b)). To je posledica omejene ločljivosti DFT-spektra. Dejanska frekvenca signala pri zasuku sensorja tudi ne sovпада s frekvenco DFT-frekvenčne komponente, ki ustreza $k = 7$. Vrh v DFT-spektru se tako »razmaže« čez sosednji frekvenčni komponenti ($k = 6$ in $k = 8$), kar pomeni, da se vrh med delovanjem zaradi spremembe dolžine interferometra seli med komponentami $k = 6, 7$ in 8 . Za točnejši izračun kota rotacije/zasuka je v ustreznem iznosu zato potrebno upoštevati tudi vpliv frekvenčnih komponent $k = 6$ in $k = 8$. V algoritmu za izračun kotov rotacij/zasukov z uporabo komercialnega spektralnega razločevalnika, s katerim smo preizkušali praktično izdelan senzor, smo tako upoštevali tri frekvenčne komponente ($k = 6, 7, 8$), tako da smo izračunali interpolirano vrednost faze iz vseh treh frekvenčnih komponent. Pri tem smo uporabili baricentrično metodo [191]:

$$\begin{aligned}
 y_1 &= |X[k-1]| \\
 y_2 &= |X[k]| \\
 y_3 &= |X[k+1]| \\
 d &= \frac{(y_3 - y_1)}{(y_1 + y_2 + y_3)} \\
 k^{\wedge} &= k + d
 \end{aligned}
 \tag{4.21}$$

kjer so:

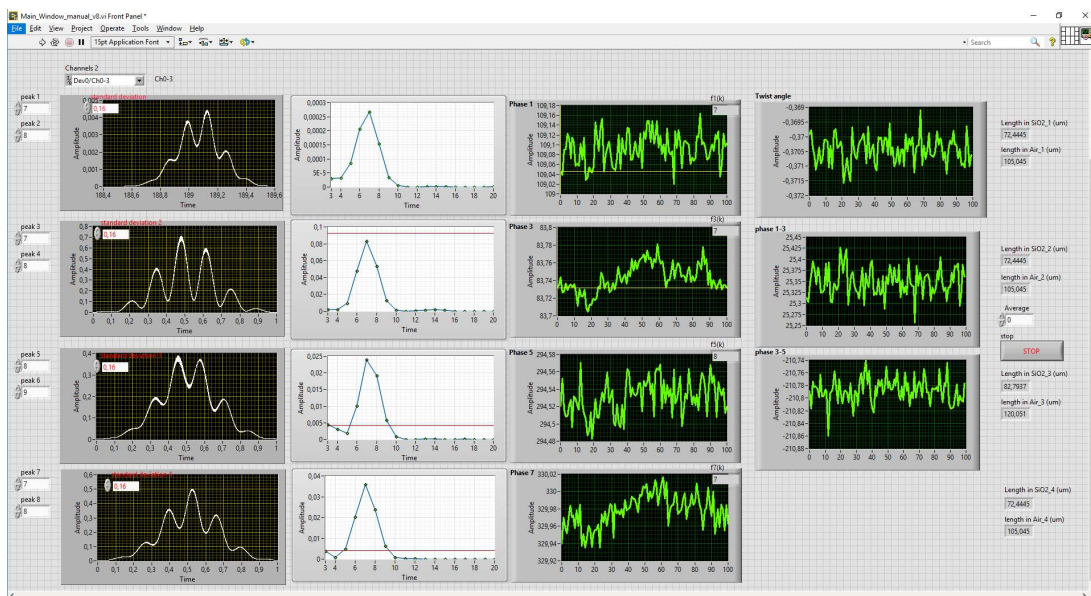
k – vrednost faze centralne DFT-frekvenčne komponente,

$X[i]$ – vrednost faze DFT-frekvenčne komponente na i -ti lokaciji,

k^{\wedge} – vrednost faze interpolirane frekvenčne komponente.

Za signalno razločanje praktično izdelanega sensorja smo uporabili spektralni razločevalnik PXIe-4844 proizvajalca »National Instruments« [192]. Le-ta ima štiri vhodne kanale, ki združujejo laserski vir in detektor. Spektralni razločevalnik omogoča

zajemanje spektralne karakteristike priključenih senzorjev s frekvenco zajemanja 10 Hz na kanal na področju valovne dolžine svetlobe med 1510 nm in 1590 nm (spektralna širina vira je 80 nm) v 20000 točkah po koraku 4 pm. Spektralne karakteristike posameznih FP-interferometrov, osvetljenih z jedri štirijedrnega vlakna, smo prenašali na osebni računalnik. V ta namen smo v programskem okolju LabView načrtovali aplikacijo z ustreznimi algoritmi za analizo DFT in uporabniškim vmesnikom, s katerim smo zajemali meritve rotacije/zasukov (Slika 4-11).



Slika 4-11: Uporabniški vmesnik, izdelan v okolju LabView.

Z aplikacijo smo s frekvenco 10 Hz simultano zajemali spektre iz vseh štirih kanalov, tj. iz vseh štirih FP-interferometrov, osvetljenih z jedri dovodnega štirijedrnega optičnega vlakna. Interogator (PXle-4844) je v osnovni namenjen za uporabo z Braggovimi rešetkami, zaradi česar so izhodni podatki v valvnodolžinskem področju (x-os) in v logaritemskem merilu (y-os). Aplikacijo smo zasnovali tako, da s pomočjo narejenih algoritmov za ponovno vzorčenje izvede pretvorbo valvnodolžinskega področja v frekvenčni prostor in logaritemskega merila v linearno merilo [190]. Novo nastalo polje vhodnih podatkov se nato pomnoži z Gaussovo funkcijo (z ustreznim oknjenjem). Iz tako obdelanih podatkov dobimo tipične optične spektre s pripadajočimi amplitudnimi spektri DFT (Slika 4-13). Za vsak posamezni FP-interferometer smo spremljali spremembo faze z uporabo baricentrične interpolacije pri dominantnih frekvenčnih komponentah DFT (vrhovih).

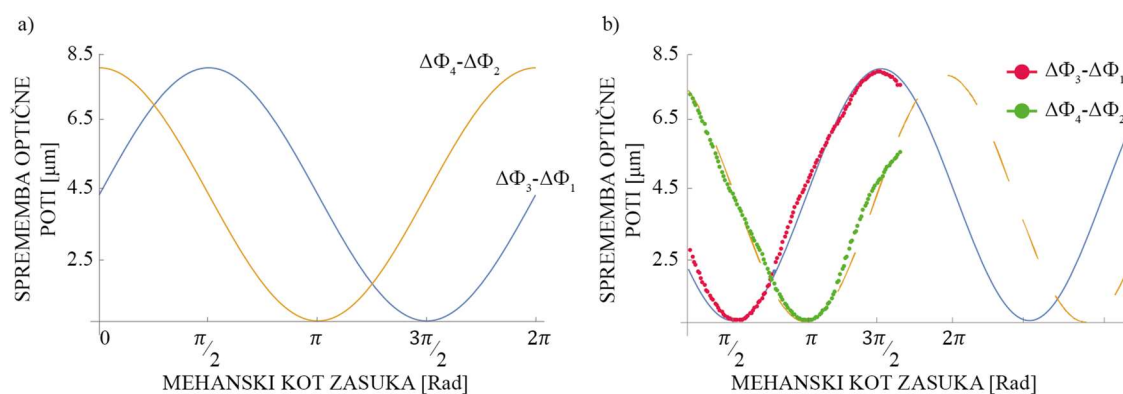
Spremembo faze posameznega interferometra, ki nastane zaradi spremembe dolžine optične poti posameznega FP-interferometra (ΔOPL_N), lahko izrazimo z:

$$\Delta\Phi_N = \frac{4\pi}{\lambda} \Delta OPL_N \quad (4.22)$$

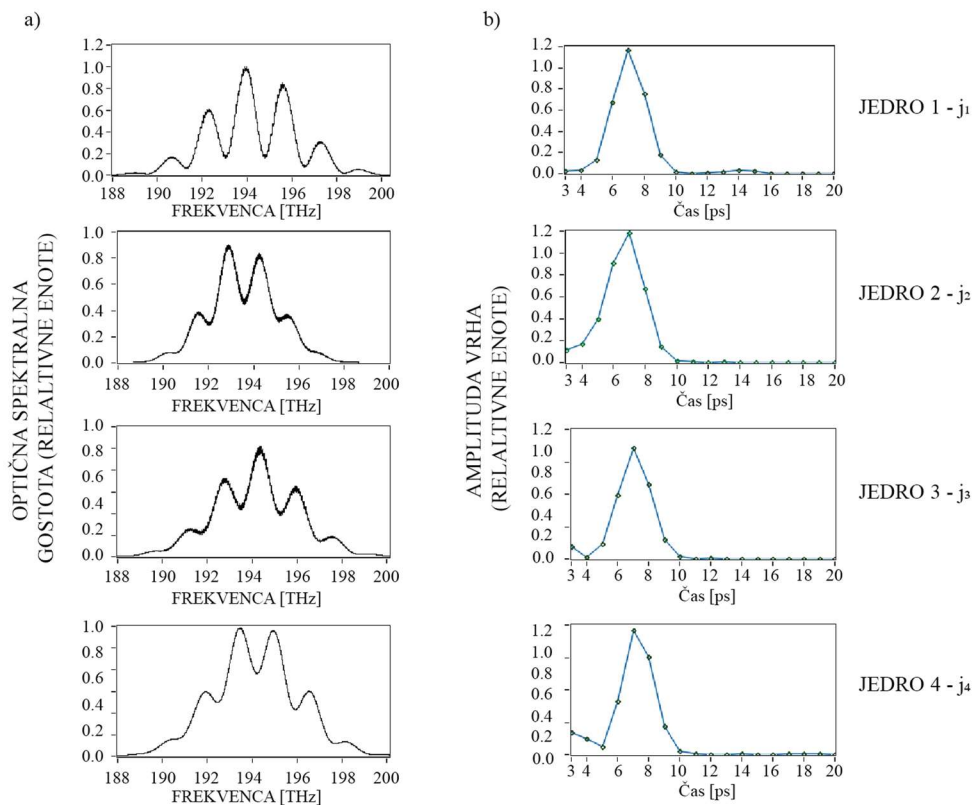
V izrazu [4.21] izrazimo ΔOPL_N in nato vstavimo v izraz (4.12), s čimer dobimo korelacijo med spremembo faze FP-interferometra in rotacijo/zasukom senzorja:

$$\sin \Phi = -\frac{\lambda(\Delta\Phi_3 - \Delta\Phi_1)}{4\pi d \tan \delta_p (n_1 - n_2)} + \sin \Phi_0 \quad (4.23)$$

kjer sta $\Delta\Phi_1$ in $\Delta\Phi_3$ spremembi faze pripadajočih vrhov v amplitudnem spektru DFT za FP-interferometra, osvetljeni z jedri N_1 in N_3 . Izraz (4.23) je prav tako mogoče uporabiti v primeru opazovanja spremembe faz za FP-interferometra, osvetljena z diametralnimi jedri N_2 in N_4 (Slika 4-12(a)). Spremembi faze sta v tem primeru v primerjavi s spremembo faz jeder N_1 in N_3 zamaknjeni za $\pi/2$ (Slika 4-12(b)).



Slika 4-12: a) Izris spremembe razlike optičnih poti diametralnih jeder (model senzorja) in b) modulacija razlike optičnih poti diametralnih jeder (črtkani krivulji) pri zasuku realnega senzorja za mehanski kot 180°.

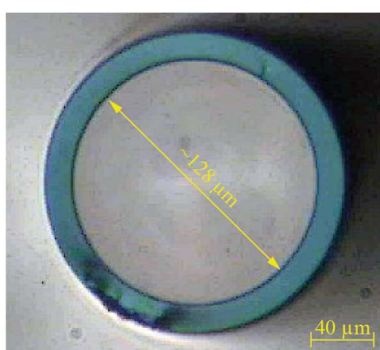


Slika 4-13: a) Optični odbiti spektri posameznih jeder, pomnoženi z Gaussovo funkcijo, in b) pripadajoči amplitudni spektri DFT.

4.5 Postopek izdelave sensorja

Predstavljeni senzor smo zgradili iz treh komponent, in sicer iz dovodnega štirijedrnega optičnega vlakna, mikrostrukture in steklene kapilare kot ohišje sensorja. Nezanemarljiva komponenta sensorja je ohišje, za katerega smo uporabili debelostensko stekleno kapilaro. Notranji premer kapilare ima pomembno vlogo pri stabilizaciji in poravnavi dovodnega štirijedrnega vlakna in mikrostrukture. Cilj je bil doseči pravilno poravnavo dovodnega štirijedrnega vlakna in mikrostrukture ter s tem zagotoviti sukanje obeh gradnikov okoli iste osi vrtenja. Za doseganje tega je bilo potrebno poiskati kapilaro z ustreznim notranjim premerom, s katerim bi zagotovili čim boljše ujemanje z zunanji premerom dovodnega štirijedrnega vlakna in mikrostrukture. Dovodno štirijedrno vlakno Fibercore SM-4C1500 [193] ima po podatkih proizvajalca zunanji premer 125 μm . Točnejši zunanji premer (128 μm) smo izmerili z uporabo mikroskopa. Mere zunanjega premera dovodnega vlakna so pogojevale enak zunanji premer mikrostrukture. Notranji premer steklene kapilare (ohišja) je zato moral meriti vsaj 128 μm . Po pregledu ponudbe na trgu smo ugotovili, da komercialno

dostopne steklene kapilare niso primerne predvsem zaradi visoke cene izdelave (zaradi zahtevanih nestandardnih dimenzij) in nesprejemljive minimalne količine naročila. Zato smo za poizkuse uporabili steklene kapilare proizvajalca »Optacore d. o. o.«, ki so bile na voljo v laboratoriju. Kapilara z notranjim premerom 135 μm je imela najprimernejše mere. Čeprav je deklarirani notranji premer občutno presegal 128 μm , smo z meritvami na različnih odsekih ugotovili, da se le-ta neenakomerno spreminja in na nekaterih področjih presega ± 9 μm . Kapilaro smo narezali na krajše dolžine ter z mikroskopskimi meritvami poiskali kose z ustreznim notranjim premerom (Slika 4-14).



Slika 4-14: Steklena kapilara z ustreznim notranjim premerom (128 μm).

Mikrostrukturo smo izdelali iz brezjedrnega vlakna z zunanjim premerom 140 μm . Več kosov brezjedrnih vlaken smo najprej jedkali v fluorovodikovi kislini (v nadaljevanju HF-kislini) na premer približno 129 μm . Za optimalno prileganje vlakna v stekleno kapilaro smo brezjedrna vlakna dodatno jedkali v kratkih časovnih intervalih nekaj sekund na zunanji premer približno 128 μm , dokler jih nismo uspešno vstavili v stekleno kapilaro. Sledila je izdelava vlakenskega zrcala (Slika 4-2). Dober interferenčni kontrast FP-interferometra je pogojen z ustrežno prilagoditvijo odbojnosti obeh zrcal in z geometrijo samega interferometra. V našem primeru smo pri določanju odstotka odbojnosti vlakenskega zrcala Z_2 (Slika 4-4) upoštevali izgube zaradi divergence svetlobnega snopa. Osnovni rod, ki se širi po enorodovnem vlaknu, lahko aproksimiramo z obliko Gaussovega snopa s polmerom $w_1 = 10$ μm , ki po izstopu iz vlakna divergira. Polmer Gaussovega snopa w_1 se na razdalji $2L$ v FP-interferometru poveča na $w_2 = 20$ μm , kar lahko izrazimo z [189]:

$$w_2 = w_1 \sqrt{1 + \left(\frac{\lambda}{\pi w_1^2} 2L \right)^2} \quad (4.24)$$

kjer so:

w_1 – polmer Gaussovega snopa na izstopu iz vlakna,

w_2 – polmer Gaussovega snopa na razdalji $2L$,

λ – valovna dolžina svetlobnega vira,

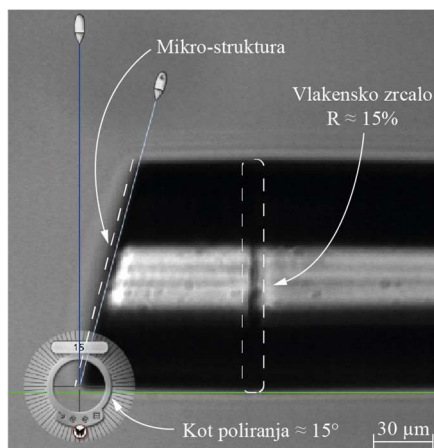
L – dolžina FP-interferometra.

