



UNIVERZITET U NOVOM SADU
FAKULTET TEHNIČKIH NAUKA U
NOVOM SADU



Ana Joža

**METODA MERENJA TALASNE DUŽINE
MONOHROMATSKE SVETLOSTI
PRIMENOM SPEKTRALNO OSETLJIVIH
OPTIČKIH KOMPONENTI**

DOKTORSKA DISERTACIJA

Novi Sad

2019



КЉУЧНА ДОКУМЕНТАЦИЈСКА ИНФОРМАЦИЈА

Редни број, РБР :		
Идентификациони број, ИБР :		
Тип документације, ТД :	монографска публикација	
Тип записа, ТЗ :	текстуални штампани материјал	
Врста рада, ВР :	докторска дисертација	
Аутор, АУ :	Ана Јожа	
Ментор, МН :	др Јован Бајић, доцент	
Наслов рада, НР :	Метода мерења таласне дужине монохроматске светлости применом спектрално осетљивих оптичких компоненти	
Језик публикације, ЈП :	српски	
Језик извода, ЈИ :	српски	
Земља публикавања, ЗП :	Република Србија	
Уже географско подручје, УГП :	Аутономна Покрајина Војводина	
Година, ГО :	2019	
Издавач, ИЗ :	ауторски репринт	
Место и адреса, МА :	Факултет техничких наука, Трг Доситеја Обрадовића 6, Нови Сад	
Физички опис рада, ФО : <small>(поглавља/страна/ цитата/табела/слика/графика/прилога)</small>	9/123/168/5/78/0	
Научна област, НО :	Електротехничко и рачунарско инжењерство	
Научна дисциплина, НД :	електроника, оптоелектроника	
Предметна одредница/Кључне речи, ПО :	Сензорски систем, фибер-оптичка рачва, фотодетектори, таласна дужина монохроматске светлости	
УДК		
Чува се, ЧУ :	Библиотека Факултета техничких наука	
Важна напомена, ВН :	У овој докторској дисертацији дат је предлог нове методе за мерење таласне дужине монохроматске светлости помоћу спектрално осетљивих оптичких компоненти. Принцип рада предложене методе се заснива на комбиновању спектралних осетљивости фибер-оптичке рачве и два различита фотодетектора. Извршена је имплементација и карактеризација сензорског система за мерење таласне дужине монохроматске светлости. У експерименталној поставци коришћена је 2x2 фибер-оптичка рачва, германијумска (Ge) фотодиода и индијум-галијум-арсенид (InGaAs) фотодиода. Постигнута је линеарност са фактором корелације $R^2=0.99942$ и мерна резолуција од 17 nm у опсегу таласних дужина светлости од 1575 до 1615 nm (L-опсег). У истом опсегу, добијена је мерна грешка од приближно ± 0.2 nm и поновљивост од ± 0.16 nm. Испитани су утицаји промена температуре, снаге оптичког извора и шума на карактеристике сензорског система.	
Извод, ИЗ :		
Датум прихватања теме, ДП :	28. децембар 2017. године	
Датум одбране, ДО :		
Чланови комисије, КО :	Председник: др Мирјана Дамњановић, редовни професор	
	Члан: др Далибор Секулић, доцент	
	Члан: др Милан Ковачевић, ванредни професор	Потпис ментора
	Члан: др Жељен Трповски, ванредни професор	
	Члан, ментор: др Јован Бајић, доцент	



KEY WORDS DOCUMENTATION

Accession number, ANO :	
Identification number, INO :	
Document type, DT :	monographic publication
Type of record, TR :	textual printed material
Contents code, CC :	doctoral thesis
Author, AU :	Ana Joža
Mentor, MN :	Jovan Bajić, Ph.D., assistant professor
Title, TI :	Method of measuring monochromatic light wavelength by using wavelength-sensitive optical components
Language of text, LT :	Serbian
Language of abstract, LA :	Serbian / English
Country of publication, CP :	Republic of Serbia
Locality of publication, LP :	Autonomous Province of Vojvodina
Publication year, PY :	2019
Publisher, PB :	author's reprint
Publication place, PP :	Faculty of Technical Sciences, Trg Dositeja Obradovića 6, Novi Sad
Physical description, PD : (chapters/pages/ref./tables/pictures/graphs/appendixes)	9/123/168/5/78/0
Scientific field, SF :	Electrical and Computer Engineering
Scientific discipline, SD :	Electronics, Optoelectronics
Subject/Key words, S/KW :	Sensor system, fiber-optic coupler, photodetectors, monochromatic light wavelength
UC	=
Holding data, HD :	Library of the Faculty of Technical Sciences
Note, N :	
Abstract, AB :	<p>In this thesis, a new method for measurement of monochromatic light wavelength by using wavelength-dependent optical components is proposed. The principle of operation of the proposed method is based on combining spectral sensitivities of fiber-optic coupler and two different photodetectors. Sensor system for measurement of monochromatic light wavelength is implemented and characterized. Experimental setup consists of 2x2 fiber-optic coupler, germanium (Ge) photodiode and indium-gallium-arsenide (InGaAs) photodiode. Excellent linearity ($R^2=0.99942$) and measurement resolution of 17 pm are achieved in measurement range 1575-1615 nm (L-band). In the same measurement range, measurement error of approximately ± 0.2 nm and repeatability of ± 0.16 nm are obtained. The influence of temperature, optical source power and noise on sensor system characteristics is investigated.</p>
Accepted by the Scientific Board on, ASB :	December 28 th , 2017
Defended on, DE :	
Defended Board, DB :	
President:	Mirjana Damnjanović, Ph.D., full professor
Member:	Dalibor Sekulić, Ph.D., assistant professor
Member:	Milan Kovačević, Ph.D., associate professor
Member:	Željko Trpovski, Ph.D., associate professor
Member, Mentor:	Jovan Bajić, Ph.D., assistant professor
	Menthor's sign

Zahvalnica

Ova doktorska disertacija je urađena na Katedri za elektroniku Departmana za energetiku, elektroniku i telekomunikacije, Fakulteta tehničkih nauka, Univerziteta u Novom Sadu.

Zahvaljujem se svima koji su mi pomogli prilikom rada na ovoj doktorskoj disertaciji.

Veliku zahvalnost dugujem svom mentoru, docentu dr Jovanu Bajiću, na ogromnoj podršci i nesebičnoj pomoći pruženoj prilikom izrade ove doktorske disertacije. Zahvaljujući njegovim naučno-stručnim savetima, ova doktorska disertacija je dovedena do kraja.

Zahvaljujem se članovima Komisije na dragocenim savetima i korisnim sugestijama prilikom izrade ove doktorske disertacije.

Najveću zahvalnost dugujem svojoj porodici.

Sadržaj

Spisak skraćenica	i
Spisak slika	ii
Spisak tabela	vi
Rezime	vii
Abstract.....	viii
1 UVOD.....	1
1.1 Problem istraživanja.....	1
1.2 Predmet istraživanja.....	4
1.3 Cilj istraživanja	5
1.4 Hipoteza i metodologija istraživanja	5
1.5 Organizacija disertacije.....	6
2 POTREBA ZA MERENJEM TALASNE DUŽINE MONOHROMATSKE SVETLOSTI	7
2.1 Gusto multipleksiranje po talasnim dužinama (DWDM)	7
2.1.1 Multipleksiranje po talasnim dužinama	7
2.1.2 DWDM sistemi	8
2.2 Optičko vlakno sa Bragovom rešetkom (FBG)	20
3 PREGLED METODA MERENJA TALASNE DUŽINE SVETLOSTI	27
3.1 Pasivne metode	28
3.1.1 Zapreminski i integrisani filtri	29
3.1.2 Fiber-optički filtri.....	30
3.1.3 Optički izvori i fotodetektori	31
3.2 Aktivne metode.....	32
3.2.1 Zapreminski optički filteri	32
3.2.2 Fiber-optički filteri.....	35
3.2.3 Optički izvori	37
3.2.4 Generisanje nosioca	37
3.2.5 Interferometrijski senzori.....	38
3.3 Korišćenje optičkih izvora sa podesivom talasnom dužinom.....	42

4	STANJE U OBLASTI ISTRAŽIVANJA I UPOREDNA ANALIZA.....	44
5	SPEKTRALNO OSETLJIVE OPTIČKE KOMPONENTE	49
5.1	Fiber-optička račva	49
5.2	Fotodiode	53
5.2.1	Princip rada	53
5.2.2	Parametri fotodiode.....	56
5.2.3	Električne karakteristike fotodiode	61
5.2.4	Uticaj temperature.....	64
5.2.5	Izvori šuma kod fotodioda	65
5.2.6	Tipovi fotodioda.....	66
5.3	Osobine poluprovodničkih materijala.....	68
5.3.1	Germanijum (Ge).....	69
5.3.2	Indijum-galijum-arsenid (InGaAs)	72
6	PREDLOG NOVE METODE MERENJA TALASNE DUŽINE MONOHROMATSKE SVETLOSTI	74
6.1	Princip rada	74
6.1.1	Odabir fotodioda	75
6.1.2	Uticaj fiber-optičke račve	76
6.1.3	Simulacija prostiranja svetlosti kroz optičku račvu	76
6.2	Eksperimentalna postavka senzorskog sistema	78
6.3	Rezultati merenja talasne dužine svetlosti predloženom metodom	81
6.3.1	Proračun odnosa sprezanja.....	83
6.3.2	Uticaj temperature na karakteristiku senzora.....	93
6.3.3	Uticaj snage svetlosnog izvora.....	97
6.3.4	Uticaj šuma	98
6.4	Istovremena karakterizacija spektralnih karakteristika fiber-optičke račve i fotodetektora.....	100
6.5	Analiza primene predložene metode za ispitivanje FBG senzora	102
6.5.1	Simulacija	102
6.5.2	Merenje pomoću širokopoljnog svetlosnog izvora i spektralnog analizatora .	104
7	DISKUSIJA	106

8	ZAKLJUČAK I DALJI PRAVCI ISTRAŽIVANJA	110
9	LITERATURA	112

Spisak skraćenica

- AOTF, akusto-optički podesivi filtar (eng. *Acusto-Optic Tunable Filter*)
- APD, lavinska fotodioda (eng. *Avalanche Photodiode*)
- ASE, pojačana spontana emisija (eng. *Amplified Spontaneous Emission*)
- AWG, rešetka sa nizom talasovoda (eng. *Arrayed Waveguide Grating*)
- CCD, uređaj sa spregnutim naelektrisanjem (eng. *Charge Coupled Device*)
- CWDM, grubo multipleksiranje po talasnim dužinama (eng. *Coarse Wavelength Division Multiplexing*)
- DBR, distribuirani Bragov reflektor (eng. *Distributed Bragg Reflector*)
- DFB, distribuirana povratna sprega (eng. *Distributed Feedback*)
- DWDM, gusto multipleksiranje po talasnim dužinama (eng. *Dense Wavelength Division Multiplexing*)
- EDFA, pojačavač sa vlaknima dopiranim erbijumom (eng. *Erbium-Doped Fiber Amplifier*)
- FBG, Bragova rešetka u vlaknu (eng. *Fiber Bragg Grating*)
- FPF, Fabri-Peroov filtar (eng. *Fabry-Perot Filter*)
- FSR, slobodni spektralni opseg (eng. *Free Spectral Range*)
- LD, laserska dioda (eng. *Laser Diode*)
- LED, svetleća dioda (eng. *Light Emitting Diode*)
- LPG, rešetka sa dugim periodom (eng. *Long Period Grating*)
- MZI, Mah-Zenderov interferometar (eng. *Mach-Zehnder Interferometer*)
- OADM, optički add-drop multiplekser (eng. *Optical Add-Drop Multiplexer*)
- OSA, optički spektralni analizator (eng. *Optical Spectrum Analyzer*)
- PD, fotodioda (eng. *Photodiode*)
- RF, radio talasi (eng. *Radio Frequency*)
- SLED, superluminescentna dioda (eng. *Superluminescent Diode*)
- SOI, silicijum-na-izolatoru (eng. *Silicon-On-Insulator*)
- TDM, vremensko multipleksiranje (eng. *Time Domain Multiplexing*)
- TFF, filtar tankog filma (eng. *Thin-Film Filter*)
- WDM, multipleksiranje po talasnoj dužini (eng. *Wavelength Division Multiplexing*)

Spisak slika

<i>Slika 1.1 Oblasti u kojima je potrebno merenje malih promena talasnih dužina svetlosti.....</i>	<i>3</i>
<i>Slika 2.1 Princip rada WDM sistema (T – predajnik, R – prijemnik, strelica pokazuje na smer toka signala) [24]</i>	<i>7</i>
<i>Slika 2.2 Poređenje broja i gustine kanala kod CWDM i DWDM sistema [25]</i>	<i>8</i>
<i>Slika 2.3 Osnovna struktura DWDM sistema (LD – laserska dioda, OP – optički pojačavač, OADM – optički add-drop multiplekser, R – prijemnik) [26]</i>	<i>9</i>
<i>Slika 2.4 Poređenje spektara a) LED i laserskih dioda (b)FP laser – Fabri-Peroov laser, c) DFB laser – laser sa distribuiranom povratnom spregom) [27].....</i>	<i>10</i>
<i>Slika 2.5 Opšti princip ubacivanja svetlosti koju emituje laserska dioda u optičko vlakno [29]</i>	<i>11</i>
<i>Slika 2.6 Spoljašnja modulacija lasera [29]</i>	<i>12</i>
<i>Slika 2.7 Princip rada DWDM demultipleksera koji se zasniva na prizmi [30]</i>	<i>12</i>
<i>Slika 2.8 DWDM demultiplekser na principu difrakcione Bragove rešetke [30].....</i>	<i>13</i>
<i>Slika 2.9 Rešetka sa nizom talasovoda kao DWDM demultiplekser [31].....</i>	<i>14</i>
<i>Slika 2.10 a) Princip rada filtra tankog filma, b) Demultiplekser na bazi više filtera tankog filma [28]</i>	<i>15</i>
<i>Slika 2.11 Princip rada optičkog add-drop multipleksera [32]</i>	<i>16</i>
<i>Slika 2.12 Osnovna struktura EDFA pojačavača [33].....</i>	<i>17</i>
<i>Slika 2.13 Tipovi EDFA pojačavača na osnovu uloge u DWDM sistemu [34].....</i>	<i>18</i>
<i>Slika 2.14 Princip rada optičkog vlakna sa Bragovom rešetkom.....</i>	<i>20</i>
<i>Slika 2.15 Ispitivanje Bragove talasne dužine pomoću širokopojasnog izvora svetlosti i optičkog spektralnog analizatora</i>	<i>21</i>
<i>Slika 2.16 Ispitivanje Bragove talasne dužine pomoću podesivog lasera i fotodetektora.....</i>	<i>22</i>
<i>Slika 2.17 Optički add-drop multiplekser na osnovu optičkog vlakna sa Bragovom rešetkom i dva optička cirkulatora [39].....</i>	<i>22</i>
<i>Slika 2.18 DBR laser sa optičkim vlaknima sa Bragovom rešetkom [40].....</i>	<i>23</i>
<i>Slika 2.19 DFB laser sa optičkim vlaknom sa Bragovom rešetkom [41]</i>	<i>23</i>
<i>Slika 2.20 Primer upotrebe FBG senzora za merenje sile prilikom operacije oka [9]</i>	<i>25</i>
<i>Slika 2.21 Raspored FBG senzora vibracija na Tongwamen mostu [48]</i>	<i>26</i>
<i>Slika 3.1 Šema pasivne metode za ispitivanje talasne dužine FBG senzora na osnovu ivičnog filtriranja [59].....</i>	<i>28</i>

<i>Slika 3.2 Distribuirani FBG senzorski sistem koji koristi rešetku sa nizom talasovoda (AWG) za ispitivanje Bragove talasne dužine [62].....</i>	<i>30</i>
<i>Slika 3.3 Senzorski sistem za merenje naprezanja na osnovu optičkog vlakna sa Bragovom rešetkom, gde se fiber-optička račva koristi za ispitivanje Bragove talasne dužine [65]31</i>	
<i>Slika 3.4 Šema senzorskog sistema koji koristi linearnu oblast ASE profila optičkog EDFA izvora [70]</i>	<i>32</i>
<i>Slika 3.5 Šema za ispitivanje talasne dužine svetlosti korišćenjem Fabri-Peroovog filtra u zatvorenoj petlji [73]</i>	<i>34</i>
<i>Slika 3.6 Princip rada akusto-optičkog podesivog filtra [75]</i>	<i>35</i>
<i>Slika 3.7 Šematski dijagram i princip rada metode merenja talasne dužine svetlosti na osnovu poklapanja spektara para vlakana sa Bragovom rešetkom (BBS – širokopolasni izvor svetlosti, FBG_S – senzorska FBG, FBG_R – prijemna FBG, IMG - gel za prilagođavanje indeksa prelamanja) [77]</i>	<i>36</i>
<i>Slika 3.8 Sistem za ispitivanje talasne dužine svetlosti na osnovu asimetričnog Mah-Zenderovog interferometra (osnovna struktura) [87]</i>	<i>39</i>
<i>Slika 3.9 Šematski dijagram sistema za ispitivanje talasne dužine na osnovu Majkelsonovog interferometra sa pokretnim ogledalom [89]</i>	<i>41</i>
<i>Slika 3.10 Šema metode ispitivanja talasne dužine svetlosti na osnovu optičkog izvora sa podesivom talasnom dužinom (WDM označava WDM multiplekser, a DBR distribuirani Bragov reflektor) [91].....</i>	<i>42</i>
<i>Slika 4.1 Blok dijagram interogatora na bazi MEMS FP filtra opisanog u [96].....</i>	<i>45</i>
<i>Slika 4.2 a) Šematski prikaz interogatora predloženog u [107], b) Šema za ispitivanja niza (MxN) FBG senzora.....</i>	<i>46</i>
<i>Slika 4.3 Spektrometar na osnovu planarnog talasovoda sa pod-talasnom rešetkom [119] ..</i>	<i>47</i>
<i>Slika 5.1 Direkciona 2×2 optička račva</i>	<i>49</i>
<i>Slika 5.2 Zavisnost odnosa sprezanja fiber-optičke račve od talasne dužine svetlosti i dužine oblasti sprezanja a) L=12.59 mm b) L=21.5 mm [128].....</i>	<i>52</i>
<i>Slika 5.3 Apsorpcija fotona u a) direktnom b) indirektnom poluprovodniku (CB – provodna zona, VB – valentna zona) [134]</i>	<i>54</i>
<i>Slika 5.4 Šematski dijagram inverzno polarizovane pn fotodiode [135].....</i>	<i>55</i>
<i>Slika 5.5 Apsorpcija fotona u inverzno polarizovanom p-n spoju [136].....</i>	<i>55</i>
<i>Slika 5.6 Koeficijenti apsorpcije nekoliko značajnih poluprovodničkih materijala u zavisnosti od talasne dužine svetlosti [137]</i>	<i>58</i>
<i>Slika 5.7 Osetljivost Si, InGaAs i Ge pin fotodiode, i GaP fotodiode na bazi p-n spoja [134]</i>	<i>59</i>

Slika 5.8 Osetljivost dve Si pin fotodiode različitih struktura [134]	59
Slika 5.9 Ekvivalentno kolo realne fotodiode	61
Slika 5.10 Strujno-naponska karakteristika fotodiode	63
Slika 5.11 Zavisnost granične talasne dužine od temperature kod standardnih i InGaAs fotodioda sa proširenim spektralnim opsegom [139]	65
Slika 5.12 Poprečni presek a) PIN fotodiode, b) lavinske fotodiode [135]	67
Slika 5.13 a) Dijamantska kristalna rešetka germanijuma [143], b) energetski dijagram germanijuma	70
Slika 6.1 Simulacija prostiranja svetlosti kroz optičku račvu na talasnoj dužini od a) 900 nm; b) 2200 nm; c) 1200 nm; d) 1900 nm i e) 1550 nm	77
Slika 6.2 Odnos sprezanja optičkih snaga u dve izlazne grane optičke račve u zavisnosti od talasne dužine ulazne svetlosti dobijen simulacijom	78
Slika 6.3 Eksperimentalna postavka za testiranje sistema za detekciju talasne dužine monohromatske svetlosti	78
Slika 6.4 Fotografija eksperimentalne postavke za testiranje senzorskog sistema za praćenje talasne dužine svetlosti	80
Slika 6.5 Osetljivost korišćene S122B germanijumske fotodiode [162]	80
Slika 6.6 Osetljivost korišćene 81624B InGaAs fotodiode [163]	81
Slika 6.7 LabVIEW aplikacija za upravljanje eksperimentalnom postavkom i akviziciju podataka	82
Slika 6.8 $P_{Ge(n)}$ i $P_{InGaAs(n)}$ spektralne karakteristike za dve različite postavke fiber-optičke račve (početna (1) i obrnuta (2))	83
Slika 6.9 Prva (početna) eksperimentalna postavka za određivanje odnosa sprezanja fiber-optičke račve (PD - fotodiode)	84
Slika 6.10 Druga (obrnuta) eksperimentalna postavka za određivanje odnosa sprezanja fiber-optičke račve sa obrnutim položajem izlaza račve u odnosu na fotodiode (PD - fotodiode)	84
Slika 6.11 Poređenje odnosa sprezanja dobijenih korišćenjem InGaAs spektralnih karakteristika u jednačini (6.9) i Ge spektralnih karakteristika u (6.9)	86
Slika 6.12 Poređenje odnosa sprezanja dobijenih pomoću simulacije i proračunom na osnovu izmerenih snaga svetlosti P_{Ge} i P_{InGaAs}	87
Slika 6.13 Simulacija prostiranja svetlosti kroz optičku račvu na talasnoj dužini od a) 1550 nm b) 1630 nm	88
Slika 6.14 P_{Ge} , P_{InGaAs} , i $(P_{InGaAs(n)} - P_{Ge(n)}) / (P_{InGaAs(n)} + P_{Ge(n)})$ karakteristike u zavisnosti od talasne dužine u opsegu od 1525 do 1630 nm	89

Slika 6.15 P_{Ge} , P_{InGaAs} , i $(P_{InGaAs(n)} - P_{Ge(n)}) / (P_{InGaAs(n)} + P_{Ge(n)})$ karakteristike u zavisnosti od talasne dužine u opsegu od 1575 do 1615 nm	90
Slika 6.16 Poređenje prethodno dobijene karakteristike prikazane u [161] i poboljšane karakteristike dobijene primenom jednačine (6.6)	90
Slika 6.17 Greška merenja u opsegu od 1575 do 1615 nm.....	91
Slika 6.18 Razlike u očitavanju talasne dužine svetlosti za deset uzastopnih merenja.....	92
Slika 6.19 Vremenska stabilnost senzorskog sistema snimana tokom 30 minuta (MV – srednja vrednost; SD-standardna devijacija).....	93
Slika 6.20 $P_{Ge(n)}$ spektralna zavisnost od temperature.....	94
Slika 6.21 $P_{InGaAs(n)}$ spektralna zavisnost od temperature.....	95
Slika 6.22 $(P_{InGaAs(n)} - P_{Ge(n)}) / (P_{InGaAs(n)} + P_{Ge(n)})$ spektralna karakteristika u zavisnosti od temperature	96
Slika 6.23 Karakteristike nagiba i R^2 faktora u zavisnosti od temperature.....	97
Slika 6.24 Uticaj optičke snage izvora na merenje talasne dužine svetlosti.....	98
Slika 6.25 Izmerene optičke snage P_{Ge} i P_{InGaAs} za snage svetlosnog izvora reda μW	99
Slika 6.26 P_{Ge} i P_{InGaAs} za niske nivoe snage svetlosnog izvora reda stotina μW	100
Slika 6.27 Izračunate osetljivosti InGaAs i Ge fotodiode (PD – fotodiode)	102
Slika 6.28 Zavisnost propuštenog spektra (transmisije) od temperature	103
Slika 6.29 Zavisnost Bragove talasne dužine od temperature	103
Slika 6.30 Izmerena Bragova talasna dužina u zavisnosti od temperature	104

Spisak tabela

<i>Tabela 1 Primer nominalnih centralnih frekvencija DWDM mreže [36].....</i>	<i>19</i>
<i>Tabela 2 Poređenje karakteristika savremenih senzora za merenje malih promena talasne dužine</i>	<i>48</i>
<i>Tabela 3 Parametri germanijuma od značaja za primene u oblasti optoelektronike i fiber-optike.....</i>	<i>70</i>
<i>Tabela 4 Pregled parametara InGaAs od značaja za primene u oblastima optoelektronike i fiber-optike.....</i>	<i>73</i>
<i>Tabela 5 Poređenje karakteristika savremenih senzora za merenje malih promena talasne dužine i senzorskog sistema predstavljenog u ovoj disertaciji</i>	<i>108</i>

Rezime

U ovoj doktorskoj disertaciji dat je predlog nove metode za merenje talasne dužine monohromatske svetlosti primenom spektralno osetljivih optičkih komponenti. Princip rada predložene metode se zasniva na kombinovanju spektralnih osetljivosti fiber-optičke račve i dva različita fotodetektora.

Izvršena je implementacija i karakterizacija senzorskog sistema za merenje talasne dužine monohromatske svetlosti. U eksperimentalnoj postavci korišćena je 2×2 fiber-optička račva, germanijumska (Ge) fotodioda i indijum-galijum-arsenid (InGaAs) fotodioda. Postignuta je linearnost sa faktorom korelacije $R^2=0.99942$ i merna rezolucija od 17 pm u opsegu talasnih dužina svetlosti od 1575 do 1615 nm (L-opseg). U istom opsegu, dobijena je merna greška od približno ± 0.2 nm i ponovljivost od ± 0.16 nm. Ispitani su uticaji promena temperature, snage optičkog izvora i šuma na karakteristike senzorskog sistema.

Abstract

In this thesis, a new method for measurement of monochromatic light wavelength by using wavelength-dependent optical components is proposed. The principle of operation of the proposed method is based on combining spectral sensitivities of fiber-optic coupler and two different photodetectors.

Sensor system for measurement of monochromatic light wavelength is implemented and characterized. Experimental setup consists of 2×2 fiber-optic coupler, germanium (Ge) photodiode and indium-gallium-arsenide (InGaAs) photodiode. Excellent linearity ($R^2=0.99942$) and measurement resolution of 17 pm are achieved in measurement range 1575-1615 nm (L-band). In the same measurement range, measurement error of approximately ± 0.2 nm and repeatability of ± 0.16 nm are obtained. The influence of temperature, optical source power and noise on sensor system characteristics is investigated.

1 UVOD

Merenje talasne dužine svetlosti je od velikog značaja za funkcionisanje modernog sveta. Rad savremenih komunikacionih sistema je zasnovan na laserskim izvorima koji emituju svetlost u veoma uskom spektralnom opsegu, pa se mogu smatrati skoro monohromatskim izvorima. Stabilnost ovih laserskih izvora je kritična za pouzdan prenos velikih količina podataka putem optičkih mreža. Takođe, princip rada mnogih senzorskih sistema je zasnovan na direktnom ili indirektnom merenju talasne dužine svetlosti, kao što su merenje indeksa prelamanja [1], temperature [2], koncentracije štetnih materija u vodi [3], intenziteta UV zračenja [4] i mnogih drugih fizičkih veličina. Iz tih razloga, istraživačke grupe na akademskim institucijama i u privredi ulažu značajne napore kako bi razvili nove metode i uređaje za pouzdano i veoma precizno merenje talasne dužine monohromatske svetlosti.

U ovoj doktorskoj disertaciji razvijena je nova metoda za merenje talasne dužine monohromatske svetlosti korišćenjem spektralno osetljivih optičkih komponenti. Opisana je eksperimentalna postavka ove metode i izvršena je karakterizacija senzorskog sistema, kao i ispitivanje uticaja spoljašne sredine i drugih relevantnih parametara koji utiču na karakteristike senzorskog sistema.

1.1 Problem istraživanja

Od pojave optičkih vlakana, a naročito fiber-optičkih senzora sve više se proširuje i lista oblasti njihove uspešne primene. Njihove prednosti u odnosu na konvencionalna rešenja su brojne i značajne, naročito za potrebe prenosa signala na velike udaljenosti, za merenje na teško dostupnim i opasnim lokacijama, kao i za merenja u više tačaka i distribuirana merenja. Ove prednosti podrazumevaju pre svega nisku cenu, male dimenzije, imunost na elektromagnetne smetnje, otpornost na koroziju, dielektričnu konstrukciju i mogućnost multipleksiranja.

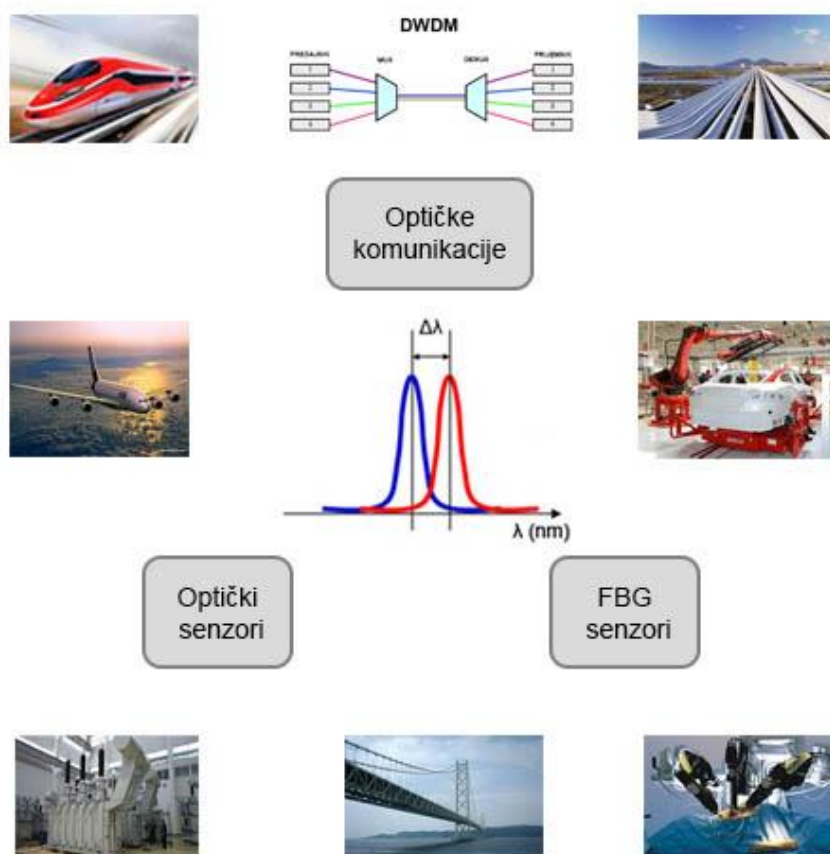
Optička vlakna se najviše koriste u oblasti optičkih komunikacija, pre svega za prenos signala na velike udaljenosti. Fiber-optički komunikacioni sistemi omogućavaju veoma brz pristup veoma velikim količinama podataka i to danas gotovo svim korisnicima savremenih informaciono-komunikacionih sistema. Kapacitet kanala za prenos signala se stalno povećava, zahvaljujući korišćenju tehnologije gustog multipleksiranja po talasnim dužinama (DWDM, eng. *Dense Wavelength Division Multiplexing*). U skladu sa ITU-T G.694.1 preporukom, trenutno su podržane gustine multipleksiranja od 100 GHz do 12.5 GHz (100 GHz, 50 GHz, 25 GHz i 12.5 GHz), odnosno približno od 0.8 nm do 0.1 nm (0.8 nm, 0.4 nm, 0.2 nm i 0.1

nm). Budući da koriste veliki broj laserskih izvora svetlosti veoma bliskih talasnih dužina, pouzdanost DWDM sistema zavisi od precizne kalibracije talasne dužine laserskih izvora, a potrebno je i da se prate promene ovih talasnih dužina tokom samog rada sistema. Praćenjem talasne dužine lasera takođe je moguće pravovremeno detektovati i eliminisati eventualne pomeraje njihove talasne dužine, koji se mogu javiti kao posledica procesa starenja lasera.

Već više od decenije, fiber-optički senzori sa Bragovom rešetkom predstavljaju možda najinteresantniju klasu optičkih senzora. FBG senzori detektuju promenu merne veličine (npr. temperature, naprezanja) kroz promenu talasne dužine reflektovanog signala. Te promene su obično veoma male, ponekad i reda pm (i manje), pa su potrebni veoma precizni uređaji za merenje promene talasne dužine svetlosti, tzv. interogatori (eng. *interrogator*). FBG senzori se danas uspešno koriste u mnogim oblastima kao što su energetske sistemi [5], građevinarstvo [6], železnički sistemi [7] [8], medicina [9] [10] [11], u nuklearnim okruženjima [12], u vazduhoplovstvu i istraživanju svemira [13] i mnogim drugim.

Kod mnogih drugih tipova optičkih senzora princip rada je takođe zasnovan na detekciji malih promena talasne dužine svetlosti, kao što je rezonantni pomeraj u transmisionom spektru optičkog senzora indeksa prelamanja na osnovu rezonatora [14] i reflektovanom spektru biosenzora (fotonski kristal) za detekciju feritina kao biomarkera nedostatka gvožđa u organizmu [15]. Fiber-optički senzori na osnovu Fabri-Peroovog interferometra takođe vrše detekciju merne veličine preciznim očitavanjem pomeraja talasne dužine svetlosti [16] [17] [18] [19] [20].

Na slici 1.1 prikazane su oblasti primene gde je neophodno detektovati male promene talasne dužine svetlosti.



Slika 1.1 Oblasti u kojima je potrebno merenje malih promena talasnih dužina svetlosti

Dakle, za pouzdan rad DWDM sistema i optičkih senzora (sa posebnim naglaskom na FBG senzore), neophodna je detekcija veoma malih promena talasne dužine svetlosti (reda pm i niže). Poželjno je da senzor ili senzorski sistem za merenje ovako malih promena talasne dužine svetlosti poseduje sledeće osobine:

- visoku rezoluciju merenja (reda pm i manje),
- širok merni opseg (nekoliko desetina ili čak stotina nm),
- veliku brzinu odziva,
- nisku ukupnu cenu senzora ili senzorskog sistema,
- jednostavnu konfiguraciju,
- veliku ponovljivost,
- imunost na fluktuacije snage optičkog izvora,
- mali uticaj faktora okruženja.

Naravno, kod većine postojećih senzora i senzorskih sistema nisu zadovoljene sve ove osobine. U zavisnosti od konkretne primene pravi se kompromis između najvažnijih

karakteristika potrebnih za tu primenu. Naročito je kritično ostvariti kompromis između postizanja visoke rezolucije merenja i što šireg mernog opsega, uz što veću brzinu odziva.

1.2 Predmet istraživanja

U ovoj doktorskoj disertaciji predmet istraživanja je senzorski sistem za pouzdano praćenje talasne dužine monohromatske svetlosti, sa posebnim naglaskom na detekciji malih promena talasne dužine. Princip rada senzora se zasniva na različitim spektralnim osetljivostima dve fotodiode i fiber-optičke račve (eng. *fiber-optic coupler*). Korišćenjem principa merenja zasnovanog na merenju odnosa (eng. *ratio-metric*) snaga, moguća je detekcija talasne dužine svetlosti nezavisno od snage izvora (lasera, poluprovodničke laserske diode i dr.). Ovakav senzorski sistem može imati primenu u optičkim komunikacijama (precizno praćenje talasne dužine laserskih izvora u DWDM sistemima), za ispitivanje (eng. *interrogation*) fiber-optičkih senzora na osnovu Bragove rešetke (FBG, eng. *Fiber Bragg Grating*), kao i za ispitivanje optičkih senzora koji rade na principu merenja talasne dužine svetlosti uopšte.

Fiber-optička račva se najčešće koristi za deljenje (eng. *splitting*) svetlosnog signala u određenom odnosu, međutim takođe može da se koristi i za detekciju talasne dužine [21]. Imajući u vidu da osetljivost (eng. *responsivity*) fotodiode zavisi od talasne dužine upadne svetlosti [22], jasno je da se i fotodetektoru mogu koristiti za detekciju talasne dužine. Kombinovanjem dva različita fotodetektora moguće je ostvariti precizno merenje talasne dužine monohromatske svetlosti u širokom spektralnom opsegu [23].

Potrebno je da senzorski sistem za merenje talasne dužine monohromatske svetlosti omogući veoma precizno merenje talasne dužine u okviru što šireg opsega talasnih dužina, uz što veću brzinu odziva. Važni kriterijumi koje senzor treba da ispuni su niska cena i jednostavna konfiguracija celokupnog sistema.

Kako bi se osigurala pouzdanost senzorskog sistema, biće izvršena njegova detaljna karakterizacija. S obzirom na to da sistem sadrži poluprovodničke elemente (fotodiode), potrebno je ispitati ponašanje senzorskog sistema u zavisnosti od promena temperature okoline. Takođe, potrebno je ustanoviti u kom opsegu snaga izvora senzorski sistem može pouzdano da meri talasnu dužinu monohromatske svetlosti, kao i uticaj šuma koji potiče od fluktuacija signala optičkog izvora i fotodetektora.

1.3 Cilj istraživanja

Cilj istraživanja ove doktorske disertacije je razvoj nove metode za pouzdano merenje talasne dužine monohromatske svetlosti zasnovane na korišćenju spektralno osetljivih optičkih komponenti, koja bi mogla imati primenu u oblasti optičkih komunikacija i ispitivanja optičkih senzora (naročito FBG senzora). Metoda će biti teorijski formulisana, a potom i eksperimentalno verifikovana. Očekuje se da će nova metoda omogućiti merenje talasne dužine monohromatske svetlosti sa visokom mernom rezolucijom i velikom širinom mernog opsega, uz veliku brzinu odziva senzorskog sistema.

1.4 Hipoteza i metodologija istraživanja

Disertacija se zasniva na hipotezi da je moguće realizovati senzorski sistem za merenje talasne dužine monohromatske svetlosti, koji se zasniva na spektralnim osetljivostima fiber-optičke račve i dva različita fotodetektora.

U cilju dokazivanja hipoteze, u okviru ove doktorske disertacije definisane su i sprovedene sledeće faze istraživanja:

- teorijska postavka problema detekcije malih promena talasne dužine monohromatske svetlosti u oblasti optičkih komunikacija i ispitivanja optičkih senzora,
- proučavanje postojećih metoda merenja talasne dužine svetlosti,
- pregled aktuelnog stanja u oblasti kroz proučavanje naučne i stručne literature iz oblasti istraživanja, i uporedna analiza predloženih rešenja,
- proučavanje spektralnih osetljivosti fiber-optičke račve i fotodioda,
- simulacija zavisnosti odnosa sprezanja optičke račve od talasne dužine ulazne svetlosti,
- formulacija napredne metode za merenje talasne dužine monohromatske svetlosti,
- eksperimentalna verifikacija predložene merne metode, koja uključuje karakterizaciju senzorskog sistema i ispitivanje uticaja sredine, i
- analiza i obrada rezultata dobijenih eksperimentalnim merenjima.

Metodologija istraživanja obuhvata teorijsko razmatranje metode za merenje talasne dužine monohromatske svetlosti, simulaciju pomoću softverskih alata, eksperimentalne metode za merenje i karakterizaciju senzora, analizu i obradu dobijenih simulacionih i eksperimentalnih rezultata koja podrazumeva statističke metode za dobijanje rezolucije i merne nesigurnosti, kao i optimizaciju rešenja na osnovu rezultata eksperimenata. U toku eksperimentalnog dela biće ispitani parametri sredine i samog sistema koji utiču na karakteristiku senzora.

1.5 Organizacija disertacije

Disertacija je organizovana u devet poglavlja.

Prvo poglavlje je uvod, gde su data uvodna razmatranja, definisani predmet, problem i cilj istraživanja, kao i hipoteza, koncepcija i metodologija istraživanja.

U drugom poglavlju opisani su sistemi kod kojih postoji potreba za praćenjem talasne dužine monohromatske svetlosti. Dat je detaljan opis komunikacionih DWDM sistema, s posebnim osvrtom na predajnike. Takođe, predstavljen je princip rada optičkog vlakna sa Bragovom rešetkom (FBG), njihova fabrikacija i oblasti primene, od kojih se naročito ističu FBG senzori različitih fizičkih veličina.

Treće poglavlje ove doktorske disertacije sadrži pregled metoda merenja talasne dužine svetlosti, a u četvrtom poglavlju je opisano trenutno stanje u oblasti istraživanja.

U petom poglavlju dat je detaljan opis spektralno osetljivih komponenti: fiber-optičke račve i fotodioda. Takođe je dat kratak pregled osobina poluprovodničkih materijala, kao materijala od kojih su sačinjene fotodiode.

U šestom poglavlju izložen je naučni doprinos ove disertacije, odnosno predložena je nova metoda merenja talasne dužine monohromatske svetlosti. Razmotrene su osobine i odabir spektralno osetljivih komponenti, odnosno fiber-optičke račve i fotodioda. U ovom poglavlju su takođe dati rezultati simulacije prostiranja svetlosti kroz optičku račvu. Opisana je eksperimentalna postavka predloženog senzorskog sistema za merenje talasne dužine monohromatske svetlosti, koja je zatim verifikovana i izvršena je karakterizacija senzorskog sistema. Ispitan je uticaj temperature okoline na eksperimentalnu postavku, kao i uticaj šuma koji potiče od fluktuacija optičkog izvora i samih fotodioda. Takođe, predložena je dodatna primena razvijenog senzorskog sistema za praćenje snage monohromatskih optičkih izvora, i za istovremenu karakterizaciju fiber-optičke račve i fotodetektora.

U sedmom poglavlju je izložena diskusija i poređenje predložene metode sa aktuelnim rešenjima iz literature.

U osmom poglavlju su izvedeni zaključci doktorske disertacije. Dat je kratak pregled sprovedenih istraživanja i naznačeni su mogući pravci daljih istraživanja.

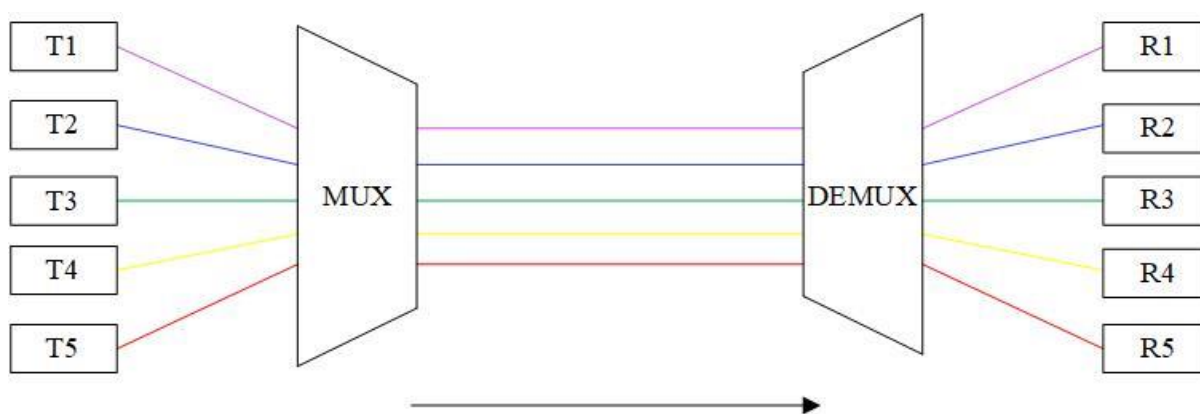
Deveto poglavlje je pregled korišćene literature.

2 POTREBA ZA MERENJEM TALASNE DUŽINE MONOHROMATSKE SVETLOSTI

2.1 Gusto multipleksiranje po talasnim dužinama (DWDM)

2.1.1 Multipleksiranje po talasnim dužinama

Multipleksiranje po talasnim dužinama (WDM, eng. *wavelength division multiplexing*) predstavlja tehnologiju koja kombinuje više različitih signala u jednom optičkom vlaknu, gde se svaki signal prenosi istovremeno na posebnoj talasnoj dužini svetlosti. Na slici 2.1 je prikazan princip rada WDM sistema.

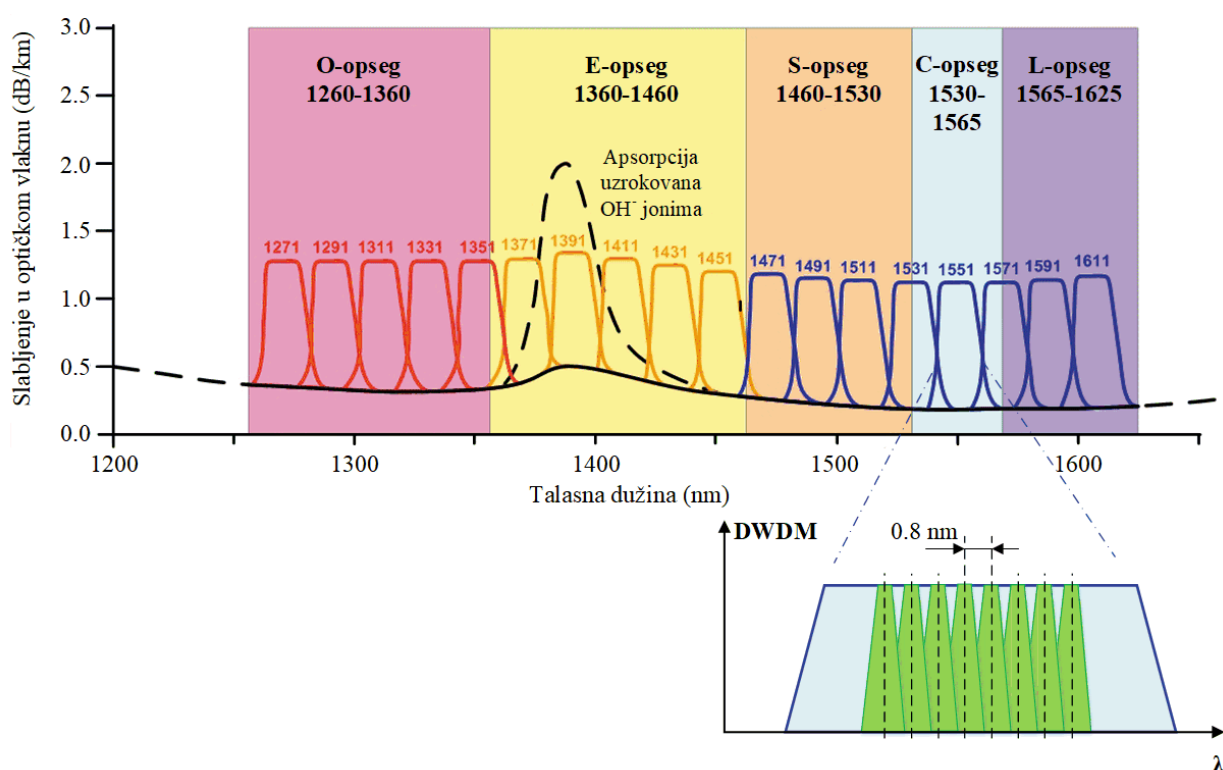


Slika 2.1 Princip rada WDM sistema (*T* – predajnik, *R* – prijemnik, strelica pokazuje na smer toka signala) [24]

Kao što se vidi na slici 2.1, osnovne komponente WDM sistema su:

- **Predajnici** – svetlosni izvori generišu svetlost u određenom uskom opsegu koji nosi digitalne podatke modulirane kao analogni signal,
- **Multiplekser** - kombinuje signale dobijene sa većeg broja predajnika,
- **Optičko vlakno** – obično monomodno, a za prenos na velike udaljenosti postoji potreba za pojačanjem signala,
- **Demultiplekser** – razdvaja signale koji se prenose duž jednog optičkog vlakna na različitim talasnim dužinama,
- **Prijemnici** – signale koje je razdvojio demultiplekser primaju fotodetektori (broj fotodetektora je jednak broju talasnih dužina).

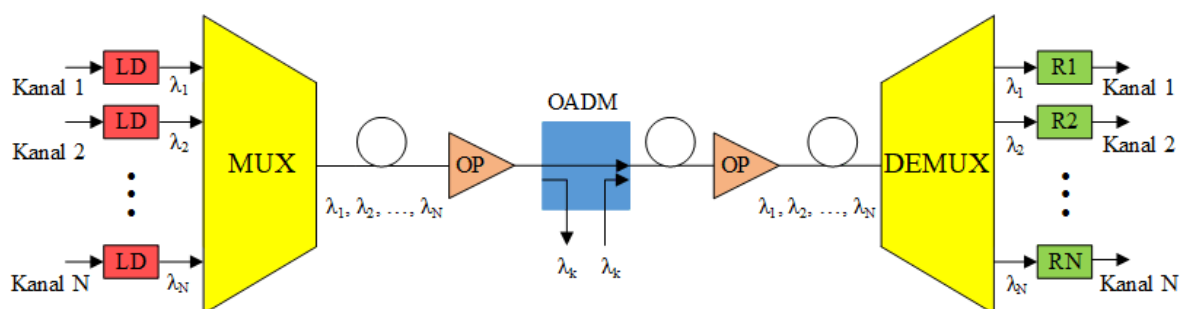
Postoje tri tipa WDM sistema. Prvi tip je tzv. normalni WDM sistem koji prenosi signale na samo dve talasne dužine, 1310 nm i 1550 nm. Sistemi sa „grubim“ multipleksiranjem po talasnim dužinama (CWDM, eng. *coarse wavelength division multiplexing*) obezbeđuju 18 kanala za prenos podataka koristeći talasne dužine od 1271 nm do 1611 nm sa razmakom kanala od 20 nm. Sistemi sa gustim multipleksiranjem po talasnim dužinama (DWDM, eng. *dense wavelength division multiplexing*) koriste talasne dužine u C (1525-1565 nm) i L (1565-1625 nm) opsegu talasnih dužina i omogućavaju od 40 do 160 kanala u zavisnosti od rastojanja između njih. Na slici 2.2 je dato poređenje broja i gustine kanala u CWDM i DWDM sistemima.



Slika 2.2 Poređenje broja i gustine kanala kod CWDM i DWDM sistema [25]

2.1.2 DWDM sistemi

DWDM sistemi nude značajne prednosti kao što su veliki broj kanala, veoma visoka brzina prenosa velikih količina podataka (i do 100 Gbps po jednom kanalu) i prenos na velike udaljenosti. Princip rada DWDM sistema šematski je ilustrovan na slici 2.3 [26].



Slika 2.3 Osnovna struktura DWDM sistema (LD – laserska dioda, OP – optički pojačavač, OADM – optički add-drop multiplexer, R – prijemnik) [26]

U ovim sistemima se obično koristi par optičkih vlakana između multiplexera i demultiplexera, pri čemu se jedno vlakno koristi za predaju, a drugo vlakno za prijem signala. Za prenos se koriste NZ-DSF optička vlakna (eng. *non-zero dispersion-shifted fiber*), koja su projektovana specijalno za potrebe DWDM sistema. Ideja prilikom projektovanja je bila da se dobije niska disperzija u oblasti oko 1550 nm, koja bi delovala nasuprot nelinearnih efekata (npr. mešanja četiri talasa (eng. *four-wave mixing*) koji predstavlja najkritičniji nelinearni efekat u DWDM sistemima). Na putanji oba vlakna se koriste i optički pojačavači (OP) i optički *add-drop* multiplexeri (OADM).

