

Universidade Federal Fluminense

**Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica e de
Telecomunicações (PPGEET)**

Dissertação de Mestrado em Sistemas de Comunicações Ópticas



Marlon Medeiros Correia

**Estudo e Desenvolvimento de Lasers em Anel de Fibra Óptica em Regimes
Contínuo e Mode-Locking Com um Amplificador Óptico Semicondutor
(SOA) Como Meio de Ganho**

Niterói

2019

Marlon Medeiros Correia

“Estudo e Desenvolvimento de Lasers em Anel de Fibra Óptica em Regimes Contínuo e Mode-Locking Com um Amplificador Óptico Semicondutor (SOA) Como Meio de Ganho”

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós Graduação em Engenharia Elétrica e de Telecomunicações da Universidade Federal Fluminense como requisito parcial para a Obtenção do Grau de Mestre em Engenharia Elétrica e de Telecomunicações. Área de concentração: Sistemas de Telecomunicações.

Orientador: Prof. Dr. Ricardo Marques Ribeiro

Niterói
(Fevereiro/2019)

Ficha catalográfica automática - SDC/BEE
Gerada com informações fornecidas pelo autor

C824e Correia, Marlon Medeiros
 Estudo e Desenvolvimento de Lasers em Anel de Fibra Óptica em
 Regimes Contínuo e Mode-Locking Com um Amplificador Óptico
 Semicondutor (SOA) Como Meio de Ganho / Marlon Medeiros Correia ;
 Ricardo Marques Ribeiro, orientador. Niterói, 2019.
 127 f. : il.

 Dissertação (mestrado)-Universidade Federal Fluminense,
 Niterói, 2019.

 DOI: <http://dx.doi.org/10.22409/PPGEET.2019.m.14520845726>

 1. Comunicações Ópticas. 2. Amplificador Óptico
 Semicondutor. 3. Lasers. 4. Óptica não-linear. 5. Produção
 intelectual. I. Ribeiro, Ricardo Marques, orientador. II.
 Universidade Federal Fluminense. Escola de Engenharia. III.
 Título.

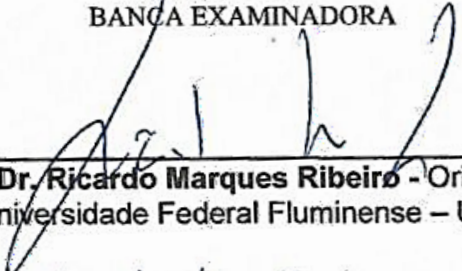
CDD -

MARLON MEDEIROS CORREIA

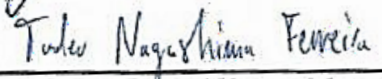
"Estudo e Desenvolvimento de Lasers em Anel de Fibra Óptica em Regimes Contínuo e Mode-Locking com um Amplificador Óptico Semicondutor (SOA) como Meio de Ganho"

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós Graduação em Engenharia Elétrica e de Telecomunicações da Universidade Federal Fluminense como requisito parcial para a Obtenção do Grau de Mestre em Engenharia Elétrica e de Telecomunicações.
Área de concentração: Sistemas de Telecomunicações.

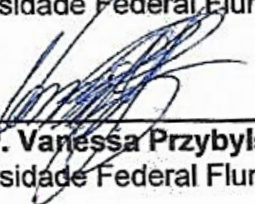
BANCA EXAMINADORA



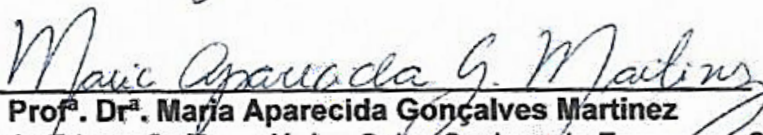
Prof. Dr. Ricardo Marques Ribeiro - Orientador
Universidade Federal Fluminense – UFF



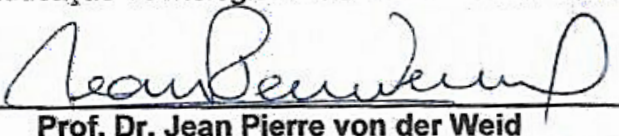
Prof. Dr. Tadeu Nagashima Ferreira
Universidade Federal Fluminense – UFF



Prof. Dr. Vanessa Przybylski Ribeiro Magri
Universidade Federal Fluminense – UFF



Prof. Dr. Maria Aparecida Gonçalves Martinez
Centro Federal de Educação Tecnológica Celso Suckow da Fonseca – CEFET/RJ



Prof. Dr. Jean Pierre von der Weid
Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro – PUC/RJ

Niterói
(Fevereiro/2019)

Agradecimentos

Primeiramente gostaria de agradecer a Deus por me dar força para superar minhas maiores dificuldades e pela sua constante presença na minha vida.

Ao meu grande Orientador Dr. Ricardo Marques Ribeiro na qual me orgulho muito por ter me acolhido como orientando, pela sua enorme paciência no esclarecimento das minhas dúvidas e por todo suporte dado a mim para que este trabalho pudesse ser realizado.

A toda minha família e meu pai José Manuel Fernandes de N. Correia que sempre me incentivou e demonstrou total apoio para comigo e meus estudos.

Aos meus colegas do LaCOP e ao professor Vinícius Nunes Henrique pelo auxílio no desenvolvimento deste trabalho e pelos momentos de descontração.

Ao CNPQ pela bolsa de Pós-Graduação com nº de processo 134450/2017-5

Dedico este Trabalho principalmente em memória de minha mãe Maria de Lourdes M. Correia e irmã Cristine Medeiros Correia que infelizmente não puderam presenciar e compartilhar este momento de alegria e felicidade.

“Existe uma coisa que uma longa existência me ensinou:
toda a nossa ciência, comparada à realidade,
é primitiva e inocente; e, portanto,
é o que temos de mais valioso.”

Albert Einstein

Resumo

Esta dissertação de mestrado consiste em realizar o estudo e desenvolvimento de três dispositivos lasers à fibra óptica em configuração de anel utilizando um amplificador óptico semicondutor (SOA - *Semiconductor Optical Amplifier*) como meio de ganho.

Inicialmente, este trabalho, descreve a caracterização estática de um SOA não usual, concebido, desenvolvido e manufaturado pela Kamelian (UK), modelo 1550 nm *Nonlinear* SOA. Este último, foi construído para apresentar um alto grau de não-linearidade óptica com 25 ps de tempo de recuperação do ganho. Assim são descritas algumas medidas de caracterização estática do SOA tal como corrente de transparência, espectro ASE (*Amplified Spontaneous Emission*), curvas potência óptica x corrente, ganho saturado e curvas de amplificação.

Após realizada a caracterização do SOA, a segunda etapa deste trabalho consiste na montagem e testes de um laser em onda contínua, sintonizável, formado por um anel de fibra óptica contendo SOA como meio de ganho. Um filtro óptico passa-banda (BPF – *Band Pass Filter*) com $< 1,2$ nm @ 3 dB de largura inserido no anel e ajustável manualmente, foi usado para realizar a referida sintonização ao longo da banda espectral de 45 nm de largura (1520-1565 nm). Obteve-se potências ópticas de saída de até 5 mW com largura espectral $< 0,02$ nm, abaixo do limite de resolução do analisador de espectro óptico utilizado.

O trabalho segue para uma terceira fase, onde uma nova montagem é realizada. Nesta etapa realizou-se a montagem e testes de um laser em onda contínua, formado por um anel de fibra óptica monomodo contendo um SOA como meio de ganho. Um filtro óptico consistindo de 6 m de fibra óptica multimodo foi inserido no anel. Tal tipo de filtro é conhecido como MMI (*Multimode-Interference*) e é capaz de transmitir um pente de frequências ópticas na banda em torno de 1550 nm. Com a inclusão deste último e a sua estabilização modal, obteve-se um dispositivo laser capaz de gerar simultaneamente dois comprimentos de onda separados por cerca de ~ 2 nm, potencialmente útil para gerar ondas milimétricas ou terahertzianas via batimento óptico. Foi também possível obter estabilização espectral e uniformidade no espaçamento espectral ao incluir um misturador de modos (MS) logo no início da fibra óptica multimodo.

Por fim, o trabalho segue para quarta e última fase, onde novamente uma nova montagem é realizada. Nesta etapa realizou-se a montagem e testes de um laser em figura-de-oito operando no regime de modo travado passivo (*passive mode locking*), que é formado por

um anel de fibra óptica monomodo contendo um SOA como meio de ganho. Um filtro óptico passa-banda (BPF) com $< 1,2 \text{ nm @ } 3 \text{ dB}$ de largura é inserido no anel e ajustável manualmente para realizar a referida sintonização ao longo da banda espectral de 45 nm de largura (1520-1565 nm). O regime *mode-locking* poderá ser atingido desde que tenhamos um laser em multimodo longitudinal. Obteve-se travamento dos modos longitudinais (*Mode Locking*) e taxa de repetição dos pulsos na frequência fundamental de 11 MHz com pulsos espaçados de $\sim 90 \text{ ns}$, corrente limiar de travamento de modo em 100 mA e excitação do 5º harmônico (55 MHz), permitindo também a operação de pulsos *mode-locking* com taxa de repetição de frequências harmônicas (*Harmonic Mode-Locking*).

Palavras-chaves: *Comunicações Ópticas; Amplificador Óptico Semicondutor; Lasers; Óptica não-linear; Dispositivos Ópticos; Filtro Óptico; Interferência Multimodal; Harmonic Mode Locking.*

Abstract

This master's thesis consists of performing the study and development of three laser device lasers in ring configuration using a semiconductor optical amplifier (SOA) as a means of gain.

Initially, this work describes the static characterization of an unusual SOA, designed, developed and manufactured by Kamelian (UK), model 1550 nm Nonlinear SOA. The latter was constructed to present a high degree of optical non-linearity with 25 ps gain recovery time. Thus, some measures of static characterization of SOA such as transparency current, ASE (Amplified Spontaneous Emission) spectrum, optical power x current curves, saturated gain and amplification curves are described.

After performing the SOA characterization, the second stage of this work consists of the assembly and testing of a tunable continuous wave laser, formed by a fiber optic ring containing SOA as a means of gain. A band pass filter (BPF) of <1.2 nm @ 3 dB in width was inserted into the ring and manually adjustable. It was used to perform the said tuning along the 45 nm wide spectral band (1520 -1565 nm). Optical output powers of up to 5 mW were obtained with FWHM <0.02 nm, below the resolution range of the optical spectrum analyzer used.

The work goes on to a third phase, where a new assembly is performed. In this stage, the assembly and testing of a continuous wave laser, formed by a single-mode fiber optic ring containing an SOA as the gain medium. An optical filter consisting of 6 m of multimode optical fiber was inserted into the ring. Such a filter is known as MMI (Multimode-Interference) and is capable of transmitting an optical frequency comb in the band around 1550 nm. With the inclusion of the latter and its modal stabilization, a laser device capable of simultaneously generating two wavelengths separated by about ~ 2 nm was obtained, which was potentially useful for generating millimetric or terahertzian waves via optical beating. It was also possible to obtain spectral stabilization and uniformity in spectral spacing by including a mode scrambler (MS) early in the multimode fiber optic.

Finally, the work goes on to the fourth and last phase, where again a new assembly is performed. In this step we performed the assembly and testing of a figure-of-eight laser operating in the passive mode locking, which is formed by a single-mode fiber optic ring containing an SOA as a gain medium. A bandpass optical filter (BPF) of <1.2 nm @ 3 dB in width is inserted into the ring and manually adjustable to perform said tuning along the 45 nm

wide (1520-1565 nm) spectral band. The mode-locking regime can be achieved as long as we have a longitudinal multimode laser. Mode locking and pulse repetition rate at the fundamental frequency of 11 MHz were obtained with pulses spaced at ~ 90 ns, mode locking threshold current at 100 mA and excitation of the 5th harmonic (55 MHz), allowing also the operation of mode-locking pulses with a harmonic frequency repetition rate (Harmonic Mode-Locking).

Keywords: *Optical Communications; Semiconductor Optical Amplifier; Lasers; non-linear Optics; Optical Devices; Optical Filter; Multimode Interference; Harmonic Mode Locking.*

Lista de Figuras

Figura 2.1 Emissão estimulada [17].....	7
Figura 2.2 Cavidade óptica ressonante [18].....	8
Figura 2.3 Largura espectral de um laser Fabry-Perrot [16].....	9
Figura 2.4 Modos longitudinais [16].....	10
Figura 2.5 Representação da origem das bandas de condução e valência nos materiais semicondutores [16].....	11
Figura 2.6 Diodo laser baseado em homoestrutura [19].....	13
Figura 2.7 Diodo laser baseado em heteroestrutura [19].....	13
Figura 2.8 Função de transferência de um diodo laser semicondutor [16].....	14
Figura 2.9 Impacto do aumento de temperatura na função transferência de um diodo laser [20].....	15
Figura 2.10 Impacto da variação de temperatura no espectro emitido [20].....	15
Figura 2.11 ASE e estrutura de um SOA TWA [21].....	16
Figura 2.12 Laser em anel de fibra óptica utilizando o SOA como meio de ganho.....	17
Figura 2.13 Esquemático de uma estrutura SMS [14].....	19
Figura 2.14 Laser em anel de fibra óptica com emissão de duplo comprimento de onda com SOA como meio de ganho e filtro MMI.....	20
Figura 2.15 Representação da variação dos parâmetros do Q-Switching [16].....	22
Figura 2.16 Resposta do absorvedor saturável [16].....	23
Figura 2.17 Efeito do somatório dos modos longitudinais na potência de saída irradiada pelo Laser [16].....	24

