

UNIVERZITET U BEOGRADU  
ELEKTROTEHNIČKI FAKULTET

Jovana P. Babić

MODULACIONI ODZIV LASERA  
ZASNOVANOG NA SPREZI  
REFLEKSIONOG OPTIČKOG POJAČAVAČA  
I OPTIČKOG VLAKNA

doktorska disertacija

Beograd, 2024.

UNIVERSITY OF BELGRADE  
SCHOOL OF ELECTRICAL ENGINEERING

Jovana P. Babić

MODULATION RESPONSE OF  
REFLECTIVE SEMICONDUCTOR OPTICAL  
AMPLIFIER - FIBER CAVITY LASER

Doctoral Dissertation

Belgrade, 2024.

Mentor:

dr JASNA CRNJANSKI, vanredni profesor  
Univerzitet u Beogradu - Elektrotehnički fakultet

Članovi komisije:

dr DEJAN GVOZDIĆ, redovni profesor  
Univerzitet u Beogradu - Elektrotehnički fakultet

dr NEBOJŠA ROMČEVIĆ, naučni savetnik  
Univerzitet u Beogradu - Institut za fiziku

dr NATAŠA NEŠKOVIĆ, redovni profesor  
Univerzitet u Beogradu - Elektrotehnički fakultet

dr MARKO KRSTIĆ, vanredni profesor  
Univerzitet u Beogradu - Elektrotehnički fakultet

dr SLOBODAN PETRIČEVIĆ, redovni profesor  
Univerzitet u Beogradu - Elektrotehnički fakultet

datum odbrane: \_\_\_\_\_

**Naslov doktorske disertacije:** Modulacioni odziv lasera zasnovanog na sprezi refleksionog optičkog pojačavača i optičkog vlakna

**Sažetak:** Predmet ove disertacije su modulacione performanse specifične klase lasera na bazi refleksionog poluprovodničkog optičkog pojačavača (RSOA) i optičkog vlakna kao rezonatorske šupljine (eng. *Fiber Cavity Laser*, FCL). Ovakav uređaj posmatra se kao laserski sistem koji se zasniva na sprezi dve sekcije, gde aktivna sekcija - refleksioni optički pojačavač obezbeđuje pojačanje, dok pasivna sekcija obuhvata optičko vlakno, koje predstavlja eksternu rezonatorsku šupljinu i optički filter postavljen između pojačavača i vlakna. Primenom odgovarajućeg optičkog filtra ovi laseri mogu relativno lako da prilagode svoju radnu talasnu dužinu, što ih čini pogodnim rešenjem za realizaciju optičkih mrežnih jedinica u pasivnim optičkim mrežama sa multipleksiranjem po talasnim dužinama.

U disertaciji je predložen detaljan matematičko-fizički model koji je numerički implementiran tako da omogući simulaciju odziva svake od komponenata laserskog sistema. Modulacioni odziv pasivne sekcije - optičkog vlakna, definisan je funkcijom prenosa optičkog vlakna, koja se dobija iz Furijeove transformacije impulsnog odziva vlakna. Na ovaj način, uzima se u obzir uticaj slabljenja i disperzije na propagaciju signala kroz vlakno. Model refleksionog optičkog pojačavača formiran je polazeći od brzinskih jednačina koje opisuju interakcije fotona i nosilaca naelektrisanja u okviru aktivne oblasti optičkog pojačavača koju čini masivni poluprovodnik, ali i dodatne kvazi-parazitne efekte same strukture u aktivnoj oblasti na bazi višestrukih kvantnih jama. Model refleksionog optičkog pojačavača uračunava i parazitne efekte poluprovodničkog čipa i njegovog pakovanja u funkcionalno kućište, a koji se mogu analizirati pomoću ekvivalentnog električnog parazitnog kola.

Integralna varijanta modela, tj. simulacija celokupnog laserskog sistema, omogućava identifikaciju i analizu faktora koji limitiraju modulacione performanse ovakvog uređaja. Pored toga, simulacija odziva pomaže u sagledavanju metoda kojima je moguće prevazići limitirajuće faktore propusnog opsega. Fokus istraživanja je na određivanju modulacionog odziva i odgovarajućeg  $-3\text{dB}$  propusnog opsega pri direktnoj modulaciji malim signalima, ali budući da se refleksioni optički pojačavači mogu koristiti i kao samostalna komponenta u pasivnim optičkim mrežama, analiza modulacionih karakteristika samog pojačavača obuhvata i režim rada za velike signale.

Model laserskog sistema koji ne uzima u obzir uticaj parazitnih efekata formulisan je kao konturni problem, koji funkciju prenosa optičkog vlakna implementira kao granični uslov. Polazeći od numeričkog rešavanja konturnog problema sprovedena je analiza modulacionog odziva i odgovarajućeg propusnog opsega lasera. Pokazano je da, zbog grupnog kašnjenja pri povratnom putu kroz vlakno, modulacioni odziv RSOA-FCL pokazuje oscilatorno ponašanje. Propusni opseg RSOA-FCL je analiziran u odnosu na gustinu struje polarizacije RSOA i dužinu aktivne oblasti, dužinu distribucionog vlakna i spektralnu širinu optičkog filtera propusnika učestanosti. Propusni opseg FCL je ograničen nižim od dva propusna opsega – RSOA ili vlakna, što je u slučaju značajne disperzije najčešće propusni opseg vlakna. U slučaju male ili neznatne disperzije vlakna, propusni opseg FCL može se poboljšati povećanjem struje polarizacije ili dužine vlakna i/ili odabirom optimalne dužine aktivne oblasti RSOA, a ograničen je performansama RSOA.

Simulacija odziva samostalnog RSOA bazirana je na složenijem modelu, koji pored interakcije

fotona i nosilaca naelektrisanja u aktivnoj oblasti uključuje i transportne efekte - difuziju, zarobljavanje i otpuštanje nosilaca. Analiza ukazuje na to da tzv. interni propusni opseg može biti dosta visok, ali da je obično ograničen parazitnim efektima samog čipa. To dovodi do relativno niskog eksternog propusnog opsega. Pokazano je da se problem može prevazići optimizacijom dizajna RSOA strukture i parametara koji su u korelaciji sa parazitnim elementima, što može značajno poboljšati eksterni propusni opseg pojačavača kroz efekat indukcionog pika. Efikasnost metode indukcionog pika se povećava ukoliko je granična frekvencija internog propusnog opsega bliska rezonantnoj frekvenciji ekvivalentnog parazitnog kola. Pored toga, u slučaju analize pri modulaciji velikim signalima pokazano je da metoda indukcionog pika može omogućiti poboljšanje Q-faktora, posebno u slučaju niskih ulaznih optičkih snaga i niskih do umerenih gustina struje koje odgovaraju logičkim nivoima 0 i 1. Pod uslovom da se dubina modulacije održava fiksnom, Q-faktor može biti maksimalizovan pronalaženjem optimalne struje koja odgovara logičkom nivou 0. Konačno, pokazano je da tehnika indukcionog pika može poboljšati i eksterni propusni opseg celokupnog RSOA-FCL u sistemu sa značajnom disperzijom, doduše u ograničenom opsegu radnih uslova.

**Ključne reči:** –3dB propusni opseg, poluprovodnički optički pojačavači, optičko vlakno, laser, modulacioni odziv, indukcionik, optičke pristupne mreže

**Naučna oblast:** Fizička elektronika

**Uža naučna oblast:** Nanoelektronika i fotonika

**Dissertation title:** Modulation response of reflective semiconductor optical amplifier - fiber cavity laser

**Abstract:** The subject of this dissertation is the modulation performance of a reflective semiconductor optical amplifier (RSOA) based - fiber cavity laser (FCL). This device is considered as a laser system composed of two sections: the active section, which is the reflective optical amplifier providing gain, and the passive section, which includes the optical fiber serving as an external resonant cavity, along with an optical band-pass filter placed between the amplifier and the fiber. With the use of an appropriate optical filter, these lasers can easily adjust their operating wavelength, making them well-suited for optical network units in wavelength division multiplexing passive optical networks.

This dissertation proposes a detailed and efficient model, numerically implemented to simulate the modulation response of each component in the laser system. The modulation response of the passive section - the optical fiber is defined by the fiber's transfer function, obtained from the Fourier transform of the fiber's impulse response. This method considers the effects of attenuation and dispersion on signal propagation through the fiber. The model for the reflective optical amplifier is based on rate equations that describe the interactions between photons and carriers within the amplifier's active region that consists of a bulk semiconductor, and also includes additional parasitic-like effects of the structure for the active region based on multiple quantum wells. The model also incorporates parasitic effects from the semiconductor chip and its packaging, analyzed using an equivalent electrical parasitic circuit.

The integrated version of the model, i.e., the simulation of the entire laser system, enables the identification and analysis of factors that limit the modulation performance of such a device. Additionally, the response simulation helps to understand the methods that can overcome the bandwidth-limiting factors. The focus of the research is on determining the modulation response and the corresponding  $-3\text{dB}$  bandwidth under small-signal direct modulation. However, since reflective optical amplifiers can also be used as standalone components in passive optical networks, the analysis of the amplifier's modulation characteristics also includes operation under large-signal conditions.

The laser system model, which does not consider the impact of parasitic effects, is encapsulated in a boundary value problem (BVP), which, through the boundary condition, accounts for the fiber cavity transfer function. By numerically solving the boundary value problem, the modulation response and corresponding bandwidth of the laser were analyzed. It was shown that due to the round-trip group delay, the RSOA-FCL's modulation response exhibits oscillatory behavior. The bandwidth of an RSOA-FCL is analyzed with respect to the RSOA's bias current density and active region length, the distribution fiber length, and the spectral width of an optical band-pass filter. The FCL bandwidth, in case of significant fiber dispersion is limited by the lower of the two bandwidths - RSOA's or fiber's, usually the latter one. In case of small or negligible fiber dispersion, the bandwidth of FCL can be improved by increasing the RSOA's bias current or fiber length and/or selecting the optimal RSOA active region length, and is limited by the RSOA's performance.

The response simulation of a standalone RSOA is based on a more complex model that includes not only the interactions between photons and carriers in the active region but also transport effects

including carrier diffusion, capture and escape. The analysis indicates that the so-called internal bandwidth can be quite high but is typically limited by the parasitic effects of the chip itself, leading to a relatively low external bandwidth. It has been shown that this issue can be mitigated by optimizing the design of the RSOA structure and the parameters correlated with parasitic elements, which can significantly enhance the external bandwidth of the amplifier through the inductive peaking effect. The efficiency of the inductive peaking technique increases if the RSOA's internal bandwidth is close to the resonant frequency of the equivalent parasitic circuit. Furthermore, in the case of large-signal modulation analysis, it has been demonstrated that the inductive peaking effect provides enhancement of the Q-factor especially in the case of low input optical powers and low to moderate current densities of bits 0 and 1. Provided that the modulation depth is kept fixed, the Q-factor can be maximized by finding the optimum current corresponding to bit 0. Finally, it has been shown that the inductive peaking technique can also improve the external bandwidth of the entire RSOA-FCL system in scenarios with significant dispersion, although within a limited range of operating conditions.

**Keywords:** –3dB bandwidth, semiconductor optical amplifiers, optical fiber, laser, modulation response, inductive peaking, optical access networks

**Scientific field:** Physical Electronics

**Scientific subfield:** Nanoelectronics and photonics

# Sadržaj

<b>1</b>	<b>Uvod</b>	<b>1</b>
1.1	Pasivne optičke pristupne mreže . . . . .	3
1.1.1	Arhitektura PON mreža . . . . .	4
1.1.2	Tehnologije multipleksiranja u PON mrežama . . . . .	5
1.1.3	Generacije PON mreža . . . . .	7
1.2	Bezbojni transmiteri za PON-WDM . . . . .	11
1.3	Pregled postojećih realizacija RSOA iz perspektive modulacionih performansi . . . . .	14
<b>2</b>	<b>Model fiber lasera sa refleksionim poluprovodničkim pojačavačem</b>	<b>17</b>
2.1	Pasivna sekcija - OBPF i optičko vlakno . . . . .	18
2.2	Princip rada i dizajn aktivne sekcije - RSOA . . . . .	22
2.2.1	Aktivna oblast RSOA od masivnog poluprovodnika . . . . .	22
2.2.2	Aktivna oblast RSOA od višestrukih kvantnih jama . . . . .	23
2.2.3	Model brzinskih jednačina RSOA . . . . .	25
2.3	Stacionarna analiza . . . . .	30
2.3.1	Stacionarna analiza MQW-RSOA . . . . .	30
2.3.2	Stacionarna analiza RSOA-FCL sistema . . . . .	32
2.4	Dinamička analiza . . . . .	34
2.4.1	Analiza RSOA i RSOA-FCL u režimu za male signale . . . . .	34
2.4.2	Analiza RSOA u režimu velikih signala . . . . .	39
2.5	Eksterni modulacioni odziv RSOA . . . . .	42
<b>3</b>	<b>Rezultati i diskusija</b>	<b>47</b>
3.1	Sopstveni modulacioni odziv RSOA-FCL . . . . .	48
3.1.1	Uticaj gustine struje polarizacije . . . . .	48
3.1.2	Uticaj dužine vlakna . . . . .	49
3.1.3	Uticaj radne talasne dužine . . . . .	50
3.1.4	Uticaj spektralne širine filtera . . . . .	53
3.1.5	Uticaj dužine aktivne oblasti RSOA . . . . .	54
3.2	Optimizacija propusnog opsega RSOA u režimu malih signala . . . . .	55
3.3	Optimizacija propusnog opsega RSOA u režimu velikih signala . . . . .	62
3.4	Optimizacija modulacionog odziva RSOA-FCL . . . . .	71



<b>4 Zaključak</b>	<b>78</b>
<b>Bibliografija</b>	<b>82</b>
<b>Indeks skraćenica</b>	<b>92</b>
<b>Biografija</b>	<b>95</b>

# Glava 1

## Uvod

Optičke pristupne mreže (eng. *Optical Access Network*, OAN) i mobilne komunikacije su u osnovi ključnog tehnološkog razvoja telekomunikacionih sistema potrebnih za podršku budućih usluga kao što je metaverzum - skup 3D virtuelnih stvarnosti za koji se predviđa da će redefinisati društvene veze [1]. Akademska zajednica i industrija se suočavaju sa brojnim izazovima posebno vezanim za segment pristupnih mreža, a koji se odnose na brzinu prenosa, kašnjenje i konvergenciju. Iako je peta generacija mobilne mrežne tehnologije (5G) još uvek u fazi implementacije širom sveta, uveliko se radi na razvoju sledeće, šeste generacije (6G) bežičnih sistema [2], [3], [4], a uporedo i na implementaciji pasivnih pristupnih optičkih mreža (eng. *Passive Optical Network*, PON) velikog kapaciteta.

U cilju zadovoljenja zahteva aktuelnih servisa i usluga, 5G tehnologija koristi nekoliko novih tehnika i karakteristika u pristupnim radio mrežama, kao što su milimetarski talasi, sistemi sa velikim brojem antena u predajniku i prijemniku (eng. *massive Multiple Input Multiple Output*, mMIMO), heterogene mreže i potpunu pokrivenost mreže upotrebom većeg broja manjih stanica [5]. Očekuje se da će 6G biti još disruptivniji i da će koristiti terahercni opseg frekvencija za ostvarivanje vrlo brzih konekcija, a sve to će nametnuti potrebu za prenosom još veće količine podataka u pristupnom segmentu [3].

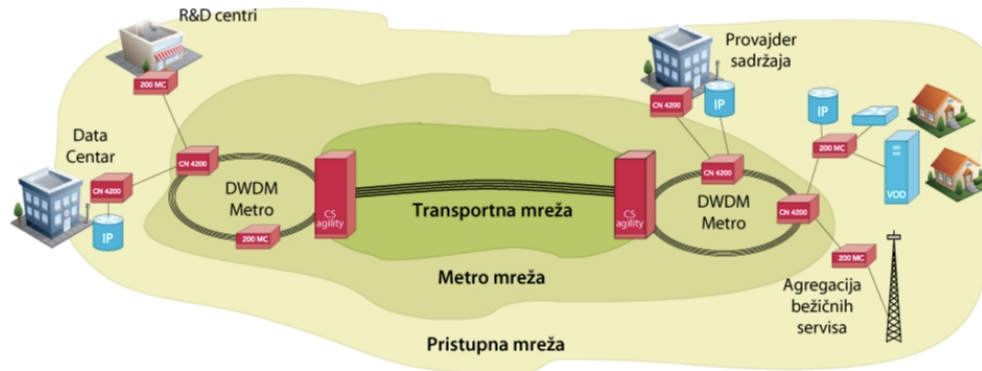
Tehnologija 5G koristi arhitekturu centralizovane radio pristupne mreže (eng. *Centralized Radio Access Network*, C-RAN), gde se jedinice za obradu baznih signala (eng. *Baseband Unit*, BBU) grupišu u centrali radi kontrole udaljenih radio jedinica (eng. *Remote Radio Units*, RRU). Upotreba optičkih pristupnih mreža za uspostavljanje veze između baznih i udaljenih radio jedinica prepoznata je kao ključni pokretač za standardizaciju PON mreža velikih brzina. Među mogućim konfiguracijama multipleksiranja po talasnim dužinama (eng. *Wavelength Division Multiplexing*, WDM) pokazuje se kao najperspektivnije za ispunjenje postavljenih zahteva. Jedan od izazova optičkih pristupnih WDM mreža je dinamička dodela talasnih dužina, koja nameće potrebu da sistemi budu skoro neosetljivi na promenu talasne dužine, odnosno da budu "bezbojni" [3].

Predmet istraživanja ove disertacije je specifična klasa lasera, koja se zasniva na sprezi aktivne komponente - refleksionog poluprovodničkog optičkog pojačavača (eng. *Reflective Semiconductor Optical Amplifier*, RSOA) i pasivne sekcije - distribucionog optičkog vlakna koje istovremeno predstavlja i laserski rezonator i poslednju deonicu pristupne optičke mreže. Ovakav predajnik predsta-

vlja potencijalno efikasno, tehnološki jednostavno i finansijski isplativo rešenje, koje u WDM-PON mrežama može da obezbedi dinamičku dodelu radnih talasnih dužina.

Disertacija je organizovana na sledeći način:

- U uvodnom poglavlju dat je pregled aktuelnih telekomunikacionih tehnologija i ukazano je na značaj bezbojnih predajnika za unapređenje kapaciteta pristupnih mreža. Prikazana je arhitektura i klasifikacija telekomunikacionih mreža, sa fokusom na razvoj optičkih mreža kroz standardizovane generacije, osnovne elemente pasivnih optičkih mreža i tehnologije multipleksiranja. Sekcija 1.2 daje pregled predajnika pogodnih za primenu u bezbojnim optičkim mrežnim jedinicama na korisničkoj strani pristupne mreže. Konačno, u okviru sekcije 1.3 analiziran je uticaj parazitnih efekata čipa i pakovanja na modulacione performanse poluprovodničkog optičkog pojačavača kao osnovnog bloka predložene optičke mrežne jedinice.
- Poglavlje 2 opisuje teorijske modele koji su korišćeni za analizu performansi predloženog laserskog sistema. Posebno su analizirane pasivna sekcija koju čine optičko vlakno i optički filter propusnik opsega (sekcija 2.1) i aktivna sekcija. U sekciji 2.2 opisani su struktura i princip rada RSOA i predstavljene su optičke osobine za pojačavače koji koriste dva različita tipa aktivnih sekcija, masivni poluprovodnik i kvantno-konfiniranu strukturu zasnovanu na višestrukim kvantnim jamama (eng. *Multiple Quantum Wells*, MQW). Stacionarna i dinamička analiza RSOA sprovedena je na osnovu sistema brzinskih jednačina koje formiraju model aktivne komponente lasera, predstavljen u sekciji 2.2.3. Stacionarna analiza koja obuhvata i model samostalnog optičkog pojačavača i model celokupnog laserskog sistema predstavljena je u sekciji 2.3, dok je dinamička analiza aktivne komponente lasera za režim malih i velikih signala opisana u sekciji 2.4. Konačno, u okviru sekcije 2.5 opisan je uticaj efekata parazitike koji uzimaju u obzir sam poluprovodnički čip i njegovo pakovanje u funkcionalno kućište, a koji se mogu analizirati pomoću ekvivalentnog električnog parazitnog kola.
- U poglavlju 3 dati su rezultati numeričkih simulacija modulacionih performansi refleksionog optičkog pojačavača kao samostalne naprave i u sklopu laserskog sistema. Analiza modulacionog odziva i odgovarajućeg propusnog opsega fiber lasera pri modulaciji malim signalima izložena je u sekciji 3.1. Rezultati su prikazani za direktno modulirani laserski sistem, koji koristi masivni poluprovodnik kao aktivnu oblast optičkog pojačavača, bez razmatranja uticaja efekata parazitike. U sekciji 3.2 fokus je stavljen na samostalni režim rada pojačavača. Izložena je analiza modulacionog odziva i propusnog opsega u režimu malih signala za strukturu sa višestrukim kvantnim jamama, uzimajući u obzir uticaj parazitnih efekata. U okviru ove sekcije, ispitana je mogućnost primene tehnike induktionog pika u svrhu poboljšavanja modulacionih performansi RSOA. Sekcija 2.4.2 daje uvid u uticaj parazitnih efekata sa tehnikom induktionog pika na modulacione karakteristike samostalnog pojačavača baziranog na višestrukim kvantnim jamama, u režimu modulacije velikim signalima. Konačno, u sekciji 3.4 ispitan je uticaj parazitnih efekata sa tehnikom induktionog pika na celokupan laserski sistem.
- U poglavlju 4 dati su zaključci istraživanja sprovedenog tokom izrade ove disertacije.



Slika 1.1: Arhitektura optičke mreže [6].

### 1.1 Pasivne optičke pristupne mreže

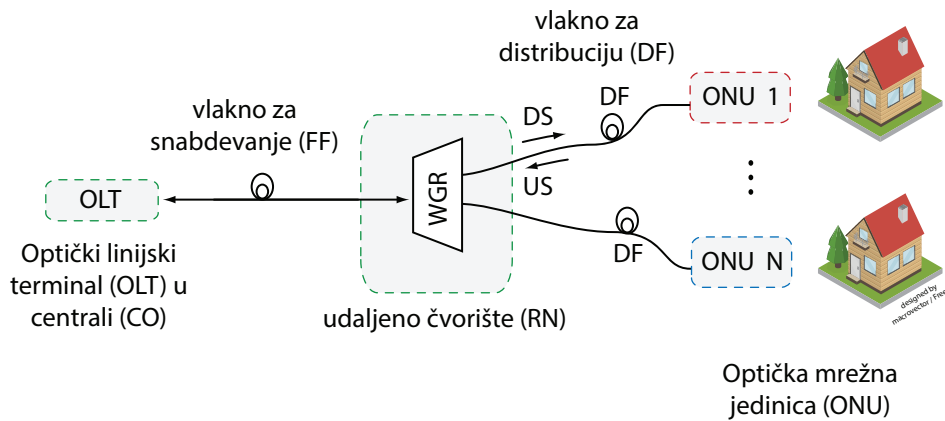
U arhitekturi telekomunikacionih mreža, šematski prikazanoj na sl. 1.1 se prepoznaju tri glavne sekcije: transportna mreža ili okosnica, metro ili regionalna mreža i pristupna mreža. Okosnica je osnova mreže, koja omogućava povezivanje na velikim udaljenostima, uobičajeno između glavnih gradova, država ili kontinenta. Ova sekcija zahteva visoki propusni opseg i otpornost na degradacije bilo koje vrste kako bi se omogućio prenos velike količine podataka. Metro ili regionalne mreže povezuju centrale u okviru gradskih oblasti ili regiona. Ova sekcija ima ključnu ulogu u prikupljanju i usmeravanju saobraćaja iz lokalnih područja ka okosnici, balansirajući između visokog propusnog opsega i optimalnosti troškova. Na kraju, pristupna optička mreža je mreža u kojoj optička vlakna prenose signale između centrala koje obezbeđuju uslugu i krajnjih korisnika ili većim delom puta do krajnjih korisnika, kao što su domaćinstva i preduzeća. Ova sekcija mreže se stoga često označava kao "poslednji kilometar". Pristupna mreža se fokusira na pristupačnost i prilagodljivost kako bi se zadovoljile različite potrebe korisnika za propusnim opsegom, obezbeđujući efikasnu dostavu usluga.

Svaka od definisanih sekcija optičke mreže se dizajnira da odgovori na specifične zahteve u pogledu informacionog kapaciteta i troškova, koji reflektuju njihove različite uloge unutar ukupne mrežne arhitekture [7].

Različiti faktori diktiraju razvoj telekomunikacionih mreža, posebno pristupnih mreža. Na primer, dostupnost pametnih uređaja poput telefona i tableta po sve nižim cenama značajno je uticala na povećanje zahteva mrežnih korisnika u odnosu na kapacitete pristupne mreže. Takođe, glavni sadržaj mobilnih prenosa više nisu glasovni pozivi. Umesto toga, usluge koje zahtevaju veliki propusni opseg, poput video sadržaja visoke rezolucije na zahtev i deljenja fajlova, koriste najveći deo mrežnog kapaciteta. Ovo zahteva ekonomične optičke pristupne mreže velikog kapaciteta, koje mogu da zadovolje rastuće potrebe kako u stambenim, tako i u poslovnim okruženjima, a istovremeno i u mobilnim mrežama [8].

Pristupna optička mreža se smatra pasivnom ako između centrale i krajnjih korisnika nema ak-

## 1.1 Pasivne optičke pristupne mreže



Slika 1.2: Arhitektura pasivne optičke mreže: u centrali (CO), optički linijski terminal (OLT) sadrži predajnik za dolazni signal (DS) i prijemnik za odlazni signal (US). DS signal se distribuira do određene tačke preko udaljenog čvorišta (RN) u kome se nalaze talasovodni optički ruter ili razdelnik snage, u zavisnosti od metode multipleksiranja. Optičko vlakno za snabdevanje (FF) povezuje CO i RN. Na poslednjem delu mreže (FFTx), US transmisija i DS prijem se realizuju unutar optičke mrežne jedinice (ONU), na strani korisnika. Optičko vlakno koje povezuje RN i ONU, naziva se vlakno za distribuciju (DF).

tivnih komponentata sa napajanjem. Upotreba isključivo pasivnih komponenti čini ove mreže značajno jeftinijim od mreža koje koriste aktivne komponente, doduše na uštrb kraćeg ukupnog dometa odnosno manje pokrivenosti, a kao posledica ograničene jačine signala. Dok aktivne optičke mreže (eng. *Active Optical Network*, AON) mogu imati domet preko 90 km, PON je obično ograničen na oko 20 km.

U zavisnosti od toga gde se PON završava, sistem se može opisati kao vlakno-do-x (eng. *Fiber-To-The-x*, FTTx) mreža, gde x može da predstavlja naselje (FFTC), zgradu (FFTB), i kuću (FFTH), odnosno krajnjeg korisnika. FTTx tehnologije se mogu implementirati kao tačka-tačka (eng. *Point-to-Point*, PtP) mreže ili tačka-ka-više-tačaka (eng. *Point-to-Multipoint*, PtMP), pri čemu je u slučaju PtP arhitekture svaki korisnik povezan zasebnim optičkim vlaknom sa centralom, dok PtMP omogućava povezivanje većeg broja korisnika jednim vlaknom od centrale do pasivnog razdelnika, a zatim posebnim vlaknom do svakog korisnika. Kako PtMP arhitekture obezbeđuju niže troškove po korisniku deljenjem ukupne cene optičkih vlakana i opreme na veći broj korisnika, PON FTTH mreže su uobičajeno PtMP tipa [7] [9].

### 1.1.1 Arhitektura PON mreža

Na sl. 1.2 dat je grafički prikaz standardne PON mreže, koja ima sledeće elemente:

- Optički linijski terminal (eng. *Optical Line Terminal*, OLT) služi kao veza između pristupne i metro mreže. Nalazi se u okviru centrale i ima ulogu da izvršava elektro-optičku konverziju i obradu dolaznog (eng. *Downstream*, DS) signala. Jedan OLT može da podrži više korisnika upotrebom neke od metoda multipleksiranja [10].
- Optička mrežna jedinica (eng. *Optical Network Unit*, ONU) predstavlja završnu tačku optič-

## 1.1 Pasivne optičke pristupne mreže

kog segmenta PON-a na strani korisnika i sadrži komponente za elektro-optičku konverziju i obradu signala. Veza između ONU i opreme na strani korisnika se može ostvariti bakarnim paricama, koaksijalnim kablovima ili optičkim vlaknima [8].

- Optička distributivna mreža (eng. *Optical Distribution Network*, ODN) obuhvata sve optičke komponente između optičkog linijskog terminala i optičke mrežne jedinice. Ove komponente podrazumevaju vlakno za snabdevanje (eng. *Feeder Fiber*, FF), udaljeno čvorište (eng. *Remote Node*, RN) i vlakno za distribuciju (eng. *Distribution Fiber*, DF). Odlazni signal koji napušta ONU vlaknom za distribuciju dolazi do udaljenog čvorišta RN. Osnovna uloga RN je da multipleksira odlazni (eng. *Upstream*, US), odnosno demultipleksira dolazni (DS) signal. Nakon RN, signal se u slučaju odlaznog saobraćaja šalje vlaknom za snabdevanje do prijemnika u OLT [8].

### 1.1.2 Tehnologije multipleksiranja u PON mrežama

PtMP PON mreže mogu se implementirati koristeći različite tehnologije multipleksiranja. U nastavku ovog poglavlja biće razmotreni protokoli multipleksiranja i kontrole višestrukog pristupa (eng. *Multiple Access Control*, MAC) koji su najčešće zastupljeni u PON mrežama, a koji upravljaju i kontrolišu način prijema dolaznih i slanja odlaznih signala. Uobičajeno korišćene tehnike koje se koriste za multipleksiranje signala u pasivnim optičkim mrežama su multipleksiranje u vremenskom domenu (eng. *Time Division Multiplexing*, TDM) i multipleksiranje po talasnim dužinama (WDM).

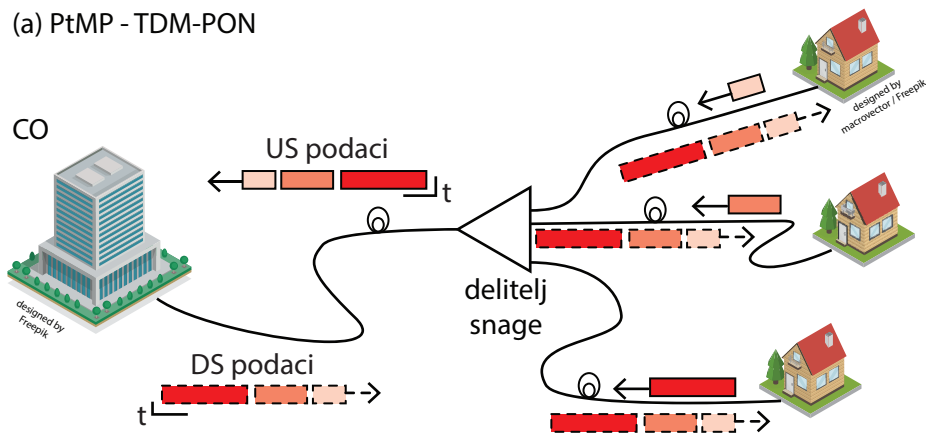
TDM je i dalje najzastupljenija metoda multipleksiranja u PON mrežama, zbog svoje jednostavnosti i optimalnih troškova. Šematski prikaz TDM-PON mreže prikazan je na sl. 1.3 (a). U ovoj tehnici specifični vremenski intervali se dodeljuju svakom korisniku, a prenos se, za sve pretplatnike, obavlja preko jedinstvene talasne dužine. U DS smeru, signal se iz centrale prenosi na sve korisnike, a oprema u korisničkim optičkim mrežnim jedinicama prima deo podataka namenjenih konkretnom korisniku na osnovu detekcije specifično dodeljene adrese. Kako ne bi došlo do preklapanja signala u US smeru, signali svih korisnika moraju biti sinhronizovani i to uzimajući u obzir različite udaljenosti korisnika od udaljenog čvorišta. Sinhronizacija takođe uzima u obzir mogućnost da različitim korisnicima mogu biti dodeljene različite veličine vremenskih slotova što zavisi od njihovih potreba za propusnim opsegom, što se naziva dinamička dodela propusnog opsega. Jedan od osnovnih razloga široke rasprostranjenosti TDM metode je činjenica da se vremenska sinhronizacija i dinamička dodela slotova mogu realizovati korišćenjem relativno jeftine elektronike.

Međutim, slanje DS signala ka svim korisnicima čini sistem zasnovan na TDM manje sigurnim. Osim toga, gubitak snage na RN razdelniku signala značajno ograničava domet TDM-PON-a, a poslednjih godina dinamička dodela vremenskih slotova za maksimalni propusni opseg jednostavno nije dovoljna da se nosi sa zahtevima od Gbit/s po korisniku [8].

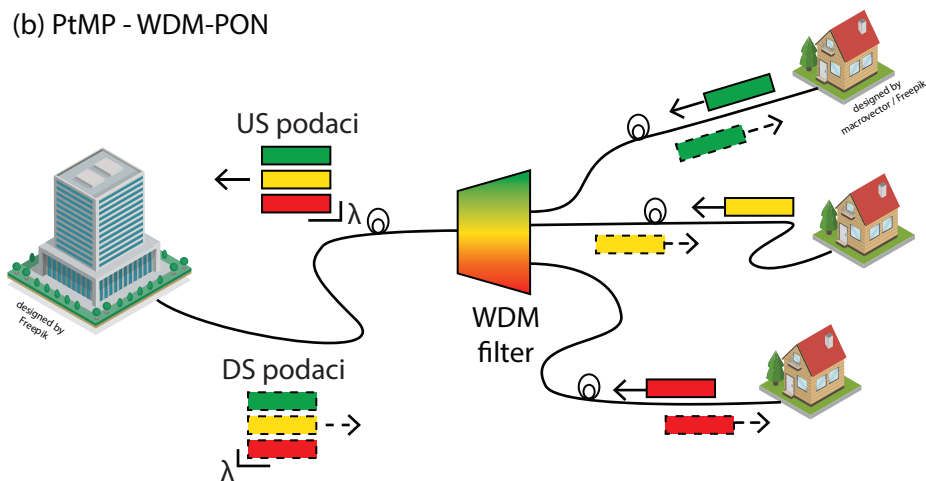
Za razliku od TDM-PON mreža, u WDM-PON mrežama svakom korisniku se dodeljuje posebna talasna dužina, kako je šematski prikazano na sl. 1.3 (b). Na ovaj način, optički link funkcioniše kao virtualna PtP veza uprkos tome što je fizički sloj realizovan kao PtMP. Dodela jedne talasne dužine po korisniku i zamena razdelnika snage WDM filterom na RN omogućava ostvarivanje dugodometnih pasivnih optičkih mreža eliminisanjem problema gubitka snage. U poređenju sa TDM-PON-om,

## 1.1 Pasivne optičke pristupne mreže

(a) PtMP - TDM-PON



(b) PtMP - WDM-PON



Slika 1.3: Tehnologije multipleksiranja pasivnih optičkih mreža sa PtMP implementacijom. (a) U TDM-PON mreži, određen vremenski interval se dodeljuje različitim korisnicima. U DS smeru, signal se od centrale prenosi svim korisnicima preko razdelnika snage na udaljenom čvorištu, pri čemu svaki prijemnik koristi unapred dodeljeni vremenski interval za detekciju. U US smeru, signali pretplatnika se spajaju na RN i tako prenose do centrale. (b) U WDM-PON mreži se posebna talasna dužina dodeljuje svakom pretplatniku, što praktično znači da se praktično uspostavlja virtuelna PtP veza [8].

WDM-PON ima veći kapacitet po korisniku.

Postoje dva faktora koja otežavaju prelazak sa široko rasprostranjene TDM-PON na WDM-PON. Prvi faktor je cena i složenost transmitera sa podesivom talasnom dužinom, a drugi je relativno skup proces zamene RN razdelnika snage sa WDM filterima potrebnim za WDM-PON. Prvi problem se može rešiti upotrebom bezbojnih predajnika. U tom slučaju, svaki korisnik može koristiti identičnu opremu, što značajno smanjuje troškove implementacije.

Izbor odgovarajuće metode multipleksiranja zavisi od više faktora. Jedan od ključnih faktora je odnos deljenja signala, odnosno broj korisnika koje mreža može da podrži. U najboljem slučaju, mreža treba da podrži što veći broj korisnika sa postojećom infrastrukturom. Međutim, u slučaju TDM-PON mreža, kada se broj korisnika poveća jačina signala se znatno smanjuje jer se snaga deli među svim korisnicima. Pored toga, dostupni vremenski interval za svakog korisnika postaje sve manji, što smanjuje brzinu prenosa podataka. Sa druge strane, WDM-PON mreže podržavaju veći broj korisnika budući da se svakom korisniku dodeljuje posebna talasna dužina. Kod WDM-PON

### 1.1 Pasivne optičke pristupne mreže

mreža razdelnik snage ne postoji, pa je potrebno uzeti u obzir samo gubitak signala kroz WDM filter na RN kraju. Još jedan važan aspekt je bezbednost prenosa podataka. U TDM-PON u DS smeru podaci se šalju svim korisnicima, što znači da privatni podaci jednog korisnika mogu biti dostupni drugima. WDM-PON ovo izbegava pružajući svakom korisniku posebnu talasnu dužinu i stvarajući siguran put do centrale [8].

#### 1.1.3 Generacije PON mreža

Razvoj pasivnih optičkih mreža može se pratiti kroz više standardizovanih generacija. Osnovna motivacija unapređivanja PON mreža jeste potreba da se ostvare veći propusni opsezi sa nizim troškovima i manjom potrošnjom energije. Međutim, treba imati u vidu da nove tehnologije moraju da koegzistiraju sa starim, koje su već široko rasprostranjene.

Međunarodna telekomunikaciona unija (eng. *International Telecommunication Union*, ITU) i Institut inženjera elektrotehnike i elektronike (eng. *Institute of Electrical and Electronics Engineers*, IEEE) zajedno su razvili opseg standarda za pasivne optičke mreže, uključujući APON, BPON, GPON, EPON, 10G-EPON, XG-PON, NG-PON2, XGS-PON, 50G-EPON i 50GPON. Svaka od ovih generacija PON mreža donosi napredak u brzini i funkcionalnosti. Na sl. (1.4) prikazana je evolucija standarda PON mreža.

**BPON (ITU-T G.983)** Širokopojasna PON mreža (eng. *Broadband PON*, BPON) je prva generacija PON mreža koja je međunarodno standardizovana od strane ITU-T. BPON predstavlja proširenje ranijeg APON koji je koristio ATM (eng. *Asynchronous Transfer Mode*, ATM-PON) paketsku komunikaciju, sa ciljem da se standardizuju dodatni širokopojasni servisi (Ethernet velike brzine, video distribucija i dr.). BPON koristi opsege talasnih dužina za DS i US smer od 1260 – 1360 nm i 1480 – 1580 nm, respektivno. Ovako širok opseg talasnih dužina je zadat kako bi se omogućila upotreba u tom trenutku dostupnih izvora za ONU, kao što su Fabri-Pero lasrske diode (FP-LD). Sa druge strane, na strani optičkog linijskog terminala koriste se laseri sa distribuiranom povratnom spregom (eng. *Distributed Feedback*, DFB), kao DS predajnici. Podržane brzine prenosa iznose 622 Mb/s, za DS, odnosno 155 Mb/s za US signale, a maksimalni domet je 20 km sa odnosom podele od 1 : 128. BPON koristi TDM tehnologiju za deljenje vlakna između više korisnika i tehniku rangiranja za sinhronizaciju vremenskih razlika između više korisnika koji su na različitim udaljenostima od centrale. Konačna verzija BPON-a uključivala je dinamičku raspodelu propusnog opsega, gde OLT može dodeljivati propusni opseg korisnicima na osnovu njihovog trenutnog saobraćaja. Međutim, ATM protokol je gubio popularnost, dok su Ethernet i Internet protokol (IP) brzo napredovali. Zbog toga je bilo potrebno uspostaviti interfejs između ATM protokola u PON mreži i Ethernet ili IP protokola koji se koriste na uređajima korisnika. Ovaj dodatni interfejs je povećavao cenu ONU-a, a povećana potreba za većim propusnim opsegom navela je ITU-T da razmotri unapređenje mreže [8], [11].

**GPON (ITU-T G.984)** Gigabitna pasivna optička mreža (GPON) razvijena je kako bi se pojednostavio prelazak sa ATM na Ethernet i IP protokole, ali i kako bi se zadovoljili sve veći zahtevi za propusnim opsegom na korisničkom kraju. Jedna od osnovnih karakteristika GPON-a je primena



### 1.1 Pasivne optičke pristupne mreže

nove GPON metode enkapsulacije (eng. *GPON Encapsulated Method*, GEM), što pruža efikasno pakovanje korisničkih podataka u ramove varijabilnih dužina. Osim enkapsulacije ATM ćelija, GPON podržava Ethernet ramove i TDM slotove. GPON podržava isti opseg talasnih dužina, budžet snage i domet kao BPON, ali takođe uključuje i drugu talasnu dužinu za analogni prenos video signala. GPON omogućava brzinu prenosa od 2.488 Gb/s za DS, odnosno 1.244 Gb/s za US. Da bi podržao ove brzine prenosa, transiveri u OLT-u i ONU-u koriste DFB lasere kao predajnike i lavinske fotodiode (eng. *Avalanche Photodiode*, APD) kao prijemnike. Dodatno, ITU-T GPON standardi propisuju upotrebu korekcije grešaka unapred (eng. *Forward Error Correction*, FEC), kako bi se postigao veći domet uz upotrebu relativno jeftinih transivera [8], [11–13].

**EPON (IEEE 802.3ah)** Ethernet PON (EPON) je prva generacija PON-a standardizovana od strane IEEE. Kako se Ethernet protokol pokazao uspešnim u lokalnim (LAN) i metro mrežama, odlučeno je da se koristi kroz celu optičku pristupnu mrežu. Podaci se prenose u Ethernet ramovima u skladu sa Ethernet standardom. Maksimalni domet mreže je 20 km sa odnosom podele 1 : 32. EPON pruža simetrične brzine prenosa od 1.25 Gb/s za DS i US. EPON nije tako efikasan kao GPON u smislu upravljanja propusnim opsegom i obezbeđivanja kvaliteta servisa, ali predstavlja ekonomičnije rešenje od GPON-a. EPON koristi DFB lasere i APD detektore u OLT-u, slično kao kod GPON-a, dok se u ONU koriste ili FP-LD ili DFB laseri [8], [11].

**10G - EPON (IEEE 802.3av)** Dalji razvoj ka brzinama prenosa od 10 Gb/s postignut je kroz Gigabit EPON (10GEPON). 10GEPON je zadržao slične specifikacije kako bi se ostvarila kompatibilnost sa EPON-om. Predloženi budžet snage varira od 20 do 29 dBm. U 10GEPON-u OLT koristi eksterno modulisanu lasersku predajniku. Prijemnik je APD fotodiode sa opcijom korišćenja poluprovodničkih optičkih pojačavača kao predpojačavača za veći budžet snage i domet. Na strani ONU-a, koriste se laseri sa direktnom modulacijom sa APD ili PIN fotodiodom kao detektorom. Opseg talasnih dužina za US prenos je od 1260 – 1280 nm, dok je za DS prenos od 1575 – 1580 nm. U poređenju sa prethodnim generacijama, dodeljeni su užji opsezi za US i DS, jer se sada koriste monomodni laserski DFB moduli umesto multimodnih FP-LD, što omogućava uže razmake i efikasnije korišćenje optičkog spektra za povećani broj pretplatnika [8].

**XGPON (ITU-T G.987)** 10 - Gigabitna pasivna optička mreža (XG-PON) predviđena je da maksimizira brzinu protoka po korisniku, domet i odnos deljenja, zadržavajući istu optičku distributivnu mrežu kao BPON i GPON. XG-PON mreža predstavlja unapređenu verziju GPON-a, čija je standardizacija započela 2010. godine. XG-PON gura granice TDM-PON tehnologije do maksimuma i pruža brzine protoka od 10 Gb/s za DS i 2.5 Gb/s za US saobraćaj. Kako bi se ostvarila kompatibilnost sa postojećom infrastrukturom, XG-PON koristi talasne dužine od 1577 nm za DS i 1270 nm za US prenos. Ova promena talasnih dužina omogućava da GPON i XG-PON koegzistiraju na istoj mreži bez ometanja. S obzirom na veliku brzinu protoka, domet i odnos deljenja koji se ostvaruju u XG-PON-u, potrebni su samo laseri sa jednim longitudinalnim modom kako na ONU tako i na OLT strani. Stoga, OLT koristi eksterno modulisanu lasere velike izlazne snage i APD fotodiodu. U zavisnosti

### 1.1 Pasivne optičke pristupne mreže

od planiranog budžeta snage, SOA se može iskoristiti kao predpojačavač ispred APD-a. ONU koristi direktno modulirane DFB lasere sa PIN fotodiodom, ili APD fotodiodom za veći domet [8][14].

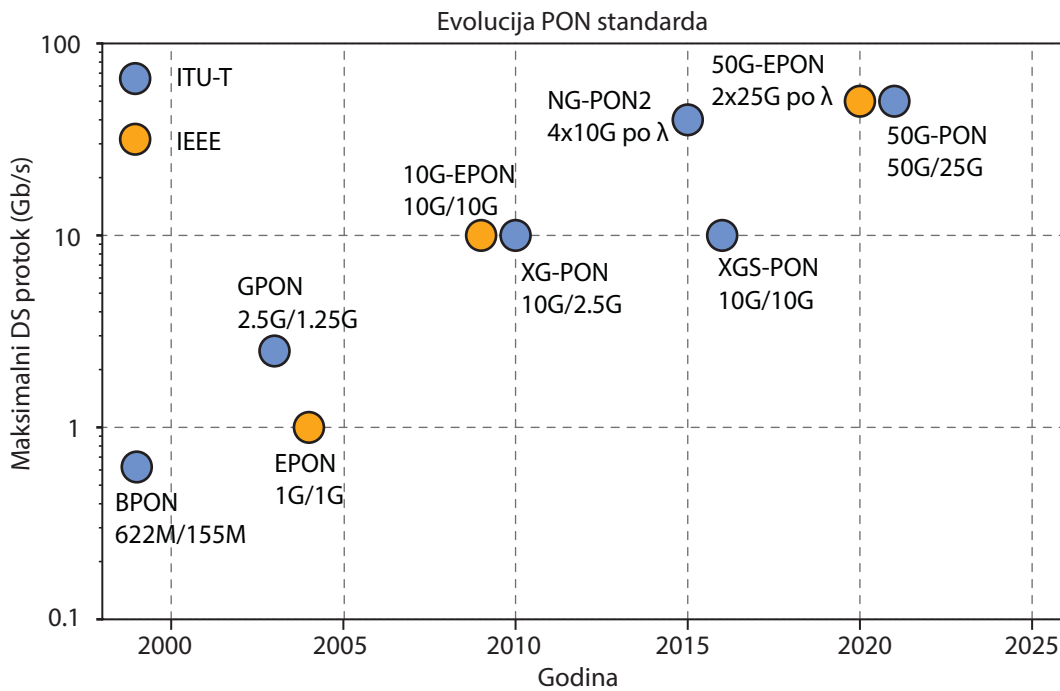
**NG-PON2 (ITU-T G.989)** Druga faza optičkih mreža nove generacije (NG-PON2) standardizovana je 2015. godine kao ITU-T G.989. Ključna karakteristika koja razlikuje NG-PON2 sistem od njegovih prethodnika je specifikacija prvog PON standarda u industriji koji podržava više talasnih dužina po smeru i kompatibilnost sa optičkim distributivnim mrežama baziranim na razdelnicima snage. Mnoge od postojećih funkcija GPON i XG-PON1 zadržane su u NG-PON2 sistemu kako bi se osigurala maksimalna upotreba postojeće tehnologije, instalirane optičke infrastrukture i koegzistencija sa postojećim PON sistemima. Zbog osnovnog zahteva NG-PON2 za kompatibilnošću sa ODN baziranim na razdelnicima snage, ovi PON sistemi zahtevaju uređaje sa podesivom talasnom dužinom na ONU. NG-PON2 standard oslanja se na TWDM tehnologiju koja kombinuje multipleksiranje u vremenskom domenu i multipleksiranje po talasnim dužinama, pri čemu se svaki kanal po talasnoj dužini može deliti među više ONU koristeći mehanizme multipleksiranja u vremenskom domenu i višestrukog pristupa. NG-PON2 podržava 4 do 8 talasnih dužina sa brzinom prenosa od 10 Gb/s po talasnoj dužini. Ukupni kapacitet mreže može biti od 40 do 80 Gb/s preko jednog optičkog vlakna. Maksimalni domet je 40 km sa odnosom podele do 1:256 [15], [16].

**XGS-PON (ITU-T G.9807.1)** 10-Gigabitna simetrična pasivna optička mreža (XGS-PON) obezbeđuje simetričnu brzinu prenosa podataka od 10 Gb/s u oba smera preko optičke mreže. Definisana je ITU-T standardom G.9807.1 i može koegzistirati sa postojećom GPON tehnologijom. Talasne dužine za DS i US smer su 1270 nm i 1577 nm, respektivno. Ove talasne dužine su izvan spektra koji je dodeljen za starije PON tehnologije, što omogućava da tehnologije mogu koegzistirati na istoj optičkoj mreži. XGS-PON sa simetričnom brzinom protoka ima slične troškove kao XG-PON, ali pruža četiri puta veći kapacitet za US, što mu daje prednost na tržištu u odnosu na prethodne generacije. XGS-PON koristi iste optičke distribucione mreže kao i GPON i XG-PON, čime se omogućava lako nadograđivanje bez potrebe za velikim izmenama u postojećoj infrastrukturi [17], [18].

**50G-EPON (IEEE 802.3ca)** 50 - Gigabitna Ethernet pasivna optička mreža (50G-EPON) standardizovana je od strane IEEE-a u junu 2020. godine. 50G-EPON je realizovan pomoću TWDM sistema koji prenosi dva talasna kanala brzinom od 25.78 Gb/s. 50G-EPON je dizajniran tako da može biti implementiran u istoj optičkoj pristupnoj mreži sa sistemom 10G-EPON, omogućavajući glatku migraciju sa konvencionalnog 10G-EPON na 50G-EPON. Na taj način, 10G signali koji koriste vremensku podelu (TDM) mogu koegzistirati na istoj talasnoj dužini u nekim slučajevima migracije. 50G-EPON radi preko već postavljene PON infrastrukture sa istim odnosom podele i nominalnim dometom kao prethodne generacije [19].