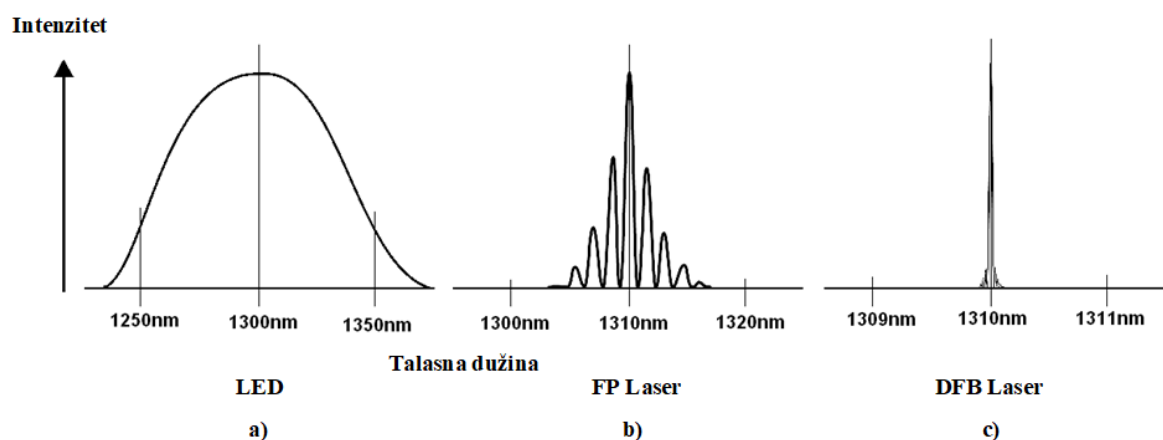
U daljem tekstu će detaljnije biti opisane komponente DWDM sistema.

I. Predajnik

Optički predajnici, kao i prijemnici, vitalni su deo svakog optičkog prenosnog sistema, jer vrše pretvaranje električnog signala u optički, i obrnuto. Predajnici su uređaji koji služe za slanje govornih i drugih informacija u obliku svetlosnog signala duž optičkog vlakna. Predajnik sadrži svetlosni izvor, i modulator, koji treba da moduliše tu svetlost, tako da ona reprezentuje binarni ili analogni ulazni signal.

Izvori svetlosti koji se koriste u oblasti optičkih komunikacija moraju da budu kompaktni, monohromatski, stabilni i dugotrajni. Pod stabilnošću svetlosnog izvora se podrazumeva konstantan intenzitet (tokom vremena, i prilikom promena napona polarizacije i temperature) i konstantna talasna dužina (na željenoj talasnoj dužini i bez drifta) generisane svetlosti. U praksi ne postoje monohromatski izvori svetlosti, već samo izvori koji generišu svetlost u veoma uskom opsegu talasnih dužina u obliku Gausove raspodele. Stabilizacija frekvencije (talasne dužine) generisane svetlosti se obično uspostavlja korišćenjem tehnika termoelektričnog hlađenja za održavanje konstantne radne temperature. Međutim, ovo povećava ukupnu cenu i potrošnju uređaja, tako da se radi na projektovanju uređaja sa manjom disipacijom toplote.

Izvori svetlosti, odnosno predajnici u DWDM sistemima su obično LED (eng. *light-emitting diode*) ili poluprovodničke laserske diode (SLD, eng. *semiconductor laser diode*). LED diode su jeftine i predstavljaju pogodne izvore za komunikacije preko multimodnog vlakna. Međutim, one imaju relativno širok spektar i emituju svetlost u širokom ugaonom rasponu. Takođe, LED diode su relativno spori uređaji, pogodni za korišćenje na brzinama manjim od 1 Gb/s. S druge strane, poluprovodnički laseri imaju osobine koje više odgovaraju primenama sa monomodnim vlaknima. U poređenju sa LED diodama laserske diode emituju koherentnu i usmerenu svetlost, sa mnogo manjom širinom spektralne linije od LED. Na slici 2.4 je dato poređenje spektara LED i LD dioda.

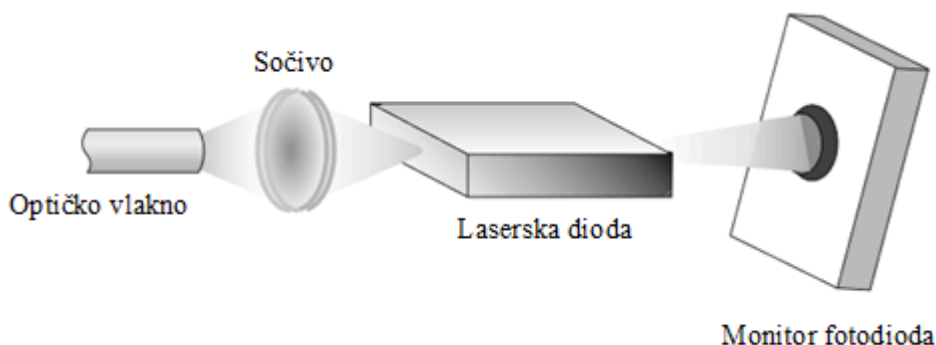


Slika 2.4 Poređenje spektara a) LED i laserskih dioda (b)FP laser – Fabri-Peroov laser, c) DFB laser – laser sa distribuiranom povratnom spregom) [27]

Izvori svetlosti su grupisani u četiri kategorije u zavisnosti od emitovane optičke snage duž dužine standardnog monomodnog optičkog vlakna (bez pojačanja) [28]:

- Prošireni dugodometni (eng. *extended long reach*), do 80 km (laseri)
- Dugodometni (eng. *long reach*), do 40 km (laseri)
- Srednjedometni (eng. *intermediate reach*), do 15 km (laseri)
- Kratkodometni (eng. *short reach*) do 2 km (laseri i LED diode)
- Veoma kratkodometni (eng. *very short reach*), do 1 km (LED diode)

Generalno, predajnici u DWDM sistemima zahtevaju određeni mehanizam upravljanja kako bi se omogućila stabilnost emitovane talasne dužine (frekvencije). Na slici 2.5 je prikazan opšti princip ubacivanja svetlosti lasera u optičko vlakno. Laserska dioda emituje svetlost u jednom smeru na sočivo koje ovu svetlost fokusira u vlakno, i u drugom smeru na fotodiodu. Fotodioda, omogućava praćenje emitovane snage zračenja lasera i pruža povratnu informaciju kako bi se izvršila potrebna podešavanja.

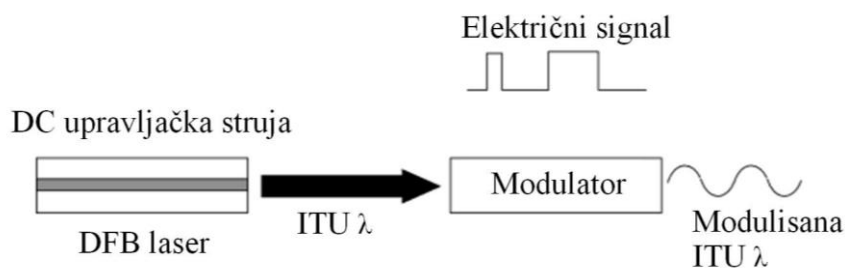


Slika 2.5 Opšti princip ubacivanja svetlosti koju emituje laserska dioda u optičko vlakno [29]

Dva tipa poluprovodničkih lasera se široko koriste, monolitski Fabri-Peroovi laseri i laseri sa distribuiranom povratnom spregom (DFB, eng. *distributed feedback*). DFB laser je naročito pogodan za DWDM primene, pošto emituje skoro monohromatsku svetlost, ima odličnu linearnost, dobar odnos signal-šum (SNR, eng. *signal-to-noise ratio*) i ima veliku brzinu odziva. Takođe, DFB laseri imaju centralne frekvencije (talasne dužine) u oblasti oko 1310 nm i od 1520 do 1565 nm. Opseg 1520-1565 nm je kompatibilan sa EDFA pojačavačem (eng. *Erbium-Doped Fiber Amplifier*).

Poluprovodnički laseri su direktno modulisani, odnosno modulacija laserske diode se ostvaruje modulacijom struje laserske diode. Međutim, direktna modulacija pri veoma visokim brzinama protoka može da uzrokuje tzv. čirpovanje frekvencije (čirp, eng. *chirp*). Čirp se dešava zato što indeks prelamanja aktivne sredine lasera zavisi od upravljačke struje. Kako se upravljačka struja menja od logičke jedinice do logičke nule i obrnuto, indeks prelamanja se dinamički menja (menja karakteristike rezonantne šupljine, što uzrokuje dinamičku promenu frekvencije (talasne dužine)).

Kako bi se prevazišao problem čirpa, izbegava se direktna modulacija, već se vrši spoljašnja modulacija lasera, npr. pomoću Mah-Zenderovog modulatora. Na slici 2.6 je prikazana šema spoljašnje modulacije DFB lasera.



Slika 2.6 Spoljašnja modulacija lasera [29]

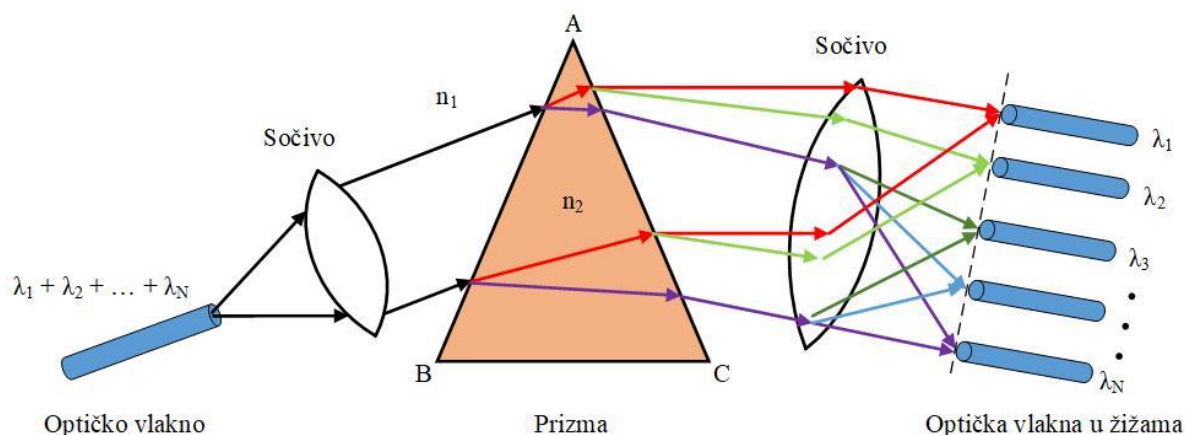
II. Multiplekseri/demultiplekseri

Optički multiplekser prima više talasnih dužina svetlosti (signala) iz više optičkih vlakana i spaja ih u jedan svetlosni zrak koji se ubacuje u optičko vlakno. Optički demultiplekser radi na potpuno suprotan način. Osnovna funkcija optičkog demultipleksera je da primi snop sačinjen od više talasnih dužina, da ga razdvoji na pojedinačne talasne dužine, koje se sprežu sa optičkim vlaknima kojih ima koliko i talasnih dužina. Razlikujemo pasivne i aktivne multipleksere/demultipleksere. Pasivni multiplekseri/demultiplekseri se zasnivaju na prizmi, difrakcionoj rešetki i spektralnim filterima, dok aktivni rade na principu kombinovanja pasivnih komponenti i podesivih detektora, gde je svaki detektor podešen na određenu talasnu dužinu.

Kao multiplekser i demultiplekser može se koristiti više uređaja. U daljem tekstu biće ukratko predstavljen njihov princip rada.

Prizma

Na slici 2.7 je prikazan princip rada demultipleksera koji se zasniva na trostranoj prizmi.

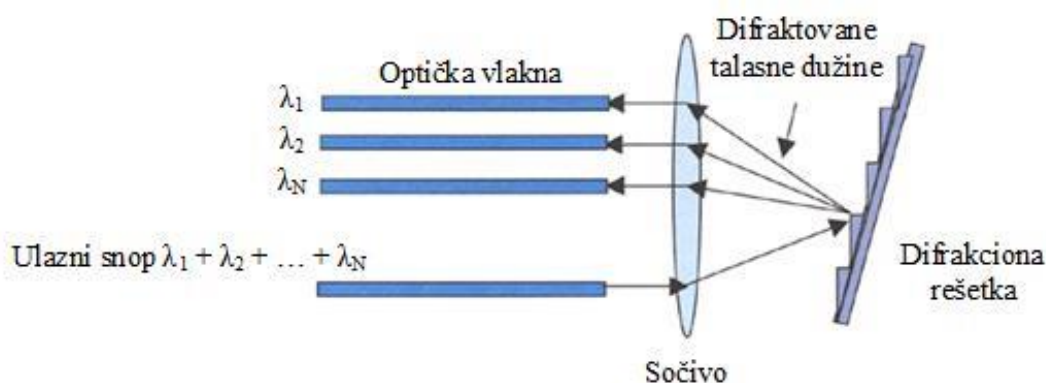


Slika 2.7 Princip rada DWDM demultipleksera koji se zasniva na prizmi [30]

Kada se paralelni snop složene svetlosti usmeri na jednu od bočnih strana prizme (AB), različite talasne dužine svetlosti se različito prelamaju. Nakon prelamanja svetlosti na drugoj strani prizme (AC), svetlost na izlazu se sastoji od talasnih dužina razdvojenih pod malim uglom. Potom, sočivo fokusira svaku talasnu dužinu u različitu tačku gde se spreže u optičko vlakno (broj optičkih vlakana = broj talasnih dužina svetlosti). Identična postavka sa prostiranjem svetlosti u suprotnom smeru se koristi kao DWDM multiplekser.

Difrakciona (Bragova) rešetka

Kada se složena svetlost usmeri na difrakcionu rešetku, svaka talasna dužina se izdvaja pod različitim uglom i usmerava ka različitoj tački u prostoru. Fokusiranje ovih pojedinačnih talasnih dužina se postiže korišćenjem sočiva, a optička vlakna su postavljena u žižama svake talasne dužine. Na slici 2.8 je prikazan demultiplekser koji radi na principu difrakcione Bragove rešetke. Identična postavka sa suprotnim smerom prostiranja svetlosti se može koristiti i kao multiplekser. U tom slučaju svetlosni signali na N različitih talasnih dužina se nakon prostiranja kroz optička vlakna fokusiraju i kombinuju u snop složene svetlosti.

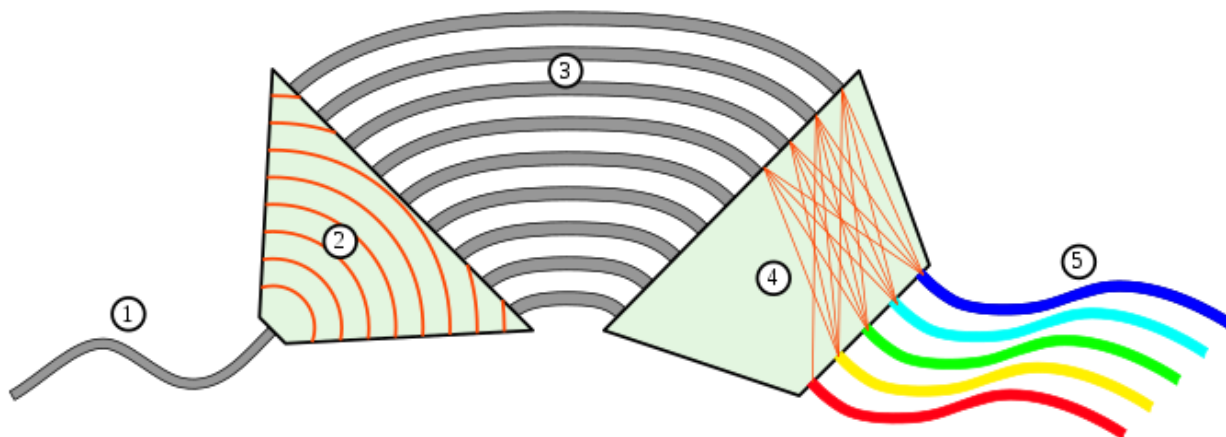


Slika 2.8 DWDM demultiplekser na principu difrakcione Bragove rešetke [30]

AWG filtri

Rešetka sa nizom talasovoda (AWG, eng. *arrayed waveguide grating*) se sastoji od niza zakrivljenih talasovoda, koji se zajedno ponašaju kao difrakciona rešetka (slika 2.9). Dužine ovih talasovoda su različite, pri čemu je razlika dužina susednih talasovoda ΔL konstantna. Talasovodi su povezani sa šupljinama na ulazu i izlazu. Kada svetlost uđe u ulaznu šupljinu (2), konusno se širi i kao takva ulazi u niz talasovoda (3). Usled razlike optičkih puteva svaka talasna dužina iz svakog talasovoda (npr. λ_1 u svakom talasovodu) dolazi sa faznom razlikom

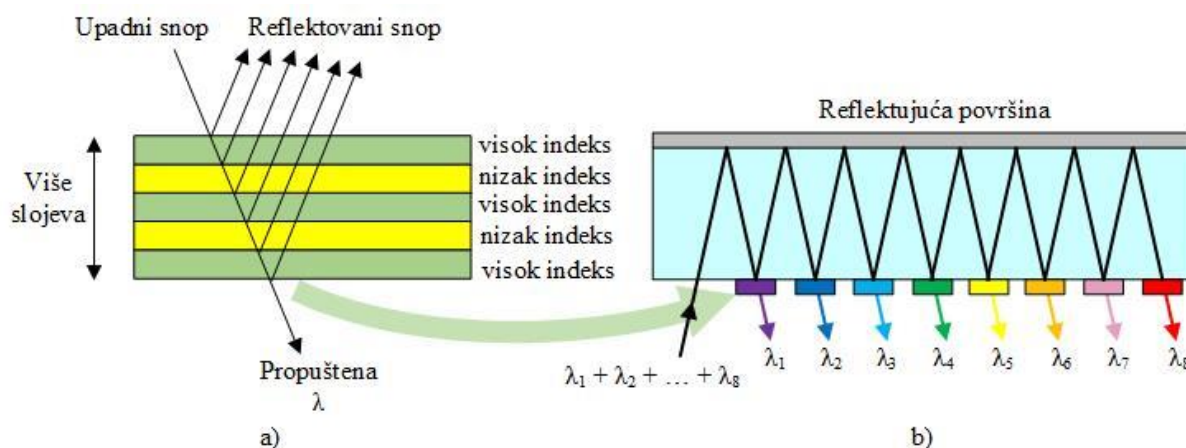
na izlaznu šupljinu (4), sa kojom je povezan niz talasovoda. Različite talasne dužine svetlosti imaju maksimalnu interferenciju u različitim tačkama, koje odgovaraju tačkama na koje se povezuju izlazni talasovodi (5). Ista AWG rešetka sa prostiranjem svetlosti u suprotnom smeru (od 5 ka 1) se može koristiti kao multiplekser.



Slika 2.9 Rešetka sa nizom talasovoda kao DWDM demultiplekser [31]

Filter tankog filma

Filter tankog filma (TFF, eng. *thin-film filter*) se koristi kao propusnik opsega talasnih dužina svetlosti. TFF propušta veoma uzak opseg talasnih dužina svetlosti, dok sve ostale talasne dužine reflektuje. Dielektrični interferentni filtri tankog filma se sastoje od naizmenično raspoređenih slojeva visokog indeksa prelamanja (npr. Ge, Si, Ta₂O₅) i slojeva niskog indeksa prelamanja (npr. GeF₃, SiO, SiO₂), pri čemu je svaki sloj debljine $\lambda/4$ u opsegu talasnih dužina od interesa, na supstratu od stakla. Talasna dužina propuštene svetlosti zavisi od odnosa vrednosti visokog i niskog indeksa prelamanja materijala. Prednosti tankog filma su veoma nizak temperaturni koeficijent (približno 0.002 nm/°C), dugotrajna stabilnost i minimalni gubici usled hromatske i polarizacione disperzije. Na slici 2.10a je prikazan princip rada filtra tankog filma, dok je na slici 2.10b dat demultiplekser na bazi više filtera tankog filma [28].

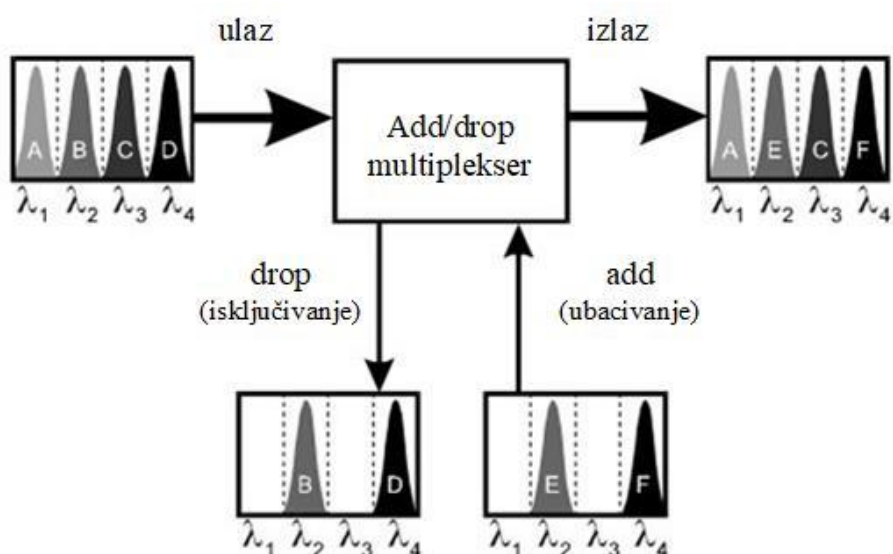


Slika 2.10 a) Princip rada filtra tankog filma, b) Demultiplekser na bazi više filtera tankog filma [28]

U savremenim DWDM sistemima koriste se AWG rešetke i TFF filtri kao multiplekseri/demultiplekseri. Filteri tankog filma nude dobru stabilnost i izolaciju između kanala po umerenoj ceni, ali imaju velike gubitke prilikom ubacivanja svetlosti (tzv. ulazni gubici, eng. *insertion loss*) [29]. Rešetke sa nizom talasovoda zavise od polarizacije (što se može kompenzovati), imaju ravan spektralni odziv i niske gubitke prilikom ubacivanja svetlosti [30]. Međutim, AWG rešetke su osetljive na promene temperature (talasna dužina kanala će se promeniti u skladu sa temperaturnim koeficijentom korišćenog materijala), i kao takve nisu pogodne za korišćenje u određenim sredinama. Ključna prednost rešetki sa nizom talasovoda u odnosu na filtere tankog filma je što njihova cena ne zavisi od broja talasnih dužina, što ih čini izuzetno isplativim za primene sa velikim brojem kanala.

III. Optički *add-drop* multiplekser

Optički *add-drop* multiplekser (OADM, eng. *optical add-drop multiplexer*) selektivno izbacuje određenu talasnu dužinu iz skupa talasnih dužina u optičkom vlaknu, stoga i podatke koje se prenose na ovoj talasnoj dužini. Zatim OADM u istom smeru prenosa podataka dodaje istu talasnu dužinu, ali sa različitim sadržajem podataka. Na slici 2.11 je prikazan princip rada optičkog *add-drop* multipleksera.



Slika 2.11 Princip rada optičkog add-drop multipleksera [32]

Postoje optički *add-drop* multiplekseri sa fiksnom, predefinisanim talasnom dužinom (još se nazivaju pasivni OADM ili fiksni OADM, FOADM) i OADM sa dinamičkom selekcijom talasne dužine (aktivni OADM). OADM-i sa fiksnom talasnom dužinom imaju fiksnu fizičku konfiguraciju, odnosno talasna dužina je na početku (tokom instalacije) odabrana (predefinisana) i ostaje ista sve dok je čovek ručno ne promeni. Pasivni OADM-i koriste filtre tankog filma, rešetke u optičkom vlaknu i planarne talasovode. OADM-i sa dinamičkim odabirom talasne dužine su rekonfigurabilni (ROADM, eng. *reconfigurable optical add-drop multiplexer*) i mogu dinamički da odaberu koje talasne dužine će se ubaciti, a koje izbaciti. Aktivni OADM-i su zasnovani na optičkim prekidačima, podesivim akusto-optičkim filterima i laserskim diodama sa podesivom talasnom dužinom.

IV. Pojačavač

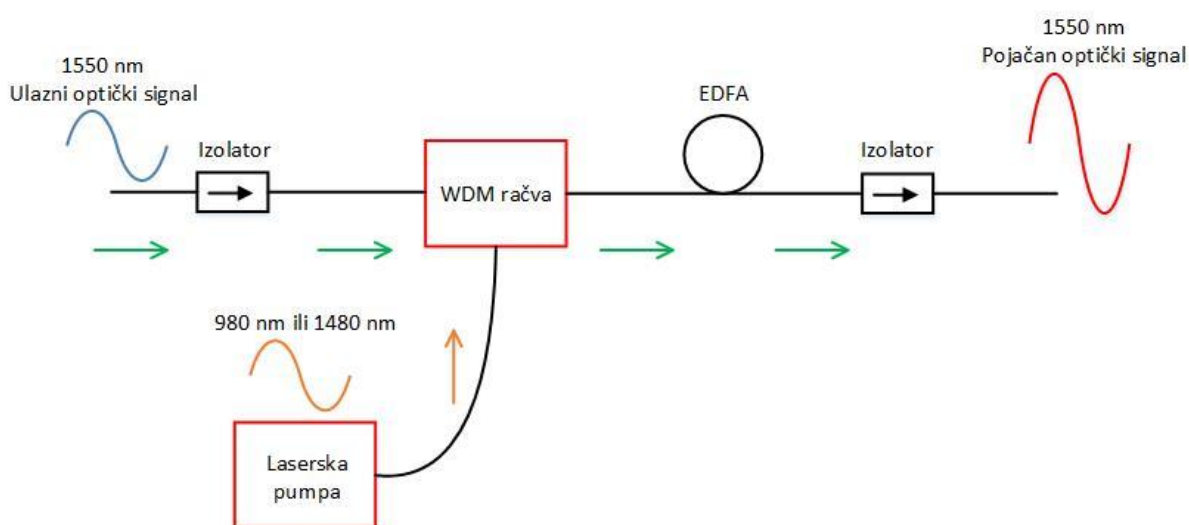
Uvođenje optičkog pojačavača je bio jedan od ključnih događaja za razvoj fiber-optičkih komunikacija. Linearni optički pojačavači se često koriste za kompenzaciju gubitaka u sistemima i mrežama optičkih komunikacija usled slabljenja u optičkom vlaknu, deljenja optičke snage i drugih faktora. Optički pojačavači mogu da povećaju dužinu prenosa optičkog signala bez potrebe za korišćenjem regeneratora.

EDFA pojačavač

Erbijum je redak element koji u pobuđenom stanju emituje svetlost na oko 1550 nm, što odgovara trećem optičkom prozoru. Optički pojačavač dopiran erbijumom (EDFA, eng.

erbium-doped fiber amplifier) pojačava signal na talasnim dužinama u C (1530-1565 nm) i L opsegu (1570-1610 nm). EDFA pojačava veliki broj optičkih signala istovremeno, bez opto-elektronske i elektro-optičke konverzije.

EDFA pruža brojne prednosti u odnosu na druge optičke pojačavače kao što su veliko pojačanje, velika optička snaga, nisko preslušavanje između kanala (talasnih dužina) i jednostavno optičko sprezanje sa i na optičko vlakno. Zahvaljujući ovim prednostima, upravo razvoj EDFA pojačavača je omogućio ogroman uspeh DWDM tehnologije. Osnovna struktura EDFA, koju čine laserska pumpa na 980 nm ili 1480 nm, erbijumom dopirano optičko vlakno, optički izolator i WDM (eng. *wavelength-division multiplexer*) račva, je prikazana na slici 2.12.



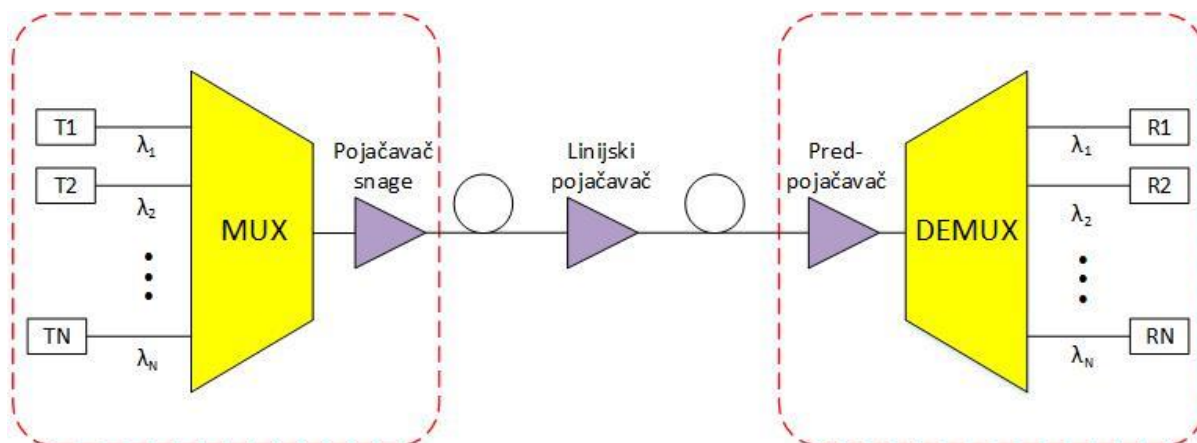
Slika 2.12 Osnovna struktura EDFA pojačavača [33]

Slab optički signal talasne dužine 1550 nm se ubacuje na ulaz optičkog vlakna. Laserska dioda proizvodi svetlost na talasnoj dužini od 980 nm ili 1480 nm. Ulazni optički signal i svetlost koju je generisala LD se kombinuju u WDM račvi, i taj signal se šalje u erbijumom dopirano vlakno. Svetlost LD interaguje sa jonima erbijuma i stimuliše ih da oslobode energiju kao dodatnu svetlost na 1550 nm. Ovaj proces se nastavlja duž erbijumom dopiranog vlakna, što konačno dovodi do generisanja pojačanog optičkog signala na istoj talasnoj dužini 1550 nm i u istom smeru. Optički izolator obezbeđuje prenos optičkog signala u samo jednom smeru i sprečava prenos svetlosti u suprotnom smeru.

Postoje tri tipa EDFA pojačavača na osnovu uloge u DWDM sistemu (slika 2.13):

- Optički pojačavač snage (OBA, eng. *optical boost amplifier*) se postavlja odmah nakon predajnika i pojačava multipleksirane optičke signale pre njihovog ulaska u optičko vlakno, odnosno koristi se da poveća predajnu snagu.

- Optički predpojačavač (OPA, eng. *optical pre-amplifier*) se postavlja tik pre prijemnika kako bi prijemnik primio dovoljno veliku optičku snagu (da bi mogao da je detektuje). OPA se koristi za kompenzaciju gubitaka u demultiplekseru.
- Optički linijski pojačavač (OLA, eng. *optical line amplifier*) se postavlja u sredini linije prenosa (optičkog linka) kako bi kompenzovao gubitke optičkog signala usled strukture optičkog vlakna.



Slika 2.13 Tipovi EDFA pojačavača na osnovu uloge u DWDM sistemu [34]

Korišćenjem Ramanovog pojačavača (zasnovanog na stimulisanom Ramanovom rasejanju), moguće je proširiti opseg talasnih dužina DWDM sistema u L-opseg (1565-1625 nm), što dovodi do približnog dupliranja broja kanala. Više detalja o principu rada, prednostima i nedostacima Ramanovog pojačavača može se pronaći u literaturi [35].

V. Prijemnici

Prijemnici u DWDM sistemima su fotodiode. Kako su fotodiode širokopolasni uređaji, neophodno je da demultiplekser prvo razdvoji signale različitih talasnih dužina. Obično se koriste PIN i lavinske fotodiode (APD, eng. *avalanche photodiode*). Više detalja o principu rada, karakteristikama i vrstama fotodioda dato je u Poglavlju 5.2.

U Tabeli 1 je dato nekoliko nominalnih centralnih frekvencija u C i L opsezima talasnih dužina za razmake kanala od 12.5 GHz (0.1 nm), 25 GHz (0.2 nm), 50 GHz (0.4 nm) i 100 GHz (0.8 nm) koje se koriste u DWDM sistemima [36].

Tabela 1 Primer nominalnih centralnih frekvencija DWDM mreže [36]

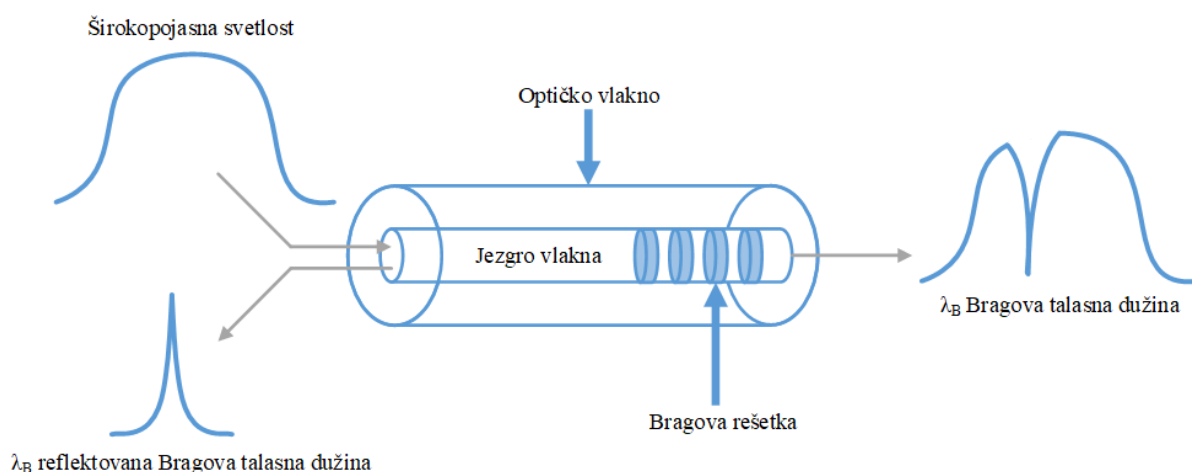
Nominalne centralne frekvencije (THz) za razmake				Nominalna centralna talasna dužina (nm)
12.5 GHz	25 GHz	50 GHz	100 GHz	
195.9375				1530.0413
195.9250	195.925			1530.1389
195.9125				1530.2365
195.9000	195.900	195.90	195.9	1530.3341
195.8875				1530.4318
195.8750	195.875			1530.5295
195.8625				1530.6271
195.8500	195.850	195.85		1530.7248
195.8375				1530.8225
195.8250	195.825			1530.9203
195.8125				1531.0180
195.8000	195.800	195.80	195.8	1531.1157
...
...
...
184.5500	184.550	184.55		1624.4511
184.5375				1624.5612
184.5250	184.525			1624.6712
184.5125				1624.7813
184.5000	184.500	184.50	184.5	1624.8914

2.2 Optičko vlakno sa Bragovom rešetkom (FBG)

Kod optičkih rešetki u optičkom vlaknu razlikujemo periodične i aperiodične rešetke. Periodične rešetke podrazumevaju optička vlakna sa periodičnom promenom indeksa prelamanja kao što su optička vlakna sa Bragovom rešetkom (FBG), optičke rešetke sa dugim periodom (LPG, eng. *long period grating*) i druge. Aperiodične rešetke su rešetke u optičkom vlaknu kod kojih promena indeksa prelamanja nije periodična, kao što su čirpovane rešetke u optičkom vlaknu. U fizičkom smislu, Bragova rešetka predstavlja periodičnu promenu indeksa prelamanja jezgra optičkog vlakna duž određene dužine L optičkog vlakna. Obično je dužina Bragove rešetke od 1 do 30 mm, dok je period rešetke reda stotina nm. Tipične vrednosti širine na polovini maksimuma (FWHM, eng. *full width at half maximum*) signala reflektovanog od FBG su od 0.05 do 0.3 nm. Princip rada Bragove rešetke je prilično jednostavan i zasniva se na mehanizmu Fresnelove refleksije. Na ulaz optičkog vlakna sa Bragovom rešetkom dovodi se širokopolasna svetlost. Optički talas se na Bragovoj rešetki reflektuje od svakog dela rešetke. Međutim, do konstruktivne interferencije optičkih talasa reflektovanih sa svakog dela rešetke dolazi samo na određenoj talasnoj dužini svetlosti (interferentna ogledala), tzv. Bragovoj talasnoj dužini. Prema tome, od upadne širokopolasne svetlosti samo uski spektar na Bragovoj talasnoj dužini se reflektuje, dok FBG propušta sve ostale talasne dužine ulaznog spektra. Bragova talasna dužina je data kao

$$\lambda_B = 2 \cdot n_{eff} \cdot \Lambda, \quad (2.1)$$

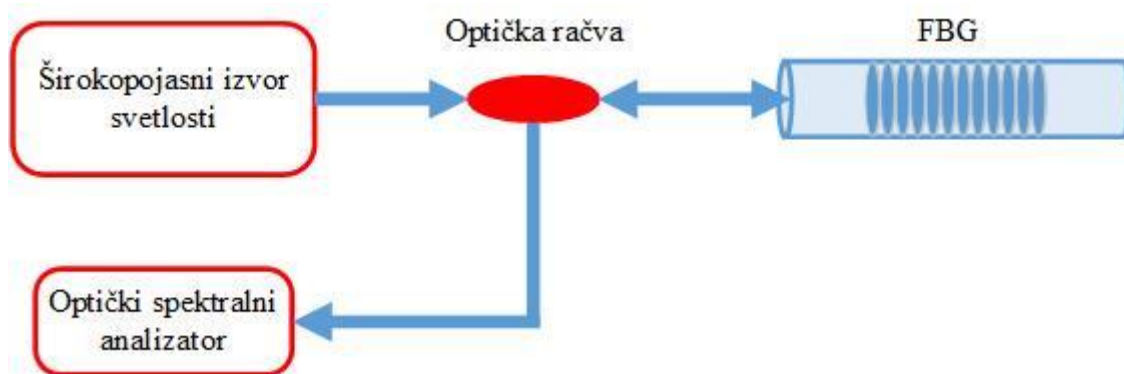
gde je λ_B Bragova talasna dužina, n_{eff} efektivni indeks prelamanja jezgra optičkog vlakna, a Λ period rešetke. Na slici 2.14 je prikazan princip rada optičkog vlakna sa Bragovom rešetkom.



Slika 2.14 Princip rada optičkog vlakna sa Bragovom rešetkom

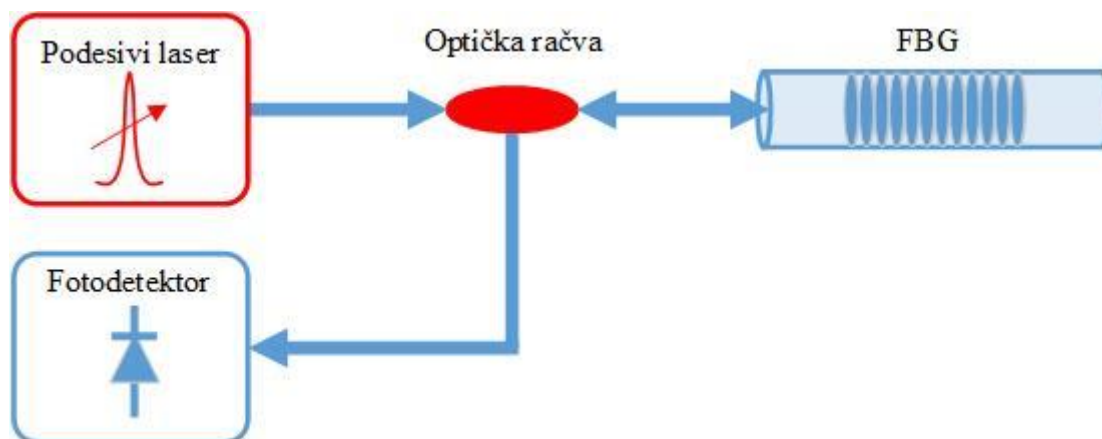
Postoji više načina fabrikacije optičkih vlakana sa Bragovom rešetkom. Osnovni princip upisivanja Bragove rešetke se zasniva na fotoosetljivosti materijala od kog je izrađeno jezgro optičkog vlakna, što znači da se indeks prelamanja jezgra trajno menja prilikom izlaganja svetlosti. Veličina promene zavisi od intenziteta i trajanja izlaganja izvoru svetlosti, kao i od fotoosetljivosti vlakna. Tradicionalno korišćena metoda podrazumeva upisivanje Bragove rešetke u jezgro germanijumom dopiranog optičkog vlakna pomoću interferencije dva zraka iz istog UV izvora. Drugi načini podrazumevaju korišćenje fazne maske, sekvencijalno upisivanje i upisivanje tačku po tačku [37]. Ranije su postupak izrade optičkog vlakna i upisivanja rešetke bili razdvojeni, dok je danas postupak fabrikacije doveden skoro do savršenstva tako što se Bragova rešetka upisuje u vlakno još u toku izvlačenja vlakna iz preforme.

Informacija o Bragovoj talasnoj dužini može da se dobije na osnovu reflektovanog ili transmissionog spektra optičkog vlakna sa Bragovom rešetkom. Ipak, u praktičnoj primeni mnogo češće su konfiguracije gde se informacija o λ_B izdvaja iz reflektovanog spektra, korišćenjem optičkog cirkulatora ili optičke račve. Transmisioni spektar se tradicionalno često koristi kod senzora na bazi rešetki sa dugim periodom [38]. Na slici 2.15 je prikazana metoda ispitivanja Bragove talasne dužine, korišćenjem širokopoljnog izvora svetlosti (npr. LED ili SLED), optičke račve i optičkog spektralnog analizatora.



Slika 2.15 Ispitivanje Bragove talasne dužine pomoću širokopoljnog izvora svetlosti i optičkog spektralnog analizatora

Na slici 2.16 je prikazana druga metoda za ispitivanje Bragove talasne dužine, pomoću podesivog laserskog izvora na ulazu optičkog vlakna sa Bragovom rešetkom, optičke račve i fotodetektora za detekciju reflektovanog signala sa FBG.



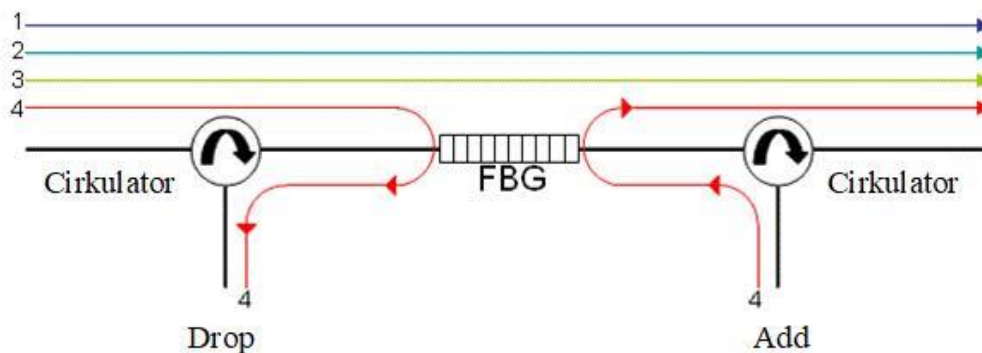
Slika 2.16 Ispitivanje Bragove talasne dužine pomoću podesivog lasera i fotodetektora

Umesto optičke račve može da se koristi i optički cirkulator.

Najznačajnije primene optičkog vlakna sa Bragovom rešetkom su za optičke komunikacije, kao sastavni deo lasera na bazi optičkog vlakna i kao senzorski element fiber-optičkih senzora različitih fizičkih veličina.

Optičke komunikacije

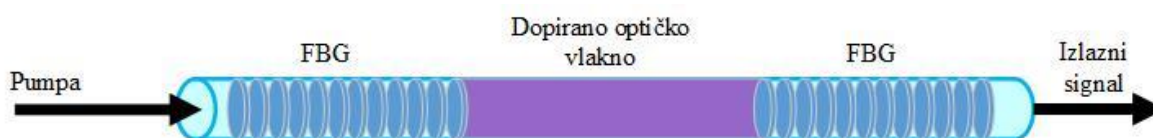
S obzirom na to da optičko vlakno sa Bragovom rešetkom u suštini radi kao selektor talasne dužine, FBG ima primenu u optičkim komunikacijama kao optički *add-drop* multiplekser (OADM) ili kao DWDM multiplekser/demultiplekser. Na slici 2.17 je prikazan optički *add-drop* multiplekser na osnovu optičkog vlakna sa Bragovom rešetkom i dva optička cirkulatora. Pomoću ovog uređaja moguće je ubaciti ili izbaciti nekoliko kanala u skladu sa brojem optičkih vlakana sa Bragovom rešetkom između cirkulatora. Signali na istoj talasnoj dužini kao Bragova talasna dužina korišćene FBG se reflektuju i vode na izlazni (drop) port, dok se ista rešetka može koristiti i za ubacivanje istih kanala (talasnih dužina) sa ulaznog (add) porta.



Slika 2.17 Optički *add-drop* multiplekser na osnovu optičkog vlakna sa Bragovom rešetkom i dva optička cirkulatora [39]

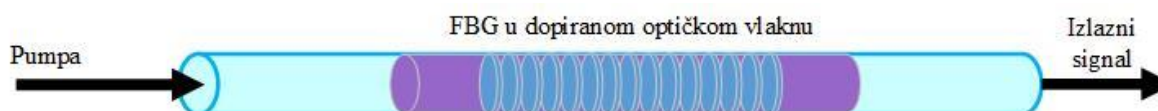
Laseri na bazi optičkog vlakna sa FBG

Optička vlakna sa Bragovom rešetkom se koriste kao sastavni deo lasera na bazi optičkih vlakana, odnosno umesto ogledala kod lasera s raspodeljenim Bragovim ogledalima (DBR, eng. *distributed Bragg reflector*) (slika 2.18),



Slika 2.18 DBR laser sa optičkim vlaknima sa Bragovom rešetkom [40]

a koristi se i kod lasera sa distribuiranom povratnom spregom (DFB, eng. *distributed feedback laser*) (slika 2.19).



Slika 2.19 DFB laser sa optičkim vlaknom sa Bragovom rešetkom [41]

FBG senzori

Kod FBG senzora, prilikom promene merene veličine dolazi do pomeraja Bragove talasne dužine $\Delta\lambda_B$. Kako bi se utvrdila promena merene veličine, potrebno je očitati promenu Bragove talasne dužine. Ispitivanje FBG senzora podrazumeva očitavanje i konvertovanje ovog pomeraja talasne dužine u promenu električnog signala koja se može izmeriti korišćenjem standardnih mernih uređaja.

FBG rešetke su osetljive na promene temperature i naprezanja, tako da su FBG senzori ove dve veličine veoma česti. Prilikom malog porasta temperature, dolazi do širenja optičkog vlakna i usled toga perioda rešetke Λ se povećava. Indeks prelamanja silicijuma (od kog je izrađeno vlakno) se takođe povećava, pri čemu je njegova promena za red veličine veća od promene periode rešetke. Kao posledicu, ovo prouzrokuje promenu (porast) Bragove talasne dužine. Ako istegnemo optičko vlakno sa Bragovom rešetkom i tako izazovemo naprezanje ε , dolazi do promene indeksa prelamanja. Naprezanje takođe izaziva promenu periode rešetke.

Relativna promena Bragove talasne dužine $\Delta\lambda_B/\lambda_B$ usled primenjenog naprezanja ε i promene temperature ΔT je približno data kao

$$\frac{\Delta\lambda_B}{\lambda_B} = C_S\varepsilon + C_T\Delta T, \quad (2.2)$$

gde je C_S koeficijent naprežanja, a C_T temperaturni koeficijent. Ovaj izraz se može preciznije napisati kao

$$\Delta\lambda_B = [(1 - p_e)\epsilon + (\alpha_A + \alpha_n)\Delta T] \cdot \lambda_B, \quad (2.3)$$

gde je p_e efektivni fotoelastični koeficijent (eng. *photoelastic coefficient*), α_A predstavlja koeficijent temperaturnog širenja (eng. *thermal expansion coefficient*), a α_n termo-optički koeficijent.

Pošto su FBG rešetke osetljive i na promenu temeprature i naprežanje, ove parametre je teško nezavisno meriti u praktičnim primenama. Značajni istraživački napori se ulažu u razvoj konfiguracija sa FBG sensorima, koji bi omogućili da se temperatura i naprežanje mogu izmeriti nezavisno jedno od drugog.

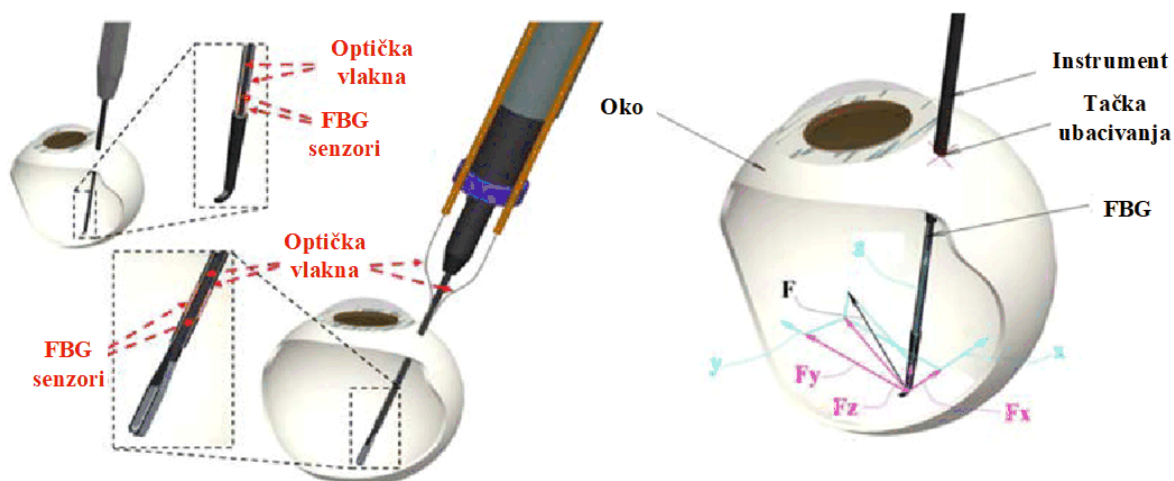
Prednosti korišćenja FBG senzora su brojne. Neke od njih kao što su imunost na elektromagnetne smetnje, fleksibilnost, male dimenzije, jednostavnost postavljanja u građevinske i druge strukture, potiču od prednosti optičkih vlakana, odnosno karakteristične su za celokupnu klasu fiber-optičkih senzora. Druge prednosti čine FBG senzore posebno atraktivnim za primene u pametnim strukturama u odnosu na konvencionalne fiber-optičke i električne senzore:

- informacija o merenoj veličini je spektralno enkodirana i usled toga, spoljašnji šum i gubici snage u suštini nemaju uticaj na signale senzora,
- Bragova talasna dužina je linearna funkcija merene veličine u okviru širokog mernog opsega,
- optička vlakna sa Bragovom rešetkom mogu biti dosta povoljna i lako su dostupna,
- optička vlakna sa Bragovom rešetkom imaju visoku reflektivnost za svetlost na Bragovoj talasnoj dužini, i
- očitavanje mernih podataka niza FBG senzora korišćenjem različitih tipova multipleksiranja: multipleksiranje po talasnim dužinama (WDM), vremensko multipleksiranje (TDM), prostorno multipleksiranje (SDM) i kodno multipleksiranje (CDMA) i njihovih kombinacija.