Figura 2.18 Trem de pulsos retangulares [16].....	25
Figura 3.1 SOA Kamelian modelo não-linear com encapsulamento <i>butterfly</i>	28
Figura 3.2 Esquema da Montagem experimental para determinar a banda de ganho do SOA.....	29
Figura 3.3 Espectros ASE gerados pelo SOA em função da corrente de polarização (<i>bias</i>) DC aplicada.....	29
Figura 3.4 Montagem experimental para determinar a corrente de transparência do SOA.....	31
Figura 3.5 Gráfico que determina a corrente de transparência do SOA Kamelian SOA-NL-L1-W-ZZ.....	31
Figura 3.6 Montagem experimental para determinar a curva de amplificação do SOA em função do comprimento de onda.....	32
Figura 3.7 Curva de ganho de amplificação do SOA em função do comprimento de onda na faixa 1520-1630 nm considerando alguns valores de I_{bias} e $P_{in} = 0,1$ mW.....	33
Figura 3.8 Montagem experimental utilizada para visualização da seletividade do BPF.....	34
Figura 3.9 Espectro de transmitância do filtro BPF <i>lightwaves2020</i>	35
Figura 3.10 Montagem experimental utilizada para obter a função transferência do SOA com BPF sintonizado.....	35
Figura 3.11 Função de transferência ($P \times I_{bias}$) do SOA com sintonização espectral realizada pelo BPF.....	36
Figura 4.1 Esquema e foto da montagem experimental do laser em onda contínua, sintonizável, em anel de fibra óptica com SOA como meio de ganho óptico.....	38
Figura 4.2 Dependência da potência óptica de saída do laser em anel emitindo em 1550 nm em função da corrente de polarização e parametrizado pela razão de acoplamento (extração de luz do anel) de 11/89 até 80/20.....	39
Figura 4.3 Dependência da corrente limiar do laser em anel como função da razão de acoplamento (extração de luz do anel).....	40
Figura 4.4 Espectro emitido pelo dispositivo com circuito óptico em aberto e na topologia em anel.....	41

Figura 4.5 Sintonização espectral do laser em anel conforme pode ser coberto pelo ajuste do filtro BPF com $I_{bias} = 50$ mA.....	41
Figura 4.6 Espectro elétrico do laser em anel mostrando o modo longitudinal fundamental e alguns de seus harmônicos (2° ao 7°)	43
Figura 5.1 Espectro do SOA para $I_{bias} = 280$ mA.....	44
Figura 5.2 Montagem experimental para realizar a caracterização espectral de transmitância da estrutura SMS com 6 metros de fibra MM.....	45
Figura 5.3 Espectro normalizado transmitido por uma estrutura SMS com 6 m de comprimento de fibra óptica MM. Pode-se notar um pente de frequências ópticas com 16 picos não-equiespaçados em comprimento de onda.....	45
Figura 5.4 Espaçamento entre os 16 picos em comprimento de onda gerados dentro da banda 1450-1650 nm pela estrutura SMS.....	46
Figura 5.5 Montagem experimental para realizar a caracterização espectral de transmitância da estrutura SMS com 6 metros de fibra MM e MS inserido no final da estrutura.....	46
Figura 5.6 Espectro normalizado transmitido por uma estrutura SMS com MS inserido no final e 6 m de comprimento de fibra óptica MM. Observa-se 27 picos principais quase que perfeitamente equiespaçados em comprimento de onda. Pode-se notar que alguns dos picos apresentam uma estrutura fina.....	47
Figura 5.7 Espaçamento entre os 50 picos de comprimento de onda (incluindo as estruturas finas) gerados dentro da banda 1450-1650 nm com MS inserido no final da estrutura SMS..	47
Figura 5.8 Montagem experimental para realizar a caracterização espectral de transmitância da estrutura SMS com 6 metros de fibra MM e MS inserido no centro geométrico dos 6 metros de fibra MM.....	48
Figura 5.9 Espectro normalizado transmitido por uma estrutura SMS com MS e 6 m de comprimento de fibra óptica MM. Observa-se 22 picos principais quase que perfeitamente equiespaçados em comprimento de onda. Pode-se notar que alguns dos picos apresentam estrutura fina.....	48
Figura 5.10 Espaçamento entre os 29 picos de comprimento de onda (incluindo as estruturas finas) gerados dentro da banda 1450-1650 nm dentro da banda 1450-1650 nm com MS inserido no centro geométrico nos 6 metros de fibra MM.....	49
Figura 5.11 Montagem experimental para realizar a caracterização espectral de transmitância da estrutura SMS com 6 metros de fibra MM e MS inserido no início.....	50
Figura 5.12 Espectro normalizado transmitido por uma estrutura SMS com MS inserido no início e 6 m de comprimento de fibra óptica MM. Observa-se 24 picos principais quase que perfeitamente equiespaçados em comprimento de onda. Pode-se notar que alguns dos picos apresentam uma estrutura fina.....	50

Figura 5.13 Espaçamento entre os 29 picos de comprimento de onda (incluindo as estruturas finas) gerados dentro da banda 1450-1650 nm dentro da banda 1450-1650 nm com MS inserido no início da estrutura SMS.....	51
Figura 5.14 Desenho esquemático e fotografia de um laser de onda contínua em anel a fibra óptica com SOA como meio de ganho e o uso de um MS inserido no início da estrutura SMS que funciona como filtro espectral multi-comprimento de onda.....	52
Figura 5.15 Espectro de emissão CW do laser em anel com filtro MMI inserido baseado na estrutura SMS sem MS, em função da corrente de polarização do SOA, usando um acoplador 50/50.....	53
Figura 5.16 Espectro de emissão CW do laser em anel com filtro MMI inserido baseado na estrutura SMS sem MS, em função da corrente de polarização do SOA, usando um acoplador 10/90.....	54
Figura 5.17 Espectro de emissão CW do laser em anel com filtro MMI inserido baseado na estrutura SMS com MS, para uma corrente de polarização do SOA em 70 mA, usando um acoplador 50/50.....	55
Figura 5.18 Espectro de emissão CW do laser em anel com filtro MMI inserido baseado na estrutura SMS com MS, para uma corrente de polarização do SOA em 150 mA, usando um acoplador 50/50.....	56
Figura 5.19 Espectro de emissão CW do laser em anel com filtro MMI inserido baseado na estrutura SMS com MS, para uma corrente de polarização do SOA em 280 mA, usando um acoplador 50/50.....	57
Figura 5.20 Medidas de estabilização espectral do laser em anel de fibra óptica com MS inserido no final da estrutura SMS.....	58
Figura 5.21 Medidas de estabilização espectral do laser em anel de fibra óptica com MS inserido no final da estrutura SMS.....	59
Figura 6.1 Esquemático do laser a fibra óptica em configuração de figura-de-oito com um SOA como meio de ganho não-linear e operação em regime de modo travado passivo.....	62
Figura 6.2 Fotografia da Montagem experimental do laser a fibra óptica em configuração de figura-de-oito com um SOA como meio de ganho não-linear e operação em regime de modo travado passivo.....	62
Figura 6.3 Espectro elétrico do laser em anel de fibra óptica de figura-de-oito mostrando o modo longitudinal fundamental e alguns de seus harmônicos (2° ao 8°) com RBW de 1 MHz.....	64
Figura 6.4 Espectro óptico emitido pelo laser em anel em configuração de figura-de-oito.....	65

Figura 6.5 Em a) Trem de pulsos periódicos espaçados de 90 nanosegundos com travamento dos modos longitudinais e taxa de repetição dos pulsos na frequência do fundamental, b) Modo fundamental em 11 MHz com RBW = 5 kHz. Pode-se também observar os pulsos relativos a geração do 2o harmônico (espaçados de ~45 ns) em menor amplitude que os picos fundamentais.....	67
Figura 6.6 Largura do pulso no tempo limitado pela resolução do osciloscópio (TEKTRONIX TDS2022B 200 MHz).....	68
Figura 6.7 Sintonização espectral do laser em configuração de figura-de-oito operando no regime de modo travado podendo ser sintonizado pelo ajuste do filtro BPF com $I_{bias} = 280$ mA.....	69
Figura 6.8 Dependência do laser em figura-de-oito emitindo em 1550 nm em função da corrente de polarização.....	70
Figura 6.9 Trem de pulsos periódicos espaçados de 18,4 nanosegundos com excitação e taxa de repetição de pulsos referente à frequência do 5º harmônico.....	72
Figura 6.10 Espectro elétrico do laser em anel de fibra óptica em configuração de figura-de-oito mostrando o 5º harmônico com relação de supressão de potência de modo secundário de 17,8 dB para uma RBW = 100 kHz.....	73

Lista de Tabelas

Tabela 5.1 Tabela que apresenta os resultados de variação ao longo de 180 minutos do comprimento de onda e potência para as configurações com MS no início e no final da estrutura SMS.....	60
---	----

Lista de Acrônimos

APC – Angle Polished Connectors

ASE – Amplified Spontaneous Emission

BPF – Band Pass Filter

BRA – Brasil

CW – Continuous Wave

dB – Decibel

dBm – Decibel Miliwatt

DFB – Distributed Feedback Lasers

EDFA – Erbium Doped Fiber Amplifier

EMD – Equilibrium Mode Distribution

ESA – Electrical Spectrum Analyzer

FWHM - Full Width At Half Maximum

GI – Graded Index

HML – Harmonic Mode Locking

LD – Laser Diode

ML – Mode Locking

MM - Multimodo

MMI – Multimode Interference

MMF – Multimode Fiber

MS – Mode Scrambler

NALM - Nonlinear Amplifier Loop Mirror

NPR – Nonlinear Polarization Rotation

OSA – Optical Spectrum Analyzer

PC – Polished Connectors

PN – Junção Formada com Impurezas Receptoras e Doadoras

PON – Passive Optical Network

RBW – Resolution Bandwidth

SNR – Signal-to-Noise Ratio

SOA - Semiconductor Optical Amplifier

SI – Step Index

SM – Single Mode

SMF – Single Mode Fiber

SMS – Single Mode-Multimode-Single Mode

TOTF - Tunable Optical Filter

TWA - Traveling-Wave-Amplifiers

UK – United Kingdom

USA – United States of America

WDM – Wavelength Division Multiplex

VOA - Variable Optical Attenuator

Lista de Símbolos

A – Ampère

α – Razão de acoplamento

c – Velocidade da luz no vácuo

DC – Direct Current

ΔE – Variação de energia entre níveis energéticos

$\Delta\Phi$ – Variação de fase

Δf – Espaçamento em frequência dos modos longitudinais

$\Delta\lambda$ – Variação do comprimento de onda emitido

ΔP – Variação da potência óptica emitida

Δt – Espaçamento no tempo do trem de pulsos

$\Delta\nu$ – Largura de linha

E_1 – Nível de energia inferior

E_2 – Nível de energia superior

E_{gap} – Energia do gap

Er – Erbium

GHz – Gigahertz

Hz – Hertz

I_{bias} – Corrente de bias

I_{ML} – Corrente de Mode Locking

I_{th} – Threshold current

λ – Comprimento de onda

kHz – kilohertz

L – Comprimento físico da cavidade ressonante

$L_{perímetro}$ – Perímetro do anel de fibra óptica

m - Metros

mA – Miliampère

MHz – Megahertz

μm – Micrometro

ms - Milissegundo

μs – Microssegundo

mW – Miliwatt

n – Índice de refração

n_{Fibra} – Índice de refração da fibra óptica

N – Número de modos longitudinais

nm – Nanômetro

ns – Nanosegundos

$P_{cavidade}$ – Potência intra cavidade

P_{in} – Potência de entrada

ps – Picosegundos

Q – Fator de Qualidade

R – Refletividade

s – Segundos

τ – Largura no tempo do pulso

THz – Terahertz

ω – Frequência angular

W – Watts

ν – Frequência óptica

Yb – Yttérbio

Sumário

Agradecimentos.....	v
Resumo.....	vii
Lista de Figuras.....	xi
Lista de Tabelas.....	xvi
Lista de Acrônimos.....	xvii
Lista de Símbolos.....	xix
Sumário.....	xxii
1. Introdução.....	1
1.0 Introdução.....	1
1.1 Motivação.....	3
1.2 Objetivos.....	4
1.3 Roteiro dos Próximos Capítulos.....	4
2. Fundamentação Teórica.....	6
2.0 Introdução.....	6
2.1 Fundamentos do Laser.....	6
2.1.1 Ressonador Óptico.....	7
2.1.2 Largura Espectral.....	8
2.1.3 Modos Longitudinais.....	9
2.2 Diodo Laser Semicondutor.....	11
2.2.1 Estrutura Do Diodo Laser Semicondutor.....	12

2.2.2 Corrente Limiar (Threshold Current).....	13
2.2.3 Controle De Temperatura.....	14
2.3 Amplificador Óptico Semicondutor (SOA).....	16
2.4 Laser Sintonizável em Configuração de Anel.....	17
2.5 Efeitos de Interferência Multimodo (MMI) e Estruturas SMS.....	18
2.5.1 Laser em Anel de Fibra Óptica com Emissão de Duplo Comprimento de Onda.....	19
2.6 <i>Mode Locking</i>	21
2.6.1 <i>Q-Switching</i>	21
2.6.2 Absorvedores Saturáveis.....	23
2.6.3 Laser em Anel de Fibra Óptica Operando no Regime de <i>Mode Locking</i> Passivo....	24
Número de Modos Longitudinais.....	25
Espaçamento no Tempo do Trem de Pulsos.....	25
Largura no Tempo do Pulso.....	26
3 Caracterização do Amplificador Óptico Semicondutor (SOA).....	28
3.0 Introdução.....	28
3.1 Emissão Espontânea Amplificada (ASE) e Banda de Ganho do SOA.....	28
3.1.1 Experimental.....	28
3.2 Corrente de Transparência.....	30
3.2.1 Experimental.....	30
3.3 Ganho de Amplificação do SOA.....	32
3.3.1 Experimental.....	32
3.4 Perfil de Transmitância e Função de Transferência do SOA.....	33

3.4.1 Experimental.....	34
3.4.2 Experimental.....	35
4 Laser Sintonizável em Anel de Fibra Óptica com Amplificador Óptico Semicondutor (SOA) como Meio de Ganho.....	37
4.0 Introdução.....	37
4.1 Montagem Experimental.....	37
4.2 Resultados Experimentais.....	38
Corrente Limiar (<i>Threshold Current</i>).....	38
Sintonização Espectral.....	40
Modos Longitudinais.....	42
5 Laser em Anel com Amplificador Óptico Semicondutor e Filtro por Interferência Multimodal.....	44
5.0 Introdução.....	44
5.1 Caracterização de Estruturas SMS (<i>Single Mode-Multimode-Single Mode</i>).....	44
5.2 Montagem Experimental do Laser em Anel de Fibra Óptica com SOA como Meio de Ganho e Filtro Tipo <i>Multimode Interference</i> (MMI).....	52
5.3 Resultados Experimentais.....	53
Análise Espectral.....	53
Medidas de Estabilidade Espectral.....	57
6 Laser a Fibra Óptica em Configuração de Figura-de-Oito com Travamento Passivo de Modos (<i>Mode Locked</i>).....	61
6.0 Introdução.....	61
6.1 Montagem Experimental do Laser em Anel de Fibra Óptica em Configuração de Figura-de-oito.....	61

6.2 Resultados Experimentais.....	63
Análise do Espectro Elétrico.....	63
Análise do Espectro Óptico.....	65
Análise do Sinal no Tempo.....	66
Sintonização Espectral.....	69
Análise da Corrente Limiar (<i>Threshold e Mode Locking Current</i>) e Potência Óptica.....	70
6.3 Laser a Fibra Óptica em Configuração de Figura-de-Oito em Regime HML (Harmonic Mode-Locked).....	71
7 Conclusão e Sugestões Futuras.....	74
Referências Bibliográficas.....	76
Apêndice.....	80
Artigo Aceito no SBrT (Simpósio Brasileiro de Telecomunicações) 2018.....	81
Artigo Publicado no MOMAG (Simpósio Brasileiro de Microondas e Optoeletrônica) 2018.....	85
Artigo Publicado no MOMAG (Simpósio Brasileiro de Microondas e Optoeletrônica) 2018.....	91
Controlador de Lefevre.....	99
Anexos.....	100
Datasheet Kamelian SOA-NL-L1-W-ZZ.....	101
Datasheet Tunable Optical Filter Lightwaves2020.....	103
Datasheet Multimode Fiber Scrambler.....	104

1 Introdução

1.0 Introdução

Os amplificadores ópticos mais utilizados em comunicações a fibra óptica são os EDFAs (*Erbium Doped Fiber Amplifier*) [1] e a seguir os amplificadores Raman [2]. Em algumas situações específicas, os amplificadores ópticos a semicondutor (SOAs) também são utilizados [3]. Os SOAs em particular, possuem a característica de recuperação rápida do ganho de amplificação, permitindo assim que sejam amplamente utilizados na construção de diversos circuitos ópticos para o processamento totalmente fotônico de sinais em Telecomunicações [4]. Ao serem inseridos na montagem de lasers à fibra óptica, os SOAs podem simultaneamente fazer o papel de meio de ganho óptico e de modulador.