Izgube zaradi divergence snopa lahko tako izrazimo s sklopnim faktorjem $\xi = 0,5$, ki je definiran kot integral prekrivanja dveh Gaussovih snopov z različnima polmeroma w [189]:

$$\xi = \frac{2w_1w_2}{w_1^2 + w_2^2} \quad (4.25)$$

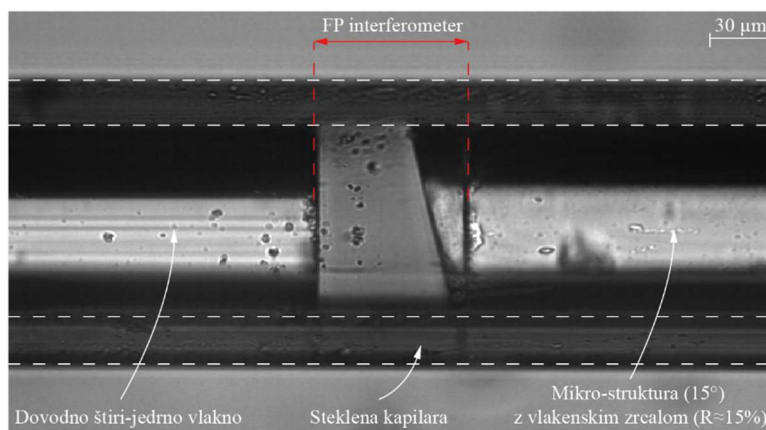
Izračun sklopnega faktorja ξ nakazuje, da za doseganje čim boljšega interferenčnega kontrasta FP-interferometra, mora imeti zrcalo Z_2 dvakrat večji odstotek odbojnosti, kot ga ima zrcalo Z_1 (Slika 4-4). Poleg izgub zaradi divergence svetlobnega snopa smo prav tako upoštevali (Fresnelove) odboje/izgube, ki so posledica dvakratnega prehoda svetlobe skozi nagnjeno plast (mikrostrukture) zrak/steklo. Ob upoštevanju vseh izgub smo s poskusi ugotovili, da vlakensko zrcalo Z_2 s približno 15-odstotno odbojnostjo daje dovolj visok interferenčni kontrast in s tem dobro razmerje signal/šum v sistemu. Poznamo dve metodi izdelave vlakenskih zrcal. Prva metoda temelji na osnovi FP-votline in omogoča izdelavo zrcal z do 9,5-odstotno odbojnostjo [194]. Druga metoda izdelave vlakenskih zrcal temelji na principu magnetronskega naprševanja tankih plasti TiO_2 (titanijev dioksid) in omogoča doseganje višjih odstotkov odbojnosti [195]. Poleg TiO_2 je za izdelavo visokoodbojnih vlakenskih zrcal mogoče uporabiti ZrO_2 (cirkonijev dioksid). Lomni količnik ZrO_2 ima pri valovni dolžini $1,55 \mu\text{m}$ vrednost $2,1$ in omogoča izdelavo vlakenskih zrcal z visokim odstotkom odbojnosti $R \approx 15 \%$. S sistemom za magnetronsko naprševanje Semicore SC 450 [196] je sledil vakuumski nanos tanke plasti ZrO_2 na ravno odrezane konce pripravljenega pojedkanega brezjedrnega vlakna. Napršene kose brezjedrnega vlakna smo z varilnikom v pulznem načinu proženja elektrod privarili na

drug konec nenapršenega brezjedrnega vlakna in s tem naredili vlakensko zrcalo s 15-odstotno odbojnostjo. V nadaljevanju smo na razdalji med 40 μm in 50 μm od vlakenskega zrcala odrezali brezjedrno optično vlakno. Odrezan konec brezjedrnega vlakna smo nato spolirali pod kotom 15° in s tem ustvarili mikrostrukturo (Slika 4-15).



Slika 4-15: Končna oblika mikrostrukture.

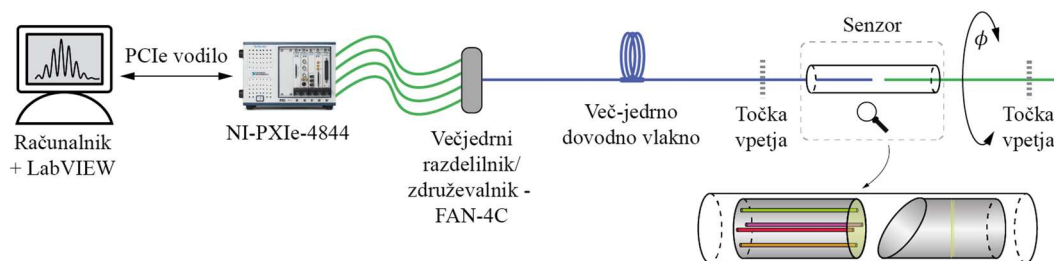
V postopku izdelave vlakenskega zrcala se je med procesom varjenja zaradi tanke plasti ZrO_2 pojavila odebelitev na območju zvara. Odebelitev je onemogočila vstavljanje mikrostrukture v stekleno kapilaro. Odebeljeni odsek smo ožili z uporabo varilnika takoj po procesu varjenja zrcala. Za končno prileganje smo odsek še dodatno jedkali v HF-kislini. Za končni sestav senzorja rotacije/zasuka smo nato v eno stran steklene kapilare vstavili dovodno štirijedrno vlakno. Kapilaro smo na robu zatalili in jo s tem pričvrstili na dovodno vlakno. V drugo stran kapilare smo zatem vstavili še mikrostrukturo. Razdaljo med dovodnim vlaknom in mikrostrukturo smo zmanjševali, dokler nismo dobili optičnega spektra z dobrim interferenčnim kontrastom FP-interferometrov (Slika 4-16).



Slika 4-16: Senzorski sestav.

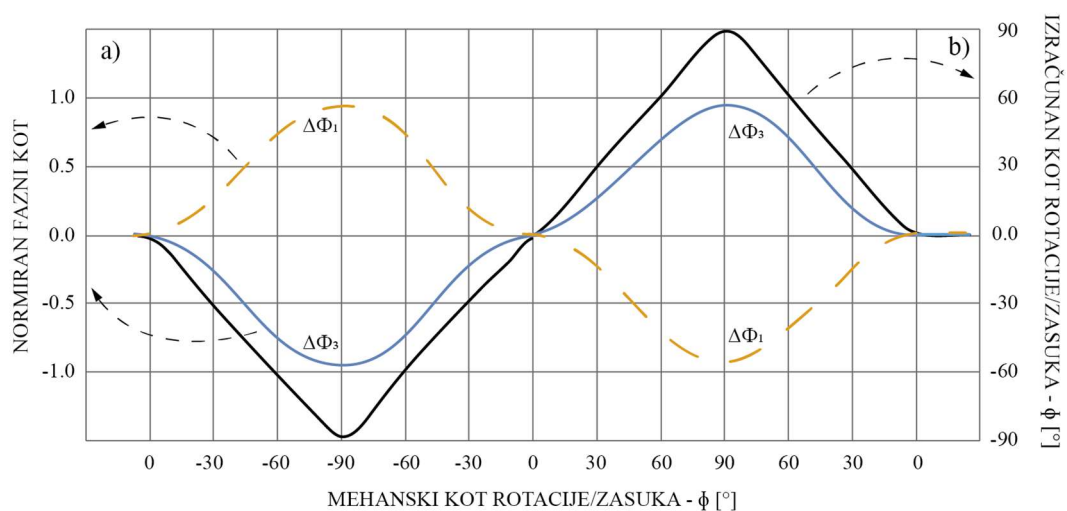
4.6 Ekperimentalni rezultati

Merilna proga senzorskega sistema je predstavljena na sliki 4-17. Sklapanje svetlobe v posamezna jedra dovodnega štirijedrnega optičnega vlakna je izvedeno s pomočjo posebnega razcepnika Fibercore FAN-4C [193], ki je namensko zgrajen za vodenje svetlobe v štirijedro vlakno preko štirih standardnih enorodovnih vlaknih (SMF-28), ki smo jih priključili na posamezni kanal spektralnega razločevalnika NI PXIe-4844. Senzor smo vstavili v držala (na sliki 4-17 označeni kot točki vpetja), s katerimi smo izvajali preizkuse na senzorju rotacije/zasukov.



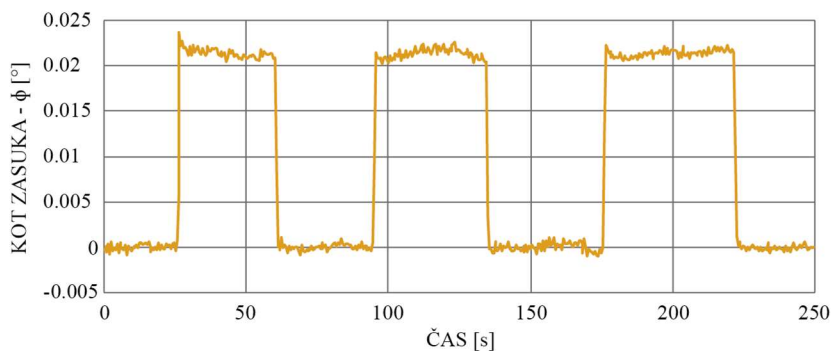
Slika 4-17: Merilna proga senzorskega rotacije/zasuka na osnovi štirijedrnega vlakna.

Ločljivost rotacijskega držala je znašala $0,01^\circ$, minimalni pomik linearnih držal za meritve raztezkov pa $1 \mu\text{m}$. Senzor smo zasukali za mehanski kot 90° po koraku 10° iz začetnega položaja v nasprotni smeri urinega kazalca ter nato nazaj začetni položaj po koraku 10° . Zatem smo senzor zasukali iz začetnega položaja v smeri urinega kazalca za 90° po koraku 10° ter nazaj v začetni položaj (Slika 4-18).



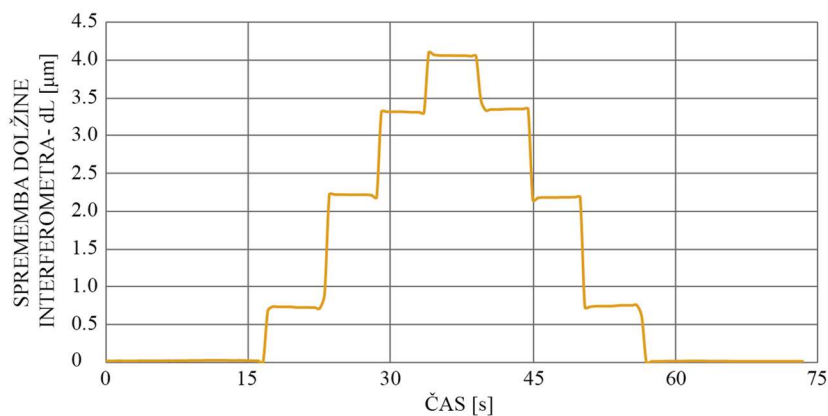
Slika 4-18: Izmerjena sprememba faze interferometrov za jedri j_1 in j_3 ter izračunan kot zasuka pri zasuku za mehanski kot $\pm 90^\circ$.

Ločljivost senzorja smo izmerili s ponovljivim periodičnim sukanjem senzorja najprej v smeri urinega kazalca in nato v nasprotni smeri urinega kazalca, dokler nismo zaznali izstopa signala iz nivoja šuma. Minimalna ločljivost, ki smo jo uspeli izmeriti, je znašala $0,023^\circ$ (Slika 4-19). Meritev smo izvajali pri frekvenci vzorčenja 5 Hz, kar pomeni, da smo pri zajemanju uporabili premikajoče povprečenje s petimi vzorci.



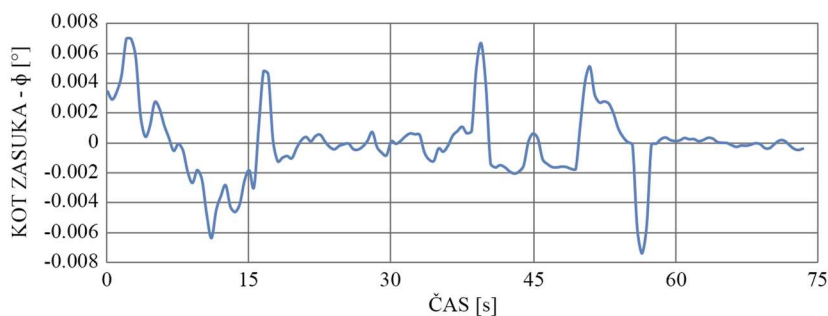
Slika 4-19: Prikaz minimalne ločljivosti senzorja pri sukanju rotacijske mize za $0,02^\circ$.

Prav tako smo merili odziv senzorja na spremembo dolžine (raztezke). Meritev smo izvedli tako, da smo vpet senzor z uporabo linearnih držal najprej raztegovali po koraku približno $1 \mu\text{m}$ in zatem vračali nazaj v začetni položaj (Slika 4-20).



Slika 4-20: Prikaz spremembe dolžine interferometra pri raztegovanju za $4 \mu\text{m}$.

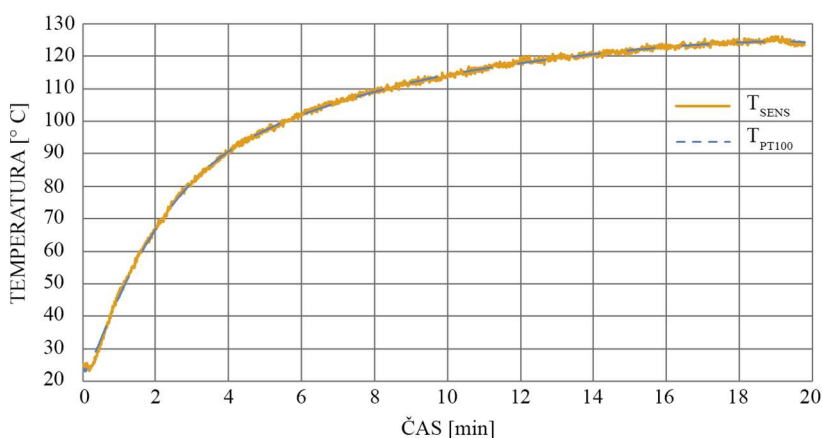
Ob meritvi raztezka smo opazovali njegov vpliv na meritev kota zasuka senzorja (Slika 4-21).



Slika 4-21: Sprememba kota zasuka kot posledica raztezka senzorja.

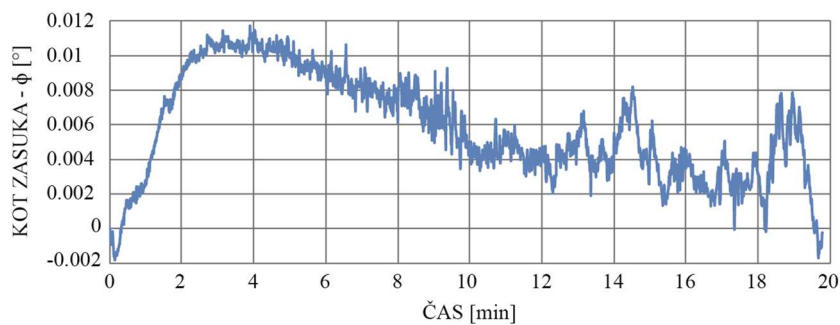
Rezultati kažejo na spremembe kota zasuka $0,013^\circ$, ki so posledica neenakomernih sprememb optičnih poti diametralnih interferometrov pri raztegovanju oz. krčenju senzorja in tresljajev zaradi premika linearnih držal.

Naposled smo preverili odziv senzorja na spremembo temperature. Za potrebe testiranja smo izdelali temperaturno regulirano komoro cevaste oblike. Temperaturno komoro smo postavili v vertikalni položaj, nakar smo vstavili senzor rotacije/zasuka. Vertikalni položaj je zagotavljal, da med preizkusom ni prihajalo do fizičnega stika med steno komore in senzorjem/dovodnim vlaknom. S tem smo želeli preprečiti neželena sprejemanja vlakna (primarne zaščite iz akrilata) z vročo steno, ki bi privedla do dodatnih raztezanj ali upogibanj senzorja. Senzor smo testirali na temperaturnem območju med 25°C in 125°C (Slika 4-22).



Slika 4-22: Prikaz meritve temperature s senzorjem rotacije/zasuka.

Na sliki 4-22 lahko vidimo dobro ujemanje izmerjene/izračunane temperature z referenčno meritvijo, izmerjeno s PT100-tipalom. Tudi pri temperaturnem preizkusu smo spremljali spremembo kota rotacije/zasuka kot posledico spremembe temperature (Slika 4-23).



Slika 4-23: Modulacija kota zasuka zaradi spremembe temperature.

Največjo spremembo kota zasuka ($0,012^\circ$) smo izmerili v začetnem delu temperaturne karakteristike, kjer je bila tudi najhitrejša sprememba temperature, ki je povzročila največjo modulacijo faz diametralnih FP-interferometrov.