Pored FBG senzora naprežanja i temperature, postoje i FBG senzori brojnih drugih fizičkih veličina kao što su FBG senzori pritiska, vibracija, sile, savijanja, tečnosti, magnetnih polja i drugih. S obzirom na raznolikost mernih veličina, FBG senzori imaju veoma široku oblast primene. Najznačajnije oblasti primene FBG senzora su u medicini, za praćenje stanja struktura građevinskih objekata, vozila, zemljišta, u industriji nafte, gasa i rudarstvu, u nuklearnim elektranama i za praćenje saobraćaja. U nastavku su nabrojane neke posebne primene u okviru ovih oblasti.

Primene FBG senzora

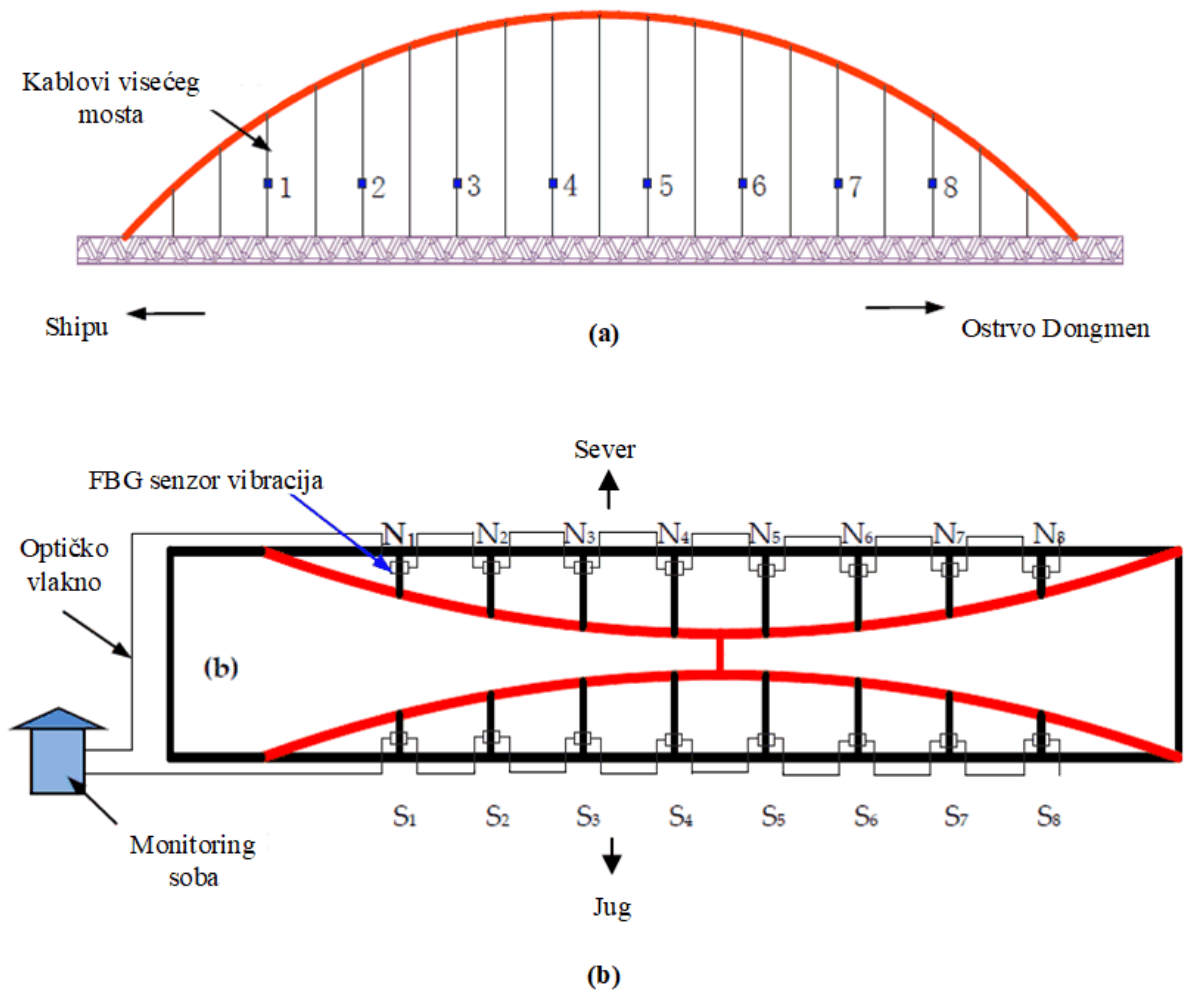
U oblasti **medicine** FBG senzori se mogu koristiti za praćenje disanja [11], praćenje hidrostatičkog pritiska u spinalnim tečnostima [42], praćenje profila pritiska u organima za varenje [43] [44], prilikom operacije oka [9] (slika 2.20), za praćenje dekalifikacije kostiju [45], za praćenje temperature tokom radiofrekventne termalne ablacije tumora [46], mapiranje pritiska tokom totalne artroplastike kolena [47] i za brojne druge primene.



Slika 2.20 Primer upotrebe FBG senzora za merenje sile prilikom operacije oka [9]

Pored primene FBG senzora u oblasti medicine, verovatno najznačajnija oblast primene je za **praćenje stanja struktura** (SHM, eng. *structural health monitoring*), naročito u trusnim područjima. FBG senzori se koriste za praćenje stanja mostova [6] [48] (slika 2.21), brana [49], tunela [50] [51], puteva [52], klizišta [53], brodova [54], aviona [13], vetrogeneratora [55], generatora velike snage i drugih struktura. U oblasti **saobraćaja** FBG senzori se primenjuju za praćenje željeznica [8] [7], praćenje transporta tereta, bezbednost prtljaga itd.

U **industriji nafte, gasa i rudarstvu** FBG senzori se koriste za praćenje cevovoda, naftnih platformi, skladišnih objekata, tankera, rafinerija, za praćenje bezbednosti tavanice rudnika [56] i druge. FBG senzori su u upotrebi i u **nuklearnim elektranama** za praćenje nuklearnih reaktora [57], za rad u nuklearnim sredinama (u uslovima visokih temperatura) [12] i drugim primenama.



Slika 2.21 Raspored FBG senzora vibracija na Tongwamen mostu [48]

3 PREGLED METODA MERENJA TALASNE DUŽINE SVETLOSTI

Konvencionalni optički uređaji za merenje talasne dužine svetlosti se zasnivaju na korišćenju difrakcionih rešetki i zapreminskih (eng. *bulk*) holograma. Difrakcione rešetke su obično integrisane u monohromatore i optičke spektralne analizatore, ali takođe mogu da se koriste eksterno zajedno sa CCD kamerama. Ovakvi sistemi su raznovrsni i mogu da se koriste za ispitivanje velikog broja senzora. Međutim, da bi se postigla visoka osetljivost prilikom određivanja talasne dužine svetlosti potrebno je koristiti difrakcione rešetke velike gustine zajedno sa rotacionim stepenima (pozicionerima) visoke preciznosti ili povećati rastojanje između difrakcionih rešetki i detektora. Ovo povećava veličinu sistema kao i njihovu cenu, čineći ih atraktivnim rešenjem samo u slučajevima kada je potrebno očitati podatke sa velikog broja senzora. U primenama gde se ne zahteva visoka osetljivost, pogodno rešenje može biti upotreba spektrometara koji se zasnivaju na difrakcionim rešetkama niske rezolucije i kratkim CCD nizovima.

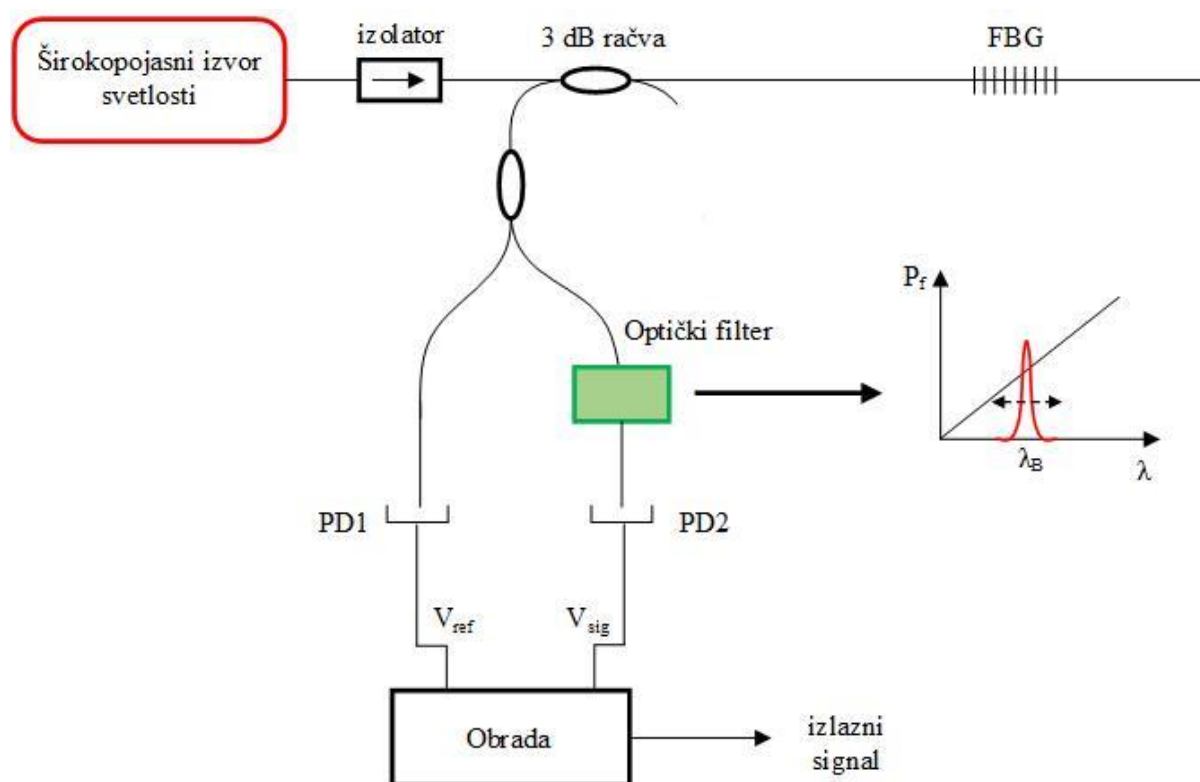
Drugi pristup podrazumeva korišćenje zapreminskih holograma upisanih u fotorefraktivnim materijalima kao difrakcionih elemenata [58]. Prednost ovog pristupa se ogleda u mogućnosti da se u jednom pasivnom uređaju uskladišti veliki broj filtera različitih spektralnih odziva, koji se kasnije može podešavati u skladu sa određenim primenama. Ovakva fleksibilnost, kao i sposobnost podešavanja centralnih talasnih dužina filtera primenom električnog polja na materijal gde je hologram upisan, ukazuju na to da hologrami konceptualno predstavljaju elegantno rešenje za ispitivanje (interogaciju) optičkih senzora. Međutim, njihova velika zapremina, kao i visoki gubici prilikom ubacivanja svetlosti su faktori koji ograničavaju njihovu primenu u ovoj oblasti.

Za ispitivanje karakteristika laserskih izvora i testiranje novih senzora talasne dužine u laboratorijskim uslovima najčešće se koristi optički spektralni analizator (OSA, eng. *optical spectrum analyzer*), ali OSA nije pogodan za korišćenje u realnim primenama, zbog niske brzine odziva usled sporog skeniranja i visoke cene.

Pored konvencionalnih senzorskih sistema razvijene su brojne druge metode za merenje talasne dužine svetlosti, koje se uopšteno mogu podeliti na aktivne i pasivne. U nastavku će biti dat kratak pregled najčešće korišćenih pasivnih i aktivnih metoda za praćenje talasne dužine svetlosti. Ove metode su prvenstveno razvijane za praćenje Bragove talasne dužine FBG senzora, ali iste tehnike se primenjuju i za praćenje laserskih izvora i ispitivanje drugih tipova optičkih senzora koji rade na principu detekcije pomeraja talasne dužine svetlosti.

3.1 Pasivne metode

Pasivne metode predstavljaju one metode u kojima se ne koriste električni, mehanički ili optički aktivni uređaji. Ove metode se obično zasnivaju na primeni tzv. ivičnog filtriranja (eng. *edge filtering*), odnosno koristi se linearni deo rastuće ili opadajuće ivice optičkog filtra. Osnovna šema pasivne metode ispitivanja talasne dužine svetlosti na osnovu ivičnog filtriranja je data na slici 3.1 [59].



Slika 3.1 Šema pasivne metode za ispitivanje talasne dužine FBG senzora na osnovu ivičnog filtriranja [59]

Uopšteno, ove metode podrazumevaju merenje snage upadnog zračenja na fotodetektor P_{sig} (koja generiše napon V_{sig}), koja se menja usled relativnog pomeraja spektralne karakteristike Bragove rešetke (koja predstavlja senzorski element) u odnosu na karakteristiku filtra. Kako bi se eliminisao uticaj fluktuacija snage optičkog izvora, gubitaka usled prostiranja svetlosti duž optičke putanje ili eventualne zavisnosti intenziteta optičkog izvora od talasne dužine, potrebno je uvesti i referentnu granu u senzorski sistem. Ova grana sadrži drugi fotodetektor na koji dolazi svetlost snage P_{ref} (koja generiše napon V_{ref}), koja predstavlja jedan deo snage koja dolazi sa rešetke. U takvim situacijama, obrada korišćenjem izraza V_{sig}/V_{ref} je dovoljna da eliminiše ove fluktuacije signala. U slučajevima kada se koriste spektralni filteri koji daju

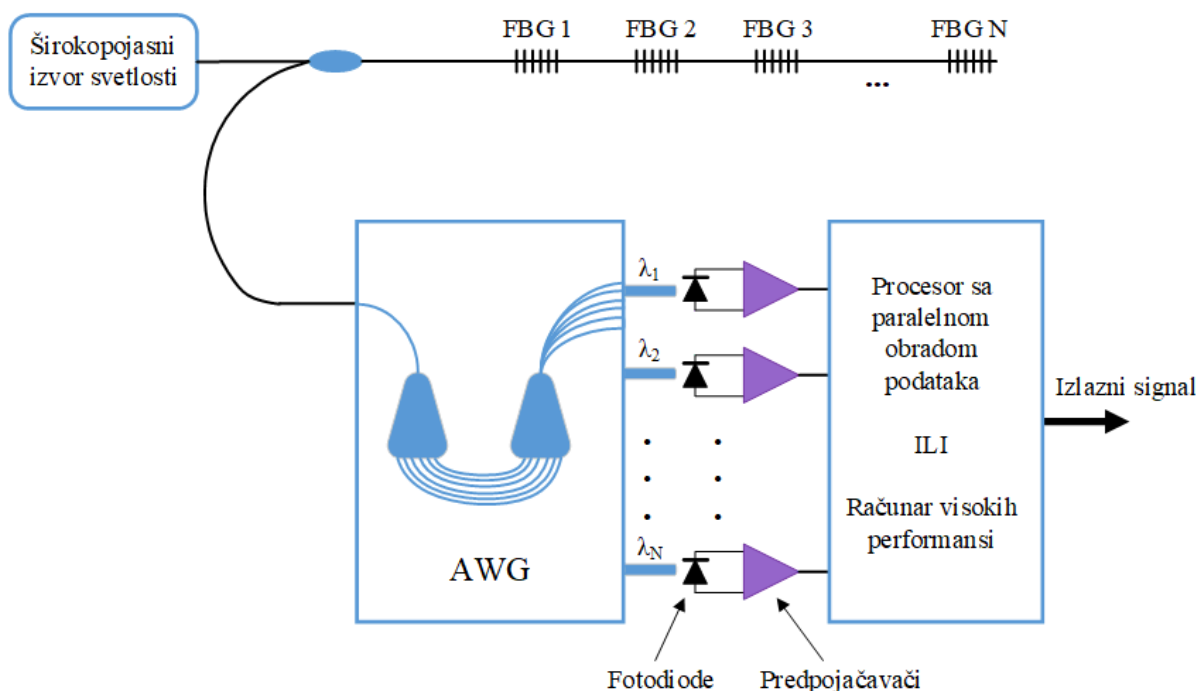
komplementarne izlazne signale V_{sig1} i V_{sig2} , kao kod WDM filtera na bazi optičkog vlakna, pogodnije je izvršiti obradu signala pomoću izraza $(V_{sig1} - V_{sig2}) / (V_{sig1} + V_{sig2})$, pošto se tako udvostručava osetljivost.

Kod metoda ispitivanja talasne dužine svetlosti gde se koristi spektralna karakteristika optičkog izvora, potreban je nešto drugačiji pristup za referenciranje.

Kod pasivnih metoda za ispitivanje talasne dužine svetlosti, funkciju optičkog filtra mogu imati zapreminski i integrisani optički filteri, filteri na bazi optičkih vlakana (tzv. fiber-optički filteri), kao i optički izvori i fotodetektor.

3.1.1 Zapreminski i integrisani filteri

Kao zapreminski (eng. *bulk*) filteri najčešće se koriste filteri boje i interferentni filteri [60] [61], koji omogućavaju širok merni opseg, ali malu rezoluciju talasne dužine svetlosti (tipično nekoliko desetina pikometara). Međutim, usled potrebe za gustim multipleksiranjem po talasnim dužinama u optičkim komunikacionim sistemima razvijeni su brojni uređaji za selekciju talasne dužine. Jedan od njih je rešetka sa nizom talasovoda (AWG, eng. *arrayed waveguide grating*), koja se sastoji od niza optičkih filtera propusnika uskog opsega integrisanih u planarnom talasovodu, koji omogućavaju brzo i istovremeno ispitivanje više talasnih dužina bez korišćenja mehaničkih pokretnih delova. Primena AWG rešetke za ispitivanje talasne dužine svetlosti je prvi put predložena u radu [62], gde se takođe koristi princip ivičnog filtriranja, odnosno da bi se izvršila obrada dobijenih rezultata na osnovu odnosa snaga koriste se opadajuća i rastuća ivica spektralnih funkcija propusnog opsega dva susedna kanala AWG. Na slici 3.2 je prikazana šema distribuiranog FBG senzorskog sistema koji koristi AWG rešetku za ispitivanje pomeraja Bragove talasne dužine.

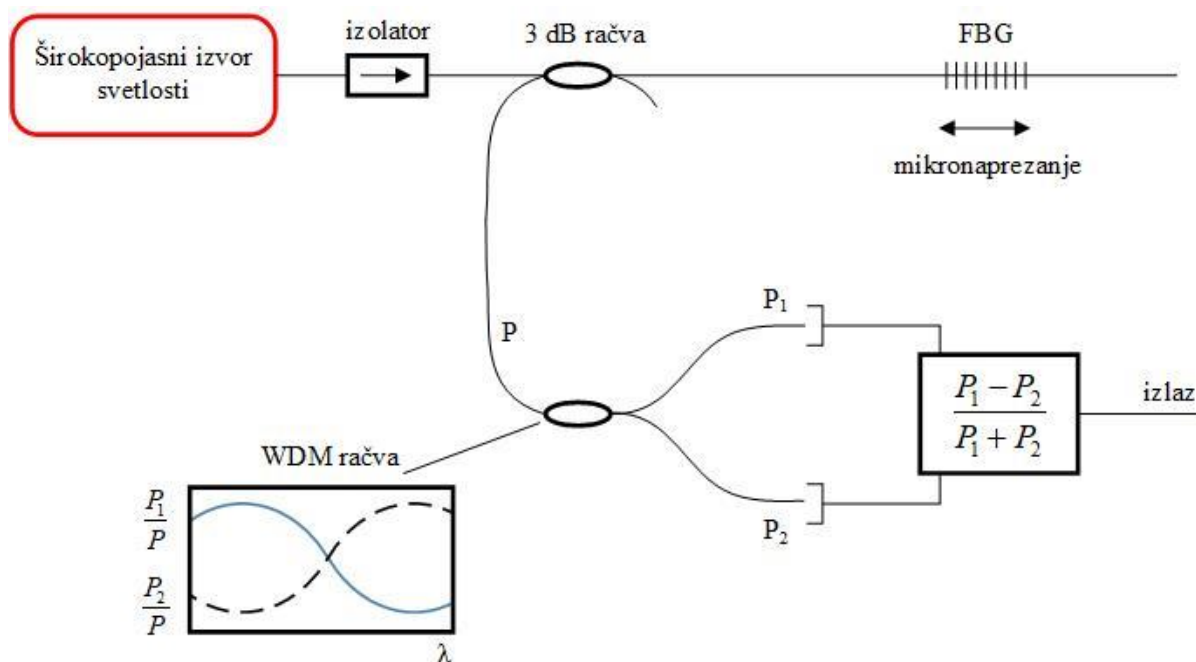


Slika 3.2 Distribuirani FBG senzorski sistem koji koristi rešetku sa nizom talasovoda (AWG) za ispitivanje Bragove talasne dužine [62]

Korišćenjem ovog pristupa za statičko ispitivanje talasne dužine FBG senzora postignuta je rezolucija od približno 0.5 pm u mernom opsegu od oko 0.2 nm. AWG rešetka je takođe naročito pogodna za dinamičko ispitivanje multipleksiranih FBG senzora, zbog svojih unutrašnjih karakteristika.

3.1.2 Fiber-optički filtri

Fiber-optički filtri su pogodniji za merenje talasne dužine svetlosti, tako da su u okviru istraživanja predloženi senzori na osnovu bikoničnih filtera [63], optičke rešetke sa dugim periodom (LPG, eng. *long period grating*) [64], fiber-optičkih račvi [65] [66], vlakna dopiranog erbijumom (EDF, eng. *erbium-doped fiber*) [67], čirpovane Bragove rešetke [68] i dr. Na slici 3.3 je prikazan senzorski sistem za merenje napreznja na osnovu optičkog vlakna sa Bragovom rešetkom, gde se fiber-optička račva koristi za ispitivanje Bragove talasne dužine. Princip rada je zasnovan na činjenici da fiber-optička račva ima približno linearne (u određenom opsegu talasnih dužina) i suprotne spektralne promene između odnosa spreznja izlazne snage na jednoj grani P_1 i ulazne snage P , i odnosa spreznja izlazne snage na drugoj grani P_2 i ulazne snage P .



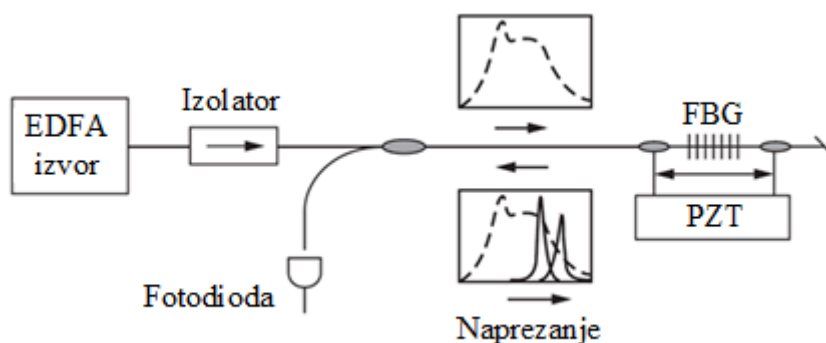
Slika 3.3 Senzorski sistem za merenje naprezanja na osnovu optičkog vlakna sa Bragovom rešetkom, gde se fiber-optička račva koristi za ispitivanje Bragove talasne dužine [65]

Interesantno je rešenje [69], gde se pomoću čirpovane rešetke upisane u vlakno dopirano erbijumom može podešavati osetljivost očitavanja talasne dužine. Kada se u vlakno dopirano erbijumom ubaci svetlost korišćenjem različitih snaga pumpe, pored pojačanja reflektovanog optičkog signala sa FBG, ovo vlakno izaziva različite nagibe ivice čirpovane rešetke. Na ovaj način, samo kontrolom struje injekcije laserske pumpe, može da se poveća osetljivost merenja talasne dužine svetlosti FBG za 2.7 puta u odnosu na situaciju kada je ista čirpovana rešetka upisana u standardno vlakno.

3.1.3 Optički izvori i fotodetektor

Za neke primene senzora na bazi optičkih rešetki, jednostavna detekcija reflektovane ili transmitovane snage je dovoljna za ispitivanje merene veličine. Ovi senzori talasne dužine svetlosti rade na principu spektralnog profila optičkog izvora (odnosno, na osnovu ivica profila) [70] [71] i na principu osetljivosti fotodetektora [72]. U slučaju senzorskih sistema na osnovu optičkog izvora, talasna dužina Bragove rešetke je centrirana u blizini prevojne tačke na jednoj od ivica spektralne karakteristike izvora, odnosno na linearnom delu karakteristike. Zbog toga, promena vrednosti talasne dužine ima kao rezultat promenu optičke snage reflektovane od Bragove rešetke. Na slici 3.4 je prikazana šema senzorskog sistema koji koristi linearnu oblast ASE profila EDFA izvora. Isprekidanom linijom je označena ASE spektralna

karakteristika, a signali označeni punom linijom predstavljaju svetlost koju reflektuje FBG senzor.



Slika 3.4 Šema senzorskog sistema koji koristi linearnu oblast ASE profila optičkog EDFA izvora [70]

Sa druge strane, kod fotodetektora sa relativno strmom karakteristikom spektralne osetljivosti, promena talasne dužine svetlosti (usled delovanja merene veličine na senzor) koja dolazi na fotodetektor se direktno prevodi u promenu generisane fotostruje. Podaci o merenoj veličini se onda mogu dobiti pomoću ove fotostruje.

3.2 Aktivne metode

Aktivne metode za detekciju talasne dužine svetlosti obično podrazumevaju korišćenje mehanizama za praćenje, skeniranje i modulisanje. Ove metode se zasnivaju na korišćenju optičkih filtera propusnika opsega koji imaju sličnu ili manju širinu spektra u odnosu na tipične širine spektra laserskih izvora i optičkih rešetki, ili na korišćenju interferometarskih konfiguracija. Ulogu filtera propusnika opsega mogu imati zapreminski optički filtri, fiber-optički filtri, uskopojasni optički izvori i rešenja koja se zasnivaju na generisanju električnog nosioca.

3.2.1 Zapreminski optički filtri

Najznačajniji predstavnici grupe zapreminskih (eng. *bulk*) optičkih filtera su Fabri-Peroov filter i akusto-optički filter.

Fabri-Peroov filter

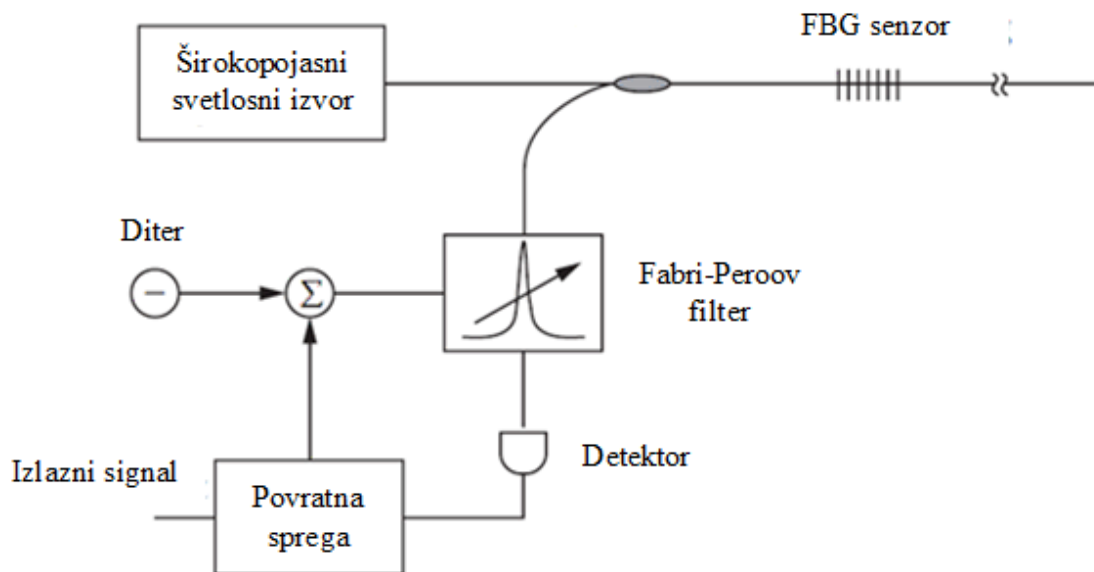
Jedna od najuspešnijih metoda za ispitivanje talasne dužine svetlosti se zasniva na korišćenju podesivog filtra propusnika opsega, i to najčešće Fabri-Peroovog podesivog filtra. Ovaj filter se ponekad naziva i Fabri-Peroov interferometar.

Fabri-Peroov filter (FPF, eng. *Fabry-Perot filter*) se sastoji od dve delimično reflektujuće površi između kojih se nalazi prazan prostor (šupljina). Svetlost ulazi u ovu šupljinu i delimično se reflektuje više puta unutar šupljine. Usled interferencije višestruko reflektovanih svetlosnih zraka, transmitansa svetlosti kroz ovu šupljinu ima periodičnu karakteristiku sa promenom optičke frekvencije (talasne dužine) ili rastojanja između dve reflektujuće površi. Ove reflektujuće površi su obično krajevi dva optička vlakna koji su pokriveni visoko reflektivnim tankim filmom, gde jedno vlakno dovodi svetlost, dok drugo vlakno skuplja propuštenu svetlost iz šupljine. Kod optičkog talasa, koji se delimično reflektuje od površi, dolazi do promene faze tokom svakog povratnog puta svetlosti (eng. *round trip*) koja je data kao

$$\varphi = 2\pi \frac{2nl}{\lambda} + \varphi_0, \quad (3.1)$$

gde n predstavlja indeks prelamanja materijala od kog je načinjena šupljina, l dužinu šupljine, λ talasnu dužinu svetlosti u slobodnom prostoru i φ_0 je faza koja proizilazi od refleksija o oba zida šupljine (0 ili 2π). Ako je fazna razlika (tj. promena faze) celobrojni umnožak 2π radijana, onda transmitansa postaje maksimalna usled konstruktivne interferencije. Iako je u jednačini (3.1) fazna razlika inverzno proporcionalna talasnoj dužini, mala promena fazne razlike $\Delta\varphi$ je proporcionalna maloj promeni talasne dužine zbog $\Delta(1/\lambda) = -(\Delta\lambda)/\lambda^2$. Jednačina takođe pokazuje da je fazna razlika proporcionalna i dužini šupljine. Stoga, ako se dužina šupljine menja pomoću PZT, podešava se propusni opseg.

Tipično, podesivi fiber FPF filteri imaju širinu spektralne linije od 0.2 do 0.6 nm, slobodni spektralni opseg (FSR, eng. *free spectral range*) od 40 do 60 nm i faktor finoće (predstavlja odnos FSR i širine spektralne linije) od 100 do 200. Podešavanje filtera se izvodi tačnim pomeranjem razmaka između reflektivnih površi korišćenjem piezoelektričnih ili elektrostatičkih aktuatora. Ovakve karakteristike omogućavaju visoke performanse u ispitivanju talasne dužine svetlosti, sa rezolucijama višim od 0.5 pm prilikom statičkih merenja talasne dužine. Na slici 3.5 je prikazan šematski dijagram podesivog fiber FPF filtra za demodulisanje pomeraja talasne dužine za jednu senzorsku FBG [73].



Slika 3.5 Šema za ispitivanje talasne dužine svetlosti korišćenjem Fabri-Peroovog filtra u zatvorenoj petlji [73]

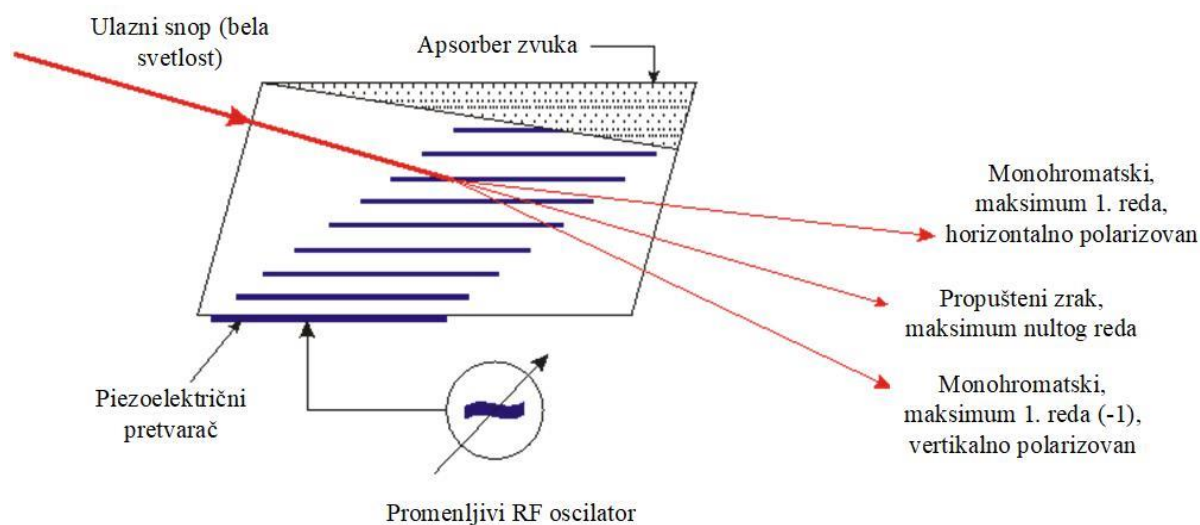
Svetlost koju reflektuje FBG senzor se pomoću optičke račve usmerava na FPF filter, koji ima propusni opseg uporediv sa propusnim opsegom FBG. FSR Fabri-Peroovog filtra treba da bude veći od radnog opsega rešetke. Korišćenjem postavke u vidu povratne (zatvorene) petlje, propusni opseg FPF filtra se zaključava za uskopojasni reflektovan FBG signal. Pomoću sinusnog diterovanja dužine šupljine FPF filtra, podešava se propusna talasna dužina filtra u malim koracima od 0.01 nm na ukupnom propusnom opsegu filtra od oko 0.3 nm. Kada se rezonantna talasna dužina filtra poklopi sa reflektovanom talasnom dužinom FBG senzora, detektor meri maksimalnu snagu usled maksimalnog preklapanja propusnog opsega FPF filtra i reflektovanog spektralnog opsega sa FBG. Diterovanje predstavlja namerno uvođenje dodatnog šuma male amplitude, a u ovom kolu služi kao signal greške. Ako se rezonantna talasna dužina filtra ne poklapa sa reflektovanom talasnom dužinom FBG senzora, komponenta ovog šuma je prisutna u signalu koji meri detektor i ukazuje da postoji greška u merenju. Kada se ove talasne dužine poklope, na detektor dolazi samo jednosmerna komponenta optičke snage, bez komponente šuma (nema greške).

Akusto-optički filter

Akusto-optički podesivi filteri (AOTF, eng. *acusto-optic tunable filter*) rade na principu interakcije zvučnih (akustičnih) i optičkih talasa. Radio (RF, eng. *radio frequency*) talasi prolaze kroz piezoelektrični pretvarač koji generiše zvučne talase visoke frekvencije koji se

zatim prostiru kroz kristal. U pitanju je specijalno pripremljen kristal sa dvojnim prelamanjem (eng. *birefringent*), obično izrađen od telurijum-oksida ili kvarca, čije se optičke osobine menjaju nakon interakcije sa zvučnim talasima. Kao posledica dolazi do periodične promene indeksa prelamanja kristala, pa deluje kao rešetka. Nakon prostiranja kroz ulazno vlakno (eng. *illuminating fiber*), svetlosni talas se difrakuje na ovoj privremenoj difrakcionoj rešetki pod uglom koji zavisi od talasne dužine i upadnog ugla svetlosti. Svetlost koja se difrakuje pod određenim prostornim uglom se zatim spreže u izlazno vlakno. Prema tome, delovanjem na frekvenciju RF signala, menja se period rešetke i može se podesiti da jedna talasna dužina (tj. veoma uzak opseg talasnih dužina) prolazi kroz kristal dok se ostale ponište destruktivnom interferencijom. Na ovaj način se mogu dobiti filtri propusnici opsega sa spektralnom širinom oko 0.2 nm i opsegom podešavanja većim od 100 nm. Opisan princip rada AOTF-a je prikazan na slici 3.6.

Značajna prednost ove metode ispitivanja talasne dužine svetlosti je mogućnost odabira više talasnih dužina istovremeno primenom više RF signala različitih frekvencija [74]. Zbog toga, AOTF može da ponudi paralelno ispitivanje talasnih dužina i smanjenje vremena potrebnog za ispitivanje niza multipleksiranih senzora.

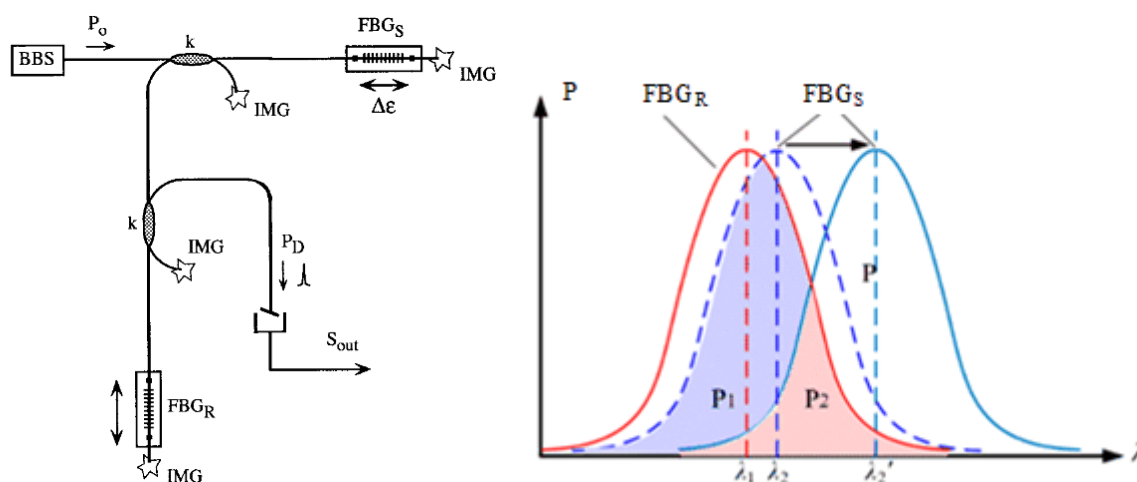


Slika 3.6 Princip rada akusto-optičkog podesivog filtra [75]

3.2.2 Fiber-optički filteri

U okviru ove grupe široko su proučavane metode ispitivanja talasne dužine svetlosti zasnovane na korišćenju optičkih Bragovih rešetki. Kod ove metode koristi se par identičnih

Bragovih rešetki, od kojih je jedna senzorska rešetka, a druga prijemna. Princip rada se bazira na poklapanju/preklapanju spektara ove dve rešetke (eng. *matched fiber Bragg grating pair interrogator*) [76]. Prijemna rešetka detektuje Bragovu talasnu dužinu senzorske rešetke filtriranjem svetlosti reflektovane od senzorske rešetke. Kada dođe do promene napreznja ili temperature koje meri senzorska rešetka, uslov poklapanja Bragove talasne dužine za par rešetki nije ispunjen. Međutim, ovaj uslov se može lako ponovo uspostaviti podešavanjem prijemne rešetke pomoću odgovarajuće metode. U svrhu podešavanja prijemne rešetke može da se koristi piezoelektrični uređaj za rastezanje (eng. *piezoelectric stretcher*). Na slici 3.7 je prikazan šematski dijagram metode ispitivanja talasne dužine svetlosti na osnovu poklapanja spektara para vlakana sa Bragovom rešetkom, kao i princip rada.



Slika 3.7 Šematski dijagram i princip rada metode merenja talasne dužine svetlosti na osnovu poklapanja spektara para vlakana sa Bragovom rešetkom (BBS – širokopolosni izvor svetlosti, FBG_S – senzorska FBG, FBG_R – prijemna FBG, IMG - gel za prilagođavanje indeksa prelamanja) [77]

Ova metoda može da bude implementirana u reflektivnoj [76], [77] ili u transmisivnoj konfiguraciji [78]. Može lako da se primeni za istovremeno ispitivanje multipleksiranog senzorskog niza sa velikim brojem rešetki, ako na prijemu mogu da se obezbede sve odgovarajuće „uparene“ rešetke. Takođe, „uparene“ prijemne rešetke mogu da se postave i u paralelnoj [76] i u serijskoj konfiguraciji [78].

Ovaj pristup za ispitivanje talasne dužine svetlosti je relativno jeftin i omogućava visoku mernu rezoluciju (manju od 1 pm za statička merenja), međutim postoje određena ograničenja kod merenja dinamičkih signala.

WDM fiber-optičke račve se takođe mogu koristiti za ispitivanje talasne dužine svetlosti [79]. Spektralni odziv WDM fiber-optičke račve se aktivno podešava istezanjem oblasti spreznja kako bi se održao konstantan odnos spreznja (eng. *coupling ratio*) pri reflektovanoj

Bragovoj talasnoj dužini. Direktnim merenjem elongacije WDM račve, dobija se informacija o talasnoj dužini svetlosti reflektovane od FBG senzora, odnosno o merenoj veličini. U okviru fiber-optičkih aktivnih filtera interesantan je i pristup zasnovan na dinamičkom filtriranju, odnosno na ultrazvučno upisanoj LPFG (U-LPFG, eng. *ultrasonically induced LPFG*) koja funkcioniše kao podesivi filter nepropusnik opsega (eng. *notch filter*) [80]. Periodična modulacija indeksa prelamanja u jezgri vlakna u pravcu ose upisuje se korišćenjem akusto-optičkog efekta kroz primenu ultrazvučnih vibracija od nekoliko stotina kHz do nekoliko MHz na vlakno bez zaštitnog omotača. Ako je U-LPFG povezana na izlaz FBG senzora (izlaz sa reflektovanim signalom sa FBG senzora) i ultrazvučna frekvencija se menja u koracima, centralna talasna dužina FBG se može dobiti kao ultrazvučna frekvencija koja daje minimalni izlazni signal.

3.2.3 Optički izvori

Optički izvori mogu takođe da vrše funkciju aktivnog filtriranja, i to obično poluprovodnička laserska dioda bilo monomodna [81] ili višemodna [82]. Informacija o talasnoj dužini se može dobiti iz nivoa optičke snage reflektovane od strane senzora, koji zavisi od relativne pozicije između rešetke i laserskog moda. Pošto je spektralna širina moda mnogo manja od spektralne širine Bragove rešetke i pod pretpostavkom da uvek postoji preklapanje dve spektralne funkcije, može se reći da filtriranje zaista vrši sama Bragova rešetka, odnosno FBG senzor. Kao i pasivne metode na bazi optičkih izvora (opisanih u odeljku 3.1.3), aktivne metode koje se zasnivaju na optičkim izvorima su osetljive na fluktuacije optičke snage i stoga je potrebno uvesti odgovarajuće referenciranje. Ovaj problem se može zaobići primenom ranije opisane tehnike diterovanja. Kod ove metode, signal ditera se veoma lako može generisati modulisanjem struje laserske diode.

3.2.4 Generisanje nosioca

Ova metoda kombinuje filtriranje propusnog opsega (eng. *bandwidth filtering*) sa modulacijom optičkog izvora/filtra i specifičnu obradu signala da bi se generisao električni nosilac. Faza generisanog nosioca je proporcionalna pomeraju Bragove talasne dužine senzorske FBG, odnosno promeni merene veličine. Kod metode generisanja nosioca, vrši se modulacija talasne dužine optičkog izvora [83], ili modulisanje Bragove rešetke na prijemu [84] ili dužine sprezanja WDM račve [85]. Informacija o Bragovoj talasnoj dužini se dobija poređenjem faze detektovanog talasa (generisanog električnog nosioca) sa fazom modulišućeg

električnog signala. Prednosti ove metode su imunost na fluktuacije optičke snage u sistemu i nezavisnost od spektralne karakteristike izvora, pošto je zasnovana na principu merenja faze.

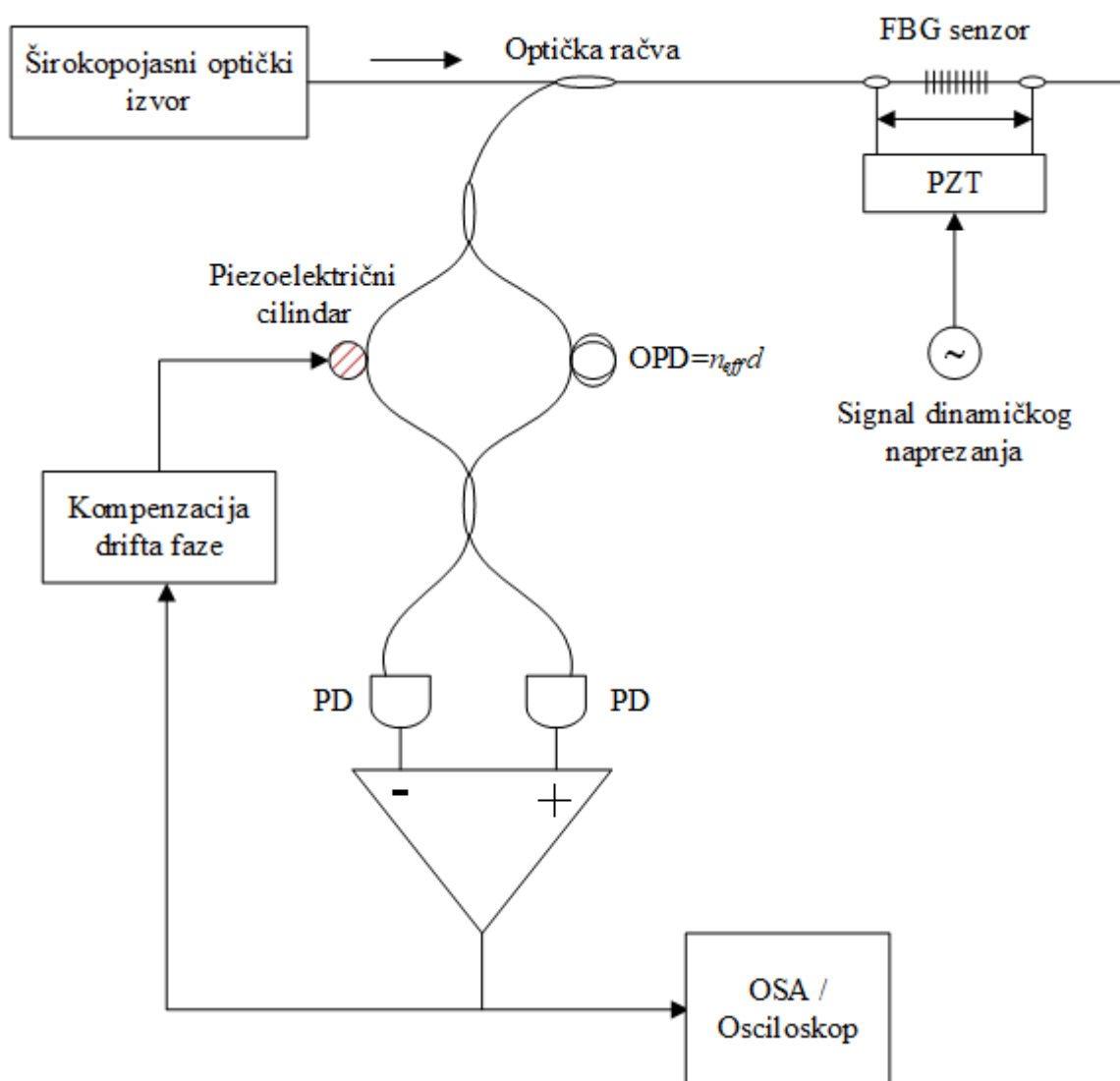
3.2.5 Interferometrijski senzori

Ispitivanje talasne dužine svetlosti na principu interferometrije predstavlja interesantan koncept koji omogućava visoku osetljivost očitavanja pomeraja talasne dužine. Postoje različite konfiguracije interferometrijskih senzora za ispitivanje talasne dužine svetlosti, gde je interferometar postavljen odmah iza optičkog izvora [86] ili na prijemnoj strani, pre fotodetektora [87]. Koriste se i različiti tipovi interferometara, najčešće Mah-Zenderov i Majkelsonov.

Osnovna ideja na kojoj su zasnovani interferometrijski senzori je da se FBG ponaša kao veštački optički izvor koji emituje svetlost na interferometar, i koji ima centralnu talasnu dužinu λ_B i spektralnu širinu $\delta\lambda$. Stoga je faza interferometra funkcija λ_B i preko veze $\Delta\lambda_B \rightarrow \Delta\Phi \rightarrow \Delta P_{out}$, gde P_{out} predstavlja optičku snagu na izlazu interferometra, dobija se naponski signal koji je proporcionalan $\Delta\lambda_B$ nakon izvršene odgovarajuće obrade signala. Osetljivost očitavanja je proporcionalna razlici optičkih puteva interferometra (OPD, eng. *optical path difference*), koju međutim gore ograničava koherentna dužina L_c veštačkog FBG optičkog izvora.

Mah-Zenderov interferometar

Sistem za ispitivanje talasne dužine svetlosti na osnovu asimetričnog (eng. *unbalanced*) Mah-Zenderovog interferometra (MZI, eng. *Mach-Zehnder interferometer*) omogućava merenja veoma visoke rezolucije. Korišćenjem asimetričnog MZI-a, promena Bragove talasne dužine fiber-optičkog senzora sa rešetkom se konvertuje u promenu faze signala nastalog usled interferencije. Kao što je prikazano na slici 3.8 [87], dve grane fiber-optičkog Mah-Zenderovog interferometra imaju različite dužine.



Slika 3.8 Sistem za ispitivanje talasne dužine svetlosti na osnovu asimetričnog Mah-Zenderovog interferometra (osnovna struktura) [87]

Ako je razlika fizičkih dužina dve grane d , razlika dužina optičkih puteva (OPD) je $n_{eff}d$, gde je n_{eff} efektivni indeks prelamanja jezgra vlakna. Ovo proizilazi iz činjenice da je unutar optičkog vlakna talasna dužina manja u odnosu na prostiranje kroz vazduh za faktor $1/n_{eff}$. Iz tog razloga, razlika efektivnih dužina koju svetlost „oseća“ je n_{eff} puta razlika fizičkih dužina. Ako je OPD manja od dužine koherencije svetlosti koju reflektuje FBG, dolazi do interferencije signala, odnosno intenzitet svetlosti na fotodetektoru na slici je dat kao

$$I = I_0 \left[1 + a \cos \left(2\pi \frac{n_{eff} d}{\lambda} \right) \right], \quad (3.2)$$

gde je I_0 konstanta, a se odnosi na vremensku koherentnost svetlosti koju reflektuje FBG, a λ je talasna dužina svetlosti u slobodnom prostoru. Ako se Bragova talasna dužina promeni usled

delovanja merne veličine na FBG senzor, onda se promeni faza u jednačini, pa se analiziranjem promene faze može dobiti informacija o merenoj veličini. Kod sistema sa MZI-om u kojima se koriste širokopojasni izvori kao što su ELED-e, superluminescentne diode ili EDFA ASE, nivo signala na fotodetektoru je veoma nizak zbog male spektralne gustine snage svetlosnih izvora. Primenom tehnike detekcije kao na slici 3.8, SNR se može znatno poboljšati. Na 3-dB optičkoj račvi koja se nalazi ispred fotodetektora na slici, kod svetlosnih zraka koji prolaze kroz račvu dolazi do promene faze za 90° . Prema tome, postoji relativna fazna razlika od 180° između dva signala na fotodetektorima. Oduzimanjem jednog signala od drugog, nivo signala se duplira, a šumovi koji ne zavise od faze se poništavaju.