**50GPON (ITU-T G.9804.1)** 50 - Gigabitna pasivna optička mreža (50G-PON) predstavlja najnoviju tehnologiju pasivnih optičkih mreža, koja je zvanično standardizovana od strane ITU-T u septembru 2021. godine. 50G-PON koristi jedan par talasnih dužina i primenjuje multipleksiranje u vremenskom domenu u DS smeru i višestruki pristup u vremenskom domenu (eng. *Time Division*

## 1.1 Pasivne optičke pristupne mreže



Slika 1.4: Evolucija standarda PON mreža definisanih od strane međunarodne telekomunikacione unije (plava boja) i instituta inženjera elektrotehnike i elektronike (narandžasta boja). Na x-osi nalaze se godine standardizacije, a na y-osi maksimalni podržani DS protok. Ispod svake tačke koja označava jednu PON generaciju dati su naziv standarda kao i podržani DS/US protoci.

Multiple Access, TDMA) u US smeru. Mreža podržava brzinu prenosa od 50 Gb/s za dolazne signale i dve opcije za brzinu prenosa za US smer: 25 Gb/s i 12.5 Gb/s. 50G-PON može da funkcioniše preko postojećih optičkih distributivnih mreža dok koegzistira sa PON sistemima koji su već u upotrebi. To je omogućeno kroz plan talasnih dužina koji omogućava multipleksiranje po talasnim dužinama različitih generacija PON-a na istoj ODN mreži. Plan talasnih dužina za 50G-PON omogućava koegzistenciju sa G-PON ili XG(S)-PON sistemima, čime se omogućava nesmetana nadogradnja sistema putem odgovarajućih opcija za US talasne dužine, 1260–1280 nm ili 1290–1310 nm. Kompatibilnost sa prethodnim generacijama se postiže korišćenjem naprednih podesivih predajnika i prijemnika, koji omogućavaju novoj tehnologiji da radi bez ometanja starijih sistema, osiguravajući nesmetanu nadogradnju. Sistem 50G-PON omogućava domet do 40 km i podržava odnos podele do 1:256, pružajući pouzdane performanse na velikim mrežnim površinama. Njegova sposobnost da kombinuje visoke brzine prenosa podataka sa efikasnim korišćenjem talasnih dužina čini ga idealnim rešenjem za rastuće zahteve za većim protokom podataka u modernim digitalnim aplikacijama [20–22].

Evolucija standarda PON mreža na slici 1.4 pokazuje da je tokom godina uloženi značajan trud kako bi se povećala brzina PON mreža. Izgradnja infrastrukture je najskuplja komponenta pristupne mreže, a trenutne PON tehnologije često zahtevaju više aktivnih lokacija, kao što su centrale ili aktivni ormarići, kako bi usluga bila dostupna za područja sa radijusom većim od 20 km, što povećava troškove i složenost upravljanja. Novo optičko rešenje čiji razvoj je u toku, a koje je prostorno efikasnije, omogućava veći domet i više korisnika po jednom optičkom vlaknu, označava se kao Super-PON.

## 1.2 Bezbojni transmiteri za PON-WDM

Predviđa se da Super-PON može da podrži povećani domet do 50 km i povećanu pokrivenost korisnika do 1024 korisnika po vlaknu preko pasivne ODN. Zbog toga je fokus Super-PON-a više na skaliranju prostornih svojstava PON-a nego na skaliranju brzine. Što se tiče brzine, Super-PON podržava brzinu od 10 Gb/s. Sa Super-PON optičkim slojem, svaka centrala je sposobna da uslužuje znatno veći region i veći broj korisnika, što značajno pojednostavljuje osnovnu fizičku infrastrukturu. Proširenje dometa sa 20 na 50 km takođe omogućava optimizaciju centrala, smanjujući broj napajanih lokacija potrebnih za pokrivanje velikog područja. Super-PON postiže ove rezultate zahvaljujući primeni tri tehnologije: multipleksiranje po talasnoj dužini, rutiranje talasnih dužina i optičko pojačanje.

U industriji postoji veliki interes za razvoj Super-PON mreža, što potvrđuju dva paralelna procesa standardizacije koja se trenutno odvijaju: IEEE 802.3 i ITU-T Q2/SG15 [23].

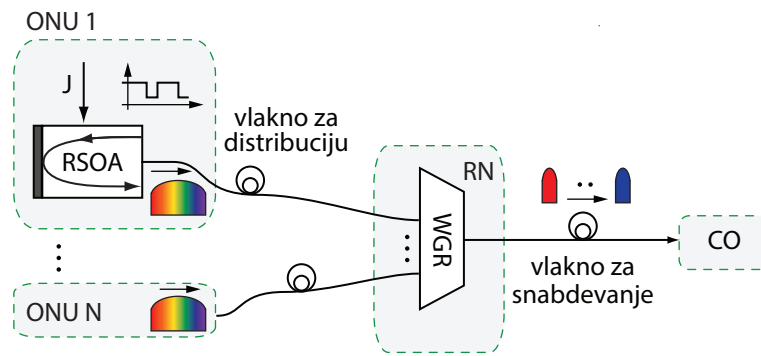
## 1.2 Bezbojni transmiteri za PON-WDM

Konstantno povećanje zahteva mrežnih korisnika u odnosu na pristupne mreže, posebno na poslednjem kilometru, zahteva primenu tehnologija koje nude jednostavna, energetska efikasna rešenja sa izuzetno niskim kapitalnim i operativnim troškovima i ulaganjima. Kako sistemi koji se baziraju na WDM još uvek predstavljaju najperspektivnije rešenje za postizanje visokog propusnog opsega u novim generacijama PON mreža, potrebno je naći način da se značajno smanji cena opreme. Potencijalno rešenje je upotreba bezbojnih transmitera, koji se mogu proizvoditi serijski. Kako je glavno ograničenje po pitanju cene opreme na strani krajnjeg korisnika, bezbojni predajnici prvenstveno primenu nalaze u ONU, za prenos US signala.

Laseri sa podesivom talasnom dužinom (eng. *Tunable Lasers*, TL) predstavljaju jedno od rešenja za bezbojne US predajnike u WDM-PON mrežama. Upotreba lasera sa podesivom talasnom dužinom omogućava instaliranje serijski proizvedenih identičnih uređaja kod svih korisničkih ONU. Talasna dužina rada ONU se podešava tokom instalacije lasera. Podesivi laseri se koriste u metro WDM mrežama kako bi se postigla dinamička rekonfiguracija talasne dužine, ali da bi bili pogodan izbor za upotrebu u pristupnim mrežama potrebno je značajno sniziti njihovu cenu. Takođe, potrebno je omogućiti i jednostavniju/efikasniju kontrolu podešavanja talasne dužine. Neki od lasera sa podesivom talasnom dužinom uključuju lasere sa distribuiranom Bragovom rešetkom (eng. *Distributed Bragg Reflector*, DBR), DFB lasere, lasere sa eksternim rezonatorom (eng. *External Cavity Lasers*, ECL) i lasere sa vertikalno realizovanim rezonatorom (eng. *Vertical Cavity Surface Emitting Lasers*, VCSEL). Izbor tipa lasera zavisi od jednostavnosti metode podešavanja talasne dužine, opsega podešavanja talasne dužine i stabilnosti podešene talasne dužine. Metode podešavanja mogu biti kontrolisane električnom strujom (uglavnom različiti tipovi DBR-a), termički kontrolisane (različiti tipovi DFB-a) i mehanički kontrolisane (uglavnom VCSELs i ECL).

Kako su predajnici poput podesivih lasera isuviše složeni za održavanje i finansijski opterećuju krajnje korisnike, od interesa je razmotriti pristupačnije alternative, kao što su širokopojasni izvori. Neka od rešenja koja se mogu pronaći u literaturi uključuju injekciono spregnute Fabri - Pero laserske diode (eng. *Injection Locked Fabry-Perot Laser Diodes*, IL FP-LD) [24], refleksione elektro-

## 1.2 Bezbojni transmiteri za PON-WDM



Slika 1.5: Šematski prikaz pristupne PON mreže sa multipleksiranjem po talasnim dužinama koja koristi RSOA predajnik i deljenje spektra u ONU. Povorka bitova US signala kodira se direktnom modulacijom u ASE šum koji se generiše u RSOA, u svakoj optičkoj mrežnoj jedinici. Signali se prenose preko vlakna za distribuciju do udaljenog čvorišta, gde se pomoću optičkog talasovodnog rutera vrši filtriranje i multipleksiranje signala. Kompozitni signal se zatim šalje do prijemnika u centrali putem vlakna za snabdevanje [28].

apsorpcione modulatore (eng. *Reflective Electro Absorption Modulator*, REAM) [25], ili direktno modulirane refleksione poluprovodničke optičke pojačavače (eng. *Reflective Semiconductor Optical Amplifier*, RSOA) [26].

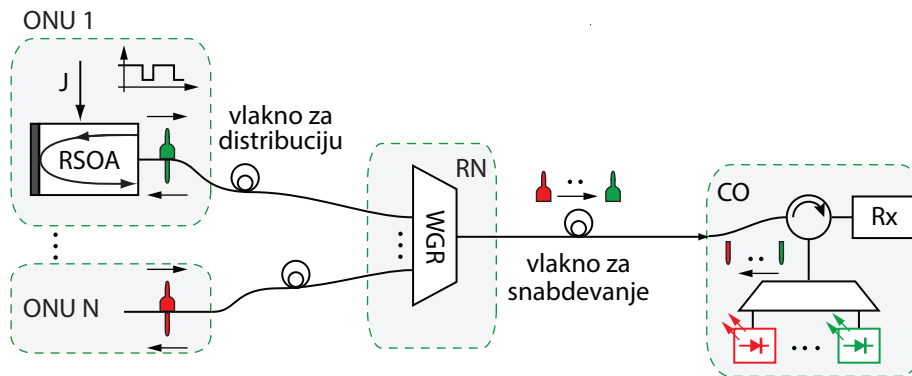
Injekciono sprezanje predstavlja efekat pri kome se svetlost iz jednog - vodećeg lasera injektuje u rezonator drugog - pratećeg lasera, koji pod određenim uslovima postaje stabilno sinhronizovan prema fazi i frekvenciji vodećeg lasera [27]. Za primenu u optičkim mrežnim jedinicama, direktno modulirana FP-LD može se injekciono sinhronizovati sa izvorom na centrali i time omogućiti kontrolu US talasne dužine ONU predajnika. Iako US predajnici sa injekcionim sprezanjem nude relativno veliki propusni opseg, imaju i neke nedostatke. Jedan od problema je što zavise od izvora koji se nalazi u centrali i da bi se nosili sa slabljenjem dolaznog snabdevajućeg signala, potreban je izvor velike snage. Alternativa je integracija optičkih pojačavača, što predstavlja dodatni izazov za implementaciju sa aspekta troškova [8].

Značajno poboljšanje u postignutoj brzini prenosa, performansama i dometu primećeno je pri integraciji brzih elektro-apsorpcionih modulatora sa optičkim pojačivačima. Integracija EAM sa SOA ili RSOA pojačivačima pruža bolje performanse iz nekoliko razloga. EAM nudi veći električni propusni opseg i faktor prigušenja u poređenju sa direktno moduliranim SOA ili RSOA pojačivačima, a doprinos pojačanja SOA povećava budžet snage čime se kompenzuju interni gubici EAM-a. Refleksioni EAM integrisan sa jednim ili dva SOA pojačivača (SOA-REAM) omogućava brzine prenosa od 10 Gb/s na udaljenosti do 25 km [8].

Refleksioni optički pojačavači se u bezbojnim ONU na korisničkoj strani pristupne mreže mogu implementirati na više načina:

- Deljenje spektra - Jedno od rešenja bazira se na deljenju spektra širokopojasnih izvora. Na sl. 1.5 prikazana je WDM - PON mreža sa bezbojnim predajnikom u ONU, koji je baziran na deljenju spektra šuma pojačane spontane emisije (eng. *Amplified Spontaneous Emission*, ASE) u RSOA. US signal se direktno kodira na širokopojasni ASE koji generiše RSOA, smešten u ONU jedinici. Optički talasovodni ruter (eng. *Waveguide Grating Router*, WGR) na udaljenom

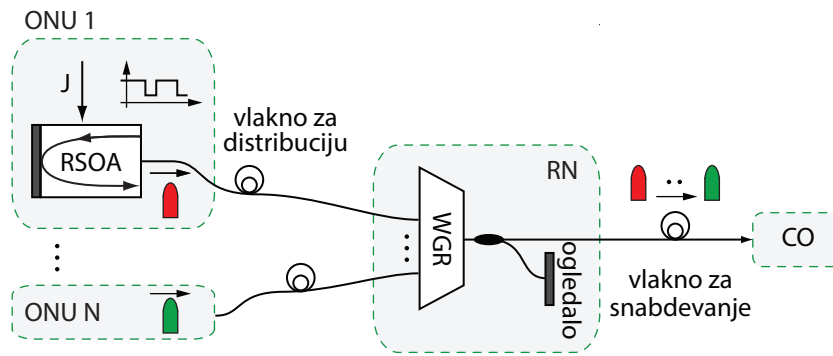
## 1.2 Bezbojni transmiteri za PON-WDM



Slika 1.6: Šematski prikaz pristupne PON mreže sa multipleksiranjem po talasnim dužinama koja koristi RSOA predajnik i eksterno snabdevanje. Predajnici koji se nalaze u u centrali šalju DS signale ka ONU u kojima se nalaze predajnici zasnovani na RSOA. Direktnom modulacijom, US informacije se utiskuju u dospeli signal i signal se vraća nazad ka centrali [28].

- čvorištu odvajaju modulirani ASE spektar i šalje porciju signala prema centrali. Porcija signala koja se dobija deljenjem spektra sa svake od mrežnih jedinica, određena je WGR portom na koji su povezane pojedinačne ONU. Iako niska cena RSOA uređaja čini ovaj pristup privlačnim, brzina modulacije je ograničena na 1 Gb/s za domet manji od 10 km. U cilju povećanja bitske brzine najčešće se pribegava širenju propusnog opsega WGR-a, što čini ovaj sistem vrlo osetljivim na hromatsku disperziju [28].
- Eksterno snabdevanje - Alternativa koja pruža poboljšanje u postignutoj brzini prenosa i dometu, ali uz veća ulaganja jesu RSOA sa eksternim snabdevanjem. Ideja je da se u centrali koristi niz lasera, po jedan za svaku optičku mrežnu jedinicu, koji šalju kontinualni DS signal ka ONU, kao što je prikazano na sl. 1.6. Optički talasovodni ruter deli i distribuiraju različite talasne dužine prema odgovarajućim mrežnim jedinicama. Refleksioni poluprovodnički optički pojačivači na ONU pojačavaju i direktno modulišu DS signal i šalju ga nazad ka centrali. Pojačavanje DS signala putem RSOA kompenzuje transmisionu gubitke, ostvarujući veći budžet snage. Takođe, uticaj hromatske disperzije manji je nego u slučaju izvora sa deljenjem spektra. Naravno, sva ova poboljšanja postižu se po cenu postavljanja relativno skupih lasera u centrali [28].
  - Samo-slabdevanje - Bezbojni predajnik koji je ekonomičniji od eksterno snabdevenog RSOA, a ipak nudi bolje performanse u poređenju sa predajnikom zasnovanim na deljenju spektra, moguće je realizovati kombinovanjem RSOA sa vlaknom, kako je prikazano na sl. 1.7. Na ovaj način se dobija podesivi samoslabdeveni laser na bazi vlakna koji predstavlja odličan izbor za udaljenosti između centrale i ONU od nekoliko kilometara do nekoliko desetina kilometara. Za razliku od eksterno snabdevenih izvora, laser na bazi RSOA i optičkog vlakna kao rezonatorske šupljine (eng. *Reflective Semiconductor Optical Amplifier Fiber Cavity Laser*, RSOA-FCL) ne zahteva dodatne laserske izvore, već se snabdeva ASE signalom koji izlazi iz RSOA. Jednostavno ogledalo na udaljenom čvorištu (RN) reflektuje deo emitovanog ASE nazad ka RSOA, što značajno smanjuje troškove. RSOA u optičkoj mrežnoj jedinici i ogledalo na RN kraju formi-

### 1.3 Pregled postojećih realizacija RSOA iz perspektive modulacionih performansi



Slika 1.7: Šematski prikaz pristupne PON mreže sa multipleksiranjem po talasnim dužinama koja koristi RSOA predajnik i samo-slabdevanje. Vlakno za distribuciju igra ulogu rezonatorske šupljine (označene žutom bojom) koju na jednoj strani zatvara RSOA u ONU, dok ogledalo na udaljenom čvorištu RN zatvara rezonatorsku šupljinu na drugom kraju i time omogućava uspostavljanje povratne sprege. US informacije se direktnom modulacijom utiskuju u izlazni laserski signal, i šalju ka centrali. [28].

raju rezonatorsku šupljinu koja je ugrađena u vlakno za distribuciju koje je samo po sebi deo pristupne mreže. Radna talasna dužina lasera se automatski podešava prema portu optičkog talasovodnog rutera na koji je ONU povezana [28].

Većina inicijalnih istraživanja o fiber laserima na bazi refleksionog poluprovodničkog optičkog pojačavača oslanjala su se isključivo na eksperimentalne rezultate, sa ciljem da se rastumači njihova haotična dinamika i definišu neophodni ulovi za rad u režimu laserovanja [28–32]. Deo istraživanja se zasniva na modelovanju RSOA-FCL, sa fokusom na stacionarnu analizu [33, 34], ili modulaciju velikim signalima, koristeći 2D prostorno-vremensku diskretizaciju RSOA za modelovanje vremenskog odziva u režimu direktne modulacije [28, 35]. Međutim, literatura ne svedoči o analizi modulacionih performansi u režimu modulacije malim signalima i određivanju odgovarajućeg  $-3$  dB propusnog opsega, koji se smatra jednim od najznačajnijih parametara kvaliteta optičkih predajnika i može služiti kao dobar pokazatelj očekivanih performansi predajnika [36]. Stoga se ova disertacija prevashodno bavi razvojem sveobuhvatnog modela RSOA-FCL laserskog sistema, u režimu direktne modulacije malim signalima i detaljnom analizom koja otkriva uticaj parametara RSOA, vlakna i neizbežnih parazitnih efekata čipa i pakovanja same strukture na modulacione performanse laserskog sistema.

## 1.3 Pregled postojećih realizacija RSOA iz perspektive modulacionih performansi

Optički predajnici koji koriste RSOA kao aktivnu komponentu predstavljaju potencijalno efikasno, tehnološki jednostavno i finansijski isplativo rešenje za realizaciju optičkih mrežnih jedinica, koje u pasivnim optičkim mrežama sa multipleksiranjem po talasnim dužinama mogu da obezbede dinamičku raspodelu radnih talasnih dužina. Uprkos mnogim prednostima, elektro-optičke (E/O) modulacione performanse RSOA smatraju se slabim. Eksperimentalni rezultati svedoče da E/O modulacioni odziv i odgovarajući  $-3$  dB propusni opseg ( $f_{3dB}$ ) RSOA ne dosežu više od nekoliko GHz

### 1.3 Pregled postojećih realizacija RSOA iz perspektive modulacionih performansi

(1 - 2 GHz) [37], [38], [39], [40], [41], pri standardnim ograničenjima niske ulazne optičke snage, i/ili struje polarizacije. Iako se propusni opseg može poboljšati do oko  $f_{3dB} = 3$  GHz povećanjem dužine aktivne oblasti pojačavača [42], vrednosti propusnog opsega RSOA su i dalje značajno niže od onih koje postižu poluprovodnički laseri ( $> 10$  GHz) [43].

Široko utemeljeno viđenje je da propusni opseg RSOA dominantno zavisi od vremena života nosilaca u aktivnoj oblasti [37] [42] [44] [45] [46] [47]. Međutim, ovaj takozvani interni propusni opseg ne uzima u obzir parazitne efekte RSOA realizovanog na čipu, niti one koji se javljaju usled pakovanja RSOA u komercijalno kućište, a koji zajedno sa vremenom života nosilaca predstavljaju značajan ograničavajući faktor modulacionog odziva kompletnog RSOA uređaja [41] [40] [48] [49] [50]. Propusni opseg određen tako da se zajedno sa internim uticajem vremena života nalektrisanja uzima u obzir i uticaj parazitike čipa i pakovanja, u nastavku razmatranja označen je kao eksterni modulacioni propusni opseg. U [51] se pokazuje da za dovoljno visok interni propusni opseg (ograničen vremenom života nosilaca), smanjenje parazitivnosti implementacijom leptir pakovanja može obezbediti umereno poboljšanje karakteristika koje je, doduše i dalje ispod onih vrednosti propusnih opsega koje se postižu u standardnim komercijalno dostupnim poluprovodničkim laserima. Neki autori takođe ukazuju da nelinearno potiskivanje pojačanja može imati značajan uticaj na propusni opseg RSOA [38]. Značajno poboljšanje propusnog opsega RSOA na ( $f_{3dB} \approx 10$  GHz) [50] može se postići realizacijom dvostrukog RSOA, ali po cenu kompleksnijeg dizajna i povećane struje polarizacije. Drugi pristup zasniva se na implementaciji optičkog filtra nepropsunika učestanosti uskog opsega na RSOA izlazu [47] [52] [53] [54] [55]. Međutim, zbog upotrebe dodatnih komponenti i ovaj pristup povećava složenost mreže i gubitke.

Kada je reč o evaluaciji modulacionih performansi pri modulaciji velikim signalima, bitski protoci veći od 10 Gb/s mogu se postići samo uz veliku verovatnoću greške (eng. *Bit-Error Ratio*, BER). Simulacije pokazuju da je maksimalna bitska brzina za tipičan RSOA u leptir pakovanju oko 5 Gb/s [44], [56]. U tabeli 1.1 je dat pregled vodećih rešenja - *State-of-the-Art* (SotA) za RSOA pri modulaciji velikim signalima, pri čemu su navedeni interni propusni opseg, primenjena metoda ekvilizacije, kao i poboljšani propusni opseg i bitski protok za zadati BER. Uobičajeni pristup za postizanje bitskih protoka reda veličine 10 Gb/s jeste primena ekvilajzera koji smanjuju intersimbolsku interferenciju (eng. *feed-forward equalizer*, FFE i *decision-feedback equalizer*, DFE) [44], [57], što uzrokuje mali penal snage ( $< 1$  dB). Bitske brzine do 25 Gb/s mogu se postići samo ukoliko je dozvoljen veliki penal snage usled ekvilizacije i to korišćenjem metode korekcije greške unapred [44], [56]. U literaturi postoje i radovi koji se bave tehnikama elektronske ekvilizacije i koriste različite vrste ekvilajzera kao što su ekvilajzer na bazi procene sekvence maksimalne verovatnoće (eng. *Maximum Likelihood Sequence Estimation*, MLSE) sa 8-stanja [58], pasivni otpornik-kondenzator ekvilajzer [59], modulacioni format koji se naziva adaptivno modulirano optičko ortogonalno multipleksiranje po frekvenciji (eng. *Adaptively Modulated Optical Orthogonal Frequency Division Multiplexing*, AMOOFDM) [60], duobinarno kodiranje sa pasivnom RLC elektronskom pre-ekvilizacijom [61], i RSOA sa segmentiranim elektrodama [62].

Poboljšanje propusnog opsega može se postići i primenom različitih tehnika optičkog filtriranja sa filterom nepropusnikom opsega, uključujući primenu interferometra sa kašnjenjem [63], [64],



### 1.3 Pregled postojećih realizacija RSOA iz perspektive modulacionih performansi

Tabela 1.1: Pregled realizacija RSOA u režimu modulacije velikim signalima sa vrednostima internih propusnih opsega, metoda ekvilizacije i poboljšanih propusnih opsega, kao i bitskih protoka za zadati BER.

Metoda Ekvilizacije	$f_{3dB}$ [GHz] Interni (Poboljšani)	Bitski Protok [Gb/s] @BER	Ref.
17-tap FFE	3.2 (-)	25@< $10^{-12}$	[44]
3-tap DFE sa FEC	2.2 (-)	10@< $10^{-12}$	[57]
MLSE sa FEC	2 (-)	10@< $10^{-9}$	[58]
Pasivni RC ekvilizator	2.5 (7)	10@ $3 \cdot 10^{-3}$	[59]
AMOOOFDM	1 (-)	10@< $10^{-8}$	[60]
Duobinarno kodiranje sa pasivnom RLC elektronskom pre-ekvilizacijom	- (-)	10@-	[61]
9-tap FFE i 4-tap DFE	4 (-)	10@< $3 \cdot 10^{-3}$	[72]
RSOA sa segmentiranim elektrodama	3 (10)	10@-	[62]
Interferometar sa kašnjenjem	1.5 (-)	10.7@ $10^{-4}$	[63]
MZI optički ekvilizator	2.5 (10)	10@-	[64]
Interferometar sa kašnjenjem	- (-)	4×10@-	[65]
Bragova rešetka	1.2 (8)	10@ $3.8 \cdot 10^{-3}$	[66]
Niz talasovodnih rešetaka	1 (-)	10@-	[67]
Pasivni Mikroring rezonator	3 (11)	11@ $3.6 \cdot 10^{-4}$	[47]
Birefrigentno vlakno sa petljom	0.95 (-)	5@-	[69]
Birefrigentno vlakno sa petljom	0.95 (-)	6@ $10^{-3}$	[73]
Birefrigentno vlakno sa petljom	0.89 (3)	4@ $10^{-9}$ 11@ $3.8 \cdot 10^{-3}$	[71]

[65], Bragove rešetke [66], niza talasovodnih rešetaka [67] i mikroprstenastih rezonatora [68]. Zahvaljujući birefrigentnom vlaknu sa petljom [69],[70], modulacioni opseg RSOA može se proširiti do 4 Gb/s za BER od  $10^{-9}$  i do 11 Gb/s na granici FEC od  $3.8 \cdot 10^{-3}$  [71].

## Glava 2

# Model fiber lasera sa refleksionim poluprovodničkim pojačavačem

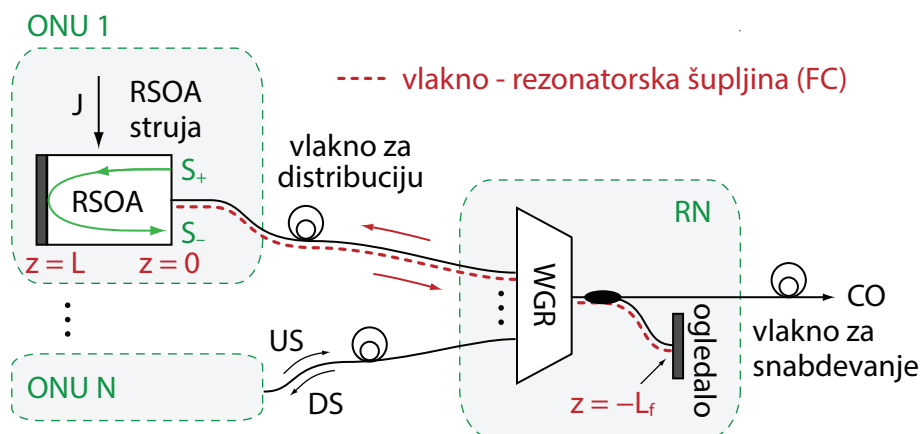
Laser sa vlaknom u ulozi rezonatora (FCL) se može posmatrati kao laserski uređaj sa dve sekcije, gde aktivna sekcija obezbeđuje pojačanje, dok pasivna - vlakno, igra ulogu spoljne rezonatorske šupljine. Jedna mogućnost za realizaciju pojačanja signala istovremeno sa obezbeđivanjem refleksije, jeste korišćenje refleksionog poluprovodničkog optičkog pojačavača (RSOA).

Zbog značajne disproporcije u dužini aktivne oblasti RSOA i vlakna, RSOA se može tretirati kao koncentrisano "aktivno" ogledalo koje istovremeno obezbeđuje refleksiju i pojačanje i zatvara rezonatorsku šupljinu vlakna na jednom kraju, dok ogledalo na udaljenom čvorištu (RN) zatvara rezonatorsku šupljinu na drugom kraju i omogućava uspostavljanje povratne sprege. Struktura RSOA-FCL je šematski prikazana na slici 2.1. Generisanje laserskog zračenja nastaje kada je struja polarizacije RSOA dovoljno visoka da omogući pojačavaču da nadoknadi slabljenje signala u vlaknu. Da bi se postigla kontrola nad radnom frekvencijom i spektralnim oblikom izlaznog signala, između RSOA i vlakna postavlja se optički filtar propusnik opsega učestanosti (eng. *Optical Band-Pass Filter*, OBPF). Filtar se koristi za suzbijanje šuma usled pojačane spontane emisije (ASE) koja napušta RSOA, u delovima spektra koji nisu od interesa. Nakon što signal izađe iz RSOA, prolazi kroz vlakno dva puta, a zatim se filtrirana replika signala vraća natrag u RSOA kako bi bila pojačana, što omogućava samosnabdevanje RSOA.

Na sl. 2.1 prikazan je RSOA-FCL integrisan u topologiju samosnabdevane pristupne pasivne optičke mreže sa multipleksiranjem po talasnim dužinama (WDM-PON). Optička mrežna jedinica (ONU) povezana je na udaljeno čvorište i centralu (CO) preko vlakna za distribuciju i vlakna za snabdevanje, respektivno. Sistem RSOA-FCL čine svi elementi između refleksione stranice RSOA i ogledala na RN i uključuje vlakno za distribuciju, optički talasovodni ruter (WGR) i spreznjak. WGR automatski dodeljuje radnu talasnu dužinu svakoj mrežnoj jedinici odabirom emisione talasne dužine za svaki RSOA-FCL.

Modelovanje dinamike RSOA-FCL sistema može se realizovati modelovanjem pojedinačnih sekcija - pasivne koju čini vlakno i aktivne koju čini RSOA, uz odgovarajuće povezivanje na interfejsu. Uz to, potrebno je uzeti u obzir OBPF koji se nalazi između sekcija. Za posmatranje sistema RSOA-

## 2.1 Pasivna sekcija - OBPF i optičko vlakno



Slika 2.1: Šematski prikaz RSOA-FCL topologije. (CO: centrala, ONU: optička mrežna jedinica, RN: udaljeno čvorište, WGR: optički talasovodni ruter)

FCL uvodi se zajednička longitudinalna  $z$ -osa, sa nulom definisanom na interfejsu RSOA-vlakno. Osa je usmerena tako da vlakno obuhvata koordinate od  $z = -L_f$  do  $z = 0$ , dok RSOA obuhvata koordinate od  $z = 0$  do  $z = L$ , gde  $L_f$  i  $L$  označavaju dužinu vlakna i dužinu aktivne oblasti RSOA, respektivno.

## 2.1 Pasivna sekcija - OBPF i optičko vlakno

Laseri sa optičkim vlaknom kao rezonatorskom šupljinom spadaju u klasu tzv. random lasera koji povratnu spregu obezbeđuju zahvaljujući značajnom povratnom Rejljevom rasejanju prilikom prostiranja svetlosti duž optičkog vlakna dužine od jednog do nekoliko desetina kilometara. Međutim, u ovom konkretnom slučaju prisutno Rejljevo rasejanje nema značajan uticaj na povratnu spregu budući da se na strani prijemnika (tj. strani optičkog linijskog terminala) nalazi RN ogledalo koje obezbeđuje dominantnu refleksiju. Zbog toga u razvoju modela lasera sa optičkim vlaknom kao rezonatorom neće biti uračunati efekti Rejljevog rasejanja unutar vlakna već samo doprinos RN ogledala. Međutim, ovaj pasivni deo lasera poseduje druge, suštinski neželjene karakteristike, a to su pre svega slabljenje i disperzija, koje u velikoj meri limitiraju kvalitet povratne sprege. Uticaj slabljenja i disperzije na propagaciju signala kroz vlakno može se uzeti u obzir kroz funkciju prenosa vlakna.

Pri određivanju funkcije prenosa vlakna  $H_f(z, \omega)$  polazi se od impulsnog odziva vlakna  $h_f(z, t)$  pod pretpostavkom da se na ulazu u vlakno nalazi intenzitetski modulisan signal konačne spektralne širine  $\sigma_{FWHM}$ . Smatra se da signal koji izlazi iz RSOA prolazi kroz Gausov optički filter propusnik opsega (OBPF) što rezultuje u tome da signal dobija formu Gausove funkcije raspodele:

$$s(\lambda) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_s} \exp\left[-\frac{(\lambda - \lambda_0)^2}{2\sigma_s^2}\right], \quad (2.1)$$

gde  $\lambda$  i  $\lambda_0$  označavaju talasne dužine signala i filtra, respektivno, a  $\sigma_s = \sigma_{FWHM}/(2\sqrt{2\ln 2})$  varijansu Gausovog filtra. Impulсни odziv se određuje integracijom spektralne raspodele signala  $s(\lambda)$ , pomno-

## 2.1 Pasivna sekcija - OBPF i optičko vlakno

žene sa Dirakovom delta funkcijom, sa uračunatim spektralno zavisnim grupnim kašnjenjem  $\tau_g(z, \lambda)$ , kao i slabljenjem signala po jedinici dužine  $\alpha$ , u celom opsegu talasnih dužina:

$$h_f(z, t) = \int_0^\infty \delta[t - \tau_g(z, \lambda)] \exp[-\alpha(\lambda)|z|] s(\lambda) d\lambda. \quad (2.2)$$

Pod pretpostavkom da je  $\sigma_{FWHM}$  mala,  $\alpha(\lambda)$  se može smatrati spektralno nezavisnim u uskom opsegu talasnih dužina oko  $\lambda_0$ . Međutim, treba naglasiti da će promena centralne talasne dužine OBPF-a zahtevati revidiranje vrednosti  $\alpha$ .

Grupno kašnjenje zavisi od talasne dužine i može se razviti u Tejlorov red u okolini radne talasne dužine:

$$\tau_g(\lambda) \approx \tau_{g0} + \tau'_{g0}(\lambda - \lambda_0) + \frac{\tau''_{g0}(\lambda - \lambda_0)^2}{2}, \quad (2.3)$$

gde je  $\tau_{g0} = |z|/v_{gf}$ ,  $\tau'_{g0} = D|z|$ , i  $\tau''_{g0} = S_D|z|$ , gde  $v_{gf}$  predstavlja grupnu brzinu,  $D$  je koeficijent disperzije, a  $S_D$  je gradijent koeficijenta disperzije i svi članovi su spektralno zavisni. Funkcija prenosa vlakna određena je Furijeovom transformacijom impulsnog odziva vlakna:

$$H_f(z, \omega) = \int_{-\infty}^\infty \left\{ \int_0^\infty \delta[t - \tau_g(z, \lambda)] \exp(-\alpha|z|) s(\lambda) d\lambda \right\} \exp(-j\omega t) dt, \quad (2.4)$$

što na osnovu osobina  $\delta$ -funkcije daje:

$$H_f(z, \omega) = \int_0^\infty \exp(-\alpha|z|) s(\lambda) \exp[-j\omega\tau_g(\lambda)] d\lambda. \quad (2.5)$$

Zamenom izraza (2.1) i (2.3) u (2.5), dobija se:

$$H_f(z, \omega) = \int_0^\infty \frac{\exp(-\alpha|z|)}{\sqrt{2\pi}\sigma_s} \exp\left[-\frac{(\lambda - \lambda_0)^2}{2\sigma_s^2}\right] \exp\left\{-j\omega\left[\tau_{g0} + \tau'_{g0}(\lambda - \lambda_0) + \frac{\tau''_{g0}(\lambda - \lambda_0)^2}{2}\right]\right\} d\lambda. \quad (2.6)$$

Podintegralna funkcija u eksponentu sadrži kvadratnu zavisnost po  $\lambda$ :

$$-\left(\frac{1}{2\sigma_s^2} + j\frac{\omega\tau''_{g0}}{2}\right)(\lambda - \lambda_0)^2 - j\omega\tau'_{g0}(\lambda - \lambda_0) - j\omega\tau_{g0}, \quad (2.7)$$

koja se uvođenjem smene  $u = A(\lambda - \lambda_0) + B$ , može svesti na kanonički oblik:

$$-u^2 + C = -[A(\lambda - \lambda_0) + B]^2 + C = -A^2(\lambda - \lambda_0)^2 - 2AB(\lambda - \lambda_0) - B^2 + C, \quad (2.8)$$

$$-u^2 + C = -\left(\frac{1}{2\sigma_s^2} + j\frac{\omega\tau''_{g0}}{2}\right)(\lambda - \lambda_0)^2 - j\omega\tau'_{g0}(\lambda - \lambda_0) - j\omega\tau_{g0}, \quad (2.9)$$

odakle se za konstante  $A$ ,  $B$  i  $C$  dobija:

$$A = \sqrt{\frac{1}{2\sigma_s^2} + j\frac{\omega\tau''_{g0}}{2}},$$

## 2.1 Pasivna sekcija - OBPF i optičko vlakno

$$B = \frac{j\omega\tau'_{g0}}{2A} = \frac{j\omega\tau'_{g0}}{2\sqrt{\frac{1}{2\sigma_s^2} + j\frac{\omega\tau''_{g0}}{2}}},$$

$$C = B^2 - j\omega\tau_{g0} = -\frac{\omega^2\tau'^2_{g0}}{4\left(\frac{1}{2\sigma_s^2} + j\frac{\omega\tau''_{g0}}{2}\right)} - j\omega\tau_{g0}.$$

Funkcija prenosa vlakna postaje:

$$H_f(z, \omega) = \int_{u=B-A\lambda_0 \approx -\infty}^{\infty} \frac{\exp(-\alpha|z|)}{\sqrt{2\pi}\sigma_s} \exp(-u^2 + C) \frac{du}{A}, \quad (2.10)$$

odnosno:

$$H_f(z, \omega) = \frac{\exp(-\alpha|z|) \exp(C)}{\sqrt{2\pi}\sigma_s A} \int_{-\infty}^{\infty} \exp(-u^2) du. \quad (2.11)$$

Zamenom A i C u prethodni izraz i izračunavanjem Gausovog integrala dobija se:

$$H_f(z, \omega) = \frac{\exp(-\alpha|z|)}{\sqrt{2\pi}\sigma_s} \frac{\sqrt{\pi}}{\sqrt{\frac{1}{2\sigma_s^2} + j\frac{\omega\tau''_{g0}}{2}}} \exp\left[-\frac{\omega^2\tau'^2_{g0}}{4\left(\frac{1}{2\sigma_s^2} + j\frac{\omega\tau''_{g0}}{2}\right)} - j\omega\tau_{g0}\right], \quad (2.12)$$

odnosno:

$$H_f(z, \omega) = \frac{\exp(-\alpha|z|)}{\sqrt{1 + j\omega\tau''_{g0}\sigma_s^2}} \exp\left[-\frac{\omega^2\tau'^2_{g0}}{4\left(\frac{1}{2\sigma_s^2} + j\frac{\omega\tau''_{g0}}{2}\right)}\right] \exp(-j\omega\tau_{g0}). \quad (2.13)$$

Primenom transformacije:

$$1 + j\omega\tau''_{g0}\sigma_s^2 = \sqrt{1 + (\omega\tau''_{g0}\sigma_s^2)^2} \exp[j \arctan(\omega\tau''_{g0}\sigma_s^2)] \quad (2.14)$$

i zamenom u (2.13), dobija se:

$$H_f(z, \omega) = \frac{\exp(-\alpha|z|)}{[1 + (\omega\tau''_{g0}\sigma_s^2)^2]^{\frac{1}{4}}} \exp\left[-j\left(\omega\tau_{g0} + \frac{1}{2} \arctan(\omega\tau''_{g0}\sigma_s^2)\right)\right] \exp\left[-\frac{\omega^2\tau'^2_{g0}\sigma_s^2(1 - j\omega\tau''_{g0}\sigma_s^2)}{2[1 + (\omega\tau''_{g0}\sigma_s^2)^2]}\right]. \quad (2.15)$$

Konačan oblik funkcije prenosa glasi:

$$H_f(z, \omega) = \frac{\exp(-\alpha|z|)}{[1 + (\omega\tau''_{g0}\sigma_s^2)^2]^{\frac{1}{4}}} \exp\left[-\frac{(\omega\tau'_{g0}\sigma_s)^2}{2[1 + (\omega\tau''_{g0}\sigma_s^2)^2]}\right] \exp(-j\Psi), \quad (2.16)$$

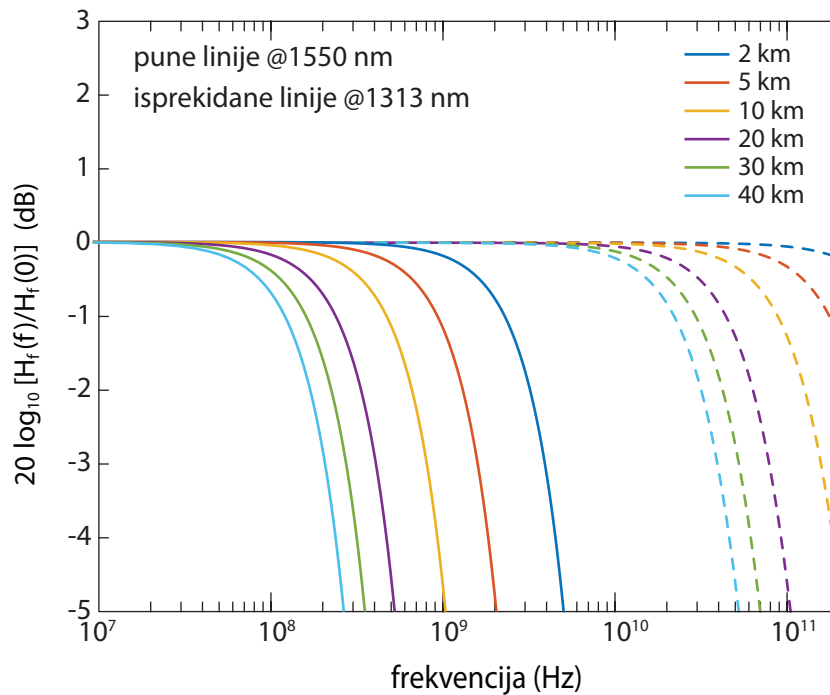
gde je

$$\Psi = \omega\tau_{g0} + \frac{1}{2} \arctan(\omega\tau''_{g0}\sigma_s^2) - \frac{\omega^3\tau'^2_{g0}\tau''_{g0}\sigma_s^4}{2[1 + (\omega\tau''_{g0}\sigma_s^2)^2]}. \quad (2.17)$$

Funkcija prenosa vlakna za povratni put, sa uračunatim OBPF-om i refleksijom na RN kraju vlakna ima sledeći oblik:

Tabela 2.1: Parametri vlakna

Simbol	Parametar	Vrednost @ $\lambda_0$	
		@1313 nm	@1550 nm
$\alpha$ [dB/km]	Slabljenje po km	0.3177	0.1826
$D$ [ps/nm/km]	Koeficijent disperzije	0.10	16.47
$S_D$ [ps/nm <sup>2</sup> /km]	Gradijent koeficijenta disperzije	$8.48 \cdot 10^{-2}$	$5.79 \cdot 10^{-2}$
$v_{gf}$ [m/s]	Grupna brzina	$2.044 \cdot 10^8$	$2.043 \cdot 10^8$
$R_f$	Refleksivnost RN ogledala	0.3	



Slika 2.2: Modulacioni odziv vlakna za različite dužine vlakna, sa OBPF centriranim na  $\lambda_0 = 1550$  nm (pune linije) i  $\lambda_0 = 1313$  nm (isprekidane linije)

$$H_{rt}(z, \omega) = \frac{R_f \exp(-2\alpha L_f)}{[1 + (\omega\tau''_{g0}\sigma_s^2)^2]^{\frac{1}{4}}} \exp\left[-\frac{(\omega\tau'_{g0}\sigma_s)^2}{2[1 + (\omega\tau''_{g0}\sigma_s^2)^2]}\right] \exp(-j\Psi), \quad (2.18)$$

pri čemu su svi članovi razvoja grupnog kasnjenja,  $\tau_{g0}$ ,  $\tau'_{g0}$  i  $\tau''_{g0}$  određeni za  $|z| = 2L_f$ . Parametri koji se koriste za modelovanje vlakna dati su u Tabeli 2.1 i odgovaraju široko raspostranjenom Corning® SMF-28 Ultra optičkom vlaknu.

Detaljnijom analizom (2.16) i (2.18) potvrđuje se činjenica da propusni opseg vlakna pretežno zavisi od proizvoda disperzije vlakna  $D$ , dužine vlakna  $L_f$  i spektralne širine linije OBPF filtra  $\sigma_s$ . Na sl. 2.2 vidi se da sa povećanjem dužine vlakna dolazi do smanjenja propusnog opsega. Međutim, smanjenje propusnog opsega je izraženije kod kraćih vlakana, pri čemu se najznačajniji pad može primetiti pri povećanju dužine vlakna sa 2 km na 5 km, dok se sa daljim povećanjem dužine vlakna smanjenje propusnog opsega postepeno ublažava, što ukazuje na to da efekat dužine vlakna na propusni opseg ulazi u zasićenje. Značajan uticaj na propusni opseg ima i disperzija vlakna, koja ima znatno veću vrednost pri  $\lambda_0 = 1550$  nm, pa je u tom slučaju propusni opseg vlakna za nekoliko redova veličine manji.

## 2.2 Princip rada i dizajn aktivne sekcije - RSOA

Prilikom formiranja detaljnog matematičko - fizičkog i numeričkog modela koji omogućava simulaciju odziva aktivne sekcije RSOA-FCL laserskog sistema, potrebno je detaljnije razmotriti strukturu i optičke osobine aktivne oblasti RSOA.

Refleksioni poluprovodnički optički pojačavači su optoelektronski uređaji koji su strukturno slični Fabri-Pero poluprovodničkim laserima i standardnim poluprovodničkim optičkim pojačavačima. Za razliku od standardnih (travelling-wave, TW-SOA) optičkih pojačavača, RSOA imaju jednu antirefleksionu i jednu visoko-refleksionu stranicu, koja obezbeđuje da optički signal prolazi kroz aktivnu oblast dva puta. Poluprovodnička aktivna oblast obezbeđuje pojačanje ulazne svetlosti kroz proces stimulisane emisije, prilikom kog ulazni fotoni indukuju emisiju dodatnih fotona identičnih po fazi, frekvenciji i pravcu prostiranja. Kako bi se postigla stimulisana emisija potrebno je ispuniti uslov inverzne naseljenosti nosilaca naelektrisanja, koja podrazumeva veću koncentraciju nosilaca na višem energetske stanju u odnosu na niže energetske stanje. Inverzna naseljenost se postiže injekcijom naelektrisanja u procesu direktne polarizacije poluprovodničke komponente. Pored stimulisane emisije, neizostavno su prisutna i druga dva druga procesa: apsorpcija, gde su dolazni fotoni apsorbovani od strane nosilaca naelektrisanja, što dovodi do gubitka incidentnih fotona, i spontana emisija, gde se nosioci rekombinuju bez uticaja ulaznog fotona, emitujući fotone sa nasumičnim svojstvima. Spontano emitovani fotoni u suštini predstavljaju šum i doprinose smanjenju broja nosilaca naelektrisanja koji su dostupni za postizanje optičkog pojačanja [74], [75], [76].

U nastavku analize biće predstavljene dve strukturno različite realizacije aktivne oblasti RSOA. U prvoj, jednostavnijoj realizaciji aktivnu oblast čini masivni poluprovodnik, dok se unapređene performanse mogu ostvariti ako se kao aktivna oblast koriste kvantno-konfinirane poluprovodničke strukture, prvenstveno zasnovane na višestrukim kvantnim jamama. Za razmatrane realizacije aktivne oblasti biće prikazani i analizirani strukturni (geometrijski i tehnološki) parametri i najznačajnije optičke osobine, kao što su materijalno pojačanje i brzina radijativne spontane rekombinacije. U cilju jednostavnije numeričke implementacije stacionarnih i dinamičkih modela RSOA, na osnovu detaljno proračunatih optičkih osobina biće predložene adekvatne aproksimativne zavisnosti.