4.7 Povzetek

V tem poglavju smo predstavili Fabry-Perotov optični vlakenski senzor za meritev rotacije/zasukov na osnovi štirijedrnega optičnega vlakna, pri katerem posebna mikrostruktura omogoča modulacijo optične poti, ko je senzor izpostavljen rotaciji/zasuku. Mikrostrukturo predstavlja pod kotom poliran kos brezjedrnega optičnega vlakna z vgrajenim vlakenskim zrcalom. Na merilnem območju $\pm 90^\circ$ smo izmerili ločljivost $0,023^\circ$. Vrednosti faz, izračunanih iz spektralnih karakteristik FP-interferometrov z uporabo algoritma DFT, je prav tako mogoče izrabiti za meritve raztezkov in temperature, neodvisno od zasuka/rotacije. Senzor smo tako preizkusili za meritve raztezkov in temperature. Senzor smo izpostavili raztezkju, ki je slednjega podaljšal za $4 \mu\text{m}$. Senzor je bil preizkušen za meritve temperatur v območju med 25°C in 125°C . V obeh primerih je bil vpliv spremembe dolžine in temperature na meritev kota majhen in je znašal med $0,012^\circ$ in $0,013^\circ$.

5 ZAKLJUČEK

V disertaciji smo predstavili raziskave in izvedbo treh različnih optičnih vlakenskih senzorjev za meritve zasukov/rotacij, ki uporabljajo enojno dovodno optično vlakno. Po pregledu obstoječega stanja na področju optičnih vlakenskih senzorjev zasukov/rotacij smo ugotovili, da obstajajo različne, a omejene možnosti za praktično in učinkovito realizacijo tovrstnih senzorjev. Pri delu smo se oprli na raziskave in izvedbe senzorjev na osnovi polarimetričnih metod ter na senzorce na osnovi Fabry-Perotove interferometrične metode.

Najprej smo predstavili miniaturni polarimetrični vlakenski senzor za meritev rotacije/zasukov na enojnem dovodnem vlaknu. Senzor je zgrajen iz dovodnega optičnega vlakna, ki ohranja polarizacijo, kosa standardnega (krožno simetričnega) enorodovnega optičnega vlakna in četrtvalovne plošče, ki je na koncu prevlečena z refleksijskim nanosom. Enorodovno optično vlakno predstavlja na zasuk/rotacijo občutljiv segment, vzdolž katerega zasuk/rotacija ne povzroči spremembe smeri vektorja električne poljske jakosti. V primeru zasuka/rotacije senzorja pride zato do spremembe orientacije vpadnega vektorja električne poljske jakosti na četrtvalovni plošči. Četrtvalovna plošča, ki je zaključena z refleksijskim slojem, vpadni val odbije in ga zasučje za 90° . Ta zasuk omogoča razločanje kota rotacije/zasuka iz razmerja optičnih moči posameznih linearno polariziranih rodov. Merilno območje senzorja je $\pm 45^\circ$, z ločljivostjo mehanske spremembe kota boljše od $0,03^\circ$. Posebno pozornost smo posvetili temperaturni občutljivosti senzorja. Temperaturno neobčutljivo četrtvalovno ploščo smo zgradili iz dveh različnih optičnih vlaken, ki ohranjajo polarizacijo. Z analitičnimi metodami in s praktičnimi postopki obdelave vlaken (z rezanjem na ustrezno dolžino in ustrezno postavitvijo) smo dosegli nizko temperaturno občutljivost senzorja, ki je znašala pod $0,011 \text{ }^\circ/\text{C}$. Tako smo zgradili kompaktni senzor rotacij/zasukov, ki je primeren za uporabo na področjih s prostorskimi omejitvami in temperaturnimi fluktuacijami ter uporablja enostaven sistem za razločanje merilnih vrednosti.

V nadaljevanju smo predstavili kvaziporazdeljen senzor rotacij/zasukov. Senzor je zgrajen iz dovodnega optičnega vlakna, ki ohranja polarizacijo, in iz niza zaporedno

postavljenih linearnih polarizatorjev, ki so povezani s standardnim enorodovnim optičnim vlaknom. Posebnost linearnih polarizatorjev so dodatno vgrajena polprepustna zrcala. Odsek standardnega enorodovnega optičnega vlakna, ki povezuje dva zaporedna linearna polarizatorja, tvori na rotacijo/zasuk občutljiv segment, pri katerem vgrajena polprepustna zrcala omogočajo razločanje merilne vrednosti s preprostim sistemom OTDR. Delovanje sensorja omogoča standardno enorodovno vlakno, vzdolž katerega se ob rotaciji/zasuku smer vektorja električne poljske jakosti ne spreminja. Zasuk/rotacija segmentov med zaporednimi polarizatorji povzroči modulacijo prenesene moči vzdolž posameznega senzorskega segmenta, katere spremljanje omogočajo vgrajena polprepustna zrcala v vsakem polarizatorju. Predstavljen kvaziporazdeljen sensor ima merilno območje 90° , ločljivost $0,3^\circ$ s presluhom, manjšim od $0,1^\circ$. Celoten sensor je sestavljen iz majhnega števila enostavnih in cenovno ugodnih optoelektronskih komponent ter predstavlja prvo znano rešitev vlakenskih sensorjev za kvaziporazdeljene meritve rotacij/zasukov. Rezultate bi lahko verjetno izboljšali z zasnovo boljšega sistema za zajemanje in optimalnega filtriranja (omejitev pasovne širine).

Naposled smo predstavili Fabry-Perotov interferometriški vlakenski sensor rotacije/zasuka. Sensor je zgrajen iz dovodnega štirijedrnega optičnega vlakna, posebne vlakenske centronesimetrične mikrostrukture in ohišja v obliki steklene kapilare. Ekscentrično postavljena jedra štirijedrnega vlakna in dve polprepustni zrcali tvorijo štiri FP-interferometre. Izziv pri načrtovanju sensorja je bil zagotoviti spremembo dolžine FP-interferometra ob zasuku/rotaciji vlakna. Pri zasuku/rotaciji vlakna vzdolž osi ne prihaja do spremembe razdalje med zrcaloma FP-interferometra. Mikrostruktura, ki je pod kotom poliran kos brezjedrnega optičnega vlakna, zaradi centronesimetrične oblike (izrezanega valja) povzroči ob zasuku/rotaciji sensorja modulacijo optične poti in s tem spremembe dolžin posameznega FP-interferometra. Merilno območje predstavljenega sensorja znaša $\pm 90^\circ$ pri izmerjeni ločljivosti $0,023^\circ$. Nadaljnje izboljšave za predstavljen sensor so mogoče predvsem v načrtovanju in zasnovi ustrežnejšega ohišja, ki se je izkazalo kot kritični element, saj zagotavlja poravnavo obeh vlaken med rotacijo. Tesneje in bolj nadzorovano prileganje s čim manjšo zračnostjo med ohišjem (kapilaro) in dovodnim štirijedrnim vlaknom ter mikrostrukture bi lahko zagotovilo rotacijske

premike z minimalnimi neželenimi vertikalnimi premiki bodisi dovodnega vlakna bodisi mikrostrukture.

5.1 Potrditev teze in izvirni znanstveni prispevki k znanosti

S predstavljenimi senzorji rotacije/zasuka smo pokazali, da je z enostavnimi postopki izdelave in z majhnim številom cenovno ugodnih optoelektronskih komponent mogoče snovati optične vlakenske senzorje rotacij/zasukov, ki imajo nizko temperaturno občutljivost, omogočajo razširitev na večje število senzorskih segmentov ter uporabljajo enostavne sisteme za razločanje merilnih signalov. S tem smo potrdili tezo doktorske disertacije. Pri tem smo prišli do naslednjih znanstvenih prispevkov:

- Zasnova in realizacija novega kompaktnega popolnoma optičnovlakenskega senzorja za merjenje kotov rotacij/zasukov z nizko temperaturno občutljivostjo, primerne za vgradnjo v visokotemperaturna območja delovanja.
- Zasnova in realizacija kompaktnega vlakenskega polarizacijskega senzorskega sistema za večsegmentno merjenje kotov rotacij/zasuka.
- Zasnova in realizacija kompaktnega popolnoma optično vlakenskega senzorja za merjenje kotov rotacij/zasukov na osnovi Fabry-Perotovega vlakenskega interferometra.
- Uporaba obstoječih optičnih (optoelektronskih) komponent, ki so že razvite za uporabo v telekomunikacijah, pri razvoju in snovanju novih optičnih vlakenskih senzorjev, ki so primerni za merjenje rotacij/zasukov.

LITERATURA

- [1] E. Udd, and W. B. Spillman, "*Fiber optic sensors : An Introduction for Engineers and Scientists*, 2nd ed.", Hoboken, N.J.: John Wiley & Sons, 2011.
- [2] S. Yin, P. B. Ruffin, and F. T. S. Yu, "*Fiber Optic Sensors*, 2nd ed.", Boca Raton, FL: CRC Press, 2008.
- [3] O. Strobel, D. Seibl, J. Lubkoll *et al.*, "Fiber-Optic Sensors - An Overview," *Icton: 2009 11th International Conference on Transparent Optical Networks, Vols 1 and 2*, pp. 1-6, 2009.
- [4] B. Culshaw, "Fibre Optic Sensor Technology - An Overview of Ofs(10)," *Optical Fibre Sensing and Systems in Nuclear Environments*, vol. 2425, pp. 129-132, 1994.
- [5] K. T. V. Grattan, and T. Sun, "Fiber Optic Sensor Technology: An Overview," *Sensors and Actuators a-Physical*, vol. 82, no. 1-3, pp. 40-61, May 15, 2000.
- [6] C. K. Y. Leung, N. Elvin, N. Olson *et al.*, "Optical Fiber Crack Sensor for Concrete Structures," *Smart Sensing, Processing, and Instrumentation - Smart Structures and Materials 1997*, vol. 3042, pp. 283-292, 1997.
- [7] D. C. Seo, I. B. Kwon, and J. J. Lee, "Fatigue Crack Growth Monitoring by Optical Fiber Sensors in Smart Composite Patch Repairs," *Advanced Nondestructive Evaluation I, Pts 1 and 2, Proceedings*, vol. 321-323, pp. 286-289, 2006.
- [8] M. Olivero, G. Perrone, A. Vallan *et al.*, "Plastic Optical Fiber Displacement Sensor for Cracks Monitoring," *Damage Assessment of Structures VII*, vol. 347, pp. 487-492, 2007.
- [9] N. Metje, D. N. Chapman, C. D. F. Rogers *et al.*, "An Optical Fiber Sensor System for Remote Displacement Monitoring of Structures - Prototype Tests in the Laboratory," *Structural Health Monitoring-an International Journal*, vol. 7, no. 1, pp. 51-63, Mar, 2008.
- [10] H. F. Pei, J. H. Yin, and W. Jin, "Development of Novel Optical Fiber Sensors for Measuring Tilts and Displacements of Geotechnical Structures," *Measurement Science and Technology*, vol. 24, no. 9, Sep, 2013.
- [11] K. Tachibana, H. Murayama, H. Igawa *et al.*, "Measurement of Distributed Strain and Deformation and Load Identification Using Optical Fiber Strain Sensors," *Structural Health Monitoring 2011: Condition-Based Maintenance and Intelligent Structures, Vol 1*, pp. 1180-1187, 2011.
- [12] M. Ruzicka, M. Dvorak, and K. Doubrava, "Strain Measurement with the Fiber Bragg Grating Optical Sensors," *Proceedings of the 50th*

- Annual Conference on Experimental Stress Analysis*, pp. 385-392, 2012.
- [13] A. W. Domanski, M. Bieda, P. Lesiak *et al.*, "Polarimetric Optical Fiber Sensors for Dynamic Strain Measurement in Composite Materials," *Acta Physica Polonica A*, vol. 124, no. 3, pp. 399-401, Sep, 2013.
- [14] F. Wang, X. P. Zhang, X. C. Wang *et al.*, "Distributed fiber strain and vibration sensor based on Brillouin optical time-domain reflectometry and polarization optical time-domain reflectometry," *Optics Letters*, vol. 38, no. 14, pp. 2437-2439, Jul 15, 2013.
- [15] B. Mikel, R. Helan, Z. Buchta *et al.*, "Optical fiber sensors for measurement strain and vibration," *Photonics, Devices, and Systems VI*, vol. 9450, 2015.
- [16] C. S. Shin, and C. C. Chiang, "Deformation monitoring by using optical fiber grating sensor," *Journal of the Chinese Institute of Engineers*, vol. 28, no. 6, pp. 985-992, Oct, 2005.
- [17] L. Lu, Z. J. Wang, H. Feng *et al.*, "Analysis of Long-term Deformation of Reinforced Retaining Wall using Optical Fiber Sensor Geotextile," *Advances in Civil and Industrial Engineering Iv*, vol. 580-583, pp. 338-343, 2014.
- [18] S. K. K. Hussaini, B. Indraratna, and J. S. Vinod, "Application of Optical-Fiber Bragg Grating Sensors in Monitoring the Rail Track Deformations," *Geotechnical Testing Journal*, vol. 38, no. 4, pp. 387-396, Jul, 2015.
- [19] Y. P. Wang, X. Q. Huang, and M. Wang, "Temperature- and strain-independent torsion sensor utilising polarisation-dependent loss of Hi-Bi FBGs," *Electronics Letters*, vol. 49, no. 13, pp. 840-841, 2013.
- [20] Y. P. Wang, M. Wang, and X. Q. Huang, "In fiber Bragg grating twist sensor based on analysis of polarization dependent loss," *Optics Express*, vol. 21, no. 10, pp. 11913-11920, May 20, 2013.
- [21] B. B. Song, H. Zhang, Y. P. Miao *et al.*, "Highly sensitive twist sensor employing Sagnac interferometer based on PM-elliptical core fibers," *Optics Express*, vol. 23, no. 12, pp. 15372-15379, Jun 15, 2015.
- [22] D. Lesnik, and D. Donlagic, "In-line, fiber-optic polarimetric twist/torsion sensor," *Optics Letters*, vol. 38, no. 9, pp. 1494-1496, May 1, 2013.
- [23] K. L. Brogan, and D. R. Walt, "Optical fiber-based sensors: application to chemical biology," *Current Opinion in Chemical Biology*, vol. 9, no. 5, pp. 494-500, Oct, 2005.
- [24] I. Peshko, O. Cherry, T. Rutkevich *et al.*, "Long-period gratings in optical fibres for chemical sensor applications," *Measurement Science and Technology*, vol. 16, no. 11, pp. 2221-2228, Nov, 2005.

- [25] Z. M. Lu, M. H. Dai, K. M. Xu *et al.*, "A high precision, fast response, and low power consumption in situ optical fiber chemical pCO₂ sensor," *Talanta*, vol. 76, no. 2, pp. 353-359, Jul 15, 2008.
- [26] Y. B. Zhang, G. Keiser, C. Marzinsky *et al.*, "Applications of Optical Fiber Sensors in the Oil Refining and Petrochemical Industries," *2011 IEEE Sensors*, pp. 246-249, 2011.
- [27] N. Cennamo, L. Zeni, G. Alberti *et al.*, "Chemical sensors based on SPR in a Plastic Optical Fiber: simultaneous detection of Fe(III) and Cu(II)," *2014 Fotonica Aet Italian Conference on Photonics Technologies*, 2014.
- [28] D. Tiwari, S. W. James, R. P. Tatam *et al.*, "A high-sensitivity chemical sensor based on titania coated optical-fiber long period grating for ammonia sensing in water," *Fifth Asia-Pacific Optical Sensors Conference*, vol. 9655, 2015.
- [29] Y. J. Rao, D. J. Webb, D. A. Jackson *et al.*, "Optical in-Fiber Bragg Grating Sensor Systems for Medical Applications," *Journal of Biomedical Optics*, vol. 3, no. 1, pp. 38-44, Jan, 1998.
- [30] W. J. Yoo, B. Lee, D. H. Cho *et al.*, "Noncontact Temperature Sensor Using an Infrared Optical Fiber for Medical Usages," *World Congress on Medical Physics and Biomedical Engineering 2006, Vol 14, Pts 1-6*, vol. 14, pp. 1331-1333, 2007.
- [31] A. Grillet, D. Kinet, J. Witt *et al.*, "Optical fiber sensors embedded into medical textiles for healthcare monitoring," *IEEE Sensors Journal*, vol. 8, no. 7-8, pp. 1215-1222, Jul-Aug, 2008.
- [32] J. Witt, F. Narbonneau, M. Schukar *et al.*, "Smart medical textiles with embedded optical fibre sensors for continuous monitoring of respiratory movements during MRI," *Fourth European Workshop on Optical Fibre Sensors*, vol. 7653, 2010.
- [33] K. Prokopczuk, T. Poczesny, P. Sobotka *et al.*, "Extrinsic Optical Fiber Sensor for Medical Audiometric Applications," *Acta Physica Polonica A*, vol. 122, no. 5, pp. 957-961, Nov, 2012.
- [34] F. Taffoni, D. Formica, P. Saccomandi *et al.*, "Optical Fiber-Based MR-Compatible Sensors for Medical Applications: An Overview," *Sensors*, vol. 13, no. 10, pp. 14105-14120, Oct, 2013.
- [35] F. Baldini, and A. G. Mignani, "Optical-fiber medical sensors," *Mrs Bulletin*, vol. 27, no. 5, pp. 383-387, May, 2002.
- [36] T. Vo-Dinh, *Biomedical photonics handbook*, Second edition. ed.
- [37] D. Donlagic, and E. Cibula, "All-fiber high-sensitivity pressure sensor with SiO₂ diaphragm," *Optics Letters*, vol. 30, no. 16, pp. 2071-2073, Aug 15, 2005.
- [38] E. Cibula, S. Pevec, B. Lenardic *et al.*, "Miniature all-glass robust pressure sensor," *Optics Express*, vol. 17, no. 7, pp. 5098-5106, Mar 30, 2009.
- [39] V. V. Tuchin, *Handbook of photonics for biomedical science*, Boca Raton, FL: CRC Press, 2010.