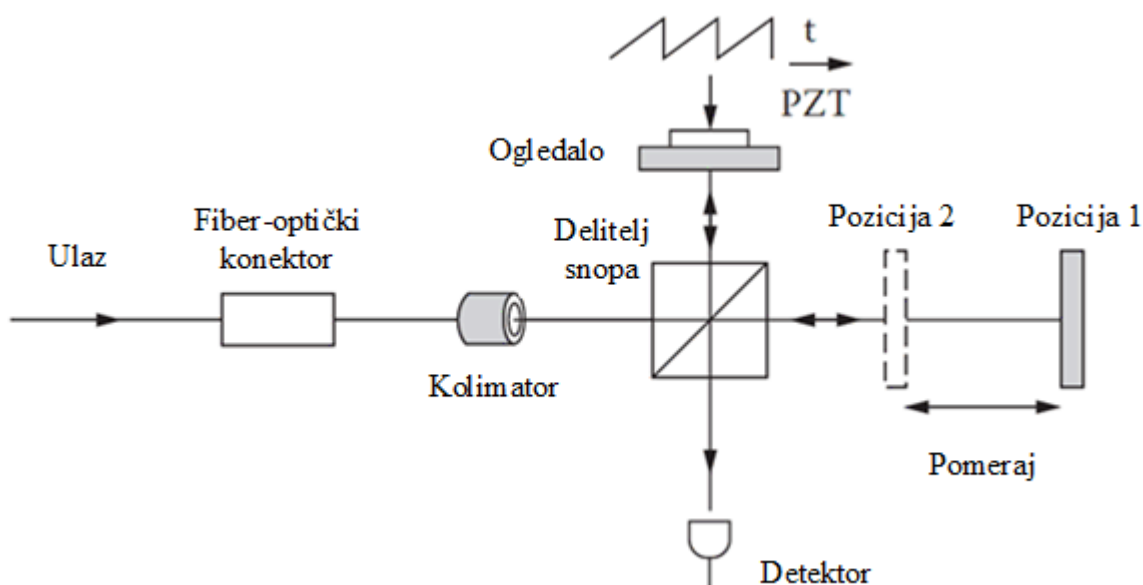
Značajna prednost korišćenja Mah-Zenderovog interferometra u odnosu na optičke filtre koji rade na principu linearne zavisnosti od talasne dužine je lako podešavanje i prilagođavanje funkcije filtra. Kontrolisanjem razlike dužina puteva d , možemo lako da povećamo ili smanjimo osetljivost sistema. Međutim, što je veća razlika dužina puteva, interferentni signal postaje manji zbog niske koherentnosti svetlosti reflektovane od FBG (parametar a se smanjuje sa odstupanjem d od 0). Dakle, maksimalna osetljivost je povezana sa razlikom optičkih puteva interferometra i koherentnošću reflektovane svetlosti (koja je inverzno proporcionalna širini opsega signala reflektovanog od FBG). Uslov za maksimalnu osetljivost je izračunat u [88] kao

$$n_{eff} d\Delta k = 2.355, \quad (3.3)$$

gde je $n_{eff}d$ OPD, a Δk je širina spektra signala reflektovanog od FBG izražena preko talasnog broja ($k=2\pi/\lambda$).

Majkelsonov interferometar

Na slici 3.9 je prikazana šema sistema za ispitivanje talasne dužine svetlosti na osnovu Majkelsonovog interferometra [89]. Rezolucija sistema na osnovu Majkelsonovog interferometra je proporcionalna razlici dužina optičkih puteva između dve grane interferometra, dok je merni opseg FSR (eng. *free spectral range*, slobodan spektralni opseg) inverzno proporcionalan OPD. Kretanje jednog ogledala se moduliše pomoću piezoelektričnog pretvarača (PZT, eng. *piezo-electric transducer*) sa testerastim signalom. Drugo ogledalo se može postaviti u dve pozicije, kao što je prikazano na slici 3.9. Za položaj ogledala u Poziciji 1, rezolucija je visoka, jer je velika razlika dužine optičkih puteva između dve grane, dok je FSR uzak. Kada se ogledalo postavi u Poziciju 2, rezolucija je niska, dok je FSR širok. Dakle, Majkelsonov interferometar sa dve šupljine (sa pokretnim ogledalom) može da iskoristi prednosti oba slučaja: visoku rezoluciju i širok FSR.



Slika 3.9 Šematski dijagram sistema za ispitivanje talasne dužine na osnovu Majkelsonovog interferometra sa pokretnim ogledalom [89]

Ispitivanje talasne dužine koje se zasniva na interferometrima može da omogući veoma visoku osetljivost merenja pomeraja talasne dužine. Stoga, kada je cilj da se maksimalno poveća merna rezolucija, naročito kada je u pitanju merenje dinamičkih parametara, obično su izbor upravo interferometrijski senzori. Međutim, negativna strana je smanjenje mernog opsega, kao i povećana cena i kompleksnost.

Glavna prednost odabira aktivnih šema u odnosu na pasivne je postizanje više rezolucije (lako se postiže rezolucija reda pm za statička merenja), međutim ovakvi sistemi su obično dosta kompleksni i imaju nisku brzinu odziva usled korišćenja pokretnih delova. Kod pasivnih metoda postoji problem postizanja dovoljno velike širine mernog opsega po cenu smanjene rezolucije merenja, i obrnuto. Međutim pasivne šeme su obično dosta jeftinije, jednostavnije i omogućavaju veću brzinu odziva u poređenju sa aktivnim.

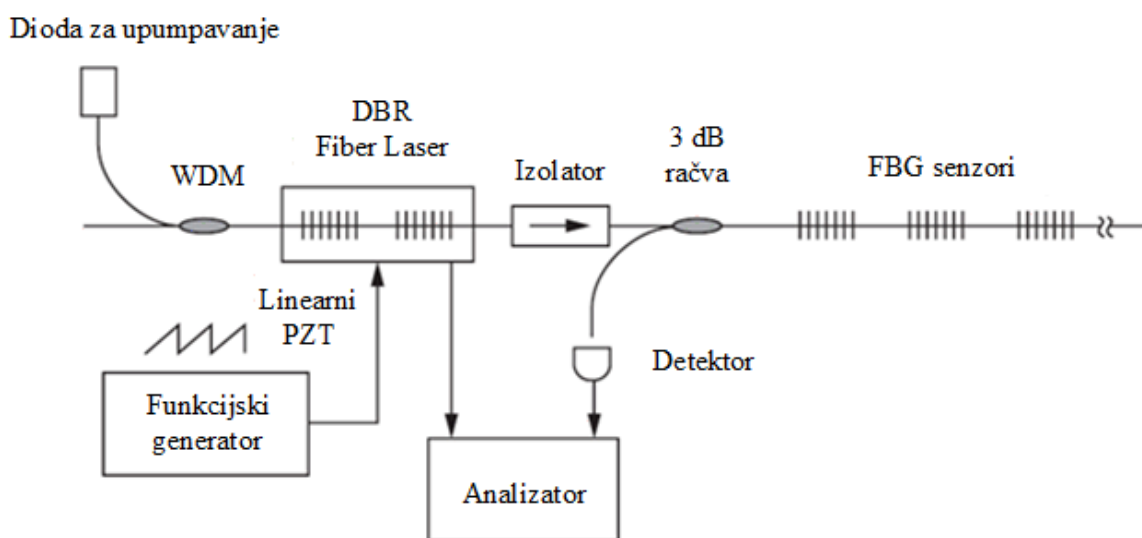
Pored konvencionalnih optičkih uređaja, pasivnih i aktivnih metoda, postoje i brojne druge metode za ispitivanje talasne dužine svetlosti. Jedna od najznačajnijih je svakako metoda zasnovana na korišćenju optičkih izvora sa podesivom talasnom dužinom, koja će u daljem tekstu biti ukratko opisana.

3.3 Korišćenje optičkih izvora sa podesivom talasnom dužinom

Prilikom ispitivanja niza multipleksiranih FBG senzora, obično se koristi širokopoljasni optički izvor i odgovarajući filtri za merenje pomeraja Bragovih talasnih dužina u svetlosnom signalu reflektovanom od niza FBG senzora. Širokopoljasni izvori obično emituju svetlost male snage, a nakon refleksije od FBG senzora snage svetlosti na prijemu su značajno smanjene. Niske snage dovode do niske vrednosti odnosa signal-šum (SNR), što smanjuje pouzdanost ispitivanja talasne dužine svetlosti.

Kako bi se povećao SNR, predložene su metode za ispitivanje talasne dužine koje koriste optičke izvore visoke snage sa podesivom talasnom dužinom i uskom spektralnom linijom [90] [91] [92]. Ako se svetlost iz ovakvog izvora poznate talasne dužine ubaci u FBG senzor i ako detektor detektuje optičku snagu reflektovanu od FBG, znači da se talasne dužine izvora i FBG senzora poklapaju ($\lambda_B = \lambda_i$). Prema tome, podešavanjem talasne dužine laserskog izvora može se izmeriti promena Bragove talasne dužine FBG senzora, u spektralnom opsegu od interesa. Podesivi laseri na bazi optičkog vlakna i podesivi poluprovodnički laseri se već koriste u ove svrhe.

Na slici 3.10 je prikazana šema metode za ispitivanje talasne dužine svetlosti niza 3 FBG senzora temperature na osnovu EDF lasera sa podesivom talasnom dužinom [91]. Kod ovog lasera talasna dužina se podešava promenom dužine šupljine (optičkog vlakna) korišćenjem piezoelektričnog pretvarača (PZT). Rezolucija sistema sa slike 3.10 iznosi približno 2.3 pm, odnosno 2 °C.



Slika 3.10 Šema metode ispitivanja talasne dužine svetlosti na osnovu optičkog izvora sa podesivom talasnom dužinom (WDM označava WDM multiplekser, a DBR distribuirani Bragov reflektor) [91]

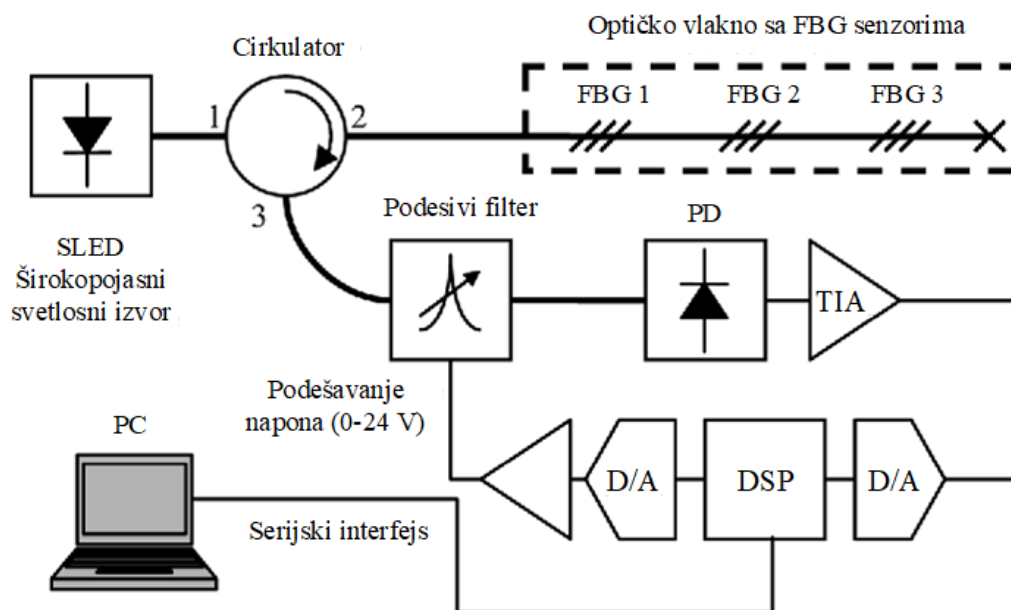
Prethodno predstavljene metode ispitivanja talasne dužine svetlosti su nastale kao rezultat istraživanja i razvoja nekoliko istraživačkih grupa. Kao takve, nisu sve ove metode u praktičnoj upotrebi, odnosno samo nekoliko metoda je ispunilo stroge zahteve neophodne za njihovu uspešnu komercijalizaciju. Savremeni komercijalni senzori se zasnivaju na nekom od sledećih pet sistema za ispitivanje talasne dužine svetlosti:

- Podesivi laser na bazi optičkog vlakna (aktivna metoda),
- Spektrometar u kombinaciji sa vremenskim multipleksiranjem TDM (konvencionalna metoda),
- Širokopolasni optički izvor u kombinaciji sa Fabri-Peroovim podesivim filtrom (aktivna metoda),
- Spektrometar visoke rezolucije (konvencionalna metoda),
- Optičko filtriranje u kombinaciji sa gustim multipleksiranjem po talasnim dužinama DWDM (pasivna metoda).

4 STANJE U OBLASTI ISTRAŽIVANJA I UPOREDNA ANALIZA

Tradicionalno korišćeni senzori za detekciju talasne dužine svetlosti su spektrometri čiji rad se zasniva na principu interferencije ili na disperzivnim svojstvima rešetke ili prizme. Senzori koji rade na principu interferencije postižu visoku rezoluciju merenja, međutim usled mehaničkog pomeranja pokretnog dela njihova brzina odziva je veoma niska. Mana ovih senzorskih konfiguracija je i to što su najčešće dosta kompleksne i skupe. S druge strane, spektrometri na bazi disperzije su zavisni od pravca upadne svetlosti i zahtevaju veliki broj fotodetektora (niza ili matrica fotodetektora) za merenje talasne dužine. Postoje pokušaji da se smanji cena senzorskih sistema na osnovu interferometara, kao što je senzorski sistem za ispitivanje talasne dužine svetlosti na osnovu Fabri-Peroovog interferometra sa mikrošupljinom, izrađenog pomoću optičkog vlakna recikliranog korišćenjem specijalnog procesa (eng. *catastrophic fuse effect*) [93] [94]. Takođe, neke istraživačke grupe pokušavaju da prebrode problem niske brzine odziva kod interferometrijskih spektrometara, kao što je FBG interogator na bazi interferencije za merenje apsolutnih talasnih dužina niza multipleksiranih senzora naprezanja [95].

Za ispitivanje talasne dužine često se koriste metode zasnovane na Fabri-Peroovim (eng. *Fabry-Perot*) podesivim filterima. Princip rada sistema opisanog u [96] (prikazan na slici 4.1) za ispitivanje multipleksiranih senzora sa Bragovom rešetkom se zasniva na podesivom Fabri-Peroovom filteru izrađenom u MEMS tehnologiji, kod koga se promena talasne dužine usled primenjenog naprezanja može detektovati korišćenjem korelacionog algoritma implementiranog na DSP-u. Senzorski sistem visoke rezolucije koji se zasniva na fiber-optičkom Fabri-Peroovom podesivom filtru i Fabri-Peroovom ITU filtru je predstavljen u [97]. Kompaktan i jeftin senzor talasne dužine opisan u [98] sadrži zakrivljen Fabri-Peroov sloj koji ima bočno promenljivu transmisiju i niz fotodioda (PDA, eng. *photodiode array*) ili poziciono osetljivi detektor (PSD, eng. *position sensing device*), i radi na principu pretvaranja talasne dužine u prostornu raspodelu intenziteta koja se dalje analizira pomoću PDA ili PSD. Zanimljivo rešenje predstavlja i holografski filter od mekog materijala (tzv. POLICRYPS filter) [99] za ispitivanje talasne dužine FBG senzora.

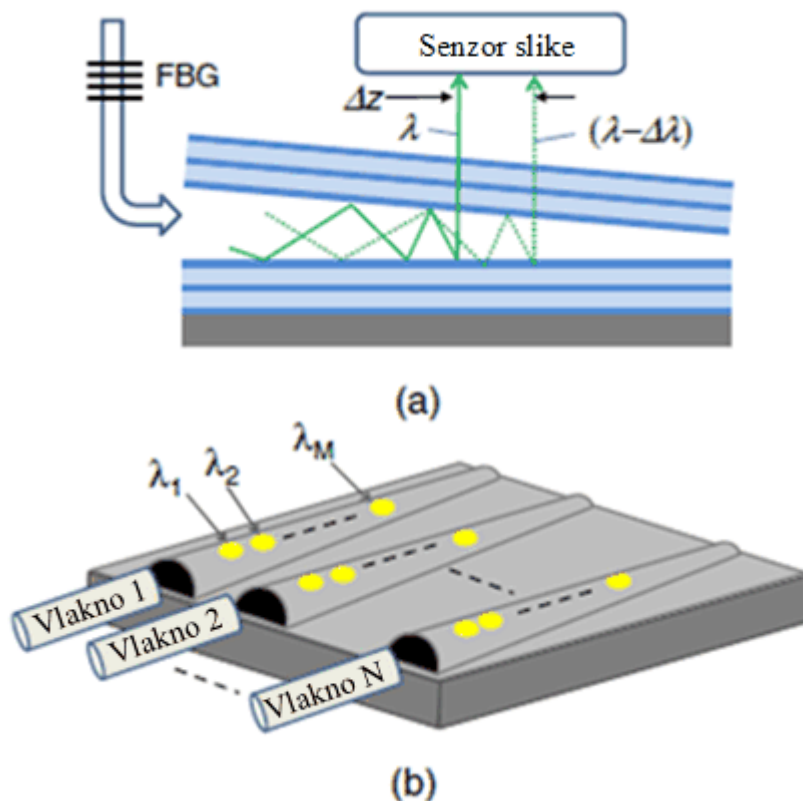


Slika 4.1 Blok dijagram interogatora na bazi MEMS FP filtra opisanog u [96]

Deo istraživanja je orijentisan ka sensorima u potpunosti izrađenim od optičkih vlakana (tzv. *all-fiber* senzori), kao što su jeftina tehnika merenja talasne dužine na osnovu makrosavijanja monomodnog vlakna sa rezolucijom od 10 pm u okviru opsega 1500-1560 nm [100]. Drugi primer je senzor za detekciju talasne dužine svetlosti korišćenjem koncepta merenja zasnovanog na merenju odnosa (eng. *ratiometric*) snaga baziran na monomodno-multimodno-monomodnom vlaknu sa rezolucijom od 10 pm duž spektralnog opsega 1530-1560 nm [101]. Značajnu grupu u okviru tzv. *all-fiber* senzora za detekciju talasne dužine svetlosti čine senzori na osnovu optičkih vlakana sa Bragovom rešetkom [102] [103] [104]. Princip rada dela ovih senzora se zasniva na očitavanju poklapanja (eng. *matching*) spektara senzorske FBG i prijemne FBG, a šeme mogu biti pasivne [103] ili aktivne [104].

Savremena rešenja za praćenje malih promena talasne dužine svetlosti najčešće podrazumevaju pasivne integrisane senzore, koji mogu da detektuju talasnu dužinu na principu savijanja optičkog vlakna [105], direkcione optičke račve [106], specijalnih suženih šupljih Bragovih talasovoda [107] (slika 4.2), podesivog termo-optičkog filtera [108], itd. Poseban značaj među integrisanim sensorima za praćenje talasne dužine svetlosti imaju senzori koji se zasnivaju na AWG rešetki [109] [110] [111]. Postoji više primera pasivnih integrisanih senzora na osnovu interferometara, kao što je senzor talasne dužine svetlosti opisan u [112] na osnovu dva Mah-Zenderova interferometra koji vrše funkciju ivičnih filtera ili senzor predstavljen u [113] na osnovu Y-grane i dva multimodna (MMI) interferometra. U [114] predstavljen je integrisani senzorski sistem koji kombinuje MZI i AWG za ispitivanje većeg broja FBG senzora. Druga interesantna grupa integrisanih senzora talasne dužine svetlosti podrazumeva

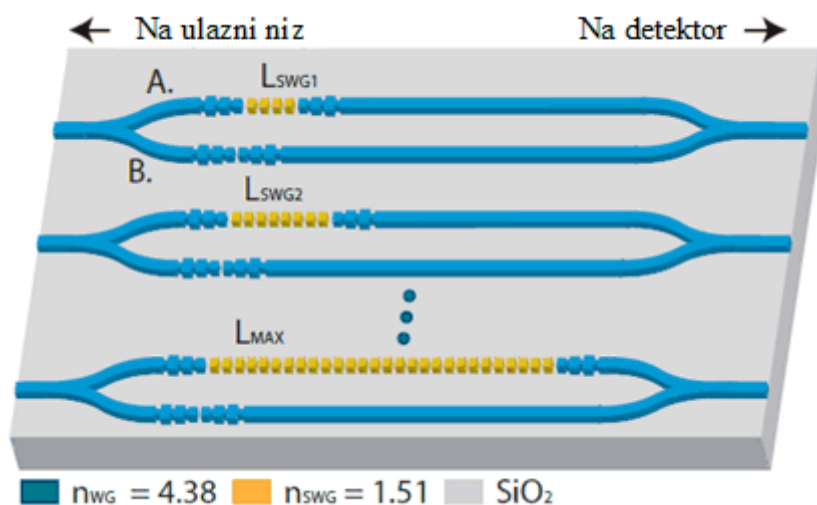
senzore koji se zasnivaju na korišćenju optičkih filtara sa mikro-prstenastim rezonatorom (eng. *microring resonator*) [115] [116] [117] [118]. U pitanju su aktivne šeme kod kojih se detekcija pomeraja talasne dužine svetlosti vrši očitavanjem vršne vrednosti (eng. *peak*) optičkog signala na izlazu sistema skeniranjem rezonantne talasne dužine filtara sa mikroprstenastim rezonatorom (rezonatorima).



Slika 4.2 a) Šematski prikaz interogatora predloženog u [107], b) Šema za ispitivanja niza ($M \times N$) FBG senzora

Interesantan primer integriranih pasivnih senzora talasne dužine predstavljaju spektrometri na osnovu talasovoda sa pod-talasnom rešetkom (eng. *subwavelength grating waveguide*). Na slici 4.3 prikazan je spektrometar na osnovu planarnih talasovoda sa pod-talasnim rešetkama [119]. Ovaj spektrometar sadrži 32 asimetrična Mah-Zenderova interferometra, pri čemu se svaki MZI sastoji od grane koja unosi kašnjenje (grana A) i referentne grane (grana B), kao što se vidi na slici 4.3. Grana koja unosi kašnjenje sadrži par pod-talasnih konvertora modova i pod-talasnju rešetku dužine L_{SWG} . Pod-talasna rešetka (SWG, eng. *subwavelength grating*) predstavlja rešetku kod koje je perioda rešetke manja od talasne dužine svetlosti koja se kroz nju prostire. Dužina SWG prvog interferometra iznosi L_{SWG1} , SWG drugog interferometra $L_{SWG2}=2L_{SWG1}$, trećeg $L_{SWG3}=3L_{SWG1}$ itd. Referentna grana sadrži identične konvertore modova i ima fiksnu dužinu 1.5 cm. Ono što je specifično kod ovog tipa interferometra je da se razlika

optičkih puteva (kašnjenje optičkih puteva) ne postiže uvođenjem razlike geometrijskih putanja, već podešavanjem promene konstante propagacije β (odnosno tzv. inženjeringom indeksa prelamanja) između dve grane interferometra. Vrednost β se može podešavati upravljanjem periodom i faktorom ispunje pod-talasne rešetke. Ovakav spektrometar nudi mernu rezoluciju oko 50 pm u okviru mernog opsega od 0.78 nm [119] [120]. Glavne prednosti spektrometara na osnovu pod-talasne rešetke u odnosu na komercijalno dostupne spektrometre su mnogo manje dimenzije (oko 10^6 puta manje) i kraće dužine putanja (10 puta manje).



Slika 4.3 Spektrometar na osnovu planarnog talasovoda sa pod-talasnom rešetkom [119]

Imajući u vidu spektralnu osetljivost fotodioda, one se takođe mogu koristiti za praćenje talasne dužine, pored njihove uobičajene primene kao detektora snage svetlosti u drugim sistemima za ispitivanje talasne dužine [98]. Senzor talasne dužine monohromatskog izvora svetlosti koji se zasniva na različitim spektralnim osetljivostima Si i InGaAs fotodioda sa širokim mernim opsegom 500-1200 nm i temperaturnom kompenzacijom je opisan u [23]. Još jedno rešenje sa fotodiodama predstavlja visoko precizni senzor talasne dužine na bazi dvoslojne fotodiode, koja sadrži dve fotodiode različitih spektralnih karakteristika koje su postavljene kao dva sloja na istom supstratu [121].

Senzorski sistemi na osnovu podešavanja talasne dužine optičkog izvora takođe predstavljaju aktuelna rešenja za ispitivanje talasne dužine svetlosti. Senzorski sistem koji se zasniva na podešavanju talasne dužine DFB diode i malom broju optoelektronskih komponenti koje se obično koriste u telekomunikacijama (fiber-optička račva, detektor sa transimpedansnim pojačavačem, DSP i druge) je opisan u [122]. U [123] je predstavljen linearizovani senzorski sistem za ispitivanje talasne dužine svetlosti na osnovu fiber-optičkog lasera sa podesivom talasnom dužinom sa aktivnom sinhronizacijom modova (eng. *active mode*

locking). Interesantan sistem na osnovu lasera sa podešivom talasnom dužinom koji kombinuje Ramanovo, Brilljuonovo i pojačanje usled korišćenja erbijumom dopiranog optičkog vlakna za udaljeno ispitivanje FBG senzora je dat u [124]. Senzorski sistem sa visokom učestanošću odabiranja za ispitivanje talasne dužine svetlosti koji se zasniva na monolitskoj laserskoj diodi sa širokim opsegom podešavanja talasne dužine korišćenjem elektrooptičkog efekta opisan je u [125].

U Tabeli 2 je dato poređenje karakteristika nekoliko novijih aktivnih i pasivnih šema za merenje talasne dužine.

Tabela 2 Poređenje karakteristika savremenih senzora za merenje malih promena talasne dužine

Senzor	Ref.	Cena	Brzina	Rezolucija	Radni opseg	Kompleksnost konfiguracije	Tip
FP filter	[96]	visoka	niska	2.4 pm	70 nm	kompleksna	aktivni
	[97]	visoka	srednja	< 2 pm	< 1 nm	kompleksna	aktivni
Senzori na principu poklapanja reflektovanih spektara vlakana sa Bragovom rešetkom	[103]	niska	visoka	0.3 pm	< 1 nm	kompleksna	pasivni
Integrirani senzori	[106]	niska	visoka	< 50 pm	100 nm	jednostavna	pasivni
	[107]	visoka	niska	10 pm	100 nm	kompleksna	pasivni
	[115]	niska	visoka	5 pm	1.2 nm	jednostavna	pasivni
	[110]	srednja	niska	0.32 pm	10 nm	srednja	pasivni
Senzori na principu spektralne osetljivosti fotioda	[121]	niska	niska	< 10 pm	1 nm	jednostavna	pasivni

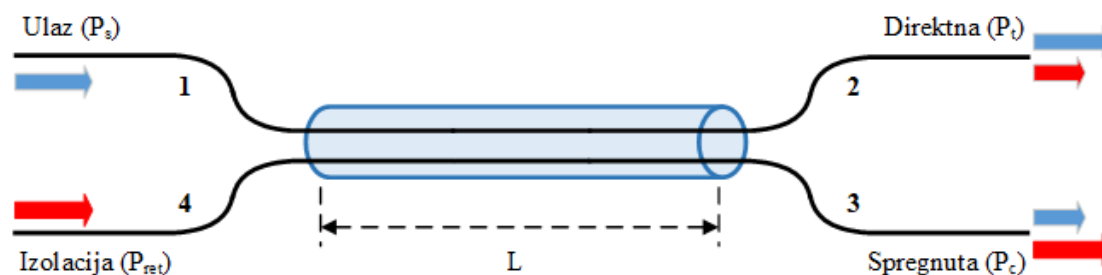
5 SPEKTRALNO OSETLJIVE OPTIČKE KOMPONENTE

5.1 Fiber-optička račva

Optičke račve predstavljaju pasivne komponente koje se koriste za razdvajanje ili kombinovanje dva ili više svetlosnih snopova. Razlikujemo integrisane i fiber-optičke račve. Direkzione fiber-optičke račve se proizvode spajanjem dva paralelna optička vlakna. Kada se jezgra dva optička vlakna nađu dovoljno blizu, njihovi modovi prostiranja počinju da se preklapaju. Kao rezultat, optička snaga može da se periodično prenosi između dva vlakna.

Proces proizvodnje podrazumeva da se dva paralelna optička vlakna prvo međusobno uvrnu, zagreju, a zatim rastegnu i spoje, tako da su njihova jezgra postavljena veoma blizu. Na ovaj način se formira tzv. oblast sprezanja (eng. *coupling region*). Dužina oblasti sprezanja L određuje odnos sprezanja snaga svetlosti iz jednog u drugo vlakno. Tokom procesa proizvodnje, svetlost se ubaci kroz ulaznu granu, a izlazne optičke snage na svakoj od izlaznih grana račve se pažljivo prate. Kada se postigne željeni odnos sprezanja, potpuno automatizovani proces proizvodnje se zaustavlja. Dobijena fiber-optička račva predstavlja u suštini jedno vlakno sa dva jezgra koja su postavljena veoma blizu jedan drugom. Ovaj proces je poznat kao FBT proces (eng. *fused biconical taper*).

Kada se govori o optičkim račvama, potrebno je skrenuti pažnju na broj ulaznih i izlaznih grana (portova) račve. Na primer, komponenta sa dva ulaza i dva izlaza se naziva 2×2 optička račva (takođe se naziva i X račva). Uopšteno, jedna $N \times M$ račva ima $N \geq 2$ ulaznih grana i $M \geq 2$ izlaznih grana. Na slici 5.1 je prikazana jedna direkciona 2×2 optička račva sa označenim nazivima ulaznih i izlaznih grana (signala) i dužinom oblasti sprezanja.



Slika 5.1 Direkciona 2×2 optička račva

Ključna karakteristika direkcionih (usmerenih) račvi je da se kod njih sprežu svetlosni zraci koji se prostiru u samo jednom smeru. U terminologiji direkcionih račvi ulaz 1 se naziva ulazna grana (eng. *input*), grana 2 direktna (eng. *through*) grana, grana 3 spregnuta grana (eng.

coupled), a grana 4 izolacija (eng. *isolation*). Međutim, bilo koja od grana optičke račve može biti ulazna sa različitim rasporedima direktne, spregnute i izlazne grane. U daljem tekstu su definisani parametri fiber-optičke račve.

Odnos sprezanja (eng. *coupling ratio*) je definisan kao odnos optičke snage na jednoj izlaznoj grani račve i ukupne sume snaga sa svih izlaznih grana račve i obično je dat u procentima

$$\alpha = \left(\frac{P_c}{P_t + P_c} \right) \times 100\% . \quad (5.1)$$

Tipične vrednosti odnosa sprezanja su 5:95, 10:90, 20:80, 30:70, 40:60 i 50:50. Kod optičkih račvi načinjenih od vlakana sa istom konstantom propagacije β i kod kojih se svetlost prostire duž z ose, snage u izlaznim granama optičke račve se mogu izraziti kao [126]

$$\begin{aligned} P_2(z) &= P_s \cdot \cos^2 \kappa z = P_s \cdot (1 - \sin^2 \kappa z) \\ P_3(z) &= P_s \cdot \sin^2 \kappa z \end{aligned} , \quad (5.2)$$

gde je κ koeficijent sprezanja i opisuje jačinu interakcije između dva optička vlakna koja čine račvu. κ zavisi od parametara optičkih vlakna, udaljenosti između jezgara vlakna, i takođe linearno zavisi od talasne dužine svetlosti koja se prostire kroz račvu. Na osnovu prethodne jednačine možemo zaključiti da postoji periodična razmena snage između optičkih vlakana koja čine optičku račvu.

Sprega (eng. *coupling*) može se izraziti u decibelima

$$C = 10 \log \frac{P_s}{P_c} [dB]. \quad (5.3)$$

Kod idealne fiber-optičke račve, ukupna izlazna snaga je jednaka ulaznoj snazi P_s , pa je $\alpha \approx P_c/P_s$. Kod realnih optičkih račvi uvek postoje gubici usled apsorpcije i rasejanja i oni čine višak gubitaka.

Višak gubitaka (eng. *excess loss*) je definisan kao odnos optičke snage ubačene u ulaznu granu optičke račve P_s i ukupne optičke snage izmerene na svim izlaznim granama

$$\eta = 10 \log \frac{P_s}{P_c + P_t} [dB]. \quad (5.4)$$

Sve snage u (5.3) su izražene u mW. Višak gubitaka se takođe može izraziti i kao

$$\eta = \frac{P_c + P_t}{P_s} . \quad (5.5)$$

Uneseno slabljenje (eng. *insertion loss*) predstavlja odnos optičke snage ubačene u ulaznu granu račve i optičke snage sa bilo koje izlazne grane i izraženi su u decibelima

$$T_c = 10 \log \frac{P_s}{P_c} [dB] \quad T_t = 10 \log \frac{P_s}{P_t} [dB], \quad (5.6)$$

a može se izraziti i kao

$$T_{c,t} = \frac{P_{c,t}}{P_s}. \quad (5.7)$$

Uneseno slabljenje uključuje i odnos sprezanja i višak gubitaka. Usled toga, uneseno slabljenje predstavlja najkorisniji parametar za projektovanje sistema

$$\begin{aligned} T_c &= \frac{P_c}{P_s} = \alpha \eta \\ T_t &= \frac{P_t}{P_s} = (1 - \alpha) \eta \end{aligned} \quad (5.8)$$

Izolacija (eng. *isolation*) predstavlja odnos upadne snage i snage koja se može izmeriti na drugoj ulaznoj grani (tzv. izolaciji)

$$I = 10 \log \frac{P_s}{P_{ret}} [dB]. \quad (5.9)$$

Ova veličina pokazuje koliko je zaista izolovana druga ulazna grana. U idealnom slučaju ova vrednost je beskonačna (tj. $P_{ret}=0$), tako da je u praksi poželjna što veća izolacija.

Usmerenost (eng. *directivity*) se odnosi na deo snage upadne svetlosti koja napušta račvu kroz drugu ulaznu granu P_{ret} umesto kroz neku od izlaznih grana. Može se izračunati u decibelima korišćenjem jednačine

$$D = 10 \log \frac{P_c}{P_{ret}} [dB]. \quad (5.10)$$

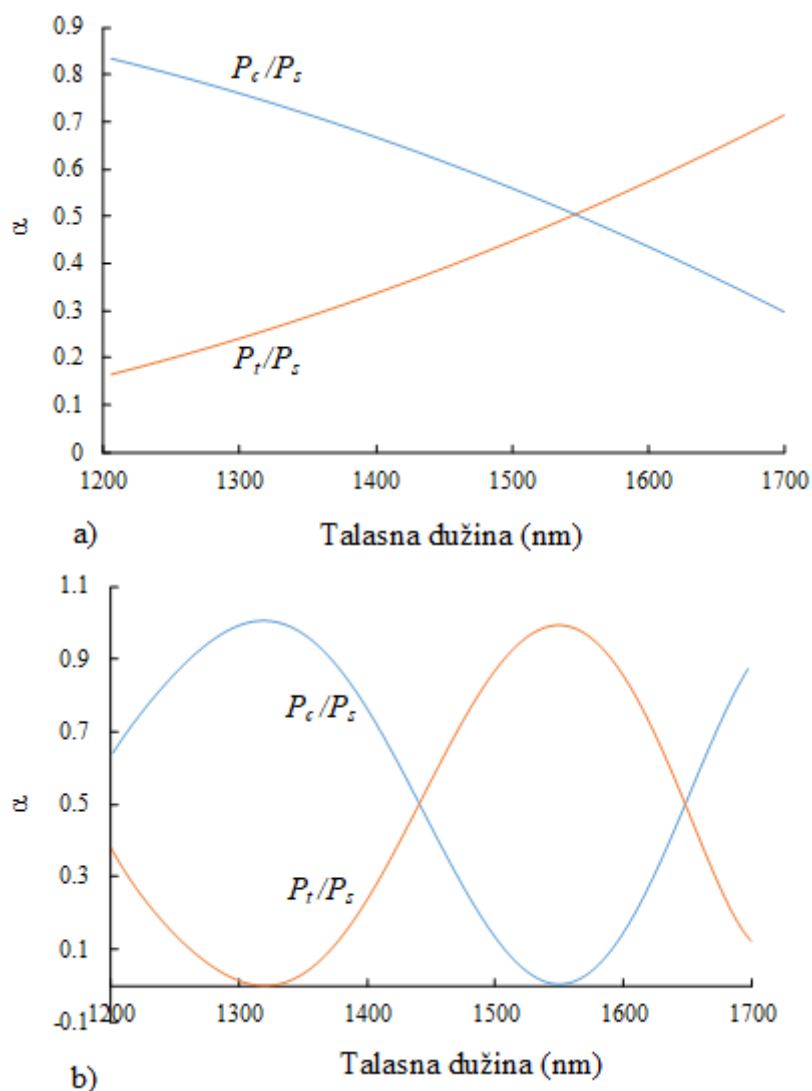
P_{ret} se javlja kao rezultat povratne refleksije na spoju grana račve. Vrednost usmerenosti pokazuje koliko je uređaj efikasan u usmeravanju spregnute snage u pravilnu granu (tj. u izlaznu granu, a ne u drugu ulaznu granu – izolaciju). U idealnom slučaju, usmerenost je beskonačna ($P_{ret}=0$), tako da je u praksi poželjna što veća usmerenost.

Izolacija, usmerenost i sprega su međusobno povezane pomoću sledeće relacije

$$I(dB) = C(dB) + D(dB). \quad (5.11)$$

Odnos sprezanja direkcionih suženih optičkih račvi α pokazuje jaku zavisnost od talasne dužine upadne svetlosti. Optička račva sa odnosom sprezanja 50:50 na 1300 nm, na 1520 nm može imati odnos sprezanja bilo gde između 80:20 i 99:1, u zavisnosti od toga da li su optička vlakna slabo ili jako spojena (eng. *fused*). Odnos sprezanja optičke račve pokazuje periodičnu (prostoperiodičnu) zavisnost od talasne dužine upadne svetlosti, sa periodom koja se smanjuje

kako dužina oblasti sprezanja raste [127] [128]. Kod optičkih račvi koje su napravljene od identičnih monomodnih optičkih vlakana, najveća promena odnosa sprezanja se dešava oko 3 dB tačke zbog sinusne zavisnosti [126]. Kako bi se smanjila zavisnost odnosa sprezanja od talasne dužine svetlosti postoje brojni pokušaji i tehnike da se proizvedu fiber-optičke račve sa „zaravnom“ spektralnom karakteristikom u širokom opsegu [129]. Uređaji koji se projektuju za rad u blizini minimuma ili maksimuma sinusne zavisnosti odnosa sprezanja snaga od talasne dužine imaju najmanju osetljivost. Na slici 5.2 je prikazana zavisnost odnosa sprezanja fiber-optičke račve od talasne dužine svetlosti i dužine oblasti sprezanja.



Slika 5.2 Zavisnost odnosa sprezanja fiber-optičke račve od talasne dužine svetlosti i dužine oblasti sprezanja a) $L=12.59$ mm b) $L=21.5$ mm [128]

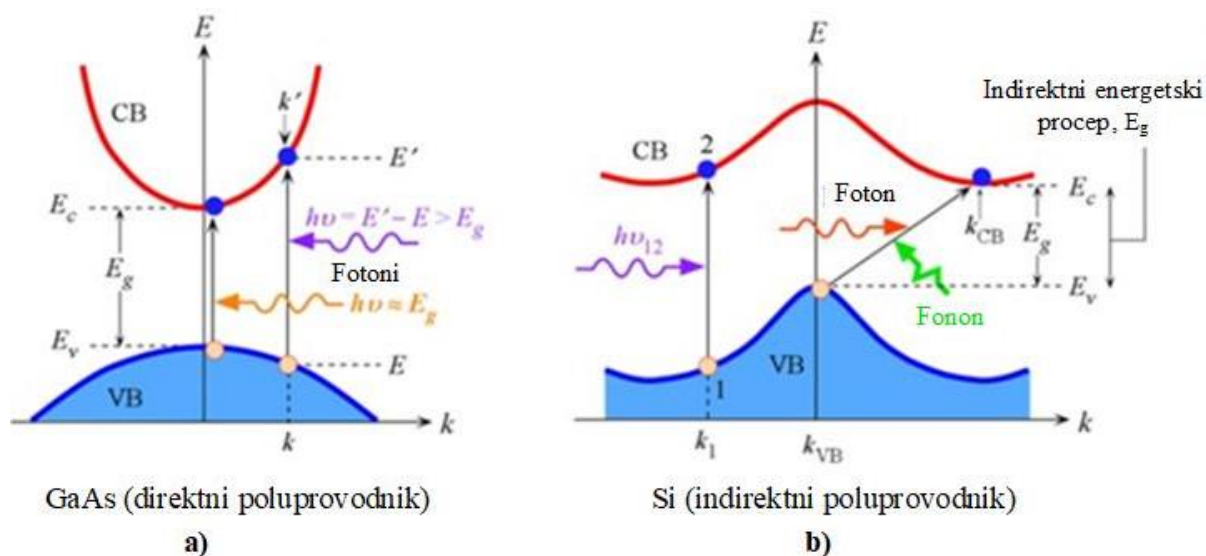
Najčešća primena fiber-optičkih i integrisanih račvi je za delitelje snage. Mogu da se koriste za podelu optičke snage sa jednog optičkog kanala (određene talasne dužine) između izlaznih

grana račve [130]. Fiber-optičke račve su ključne komponente u Majkelsonovom i Mah-Zenderovom interferometru sa optičkim vlaknima. Druga značajna primena podrazumeva kombinovanje ili razdvajanje snaga sa različitih kanala, koje odgovaraju različitim talasnim dužinama svetlosti, odnosno kao multiplekseri i demultiplekseri po talasnim dužinama (WDM, eng. *wavelength division multiplexing*) [131]. Takođe, fiber i integrisane optičke račve se kombinuju sa reflektivnim Bragovim rešetkama koje su upisane u oblasti sprezanja račve, kako bi se omogućilo selektivno dodavanje i izostavljanje (eng. *add-drop*) različitih kanala (talasnih dužina) u WDM sistemima [132] [133]. Veoma interesantna primena fiber i integrisanih optičkih račvi je kao senzora talasne dužine svetlosti, koji rade na principu zavisnosti odnosa sprezanja optičke račve od talasne dužine upadne svetlosti [65] [106]. Fiber-optičke račve se veoma često koriste kao deo sistema za merenje pomeraja talasne dužine FBG senzora, u smislu razdvajanja svetlosnih snopova i mogućnosti preciznijih merenja određenih veličina pomoću merenja snage svetlosti i u senzorskoj i u referentnoj grani. U ovu svrhu, često se umesto fiber-optičke račve koristi optički cirkulator. Optički cirkulator je pasivni uređaj sa više portova (tipično tri) koji prosleđuje svetlost sekvencijalno iz porta u port u samo jednom smeru. Cena cirkulatora u odnosu na fiber-optičku račvu je nešto viša, ali on ima brojne prednosti kao što su mali uneti gubici, dobra izolacija duž širokog opsega talasnih dužina, minimalni gubici usled polarizacije (PDL, eng. *Polarization Dependent Loss*), i druge.

5.2 Fotodiode

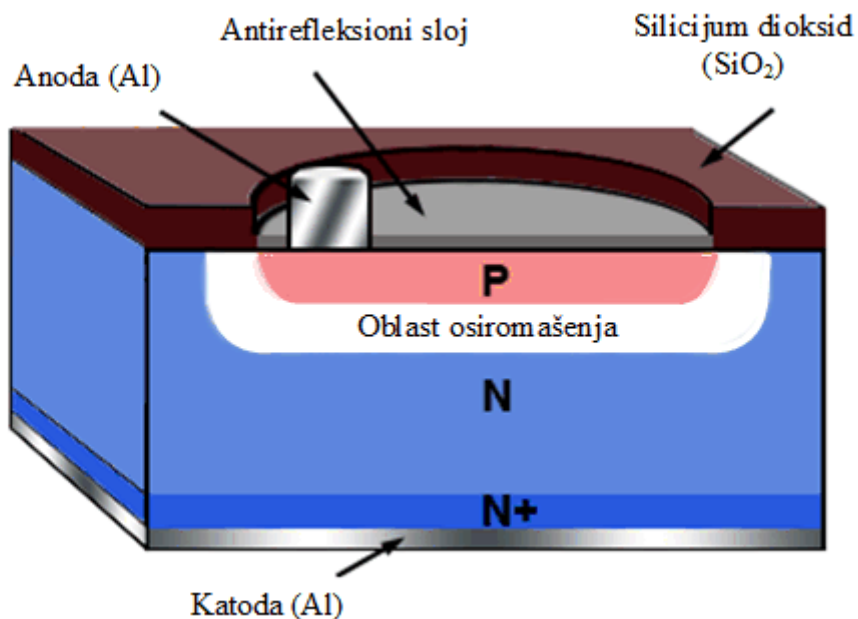
5.2.1 Princip rada

Princip rada fotodiode se zasniva na apsorpciji fotona u p-n spoju i stvaranju parova elektron-šupljina, odnosno na unutrašnjem fotoelektričnom efektu. Fotoni svetlosti koji imaju energiju veću od energetskog procepa poluprovodnika mogu biti apsorbovani i predati svoju energiju elektronu kako bi izvršio prelaz preko energetskog procepa u provodnu zonu. Mehanizmi apsorpcije su različiti kod direktnih i indirektnih poluprovodnika. Kod direktnih poluprovodnika (GaAs, InGaAs, GaP, InP, GaAsSb) vrh valentne zone se nalazi upravo ispod dna provodne zone, tako da prelaz elektrona iz valentne u provodnu zonu ne zahteva promenu u kristalnom momentu elektrona. Kod indirektnih poluprovodnika (silicijum Si, germanijum Ge) to nije slučaj, pošto je vrh valentne zone pomeren u odnosu na dno provodne zone. Za prelaz elektrona iz valentne u provodnu zonu zahteva se i promena kristalnog momenta, za koju je potrebna asistencija vibracija kristalne rešetke (fonona). Pošto je za interakciju fotona i valentnog elektrona potreban i efekat vibracije rešetke, verovatnoća apsorpcije fotona nije tako visoka kao kod direktnih prelaza. Na slici 5.3 je prikazana apsorpcija fotona kod direktnih i indirektnih poluprovodnika.



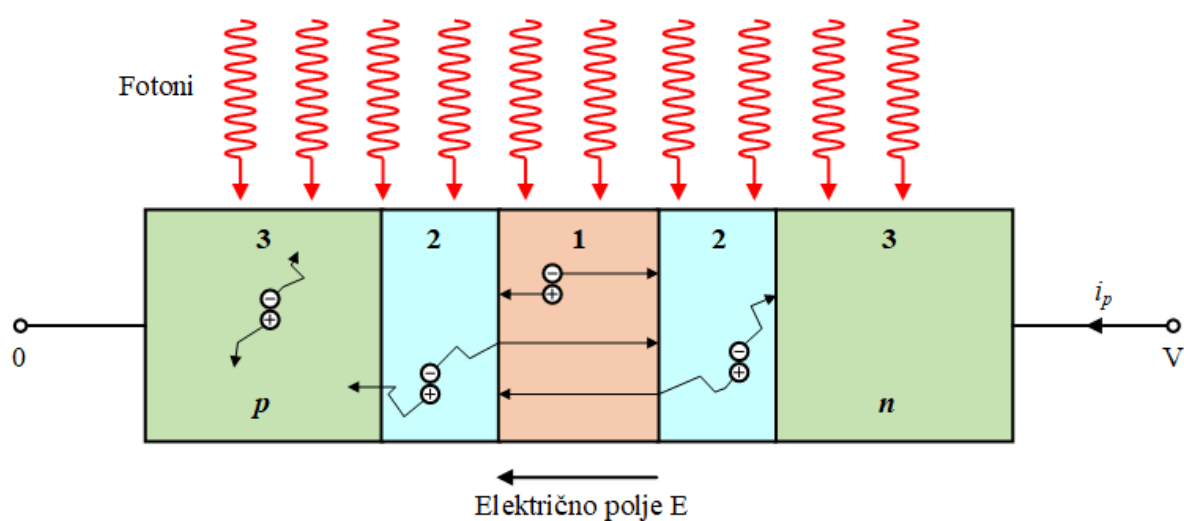
Slika 5.3 Apsorpcija fotona u a) direktnom b) indirektnom poluprovodniku (CB – provodna zona, VB – valentna zona) [134]

Fotodiode u osnovi predstavlja inverzno polarisan p-n spoj, čija inverzna struja raste kada apsorbira fotone. Na slici 5.4 je prikazan šematski dijagram inverzno polarizovane p-n fotodiode. U slučaju silicijumske p-n fotodiode, p-n spoj se može formirati bilo difuzijom primesa p-tipa, kao što je bor, u zapreminski (eng. *bulk*) silicijumski vafer n-tipa ili difuzijom primesa n-tipa, kao što je fosfor, u zapreminski silicijumski vafer p-tipa. Oblast u koju su difuzijom ubačene primese definiše aktivnu oblast fotodiode. Kontakti su postavljeni na prednju stranu aktivne oblasti na definisana područja i sa zadnje strane fotodiode, gde kontakt potpuno pokriva uređaj. Aktivna oblast je prekrivena antirefleksionim slojem kako bi se smanjila refleksija svetlosti. Delovi izvan aktivne oblasti na vrhu fotodiode su pokriveni debelim slojem silicijum-oksida. Kontrolisanjem debljine zapreminskog supstrata, može se kontrolisati brzina i osetljivost fotodiode.



Slika 5.4 Šematski dijagram inverzno polarizovane pn fotodiode [135]

Na slici 5.5 je prikazan proces apsorpcije fotona duž inverzno polarizovane p-n fotodiode [136]. Fotoni se apsorbuju duž cele fotodiode sa koeficijentom apsorpcije α . Prilikom apsorpcije fotona, generiše se par elektron-šupljina. Međutim, samo u oblastima gde postoji električno polje, može doći do transporta nosilaca naelektrisanja u određenom smeru. Pošto u p-n spoju električno polje postoji samo u oblasti osiromašenja, poželjno je da se upravo u ovoj oblasti generišu fotonosioči.



Slika 5.5 Apsorpcija fotona u inverzno polarizovanom p-n spoju [136]

Međutim, postoje 3 moguće oblasti gde može doći do generacije parova elektron-šupljina:

1. Elektroni i šupljine generisani u oblasti osiromašenja (na slici 5.5 označena sa 1) brzo driftuju u suprotnim smerovima pod uticajem jakog električnog polja. Pošto je električno polje uvek orijentisano od n ka p strani, elektroni se kreću ka n strani, a šupljine ka p strani. Kao rezultat, fotostruja generisana u spoljašnjem kolu je uvek inverzna (od n ka p oblasti). Svaki par nosilaca generiše u spoljašnjem polju impuls električne struje površine e , pošto nema rekombinacije u oblasti osiromašenja.
2. Parovi elektron-šupljina koji nisu generisani u oblasti osiromašenja, već u njenoj blizini (ove oblasti su na slici 5.5 označene sa 2), imaju šansu da uđu u oblast osiromašenja nasumičnom (prostom) difuzijom. Elektron koji dolazi sa p strane brzo se transportuje kroz spoj i tako doprinosi sa naelektrisanjem e spoljašnjem kolu. Sličan proces se dešava i za šupljine sa n strane.
3. Elektroni i šupljine koji su generisani daleko od oblasti osiromašenja (oblasti označene sa 3 na slici 5.5) ne mogu da se transportuju zbog odsustva električnog polja. Oni nasumično lutaju dok se ne rekombinuju. Ovi nosioci naelektrisanja ne doprinose fotostruji.