### 2.2.1 Aktivna oblast RSOA od masivnog poluprovodnika

RSOA kod kojih su dimenzije aktivne oblasti značajno veće od de Brojjeve talasne dužine ( $\lambda_B = h/p$ , gde je  $h$  Plankova konstanta, a  $p$  impuls nosioca naelektrisanja), označavaju se kao RSOA sa aktivnom oblašću na bazi masivnog (balkovskog) poluprovodnika. Ovakva aktivna oblast najčešće je izrađena od materijala sa direktnim energetske procepom, što znači da su vrh valentne i dno provodne zone određeni istom vrednošću talasnog vektora. Poluprovodnici sa direktnim energetske procepom koriste se zato što imaju značajno veću verovatnoću radijativne rekombinacije iz provodne u valentnu zonu nego materijali sa indirektnim energetske procepom, što dovodi do veće efikasnosti uređaja [76]. U daljoj analizi posmatra se RSOA sa aktivnom oblašću na bazi nenapregnutog  $\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}$  masivnog poluprovodnika. Izrazi za materijalno pojačanje  $g$  i brzinu spontane emisije  $r_{sp}$  u funkciji koncentracije naelektrisanja  $n$  i energije fotona  $\hbar\omega$ , određeni primenom dvo-

Tabela 2.2: Materijalni parametri aktivne oblasti zasnovane na masivnom poluprovodniku  $\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}$  sa omotačem od  $\text{In}_{0.76}\text{Ga}_{0.24}\text{As}_{0.52}\text{P}_{0.48}$ .

simbol	veličina	InGaAs	InGaAsP
$E_g$ [meV]	energetski procep CB-VB (HH,LH)	748	1001
$E_{g,\text{SO}}$ [meV]	energetski procep CB-VB (SO)	1115	1246
$\Delta_{\text{SO}}$ [meV]	energija SO otcepljenja	367	245.3
$E_p$ [eV]	međuzonski matični element	24.93	23.26
$m_e^*$ [ $m_0$ ]	efektivna masa elektrona	0.0389	0.0541
$m_{\text{HH}}^*$ [ $m_0$ ]	efektivna masa HH šupljina	0.3410	0.4069
$m_{\text{LH}}^*$ [ $m_0$ ]	efektivna masa LH šupljina	0.0567	0.0889
$m_{\text{SO}}^*$ [ $m_0$ ]	efektivna masa SO šupljina	0.1393	0.1709
$\gamma$ [meV]	poluširina Lorencove funkcije		7

zonskog modela dati su sledećim relacijama [77]:

$$g(n, \hbar\omega) = C_g \frac{M_b^2}{2\pi^2} \sum_{i=\text{HH,LH,SO}} \left( \frac{2\mu_i}{\hbar^2} \right)^{3/2} \int_{E_{g,i}}^{\infty} \frac{\gamma}{\pi} \frac{\sqrt{x - E_{g,i}}}{(x - \hbar\omega)^2 + \gamma^2} (f_{\text{FD}}^c - f_{\text{FD}}^v) dx, \quad (2.19)$$

$$r_{\text{sp}}(n, \hbar\omega) = \frac{8\pi n_r^2 (\hbar\omega)^2}{h^3 c^2} C_g \frac{M_b^2}{2\pi^2} \times C_g \frac{M_b^2}{2\pi^2} \sum_{i=\text{HH,LH,SO}} \left( \frac{2\mu_i}{\hbar^2} \right)^{3/2} \int_{E_{g,i}}^{\infty} \frac{\gamma}{\pi} \frac{\sqrt{x - E_{g,i}}}{(x - \hbar\omega)^2 + \gamma^2} f_{\text{FD}}^c (1 - f_{\text{FD}}^v) dx. \quad (2.20)$$

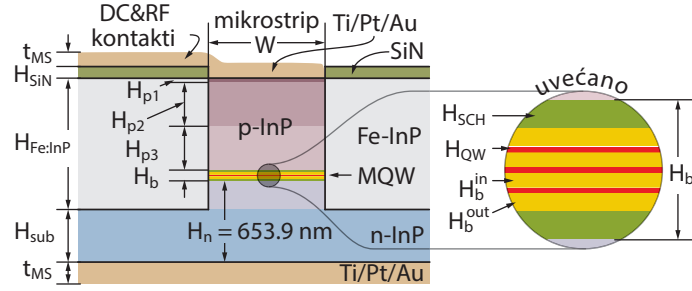
Parametar  $C_g$  definisan je izrazom  $C_g = \pi q^2 / (n_r c \epsilon_0 m_0^2 \omega)$ , gde je  $q$  elementarno naelektrisanje,  $n_r$  indeks prelamanja aktivne oblasti,  $c$  brzina svetlosti u vakuumu, dok  $\epsilon_0$  i  $m_0$  predstavljaju dielektričnu konstantu vakuuma i masu slobodnog elektrona, respektivno. Parametar  $M_b$  označava momentni matični element za masivni poluprovodnik, za koji važi  $M_b^2 = m_0 E_p / 6$ , gde  $E_p$  predstavlja međuzonski matični element. Redukovana efektivna masa definisana je sa  $\mu_i = (m_e^{-1} + m_i^{-1})^{-1}$ ,  $E_{g,i}$  označava energetski procep između dna provodne zone i vrha valentne zone koji su označeni sa  $E_c$  i  $E_{v,i}$ , respektivno. Indeks  $i$  po kome se vrši sumiranje u (2.19) i (2.20) označava podzonu teških šupljina (eng. *Heavy Hole*, HH), podzonu lakih šupljina (eng. *Light Hole*, LH), i spin-orbitno otcepljenu podzonu, (eng. *Spin-Orbit*, SO), dok  $\gamma$  predstavlja poluširinu Lorencove funkcije.  $f_{\text{FD}}^j$  označava Fermi - Dirakovu raspodelu  $f_{\text{FD}}^j(E) = 1 + \exp[(E - E_f^j) / (k_B T)]^{-1}$ , za provodnu  $j = c$ , odnosno valentnu zonu  $j = v$ , pri čemu je  $E_f^j$  odgovarajući kvazi-Fermijev nivo,  $k_B$  Bolcmanova konstanta, a  $T$  radna temperatura naprave. Svi pomenuti parametri se mogu naći u Tabeli 2.2, pri čemu su sve navedene vrednosti preuzete iz [77].

## 2.2.2 Aktivna oblast RSOA od višestrukih kvantnih jama

Aktivna oblast zasnovana na višestrukim kvantnim jamama (MQW) posebno je dizajnirana tako da ponudi visoko diferencijalno pojačanje i balansiran transport nosilaca kroz strukturu višestru-



## 2.2 Princip rada i dizajn aktivne sekcije - RSOA



Slika 2.3: Šematski prikaz poprečnog preseka MQW RSOA sa označenim slojevima.

kih kvantnih jama. Na Sl. 2.3 prikazan je poprečni presek MQW RSOA strukture sa razdvajajuće-ograničavajućim heterostrukturalnim regionom (eng. *Separate Confinement Heterostructure*, SCH) [78] koji ima za cilj smanjenje apsorpcije na slobodnim nosiocima i dopantima i omogućava bolju kontrolu podržanih transverzalnih modova (idealno samo jednog, osnovnog moda). Aktivna oblast se sastoji od  $N_{QW} = 3$  kvantne jame od  $\text{In}_{0.75}\text{Ga}_{0.25}\text{As}_{0.87}\text{P}_{0.13}$ , odvojene  $\text{In}_{0.46}\text{Ga}_{0.39}\text{Al}_{0.15}\text{As}$  barijerama čija je kompozicija odabrana tako da kompenzuje naprezanje kvantnih jama. Debljina pojedinačnih jama je  $H_{QW} = 8.7$  nm, dok je debljina barijernih oblasti  $H_b^{\text{in}} = 20$  nm. Sa spoljašnje strane, jame su okružene materijalom barijere debljine  $H_b^{\text{out}} = 30$  nm i SCH regijom debljine  $H_{SCH} = 60$  nm [27]. Višestruke kvantne jame narastaju se na  $N_d = 10^{18} \text{ cm}^{-3}$  n-dopiranom n-InP supstratu debljine  $H_{\text{sub}} = 110 \mu\text{m}$  i ukopane su ispod p-InP višeslojnog omotača, sa slojevima debljina  $\{H_{p1}; H_{p2}; H_{p3}\} = \{0.1; 1; 1\} \mu\text{m}$  i dopiranja  $\{N_{a1}; N_{a2}; N_{a3}\} = \{10; 1; 0.4\} \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ , navedenim u redosledu odozgor-nadole prateći Sl. 2.3. Kvantne jame i omotač okruženi su polu-izolatorskim slojem Fe:InP, debljine  $H_{\text{Fe:InP}} = 3 \mu\text{m}$ . Mikrostrip elektroda i polarizaciono (DC) - modulacioni (RF) kontakt izrađeni su višeslojnom metalizacijom Ti/Pt/Au, pri čemu je debljina slojeva  $\{t_{\text{Ti}}; t_{\text{Pt}}; t_{\text{Au}}\} = \{20 \text{ nm}; 40 \text{ nm}; 5 \mu\text{m}\}$ , respektivno. Debljina SiN izolatorskog sloja iznosi  $H_{\text{SiN}} = 0.2 \mu\text{m}$ . Upotrebom jama sa tenzionim naprezanjem od 1.05% i barijera sa kompresionim naprezanjem od 0.5% dobija se struktura sa jama optimizovanim na  $\lambda = 1698$  nm ( $E_g = 0.73$  eV), sa odnosom diskontinuiteta provodne zone  $\Delta E_c / (\Delta E_c + \Delta E_{v,\text{HH-LH}}) = 81.1\%$ . Optičke osobine aktivne oblasti na bazi MQW RSOA, kao što su materijalno pojačanje i brzina spontane emisije mogu se odrediti pomoću višezonskog  $8 \times 8 k \cdot p$  metoda [79], koji se zaniva na Bart-Foremanovom formalizmu [80] i uzima u obzir biaksijalno naprezanje koje nastaje usled neslaganja konstanti rešetki materijala jama i barijera pri narastanju.

Materijalno pojačanje i brzina radijativne spontane rekombinacije mogu se odrediti primenom sledećih izraza [77]:

$$g(n, \hbar\omega) = \frac{q^2 \pi}{n_r c \epsilon_0 m_0^2 \omega H_b} \sum_{\eta=U,L} \sum_{\sigma=U,L} \sum_{n,m} \int |\mathbf{eM}_{nm}^{\eta\sigma}|^2 \frac{\gamma}{\pi (E_{nm}^{\eta\sigma} - \hbar\omega)^2 + \gamma^2} \frac{k_t dk_t}{2\pi}, \quad (2.21)$$

$$r_{\text{sp}}(n, \hbar\omega) = \frac{q^2 \pi}{n_r c \epsilon_0 m_0^2 \omega H_b} \sum_{\eta=U,L} \sum_{\sigma=U,L} \sum_{n,m} \int |M_{\text{sp}}|^2 \frac{\gamma}{\pi (E_{nm}^{\eta\sigma} - \hbar\omega)^2 + \gamma^2} \frac{k_t dk_t}{2\pi}. \quad (2.22)$$

U sistemu jednačina (2.21) - (2.22),  $H_b$  predstavlja ukupnu debljinu MQW strukture  $H_b = 2(H_{SCH} + H_b^{\text{out}}) + H_w + (N_{QW} - 1)H_b^{\text{in}}$ . Kako se  $8 \times 8$  Hamiltonijan može razdvojiti na dva  $4 \times 4$  Hamiltonijana,  $H_L$  i  $H_U$ , koji označavaju donji i gornji segment Hamiltonove matrice, respektivno [81],  $\eta$  i  $\sigma$  označavaju  $H_L$  i  $H_U$  koji odgovaraju  $n$ -toj provodnoj i  $m$ -toj valentnoj podzoni. Jedinični vektor

## 2.2 Princip rada i dizajn aktivne sekcije - RSOA

polarizacije označen je sa  $\mathbf{e}$ ,  $\mathbf{M}_{nm}^{\eta\sigma}$  predstavlja vektor momentnog matričnog elementa  $n$ -te provodne podzone  $\eta$  - Hamiltonijana i  $m$  - te valentne podzone  $\sigma$  - Hamiltonijana, a  $E_{nm}^{\eta\sigma}$  odgovarajuću energetsku razdvojenost. Komponenta talasnog vektora u transverzalnoj ravni označena je sa  $k_t$ , dok  $f_{\eta n}^c$  i  $f_{\sigma m}^v$  označavaju Fermi - Dirakove raspodele za odgovarajuće podzone u provodnoj i valentnoj zoni, respektivno. Optičke osobine RSOA kao i transportni parametri nosilaca mogu se odrediti numerički, prateći standardne pristupe predstavljene u [74], [82], [83].

### 2.2.3 Model brzinskih jednačina RSOA

Detaljna analiza RSOA i njegovih performansi podrazumeva određivanje osnovnih fizičkih procesa koji opisuju interakcije fotona i nosilaca naelektrisanja. Mehanizmi interakcije fotona i nosilaca naelektrisanja unutar RSOA opisani su sistemom spregnutih parcijalnih diferencijalnih jednačina, označenih kao brzinske jednačine.

Osnovni model RSOA opisuje prostorno ( $z$ ) vremensku ( $t$ ) interakciju gustine nosilaca naelektrisanja i putujućeg optičkog talasa koji se prostire u dva smera, unapred (+) i unazad (-), posmatrano u odnosu na longitudinalnu  $z$ -osu. Gustina nosilaca naelektrisanja označava se sa  $n(z, t)$ , a optički signal je predstavljen gustinom fotona  $S_{\pm}(z, t)$ . Kako bi se postigao režim pojačanja, neophodno je ispuniti uslov inverzije naseljenosti nivoa u aktivnoj oblasti pojačavača, što se postiže električnim pumpanjem strujom  $I$ . Za niske vrednosti struje polarizacije, pretežno dolazi do spontane rekombinacije nosilaca naelektrisanja. Ovaj proces može biti neradijativan, pri čemu dolazi do vibracija između atoma ili molekula kristalne rešetke (fononi), ili radijativan, što rezultuje emisijom nekoherentnog optičkog signala širokog spektra, koji realno predstavlja šum. Kako bi došlo do pojačanja optičkog signala koji propagira kroz aktivnu oblast RSOA, potrebno je obezbediti uslove pri kojima stimulirana emisija postaje dominantan proces. Ovo podrazumeva da struja polarizacije bude veća od struje praga, odnosno da modalno pojačanje prevazilazi gubitke unutar talasovoda [74].

Interakcija fotona i nosilaca naelektrisanja u aktivnoj oblasti RSOA može se opisati sistemom spregnutih talasnih jednačina za oba pravca propagacije duž  $z$  ose, napisanih za gustine fotona i ASE šum, respektivno:

$$\pm \frac{\partial S_{\pm}}{\partial z} + \frac{1}{v_g} \frac{\partial S_{\pm}}{\partial t} = \left( \frac{\Gamma g}{1 + \varepsilon S_{\Sigma}} - \alpha_i \right) S_{\pm}, \quad (2.23)$$

$$\pm \frac{\partial A_{\pm}}{\partial z} + \frac{1}{v_g} \frac{\partial A_{\pm}}{\partial t} = \left( \frac{\Gamma g}{1 + \varepsilon S_{\Sigma}} - \alpha_i \right) A_{\pm} + \frac{1}{2v_g} \Gamma \beta_{sp} R_{sp}. \quad (2.24)$$

Ovde,  $v_g = c/n_{\text{eff}}$  predstavlja grupnu brzinu, gde je  $n_{\text{eff}}$  efektivni indeks prelamanja aktivne oblasti,  $\Gamma$  označava optički faktor konfiniranja,  $g$  je materijalno pojačanje aktivne oblasti,  $\varepsilon$  je koeficijent nelinearnog potiskivanja pojačanja, dok  $S_{\Sigma} = S_{+} + S_{-} + A_{+} + A_{-}$  predstavlja ukupnu gustinu fotona uključujući i ASE šum u aktivnoj oblasti. Gubici u aktivnoj oblasti označeni su sa  $\alpha_i = K_0 + \Gamma K_1 n$ , gde  $K_0$  i  $K_1$  predstavljaju koeficijente gubitaka nezavisnih i zavisnih od koncentracije nosilaca, respektivno. Faktor sprežanja spontane emisije označen je sa  $\beta_{sp}$ , a brzina radijativne spontane rekombinacije sa  $R_{sp}$ .

Kako fotoni signala i šuma propagiraju zajedno kroz aktivnu oblast jednačina (2.23) se može

## 2.2 Princip rada i dizajn aktivne sekcije - RSOA

zapisati tako da uključuje i član koji opisuje spontanu emisiju, ukoliko je ulazni signal spektralno uzak, odnosno:

$$\pm \frac{\partial S_{\pm}}{\partial z} + \frac{1}{v_g} \frac{\partial S_{\pm}}{\partial t} = \left( \frac{\Gamma g}{1 + \epsilon S_{\Sigma}} - \alpha_i \right) S_{\pm} + \frac{1}{2v_g} \Gamma \beta_{sp} R_{sp}. \quad (2.25)$$

Kada je potrebno uprostiti model, numeričke zavisnosti optičkog pojačanja  $g$  i brzine radijativne spontane rekombinacije  $R_{sp}$  od koncentracije naelektrisanja  $n$  dobijene iz (2.19) - (2.20) za masivni RSOA, odnosno (2.21) - (2.22) za MQW-RSOA mogu se aproksimirati analitičkim izrazima, bez značajnog gubitka tačnosti. Zavisnost materijalnog pojačanja od koncentracije nosilaca,  $g(n)$ , može se aproksimirati jednostavnom tro-parametarskom logaritamskom funkcijom:

$$g(n) = g_0 \ln \frac{n + n_s}{n_{tr} + n_s}, \quad (2.26)$$

gde  $g_0$  predstavlja parametar fitovanja materijalnog pojačanja,  $n_{tr}$  koncentraciju nosilaca pri transparentnosti, a  $n_s$  parametar koji onemogućava beskonačno negativno pojačanje za nulte koncentracije nosilaca. Izraz (2.26) se može dodatno pojednostaviti za  $g(n) \geq 0$ , pri čemu se dobija, često korišćena, dvo-parametarska logaritamska zavisnost [36]:

$$g(n) = g_0 \ln \frac{n}{n_{tr}}. \quad (2.27)$$

Brzina radijativne spontane rekombinacije može se predstaviti kvadratnom funkcijom ili polinomom drugog reda sa različitim brojem članova, u zavisnosti od složenosti modela. Ukoliko se uzima u obzir linearna i kvadratna zavisnost, brzina radijativne spontane rekombinacije može se predstaviti kao:

$$R_{sp} = B_1 n + B_2 n^2, \quad (2.28)$$

gde  $B_1$  i  $B_2$  predstavljaju linearni i kvadratni parametar fitovanja brzine spontane emisije, respektivno. Takođe, ovaj izraz se može dopuniti konstantnim parametrom fitovanja spontane emisije,  $B_0$ , što dovodi do [74]:

$$R_{sp} = B_0 + B_1 n + B_2 n^2. \quad (2.29)$$

Sistem jednačina putujućeg talasa za gustine fotona kontrapropagirajućih optičkih signala imaju istu formu za slučaj RSOA sa masivnim poluprovodnikom kao i za MQW RSOA. Međutim, za MQW RSOA, parametri zavisni od koncentracije (materijalno pojačanje i gubici unutar aktivne oblasti), zavise od gustine nosilaca u vezanim stanjima jama,  $n_w$ . Dodatno, faktor konfiniranja za MQW strukturu definisan je kao  $\Gamma = N_{QW} \Gamma_{QW}$ , gde je  $\Gamma_{QW}$  faktor konfiniranja po kvantnoj jami, dok je faktor sprežanja spontane emisije  $\beta_{sp} = \Gamma_{QW} v_g \tilde{\beta}_{sp} / V_{QW}$ , pri čemu je  $V_{QW}$  zapremina jedne kvantne jame, a  $\tilde{\beta}_{sp}$  redukovani faktor sprežanja spontane emisije.

Pod pretpostavkom da je bočna stranica RSOA na  $z = 0$  prekrivena dielektričnim slojem koji obezbeđuje zanemarljivu reflektivnost, granični uslov za prostiranje u pozitivnom smeru glasi:

## 2.2 Princip rada i dizajn aktivne sekcije - RSOA

$$S_+(z=0) = S_{in}, \quad (2.30)$$

gde je  $S_{in} = \Gamma P_{in}/(\hbar\omega_0 v_g WH)$  gustina fotona na ulazu u RSOA, određena ulaznim optičkom signalom konstantne snage (eng. *Continuous Wave*, CW),  $P_{in}$ , i centralnom energijom signala  $\hbar\omega_0$ , dok  $W$  i  $H$  predstavljaju širinu i visinu aktivne oblasti, pri čemu je  $H = H_w$  ukoliko se radi o MQW RSOA. Na drugoj bočnoj stranici granični uslov je određen koeficijentom refleksije snage  $R_2$ :

$$S_-(z=L) = R_2 S_+(z=L). \quad (2.31)$$

Brzinska jednačina koja opisuje dinamiku nosilaca naelektrisanja za slučaj RSOA sa aktivnom oblasti od masivnog poluprovodnika data je sa:

$$\frac{dn}{dt} = \frac{J}{qH} - (An + R_{sp} + Cn^3) - \frac{v_g g S_\Sigma}{1 + \epsilon S_\Sigma}, \quad (2.32)$$

gde  $J = I/(WL)$  označava gustinu struje polarizacije, a  $I$  struju polarizacije.  $W$ ,  $H$  i  $L$  predstavljaju širinu, visinu i dužinu aktivne oblasti RSOA, respektivno. Ovi parametri figurišu u prvom članu sa desne strane relacije (2.32) i predstavljaju brzinu pumpanja nosilaca u aktivnu oblast. Drugi član označava gubitak nosilaca kroz proces spontane rekombinacije, gde su  $A$  i  $C$  Šokli-Rid-Holov i Ožeoov koeficijent, respektivno, a  $R_{sp}$  već pomenuti član koji predstavlja brzinu radijativne spontane rekombinacije. Treći član odnosi se na doprinos procesa stimulisane emisije i uračunava gubitak nosilaca kroz nelinearno pojačanje signala i šuma zajedno, ukoliko je sistem opisan relacijama (2.23) i (2.24) ili samog signala ukoliko je opisan relacijom (2.25).

Kada je reč o MQW RSOA dinamika nosilaca naelektrisanja je složenija u poređenju sa RSOA sa masivnim poluprovodnikom. Ovo sa sobom povlači i detaljniji model brzinskih jednačina po gustinama nosilaca naelektrisanja, koji se u ovom slučaju moraju odvojeno posmatrati u barijernim stanjima ( $n_b$ ) i u vezanim stanjama ( $n_w$ ).

Dinamika nosilaca u barijernim stanjima (koja se modeluju kao kontinuum stanja) i unutar jama, određena je sistemom spregnutih brzinskih jednačina modela rezervoara [82]:

$$\frac{dn_b}{dt} = \eta_{inj} \frac{I}{qV_b} - \frac{n_b}{\tau_b} - \frac{n_b}{\tau_{bw}} + \frac{n_w}{\tau_{wb}} \frac{V_w}{V_b}, \quad (2.33)$$

$$\frac{dn_w}{dt} = \frac{n_b}{\tau_{bw}} \frac{V_b}{V_w} - \frac{n_w}{\tau_w} - \frac{n_w}{\tau_{wb}} - \frac{v_g g S_\Sigma}{1 + \epsilon S_\Sigma}, \quad (2.34)$$

U (2.33)-(2.34),  $\eta_{inj}$  je efikasnost injekcije nosilaca,  $V_b = WH_bL$  je ukupna zapremina barijerne regije koja obuhvata SCH i aktivnu oblast, a  $V_w = WH_wL$  je zapremina oblasti jama. Ukupna debljina aktivne oblasti označena je sa  $H_b$ , a debljina oblasti jama sa  $H_w = N_{QW}H_{QW}$ . Rekombinaciona vremena života nosilaca u oblasti barijere  $\tau_b$ , odnosno jama  $\tau_w$ , zavisna su od koncentracija i određuju se kao:

$$\frac{1}{\tau_b} = \frac{1}{\tau_b(n_b)} = A_b + B_b n_b + C_b n_b^2, \quad (2.35)$$

$$\frac{1}{\tau_w} = \frac{1}{\tau_w(n_w)} = A_w + \frac{B_{0w}}{n_w} + B_{1w} + B_{2w} n_w + C_w n_w^2. \quad (2.36)$$

## 2.2 Princip rada i dizajn aktivne sekcije - RSOA

Kao i u slučaju RSOA sa masivnom aktivnom oblasti, parametri  $A$  i  $C$  označavaju Šokli-Rid-Holov i Ožeov koeficijent koji su posebno definisani za oblast barijere,  $A_b/C_b$ , i oblasti jama  $A_w/C_w$ , dok  $B_{w(0,1,2)}$  označavaju konstantni, linearni i kvadratni parametar fitovanja brzine spontane emisije u oblasti jama. U relaciji (2.35) figuriše i koeficijent bimolekularne rekombinacije u barijeri  $B_b$ .

Članovi koji sprežu relacije (2.33) i (2.34) uslovljavaju razmenu nosilaca između barijernih stanja i stanja jama i označavaju se kao vremena zarobljavanja,  $\tau_{bw}$ , i otpuštanja nosilaca  $\tau_{wb}$ . Vreme zarobljavanja nosilaca obuhvata efektivno vreme difuzije nosilaca kroz SCH oblast, kao i sopstveno vreme zarobljavanja nosilaca u jamama [83–86], što je opisano prvim i drugim članom u relaciji:

$$\tau_{bw} = \frac{(H_{SCH} + H_b^{\text{out}})^2}{2D_a} + \frac{m^*}{2\hbar} H_b H_{QW} \exp\left(\frac{\zeta \Delta E_c}{k_B T}\right), \quad (2.37)$$

gde je  $D_a = 10 \text{ cm}^2/\text{s}$  ambipolarni koeficijent difuzije [84]. Efektivna masa elektrona u materijalu barijere data je sa  $m^* = 0.0517m_0$  pri čemu  $m_0$  označava masu slobodnog elektrona,  $\zeta \Delta E_c$  je razlika energija između prvog konfinirajućeg nivoa i dna provodne zone u jamama, gde  $\Delta E_c = 175.3 \text{ meV}$  označava diskontinuitet provodne zone, a  $\zeta = 0.2719$ . Temperatura uređaja označena je sa  $T$  i iznosi  $T = 300 \text{ K}$  [27]. Na osnovu datih parametara vreme zarobljavanja nosilaca iznosi  $\tau_{bw} = 7.07 \text{ ps}$  i u najvećoj meri je određeno vremenom difuzije nosilaca kroz SCH oblast.

Vreme otpuštanja nosilaca iz jama u barijerna stanja modelovano je samo kroz uticaj termojonske emisije, što predstavlja dovoljno dobru aproksimaciju kada je reč o jamama koje nisu isuviše plitke i čija širina iznosi barem 5 nm. Pored toga, usled značajne širine barijera efekat tunelovanja nema značajnog uticaja [84], [87]. Vreme otpuštanja nosilaca se može izraziti kao:

$$\tau_{wb} = \frac{1}{2} H_{QW} \sqrt{\frac{2\pi m^*}{k_B T}} \exp\left(\frac{\Delta E_c}{k_B T}\right), \quad (2.38)$$

i za prethodno date parametre iznosi  $\tau_{wb} = 32.36 \text{ ps}$ .

Uticaj vremena zarobljavanja i otpuštanja nosilaca na dinamiku SOA, kao i na dinamiku laserskih dioda se u određenoj meri već razmatrao u dostupnoj literaturi [84], [85]. Često se upravo ovi faktori smatraju glavnim uzrokom razlika ekperimentalnih merenja modulacionih karakteristika u odnosu na teorijske rezultate.

Pod pretpostavkom da je vreme zarobljavanja nosilaca zanemarljivo malo,  $\tau_{bw} \rightarrow 0$ , odnosno da su nosioci trenutno smešteni u stanja jama, eliminiše se potreba za analizom barijernih stanja i transportnih efekata. Ovakav model RSOA označava se kao sopstveni model i u tom slučaju se sistem jednačina (2.33)-(2.34) svodi na dobro poznatu relaciju [91]:

$$\frac{dn_w}{dt} = \eta_{inj} \frac{I}{qV_w} - \frac{n_w}{\tau_w} - \frac{v_g g S_\Sigma}{1 + \varepsilon S_\Sigma}, \quad (2.39)$$

koja ima isti oblik kao i u slučaju modela RSOA sa aktivnom oblasti od masivnog poluprovodnika.

Vrednosti svih definisanih parametara koji će biti korišćeni za proračune u nastavku analize mogu se naći u Tabeli 2.4 za RSOA sa masivnim poluprovodnikom kao aktivnom oblasti, odnosno u Tabeli 2.3 za MQW RSOA.

Tabela 2.3: MQW RSOA materijalni i geometrijski parametri.

simbol	veličina	@1550 nm
$W$ [ $\mu\text{m}$ ]	širina aktivne oblasti	1.6
$L$ [ $\mu\text{m}$ ]	dužina aktivne oblasti	650
$\eta_{\text{inj}}$	efikasnost injekcije nosilaca	0.8 [36]
$A_b$ [ $\text{s}^{-1}$ ]	Šokli-Rid-Holov koeficijent u barijeri	$6.7 \times 10^7$ [88]
$B_b$ [ $\text{cm}^3/\text{s}$ ]	bimolekularni koeficijent rekombinacije u barijeri	$0.7 \times 10^{-10}$ [88]
$C_b$ [ $\text{cm}^6/\text{s}$ ]	Ožeov koeficijent rekombinacije u barijeri	$3 \times 10^{-28}$ [88]
$A_w$ [ $\text{s}^{-1}$ ]	Šokli-Rid-Holov koeficijent u jami	$1.1 \times 10^8$ [88]
$B_{0w}$ [ $\text{cm}^{-3}/\text{s}$ ]	konstantni koeficijent spontane emisije	$-5.67 \times 10^{25}$ [27]
$B_{1w}$ [ $\text{s}^{-1}$ ]	linearni koeficijent spontane emisije	$1.2 \times 10^8$ [27]
$B_{2w}$ [ $\text{cm}^3/\text{s}$ ]	kvadratni koeficijent spontane emisije	$2.38 \times 10^{-11}$ [27]
$C_w$ [ $\text{cm}^6/\text{s}$ ]	Ožeov koeficijent rekombinacije u jami	$1.1 \times 10^{-27}$ [88]
$n_{\text{eff}}$	efektivni indeks prelamanja	3.19 [89]
$\varepsilon$ [ $\text{cm}^3$ ]	koeficijent nelinearnog potiskivanja pojačanja	$2.85 \times 10^{-17}$ [90]
$g_0$ [ $\text{cm}^{-1}$ ]	parametar fitovanja materijalnog pojačanja	2188 [27]
$n_{\text{tr}}$ [ $\text{cm}^{-3}$ ]	gustina nosilaca pri transparentiji	$1.5 \times 10^{18}$ [27]
$\Gamma_{\text{QW}}$ [%]	faktor konfiniranja po kvantnoj jami	1.589 [89]
$K_0$ [ $\text{cm}^{-1}$ ]	koeficijent gubitaka nezavisnih od $n_w$	20.676 [88]
$K_1$ [ $\text{cm}^2$ ]	koeficijent gubitaka zavisnih od $n_w$	$72 \times 10^{-18}$ [88]
$\tilde{\beta}_{\text{sp}}$ [ $\text{cm}^2\text{s}$ ]	redukovani faktor sprezanja spontane emisije.	$3.74 \times 10^{-24}$ [27]
$n_{\text{rw}}$	indeks prelamanja u jamama	3.59 [27]

Tabela 2.4: Materijalni parametri za RSOA sa aktivnom oblasti od masivnog poluprovodnika.

simbol	veličina	@1313 nm	@1550nm
$W$ [ $\mu\text{m}$ ]	širina aktivne oblasti	2	
$H$ [nm]	visina aktivne oblasti	140	
$L$ [ $\mu\text{m}$ ]	dužina aktivne oblasti	500	
$A$ [ $\text{s}^{-1}$ ]	Šokli-Rid-Holov koeficijent	$1.1 \times 10^8$ [91]	
$C$ [ $\text{cm}^6/\text{s}$ ]	Ožeov koeficijent	$5.82 \times 10^{-29}$ [91]	
$B_1$ [ $\text{s}^{-1}$ ]	linearni koeficijent spontane emisije	$7.92 \times 10^7$ [91]	
$B_2$ [ $\text{cm}^3/\text{s}$ ]	kvadratni koeficijent spontane emisije	$3.6 \times 10^{-11}$ [91]	
$K_0$ [ $\text{cm}^{-1}$ ]	koeficijent gubitaka nezavisnih od $n$	62 [91]	
$K_1$ [ $\text{cm}^2$ ]	koeficijent gubitaka zavisnih od $n$	$7.5 \times 10^{-27}$ [91]	
$\Gamma$ [%]	faktor konfiniranja	30.12	30.44
$v_g$ [m/s]	grupna brzina	$6.82 \times 10^7$	$7.76 \times 10^7$
$n_{\text{tr}}$ [ $\text{cm}^{-3}$ ]	gustina nosilaca pri transparentiji	$3.65 \times 10^{18}$	$1.37 \times 10^{18}$
$\beta_{\text{sp}}$	faktor sprezanja spontane emisije	$5.43 \times 10^{-6}$	$1.84 \times 10^{-5}$

## 2.3 Stacionarna analiza

Potpuni sistem jednačina za stacionarni model RSOA izvodi se iz odgovarajućih brzinskih jednačina u odnosu na tip aktivne oblasti, opisanih u potpoglavlju 2.2.3, izjednačavanjem svih izvoda po vremenu sa nulom. Sistem jednačina za stacionarni model RSOA može se rešiti numerički, implementacijom samosaglasnog modela, koji je potrebno primeniti usled sprezanja između brzinskih jednačina napisanih po gustinama fotona i koncentracijama nosilaca. Međutim, kada se RSOA posmatra kao deo složenog laserskog sistema RSOA-FCL, rešavanje ovog problema može zahtevati značajne procesorske i memorijske resurse. Rešenje se može tražiti kroz primenu polu-analitičkog pristupa koji uz odgovarajuće aproksimacije smanjuje složenost modela, bez značajnog gubitka tačnosti.

### 2.3.1 Stacionarna analiza MQW-RSOA

Dinamika nosilaca za model MQW RSOA, predstavljen u potpoglavlju 2.2.2, opisana je sistemom jednačina (2.33) - (2.34), dok je propagacija signala opisana relacijom (2.25), pod pretpostavkom spektralno uskog ulaznog signala. Sistem jednačina u stacionarnom modelu dobija se kada se svi izvodi po vremenu izjednače sa nulom:

$$0 = \eta_{inj} \frac{\bar{I}}{qV_b} - \frac{\bar{n}_b}{\tau_b} - \frac{\bar{n}_b}{\tau_{bw}} + \frac{\bar{n}_w}{\tau_{wb}} \frac{V_w}{V_b}, \quad (2.40)$$

$$0 = \frac{\bar{n}_b}{\tau_{bw}} \frac{V_b}{V_w} - \frac{\bar{n}_w}{\tau_w} - \frac{\bar{n}_w}{\tau_{wb}} - \frac{v_g g \bar{S}_\Sigma}{1 + \epsilon \bar{S}_\Sigma}, \quad (2.41)$$

$$\pm \frac{d\bar{S}_\pm}{dz} = \left( \frac{\Gamma \bar{g}}{1 + \epsilon \bar{S}_\Sigma} - \bar{\alpha}_i \right) \bar{S}_\pm + \frac{1}{2v_g} \Gamma \beta_{sp} \bar{R}_{sp}, \quad (2.42)$$

pri čemu su za stacionarne vrednosti svih vremenskih zavisnih parametara korišćene nadvučene oznake. Granični uslovi za prostiranje signala unapred i unazad imaju isti oblik kao (2.30) - (2.31), odnosno  $S_+(0) = S_{in}$  i  $S_-(L) = R_2 S_+(L)$ , pri čemu je gustina fotona na ulazu u RSOA,  $S_{in}$ , određena ulaznom optičkom snagom  $P_{in}$  i data vezom  $S_{in} = \Gamma P_{in} / (\hbar \omega_0 v_g W H_w)$ . Formirani sistem jednačina može se rešiti implementacijom širokopojasnog samosaglasnog modela koji je detaljno opisan u [77].

Naime, samosaglasni metod (eng. *Self-Consistent Numerical Method*, SCNM) u svakoj iteraciji naizmenično izračunava gustinu nosilaca na osnovu raspodele fotona iz prethodne iteracije i obrnuto, sve dok se ne postigne prihvatljiva greška između dve uzastopne iteracije. Kako je pokazano u [77], razlika između koncentracija nosilaca između dva iterativna koraka je relativno mala, dok promene gustina fotona mogu biti značajne. Kao posledica toga često se dešava da iterativni proces ne konvergira ka traženom rešenju. Stoga, za potrebe podešavanja konvergencije u svakom iterativnom koraku reevaluacija ulaznih vrednosti vrši se usrednjavanjem vrednosti iz poslednjih  $k$  iterativnih koraka, uz množenje odgovarajućim težinskim koeficijentima,  $w_i$ . Vrednosti koncentracije nosilaca i gustine fotona u svakom iterativnom koraku određuju se izračunavanjem:

### 2.3 Stacionarna analiza

$$x_{i+1} = w_i x_i + w_{i-1} x_{i-1} + \dots + w_{i-k} x_{i-k}, \quad (2.43)$$

pri čemu  $x_{i+1}$  označava novu vrednost iz tekućeg koraka, koja se prosleđuje u naredni iterativni korak.

Kako su jednačine (2.40) - (2.42) međusobno spregnute, pre nego što se započne iterativni proces potrebno je definisati početne vrednosti za sve veličine od interesa. Za inicijalnu vrednost gustine fotona, za smer propagacije unapred, može se uzeti  $S_+ = S_{in}$ , dok se za smer propagacije unazad, inicijalna vrednost može odrediti sa  $S_- = R_2 S_{in}$ . Na onovu ovih vrednosti koncentracije nosilaca u barijerama,  $n_b$ , i jamama,  $n_w$ , se mogu odrediti numeričkim rešavanjem transcendentnih jednačina (2.40) - (2.41), pri čemu se za potrebe određivanja  $n_b$  za  $n_w$  može uzeti vrednost koja se nalazi u intervalu  $(n_{tr}, n_{max})$ , gde  $n_{tr}$  predstavlja koncentraciju transparentije, a  $n_{max}$  predstavlja maksimalnu moguću koncentraciju za datu struju polarizacije  $\bar{I}$ . Pre ulaska u iterativnu petlju potrebno je definisati i uslov za prekidanje iterativnog postupka, što je u ovom slučaju maksimalna relativna razlika  $\delta_{max}$ , koju veličine između dva iterativna koraka mogu imati da bi se smatrale jednakim.

Jedan iterativni korak  $i$  započinje određivanjem  $S_+$  i  $S_-$  rešavanjem (2.42) na diskretizovanoj  $z$  - osi podeljenoj na ekvidistantne tačke na intervalu od 0 do  $L$ , pri čemu se izvodi po koordinati  $z$  mogu izraziti preko konačnih razlika. Za smer prostiranja signala unapred i unazad, gustine fotone date su sledećim izrazima, respektivno:

$$\bar{S}_+(z_{j+1}) = \bar{S}_+(z_j) + \Delta z \left[ \left( \frac{\Gamma \bar{g}(z_j)}{1 + \varepsilon \bar{S}_\Sigma(z_i)} - \bar{a}_i(z_i) \right) \bar{S}_+(z_i) + \frac{1}{2v_g} \Gamma \beta_{sp} \bar{R}_{sp}(z_i) \right], \quad (2.44)$$

$$\bar{S}_-(z_{j-1}) = \bar{S}_-(z_j) + \Delta z \left[ \left( \frac{\Gamma \bar{g}(z_j)}{1 + \varepsilon \bar{S}_\Sigma(z_i)} - \bar{a}_i(z_i) \right) \bar{S}_-(z_i) + \frac{1}{2v_g} \Gamma \beta_{sp} \bar{R}_{sp}(z_i) \right]. \quad (2.45)$$

Najpre se rešava (2.44) na osnovu početnih uslova u  $z = 0$ , pri čemu su vrednosti veličina koje zavise od koncentracije nosilaca i gustine fotona preuzete iz prethodnog iterativnog koraka. Potom se vrednosti  $S_+$  ažuriraju prema (2.43) usrednjavanjem vrednosti iz tekućeg koraka i prethodnih  $k$  koraka. Treba naglasiti da se, za početnih  $k$  iteracija, vrednosti veličina koje nedostaju mogu zameniti sa početnim pretpostavljenim vrednostima. Isti postupak se ponavlja za određivanje  $\bar{S}_-$ , pri čemu je  $\bar{S}_-(L) = R_2 \bar{S}_+(L)$ . Određivanje stacionarnih vrednosti koncentracije nosilaca  $n_w(z)$  i  $n_b(z)$  vrši se u svakoj tački  $z_j$ , numeričkim rešavanjem transcendentnih jednačina (2.40) i (2.41), respektivno. Pri tome, nakon određivanja svake od veličina, radi se ažuriranje te veličine na osnovu tekućeg i  $k$  prethodnih iterativnih koraka. Na kraju svakog iterativnog koraka određuje se relativna razlika svih posmatranih veličina, koja se računa kao maksimalna vrednost između relativnih razlika date promenljive za svaku tačku  $z_j$ . Za relativnu razliku celokupnog iterativnog koraka,  $\delta$ , bira se maksimalna vrednost skupa relativnih razlika svih promenljivih,

$$\delta = \max[\delta(\bar{S}_+), \delta(\bar{S}_-), \delta(\bar{n}_w), \delta(\bar{n}_b)]. \quad (2.46)$$

Uslov za prekid iterativne procedure je ispunjen kada je  $\delta$  manje ili jednako prethodno definisanoj vrednosti maksimalne relativne razlike  $\delta_{max}$ .



### 2.3 Stacionarna analiza

Primenom analogne procedure moguće je realizovati stacionarnu analizu RSOA kada je aktivna oblast realizovana od masivnog poluprovodnika.

#### 2.3.2 Stacionarna analiza RSOA-FCL sistema

Kada se RSOA posmatra u okviru RSOA-FCL laserskog sistema, složenost modela je velika, pa je potrebno primeniti adekvatna pojednostavljenja. Za potrebe određivanja stacionarnih vrednosti koncentracije nosilaca i gustine fotona u RSOA-FCL, može se koristiti stacionarni polu-analički model koji je detaljno opisan u [92].

Jedna od aproksimacija koje se može primeniti je zanemarivanje nelinearnog potiskivanja pojačanja, odabirom  $\varepsilon = 0$ . Koeficijent nelinearnog potiskivanja pojačanja,  $\varepsilon$ , je parametar kroz koji se uračunavaju efekti zagrevanja nosilaca i progorevanja spektra, i za struje polarizacije koje nisu previše visoke ne utiče značajno na tačnost modela. U tom slučaju, jednačine napisane po koncentraciji nosilaca i gustinama fotona u oba pravca propagacije, za stacionarni model RSOA sa aktivnom oblasti koja se sastoji od masivnog poluprovodnika dobijaju sledeći oblik:

$$0 = \frac{\bar{J}}{qH} - (A\bar{n} + \bar{R}_{sp} + C\bar{n}^3) - v_g \bar{g} \bar{S}_\Sigma, \quad (2.47)$$

$$\pm \frac{d\bar{S}_\pm}{dz} = (\Gamma \bar{g} - \bar{\alpha}_i) \bar{S}_\pm + \frac{1}{2v_g} \Gamma \beta_{sp} \bar{R}_{sp}. \quad (2.48)$$

Koncentracija nosilaca  $\bar{n}$ , ne menja se značajno po logitudinalnoj osi  $z$  i može se smatrati konstantnom. Sa druge strane, tokom propagacije duž  $z$  ose, promena gustine fotona može biti značajna [92]. Stoga, treba odabrati odgovarajuće  $\bar{n}$ , kako ne bi došlo do primetne greške u izlaznim gustinama fotona. Ako se za pretpostavljenu konstantnu vrednost koncentracije odabere njena vrednost  $\bar{n} = \bar{n}(z = L/2)$ , delimično se može umanjiti greška koja proizilazi iz pretpostavke da je  $\bar{n}$  fiksno. Za konstantnu vrednost  $\bar{n}$ , sistem jednačina (2.47)-(2.48) može se rešiti analitički, rešavanjem linearnih diferencijalnih jednačina prvog reda. Razdvajanjem promenljivih, jednačina (2.48) za smer propagacije unapred postaje:

$$\frac{d\bar{S}_+}{(\Gamma \bar{g} - \bar{\alpha}_i) \bar{S}_+ + \frac{1}{2v_g} \Gamma \beta_{sp} \bar{R}_{sp}} = dz. \quad (2.49)$$

Uvođenjem smene  $u = (\Gamma \bar{g} - \bar{\alpha}_i) \bar{S}_+ + \frac{1}{2v_g} \Gamma \beta_{sp} \bar{R}_{sp}$  i integracijom obe strane jednačine, dobija se:

$$\frac{1}{(\Gamma \bar{g} - \bar{\alpha}_i)} \int_{(\Gamma \bar{g} - \bar{\alpha}_i) \bar{S}_+(0) + \frac{1}{2v_g} \Gamma \beta_{sp} \bar{R}_{sp}}^{(\Gamma \bar{g} - \bar{\alpha}_i) \bar{S}_+(L) + \frac{1}{2v_g} \Gamma \beta_{sp} \bar{R}_{sp}} \frac{du}{u} = \int_0^L dz, \quad (2.50)$$

odnosno

$$\frac{1}{(\Gamma \bar{g} - \bar{\alpha}_i)} \ln u \Big|_{(\Gamma \bar{g} - \bar{\alpha}_i) \bar{S}_+(0) + \frac{1}{2v_g} \Gamma \beta_{sp} \bar{R}_{sp}}^{(\Gamma \bar{g} - \bar{\alpha}_i) \bar{S}_+(L) + \frac{1}{2v_g} \Gamma \beta_{sp} \bar{R}_{sp}} = z \Big|_0^L. \quad (2.51)$$

Sređivanjem izraza (2.51), dobija se konačan oblik za  $S_+(z = L)$ :

### 2.3 Stacionarna analiza

$$\bar{S}_+(L) = \bar{G}_{sp}\bar{S}_+(0) + \bar{\sigma}_{sp}, \quad (2.52)$$

gde su  $\bar{G}_{sp}$  i  $\bar{\sigma}_{sp}$  transmisiono pojačanje i doprinos šuma spontane emisije pri jednom prolasku kroz sistem, respektivno:

$$\bar{G}_{sp} = \exp[(\Gamma\bar{g} - \bar{\alpha}_i)L], \quad (2.53)$$

$$\bar{\sigma}_{sp} = \Gamma\beta_{sp}\bar{R}_{sp} \frac{L(\bar{G}_{sp} - 1)}{2\nu_g \ln \bar{G}_{sp}}. \quad (2.54)$$

Na sličan način se može doći i do  $S_-(z = 0)$ . Primenom graničnog uslova u  $z = L$ , dobija se:

$$\bar{S}_-(0) = R_2\bar{G}_{sp}^2\bar{S}_+(0) + (R_2\bar{G}_{sp} + 1)\bar{\sigma}_{sp}. \quad (2.55)$$

Pojačanje za kompletni povratni prolazak kroz strukturu RSOA, može se odrediti iz:

$$\bar{G}_{rt} = \bar{S}_-(0)/\bar{S}_+(0) = R_2\bar{G}_{sp}^2 + (R_2\bar{G}_{sp} + 1)\bar{\sigma}_{sp}/\bar{S}_+(0). \quad (2.56)$$

Kada se RSOA posmatra kao deo RSOA-FCL laserskog sistema, za vrednosti gustine struje polarizacije koje su niže od struje praga,  $\bar{J} < \bar{J}_{th}$ , pojačanje aktivne oblasti nije dovoljno da nadomesti gubitke u vlaknu i omogući lasersku emisiju. U tom slučaju, pojačanje pri povratnom prolasku određeno je izrazom (2.56) za pojačanje RSOA. Sa druge strane, za dovoljno visoku vrednost gustine struje polarizacije,  $\bar{J} \geq \bar{J}_{th}$ , RSOA ulazi u režim laserovanja, a pojačanje RSOA koji je deo laserskog sistema biće fiksirano na vrednost praga pojačanja,  $\bar{G}_{rt} = \bar{G}_{th}$ . U ovom režimu, RSOA koji je deo laserskog sistema radi u blizini saturacije, ili u saturaciji. Ovo sugerise da se doprinos šuma pri jednom punom prolasku,  $(R_2\bar{G}_{sp} + 1)\bar{\sigma}_{sp}/\bar{S}_+(0)$ , može zanemariti u odnosu na doprinos pojačanja, pa se pojačanje pri punom prolasku može aproksimirati sa:

$$\bar{G}_{rt} \approx R_2\bar{G}_{sp}^2. \quad (2.57)$$

Kako je već pomenuto, generisanje laserskog zračenja nastaje kada je pojačanje u aktivnoj oblasti dovoljno veliko da nadoknadi slabljenje signala u vlaknu, što dovodi do toga da prag pojačanja zavisi od funkcije prenosa vlakna pri punom proslasku kroz vlakno, u slučaju kada nema modulacije, odnosno  $\bar{G}_{th} = H_{rt}^{-1}(\omega = 0)$ . Na osnovu (2.18), funkcija prenosa vlakna kada nema modulacije uračunava samo gubitke koji potiču od slabljenja u vlaknu i RN ogledala, odnosno  $H_{rt}(\omega = 0) = R_f \exp(-2\alpha_f L_f)$ . Zamenom izraza (2.53) za  $G_{sp}$ , u  $R_2\bar{G}_{sp}^2 = (R_f \exp(-2\alpha_f L_f))^{-1}$ , dobija se:

$$R_2 \exp[2(\Gamma\bar{g} - \bar{\alpha}_i)L] = \frac{1}{R_f} \exp(2\alpha_f L_f), \quad (2.58)$$

a daljom zamenom izraza za materijalno pojačanje i unutrašnje gubitke,  $\bar{g} = g_0 \ln(\bar{n}/n_{tr})$  i  $\bar{\alpha}_i = K_0 + \Gamma K_1 \bar{n}$  u (2.58) izraz postaje:

## 2.4 Dinamička analiza

$$\Gamma g_0 \ln(\bar{n}_{\text{th}}/n_{\text{tr}}) - K_0 - \Gamma K_1 \bar{n}_{\text{th}} = \frac{1}{2L} \ln \left[ \frac{\exp(2\alpha_f L_f)}{R_2 R_f} \right]. \quad (2.59)$$

Grupisanjem svih članova sa  $\bar{n}_{\text{th}}$ , izraz za graničnu gustinu nosilaca dobija se kao:

$$\bar{n}_{\text{th}} = -\frac{g_0}{K_1} W_L \left\{ -\frac{K_1 n_{\text{tr}}}{g_0} \exp \left[ \frac{1}{\Gamma g_0} \left( K_0 + \frac{1}{2L} \ln \frac{\bar{G}_{\text{th}}}{R} \right) \right] \right\}, \quad (2.60)$$

gde  $W_L(x)$  označava Lamberovu W funkciju. Kako je stacionarna gustina nosilaca fiksirana na vrednost granične gustine nosilaca,  $\bar{n} = \bar{n}_{\text{th}}$ , gustina struje polarizacije  $\bar{J}$  i gustina fotona na izlazu iz RSOA  $\bar{S}_-(z=0)$  jedinstveno su povezane stacionarnim oblikom brzinske jednačine po gustini nosilaca (2.47), za  $z = L/2$ . Za dato  $\bar{J}$ , (2.47) se može rešiti u odnosu na  $\bar{S}_-(0)$ , ukoliko se u članu koji se odnosi na doprinos procesa stimulisane emisije  $\bar{S}_\Sigma = \bar{S}_+ + \bar{S}_-$  zameni sa  $\bar{S}_+(L/2) + \bar{S}_-(L/2) \approx \bar{S}_-(0)(1 + R_2 \bar{G}_{\text{sp}})/(R_2 \bar{G}_{\text{sp}}^{-3/2})$ , gde je  $\bar{G}_{\text{sp}} = \bar{G}_{\text{rt}}^{-1/2}/R_2$ . Na ovaj način se može odrediti  $\bar{S}_-(0)$ , a time i stacionarna izlazna snaga na RN kraju vlakna koja je data izrazom:

$$\bar{P}_{\text{out}}(\nu_0) = (1 - R_f) h \nu_0 \nu_g W H \bar{S}_-(0) H_f(-L_f, 0) / \Gamma, \quad (2.61)$$

pri čemu je  $h\nu_0$  energija signala, a  $H_f(-L_f, 0) = \exp(-\alpha_f L_f)$  funkcija prenosa vlakna za jedan prolazak signala.