O confinamento do sinal óptico providenciado pela fibra óptica permite que os lasers a fibra sejam extremamente eficientes. Estes lasers apresentam como principal desvantagem a existência de uma cavidade óptica longa, o que pode resultar em uma instabilidade espectral de emissão (deslocamento do comprimento de onda de emissão). Entretanto, é relativamente fácil construir um laser a fibra, e suas aplicações são variadas na área industrial, comunicações ópticas, caracterização de dispositivos ópticos e em sensores a fibra [5,7].

Lasers a fibra óptica são aqueles onde a fibra é o próprio meio de ganho. Os tipos mais comuns são formados por fibra óptica dopada com Érbio (Er) [8] ou com co-dopagem de Ytérbio (Yb) [9], porém outros dopantes são possíveis. Lasers a fibra óptica nas configurações linear [8] e em anel [9,10], têm sido reportados na literatura e são úteis em diversas aplicações industriais e em Telecomunicações [10].

Um amplificador óptico semicondutor (SOA) consiste essencialmente em um laser semicondutor frustrado onde suas faces apresentam refletividade virtualmente nula [4]. Um SOA funciona então como um meio de ganho óptico eficaz. Se estiver, por exemplo, inserido em um anel de fibra óptica juntamente com algum tipo de filtro em linha, poderá se constituir como um laser em anel onde a fibra neste caso só terá o papel de condutora de luz [11]. Redes de Bragg gravadas na própria fibra podem ser utilizadas como elementos espectralmente seletivos determinando a banda (espectral) que oscila na cavidade de lasers a fibra na configuração linear [8]. Lasers em anel de fibra óptica podem também utilizar filtros ópticos

inseridos para limitar a banda espectral oscilante [11].

O efeito de auto-imageamento óptico é melhor conhecido como aquele que ocorre ao longo da propagação da luz em fibras ópticas multimodo com perfil de índice gradual (GI – *Graded Index*) onde a grosso modo, diz-se que os raios seguem trajetórias de padrão senoidal com periodicidade espacial (*pitch*) de ~ 1 mm [12]. Dispositivos baseados no efeito de auto-imageamento em guias de ondas ou fibras ópticas multimodo (MM), são genericamente chamados de dispositivos MMI (*Multimode Interference*) [13]. Um dispositivo MMI a fibra MM pode ser facilmente construído fazendo uma emenda de suas extremidades com fibra monomodo (SM – *Single Mode*), para formar uma estrutura comumente chamada de SMS (*Single-mode-Multimode-Single-mode*) [14]. Estas últimas estruturas, possuem propriedades de filtragem óptica via interferência multimodal [13]. Estes filtros podem ser inseridos em um anel de fibra óptica utilizando o SOA como meio ganho.

Os lasers a fibra operando em regime de modo travado (*mode-locking*) são dispositivos ultrarrápidos utilizados para produzirem pulsos da ordem de poucos picosegundos ou até femtosegundos. Este dispositivo (*mode-locking* passivo) pode ser construído utilizando um absorvedor saturável ou através de um par de anéis de fibra óptica não-linear em conjunto com controladores de polarização NALM (*Nonlinear Amplifier Loop Mirror*). O laser em *mode-locked* (modo travado) funciona como uma ferramenta experimental para diversas aplicações, por exemplo, em redes ópticas passivas (PON – *Passive Optical Network*), dispor de um laser com baixo ruído de fase [7], para gerar pulsos ópticos de amostragem na digitalização fotônica [15].

Este trabalho está então organizado de forma a construir e caracterizar três diferentes dispositivos lasers a fibra óptica que operam de forma distinta. O primeiro descreve o desenvolvimento experimental de um laser a fibra óptica em configuração de anel operando em onda contínua (CW – *Continuous Wave*), onde utiliza-se um SOA como meio de ganho óptico e um filtro óptico passa-banda (BPF) com ajuste manual na faixa espectral de 1520-1565 nm e banda de $< 1,2$ nm @ 3dB que permite a sua sintonização. O segundo descreve o desenvolvimento experimental de um laser na configuração em anel de fibra óptica, operando em onda contínua (CW), usando um SOA como meio de ganho e uma estrutura SMS com 6 m de fibra MM inserida de forma a operar como um filtro óptico multi-comprimento de onda dentro da faixa espectral de 1450-1650 nm. O emprego de 6 m de fibra MM é não-usual. Além disto, aspectos originais de estabilização modal e sintonização do laser são também apresentados e discutidos. O terceiro e último descreve a montagem e testes de um laser à fibra em figura-de-oito operando no regime de *Mode-Locking* (Modo Travado), que é

formado por um anel de fibra óptica monomodo contendo um amplificador óptico semiconductor (SOA) como meio de ganho. Um filtro óptico passa-banda com $< 1,2 \text{ nm @ } 3 \text{ dB}$ de largura é inserido no anel e ajustável manualmente para realizar a referida sintonização ao longo da banda espectral de 45 nm de largura (1520-1565 nm).

1.1 Motivação

Fontes lasers são dispositivos que em sua grande maioria apresentam custos relativamente altos. A principal motivação deste trabalho é utilizar um SOA como meio de ganho, com o objetivo de construir lasers à fibra em configuração de anel com um custo relativamente baixo comparado com dispositivos lasers comerciais. O SOA produzido pela Kamelian (UK) é um dispositivo que apresenta um bom custo benefício, sendo assim, ainda que as especificações dos dispositivos lasers construídos não apresentem resultados superiores comparado com os dispositivos comerciais, o seu custo total envolvido é muito menor.

Além disso, todas estas pesquisas em laser com fibra em configuração de anel são pioneiras na UFF. Ao desenvolver um laser em anel de fibra óptica CW e sintonizável espera-se obter uma saída que apresente alta potência e largura de linha estreita para, por exemplo, realizar uma modulação posterior através de um modulador externo e estabelecer um possível enlace óptico de telecomunicações ou utilizar o laser no próprio laboratório em possíveis caracterizações e calibrações de instrumentos, equipamentos e dispositivos ópticos. Já ao desenvolver um laser em anel de fibra óptica CW que opere em multi-comprimento de onda espera-se gerar uma saída formada pela emissão de dois ou mais comprimentos de onda para, por exemplo, dispor de um laser potencialmente útil na geração de ondas terahertzianas, milimétricas ou microondas por batimento óptico dependendo do intervalo entre os picos de emissão. Por fim, ao desenvolver um laser em *mode-locking* espera-se utilizar sua saída em uma possível geração de uma torrente de bits 1010101 com jitter muito baixo para posterior modulação em um modulador externo do tipo MZ ou na realização de amostragem óptica (*optical sampling*) de sinais ópticos ou elétricos, onde neste caso, a taxa de repetição dos pulsos pode ser utilizada como a frequência de amostragem (frequência de Nyquist) na digitalização de sinais de telecomunicações.

1.2 Objetivos

Este Trabalho de dissertação de mestrado, descreve o desenvolvimento de lasers à fibra óptica em configuração de anel com SOA como meio de ganho. Dado que o trabalho contempla o desenvolvimento de quatro configurações de lasers à fibra óptica, o objetivo do trabalho é então dividido em quatro partes. O objetivo referente ao laser à fibra óptica em configuração de anel operando em onda contínua (CW) é construir um dispositivo óptico que funcione como um laser sintonizável em comprimento de onda através da utilização de um filtro passa banda (BPF – *Band Pass Filter*). Espera-se uma saída com alta potência óptica e baixa largura de linha. Na segunda etapa, um laser na configuração em anel de fibra óptica, é construído substituindo o filtro sintonizável por uma estrutura SMS com 6 m de fibra MM. Espera-se que a mesma opere como um filtro óptico multi-comprimento de onda dentro da faixa espectral de 1450-1650 nm. O objetivo é obter um dispositivo em que na sua saída tenha-se um laser em multi-comprimento de onda com potencial capacidade de gerar ondas terahertzianas e milimétricas por batimento óptico. Na terceira e última etapa, um laser à fibra em figura-de-oito operando no regime de *Mode-Locking* (Modo Travado) é construído. O objetivo é obter trem de pulsos no tempo espaçados periodicamente com largura temporal da ordem de poucos picosegundos.

Ao fim deste trabalho, espera-se realizar a análise dos resultados e sugerir correções e ajustes para otimização dos três dispositivos lasers à fibra aqui construídos.

1.3 Roteiro dos Próximos Capítulos

No capítulo 2, é descrito o ferramental teórico dos conhecimentos registrados na literatura abordada e pesquisada sobre o assunto. Desta forma, espera-se que essas referências de estudos possam apresentar o embasamento necessário para a realização e entendimento do que será apresentado nos capítulos seguintes deste trabalho.

No capítulo 3 descreve-se o processo de caracterização de um Amplificador óptico semicondutor (SOA).

No capítulo 4 descreve-se a apresentação dos resultados do processo da montagem e testes de um laser em onda contínua, sintonizável, formado por um anel de fibra óptica contendo SOA como meio de ganho.

No capítulo 5 descreve-se a montagem e testes de um laser em onda contínua, formado por um anel de fibra óptica monomodo contendo um SOA como meio de ganho. Um filtro óptico consistindo de 6 m de fibra óptica multimodo foi inserido no anel. Tal tipo de filtro é conhecido como MMI (*Multimode-Interference*) e é capaz de transmitir um pente de frequências ópticas na banda em torno de 1550 nm.

No capítulo 6 descreve-se a montagem e testes de um laser em figura-de-oito operando no regime de *Mode-Locking* (Modo Travado), este é formado por um par de anéis de fibra óptica monomodo contendo um SOA como meio de ganho.

Por fim, no Capítulo 7 apresentam-se as conclusões a respeito do que foi investigado, assim como algumas sugestões de aplicações e de projetos que podem ser realizados de forma contínua ao que foi demonstrado neste trabalho.

2 Fundamentação Teórica

2.0 – Introdução

Neste capítulo, é feita uma revisão do ferramental teórico essencial para o entendimento deste trabalho. Então, o capítulo é dividido em seis partes seguindo uma ordem razoavelmente lógica:

2.1 - Fundamentos do laser

2.2 - Laser semicondutor

2.3 - Amplificador Óptico Semicondutor (SOA)

2.4 – Laser sintonizável em configuração de anel

2.5 - Efeitos de Interferência Multimodo (MMI) e estruturas SMS

2.6 – *Mode Locking*

2.1 – Fundamentos do Laser

O laser (*light amplification by stimulated emission of radiation*) é um dispositivo que produz radiação eletromagnética baseada na emissão estimulada de fótons. Neste caso, podem-se destacar dois pontos importantes a respeito deste fenômeno físico. Primeiro, o fóton produzido possui a mesma energia e comprimento de onda do fóton gerador, permite-se assim uma emissão monocromática (Comprimento de Onda de Emissão bem definido). Segundo, os dois fótons gerados e emitidos estão em fase (Luz Coerente) e suas ondas eletromagnéticas associadas possuem a mesma direção (Luz Colimada) [16]. Na figura 2.1 é possível observar o fenômeno da emissão estimulada.

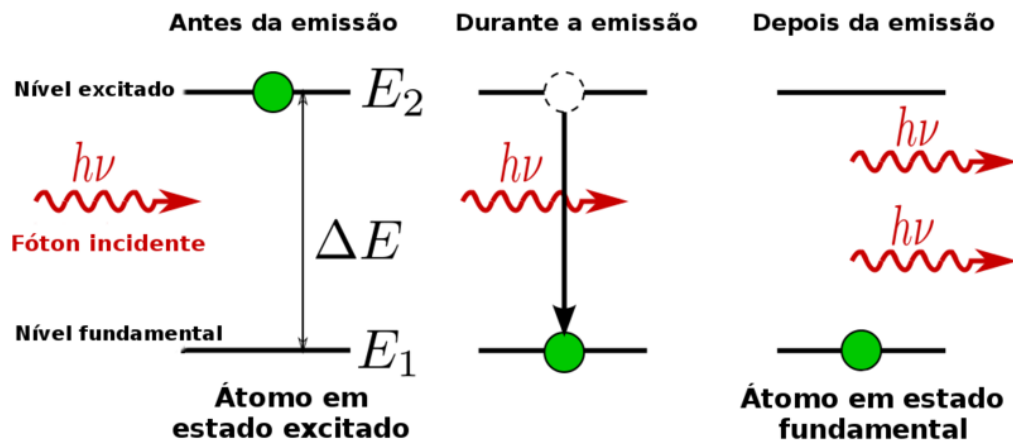


Figura 2.1 Emissão estimulada [17].

$$\Delta E = E_2 - E_1 = h\nu \text{ (J)} \text{ OU } \Delta E = \frac{1,24}{\lambda(\mu\text{m})} \text{ (eV)} \quad (2.1)$$

Na figura 2.1, observa-se a incidência de um fóton com energia ΔE que promove o decaimento do átomo de um estado de energia excitado (E_2) para o estado de energia fundamental (E_1) ocasionando a emissão de dois fótons com comprimento de onda (λ) e energia bem definidos como visto na equação 2.1. A partir deste conceito, pode-se concluir que a emissão estimulada caracteriza-se pela inversão de população, esta ocorre quando em determinado sistema existe uma maior quantidade de portadores no estado excitado do que no estado fundamental, definindo assim a emissão de luz que comumente chamamos de LASER.