- [40] S. Ezekiel, and H. J. Arditty, *Fiber-optic rotation sensors and related technologies proceedings of the first international conference, MIT, Cambridge, Mass., USA, November 9-11, 1981*, Berlin ; New York: Springer-Verlag, 1982.
- [41] W. K. Burns, *Optical fiber rotation sensing*, Boston: Academic Press, 1994.
- [42] T. Koh, H. Takase, and T. Tsugawa, "Torsional Problems in Aseismic Design of High-rise Buildings," in *Proceedings of the Fourth World Conference on Earthquake Engineering*, Santiago de Chile, 1969, pp. 71-88.
- [43] I. Venanzi, F. Cluni, V. Gusella *et al.*, "Torsional and across-wind response of high-rise buildings," in *12th International Conference on Wind Engineering*, Cairns - Australia, 2007.
- [44] A. M. Aly, A. Zasso, and F. Resta, "Dynamics and Control of High-Rise Buildings under Multidirectional Wind Loads," *Smart Materials Research*, vol. 2011, 2011.
- [45] A. L. Materazzi, and F. Ubertini, "Eigenproperties of suspension bridges with damage," *Journal of Sound and Vibration*, vol. 330, no. 26, pp. 6420-6434, Dec 19, 2011.
- [46] O. A. Bauchau, T. M. Krafchack, and J. F. Hayes, "Torsional Buckling Analysis and Damage Tolerance of Graphite/Epoxy Shafts," *Journal of Composite Materials*, vol. 22, no. 3, pp. 258-270, March 1, 1988, 1988.
- [47] I. L. Howard, "Practical approaches for evaluating bending and torsion of fiber reinforced polymer components using instrumented testing," *Journal of Applied Science & Engineering Technology* vol. 2, 2008.
- [48] P. D. Spanos, A. M. Chevallier, N. P. Politis *et al.*, "Oil and Gas Well Drilling: A Vibrations Perspective," *The Shock and Vibration Digest*, vol. 35, no. 2, pp. 85-103, 2003.
- [49] J. Rajnauth, and T. Jagai, "Reduce Torsional Vibration and Improve Drilling Operations " *International Journal of Applied Science and Technology* vol. 2, no. 7, pp. 109-123, 2012.
- [50] M. Pieraccini, M. Fratini, F. Parrini *et al.*, "Monitoring of bridges using coherent radar: detection of longitudinal and torsional modes," *2008 European Radar Conference*, pp. 176-179, 2008.
- [51] D. Dei, M. Pieraccini, M. Fratini *et al.*, "Detection of vertical bending and torsional movements of a bridge using a coherent radar," *Ndt & E International*, vol. 42, no. 8, pp. 741-747, Dec, 2009.
- [52] W. A. A. W. Akib, S. K. Kok, and Z. Mat Amin, "High rise building deformation monitoring with GPS," in *Symposium and Exhibition on Geoinformation*, Kuala Lumpur, Malaysia, 2004.
- [53] H. S. Park, H. G. Shon, I. S. Kim *et al.*, "Monitoring of Structural Behavior of High-rise Buildings using GPS," in *CTBUH*, Seoul, 2004.

- [54] V. H. S. Khoo, Y. K. Tor, and G. On, "Monitoring of High Rise Building using Real-Time Differential GPS," in FIG Congress - Facing the Challenges – Building the Capacity, Sydney, Australia, 2010.
- [55] S. W. Choi, I. S. Kim, J. H. Park *et al.*, "Evaluation of Stiffness Changes in a High-Rise Building by Measurements of Lateral Displacements Using GPS Technology," *Sensors*, vol. 13, no. 11, pp. 15489-15503, Nov, 2013.
- [56] A. Maekawa, M. Noda, M. Shintani *et al.*, "Development of noncontact measurement methods using multiple laser displacement sensors for bending and torsional vibration stresses in piping systems," *International Journal of Pressure Vessels and Piping*, vol. 137, pp. 38-45, Jan, 2016.
- [57] A. M. Smith, "Birefringence Induced by Bends and Twists in Single-Mode Optical Fiber," *Applied Optics*, vol. 19, no. 15, pp. 2606-2611, 1980.
- [58] R. Ulrich, and A. Simon, "Polarization Optics of Twisted Single-Mode Fibers," *Applied Optics*, vol. 18, no. 13, pp. 2241-2251, 1979.
- [59] H. J. El-Khozondar, M. S. Muller, T. C. Buck *et al.*, "Experimental Investigation of Polarization Rotation in Twisted Optical Fibers," *Isot: 2009 International Symposium on Optomechatronic Technologies*, pp. 219-222, 2009.
- [60] N. Mancier, A. Chakari, P. Meyrueis *et al.*, "Angular Displacement Fiberoptic Sensor - Theoretical and Experimental-Study," *Applied Optics*, vol. 34, no. 28, pp. 6489-6495, Oct 1, 1995.
- [61] A. J. Barlow, J. J. Ramskovhansen, and D. N. Payne, "Birefringence and Polarization Mode-Dispersion in Spun Single-Mode Fibers," *Applied Optics*, vol. 20, no. 17, pp. 2962-2968, 1981.
- [62] D. Tentori, and A. Garcia-Weidner, "Jones birefringence in twisted single-mode optical fibers," *Optics Express*, vol. 21, no. 26, pp. 31725-31739, Dec 30, 2013.
- [63] D. B. Mortimore, "Fiber Loop Reflectors," *Journal of Lightwave Technology*, vol. 6, no. 7, pp. 1217-1224, Jul, 1988.
- [64] O. Frazao, J. M. Baptista, and J. L. Santos, "Recent advances in high-birefringence fiber loop mirror sensors," *Sensors*, vol. 7, no. 11, pp. 2970-2983, Nov, 2007.
- [65] H. H. Liang, M. M. Sun, and Y. X. Jin, "Twist sensor based on Sagnac single-mode optic fiber interferometer," *Optik*, vol. 124, no. 24, pp. 6676-6678, 2013.
- [66] P. Zu, C. C. Chan, Y. X. Jin *et al.*, "A Temperature-Insensitive Twist Sensor by Using Low-Birefringence Photonic-Crystal-Fiber-Based Sagnac Interferometer," *Ieee Photonics Technology Letters*, vol. 23, no. 13, pp. 920-922, Jul 1, 2011.
- [67] O. Frazao, S. O. Silva, J. M. Baptista *et al.*, "Simultaneous measurement of multiparameters using a Sagnac interferometer

- with polarization maintaining side-hole fiber," *Applied Optics*, vol. 47, no. 27, pp. 4841-4848, Sep 20, 2008.
- [68] W. G. Chen, S. Q. Lou, L. W. Wang *et al.*, "Highly Sensitive Torsion Sensor Based on Sagnac Interferometer Using Side-Leakage Photonic Crystal Fiber," *Ieee Photonics Technology Letters*, vol. 23, no. 21, pp. 1639-1641, Nov 1, 2011.
- [69] X. Wang, S. Q. Lou, X. Z. Sheng *et al.*, "Simultaneous measurement of torsion, strain and temperature using a side-leakage photonic crystal fiber loop mirror," *Infrared Physics & Technology*, vol. 76, pp. 603-607, May, 2016.
- [70] H. M. Kim, T. H. Kim, B. Kim *et al.*, "Temperature-Insensitive Torsion Sensor With Enhanced Sensitivity by Use of a Highly Birefringent Photonic Crystal Fiber," *Ieee Photonics Technology Letters*, vol. 22, no. 20, pp. 1539-1541, Oct 15, 2010.
- [71] S. Wei, W. Zhang, J. Shang *et al.*, "Torsion sensing characteristics of fibre ring laser based on nonlinear polarisation rotation," *Electronics Letters*, vol. 48, no. 2, pp. 116-118, 2012.
- [72] M. S. Ferreira, J. L. Santos, P. Mergo *et al.*, "Torsion sensor based on a figure-of-eight cavity fibre laser," *Laser Physics Letters*, vol. 10, no. 4, pp. 3, Apr, 2013.
- [73] O. Frazao, R. M. Silva, and J. L. Santos, "High-Birefringent Fiber Loop Mirror Sensors With an Output Port Probe," *Ieee Photonics Technology Letters*, vol. 23, no. 2, pp. 103-105, Jan 15, 2011.
- [74] T. Hu, Y. Zhao, and D. Wu, "Novel torsion sensor using a polarization maintaining photonic crystal fiber loop mirror," *Instrumentation Science & Technology*, vol. 44, no. 1, pp. 46-53, Jan 2, 2016.
- [75] Y. Chen, Y. Semenova, G. Farrell *et al.*, "A Compact Sagnac Loop Based on a Microfiber Coupler for Twist Sensing," *Ieee Photonics Technology Letters*, vol. 27, no. 24, pp. 2579-2582, Dec 15, 2015.
- [76] H. F. Xuan, W. Jin, M. Zhang *et al.*, "In-fiber polarimeters based on hollow-core photonic bandgap fibers," *Optics Express*, vol. 17, no. 15, pp. 13246-13254, Jul 20, 2009.
- [77] H. Y. Fu, S. K. Khijwania, H. Y. Tam *et al.*, "Polarization-maintaining photonic-crystal-fiber-based all-optical polarimetric torsion sensor," *Applied Optics*, vol. 49, no. 31, pp. 5954-5958, Nov 1, 2010.
- [78] X. Y. Li, W. G. Zhang, L. Chen *et al.*, "Helical fiber interferometer using flame-heated treatment for torsion sensing application," *IEEE Photonics Technology Letters*, vol. PP, no. 99, pp. 1-1, 2016.
- [79] J. H. Wo, M. Jiang, M. Malnou *et al.*, "Twist sensor based on axial strain insensitive distributed Bragg reflector fiber laser," *Optics Express*, vol. 20, no. 3, pp. 2844-2850, Jan 30, 2012.
- [80] J. Case, H. C. Chilver, and C. T. F. Ross, *Strength of materials & structures : with an introduction to finite element methods*, 3rd ed., London: Edward Arnold, 1993.

- [81] T. W. MacDougall, S. Pilevar, C. W. Haggans *et al.*, "Generalized expression for the growth of long period gratings," *Ieee Photonics Technology Letters*, vol. 10, no. 10, pp. 1449-1451, Oct, 1998.
- [82] Y. J. Rao, Y. P. Wang, Z. L. Ran *et al.*, "Novel fiber-optic sensors based on long-period fiber gratings written by high-frequency CO₂ laser pulses," *Journal of Lightwave Technology*, vol. 21, no. 5, pp. 1320-1327, May, 2003.
- [83] Y. P. Wang, X. Q. Huang, and M. Wang, "Temperature Insensitive Birefringent LPG Twist Sensing Based on the Polarization Properties," *Ieee Photonics Technology Letters*, vol. 27, no. 22, pp. 2367-2370, Nov 15, 2015.
- [84] D. A. Gonzalez, C. Jauregui, A. Quintela *et al.*, "Torsion-induced effects on UV long-period fiber gratings." pp. 192-195.
- [85] J. M. Baptista, S. F. Santos, G. Rego *et al.*, "Measurement of angular rotation using a long period fiber grating in a self-referenced fiber optic intensity sensor," *2005 IEEE LEOS Annual Meeting Conference Proceedings (LEOS)*, pp. 805-806, 2005.
- [86] C. Y. Lin, L. A. Wang, and G. W. Chern, "Corrugated long-period fiber gratings as strain, torsion, and bending sensors," *Journal of Lightwave Technology*, vol. 19, no. 8, pp. 1159-1168, Aug, 2001.
- [87] A. S. Nair, V. P. S. Kumar, and H. Joe, "Twist Sensitivity of Cladding-Mode Resonances and Its Cross-Sensitivity to Strain and Temperature in a Mechanically Induced Long-Period Fiber Grating," *Fiber and Integrated Optics*, vol. 33, no. 5-6, pp. 347-359, 2014/09/03, 2014.
- [88] J. Y. Cho, J. H. Lim, and K. S. Lee, "Optical fiber twist sensor with two orthogonally oriented mechanically induced long-period grating sections," *Ieee Photonics Technology Letters*, vol. 17, no. 2, pp. 453-455, Feb, 2005.
- [89] D. E. Ceballos-Herrera, I. Torres-Gomez, A. Martinez-Rios *et al.*, "Torsion Sensing Characteristics of Mechanically Induced Long-Period Holey Fiber Gratings," *Ieee Sensors Journal*, vol. 10, no. 7, pp. 1200-1205, Jul, 2010.
- [90] M. Pulido-Navarro, J. Álvarez-Chávez, D. Ceballos-Herrera *et al.*, "Optical Fiber Torsion Sensor with Mechanically Induced Long Period Fiber Gratings in Rare-Earth Doped Fibers," *Optics and Photonics Journal*, vol. Vol.04No.06, pp. 7, 2014.
- [91] Y. P. Wang, Y. J. Rao, A. Z. Hu *et al.*, "A novel fiber-optic torsion sensor based on a CO₂-laser-induced long-period fiber grating," *Ofs 2002: 15th Optical Fiber Sensors Conference Technical Digest*, pp. 147-150, 2002.
- [92] Y. P. Wang, and Y. J. Rao, "Long period fibre grating torsion sensor measuring twist rate and determining twist direction simultaneously," *Electronics Letters*, vol. 40, no. 3, pp. 164-166, Feb 5, 2004.

- [93] Y. P. Wang, and Y. Rao, "CO₂-laser induced LPFG torsion characteristics depending on length of twisted fibre," *Electronics Letters*, vol. 40, no. 18, pp. 1101-1103, Sep 2, 2004.
- [94] T. Zhu, K. S. Chiang, Y. J. Rao *et al.*, "Characterization of Long-Period Fiber Gratings Written by CO₂ Laser in Twisted Single-Mode Fibers," *Journal of Lightwave Technology*, vol. 27, no. 21, pp. 4863-4869, Nov 1, 2009.
- [95] X. L. Li, W. G. Zhang, J. Ruan *et al.*, "Temperature- and strain-insensitive torsion sensor based on phase-shifted ultra-long-period grating," *Electronics Letters*, vol. 48, no. 4, pp. 235-236, Feb 16, 2012.
- [96] L. Zhang, Y. Q. Liu, Y. H. Zhao *et al.*, "High Sensitivity Twist Sensor Based on Helical Long-Period Grating Written in Two-Mode Fiber," *Ieee Photonics Technology Letters*, vol. 28, no. 15, pp. 1629-1632, Aug 1, 2016.
- [97] Y.-h. Feng, Y. Ran, L.-P. Sun *et al.*, "Highly sensitive twist sensor based on CO₂-laser-induced long period grating in few mode fibers," *OSA Technical Digest (online)*. p. ASu2A.39.
- [98] Y. P. Wang, J. P. Chen, and Y. J. Rao, "Torsion characteristics of long-period fiber gratings induced by high-frequency CO₂ laser pulses," *Journal of the Optical Society of America B-Optical Physics*, vol. 22, no. 6, pp. 1167-1172, Jun, 2005.
- [99] R. Gao, Y. Jiang, and L. Jiang, "Multi-phase-shifted helical long period fiber grating based temperature-insensitive optical twist sensor," *Optics Express*, vol. 22, no. 13, pp. 15697-15709, Jun 30, 2014.
- [100] L. L. Shi, T. Zhu, Y. E. Fan *et al.*, "Torsion sensing with a fiber ring laser incorporating a pair of rotary long-period fiber gratings," *Optics Communications*, vol. 284, no. 22, pp. 5299-5302, Oct 15, 2011.
- [101] Y. J. Rao, T. Zhu, and Q. J. Mo, "Highly sensitive fiber-optic torsion sensor based on an ultra-long-period fiber grating," *Optics Communications*, vol. 266, no. 1, pp. 187-190, Oct 1, 2006.
- [102] S. Guan, Q. Yu, S. Song *et al.*, "A novel long-period fiber grating torsion sensor." pp. 63440W-63440W-7.
- [103] G. Rego, J. R. A. Fernandes, J. L. Santos *et al.*, "New technique to mechanically induce long-period fibre gratings," *Optics Communications*, vol. 220, no. 1-3, pp. 111-118, 5/1/, 2003.
- [104] B. U. Nair, V. P. Sudeep Kumar, V. P. Mahadevan Pillai *et al.*, "Wavelength Shift of Cladding Mode Resonances in a Mechanically Induced LPFG by Twisting the Fiber," *Fiber and Integrated Optics*, vol. 26, no. 3, pp. 159-172, 2007/04/27, 2007.
- [105] G. Rego, M. Morais, J. L. Santos *et al.*, "PDL and DGD Measurements of Mechanically Induced Long-period Fiber Gratings," in *Proceedings of the London Communications Symposium, London, 2003*, pp. 77-80.