## 2.4 Dinamička analiza

Simulaciona analiza modulacionih performansi RSOA-FCL laserskog sistema zahteva formiranje dinamičkog modela. U okviru ove sekcije biće predstavljeni dinamički modeli RSOA struktura opisanih u sekciji 2.2, prilagođeni analizi u režimu za male i režimu za velike signale.

### 2.4.1 Analiza RSOA i RSOA-FCL u režimu za male signale

Jedan od najznačajnijih parametara kvaliteta poluprovodničkih optičkih pojačavača u dinamičkom režimu rada jeste trodecibelski propusni opseg za male signale. Propusni opseg neke elektonske komponente definiše se kao opseg frekvencija u okviru koga performanse ostaju u okviru unapred zadatih granica. U konkretnom slučaju, amplitudsko-frekvencijska karakteristika po obliku odgovora filteru propusniku niskih učestanosti, pa je propusni opseg praktično određen graničnom frekvencijom. Trodecibelska granična frekvencija,  $f_{3\text{dB}}$ , se definiše kao frekvencija modulacionog signala, odnosno struje polarizacije, pri kojoj amplituda varijacije izlazne veličine, u konkretnom slučaju gustine emitovanih fotona, opada na polovinu svoje DC vrednosti, što odgovara padu od 3 dB.

Za potrebe analize u režimu malih signala pretpostavlja se da je RSOA modulisan strujom koja se može predstaviti kao sinusoidalna varijacija sa malom amplitudom  $\Delta I(z)$ , oko srednje vrednosti  $\bar{I}$ :

$$I(z, t) = \bar{I} + \Delta I(z) \exp(j\omega t), \quad (2.62)$$

## 2.4 Dinamička analiza

gde je ugaona frekvencija  $\omega = 2\pi f$  i važi da je  $\Delta I \ll \bar{I}$ . U prethodnom izrazu,  $\Delta I(z)$  opisuje prostornu raspodelu varijacije struje. U narednom razmatranju, simbol  $\Delta$  će se koristiti za označavanje malih varijacija svih relevantnih parametara. Struja polarizacije će modulisati gustinu nosilaca kroz brzinsku jednačinu koja opisuje dinamiku nosilaca naelektrisanja, što kroz parametre zavisne od gustine nosilaca (materijalno pojačanje  $g$ , gubici u aktivnoj oblasti  $\alpha_i$  i brzina spontane emisije  $R_{sp}$ ) dovodi do modulacije gustine fotona i u pozitivnom i u negativnom smeru propagacije. Forma brzinskih jednačina koje se koriste za formiranje modela u režimu malih signala razlikuje se u zavisnosti od tipa aktivne oblasti RSOA.

Za RSOA sa aktivnom oblasti od masivnog poluprovodnika, pod pretpostavkom da je opravdano zanemariti uticaj nelinearnog potiskivanja pojačanja ( $\varepsilon = 0$ ), brzinske jednačine imaju oblik:

$$\frac{dn}{dt} = \frac{J}{qH} - (An + R_{sp} + Cn^3) - v_g g(S_+ + S_-), \quad (2.63)$$

$$\pm \frac{\partial S_{\pm}}{\partial z} + \frac{1}{v_g} \frac{\partial S_{\pm}}{\partial t} = (\Gamma g - \alpha_i) S_{\pm} + \frac{1}{2v_g} \Gamma \beta_{sp} R_{sp}, \quad (2.64)$$

gde gustina struje polarizacije po formi prati struju polarizacije definisanu relacijom (2.62). Zamenom  $J = \bar{J} + \Delta J \exp(j\omega t)$  u (2.63) - (2.64) dobija se sistem od šest jednačina, od kojih tri opisuju stacionarne vrednosti  $\bar{S}_{\pm}$  i  $\bar{n}$ , koje mogu biti određene na način opisan u 2.3.2, dok preostale tri opisuju dinamiku u režimu malih signala. Detaljno izvođenje modela za analizu u režimu malih signala za RSOA sa aktivnom oblasti od masivnog poluprovodnika, prikazano je u [91], [93]. Sistem linearizovanih brzinskih jednačina napisanih po koncentraciji nosilaca naelektrisanja i gustini fotona za oba smera propagacije, dat je sledećim relacijama:

$$\Delta n = \frac{\Delta J/(qH) - v_g \bar{g}(\Delta S_+ + \Delta S_-)}{A + B_1 + 2B_2 \bar{n} + 3C \bar{n}^2 + v_g g_0/\bar{n}(\bar{S}_{\pm} + \bar{S}_{\mp}) + i\omega}, \quad (2.65)$$

$$\pm \frac{d\Delta S_{\pm}}{dz} = \frac{\Gamma \gamma_{\pm}}{qH v_g} \Delta J - \Gamma \bar{g} \gamma_{\pm} (\Delta S_{\pm} + \Delta S_{\mp}) + (\Gamma \bar{g} - \bar{\alpha}_i - i\omega/v_g) \Delta S_{\pm}, \quad (2.66)$$

gde je  $\gamma$  pomoćni parametar definisan izrazom:

$$\gamma_{\pm} = \frac{v_g(g_0/\bar{n} - K_1)\bar{S}_{\pm} + \beta_{sp}(B_1/2 + B_2\bar{n})}{A + B_1 + 2B_2\bar{n} + 3C\bar{n}^2 + v_g g_0/\bar{n}(\bar{S}_{\pm} + \bar{S}_{\mp}) + i\omega}. \quad (2.67)$$

Primenom analognog postupka može se izvesti sistem brzinskih jednačina u režimu za male signale i za RSOA sa aktivnom oblasti od višestrukih kvantnih jama. Dinamika nosilaca opisana je sistemom jednačina (2.33) - (2.34):

$$\frac{dn_b}{dt} = \eta_{inj} \frac{I}{qV_b} - A_b n_b - B_b n_b^2 - C_b n_b^3 - \frac{n_b}{\tau_{bw}} + \frac{n_w}{\tau_{wb}} \frac{V_w}{V_b}, \quad (2.68)$$

$$\frac{dn_w}{dt} = \frac{n_b}{\tau_{bw}} \frac{V_b}{V_w} - A_w - B_{0w} - B_{1w} n_w - B_{2w} n_w^2 - C_w n_w^3 - \frac{n_w}{\tau_{wb}} - \frac{v_g g S_{\Sigma}}{1 + \varepsilon S_{\Sigma}}, \quad (2.69)$$

u okviru kojih su iskorišćene relacije (2.35) i (2.36) za srednje vreme života naelektrisanja u barijernoj

## 2.4 Dinamička analiza

$\tau_b$  i jamskoj oblasti  $\tau_w$ , respektivno. Zamenom izraza za struju (2.62), kao i izraza za koncentraciju nosilaca naelektrisanja  $n_{b/w} = \bar{n}_{b/w} + \Delta n_{b/w} \exp(j\omega t)$ , u jednačinu (2.68) dobija se:

$$\begin{aligned} \frac{d(\bar{n}_b + \Delta n_b \exp(j\omega t))}{dt} &= \eta_{inj} \frac{\bar{I} + \Delta I \exp(j\omega t)}{qV_b} - A_b(\bar{n}_b + \Delta n_b \exp(j\omega t)) \\ &\quad - B_b(\bar{n}_b + \Delta n_b \exp(j\omega t))^2 - C_b(\bar{n}_b + \Delta n_b \exp(j\omega t))^3 \\ &\quad - \frac{\bar{n}_b + \Delta n_b \exp(j\omega t)}{\tau_{bw}} + \frac{(\bar{n}_w + \Delta n_w \exp(j\omega t)) V_w}{\tau_{wb} V_b}. \end{aligned} \quad (2.70)$$

Analiza u režimu za male signale zasniva se na pretpostavci da su male veličine barem za jedan red veličine manje od odgovarajućih stacionarnih vrednosti, pa se prethodne jednačine mogu lineari- zovati, tj. mogu se zanemariti sve male veličine drugog ili višeg reda. Primenom ove procedure na (2.70) i uz separaciju članova koji označavaju stacionarne komponente i male varijacije parametara, dobija se:

$$\begin{aligned} j\omega \Delta n_b \exp(j\omega t) &= \underbrace{\frac{\eta_{inj} \bar{I}}{qV_b} - A_b \bar{n}_b - B_b \bar{n}_b^2 - C_b \bar{n}_b^3 - \frac{\bar{n}_b}{\tau_{bw}} + \frac{\bar{n}_w V_w}{\tau_{wb} V_b}}_{=0} \\ &\quad + \frac{\eta_{inj} \Delta I}{qV_b} \exp(j\omega t) - A_b \Delta n_b \exp(j\omega t) - 2B_b \bar{n}_b \Delta n_b \exp(j\omega t) \\ &\quad - B_b \bar{n}_b (\Delta n_b)^2 \exp(2j\omega t) - 3C_b \bar{n}_b^2 \Delta n_b \exp(j\omega t) \\ &\quad - 3C_b \bar{n}_b (\Delta n_b)^2 \exp(2j\omega t) - C_b (\Delta n_b)^3 \exp(3j\omega t) \\ &\quad - \frac{\Delta n_b}{\tau_{bw}} \exp(j\omega t) + \frac{\Delta n_w V_w}{\tau_{wb} V_b} \exp(j\omega t). \end{aligned} \quad (2.71)$$

Ako se obe strane jednačine podele sa  $\exp(j\omega t)$  i grupišu svi članovi koji idu uz  $\Delta n_b$ , dobija se:

$$\Delta n_b \left( j\omega + A_b + 2B_b \bar{n}_b + 3C_b \bar{n}_b^2 + \frac{1}{\tau_{bw}} \right) = \frac{\eta_{inj} \Delta I}{qV_b} + \frac{\Delta n_w V_w}{\tau_{wb} V_b}. \quad (2.72)$$

Konačno,  $\Delta n_b$  se može izraziti kao:

$$\Delta n_b = \frac{1}{j\omega + (\tau_b^{eff})^{-1}} \left( \eta_{inj} \frac{\Delta I}{qV_b} + \frac{\Delta n_w V_w}{\tau_{wb} V_b} \right) \quad (2.73)$$

gde je  $\tau_b^{eff}$  pomoćni parametar definisan relacijom:

$$(\tau_b^{eff})^{-1} = A_b + 2B_b \bar{n}_b + 3C_b \bar{n}_b^2 + \tau_{bw}^{-1}. \quad (2.74)$$

Dobijeni izraz za  $\Delta n_b$  može se iskoristiti za određivanje  $\Delta n_w$ , zamenom u (2.69). Pored toga, potrebno je izraziti i materijalno pojačanje,  $g = g_0 \ln(n_w/n_{tr})$ , koje zavisi od koncentracije nosilaca naelektri- sanja preko  $\Delta n_w$ , odnosno, potrebno je odrediti  $\Delta g(\Delta n_w)$ . Materijalno pojačanje u režimu za male signale može se dobiti koristeći prvi izvod po koncentraciji, za koncentraciju koja odgovara stacio-

## 2.4 Dinamička analiza

narnoj vrednosti koncentracije nosilaca, odnosno:

$$\Delta g = \left. \frac{dg}{dn_w} \right|_{n=\bar{n}} \Delta n_w = \left. \frac{d(g_0 \ln(n_w/n_{tr}))}{dn_w} \right|_{n=\bar{n}} \Delta n_w = \frac{g_0}{\bar{n}} \Delta n_w. \quad (2.75)$$

Da bi se odredio izraz za  $\Delta n_w$ , potrebno je linearizovati i član koji opisuje stimulisanu emisiju,  $v_g g S_\Sigma / (1 + \varepsilon S_\Sigma)$ . Kako gustina fotona zavisi od koncentracije nosilaca, može se izraziti kao  $S_\pm = \bar{S}_\pm + \Delta S_\pm \exp(j\omega t)$ , pa imenilac člana koji opisuje doprinos stimulisane emisije postaje:

$$(1 + \varepsilon S_\Sigma) = 1 + \varepsilon \bar{S}_\Sigma + \varepsilon \Delta S_+ \exp(j\omega t) + \varepsilon \Delta S_- \exp(j\omega t). \quad (2.76)$$

Kada se izraz (2.76) predstavi u formi:

$$(1 + \varepsilon S_\Sigma) = (1 + \varepsilon \bar{S}_\Sigma) \left[ 1 + \varepsilon \frac{\Delta S_+ + \Delta S_-}{(1 + \varepsilon \bar{S}_\Sigma)} \exp(j\omega t) \right], \quad (2.77)$$

kompletan član koji opisuje stimulisanu emisiju dobija oblik:

$$\frac{v_g g S_\Sigma}{1 + \varepsilon S_\Sigma} = \frac{v_g g S_\Sigma}{1 + \varepsilon \bar{S}_\Sigma} \left[ 1 + \varepsilon \frac{\Delta S_+ + \Delta S_-}{(1 + \varepsilon \bar{S}_\Sigma)} \exp(j\omega t) \right]^{-1}. \quad (2.78)$$

Uvođenjem smene  $x = \varepsilon (\Delta S_+ + \Delta S_-) \exp(j\omega t) / (1 + \varepsilon \bar{S}_\Sigma)$ , za koju važi  $x \ll 1$ , drugi činilac sa desne strane prethodnog izraza se može linearizovati primenom Tejlorovog razvoja u okolini nule,  $(1 + x)^{-1} \approx 1 - x$ , pa član koji označava doprinos stimulisane emisije postaje:

$$\frac{v_g g S_\Sigma}{1 + \varepsilon S_\Sigma} = \frac{v_g g S_\Sigma}{1 + \varepsilon \bar{S}_\Sigma} \left[ 1 - \varepsilon \frac{\Delta S_+ + \Delta S_-}{(1 + \varepsilon \bar{S}_\Sigma)} \exp(j\omega t) \right]. \quad (2.79)$$

Ovako dobijeni izraz, zajedno sa već izvedenim izrazima za varijaciju materijalnog pojačanja (2.75) i koncentraciju nosilaca naelektrisanja u barijernim stanjima (2.73) u (2.69) omogućava određivanje varijacije koncentracije nosilaca naelektrisanja u jami, u režimu za male signale. Ponavljanjem postupka koji je korišćen pri određivanju  $\Delta n_b$ , za konačan izraz za  $\Delta n_w$  dobija se:

$$\Delta n_w = \frac{\eta_{inj} \frac{\Delta I}{qV_w} \frac{\tau_{bw}^{-1}}{j\omega + (\tau_b^{eff})^{-1}} - v_g \frac{g_{eff}}{\Gamma} \Delta S_\Sigma}{j\omega + (\tau_w^{eff})^{-1} + v_g \frac{g_0}{\bar{n}_w} \frac{\bar{S}_\Sigma}{1 + \varepsilon \bar{S}_\Sigma} - \frac{(\tau_{wb} \tau_{bw})^{-1}}{j\omega + (\tau_b^{eff})^{-1}}}, \quad (2.80)$$

gde su pomoćni parametri definisani sa:

$$g_{eff} = \Gamma \bar{g} / (1 + \varepsilon \bar{S}_\Sigma)^2, \quad (2.81)$$

$$(\tau_w^{eff})^{-1} = A_w + B_{1w} + 2B_{2w} \bar{n}_w + 3C_w \bar{n}_w^2 + \tau_{wb}^{-1}. \quad (2.82)$$

Kompletan model za analizu u režimu malih signala zahteva razmatranje dinamike varijacije gustine fotona za oba smera propagacije. Polazna jednačina za određivanje varijacije gustine fotona u ovom slučaju ima isti oblik kao (2.25), odnosno:

$$\pm \frac{\partial S_{\pm}}{\partial z} + \frac{1}{v_g} \frac{\partial S_{\pm}}{\partial t} = \left( \frac{\Gamma g}{1 + \varepsilon S_{\Sigma}} - \alpha_i \right) S_{\pm} + \frac{1}{2v_g} \Gamma \beta_{sp} R_{sp}. \quad (2.83)$$

U skladu sa već prikazanom procedurom, svi članovi koji zavise od koncentracije nosilaca mogu se predstaviti kao zbir stacionarne vrednosti i male varijacije oko stacionarne vrednosti. Već određeni izraz (2.75), opisuje varijaciju materijalnog pojačanja, a po istom principu se mogu odrediti predstaviti i varijacije gubitaka u aktivnoj oblasti, definisanih kao  $\alpha_i = K_0 + \Gamma K_1 n_w$  i brzine spontane emisije,  $R_{sp} = B_{0w} + B_{1w} n_w + B_{2w} n_w^2$ , što daje:

$$\Delta \alpha_i = \left. \frac{d\alpha_i}{dn_w} \right|_{n=\bar{n}_w} \Delta n_w = \left. \frac{d(K_0 + \Gamma K_1 n_w)}{dn_w} \right|_{n=\bar{n}_w} \Delta n_w = \Gamma K_1 \Delta n_w, \quad (2.84)$$

$$\Delta R_{sp} = \left. \frac{dR_{sp}}{dn_w} \right|_{n=\bar{n}_w} \Delta n_w = \left. \frac{d(B_{0w} + B_{1w} n_w + B_{2w} n_w^2)}{dn_w} \right|_{n=\bar{n}_w} \Delta n_w = (B_{1w} + 2B_{2w} \bar{n}_w) \Delta n_w. \quad (2.85)$$

Zamenom  $\Delta n_b$  i  $\Delta n_w$  i (2.84) - (2.85) u sistem izražen preko  $\Delta S_{\pm}$  zatvara se konturni problem (eng. *Boundary Value Problem*, BVP):

$$\begin{aligned} \pm \frac{d\Delta S_{\pm}}{dz} &= \frac{\Gamma \gamma_{\pm}}{v_g} \eta_{inj} \frac{\Delta I}{qV_w} \frac{\tau_{bw}^{-1}}{j\omega + (\tau_b^{eff})^{-1}} \\ &+ \left[ g_{eff}(1 + \varepsilon \bar{S}_{\mp} - \gamma_{\pm}) - \bar{\alpha}_i - j\omega/v_g \right] \Delta S_{\pm} \\ &- g_{eff}(\gamma_{\pm} + \varepsilon \bar{S}_{\pm}) \Delta S_{\mp}, \end{aligned} \quad (2.86)$$

gde je

$$\gamma_{\pm} = \frac{v_g \left( \frac{g_0/\bar{n}_w}{1 + \varepsilon \bar{S}_{\Sigma}} - K_1 \right) \bar{S}_{\pm} + \beta_{sp} (B_{1w}/2 + B_{2w} \bar{n}_w)}{j\omega + (\tau_w^{eff})^{-1} + v_g \frac{g_0}{\bar{n}_w} \frac{\bar{S}_{\Sigma}}{1 + \varepsilon \bar{S}_{\Sigma}} - \frac{(\tau_{wb} \tau_{bw})^{-1}}{j\omega + (\tau_b^{eff})^{-1}}}. \quad (2.87)$$

Konturni problem opisan pomoću (2.66) za RSOA sa aktivnom oblasti od masivnog poluprovodnika, odnosno (2.86) za MQW ROSA može biti rešen numerički pomoću metode konačnih razlika (eng. *Finite Difference Method*, FDM) sa implementiranom Lobato IIIa trostepenom funkcijom [91]. Granični uslovi za rešavanje konturnog problema zavise od toga da li se RSOA posmatra kao samostalna komponenta ili kao deo laserskog RSOA-FCL sistema. Ukoliko se posmatra izolovan RSOA, granični uslovi biće izvedeni od onih definisanih izrazima (2.30)-(2.31). Pod pretpostavkom da je ulazni signal konstantne snage, granični uslovi za jednačine napisane po malim signalima glase:

$$\Delta S_{+}(0, \omega) = 0, \quad (2.88)$$

$$\Delta S_{-}(L, \omega) = R_2 \Delta S_{+}(L, \omega). \quad (2.89)$$

## 2.4 Dinamička analiza

Kada je reč o RSOA koji je deo laserskog sistema, signal koji ulazi u RSOA na antirefleksivnoj ivici,  $S_+(z=0)$ , određen je izlaznim signalom  $S_-(z=0)$  koji je izmenjen usled dvostrukog prolaska kroz vlakno. U tom slučaju granični uslovi glase:

$$\Delta S_+(0, \omega) = H_{rt} \Delta S_-(0, \omega), \quad (2.90)$$

$$\Delta S_-(L, \omega) = R_2 \Delta S_+(L, \omega), \quad (2.91)$$

pri čemu  $H_{rt}$  označava funkciju prenosa vlakna na povratnom putu.

Modulacioni odziv RSOA se označava kao sopstveni (s), ukoliko je opisan modelom koji računa samo interakcije između fotona i nosilaca naelektrisanja u aktivnoj oblasti. Ukoliko je model složeniji i uzima u obzir i transport nosilaca naelektrisanja kroz aktivnu oblast, modulacioni odziv se označava kao interni (i). Sopstveni/interni modulacioni odziv definisan je funkcijom ugaone frekvencije  $\omega = 2\pi f$  na izlazu iz RSOA ( $z=0$ ):

$$H_{s/i}(\omega) = 20 \log_{10} |\Delta S_-(\omega, z=0) / \Delta S_-(0, z=0)|. \quad (2.92)$$

Granična učestanost  $f_{3dB}$  može se odrediti interpolacijom (2.92), i traženjem učestanosti za koju vrednost funkcije opadne na  $-3$  dB:

$$H_{s/i}(f_{3dB}) = 20 \log_{10} |\Delta S_-(f_{3dB}, z=0) / \Delta S_-(0, z=0)| = -3 \text{ dB}. \quad (2.93)$$

Kada je reč o laserskom sistemu RSOA-FCL, može se definisati izlazna snaga na udaljenom čvorištu ( $z = -L_f$ ):

$$\Delta P_{out}(\omega, -L_f) = (1 - R_f) \hbar \omega_0 v_g W H \Delta S_-(\omega, 0) H_f(\omega, -L_f) / \Gamma, \quad (2.94)$$

pri čemu je  $H_f$  prenosna funkcija vlakna pri jednom prolazu. U tom slučaju modulacioni odziv se može izraziti na sledeći način:

$$H_{s/i}(\omega) = 20 \log_{10} |\Delta P_{out}(\omega, z = -L_f) / \Delta P_{out}(0, z = -L_f)|. \quad (2.95)$$

### 2.4.2 Analiza RSOA u režimu velikih signala

U okviru ovog potpoglavlja biće prikazan numerički model za analizu RSOA koji se može modulisati proizvoljnim oblikom signala struje modulacije  $I(t)$ . Evaluacija modulacionih performansi pri modulaciji velikim signalima zasniva se na određivanju BER-a i faktora kvaliteta  $Q$ , koji se određuju analizom ukupne izlazne snage  $P_{out}(t, z=0)$  uključujući i šum.

Propagacija signala i šuma za model MQW-RSOA može se predstaviti relacijama koje imaju isti oblik kao (2.23) - (2.24), odnosno:



## 2.4 Dinamička analiza

$$\pm \frac{\partial S_{\pm}}{\partial z} + \frac{1}{v_g} \frac{\partial S_{\pm}}{\partial t} = \left( \frac{\Gamma g}{1 + \epsilon S_{\Sigma}} - \alpha_i \right) S_{\pm}, \quad (2.96)$$

$$\pm \frac{\partial A_{\pm}}{\partial z} + \frac{1}{v_g} \frac{\partial A_{\pm}}{\partial t} = \left( \frac{\Gamma g}{1 + \epsilon S_{\Sigma}} - \alpha_i \right) A_{\pm} + \frac{1}{2v_g} \Gamma \beta_{sp} R_{sp}. \quad (2.97)$$

Svi parametri u prethodnim jednačinama su već definisani u okviru potpoglavlja 2.2.3 a vrednosti su date u Tabeli 2.3. Smatra se je ulazno/izlazna stranica RSOA u koordinati  $z = 0$  antirefleksiona, pa su granični uslovi za signal i ASE šum određeni relacijama:

$$S_+(z = 0) = S_{in}, \quad (2.98)$$

$$A_+(z = 0) = 0, \quad (2.99)$$

pri čemu  $S_{in} = \Gamma P_{in}/(\hbar\omega_0 v_g W H_w)$  označava gustinu fotona CW signala, koja je određena ulaznom optičkom snagom  $P_{in}$ . Zadnja bočna stranica ( $z = L$ ) ima konačnu reflektivnost  $R_2 = (n_{rw-1})^2/(n_{rw} + 1)^2$ , određenu indeksom prelamanja materijala jame  $n_{rw}$ , pa odgovarajući granični uslovi glase:

$$S_-(z = L) = R_2 S_+(z = L), \quad (2.100)$$

$$A_-(z = L) = R_2 A_+(z = L). \quad (2.101)$$

Dinamika nosilaca za model MQW-RSOA opisana je sistemom jednačina (2.33) - (2.34) za stanja u barijerama i jamama odvojeno, odnosno:

$$\frac{dn_b}{dt} = \eta_{inj} \frac{I(t)}{qV_b} - \frac{n_b}{\tau_b} - \frac{n_b}{\tau_{bw}} + \frac{n_w}{\tau_{wb}} \frac{V_w}{V_b}, \quad (2.102)$$

$$\frac{dn_w}{dt} = \frac{n_b}{\tau_{bw}} \frac{V_b}{V_w} - \frac{n_w}{\tau_w} - \frac{n_w}{\tau_{wb}} - \frac{v_g g S_{\Sigma}}{1 + \epsilon S_{\Sigma}}, \quad (2.103)$$

gde je  $I(t)$  strujni signal proizvoljnog oblika, a  $S_{\Sigma} = S_+ + S_- + A_+ + A_-$  ukupna gustina fotona u aktivnoj oblasti koja uračunava doprinose i signala i šuma.

Kako se za analizu velikih signala sistemi jednačina (2.96) - (2.97) i (2.102) - (2.103) ne mogu rešiti analitički, do ukupne snage izlaznog signala može se doći numeričkom implementacijom uzvodne šeme prvog reda koja se oslanja na FDM, a koja je detaljno opisana u [74].

Naime, sistem jednačina koji opisuje dinamiku nosilaca i gustine fotona rešava se na diskretizovanoj prostorno-vremenskoj mreži, sa razmakom čvorova  $\Delta z = L/(P - 1)$  duž longitudinalne ose  $P$ , i  $\Delta t \leq \Delta z/v_g$  duž vremenske ose. Metoda uzvodne šeme najpre zahteva da se jednačine koje određuju  $S_{\pm}(z, t)$ ,  $A_{\pm}(z, t)$ ,  $n_w(z, t)$  i  $n_b(z, t)$  predstave konačnim razlikama. Za bilo koju od navedenih promenljivih, izvodi po vremenu se mogu izraziti kao  $df/dt \approx (f(t_{j+1}) - f(t_j))/\Delta t$ , dok se izvodi po prostornoj koordinati za prostiranje unapred mogu izraziti kao  $df_+/dz \approx (f_+(z_i) - f_+(z_{i-1}))/\Delta z$ , odnosno za prostiranje unazad  $df_-/dz \approx (f_-(z_{i+1}) - f_-(z_i))/\Delta z$ , pri čemu  $f(z, t)$  predstavlja opšti izraz za vremenski-prostorno zavisne promenljive. Ako se izrazi za izvode zamene u (2.102) i (2.103), sistem spregnutih diferencijalnih jednačina po gustinama nosilaca u barijernim stanjima i stanjima jama

## 2.4 Dinamička analiza

postaje:

$$n_b(z_i, t_{j+1}) = n_b(z_i, t_j) + \Delta t \left[ \eta_{inj} \frac{I(t)}{qV_b} - \frac{n_b(z_i, t_j)}{\tau_b} - \frac{n_b(z_i, t_j)}{\tau_{bw}} + \frac{n_w(z_i, t_j)}{\tau_{wb}} \frac{V_w}{V_b} \right], \quad (2.104)$$

$$n_w(z_i, t_{j+1}) = n_w(z_i, t_j) + \Delta t \left[ \frac{n_b(z_i, t_j)}{\tau_{bw}} \frac{V_b}{V_w} - \frac{n_w(z_i, t_j)}{\tau_w} - \frac{n_w(z_i, t_j)}{\tau_{wb}} - \frac{v_g g S_\Sigma(z_i, t_j)}{1 + \epsilon S_\Sigma(z_i, t_j)} \right]. \quad (2.105)$$

Primenom iste procedure mogu se formulirati i sistemi jednačina za oba pravca propagacije signala, (2.106) - (2.107), odnosno šuma, (2.108) - (2.109):

$$S_+(z_i, t_{j+1}) = S_+(z_i, t_j) + \Delta t v_g \left[ \left( \frac{\Gamma g(z_i, t_j)}{1 + \epsilon S_\Sigma(z_i, t_j)} - \alpha_i(z_i, t_j) \right) S_+(z_i, t_j) - \frac{S_+(z_i, t_j) - S_+(z_{i-1}, t_j)}{\Delta z} \right], \quad (2.106)$$

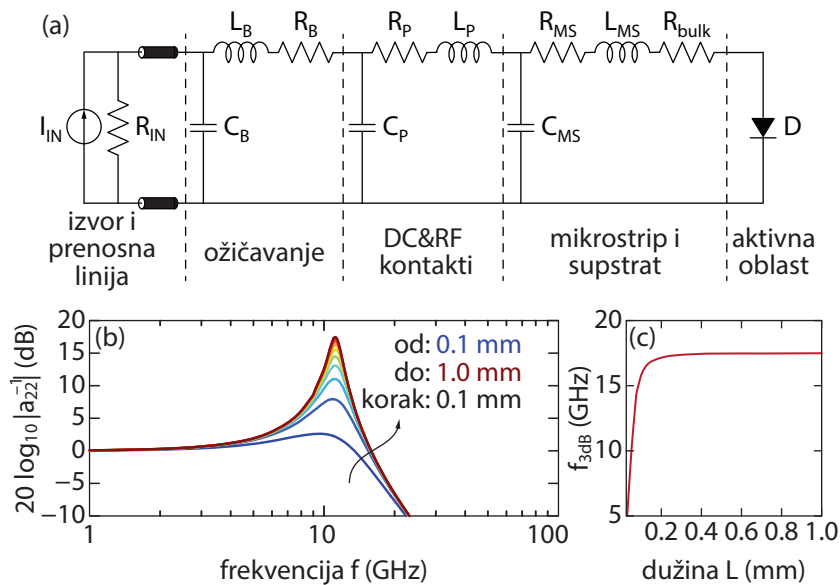
$$S_-(z_i, t_{j+1}) = S_-(z_i, t_j) + \Delta t v_g \left[ \left( \frac{\Gamma g(z_i, t_j)}{1 + \epsilon S_\Sigma(z_i, t_j)} - \alpha_i(z_i, t_j) \right) S_-(z_i, t_j) + \frac{S_-(z_{i+1}, t_j) - S_-(z_i, t_j)}{\Delta z} \right], \quad (2.107)$$

$$A_+(z_i, t_{j+1}) = A_+(z_i, t_j) + \Delta t v_g \left[ \left( \frac{\Gamma g(z_i, t_j)}{1 + \epsilon S_\Sigma(z_i, t_j)} - \alpha_i(z_i, t_j) \right) A_+(z_i, t_j) + \frac{1}{2v_g} \Gamma \beta_{sp} R_{sp}(z_i, t_j) - \frac{A_+(z_i, t_j) - A_+(z_{i-1}, t_j)}{\Delta z} \right], \quad (2.108)$$

$$A_-(z_i, t_{j+1}) = A_-(z_i, t_j) + \Delta t v_g \left[ \left( \frac{\Gamma g(z_i, t_j)}{1 + \epsilon S_\Sigma(z_i, t_j)} - \alpha_i(z_i, t_j) \right) A_-(z_i, t_j) + \frac{1}{2v_g} \Gamma \beta_{sp} R_{sp}(z_i, t_j) + \frac{A_-(z_{i+1}, t_j) - A_-(z_i, t_j)}{\Delta z} \right]. \quad (2.109)$$

Numerička rešenja za  $n_w(z, t)$ ,  $n_b(z, t)$ ,  $S_\pm(z, t)$  i  $A_\pm(z, t)$  dobijaju se iterativnim rešavanjem sistema jednačina (2.104) - (2.109) za vremensku i za prostornu evoluciju signala. Za svaku tačku  $j$  na vremenskoj osi najpre se određuje prostorna raspodela gustine nosilaca u barijerama (2.104) i jamama (2.105), za svaku tačku na prostornoj osi  $z_i$ , od  $i = 1$  do  $i = P$ . Kako vrednosti gustine nosilaca u datom trenutku  $t_{j+1}$  zavise od onih u trenutku  $t_j$  potrebno je najpre definisati početne uslove za sve veličine od interesa. Početne vrednosti raspodele gustina nosilaca u barijerama  $n_b(z, 0)$  i jamama  $n_w(z, 0)$  mogu se odrediti iz stacionarne analize postupkom opisanim u potpoglavlju (2.3.1), ako se pretpostavi da su  $S_\pm(z, 0)$  i  $A_\pm(z, 0)$  jednaki nuli, što je opravdano ukoliko ulazni signal nije postojao pre  $t = 0$ . Nakon što su određene prostorne raspodele gustina nosilaca na celom opsegu  $z$ , pristupa se

## 2.5 Eksterni modulacioni odziv RSOA



Slika 2.4: (a) Ekvivalentno parazitno kolo RSOA. (b) Modulacioni odziv parazitnog kola za različite dužine elektrode  $L$ . (c) Zavisnost  $-3\text{dB}$  propusnog opsega parazitnog kola od dužine elektrode  $L$ .

određivanju prostorne raspodele signala (2.106) i šuma (2.108) u pravcu prostiranja unapred, a zatim i unazad, rešavanjem (2.107) i (2.109). Opisani proces se ponavlja dok se ne dosegne kraj vremenske ose.

Nakon što su pronađena numerička rešenja za  $S_{\pm}(z, t)$  i  $A_{\pm}(z, t)$  ukupna izlazna snaga se može odrediti na osnovu:

$$P_{\text{out}}(z = 0, t) = \hbar\omega_0 v_g WH[S_-(0, t) + A_-(0, t)]/\Gamma \quad (2.110)$$

## 2.5 Eksterni modulacioni odziv RSOA

Eksterni modulacioni odziv RSOA koji uzima u obzir parazitne efekte samog poluprovodničkog uređaja (čipa) i njegovog pakovanja u odgovarajuće kućište može se analizirati polazeći od ekvivalentnog parazitnog kola prikazanog na sl. 2.4, koje uzima u obzir ožičavanje (eng. *bonding*) čipa, *RF* i *DC* kontakte, mikrostrip elektrodu i otpornosti supstrata. Na sl. 2.4 (a) dioda  $D$  modeluje oblast prostornog tovara, odnosno SCH oblast RSOA. Pri direktnoj polarizaciji,  $D$  se može smatrati elementom sa približno nultom otpornošću u električnom kolu. Pod pretpostavkom da je vrednost struje curenja niska, njen uticaj je uračunat kroz  $\eta_{\text{inj}}$ .

U parazitnom kolu,  $R_{\text{bulk}}$  predstavlja rednu otpornost p-InP višeslojnjog omotača i n-InP substrata. Otpornost  $R_{\text{bulk}}$  se može odrediti kao [94]:

$$R_{\text{bulk}} = H_n/(\sigma_n WL) + \sum_{i=1}^3 H_{pi}/(\sigma_{pi} WL), \quad (2.111)$$

gde  $H_n$  predstavlja debljinu n-InP ispod aktivne oblasti (vidi sl. 2.3),  $\sigma_n = qN_d\mu_n$  i  $\sigma_{pi} = qN_{ai}\mu_{pi}$  su n- i p-InP provodnosti, respektivno, sa pokretljivošću nosilaca  $\mu_n = \mu_{n0}/(1 + \sqrt{N_d/10^{17} \text{ cm}^{-3}})$  i  $\mu_{pi} = \mu_{p0}/[1 + \sqrt{N_{ai}/(2 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3})}]$ , gde  $\mu_{n0}$  and  $\mu_{p0}$  predstavljaju pokretljivosti nosilaca u nedopiranom

## 2.5 Eksterni modulacioni odziv RSOA

materijalu [95].  $C_{MS}$  označava šant kapacitivnost između p- i n- kontakata mikrostrip elektrode, i određuje se kao  $C_{MS} = C'_{MS}L$ , gde je kapacitivnost po jedinici dužine data sa [96]:

$$C'_{MS} = 26.38 \frac{1.41 + \varepsilon_r^{\text{InP}}}{\ln[5.98H_{\text{tot}}/(0.8W + t_{MS})]} \left[ \frac{\text{pF}}{\text{m}} \right]. \quad (2.112)$$

U (2.112),  $\varepsilon_r^{\text{InP}}$  je relativna dielektrična konstanta InP,  $H_{\text{tot}} = H_n + H_{\text{Fe:InP}}$  je ukupna debljina poluprovodničkog sloja između p- i n-kontakata, a  $t_{MS}$  je ukupna debljina Ti/Pt/Au metalnih multi slojeva. Uticaj MQW aktivne oblasti na šant kapacitivnost se zanemaruje, kako je  $H_b \ll H_{\text{sub}}$ . Kapacitivnost  $C_P = 6.764$  fF je šant kapacitivnost DC i RF kontakata, i može se odrediti iz (2.112) zamenom  $W$  u  $W_{\text{pad}}$ , kao i  $H_{\text{tot}}$  u  $H_{\text{tot}} + H_{\text{SiN}}$  i konačno, zamenom  $\varepsilon_r^{\text{InP}}$  sa efektivnom dielektričnom konstantom koja uzima u obzir prisustvo SiN sloja,  $\varepsilon_{r,\text{eff}} = (H_{\text{tot}} + H_{\text{SiN}})(H_{\text{tot}}/\varepsilon_r^{\text{InP}} + H_{\text{SiN}}/\varepsilon_r^{\text{SiN}})^{-1}$ .  $R_{MS} = \text{Re}(Z_{MS})$  i  $L_{MS} = \text{Im}(Z_{MS})/\omega$  označavaju efektivnu, frekvencijiski zavisnu otpornost i induktivnost mikrostrip elektrode impedanse  $Z_{MS}$ .  $Z_{MS}$  se može odrediti kao efektivna impedansa paralelne mreže tri impedanse, gde svaka opisuje jedan od metalnih slojeva  $i = \{\text{Ti}, \text{Pt}, \text{Au}\}$ :

$$Z_i = \frac{1}{k_i} \frac{L}{\sigma_i W t_i} \sqrt{1 + j \left( \frac{W t_i}{W + t_i} \right)^2 \sigma_i \mu_0 \frac{\omega}{4}}, \quad (2.113)$$

gde su  $\sigma_{\text{Ti}}$ ,  $\sigma_{\text{Pt}}$  i  $\sigma_{\text{Au}}$  provodnosti metalnih slojeva, a  $\mu_0$  je permeabilnost vakuuma. Koficijent  $k_i$  opisuje slabljenje polja koje prodire u susedne metalne slojeve [97]. Pod pretpostavkom da je maksimum polja unutar metalnog sloja (Ti) minimalne provodnosti, dolazi se do  $\{k_{\text{Ti}}; k_{\text{Pt}}; k_{\text{Au}}\} = \{1; k_{\text{Ti}} \exp(-t_{\text{Ti}}/\delta_{\text{Ti}}); k_{\text{Pt}} \exp(-t_{\text{Pt}}/\delta_{\text{Pt}})\}$ , gde je  $\delta_i = \sqrt{2/(\omega \mu_0 \sigma_i)}$  površinska debljina svakog od metalnih slojeva [99].  $R_p = \text{Re}(Z_p)$  i  $L_p = \text{Im}(Z_p)/\omega$  označavaju efektivnu, frekvencijiski zavisnu otpornost i induktivnost DC i RF kontakta impedanse  $Z_p$ .  $Z_p$  se može odrediti iz (2.113) zamenom  $W$  i  $L$  sa  $W_{\text{pad}}$  i  $L_{\text{pad}}$ . Ožičavanje unosi parazitne otpornost  $R_B = 1 \Omega$ , induktivnost  $L_B = 1.1$  nH i šant kapacitivnost sa uzemljenjem  $C_B = 0.18$  pF. Zavisnosti parametara parazitnog kola od dužine mikrostrip elektrode  $L$  i modulacione učestanosti  $f$  prikazane su na sl. 2.5.

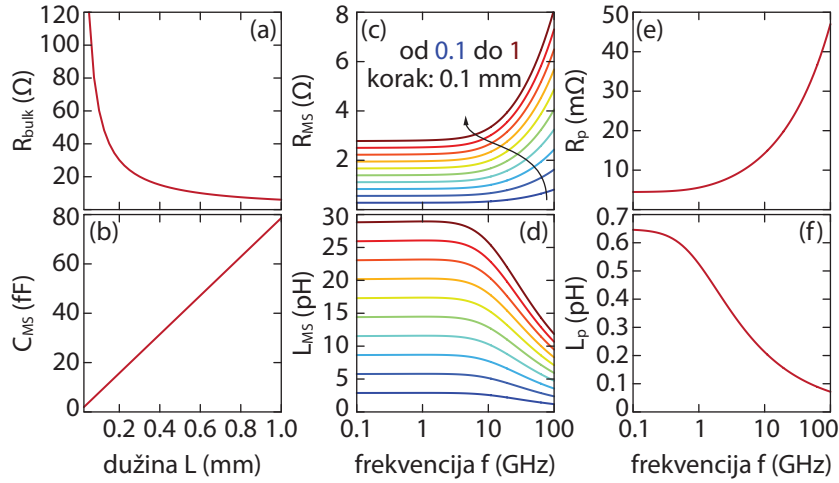
Funkcija prenosa parazitnog električnog kola  $H_p(\omega)$  koja povezuje eksterni strujni izvor,  $I_{\text{IN}}$ , kao ulaz i struju  $I$  koja je raspoređena u oblast prostornog tovara SCH regije RSOA kao izlaz, može biti izvedena iz ekvivalentnog parazitnog kola prikazanog na sl. 2.4 [94], [96], [98], [99]. Ekvivalentno parazitno kolo se može posmatrati kao dvoprístupna mreža, odnosno četvoropol sa četiri kraja koji obrazuju dva pristupa, kako je prikazano na sl. 2.6. U tom slučaju jednačine četvoropola se mogu napisati pomoću transmisionne matrice određene pogonskim -  $a$  parametrima, za koje važi:

$$\begin{bmatrix} u_1 \\ i_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} \\ a_{21} & a_{22} \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} u_2 \\ -i_2 \end{bmatrix} \quad (2.114)$$

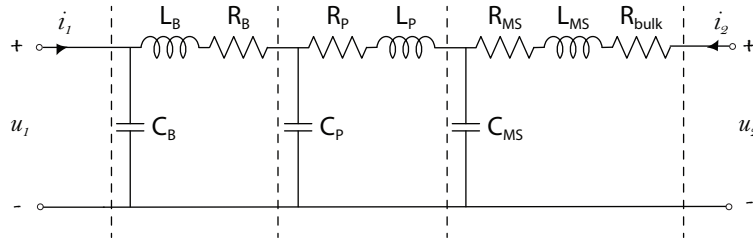
Pogonski parametri transmisionne matrice definisani su na sledeći način:

$$a_{11} = \frac{u_1}{u_2}, \text{ kada je } i_2 = 0, \quad (2.115)$$

## 2.5 Eksterni modulacioni odziv RSOA



Slika 2.5: Zavisnost (a) redne otpornosti  $p$ - i  $n$ -InP slojeva ( $R_{\text{bulk}}$ ) i (b) šant kapacitivnosti mikrostrip elektrode  $C_{\text{MS}}$  od dužine elektrode  $L$ . Zavisnost (c) otpornosti  $R_{\text{MS}}$  i (d) induktivnosti  $L_{\text{MS}}$  mikrostrip elektrode od modulacione frekvencije  $f$  za opseg dužina elektrode od 0.1 mm do 1 mm, sa korakom od 0.1 mm. Zavisnost otpornosti (e)  $R_{\text{P}}$  i (f) induktivnosti  $L_{\text{P}}$  DC&RF elektrode od modulacione frekvencije  $f$ .



Slika 2.6: Prikaz ekvivalentnog električnog parazitnog kola kao dvoprstupne mreže sa označenim strujama i naponima.

$$a_{12} = -\frac{u_1}{i_2}, \text{ kada je } u_2 = 0, \quad (2.116)$$

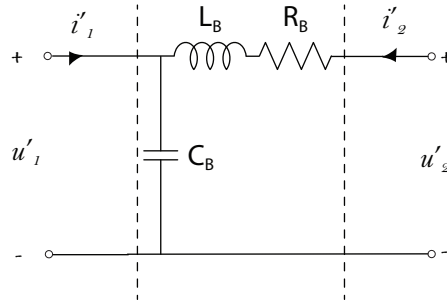
$$a_{21} = \frac{i_1}{u_2}, \text{ kada je } i_2 = 0, \quad (2.117)$$

$$a_{22} = -\frac{i_1}{i_2}, \text{ kada je } u_2 = 0. \quad (2.118)$$

Složeno električno kolo može biti predstavljeno rednom vezom jednostavnijih sistema, konkretno, rednom vezom delova kola koji predstavljaju sekciju ožičavanja, DC & RF kontakte i sekciju koja predstavlja mikrostrip elektrodu i substrat. Na ovaj način transmisiona matrica celokupnog ekvivalentnog parazitnog kola može se odrediti množenjem transmisionih matrica odvojenih sekcija. Svaka od sekcija može se smatrati četvoropolom, a primer četvoropola za sekciju ožičavanja dat je na sl. 2.7. Sistem jednačina kola prema Kirhofovom zakonu, za mrežu sekcije ožičavanja može se zapisati na sledeći način:

$$u'_1 = \frac{1}{sC_B} i'_1 + \frac{1}{sC_B} i'_2, \quad (2.119)$$

## 2.5 Eksterni modulacioni odziv RSOA



Slika 2.7: Prikaz sekcije ožičavanja kao dvoprístupne mreže sa označenim strujama i naponima.

$$u'_2 = \frac{1}{sC_B} i'_1 + (R_B + sL_B + \frac{1}{sC_B}) i'_2, \quad (2.120)$$

gde je  $s = j\omega$ , a  $R_B + sL_B$  se u nastavku može označavati sa  $Z_B$ . Iz (2.120) sledi

$$i'_1 = sC_B u'_2 - sC_B Z_B i'_2, \quad (2.121)$$

a zamenom (2.121) u (2.119) dobija se

$$u'_1 = u'_2 - (Z_B + \frac{1}{sC_B}) i'_2. \quad (2.122)$$

Na osnovu (2.114), prepoznavanjem parametara transmisionne matrice kao koeficijenata u preuređenim jednačinama (2.122) i (2.121), transmisiona matrica sekcije ožičavanja dobija sledeću formu:

$$[a'] = \begin{bmatrix} a'_{11} & a'_{12} \\ a'_{21} & a'_{22} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & Z_B \\ sC_B & 1 + sC_B Z_B \end{bmatrix}. \quad (2.123)$$

Istim postupkom mogu se odrediti i transmisionne matrice za DC & RF kontakte, kao i za sekciju koja predstavlja mikrostrip elektrodu i supstrat. Konačno, transmisiona matrica za celokupno ekvivalentno parazitno dobija se množenjem transmisionih matrica svake od sekcija, odnosno

$$[a] = \begin{bmatrix} 1 & Z_B \\ sC_B & 1 + sC_B Z_B \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} 1 & Z_P \\ sC_P & 1 + sC_P Z_P \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} 1 & Z_{MS} + R_{bulk} \\ sC_{MS} & 1 + sC_{MS}(Z_{MS} + R_{bulk}) \end{bmatrix}. \quad (2.124)$$

Na osnovu (2.124) i (2.118) prenosna funkcija parazitnog kola se može izraziti kao:

$$H_P(\omega) = 20 \log_{10} |a_{22}^{-1}|. \quad (2.125)$$

Prenosna funkcija parazitnog kola prikazana je na sl. 2.4 (b), zajedno sa  $-3$  dB propusnim opsegom, sl. 2.4 (c), za različite dužine  $L$  mikrostrip elektrode. Sl. 2.4 (b) pokazuje da modulacioni odziv parazitnog kola odgovara niskopropusnom sistemu drugog reda, sa visokim  $Q$ -faktorom.

Množenje  $H_P(\omega)$  sa sopstvenim modulacionim odzivom, za koji je ulaz struja kroz oblast prostor-

## 2.5 Eksterni modulacioni odziv RSOA

Tabela 2.5: Vrednosti elemenata ekvivalentnog parazitnog električnog kola RSOA, dužine aktivne oblasti  $L = 650 \mu\text{m}$ .

simbol	veličina	1 Gb/s	5 Gb/s	10 Gb/s
$R_p$ [m $\Omega$ ]	otpornost DC&RF kontakta	5.57	10.26	14.26
$L_p$ [pH]	induktivnost DC&RF kontakta	0.52	0.29	0.21
$R_{MS}$ [ $\Omega$ ]	otpornost mikrostrip elektrode	1.82	1.93	2.14
$L_{MS}$ [pH]	induktivnost mikrostrip elektrode	18.82	18.22	16.74

nog tovara RSOA,  $I$ , a izlaz optički signal koji napušta RSOA,  $S_-(z = 0)$ , kao rezultat daje eksterni modulacioni odziv.

U okviru aproksimacije malih signala moguće je koristiti princip linearnosti pri određivanju eksternog modulacionog odziva MQW RSOA, što dovodi do sledećeg izraza:

$$H_e(\omega) = 20 \log_{10} |a_{22}^{-1} \Delta S_-(\omega, z = 0) / \Delta I|. \quad (2.126)$$

Za uzimanje u obzir uticaja parazitnih efekata pri analizi velikih signala, dinamički model kola prikazanog na sl. 2.4 formiran je u LTspice okruženju, koristeći ugrađene modele otpornika, kondenzatora i kalema. Analiza je izvršena u prelaznom režimu. Struja na ulazu u kolo,  $I_{IN}$ , data je u obliku sinusoidalnog signala sa povratkom na nulu (eng. *Return To Zero*, RZ) sa zadatim nivoima bitova koji odgovaraju logičkoj 0 i 1. Ovako zadati strujni signal prosleđen je na ulaz parazitnog električnog kola. Izlazna struja ovog električnog kola, koja se posmatra kao struja koja dopire do SCH regiona RSOA,  $I$ , merena je na diodi koja služi kao zamena za RSOA sa uračunatim padom napona od 1.2 V.