Difuzija nosilaca iz oblasti označenih sa 2 na slici 5.5 ka oblasti osiromašenja p-n fotodiode je relativno spor proces u poređenju sa procesom drifta u oblasti osiromašenja. Kako bi se povećala brzina odziva fotodiode, nastoji se da se proces apsorpcije fotona i generisanja parova elektron-šupljina odvija pretežno u oblasti osiromašenja.

5.2.2 Parametri fotodiode

Osetljivost (eng. *responsivity*) R_λ predstavlja meru osetljivosti na svetlost i definisana je kao odnos fotostruje I_p i upadne snage svetlosti na određenoj talasnoj dužini P

$$R_\lambda = \frac{I_p}{P}. \quad (5.12)$$

Drugim rečima, osetljivost predstavlja meru efikasnosti pretvaranja optičke snage u električnu struju. Osetljivost zavisi od talasne dužine upadne svetlosti, temperature i primenjenog inverznog napona. Zavisnost osetljivosti od talasne dužine proizilazi iz zavisnosti kvantne efikasnosti od talasne dužine.

Spektralni opseg (eng. *spectral range*) je određen talasnom dužinom iznad koje odziv fotonskog detektora počinje naglo da pada. Ova talasna dužina odgovara fotonu sa energijom jednakom energetskom procepu materijala

$$\lambda_g = \frac{1.239}{E_g}, \quad (5.13)$$

gde je λ_g granična talasna dužina (eng. *cut-off wavelength*) u μm , a E_g energetski procep u eV.

Kvantna efikasnost η (eng. *quantum efficiency*) ($0 \leq \eta \leq 1$) fotodiode je definisana kao verovatnoća da jedan upadni foton generiše par elektron-šupljina koji doprinosi fotostruji. Kvantna efikasnost je direktno proporcionalna osetljivosti fotodiode na osnovu formule

$$\eta = R_\lambda \frac{hc}{\lambda q} = 1240 \frac{R_\lambda}{\lambda}, \quad (5.14)$$

gde je $h = 6.63 \times 10^{-34} \text{ J s}$ Plankova konstanta, $c = 3 \times 10^8 \text{ m/s}$ brzina svetlosti u vakuumu, $q = 1.6 \times 10^{-19} \text{ C}$ naelektrisanje elektrona, R_λ predstavlja osetljivost izraženu u A/W, a λ je talasna dužina u nanometrima. Na osnovu jednačine (5.14), osetljivost se još može izraziti i kao

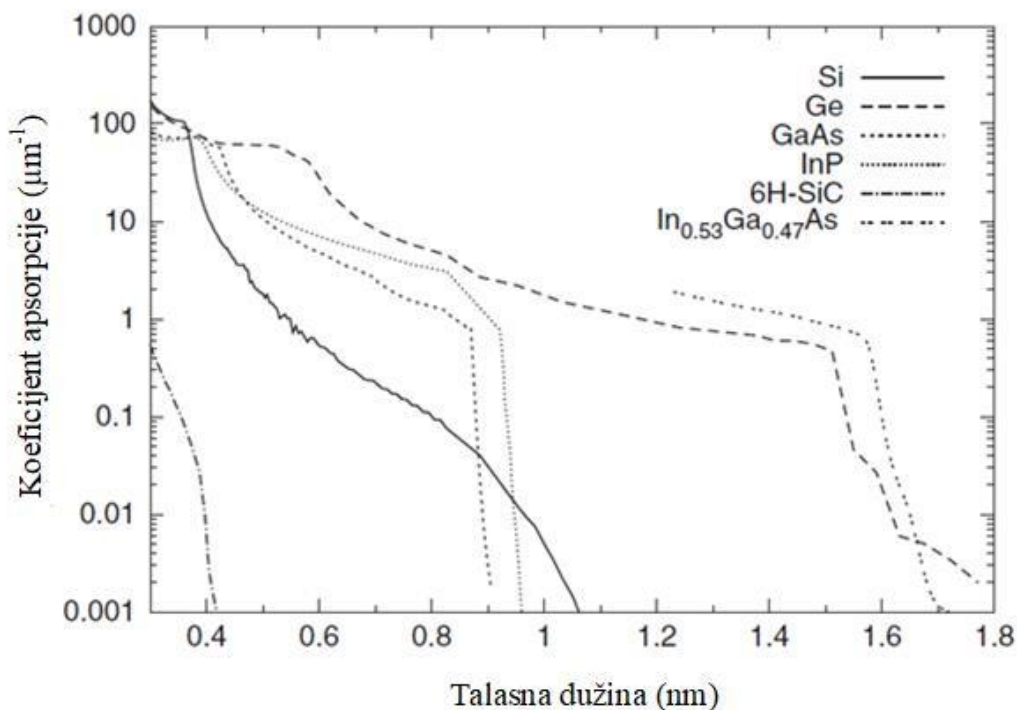
$$R_\lambda = \frac{\eta \lambda q}{hc} = \eta \frac{\lambda}{1240}. \quad (5.15)$$

Kvantna efikasnost se može definisati i na nešto drugačiji način prema sledećoj relaciji

$$\eta = (1 - R) \cdot e^{-\alpha_p w_p} \cdot (1 - e^{-\alpha w}), \quad (5.16)$$

gde je R deo optičke snage koji se reflektuje od površine p tipa poluprovodnika, α_p i w_p su koeficijent apsorpcije i širina p oblasti, α je koeficijent apsorpcije oblasti osiromašenja, dok je w širina oblasti osiromašenja. Iz (5.16) može se zaključiti da je u cilju postizanja što veće kvantne efikasnosti fotodiode, potrebno što više smanjiti refleksiju R i apsorpciju pre oblasti osiromašenja, a povećati apsorpciju u samoj oblasti osiromašenja. Ovo je moguće ostvariti smanjenjem širine p oblasti w_p , širokom oblašću osiromašenja w , kao i korišćenjem antirefleksionih slojeva na površini fotodiode.

Kvantna efikasnost zavisi od talasne dužine svetlosti, prvenstveno zbog zavisnosti koeficijenta apsorpcije α od talasne dužine. Na slici 5.6 je dat uporedni prikaz koeficijenata optičke apsorpcije za nekoliko važnih poluprovodničkih materijala.



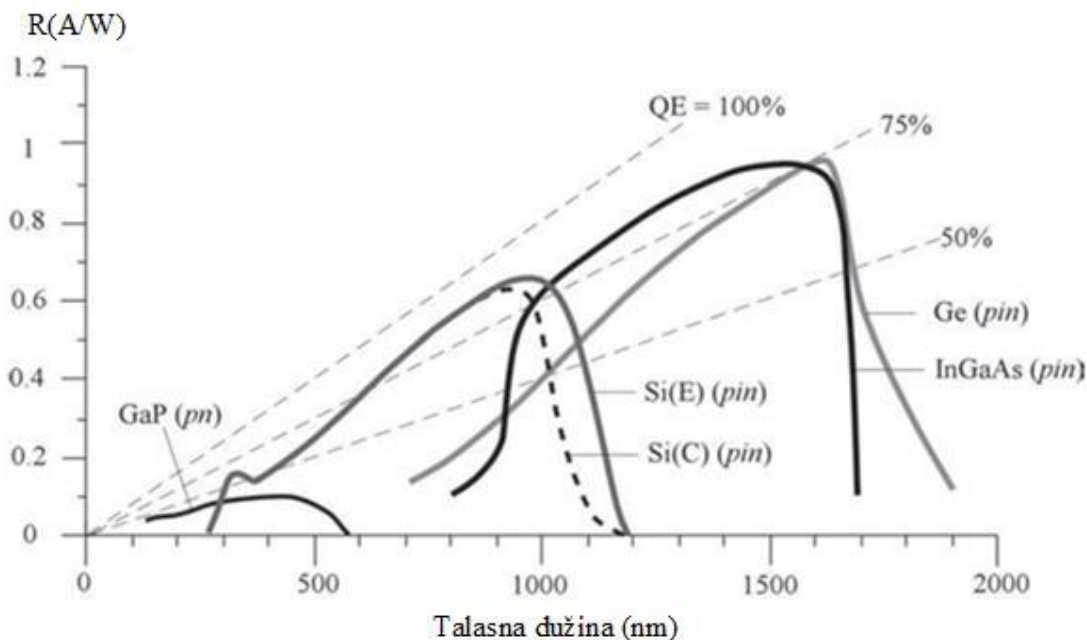
Slika 5.6 Koeficijenti apsorpcije nekoliko značajnih poluprovodničkih materijala u zavisnosti od talasne dužine svetlosti [137]

Kao što se može uočiti na slici 5.6, za talasne dužine manje od λ_g , koeficijent apsorpcije naglo raste. Nagib dela karakteristike koji označava početak apsorpcije (desna ivica karakteristika) zavisi od vrste zonskog prelaza. Pošto je kod indirektnih poluprovodnika neophodna asistencija vibracije rešetke (koja zavisi od temperature) kako bi se apsorbovao foton, verovatnoća apsorpcije fotona kod indirektnih poluprovodnika nije tako visoka kao kod direktnih. Nagib je veliki, odnosno karakteristika je veoma strma u slučaju direktnih poluprovodnika kao što je InGaAs ili InP, dok je kod indirektnih poluprovodnika kao što su silicijum i germanijum ovaj nagib dosta manji.

Za dovoljno velike vrednosti talasne dužine, kvantna efikasnost je niska s obzirom na činjenicu da nema apsorpcije kada je $\lambda \geq \lambda_g = hc/E_g$, odnosno kada je energija fotona manja od energetske procepa. Stoga, talasna dužina λ_g predstavlja maksimalnu talasnu dužinu poluprovodničkog materijala. Za dovoljno male vrednosti talasne dužine, kvantna efikasnost takođe opada pošto se u tom slučaju većina fotona apsorbuje blizu površine fotodiode (unutar rastojanja $1/\alpha_p$). Prema tome, minimalna talasna dužina spektralnog opsega određena apsorpcijom u p^+ oblasti.

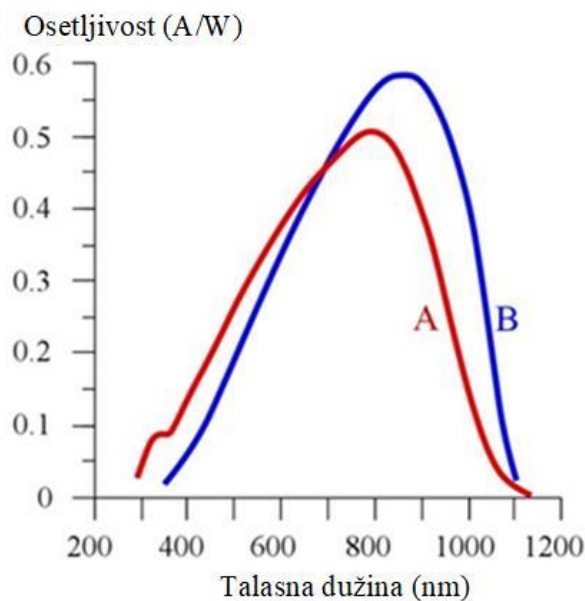
Na slici 5.7 su prikazane osetljivosti Si, InGaAs, Ge i GaP fotodiode. U pitanju su GaP fotodiode FGAP71 proizvođača Thorlabs Inc., Si fotodiode unapređena za rad u IR oblasti (Si(E)), standardna Si fotodiode sa poboljšanim radom u UV opsegu (Si(C)), InGaAs

fotodiode G8376 proizvođača Hamamatsu Photonics K.K. i Ge fotodiode FDG03 proizvođača Thorlabs Inc. Isprekidana linija na slici 5.7 predstavlja idealnu osetljivost kada je kvantna efikasnost $\eta=100\%$, 75% i 50%.



Slika 5.7 Osetljivost Si, InGaAs i Ge pin fotodiode, i GaP fotodiode na bazi p-n spoja [134]

Kvantna efikasnost, a samim tim i osetljivost fotodiode, takođe zavisi od strukture fotodiode. Na slici 5.8 su prikazane osetljivosti dve silicijumske pin fotodiode različitih struktura.



Slika 5.8 Osetljivost dve Si pin fotodiode različitih struktura [134]

Napon V_n i struja šuma I_n (eng. *noise voltage, noise current*) predstavljaju srednji signal izmeren na detektoru po zatom frekventnom intervalu u odsustvu bilo kakve pobude

$$V_n = \frac{V}{\Delta f} \left[\frac{V}{\sqrt{\text{Hz}}} \right] \quad I_n = \frac{I}{\Delta f} \left[\frac{A}{\sqrt{\text{Hz}}} \right]. \quad (5.17)$$

Frekventna zavisnost naziva se spektralni šum.

Vreme tranzita, vreme preleta (eng. *transit time*) predstavlja srednje vreme za koje nosioci pod dejstvom polja pređu preko aktivne oblasti. Vreme preleta je direktno proporcionalno kvadratu dužine puta L , a obrnuto proporcionalno pokretljivosti nosilaca μ i primenjenom polju V .

Vreme života nosilaca (eng. *carrier lifetime*) τ je srednje vreme potrebno za rekombinaciju nosilaca naelektrisanja.

Fotoelektrično pojačanje (eng. *photoelectric gain*) predstavlja broj elektrona koji teku kroz kolo fotodiode po apsorbovanom fotonu, odnosno odnos vremena života nosilaca i vremena preleta

$$G = \frac{\tau}{T_{tr}}. \quad (5.18)$$

Frekventni opseg (eng. *bandwidth, cutoff frequency*) predstavlja frekvenciju na kojoj odziv na prostoperiodičnu pobudu padne na 0.707 svog maksimuma, odnosno smanji se za 3 dB i izražava se u Hz.

Snaga ekvivalentna šumu (NEP, eng. *noise equivalent power*) predstavlja veličinu upadne snage svetlosti, koja generiše fotostruju koja je jednaka struji šuma. NEP je definisan kao

$$NEP = \frac{I_m}{R_\lambda}, \quad (5.19)$$

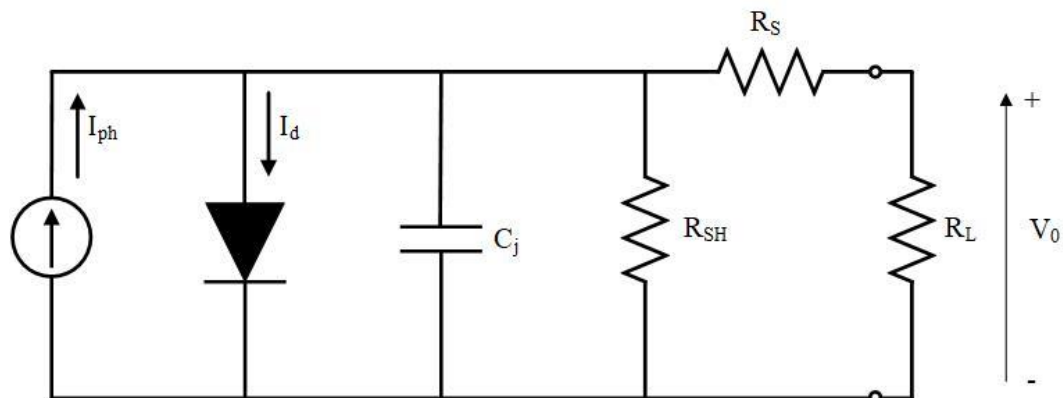
gde je R_λ osetljivost izražena u A/W , a I_m ukupan šum fotodiode. Vrednosti snage ekvivalentne šumu se kreću od $10^{-11} W/\sqrt{\text{Hz}}$ za fotodiode sa velikom površinom aktivne oblasti do $10^{-15} W/\sqrt{\text{Hz}}$ za fotodiode sa malom površinom aktivne oblasti.

Detektivnost (eng. *detectivity*) je definisana kao recipročna vrednost snage ekvivalentne šumu i predstavlja meru osetljivosti fotodiode u odnosu na različite izvore šuma

$$D = \frac{1}{NEP}. \quad (5.20)$$

5.2.3 Električne karakteristike fotodiode

Idealna fotodiode može da se predstavi kao paralelna veza strujnog izvora i idealne diode, pri čemu strujni izvor predstavlja fotostruju koja nastaje usled upadnog zračenja, dok dioda predstavlja p-n spoj. Na slici 5.9 je prikazano ekvivalentno kolo realne fotodiode, koje osim strujnog izvora i idealne diode uključuje i paralelnu R_{sh} i rednu R_s otpornost, kao i kapacitivnost p-n spoja C_j .



Slika 5.9 Ekvivalentno kolo realne fotodiode

Paralelna otpornost R_{sh} (eng. *shunt resistance*)

Paralelna otpornost modeluje nagib strujno-naponske karakteristike fotodiode kada je $V=0$. Iako bi kod idealne fotodiode vrednost paralelne otpornosti trebala da bude beskonačno velika, stvarne vrednosti se kreću od par desetina do nekoliko hiljada $M\Omega$. Za postizanje najboljih karakteristika fotodiode, poželjno je da vrednost paralelne otpornosti bude što veća.

Redna otpornost R_s (eng. *series resistance*)

Redna otpornost fotodiode potiče od otpornosti kontakata i otpornosti neosiromašenog materijala, i data je formulom

$$R_s = \frac{(W_s - W_d)\rho}{A} + R_C, \quad (5.21)$$

gde je W_s debljina supstrata, W_d je širina osiromašene oblasti, A površina aktivne oblasti, ρ specifična otpornost supstrata, a R_C je otpornost kontakata. Redna otpornost se koristi za određivanje linearnosti fotodiode u fotonaponskom režimu rada (bez polarizacije, $V=0$). Iako bi idealna fotodiode trebala da ima nultu rednu otpornost, tipične vrednosti se kreću u opsegu od 10 do par hiljada Ω .

Kapacitivnost p-n spoja C_j (eng. *junction capacitance*)

Ivice oblasti osiromašenja se ponašaju kao ploče paralelnog pločastog kondenzatora. Kapacitivnost p-n spoja je direktno proporcionalna površini aktivne oblasti, a obrnuto proporcionalna širini osiromašene oblasti. Takođe, supstrati koji imaju veću specifičnu otpornost (eng. *resistivity*) imaju nižu kapacitivnost p-n spoja. Kapacitivnost zavisi još i od napona inverzne polarizacije prema sledećoj relaciji

$$\begin{aligned} C_j &= \frac{\varepsilon_r \varepsilon_0 A}{\sqrt{2\varepsilon_r \varepsilon_0 \mu \rho (V_A + V_{bi})}} \\ &= A \sqrt{\frac{\varepsilon_r \varepsilon_0}{2\mu \rho (V_A + V_{bi})}} \end{aligned} \quad (5.22)$$

gde je $\varepsilon_0 = 8.854 \times 10^{-14} \text{ F/cm}$ permitivnost slobodnog prostora, ε_r je dielektrična konstanta materijala od kog je napravljena fotodioda, μ je pokretljivost elektrona na 300 K, ρ je specifična otpornost poluprovodničkog materijala, V_{bi} je ugrađeni potencijal, a V_A primenjeni inverzni napon. Kapacitivnost p-n spoja se koristi za određivanje brzine odziva fotodiode.

Brzina odziva

Tri faktora definišu vreme odziva (brzinu odziva) fotodiode:

1. t_{DRIFT} , vreme preleta nosilaca kroz oblast osiromašenja,
2. $t_{DIFFUSED}$, vreme difuzije nosilaca generisanih izvan oblasti osiromašenja,
3. t_{RC} , RC vremenska konstanta kola.

t_{RC} je definisana kao $t_{RC} = 2.2 RC$, gde je R zbir redne otpornosti i otpornosti opterećenja $R_s + R_L$, a C je zbir kapacitivnosti spoja i parazitne kapacitivnosti $C_j + C_s$. Parazitna kapacitivnost se može minimizovati korišćenjem kraćih vodova i pažljivim raspoređivanjem električnih komponenti. Ukupno vreme porasta je definisano kao

$$t_R = \sqrt{t_{DRIFT}^2 + t_{DIFFUSED}^2 + t_{RC}^2} \quad (5.23)$$

Generalno, u fotonaponskom režimu rada (bez polarizacije) u vremenu porasta dominira vreme difuzije za aktivne oblasti manje od 5 mm^2 , dok za veće površine aktivne oblasti dominira RC vremenska konstanta. Kada fotodioda radi u fotoprovodnom režimu (primenjena inverzna polarizacija) i ako je fotodioda potpuno osiromašena (kao kod serije fotodiode visoke brzine), dominantan faktor je vreme preleta. Kod fotodiode koje nisu potpuno osiromašene, sva tri faktora utiču na brzinu odziva.

Strujno-naponska karakteristika

Struja fotodiode je data jednačinom

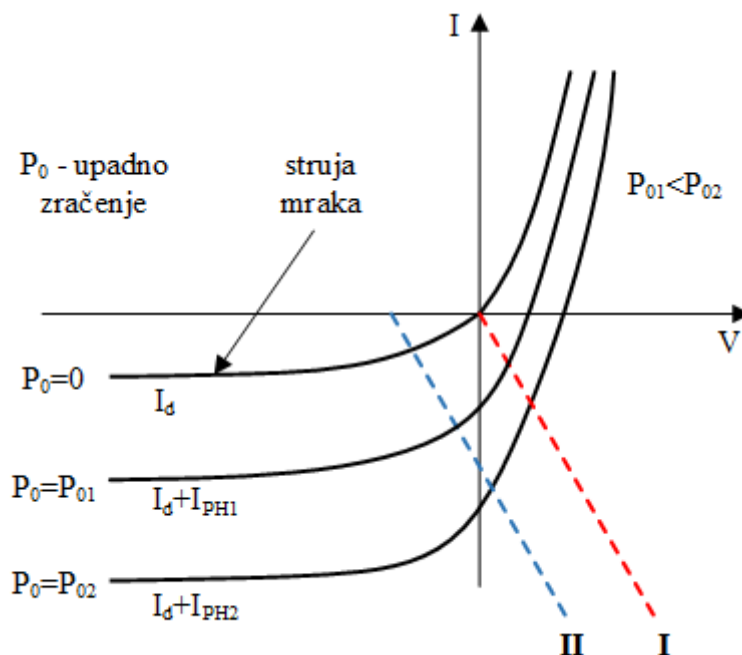
$$I_D = I_{SAT} \left(e^{\frac{qV_A}{k_B T}} - 1 \right) - I_{ph}, \quad (5.24)$$

gde prvi član jednačine predstavlja struju mraka, I_{SAT} je inverzna struja zasićenja fotodiode, q je naelektrisanje elektrona, V_A primenjen inverzni napon, $k_B = 1.38 \times 10^{-23}$ J/K je Bolcmanova konstanta, T je apsolutna temperatura u stepenima Kelvina, a I_{ph} je generisana fotostruja.

Struja mraka predstavlja struju koja teče kroz fotodiodu u fotoprovodnom režimu rada u odsustvu svetlosti. Ona uključuje fotostruju generisanu usled pozadinskog zračenja i inverznu struju zasićenja fotodiode. Na osnovu prethodne jednačine, u zavisnosti od vrednosti napona polarizacije razlikujemo sledeće tri situacije:

1. Bez polarizacije ($V=0$), struja mraka je jednaka 0 i važi $I_D = -I_{ph}$ - fotonaponski režim rada fotodiode
2. Direktna polarizacija ($V=+V$), struja mraka eksponencijalno raste
3. Jaka inverzna polarizacija ($V=-V$), struja mraka postaje jednaka inverznoj struji zasićenja - fotoprovodni režim rada fotodiode

Na slici 5.10 je prikazana strujno-naponska karakteristika fotodiode sa radnim pravama za fotonaponski režim rada (označena sa I) i fotoprovodni režim rada (označena sa II).



Slika 5.10 Strujno-naponska karakteristika fotodiode

Fotodiode obično rade u režimu jake inverzne polarizacije (fotoprovodnom režimu) iz sledećih razloga:

- jaka inverzna polarizacija stvara jako električno polje u oblasti osiromašenja koje povećava brzinu drifta nosilaca, i na taj način smanjuje vreme tranzita,
- jaka inverzna polarizacija povećava širinu oblasti osiromašenja i tako smanjuje kapacitivnost p-n spoja i poboljšava vreme odziva,
- povećana širina oblasti osiromašenja znači veću fotoosetljivu površinu, i na taj način je lakše da fotodiode prikupi više svetlosti (fotona).

5.2.4 Uticaj temperature

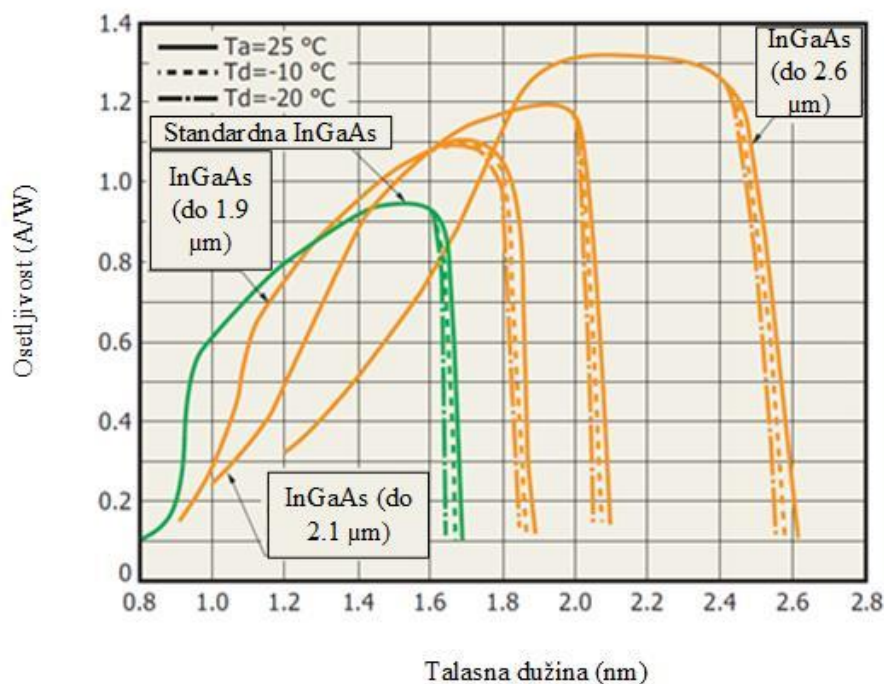
Kao i svi poluprovodnički uređaji, fotodiode su temperaturno osetljive. Parametri fotodiode koji su najviše osetljivi na promene temperature su paralelna otpornost, struja mraka i u nešto manjoj meri osetljivost. Prema dostupnim eksperimentalnim podacima u literaturi, struja mraka silicijumske fotodiode se približno duplo povećava za svakih 8 °C porasta temperature. Paralelna otpornost raste duplo za svakih 6 °C porasta temperature [138].

Na osnovu jednačina (5.25) i (5.26) može se izračunati struja mraka i paralelna otpornost (obično je data vrednost ovih parametara za temperaturu od 25 °C) za bilo koju temperaturu iz određenog opsega [138]

$$I_{dk}(T_2) = I_{dk}(T_1) 2^{\frac{T_1 - T_2}{8}}, \quad (5.25)$$

$$R_{sh}(T_2) = R_{sh}(T_1) 2^{\frac{T_1 - T_2}{8}}. \quad (5.26)$$

Povećanje temperature poluprovodnika pomera njegov apsorpcioni spektar ka višim talasnim dužinama, tako što smanjuje efektivni energetski procep. Kako je spektar apsorpcije prilično širok, mali pomeraji spektra apsorpcije izazvani promenom temperature utiču značajnije na osetljivost samo na ivicama karakteristike spektralne osetljivosti, kao što se vidi i na slici 5.11.



Slika 5.11 Zavisnost granične talasne dužine od temperature kod standardnih i InGaAs fotodioda sa proširenim spektralnim opsegom [139]

5.2.5 Izvori šuma kod fotodioda

Donja granica detekcije bilo kog fotodetektora je određena šumom uređaja. Dve glavne vrste šuma kod fotodioda su šum sačme i Džonsonov šum.

Šum sačme (eng. *shot noise*)

Šum sačme potiče od statističke prirode pristizanja fotona na p-n spoj, odnosno tokom jednog perioda pristigne mali broj fotona, dok tokom drugog perioda istog trajanja pristigne veliki broj fotona. Drugi izvor šuma sačme je struja mraka zbog kvantne prirode nosilaca naelektrisanja. Prema tome, struja šuma sačme je data kao

$$I_{sn} = \sqrt{2q(I_p + I_{dark})\Delta f} \left[\frac{A}{\sqrt{Hz}} \right], \quad (5.27)$$

gde je $q = 1.6 \times 10^{-19}$ C naelektrisanje elektrona, I_p je fotostruja, I_{dark} je struja mraka fotodiode, a Δf je propusni opseg. Šum sačme se ne može izbeći i on predstavlja dominantan izvor šuma kada fotodioda radi u fotoprovodnom režimu.

Džonsonov šum (eng. *Johnson noise*) se još naziva i termalni šum i predstavlja najveću pojedinačnu komponentu šuma fotodiode, kada se nađe u elektronskom kolu sa otpornicima i pojačavačima. Potiče od slučajnog kretanja nosilaca u otpornicima na konačnim temperaturama. Slučajno termalno kretanje nosilaca može dovesti do toga da se višak naelektrisanja brzo nagomila na jednom kraju otpornika. Ovo uzrokuje male razlike napona i struje. Ova kretanja dovode do stvaranja slučajne električne struje čak i u odsustvu spoljašnjeg izvora električne energije. Svaki otpornik u kolu će pokazivati termalni šum. Džonsonov šum paralelne otpornosti fotodiode je dat kao

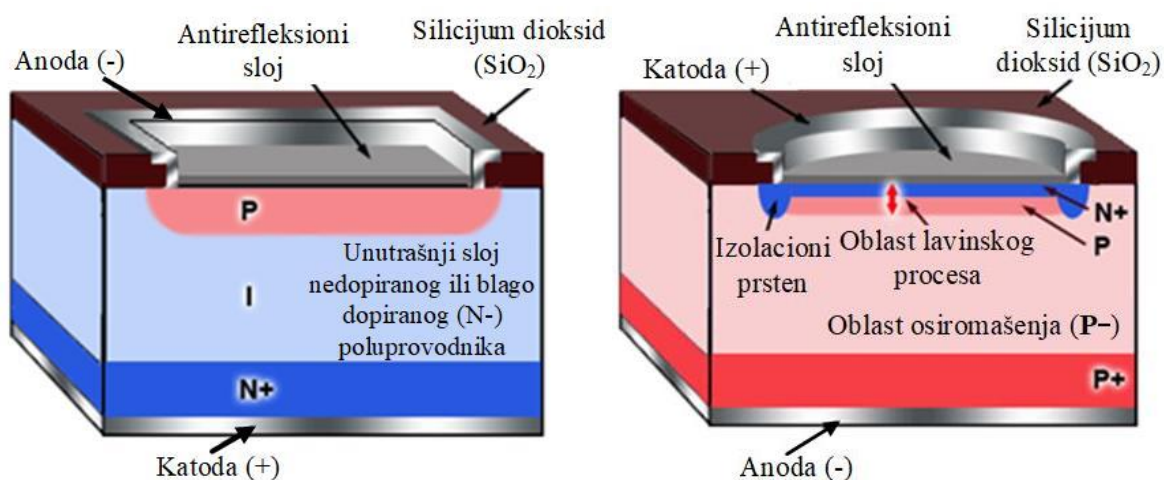
$$I_{jn} = \sqrt{\frac{4k_B T \Delta f}{R_{SH}}} \left[\frac{A}{\sqrt{Hz}} \right], \quad (5.28)$$

gde je $k_B = 1.38 \times 10^{-23}$ J/K Bolcmanova konstanta, T je apsolutna temperatura u stepenima Kelvina, Δf je propusni opseg, a R_{SH} je paralelna otpornost fotodiode. Kao što se vidi iz (5.28) Džonsonov šum raste proporcionalno kvadratnom korenu temperature. Termalni šum je dominantan u fotonaponskom režimu rada.

5.2.6 Tipovi fotodiode

Postoje četiri osnovna tipa fotodiode: p-n fotodiode, p-i-n fotodiode, lavinska fotodiode i Šotkijeva fotodiode. Najviše se koriste PIN i lavinske fotodiode, koje će biti ukratko opisane u daljem tekstu.

Na slici 5.12a je prikazan poprečni presek PIN fotodiode. PIN diode predstavlja p-n spoj kod koga je sloj od slabo dopiranog sopstvenog poluprovodnika ubačen između slojeva p i n tipa. Pomoću ovakve strukture povećava se širina oblasti u kojoj postoji električno polje, odnosno povećava se širina oblasti osiromašenja. Povećanjem širine oblasti osiromašenja kod PIN fotodiode, povećava se površina koja „prikuplja“ svetlost, smanjuje se kapacitivnost p-n spoja, a samim tim i RC vremenska konstanta. Na ovaj način se smanjuje udeo fotostruje koja nastaje usled difuzije nosilaca (smanjena je dužina difuzije), što dovodi do povećanja brzine odziva. Brzina odziva kod PIN fotodiode je ograničena vremenom preleta generisanih nosilaca preko široke oblasti osiromašenja. Usled uvođenja sopstvene I oblasti, kvantna efikasnost PIN fotodiode je višestruko povećana u odnosu na pn fotodiode.



Slika 5.12 Poprečni presek a) PIN fotodiode, b) lavinske fotodiode [135]

Princip rada lavinskih fotodiode (slika 5.12b) se zasniva na generisanju nosilaca kroz proces udarne jonizacije [140]. Lavinske fotodiode konvertuju svaki apsorbirani foton u kaskadu pokretnih parova elektron-šupljina. Kako bi se maksimalno povećala apsorpcija fotona, potrebno je da širina oblasti osiromašenja bude velika. Nasuprot tome, da bi se smanjila pojava lokalnih nekontrolisanih procesa udarne jonizacije (lavinskih procesa), potrebno je da oblast multipliciranja nosilaca bude što uža. Zbog navedenih zahteva, kod lavinskih fotodiode oblasti apsorpcije fotona i multipliciranja nosilaca su razdvojene, kao što se primeti i na slici 5.12b.

Brzina odziva lavinskih fotodiode je nešto niža u odnosu na PIN fotodiode, i fotodiode na bazi p-n spoja, zbog dodatnog vremena potrebnog za multipliciranje nosilaca (eng. *avalanche buildup time*). Lavinske fotodiode su skuplje u odnosu na PIN fotodiode, osetljive su na promene temperature i zahtevaju visoke inverzne napone. Takođe, kod lavinskih fotodiode javlja se M puta veći šum sačme, gde M predstavlja faktor multipliciranja. Glavna prednost lavinskih u odnosu na PIN fotodiode je povećana osetljivost. Dok kod PIN fotodiode nema pojačanja, lavinski proces kod APD povećava pojačanje više puta.

U nastavku teksta dat je kratak pregled najvažnijih osobina i oblasti primene komercijalno dostupnih fotodiode:

Silicijumska (Si) fotodiode (200 – 1100 nm): visoka osetljivost, niska struja mraka, niska cena, visoka brzina odziva.

Primene: fiber-optičke komunikacije, industrijska merenja, analitička oprema, optička merna oprema, optički prekidači (eng. *optical switches*), detekcija zračenja, optički senzori u automobilima, kopir aparatima, barkod čitačima, spektroskopija, kolorimetri.

Silicijum karbid (SiC) fotodiode (210 - 380 nm): veoma niska struja mraka.

Primene: detekcija UV zračenja, univerzalna merenja u UV opsegu, nadgledanje lampi za sterilizaciju, praćenje požara, merenja UV zračenja u pojedinim opsezima UVA, UVB ili UVC.

Galijum fosfor (GaP) fotodioda (150 - 550 nm): niska struja mraka, velika paralelna otpornost, visoka brzina odziva, umerena cena.

Primene: detekcija UV zračenja, kontrola zračenja u solarijumu, praćenje ekoloških parametara, dermatologija, u postrojenjima za prečišćavanje vode UV zračenjem.

Germanijumska (Ge) fotodioda (800 – 1800 nm): visoka struja mraka, niska cena, visoka kapacitivnost p-n spoja, niska brzina odziva, mala paralelna otpornost.

Primene: detekcija IR zračenja, optički merači snage, testiranje optičkih vlakana, kontrola laserskih dioda, optičke komunikacije, senzori temperature, NIR spektroskopija.

Indijum-galijum-arsenid (InGaAs) fotodioda (800 – 2600 nm): niska struja mraka kod standardnih, a kod InGaAs sa proširenim spektralnim opsegom visoka struja mraka, umerena cena standardne, visoka cena proširene, visoka brzina odziva.

Primene: detekcija IR zračenja elektronika, bezbednost, prevencija katastrofa, industrijska merenja, optičke komunikacije, merenja na daljinu, medicinska oprema i analitička merenja, optički merači snage, NIR spektroskopija, analiza gasova, merenje vlage, praćenje lasera i laserskih dioda.

Živa-kadmijum-telurid (MCT, eng. mercury cadmium telluride, HgCdTe) fotodioda: visoka struja mraka, niska brzina odziva, visoka cena. Podešavanjem udela HgTe i CdTe, HgCdTe nudi mogućnost podešavanja energetskog procepa, odnosno rad u opsegu talasnih dužina od 3000 do 17000 nm.

Primene uključuju noćni vid, termoviziju i dugotalasne optičke komunikacije (eng. *long-wavelength lightwave communications*).

5.3 Osobine poluprovodničkih materijala

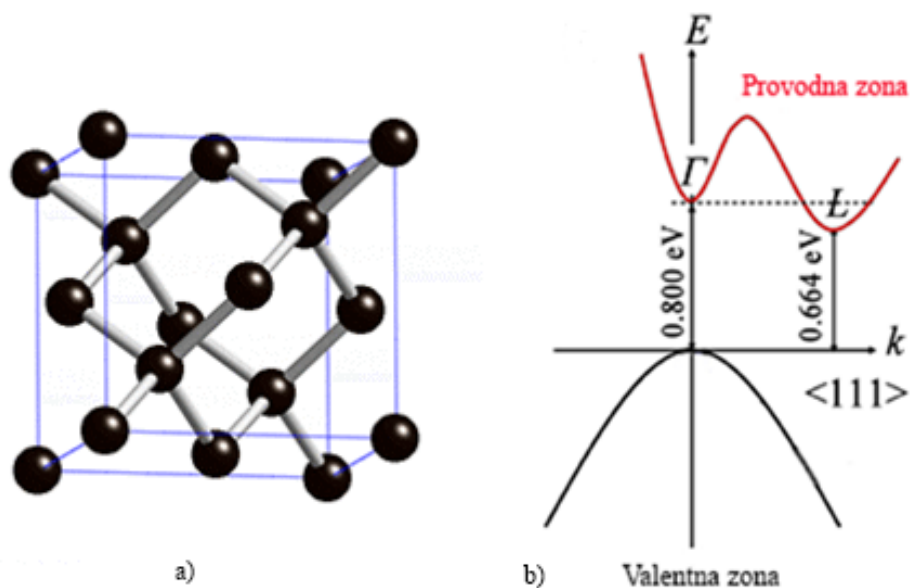
Poluprovodnici su materijali čija specifična električna provodnost ima vrednosti između električne provodnosti metala (od 10^4 do 10^6 S/cm) i izolatora (od 10^{-18} do 10^{-8} S/cm). Razlikujemo elementarne poluprovodnike koji se sastoje od samo jedne vrste atoma, kao što su silicijum Si i germanijum Ge, i nalaze se u IV koloni periodnog sistema elemenata, i poluprovodnička jedinjenja koja se sastoje od dva ili više elemenata, kao što su GaAs, InGaAs, GaP, SiC, InGaAsP. Jedna grupa poluprovodničkih jedinjenja od posebnog značaja za primene u optoelektronici je poznata pod nazivom III-V jedinjenja, pošto se sastoje od elemenata III

(galijum Ga, indijum In) i elemenata V (fosfor P, arsen As) grupe. Provodnost poluprovodničkih materijala je generalno osjetljiva na temperaturu, osvetljenost, magnetsko polje i tip i koncentraciju primesnih atoma. Na osnovu koncentracije primesnih atoma razlikujemo sopstvene (bez primesa, nedopirani) i primesne (dopirani primesama) poluprovodnike. Na osnovu energetskog procepa, odnosno vrste energetskog prelaza, poluprovodničke materijale možemo podeliti na direktne i indirektno. U daljem tekstu biće dat detaljan opis germanijuma Ge, kao predstavnika indirektnih poluprovodnika, i indijum-galijum-arsenida InGaAs, kao predstavnika direktnih poluprovodnika.

5.3.1 Germanijum (Ge)

Mendeljejev je još 1871. godine predvideo postojanje i odredio mesto u periodnom sistemu elemenata za element koji je nazvao eka-silicijum. 1886. godine nemački naučnik Klemens Vinkler je otkrio ovaj element i nazvao ga germanijum, po latinskom nazivu za Nemačku (lat. *Germania*). Germanijum (Ge) je zastupljen u Zemljinoj kori približno 1.6 ppm. Rude koje sadrže germanijum u značajnijim količinama su veoma retke (germanit, argirodit, briartit i renierit) i kako ne postoje isplativi rudni depoziti ovih ruda, one predstavljaju sekundarni izvor germanijuma. Germanijum je takođe prisutan u manjem procentu (takoreći u tragovima) u rudama cinka, olova, srebra i bakra, za koje postoje velika nalazišta. Danas se germanijum primarno dobija kao nusproizvod tokom prerade sfalerita (osnovne rude cinka). Drugi izvor dobijanja germanijuma su čestice pepela iz termoelektrana koje se pogone na uglj koji sadrži germanijum, dok 30% ukupne potrošnje germanijuma potiče od recikliranih materijala [141]. Čist germanijum je krt materijal sivkasto bele boje i metalnog sjaja. Germanijum ima kubičnu dijamantsku kristalnu strukturu prikazanu na slici 5.13.

Germanijum predstavlja materijal od posebnog značaja za razvoj elektronike. Prvi tranzistor koji se izumeli u Belovim laboratorijama 1947. godine, kao i prvi bipolarni tranzistor (1948) bio je napravljen od germanijuma [142]. Tokom 50-ih godina 20-og veka veći deo komercijalne proizvodnje tranzistora je bio zasnovan na upotrebi germanijuma. Za proizvodnju tranzistora se koristi poluprovodnik veoma visokog stepena čistoće, što u vreme otkrića tranzistora nije bilo moguće postići za silicijum. Danas je većina tranzistora napravljena od veoma čistog silicijuma ili germanijuma (sadržaj nečistoća je reda 10^{-10}), s tim da je udeo silicijumskih tranzistora nekoliko puta veći.



Slika 5.13 a) Dijamantska kristalna rešetka germanijuma [143], b) energetski dijagram germanijuma

Prema dostupnim podacima u literaturi, germanijum se tokom 2015. godine najviše koristio u oblasti fiber-optike (30%), infracrvene optike (20%), kao katalizator za polimerizaciju (20%), elektronike i solarnih panela (15%), i kao fosfori (supstance koje spontano emituju svetlost što nije uzrokovano porastom temperature), u oblasti metalurgije i hemoterapije (15%) [144]. U Tabeli 3 je dat pregled parametara germanijuma od značaja za primene u oblasti optoelektronike i fiber-optike.

Tabela 3 Parametri germanijuma od značaja za primene u oblasti optoelektronike i fiber-optike

Parametar	Vrednost
Simbol	Ge
Grupa	IVA
Atomski broj	32
Stanje (na 20 °C)	čvrsto
Energetski procep (na 300K)	0.67 eV
Tip poluprovodnika	indirektni
Tip rešetke	dijamantska
Konstanta rešetke	5.658 Å

Tačka topljenja	938.25 °C
Pokretljivost elektrona	$\leq 3900 \text{ cm}^2 \text{ V}^{-1} \text{ s}^{-1}$
Pokretljivost šupljina	$\leq 1900 \text{ cm}^2 \text{ V}^{-1} \text{ s}^{-1}$
Specifična otpornost	46 Ωcm
Koeficijent difuzije elektrona	$\leq 100 \text{ cm}^2 \text{ s}^{-1}$
Koeficijent difuzije šupljina	$\leq 50 \text{ cm}^2 \text{ s}^{-1}$
Indeks prelamanja	~ 4

Veoma značajno jedinjenje germanijuma je germanijum-dioksid (GeO_2), koje se odlikuje visokim indeksom prelamanja i slabom optičkom disperzijom. Ove osobine su dovele do toga da GeO_2 zameni titanijum-dioksid (TiO_2) kao dopant jezgru optičkog vlakna (od čistog silicijuma) kako bi se povećao indeks prelamanja i na taj način smanjili gubici u optičkom vlaknu. Dodatna prednost dopiranja jezgra germanijum-dioksidom je što sada više nema potrebe za naknadnom termičkom obradom, koja je činila da vlakna postanu krta. Zbog svojih optičkih osobina GeO_2 se takođe koristi kao materijal za širokougaona sočiva za kamere i objektivne mikroskopa.

Pošto su germanijum i germanijum-dioksid transparentni u infracrvenom opsegu talasnih dužina, koriste se u komponentama za detekciju i merenje infracrvenog zračenja, kao što su sočiva i optički prozori. Germanijum se naročito koristi za prednju optiku u termovizijskim kamerama koje rade u opsegu od 8 do 14 μm za pasivno termalno snimanje i za detekciju vrelih tačaka u vojnim primenama, za aplikaciju noćnog vida u mobilnim telefonima i kod gašenja požara.

Silicijum-germanijum (SiGe , odnosno $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$) predstavlja leguru silicijuma i germanijuma koja se obično koristi kao poluprovodnički materijal u integrisanim kolima za heterospojne bipolarne tranzistore i CMOS tranzistore. Kola koja koriste osobine Si-SiGe spojeva mogu da budu dosta brža u odnosu na ona koja koriste samo silicijum [145]. Primer primene SiGe čipova je u sigurnosnim sistemima u automobilima [146]. SiGe se takođe koristi i kao termoelektrični materijal za primene u uslovima visokih temperatura. Silicijum germanijum-na-izolatoru (SGOI, eng. *Silicon Germanium-on-insulator*) predstavlja tehnologiju analognu tehnologiji silicijum-na-izolatoru (SOI, eng. *Silicon-On-Insulator*) koja se trenutno koristi u fabricaciji čipova. SGOI povećava brzinu tranzistora unutar mikročipova pomoću naprezanja kristalne rešetke ispod gejta MOS tranzistora što za posledicu ima povećanje pokretljivosti elektrona i više upravljačke struje [147].

Jedinjenja germanijuma se takođe koriste kao supstrati u proizvodnji visokoefikasnih fotonaponskih ćelija (PVC, eng. *photovoltaic cell*) za generisanje energije za primene i u svemiru (sateliti) i na zemlji. Važne primene su i za LED diode visokog sjaja koje se koriste u prednjim svetlima automobila, i za pozadinsko osvetljenje LCD ekrana. Monokristalni germanijum visoke čistoće se koristi za fotodiode [148], kao i za fotodetektore koji se koriste za pronalaženje izvora zračenja, npr. za bezbednost na aerodromima, u spektrometrima x i γ zraka [149], i brojnim drugim primenama.

Svake godine, oko 17 tona germanijum-dioksida se koristi kao katalizator za polimerizaciju u proizvodnji PET (polietilen tereftalat) plastike. PET plastika se najviše koristi kao ambalaža za hranu i pića.

5.3.2 Indijum-galijum-arsenid (InGaAs)

Indijum-galijum-arsenid je trokomponentna legura indijum-arsenida (InAs) i galijum-arsenida (GaAs). Ovo jedinjenje je poznato i pod nazivom galijum-indijum-arsenid (GaInAs), a zvanična nomenklatura je $Ga_xIn_{1-x}As$. Indijum i galijum su elementi treće grupe periodnog sistema elemenata, dok je arsen element pete grupe. Indijum-galijum-arsenid se ne može naći u prirodi, već se dobija sintezom indijum-arsenida i galijum-arsenida na supstratu od indijum-fosfida (InP). Monokristalni materijal u formi tankog filma može da se dobije pomoću epitaksije iz tečne faze (LPE, eng. *liquid-phase epitaxy*), epitaksije iz parne faze (VPE, eng. *vapour-phase epitaxy*), epitaksije molekularnim snopom (MBE, eng. *molecular beam epitaxy*) i metalorganske epitaksije iz parne faze (MO-CVD, eng. *metalorganic chemical vapour deposition*), ali najčešće se koriste MO-CVD i MBE. Legura $Ga_{0.47}In_{0.53}As$ ima konstantu rešetke koja se poklapa sa konstantom rešetke InP. $Ga_{0.47}In_{0.53}As$ ima energetski procep od 0.75 eV, što odgovara graničnoj talasnoj dužini (eng. *cut-off wavelength*) od 1680 nm na temperaturi od 295 K. Povećavanjem molarnog udela InAs u odnosu na GaAs, može da se poveća granična talasna dužina do 2600 nm. Vrednost energetskog procepa savršeno odgovara za primene InGaAs za lasere i fotodetektore u trećem optičkom prozoru (C-opseg i L-opseg) za fiber-optičke komunikacije. U Tabeli 4 je dat pregled parametara InGaAs od značaja za primene u oblasti optoelektronike i fiber-optike.

Osnovni značaj InGaAs je njegova primena kao fotodetektora visoke brzine i osetljivosti za fiber-optičke komunikacije. InGaAs fotodiode su obično glavni izbor u infracrvenom opsegu talasnih dužina (naročito u opsegu od 1100 do 1700 nm), zahvaljujući svojim dobrim osobinama kao što su veoma kratko vreme odziva, mala serijska otpornost, visoka kvantna efikasnost i niska vrednost struje mraka. Komercijalno su dostupne PIN i lavinske InGaAs fotodiode, pojedinačno, u formi niza i u formi matrice. InGaAs kamere se koriste za proveru bezbednosti hrane, odnosno za detekciju stranih tela i oštećenja voća i povrća [150]. Druga

značajna primena InGaAs je kao poluprovodničkog lasera, kod kojih je aktivna sredina od InGaAs. Kvantne tačke od InGaAs na GaAs takođe su predmet istraživanja za laserske primene [151] [152], kao i laseri na bazi InGaAs/InAlGaAs kvantnih jama koji emituju svetlost na 1500 nm [153] ili u vidljivom opsegu talasnih dužina [154].

InGaAs se koristi i za izradu solarnih ćelija. Solarne ćelije izrađene od više p-n spojeva na bazi III-V poluprovodnika predstavljaju najefikasnije fotonaponske uređaje sa rekordnim vrednostima efikasnosti iznad 40% [155] [156]. $\text{In}_{0.015}\text{Ga}_{0.985}\text{As}$ ima konstantu rešetke koja se savršeno poklapa sa konstantom rešetke Ge i stoga može da se koristi kao spoj u sredini kod fotonaponskih ćelija sa više spojeva na Ge supstratu [157]. Savršeno poklapanje konstanti rešetke smanjuje gustinu oštećenja i na taj način doprinosi povećanju efikasnosti ćelije.