- [106] O. V. Ivanov, "Wavelength shift and split of cladding mode resonances in microbend long-period fiber gratings under torsion," *Optics Communications*, vol. 232, no. 1-6, pp. 159-166, Mar 1, 2004.
- [107] X. Yu, P. Shum, S. Fu *et al.*, "Torsion-sensitivity of mechanical long-period grating in photonic crystal fiber," *Journal of Optoelectronics and Advanced Materials*, vol. 8, no. 3, pp. 1247-1249, Jun, 2006.
- [108] L. A. Wang, C. Y. Lin, and G. W. Chern, "A torsion sensor made of a corrugated long period fibre grating," *Measurement Science and Technology*, vol. 12, no. 7, pp. 793-799, Jul, 2001.
- [109] J. Duan, Z. Xie, C. Wang *et al.*, "Torsion sensing characteristics of long period fiber gratings fabricated by femtosecond laser in optical fiber," *Optics and Laser Technology*, vol. 83, pp. 94-98, Sep, 2016.
- [110] S. T. Oh, K. R. Lee, U. C. Paek *et al.*, "Fabrication of helical long-period fiber gratings by use of a CO2 laser," *Optics Letters*, vol. 29, no. 13, pp. 1464-1466, Jul 1, 2004.
- [111] W. Shin, B. A. Yu, Y. L. Lee *et al.*, "High strength coupling and low polarization-dependent long-period fiber gratings based on the helicoidal structure," *Optical Fiber Technology*, vol. 14, no. 4, pp. 323-327, Oct, 2008.
- [112] L. L. Xian, P. Wang, and H. P. Li, "Power-interrogated and simultaneous measurement of temperature and torsion using paired helical long-period fiber gratings with opposite helicities," *Optics Express*, vol. 22, no. 17, pp. 20260-20267, Aug 25, 2014.
- [113] L. Zhang, Y. Q. Liu, X. B. Cao *et al.*, "High Sensitivity Chiral Long-Period Grating Sensors Written in the Twisted Fiber," *Ieee Sensors Journal*, vol. 16, no. 11, pp. 4253-4257, Jun 1, 2016.
- [114] G. Rego, O. Okhotnikov, E. Dianov *et al.*, "High-temperature stability of long-period fiber gratings produced using an electric arc," *Journal of Lightwave Technology*, vol. 19, no. 10, pp. 1574-1579, Oct, 2001.
- [115] G. Rego, R. Falate, J. L. Santos *et al.*, "Arc-induced long-period gratings in aluminosilicate glass fibers," *Optics Letters*, vol. 30, no. 16, pp. 2065-2067, Aug 15, 2005.
- [116] P. Caldas, G. Rego, O. V. Ivanov *et al.*, "Characterization of the response of a dual resonance of an arc-induced long-period grating to various physical parameters," *Applied Optics*, vol. 49, no. 16, pp. 2994-2999, Jun 1, 2010.
- [117] G. M. Rego, J. L. Santos, and H. M. Salgado, "Polarization dependent loss of arc-induced long-period fibre gratings," *Optics Communications*, vol. 262, no. 2, pp. 152-156, Jun 15, 2006.
- [118] O. Frazao, C. Jesus, J. M. Baptista *et al.*, "Fiber-Optic Interferometric Torsion Sensor Based on a Two-LP-Mode Operation in Birefringent Fiber," *Ieee Photonics Technology Letters*, vol. 21, no. 17, pp. 1277-1279, Sep 1, 2009.

- [119] Y. Y. Du, X. G. Qiao, Q. Z. Rong *et al.*, "Polarization-dependent in-line quasi-Michelson interferometer based on PM-PCF reflection," *Applied Optics*, vol. 52, no. 15, pp. 3591-3596, May 20, 2013.
- [120] S. M. Nalawade, S. S. Harnol, and H. V. Thakur, "Temperature and Strain Independent Modal Interferometric Torsion Sensor Using Photonic Crystal Fiber," *Ieee Sensors Journal*, vol. 12, no. 8, pp. 2614-2615, Aug, 2012.
- [121] Y. Yu, Q. Huang, X. Li *et al.*, "An in-line fiber-optic modal interferometer for simultaneous measurement of twist and ambient temperature," *Sensing and Bio-Sensing Research*, vol. 2, pp. 38-42, 12//, 2014.
- [122] J. M. Sierra-Hernandez, A. Castillo-Guzman, R. Selvas-Aguilar *et al.*, "Torsion sensing setup based on a three beam path Mach-Zehnder interferometer," *Microwave and Optical Technology Letters*, vol. 57, no. 8, pp. 1857-1860, 2015.
- [123] E. Huerta-Mascotte, J. M. Sierra-Hernandez, R. I. Mata-Chavez *et al.*, "A Core-Offset Mach Zehnder Interferometer Based on A Non-Zero Dispersion-Shifted Fiber and Its Torsion Sensing Application," *Sensors*, vol. 16, no. 6, Jun, 2016.
- [124] B. B. Song, Y. P. Miao, W. Lin *et al.*, "Multi-mode interferometer-based twist sensor with low temperature sensitivity employing square coreless fibers," *Optics Express*, vol. 21, no. 22, pp. 26806-26811, Nov 4, 2013.
- [125] N. K. Chen, J. J. Wang, G. L. Cheng *et al.*, "Fiber torsion sensor with directional discrimination based on twist-induced circular birefringence in unbalanced MachZehnder interferometer," *2014 Conference on Lasers and Electro-Optics (Cleo)*, 2014.
- [126] Q. Zhou, W. G. Zhang, L. Chen *et al.*, "Fiber torsion sensor based on a twist taper in polarization-maintaining fiber," *Optics Express*, vol. 23, no. 18, pp. 23877-23886, Sep 7, 2015.
- [127] H. L. Zhang, W. G. Zhang, L. Chen *et al.*, "Bidirectional Torsion Sensor Based on a Pair of Helical Long-Period Fiber Gratings," *Ieee Photonics Technology Letters*, vol. 28, no. 15, pp. 1700-1702, Aug 1, 2016.
- [128] J. Ruan, W. G. Zhang, H. Zhang *et al.*, "Temperature and twist characteristics of cascaded long-period fiber gratings written in polarization-maintaining fibers," *Journal of Optics*, vol. 14, no. 10, Oct, 2012.
- [129] X. M. Xi, G. K. L. Wong, T. Weiss *et al.*, "Measuring mechanical strain and twist using helical photonic crystal fiber," *Optics Letters*, vol. 38, no. 24, pp. 5401-5404, Dec 15, 2013.
- [130] C. G. Askins, G. A. Miller, and E. J. Friebele, "Bend and twist sensing in a multiple-core optical fiber," *2008 Conference on Optical Fiber Communication/National Fiber Optic Engineers Conference, Vols 1-8*, pp. 1545-1547, 2008.

- [131] C. Askins, J. Friebele, and G. Miller, "Multi-core optical fiber and method of making and using same," Google Patents, 2007.
- [132] L. A. Fernandes, J. R. Grenier, J. S. Aitchison *et al.*, "Fiber optic stress-independent helical torsion sensor," *Optics Letters*, vol. 40, no. 4, pp. 657-660, Feb 15, 2015.
- [133] B. Kim, C. Long, and Y. Chung, "Twin-core photonic crystal fiber for in-line torsion sensor." pp. 653-654.
- [134] O. Frazao, R. M. Silva, J. Kobelke *et al.*, "Temperature- and strain-independent torsion sensor using a fiber loop mirror based on suspended twin-core fiber," *Optics Letters*, vol. 35, no. 16, pp. 2777-2779, Aug 15, 2010.
- [135] V. Budinski, and D. Donlagic, "Quasi-distributed twist/torsion sensor," *Optics Express*, vol. 24, no. 23, pp. 26282-26299, 2016/11/14, 2016.
- [136] R. M. Silva, M. S. Ferreira, and O. Frazao, "Temperature independent torsion sensor using a high-birefringent Sagnac loop interferometer," *Optics Communications*, vol. 285, no. 6, pp. 1167-1170, Mar 15, 2012.
- [137] L. Chen, W. G. Zhang, L. Wang *et al.*, "In-fiber torsion sensor based on dual polarized Mach-Zehnder interference," *Optics Express*, vol. 22, no. 26, pp. 31654-31664, Dec 29, 2014.
- [138] G. Basilio-Sanchez, and J. Hernandez-Cordero, "Enhancement in sensitivity for fiber-optic torsion sensors," *Ieee Sensors Journal*, vol. 5, no. 6, pp. 1332-1337, Dec, 2005.
- [139] T. Guo, F. Liu, F. Du *et al.*, "VCSEL-powered and polarization-maintaining fiber-optic grating vector rotation sensor," *Optics Express*, vol. 21, no. 16, pp. 19097-19102, Aug 12, 2013.
- [140] T. Erdogan, and J. E. Sipe, "Tilted fiber phase gratings," *Journal of the Optical Society of America a-Optics Image Science and Vision*, vol. 13, no. 2, pp. 296-313, Feb, 1996.
- [141] J. Albert, L.-Y. Shao, and C. Caucheteur, "Tilted fiber Bragg grating sensors," *Laser & Photonics Reviews*, vol. 7, no. 1, pp. 83-108, 2013.
- [142] X. Chen, K. Zhou, L. Zhang *et al.*, "In-fiber twist sensor based on a fiber Bragg grating with 81 degrees tilted structure," *Ieee Photonics Technology Letters*, vol. 18, no. 21-24, pp. 2596-2598, Nov-Dec, 2006.
- [143] Z. Yan, A. Adebayo, K. Zhou *et al.*, "All-fibre twist sensor system based on 45° and 81° tilted fibre gratings." pp. 77538E-77538E-4.
- [144] Y. F. Lu, C. Y. Shen, D. B. Chen *et al.*, "Highly sensitive twist sensor based on tilted fiber Bragg grating of polarization-dependent properties," *Optical Fiber Technology*, vol. 20, no. 5, pp. 491-494, Oct, 2014.
- [145] C. Mou, K. Zhou, R. Suo *et al.*, "Fibre laser torsion sensor system using an excessively tilted fibre grating and low-cost time domain demodulation." pp. 75033E-75033E-4.

- [146] T. Guo, F. Liu, B. O. Guan *et al.*, "Polarimetric multi-mode tilted fiber grating sensors," *Optics Express*, vol. 22, no. 6, pp. 7330-7336, Mar 24, 2014.
- [147] C. Y. Shen, Y. Zhang, W. J. Zhou *et al.*, "Au-coated tilted fiber Bragg grating twist sensor based on surface plasmon resonance," *Applied Physics Letters*, vol. 104, no. 7, Feb 17, 2014.
- [148] F. Yang, Z. J. Fang, Z. Q. Pan *et al.*, "Orthogonal polarization mode coupling for pure twisted polarization maintaining fiber Bragg gratings," *Optics Express*, vol. 20, no. 27, pp. 28839-28845, Dec 17, 2012.
- [149] B. Yin, H. S. Li, S. C. Feng *et al.*, "Temperature-Independent and Strain-Independent Twist Sensor Based on Structured PM-CFBG," *Ieee Photonics Technology Letters*, vol. 26, no. 15, pp. 1565-1568, Aug 1, 2014.
- [150] Y.-L. Lo, B.-R. Chue, and S.-H. Xu, "Fiber torsion sensor demodulated by a high-birefringence fiber Bragg grating," *Optics Communications*, vol. 230, no. 4-6, pp. 287-295, 2/1/, 2004.
- [151] V. I. Kopp, V. M. Churikov, J. Singer *et al.*, "Chiral fiber sensors." pp. 76770U-76770U-6.
- [152] S. Ura, S. Shoda, K. Nishio *et al.*, "In-line rotation sensor based on VCSEL behavior under polarization-rotating optical feedback," *Optics Express*, vol. 19, no. 24, pp. 23683-23688, Nov 21, 2011.
- [153] L. S. Pieter, A. C. Anatoli, and A. J. v. Wyk, "Dual Bragg grating sensor for concurrent torsion and temperature measurement," *Measurement Science and Technology*, vol. 17, no. 5, pp. 1057, 2006.
- [154] L. Kruger, P. L. Swart, A. A. Chtcherbakov *et al.*, "Non-contact torsion sensor using fibre Bragg gratings," *Measurement Science and Technology*, vol. 15, no. 8, pp. 1448-1452, Aug, 2004.
- [155] X. Tian, and X. Tao, "Torsion measurement by using FBG sensors." pp. 154-164.
- [156] Y. J. Wang, L. Liang, Y. Q. Yuan *et al.*, "A Two Fiber Bragg Gratings Sensing System to Monitor the Torque of Rotating Shaft," *Sensors*, vol. 16, no. 1, Jan, 2016.
- [157] M. S. Müller, L. Hoffmann, T. S. Buck *et al.*, "Realization of a fiber-optic force-torque sensor with six degrees of freedom." pp. 72660S-72660S-8.
- [158] X. G. Tian, and X. M. Tao, "Torsion measurement using fiber Bragg grating sensors," *Experimental Mechanics*, vol. 41, no. 3, pp. 248-253, 2001//, 2001.
- [159] W. G. Zhang, G. Y. Kai, X. Y. Dong *et al.*, "Temperature-independent FBG-type torsion sensor based on combinatorial torsion beam," *Ieee Photonics Technology Letters*, vol. 14, no. 8, pp. 1154-1156, Aug, 2002.

- [160] B. K. Cheng, W. G. Zhu, L. W. Hua *et al.*, "Distributed torsion sensor based on cascaded coaxial cable Fabry-Perot interferometers," *Measurement Science and Technology*, vol. 27, no. 7, Jul, 2016.
- [161] H. J. Sheng, W. F. Liu, and M. Y. Fu, "360 degrees Rotation Sensor Using a Chirped Fiber Grating," *Ieee Photonics Technology Letters*, vol. 26, no. 2, pp. 162-164, Jan 15, 2014.
- [162] M. Lomer, and K. Contreras, "Non-contact torsion transducer based on the measurement of Moire patterns using plastic optical fibres." pp. 66161N-66161N-9.
- [163] "Micronor Inc.," 16. 6. 2017; <http://micronor.com/products/rotary-encoders-mri/>
- [164] F. Zhang, and J. W. Y. Lit, "Temperature and Strain Sensitivity Measurements of High-Birefringent Polarization-Maintaining Fibers," *Applied Optics*, vol. 32, no. 13, pp. 2213-2218, May 1, 1993.
- [165] X. Dong, J. Hao, J. Su *et al.*, "Temperature stabilized and broadband fiber waveplate fabricated with a birefringent photonic crystal fiber," *Frontiers of Optoelectronics in China*, vol. 3, no. 1, pp. 9-12, 2010//, 2010.
- [166] H. Zhao, M. Chen, and G. Li, "Temperature dependence of birefringence in polarization-maintaining photonic crystal fibres," *Chinese Physics B*, vol. 21, no. 6, pp. 068404, 2012.
- [167] "DenseLight," 16 .6. 2017; <http://www.poet-technologies.com/products/us-series.html>.
- [168] "Maxim Integrated - MAX4322," 16. 6. 2017; <https://www.maximintegrated.com/en/products/analog/amplifiers/MAX4322.html>.
- [169] "ON Semiconductor - FDV303N," 16. 6. 2017; <https://www.fairchildsemi.com/products/discretes/fets/mosfets/FDV303N.html>.
- [170] "OSEMOS - OSMPDPS-2101BFSO," 16. 6. 2017; <http://osemos.com/product/>.
- [171] "Texas Instruments - OPA381," 16. 6. 2017; <http://www.ti.com/product/OPA381>.
- [172] "Texas Instruments - ADS8320," 16. 6. 2017; <http://www.ti.com/product/ADS8320>.
- [173] "Atmel - SAM3X8E," 16. 6. 2017; <http://www.atmel.com/products/microcontrollers/arm/sam3x.aspx>.
- [174] "Thorlabs - RSP05/M," 16. 6. 2017; <https://www.thorlabs.com/thorproduct.cfm?partnumber=RSP05/M#ad-image-0>.
- [175] "Maxim Integrated - DS1023-100," 16. 6. 2017; <https://www.maximintegrated.com/en/products/digital/clock-generation-distribution/DS1023.html>.