2.1.1 Ressonador Óptico

Na maioria dos casos, a amplificação da luz gerada pelo dispositivo laser é ocasionada por um par de espelhos em paralelo com alta capacidade de reflexão. Os espelhos formam uma cavidade óptica ressonante (também chamada de cavidade de Fabry-Perrot) que permite uma realimentação positiva da mesma a partir dos fótons já gerados da emissão estimulada [16], ou seja, parte da energia retorna para o interior da cavidade. Em termos de comparação, pode-se dizer que os dois espelhos apresentam um comportamento bastante análogo a um

amplificador eletrônico. Como dito anteriormente, os espelhos promovem um ganho no interior da cavidade ressonante e consequentemente o aumento da amplitude (amplificação) da luz emitida, desde que a condição de inversão de população seja atendida, conforme já explicado anteriormente. Na figura 2.2 pode-se ver um exemplo de cavidade óptica ressonante.

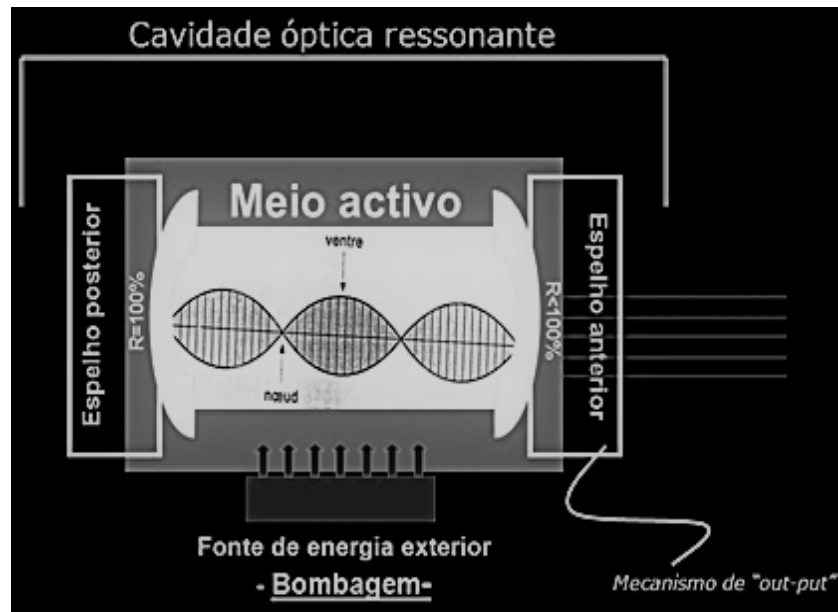


Figura 2.2 Cavidade óptica ressonante [18].

Na figura 2.2, observa-se um par de espelhos formando a cavidade ressonante óptica, é importante observar que um espelho posterior possui refletividade (R) de 100 % enquanto o espelho anterior possui refletividade (R) $< 100\%$ (em torno de 90%) justamente para permitir a realimentação e o retorno de parte da energia para o interior da cavidade como já mencionado.

2.1.2 Largura Espectral

Até esta presente seção assumimos que os estados de energia superior e inferior interagem de forma perfeitamente monocromática, porém, na natureza, todas as linhas espectrais possuem uma largura finita como pode ser visto na figura 2.3.

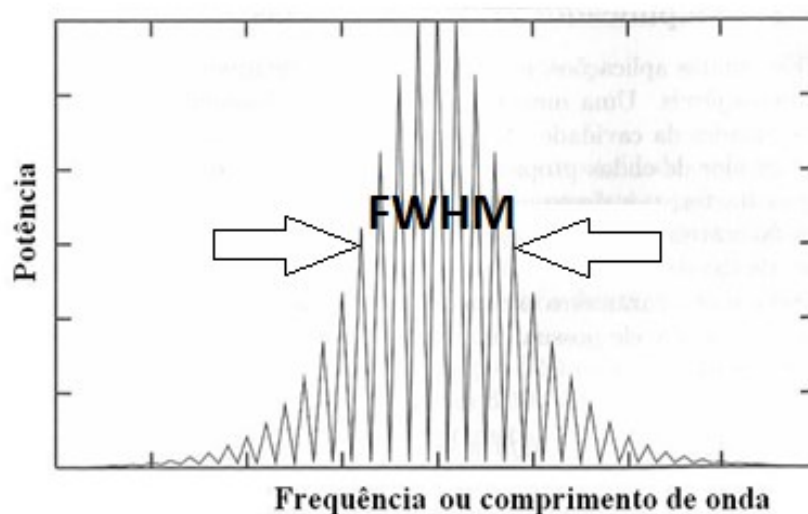


Figura 2.3 Largura espectral de um laser Fabry-Perrot [19].

Na figura 2.3, é possível observar a largura espectral à meia altura (*Full Width At Half Maximum*) de um laser Fabry-Perrot e seus respectivos modos longitudinais. Note que no gráfico, o espaçamento tanto pode ser dado em frequência como em comprimento de onda, pois dependendo da tecnologia empregada na construção do dispositivo laser, pode-se ter um FWHM que varia de poucos KHz como em um laser DFB (*Distributed Feedback Lasers*) até alguns nanômetros como em um laser Fabry-Perrot.

2.1.3 Modos Longitudinais

Os modos longitudinais de um dispositivo laser consistem em um número discreto de componentes de frequência que possuem largura muito estreita e espaçamento muito próximos [16]. A faixa espectral FWHM é conhecida como o intervalo em que de fato alguns dos modos longitudinais exibem ganho significativo (visualizar figura 2.3) no interior do ressonador óptico. O ganho depende tanto do comprimento da cavidade como da refletividade e natureza dos espelhos utilizados na construção do dispositivo laser, e do meio de ganho, pois estes possibilitam que apenas determinados portadores realmente encontrem-se na situação de emissão estimulada.

Com objetivo de determinar o espaçamento em frequência dos modos longitudinais de uma cavidade ressonante retangular com comprimento L e índice de refração n , utiliza-se a variação de fase de uma onda eletromagnética $\Delta\Phi$ para chegar ao espaçamento em frequência (Δf). Alternativamente, uma cavidade forma uma onda estacionária em seu interior de forma a formarem-se nós em seus espelhos. Então, os modos longitudinais consistem em um número inteiro (p) de meias-ondas estacionárias “encaixadas” na cavidade.

$$\Delta\Phi = \frac{2\pi}{\lambda}(2L) \quad (2.2)$$

$$2p\pi = \frac{2\pi n\nu}{c}(2L) \quad (2.3)$$

$$\Delta f = \nu_p - \nu_{p-1} = p \frac{c}{n(2L)} - (p-1) \frac{c}{n(2L)} = \frac{c}{n(2L)} \quad (2.4)$$

A equação 2.4 foi desenvolvida para o espaçamento em frequência dos modos longitudinais (Δf), onde (p) é um numero inteiro e (c) é a velocidade da luz no vácuo.

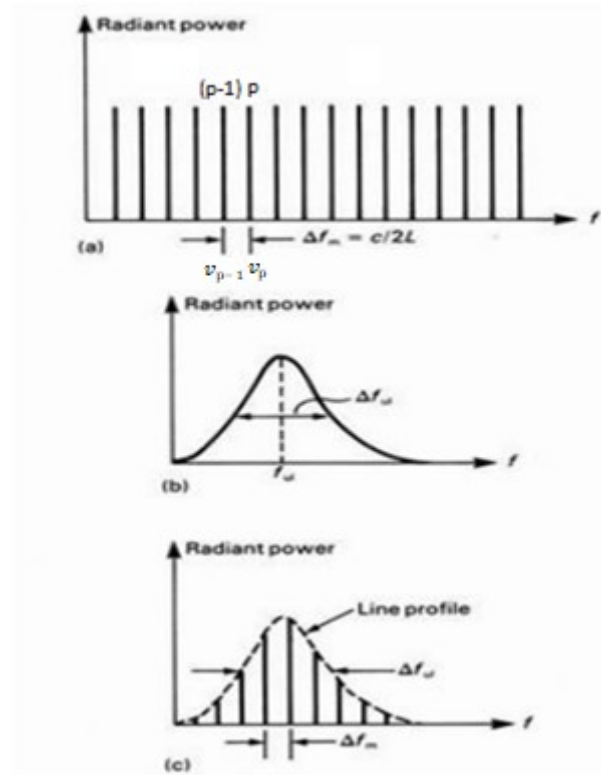


Figura 2.4 Modos longitudinais [16].

Na figura 2.4, é possível observar em (a) o espaçamento em frequência dos modos longitudinais que foi desenvolvido a partir da equação 2.2, em (b) observa-se o padrão de largura de linha (*linewidth*) de irradiação de um laser, e finalmente em (c) observa-se um nível em que a potência de alguns modos cai pela metade, no qual já definimos anteriormente e é conhecido como FWHM.

2.2 – Diodo Laser Semicondutor

O laser semicondutor é um dispositivo baseado em uma junção PN. Neste caso, a polarização elétrica direta do dispositivo além de proporcionar a passagem de uma corrente elétrica, proporciona, também, a emissão de fótons. Esta emissão ocorre graças à recombinação de elétrons (carga negativas) e lacunas (cargas positivas) na região de depleção (junção PN). Essa recombinação permite que a energia adquirida pelos elétrons seja liberada, o que ocorre na forma de fótons (luz). É importante ressaltar que essa transição dos elétrons da banda de condução para banda de valência ocorre de forma estimulada (Emissão Estimulada). Na figura 2.5, é possível visualizar a estrutura de bandas do material semicondutor.

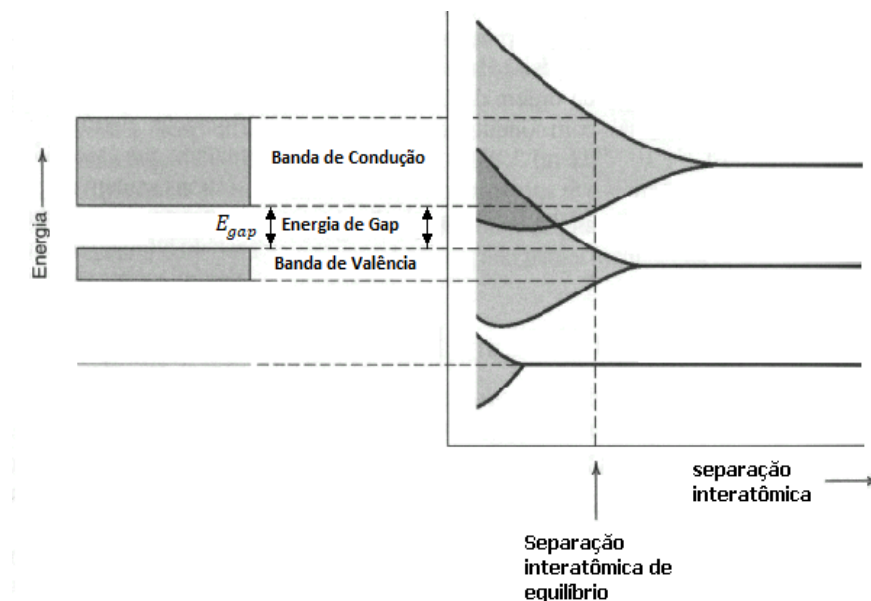


Figura 2.5 Representação da origem das bandas de condução e valência nos materiais semicondutores [16].

Ao observar a figura 2.5, é importante introduzir o conceito de bandas de energia, este se diferencia do conceito inicial de camadas (níveis de energia) explicado na seção 2.1 - fundamentos do laser. As bandas de energias são formadas a partir da sobreposição de camadas (níveis de energia) das estruturas atômicas. Estas estruturas intrínsecas muitas vezes são dopadas previamente com materiais do tipo P e do tipo N com objetivo da redução da energia de gap (introdução de novos níveis de energia e aproximação da banda de condução da banda de valência) e formação da região de depleção. A dopagem é um processo que gera um desbalanceamento de cargas na estrutura (alta densidade de elétrons livres e lacunas), isto acontece graças à introdução de impurezas de dois tipos: Doadoras ou Receptoras. As impurezas doadoras caracterizam-se pela presença de elétrons livres que podem se mover livremente pelo material semiconductor, já as impurezas receptoras caracterizam pela presença de lacunas que se comportam como cargas positivas, ou seja, semicondutores dopados com impurezas doadoras são do tipo N e semicondutores dopados com impurezas receptoras são do tipo P [16]. A existência deste desbalanceamento de cargas é essencial para que se permita a absorção estimulada de portadores, inversão de população e emissão estimulada de fótons (equação 2.1) pelo diodo laser com tecnologia semicondutora.

2.2.1 - Estrutura do Diodo Laser Semicondutor

O diodo laser semiconductor é um dispositivo que pode ter em sua estrutura a disposição dos materiais de diferentes formas. Lasers podem ser dispositivos em que sua estrutura esteja baseada em uma homojunção PN (homoestrutura) ou esteja baseada em uma heterojunção PN (heteroestrutura).

Diodos lasers baseados em uma única junção PN (homojunção) são feitos a partir do mesmo material semiconductor, isto faz com que sejam pouco eficientes dada a recombinação entre elétrons e lacunas ocorrerem em uma área de ganho de $\sim 200\text{-}400\text{ }\mu\text{m}$ [16]. A inversão de população é alcançada no meio de ganho a partir de inúmeras reflexões ocasionadas na própria região de depleção do material semiconductor, ainda sim, se tem baixa taxa de confinamento de fótons comparado a heterojunção. Sua estrutura pode ser visualizada na figura 2.6.

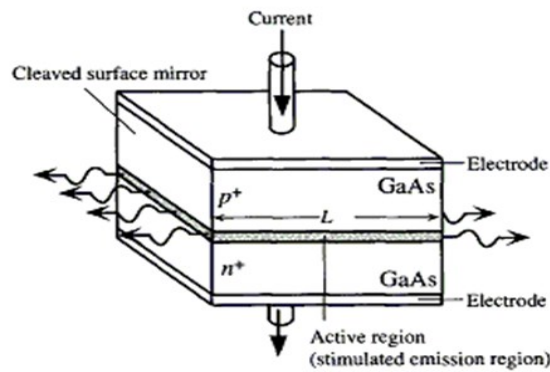


Figura 2.6 Diodo laser baseado em homoestrutura [19].