Integrisana kola na bazi InGaAs tranzistora s efektom polja su trenutno u širokoj upotrebi kod pametnih telefona, bežičnog LAN-a, fiber-optičkih linkova brzog protoka i kod mnogih odbrambenih i svemirskih komunikacionih sistema. U [158] istraživači sa MIT univerziteta su predstavili najmanji tranzistor od InGaAs, koji ima dužinu gejeta od samo 22 nm. Grupa naučnika iz Singapura i SAD je prvi put uspeła da integriše na istom supstratu od germanijuma InGaAs tranzistore sa InGaAs/GaAs laserima na bazi više kvantnih jama [159], što predstavlja značajan korak u razvoju optoelektronskih integrisanih kola male snage i visoke brzine.

Tabela 4 Pregled parametara InGaAs od značaja za primene u oblastima optoelektronike i fiber-optike

Parametar	Vrednost
Simbol	InGaAs
Grupa	III-V
Stanje (na 20 °C)	čvrsto
Energetski procep (na 295 K)	0.75 eV
Tip poluprovodnika	direktni
Konstanta rešetke (na 295 K)	5.869 Å
Tačka topljenja	~1100 °C
Pokretljivost elektrona (na 295 K)	10000 cm ² V ⁻¹ s ⁻¹ [160]
Pokretljivost šupljina (na 295 K)	≤ 300 cm ² V ⁻¹ s ⁻¹ [160]
Koeficijent difuzije elektrona	250 cm ² s ⁻¹

6 PREDLOG NOVE METODE MERENJA TALASNE DUŽINE MONOHROMATSKE SVETLOSTI

6.1 Princip rada

Princip rada senzorskog sistema za praćenje talasne dužine monohromatske svetlosti se zasniva na merenju spektralnih osetljivosti fiber-optičke račve i dve različite fotodiode, i izvođenju informacije o talasnoj dužini na osnovu prikupljenih podataka. Razvijen senzorski sistem predstavlja sistem za merenje talasne dužine svetlosti na osnovu odnosa snaga, što omogućava merenje talasne dužine signala optičkog izvora nezavisno od snage signala optičkog izvora.

Rešenje opisano u [23] koje se zasniva na sličnom principu nudi širok merni opseg od 500 do 1200 nm, ali uz prilično nisku mernu rezoluciju od 5 nm. Ideja je da se razvije senzorski sistem visoke rezolucije, koji bi omogućio merenja talasne dužine u kratkotalasnoj infracrvenoj (SWIR, eng. *short-wavelength infrared*) oblasti koja obuhvata opseg talasnih dužina oko trećeg optičkog prozora. Ova oblast je od velikog značaja za fiber-optičke komunikacije, vojne primene, i za optičke senzore temperature, naprezanja, pritiska i mnogih drugih veličina.

Kao što je prethodno opisano u odeljku 5.2.2, osetljivost fotodiode predstavlja meru njene osetljivosti na svetlost i definisana je kao

$$R_{\lambda} = \frac{I_p}{P}, \quad (6.1)$$

gde I_p označava fotostruju, a P je snaga upadnog zračenja na fotodiodu na određenoj talasnoj dužini. Osetljivost fotodiode se menja sa talasnom dužinom upadne svetlosti, što je označeno indeksom λ .

Ako svetlosnu snagu koju emituje optički izvor, podelimo na dva dela korišćenjem fiber-optičke račve kako bi svetlost istovremeno dospela do obe fotodiode, snage upadnog zračenja na fotodiode se mogu izraziti pomoću sledećih formula

$$P_1 = A_1 \cdot R_{1\lambda} \cdot \alpha_{\lambda} \cdot P_i, \quad (6.2)$$

$$P_2 = A_2 \cdot R_{2\lambda} \cdot (1 - \alpha_{\lambda}) \cdot P_i, \quad (6.3)$$

gde A označava konstantu koja uključuje gubitke, efikasnost sprezanja svetlosti u optičko vlakno i druge faktore koje ne zavise od talasne dužine svetlosti, α_{λ} predstavlja zavisnost odnosa sprezanja (eng. *coupling ratio*) od talasne dužine, a P_i je snaga optičkog izvora. Indeks 1 označava prvu fotodiodu, dok indeks 2 predstavlja drugu fotodiodu. Radi eliminisanja

zavisnosti senzorskog sistema od eventualnih fluktuacija snage optičkog izvora, snage zračenja koja dolaze na obe fotodiode P_1 i P_2 se mogu podeliti kao u [23]

$$f(\lambda) = \frac{P_1}{P_2} = \frac{A_1 \cdot R_{1\lambda} \cdot \alpha_\lambda \cdot P_i}{A_2 \cdot R_{2\lambda} \cdot (1 - \alpha_\lambda) \cdot P_i}$$

$$f(\lambda) = \frac{A_1 \cdot R_{1\lambda} \cdot \alpha_\lambda}{A_2 \cdot R_{2\lambda} \cdot (1 - \alpha_\lambda)} = B \cdot \frac{R_{1\lambda}}{R_{2\lambda}} \cdot \frac{\alpha_\lambda}{(1 - \alpha_\lambda)}, \quad (6.4)$$

$$B = \frac{A_1}{A_2}$$

i na taj način je omogućeno određivanje talasne dužine svetlosti pomoću merenja zasnovanog na merenju odnosa (eng. *ratiometric*) snaga.

6.1.1 Odabir fotodioda

Prilikom odabira fotodioda, važno je uzeti u obzir performanse fotodiode i njenu cenu. Parametri od posebnog interesa za praćenje performansi fotodiode su njena osetljivost, struja mraka, kapacitivnost p-n spoja i paralelna otpornost. Pošto je cilj istraživanja praćenje talasne dužine svetlosti u SWIR opsegu, silicijumske fotodiode sa spektralnim opsegom od 200 do 1100 nm nisu razmatrane kao opcija. Među komercijalnim fotodiodama koje rade u SWIR opsegu, najčešće se koriste germanijumske Ge i indijum-galijum-arsenid InGaAs fotodiode, tako da upravo one i predstavljaju logičan izbor za konfiguraciju sistema sa dva fotodetektora. Spektralni opseg InGaAs fotodiode je od 800 do 1700 nm, a spektralni opseg Ge fotodiode od 700 do 1800 nm. Oba tipa fotodioda imaju visoku kvantnu efikasnost i osetljivost. Pored toga, InGaAs fotodioda ima veliku paralelnu otpornost reda desetina M Ω , dok Ge fotodioda ima malu paralelnu otpornost reda k Ω . Takođe, struja mraka i kapacitivnost p-n spoja InGaAs fotodiode su dosta niže u odnosu na Ge fotodiodu. S druge strane, optičke glave koje sadrže Ge fotodiodu su dosta jeftinije nego optičke glave koje sadrže InGaAs fotodiodu. Uopšte, InGaAs fotodiode se koriste za precizna merenja u oblasti optičkih komunikacija, noćnog vida, bezbednosti, bliske infracrvene (NIR, eng. *near-infrared*) spektroskopije i mnogim drugim, dok Ge fotodiode predstavljaju jeftiniju alternativu InGaAs fotodiodama nudeći samo skromnu tačnost u NIR opsegu sa primenama u optičkim komunikacijama, optičkim meračima snage, testiranju optičkih vlakna, temperaturnim sensorima, NIR spektroskopiji i drugim.

Na osnovu spektralnih karakteristika datih u specifikacijama proizvođača, može da se primeti da je u oblasti talasnih dužina oko trećeg optičkog prozora spektralna karakteristika InGaAs fotodiode skoro konstantna, dok spektralna karakteristika Ge fotodiode strmo opada. Ove karakteristike su od ključnog značaja za implementaciju senzorskog sistema razvijenog u okviru ove disertacije.

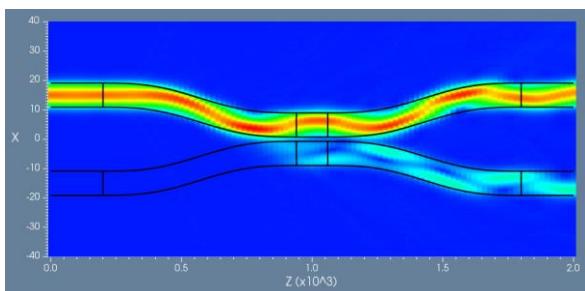
6.1.2 Uticaj fiber-optičke račve

Umesto korišćenja jednostavnog delitelja (eng. *splitter*) za istovremeni prenos ulazne svetlosti, odlučeno je da se koristi fiber-optička račva. Dobro je poznato da kod direkcione optičke račve postoji zavisnost od talasne dužine svetlosti koja se prostire kroz račvu, što ima za posledicu promenu odnosa sprezanja u određenom opsegu talasnih dužina [21]. Ova spektralna zavisnost fiber-optičke račve je iskorišćena u predloženom senzorskom sistemu kako bi se dodatno povećala osetljivost kompletnog senzorskog sistema, pri čemu jedna izlazna grana račve povećava nagib karakteristike osetljivosti jedne fotodiode, a druga izlazna grana račve smanjuje nagib karakteristike osetljivosti druge fotodiode. Imajući ovo u vidu, od ključnog je značaja da se na ispravan način postavi određena izlazna grana račve na određenu fotodiodu kako bi se postigao prethodno pomenuti efekat.

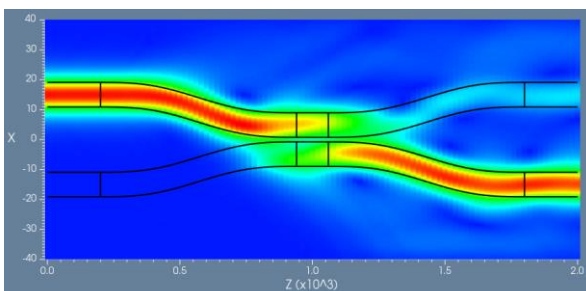
6.1.3 Simulacija prostiranja svetlosti kroz optičku račvu

Simulacija ponašanja fiber-optičke račve u zavisnosti od talasne dužine upadne svetlosti je izvršena korišćenjem OptiBPM softvera proizvođača Optiwave Systems Inc. Kao parametri materijala od kog je napravljena optička račva uneti su podaci za SMF-28 optičko vlakno. Posebno se vodilo računa da se postigne odnos sprezanja 50:50 na 1550 nm, kao što je slučaj kod realne fiber-optičke račve korišćene u eksperimentima.

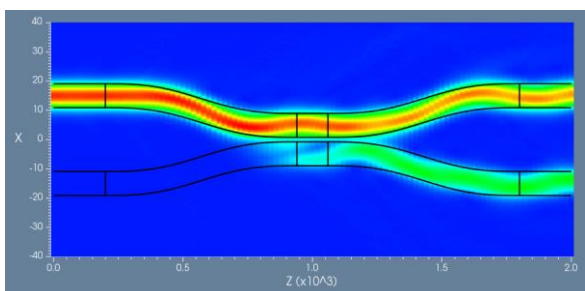
Na slici 6.1 je prikazano prostiranje svetlosti kroz optičku račvu na talasnoj dužini 900 nm (a), 2200 nm (b), 1200 nm (c), 1900 nm (d) i 1550 nm (e), dobijeno simulacijom u OptiBPM softveru. Na slici 6.1 se može uočiti zavisnost odnosa sprezanja od talasne dužine svetlosti, odnosno veća količina svetlosti se prostire kroz gornju granu optičke račve kada je talasna dužina manja od 1550 nm u odnosu na slučaj kada je talasna dužina veća od 1550 nm (talasna dužina pri kojoj su snage svetlosti u obe izlazne grane jednake).



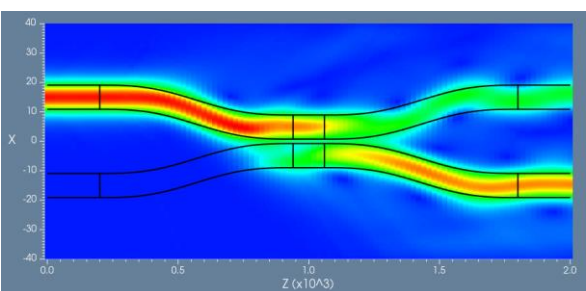
a) 900 nm



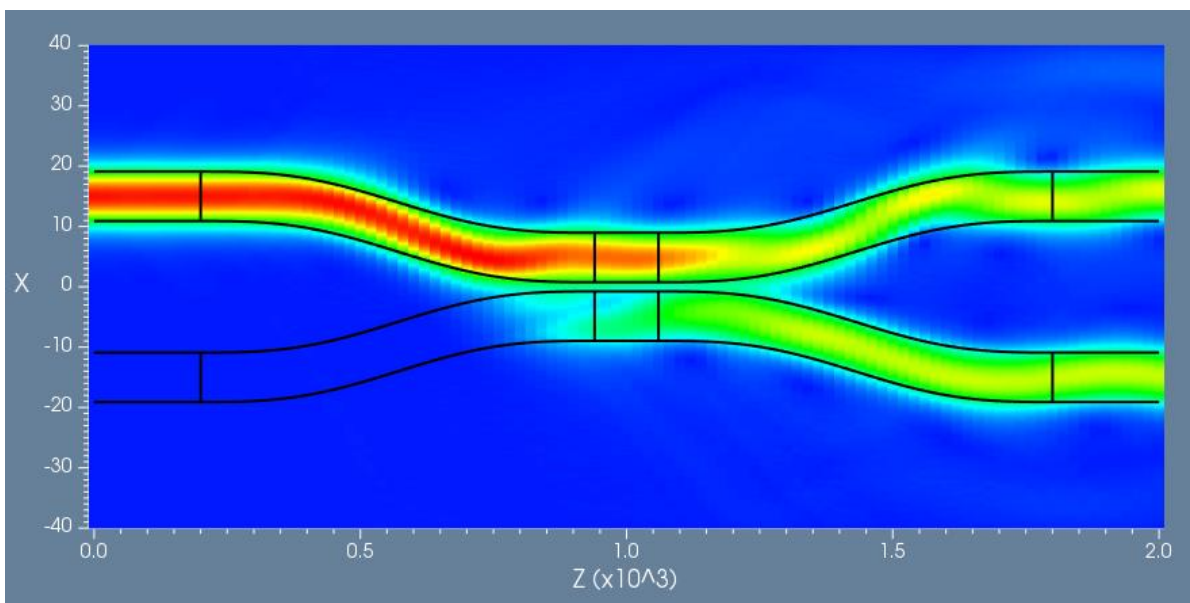
b) 2200 nm



c) 1200 nm



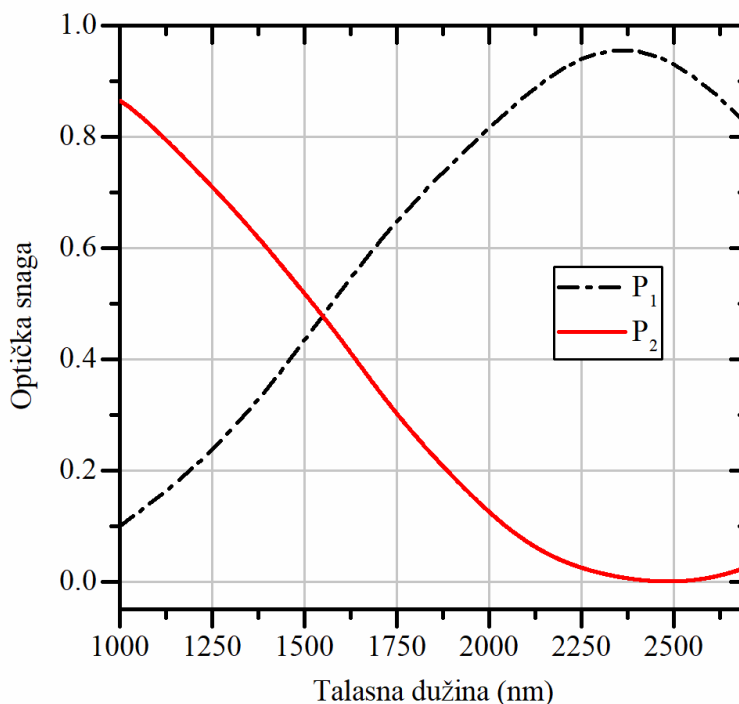
d) 1900 nm



e) 1550 nm

Slika 6.1 Simulacija prostiranja svetlosti kroz optičku račvu na talasnoj dužini od a) 900 nm; b) 2200 nm; c) 1200 nm; d) 1900 nm i e) 1550 nm

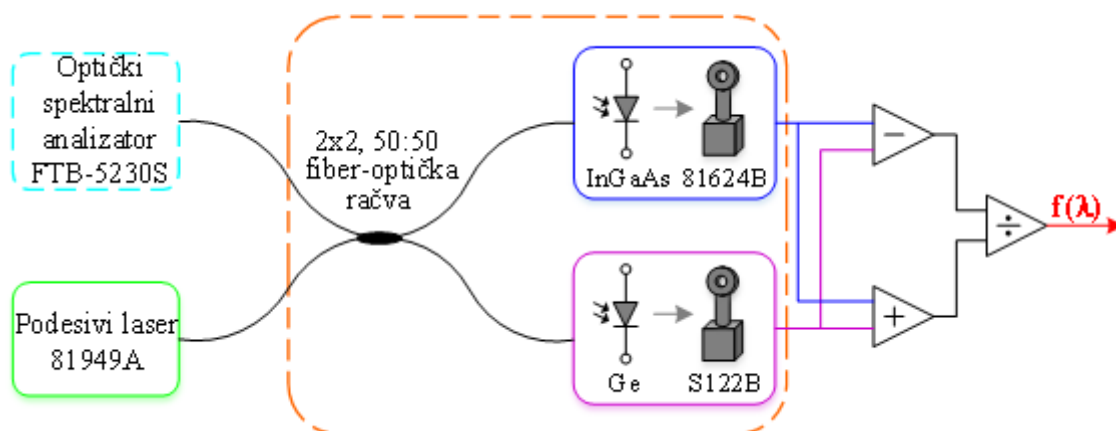
Na slici 6.2 dat je odnos sprezanja optičkih snaga u dve izlazne grane optičke račve u zavisnosti od talasne dužine ulazne svetlosti dobijen simulacijom.



Slika 6.2 Odnos sprezanja optičkih snaga u dve izlazne grane optičke račve u zavisnosti od talasne dužine ulazne svetlosti dobijen simulacijom

6.2 Eksperimentalna postavka senzorskog sistema

Na slici 6.3 prikazana je eksperimentalna postavka senzorskog sistema za praćenje talasne dužine lasera, a na slici 6.4 fotografija postavke.



Slika 6.3 Eksperimentalna postavka za testiranje sistema za detekciju talasne dužine monohromatske svetlosti

Kao izvor svetlosti koristi se 81949A laser sa podesivom talasnom dužinom proizvođača Keysight Technologies Inc. sa širokim opsegom podešavanja od 1520 nm do 1630 nm i rezolucijom od 5 pm. SDW13550229UC monomodna 2×2 fiber-optička račva sa 50:50 odnosom spreznja na 1550 nm proizvođača Fiber Instrument Sales, Inc. se koristi za deljenje snage lasera. Svetlosni signal koja se prostire kroz gornju izlaznu granu optičke račve se dovodi na InGaAs fotodiodu, koja se nalazi unutar 81624B optičke glave proizvođača Keysight Technologies Inc. Signal koji se prostire kroz donju izlaznu granu račve se dovodi na Ge fotodiodu unutar S122B optičke glave proizvođača Thorlabs Inc. 81624B i S122B optičke glave su zatim povezane na Lightwave measurement system 8164B proizvođača Keysight Technologies Inc. i PM300E merač optičke snage proizvođača Thorlabs Inc., respektivno, kako bismo mogli da izmerimo i prikažemo podatke o optičkoj snazi. Optički spektralni analizator FTB-5230S u okviru FTB-400 univerzalnog sistema za testiranje proizvođača EXFO, Inc. je povezan na preostali slobodan izlaz račve da bi se dobili precizni podaci o talasnoj dužini svetlosti tokom faza testiranja i kalibrisanja razvijenog senzorskog sistema.

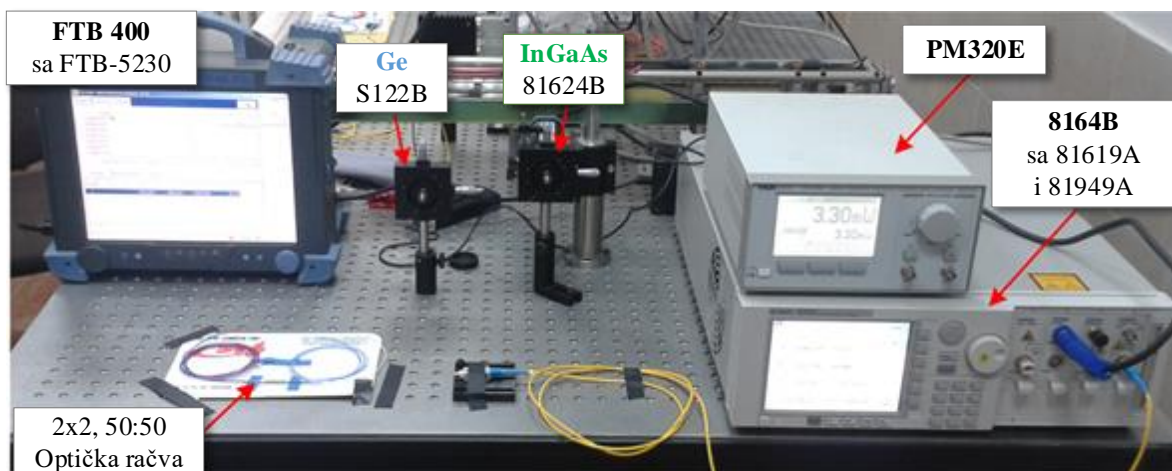
Aplikacija u LabVIEW 2011 softveru je razvijena na personalnom računaru sa ciljem da omogući kontrolu laserskog izvora, sinhronizovano prikupljanje mernih podataka, obradu signala, prikaz i skladištenje izmerenih vrednosti izlaznih snaga P_{Ge} i P_{InGaAs} . Nakon obrade signala izlaznih snaga, ovi podaci se skladište na personalnom računaru, gde se dalje matematički obrađuju kako bi se smanjio uticaj šuma. Prvobitno [161] je za obradu prikupljenih podataka korišćen izraz

$$f(\lambda) = \frac{P_{InGaAs(n)}}{P_{Ge(n)}}, \quad (6.5)$$

koji omogućava eliminisanje uticaja fluktuacija snage optičkog izvora, međutim bolja linearnost senzorskog sistema (uz eliminisanje uticaja fluktuacija optičkog izvora) se može postići primenom formule

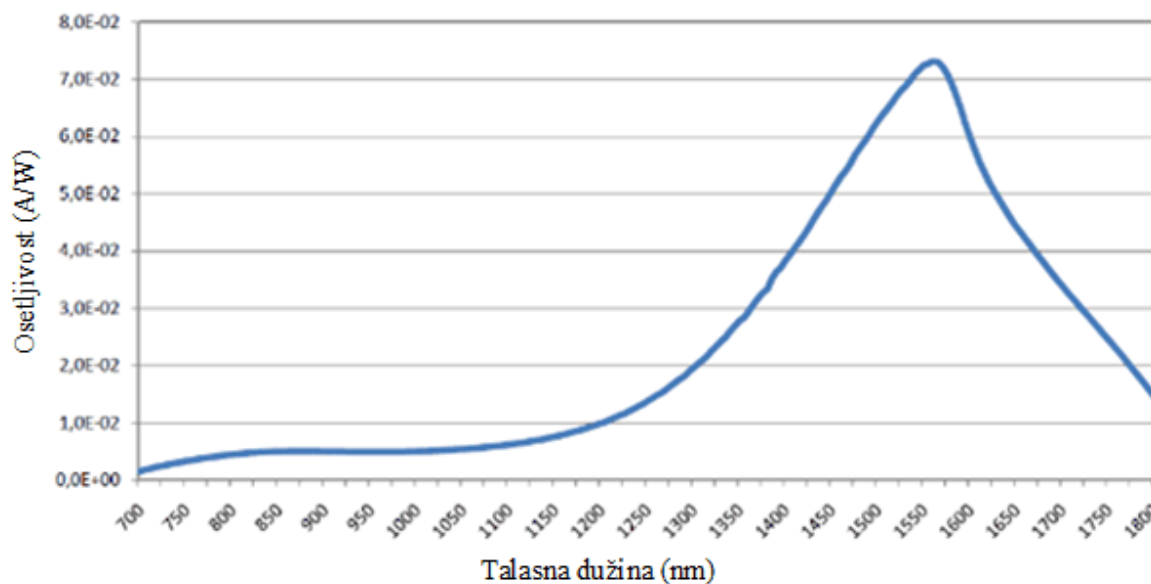
$$f(\lambda) = \frac{P_{InGaAs(n)} - P_{Ge(n)}}{P_{InGaAs(n)} + P_{Ge(n)}}, \quad (6.6)$$

gde indeks n označava normalizovanu optičku snagu. Normalizacija spektralnih karakteristika se vrši za određenu talasnu dužinu, koja je na početku izabrana kao radna talasna dužina optičkih glava. Isprekidana linija na slici 6.3 označava deo eksperimentalne postavke koji se kasnije postavlja u temperaturnu komoru kako bi se ispitala zavisnost senzorskog sistema od promena temperature.



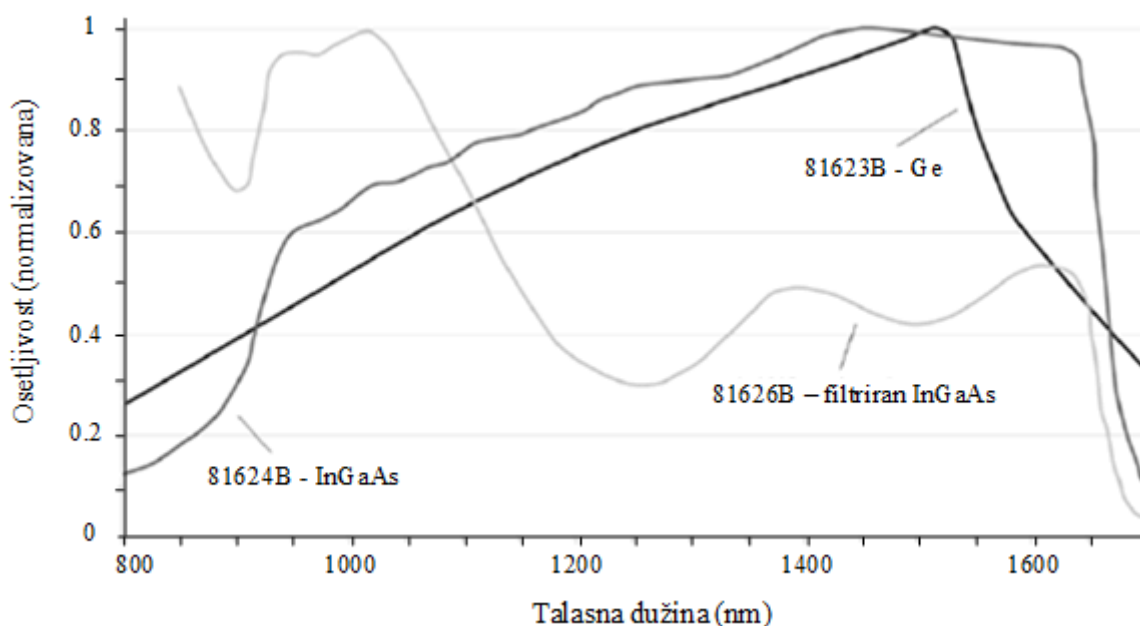
Slika 6.4 Fotografija eksperimentalne postavke za testiranje senzorskog sistema za praćenje talasne dužine svetlosti

Na slici 6.5 je prikazana osetljivost Ge fotodiode koja se nalazi unutar optičke glave S122B koja je data u specifikaciji proizvođača Thorlabs Inc. [162].



Slika 6.5 Osetljivost korišćene S122B germanijumske fotodiode [162]

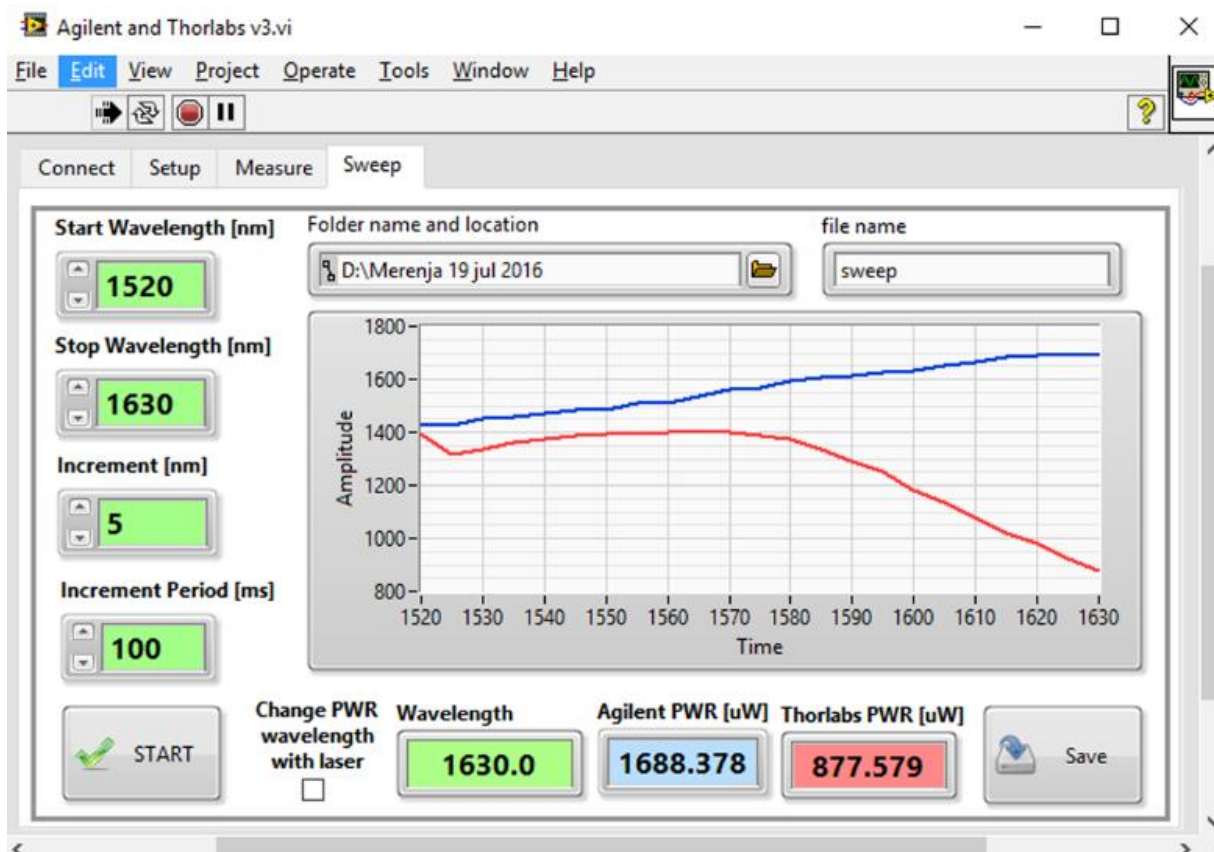
Na slici 6.6 je prikazana osetljivost InGaAs fotodiode koja se nalazi unutar optičke glave 81624B koja je data u specifikaciji proizvođača Keysight Technologies Inc. [163].



Slika 6.6 Osetljivost korišćene 81624B InGaAs fotodiode [163]

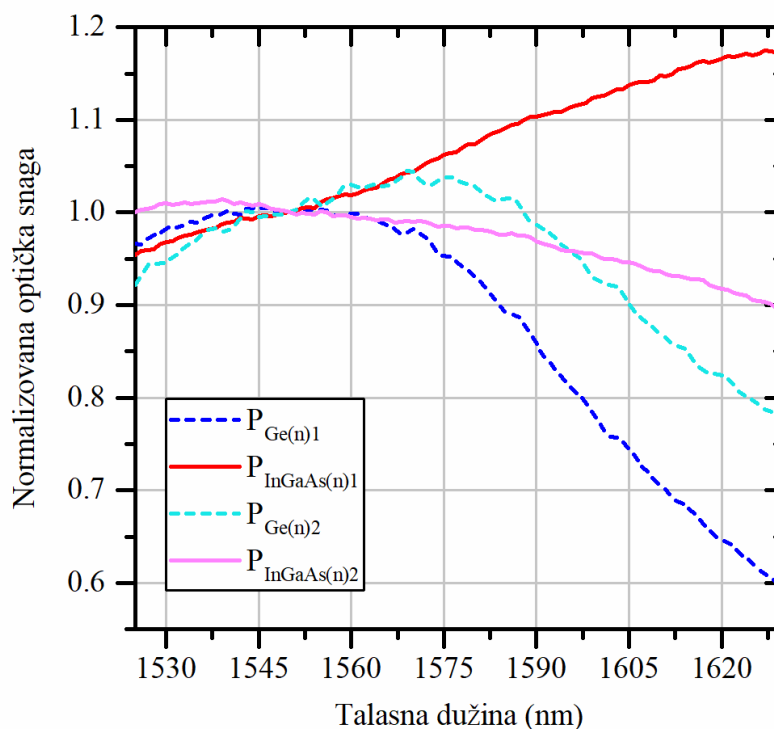
6.3 Rezultati merenja talasne dužine svetlosti predloženom metodom

Talasna dužina podesivog lasera se menja u koracima od 5 nm u opsegu od 1525 nm do 1630 nm, dok je snaga lasera podešena na 10 mW za sva merenja talasne dužine. Pošto je odnos spreznjanja fiber-optičke račve 50:50 na 1550 nm, ova talasna dužina je naročito pogodan izbor za radnu talasnu dužinu za obe fotodiode. Takođe, na ovoj talasnoj dužini je izvršena normalizacija Ge i InGaAs spektralnih karakteristika, pa samim tim ona predstavlja tačku kalibracije senzora. Usrednjavanje je primenjeno i na Ge senzor u sklopu S122B optičke glave i na InGaAs senzor u okviru 81624B optičke glave, kako bi se redukovao šum koji potiče od samih fotodetektora. Na slici 6.7 je prikazana LabVIEW aplikacija razvijena za upravljanje eksperimentalnom postavkom i akviziciju podataka.



Slika 6.7 LabVIEW aplikacija za upravljanje eksperimentalnom postavkom i akviziciju podataka

Na slici 6.8 su date spektralne karakteristike Ge i InGaAs optičkih snaga za dve postavke izlaznih grana optičke račve (početnu, označenu indeksom 1 i obrnutu, označenu indeksom 2).



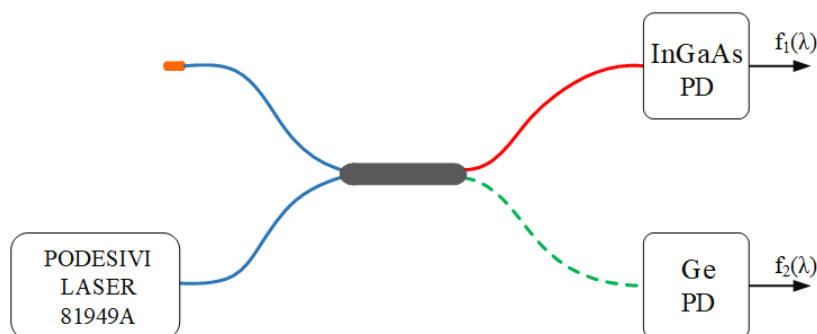
Slika 6.8 $P_{Ge(n)}$ i $P_{InGaAs(n)}$ spektralne karakteristike za dve različite postavke fiber-optičke račve (početna (1) i obrnuta (2))

Poređenjem karakteristika na slici 6.8 za početnu i obrnutu postavku fiber-optičke račve, može se uočiti da se u slučaju početne postavke dobijaju karakteristike sa izraženijom razlikom nagiba u odnosu na slučaj kada se ne koristi fiber-optička račva, kao što je i predviđeno. Međutim, u slučaju obrnute postavke razlika nagiba spektralnih karakteristika fotodioda je manje izražena, odnosno nagib $P_{InGaAs(n)}$ karakteristike se smanjio, dok se nagib $P_{Ge(n)}$ povećao. Na osnovu ovih podataka, može se zaključiti koliki je značaj pravilne postavke izlaza fiber-optičke račve kako bi se dobili relevantni rezultati. Za dalje proračune ćemo koristiti $P_{Ge(n)}$ i $P_{InGaAs(n)}$ spektralne karakteristike za početnu postavku izlaza optičke račve (označeno indeksom 1 na slici 6.8), kako bismo postigli što veću osetljivost senzora. Takođe, i za dodatna merenja (merna stabilnost, uticaj temperature i dr.) ćemo koristiti fiber-optičku račvu u početnoj postavci.

6.3.1 Proračun odnosa sprezanja

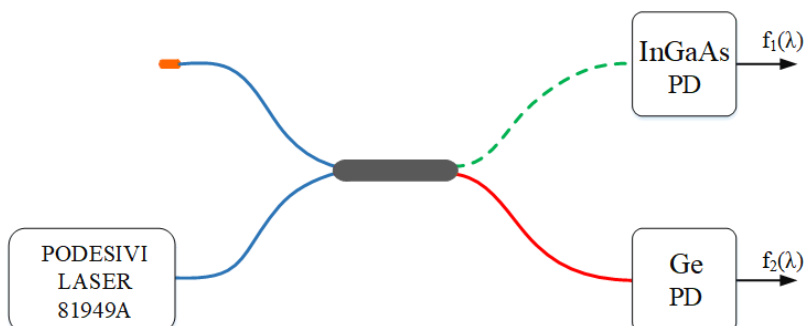
Kako bismo izračunali odnos sprezanja na osnovu spektralnih karakteristika celokupnog senzorskog sistema $f_1(\lambda)$ i $f_2(\lambda)$, izvršena su merenja za dve različite postavke fiber-optičke račve u odnosu na fotodiode. Prva merna postavka gde je izlazna grana optičke račve označena

crvenom bojom povezana sa InGaAs fotodiodom, a grana označena isprekidanom zelenom linijom je povezana sa Ge fotodiodom, prikazana je na slici 6.9.



Slika 6.9 Prva (početna) eksperimentalna postavka za određivanje odnosa sprezanja fiber-optičke račve (PD - fotodiode)

Drugo merenje podrazumeva obrnutu postavku fiber-optičke račve u odnosu na fotodiode, odnosno izlazna grana obojena crveno je sada povezana sa Ge fotodiodom, a izlazna grana označena zelenom isprekidanom linijom je spojena sa InGaAs fotodiodom, što je ilustrirano na slici 6.10.



Slika 6.10 Druga (obrnuta) eksperimentalna postavka za određivanje odnosa sprezanja fiber-optičke račve sa obrnutim položajem izlaza račve u odnosu na fotodiode (PD - fotodiode)

U slučaju prve (početne) postavke izlaza optičke račve, optičke snage svetlosti koja dolazi na InGaAs i Ge fotodiode mogu se aproksimirati kao

$$\begin{aligned} f_{11}(\lambda) &= (k + x) \cdot S_{InGaAs} \cdot P \\ f_{21}(\lambda) &= (k - x) \cdot S_{Ge} \cdot P \end{aligned} \quad (6.7)$$

gde k označava konstantu od 0.5 (koja predstavlja 50% odnos sprezanja), x koeficijent sprezanja (u kombinaciji sa k , modeluje odnos sprezanja od 0 do 100%), S osetljivost fotodiode i P predstavlja snagu upadne svetlosti. Nakon obrtanja izlaznih grana fiber-optičke račve, dobija se

$$\begin{aligned} f_{12}(\lambda) &= (k - x) \cdot S_{\text{InGaAs}} \cdot P \\ f_{22}(\lambda) &= (k + x) \cdot S_{\text{Ge}} \cdot P \end{aligned} \quad (6.8)$$

Drugi indeks kod $f_1(\lambda)$ i $f_2(\lambda)$ označava početnu (indeks 1) ili obrnutu postavku izlaza optičke račve (indeks 2).

Optičke snage koje su izmerene pomoću jednog fotodetektora, na primer InGaAs, za ove dve različite postavke optičke račve su međusobno podeljene kako bi se dobila vrednost koeficijenta odnosa sprezanja.

$$\frac{(k + x) \cdot S_{\text{InGaAs}} \cdot P}{(k - x) \cdot S_{\text{InGaAs}} \cdot P} = d = \frac{f_{11}(\lambda)}{f_{12}(\lambda)}, \quad (6.9)$$

gde d predstavlja odnos snaga koje meri InGaAs fotodioda za dve različite postavke optičke račve

$$\begin{aligned} k + x &= d \cdot (k - x) \\ (1 + d) \cdot x &= (d - 1) \cdot k \end{aligned} \quad (6.10)$$

Konačno, iz jednačine (6.10) se može izračunati koeficijent sprezanja x

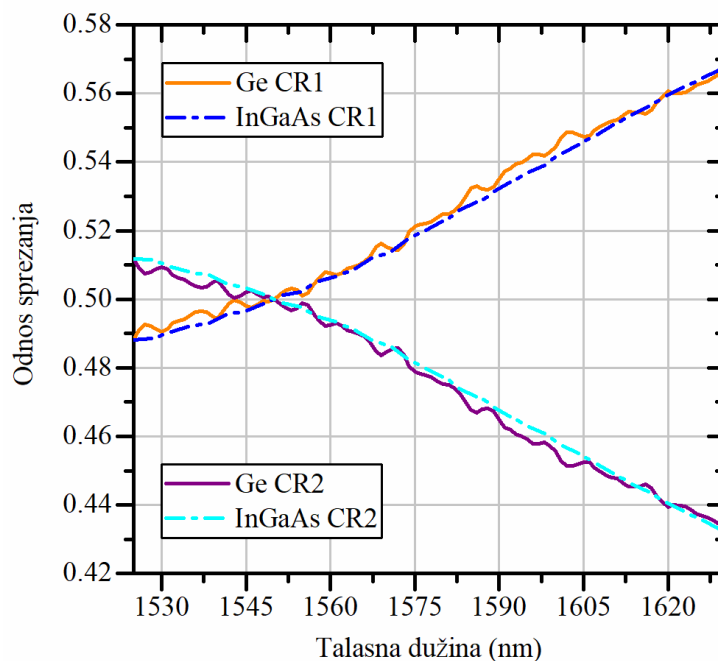
$$x = \frac{k \cdot (d - 1)}{(d + 1)}, \quad (6.11)$$

a na osnovu koeficijenta sprezanja dobijamo odnos sprezanja α

$$\begin{aligned} \alpha_1 = k + x &= \frac{2 \cdot d \cdot k}{1 + d} = \frac{d}{1 + d}, \\ \alpha_2 = k - x &= \frac{2 \cdot k}{1 + d} = \frac{1}{1 + d}, \end{aligned} \quad (6.12)$$

gde indeks 1 označava odnos sprezanja u jednoj, a indeks 2 u drugoj izlaznoj grani fiber-optičke račve.

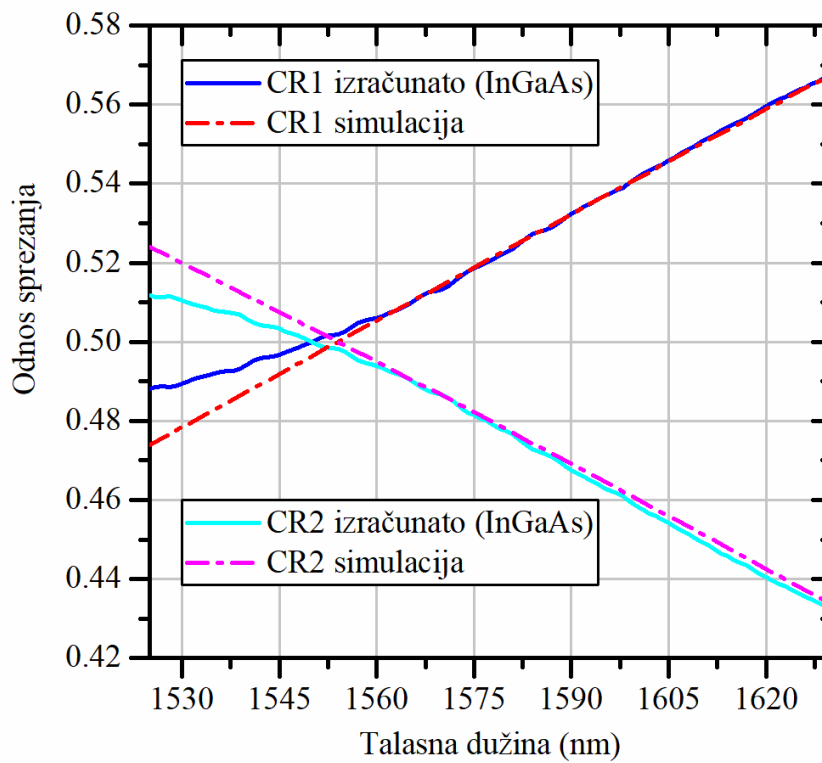
Na slici 6.11 dato je poređenje spektralnih karakteristika odnosa sprezanja koje su izračunate ubacivanjem mernih podataka dobijenih samo sa InGaAs fotodiodom ($f_{11}(\lambda)$ i $f_{12}(\lambda)$) i samo sa Ge fotodiodom ($f_{21}(\lambda)$ i $f_{22}(\lambda)$) u jednačinu (6.9).



Slika 6.11 Poređenje odnosa sprezanja dobijenih korišćenjem InGaAs spektralnih karakteristika u jednačini (6.9) i Ge spektralnih karakteristika u (6.9)

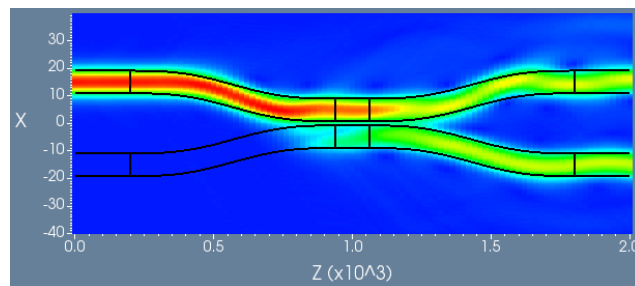
Na slici 6.11 se može primetiti da se spektralne karakteristike odnosa sprezanja dobijene pomoću InGaAs fotodiode i pomoću Ge fotodiode skoro savršeno poklapaju. Fluktuacije spektralnih karakteristika odnosa sprezanja dobijene korišćenjem Ge fotodiode mogu se objasniti povećanim nivoom šuma koji unosi Ge fotodiode usled male paralelne otpornosti i velike struje mraka.

Na slici 6.12 je dato poređenje spektralnih karakteristika odnosa sprezanja dobijenih pomoću simulacije i proračunom na osnovu izmerenih snaga svetlosti P_{Ge} i P_{InGaAs} . Rezultati dobijeni simulacijom i proračunom se veoma dobro poklapaju na talasnim dužinama većim od 1550 nm.

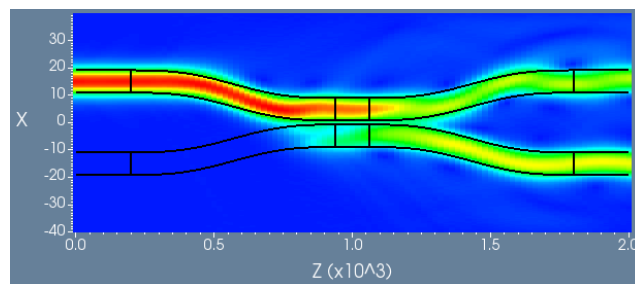


Slika 6.12 Poređenje odnosa sprezanja dobijenih pomoću simulacije i proračunom na osnovu izmerenih snaga svetlosti P_{Ge} i P_{InGaAs}

Na slici 6.13 je prikazano prostiranje svetlosti kroz optičku račvu na talasnoj dužini 1550 nm (a) i 1630 nm (b), dobijeno simulacijom u OptiBPM softveru.



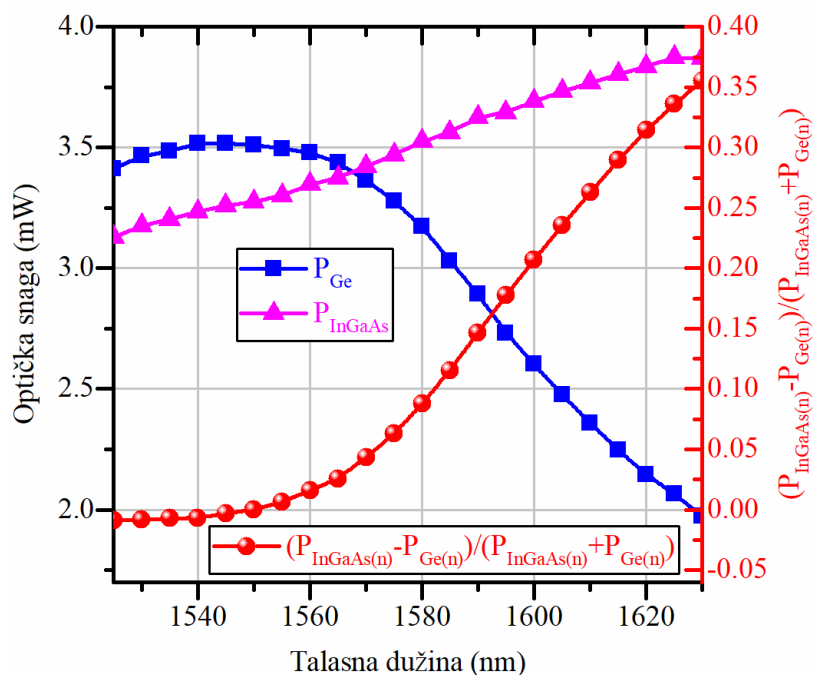
a)



b)

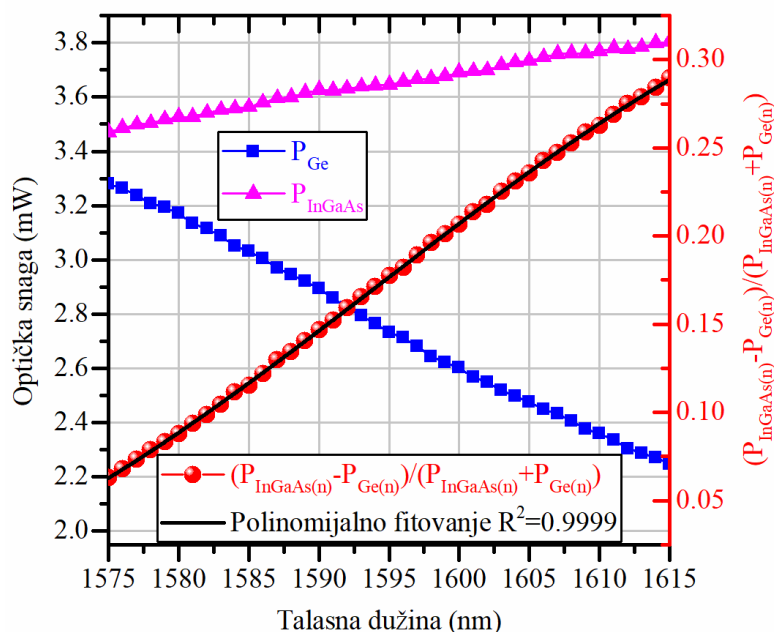
Slika 6.13 Simulacija prostiranja svetlosti kroz optičku račvu na talasnoj dužini od a) 1550 nm; b) 1630 nm

Na slici 6.14 su prikazane spektralne karakteristike optičke snage izmerene korišćenjem Ge fotodiode, optičke snage izmerene korišćenjem InGaAs fotodiode i njihov odnos u skladu sa jednačinom (6.6). Može se primetiti, da P_{InGaAs} sada monotono raste u posmatranom opsegu, što se može pripisati upotrebi fiber-optičke račve, odnosno iskorišćavanju zavisnosti odnosa sprezanja od talasne dužine svetlosti. Nasuprot tome, P_{Ge} karakteristika opada sa strmijim nagibom, usled povezivanja izlaza račve sa opadajućom karakteristikom na Ge fotodiodu.