- [176] "Texas Instruments - LMH6526," 16. 6. 2017;
<http://www.ti.com/product/LMH6526>.
- [177] "Maxim Integrated - MAX5842," 16. 6. 2017;
<https://www.maximintegrated.com/en/products/analog/data-converters/digital-to-analog-converters/MAX5842.html>.
- [178] "Texas Instruments - SN75LVDS391," 16. 6. 2017;
<http://www.ti.com/product/SN75LVDS391>.
- [179] "OSEMOS - OSMFLP-5110BFA2G," 16. 6. 2017;
<http://osemos.com/product/>.
- [180] "OSEMOS - OSMPDPS-1102ANS0," 16. 6. 2017;
<http://osemos.com/product/>.
- [181] "Analog Devices - AD8015," 16. 6. 2017;
<http://www.analog.com/en/products/amplifiers/specialty-amplifiers/photo-detector-integrated-transimpedance-amplifiers/ad8015.html>.
- [182] "Analog Devices - AD8375," 16. 6. 2017;
<http://www.analog.com/en/products/rf-microwave/rf-amplifiers/fully-differential-amplifiers/ad8375.html>.
- [183] R. Ulrich, S. C. Rashleigh, and W. Eickhoff, "Bending-Induced Birefringence in Single-Mode Fibers," *Optics Letters*, vol. 5, no. 6, pp. 273-275, 1980.
- [184] P. G. Cielo, "Fiber Optic Hydrophone - Improved Strain Configuration and Environmental Noise Protection," *Applied Optics*, vol. 18, no. 17, pp. 2933-2937, 1979.
- [185] R. A. J. S. Acceta, "Ultra-sensitive optical sensors for robotic touch and hearing." p. 75.
- [186] K. A. J. W. H. Quick, J. E. Coker, "Fiber optic, Fabry-Perot strain gauge: Soc for Experimental Mechanics," pp. 124-129, 1984.
- [187] A. A. H. I. Paulicka, V. Sochor, "Optical fibre Fabry-Perot sensor for the detection of small vibrations and displacements." pp. 1066-1067.
- [188] T. Yoshino, K. Kurosawa, K. Itoh *et al.*, "Fiber-Optic Fabry-Perot Interferometer and its Sensor Applications," *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, vol. 30, no. 10, pp. 1612-1621, 1982.
- [189] E. Cibula, "Uporaba površinske mikroobdelave optičnega vlakna v senzorski tehniki in fotoniki," Univerza v Mariboru, 2005.
- [190] S. Pevec, "Mikro-obdelava in mikro-naprave iz optičnih vlaken temelječe na selektivnem jedkanju in dopiranju s P2O5 ", Univerza v Mariboru, 2014.
- [191] "Wolfram MathWorld - Barycentric Coordinates," 01. 9. 2017;
<http://mathworld.wolfram.com/BarycentricCoordinates.html>.
- [192] "National instruments - PXIe-4844," 01. 9. 2017;
<http://www.ni.com/sl-si/support/model.pxie-4844.html>.

- [193] "Fibercore - Fan Outs," 01. 9. 2017;
<http://fibercore.com/product/fan-outs>.
- [194] E. Cibula, and D. Donlagic, "Low-loss semi-reflective in-fiber mirrors,"
Opt Express 18, 12017-12026 (2010).
- [195] C. E. Lee, and H. F. Taylor, "Interferometric optical fibre sensors
using internal mirrors," Electronics Letters 24, 193-194 (1988).
- [196] "Semicore Inc. - SC450," 01. 9. 2017;
<http://www.semicore.com/sputtering-systems>.

PRILOGA

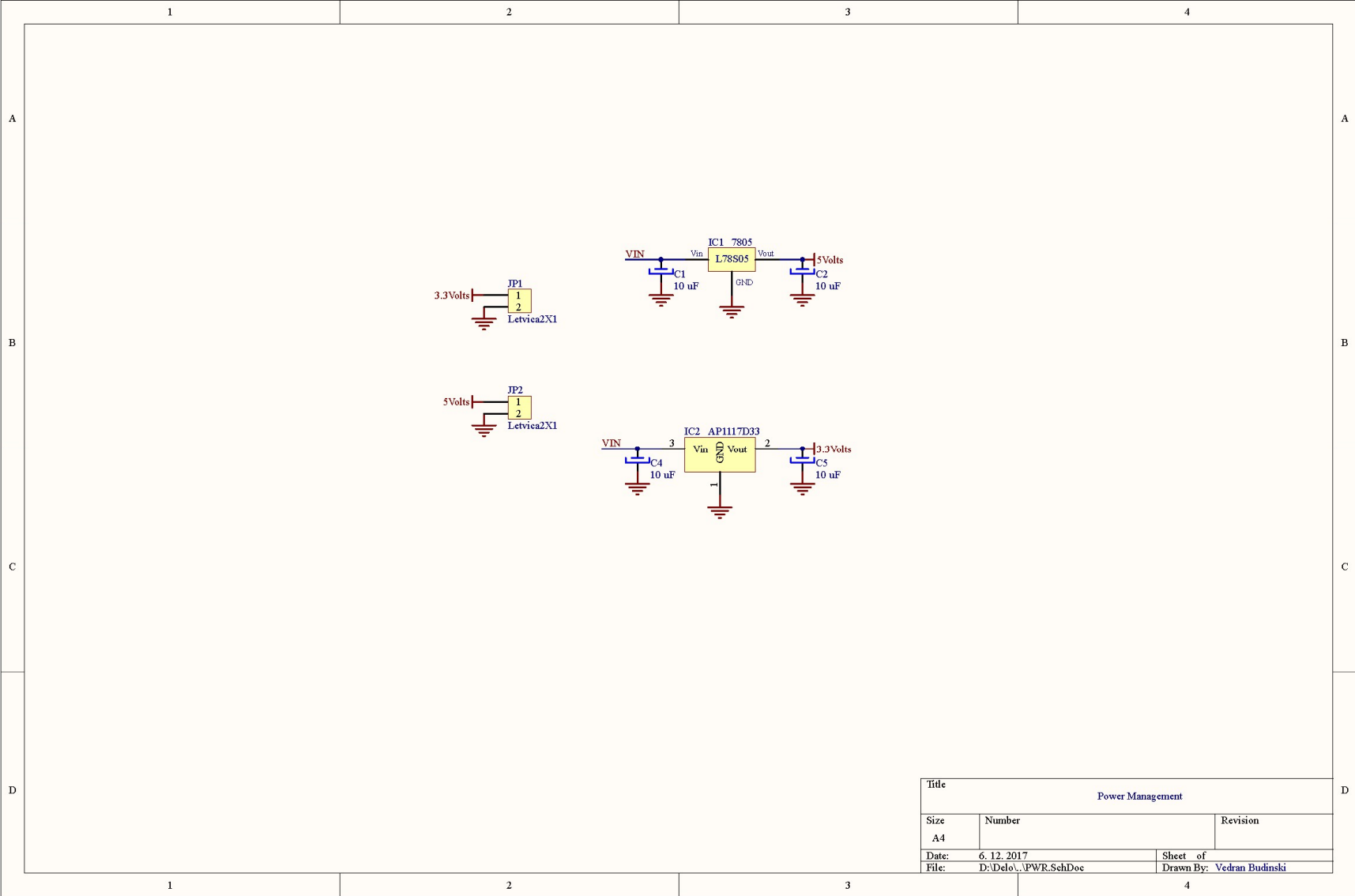
Elektronske sheme in načrti merilnih sistemov za merjenje rotacij/zasukov.

Opto-elektronski sklop optičnega polarimetričnega vlakenskega senzorja za meritev rotacije/zasukov na enojnem dovodnem vlaknu.

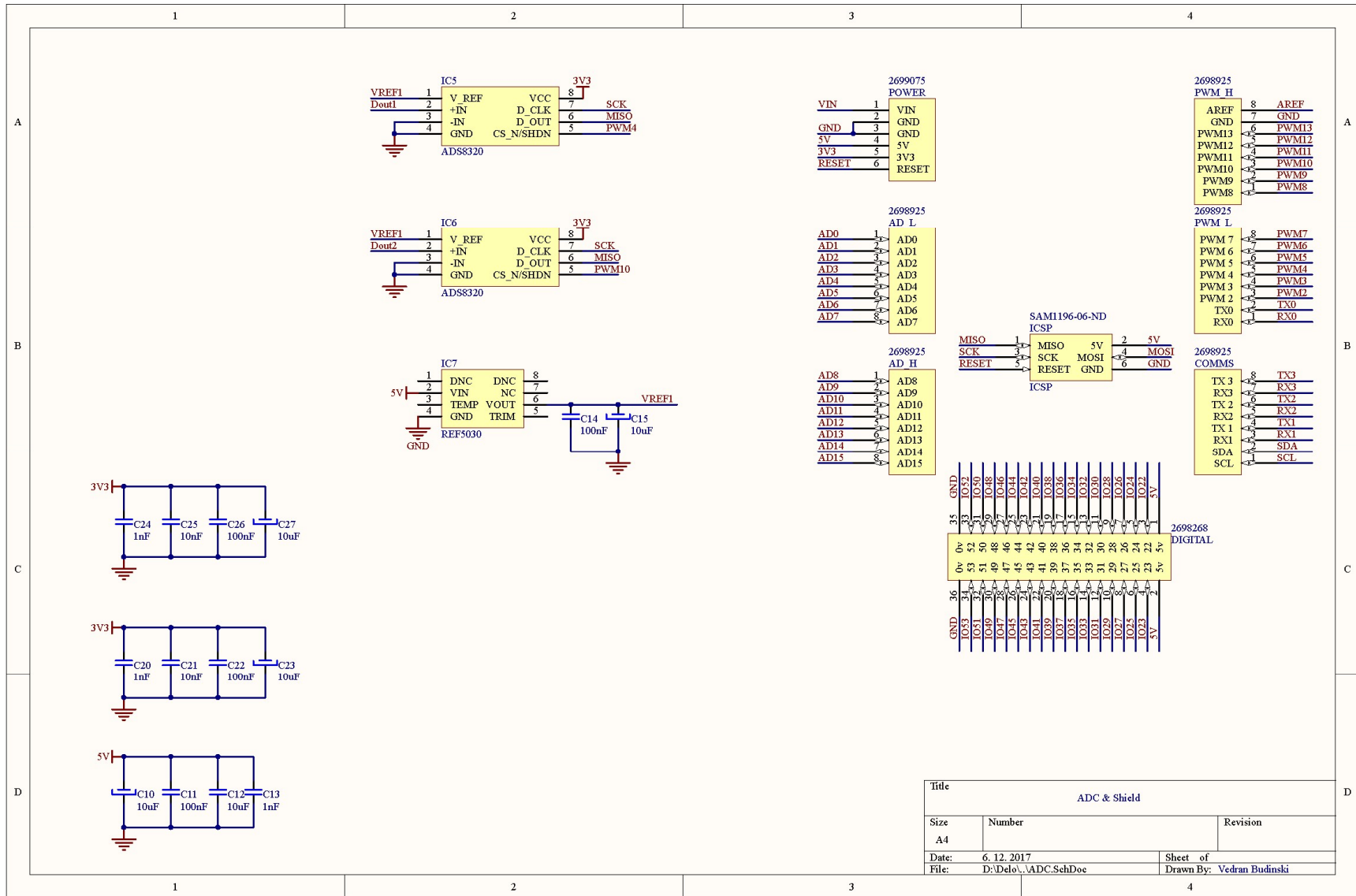
- Oddajni in sprejemni del.

Opto-elektronski sklop kvaziporazdeljenega polarimetričnega optičnega vlakenskega senzorja za meritev rotacije/zasukov.

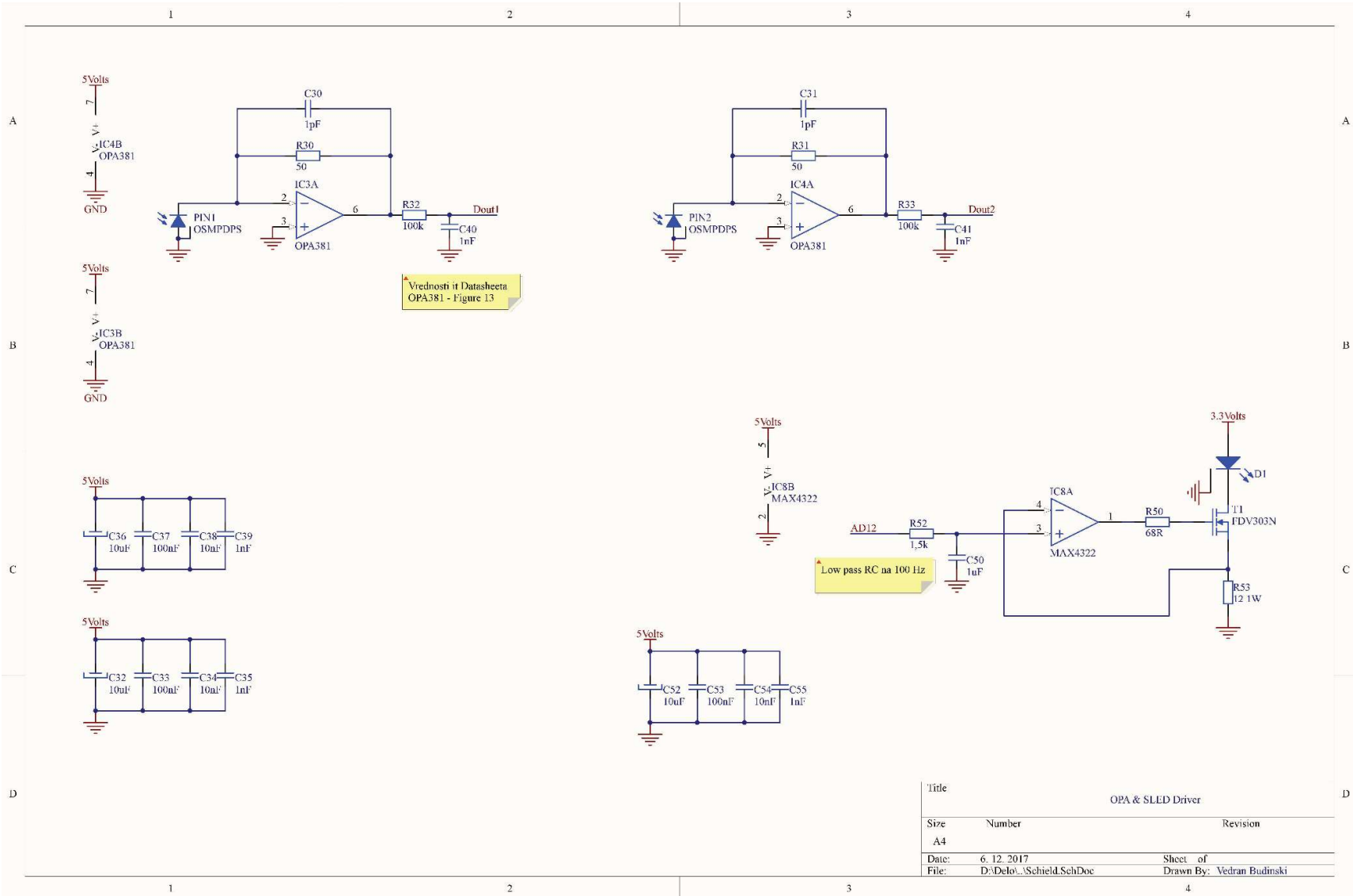
- Oddajni in sprejemni del.