Modulacione performanse RSOA u modelu koji uzima u obzir parazitne uticaje mogu se optimizovati kroz brojne parametre, kako onih vezanih za sam poluprovodnički element - RSOA, poput dužine aktivne oblasti ili radnih uslova definisanih modulacionom strujom i ulaznom optičkom snagom, tako i onih vezanih za parazitno kolo, npr. kroz induktivnost žice za povezivanje. Međutim, optimizacija parametara nije jednoznačna i zavisi od režima rada. U analizi RSOA pri modulaciji velikim signalima, vrednosti parametara parazitnog električnog kola koje ne zavise od bitske brzine, odnosno  $R_B$ ,  $L_B$ ,  $C_B$ ,  $C_P$ ,  $C_{MS}$  i  $R_{bulk}$  smatraju se istim kao vrednosti korišćene pri analizi malih signala. Vrednosti preostalih parametara za različite bitske brzine date su u Tabeli 2.5.

## Glava 3

# Rezultati i diskusija

U poglavlju koje sledi biće prikazani rezultati numeričkih simulacija modulacionih performansi refleksionog optičkog pojačavača kao samostalne naprave i u sklopu RSOA-FCL laserskog sistema. Simulaciona analiza je zasnovana na matematičko-fizičkom modelu formulisanom u Poglavlju 2, za RSOA sa aktivnom oblasti koju čini masivni poluprovodnik ili višestruke kvantne jame (MQW). Analizom će biti obuhvaćeni modeli različite složenosti. Model koji uračunava interakciju fotona i nosilaca naelektrisanja isključivo u aktivnoj oblasti omogućava određivanje tzv. sopstvenog modulacionog odziva i propusnog opsega. Uračunavanje transportnih efekata, kao što su difuzija i zarobljavanje/otpuštanje nosilaca naelektrisanja vodi ka složenijem modelu i internom modulacionom odzivu. Konačno, ako se u obzir uzme i uticaj parazitike poluprovodničkog čipa, kroz formulisanje ekvivalentnog parazitnog električnog kola opisanog u sekciji 2.5, modulacioni odziv se označava kao eksterni.

Poglavljje je organizovano kroz četiri sekcije. U sekciji 3.1 izložena je analiza sopstvenog modulacionog odziva za male signale i odgovarajućeg propusnog opsega za direktno modulisani RSOA-FCL, koji koristi masivni poluprovodnik kao aktivnu oblast RSOA, primenom modela formulisanog u 2.4.1, bez razmatranja uticaja parazitnih efekata. Analiziran je uticaj različitih parametara RSOA i optičkog vlakna, u cilju pronalaženja optimalnih radnih uslova kako bi se postigao maksimalan propusni opseg [100]. U sekciji 3.2 fokus je stavljen na samostalni režim rada RSOA. Izložena je analiza sopstvenog i internog modulacionog odziva i  $-3$  dB propusnog opsega u aproksimaciji malih signala za optimizovanu strukturu RSOA sa aktivnom oblasti koju čine višestruke kvantne jame, opisanu u sekciji 2.2.2. Takođe, data je analiza eksternog propusnog opsega, uzimajući u obzir uticaj parazitnih efekata [101]. Sekcija 3.3 daje uvid u uticaj parazitnih efekata na modulacione karakteristike samostalnog RSOA sa aktivnom oblašću od višestrukih kvantnih jama modulisanog velikim signalima. Analizom histograma semplovanog signala na izlazu iz RSOA ispitivana je promena  $Q$ -faktora za različite radne uslove, sa i bez uticaja parazitnih efekata [102], [103]. Konačno, u sekciji 3.4 ispitan je uticaj parazitnog kola opisanog u 2.5, na celokupan RSOA-FCL sistem. Uticaj parazitike razmatran je kroz poređenje internog i eksternog modulacionog odziva malih signala RSOA-FCL, sa aktivnom oblašću RSOA od višestrukih kvantnih jama, za različite parametre RSOA i optičkog vlakna.



### 3.1 Sopstveni modulacioni odziv RSOA-FCL

U nastavku je izložena analiza sopstvenog modulacionog odziva u režimu malih signala i odgovarajućeg  $-3$  dB propusnog opsega RSOA-FCL sistema kod kog aktivnu oblast RSOA čini masivni poluprovodnik. Model je formulisan kao konturni problem (2.66), koji funkciju prenosa optičkog vlakna uzima u obzir preko graničnih uslova (2.90)-(2.91). Modulacioni odziv određen je izrazom (2.92), na antirefleksionom kraju RSOA ( $z = 0$ ), odnosno izrazom (2.95), na RN kraju vlakna ( $z = -L_f$ ). Analiza je sprovedena za različite gustine struje polarizacije, dužine aktivne oblasti RSOA, dužine optičkog vlakna i spektralne širine optičkog filtra propusnika opsega, na oba kraja vlakna. Na osnovu poređenja modulacionog odziva sa standardnim poluprovodničkim laserima razmotrene su metode koje mogu dovesti do poboljšanja propusnog opsega.

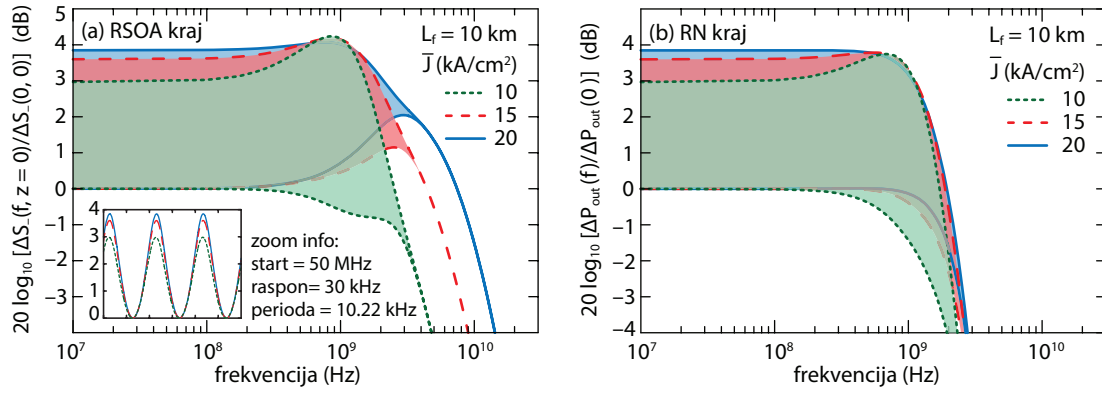
Za razliku od standardnih poluprovodničkih lasera ili lasera sa eksternim rezonatorom, funkcija modulacionog odziva RSOA-FCL ispoljava oscilatorni karakter u odnosu na frekvenciju modulacije  $f$  sa anvelopom čija forma odgovara standardnoj modulacionoj karakteristici laserskog izvora za male signale. Rezonantni i antirezonantni pikovi u modulacionom odzivu javljaju se na frekvencijama koje odgovaraju akumulaciji faze na povratnom putu od  $2k\pi$  i  $2(k+1)\pi$ , respektivno, gde  $k \in \mathbb{Z}$ . Osnovna frekvencija  $\Delta f$ , koja je jednaka razlici frekvencija između dva susedna rezonantna ili antirezonantna pika, može se odrediti izjednačavanjem ukupne fazne akumulacije sa  $2\pi$ . Disproporcija između dužina RSOA i vlakna implicira da će frekvencija  $\Delta f$  biti dominantno određena faznom akumulacijom u vlaknu, koja je data sa (2.17), a koja figurise u  $\Delta S_-(z, \omega)$  kroz granični uslov (2.90). U poređenju sa grupnim kašnjenjem  $\tau_{g0}(\lambda)$ , koeficijent gradijenta disperzije  $S_D$  ima zanemarljiv doprinos  $\Psi$  (2.17), što dovodi do toga da je  $\Delta f \approx \tau_{g0}^{-1}$ . Povećanje dužine vlakna  $L_f$  dovodi do linearnog rasta  $\tau_{g0}(\lambda)$ , a samim tim i smanjenja  $\Delta f$ , koje je reda veličine od nekoliko kHz do nekoliko desetina kHz za uobičajene dužine vlakna u WDM-PON mrežama (između 1 i 40 km). Ovako male vrednosti za  $\Delta f$  dovode do fluktuacija u modulacionom odzivu koje se ne mogu jasno razlikovati. Stoga, umesto brzo promenljive modulacione karakteristike, u nastavku analize posmatraće se anvelope funkcije modulacionog odziva [100].

#### 3.1.1 Uticaj gustine struje polarizacije

Na sl. 3.1 prikazana je modulaciona karakteristika za vlakno dužine 10 km i tri vrednosti gustine struje polarizacije RSOA, sa OBPF centriranim na  $\lambda_0 = 1550$  nm i FWHM od 1 nm. Dodatak na sl. 3.1 (a) je uvećani prikaz jednog segmenta modulacionog odziva sa vidljivim brzim fluktuacijama. Povećanje gustine struje polarizacije dovodi do povećanja amplitude fluktuacija modulacionog odziva na oba kraja vlakna. Početna tačka donje anvelope je na 0 dB. Budući da donja anvelopa prva dostiže  $-3$  dB, za određivanje propusnog opsega RSOA-FCL koristi se samo zavisnost donje anvelope od frekvencije.

Optička snaga generisana u RSOA je u osnovi proporcionalna razlici između gustine struje polarizacije RSOA  $\bar{J}$  i odgovarajućeg praga gustine struje FCL-a  $J_{th}$ , koji zavisi od praga pojačanja RSOA [33]. Stoga, modulacioni odziv u odnosu na gustinu struje odgovara zavisnosti modulacionog odziva od stacionarne optičke snage, koja je proporcionalna  $\bar{S}_{\pm}$ . Kao i kod standardnih poluprovodničkih

### 3.1 Sopstveni modulacioni odziv RSOA-FCL



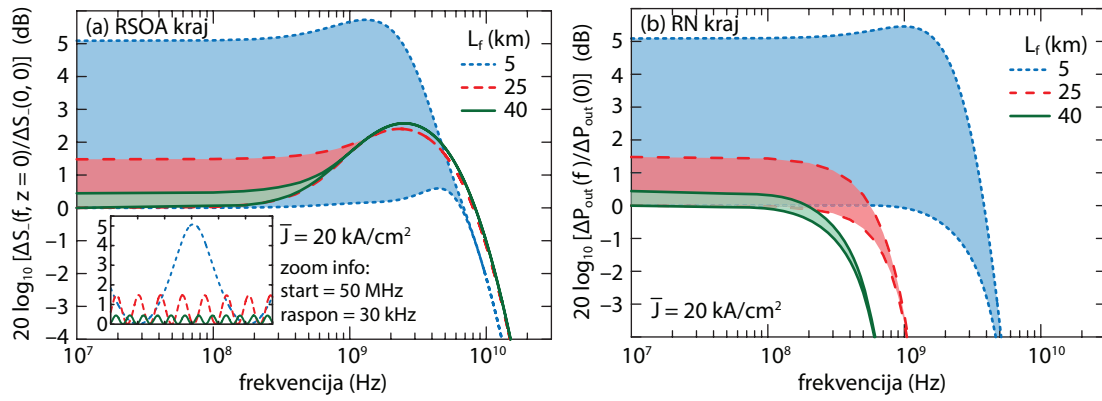
Slika 3.1: Modulacioni odziv RSOA-FCL na  $\lambda_0 = 1550 \text{ nm}$  za dužinu vlakna  $L_f = 10 \text{ km}$  i tri vrednosti gustine struje polarizacije ROSA  $\bar{J}$  (a) na RSOA ulaz/izlaz stranici ( $z = 0$ ) i (b) RN kraju vlakna sa ogledalom ( $z = -L_f$ ) [100].

lasera, povećanje gustine struje polarizacije  $\bar{J}$  poboljšava modulacionu karakteristiku na RSOA kraju vlakna [videti sl. 3.1(a)]. Međutim, poboljšanje uzrokovano povećanjem gustine struje polarizacije nije značajno na RN kraju vlakna [videti sl. 3.1(b)]. Može se primetiti da modulacioni odziv na RN kraju vlakna ( $z = -L_f$ ) brže opada sa porastom frekvencije nego na RSOA kraju ( $z = 0$ ), što dovodi do manjeg propusnog opsega na RN kraju nego na RSOA kraju vlakna. Ova degradacija propusnog opsega RSOA-FCL u  $z = -L_f$  može se pripisati limitaciji propusnog opsega koju uslovljava funkcija prenosa vlakna, kako tokom jednog prolaza (2.16), tako i na povratnom putu (2.18), usled značajne disperzije na  $\lambda_0 = 1550 \text{ nm}$ , što potvrđuju vrednosti u Tabeli 2.1. Prema (2.18), ako se frekvencija poveća iznad propusnog opsega vlakna, funkcija prenosa vlakna brzo opada i približava se nuli, što dovodi do toga da granični uslov na izlaznoj strani RSOA (2.90) teži nuli. U tom slučaju, povratna sprega vlakna za male signale nestaje, kao i modulacioni odziv. Detaljnije razmatranje (2.18) potvrđuje dobro poznatu činjenicu da propusni opseg vlakna dominantno zavisi od proizvoda disperzije vlakna ( $D$ ), dužine vlakna ( $L_f$ ) i spektralne širine linije filtra i spektra RSOA ( $\sigma_s$ ). Stoga, povećanje bilo kojeg od navedenih parametara, koji određuju propusni opseg vlakna, može postati ograničavajući faktor za propusni opseg RSOA-FCL na RN kraju vlakna. Pored toga, propusni opseg vlakna odgovara frekvenciji iznad koje su oscilacije modulacione karakteristike oslabljene, što dovodi do toga da se gornja i donja anvelopa spajaju u jednu liniju. Može se videti na sl. 3.1(a) i (b) da je frekvencija na kojoj se sve gornje i donje anvelope spajaju u jednu liniju ista za oba kraja vlakana i za sve gustine struje polarizacije. Ovakav rezultat je očekivan imajući u vidu da propusni opseg vlakna zavisi od dužine i disperzije vlakna, kao i spektralne širine signala, što su parametri koji se smatraju konstantnim za sve modulacione odzive prikazane na sl. 3.1 [100].

#### 3.1.2 Uticaj dužine vlakna

Na osnovu modulacionog odziva određenog za različite dužine vlakna prikazanog na sl. 3.2, može se primetiti da dužina vlakna značajno utiče na amplitudu oscilacija modulacionog odziva, koja opada sa povećanjem dužine vlakna. Osnovni razlog leži u kombinovanom uticaju slabljenja i disperzije vlakna koji, prema (2.18), dovodi do eksponencijalnog opadanja funkcije prenosa vlakna i povrat-

### 3.1 Sopstveni modulacioni odziv RSOA-FCL



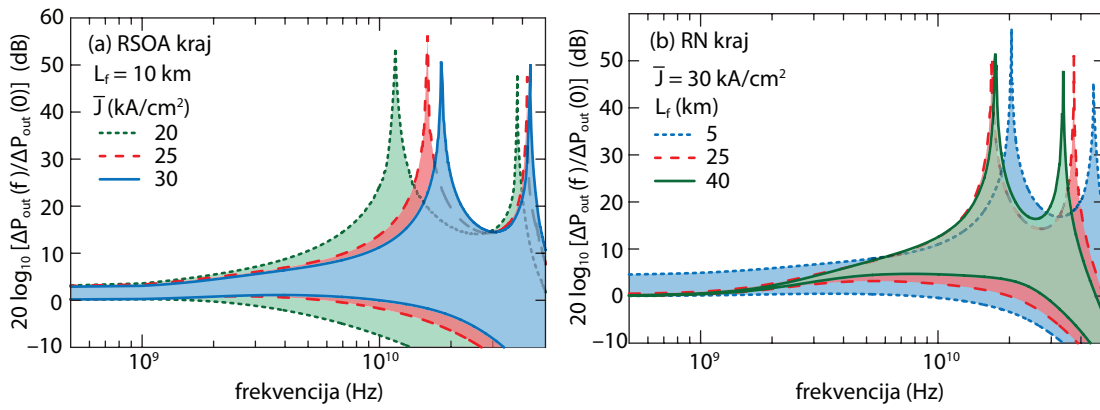
Slika 3.2: Modulacioni odziv RSOA-FCL na  $\lambda_0 = 1550 \text{ nm}$  za gustinu struje polarizacije ROSA  $\bar{J} = 20 \text{ kA/cm}^2$  i za tri vrednosti dužine vlakna  $L_f$  (a) na RSOA ulaz/izlaz stranici ( $z = 0$ ) i (b) RN kraju vlakna sa ogledalom ( $z = -L_f$ ) [100].

ne sprege lasera sa porastom  $L_f$ . Usled smanjenja propusnog opsega vlakna sa povećanjem dužine vlakna, frekvencija pri kojoj se gornja i donja anvelopa spajaju u jednu liniju je niža za veće dužine vlakna. Interesantno je da propusni opseg na  $z = 0$  slabo zavisi od dužine vlakna, čak može doći i do malog porasta njegove vrednosti sa povećanjem dužine vlakna [videti sl. 3.2(a)]. Sa druge strane, propusni opseg RSOA-FCL ostaje ograničen propusnim opsegom vlakna na RN kraju [videt sl. 3.2(b)]. Porast propusnog opsega sa povećanjem dužine vlakna na  $z = 0$  usko je povezan sa činjenicom da oscilacije modulacionog odziva zavise od članova  $|\exp(i\omega\tau_{g0}) - |H_{rt}(\omega)||$  i  $|\exp(i\omega\tau_{g0}) - R|H_{rt}(\omega)||$ , koji se pojavljuju u imeniocu aproksimativnog analitičkog rešenja (2.66), zasnovanog na pretpostavci da je  $\gamma_+ = \gamma_-$ . Usled slabljenja u vlaknu, pri dovoljno velikim dužinama vlakna važi  $|H_{rt}| \ll 1$ , što implicira da su oscilacije navedenih članova potisnute, što dovodi do potiskivanja amplitude oscilacija koje se vidi na sl. 3.2(a). Dodatno, faktor prigušenja modulacionog odziva takođe je potisnut, što omogućava veći propusni opseg [100].

#### 3.1.3 Uticaj radne talasne dužine

Do sada je analiza bila usredsređena na RSOA-FCL sa radnom talasnom dužinom  $\lambda_0 = 1550 \text{ nm}$ , na kojoj disperzija značajno utiče na modulacioni odziv i propusni opseg. U slučaju kada RSOA-FCL radi na talasnim dužinama za koje je disperzija vlakna bliska nuli, što je slučaj sa  $\lambda_0 = 1313 \text{ nm}$  za standardno monomodno optičko vlakno (Tabela 2.1), propusni opseg vlakna prestaje da bude ograničavajući faktor. U ovom slučaju, funkciju prenosa vlakna dominantno određuje slabljenje u vlaknu. Na sl. 3.3 prikazan je modulacioni odziv na  $z = -L_f$  za tri vrednosti gustine struje polarizacije i fiksnu dužinu vlakna [videti sl. 3.3(a)], kao i za tri dužine vlakna i fiksnu gustinu struje [videti sl. 3.3(b)]. Izraženo svojstvo gornje anvelope modulacionog odziva su neuobičajeno visoki rezonantni pikovi. Aproksimativno analitičko rešenje (2.66), koje se zasniva na pretpostavci da je  $\gamma_+ = \gamma_-$ , navodi na to da su rezonantni pikovi posledica nula transcendentne funkcije u imeniocu funkcije modulacionog odziva, čije se fizičko poreklo ne može jasno identifikovati iz same funkcije. Može se primetiti pomeraj pikova ka višim frekvencijama sa povećanjem gustine struje polarizacije [videti sl. 3.3(a)], što podseća na ponašanje tipičnih poluprovodničkih lasera. Još važnije je da donja anvelopa,

### 3.1 Sopstveni modulacioni odziv RSOA-FCL

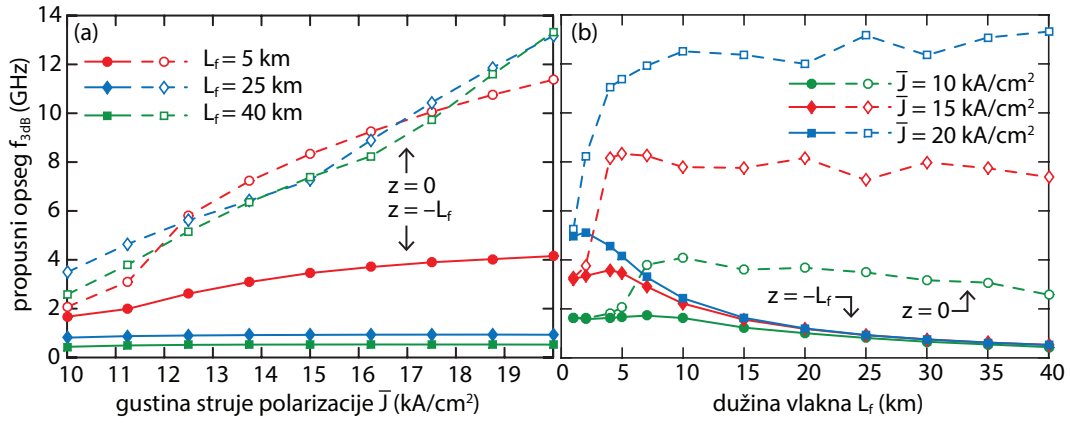


Slika 3.3: Modulacioni odziv RSOA-FCL na  $\lambda_0 = 1313$  nm na RN kraju vlakna sa ogledalom ( $z = -L_f$ ) za (a) dužinu vlakna  $L_f = 10$  km i tri vrednosti gustine struje polarizacije ROSA  $\bar{J}$  i (b) gustinu struje polarizacije  $\bar{J} = 30$  kA/cm<sup>2</sup> tri vrednosti dužine vlakna  $L_f$  [100].

koja zapravo određuje propusni opseg RSOA-FCL, ispoljava slično ponašanje i pomera se ka višim frekvencijama sa povećanjem gustine struje [videti sl. 3.3(a)], ali bez postojanja rezonantnog pika. Kao što je prikazano na sl.3.2, a potvrđeno na sl. 3.3(b), povećanje dužine vlakna dovodi do povećanja slabljenja u vlaknu, a posledično i do smanjenja modula funkcije prenosa vlakna u (2.90), što konačno dovodi do prigušenja amplitude oscilacija modulacionog odziva FCL. Usled potiskivanja oscilacija modulacionog odziva, donja anvelopa modulacionog odziva opada prema  $-3$  dB za više frekvencije u poređenju sa slučajem kada je prisutna značajna disperzija, omogućavajući na taj način veći propusni opseg za vlakna veće dužine [videti sl. 3.3(b)]. Međutim, ovaj efekat postaje izražen samo za visoke gustine struje polarizacije ( $\bar{J} > 20$  kA/cm<sup>2</sup>) [100].

Slika 3.4(a) prikazuje propusni opseg RSOA-FCL-a na  $\lambda_0 = 1550$  nm u zavisnosti od gustine struje polarizacije za tri vrednosti dužine vlakna, na oba kraja vlakna, tj.  $z = 0$  (isprekidana linija) i  $z = -L_f$  (puna linija). Propusni opseg na  $z = 0$  ispoljava približno linearnu zavisnost od gustine struje polarizacije za relativno širok opseg dužina vlakna. Na RN kraju vlakna, propusni opseg je skoro nezavisan od gustine struje polarizacije za dovoljno velike dužine vlakna ( $L_f > 20$  km). U slučaju relativno kratkih vlakana ( $L_f \leq 5$  km), propusni opseg raste sa povećanjem gustine struje do postizanja zasićenja. U skladu sa prethodno sprovedenom analizom, usko grlo propusnog opsega RSOA-FCL-a nastaje zbog ograničenog propusnog opsega vlakna i značajne disperzije na ovoj talasnoj dužini. Za kraća vlakna, propusni opseg vlakna ima dovoljno veliku vrednost da ograničavajući uticaj preuzima propusni opseg RSOA. Drugim rečima, ograničenje propusnog opsega RSOA-FCL-a uslovljeno je onim elementom sistema (RSOA ili vlakno) koji ima slabije performanse. Naravno, tehnike kompenzacije disperzije mogu pomoći u otklanjanju ograničenja propusnog opsega vlakna za RSOA-FCL. Kompenzacija disperzije može se postići na razne načine, uključujući zamenu RN ogledala sa Bragovom rešetkom, ili umetanjem vlakana za kompenzaciju disperzije. Nedostatak koji prati vlakno za kompenzaciju disperzije je povećanje ukupne dužine vlakna i, posledično, kumulativno slabljenje, što zahteva povećanje praga pojačanja lasera, možda i do vrednosti iznad maksimalne koju može obezbediti RSOA. Međutim, bez obzira na primenjenu tehniku kompenzacije disperzije, propusni opseg RSOA-FCL-a u tom slučaju postaje ograničen propusnim opsegom RSOA.

### 3.1 Sopstveni modulacioni odziv RSOA-FCL

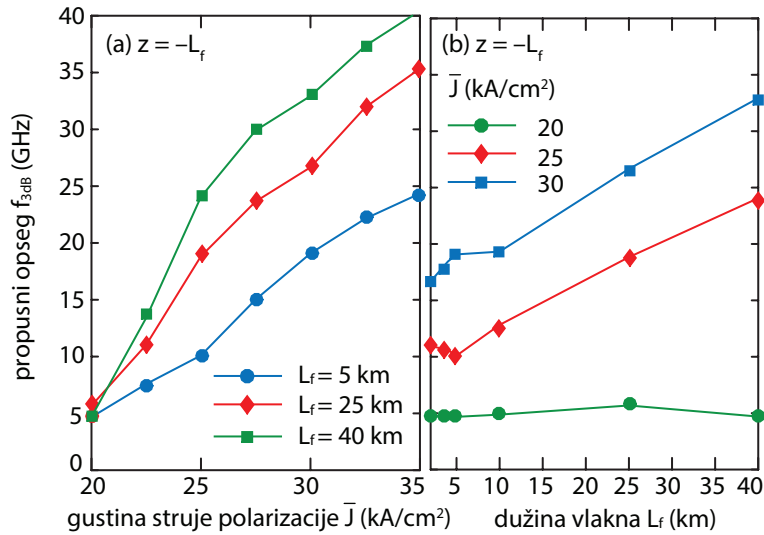


Slika 3.4: Propusni opseg RSOA-FCL  $f_{3dB}$  u zavisnosti od (a) gustine struje polarizacije RSOA  $\bar{J}$  za tri vrednosti dužine vlakna  $L_f$  i (b) dužine vlakna  $L_f$  za tri vrednosti gustine struje polarizacije  $\bar{J}$ , na  $\lambda_0 = 1550$  nm na ulaznoj/izlaznoj stranici RSOA ( $z = 0$ ) (isprekidana linija) i na RN kraju vlakna sa ogledalom ( $z = -L_f$ ) (puna linija) [100].

Bolji uvid u uticaj dužine vlakna na propusni opseg RSOA-FCL-a može se dobiti na osnovu sl. 3.4(b). Na  $z = 0$  (isprekidane linije) propusni opseg brzo raste sa porastom  $L_f$  za širok opseg vrednosti gustine struje polarizacije RSOA. Objašnjenje za ovaj efekat isto je kao i u slučaju prikazanom na sl. 3.2(a). Povećanje dužine vlakna smanjuje amplitudu oscilacija funkcije prenosa modulacije i istovremeno smanjuje njen faktor prigušenja, čime se povećava propusni opseg. Međutim, za  $L_f > 10$  km, propusni opseg blago opada za umerene ili niske gustine struje polarizacije  $\bar{J} \leq 15$  kA/cm<sup>2</sup> ili ulazi u zasićenje za veće vrednosti gustine struje  $\bar{J} = 20$  kA/cm<sup>2</sup>. Na RN kraju vlakna (puna linija), propusni opseg RSOA-FCL-a raste sa dužinom vlakna sve dok disperzija ne postane ograničavajući faktor, do  $L_f \approx 5$  km, u zavisnosti od gustine struje i samim tim od ulazne optičke snage koja se uvodi u vlakno. Ovaj porast granične frekvencije za male dužine vlakna praćen je opadanjem granične frekvencije sa povećanjem  $L_f$  za širok opseg vrednosti gustine struje polarizacije za  $L_f > 10$  km. Opadanje propusnog opsega RSOA-FCL-a sa porastom  $L_f$  je rezultat uskog grla propusnog opsega vlakna, kao što je ranije objašnjeno. Za veće dužine vlakna, propusni opseg je skoro nezavisan od gustine struje polarizacije. Za kratka vlakna,  $L_f < 10$  km, gustina struje polarizacije igra važnu ulogu u određivanju propusnog opsega (sl. 3.4(a) (pune linije)) [100].

Za centralnu talasnu dužinu OBPF-a podešenu na  $\lambda_0 = 1313$  nm, propusni opseg RSOA-FCL-a na  $z = -L_f$  neznatno je niži od onog na  $z = 0$ . Razlog je što usled niske disperzije propusni opseg vlakna nije ograničavajući faktor. Kao rezultat, propusni opseg se povećava sa gustinom struje polarizacije na oba kraja vlakna i dovoljno je analizirati samo  $f_{-3dB}$  na  $z = -L_f$ . Isti efekat povećanja propusnog opsega sa porastom dužine vlakna koji se vidi na sl. 3.3(b), može se još jasnije videti na sl. 3.5. Slika 3.5(a) pokazuje da se propusni opseg za veće dužine linka povećava u odnosu na kraće, u širokom opsegu vrednosti gustine struje polarizacije. Sličan zaključak se može izvesti iz sl. 3.5(b), koja pokazuje da se propusni opseg skoro linearno povećava za veće vrednosti gustine struje polarizacije  $\bar{J} \geq 25$  kA/cm<sup>2</sup>. Za niže gustine struje ( $\bar{J} = 20$  kA/cm<sup>2</sup>), propusni opseg neznatno opada sa povećanjem dužine vlakna [100].

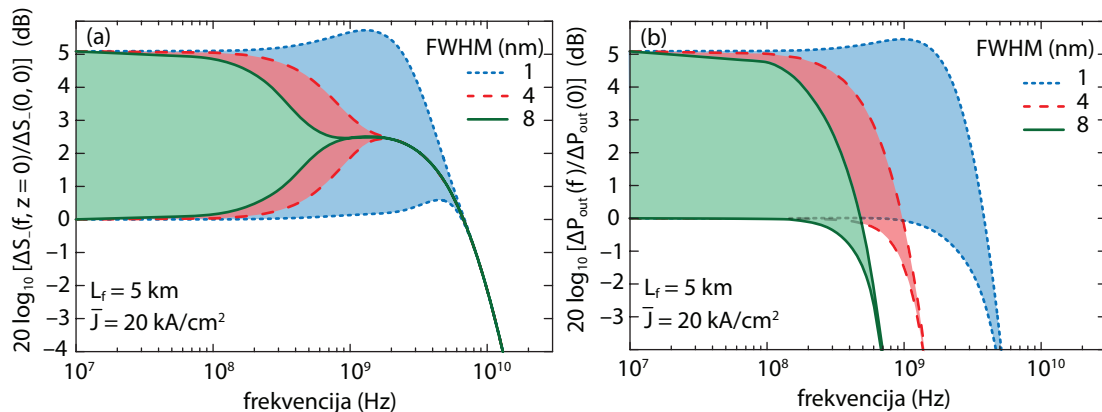
### 3.1 Sopstveni modulacioni odziv RSOA-FCL



Slika 3.5: Propusni opseg RSOA-FCL  $f_{3dB}$  na  $\lambda_0 = 1313$  nm na RN kraju vlakna ( $z = -L_f$ ) u zavisnosti od (a) gustine struje polarizacije  $\bar{J}$  i (b) dužine vlakna  $L_f$  [100].

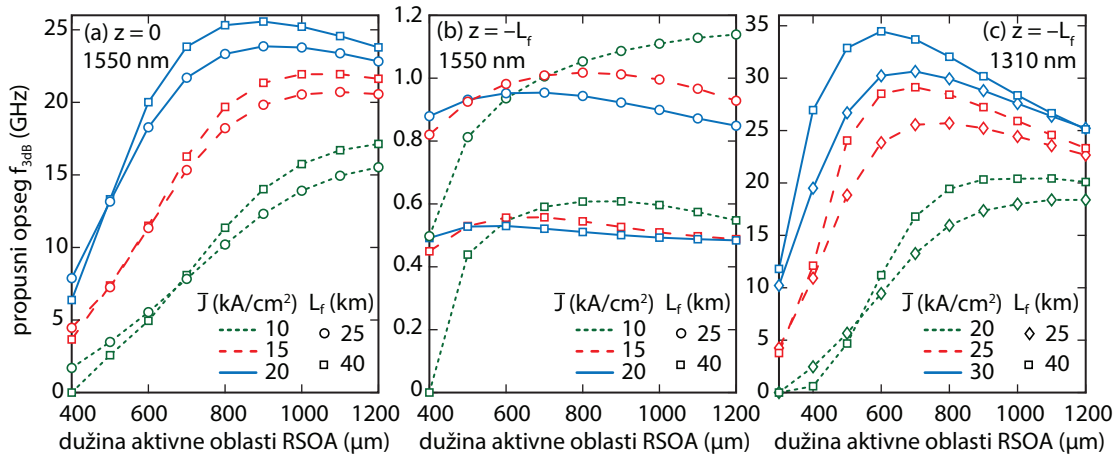
#### 3.1.4 Uticaj spektralne širine filtera

Uz gustinu struje polarizacije RSOA  $\bar{J}$  i dužinu vlakna  $L_f$ , spektralna širina  $\sigma_s$  na izlazu OBPF-a je još jedan parametar koji značajno može uticati na modulacioni odziv. Slika 3.6 prikazuje modulacioni odziv za tri vrednosti  $\sigma_{FWHM}$  i fiksne vrednosti gustine struje polarizacije i dužine vlakna. Povećanje spektralne širine pomera frekvenciju konvergencije gornje i donje anvelope ka nižim vrednostima, slično kao u slučaju povećanja dužine vlakna. Propusni opseg na  $z = 0$  [videti sl. 3.6(a)] ostaje nepromenjen za date vrednosti spektralne širine. Ipak, propusni opseg na  $z = -L_f$  [videti sl. 3.6(b)] značajno se smanjuje i opada sa porastom spektralne širine. Slično kao i ranije, glavni razlog je ograničenje propusnog opsega vlakna koje, na osnovu (2.18) u slučaju značajne disperzije postaje sve izraženije sa porastom spektralne širine [100].



Slika 3.6: Modulacioni odziv RSOA-FCL na  $\lambda_0 = 1550$  nm za gustinu struje polarizacije  $\bar{J} = 20$  kA/cm<sup>2</sup>, dužinu vlakna  $L_f = 5$  km i tri vrednosti FWHM spektralne širine  $\sigma_{FWHM}$  na (a) ulaz/izlaz stranici RSOA ( $z = 0$ ) i (b) RN kraju vlakna ( $z = -L_f$ ) [100].

### 3.1 Sopstveni modulacioni odziv RSOA-FCL



Slika 3.7: Zavisnost propusnog opsega RSOA-FCL  $f_{3dB}$  od dužine aktivne oblasti  $L$ , za (a), (b)  $\lambda_0 = 1550 \text{ nm}$  i (c)  $\lambda_0 = 1310 \text{ nm}$ . Funkcije su prikazane za različite vrednosti gustine struje polarizacije i dve dužine distribucionog vlakna  $L_f = 25 \text{ km}$  i  $L_f = 40 \text{ km}$  na RSOA kraju ( $z = 0$ ) (a) i na RN kraju vlakna (b), (c) [100].

#### 3.1.5 Uticaj dužine aktivne oblasti RSOA

Konačno, ispitan je uticaj dužine aktivne oblasti RSOA,  $L$ , na modulacioni odziv i odgovarajući 3 dB propusni opseg, kako na  $\lambda_0 = 1550 \text{ nm}$ , tako i na  $\lambda_0 = 1313 \text{ nm}$  [videti sl. 3.7]. Za centralnu talasnu dužinu OBPF-a na  $\lambda_0 = 1550 \text{ nm}$  i gustinu struje polarizacije od 10 do 20  $\text{kA/cm}^2$ , 3 dB propusni opseg na  $z = 0$  (sl. 3.7(a)) povećava se skoro linearno sa povećanjem dužine aktivne oblasti  $L$ , dostiže maksimum i zatim neznatno opada za veće vrednosti dužine aktivne oblasti. Sa povećanjem gustine struje polarizacije, maksimum se pomera ka manjim dužinama aktivne oblasti, dok veća gustina struje obezbeđuje veći propusni opseg, kao u slučaju standardnih poluprovodničkih lasera. Na RN kraju ( $z = -L_f$ ), sl. 3.7(b) pokazuje da je 3dB propusni opseg ograničen i opada sa dužinom vlakna, dok je zavisnost od gustine struje polarizacije manje izražena. Za  $L_f = 40 \text{ km}$  propusni opseg je skoro dva puta manji nego za  $L_f = 25 \text{ km}$ . Za veće vrednosti gustine struje polarizacije, propusni opseg se ne menja značajno sa dužinom aktivne oblasti RSOA. Međutim, kao i u slučaju  $z = 0$ , ispoljava maksimum koji se pomera ka manjim dužinama RSOA u slučaju većih gustina struje. Izraženija zavisnost 3 dB propusnog opsega od dužine aktivne oblasti RSOA na  $z = -L_f$  može se primetiti u slučaju manjih vrednosti gustina struje polarizacije ( $\bar{J} = 10 \text{ kA/cm}^2$ ). U ovom slučaju, povećanje propusnog opsega sa  $L$  je najveće za manje dužine aktivne oblasti RSOA [100].

Za centralnu talasnu dužinu od  $\lambda_0 = 1313 \text{ nm}$  3 dB propusni opseg prikazan na sl. 3.7(c) je neznatno veći na RSOA ( $z = 0$ ) nego na RN kraju  $z = -L_f$ , zadržavajući istu kvalitativnu zavisnost od dužine aktivne oblasti RSOA, što ukazuje da je na  $\lambda_0 = 1313 \text{ nm}$  propusni opseg RSOA-FCL ograničen dinamikom RSOA-a, a ne propusnim opsegom vlakna. Zaključci u vezi sa zavisnošću propusnog opsega od  $L$  na oba kraja sistema, za  $\lambda_0 = 1313 \text{ nm}$ , su suštinski isti kao i u slučaju  $\lambda_0 = 1550 \text{ nm}$  na  $z = 0$ . Kao što se može videti na sl. 3.7(c), zavisnost propusnog opsega od  $L$  ispoljava maksimum koji se pomera prema manjim dužinama aktivne oblasti sa povećanjem gustine struje polarizacije. Takođe, treba napomenuti da povećanje dužine vlakna  $L_f$  dovodi do toga da funkcija zavisnosti propusnog opsega od dužine aktivne oblasti  $L$  ima strmiji nagib, kao i veće maksimume. Objašnjenje

ovog efekta je već dato u okviru diskusije rezultata prikazanih na sl. 3.3. Veće slabljenje u dužim vlaknima dovodi do potiskivanja oscilacija modulacionog odziva. Ovo uzrokuje da donja anvelopa modulacionog odziva dostigne  $-3$  dB za veće frekvencije u poređenju sa slučajem sa značajnom disperzijom ( $\lambda_0 = 1550$  nm), obezbeđujući na taj način veći propusni opseg za duža vlakna [100].

## 3.2 Optimizacija propusnog opsega RSOA u režimu malih signala

Rezultati predstavljeni u prethodnoj sekciji razmatraju uticaj gustine struje polarizacije, dužine distribucionog vlakna, dužine aktivne oblasti RSOA, kao i spektralne širine OBPF filtra, u cilju identifikacije parametara koji limitiraju modulacione performanse RSOA-FCL sistema. Pokazano je da je propusni opseg celokupnog RSOA-FCL sistema ograničen onom sekcijom koja za date radne uslove ima niži propusni opseg. U slučaju kada je disperzija u vlaknu značajna, propusni opseg vlakna će predstavljati ograničavajući faktor, dok je, u slučaju kada je disperzija zanemarljiva, propusni opseg ograničen performansama RSOA.

Kako bi se jasnije utvrdili faktori koji određuju modulacione performanse refleksionog optičkog pojačavača kao samostalne komponente, potrebno je posmatrati složeniji model RSOA koji pored interakcije nosilaca i fotona u aktivnoj oblasti uključuje i transportne efekte: difuziju nosilaca naelektrisanja, i procese zarobljavanja i otpuštanja nosilaca naelektrisanja. U nastavku će biti izložena analiza sopstvenog, internog i eksternog modulacionog odziva i odgovarajućeg propusnog opsega za RSOA kod kog je aktivna oblast realizovana kao višestruke kvantne jame kao što je opisano u 2.2.2. Kako bi se odredio propusni opseg  $f_{3\text{dB}}$  polazi se od numeričkog rešenja konturnog problema datog pomoću (2.86), uz granične uslove (2.88)-(2.89) na antirefleksionom kraju RSOA ( $z = 0$ ). Stacionarne vrednosti neophodne za rešavanje (2.86) određene su metodom prikazanom u potpoglavlju 2.3.1.

Ispitan je uticaj CW ulazne optičke snage, gustine struje polarizacije i dužine aktivne oblasti pojačavača na modulacioni odziv i 3 dB propusni opseg RSOA. Uticaj transportnih, kvazi-parazitnih efekata analiziran je kroz nezavisno razmatranje dve različite debljine SCH regiona,  $H_{\text{SCH}} = 60$  nm i  $H_{\text{SCH}} = 200$  nm. Da bi se utvrdila jasna korelacija između režima rada RSOA i 3 dB propusnog opsega, određena je zavisnost pojačanja RSOA u stacionarnom stanju od ulazne snage [videti sl. 3.8 (a)], a zatim i od gustine struje polarizacije [videti sl. 3.8 (b)]. Na sl. 3.9 (a) prikazana je zavisnost  $f_{3\text{dB}}$  od CW ulazne optičke snage u sopstvenom modelu (tačkasta linija) [91]. Propusni opseg skoro da ne zavisi od debljine  $H_{\text{SCH}}$ , dok se malo veće vrednosti koje se ispoljavaju za veće SCH debljine (isprekidana linija) mogu pripisati razlikama u vrednosti faktora konfiniranja  $\Gamma$ , zapremine aktivne oblasti  $V_b$  i efektivnog indeksa prelamanja  $n_{\text{eff}}$  koje su prikazane u Tabeli 3.1 [101].

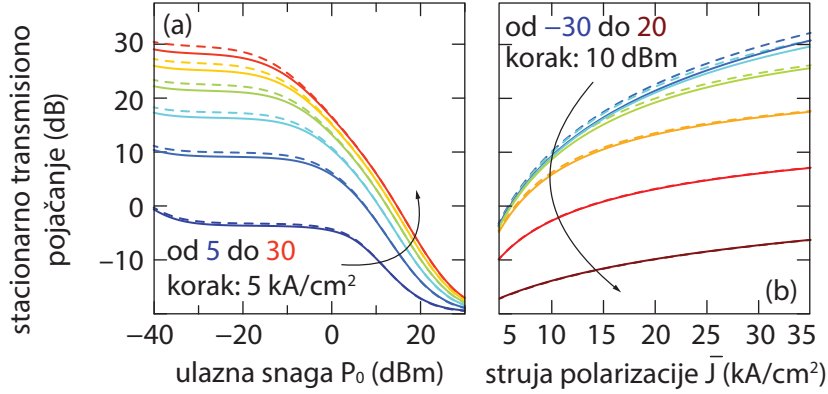
Zavisnost 3 dB propusnog opsega od  $P_0$  ispoljava monotoni porast za niske vrednosti gustine struje polarizacije. Međutim, za srednje i visoke vrednosti  $\bar{J}$ , lokalni minimum i maksimum se pojavljuju u saturacionom režimu, što je detaljno opisano u [91]. Maksimalna vrednost propusnog opsega prevazilazi 10 ili čak 20 GHz, u zavisnosti od ulazne optičke snage i gustine struje polarizacije. Slika 3.9(c) pokazuje da transportni efekti, prevashodno efektivno vreme difuzije kroz SCH



### 3.2 Optimizacija propusnog opsega RSOA u režimu malih signala

Tabela 3.1: Vrednosti materijalnih i tehnoloških parametara u zavisnosti od debljine SCH oblasti.

$H_{SCH}[\text{nm}]$	$n_{\text{eff}}$	$\Gamma_{\text{QW}}[\%]$	$\tau_{\text{bw}}[\text{ps}]$	$\tau_{\text{bw}}/\tau_{\text{wb}}$
60	3.1909	1.5890	7.0712	0.2185
200	3.2391	1.6395	32.9085	1.0168



Slika 3.8: Zavisnost internog stacionarnog pojačanja (a) od ulazne optičke snage  $P_{\text{in}}$  za različite vrednosti gustine struje polarizacije  $\bar{J}$  i (b) od gustine struje polarizacije za različite  $P_{\text{in}}$  [101].

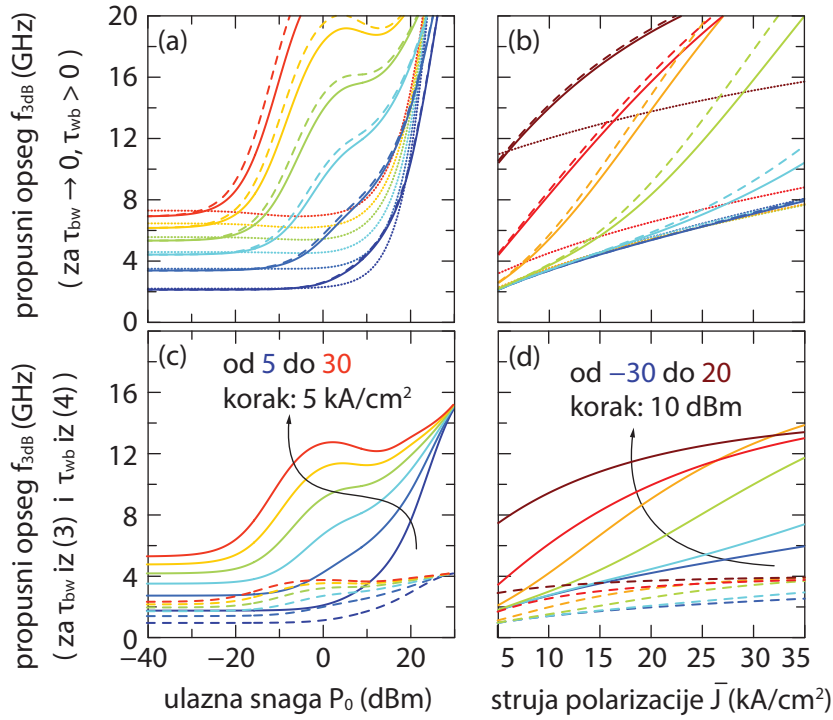
oblast i vreme zarobljavanja nosilaca u jami,  $\tau_{\text{bw}}$ , i vreme termo-jonske emisije i difuzije nosilaca iz jamskih u barijerna stanja  $\tau_{\text{wb}}$ , smanjuju 3 dB propusni opseg, istovremeno zadržavajući formu zavisnosti prikazanu na sl. 3.9(a). Propusni opseg u slučaju kada je SCH oblast veće debljine je značajno potisnut na jedva nekoliko GHz (3 – 4 GHz). Propusni opseg monotono raste sa porastom gustine struje polarizacije, što se može videti na slici 3.9 (b), (d), sa najvećim nagibom za srednje vrednosti optičke snage. Slično kao na sl. 3.9(c), transportni efekti dovode do potiskivanja  $f_{3\text{dB}}$  [videti sl. 3.9(d)], što postaje više izraženo u slučaju kada je SCH oblast veće debljine.

Pored toga, detaljno je analizirano opšte-prihvaćeno stanovište da vreme života nosilaca naelektrisanja određuje sopstveni propusni opseg RSOA. Kako sopstveni i interni modulacioni odziv RSOA (sl. 3.10, isprekidana linija) približno odgovaraju funkciji prenosa sa jednostrukim polom, pretpostavlja se da je 3 dB propusni opseg obrnuto proporcionalan prostorno usrednjenom vremenu života nosilaca unutar RSOA ( $\tau_{\text{cl}}$ ), [37, 42, 44, 45]. Sopstveni propusni opseg se može proceniti na osnovu  $f_{3\text{dB}} = (2\pi\tau_{\text{cl}})^{-1}$ , gde se  $\tau_{\text{cl}}^{-1}$  odnosi na doprinos brzina spontane i stimulisane rekombinacije (2.39) i određen je relacijom:

$$\tau_{\text{cl}}^{-1} = A_w + B_{1w} + 2B_{2w}\bar{n}_w + 3C_w\bar{n}_w^2 + v_g \frac{g_0}{\bar{n}_w} \frac{\bar{S}_\Sigma}{1 + \epsilon\bar{S}_\Sigma}. \quad (3.1)$$

Propusni opseg, izračunat preko (3.1), u osnovi odgovara 3 dB propusnom opsegu  $\gamma_{\pm}$  (2.87) za  $\tau_{\text{bw}} \rightarrow 0$ . U okviru režima rada van saturacije, 3 dB propusni opseg je dobro aproksimiran inverznim prostorno-usrednjenim efektivnim vremenom života nosilaca, sl. 3.9 (a), (b). Kako se RSOA približava pragu saturacije, aproksimativna formula ne procenjuje dovoljno dobro sopstveni propusni opseg koji je definisan ovde prikazanim detaljnim modelom.

### 3.2 Optimizacija propusnog opsega RSOA u režimu malih signala



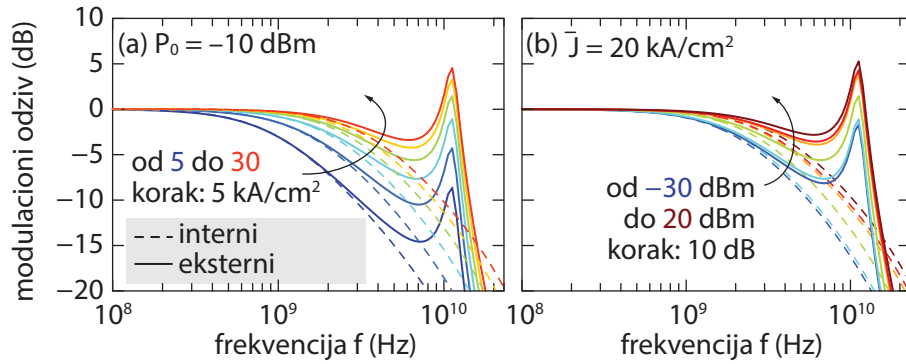
Slika 3.9: (a) i (b) označavaju zavisnost sopstvenog, a (c) i (d) internog 3 dB propusnog opsega RSOA od ulazne optičke snage (a), (c) i gustine struje polarizacije (b), (d). Punim linijama označene su vrednosti određene za  $H_{SCH} = 60$  nm, isprekidanim za  $H_{SCH} = 200$  nm, a tačkaste linije na (a)-(b) označavaju  $f_{3dB}$  određen prema (3.1) [101].