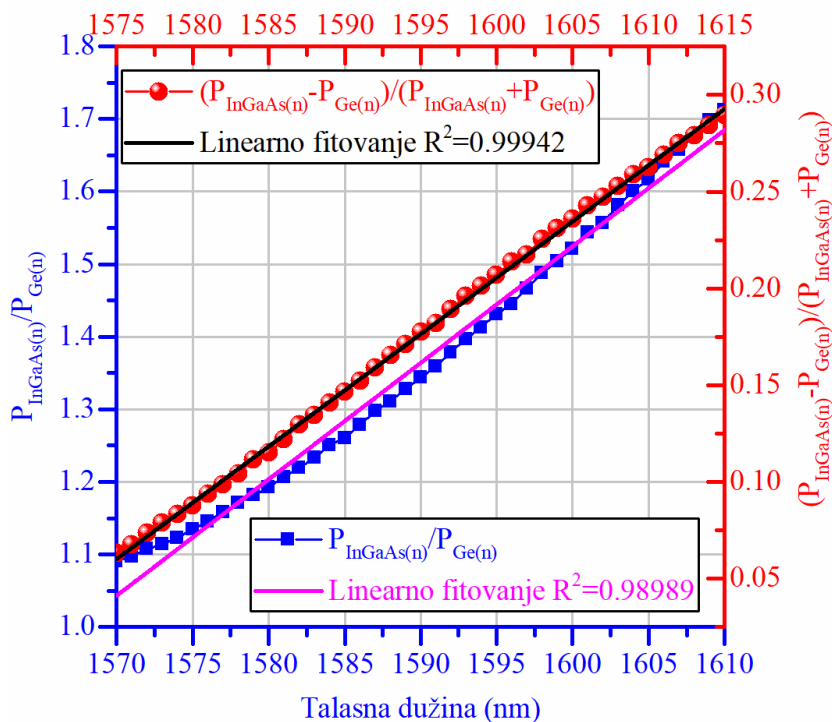
Slika 6.14 P_{Ge} , P_{InGaAs} , i $(P_{InGaAs(n)} - P_{Ge(n)}) / (P_{InGaAs(n)} + P_{Ge(n)})$ karakteristike u zavisnosti od talasne dužine u opsegu od 1525 do 1630 nm

Pažljivim ispitivanjem karakteristike senzora u 1525-1630 nm opsegu talasnih dužina, primećeno je da senzor postiže najveći nivo linearnosti u opsegu od 1575 nm do 1615 nm (L-opseg). Izvršeno je ponovno merenje, pri čemu je talasna dužina lasera pomerana od 1575 nm do 1615 nm u koracima od 1 nm. Izmerene vrednosti optičkih snaga P_{Ge} i P_{InGaAs} , kao i njihov odnos u skladu sa jednačinom (6.6) su prikazane na slici 6.15. Iako je postignuta visoka linearnost od $R^2=0.99942$, radi poboljšanja performansi senzora polinomijalno fitovanje je primenjeno na $(P_{InGaAs(n)} - P_{Ge(n)}) / (P_{InGaAs(n)} + P_{Ge(n)})$ karakteristiku sa $R^2=0.9999$. Prenosna karakteristika dobijena korišćenjem polinomijalnog fitovanja će se koristiti za proračun talasne dužine mernih parametara.



Slika 6.15 P_{Ge} , P_{InGaAs} , i $(P_{InGaAs(n)} - P_{Ge(n)}) / (P_{InGaAs(n)} + P_{Ge(n)})$ karakteristike u zavisnosti od talasne dužine u opsegu od 1575 do 1615 nm

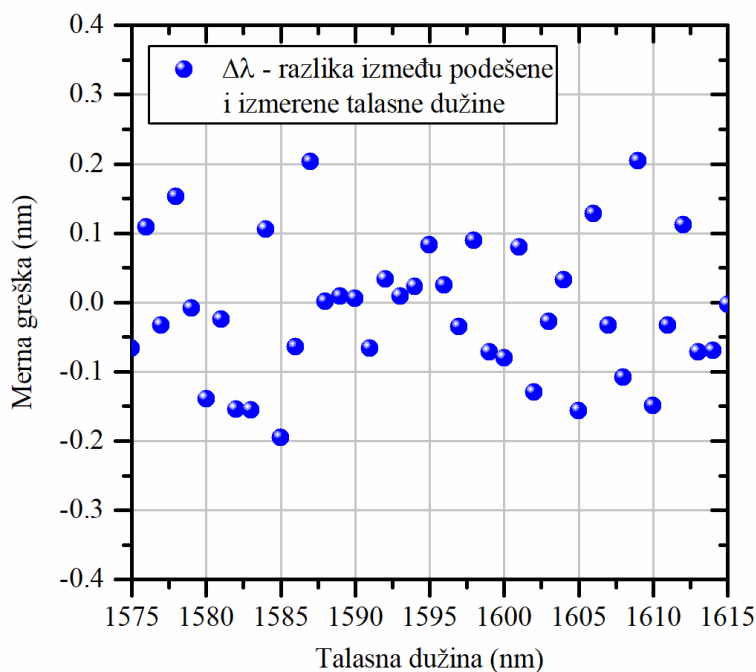
Na slici 6.16 dato je poređenje karakteristike dobijene u radu [161] na osnovu jednačine (6.5) i karakteristike senzorskog sistema dobijene korišćenjem poboljšane jednačine (6.6).



Slika 6.16 Poređenje prethodno dobijene karakteristike prikazane u [161] i poboljšane karakteristike dobijene primenom jednačine (6.6)

Na slici 6.16 jasno se vidi da se linearnost senzorske karakteristike značajno povećala u poređenju sa prethodno dobijenim rezultatima [161], što predstavlja važno poboljšanje. Ovo poboljšanje se može delom pripisati pomeranju opsega talasnih dužina od 1570 do 1610 nm na 1575-1615 nm, što je dovelo do porasta linearnosti sa $R^2=0.98989$ na $R^2=0.99503$. Drugi faktor koji ima veliki uticaj na poboljšanje linearnosti karakteristike senzora je primena poboljšane formule za normalizaciju (6.6), tako da je konačna linearnost karakteristike senzorskog sistema $R^2=0.99942$.

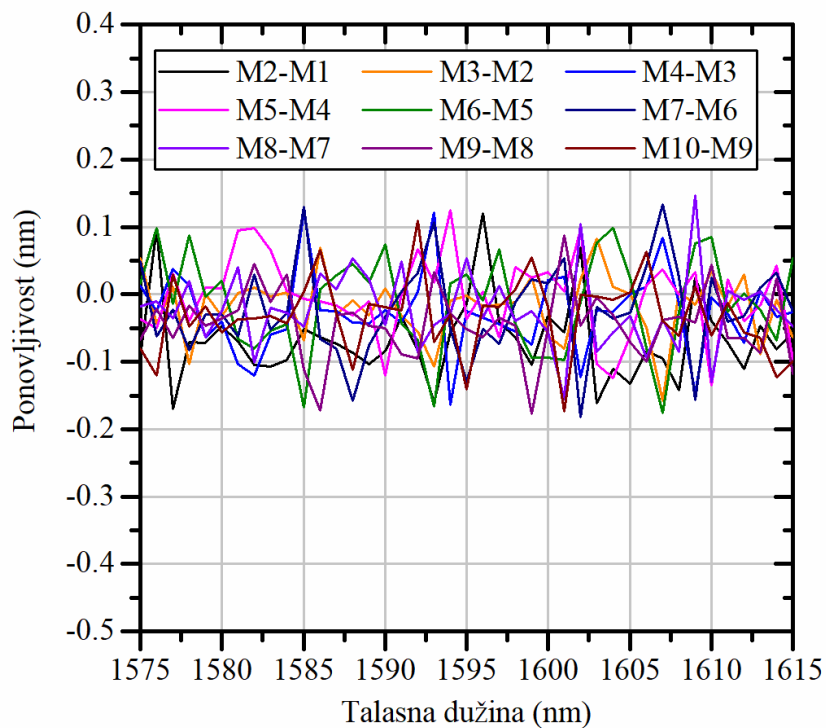
Na slici 6.17 prikazana je greška merenja predloženog senzorskog sistema u spektralnom opsegu od 1575 do 1615 nm. Kao i karakteristika senzora, greška merenja je snimana u koracima od po 1 nm. Dobijena greška merenja iznosi ± 0.2 nm. Pretpostavka je da se može dobiti čak i manja greška, projektovanjem namenskog uređaja koji bi integrisao i fotodetektore i obradu signala.



Slika 6.17 Greška merenja u opsegu od 1575 do 1615 nm

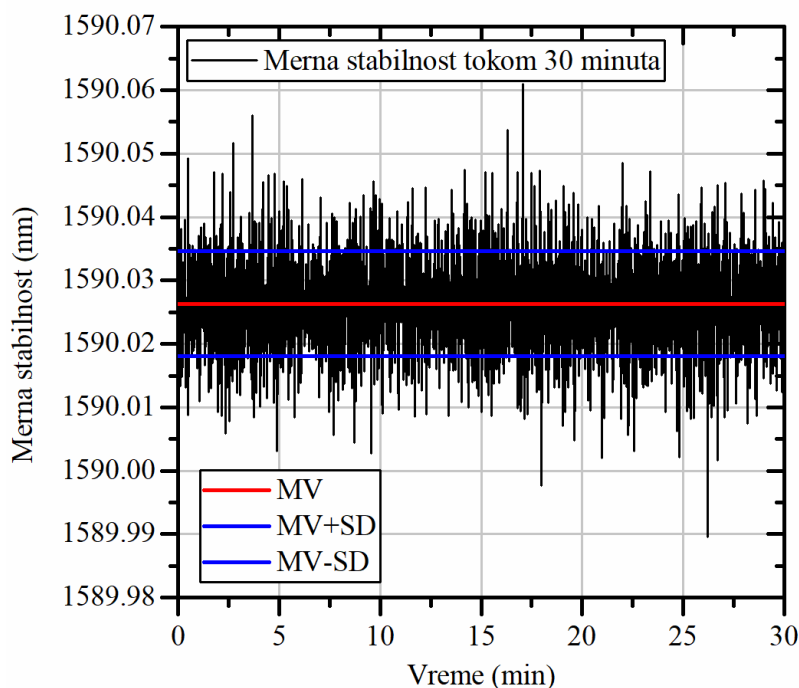
Kako bismo obezbedili visoku pouzdanost senzorskog sistema, testirana je ponovljivost za veći broj merenja. Ponovljivost senzora se dobija merenjem karakteristike senzora deset puta duž 1575-1615 nm opsega u koracima od po 1 nm pod istim uslovima. Isti uslovi podrazumevaju da se karakteristika senzora meri na istoj temperaturi, i da je fiber-optička račva postavljena na isti način u odnosu na izvor svetlosti i fotodiode (spojevi optičkog vlakna sa svetlosnim izvorom i fotodiodama su isti za sva merenja). Postignuta je visoka ponovljivost senzorskog sistema, a razlike u očitavanju talasne dužine za deset ponovljenih uzastopnih

merjenja su prikazane na slici 6.18. Kao što se može videti na slici 6.18, ponovljivost merjenja je u opsegu ± 0.16 nm.



Slika 6.18 Razlike u očitavanju talasne dužine svetlosti za deset uzastopnih merenja

Snimanjem stabilnosti merenja tokom 30 minuta (slika 6.19), izračunali smo da je merna rezolucija razvijenog senzora oko 17 pm, odnosno dve standardne devijacije, sa nivoom pouzdanosti od približno 95%.



Slika 6.19 Vremenska stabilnost senzorskog sistema snimana tokom 30 minuta (MV – srednja vrednost; SD-standardna devijacija)

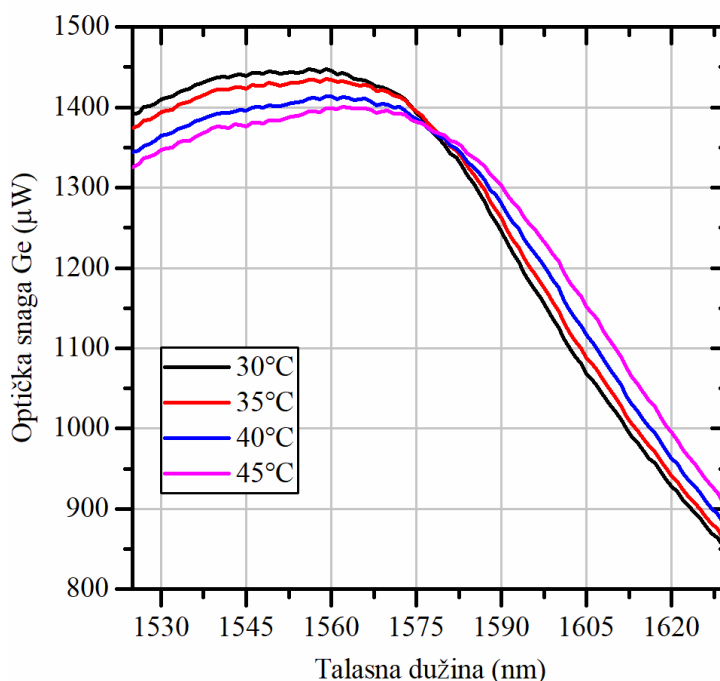
Pošto se u predloženom senzorskom sistemu koriste dva potpuno nezavisna merila optičke snage opšte namene (proizvođača Keysight Technologies Inc. i Thorlabs Inc.) i kako se obrada signala vrši nakon što merila optičke snage završe sa procesom prikupljanja mernih podataka, brzina odziva trenutne eksperimentalne postavke je relativno niska. Međutim, potencijalna brzina je veoma visoka, praktično ograničena samo vremenom odziva fotodetektora, što će biti predmet daljih istraživanja nakon projektovanja namenskog uređaja za merenje talasne dužine svetlosti.

6.3.2 Uticaj temperature na karakteristiku senzora

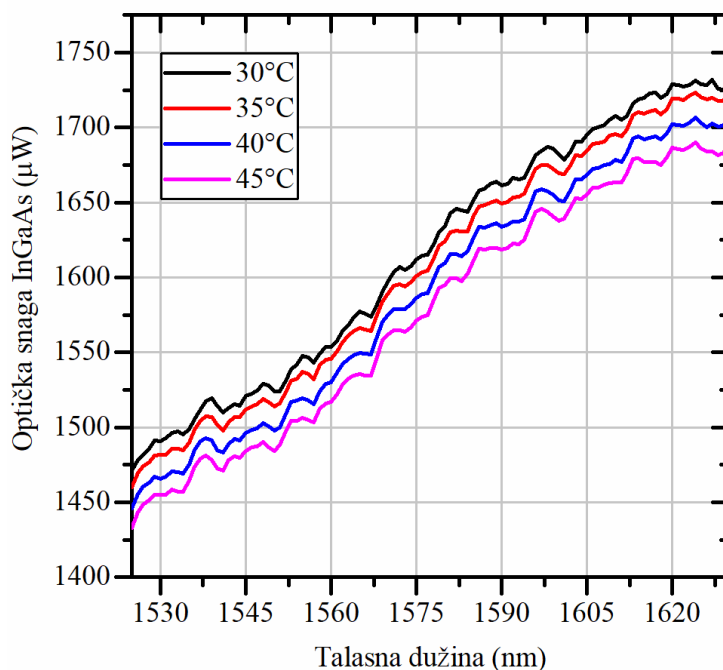
Senzorski sistem podrazumeva korišćenje Ge i InGaAs fotodetektora, koji su poluprovodnički materijali i kao takvi su veoma osetljivi na promene temperature. Iz tog razloga, razumno je očekivati da će ceo senzorski sistem za praćenje talasne dužine svetlosti zavisiti od promene temperature. Opseg radne temperature senzorskog sistema za praćenje talasne dužine svetlosti zavisi od graničnih vrednosti radnih temperatura fotodioda. Radna temperatura InGaAs 81624B optičke glave je od 0°C do 40°C, dok S122B optička glava sa Ge fotodiodom pokazuje dobru stabilnost rada u temperaturnom opsegu 5-40°C. Međutim, doneta je odluka da se testiraju granice ovih opsega izvođenjem merenja od 30°C do 45°C u koracima

od po 5°C. Na osnovu podataka iz literature (slika 5.11), može se očekivati da se porastom temperature granične talasne dužine InGaAs i Ge fotodiode blago pomere ka većim talasnim dužinama. Očekuje se da će se u opsegu 1575-1615 nm samo spektralna karakteristika Ge fotodiode značajnije promeniti, dok se granična talasna dužina InGaAs fotodiode nalazi izvan ispitivanog spektralnog opsega. Takođe, očekuje se da odnos sprezanja korišćene fiber-optičke račve neće pretrpeti značajniju promenu u zavisnosti od temperature, što je eksperimentalno i potvrđeno.

Spektralne karakteristike (normalizovane optičke snage u datom opsegu talasnih dužina) Ge i InGaAs fotodiode snimljene na nekoliko različitih temperatura, prikazane su na slici 6.20 i slici 6.21.



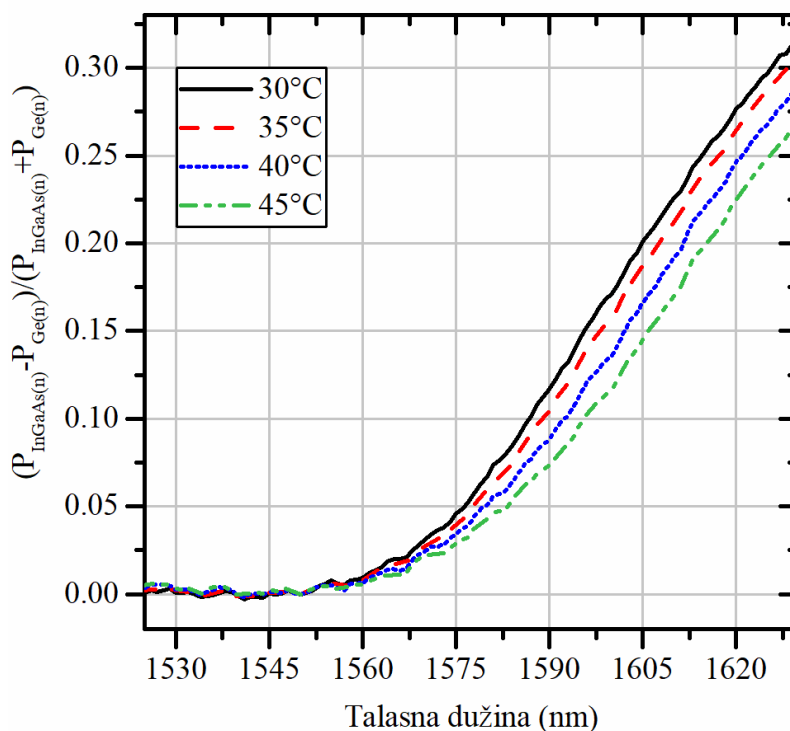
Slika 6.20 $P_{Ge(n)}$ spektralna zavisnost od temperature



Slika 6.21 $P_{\text{InGaAs}(n)}$ spektralna zavisnost od temperature

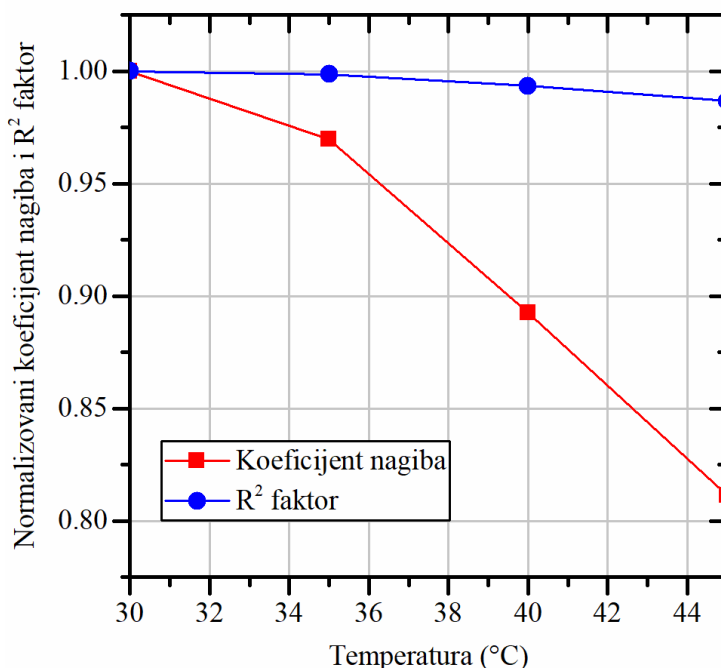
Sa slike 6.20 može da se primeti da se signal optičke snage Ge fotodiode ponaša u skladu sa očekivanjima, odnosno granična talasna dužina se pomera ka većim talasnim dužinama sa porastom temperature. Kod InGaAs karakteristika na slici 6.21 uočava se pad optičke snage sa porastom temperature, bez promene granične talasne dužine.

Spektralna osetljivost celog senzorskog sistema u zavisnosti od temperature prikazana je na slici 6.22. Kod ove spektralne karakteristike dolazi do pomeraja granične talasne dužine ka višim talasnim dužinama sa porastom temperature, što je rezultat zavisnosti spektralnih karakteristika obe fotodiode od temperature.



Slika 6.22 $(P_{\text{InGaAs}(n)} - P_{\text{Ge}(n)}) / (P_{\text{InGaAs}(n)} + P_{\text{Ge}(n)})$ spektralna karakteristika u zavisnosti od temperature

U 1575-1615 nm opsegu talasnih dužina koji je izabran kao optimalan za rad senzorskog sistema, karakteristike date na slici 6.22 su linearno fitovane kako bi se dalje proučile promene linearnosti i nagiba u zavisnosti od temperature. Dobijeni koeficijent nagiba se menja od 0.0053 na 30°C do 0.0043 na 45°C, dok linearnost opada, odnosno R^2 faktor se menja od 0.99901 na 30°C do 0.98575 na 45°C. Kako bi se mogli uporediti trendovi ovih promena, vrednosti koeficijenta nagiba i R^2 faktora su normalizovane u odnosu na njihove vrednosti na 30°C. Na slici 6.23 prikazana je zavisnost koeficijenta nagiba i R^2 faktora od temperature.

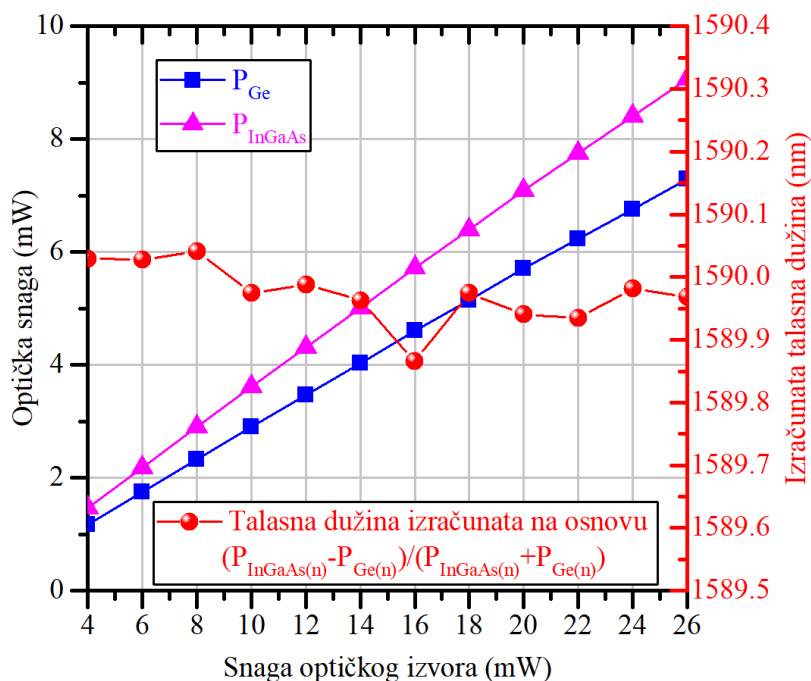


Slika 6.23 Karakteristike nagiba i R² faktora u zavisnosti od temperature

U slučaju razvijenog senzorskog sistema, metode za kompenzaciju temperaturne osetljivosti mogu da budu i softverske (matematička obrada signala) i hardverske (npr. uvođenjem temperaturno osetljivog otpornika). Međutim, optimalno rešenje bi bila regulacija radne temperature, pošto na taj način može da se garantuje visoka osetljivost i dobra linearnost merenja talasne dužine svetlosti.

6.3.3 Uticaj snage svetlosnog izvora

Na slici 6.24 je prikazan uticaj snage optičkog izvora na merenje talasne dužine svetlosti zasnovano na merenju odnosu snaga. Snaga podesivog lasera se menja u koracima od po 2 mW u opsegu od 4 do 26 mW, dok se talasna dužina lasera održava konstantnom na 1590 nm. Na slici se može videti da i optička snaga Ge fotodiode P_{Ge} i optička snaga InGaAs fotodiode P_{InGaAs} linearno rastu sa porastom optičke snage izvora. Talasna dužina izračunata korišćenjem $(P_{InGaAs(n)} - P_{Ge(n)}) / (P_{InGaAs(n)} + P_{Ge(n)})$ jednačine u zavisnosti od optičke snage izvora ima odličnu stabilnost ± 0.1 nm u opsegu 4-26 mW. Za snage optičkog izvora iznad 26 mW dolazi do zasićenja optičkih glava sa fotodiodama.



Slika 6.24 Uticaj optičke snage izvora na merenje talasne dužine svetlosti

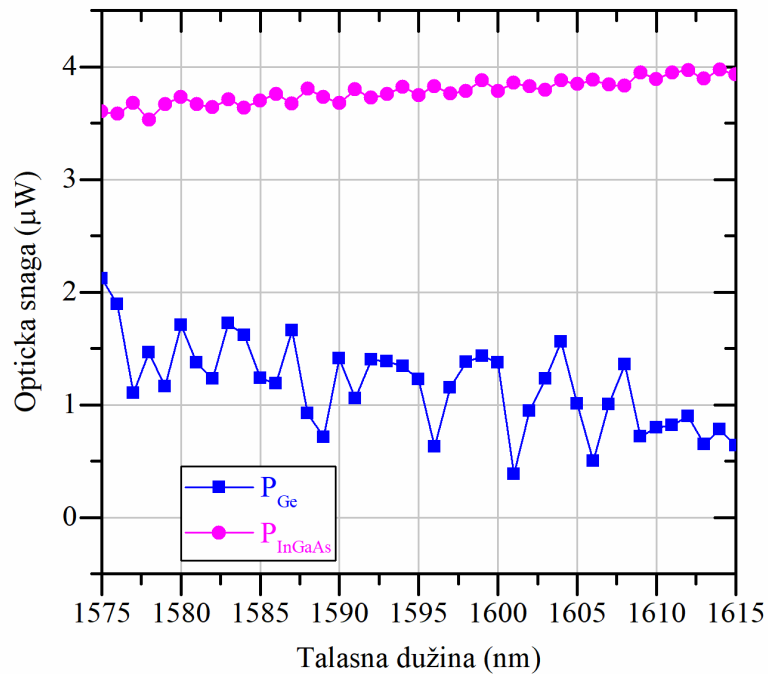
Predloženi senzorski sistem takođe može da se koristi za praćenje optičke snage monohromatskog izvora. Kako bi se tačno izmerila snaga korišćenjem Ge ili InGaAs fotodiode, radna talasna dužina (talasna dužina izvora svetlosti) mora biti poznata i koristi se za kompenzaciju spektralnih osetljivosti poluprovodničkih fotodetektora. Kako je predloženi senzorski sistem prvenstveno namenjen za merenje talasne dužine upadne svetlosti, lako se može postići tačno merenje snage optičkog izvora, nezavisno od nivoa snage upadne svetlosti i bez obzira na njenu talasnu dužinu.

6.3.4 Uticaj šuma

Pošto Ge fotodiode ima značajno manju paralelnu otpornost u odnosu na InGaAs fotodiode, očekuje se da će pokazati visok nivo Džonsonovog šuma. Ovaj šum, izazvan termalnim kretanjem elektrona dodatno raste sa porastom temperature. S obzirom na to da ima veću vrednost struje mraka u poređenju sa InGaAs fotodiode, kod Ge fotodiode se takođe javlja i šum sačme. Kako bi smanjili nivo šuma primenjeno je usrednjavanje na podatke očitane sa Ge fotodiode, ali ipak je ostao visok nivo šuma.

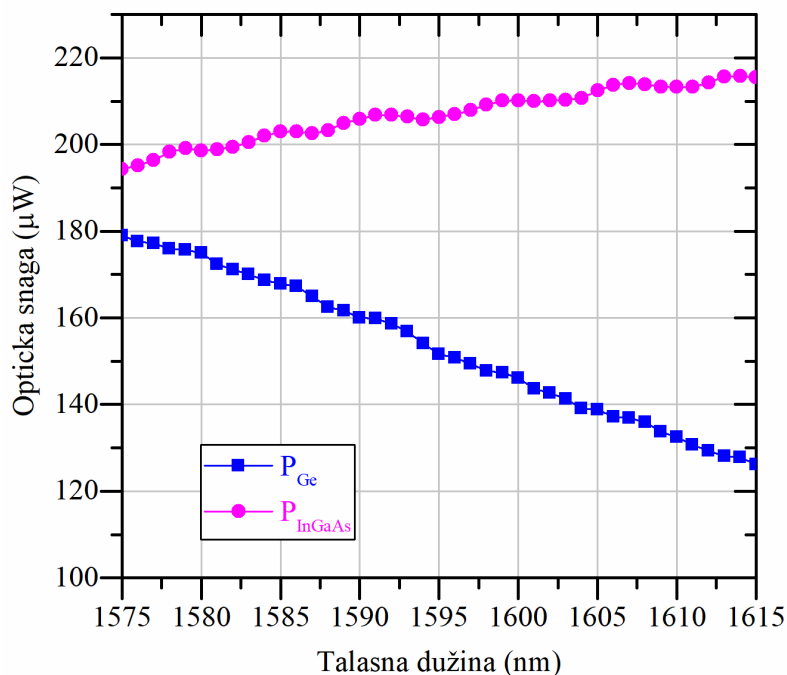
U daljim istraživanjima ispitan je uticaj niske snage optičkog izvora na izlazne signale Ge i InGaAs fotodiode. P_{Ge} i P_{InGaAs} su merene kada je optička snaga lasera reda μW i par stotina μW . Minimalna snaga koju laser može da emituje je 4 mW, tako da su niske vrednosti snage

(reda μW i par stotina μW) dobijene namernim unošenjem velikih gubitaka na spoju lasera i fiber-optičke račve. Na slici 6.25 su date izmerene optičke snage P_{Ge} i P_{InGaAs} za snage svetlosnog izvora reda μW .



Slika 6.25 Izmerene optičke snage P_{Ge} i P_{InGaAs} za snage svetlosnog izvora reda μW

Na slici 6.26 su date P_{Ge} i P_{InGaAs} za snage optičkog izvora reda stotinu μW .



Slika 6.26 P_{Ge} i P_{InGaAs} za niske nivoe snage svetlosnog izvora reda stotina μW

Sa slike 6.25 se može videti da je pri slaboj upadnoj svetlosti reda μW , odnos signal-šum (SNR, eng. *signal-to-noise ratio*) veoma nizak, odnosno šum postaje dominantan naročito u slučaju Ge fotodiode, kao što je i očekivano. Ovaj šum uključuje i šum koji potiče od optičkog izvora i šum koji unose fotodetektor. Kada je snaga upadne svetlosti dva reda viša (iznad $100 \mu W$), uticaj šuma postaje manje dominantan, iako je njegov nivo ostao isti kao u slučaju kada je snaga reda μW . SNR je mnogo bolji, što čini ovaj nivo upadne snage odgovarajućim za merenja talasne dužine svetlosti. Takođe, fluktuacije P_{Ge} i P_{InGaAs} signala su sada sinhronizovane i prilično slične amplitude, što ukazuje na to da su fluktuacije snage lasera njihov glavni uzrok.

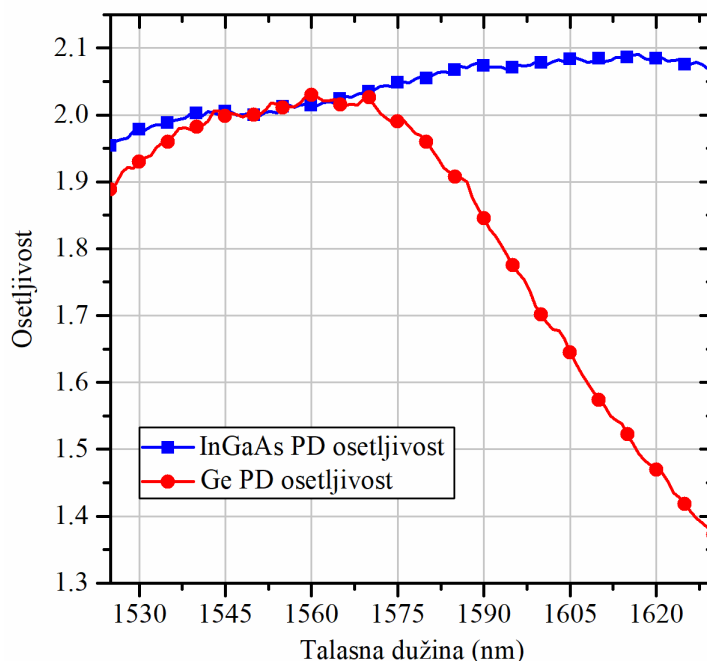
6.4 Istovremena karakterizacija spektralnih karakteristika fiber-optičke račve i fotodetektora

Metoda merenja talasne dužine monohromatske svetlosti predložena u ovoj disertaciji pored osnovne funkcionalnosti merenja talasne dužine i sekundarne merenja snage optičkog izvora, ima i dodatnu vrednost. Naime, predložena metoda se može koristiti za istovremenu karakterizaciju spektralnih karakteristika fiber-optičke račve i dva različita poluprovodnička fotodetektora.

Karakterizacija fiber-optičke račve se obično izvodi korišćenjem podesivog svetlosnog izvora, kao što je kombinacija LED diode ili obične električne sijalice i podesivog optičkog filtra, na ulazu i optičkih merača snage na izlaznim krajevima [128]. Pomoći četiri optička merača snage može se odrediti odnos sprezanja, uneseno slabljenje, usmerenost i reflektovanu optičku snagu 2×2 direkcione fiber-optičke račve. Tipična eksperimentalna postavka za karakterizaciju osetljivosti fotodetektora podrazumeva optički izvor sa podesivom talasnom dužinom (npr. podesivi laser) i promenljivi prigušivač optičkog signala (eng. *attenuator*), na ulazu fotodetektora, i transimpedansni pojačavač, voltmetar i osciloskop, na izlazu fotodetektora [128].

Pomoću eksperimentalne postavke predložene metode merenja talasne dužine monohromatske svetlosti mogu se odrediti odnos sprezanja fiber-optičke račve i osetljivosti dva različita fotodetektora. Na osnovu malih varijacija eksperimentalne postavke prikazanih na slici 6.9 i slici 6.10 (početna i obrnuta postavka fiber-optičke račve) i naknadnog proračuna odnosa sprezanja datog u odeljku 6.3.1, dobija se spektralna karakteristika odnosa sprezanja korišćene fiber-optičke račve (slika 6.11).

Ako su poznate spektralna karakteristika celokupnog sistema za merenje talasne dužine svetlosti (tj. sistema za istovremenu karakterizaciju spektralnih karakteristika optičke račve i fotodetektora) P_{Ge} i P_{InGaAs} i spektralna karakteristika odnosa sprezanja fiber-optičke račve, spektralne karakteristike dva različita fotodetektora se mogu vrlo jednostavno izračunati. Na slici 6.27 su prikazane izračunate spektralne karakteristike osetljivosti Ge i InGaAs fotodioda, koje su korišćene u ovoj konkretnoj eksperimentalnoj postavci, ali isti princip važi i za druge tipove fotodioda (Si, GaP i druge).



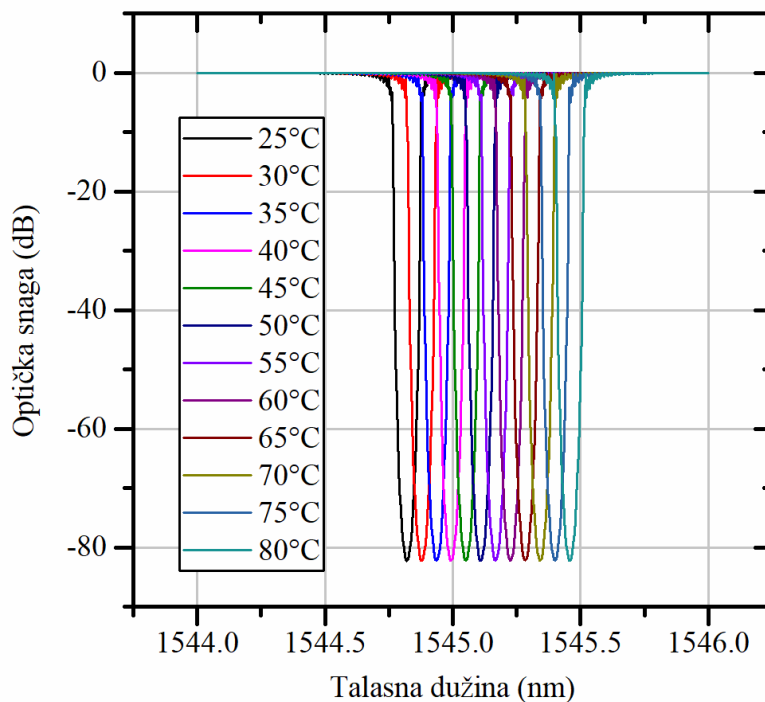
Slika 6.27 Izračunate osetljivosti InGaAs i Ge fotodioda (PD – fotodioda)

6.5 Analiza primene predložene metode za ispitivanje FBG senzora

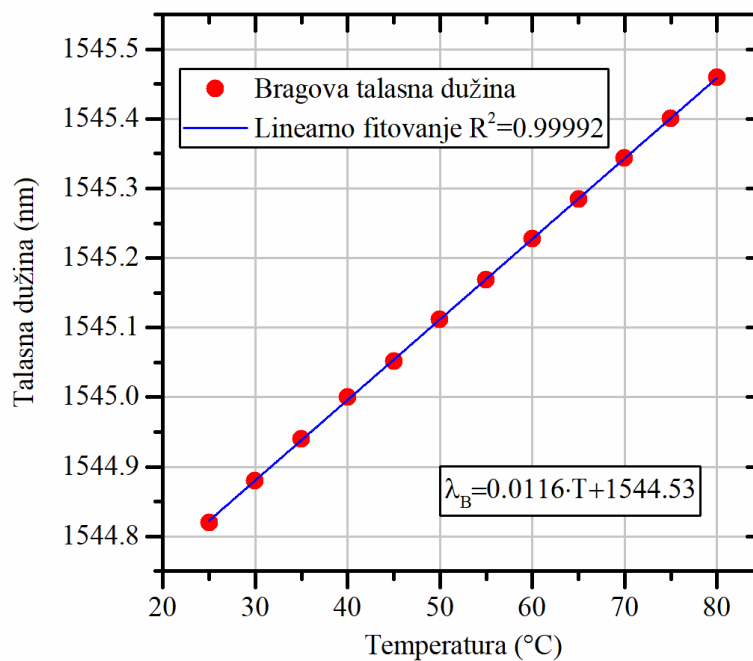
Na osnovu same prirode eksperimentalne postavke (slika 6.3) pokazano je da se predložena metoda može koristiti za praćenje talasnih dužina laserskih izvora. Kako nije postojala mogućnost da se ova metoda eksperimentalno verifikuje za primenu ispitivanja FBG senzora, u daljem tekstu izvršena je teorijska analiza upotrebljivosti predložene metode za ispitivanje FBG senzora temperature.

6.5.1 Simulacija

Simulacija FBG senzora temperature je izvršena pomoću OptiGrating softvera proizvođača Optiwave. Korišćeni su podaci za standardno monomodno optičko vlakno (SMF, eng. *singlemode fiber*), sa prečnikom jezgra od $9\ \mu\text{m}$ i prečnikom omotača vlakna od $125\ \mu\text{m}$, a temperatura je podešena na 25°C . U daljem tekstu izvršene su simulacije ponašanja optičkog vlakna sa Bragovom rešetkom sa promenom temperature. Ovo je idealna situacija pošto u praksi često dolazi do istovremene promene temperature i naprezanja. Temperatura je menjana od 25°C do 80°C , u koracima od po 5°C . Koefficient temperaturnog širenja je podešen na $\alpha_\lambda = 0.5 \cdot 10^{-6} 1/K$, a termo-optički koefficient na $\alpha_n = 7 \cdot 10^{-6} 1/K$. Na slici 6.28 prikazana je promena propuštenog (transmitovanog) spektra u zavisnosti od talasne dužine upadne svetlosti, dok je na slici 6.29 prikazana zavisnost Bragove talasne dužine od promene temperature.



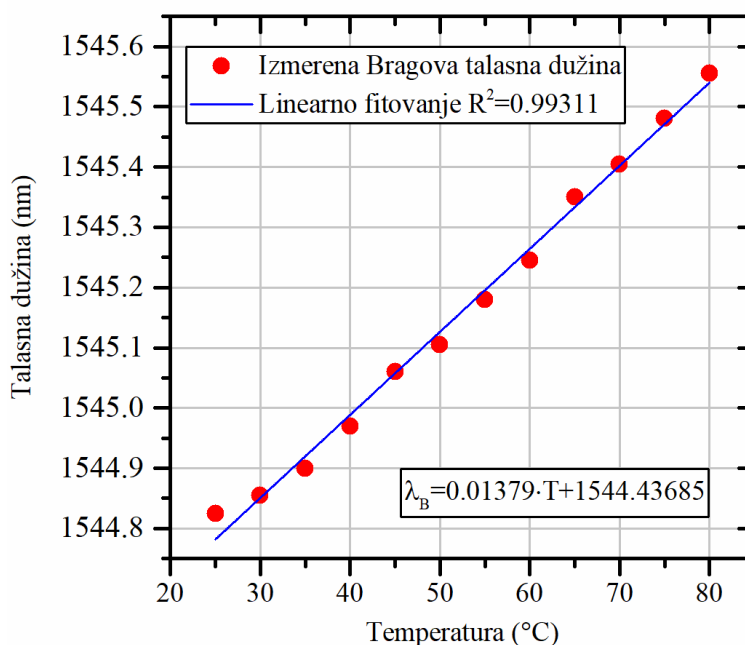
Slika 6.28 Zavisnost propuštenog spektra (transmisije) od temperature



Slika 6.29 Zavisnost Bragove talasne dužine od temperature

6.5.2 Merenje pomoću širokopoljnog svetlosnog izvora i spektralnog analizatora

Postoje dve osnovne metode za ispitivanje talasne dužine optičkih vlakana sa Bragovom rešetkom koje su ukratko opisane u Poglavlju 2.2. U Laboratoriji za optoelektroniku Fakulteta tehničkih nauka izvršena su merenja Bragove talasne dužine za različite vrednosti temperature pomoću širokopoljnog svetlosnog izvora i optičkog spektralnog analizatora (slika 2.15). Kao širokopoljni svetlosni izvor korišćena je superluminescentna dioda koja emituje svetlost centralne talasne dužine na 1550 nm u opsegu većem od 100 nm. Deo optičkog vlakna sa Bragovom rešetkom postavljen je u temperaturnu komoru, gde je vršeno podešavanje temperature od 25 do 80°C u koracima od po 5°C. Na slici 6.30 prikazana je promena Bragove talasne dužine FBG senzora u zavisnosti od promene temperature dobijena na osnovu rezultata merenja.



Slika 6.30 Izmerena Bragova talasna dužina u zavisnosti od temperature

Na osnovu simulacije i izmerenih rezultata, može se zaključiti da je u oba slučaja postignuta odlična linearnost ($R^2=0.99992$ prilikom simulacije, $R^2=0.99311$ prilikom merenja) i dobijene su slične osetljivosti FBG senzora za merenje temperature (11.6 pm/°C za simulaciju, 13.8 pm/°C za merenja). Prema tome, prilikom merenja temperature rezoluciji od 1°C odgovara promena Bragove talasne dužine od približno 14 pm.

Metoda predložena u ovoj doktorskoj disertaciji nudi mernu rezoluciju od 17 pm. Ova veličina je uporediva sa rezolucijom FBG kao senzora temperature (približno 14 pm). Prema tome, razvijen senzorski sistem se može primeniti za očitavanje promena temperature od

približno 1.31 °C. Prilikom ove analize, treba imati u vidu da su ovo najviše vrednosti, dobijene na osnovu senzorskog sistema u trenutnom stanju. Daljom optimizacijom i minijaturizacijom merne postavke, očekuje se postizanje dosta boljih mernih parametara.

7 DISKUSIJA

U ovom poglavlju prikazana je diskusija rezultata dobijenih u okviru istraživanja vezanih za ovu doktorsku disertaciju.

Motivacija za istraživanja predstavljena u ovoj disertaciji proizašla je iz potrebe za preciznim i pouzdanim merenjem talasne dužine monohromatske svetlosti kod laserskih izvora u okviru DWDM sistema, kao i za očitavanje promene merne veličine kod optičkih senzora, pre svega FBG senzora. Tokom poslednjih godina, istraživanja su u velikoj meri orijentisana ka razvoju integrisanih pasivnih sistema za ispitivanje talasne dužine. Kod pasivnih metoda za merenje talasne dužine svetlosti važno je postići kompromis između rezolucije merenja i širine mernog opsega. Senzor predstavljen u [106] nudi visoku brzinu merenja talasne dužine, po niskoj ceni, jednostavnu konfiguraciju i širok merni opseg od 100 nm, ali po ceni ograničene rezolucije, manje oko 50 pm. Problem niske rezolucije je rešen u [107], gde je dobijena rezolucija od 10 pm u mernom opsegu širine 100 nm, ali ovo je postignuto sa sistemom niske brzine odziva, visoke cene i velike kompleksnosti. S druge strane, nedavno predstavljen senzorski sistem baziran na AWG rešetki [110] ima odličnu rezoluciju od 0.32 pm, ali malu širinu mernog opsega od samo 10 nm i nisku brzinu odziva. Slična situacija je i kod senzora opisanih u [115] [103], koji imaju rezoluciju 5 pm u [115] i 0.3 pm u [103], ali širina opsega merenja je približno samo 1 nm [115] [103]. Kod aktivnih metoda za ispitivanje talasne dužine na bazi FP filtra [97] javlja se ista situacija, pri čemu je rezolucija 2 pm, ali merni opseg je ograničen na manje od 1 nm. Kod senzora koji uspevaju da postignu i visoku rezoluciju i širok merni opseg, brzina odziva je kritično niska, kao što je slučaj u [96].

U doktorskoj disertaciji je predstavljen princip rada spektralno osetljivih optičkih komponenti, odnosno fiber-optičke račve i fotodioda. Detaljno je objašnjena zavisnost odnosa sprezanja fiber-optičke račve od talasne dužine ulazne svetlosti, kao i zavisnost osetljivosti fotodioda od talasne dužine ulazne svetlosti. Senzori talasne dužine svetlosti čiji princip rada se zasniva na zavisnosti odnosa sprezanja optičke račve [65] [66] [106] ili na osnovu zavisnosti osetljivosti fotodioda [23] od talasne dužine upadne svetlosti su poznati od ranije.

U ovoj doktorskoj disertaciji predložena je nova metoda merenja talasne dužine monohromatske svetlosti primenom spektralno osetljivih optičkih komponenti, odnosno fiber-optičke račve i dva različita fotodetektora. Izvršena je simulacija zavisnosti odnosa sprezanja optičke račve od talasne dužine ulazne svetlosti. Dobijeni rezultati se slažu sa teorijskom analizom, tj. odnos sprezanja se menja prostoperiodično sa promenom talasne dužine ulazne svetlosti. Na osnovu predložene metode razvijen je senzorski sistem za merenje talasne dužine monohromatske svetlosti na osnovu 2x2 fiber-optičke račve, i germanijumske (Ge) i indijum-galijum-arsenid (InGaAs) fotodiode. Ge i InGaAs fotodiode su izabrane u cilju dobijanja

senzora talasnih dužina monohromatske svetlosti u SWIR opsegu. Takođe je izveden proračun odnosa sprezanja na osnovu predstavljene nove metode, uz male modifikacije eksperimentalne postavke. Izračunati rezultati za odnos sprezanja se veoma dobro poklapaju sa rezultatima dobijenim simulacijom na talasnim dužinama većim od 1550 nm. Opisan senzorski sistem ima približno linearnu karakteristiku ($R^2=0.99942$) u opsegu talasnih dužina od 1575 do 1615 nm, koji je od velikog značaja za optičke komunikacije (L-opseg), kao i za veliki broj optičkih senzora. Na osnovu merenja stabilnosti senzorskog sistema tokom 30 minuta, izračunata je merna rezolucija od 17 pm. Brzina odziva opisanog senzorskog sistema je relativno niska, usled korišćenja dva potpuno nezavisna merila optičke snage, i zato što se obrada signala vrši tek nakon što merila optičke snage završe sa procesom prikupljanja mernih podataka. Za razliku od brzine odziva predstavljene eksperimentalne postavke, potencijalna brzina je veoma visoka i praktično ograničena samo vremenom odziva fotodetektora.

Prilikom istraživanja na ovoj doktorskoj disertaciji, poseban naglasak je stavljen na proučavanje pouzdanosti razvijenog senzorskog sistema za merenje talasne dužine monohromatske svetlosti. Na osnovu rezultata merenja dobijena je merna greška od ± 0.2 nm i veoma dobra ponovljivost ± 0.16 nm. Detaljno je ispitan uticaj temperature okruženja na karakteristike razvijenog senzorskog sistema. U predloženom mernom opsegu 1575-1615 nm, granična talasna dužina prenosne karakteristike senzorskog sistema se sa porastom temperature pomera ka višim talasnim dužinama, što je u skladu sa teorijskom analizom zavisnosti spektralnih karakteristika Ge i InGaAs fotodioda od temperature. Za kompenzovanje ove temperaturne osetljivosti predloženo je korišćenje softverskih (matematička obrada signala) ili hardverskih metoda (primena senzora temperature). Svakako, najbolje rešenje bi bila kontrola temperature.

Takođe je ispitan uticaj snage svetlosnog izvora, odnosno njenih fluktuacija, na prenosnu karakteristiku senzorskog sistema. Na osnovu rezultata merenja zaključeno je da u opsegu 4-26 mW snage optičkog izvora, merenje talasne dužine pokazuje odličnu stabilnost ± 0.1 nm.