Já os diodos lasers baseados em uma heterojunção PN (heteroestrutura) são dispositivos feitos a partir de junção materiais com menor energia de gap entre materiais com energia de gap maior ($E_{gap1} < E_{gap2}$). Esta estrutura proporciona uma eficiência maior que a homoestrutura, já que a recombinação entre elétrons e lacunas ocorre em uma região estreita ($< 1\mu\text{m}$ de largura), permite-se então uma alta taxa de confinamento dos fótons [16]. Sua estrutura pode ser visualizada na figura 2.7.

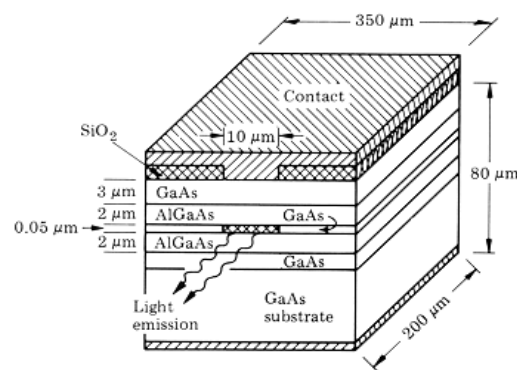


Figura 2.7 Diodo laser baseado em heteroestrutura [19].

2.2.2 - Corrente Limiar (*Threshold Current*)

O diodo laser semiconductor é um dispositivo que varia a natureza da radiação emitida conforme a corrente de operação. A corrente de *Threshold* define o ponto limiar entre a emissão espontânea e a emissão estimulada conforme pode ser visualizado na figura 2.8.

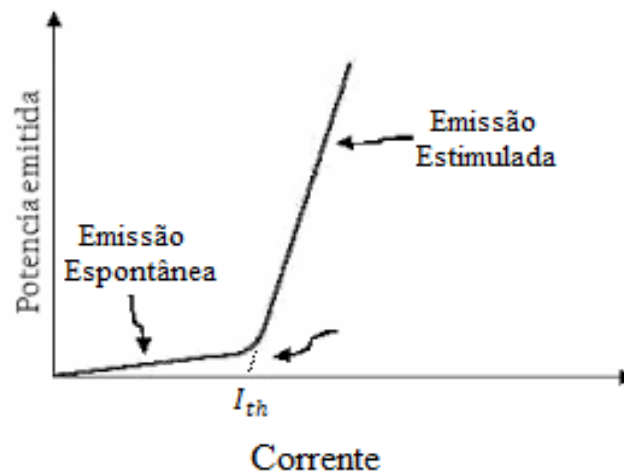


Figura 2.8 Função de transferência de um diodo laser semiconductor [16].

Ao observar a figura 2.8, é possível visualizar a função transferência de um diodo laser, note que do ponto de vista matemático, a corrente limiar (*Corrente de Threshold*) é dada pela projeção da região estática no eixo da abscissa. Fisicamente, a corrente de *threshold* representa o ponto no qual o ganho da cavidade ressonante se iguala as perdas no interior da mesma.

2.2.3 – Controle de Temperatura

O diodo laser é um dispositivo sensível a variações de temperatura. Seu aumento faz com que ocorram significativas mudanças no espectro da luz emitida. Este comportamento, muitas vezes pode ser o suficiente para quedas na eficiência de uma transmissão em um enlace de telecomunicações, por exemplo, o aumento da temperatura provoca deslocamentos do comprimento de onda emitido. A atenuação em uma fibra óptica varia com o comprimento de onda e isto faz com que a luz experimente diferentes valores de atenuação podendo provocar queda de rendimento do enlace projetado. Num sistema WDM, os comprimentos de onda multiplexados têm de ser extremamente estáveis para que o *crosstalk* (interferência de canal adjacente) seja mínimo. Além deste comportamento, o controle de temperatura garante uma maior vida útil ao diodo laser. Na figura 2.9, é possível visualizar a influência do aumento da temperatura na função de transferência de um laser.

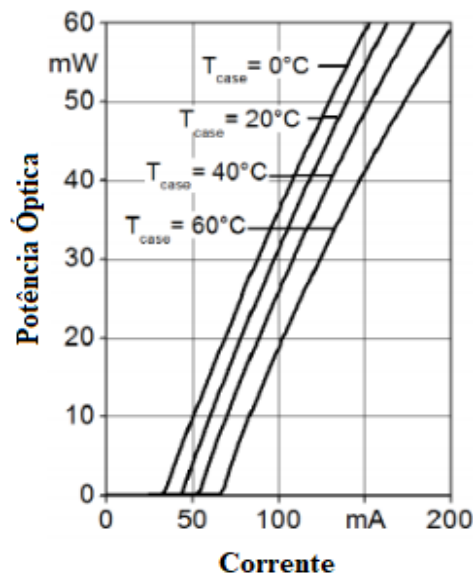


Figura 2.9 Impacto do aumento de temperatura na função transferência de um diodo laser [20].

Na figura 2.9, nota-se o aumento da corrente limiar (I_{th}) com o aumento da temperatura, este comportamento pode ocasionar uma mudança na região de operação do diodo laser (Emissão Espontânea ou Emissão Estimulada). Além disto, o aumento da corrente limiar diminui a potência óptica de saída, pois o aumento da temperatura faz a distribuição da população de Boltzmann natural dos elétrons variarem, e, portanto são precisos mais elétrons na banda de condução para se conseguir a mesma inversão efetiva de população. Na figura 2.10 é possível observar um *red-shift* no espectro emitido com o aumento da temperatura no de um diodo laser.

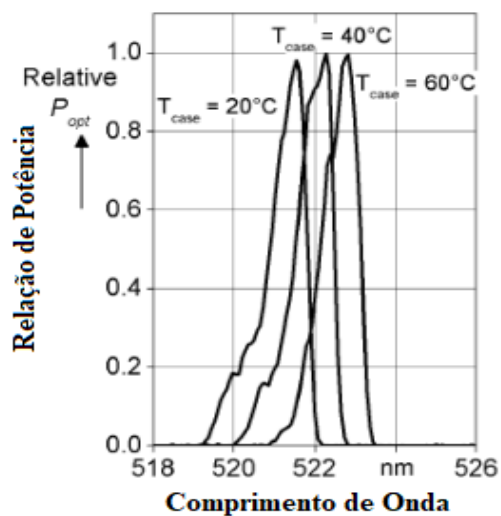


Figura 2.10 Impacto da variação de temperatura no espectro emitido [20].

2.3 – Amplificador Óptico Semicondutor (SOA)

Os amplificadores ópticos a semicondutor (SOAs), assim como os lasers de diodo (LD – *Laser Diode*), são construídos a partir de junções semicondutoras e seguem o mesmo princípio de funcionamento, exceto por um. Os SOAs TWA (*Traveling-Wave Amplifiers*) são uma espécie de LD frustrado pois suas faces (espelhos) de saída de luz possuem muito baixa refletividade [7]. Os SOAs emitem luz com grande largura espectral chamada de ASE (*Amplified Spontaneous Emission*). Na figura 2.11 é possível visualizar a ASE e a estrutura de um SOA TWA.

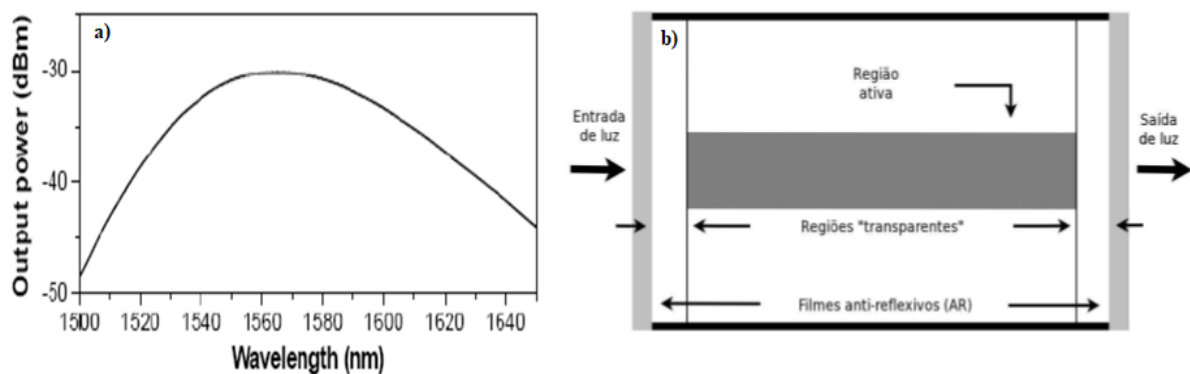


Figura 2.11 ASE e estrutura de um SOA TWA [21].

Na figura 2.11, é possível observar em (a) a ASE emitida por um SOA TWA, note que o comprimento de onda de pico encontra-se em torno de 1550 nm, tratando-se possivelmente de um SOA utilizado na banda C de comunicações ópticas, em (b) observa-se a estrutura de um SOA TWA, note que em seus extremos, os “espelhos” são constituídos de filmes anti-reflexivos, justamente para permitir que a onda (luz) propague uma única vez pelo meio de ganho (região ativa).

Os SOAs como o nome já diz, são responsáveis por amplificar (fornecer ganho) o sinal óptico sem necessidade de conversão O-E (óptico-elétrico) e E-O (elétrico-óptico). Diferente dos EDFAs (tempo de recuperação do ganho na ordem de ms), os SOAs possuem baixo tempo de recuperação do ganho (ordem de ns ou ps), o que permite uma ganho menor comparado ao EDFA, já que os portadores permanecem menos tempo no estado excitado, porém os SOAs são dispositivos mais rápidos (menor tempo de resposta) do que os EDFAs [7]. Ao serem inseridos em um anel, conforme será mostrado na seção 2.4, os SOAs podem

simultaneamente fazer o papel de meio de ganho e de modulador. No capítulo 3 será apresentado um SOA construído e manufaturado pela Kamelian (UK) bem como todas suas características.

2.4 – Laser Sintonizável em Configuração de Anel

Na seção anterior conceituamos o SOA como uma espécie de LD frustrado visto a baixa refletividade dos seus espelhos. A fim de explorar esta propriedade e construir um laser, é proposto o estabelecimento de um anel de fibra óptica a fim de desenvolver uma cavidade óptica ressonante. Neste caso, o SOA pode simultaneamente fazer o papel de meio de ganho e de modulador como já mencionado anteriormente. Na figura 2.12 é possível observar um exemplo de laser em anel de fibra óptica.

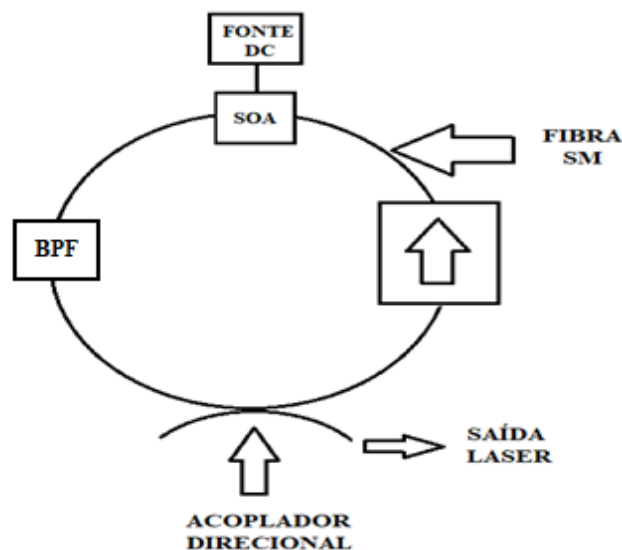


Figura 2.12 Laser em anel de fibra óptica utilizando o SOA como meio de ganho.

Na figura 2.12, é possível observar a fibra SM (*Single-Mode*) estabelecendo uma cavidade ressonante óptica circular, um acoplador direcional que retira e realimenta esta cavidade desempenhando uma função análoga ao par de espelhos de uma cavidade Fabry-Perrot, um isolador que permite a luz circular apenas em um sentido (anti-horário) e um filtro passa banda (BPF- *Band Pass Filter*) que estabelece a sintonização espectral.

Neste caso, o confinamento do sinal óptico providenciado pela fibra óptica permite que os lasers a fibra sejam extremamente eficientes e relativamente fáceis de serem construídos. Na seção 2.1.4 deste capítulo, fez-se o desenvolvimento matemático para encontrar o espaçamento em frequência dos modos longitudinais de um LD construído a partir de uma cavidade ressonante retangular com comprimento L (Visualizar equação 2.4). Neste caso diferente do que foi abordado anteriormente, a cavidade ressonante passou a ter uma estrutura circular, logo:

$$\Delta f = \frac{c}{n (L_{perimetro})} \quad (2.5)$$

Note que ao observar a equação 2.5 e comparar com a equação 2.4, o número 2 do denominador desaparece, isto acontece pelo fato do *Round Trip* da luz no anel de fibra óptica ser o perímetro do mesmo.

No capítulo 4 uma análise bem mais detalhada do funcionamento do dispositivo é apresentada.

2.5 – Efeitos de Interferência Multimodo (MMI) e Estruturas SMS

O efeito de auto-imageamento óptico é mais bem conhecido como aquele que ocorre ao longo da propagação da luz em fibras ópticas multimodo com perfil de índice gradual (GI), onde a grosso modo, diz-se que os raios seguem trajetórias de padrão senoidal com periodicidade espacial (*pitch*) de ~ 1 mm [12]. Dispositivos baseados no efeito de auto-imageamento em guias de ondas ou fibras ópticas multimodo (MM), são genericamente chamados de dispositivos MMI (*Multimode Interference*) [13]. Um dispositivo MMI a fibra MM pode ser facilmente construído fazendo uma emenda em ambas as extremidades com fibra monomodo (SM), para formar uma estrutura comumente chamada de SMS (*Single-mode-Multimode-Single-mode*) [14]. Estas últimas estruturas, possuem propriedades de filtragem óptica via interferência multimodal e sua estrutura pode ser visualizada na figura 2.13.

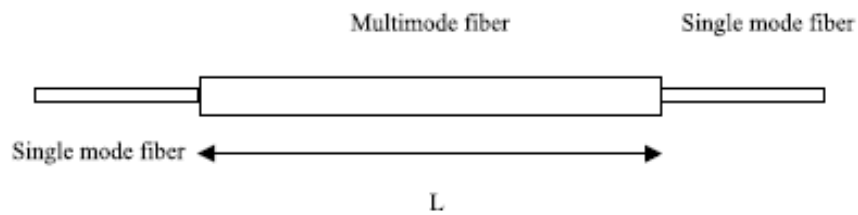


Figura 2.13 Esquemático de uma estrutura SMS [14].