Treba obratiti pažnju na to da teorijska razmatranja propusnog opsega bazirana na efektivnom vremenu života nosilaca u [37], neopravdano uzimaju u obzir faktor konfiniranja RSOA, što dovodi do značajno manjeg propusnog opsega ( $< 2$  GHz) od onog koji je predviđen (3.1), ili ovde prikazanim detaljnim modelom. Štaviše, u [37] se sugerije da je nizak sopstveni propusni opseg RSOA glavni uzrok loših modulacionih performansi uređaja, što se pokazalo kao tačno u veoma ograničenom opsegu radnih uslova.

Rezultati predstavljeni na sl. 3.9 jasno pokazuju da je sopstveni i interni (kvazi-parazitni) propusni opseg na osnovu modela opisanog u potpoglavlju 2.2.3, značajno viši od eksperimentalno merenih vrednosti [37–42, 51, 104], ili onih vrednosti koje se dobijaju iz modela zasnovanog na vremenu života nosilaca naelektrisanja [37]. Međutim, ovaj zaključak se ne odnosi na veće debljine SCH oblasti ( $H_{SCH} = 200$  nm). Stoga, poznata ograničenja izmerenog eksternog propusnog opsega modulacije RSOA u režimu malih signala ne potiču od internog (kvazi parazitnog ili sopstvenog) modulacionog odziva, osim u slučaju debljih SCH oblasti kada dominiraju transportni efekti. Kako je u nastavku razmatranja prikazano, dizajn i optimizacija parazitnih elemenata čipa i ožičavanja RSOA su ključni za postizanje visokog propusnog opsega RSOA [101].

U nastavku analize razmatra se uticaj parazitnog kola na modulacioni odziv zajedno sa uticajem transportnih, kvazi-parazitnih efekata, što zapravo određuje eksterni modulacioni odziv tj. model koji daje rezultate najpribližnije eksperimentalno određenim vrednostima. U slučaju kada je interni propusni opseg određen sa (2.92) uticaj parazitnog kola se može uračunati kroz (2.126). Na sl. 3.10 prikazan je interni modulacioni odziv RSOA za  $H_{SCH} = 60$  nm sa uračunatim kvazi-parazitnim efek-

### 3.2 Optimizacija propusnog opsega RSOA u režimu malih signala

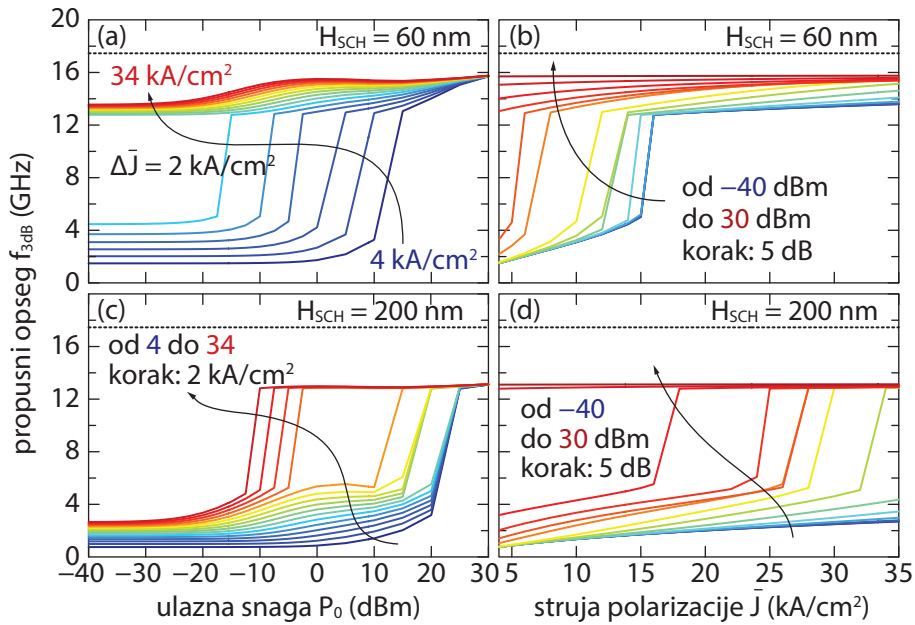


Slika 3.10: Modulacioni odziv za RSOA debljine SCH regije  $H_{SCH} = 60$  nm prikazan za (a) ulaznu optičku snagu  $P_{in} = -10$  dBm i vrednosti gustine struje polarizacije od 5 do 30 kA/cm<sup>2</sup> sa korakom 5 kA/cm<sup>2</sup>, i (b) gustinu struje polarizacije  $\bar{J} = 20$  kA/cm<sup>2</sup> i vrednosti optičke snage od -30 do 10 dBm sa korakom 10 dB. Pune linije označavaju eksterni,  $H_e$ , a isprekidane interni,  $H_i$ , propusni opseg [101].

tima (isprekidana linija) i eksterni modulacioni odziv (puna linija). Vrednosti internog propusnog opsega na sl. 3.10 deo su rezultata koji su predstavljeni na sl. 3.9. Rezonantni pik koji potiče od parazitnog kola [videti sl. 2.4 (b)], značajno utiče na eksterni modulacioni odziv RSOA dat relacijom (3.10). Dizajn RSOA strukture predložene u potpoglavlju 2.2.2 ispoljava značajno manje parazitne efekte od onih predloženih u ranijim radovima, što je potvrđeno na sl. 2.5. Ukoliko bi se deo ekvivalentnog kola koji uzima u obzir parazitne efekte usled ožičavanja isključio iz razmatranja, ostatak ekvivalentnog kola koji čine DC i RF kontakt, mikrostrip elektroda i supstrat, ponaša se kao filter propusnik opsega. To dovodi do skoro identičnog internog i eksternog modulacionog odziva, a time i 3 dB propusnog opsega. U tom slučaju je eksterni propusni opseg RSOA ograničen internim (kvazi-parazitnim) propusnim opsegom. Međutim, u slučaju uračunavanja kompletnog parazitnog kola, koje obuhvata i uticaj ožičavanja sa uobičajenim parametrima [94], moguća su još dva ishoda. Ako je rezonantna frekvencija ( $f_{res}$ ) ili propusni opseg parazitnog kola značajno niži od internog propusnog opsega RSOA, eksterni propusni opseg je ograničen propusnim opsegom parazitnog kola. S druge strane, ako je rezonantna frekvencija parazitnog kola (2.4) reda veličine internog propusnog opsega RSOA (sl. 3.9 i 3.10), eksterni propusni opseg može se poboljšati kroz optimizaciju parazitnih elemenata uvođenjem tzv. indukcionog pika (eng. *Inductive Peaking Effect*, IPE). Za predloženi dizajn RSOA, pokazuje se da IPE ne doprinosi povećanju propusnog opsega za niske vrednosti gustine struje  $\bar{J}$  [videti sl. 3.10(a)] i/ili niske ulazne optičke snage  $P_{in}$  [videti sl. 3.10(b)], usled značajne razlike između internog propusnog opsega i rezonantne frekvencije  $f_{res}$  što dovodi do pada eksternog modulacionog odziva koji prevazilazi 3 dB. Za veće vrednosti  $\bar{J}$  i/ili  $P_{in}$ , vrednosti  $f_{3dB}$  internog propusnog opsega su više i bliže  $f_{res}$ , kako se vidi na sl. 2.4. U ovom slučaju, pad u modulacionom odzivu se smanjuje ili potpuno kompenzuje rezonantnim pikom usled IPE, što dovodi do poboljšanja propusnog opsega prikazanog na sl. 3.10 [101].

Za veće debljine SCH oblasti ( $H_{SCH} = 200$  nm), pad u modulacionom odzivu se ne može potpuno kompenzovati, tako da je pojačanje putem IPE moguće postići samo za veće vrednosti struje polarizacije ili ulazne optičke snage. Međutim za veće  $H_{SCH}$  povećanje propusnog opsega može potpuno izostati. Slika 3.11 prikazuje eksterni modulacioni propusni opseg RSOA u zavisnosti od  $P_{in}$  i  $\bar{J}$  za

### 3.2 Optimizacija propusnog opsega RSOA u režimu malih signala

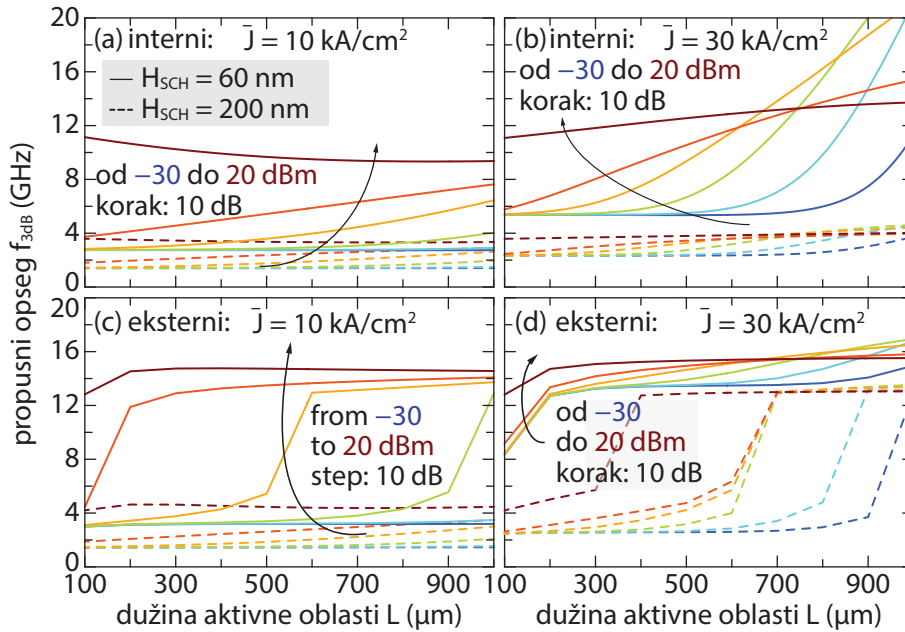


Slika 3.11: Zavisnost eksternog 3 dB propusnog opsega RSOA (uključujući električne parazitne efekte) od (a), (c) optičke snage ulaznog signala  $P_{in}$  za različite vrednosti gustine struje polarizacije  $\bar{J}$ , i (b), (d) gustine struje polarizacije za različite vrednosti  $P_{in}$ . Prikazane funkcije određene su za model RSOA sa  $H_{SCH} = 60$  nm (a)-(b), i  $H_{SCH} = 200$  nm (c)-(d). Isprekidanom crnom linijom, na sva četiri grafika, obeležen je propusni opseg ekvivalentnog parazitnog električnog kola [101].

dve vrednosti  $H_{SCH}$ . Sa slike se jasno razlikuju dva režima: (i) režim niskog propusnog opsega i (ii) režim visokog, odnosno povećanog propusnog opsega. Režim niskog propusnog opsega ( $< 5$  GHz) odgovara ili niskom internom modulacionom odzivu, za niske vrednosti gustine struje i ulazne optičke snage, ili režimu u kome je propusni opseg ograničen parazitnim kolom, pri čemu je unutrašnji propusni opseg veći od propusnog opsega dela ekvivalentnog parazitnog kola koji se odnosi na ožičavanje. Režim visokog propusnog opsega ( $> 10$  GHz) obično se javlja pri visokim vrednostima  $\bar{J}$  i/ili  $P_{in}$ , pri čemu je već visoki interni propusni opseg dodatno povećan usled IPE. Slika 3.11(a) pokazuje da se režim visokog eksternog propusnog opsega može postići za niske vrednosti ulazne snage i visoke gustine struje, u slučaju dovoljno visokog internog propusnog opsega, koji odgovara manjim debljinama SCH oblasti. U ovom slučaju, IPE može značajno poboljšati interni modulacioni odziv [videti sl. 3.9 (c)]. Treba napomenuti da se režim RSOA niskih optičkih snaga i niskih struja polarizacije takođe može podvrgnuti poboljšanju propusnog opsega putem IPE uz podešavanje rezonantne frekvencije parazitnog kola. Zbog nižeg internog propusnog opsega, poboljšanje se može postići smanjenjem rezonantne frekvencije parazitnog kola. Približavanje ove dve frekvencije može proizvesti induktivno pojačavanje. Međutim, efikasnost poboljšanja (maksimalna vrednost ostvarenog eksternog propusnog opsega) biće smanjena zbog smanjenja rezonantne frekvencije. Ovaj režim rada RSOA može biti važan za postizanje manjeg RIN i veće termalne stabilnosti emisije [38].

Slika 3.11 pokazuje da režim visokog eksternog propusnog opsega ne može biti postignut za niske vrednosti  $P_{in}$  u opsegu razmatranih vrednosti gustine struje polarizacije. Za ove vrednosti ulaznih parametara granična frekvencija internog modulacionog odziva nije dovoljno velika da bi bila reda veličine  $f_{res}$ . Poređenje sl. 3.11 (a) i (c) otkriva da se prelaz od režima niskog do režima visokog

### 3.2 Optimizacija propusnog opsega RSOA u režimu malih signala

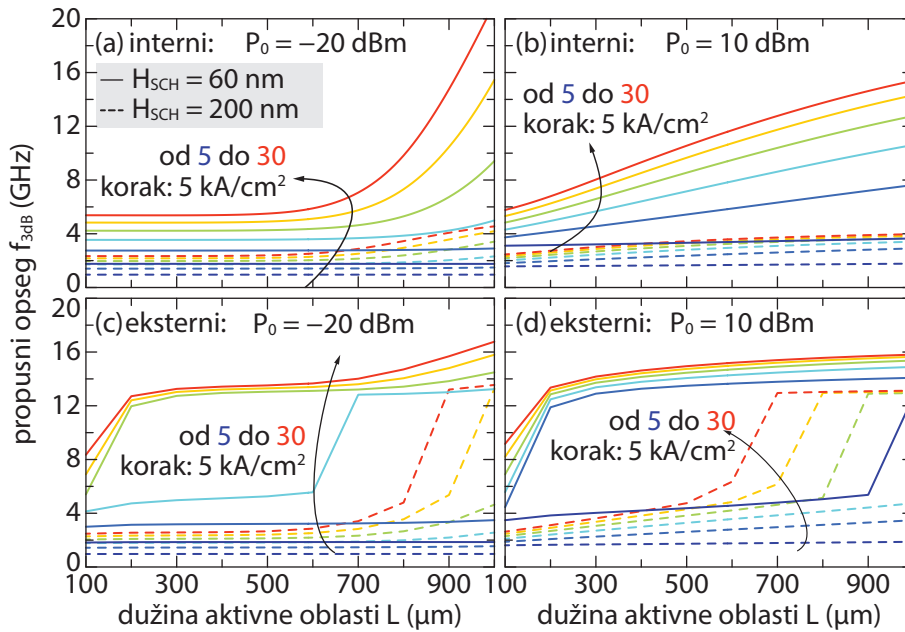


Slika 3.12: Zavisnost internog (a)-(b) i eksternog (c),(d) 3dB propusnog opsega od dužine aktivne oblasti  $L$ . Funkcije zavisnosti prikazane su za dve vrednosti gustine struje polarizacije  $\bar{J} = 10 \text{ kA/cm}^2$  (a),(c) i  $\bar{J} = 30 \text{ kA/cm}^2$  (b), (d) i skup vrednosti ulazne optičke snage  $P_{in}$  od  $-30$  do  $20 \text{ dBm}$ , sa korakom  $10 \text{ dB}$ . Punim linijama prikazane su vrednosti propusnih opsega za RSOA sa  $H_{SCH} = 60 \text{ nm}$ , a isprekidanim za RSOA sa  $H_{SCH} = 200 \text{ nm}$  [101].

propusnog osega i obrnuto, dešava za niže ulazne optičke snage ukoliko je interni propusni opseg viši (sl. 3.9 (c)), a što se ostvaruje za manje vrednosti  $H_{SCH}$ . Slike 3.11 (b) i (d) pokazuju da povećanje  $\bar{J}$  dovodi do prelaza iz režima niskog u režim visokog eksternog propusnog opsega za niže  $P_{in}$ . S obzirom da interni propusni opseg skoro linearno raste sa porastom struje polarizacije (sl. 3.9 (d)), a IPE se postiže kada je interni propusni opseg dovoljno visok i u okolini rezonantne frekvencije parazitnog kola, režim visokog eksternog propusnog opsega se lakše može postići za dovoljno velike struje. Stoga, slično kao u slučaju povećanja ulazne optičke snage prikazanom na slikama 3.11 (a) i (c), prelaz iz režima niskog do režima visokog režima propusnog opsega prikazan na slikama 3.11 (b) i (d) dešava se pri nižim vrednostima struje polarizacije za RSOA sa većim internim propusnim opsegom, odnosno sa manjom debljinom SCH oblasti [videti sl. 3.9 (d)] [101].

Analiza uticaja dužine aktivne oblasti RSOA na eksterni propusni opseg, za dve vrednosti debljine SCH oblasti, predstavljena je na sl. 3.12 za fiksne vrednosti gustine struje polarizacije i sl. 3.13 za fiksne vrednosti ulazne optičke snage. Slike 3.12 (a), (b) kao i sl. 3.13 (a), (b) pokazuju da interni propusni opseg uglavnom raste sa dužinom aktivne oblasti RSOA. Povećanje propusnog opsega je izraženije za niže  $P_{in}$ , tj. RSOA van saturacije, kao i za manje vrednosti  $H_{SCH}$  [videti sl. 3.12 (b) i 3.13 (a)]. Za veće debljine SCH oblasti, interni propusni opseg je niži i slabo zavisi od dužine aktivne oblasti  $L$ . Na sl. 2.4 (c) se vidi da povećanje dužine mikrostrip elektrode ne dovodi do značajnog povećanja propusnog opsega parazitnog kola. Međutim,  $Q$ -faktor, koji određuje visinu rezonantnog pika raste sa dužinom mikrostrip elektrode i time obezbeđuje efikasnije induktivno pojačanje. Za niske vrednosti gustine struje polarizacije ( $\bar{J} = 10 \text{ kA/cm}^2$ ), izražen je režim niskog propusnog opsega RSOA, sl. 3.12 (c), 3.13 (c), osim za veoma visoke  $P_{in}$  za koje je RSOA u saturaciji, sl. 3.13

### 3.2 Optimizacija propusnog opsega RSOA u režimu malih signala



Slika 3.13: Zavisnost internog (a)-(b) i eksternog (c),(d)  $-3$  dB propusnog opsega od dužine aktivne oblasti  $L$  za dve vrednosti snage ulaznog optičkog signala  $P_{in} = -20$  dBm (a),(c) i  $P_{in} = 10$  dBm (b),(d) i skup vrednosti gustine struje polarizacije  $\bar{J}$  od 5 do 30 kA/cm<sup>2</sup>, sa korakom 5 kA/cm<sup>2</sup>. Punim linijama prikazane su vrednosti propusnih opsega za RSOA sa  $H_{SCH} = 60$  nm, a isprekidanim za RSOA sa  $H_{SCH} = 200$  nm [101].

(d). U ovom slučaju uređaji sa većom dužinom aktivne oblasti i manjom debljinom SCH oblasti pokazuju bolje performanse. Ako se posmatraju kraće dužine, poboljšanje se može ostvariti samo u ograničenom opsegu visokih ulaznih optičkih snaga. Za visoke vrednosti gustine struje polarizacije ( $\bar{J} = 30$  kA/cm<sup>2</sup>), sl. 3.12 (d), eksterni modulacioni odziv može se naći u režimu visokog propusnog opsega za obe prikazane vrednosti  $H_{SCH}$ . Za manje debljine SCH oblasti ovaj režim je ostvariv u velikom rasponu optičkih snaga i dužina uređaja (sl. 3.12 (d), puna linija), dok se za veće debljine SCH oblasti režim visokog propusnog opsega postiže za kraće dužine i to samo za dovoljno velike snage (sl. 3.12 (d), isprekidana linija) [101].

Slični zaključci se mogu izvesti posmatrajući sl. 3.12 (d), (c), gde se umesto gustine struje razmatraju slučajevi niske i visoke ulazne optičke snage. Naime, za niske optičke snage ( $P_{in} = -20$  dBm) povećanje propusnog opsega moguće je postići za širok interval  $L$  i za  $\bar{J} > 20$  kA/cm<sup>2</sup> u slučaju manjih debljina SCH oblasti. Kada je reč o većim debljinama  $H_{SCH}$  oblasti, povećanje se postiže samo za veoma visoke struje i dužine aktivne oblasti  $L > 900$   $\mu$ m. U slučaju visokih ulaznih snaga, uglavnom je izražen režim visokog propusnog opsega za  $H_{SCH} = 60$  nm, dok je za  $H_{SCH} = 200$  nm povećanje propusnog opsega moguće samo za  $\bar{J} \geq 20$  kA/cm<sup>2</sup> i relativno velike dužine aktivne oblasti RSOA [101].

### 3.3 Optimizacija propusnog opsega RSOA u režimu velikih signala

U prethodnom potpoglavlju pokazano je da propusni opseg RSOA može da bude visok čak i kada su kvazi parazitni - transportni efekti uračunati, tj. u modelu internog modulacionog odziva. Sa druge strane, eksterni propusni opseg je obično ograničen parazitikom čipa i postiže znatno niže vrednosti. Međutim, pažljivim dizajnom i optimizacijom strukture parazitni efekti mogu obezbediti poboljšanje internog propusnog opsega kroz uvođenje indukcionog pika u modulacioni odziv. Ostaje otvoreno pitanje da li se zaključci vezani za propusni opseg i efekat indukcionog pojačanja ostvareni u režimu malih signala mogu proširiti i na analizu u režimu velikih signala.

Kada je reč o evaluaciji performansi MQW-RSOA u režimu modulacije velikim signalima parametri kvaliteta su BtB (eng. *back-to-back*)  $Q$ -faktor i BER. Ovi parametri se određuju analizom histograma semplovanog izlaznog signala, označenog kao  $x = S_-(z = 0, t_n)$ , koji je razdvojen na dve kolekcije,  $x_0$  i  $x_1$ , a koje odgovaraju logičkim nivoima 0 i 1, respektivno. U ovom kontekstu  $t_n$  predstavlja niz ekvidistantnih trenutaka odabiranja sa ukupno  $N$  elemenata, koji su razdvojeni periodom  $T$ . Zbog prisustva dinamičkih efekata distorzije koji proizilaze iz nelinearnog odziva RSOA, kao i od odziva parazitnog kola koje je prikazano na sl. 2.4, funkcije gustine verovatnoće (eng. *Probability Density Functions*, PDF) za  $x_0$  i  $x_1$  će imati višestruke lokalne ekstremume [105]. Drugim rečima, sistem koji čine parazitno kolo i aktivna i SCH oblast RSOA nije bez memorije, što znači da će optička snaga na izlazu iz uređaja zavisiti od struje modulacije za odgovarajući bit, kao i od nekoliko bitova koji mu prethode. Stoga, klasični pristup modelovanja raspodela  $x_0$  i  $x_1$  pomoću jedne Gausove funkcije neće dovesti do rezultata zadovoljavajuće tačnosti. Iz tog razloga, primenjuje se višestruka Gausova raspodela (eng. *Multi-Gaussian Distribution*, MGD), gde se svaki od histograma predstavlja superpozicijom odgovarajućeg broja Gausovih funkcija raspodele sa određenim težinskim koeficijentima [102].

Pre utvrđivanja broja odgovarajućih Gausovih funkcija raspodele i njihovih parametara, potrebno je izvršiti preliminarno predstavljanje kolekcije semplova  $x_0$  i  $x_1$  funkcijama gustine verovatnoće. U tu svrhu koristi se metoda ocene gustine raspodele pomoću tzv. funkcije-jezgra (eng. *Kernel Density Estimator*, KDE), što je neparametarska metoda koja se najčešće koristi za određivanje gustine raspodele slučajnih promenljivih. U konkretnom slučaju, primenjuje se KDE zasnovan na linearnim difuzionim procesima i sa Gausovskim kernelom [106]. Ovakav KDE koristi adaptivno zaglađivanje i metod selekcije opsega bez referenci, što omogućava da se jednako dobro tretiraju dijagrami oka sa različitim stepenima degradacije i/ili preklapanja. Nakon što su preliminarne PDF određene, uz pomoć metode iz [107] može se odrediti broj odgovarajućih Gausovih raspodela,  $N_G$ , kao i njihovi parametri, što dovodi do analitičkih izraza funkcija gustine verovatnoće uzoraka  $x_0$  i  $x_1$ , koje se označavaju kao  $p_0$  i  $p_1$ :

$$p_k(x) = \sum_{i=1}^{N_G^k} \frac{A_{k,i}}{\sigma_{k,i} \sqrt{2\pi}} \exp \left[ - \left( \frac{x - \mu_{k,i}}{\sigma_{k,i} \sqrt{2}} \right)^2 \right], \quad (3.2)$$

gde  $\{A, \mu, \sigma\}_{k,i}$  označavaju težinske koeficijente, srednju vrednost i standardnu devijaciju Gausovskih

### 3.3 Optimizacija propusnog opsega RSOA u režimu velikih signala

funkcija  $i \in [1, N_G^k]$  koje odgovaraju bitovima 0 ( $k = 0$ ) i 1 ( $k = 1$ ).

Pod pretpostavkom da se bitovi 0 i 1 pojavljuju sa jednakom verovatnoćom i da su višestruke Gausovske raspodele  $p_k(x)$  normalizovane tako da njihov integral na celom domenu iznosi 1, BER se može odrediti kao  $BER = 1/2[P(0|1) + P(1|0)]$ , gde  $P(0|1)$  i  $P(1|0)$  označavaju verovatnoću pogrešne detekcije bita 1 onda kada se šalje 0 i verovatnoću pogrešne detekcije bita 0 onda kada se šalje 1, respektivno [105]. Ove verovatnoće mogu se odrediti u odnosu na prag  $x_{th}$ :

$$BER(x_{th}) = \frac{1}{2} \left[ \int_{x_{th}}^{\infty} p_0(x) dx + \int_0^{x_{th}} p_1(x) dx \right]. \quad (3.3)$$

Zamenom (3.2) u (3.3), dobija se:

$$BER(x_{th}) = \frac{1}{4} \left[ \sum_{k=0}^1 \sum_{i=1}^{N_G^k} A_{k,i} \operatorname{erfc} \left( (-1)^k \frac{x_{th} - \mu_{k,i}}{\sigma_{k,i} \sqrt{2}} \right) \right]. \quad (3.4)$$

Najmanji BER iz (3.4) bira se kao konačan rezultat, a odgovarajući  $x_{th}$  se uzima kao optimalni prag. Konačno,  $Q$ -faktor se određuje na osnovu [105]:

$$Q = \sqrt{2} \operatorname{erfc}^{-1}(2 \text{ BER}). \quad (3.5)$$

Treba napomenuti da je pre semplovanja izlazni signal sinhronizovan sa globalnim satom kako bi se uzelo u obzir kašnjenje koje potiče od propagacije signala i ograničenog vremena odziva RSOA. Osim toga, trenutak semplovanja se bira pretraživanjem intervala trajanja bita u potrazi za maksimalnim otvorom oka.

Sekvenca bitova koja je odabrana za stres-test MQW-RSOA je de Brojn tipa, reda  $s$  sa alfabetom dimenzije 2, koji sadrži bitove 0 i 1. Za razliku od pseudo-nasumične, de Brojn sekvenca garantuje da će se u okviru sekvence  $2^s$  bitova tačno jednom naći sve kombinacije jedinstvenog niza dužine  $s$ . Za sekvencu reda  $s = 6$ , mogu se pokriti skoro svi slučajevi od interesa, što rezultira optimalno kratkom sekvencom od  $N = 2^6 = 64$  bitova. Modulacioni format je sinusoidalni RZ sa faktorom ispunjenosti bita (eng. *Duty Cycle*, DC) od 33%. Uticaj parazitnih efekata čipa i pakovanja uzima se kroz struju  $I$ , čiji se vremenski oblik dobija simulacijom u LTspice okruženju na osnovu dinamičkog modela ekvivalentnog parazitnog kola, kako je objašnjeno u potpoglavlju 2.5. Naime, sekvenca bitva koja je zadata sinusoidalnim strujnim signalom prosleđuje se na ulaz ekvivalentnog parazitnog kola, a izlazna struja  $I$  ovog električnog kola posmatra se kao struja koja dopire do SCH regiona RSOA [102].

Kako bi se odredile modulacione performanse pri modulaciji velikim signalima, na ulazu u RSOA pretpostavlja se CW optički signal koji se moduliše strujom  $I$ . Sistem jednačina koje opisuju interakciju fotona i nosilaca i dinamiku nosilaca naelektrisanja, (2.96)-(2.103), rešava se na diskretizovanoj prostorno-vremenskoj mreži, sa razmakom čvorova  $\Delta z = L/50$  duž longitudinalne ose i  $\Delta t = \Delta z/v_g$  duž vremenske ose, implementacijom uzvodne šeme prvog reda, kako je opisano u potpoglavlju 2.4.2. Primenom pomenute metode dolazi se do vremenske zavisnosti izlaznog optičkog signala,  $S_-(z = 0)$ , čijom analizom se određuju modulacione performanse RSOA.



### 3.3 Optimizacija propusnog opsega RSOA u režimu velikih signala

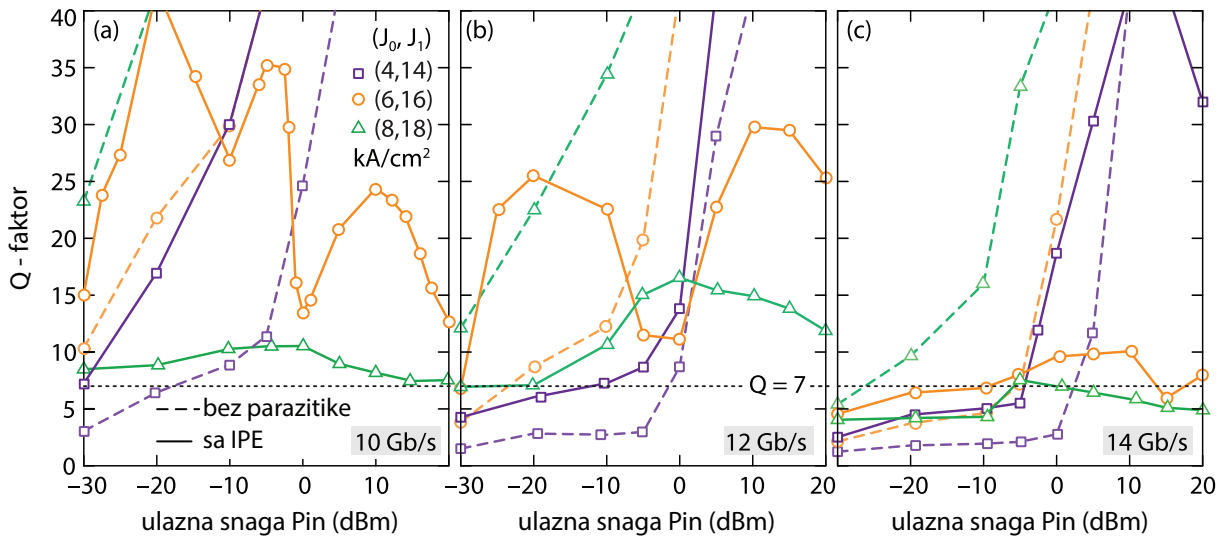
Ispitivanje mogućnosti poboljšanja modulacionih performansi primenom efektom indukcionog pika zahteva definisanje odgovarajućeg referentnog slučaja u odnosu na koji je moguće izvršiti adekvatno upoređivanje performansi RSOA sa uračunatim IPE. Kako parazitni efekti obično degradiraju modulacione performanse RSOA, kao referentni model ne može se postaviti bilo koji model RSOA sa uračunatim parazitnim efektima. Stoga, za referentnu veličinu najbolje je izabrati  $Q$ -faktor modela RSOA bez uračunate parazitike, budući da to daje najstrožije poređenje. U potpoglavlju 3.2 pokazano je da u režimu malih signala, RSOA bez uračunate parazitike ispoljava značajno veći propusni opseg od modela RSOA sa bilo kojom proizvoljnom parazitikom. U režimu velikih signala, ukoliko se pokaže da dolazi do poboljšanja  $Q$ -faktora adekvatnim izborom IP-parazitike u odnosu na interni  $Q$ -faktor bez uračunatih parazitnih efekata, slično kao u potpoglavlju 3.2, može se zaključiti da bi takav dizajn imao prednost u odnosu na RSOA dizajn sa proizvoljnom parazitikom.

Kako je pokazano u 3.2, radni uslovi definisani ulaznom optičkom snagom i gustinom struje polarizacije igraju značajnu ulogu u poboljšanju propusnog opsega u režimu malih signala kroz uvođenje indukcionog pika (videti slike 3.10 i 3.11). Stoga će uticaj ovih parametara biti detaljno razmatran i u analizi velikih signala. Slika 3.14 uporedo prikazuje zavisnost  $Q$ -faktora od ulazne optičke snage za model RSOA bez uračunatih parazitnih efekata i model RSOA sa IP-parazitikom, pri bitskim protocima 10 Gb/s, 12 Gb/s i 14 Gb/s. Prikazane su zavisnosti  $Q$ -faktora za različite parove gustina struja koje odgovaraju nivoima logičkih 0 i 1,  $J_{\{0,1\}} = I_{IN\{0,1\}}/(WL)$ . Vrednosti gustine struje zadate su kao uređeni parovi  $(J_0, J_1)$ , sa rastućim vrednostima za obe struje, izraženim u  $\text{kA/cm}^2$ , varirajući od relativno niskih (4, 14), preko umerenih (6, 16) do relativno visokih vrednosti (8, 18), uz pretpostavku fiksne apsolutne dubine modulacije,  $J_1 - J_0 = \Delta J = 10 \text{ kA/cm}^2$ . Odgovarajuće jačine struje su, redom, (41.6, 145.6), (62.4, 166.4) i (83.2, 187.2), izražene u mA (videti sl. 3.15). Za bitske protoke  $\leq 7.3 \text{ Gb/s}$ , vrednosti  $Q$ -faktora za oba modela su veće od 7 ( $\text{BER} = 10^{-12}$ ) za ceo opseg ulazne snage i od niskih do visokih vrednosti gustine struje. Značajna razlika između modela javlja se za bitske protoke  $\geq 10 \text{ Gb/s}$  [102].

Za model bez parazitike,  $Q$ -faktor monotono raste sa porastom ulazne snage  $P_{in}$ , kao i sa  $(J_0, J_1)$ , slično trendu koji je već prikazan u potpoglavlju 3.2 za modulaciju u režimu malih signala. Povećanje optičke snage ili struje dovodi do povećanja nivoa signala, što se ispoljava kao povećanje otvora oka i vrednosti  $Q$ -faktora. Kako sa porastom struje ili snage RSOA ulazi u režim saturacije, dominantni uzrok povećanja  $Q$ -faktora postaje smanjenje disperzije nivoa signala, odnosno, standardne devijacije  $\sigma_{0,i}$  i  $\sigma_{1,i}$ . Međutim, kako se može videti na sl. 3.14 (a), najniži par gustina struje  $(J_0, J_1)$  za niske ulazne snage ( $P_{in} < -20 \text{ dBm}$ ) dovodi do niskog  $Q$ -faktora ( $Q < 7$ ). Kako je prikazano na sl. 3.14 (b)-(c),  $Q$ -faktor se dodatno pogoršava sa povećanjem bitske brzine, dostižući vrednosti između 2 i 4. Istovremeno, opseg snaga za koji  $Q$ -faktor ostaje nizak širi se prema višim vrednostima ulazne optičke snage  $P_{in}$  (do 0 dBm). Ovaj režim niskih struja i snaga je od posebnog interesa kada je u pitanju razmatranje primene indukcionog pika u svrhu poboljšanja modulacionih performansi, jer tako nizak  $Q$ -faktor teško može obezbediti prihvatljiv kvalitet prenosa signala.

Slično kao u slučaju kada je uticaj parazitike zanemaren, za najniži par gustina struje  $(J_0, J_1)$ , zavisnost  $Q(P_{in})$  za odziv uz IPE monotono raste, zbog širokog opsega  $P_{in}$  vrednosti pri kojima RSOA ostaje van režima saturacije. Takođe, pri niskim strujama, efekat indukcionog pika obezbeđuje po-

### 3.3 Optimizacija propusnog opsega RSOA u režimu velikih signala



Slika 3.14: BtB  $Q$ -faktor u funkciji od  $P_{in}$  za niske (4, 14), srednje (6, 16) i visoke (8, 18) vrednosti nivoa gustine struje. Isprekidanim linijama označena je zavisnost  $Q(P_{in})$  za model bez parazitike, a punim linijama za model sa IPE, za bitske brzine od (a) 10 Gb/s, (b) 12 Gb/s i (c) 14 Gb/s [102].

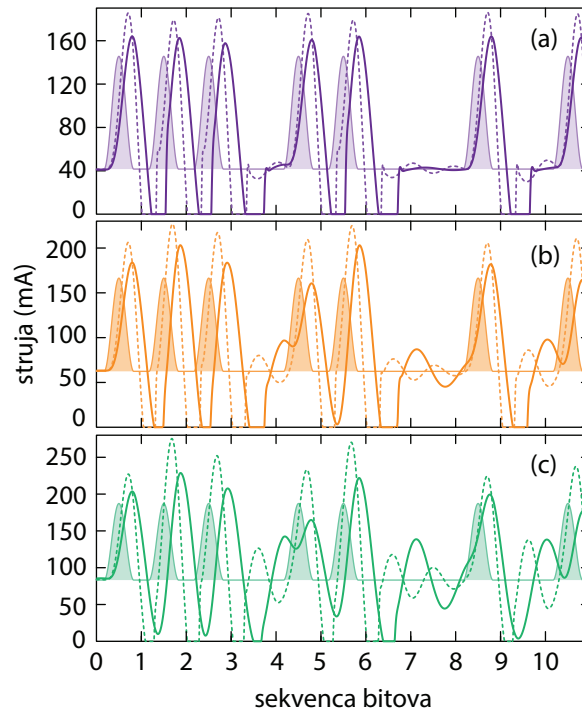
jačanje intenziteta struje bez značajne deformacije oblika (videti sl. 3.15 (a)), dodatno povećavajući otvor oka i značajno doprinoseći poboljšanju  $Q$ -faktora. Ovo predstavlja ključni mehanizam poboljšanja  $Q$ -faktora upotrebom IPR, posebno u slučaju niske vrednosti ulazne optičke snage. Za visoke optičke snage, režim saturacije suzbija disperziju nivoa 1 i 0, što dovodi do smanjenja  $\sigma_{0,i}$  i  $\sigma_{1,i}$ . To donekle kompenzuje ograničeno povećanje otvora oka usled zasićenja snage i rezultira poboljšanjem  $Q$ -faktora [102].

Za visoke vrednosti gustine struje, RSOA sa IPE ne pruža nikakvu prednost u poređenju sa slučajem kada su paraziti efekti zanemareni. Opseg vrednosti ulazne optičke snage  $P_{in}$  koji odgovara nesaturiranom režimu RSOA je uži, dok je intenzitet struje injektovane u SCH oblast RSOA povećan, a oblik signala izobličen u odnosu na struju na ulazu u parazitno kolo [videti sl. 3.15 (c)]. Rezultati pokazuju da usled visoke vrednosti gustine struje otvor oka postaje veći i nastavlja da raste sa porastom ulazne snage sve dok je RSOA van zasićenja. Međutim, izobličena forma struje i velika osetljivost na redosled u nizu bitova dovodi do značajno većih vrednosti  $\sigma_{0,i}$  i  $\sigma_{1,i}$ . Velika distorzija nivoa signala umanjuje uticaj povećanja otvora oka, uzrokujući značajno smanjenje  $Q$ -faktora. U slučaju visokih snaga, zasićenje uzrokuje smanjenje otvora oka, koje je izraženije od uticaja smanjenja  $\sigma_{0,i}$  i  $\sigma_{1,i}$ , što dovodi do niskih vrednosti  $Q$ -faktora.

U slučaju umerenih vrednosti gustine struje dolazi do međusobnog preplitanja uticaja ovih efekata, što otežava jasno predviđanje koji od efekata će dominantno uticati za datu vrednost ulazne optičke snage. Generalno gledano, RSOA sa IPE povećava  $Q$ -faktor za nisku ulaznu snagu (režim van saturacije), dok su vrednosti  $Q$ -faktora za srednje i visoke snage obično manji od vrednosti u modelu bez parazitike (režim saturacije).

Poboljšanje  $Q$ -faktora za najmanje vrednosti nivoa struje ( $J_0, J_1$ ) u slučaju RSOA sa IPE ključno je pri niskim  $P_{in}$ , jer u ovom opsegu snage RSOA bez parazitike pokazuje kritično niske vrednosti  $Q$ -faktora. Tehnika indukcionog pika se suštinski oslanja na neprigušeni odziv linearnog parazitnog kola 2. reda, koje u okolini rezonantne frekvencije pojačava struju  $I_{IN}$  na ulazu u kolo [videti sl. 3.15

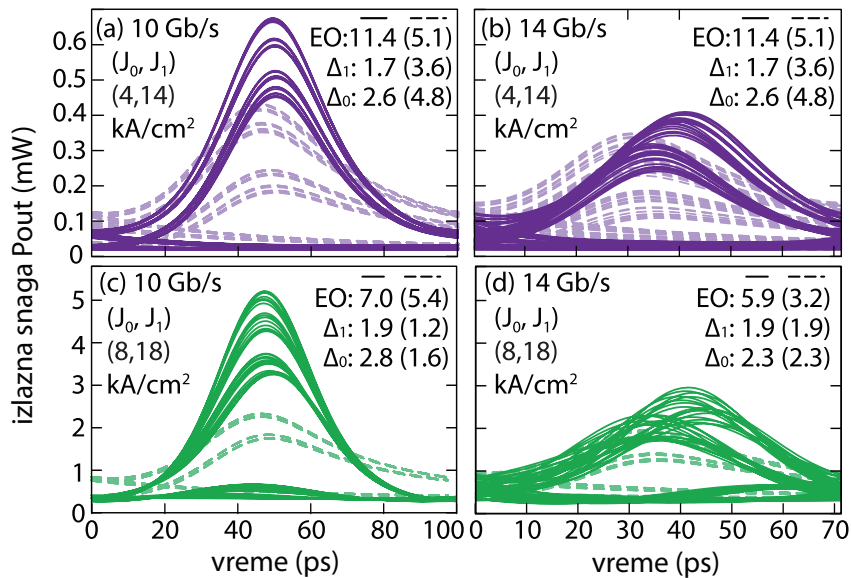
### 3.3 Optimizacija propusnog opsega RSOA u režimu velikih signala



Slika 3.15: Ulazni modulacioni signal formata 33% RZ koji predstavlja de Brojn sekvencu bitova. Osenčenom linijom prikazana je struja na ulazu u parazitno električno kolo  $I_{IN}$ , a struja  $I$  koja dolazi do RSOA SCH oblasti označena je isprekidanom linijom za bitsku brzinu od 10 Gb/s i punom linijom pri bitskoj brzini od 14 Gb/s. Funkcije struje prikazane su za odgovarajuće parove vrednosti gustine struje koje odgovaraju bitovima 0 i 1, odnosno (a) (4, 14) kA/cm<sup>2</sup>, (b) (6, 16) kA/cm<sup>2</sup> i (c) (8, 18) kA/cm<sup>2</sup> [102].

(a)-(c)]. Na osnovu modulacionog odziva u režimu malih signala, približna vrednost rezonantne frekvencije ekvivalentnog parazitnog kola prikazanog u potpoglavlju 2.5, može se proceniti na 10 GHz. Dakle, pri bitskoj brzini od 10 Gb/s (sl. 3.14 (a)), vrednost  $Q$ -faktora za RSOA sa IPE pri niskim strujama postaje prihvatljiva i veća od 7 za ceo opseg  $P_{in}$ , dok se pri bitskoj brzini 12 Gb/s (sl. 3.14 (b)) poboljšanje dešava za  $P_{in} \geq 10$  dBm. Za ove dve bitske brzine i umerene vrednosti gustine struje (6, 16), vrednost  $Q$ -faktora zadovoljava uslov  $Q > 7$  za ceo opseg ulaznih optičkih snaga, iako se poboljšanje u odnosu na model bez uračunate parazitike postiže samo za  $P_{in} < -10$  dBm. Dovoljno visok  $Q$ -faktor ( $Q \geq 7$ ) javlja se i za visoke gustine struje, tj. (8, 18) pri ovim bitskim brzinama, iako je, u ovom slučaju,  $Q$ -faktor značajno umanjen u odnosu na slučaj bez parazitike. Konačno, posmatrajući sl. 3.14 (c) za  $B_p = 14$  Gb/s, može se primetiti da niske i umerene struje polarizacije obezbeđuju udvostručenje vrednosti  $Q$ -faktora za primenu IPE na RSOA u režimu van saturacije. Ipak, iako IPE značajno poboljšava  $Q$ -faktor njegova vrednost ostaje ispod granice  $Q = 7$ . Isti zaključak se ne može izvesti za visoke vrednosti gustine struje, (8, 18), pri kojima parazitika značajno pogoršava vrednosti  $Q$ -faktora za ceo opseg ulazne snage. Za razliku od modela bez parazitike koji obezbeđuje monotono povećanje vrednosti  $Q$ -faktora sa povećanjem gustine struje ( $J_0, J_1$ ), u slučaju RSOA sa IPE postoji optimalan par vrednosti nivoa gustine struje približno na (6, 16). Ovaj par vrednosti obezbeđuje najveće vrednosti  $Q$ -faktora preko najšireg opsega ulaznih optičkih snaga i bitskih brzina pri fiksnoj dubini modulacije (videti sl. 3.14) [102].

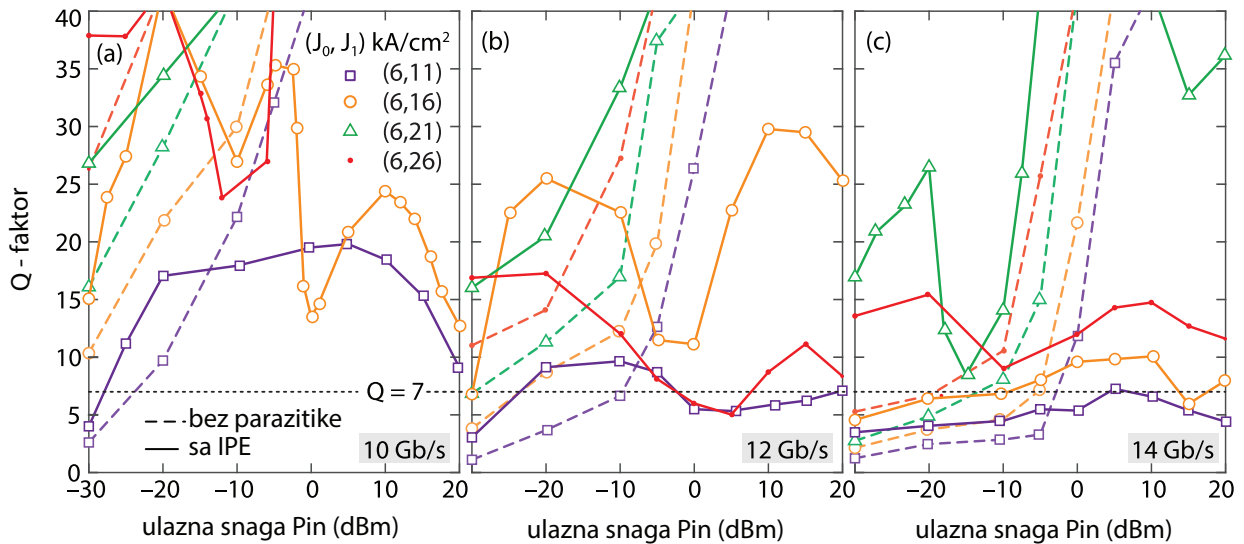
### 3.3 Optimizacija propusnog opsega RSOA u režimu velikih signala



Slika 3.16: BtB dijagrami oka izlaznog signala RSOA za bitske brzine (a), (c) 10 Gb/s i (b), (d) 14 Gb/s. Isprekidanom linijom označeni su dijagrami oka za model bez parazitike, a punom linijom za model RSOA sa IPE. Dijagrami su prikazani za niske vrednosti ulazne optičke snage  $P_{IN} = -10$  dBm i gustine struje koje odgovaraju niskim (a), (b) (4, 14) kA/cm<sup>2</sup> i (c), (d) visokim (8, 18) kA/cm<sup>2</sup> vrednostima. Navedene metrike dijagrama oka izražene su u dB i označavaju: otvor oka (eng. eye opening, EO), varijaciju nivoa jedinice ( $\Delta_1$ ), varijaciju nivoa nule ( $\Delta_0$ ) [102].