Title			Power Management		
Size	Number		Revision		
A4					
Date:	6. 12. 2017		Sheet		of
File:	D:\Delo\...\PWR.SchDoc		Drawn By:		Vedran Budinski



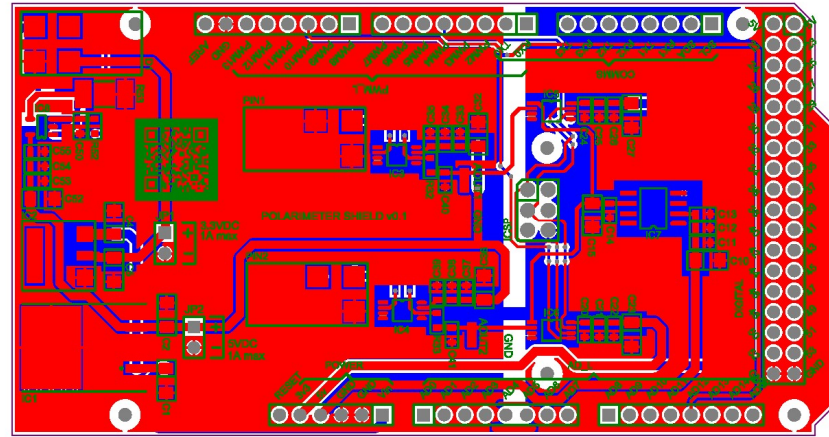
Title			ADC & Shield		
Size	Number		Revision		
A4					
Date:	6. 12. 2017		Sheet of		
File:	D:\Delo\...\ADC.SchDoc		Drawn By:		Vedran Budinski

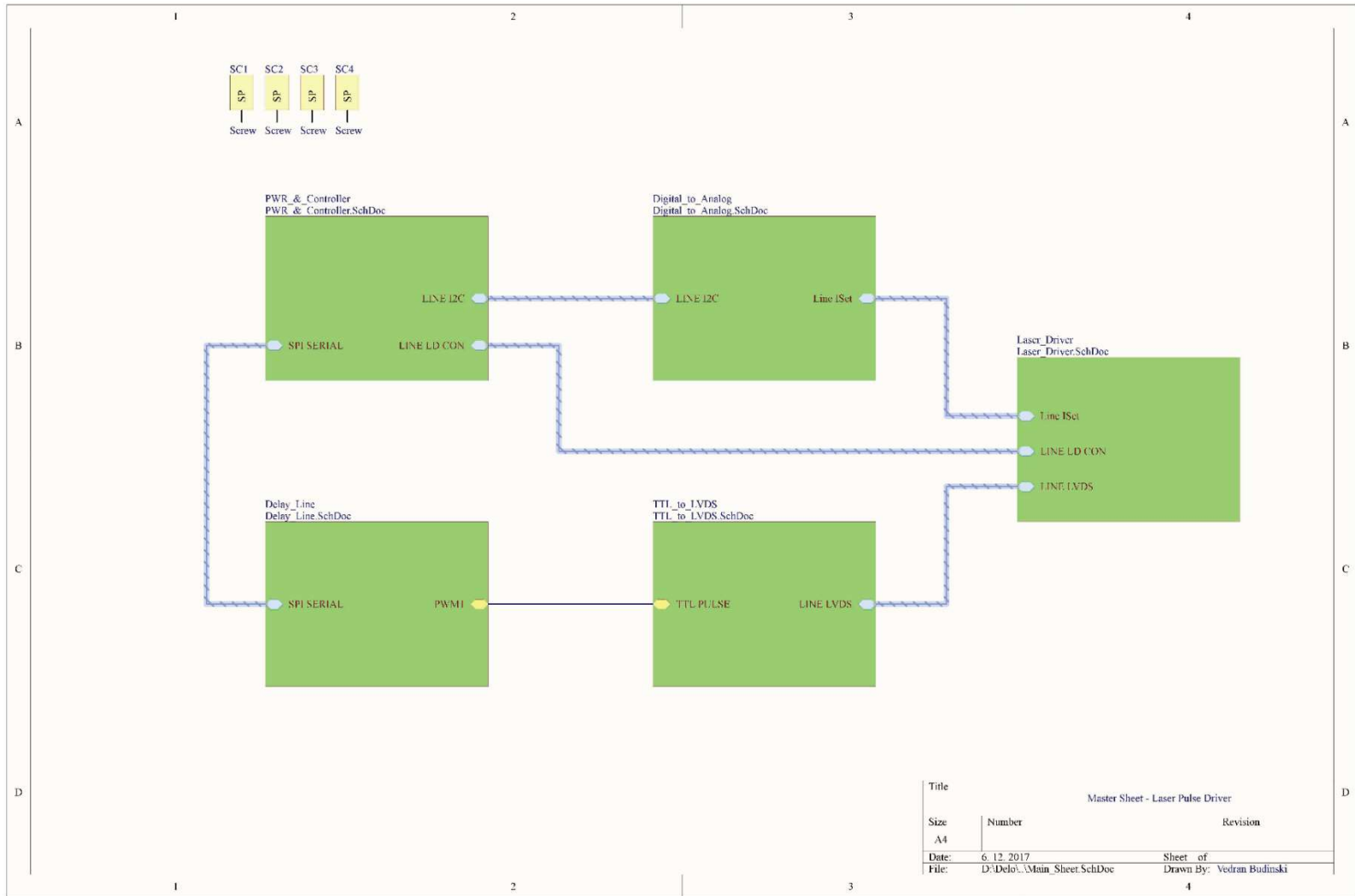


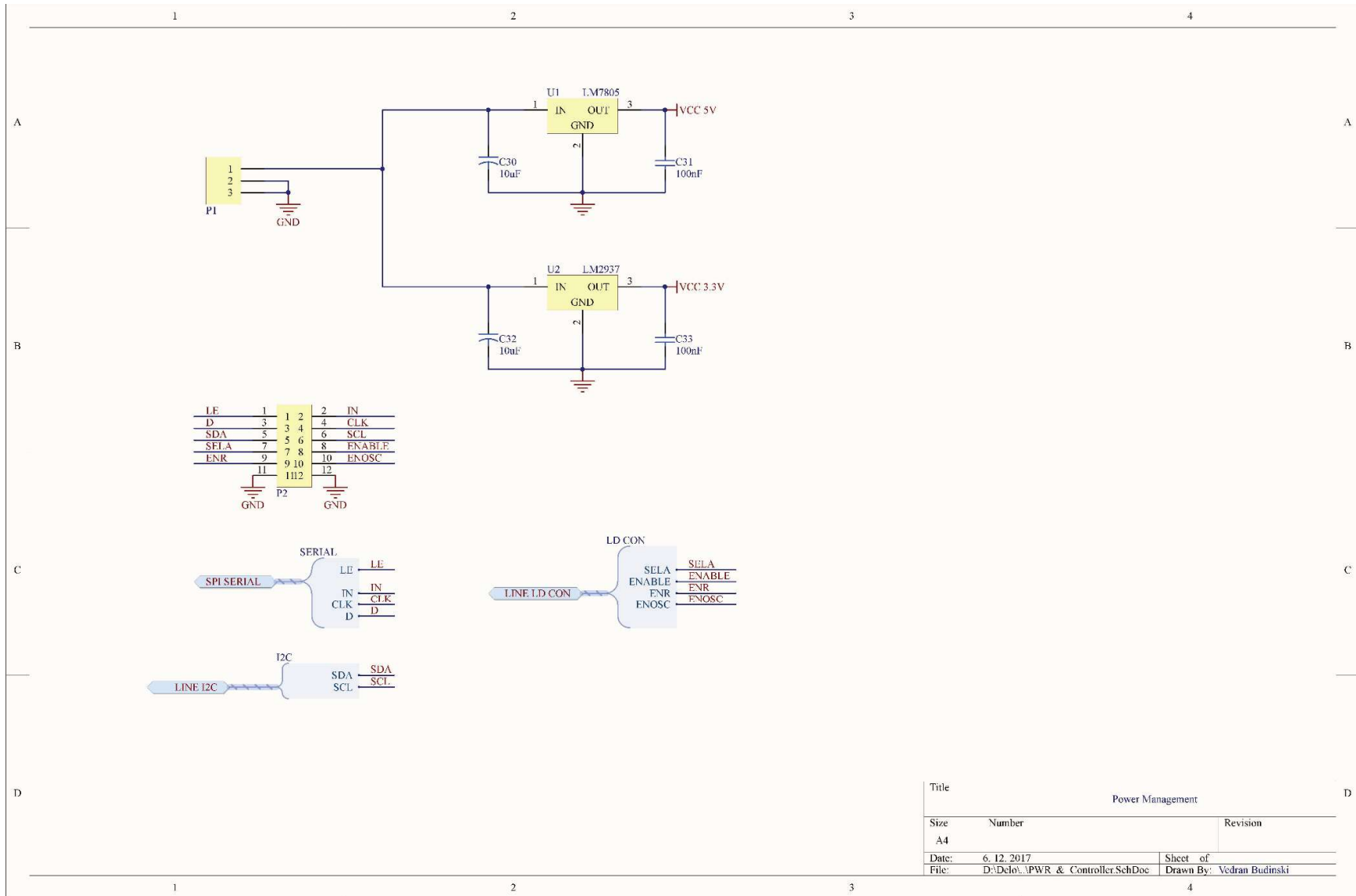
Vrednosti iz Datasheeta
OPA381 - Figure 13

Low pass RC na 100 Hz

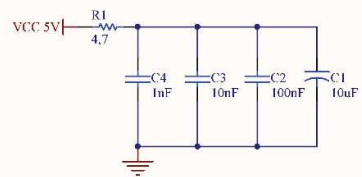
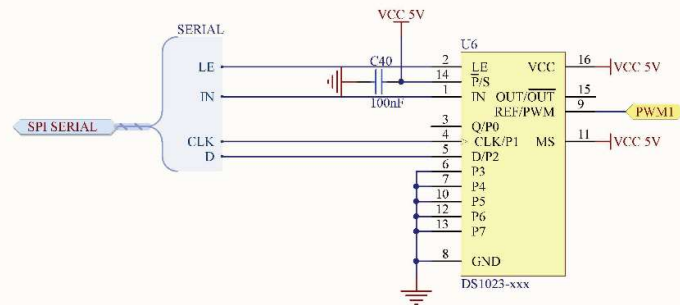
Title	OPA & SLED Driver	
Size	Number	Revision
A4		
Date:	6. 12. 2017	Sheet of
File:	D:\Delo\...Schield.SchDoc	Drawn By: Vedran Budinski



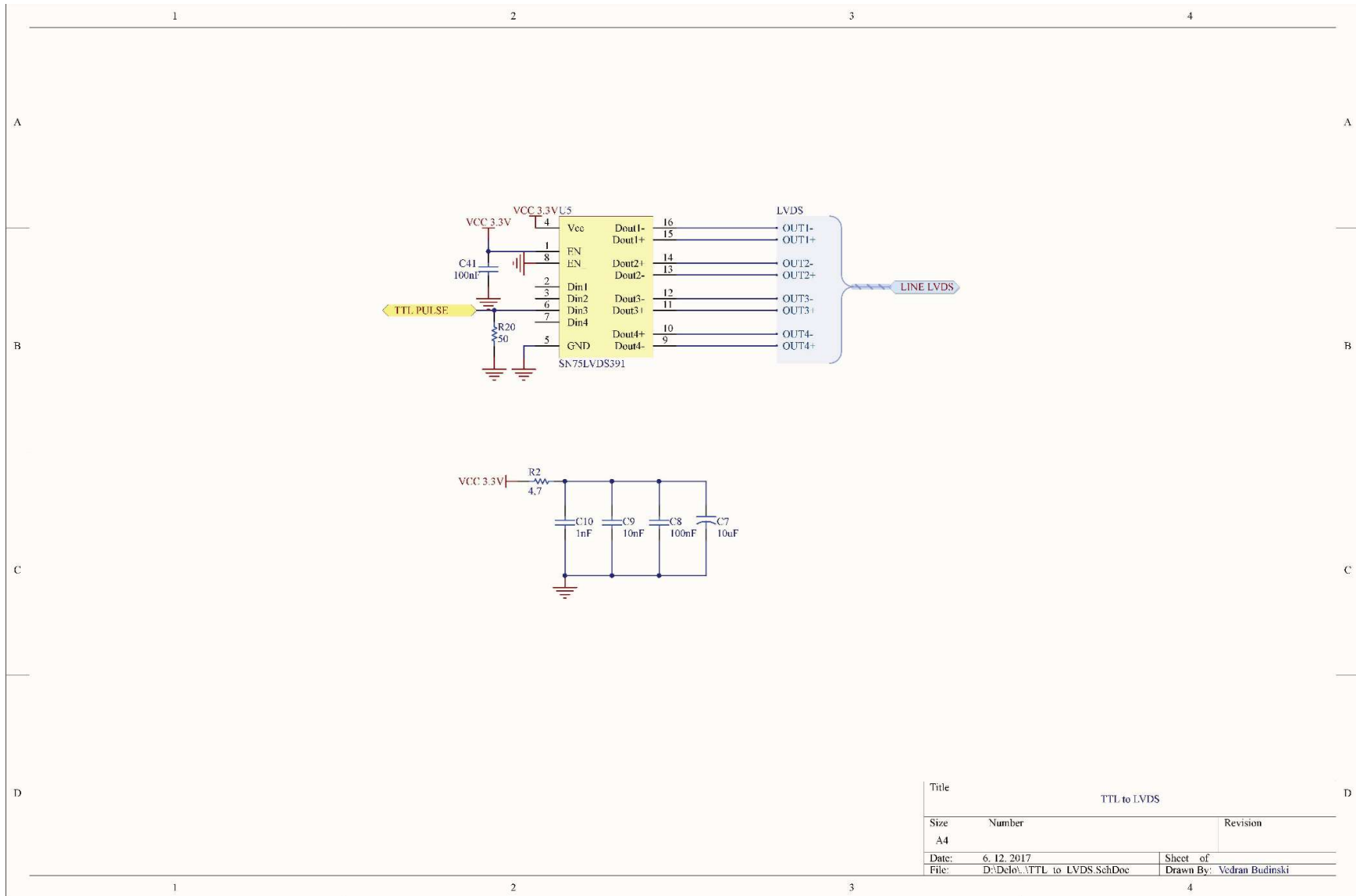




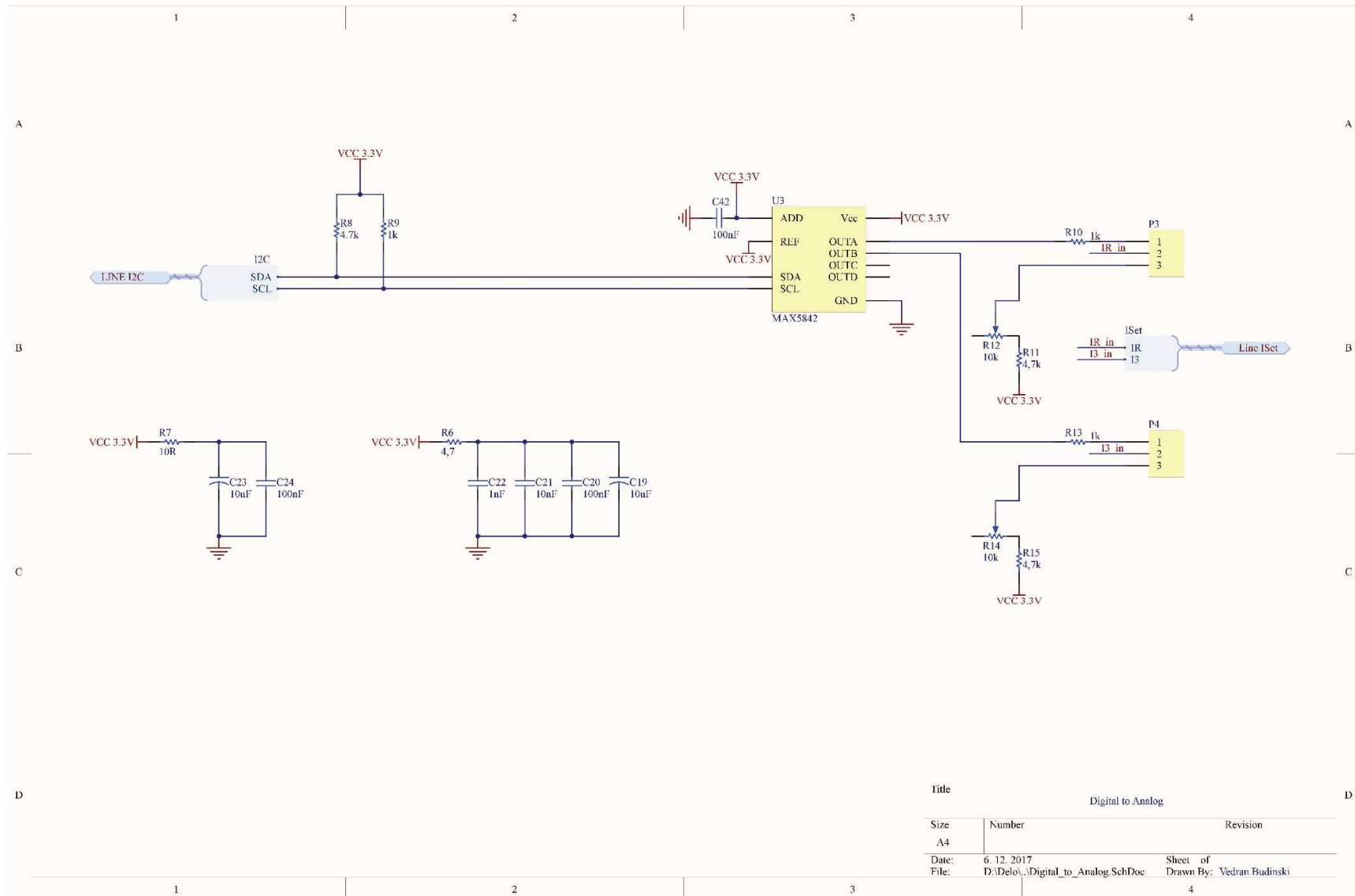
Title		Power Management	
Size	Number	Revision	
A4			
Date:	6. 12. 2017	Sheet	of
File:	D:\Dcdo\...PWR & Controller.SchDoc	Drawn By:	Vedran Budinski