Em uma estrutura SMS em que as emendas por fusão estejam perfeitamente alinhadas ao eixo axial, é importante destacar que a luz ao propagar-se pela fibra SM, toda energia da onda eletromagnética está concentrada em um único modo transversal (modo fundamental) de propagação, porém na primeira emenda (*Input*) SM/MM a energia que antes estava concentrada neste único modo distribui-se entre os diversos modos de propagação. Considerando que, a condição de alinhamento das fibras SM e MM sejam satisfeita, apenas o modo de mais baixa ordem (LP_{01}) e mais alguns com simetria azimutal (LP_{0m} , onde m é inteiro > 1) são excitados na fibra GI-MM (espera-se que a maior parte da energia concentre-se no modo LP_{01}). Sendo assim, cria-se um efeito de “filtragem espacial” no momento da re-acoplagem à fibra SM (*Output*), possibilitando a ocorrência de interferência multimodal (MMI). Além disso, em uma fibra de núcleo parabólico (Fibra MM GI), uma vez que as constantes de propagação dos vários modos são quase igualmente espaçadas, espera-se que a energia acoplada à fibra monomodo de saída seja extremamente sensível à diferença de fase desenvolvida entre os vários modos na extremidade de saída da seção de fibra multimodo. Assim, o desempenho da estrutura de fibra SMS deve ser altamente dependente do comprimento de onda de operação e também do comprimento físico da fibra multimodo [14].

2.5.1 – Laser em Anel de Fibra Óptica com Emissão de Duplo Comprimento de Onda

As estruturas SMS podem ser utilizadas como filtros por funcionarem baseadas no efeito de interferência multimodal (MMI). Este fenômeno permite a construção de filtros com largura espectral de transmissão estreita e picos de seletividade em diferentes comprimentos

de onda. Esse recurso torna a estrutura SMS atraente para aplicações de detecção em fibra óptica (sensores) e de lasers a fibra [22]. O desempenho da estrutura SMS como um filtro passa-banda faz dela um dispositivo de seleção de comprimento de onda e ajuste da cavidade ressonante de lasers à fibra.

A emissão laser em duplo comprimento de onda gerou um interesse considerável nos últimos anos, pois seu uso tem sido atraente em diferentes aplicações como Sensores à fibra óptica, comunicações ópticas, microondas e geração de ondas terahertzianas [22]. Diferente do que foi abordado em [22], onde se utilizam dois pequenos comprimentos de fibra MM ($L_1 = 58,7$ mm e $L_2 = 59$ mm) a fim de projetar dois filtros MMI, filtros estes que posteriormente são inseridos na mesma cavidade óptica ressonante e possibilitam a emissão laser em duplo comprimento de onda, neste trabalho utilizou-se uma única fibra MM para projetar um único filtro MMI, esta fibra MM possui um comprimento bem maior ($L = 6$ m) do que as apresentadas em [22] ($L_1 = 58,7$ mm e $L_2 = 59$ mm), o objetivo aqui é gerar uma emissão em duplo comprimento de onda apenas com um único filtro MMI, pois segundo a teoria apresentada em [14], quanto maior o comprimento da fibra multimodo, menor o espaçamento entre picos do filtro MMI projetado. Na figura 2.14 é possível visualizar um exemplo de laser em anel com emissão de duplo comprimento de onda utilizando-se uma única cavidade ressonante e o SOA como meio de ganho.

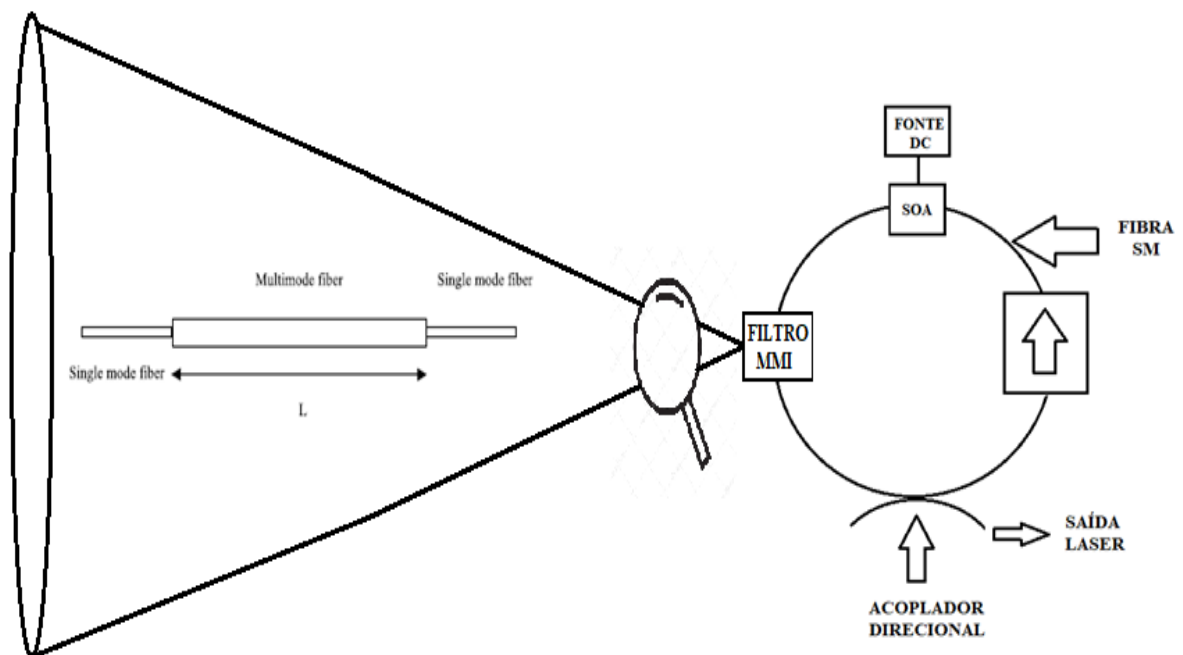


Figura 2.14 Laser em anel de fibra óptica com emissão de duplo comprimento de onda com SOA como meio de ganho e filtro MMI.

O princípio de funcionamento do laser em duplo comprimento de onda mostrado na figura 2.14 é o mesmo do laser montado na figura 2.12 e explicado na seção 2.4, porém nesta configuração é introduzido um filtro MMI baseado em uma estrutura SMS.

No capítulo 5 deste trabalho é feita uma análise bem mais detalhada do funcionamento do dispositivo.

2.6 – *Mode Locking*

O regime de *mode-locking* consiste na emissão de um trem de pulsos com curta duração no tempo e taxa de repetição bastante estável, diretamente dependente do material que preenche a cavidade e o seu comprimento físico. O *mode-locking* pode ser alcançado desde que tenhamos um dispositivo laser multimodo longitudinal conforme visto na subseção 2.1.4. Em uma determinada cavidade ressonante diversos modos podem oscilar simultaneamente, sendo assim a saída do laser estará definida em função do tempo e dependerá da fase, frequência e amplitude dos modos longitudinais [16].

2.6.1– *Q-Switching*

O *Q-Switching* é uma técnica utilizada para criar um pulso de curta duração (tipicamente com poucos ns de duração ou mais) e com uma intensa potência de irradiação laser [16]. Para isto são necessários modos longitudinais igualmente espaçados oscilando no interior de uma cavidade ressonante. O emprego desta técnica é baseado no fator Q, o mesmo é conhecido como o fator de qualidade da cavidade ressonante e pode ser definido como:

$$Q = \frac{\nu}{\Delta\nu} \quad (2.6)$$

Na equação 2.6, (ν) é a frequência óptica central de operação enquanto $\Delta\nu$ é a largura de linha do dispositivo laser.

O fator de qualidade caracteriza o interior de determinada cavidade ressonante, seu funcionamento se dá introduzindo deliberadamente uma perda que varia ao longo do tempo. Esta alta perda no interior da cavidade evita uma irradiação laser enquanto portadores são levados para um estado de energia mais excitado. Após uma grande inversão de população ser alcançada, subitamente a perda é reduzida e consequentemente o fator Q é elevado a valores extremos, neste momento a condição de inversão de população promove um elevado ganho no interior da cavidade e isto faz com que toda energia de fato seja liberada na forma de um pulso de luz com grande amplitude e curta duração no tempo [16]. Após a liberação de toda energia, ocorre um despovoamento do nível de energia mais excitado desfazendo o mecanismo de inversão de população até que a emissão de luz laser cessa. Na figura 2.15 é possível visualizar como funciona o *Q-Switching*.

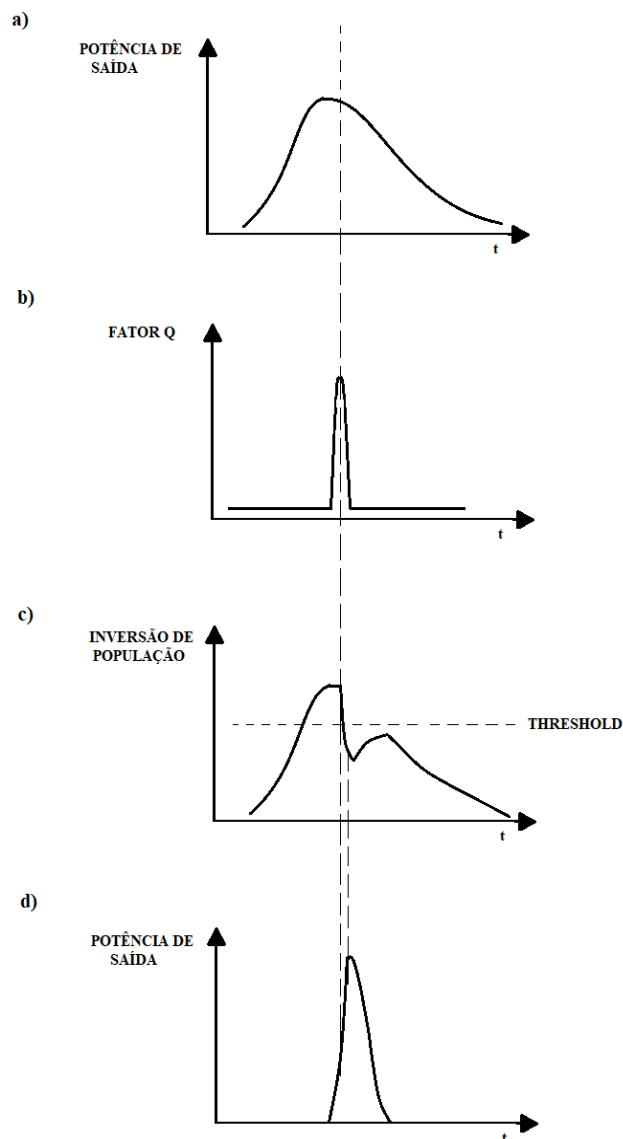


Figura 2.15 Representação da variação dos parâmetros do *Q-Switching* [16].

Ao observar a figura 2.15, é possível visualizar as etapas do *Q-switching*: (a) Emissão de luz com grande largura temporal; (b) Variação abrupta do fator Q e aumento elevado do ganho no interior da cavidade; (c) Despovoamento do estado energético superior desfazendo-se a condição de inversão de população; (d) Emissão de um pulso de luz com grande potência e curta largura temporal.

2.6.2– Absorvedores saturáveis

Absorvedores saturáveis, são dispositivos formados por materiais especiais cuja absorção diminui com o aumento da irradiação de luz, este efeito acontece porque o aumento da incidência de luz faz com que exista um maior numero de portadores no estado excitado do que no estado fundamental. Este comportamento faz dos materiais dos absorvedores saturáveis diferentes de materiais comuns, estes materiais especiais conseguem absorver a luz tão fortemente quando são submetidos à radiação que conseguem causar o desbalanceamento de estados energéticos, ocasionando um maior povoamento de portadores no estado de energia mais excitado do que no estado menos excitado [16]. Na figura 2.16 é possível visualizar resposta do absorvedor saturável.

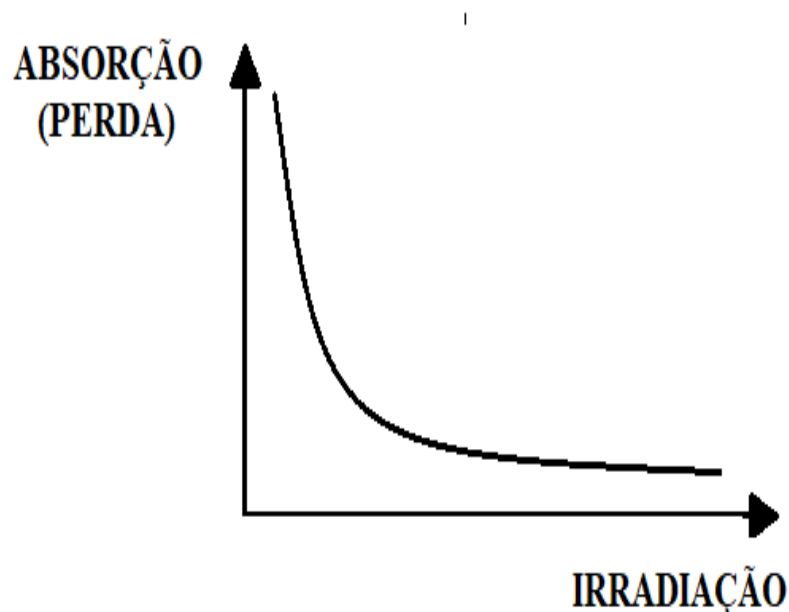


Figura 2.16 Resposta do absorvedor saturável [16].

2.6.3– Laser em Anel de Fibra Óptica Operando no Regime de *Mode Locking* Passivo

No regime de *mode-locking* (modo travado) passivo é necessário variar as perdas da cavidade periodicamente no tempo. No capítulo 6 deste trabalho será explicada a técnica utilizada para variar as perdas ao longo do tempo em uma cavidade ressonante. Nesta secção será explicada apenas a forma de inicialização e modelagem do pulso óptico. Conforme já mencionado anteriormente, um laser em regime de modo travado gera um trem de pulsos com a mesma largura e espaçamento temporal. Sendo assim a saída do laser estará definida em função do tempo e dependerá da fase, frequência e amplitude dos modos longitudinais conforme pode ser visto na figura 2.17.