Bolji uvid u mehanizme koji stoje iza poboljšanja  $Q$ -faktora pri niskim (4, 14) i visokim (8, 18) kA/cm<sup>2</sup> vrednostima gustine struje daju dijagrami oka na izlazu RSOA za  $P_{in} = -10$  dBm i bitske brzine 10 i 14 Gb/s prikazani na sl. 3.16. Pri niskim vrednostima gustine struje i bitskoj brzini od 10 Gb/s struja koja dopire do SCH oblasti RSOA sa IPE ima višu vrednost nivoa 1 nego u slučaju kada parazitika nije uračunata. To dovodi do povećanja vrednosti  $\mu_{1,i}$  izlaznog optičkog signala i visine oka, kao što se može videti na sl. 3.16 (a). Dodatna prednost IPE je smanjenje razućenosti signala  $\sigma_{1,i}$ , posebno u slučaju inicijalno niskih struja modulacije. Sve ovo doprinosi većoj fleksibilnosti pri određivanju praga odlučivanja i poboljšanju  $Q$ -faktora. Pri visokim bitskim brzinama (14 Gb/s), otvor oka se smanjuje, što dovodi do niskog  $Q$ -faktora kako za model bez uračunate parazitike, tako i za model RSOA sa IPE. Međutim, efekat indukcionog pika uzrokuje blagi porast amplitude struje i značajno smanjenje vrednosti  $\sigma_{1,i}$  [videti sl. 3.16 (b)]. Uprkos izobličenju forme struje, zbog smanjenja vrednosti  $\sigma_{1,i}$   $Q$ -faktor se poboljšava u slučaju RSOA sa IPE. Na slikama 3.16 (c) i (d) prikazani su dijagrami oka za vrednosti gustine struje (8, 18) kA/cm<sup>2</sup>. Dosadašnja analiza pokazuje da povećanje struje modulacije, odnosno povećanje DC komponente struje dovodi do ulaska RSOA u režim saturacije za niske ulazne snage. Usled izraženog efekta saturacije disperzija nivoa 1 i 0 ( $\sigma_{1,i}$  i  $\sigma_{0,i}$ ) smanjena je u poređenju sa vrednostima koje se dobijaju za niže vrednosti struje u modelu RSOA bez uračunate parazitike. Ovo se jasno može videti na sl. 3.16, za niske vrednosti ulazne optičke snage  $P_{in} = -10$  dBm. Kao što se može videti na sl. 3.15 (c), efekat indukcionog pika dvojako utiče na talasni oblik struje. Sa jedne strane dolazi do značajnog povećanja amplitude struje, što dovodi do većeg  $\mu_{1,i}$ , a ujedno je jedan od glavnih mehanizama za poboljšanje  $Q$ -faktora. Dok, sa druge strane, izobličenost strujnog signala dovodi do veće disperzije nivoa 0 i 1, odnosno povećanja  $\sigma_{0,i}$  i  $\sigma_{1,i}$ . Za

### 3.3 Optimizacija propusnog opsega RSOA u režimu velikih signala

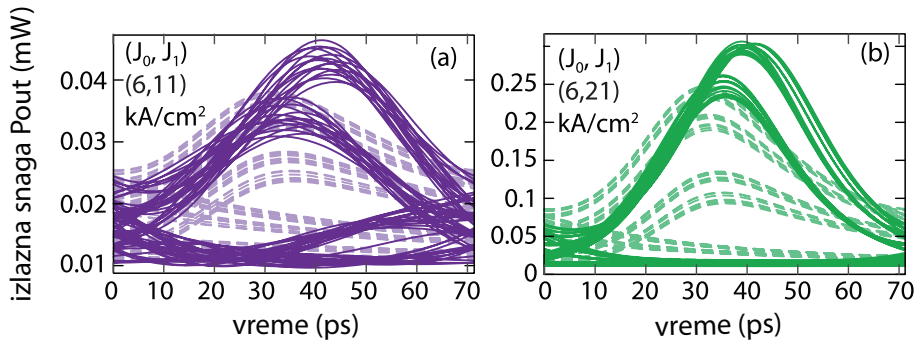


Slika 3.17: BtB  $Q$ -faktor u funkciji ulazne optičke snage  $P_{in}$  za vrednosti dubine modulacije  $\Delta J$  od 5 do  $20 \text{ kA}/\text{cm}^2$  sa korakom  $5 \text{ kA}/\text{cm}^2$ , pri fiksnoj vrednosti gustine struje koja odgovara bitu 0 ( $J_0 = 6 \text{ kA}/\text{cm}^2$ ) i bitskim brzinama od 10 Gb/s (a), 12 Gb/s (b) i 14 Gb/s (c). Isprekidanim linijama prikazane su vrednosti određene za model RSOA bez uračunatih parazitnih efekata, dok su punim linijama prikazane vrednosti za model RSOA sa IPE [102].

model RSOA bez parazitike, MGD standardne devijacije  $\sigma_{1,i}$  su za barem dva reda veličine (10 Gb/s), odnosno jedan red veličine (14 Gb/s) manje, nego odgovarajuće vrednosti za model RSOA sa IPE. Ovo je jasno prikazano na sl. 3.16 (c) i (d), gde su linije koje odgovaraju slučaju bez parazitike usko grupisane oko odgovarajuće srednje vrednosti, a linije koje odgovaraju slučaju sa IPE značajno razvučene. Primenom IPE vrednost  $\mu_{1,i}$  je skoro udvostručena pri bitskoj brzini od 10 Gb/s. Međutim, ovo poboljšanje se narušava pogoršanjem standardnih devijacija, čije vrednosti rastu od 10 do 100 puta u odnosu na model bez parazitike. Kao posledica toga, dijagrami oka dobijeni za model RSOA sa IPE zapravo odgovaraju nižim vrednostima  $Q$ -faktora u poređenju sa modelom bez parazitnih efekata, iako je otvor oka veći. Povećanje bitske brzine sa 10 na 14 Gb/s uzrokuje veću distorziju i, kao posledicu, veće vrednosti standardne devijacije, što se može videti na sl. 3.16 (c) i (d) [102].

U nastavku analize biće ispitana zavisnost  $Q$ -faktora od ulazne optičke snage  $P_{in}$  za različite dubine modulacije. Na sl. 3.17 prikazano je  $Q(P_{in})$  za fiksnu vrednost gustine struje nivoa 0,  $J_0 = 6 \text{ kA}/\text{cm}^2$ , dok se vrednost struje nivoa 1 postepeno povećava sa korakom od  $5 \text{ kA}/\text{cm}^2$ , od  $11 \text{ kA}/\text{cm}^2$ , tj.  $114,4 \text{ mA}$ , do  $26 \text{ kA}/\text{cm}^2$ , tj.  $270,4 \text{ mA}$ . Za model RSOA bez parazitike,  $Q$ -faktor monotonno raste sa porastom  $P_{in}$  i  $J_1$ , što se može jasno videti na sl. 3.17. Isto ponašanje modela bez parazitike prethodno je prikazano i na sl. 3.14. Nasuprot tome, za model RSOA sa IPE ne postoji dosledan obrazac u ponašanju  $Q$ -faktora, čije vrednosti variraju između lokalnih minimuma i maksimuma za različite režime rada. Pored toga, u većini analiziranih slučajeva, kvalitet signala ostaje iznad granice  $Q = 7$ , sa time da se za veće bitske brzine bolji rezultati ostvaruju pri većim dubinama modulacije. Poboljšanje  $Q$ -faktora zahvaljujući IPE je najznačajnije pri niskim vrednostima  $P_{in}$  i umerenim do visokim dubinama modulacije, gde su vrednosti  $Q$ -faktora već bile kritično niske u modelu bez parazitike. Međutim, za visoke vrednosti ulazne snage  $Q$ -faktor za RSOA sa IPE je lošiji u poređenju s modelom bez uračunate parazitike. Imajući na umu da će parazitni efekti postojati u

### 3.3 Optimizacija propusnog opsega RSOA u režimu velikih signala



Slika 3.18: Dijagrami oka izlaznog signala RSOA za vrednosti dubine modulacije  $\Delta J = 5 \text{ kA/cm}^2$  (a) i  $\Delta J = 15 \text{ kA/cm}^2$  (b), pri fiksnoj vrednosti gustine struje koja odgovara bitu 0 ( $J_0 = 6 \text{ kA/cm}^2$ ). Dijagrami su prikazani za vrednosti ulazne optičke snage  $P_{in} = -20 \text{ dBm}$  pri bitskoj brzini  $14 \text{ Gb/s}$ . Isprekidana linija označava nivoe izlazne snage određene za model bez parazitike, a puna linija za model RSOA sa IPE. Metrike dijagrama oka izražene u dB za: (a) otvor oka  $EO = 3.4(1.2)$ ,  $\Delta_1 = 1.2(1.9)$ ,  $\Delta_0 = 1.2(2.1)$ , i (b)  $EO = 11(4.1)$ ,  $\Delta_1 = 1.1(4.0)$ ,  $\Delta_0 = 2.3(5.1)$  sa IPE, (bez parazitike) [102].

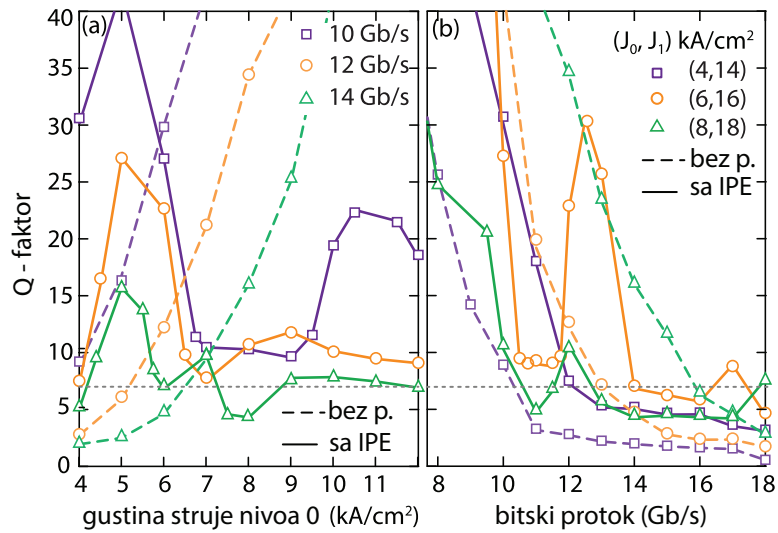
svakom praktičnom slučaju od interesa, glavni cilj je identifikacija načina za povećanje  $Q$ -faktora i određivanje radnih uslova koji će to omogućiti, uz svest da će performanse neizbežno biti lošije u preostalim radnim režimima [102].

Povećanje vrednosti  $J_1$  obično dovodi do poboljšanja  $Q$ -faktora, dostižući maksimum u blizini od  $21 \text{ kA/cm}^2$  što je prikazano na sl. 3.17. Ovo poboljšanje prati brz pad za veoma visoke vrednosti  $J_1 = 26 \text{ kA/cm}^2$ , čiji je osnovni uzrok distorzija struje u parazitnom kolu i posledično povećanje  $\sigma_{1,i}$ . Međutim, iako povećanje  $J_1$  i dubine modulacije može poboljšati  $Q$ -faktor, takođe dovodi do povećane potrošnje uređaja. Stoga je najbolje koristiti što nižu vrednost  $J_1$  koja i dalje može obezbediti dovoljno dobar  $Q$ -faktor za širok opseg ulaznih optičkih snaga. Imajući to u vidu, dobar izbor za odabir vrednosti gustine struje nalazi se u opsegu umerenih gustina struje, tj. u okolini  $(6, 16) \text{ kA/cm}^2$ .

Kako bi se bolje razumeli fizički mehanizmi koji stoje iza poboljšanja  $Q$ -faktora efektom indukcionog pika pri visokim bitskim protocima ( $14 \text{ Gb/s}$ ), potrebno je osvrnuti se na dijagrame oka za različite dubine modulacije. Na sl. 3.18 (a) i (b) prikazani su dijagrami oka za  $P_{in} = -20 \text{ dBm}$ , pri čemu je gustina struje koja odgovara logičkom nivou 0 fiksirana na vrednost  $J_0 = 6 \text{ kA/cm}^2$ , dok vrednosti gustine struje koje odgovaraju logičkom nivou 1 iznose  $J_1 = 11$  i  $J_1 = 21 \text{ kA/cm}^2$ , respektivno. Poboljšanje  $Q$ -faktora za  $J_1 = 11 \text{ kA/cm}^2$  iznosi svega  $\Delta Q \approx 1.6$ , što je pretežno uzrokovano blagim smanjenjem  $\sigma_{0,i}$  u optimalnom trenutku odabiranja. Sa druge strane, za  $J_1 = 21 \text{ kA/cm}^2$ ,  $\Delta Q$  je značajno veće ( $\Delta Q \approx 21.6$ ), s' obzirom su u ovom slučaju svi parametri koji određuju  $Q$ -faktor poboljšani:  $\mu_{0,i}$ ,  $\sigma_{0,i}$  i  $\sigma_{1,i}$  su povećani, dok je  $\mu_{1,i}$  smanjeno.

Na sl. 3.19(a) prikazana je zavisnost  $Q$ -faktora od gustine struje koja odgovara logičkom nivou 0, za fiksnu vrednost  $\Delta J = 10 \text{ kA/cm}^2$  i  $P_{in} = -10 \text{ dBm}$  i za tri različite bitske brzine. Kao što je već prikazano na slikama 3.14 i 3.17, povećanje bitske brzine uzrokuje smanjenje  $Q$ -faktora. Za model bez parazitike,  $Q$ -faktor za određenu bitsku brzinu raste sa povećanjem  $J_0$ . Međutim, ako se razmatra model RSOA sa IPE, zavisnost  $Q$ -faktora od  $J_0$  ispoljava globalni maksimum koji se pojavljuje pri vrednosti od oko  $5 \text{ kA/cm}^2$  i dodatni lokalni maksimum koji se javlja za znatno veće vrednosti gustine struje ( $J_0 = 9$  do  $11 \text{ kA/cm}^2$ ). Ovaj lokalni maksimum je izraženiji pri nižim bitskim brzinama

### 3.3 Optimizacija propusnog opsega RSOA u režimu velikih signala



Slika 3.19: *BtB*  $Q$ -faktor u funkciji od (a) gustine struje koja odgovara bitu 0,  $J_0$  i (b) bitske brzine, za fiksnu vrednost dubine modulacije  $\Delta J = 10 \text{ kA/cm}^2$  i  $P_{\text{in}} = 10 \text{ dBm}$ . Punom linijom označene su zavisnosti određene za model RSOA sa IPE, a isprekidanom za model bez uračunatih parazitnih efekata. Sivom isprekidanom linijom označena je granična vrednost  $Q = 7$  [102].

(10 Gb/s), dok je sa povećanjem bitske brzine sve manje izražen i pomera se prema nižim vrednostima gustine struje. Vrednost gustine struje koja odgovara globalnom maksimumu manja je od one koja odgovara dodatnom lokalnom maksimumu. Takođe, ova vrednost se ne menja sa promenom bitske brzine i obezbeđuje znatno viši  $Q$ -faktor i manju potrošnju, zbog čega predstavlja optimalan izbor za  $J_0$ . Globalni maksimum funkcije zavisnosti  $Q(J_0)$  javlja se usled izuzetno malih vrednosti  $\sigma_{0,i}$ ,  $\sigma_{1,i}$  i  $\mu_{0,i}$ . Za optimalnu gustinu struje, izobličenost talasne forme struje koja dolazi do SCH oblasti je mala i stoga dovodi do malih standardnih devijacija. Za druge, neoptimalne vrednosti (npr.  $J_0 = 7 \text{ kA/cm}^2$ ), ove vrednosti su mnogo veće, uključujući i srednju vrednost  $\mu_{1,i}$  raspodela nivoa 1. Međutim, kao što je već pokazano na slikama 3.16 (c) i (d), povećanje  $\mu_{1,i}$  neće nužno moći da nadoknadi značajno povećanje standardnih devijacija, što na kraju dovodi do smanjenja vrednosti  $Q$ -faktora [102].

Konačno, analizirana je zavisnost  $Q$ -faktora u odnosu na bitsku brzinu pri fiksnoj dubini modulacije  $\Delta J = 10 \text{ kA/cm}^2$  i ulaznoj optičkoj snazi od  $P_{\text{in}} = -10 \text{ dBm}$ , za tri različite vrednosti gustina struja koje odgovaraju nivoima bitova 0 i 1. Slika 3.19 (b) jasno pokazuje da povećanje bitske brzine generalno degradira  $Q$ -faktor i da funkcija  $Q$ -faktora monotono opada za slučaj bez parazitike. Smanjenje  $Q$ -faktora prisutno je i za model RSOA sa IPE, međutim, nije monotnog karaktera za sve kombinacije  $(J_0, J_1)$ . Umesto toga, ponekad ispoljava rezonantno ponašanje, koje je uzrokovano izraženošću pika 2. reda u funkciji prenosa modulacionog odziva. Kao što je već pokazano, položaj ovog rezonantnog pika, kao i propusni opseg RSOA sa IPE, menjaju se sa radnim uslovima RSOA. Ovo dalje objašnjava nestanak ili pomeranje maksimuma  $Q$ -faktora sa promenom  $(J_0, J_1)$ . Uprkos tome, za sve razmatrane vrednosti gustine struje,  $Q$ -faktor je dovoljno visok ( $Q \geq 7$ ) za širok opseg bitskih brzina, padajući ispod tog limita za bitske brzine veće od 10 Gb/s. Za niske vrednosti nivoa struje (4, 14), IPE poboljšava  $Q$ -faktor u odnosu na model bez parazitike, dok je za visoke vrednosti nivoa struje (8, 18) situacija obrnuta. Kada je reč o umerenim vrednostima nivoa struje (6, 16) IPE

### 3.4 Optimizacija modulacionog odziva RSOA-FCL

poboljšava  $Q$ -faktor u poređenju sa modelom bez parazitike za opseg bitskih brzina do 10 Gb/s, a zatim ponovo za opseg od 12 do 18 Gb/s. Međutim, najvažnije postignuće u ovom slučaju je da je vrednost  $Q$ -faktora, poboljšanog pomoću IPE dovoljno visoka ( $Q \geq 7$ ) za bitske brzine i do 14 Gb/s. Maksimum  $Q$ -faktora koji se javlja pri bitskoj brzini od 13 Gb/s nastaje zbog rezonancije parazitnog kola, što značajno povećava  $\mu_{1,i}$  i samim tim i  $Q$ -faktor [102].

Kao i svaka druga tehnika, i IPE ima svoja ograničenja. U slučaju da je interni propusni opseg prilično visok u odnosu na propusni opseg ekvivalentnog parazitnog kola predložena šema će biti neefikasna, jer će se parazitno kolo ponašati kao niskopropusni filter, što dovodi do ograničenja širine opsega. Isto važi i u suprotnom slučaju, tj. ako je propusni opseg parazitnog kola mnogo veći od internog, u tom slučaju bi ograničenje dolazilo od samog internog propusnog opsega. Međutim, ako je interni propusni opseg modulacije blizak propusnom opsegu parazitnog kola za uobičajene vrednosti parazitnih parametara, moguće je tražiti optimalnu vrednost induktivnosti ožičavanja koja, ako se pronađe, može obezbediti odgovarajući pik drugog reda, što vodi do daljeg značajnog poboljšanja propusnog opsega ili brzine prenosa podataka za dati BER. Sličan rezultat se može postići podešavanjem drugih parametara kola, ali većina njih su međusobno povezani i mogu uticati na druge osobine vezane za interni modulacioni odziv RSOA. Neki drugi parametri su teško promenljivi ili ne mogu pružiti neophodan raspon vrednosti, kao što je, na primer, kapacitivnost sekcije ožičavanja. Takođe, zbog mnogih parametara uključenih u model, teško je odabrati one ključne koji mogu dati jasnu indikaciju modulacionih performansi RSOA. Dodatno, pokazano je da značajan uticaj na propusni opseg imaju gustina struje polarizacije i ulazna optička snaga.

## 3.4 Optimizacija modulacionog odziva RSOA-FCL

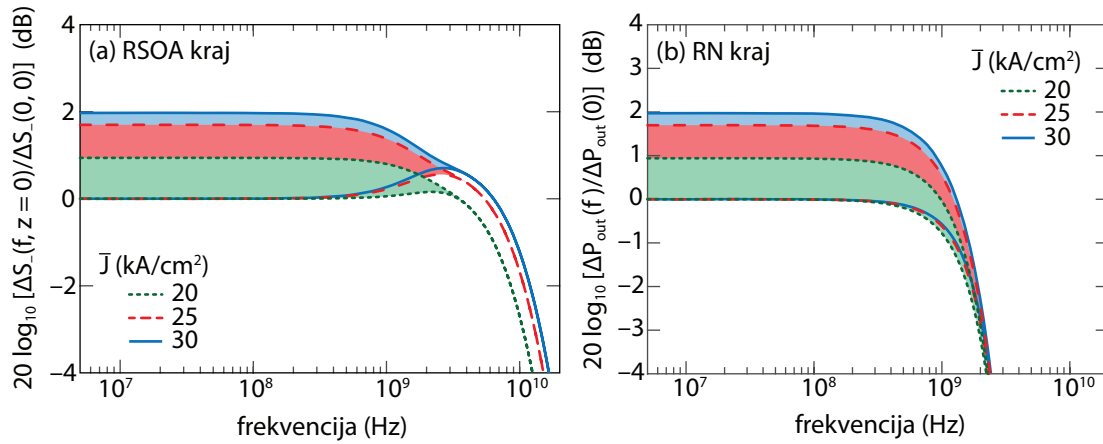
Nakon razmatranja uticaja parazitnih efekata na interni propusni opseg samostalnog RSOA, potrebno je ispitati uticaj ovih efekata na celokupni laserski sistem RSOA-FCL. U 3.1 data je analiza laserskog sistema za model RSOA koji kao aktivnu oblast koristi masivni poluprovodnik, pri čemu je razmatrana samo interakcija između fotona i nosilaca naelektrisanja u aktivnoj oblasti. U nastavku, sledi analiza modulacionog odziva i odgovarajućeg propusnog opsega RSOA-FCL, za model RSOA kod kog je aktivna oblast realizovana kao struktura višestrukih kvantnih jama, koji je opisan u potpoglavlju 2.2.2.

Na osnovu analize prikazane u potpoglavlju 3.1, funkcija modulacionog odziva RSOA-FCL ispoljava oscilatorni karakter, pa umesto brzo promenljive funkcije prenosa prikazujemo njene anvelope. Budući da donja anvelopa prva dostiže vrednost  $-3$  dB samo njena zavisnost od frekvencije je relevantna za određivanje propusnog opsega. Rezultati koji slede se odnose na model koji obuhvata OBPF centriran na  $\lambda_0 = 1550$  nm sa FWHM od 1 nm.

Na sl. 3.20 prikazan je interni modulacioni odziv za vlakno dužine  $L_f = 10$  km i tri vrednosti gustine struje polarizacije na izlazu iz RSOA ( $z = 0$ ) i na RN kraju vlakna ( $z = -L_f$ ). Slično kao u potpoglavlju 3.1, povećanje struje polarizacije dovodi do poboljšanja modulacione karakteristike na RSOA kraju vlakna [sl. 3.20 (a)]. Na RN kraju vlakna poboljšanje uzrokovano povećanjem struje nije primetno usled značajne disperzije koja ograničava propusni opseg vlakna [sl. 3.20 (b)]. Oscilacije



### 3.4 Optimizacija modulacionog odziva RSOA-FCL



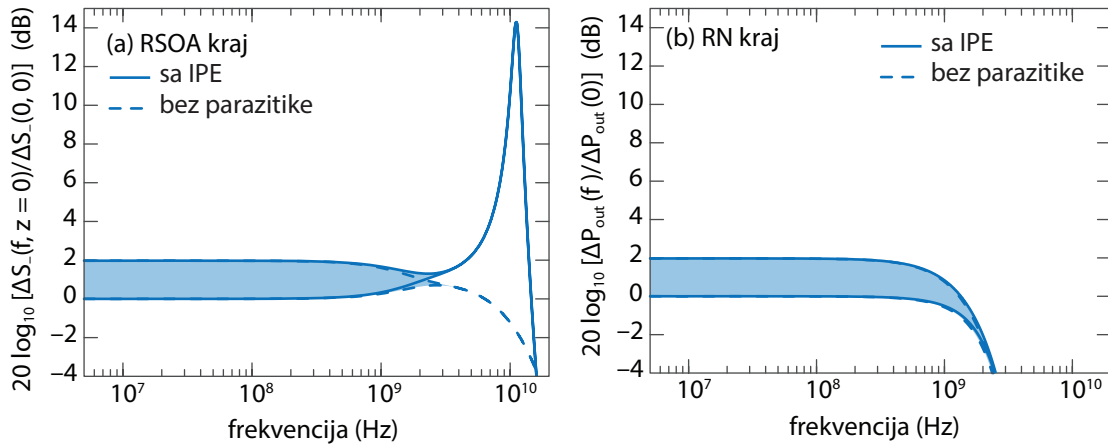
Slika 3.20: Modulacioni odziv RSOA-FCL sa aktivnom oblasti od višestrukih kvantnih jama na  $\lambda_0 = 1550$  nm, za dužinu vlakna  $L_f = 10$  km i tri vrednosti gustine struje polarizacije  $\bar{J} = \{20, 25, 30\}$  kA/cm<sup>2</sup>. Prikazani modulacioni odziv određen je za model RSOA-FCL bez uračunatih električnih parazitnih efekata na (a) RSOA i (b) RN kraju vlakna.

koje se ispoljavaju u funkciji modulacionog odziva postaju prigušene za frekvencije veće od granične frekvencije modulacionog odziva vlakna (sl. 2.2), što dovodi do spajanja gornje i donje anvelope u jednu. Kako su parametri koji utiču na propusni opseg vlakna konstantni za sve modulacione odzive prikazane na sl. 3.20, spajanje anvelopa dešava se pri istoj frekvenciji za sve vrednosti gustine struje.

Uticaj parazitike čipa pojačavača posmatra se kroz eksterni modulacioni odziv laserskog sistema, koji se određuje množenjem internog modulacionog odziva sa prenosnom funkcijom parazitnog električnog kola datom relacijom (2.125). Slika 3.21 uporedo prikazuje interni i eksterni modulacioni odziv lasera za vlakno dužine  $L_f = 10$  km i gustinu struje polarizacije  $\bar{J} = 30$  kA/cm<sup>2</sup> na RSOA (3.21 (a)) i RN (3.21 (b)) kraju vlakna. U potpoglavlju 3.2 pokazano je da ukoliko je granična frekvencija internog propusnog opsega RSOA reda veličine rezonantne frekvencije ekvivalentnog parazitnog kola, može doći do poboljšanja internog propusnog opsega efektom indukcionog pika. Kako je rezonantna frekvencija ekvivalentnog parazitnog kola prikazanog na sl. 2.4 reda veličine 10 GHz očekivano je da će doći do pobošanja internog propusnog opsega RSOA-FCL samo na RSOA kraju vlakna, gde je za date radne uslove vrednost internog propusnog opsega procenjena na 14 GHz (sl. 3.20 (a)). Na RN kraju vlakna vrednost internog propusnog opsega iznosi  $\approx 2$  GHz, pa se stoga pojava pika usled množenja internog modulacionog odziva funkcijom prenosa parazitnog kola dešava pri frekvencijama za koje je vrednost modulacionog odziva značajno ispod  $-3$  dB. Zbog toga je poboljšanje internog propusnog opsega na RN kraju vlakna ( $\Delta f_{3dB} = f_{3dB,ekst} - f_{3dB,int} \approx 0.16$  GHz) značajno manje od onog na RSOA kraju  $\Delta f_{3dB} \approx 1.25$  GHz.

S obzirom da je dužina vlakna jedan od faktora koji značajno utiču na propusni opseg vlakna (sl. 2.2), očekivano je da interni propusni opseg RSOA-FCL opada sa porastom dužine vlakna, kako je prethodno pokazano i u sekciji 3.1 (sl. 3.2). Međutim, ova razlika je mnogo izraženija na RN kraju vlakna, gde je modulacioni odziv u najvećoj meri ograničen propusnim opsegom samog vlakna. Posmatrajući vrednosti granične frekvencije  $f_{3dB}$  na oba kraja vlakna može se pretpostaviti da bi eksterni modulacioni odziv mogao biti veći od internog na RSOA kraju, dok bi neko značajnije poboljšanje usled IPE na RN kraju vlakna bilo moguće samo za manje dužine vlakna, pri kojima je  $f_{3dB}$

### 3.4 Optimizacija modulacionog odziva RSOA-FCL



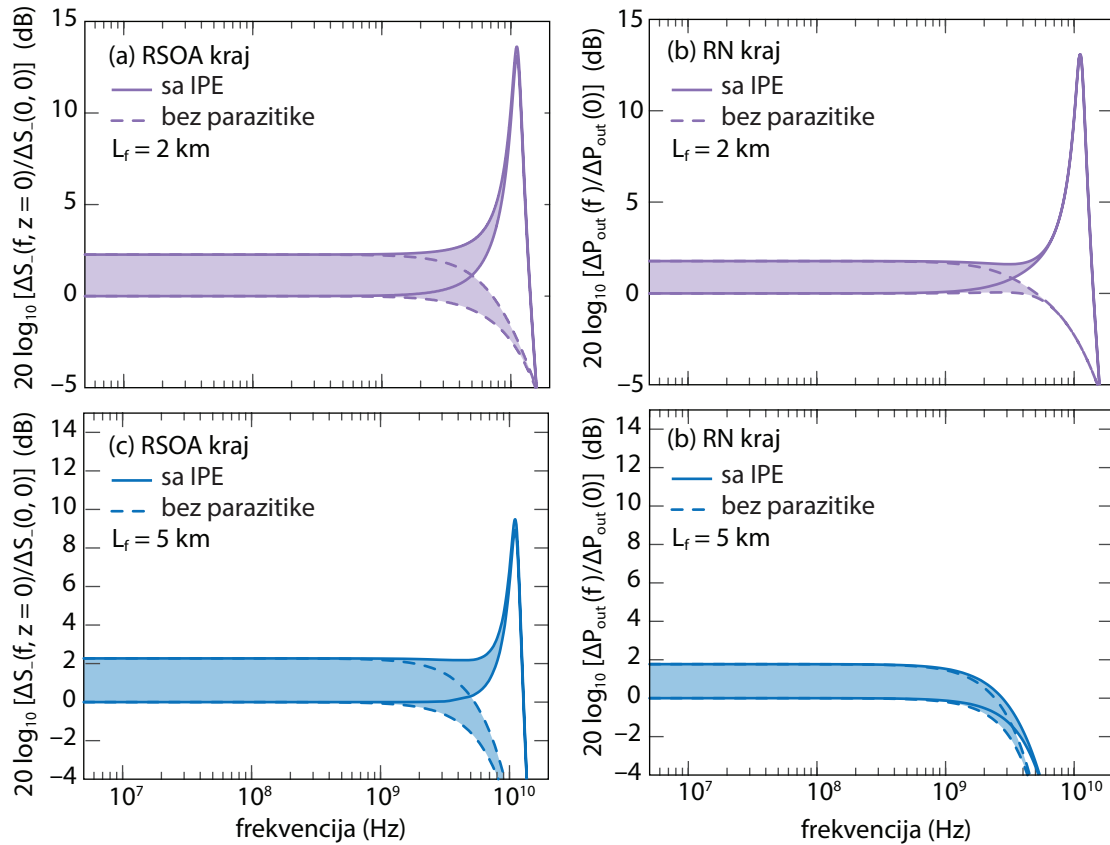
Slika 3.21: Modulacioni odziv RSOA-FCL na (a) RSOA i (b) RN kraju vlakna za fiksnu vrednost gustine struje polarizacije  $\bar{J} = 30 \text{ kA/cm}^2$  i dužine vlakna  $L_f = 10 \text{ km}$ . Isprekidanom linijom označeni su modulacioni odzivi modela RSOA-FCL bez uračunatih parazitnih efekata, dok su punom linijom označeni modulacioni odzivi modela RSOA sa IPE.

bliža vrednosti rezonantne frekvencije ekvivalentnog parazitnog kola. Ova konstatacija proističe iz pretpostavke da se rešenje za propusni opseg na kraju vlakna traži isključivo kroz unapređenje performansi RSOA. Međutim, u realnom sistemu, rešenje ovog problema bi se u režimu malih signala tražilo kroz kompenzaciju disperzije vlakna, što se u osnovi svodi na prethodno prikazanu analizu na talasnoj dužini 1310 nm, na kojoj je disperzija zanemarljiva i modulacione performanse RSOA-FCL su praktično određene samim RSOA koji za primenjen IPE obezbeđuje značajno poboljšanje. U režimu velikih signala od značaja bi bila primena naprednih sistema digitalne obrade signala ili naprednih modulacionih formata.

Kako bi se detaljnije ispitala pretpostavka pogodnosti manje dužine, na sl. 3.22 uporedo su prikazani interni i eksterni modulacioni odzivi na izlazu iz RSOA,  $z = 0$ , (sl. 3.22 (a), (c)) i RN kraju vlakna,  $z = -L_f$  (sl. 3.22 (b), (d)), za relativno male vrednosti dužine vlakna  $L_f = 2 \text{ km}$  i  $L_f = 5 \text{ km}$ . Za dužinu vlakna  $L_f = 2 \text{ km}$  (sl. 3.22 (a), (c)) jasno se vidi poboljšanje propusnog opsega efektom indukcionog pika, na oba kraja vlakna. Može se primetiti da su vrednosti  $f_{3\text{dB}}$  bliske za sve eksterne modulacione odzive kod kojih dolazi do pojave pika, pa stoga najveće poboljšanje eksternog propusnog opsega u odnosu na interni dolazi za najniže vrednosti  $f_{3\text{dB, int}}$ , što je u ovom slučaju na RN kraju vlakna (sl. 3.20 (c)). Sa druge strane, za dužinu vlakna  $L_f = 5 \text{ km}$  vrednost  $f_{3\text{dB}}$  internog modulacionog odziva nije dovoljno bliska rezonantnoj frekvenciji parazitnog elektricnog kola da bi došlo do značajnog poboljšanja usled pojave pika (sl. 3.22 (d)).

Bolji uvid u uticaj faktora kao što su gustina struje polarizacije, dužina vlakna i dužina aktivne oblasti RSOA na propusni opseg RSOA-FCL sistema biće dat u nastavku analize, posmatranjem zavisnosti graničnih frekvencija  $f_{3\text{dB}}$  u zavisnosti od pomenutih veličina za modele sa i bez uračunatih parazitnih efekata. Na sl. 3.23 prikazane su zavisnosti internog i eksternog propusnog opsega u zavisnosti od gustine struje polarizacije, za tri vrednosti dužine vlakna, na izlazu iz RSOA (sl. 3.23 (a)) i na RN kraju vlakna (sl. 3.23 (b)). Sa sl. 3.23 (a), može se primetiti da interni propusni opseg monotono raste sa porastom  $\bar{J}$  za sve prikazane vrednosti dužine vlakna. Sa druge strane, eksterni propusni opseg ispoljava blagi porast za niže vrednosti gustine struje, dok je za vrednosti struje

### 3.4 Optimizacija modulacionog odziva RSOA-FCL

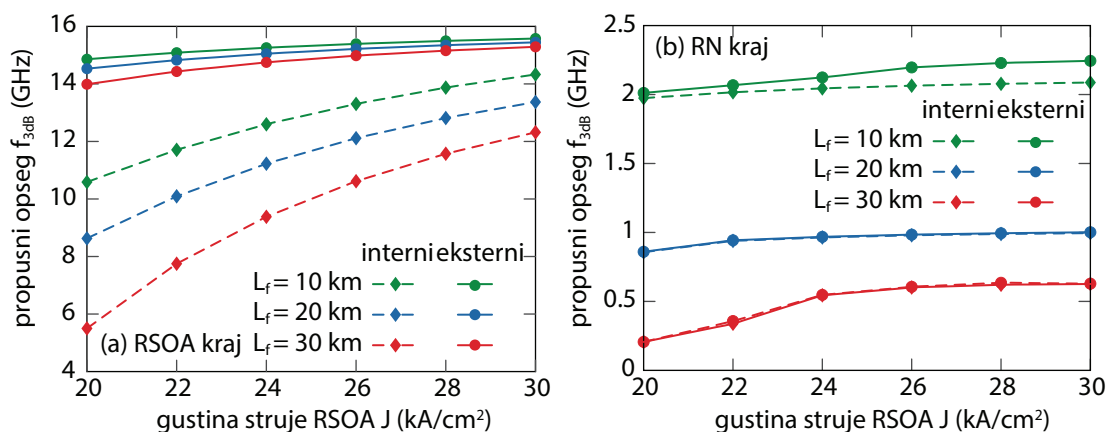


Slika 3.22: Modulacioni odziv RSOA-FCL za fiksnu vrednost gustine struje polarizacije  $\bar{J} = 20 \text{ kA/cm}^2$  i dve dužine vlakna,  $L_f = 2 \text{ km}$  (a), (c) i  $L_f = 5 \text{ km}$  (b), (d) na (a), (c) RSOA i (b), (d) RN kraju vlakna. Isprekidana linija označava model RSOA-FCL bez parazitike, a puna linija model RSOA-FCL sa IPE.

$\bar{J} > 25 \text{ kA/cm}^2$  funkcija zavisnosti skoro konstantna. Takođe, može se primetiti da su vrednosti  $f_{3\text{dB}}$  eksternog propusnog opsega veoma bliske za sve vrednosti  $L_f$ . Zbog toga, najveće poboljšanje eksternog u odnosu na interni propusni opseg dešava se za one slučajeve gde su vrednosti internog propusnog opsega najmanje, odnosno pri manjim gustinama struje polarizacije i većim dužinama vlakna. Kada se posmatra zavisnost  $f_{3\text{dB}}(\bar{J})$  na RN kraju vlakna (sl. 3.23 (b)) vidi se da su funkcije internog propusnog opsega skoro konstantne na celom domenu, osim za niže vrednosti struje i  $L_f = 30 \text{ km}$ , gde se ispoljava blagi porast. Na RN kraju vlakna parazitni efekti skoro da nemaju uticaj na interni propusni opseg za veće dužine vlakna, gde vrednosti  $f_{3\text{dB}}$  ne dosežu ni  $1 \text{ GHz}$ , što je za red veličine manje od rezonantne frekvencije parazitnog električnog kola. Za  $L_f = 10 \text{ km}$  može se primetiti blago poboljšanje eksternog modulacionog odziva u odnosu na interni, koje je reda veličine  $0.15 \text{ GHz}$ , pri visokim vrednostima gustine struje polarizacije.

Slika 3.24 prikazuje zavisnost internog i eksternog propusnog opsega od dužine vlakna  $L_f$ , za različite vrednosti gustine struje polarizacije na oba kraja vlakna. Za razliku od internog propusnog opsega za model RSOA-FCL sa aktivnom oblasti od masivnog poluprovodnika (sl. 3.4 (b)) koji skoro da ne zavisi od  $L_f$ , interni modulacioni odziv na izlazu iz RSOA, prikazan na sl. 3.24 (a) monotono opada sa porastom dužine vlakna, za sve vrednosti gustine struje polarizacije. Kako su vrednosti internog propusnog opsega na izlazu iz RSOA bliske rezonantnoj frekvenciji parazitnog kola dolazi do poboljšanja eksternog propusnog opsega u odnosu na interni za sve prikazane vrednosti  $\bar{J}$  i

### 3.4 Optimizacija modulacionog odziva RSOA-FCL



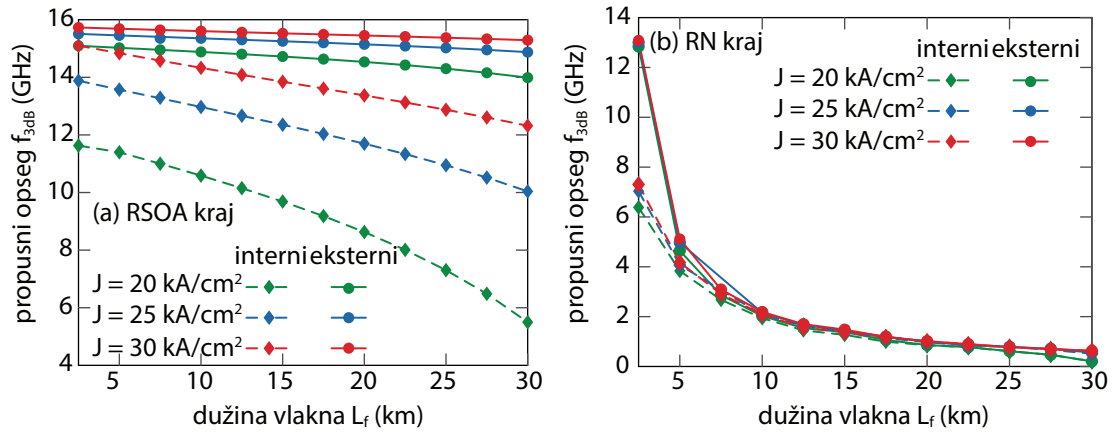
Slika 3.23: Propusni opseg  $f_{3dB}$  u zavisnosti od gustine struje polarizacije  $\bar{J}$  za tri vrednosti duzine vlakna  $L_f = \{10, 20, 30\}$  km na (a) RSOA i (b) RN kraju vlakna. Isprekidanom linijom označen je interni, a punom linijom eksterni 3 dB propusni opseg  $f_{3dB}$ .

$L_f$ , ali je poboljšanje najizraženije na većim dužinama vlakna za najnižu vrednost gustine struje polarizacije. Za srednje ka višim vrednostima gustine struje eksterni propusni opseg ne zavisi od duzine vlakna, dok za  $\bar{J} = 20 \text{ kA/cm}^2$  eksterni propusni opseg trpi blagi pad sa porastom  $L_f$ .

Kako je do sada pokazano, propusni opseg RSOA-FCL laserskog sistema ograničen je propusnim opsegom one sekcije (aktivne - RSOA, ili pasivne - vlakno) koja ima lošije performanse. U slučaju kada je disperzija značajna, propusni opseg vlakna je ograničavajući faktor i dužina vlakna značajno utiče na propusni opseg vlakna, a time i celog sistema. Za veliki opseg  $L_f$ , granična frekvencija propusnog opsega vlakna za red veličine je manja od rezonantne frekvencije parazitnog kola (sl. 2.2), pa se ne očekuje da efekat indukcionog pika ima značajan uticaj na RN kraju vlakna. Ipak, kako je pokazano na sl. 3.22 (c), za manje dužine vlakna može doći do značajnog poboljšanja eksternog propusnog opsega u odnosu na interni. Detaljniji uvid u uticaj duzine vlakna na interni i eksterni propusni opseg RSOA-FCL na RN kraju vlakna prikazan je na sl. 3.24 (b). Može se primetiti da za  $L_f < 7.5 \text{ km}$   $f_{3dB}$  naglo opada sa porastom duzine vlakna, za sve vrednosti gustine struje, ali i da na ovom opsegu  $L_f$ , eksterni propusni opseg ima značajno veće vrednosti nego interni. Za  $L_f > 7.5 \text{ km}$ , i interni i eksterni propusni opseg skoro linearno opadaju sa  $L_f$ , sa blagim nagibom. Pri tome, vrednosti skoro da ne zavise od vrednosti gustine struje.

U nastavku, sprovedena je analiza propusnog opsega RSOA-FCL laserskog sistema za različite dužine aktivne oblasti pojačavača  $L$ , u cilju određivanja uticaja  $L$  na  $f_{3dB}$  i ispitivanja mogućnosti za optimizaciju duzine aktivne oblasti, kako bi se postigao maksimalni propusni opseg. Zavisnost propusnog opsega od duzine aktivne oblasti RSOA, data je na sl. 3.25 za tri vrednosti gustine struje polarizacije  $\bar{J}$  i dužinu vlakna  $L_f = 10 \text{ km}$ . Posmatrani su interni i eksterni propusni opseg za opseg dužina aktivne oblasti od  $500 - 1200 \mu\text{m}$ , na izlazu iz RSOA ( $z = 0$ ), sl. 3.25 (a) i RN kraju vlakna ( $z = -L_f$ ), sl. 3.25 (b). Za manje  $L$ , interni propusni opseg raste monotono za sve vrednosti gustine struje, dok za visoke vrednosti struje i  $L > 800 \mu\text{m}$  funkcija  $f_{3dB}(L)$  ulazi u zasićenje. Kao što je već pomenuto, eksterni modulacioni odziv određuje se množenjem internog propusnog opsega sa funkcijom prenosa ekvivalentnog parazitnog kola, koja je konstantna za faktore kao što su gustina struje polarizacije i dužina vlakna, ali zavisi od duzine mikrostrip elektrode koja odgovara dužini

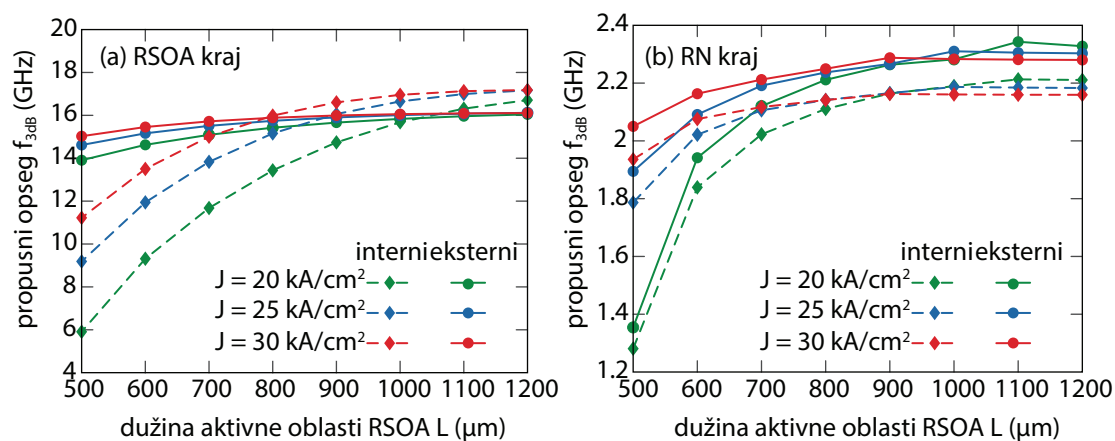
### 3.4 Optimizacija modulacionog odziva RSOA-FCL



Slika 3.24: Propusni opseg  $f_{3dB}$  u zavisnosti od dužine vlakna  $L_f$  za tri vrednosti gustine struje polarizacije  $\bar{J} = \{20, 25, 30\} \text{ kA/cm}^2$  na (a) RSOA i (b) RN kraju vlakna. Isprekidanom linijom označene su vrednosti  $f_{3dB}$  određene za model RSOA-FCL bez parazitike, a punom linijom za model RSOA-FCL sa IPE.

aktivne oblasti RSOA. Sa sl. 2.4 (b) može se videti da je rezonantna frekvencija parazitnog kola ista za sve vrednosti dužine aktivne oblasti RSOA, kao i da se sa povećanjem  $L$  povećava i amplituda pika i granična frekvencija modulacionog odziva kola. Takođe, može se primetiti da za vrednosti  $L > 800 \mu\text{m}$  modulacioni odzivi parazitnog kola imaju skoro identičan oblik. Zbog toga, eksterni propusni opseg prikazan na sl. 3.25 (a) (isprekidana linija), skoro da ne zavisi od dužine aktivne oblasti za  $L > 800 \mu\text{m}$ , dok interni propusni opseg (puna linija) raste na celom opsegu  $L$  i čak prevazilazi vrednosti eksternog propusnog opsega za veće  $L$ . Dužina aktivne oblasti za koju interni propusni opseg prevazilazi eksterni na RSOA kraju vlakna zavisi i od gustine struje polarizacije  $\bar{J}$ , pa je za niže vrednosti gustine struje  $f_{3dB,int} > f_{3dB,ekst}$  za dužine aktivne oblasti preko  $1000 \mu\text{m}$ , dok je za visoke struje ( $\bar{J} = 30 \text{ kA/cm}^2$ ) eksterni propusni opseg ispod vrednosti internog za  $L > 800 \mu\text{m}$ . Za niže vrednosti  $L$ , eksterni propusni opseg blago raste sa porastom  $L$  i obezbeđuje poboljšanje u odnosu na interni propusni opseg, koje je najizraženije za  $L = 500 \mu\text{m}$  i  $\bar{J} = 20 \text{ kA/cm}^2$ . Kada je reč o propusnom opsegu na RN kraju vlakna (sl. 3.25 (b)), može se primetiti da interni propusni opseg najpre brzo raste sa povećanjem  $L$ , dok za  $L > 800 \mu\text{m}$  polako ulazi u zasićenje. Takođe, dok za niže vrednosti  $L$  interni propusni opseg raste sa povećanjem gustine struje, za veće dužine aktivne oblasti situacija je obrnuta, odnosno za  $L > 1000 \mu\text{m}$  najveća  $f_{3dB}$  dobija se za  $\bar{J} = 20 \text{ kA/cm}^2$ , a isti trend prati i eksterni propusni opseg. Kako vrednost internog propusnog opsega na celom opsegu  $L$  nije dovoljno bliska rezonantnoj frekvenciji parazitnog kola da bi usled efekta indukcionog pika došlo do pojave pika u modulacionom odzivu uređaja u okolini granične frekvencije  $f_{3dB,int}$ , a time i do značajnog poboljšanja propusnog opsega. Poboljšanje propusnog opsega koje se ostvaruje je reda veličine  $0.12 \text{ GHz}$ .

### 3.4 Optimizacija modulacionog odziva RSOA-FCL



Slika 3.25: Propusni opseg  $f_{3dB}$  u zavisnosti od dužine aktivne oblasti RSOA  $L$  za tri vrednosti gustine struje polarizacije  $\bar{J} = \{20, 25, 30\} \text{ kA/cm}^2$  i fiksnu vrednost dužine vlakna  $L_f = 10 \text{ km}$  na (a) RSOA i (b) RN kraju vlakna. Isprekidanom linijom označene su vrednosti  $f_{3dB}$  određene za model RSOA-FCL bez parazitike, a punom linijom za model RSOA-FCL sa IPE.

# Glava 4

## Zaključak

Razvoj tehnologija koje nude jednostavna, energetski efikasna rešenja sa niskim kapitalnim i operativnim ulaganjima i troškovima, a koje mogu da obezbede dinamičku dodelu radnih talasnih dužina ključan je za primenu u narednim generacijama pasivnih optičkih mreža sa multipleksiranjem po talasnim dužinama (WDM-PON). Laseri na bazi refleksionog poluprovodničkog optičkog pojačavača i optičkog vlakna kao rezonatorske šupljine (RSOA-FCL) predstavljaju efikasno, tehnološki jednostavno i finansijski isplativo rešenje koje bi potencijalno moglo da zameni skupe komponente, kao što su laseri sa podesivom talasnom dužinom, u optičkim mrežnim jedinicama koje predstavljaju korisnički kraj pristupnih optičkih mreža. Ova vrsta optičkog predajnika zasniva se na primeni bezbojnog, tj širokopojasnog izvora kao što je refleksioni optički pojačavač, kome samo vlakno za distribuciju uz odgovarajući filter obezbeđuje rezonatorsku šupljinu za uspostavljanje laserskog režima rada i prenos informacija ka centrali. Ključni izazov realizacije RSOA-FCL kao predajnika u optičkim mrežnim jedinicama je pronalaženje metode kojom je moguće obezbediti da se modulacioni propusni opseg ovakvih uređaja dovoljno unapredi da bi se postigla prihvatljiva brzina prenosa informacija, koja u ovom trenutku nije adekvatna i značajno podriva njihovu masovnu upotrebu u pasivnim optičkim mrežama.

Kako bi se bolje razumeli limitirajući faktori modulacionih performansi RSOA-FCL potrebno je poznavati detaljnu zavisnost parametara kvaliteta od materijalnih i strukturnih osobina kao i radnih uslova pojedinačnih komponenti laserskog sistema, kao i celokupnog sistema. Zbog toga je potrebno je definisati detaljan i efikasan model RSOA kao samostalne komponente koji uračunava sve relevantne efekte prisutne u pojačavaču, a koji se odnose na interakciju nosilaca naelektrisanja i fotona. Model pojačavača treba dodatno proširiti modelom ekvivalentnog električnog kola koje uračunava doprinos samog poluprovodničkog čipa i njegovog pakovanja. Najčešće se pribegava odvojenoj detaljnoj analizi pojačavača i pojednostavljenoj analizi sistema kao celine, koja se zarad uštede vremena i računarskih resursa oslanja na uvođenje značajnog broja aproksimacija.