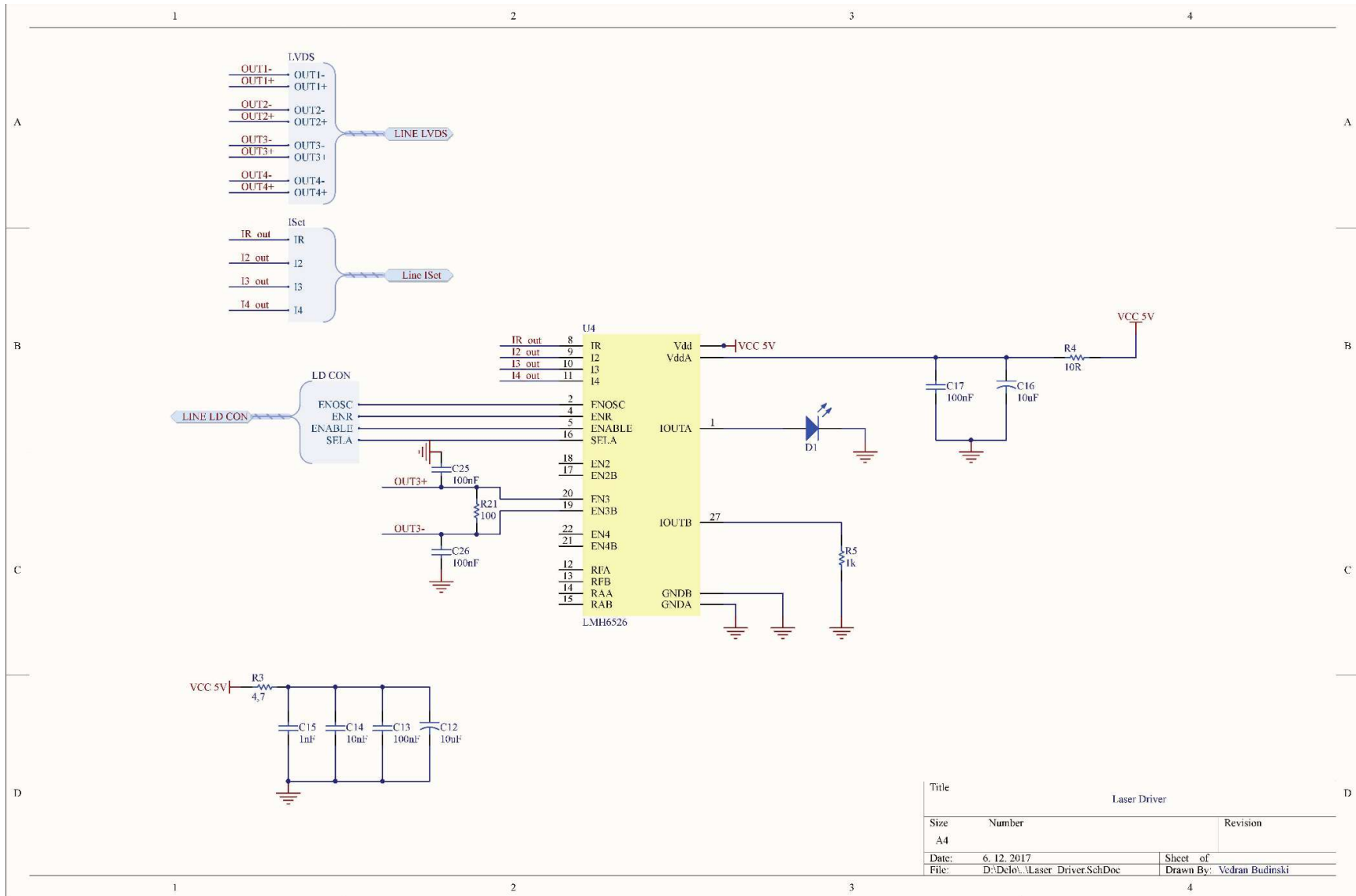
Title		Delay Line	
Size	Number	Revision	
A4			
Date:	6.12.2017	Sheet of	
File:	D:\Delo\...\Delay_Line.SchDoc	Drawn By:	Vedran Budinski



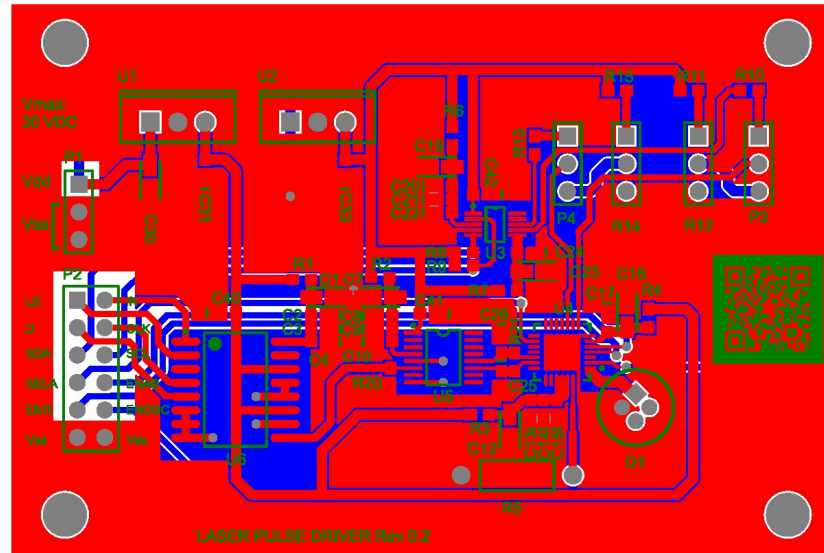
Title		TTL to LVDS	
Size	Number	Revision	
A4			
Date:	6. 12. 2017	Sheet	of
File:	D:\Dcdo\TTL to LVDS.SchDoc	Drawn By:	Vedran Budinski

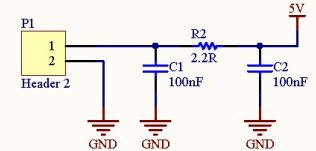
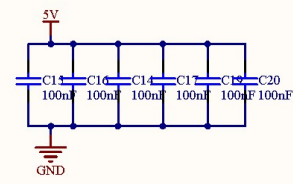
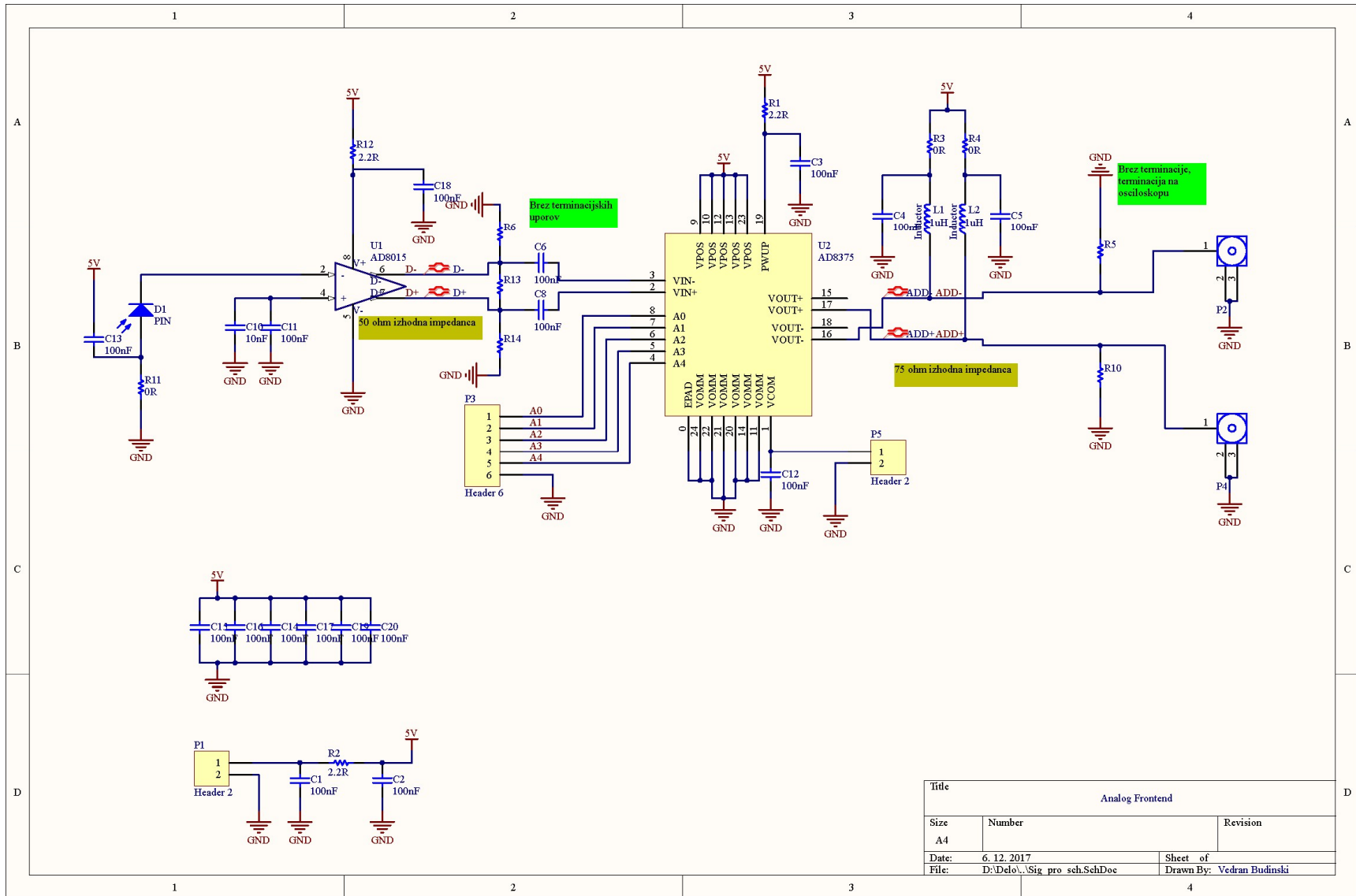


Title		
	Digital to Analog	
Size	Number	Revision
A4		
Date:	6. 12. 2017	Sheet of
File:	D:\Delo\Digital_to_Analog.SchDoc	Drawn By: Vedran Budinski

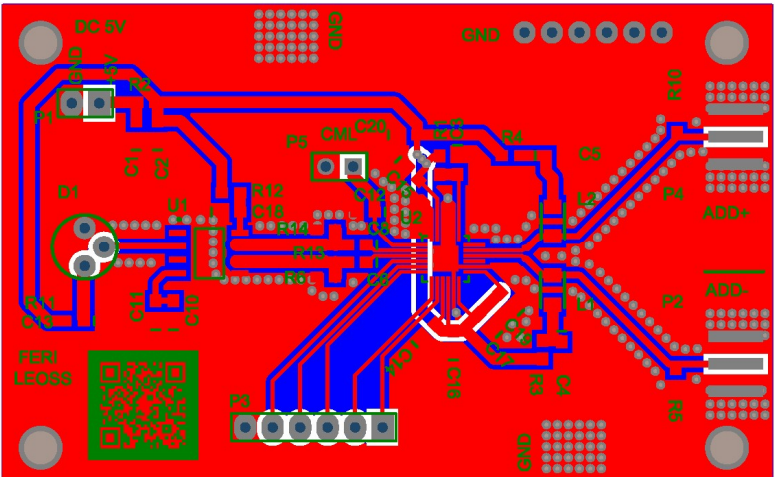


Title			Laser Driver		
Size	Number	Revision			
A4					
Date:	6. 12. 2017	Sheet		of	
File:	D:\Delo\...Laser_Driver.SchDoc	Drawn By:		Vedran Budinski	





Title			Analog Frontend		
Size	Number	Revision			
A4					
Date:	6. 12. 2017	Sheet of			
File:	D:\Delo\...\Sig_pro_sch.SchDoc	Drawn By:		Vedran Budinski	





Univerza v Mariboru

Fakulteta za elektrotehniko,
računalništvo in informatiko
Koroška cesta 46
2000 Maribor, Slovenija



IZJAVA DOKTORSKEGA KANDIDATA

Podpisani-a Vedran Budinski,

vpisna številka E9506541.

izjavljam,

da je doktorska disertacija z naslovom OPTIČNOVLAKENSKI SENZORJI ZA TOČKOVNE IN KVAZIPORAZDELJENE MERITVE ROTACIJ IN KOTOV ZASUKA Z ENOJNIM DOVODNIM VLAKNOM

- rezultat lastnega raziskovalnega dela,
- da predložena disertacija v celoti ali v delih ni bila predložena za pridobitev kakršnekoli izobrazbe po študijskem programu druge fakultete ali univerze,
- da so rezultati korektno navedeni in
- da nisem kršil-a avtorskih pravic in intelektualne lastnine drugih.

Podpis doktorskega-e kandidata-ke:

Vedran Budinski

Obrazec RŠZ



Fakulteta za elektrotehniko,
računalništvo in informatiko
Koroška cesta 46
2000 Maribor, Slovenija



IZJAVA KANDIDATOVEGA MENTORJA O USTREZNOSTI DOKTORSKE DISERTACIJE

Podpisani-a prof. ddr. Denis Donlagić, mentor-ica doktorskemu-i kandidatu-ki, izjavljam, da je doktorska disertacija z naslovom OPTIČNOVLAKENSKI SENZORJI ZA TOČKOVNE IN KVAZIPORAZDELJENE MERITVE ROTACIJ IN KOTOV ZASUKA Z ENOJNIM DOVODNIM VLAKNOM ki jo je izdelal-a doktorski-a kandidat-ka Vedran Budinski v skladu z odobreno temo, Pravilnikom o pripravi in zagovoru doktorske disertacije ter mojimi navodili in predstavlja izviren prispevek k razvoju znanstvene discipline.

Datum in kraj: Maribor, 06.11.2017

Podpis mentorja-ice:

Obrazec RŠZ



Univerza v Mariboru

Fakulteta za elektrotehniko,
računalništvo in informatiko
Koroška cesta 46
2000 Maribor, Slovenija



**IZJAVA O OBJAVI ELEKTRONSKE VERZIJE DOKTORSKE DISERTACIJE IN OSEBNIH PODATKOV,
VEZANIH NA ZAKLJUČEK ŠTUDIJA**

Ime in priimek doktoranda-ke: Vedran Budinski

Vpisna številka: E9506541

Študijski program: ELEKTROTEHNIKA

Naslov doktorskega dela:

OPTIČNOVLAKENSKI SENZORJI ZA TOČKOVNE IN KVAZIPORAZDELJENE MERITVE ROTACIJ IN
KOTOV ZASUKA Z ENOJNIM DOVODNIM VLAKNOM

Mentor-ica: red. prof. ddr. Denis Donlagić

Somentor-ica: _____

Podpisani soglašam z objavo doktorske disertacije v Digitalni knjižnici Univerze v Mariboru.

Tiskana verzija doktorske disertacije je istovetna elektronski verziji, ki sem jo oddal-a v Digitalno knjižnico Univerze v Mariboru.

Podpisani-a hkrati izjavljam, da dovoljujem objavo osebnih podatkov, vezanih na zaključek študija (ime, priimek, leto in kraj rojstva, datum diplomiranja, naslov diplomskega dela) na spletnih straneh in v publikacijah Univerze v Mariboru.

Datum in kraj:

Maribor, 06.11.2017

Podpis doktoranda-ke:

Vedran Budinski

Obrazec RŠZ