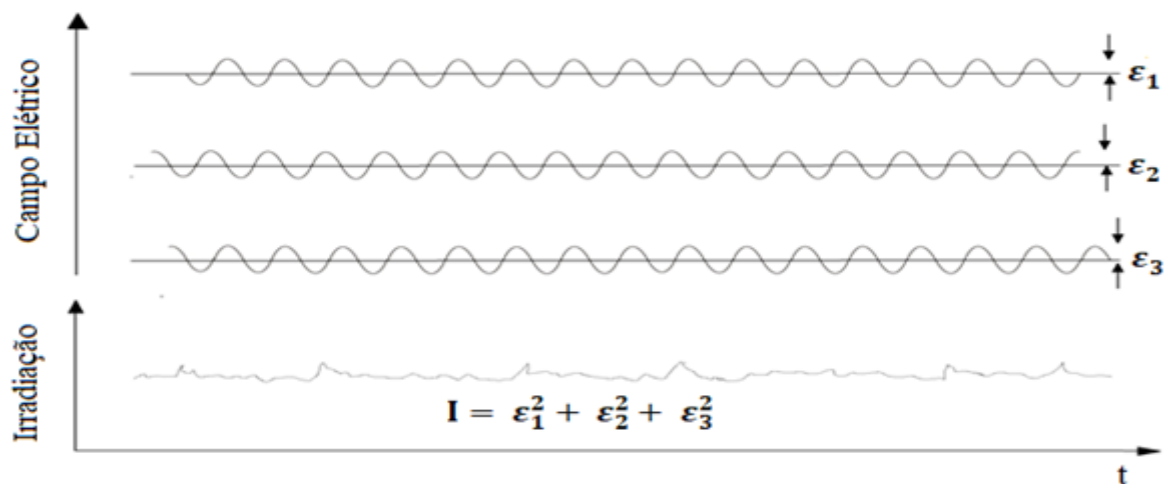


Figura 2.17 Efeito do somatório dos modos longitudinais na potência de saída irradiada pelo laser [16].

Ao observar a figura 2.17, nota-se que a potência de saída irradiada pelo laser sofre pequenas flutuações ao longo do tempo. Este efeito é ocasionado em virtude do somatório quadrático das amplitudes dos campos elétricos de dois ou mais modos longitudinais que se encontram em mesma fase (interferência construtiva).

Ao provocar uma defasagem entre o modo fundamental e seus harmônicos de um laser multimodo longitudinal, estes estarão sujeitos à interferências construtivas, destrutivas e mistas dando início a modelagem de um pulso. Isto pode ser comprovado matematicamente através da série de Fourier na figura 2.18 para o exemplo específico de um pulso retangular.

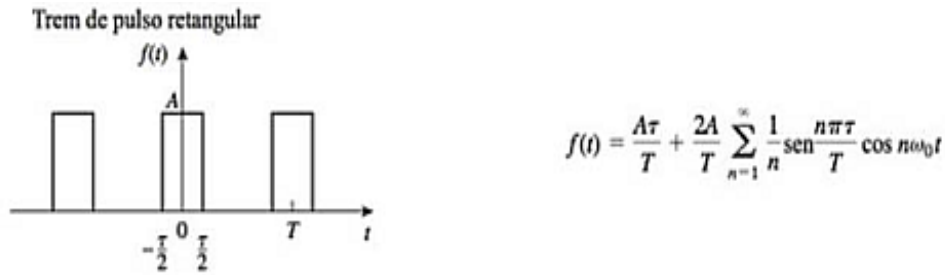


Figura 2.18 Trem de pulsos retangulares [16].

- **Número de Modos Longitudinais**

Com o objetivo de encontrar o número de modos de um laser em anel de fibra óptica operando em regime de *mode-locking*, deve-se utilizar a equação 2.5 que define o espaçamento em frequência dos modos longitudinais para uma cavidade ressonante circular.

$$\Delta f = \frac{c}{n (L_{\text{perímetro}})} \quad (2.5)$$

Logo, o número de modos será a largura de linha do laser sobre o espaçamento em frequência entre cada modo longitudinal conforme pode ser visto na equação 2.7.

$$N = \Delta \nu / \Delta f \quad (2.7)$$

- **Espaçamento no Tempo do Trem de Pulsos**

Com o objetivo de encontrar o espaçamento no tempo do trem de pulsos emitido pelo laser em regime de *mode-locking*, deve-se utilizar a relação básica entre período e frequência como mostra a equação 2.8.

$$\Delta t = 1/\Delta f \quad (2.8)$$

Substituindo 2.5 em 2.8:

$$\Delta t = 1 / \frac{c}{n(L_{perimetro})} \quad (2.9)$$

Logo,

$$\Delta t = \frac{n(L_{perimetro})}{c} \quad (2.10)$$

- **Largura no Tempo do Pulso**

Com o objetivo de encontrar a largura no tempo do pulso emitido pelo laser em regime de *mode-locking*, basta dividir o espaçamento no tempo entre os pulsos pelo número de modos longitudinais de acordo com [16]. Logo,

$$T = \Delta t / N \quad (2.11)$$

Substituindo 2.10 em 2.11:

$$T = \frac{1}{N} \frac{n(L_{perimetro})}{c} \quad (2.12)$$

No capítulo 6 deste trabalho, um laser em anel de fibra óptica operando no regime de *mode-locking* passivo será descrito baseado em uma configuração de figura-de-oito para simular artificialmente o efeito gerado pelo absorvedor saturável. Absorvedores saturáveis artificiais são dispositivos que utilizam técnicas (ex: NPR - *Nonlinear Polarization Rotation*)

para modular as perdas de uma cavidade óptica ressonante ao longo do tempo. Este efeito é similar aos dos absorvedores saturáveis convencionais como já explicado na subseção 2.6.2 deste trabalho.

3 Caracterização do Amplificador Óptico Semicondutor (SOA)

3.0 - Introdução

Este capítulo descreve a caracterização estática de um amplificador óptico semicondutor (SOA) concebido e desenvolvido para aplicações envolvendo óptica não-linear. Obteve-se: espectro ASE, corrente de transparência, ganho de amplificação, perfil de transmitância e função de transferência.

3.1 - Emissão Espontânea Amplificada (ASE) e Banda de Ganho do SOA

O objetivo da primeira medição deste trabalho foi realizar a caracterização da ASE do SOA disponível no LaCOp. O modelo de SOA utilizado foi o Kamelian SOA-NL-L1-W-ZZ e pode ser visualizado na figura 3.1.

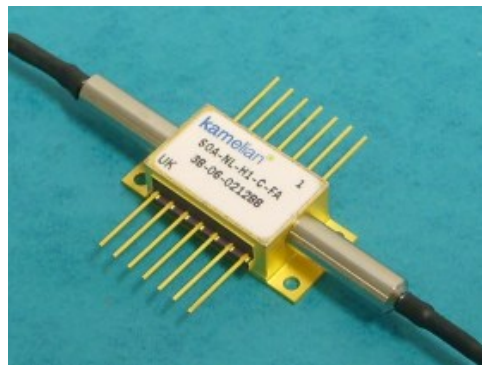


Figura 3.1 SOA Kamelian modelo não-linear com encapsulamento *butterfly* [23].

3.1.1 - Experimental

O objetivo deste experimento foi determinar a banda de ganho do SOA em função da corrente de polarização (I_{bias}). O esquema da montagem experimental pode ser visualizada na figura 3.2.

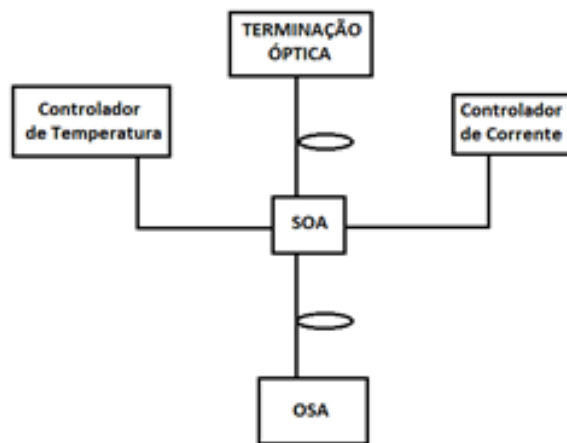


Figura 3.2 Esquema da montagem experimental para determinar a banda de ganho do SOA.

Este experimento consistiu em testar o SOA não-linear da Kamelian NL-L1-W-ZZ acoplado ao receptáculo THORLABS LM14S2, assim foi possível conectar o controlador de temperatura THORLABS TED200C e o controlador de corrente THORLABS LDC205C. A Figura 3.2, mostra o esquema de uma primeira montagem experimental para medir com um OSA (*Optical Spectrum Analyzer – YOKOGAWA PZT0B*), o espectro emitido e o comprimento de onda de pico da ASE (*Amplified Spontaneous Emission*) em função da corrente de polarização (*bias*) no SOA. A medição consistiu em gerar uma família de curvas como é possível observar na figura 3.3.

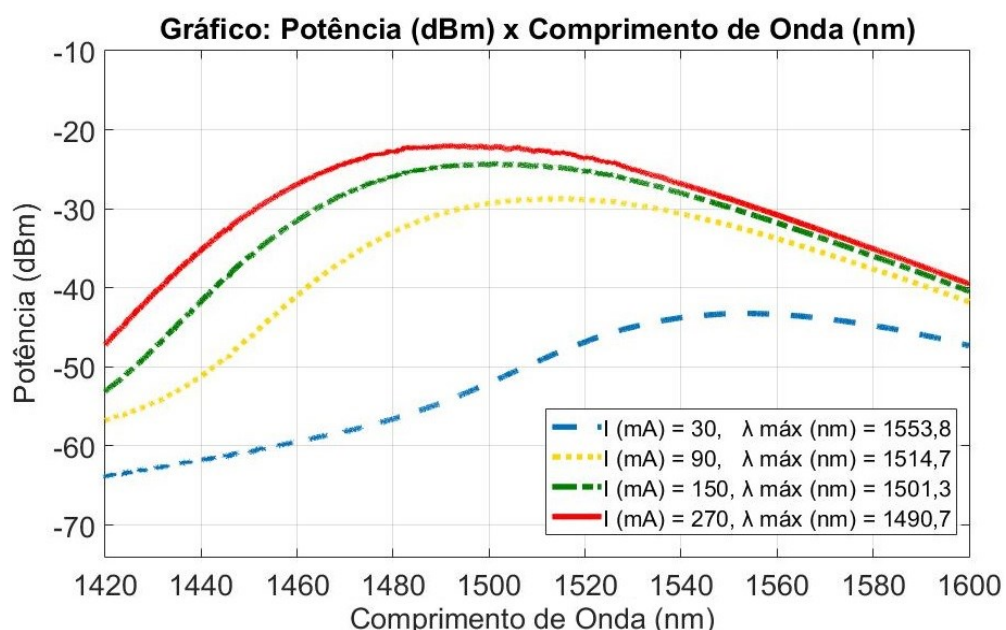


Figura 3.3 Espectros ASE gerados pelo SOA em função da corrente de polarização (*bias*) DC aplicada.

Ao observar os resultados obtidos dos gráficos da figura 3.3, é possível concluir que o SOA utilizado sofre a ação de um forte *blue-shift* com o aumento da corrente de *bias*, neste experimento limitada a um máximo aplicado de 270 mA. Este *blue-shift* caracteriza-se pelo deslocamento do pico em 1553.8 nm para aproximadamente 1490.7 nm quando I_{bias} era de 270 mA. Este comportamento pode ser explicado pelo enchimento da banda de condução com o aumento de I_{bias} no SOA. O aumento da corrente de *bias* no SOA faz com que portadores (elétrons) alcancem níveis mais energéticos dentro da banda de condução, ou seja, estes níveis vão se preenchendo (enchimento da banda) a partir do momento em que se aumenta I_{bias} , sendo assim, o decaimento destes portadores de níveis mais energéticos dentro da banda de condução para níveis menos energéticos dentro da banda de valência provoca a geração de fótons com maior energia (energia de fóton), o que se traduz em maior frequência e consequentemente menor comprimento de onda de emissão.

3.2 - Corrente de Transparência

O objetivo da segunda medição, foi determinar a corrente de transparência do SOA. Para realizar este experimento, foi utilizado um medidor de potência óptica (NEWPORT 2931-C) de dois canais, atenuador óptico variável (VOA) para evitar uma elevada potência óptica de entrada no SOA e um laser sintonizável (Agilent 8163B - 1520-1630 nm) a fim de fornecer um sinal de entrada com uma potência fixa com comprimento de onda de 1550 nm. O laser (Agilent 8163B) é um dispositivo que fornece um controle modular flexível e facilita os testes realizados no laboratório.

3.2.1 - Experimental

A corrente de transparência corresponde a um valor tal que o SOA apresenta ganho zero na escala logarítmica (0 dB) ou ganho unitário na escala linear (x1), isto significa que a potência de saída e a potência de entrada são iguais. Na equação 3.1 é possível observar esta relação.

$$g = \frac{p_{OUT}}{p_{in}} = 1 \quad \text{ou} \quad G(dB) = 10 \log_{10} p_{OUT}(mW) - 10 \log_{10} p_{in}(mW) = 0 \quad (3.1)$$

Para determinar a corrente de transparência foi realizada a montagem experimental que pode ser visualizada esquematicamente na figura 3.4.

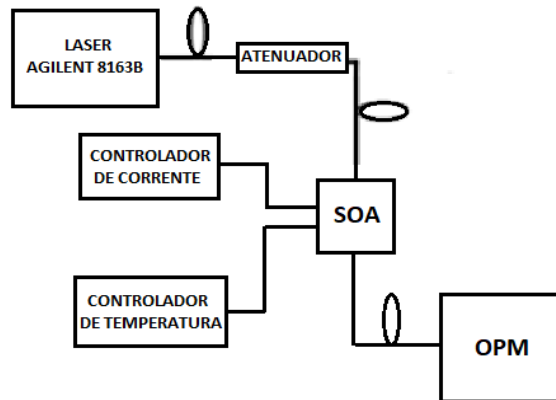


Figura 3.4 Montagem experimental para determinar a corrente de transparência do SOA.

Este experimento consistiu em inserir um sinal óptico em 1550 nm com potência de 1,0 mW na entrada do SOA. Ao variar I_{bias} através do controlador de corrente THORLABS LDC205C, foi realizado a medição da potência óptica através do OPM (*Optical Power Meter*) da NEWPORT 2931-C. As medições de potência foram feitas em mW e convertidas para dBm conforme a equação 3.1. Na figura 3.5 é possível observar os resultados do experimento.