Doprinosi ove disertacije mogu se formulirati na sledeći način:

- Razvijen je detaljan matematičko-fizički model odziva refleksionog poluprovodničkog optičkog pojačavača koji pored interakcije nosilaca naelektrisanja i fotona u aktivnoj oblasti uračunava i kvazi-parazitne efekte same strukture - transportne efekte koji uključuju difuziju nosi-

laca, zarobljavanje i otpuštanje nosilaca u aktivnoj oblasti pojačavača. Takođe, napravljena je distinkcija između parametara kvaliteta modulacije RSOA koji je opisan detaljnim modelom i modelom gde su kvazi-parazitni (transportni efekti) zanemareni. Softverskom implementacijom razvijenog modela analizirani su modulacioni odziv u režimu malih signala i odgovarajući 3dB propusni opseg RSOA.

- Preispitano je opšte-prihvaćeno mišljenje da je sopstveni propusni opseg RSOA (koji ne uzima u obzir kvazi-parazitne transportne efekte) određen vremenom života nosilaca naelektrisanja. Pokazano je da je sopstveni 3dB propusni opseg dobro aproksimiran inverznim prostorno-usrednjenim efektivnim vremenom života nosilaca, u okviru režima rada van saturacije. Kako se RSOA približava pragu saturacije ova aproksimacija značajno potcenjuje vrednosti sopstvenog propusnog opsega. Iz ovoga se može zaključiti da sopstveni propusni opseg nije ono što ograničava modulacione performanse RSOA, odnosno da, u zavisnosti od dizajna i radnih uslova, postoji potencijal za unapređenje propusnog opsega u odnosu na vrednosti koje su eksperimentalno izmerene.
- Pokazano je da interni propusni opseg koji uzima u obzir kvazi-parazitne transportne efekte, iako niži od sopstvenog i dalje značajno viši od ekperimentalno merenih vrednosti ili onih vrednosti koje se dobijaju iz modela zasnovanog na vremenu života nosilaca naelektrisanja, u zavisnosti od ulazne optičke snage i gustine struje polarizacije. Međutim, ovaj zaključak se ne odnosi na veće debljine SCH oblasti, kada je usled izraženih transportnih efekata propusni opseg značajno potisnut. Ovo ukazuje na to da bi se pažljivim dizajnom strukture RSOA mogao ostvariti potencijal za značajno unapređenje internog propusnog opsega.
- Formiran je model RSOA koji razmatra uticaj parazitnih efekata čipa i pakovanja na modulacioni odziv zajedno sa uticajem transportnih, kvazi-parazitnih efekata. Na osnovu ovako definisanog modela određen je tzv. eksterni modulacioni odziv koji daje rezultate najpribližnije eksperimentalno određenim vrednostima. Efekti parazitike koji uzimaju u obzir čip i pakovanje RSOA analizirani su pomoću ekvivalentnog parazitnog kola koje uključuje uticaje ožičavanja čipa, RF i DC kontakata, mikrostrip elektrode i supstrata. Uticaj parazitnog kola za analizu propusnog opsega pri modulaciji u režimu malih signala razmatran je kroz simboličko određivanje funkcije prenosa u linearnim električnim kolima.
- Uočeno je da se, ukoliko se sekcija ožičavanja izuzme iz ekvivalentnog parazitnog kola, ostatak kola koji uključuje DC i RF kontakte, mikrostrip elektrodu i supstrat ponaša se kao filter propusnik opsega sa značajno velikim propusnim opsegom. To dovodi do skoro identičnog internog i eksternog modulacionog odziva i propusnog opsega i, u tom slučaju, propusni opseg RSOA je ograničen internim propusnim opsegom. Kada se u razmatranje uzme i uticaj sekcije ožičavanja, sa uobičajenim parametrima, moguća su dva ishoda. Ukoliko je rezonantna frekvencija poptunog parazitnog kola značajno niža od internog propusnog opsega, eksterni propusni opseg je ograničen propusnim opsegom parazitnog kola. Ovaj ishod je najčešći razlog niskih vrednosti propusnog opsega RSOA koje su zabeležene eksperimentalnim merenjem. Sa druge strane, ako je rezonantna frekvencija parazitnog kola reda veličine internog propusnog



opsega RSOA, eksterni propusni opseg se može poboljšati efektom induktivnog pika. Kako ekvivalentno parazitno kolo odgovara nisko-propusnom sistemu drugog reda, podešavanjem induktivnosti moguće je prilagoditi rezonantnu frekvenciju kola internom propusnom opsegu RSOA, kako bi došlo do poboljšanja propusnog opsega. Pokazano je da se promenom geometrijskih parametara aktivne oblasti RSOA direktno utiče na impedansu mikrostrip elektrode, čime se može uticati na pojavu pika u prenosnoj funkciji kola. Poboljšani eksterni propusni opseg RSOA može dostići vrednosti koje su reda veličine propusnog opsega standardnih poluprovodničkih lasera (8 – 12GHz).

- Analizirana je zavisnost eksternog propusnog opsega RSOA od radnih uslova i geometrijskih parametara strukture. Ako je propusni opseg parazitnog kola mnogo veći od internog propusnog opsega RSOA, eksterni propusni opseg je ograničen internim propusnim opsegom. U suprotnom, eksterni propusni opseg je ograničen propusnim opsegom parazitnog kola. Da bi se obezbedio dovoljno visok interni propusni opseg, potrebno je primeniti ili visoke struje polarizacije, visoke ulazne optičke snage ili veće dužine aktivne oblasti RSOA. Pri tome, potrebno je maksimalno smanjiti uticaj kvazi parazitnih - transportnih efekata u aktivnoj oblasti RSOA, npr. upotrebom optimizovanog dizajna strukture sa tankim SCH regijama.
- Prateći izvedene zaključke koji pokazuju prednosti koncepta indukcionog pika u proširenju propusnog opsega u režimu malih signala, analizirana je primena iste metode i na RSOA u režimu velikih signala. Kako bi se istakle prednosti tehnike indukcionog pika, rezultati dobijeni simulacijom modela RSOA koji uključuje IPE upoređeni su sa dostupnim rezultatima trenutnih vodećih rešenja tehnika ekvilizacije koje su implementirane u cilju postizanja boljih modulacionih performansi RSOA. Pored toga, rezultati su upoređeni i sa modelom RSOA bez uračunatih parazitnih efekata čipa i pakovanja. Pažljivim proučavanjem radnih uslova, pokazano je da su modulacione performanse optimizovane aktivne oblasti RSOA u režimu velikih signala uporedive sa modulacionim performansama standardne laserske diode. Pomoću novog, nekonvencionalnog pristupa modelovanja raspodele gustine verovatnoće superpozicijom odgovarajućeg broja Gausovih funkcija sa određenim težinskim koeficijentima, utvrđeni su osnovni mehanizmi kojima IPE utiče na poboljšanje modulacionih performansi, kao što su povećanje nivoa optičkog signala koji odgovara bitu 1 i suzbijanje disperzije bitova 0 i 1. Takođe, predložen je set smernica za iskorišćavanje IPE i identifikaciju njegovih ograničenja, otvarajući put za jeftino i jednostavno poboljšanje Q-faktora, posebno u kritičnom režimu niske ulazne optičke snage i niske do srednje gustine struje, čime se omogućava rad sa niskom potrošnjom energije.
- Proširenjem detaljnog modela samostalnog refleksionog optičkog pojačavača modelom optičkog vlakna formiran je kompletan matematičko-fizički model i softver za simulaciju celokupnog laserskog sistema RSOA-FCL. Sistem jednačina koji opisuje modulacioni odziv refleksionog pojačavača dopunjen je funkcijom prenosa optičkog vlakna, koja se određuje Furijeovom transformacijom impulsnog odziva vlakna. Ovime se uzimaju u obzir uticaj slabljenja i disperzije na propagaciju signala kroz vlakno, odnosno rezonator lasera. Model RSOA-FCL razma-

tran je sa i bez uračunatih efekata parazitike koji potiču od samog poluprovodničkog čipa i pakovanja u funkcionalno kućište kako bi se ustanovilo da li tehnika indukcionog pika može poboljšati modulacione performanse modela koji uključuje i optičko vlakno.

- Pokazano je da funkcija modulacionog odziva laserskog sistema RSOA-FCL ispoljava oscilatorni karakter u odnosu na frekvenciju modulacije, sa anvelopom koja odgovara standardnoj modulacionoj karakteristici poluprovodničkih lasera za male signale. Uzrok oscilacija u funkciji modulacionog odziva je grupno kašnjenje signala pri povratnom putu kroz distribuciono vlakno,  $\tau_{g0}(\lambda)$ . Zbog brzopromenljive modulacione karakteristike, pri određivanju propusnog opsega RSOA-FCL dovoljno je posmatrati samo donju anvelopu funkcije modulacionog odziva, budući da ona prva dostiže vrednost od 3dB.
- Pokazano je da je propusni opseg RSOA-FCL bez uračunatih parazitnih efekata ograničen onom sekcijom, RSOA ili optičko vlakno, koja ima slabije performanse. Kako propusni opseg vlakna prevashodno zavisi od proizvoda disperzije u vlaknu, dužine samog vlakna i širine spektralne linije OBPF filtra, povećanje bilo kojeg od ovih parametara može značajno ograničiti opusni opseg vlakna. Konkretno, u slučaju dugih vlakana sa izraženom disperzijom, propusni opseg RSOA-FCL je ograničen propusnim opsegom vlakna, dok u slučaju dovoljno kratkih vlakana propusni opseg laserskog sistema zavisi od propusnog opsega RSOA. Kada je disperzija slaba i kada propusni opseg FCL nije ograničen propusnim opsegom vlakna, povećanje struje polarizacije RSOA je glavni mehanizam za poboljšanje propusnog opsega RSOA-FCL. Pored toga, propusni opseg može biti dodatno poboljšan izborom optimalne dužine aktivne regije RSOA ili povećanjem dužine vlakna, ali samo za dovoljno visoke struje polarizacije RSOA.
- Pokazano je da tehnika indukcionog pika može poboljšati eksterni propusni opseg RSOA-FCL laserskog sistema u sistemu sa značajnom disperzijom, u onoj meri u kojoj je ispunjen uslov za indukciono pojačanje, odnosno uslov da je granična frekvencija internog modulacionog odziva bliska rezonantnoj frekvenciji ekvivalentnog parazitnog električnog kola. U slučaju kada je interni propusni opseg znatno manji od rezonantne frekvencije parazitnog kola može doći do veoma blagog poboljšanja eksternog propusnog opsega, zbog toga što se pik funkcije eksternog modulacionog odziva javlja na frekvencijama za koje je vrednost modulacionog odziva značajno ispod 3dB. Sa druge strane, ukoliko je granična frekvencija bliska rezonantnoj frekvenciji parazitnog kola i pik je izražen u opsegu radnih frekvencija, poboljšanje propusnog opsega može biti značajno. U sistemu sa izraženom disperzijom ovakvo poboljšanje postiže se za kraća vlakna. U tom slučaju, propusni opseg RSOA-FCL se može dodatno poboljšati povećanjem gustine struje polarizacije. Međutim, pod pretpostavkom da je u sistemu izvršena uobičajena kompenzacija disperzije, odziv RSOA-FCL će biti dominantno određen samim RSOA koji za primenjenu tehniku indukcionog pika obezbeđuje značajno povećanje propusnog opsega.

Detaljnim teorijskim modelovanjem i analizom uticaja tehnike indukcionog pika na modulacione performanse refleksionog poluprovodničkog optičkog pojačavača i celokupnog laserskog sistema

## *Zaključak*

prikazane su metode kojima je moguće prevazići limitirajuće faktore koji su nametnuti neizbežnim parazitnim efektima. Obradjena tema je od interesa za naučnu zajednicu aktivnu u ovoj oblasti, s obzirom na to da su RSOA prepoznati, usvojeni i korišćeni kao ključna tehnologija u mnogim modernim aplikacijama, a bezbojni izvori bazirani na refleksionm optičkim pojačavačima predstavljaju potencijalno efikasno i isplativo rešenje za primenu u budućim generacijama pasivnih optičkih mreža. U tu svrhu, predstavljena je detaljna studija koja uzima u obzir i ispituje odgovarajuće metrike na osnovu kojih se dolazi do korisnih smernica za poboljšanje propusnog opsega samog RSOA i RSOA-FCL laserskog sistema u meri koja je veća od one koja je do sada zabeležena u literaturi. Ovo ističe prikladnost i efikasnost predložene tehnike, koja se pokazala kao održivo tehnološko rešenje i može otvoriti nove perspektive u praktičnoj primeni i eksploataciji RSOA.

# Bibliografija

- [1] Y. Lu, and X. Zheng, “6G: A survey on technologies, scenarios, challenges, and the related issues,” *Journal of Industrial Information Integration*, vol. 19, 2020.
- [2] F. J. Effenberger and D. Zhang, “WDM-PON for 5G Wireless Fronthaul,” *IEEE Wireless Communications*, vol. 29, no. 2, pp. 94-99, April 2022.
- [3] C.L.M.P. Plazas, A. M. de Souza, D. R. Celino, and M. A. Romero, “Colorless WDM-PON fronthaul topology for beyond 5G C-RAN architectures,” *Optical Fiber Technology*, vol. 76, 2023.
- [4] D. R. Celino, U. R. Duarte, and M. A. Romero, “Improved self-seeding and carrier remodulation performance for WDM-PON by means of double RSOA erasure,” *Optics Communications*, vol. 459, 2020.
- [5] W. Jiang, B. Han, M. A. Habibi, and H. D. Schotten, “The Road Towards 6G: A Comprehensive Survey,” *IEEE Open Journal of the Communications Society*, vol. 2, pp. 334–366, 2021.
- [6] A. Totović, “Modeling of semiconductor optical amplifiers for optical access networks,” Ph.D. dissertation, University of Belgrade, 2018.
- [7] M. Ilyas and H. T. Mouftah, Eds., *The Handbook of optical communication networks*, CRC Press, 2003.
- [8] S. A. Gebrewold, “Reflective Semiconductor Optical Amplifiers (RSOAS) as colorless sources in access networks,” Ph.D. dissertation, University of Zurich, 2016.
- [9] J. Prat, Ed., *Next-Generation FTTH Passive Optical Networks: Research Towards Unlimited Bandwidth Access*, Springer Netherlands, 2008.
- [10] V. Khosia, “A Comprehensive Review of Recent Advancement in Optical Communication Networks,” *INTERNATIONAL JOURNAL OF COMPUTER SCIENCES AND ENGINEERING* vol. 6, pp. 617–626, 2018.
- [11] N. Ansari, and J. Zhang, “Media Access Control and Resource Allocation: For Next Generation Passive Optical Networks” Springer New York, NY, 2013.
- [12] L. G. Kazovsky, N. Cheng, W.-T. Shaw, D. Gutierrez, and S.-W. Wong, “Broadband Optical Access Networks,” John Wiley & Sons, 2011.

- [13] “Gigabit-capable Passive Optical Networks (G-PON): General characteristics,” ITU-T Recommendation G.984.1, 2003
- [14] “10-Gigabit-capable passive optical networks (XG-PON): General requirements,” ITU-T Recommendation G.987.1, 2010
- [15] “40-Gigabit-capable passive optical networks (NG-PON2): General requirements,” ITU-T Recommendation G.989.1, 2013
- [16] J. Wey, D. Nessel, M. Valvo, K. Grobe, H. Roberts, Y. Luo, and J. Smith, “Physical Layer Aspects of NG-PON2 Standards—Part 1: Optical Link Design [Invited],” *J. Opt. Commun. Netw.* vol. 8, pp. 33–42, 2016.
- [17] “10-Gigabit-capable symmetric passive optical network (XGS-PON),” ITU-T Recommendation G.9807.1, 2016
- [18] H. Gupta, P. Gupta, P. Kumar, A. K. Gupta and P. Kumar Mathur, “Passive Optical Networks: Review and Road Ahead,” *TENCON 2018 - 2018 IEEE Region 10 Conference, Jeju, Korea (South)* pp. 0919–0924, 2018.
- [19] N. Tanaka et al, “25.78-Gbit/s Burst-mode Receiver for 50G-EPON OLT,” *2020 Optical Fiber Communications Conference and Exhibition (OFC)* pp. 1–3, 2020.
- [20] F. J. Effenberger, “PON standardisation status and future prospects,” *45th European Conference on Optical Communication (ECOC 2019), Dublin, Ireland*, pp. 1-3, 2019.
- [21] R. Bonk, D. Geng, D. Khotimsky, D. Liu, X. Liu, Y. Luo, D. Nessel, V. Oksman, R. Strobel, W. Van Hoof, and J. Shan Wey, “50G-PON: The First ITU-T Higher-Speed PON System,” *IEEE Communications Magazine* vol. 60, pp. 48–54, 2022.
- [22] “50-Gigabit-capable passive optical networks (50G-PON): Physical media dependent (PMD) layer specification,” ITU-T Recommendation G.9804.3, 2021.
- [23] L. B. DU, F. C. Lam, “Super-PON: technology and standards for simplifying FTTH deployment,” *Conference: Photonic Networks and Devices 2020*.
- [24] M. Krstić, “Statical and dynamical characteristics of injection-locked Fabry-Pérot laser diodes,” Ph.D. dissertation, University of Belgrade, 2016.
- [25] G. Berrettini, G. Meloni, L. Giorgi, F. Ponzini, F. Cavaliere, P. Ghiggino, L. Potì, and A. Bogoni, “Colorless WDM-PON performance improvement exploiting a service-ONU for multiwavelength distribution,” *Optical Fiber Communication Conference, 2009. Technical Digest. OFC/NFOEC*, pp. OMN2-1–3, 2009.
- [26] W. Xu, L. Huang, Y. Xu, W. Jiang, W. Hu, G. Ke, and L. Yi, “SOA assisted wavelength reusing for 25G colorless PON with low-cost 10G EAM,” *IEEE Photonics Journal* vol. 14, pp. 1–1, 2022.

- [27] M. M. Krstić, J. V. Crnjanski, and D. M. Gvozdić, "Injection power and detuning-dependent bistability in Fabry–Perot laser diodes," *IEEE J. Sel. Topics Quantum Electron.*, vol. 18, no. 2, pp. 826–833, 2012.
- [28] S. A. Gebrewold, R. Bonjour, S. Barbet, A. Maho, R. Brenot, P. Chanclou, M. Brunero, L. Marazzi, P. Parolari, A. Totovic, D. Gvozdic, D. Hillerkuss, C. Hafner, and J. Leuthold, "Self-seeded RSOA-fiber cavity lasers vs. ASE spectrum-sliced or externally seeded transmitters – A comparative study," *Applied Sciences*, vol. 5, no. 4, pp. 1922–1941, 2015.
- [29] Q. Deniel et al., "Up to 10 Gbit/s transmission in WDM-PON architecture using external cavity laser based on self-tuning ONU," in *National Fiber Optic Engineers Conference*, paper JTh2A.55., 2012.
- [30] G. Simon *et al.*, "Observation of a random fiber laser induced by Rayleigh backscattering," *2014 International Semiconductor Laser Conference*, Palma de Mallorca, 2014, pp. 104–105.
- [31] A. Maho et al., "Demystification of the Self-Seeded WDM Access," *J. Lightwave. Technol.*, vol. 34, no. 2, pp. 776–782, 2016.
- [32] Y. Chien-Hung, and C. Chi-Wai, "Utilization of Reflective Semiconductor Optical Amplifier (RSOA) for Multiwavelength and Wavelength-Tunable Fiber Lasers," Ch. 8 in *Fiber Laser*, IntechOpen, 2016.
- [33] D. M. Gvozdić *et al.*, "Self-seeded RSOA fiber cavity laser and the role of Rayleigh backscattering - an analytic model," *J. Lightwave. Technol.*, vol. 35, no. 22, pp. 4845–4850, Nov. 2017.
- [34] A. Totović, J. Crnjanski, M. Krstić and, D. Gvozdić, "Quiescent points of self-seeded RSOA-FCL with Rayleigh backscattering feedback," VI International School and Conference on Photonics – PHOTONICA2017, Belgrade, Serbia, 2017, p. 149.
- [35] S. A. Gebrewold *et al.*, "Reflective-SOA fiber cavity laser as directly modulated WDM-PON colorless transmitter," *IEEE J. Sel. Topics Quantum Electron.*, vol. 20, no. 5, pp. 3100409, 2014.
- [36] L. A. Coldren, S. W. Corzine, and M. L. Mashanovitch, *Diode lasers and photonic integrated circuits*, 2<sup>nd</sup> Ed., John Wiley & Sons, Inc., 2012.
- [37] G. de Valicourt, "Next generation of optical access network based on reflective-SOA," in *Selected Topics on Optical Amplifiers in Present Scenario*, S. K. Garai, Ed., InTech, ch. 1, pp. 1–24, 2012.
- [38] G. de Valicourt, M. A. Violas, D. Wake, F. van Dijk, C. Ware, A. Enard, D. Maké, Z. Liu, M. Lamponi, G.-H. Duan, and R. Brenot, "Radio-over-fiber access network architecture based on new optimized RSOA devices with large modulation bandwidth and high linearity," *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, vol. 58, no. 11, pp. 3248–3258, 2010.

- [39] L. Marazzi *et al.*, “O-band 10-Gb/s operation of a reflective semiconductor optical amplifier based self-seeded transmitter for optical access applications,” *Fiber Integrated Opt.*, vol. 33, no. 3, pp. 137–183, 2014.
- [40] H. C. Shin *et al.*, “Reflective SOAs optimized for 1.25 Gbit/s WDM-PONs,” in *Proc. LEOS*, Rio Grande, Puerto Rico, vol.1, pp. 308–309, 2004
- [41] P. Chanclou *et al.*, “Demonstration of RSOA-based remote modulation at 2.5 and 5 Gbit/s for WDM PON,” in *Proc. OFC/NFOEC*, Anaheim, CA, pp. 1–3, 2007.
- [42] G. de Valicourt, D. Make, C. Fortin, A. Enard, F. Van Dijk, and R. Brenot, “10 Gbit/s modulation of reflective SOA without any electronic processing,” in *Proc. OFC/NFOEC*, Los Angeles, CA, pp. 1–3, 2011.
- [43] O. Kjebon *et al.*, “30 GHz direct modulation bandwidth in detuned loaded InGaAsP DBR lasers at 1.55 micron wavelength,” *Electronics Letters*, vol. 33, pp. 488–489, 1997.
- [44] K. Cho, B. Choi, Y. Takushima, Y. Chung, “25.78-Gb/s operation of RSOA for next-generation optical access networks,” *IEEE Photon. Technol. Lett.*, vol. 23, pp. 495–497, 2011.
- [45] H.-S. Kim, B.-S. Choi, K.-S. Kim, D. C. Kim, O.-K. Kwon, and D.-K. Oh, “Improvement of modulation bandwidth in multisection RSOA for colorless WDM-PON,” *Optics Express*, vol. 17, no. 19, pp. 16372–16378, 2009.
- [46] O. M. Kharraz, A. S. M. Supa’at, A. F. Abas, M. T. Alresheedi, and M. A. Mahdi, “Acceleration of carrier lifetime in gain-clamped semiconductor optical amplifiers,” *IEEE Photon. J.*, vol. 10, no. 5, pp. 7104613(13), 2018.
- [47] Rizou, Z.V. and Zoiros, K.E., 2018. “Theoretical analysis of directly modulated reflective semiconductor optical amplifier performance enhancement by microring resonator-based notch filtering.” *Applied Sciences*, 8(2), p.223.
- [48] J.-M. Kang and S.-K. Han, “A novel hybrid WDM/SCM-PON sharing wavelength for up- and down-link using reflective semiconductor optical amplifier,” *IEEE Photon. Technol. Lett.*, vol. 18, no. 3, pp. 502–504, 2006.
- [49] I. Papagiannakis *et al.*, “Investigation of 10-Gb/s RSOA-based upstream transmission in WDM-PONs utilizing optical filtering and electronic equalization,” *IEEE Photon. Technol. Lett.*, vol. 20, no. 24, pp. 2168–2170, 2008.
- [50] P. Zhou, W. Zhan, M. Mukaikubo, Y. Nakano, and T. Tanemura, “Reflective semiconductor optical amplifier with segmented electrodes for high-speed self-seeded colorless transmitter,” *Opt. Exp.*, vol. 25, no. 23, pp. 28547–28555, 2017.
- [51] K. Y. Cho *et al.*, “103-Gb/s long-reach WDM PON implemented by using directly modulated RSOAs,” *IEEE Photon. Technol. Lett.*, vol. 24, no. 3, pp. 209–211, 2012.

## Bibliografija

- [52] H. Kim, "10-Gb/s operation of RSOA using a delay interferometer," *IEEE Photon. Technol. Lett.*, vol. 22, no. 18, pp. 1379–1381, 2010.
- [53] T. Su *et al.*, "Improved 10-Gbps uplink transmission in WDM-PON with RSOA-based colorless ONUs and MZI-based equalizers," *Opt. Laser Technol.*, vol. 51, pp. 90–97, 2013.
- [54] M. Zhang, D. Wang, Z. Cao, X. Chen, and S. Huang, "Suppression of pattern dependence in 10Gbps upstream transmission of WDM-PON with RSOA-based ONUs," *Opt. Commun.*, vol. 308, pp. 248–252, 2013.
- [55] M. Presi *et al.*, "Enhanced 10 Gb/s operations of directly modulated reflective semiconductor optical amplifiers without electronic equalization," *Opt. Express*, vol. 20, no. 26, pp. B507–B212, 2012.
- [56] Y. Chung and Y. Takushima, "Optical Fiber Telecommunications VIB: Chapter 23. Wavelength-Division-Multiplexed Passive Optical Networks (WDM PONs)" Academic Press, 2013.
- [57] K. Cho, Y. Takushima, and Y. Chung, "10-Gb/s operation of RSOA for WDM PON," *IEEE Photon. Technol. Lett.*, vol. 20, pp. 1533–1535, 2008.
- [58] A. Agata and Y. Horiuchi, "RSOA-Based 10Gb/s WDM PON using FEC and MLSE equalizers," in "Optical Fiber Communication Conference," (Optical Society of America, 2010).
- [59] B. Schrenk, G. de Valicourt, M. Omella, J. Lazaro, R. Brenot, J. Prat, "Direct 10-Gb/s modulation of a single-section RSOA in PONs with high optical budget," *IEEE Photon. Technol. Lett.*, vol. 22, pp. 392–394, 2010.
- [60] T. Duong, et al, "Experimental demonstration of 10 Gbit/s upstream transmission by remote modulation of 1 GHz RSOA using adaptively modulated optical OFDM for WDM-PON single fiber architecture," 34<sup>th</sup> European Conference on Optical Communication, Brussels, 2008 pp. 1-2.
- [61] M. Omella, V. Polo, J. Lazaro, B. Schrenk, J. Prat, "10 Gb/s RSOA transmission by direct duobinary modulation," 34th European Conference on Optical Communication, Brussels, 2008, pp. 1-2.
- [62] P. Zhou, W. Zhan, M. Mukaikubo, Y. Nakano, and T. Tanemura, "Reflective semiconductor optical amplifier with segmented electrodes for high-speed self-seeded colorless transmitter," *Opt. Express*, vol. 25, pp. 28547–28555, 2017.
- [63] H. Kim, "10-Gb/s operation of RSOA using a delay interferometer," *IEEE Photon. Technol. Lett.*, vol. 22, pp. 1379–1381, 2010.
- [64] T. Su, et al, "Improved 10-Gbps uplink transmission in WDM-PON with RSOA-based colorless ONUs and MZI-based equalizers," *Opt. Laser Technol.*, vol. 51, pp. 90–97, 2013.



- [65] S. Bindhaiq, N. Zulkifli, A. Supaat, "The transmission of symmetric 40 Gb/s TWDM-based NG-PON2 utilizing delay interferometer for RSOA bandwidth enhancement," *Opt. Fiber Technol.*, vol. 30, pp. 65–71, 2016.
- [66] M. Zhang, D. Wang, Z. Cao, X. Chen, S. Huang, "Suppression of pattern dependence in 10 Gbps upstream transmission of WDM-PON with RSOA-based ONUs," *Opt. Commun.*, vol. 308, pp. 248–252, 2013.
- [67] M. Presi, et al "Enhanced 10 Gb/s operations of directly modulated reflective semiconductor optical amplifiers without electronic equalization," *Opt. Express*, vol.20, pp. B507–B512, 2012.
- [68] Z. Rizou, K. Zoiros, T. Houbavlis, "Operating speed extension of SOA external modulator using microring resonator," in: *Proceedings of Progress in Electromagnetics Research Symposium*, pp. 2399–2402, 2015.
- [69] K. Zoiros, P. Morel, "Enhanced performance of semiconductor optical amplifier at high direct modulation speed with birefringent fiber loop," *AIP Adv.*, vol. 4, pp. 077107, 2014.
- [70] K. Zoiros, P. Morel, M. Hamze, "Performance improvement of directly modulated semiconductor optical amplifier with filter-assisted birefringent fiber loop," *Microwave Opt. Technol. Lett.*, vol. 57, pp. 2247–2251, 2015.
- [71] Z. Rizou, K. Zoiros, T. Rampone, A. Sharaiha, "Reflective Semiconductor Optical Amplifier Direct Modulation Capability Enhancement Using Birefringent Fiber Loop," *Appl. Sci.*, vol. 10, pp. 5328, 2020.
- [72] P. Parolari, et al, "C- and O-band operation of RSOA WDM PON self-seeded transmitters up to 10 Gb/s," *J. Opt. Commun. Netw.*, vol. 7, pp. A249–A255, 2014.
- [73] T. Engel, Z.V. Rizou, K.E. Zoiros, P. Morel, "Semiconductor optical amplifier direct modulation with double-stage birefringent fiber loop," *Appl. Phys. B Lasers Opt.*, vol. 122, pp. 1–10, 2016.
- [74] A. Totović and D. Gvozdić, "Traveling-wave and reflective semiconductor optical amplifiers," in *Handbook of optoelectronic device modeling and simulation: Fundamentals, materials, nanostructures, LEDs, and amplifiers*, vol. 1, Ed. J. Piprek, ch. 21, CRC Press, 2017.
- [75] N. K. Dutta and Q. Wang, *Semiconductor optical amplifiers*, 2<sup>nd</sup> Ed., World scientific, 2013.
- [76] M. J. Connelly, *Semiconductor optical amplifiers*, Kluwer Academic Publishers, 2002.
- [77] A. R. Totović, J. V. Crnjanski, M. M. Krstić, M. L. Mašanović, and D. M. Gvozdić, "A self-consistent numerical method for calculation of steady-state characteristics of traveling-wave and reflective SOAs," *IEEE J. Sel. Topics Quantum Electron.*, vol. 19, no. 5, pp.3000411(11), 2013.
- [78] A. R. Totović, J. V. Crnjanski, M. M. Krstić, and D. M. Gvozdić, "Modelling of carrier dynamics in multi-quantum well semiconductor optical amplifiers," *Physica Scripta*, vol. 2012, no. T149, pp.014032, 2012.

- [79] A. T. Meney, B. Gonul, and E. P. O'Reilly, "Evaluation of various approximations used in the envelope-function method," *Physical Review B*, vol. 50, no. 15, pp. 10893–10904, 1994.
- [80] D. M. Gvozdić and U. Ekenberg, "Superefficient electric-field-induced spin-orbit splitting in strained p-type quantum wells," *Europhysics Letters*, vol. 73, no. 6, pp. 927–933, 2006.
- [81] G. Liu, and S.-L. Chuang, "Modeling of Sb-based type-II quantum cascade lasers," *Physical Review B*, vol. 65, no. 16, pp. 165220-1–10, 2002.
- [82] T. Keating, X. Jin, S. L. Chuang, and K. Hess, "Temperature dependence of electrical and optical modulation responses of quantum-well lasers," *IEEE Journal of Quantum Electronics*, vol. 35, no. 10, pp. 1526–1534, 1999.
- [83] R. Nagarajan, M. Ishikawa, T. Fukushima, R. S. Geels, and J. E. Bowers, "High speed quantum-well lasers and carrier transport effects," *IEEE J. Quantum Electron.*, vol. 28, no. 10, pp. 1990–2008, 1992.
- [84] C.-Y. Tsai, C.-Y. Tsai, Y.-H. Lo, R. Spencer, and L. F. Eastman, "Nonlinear gain coefficients in semiconductor quantum-well lasers: effects of carrier diffusion, capture, and escape," *IEEE J. Sel. Topics Quantum Electron.*, vol. 1, no. 2, pp. 316–330, 1995.
- [85] B. Romero, J. Arias, I. Esquivias, and M. Cada, "Simple model for calculating the ratio of the carrier capture and escape times in quantum-well lasers", *Appl. Phys. Lett.*, vol. 76, no. 12, pp. 1504–1506, 2000.
- [86] V. V. Lysak, H. Kawaguchi, I. A. Sukhoivanov, T. Katayama, and A. V. Shulika, "Ultrafast gain dynamics in asymmetrical multiple quantum-well semiconductor optical amplifiers," *IEEE J. Quantum Electron.*, vol. 41, no. 6, pp. 797–807, 2005.
- [87] L. V. T. Nguyen, A. J. Lowery, P. C. R. Gurney, and D. Novak, "A time-domain model for high-speed quantum-well lasers including carrier transport effects," *IEEE J. Sel. Topics Quantum Electron.*, vol. 1, no. 2, pp. 494–504, 1995.
- [88] J. Minch, S. H. Park, T. Keating, and S. L. Chuang, "Theory and experiment of  $\text{In}_{1-x}\text{Ga}_x\text{As}_y\text{P}_{1-y}$  and  $\text{In}_{1-x-y}\text{Ga}_x\text{Al}_y\text{As}$  long-wavelength strained quantum-well lasers," *IEEE J. Quantum Electron.*, vol. 35, no. 5, pp. 771–782, 1999.
- [89] M. Hammer, "1-D multilayer slab waveguide mode solver", available at <https://www.sio.eu/oms.html> [Accessed: July 08<sup>th</sup>, 2018]
- [90] M. Nadeem Akram *et al.*, "Experimental characterization of high-speed 1.55  $\mu\text{m}$  buried heterostructure InGaAsP/InGaAlAs quantum-well lasers," *J. Opt. Soc. Am. B*, vol. 26, no. 2, pp. 318–327, 2009.
- [91] A. R. Totović, J. V. Crnjanski, M. M. Krstić, and D. M. Gvozdić, "Numerical study of the small-signal modulation bandwidth of reflective and traveling-wave SOAs," *Journal of Lightwave Technology*, vol. 33, no. 13, pp. 2758–2764, 2015.

- [92] A. R. Totović, J. V. Crnjanski, M. M. Krstić, and D. M. Gvozdić, “An efficient semi-analytical method for modeling of traveling-wave and reflective SOAs,” *Journal of Lightwave Technology*, vol. 32, no. 11, pp. 2106–2112, 2014.
- [93] A. R. Totović, V. G. Levajac, and D. M. Gvozdić, “Electro-optical modulation bandwidth analysis for traveling-wave and reflective semiconductor optical amplifiers in transparency operating regime,” *Opt. Quant. Electron.*, vol. 48, no. 4, pp. 262, 2016.
- [94] R. Tucker and I. Kaminow, “High-frequency characteristics of directly modulated InGaAsP ridge waveguide and buried heterostructure lasers,” *J. Lightwave Technol.*, vol. 2, no. 4, pp. 385–393, 1984.
- [95] N. M. Shmidt, “Indium Phosphide (InP),” in *Handbook series on semiconductor parameters: Volume 1*, M. Levinshtein, S. Rumyantsev, and M. Shur, Eds., World Scientific, pp. 169–190, 1996.
- [96] E. Bogatin, *Signal and power integrity – simplified*, 2<sup>nd</sup> Ed., Pearson Education, Inc., 2009.
- [97] A. D. Fund *et al.*, “Metal layer losses in thin-film microstrip on LTCC,” *IEEE Trans. Compon. Packag. Manuf. Technol.*, vol. 4, no. 12, pp. 1956–1962, 2014.
- [98] H. Ghafouri-Shiraz, *The principles of semiconductor laser diodes and amplifiers: Analysis and transmission line laser modeling*, Imperial College Press, 2004.
- [99] H. Johnson and M. Graham, *High-speed signal propagation: Advanced black magic*, Pearson Education, Inc., 2003.
- [100] J. P. Babić, A. R. Totović, J. V. Crnjanski, M. M. Krstić, and D. M. Gvozdić, “Small-signal modulation response and -3 dB bandwidth of of reflective semiconductor optical amplifier based fiber fiber cavity laser,” *Optics Communications* , vol. 512, pp. 128057, 2022.
- [101] J. P. Babić, A. R. Totović, J. V. Crnjanski, M. M. Krstić, L. M. Mašanović and D. M. Gvozdić, “Enhancement of the MQW-RSOA’s small-signal modulation bandwidth by inductive peaking,” *J. Lightwave. Technol.*, vol. 37, pp. 1981–1989, 2019.
- [102] J. P. Babić, A. R. Totović, J. V. Crnjanski, M. M. Krstić, L. M. Mašanović and D. M. Gvozdić, “Exploiting Inductive Peaking for Enhancing the RSOA’s Large-Signal Modulation Performance,” *J. Lightwave. Technol.*, vol. 39, pp. 3502–3510, 2021.
- [103] J. P. Babić, A. R. Totović, J. V. Crnjanski, M. M. Krstić, and D. M. Gvozdić, “Large-Signal Modulation of an RSOA Enhanced by Inductive Peaking,” *VII International School and Conference on Photonics – PHOTONICA 2019*, Belgrade, pp. 154–154, 2019.
- [104] M. Omella, V. Polo, J. Lazaro, B. Schrenk, and J. Prat, “10 Gb/s RSOA transmission by direct duobinary modulation,” in *Proc. ECOC*, Brussels, pp. 1–2, 2008.
- [105] Le Nguyen Binh, *Advanced Digital Optical Communications*, 2<sup>nd</sup> Ed., CRC Press, 2017.

## *Bibliografija*

- [106] Z. I. Botev, J. F. Grotowski, and D. P. Kroese, "Kernel density estimation via diffusion," *Ann. Statist.*, vol. 38, no. 5, pp. 2916–2957, 2010.
- [107] D. Ye and W.-D. Zhong, "Improved BER monitoring based on amplitude histogram and multi-Gaussian curve fitting," *J. Opt. Netw.*, vol. 6, no. 6, pp. 584–598, 2007.

# Indeks skraćenica

**AMOOFD** *Adaptively Modulated Optical Orthogonal Frequency Division Multiplexing* – adaptivno modulirano optičko ortogonalno multipleksiranje po frekvenciji.

**AON** *Active Optical Network* – aktivna optička mreža.

**APD** *Avalanche Photodiode* – lavinska fotodioda.

**ASE** *Amplified Spontaneous Emission* – pojačana spontana emisija.

**ATM-PON** *Asynchronous Transfer Mode PON* – PON sa asinhronim režimom prenosa.

**BBU** *Baseband Unit* – jedinica za obradu baznog signala.

**BER** *Bit-Error Ratio* – verovatnoća greške.

**BPON** *Broadband PON* – širokopolasna pasivna optička mreža.

**BVP** *Boundary Value Problem* – konturni problem.

**C-RAN** *Centralized Radio Access Network* – centralizovana radio pristupna mreža.

**CW** *Continuous Wave* – signal konstantne snage.

**DBR** *Distributed Bragg Reflector* – laser sa distribuiranom Bragovom rešetkom.

**DC** *Duty Cycle* – faktor ispunjenosti bita.

**DF** *Distribution Fiber* – vlakno za distribuciju.

**DFB** *Distributed Feedback* – laser sa distribuiranom povratnom spregom.

**DFE** *Decision-Feedback Equalizer* – ekvilajzer sa povratnom spregom odlučivanja.

**DS** *Downstream* – dolazni signal.

**E/O** elektro-optička.

**ECL** *External Cavity Lasers* – laser sa eksternom rezonatorskom šupljinom.

**EPON** *Ethernet PON* – ethernet pasivna optička mreža.

## *Indeks skraćenica*

- FCL** *Fiber Cavity Laser* – laser sa optičkim vlaknom kao rezonatorskom šupljinom.
- FDM** *Finite Difference Method* – metod konačnih razlika.
- FEC** *Forward Error Correction* – korekcija greške unapred.
- FF** *Feeder Fiber* – vlakno za snabdevanje.
- FFE** *Feed-Forward Equalizer* – ekvilajzer sa unaprednom spregom.
- FTTB** *Fiber-to-the-Building* – vlakno-do-zgrade.
- FTTC** *Fiber-to-the-Curb* – vlakno-do-naselja.
- FFTH** *Fiber-to-the-Home* – vlakno-do-kuće.
- FTTx** *Fiber-to-the-x* – vlakno-do-x.
- FP-LD** *Fabry-Perot Laser Diode* – Fabri Pero laserska dioda.
- GEM** *GPON Encapsulated Method* – GPON metoda enkapsulacije.
- GPON** *Gigabit PON* – gigabitna pasivna optička mreža.
- IEEE** *Institute of Electrical and Electronics Engineers* – institut inženjera elektrotehnike i elektronike.
- IL FP-LD** *Injection Locked Fabry - Perot Laser Diode* – injekciono spregnuta Fabri - Pero laserska dioda.
- IPE** *Inductive Peaking Effect* – efekat indukcionog pika.
- ITU** *International Telecommunication Union* – međunarodna telekomunikaciona unija.
- KDE** *Kernel Density Estimator* – procena gustine raspodele pomoću funkcije - jezgra.
- MAC** *Multiple Access Control* – kontrola višestrukog pristupa.
- MGD** *Multi-Gaussian Distribution* – višestruka Gausova raspodela.
- MLSE** *Maximum Likelihood Sequence Estimation* – procena sekvence maksimalne verovatnoće.
- mMIMO** *massive Multiple Input Multiple Output* – sistem sa velikim brojem antena u predajniku i prijemniku.
- MQW** *Multiple Quantum Well* – višestruke kvantne jame.
- OAN** *Optical Access Network* – Optička pristupna mreža.
- OBPF** *Optical Band-Pass Filter* – optički filter propusnog opsega.

*Indeks skraćenica*

**ODN** *Optical Distribution Network* – optička distributivna mreža.

**OLT** *Optical Line Terminal* – optički linijski terminal.

**ONU** *Optical Network Unit* – optička mrežna jedinica.

**PDF** *Probability Density Function* – funkcija gustine verovatnoće.

**PON** *Passive Optical Network* – pasivna optička mreža.

**PtMP** *Point-to-Multipoint* – tačka-ka-više-tačaka prenos.

**PtP** *Point-to-Point* – tačka-tačka prenos.

**REAM** *Reflective Electro Absorption Modulator* – refleksioni elektro-apsorpcioni modulator.

**RN** *Remote Node* – udaljeno čvorište.

**RRU** *Remote Radio Unit* – udaljene radio jedinice.

**RSOA** *Reflective Semiconductor Optical Amplifier* – refleksioni poluprovodnički optički pojačavač.

**RSOA-FCL** *Reflective Semiconductor Optical Amplifier Fiber Cavity Laser* – laser na bazi RSOA i optičkog vlakna kao rezonatorske šupljine.

**RZ** *Return-to-Zero* – sa povratkom na nulu.

**SCH** *Separate Confinement Heterostructure* – razdvajajuće-ograničavajući heterostrukturalni region.

**SCNM** *Self-Consistent Numerical Method* – samosaglasni numerički metod.

**TDM** *Time Division Multiplexing* – multipleksiranje u vremenskom domenu.

**TDMA** *Time Division Multiple Access* – višestruki pristup u vremenskom domenu.

**TL** *Tunable Lasers* – laseri sa podesivom talasnom dužinom.

**US** *Upstream* – odlazni signal.

**VCSEL** *Vertical Cavity Surface Emitting Laser* – laser sa vertikalno realizovanim rezonatorom.

**WDM** *Wavelength Division Multiplexing* – multipleksiranje po talasnim dužinama.

**WGR** *Waveguide Grating Router* – optički talasovodni ruter.

# Biografija

Jovana P. Babić je rođena 20.01.1992. godine u Beogradu. Elektrotehnički fakultet upisala je 2011. godine. Diplomirala je na odseku za Fizičku elektroniku 2015. godine. Diplomski rad, pod nazivom "Uticaj neortogonalnosti talasnih funkcija na matrični element prelaza u poluprovodničkim kvantnim jamama" odbranila je u septembru 2015. godine sa ocenom 10. Diplomске akademske - master studije na Elektrotehničkom fakultetu u Beogradu, na Modulu nanoelektronika i fotonika upisala je u oktobru 2015. godine. Master rad, pod nazivom "Određivanje odnosa difuzione konstante i pokretljivosti u kvantnom kaskadnom laseru" odbranila je u septembru 2016. godine sa ocenom 10. Doktorske studije upisala je na Elektrotehničkom fakultetu u Beogradu, pri istom modulu u oktobru 2016. godine. Predmet istraživanja mast.inž. Jovane Babić predstavljaju FCL laseri, bazirani na refleksionom optičkom pojačavaču (RSOA) kao aktivnom medijumu (RSOA-FCL).

U periodu od jula 2018. godine do aprila 2020. godine radila je kao istraživač pripravnik na Elektrotehničkom fakultetu u Beogradu, na projektu "Fotonske komponente i Sistemi", pod pokroviteljstvom Ministarstva prosvete, nauke i tehnološkog razvoja. Od 2020. godine zaposlena je u kompaniji VELSER (prethodno Seven Bridges) na poziciji bioinformatičar.

Bila je predsednik i jedan od osnivača udruženja "Studentski deo Optičkog društva na Univerzitetu u Beogradu" koje se bavi promocijom optike i fotonike, a koji je studentski ogranak Optičkog društva (OSA).



## Изјава о ауторству

Име и презиме аутора Јована Бабић

Број индекса 2016/5010

### Изјављујем

да је докторска дисертација под насловом

Модулациони одзив ласера заснованог на спреси рефлексионог оптичког појачавача  
и оптичког влакна

- резултат сопственог истраживачког рада;
- да дисертација у целини ни у деловима није била предложена за стицање друге дипломе према студијским програмима других високошколских установа;
- да су резултати коректно наведени и
- да нисам кршио/ла ауторска права и користио/ла интелектуалну својину других лица.

### Потпис аутора

У Београду, 08.08.2024.

Јована Бабић

## Изјава о истоветности штампане и електронске верзије докторског рада

Име и презиме аутора Јована Бабић

Број индекса 2016/5010

Студијски програм наноелектроника и фотоника

Модулациони одзив ласера заснованог на спреси рефлексионог оптичког појачавача  
Наслов рада и оптичког влакна

Ментор др Јасна Црњански

Изјављујем да је штампана верзија мог докторског рада истоветна електронској верзији коју сам предао/ла ради похрањивања у **Дигиталном репозиторијуму Универзитета у Београду**.

Дозвољавам да се објаве моји лични подаци везани за добијање академског назива доктора наука, као што су име и презиме, година и место рођења и датум одбране рада.

Ови лични подаци могу се објавити на мрежним страницама дигиталне библиотеке, у електронском каталогу и у публикацијама Универзитета у Београду.

**Потпис аутора**

У Београду, 08.08.2024.

Јована Бабић

## Изјава о коришћењу

Овлашћујем Универзитетску библиотеку „Светозар Марковић“ да у Дигитални репозиторијум Универзитета у Београду унесе моју докторску дисертацију под насловом:

Модулациони одзив ласера заснованог на спрези рефлексионог оптичког појачавача и оптичког влакна

која је моје ауторско дело.

Дисертацију са свим прилозима предао/ла сам у електронском формату погодном за трајно архивирање.

Моју докторску дисертацију похрањену у Дигиталном репозиторијуму Универзитета у Београду и доступну у отвореном приступу могу да користе сви који поштују одредбе садржане у одабраном типу лиценце Креативне заједнице (Creative Commons) за коју сам се одлучио/ла.

1. Ауторство (CC BY)

2. Ауторство – некомерцијално (CC BY-NC)

3. Ауторство – некомерцијално – без прерада (CC BY-NC-ND)

4. Ауторство – некомерцијално – делити под истим условима (CC BY-NC-SA)

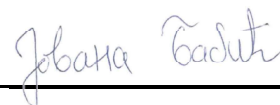
5. Ауторство – без прерада (CC BY-ND)

6. Ауторство – делити под истим условима (CC BY-SA)

(Молимо да заокружите само једну од шест понуђених лиценци.  
Кратак опис лиценци је саставни део ове изјаве).

**Потпис аутора**

У Београду, 08.08.2024.



1. **Ауторство.** Дозвољаваате умножавање, дистрибуцију и јавно саопштавање дела, и прераде, ако се наведе име аутора на начин одређен од стране аутора или даваоца лиценце, чак и у комерцијалне сврхе. Ово је најслободнија од свих лиценци.

2. **Ауторство - некомерцијално.** Дозвољаваате умножавање, дистрибуцију и јавно саопштавање дела, и прераде, ако се наведе име аутора на начин одређен од стране аутора или даваоца лиценце. Ова лиценца не дозвољава комерцијалну употребу дела.

3. **Ауторство - некомерцијално - без прерада.** Дозвољаваате умножавање, дистрибуцију и јавно саопштавање дела, без промена, преобликовања или употребе дела у свом делу, ако се наведе име аутора на начин одређен од стране аутора или даваоца лиценце. Ова лиценца не дозвољава комерцијалну употребу дела. У односу на све остале лиценце, овом лиценцом се ограничава највећи обим права коришћења дела.

4. **Ауторство - некомерцијално - делити под истим условима.** Дозвољаваате умножавање, дистрибуцију и јавно саопштавање дела, и прераде, ако се наведе име аутора на начин одређен од стране аутора или даваоца лиценце и ако се прерада дистрибуира под истом или сличном лиценцом. Ова лиценца не дозвољава комерцијалну употребу дела и прерада.

5. **Ауторство - без прерада.** Дозвољаваате умножавање, дистрибуцију и јавно саопштавање дела, без промена, преобликовања или употребе дела у свом делу, ако се наведе име аутора на начин одређен од стране аутора или даваоца лиценце. Ова лиценца дозвољава комерцијалну употребу дела.

6. **Ауторство - делити под истим условима.** Дозвољаваате умножавање, дистрибуцију и јавно саопштавање дела, и прераде, ако се наведе име аутора на начин одређен од стране аутора или даваоца лиценце и ако се прерада дистрибуира под истом или сличном лиценцом. Ова лиценца дозвољава комерцијалну употребу дела и прерада. Слична је софтверским лиценцама, односно лиценцама отвореног кода.