U daljem istraživanju ispitan je i uticaj šuma fotodioda i fluktuacija snage optičkog izvora za niske vrednosti snage optičkog izvora (reda veličine μW i stotinu μW) na merenje talasne dužine monohromatske svetlosti. Na osnovu mernih rezultata može se zaključiti da je SNR veoma nizak, odnosno šum je dominantan za ulazne snage reda μW , dok je za optičke snage reda stotinu μW SNR mnogo bolji, odnosno uticaj šuma je dosta manji. Ovo ukazuje da je nivo ulazne snage reda stotinu μW i veći odgovarajući za merenje talasne dužine svetlosti.

Senzorski sistem razvijen u ovoj disertaciji omogućava kompromis između postizanja visoke merne rezolucije i širokog mernog opsega, nudeći rezoluciju od 17 pm, koja je uporediva sa ranije opisanim novijim rešenjima i merni opseg širine 40 nm. Pored toga, važne prednosti senzorskog sistema su jednostavna konfiguracija eksperimentalne postavke, niska

cena, kao i postizanje jednake ili veće brzine odziva u odnosu na prethodno opisane senzorske sisteme. U Tabeli 5 dat je detaljan uporedni pregled senzora opisanih u savremenoj literaturi i senzorskog sistema predstavljenog u ovoj disertaciji.

Tabela 5 Poređenje karakteristika savremenih senzora za merenje malih promena talasne dužine i senzorskog sistema predstavljenog u ovoj disertaciji

Senzor	Ref.	Cena	Brzina	Rezolucija	Radni opseg	Kompleksnost konfiguracije	Tip
FP filter	[96]	visoka	niska	2.4 pm	70 nm	kompleksna	aktivni
	[97]	visoka	srednja	< 2 pm	< 1 nm	kompleksna	aktivni
Senzori na principu poklapanja reflektovanih spektara vlakana sa Bragovom rešetkom	[103]	niska	visoka	0.3 pm	< 1 nm	kompleksna	pasivni
Integrirani senzori	[106]	niska	visoka	< 50 pm	100 nm	jednostavna	pasivni
	[107]	visoka	niska	10 pm	100 nm	kompleksna	pasivni
	[115]	niska	visoka	5 pm	1.2 nm	jednostavna	pasivni
	[110]	srednja	niska	0.32 pm	10 nm	srednja	pasivni
Senzori na principu spektralne osetljivosti fototioda	[121]	niska	niska	< 10 pm	1 nm	jednostavna	pasivni
Senzor predstavljen u ovoj disertaciji		niska	visoka	17 pm	40 nm	jednostavna	pasivni

Predložene su dodatne primene predstavljene nove metode merenja talasne dužine monohromatske svetlosti za merenje snage monohromatskog optičkog izvora, kao i za istovremenu karakterizaciju spektralnih karakteristika fiber-optičke račve i dva različita fotodetektora. Takođe, pošto sama konfiguracija eksperimentalne postavke pokazuje mogućnost primene predložene nove metode za praćenje talasne dužine laserskih izvora, izvršena je teorijska analiza primene predložene metode za očitavanje promena talasne dužine kod FBG senzora. Izvršena je simulacija ponašanja optičkog vlakna sa Bragovom rešetkom sa promenom temperature, a dobijeni rezultati su upoređeni sa eksperimentalnim rezultatima dobijenim pomoću merne postavke sa širokopojasnim svetlosnim izvorom na ulazu FBG senzora temperature i optičkog spektralnog analizatora na izlazu FBG senzora temperature. Dobijene su slične osetljivosti u oba slučaja, a prilikom merenja temperature rezoluciji od 1°C odgovara promena Bragove talasne dužine od približno 14 pm, što je uporedivo sa rezolucijom razvijenog mernog sistema od 17 pm. Izveden je zaključak da se opisan senzorski sistem u trenutnom stanju može uspešno primeniti za merenje temperature sa rezolucijom od 1.31°C.

8 ZAKLJUČAK I DALJI PRAVCI ISTRAŽIVANJA

U ovoj doktorskoj disertaciji je predložena nova metoda merenja talasne dužine monohromatske svetlosti, odnosno razvijen je i testiran jednostavan i pouzdan senzorski sistem visoke osetljivosti za praćenje talasne dužine monohromatske svetlosti. U disertaciji je opisan princip rada senzora talasne dužine monohromatske svetlosti, zasnovan na kombinovanju spektralnih osetljivosti fiber-optičke račve i dve različite fotodiode, sa ciljem da se poveća osetljivost celog sistema. Senzor ima približno linearnu karakteristiku u mernom opsegu od 1575 do 1615 nm. Rezolucija merenja u navedenom mernom opsegu je 17 pm. Dobijena je greška merenja od ± 0.2 nm i veoma dobra ponovljivost merenja ± 0.16 nm.

Iako je cena opisane eksperimentalne postavke prilično visoka, sama ideja koja uključuje samo spektralno osetljive komponente (fiber-optičku račvu i fotodiode) nudi jeftin senzorski sistem. Predloženi senzor je pogodan za primene u sistemima optičkih komunikacija (DWDM sistemima), kao interogator FBG senzora za merenje različitih parametara od značaja u oblastima medicine, energetike, praćenja stanja građevinskih konstrukcija i mnogim drugim, i uopšte kod optičkih senzora zasnovanih na detekciji malih promena talasne dužine svetlosti.

Kao što je izloženo u prethodnim poglavljima, tokom proteklih godina razvijen je veliki broj metoda i senzorskih sistema za merenje talasne dužine svetlosti, međutim samo nekoliko ovih metoda se danas koristi u komercijalnim uređajima za ispitivanje talasne dužine svetlosti. Postojeća rešenja koja nude visoku rezoluciju, obično imaju dosta uzak merni opseg. Senzorski sistemi kod kojeg su ova dva zahteva usklađena imaju nisku brzinu odziva ili suviše kompleksnu konfiguraciju ili su veoma skupi.

Prednosti senzorskog sistema predloženog u ovoj disertaciji su visoka osetljivost, dobar kompromis između merne rezolucije od 17 pm i širine mernog opsega od 40 nm, visoka brzina odziva, niska cena i jednostavna konfiguracija. Rezultati koji su proistekli iz doktorske disertacije su objavljeni u naučnim radovima [164] [161] [165]:

- Ana V. Joža, Jovan S. Bajić, Lazo M. Manojlović, Vladimir A. Milosavljević, Branislav D. Batinić, Nikola M. Laković, Miloš B. Živanov, „*Design considerations and performance analysis of dual photodetector system for reliable laser wavelength and power monitoring*“, Sensors and Actuators A: Physical, 2017, Vol. 261, pp. 14-23, ISSN 0924-4247 (M21).
- Jovan S. Bajić, Lazo Manojlović, Branislav Batinić, Ana Joža, Nikola Laković, Miloš B. Živanov, „*Monitoring of the laser wavelength in modern fiber-optic communication systems using dual photodetectors*“, Optical and Quantum Electronics, Vol. 48, No. 6, art. 333, ISSN 0306-8919 (M23).

- Ana V. Joža, Jovan S. Bajić, Nikola M. Laković, Branislav B. Batinić, Vladimir A. Milosavljević, Živorad Mihajlović, Vladimir Rajs, „*Simultaneous Characterization of Bidirectional Coupler and Semiconductor Photodetectors Spectral Properties*“, 25th Telecommunications forum TELFOR 2017, Belgrade, November 21-22, 2017, pp. 900-903, ISBN: 978-1-5386-3072-3 (M33).

Ipak, opisano rešenje predstavlja samo dokaz hipoteze i proučavanje njegovih performansi, uključujući zavisnost od temperature, procenu nivoa šuma, rad u uslovima slabe svetlosti i druge. Potrebno je uvesti dalja poboljšanja kako bi se ispitale granice performansi sistema, kao što su moguća rezolucija, povećanje brzine odziva, kao i mogućnosti za smanjenje cene sistema. Takođe, umesto korišćenja komercijalno dostupnih merila optičke snage, ideja je da se dalje radi na razvijanju uređaja visoke preciznosti i brzine odziva koji bi uključivao i fotodetektore i obradu signala.

Plan je da se u budućim istraživanjima performanse predloženog senzora testiraju za ekperimentalne postavke sa FBG senzorom ili nizom od nekoliko FBG senzora. Ako se uzmu u obzir spektralne karakteristike Ge i InGaAs fotodioda date od strane proizvođača, druga ideja je da se ista ekperimentalna postavka (kao u ovoj doktorskoj disertaciji) testira za merenje talasne dužine svetlosti u oblasti drugog optičkog prozora, odnosno oko 1300 nm. U tom slučaju je potrebno da se uvedu određene promene ekperimentalne postavke: obrnuta postavka fiber-optičke račve (izlaznu granu račve sa opadajućim signalom treba povezati na InGaAs fotodiodu, a granu sa rastućim signalom na Ge fotodiodu) i korišćenje podesivog lasera koji ima opseg podešavanja u oblasti drugog optičkog prozora (npr. to bi mogao biti 81602A laserski modul od proizvođača Keysight Technologies Inc.). Takođe, interesantno bi bilo ispitati slučaj kad bi se u predloženoj senzorskoj konfiguraciji InGaAs fotodioda zamenila sa PbS ili PbSe fotoprovodnim detektorom, koji imaju negativan temperaturni koeficijent, što otvara mogućnost međusobne temperaturne kompenzacije sa Ge fotodiodom.

Princip rada razvijenog senzorskog sistema je veoma atraktivan imajući u vidu trendove razvoja optoelektronike, odnosno razvoj silicijumske fotonike. Rezultati istraživanja o razvoju i integraciji optičke račve [106], Ge [166] i InGaAs [167] fotodetektora na silicijumskom supstratu ili na silicijum-na-izolatoru (SOI, eng. *silicon-on-insulator*) supstratu su već predstavljeni i očekuje se da će u bliskoj budućnosti biti moguća integracija i Ge i InGaAs fotodetektora na istom supstratu [168], što će verovatno biti silicijumski supstrat ili SOI.

9 LITERATURA

- [1] P. Bhatia and B. D. Gupta, "Surface-plasmon-resonance-based fiber-optic refractive index sensor: sensitivity enhancement," *Appl. Opt.*, vol. 50, no. 14, pp. 2032–2036, 2011.
- [2] J. Kou, S. Qiu, F. Xu, and Y. Lu, "Demonstration of a compact temperature sensor based on first-order Bragg grating in a tapered fiber probe," *Opt. Express*, vol. 19, no. 19, pp. 18452–18457, 2011.
- [3] B. B. Obrovski, J. S. Bajić, I. J. Mihajlović, M. B. Vojinović Miloradov, B. D. Batinić, and M. B. Živanov, "Colorimetric fiber optic probe for measurement of chemical parameters in surface water," *Sensors Actuators B Chem.*, vol. 228, pp. 168–173, 2016.
- [4] I.-S. Song, W.-Y. Kim, C.-Y. Kim, B. H. Kim, H.-K. Kim, and T.-J. Ahn, "Sensitivity enhancement of a UV photo-sensor based on a fiber Bragg grating coated by a photomechanical functional polymer," *Sensors Actuators A Phys.*, vol. 232, pp. 223–228, 2015.
- [5] G. Ma, C. Li, Y. Luo, R. Mu, and L. Wang, "High sensitive and reliable fiber Bragg grating hydrogen sensor for fault detection of power transformer," *Sensors Actuators B Chem.*, vol. 169, pp. 195–198, 2012.
- [6] C. Rodrigues, C. Félix, A. Lage, and J. Figueiras, "Development of a long-term monitoring system based on FBG sensors applied to concrete bridges," *Eng. Struct.*, vol. 32, no. 8, pp. 1993–2002, 2010.
- [7] A. Catalano, F. A. Bruno, M. Pisco, A. Cutolo, and A. Cusano, "An Intrusion Detection System for the Protection of Railway Assets Using Fiber Bragg Grating Sensors," *Sensors (Switzerland)*, vol. 14, pp. 18268–18285, 2014.
- [8] M. L. Filograno *et al.*, "Real-Time Monitoring of Railway Traffic Using Fiber Bragg Grating Sensors," *IEEE Sens. J.*, vol. 12, no. 1, pp. 85–92, 2012.
- [9] I. Iordachita *et al.*, "A sub-millimetric, 0.25 mN resolution fully integrated fiber-optic force-sensing tool for retinal microsurgery," *Int. J. Comput. Assist. Radiol. Surg.*, vol. 4, no. 4, pp. 383–390, 2009.
- [10] R. Monfaredi, R. Seifabadi, G. Fichtinger, and I. Iordachita, "Design of a Decoupled MRI-compatible Force Sensor using Fiber Bragg Grating Sensors for Robot-assisted Prostate Interventions," in *Proceedings of Medical Imaging 2013: Image-Guided Procedures, Robotic Interventions, and Modeling*, 2013, p. 867118.
- [11] A. F. Silva, J. P. Carmo, P. M. Mendes, and J. H. Correia, "Simultaneous cardiac and respiratory frequency measurement based on a single fiber Bragg grating sensor," *Meas. Sci. Technol.*, vol. 22, p. 075801 (5pp), 2011.
- [12] A. Morana *et al.*, "Radiation-Hardened Fiber Bragg Grating Based Sensors for Harsh Environments," *IEEE Trans. Nucl. Sci.*, vol. 64, no. 1, pp. 68–73, 2017.
- [13] R. Di Sante, "Fibre Optic Sensors for Structural Health Monitoring of Aircraft Composite Structures: Recent Advances and Applications," *Sensors (Switzerland)*, vol. 15, pp. 18666–18713, 2015.
- [14] C. Qiu, J. Chen, and Q. Xu, "Ultraprecise measurement of resonance shift for sensing

- applications,” *Opt. Lett.*, vol. 37, no. 23, pp. 5012–5014, 2012.
- [15] R. D. Peterson, B. T. Cunningham, and J. E. Andrade, “A photonic crystal biosensor assay for ferritin utilizing iron-oxide nanoparticles,” *Biosens. Bioelectron.*, vol. 56, pp. 320–327, 2014.
- [16] Y. Wang, D. N. Wang, C. Wang, and T. Hu, “Compressible fiber optic micro-Fabry-Pérot cavity with ultra-high pressure sensitivity,” *Opt. Express*, vol. 21, no. 12, pp. 14084–14089, 2013.
- [17] L. H. Chen *et al.*, “Chitosan based fiber-optic Fabry – Perot humidity sensor,” *Sensors Actuators B Chem.*, vol. 169, pp. 167–172, 2012.
- [18] C. Wu, H. Y. Fu, K. K. Qureshi, B.-O. Guan, and H. Y. Tam, “High-pressure and high-temperature characteristics of a Fabry–Perot interferometer based on photonic crystal fiber,” *Opt. Lett.*, vol. 36, no. 3, pp. 412–414, 2011.
- [19] P. A. R. Tafulo, P. A. S. Jorge, J. L. Santos, and O. Frazão, “Fabry–Pérot cavities based on chemical etching for high temperature and strain measurement,” *Opt. Commun.*, vol. 285, no. 6, pp. 1159–1162, 2012.
- [20] R.-Q. Lv, Y. Zhao, D. Wang, and Q. Wang, “Magnetic Fluid-Filled Optical Fiber Fabry–Pérot Sensor for Magnetic Field Measurement,” *IEEE Photonics Technol. Lett.*, vol. 26, no. 3, pp. 217–219, 2014.
- [21] C. R. Pollock, “Coupled mode theory and application,” in *Fundamentals of Optoelectronics*, 1st ed., USA: Richard D. Irwin Inc, 1995, pp. 271–290.
- [22] M. Cvijetic, “Optical signal, noise, and impairments parameters,” in *Optical Transmission Systems Engineering*, Norwood: Artech House, Inc., 2004, pp. 69–70.
- [23] X. Zeng and Y. An, “Wavelength sensing by dual photodetectors,” *Sensors Actuators A Phys.*, vol. 109, no. 1–2, pp. 76–78, 2003.
- [24] T. Warren, “Utilizing the WDM – Increase Fiber Capacity Without Construction,” 2016. [Online]. Available: <https://www.multicominc.com/utilizing-wdm-increase-fiber-capacity-without-construction/>. [Accessed: 12-Dec-2018].
- [25] “Fiber optics.” [Online]. Available: <http://a2net.eu/fiberoptics.html>. [Accessed: 10-Feb-2019].
- [26] S. V. Kartalopoulos, “DWDM Topologies,” in *Introduction to DWDM Technology: Data in a Rainbow*, New York, USA: Wiley-IEEE Press, 2000, pp. 197–207.
- [27] “Multimode Fiber: the Good, the Bad and the Rather Ordinary.” [Online]. Available: <http://osd.com.au/multimode-fiber-the-good-the-bad-and-the-rather-ordinary/>. [Accessed: 13-Feb-2019].
- [28] S. V. Kartalopoulos, “Optical Components,” in *DWDM: Networks, Devices, and Technology*, Hoboken, New Jersey: Wiley-IEEE Press, 2003, pp. 93–234.
- [29] “Introduction to DWDM Technology,” *Cisco Systems, Inc.*, 2000. [Online]. Available: https://www.cisco.com/c/dam/global/de_at/assets/docs/dwdm.pdf. [Accessed: 02-Feb-2019].
- [30] S. V. Kartalopoulos, “Optical Demultiplexers,” in *Introduction to DWDM Technology: Data in a Rainbow*, New York, USA: Wiley-IEEE Press, 2000, pp. 91–96.

-
- [31] “Arrayed waveguide grating.” [Online]. Available: https://en.wikipedia.org/wiki/Arrayed_waveguide_grating. [Accessed: 01-Apr-2019].
- [32] “OADM - Optical Add-Drop Multiplexer,” 2016. [Online]. Available: <http://www.fiber-optic-cable-sale.com/oadm-optical-add-drop-multiplexer.html>. [Accessed: 03-Feb-2019].
- [33] A. Shaik, “EDFA (Erbium Doped Fiber Amplifier).” [Online]. Available: <https://www.physics-and-radio-electronics.com/blog/edfa-erbium-doped-fiber-amplifier/>. [Accessed: 03-Feb-2019].
- [34] “How Does EDFA Amplifier Work for Extending DWDM System?,” 2017. [Online]. Available: <http://ka04.over-blog.com/2017/06/how-does-edfa-amplifier-work-for-extending-dwdm-system.html>. [Accessed: 13-Feb-2019].
- [35] W. S. Wong, C.-J. Chen, and Y. Sun, “Introduction to lasers and optical amplifiers,” in *Handbook of Optoelectronics: Concepts, Devices, and Techniques (Volume One)*, 2nd ed., J. P. Dakin and R. G. W. Brown, Eds. Boca Raton, USA: CRC Press, 2017, pp. 175–195.
- [36] International Telecommunication Union - ITU-T, “Rec. ITU-T G.694.1 (02/2012),” 2012.
- [37] R. Kashyap, “Fabrication of Bragg Gratings,” in *Fiber Bragg Gratings*, 2nd, Ed. Academic Press, 2009, pp. 53–118.
- [38] V. Bhatia and A. M. Vengsarkar, “Optical fiber long-period grating sensors,” *Opt. Lett.*, vol. 21, no. 9, pp. 692–694, 1996.
- [39] “Optical add-drop multiplexer.” [Online]. Available: https://en.wikipedia.org/wiki/Optical_add-drop_multiplexer. [Accessed: 01-Apr-2019].
- [40] “Distributed Bragg Reflector Lasers.” [Online]. Available: https://www.rp-photonics.com/distributed_bragg_reflector_lasers.html. [Accessed: 01-Apr-2019].
- [41] “Distributed Feedback Lasers.” [Online]. Available: https://www.rp-photonics.com/distributed_feedback_lasers.html. [Accessed: 01-Apr-2019].
- [42] C. R. Dennison, P. M. Wild, D. R. Wilson, P. A. Crompton, and M. Dvorak, “Pressure sensor for biological fluids and use thereof,” WO2007/095752, 2007.
- [43] J. W. Arkwright *et al.*, “Design of a high-sensor count fibre optic manometry catheter for in-vivo colonic diagnostics,” *Opt. Express*, vol. 17, no. 25, pp. 22423–22431, 2009.
- [44] J. W. Arkwright *et al.*, “In-vivo demonstration of a high resolution optical fiber manometry catheter for diagnosis of gastrointestinal motility disorders,” *Opt. Express*, vol. 17, no. 6, pp. 4500–4508, 2009.
- [45] V. Mishra *et al.*, “Fiber Bragg grating sensor for monitoring bone decalcification,” *Orthop. Traumatol. Surg. Res.*, vol. 96, no. 6, pp. 646–651, 2010.
- [46] G. Palumbo *et al.*, “Fiber Bragg Grating for temperature monitoring during medical radiofrequency treatments,” *Procedia Eng.*, vol. 168, pp. 1308–1311, 2016.
- [47] L. Mohanty, S. C. Tjin, D. T. T. Lie, S. E. C. Panganiban, and P. K. H. Chow, “Fiber grating sensor for pressure mapping during total knee arthroplasty,” *Sensors Actuators A Phys.*, vol. 135, no. 2, pp. 323–328, 2007.

-
- [48] D. Hu, Y. Guo, X. Chen, and C. Zhang, "Cable Force Health Monitoring of Tongwamen Bridge Based on Fiber Bragg Grating," *Appl. Sci.*, vol. 7, no. 4, p. 384, 2017.
- [49] L. Ren, J. Chen, H.-N. Li, G. Song, and X. Ji, "Design and application of a fiber Bragg grating strain sensor with enhanced sensitivity in the small-scale dam model," *Smart Mater. Struct.*, vol. 18, no. 3, p. 035015, 2009.
- [50] C. Li, Y.-G. Zhao, H. Liu, Z. Wan, C. Zhang, and N. Rong, "Monitoring second lining of tunnel with mounted fiber Bragg grating strain sensors," *Autom. Constr.*, vol. 17, no. 5, pp. 641–644, 2008.
- [51] "SysTunnel: A complete tunnel monitoring system." [Online]. Available: <https://www.hbm.com/en/5854/tunnel-monitoring-with-fiber-bragg-sensors/>. [Accessed: 01-Apr-2019].
- [52] Z. Zhou *et al.*, "Optical fiber Bragg grating sensor assembly for 3D strain monitoring and its case study in highway pavement," *Mech. Syst. Signal Process.*, vol. 28, pp. 36–49, 2012.
- [53] A.-B. Huang, J.-T. Lee, Y.-T. Ho, Y.-F. Chiu, and S.-Y. Cheng, "Stability monitoring of rainfall-induced deep landslides through pore pressure profile measurements," *Soils Found.*, vol. 52, no. 4, pp. 737–747, 2012.
- [54] W. Shen, R. Yan, L. Xu, G. Tang, and X. Chen, "Application study on FBG sensor applied to hull structural health monitoring," *Optik (Stuttg.)*, vol. 126, no. 17, pp. 1499–1504, 2015.
- [55] S.-W. Kim, W.-R. Kang, M.-S. Jeong, I. Lee, and I.-B. Kwon, "Deflection estimation of a wind turbine blade using FBG sensors embedded in the blade bonding line," *Smart Mater. Struct.*, vol. 22, no. 12, p. 125004, 2013.
- [56] Y. Zhao, N. Zhang, and G. Si, "A Fiber Bragg Grating-Based Monitoring System for Roof Safety Control in Underground Coal Mining," *Sensors (Switzerland)*, vol. 16, no. 10, p. 1759, 2016.
- [57] G. Laffont, R. Cotillard, N. Roussel, R. Desmarchelier, and S. Rougeault, "Temperature Resistant Fiber Bragg Gratings for On-Line and Structural Health Monitoring of the Next-Generation of Nuclear Reactors," *Sensors (Switzerland)*, vol. 18, no. 6, p. 1791, 2018.
- [58] S. W. James, M. L. Dockney, and R. P. Tatam, "Photorefractive Volume Holographic Demodulation of In-Fiber Bragg Grating Sensors," *IEEE Photonics Technol. Lett.*, vol. 8, no. 5, pp. 664–666, 1996.
- [59] J. L. Santos and L. A. Ferreira, "Fibre Bragg Grating Interrogation Techniques," in *Handbook of Optical Fibre Sensing Technology*, 1st ed., J. M. López-Higuera, Ed. John Wiley & Sons, Inc., 2002, pp. 379–402.
- [60] S. M. Melle, K. Liu, and R. M. Measures, "A Passive Wavelength Demodulation System for Guided-Wave Bragg Grating Sensors," *IEEE Photonics Technol. Lett.*, vol. 4, no. 5, pp. 516–518, 1992.
- [61] S. M. Melle, K. Liu, and R. M. Measures, "Practical fiber-optic Bragg grating strain gauge system," *Appl. Opt.*, vol. 32, no. 19, pp. 3601–3609, 1993.

-
- [62] Y. Sano and T. Yoshino, "Fast Optical Wavelength Interrogator Employing Arrayed Waveguide Grating for Distributed Fiber Bragg Grating Sensors," *J. Light. Technol.*, vol. 21, no. 1, pp. 132–139, 2003.
- [63] A. B. L. Ribeiro, L. A. Ferreira, M. Tsvetkov, and J. L. Santos, "All-fibre interrogation technique for fibre Bragg sensors using a biconical fibre filter," *Electron. Lett.*, vol. 32, no. 4, pp. 382–383, 1996.
- [64] R. W. Fallon, L. Zhang, L. A. Everall, J. A. R. Williams, and I. Bennion, "All-fibre optical sensing system: Bragg grating sensor interrogated by a long-period grating," *Meas. Sci. Technol.*, vol. 9, no. 12, pp. 1969–1973, 1998.
- [65] M. A. Davis and A. D. Kersey, "All-fibre Bragg grating strain-sensor demodulation technique using a wavelength division coupler," *Electron. Lett.*, vol. 30, no. 1, pp. 75–77, 1994.
- [66] Q. Zhang *et al.*, "Use of highly overcoupled couplers to detect shifts in Bragg wavelength," *Electron. Lett.*, vol. 31, no. 6, pp. 480–482, 1995.
- [67] U. Tiwari, K. Thyagarajan, M. R. Shenoy, and S. C. Jain, "EDF-Based Edge-Filter Interrogation Scheme for FBG Sensors," *IEEE Sens. J.*, vol. 13, no. 4, pp. 1315–1319, 2013.
- [68] R. W. Fallon, L. Zhang, A. Gloag, and I. Bennion, "Identical broadband chirped grating interrogation technique for temperature and strain sensing," *Electron. Lett.*, vol. 33, no. 8, pp. 705–707, 1997.
- [69] R. Romero, O. Frazao, P. V. S. Marques, H. M. Salgado, and J. L. Santos, "Fibre Bragg grating interrogation technique based on a chirped grating written in an erbium-doped fibre," *Meas. Sci. Technol.*, vol. 14, no. 11, pp. 1993–1997, 2003.
- [70] S. C. Kang, H. Yoon, S. B. Lee, S. S. Choi, and B. Lee, "Real-time measurement for static and dynamic strain using a fiber Bragg grating and the ASE profile of EDFA," in *Proc. SPIE 3746, 13th International Conference on Optical Fiber Sensors, 374622*, 1999, pp. 530–533.
- [71] L. A. Ferreira and J. L. Santos, "Demodulation scheme for fibre Bragg sensors based on source spectral characteristics," *Pure Appl. Opt. J. Eur. Opt. Soc. Part A*, vol. 5, no. 3, pp. 257–261, 1996.
- [72] T. Coroy and R. M. Measures, "Active wavelength demodulation of a Bragg grating fibre optic strain sensor using a quantum well electroabsorption filtering detector," *Electron. Lett.*, vol. 32, no. 19, pp. 1811–1812, 1996.
- [73] A. D. Kersey, T. A. Berkoff, and W. W. Morey, "Multiplexed fiber Bragg grating strain-sensor system with a fiber Fabry–Perot wavelength filter," *Opt. Lett.*, vol. 18, no. 16, pp. 1370–1372, 1993.
- [74] M. Volanthen, H. Geiger, M. G. Xu, and J. P. Dakin, "Simultaneous monitoring of multiple fibre gratings with a single acousto-optic tunable filter," *Electron. Lett.*, vol. 32, no. 13, pp. 1228–1229, 1996.
- [75] "Acousto-optical tunable filters (AOTF)." [Online]. Available: [http://lasernetworks.hu/lasernetworks.eu/?acousto-optical-tunable-filters-\(aotf\),17](http://lasernetworks.hu/lasernetworks.eu/?acousto-optical-tunable-filters-(aotf),17). [Accessed: 21-Feb-2019].

-
- [76] D. A. Jackson, A. B. Lobo Ribeiro, L. Reekie, and J. L. Archambault, "Simple multiplexing scheme for a fiber-optic grating sensor network," *Opt. Lett.*, vol. 18, no. 14, pp. 1192–1194, 1993.
- [77] A. B. Lobo Ribeiro, L. A. Ferreira, J. L. Santos, and D. A. Jackson, "Analysis of the reflective-matched fiber Bragg grating sensing interrogation scheme," *Appl. Opt.*, vol. 36, no. 4, pp. 934–939, 1997.
- [78] M. A. Davis and A. D. Kersey, "Matched-filter interrogation technique for fibre Bragg grating arrays," *Electron. Lett.*, vol. 31, no. 10, pp. 822–823, 1995.
- [79] F. M. Araujo, L. A. Ferreira, J. L. Santos, and F. Farahi, "Demodulation scheme for fiber Bragg grating sensors based on active control of the spectral response of a wavelength division multiplexer," *Appl. Opt.*, vol. 37, no. 34, pp. 7940–7946, 1998.
- [80] N. Fukuma, K. Kubota, K. Nakamura, and S. Ueha, "An interrogator for fibre Bragg grating sensors using an ultrasonically induced long-period optical fibre grating," *Meas. Sci. Technol.*, vol. 17, no. 5, pp. 1046–1051, 2006.
- [81] A. D. Kersey, M. A. Davis, and T. Tsai, "Fiber Optic Bragg Grating Strain Sensor with Direct Reflectometric Interrogation," in *Proceedings of XI International Conference Optical Fiber Sensors*, 1996, pp. 634–637.
- [82] L. A. Ferreira, E. V. Diatzikis, J. L. Santos, and F. Farahi, "Demodulation of fiber Bragg grating sensors based on dynamic tuning of a multimode laser diode," *Appl. Opt.*, vol. 38, no. 22, pp. 4751–4759, 1999.
- [83] L. A. Ferreira, E. V. Diatzikis, J. L. Santos, and F. Farahi, "Frequency-Modulated Multimode Laser Diode for Fiber Bragg Grating Sensors," *J. Light. Technol.*, vol. 16, no. 9, pp. 1620–1630, 1998.
- [84] L. A. Ferreira, J. L. Santos, and F. Farahi, "Pseudoheterodyne Demodulation Technique for Fiber Bragg Grating Sensors Using Two Matched Gratings," *IEEE Photonics Technol. Lett.*, vol. 9, no. 4, pp. 487–489, 1997.
- [85] C. J. Misas, F. M. M. Araujo, L. A. Ferreira, J. L. Santos, and J. M. Lopez-Higuera, "Fiber Bragg Sensors Interrogation Based on Carrier Generation by Modulating the Coupling Length of a Wavelength-Division Multiplexer," *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron.*, vol. 6, no. 5, pp. 750–755, 2000.
- [86] A. D. Kersey and T. A. Berkoff, "Fiber-Optic Bragg-Grating Differential-Temperature Sensor," *IEEE Photonics Technol. Lett.*, vol. 4, no. 10, pp. 1183–1185, 1992.
- [87] A. D. Kersey, T. A. Berkoff, and W. W. Morey, "High-resolution fibre-grating based strain sensor with interferometric wavelength-shift detection," *Electron. Lett.*, vol. 28, no. 3, pp. 236–238, 1992.
- [88] R. S. Weis, A. D. Kersey, and T. A. Berkoff, "A four-element fiber grating sensor array with phase-sensitive detection," *IEEE Photonics Technol. Lett.*, vol. 6, no. 12, pp. 1469–1472, 1994.
- [89] Y. J. Rao, D. A. Jackson, L. Zhang, and I. Bennion, "Dual-cavity interferometric wavelength-shift detection for in-fiber Bragg grating sensors," *Opt. Lett.*, vol. 21, no. 19, pp. 1556–1558, 1996.
- [90] S. M. Melle, A. T. Alavie, S. Karr, T. Coroy, K. Liu, and R. M. Measures, "A Bragg

- grating-tuned fiber laser strain sensor system,” *IEEE Photonics Technol. Lett.*, vol. 5, no. 2, pp. 263–266, 1993.
- [91] G. A. Ball, W. W. Morey, and P. K. Cheo, “Fiber laser source/analyzer for Bragg grating sensor array interrogation,” *J. Light. Technol.*, vol. 12, no. 4, pp. 700–703, 1994.
- [92] A. D. Kersey and W. W. Morey, “Multiplexed Bragg grating fibre-laser strain sensor system with mode-locked interrogation,” *Electron. Lett.*, vol. 29, no. 1, p. 112, 1993.
- [93] C. A. R. Díaz *et al.*, “A cost-effective edge-filter based FBG interrogator using catastrophic fuse effect micro-cavity interferometers,” *Measurement*, vol. 124, pp. 486–493, 2018.
- [94] C. A. R. Díaz *et al.*, “Low-Cost Interrogation Technique for Dynamic Measurements with FBG-Based Devices,” *Sensors (Switzerland)*, vol. 17, no. 10, p. 2414, 2017.
- [95] M. Perry, P. Orr, P. Niewczas, and M. Johnston, “High-Speed Interferometric FBG Interrogator With Dynamic and Absolute Wavelength Measurement Capability,” *J. Light. Technol.*, vol. 31, no. 17, pp. 2897–2903, 2013.
- [96] W. R. Allan, Z. W. Graham, J. R. Zayas, D. P. Roach, and D. A. Horsley, “Multiplexed Fiber Bragg Grating Interrogation System Using a Microelectromechanical Fabry-Perot Tunable Filter,” *IEEE Sens. J.*, vol. 9, no. 8, pp. 936–943, 2009.
- [97] Y. Ma, C. Wang, Y. Yang, S. Yan, and J. Li, “High resolution and wide scale fiber Bragg grating sensor interrogation system,” *Opt. Laser Technol.*, vol. 50, pp. 107–111, 2013.
- [98] O. Schmidt, P. Kiesel, S. Mohta, and N. M. Johnson, “Resolving pm wavelength shifts in optical sensing,” *Appl. Phys. B Lasers Opt.*, vol. 86, no. 4, pp. 593–600, 2007.
- [99] D. Donisi, L. De Sio, R. Beccherelli, M. A. Caponero, A. D’Alessandro, and C. Umerton, “Optical interrogation system based on holographic soft matter filter,” *Appl. Phys. Lett.*, vol. 98, no. 15, p. 151103, 2011.
- [100] Q. Wang, G. Farrell, T. Freir, G. Rajan, and P. Wang, “Low-Cost Wavelength Measurement Based on a Macrobending Single-Mode Fiber,” *Opt. Lett.*, vol. 31, no. 12, pp. 1785–1787, 2006.
- [101] A. M. Hatta, G. Farrell, Q. Wang, G. Rajan, P. Wang, and Y. Semenova, “Ratiometric Wavelength Monitor Based on Singlemode-Multimode-Singlemode Fiber Structure,” *Microw. Opt. Technol. Lett.*, vol. 50, no. 12, pp. 3036–3039, 2008.
- [102] Q. Wu, Y. Semenova, A. Sun, P. Wang, and G. Farrell, “High resolution temperature insensitive interrogation technique for FBG sensors,” *Opt. Laser Technol.*, vol. 42, no. 4, pp. 653–656, 2010.
- [103] J. Cui, Y. Hu, K. Feng, J. Li, and J. Tan, “FBG Interrogation Method with High Resolution and Response Speed Based on a Reflective-Matched FBG Scheme,” *Sensors (Switzerland)*, vol. 15, no. 7, pp. 16516–16535, 2015.
- [104] A. Dante, R. Moreira Bacurau, A. Wedderhoff Spengler, E. Chagas Ferreira, and J. A. Siqueira Dias, “A Temperature-Independent Interrogation Technique for FBG Sensors Using Monolithic Multilayer Piezoelectric Actuators,” *IEEE Trans. Instrum. Meas.*,

- vol. 65, no. 11, pp. 2476–2484, 2016.
- [105] Q. Wang, G. Farrell, P. Wang, G. Rajan, and T. Freir, “Design of integrated wavelength monitor based on a Y-branch with an S-bend waveguide,” *Sensors Actuators A Phys.*, vol. 134, no. 2, pp. 405–409, 2007.
- [106] P. Wang, A. M. Hatta, H. Zhao, J. Zheng, G. Farrell, and G. Brambilla, “A Ratiometric Wavelength Measurement Based on a Silicon-on-Insulator Directional Coupler Integrated Device,” *Sensors (Switzerland)*, vol. 15, no. 9, pp. 21280–21293, 2015.
- [107] C. Potts, T. W. Allen, A. Azar, A. Melnyk, C. R. Dennison, and R. G. DeCorby, “Wavelength interrogation of fiber Bragg grating sensors using tapered hollow Bragg waveguides,” *Opt. Lett.*, vol. 39, no. 20, pp. 5941–5944, 2014.
- [108] V. M. N. Passaro, A. V. Tsarev, and F. De Leonardis, “Wavelength Interrogator for Optical Sensors Based on a Novel Thermo-Optic Tunable Filter in SOI,” *J. Light. Technol.*, vol. 30, no. 13, pp. 2143–2150, 2012.
- [109] J. Koch, M. Angelmahr, and W. Schade, “Arrayed waveguide grating interrogator for fiber Bragg grating sensors : measurement and simulation,” *Appl. Opt.*, vol. 51, no. 31, pp. 7718–7723, 2012.
- [110] D. Pustakhod, E. Kleijn, K. Williams, and X. Leijtens, “High-Resolution AWG-Based Fiber Bragg Grating Interrogator,” *IEEE Photonics Technol. Lett.*, vol. 28, no. 20, pp. 2203–2206, 2016.
- [111] A. Trita *et al.*, “Simultaneous Interrogation of Multiple Fiber Bragg Grating Sensors Using an Arrayed Waveguide Grating Filter Fabricated in SOI Platform,” *IEEE Photonics J.*, vol. 7, no. 6, p. 7802611, 2015.
- [112] B. Yang *et al.*, “Dual Mach-Zehnder Based Integrated X-Type Ratiometric Wavelength Monitor on Glass,” *IEEE Photonics Technol. Lett.*, vol. 26, no. 5, pp. 433–436, 2014.
- [113] P. Wang *et al.*, “Passive photonic integrated ratiometric wavelength monitor with resolution better than 15 pm,” *Opt. Express*, vol. 25, no. 3, pp. 2939–2949, 2017.
- [114] Y. E. Marin, T. Nannipieri, C. J. Oton, and F. Di Pasquale, “Integrated FBG Sensors Interrogation Using Active Phase Demodulation on a Silicon Photonic Platform,” *J. Light. Technol.*, vol. 35, no. 16, pp. 3374–3379, 2017.
- [115] B. Yang *et al.*, “Microring-based ratio-metric wavelength monitor on silicon,” *Opt. Lett.*, vol. 39, no. 11, pp. 3298–3300, 2014.
- [116] A. Shen *et al.*, “Tunable microring based on-chip interrogator for wavelength-modulated optical sensors,” *Opt. Commun.*, vol. 340, pp. 116–120, 2015.
- [117] G. Wang *et al.*, “Fano-resonance-based ultra-high-resolution ratio-metric wavelength monitor on silicon,” *Opt. Lett.*, vol. 41, no. 3, pp. 544–547, 2016.
- [118] J. Tao, H. Cai, Y. Gu, and A. Liu, “Demonstration of a compact wavelength tracker using a tunable silicon resonator,” *Opt. Express*, vol. 22, no. 20, pp. 24104–24110, 2014.
- [119] H. Podmore *et al.*, “Demonstration of a compressive-sensing Fourier-transform on-chip spectrometer,” *Opt. Lett.*, vol. 42, no. 7, pp. 1440–1443, 2017.

-
- [120] P. J. Bock *et al.*, “Subwavelength grating Fourier-transform interferometer array in silicon-on-insulator,” *Laser Photonics Rev.*, vol. 7, no. 6, pp. L67–L70, 2013.
- [121] T. Amthor, C. S. Hofmann, J. Knorz, and M. Weidemüller, “High-precision semiconductor wavelength sensor based on a double-layer photo diode,” *Rev. Sci. Instrum.*, vol. 82, no. 9, pp. 1–6, 2011.
- [122] M. Njegovec and D. Donlagic, “Interrogation of FBGs and FBGs Arrays Using Standard Telecom DFB Diode,” *J. Light. Technol.*, vol. 34, no. 22, pp. 5340–5348, 2016.
- [123] H. D. Lee, G. H. Kim, T. J. Eom, M. Y. Jeong, and C.-S. Kim, “Linearized Wavelength Interrogation System of Fiber Bragg Grating Strain Sensor Based on Wavelength-Swept Active Mode Locking Fiber Laser,” *J. Light. Technol.*, vol. 33, no. 12, pp. 2617–2622, 2015.
- [124] D. Leandro, A. Ullan, A. Loayssa, J. M. López-Higuera, and M. López-Amo, “Remote (155 km) Fiber Bragg Grating Interrogation Technique Combining Raman , Brillouin , and Erbium Gain in a Fiber Laser,” *IEEE Photonics Technol. Lett.*, vol. 23, no. 10, pp. 621–623, 2011.
- [125] M. S. Müller *et al.*, “Fiber-Optic Sensor Interrogation Based on a Widely Tunable Monolithic Laser Diode,” *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, vol. 59, no. 3, pp. 696–703, 2010.
- [126] A. Ghatak and K. Thyagarajan, “Single-mode fiber optic components,” in *Introduction to Fiber Optics*, 1st ed., Cambridge: Cambridge University Press, 1998, pp. 360–380.
- [127] S. Lacroix and X. Daxhelet, “Optical fibre devices,” in *Handbook of Optoelectronics - Volume I*, J. P. Dakin and R. G. W. Brown, Eds. CRC Press, 2006, pp. 460–473.
- [128] R. Hui and M. O’Sullivan, “Characterization of Optical Devices,” in *Fiber Optic Measurement Techniques*, 1st ed., Elsevier Academic Press, 2009, pp. 259–363.
- [129] D. B. Mortimore, “Wavelength-flattened fused couplers,” *Electron. Lett.*, vol. 21, no. 17, pp. 742–743, 1985.
- [130] A. W. Snyder, “Polarising beamsplitter from fused-taper couplers,” *Electron. Lett.*, vol. 21, no. 14, pp. 623–625, 1985.
- [131] A. Lord, I. J. Wilkinson, A. Ellis, D. Cleland, R. A. Garnham, and W. A. Stallard, “Comparison of WDM Coupler Technologies for use in Erbium Doped Fibre Amplifier Systems,” *Electron. Lett.*, vol. 26, no. 13, pp. 900–901, 1990.
- [132] F. Bakhti *et al.*, “Optical add/drop multiplexer based on UV-written Bragg grating in a fused 100% coupler,” *Electron. Lett.*, vol. 33, no. 9, pp. 803–804, 1997.
- [133] F. Bakhti, X. Daxhelet, P. Sansonetti, and S. Lacroix, “Influence of Bragg grating location in fused 100% coupler for add and drop multiplexer realization,” in *Optical Fiber Communication Conference and Exhibit, 1998. OFC '98., Technical Digest, 1998*, pp. 333–334.
- [134] S. O. Kasap, “Photodetectors and Image Sensors,” in *Optoelectronics and Photonics: Principles and Practices*, 2nd ed., Pearson Education Limited, 2013, pp. 381–455.
- [135] “Photodiodes.” [Online]. Available: http://www.learnabout-electronics.org/Semiconductors/diodes_27.php. [Accessed: 05-Feb-2019].

-
- [136] B. E. A. Saleh and M. C. Teich, "Semiconductor Photon Detectors," in *Fundamentals of Photonics*, 2nd ed., Hoboken, New Jersey: John Wiley & Sons, Inc., 2007, pp. 748–803.
- [137] H. Zimmermann, "Basics of Optical Emission and Absorption," in *Integrated Silicon Optoelectronics*, 2nd ed., Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2010, pp. 1–9.
- [138] C. M. Griot, "Fundamentals of Power and Energy Measurement," *Introduction to Laser Beam and Spectral Measurement*. [Online]. Available: <http://www.astro.caltech.edu/~lah/ay105/pdf/e1-photodiode.pdf>. [Accessed: 03-Mar-2019].
- [139] "InGaAs Photodiodes," 2017. [Online]. Available: https://www.hamamatsu.com/resources/pdf/ssd/ingaas_kird0005e.pdf. [Accessed: 01-Feb-2019].
- [140] M. B. Živanov, "Lavinski proboj," in *ELEKTRONIKA, komponente, teorija i zadaci*, 1st ed., Novi Sad, Serbia: Univerzitet u Novom Sadu, 2002, pp. 94–96.
- [141] B. Depuydt *et al.*, "Germanium Materials," in *Germanium-Based Technologies: From Materials to Devices*, 1st ed., C. Claeys and E. Simoen, Eds. Elsevier Science, 2007, pp. 11–39.
- [142] G. Kissinger and S. Pizzini, Eds., "Germanium on Silicon: Epitaxy and Applications," in *Silicon, Germanium, and Their Alloys: Growth, Defects, Impurities, and Nanocrystals*, 1st ed., Boca Raton, USA: CRC Press, 2014, pp. 61–86.
- [143] "Silicon & Germanium Crystal Structure," 2018. [Online]. Available: <http://physicsopenlab.org/2018/01/28/silicon-germanium-crystal-structure>. [Accessed: 01-Feb-2019].
- [144] D. E. Guberman, "Germanium," 2016.
- [145] K. Washio, "SiGe HBT and BiCMOS Technologies for Optical Transmission and Wireless Communication Systems," *IEEE Trans. Electron Devices*, vol. 50, no. 3, pp. 656–668, 2003.
- [146] "Automotive Radar, High-resolution 77 GHz radar," 2011. [Online]. Available: <https://www.nxp.com/docs/en/fact-sheet/AUTORADARFS.pdf>.
- [147] Z.-Y. Cheng *et al.*, "Electron Mobility Enhancement in Strained-Si n-MOSFETs Fabricated on SiGe-on-Insulator (SGOI) Substrates," *IEEE Electron Device Lett.*, vol. 22, no. 7, pp. 321–323, 2001.
- [148] Thorlabs Inc., "Photodiodes." [Online]. Available: https://www.thorlabs.com/newgrouppage9.cfm?objectgroup_id=285#1291.
- [149] "Gamma and x-ray HPGe spectrometer." [Online]. Available: <https://www.caensys.com/gax-ge-spectrometer/>.
- [150] "Fruit and Vegetable Optical Sorting." [Online]. Available: https://www.buhlergroup.com/global/en/downloads/SR_Fruit_Vegetables_EN.pdf.
- [151] D. Bimberg, N. Kirstaedter, N. N. Ledentsov, Z. I. Alferov, P. S. Kop'ev, and V. M. Ustinov, "InGaAs–GaAs Quantum-Dot Lasers," *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron.*, vol. 3, no. 2, pp. 196–205, 1997.

- [152] K. Mukai, Y. Nakata, K. Otsubo, M. Sugawara, N. Yokoyama, and H. Ishikawa, "1.3- μm CW Lasing of InGaAs-GaAs Quantum Dots at Room Temperature with a Threshold Current of 8 mA," *IEEE Photonics Technol. Lett.*, vol. 11, no. 10, pp. 1205–1207, 1999.
- [153] D. Y. Chu, M. K. Chin, N. J. Sauer, Z. Hu, T. Y. Chang, and S. T. Ho, "1.5- μm InGaAs/InAlGaAs Quantum-Well Microdisk Lasers," *IEEE Photonics Technol. Lett.*, vol. 5, no. 12, pp. 1353–1355, 1993.
- [154] J. Lidan *et al.*, "Frequency doubling of an InGaAs multiple quantum wells semiconductor disk laser," *Superlattices Microstruct.*, vol. 113, pp. 785–790, 2018.
- [155] J. F. Geisz *et al.*, "40.8% efficient inverted triple-junction solar cell with two independently metamorphic junctions," *Appl. Phys. Lett.*, vol. 93, no. 12, p. 123505, 2008.
- [156] M. P. Lumb *et al.*, "Development of InGaAs Solar Cells for >44% Efficient Transfer-Printed Multi-junctions," in *2014 IEEE 40th Photovoltaic Specialist Conference, PVSC 2014*, 2014, pp. 491–494.
- [157] M. Gutiérrez, C. E. Pastore, D. Araújo, J. Miguel-Sánchez, and E. Rodríguez-Messmer, "Mechanism of Phase Separation Generation in Ge-Based Solar Cell Tunnel Junctions," *J. Nanosci. Nanotechnol.*, vol. 10, no. 2, pp. 1166–1170, 2010.
- [158] "Tiny compound semiconductor transistor could challenge silicon's dominance." [Online]. Available: <http://news.mit.edu/2012/tiny-compound-semiconductor-transistor-could-challenge-silicons-dominance-1210>.
- [159] A. Kumar *et al.*, "Monolithic integration of InGaAs n-FETs and lasers on Ge substrate," *Opt. Express*, vol. 25, no. 5, pp. 5146–5155, 2017.
- [160] T. P. Pearsall and J. P. Hirtz, "The carrier mobilities in Ga_{0.47}In_{0.53}As grown by organo-metallic CVD and liquid-phase epitaxy," *J. Cryst. Growth*, vol. 54, no. 1, pp. 127–131, 1981.
- [161] J. S. Bajić, L. Manojlović, B. Batinić, A. Joža, N. Laković, and M. B. Živanov, "Monitoring of the laser wavelength in modern fiber-optic communication systems using dual photodetectors," *Opt. Quantum Electron.*, vol. 48, p. 333, 2016.
- [162] "Compact Photodiode Power Head with Germanium Detector - S122C." [Online]. Available: <https://www.thorlabs.com/drawings/24248abc4193fc0c-946A65E3-EDB7-3D08-975C0B43D4FC36FC/S122C-SpecSheet.pdf>.
- [163] "Optical Power Meter Head - Special Calibrations." [Online]. Available: <https://literature.cdn.keysight.com/litweb/pdf/5988-7520EN.pdf?id=340692>.
- [164] A. V. Joža *et al.*, "Design considerations and performance analysis of dual photodetector system for reliable laser wavelength and power monitoring," *Sensors Actuators, A Phys.*, vol. 261, pp. 14–23, 2017.
- [165] A. V. Joža *et al.*, "Simultaneous Characterization of Bidirectional Coupler and Semiconductor Photodetectors Spectral Properties," in *25th Telecommunications Forum, TELFOR 2017 - Proceedings*, 2017, pp. 900–903.
- [166] J. Wang and S. Lee, "Ge-Photodetectors for Si-Based Optoelectronic Integration," *Sensors*, vol. 11, no. 1, pp. 696–718, 2011.

- [167] Y. Geng, S. Feng, A. W. O. Poon, and K. M. Lau, “High-Speed InGaAs Photodetectors by Selective-Area MOCVD Toward Optoelectronic Integrated Circuits,” *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron.*, vol. 20, no. 6, p. 3801807, 2014.
- [168] S. Takagi *et al.*, “High mobility CMOS technologies using III-V/Ge channels on Si platform,” *Solid. State. Electron.*, vol. 88, pp. 2–8, 2013.