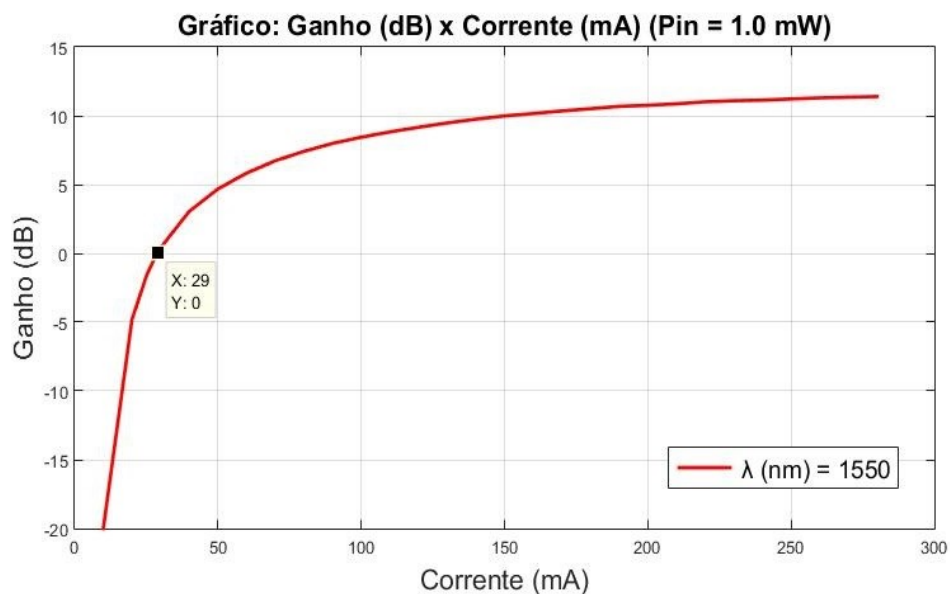


Figura 3.5 Gráfico que determina a corrente de transparência do SOA Kamelian SOA-NL-L1-W-ZZ.

A Fig. 3.5 mostra a curva de ganho de amplificação do SOA em função da corrente de *bias* aplicada com uma potência óptica injetada fixa de $P_{in} = 1,0$ mW em 1550 nm. O gráfico mostra em particular um ganho nulo em 29 mA, o que caracteriza este valor como a sua corrente de transparência. Esta última refere-se ao valor a partir do qual o SOA passa amplificar o sinal óptico de entrada, até o seu ganho máximo em torno de 11,4 dB (valor saturado). O fabricante garante um ganho de amplificação de no mínimo 10 dB para 0 dBm (1 mW) de potência óptica injetada, o que está confirmado pelo gráfico da Fig. 3.5.

3.3 - Ganho de Amplificação do SOA

Nesta seção, é descrito um experimento para determinar o ganho de amplificação do SOA em função do comprimento de onda de entrada de um sinal óptico gerado pelo laser sintonizável Agilent 8163B (1520-1630 nm) para diferentes valores de I_{bias} .

3.3.1 – Experimental

Para determinar as curvas de amplificação foi realizada a montagem experimental cujo esquema pode ser visualizado na figura 3.6.

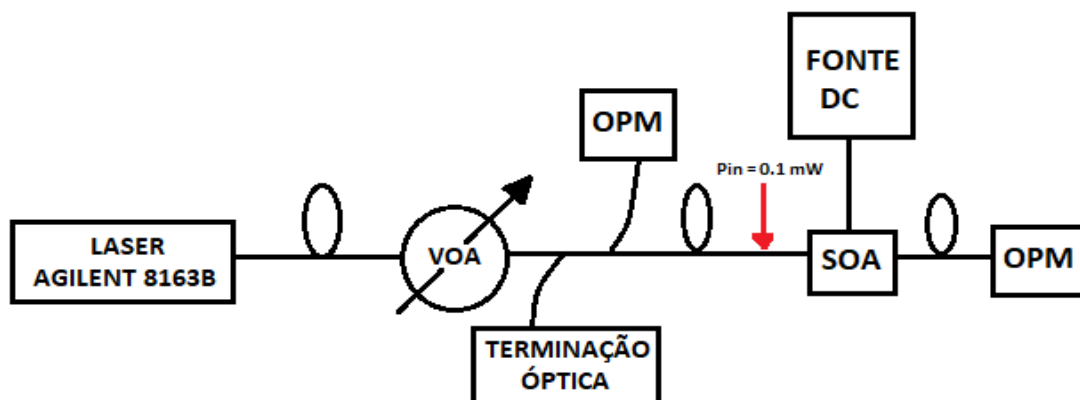


Figura 3.6 Montagem experimental para determinar a curva de amplificação do SOA em função do comprimento de onda.

Neste esquema (fig. 3.6) utilizou-se um laser sintonizável (Agilent 8163B) e um atenuador óptico variável (VOA) para injetar 0,1 mW de potência óptica em 1550 nm na entrada do SOA através de um acoplador direcional (OPTOLINK) com razão 80/20. Então, 20% da potência é medida pelo OPM1 (*Optical Power Meter*), enquanto os outros 80% são injetados no SOA. Posteriormente variou-se o comprimento de onda emitido pelo laser sintonizável (1520-1630 nm) para uma dada corrente constante de polarização do SOA (20 mA, 150 mA e 280 mA). Os resultados podem ser vistos na figura 3.7.

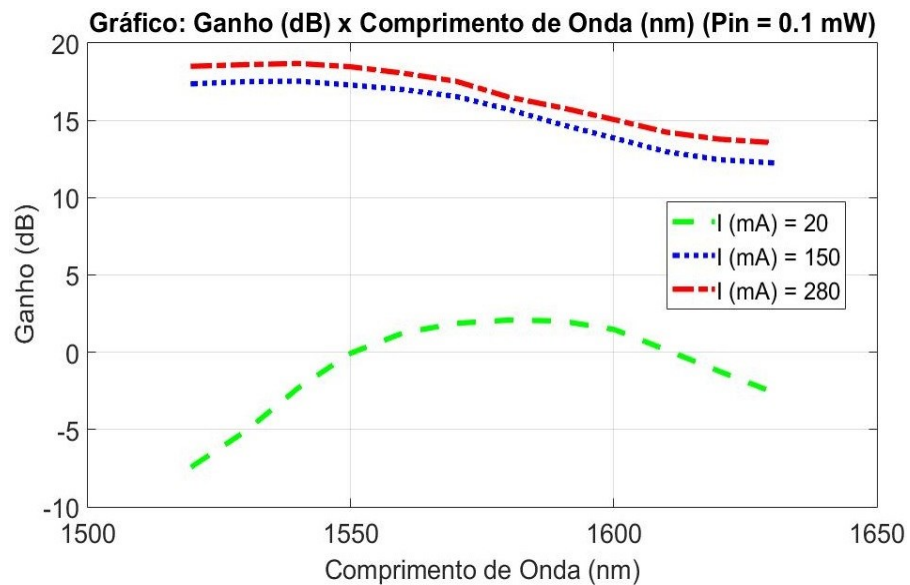


Figura 3.7 Curva de ganho de amplificação do SOA em função do comprimento de onda na faixa 1520-1630 nm considerando alguns valores de I_{bias} e $P_{in} = 0,1$ mW.

A Figura 3.7 mostra o resultado de medidas do ganho de amplificação do SOA na faixa espectral 1520-1630 nm considerando um baixo sinal de entrada (0,1 mW) nos valores de corrente de bias em 20 mA (abaixo da transparência), 150 mA e 280 mA. Pode-se claramente notar, que acima da corrente de transparência o pico de ganho relativamente plano está em torno de 1550 nm, conforme revelado pelo fabricante [23].

3.4 - Perfil De Transmitância e Função de Transferência do SOA

Neste experimento, foi realizada a caracterização do filtro passa-banda (BPF) da *Lightwaves2020* (TOTF - *Tunable Optical Filter*) e obtida a função transferência do SOA

quando sintonizado em determinado comprimento de onda. O filtro passa-banda *Lightwaves2020* é um filtro de banda estreita (em 1,2 nm) que opera ou que pode ser sintonizado manualmente entre 1520 nm e 1565 nm. A sintonização é obtida girando-se manualmente um parafuso micrométrico integrado ao dispositivo até o comprimento de onda central desejado [24]. A calibração da marcação em milímetros do parafuso micrométrico com o comprimento de onda central que o dispositivo permite que seja transmitido, deve ser feita pelo usuário.

3.4.1 – Experimental

Na primeira etapa desta secção, dedicada à caracterização do BPF, é descrita a visualização da ASE produzida pelo SOA no Analisador de Espectro Óptico (*YOKOGAWA PZT0B*) utilizando o BPF sintonizado em diferentes comprimentos de onda. Na figura 3.8 é possível visualizar a montagem experimental.

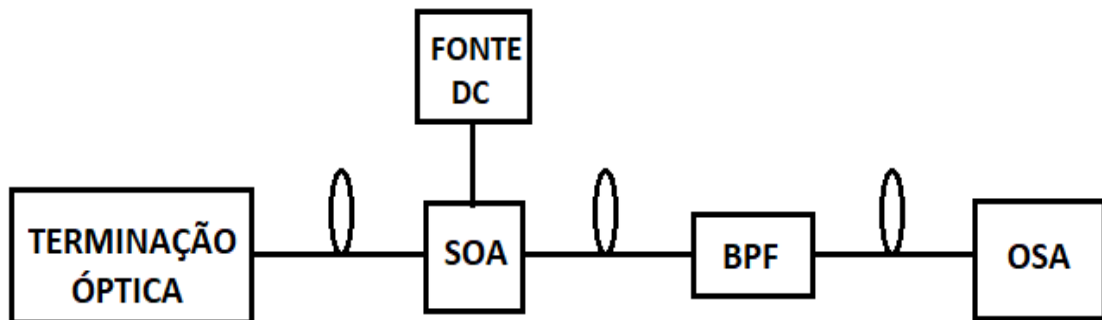


Figura 3.8 Montagem Experimental Utilizada para Visualização da Seletividade do BPF.

Este experimento consistiu em manter a corrente de *bias* do SOA constante em 70 mA. Realizava-se então a sintonização do BPF em determinado comprimento de onda e observava-se o espectro no OSA (*YOKOGAWA PZT0B*). Foi realizada uma varredura discreta em comprimento de onda para toda faixa de operação do filtro e os resultados podem ser visualizados na figura 3.9.

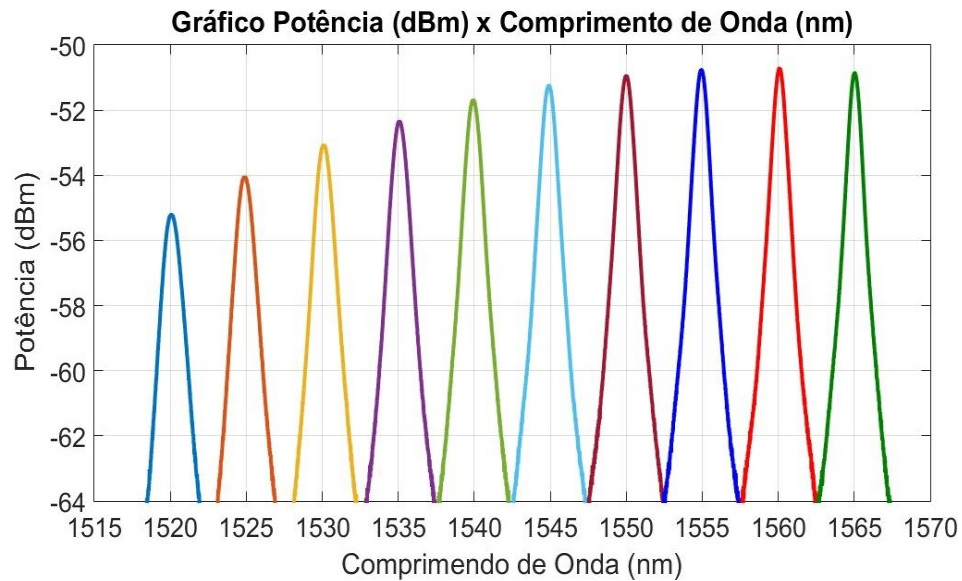


Figura 3.9 Espectro de transmitância do filtro BPF *Lightwaves2020*.

A Figura 3.9, mostra que a largura espectral em 3dB do filtro passa-banda utilizado é de aproximadamente 1,1 nm e o mesmo é sintonizável na banda 1520-1565 nm, esta característica poderá ser utilizada mais a frente nos testes do laser em anel CW (*Continuous Wave*). Os valores obtidos para o BPF estão de acordo com o revelado pelo fabricante.

3.4.2 – Experimental

Na segunda etapa desta secção, foi realizada a caracterização do SOA através da sua função de transferência com o filtro passa-banda sintonizado nos comprimentos de onda de pico mostrados no gráfico da figura 3.9. Na figura 3.10 é possível visualizar o esquema da montagem experimental utilizada.

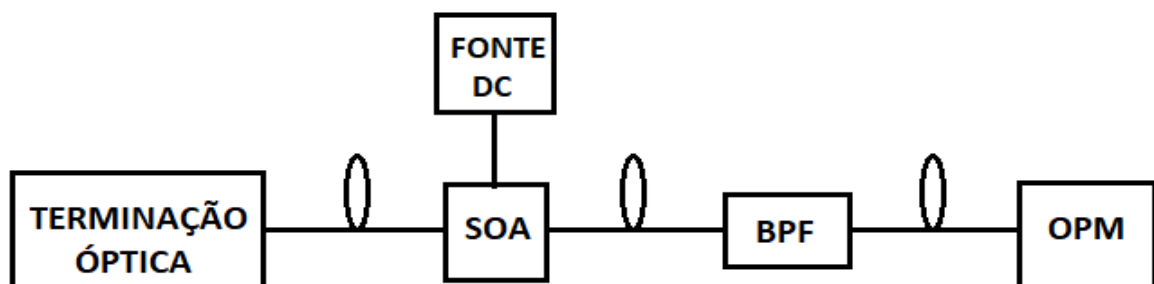


Figura 3.10 Montagem experimental utilizada para obter a função transferência do SOA com BPF sintonizado.

Este experimento (fig. 3.10) apresentou uma característica ininterrupta visto que todas as etapas deviam ser repetidas até a varredura de toda a faixa de operação (1520-1565 nm) do filtro *Lightwaves2020*. Na primeira etapa, utilizou-se o OSA (*YOKOGAWA PZT0B*) para sintonizar o filtro em um comprimento de onda de pico determinado, conforme já visto na figura 3.9. A partir deste momento, com o filtro BPF já sintonizado, a segunda etapa consistiu em realizar a aquisição dos valores de potência óptica emitida pelo SOA através de um OPM (*NEWPORT 2931-C*) em função da variação da corrente de *Bias*. O resultado da medição gerou uma família de curvas como é possível observar no gráfico da figura 3.11.

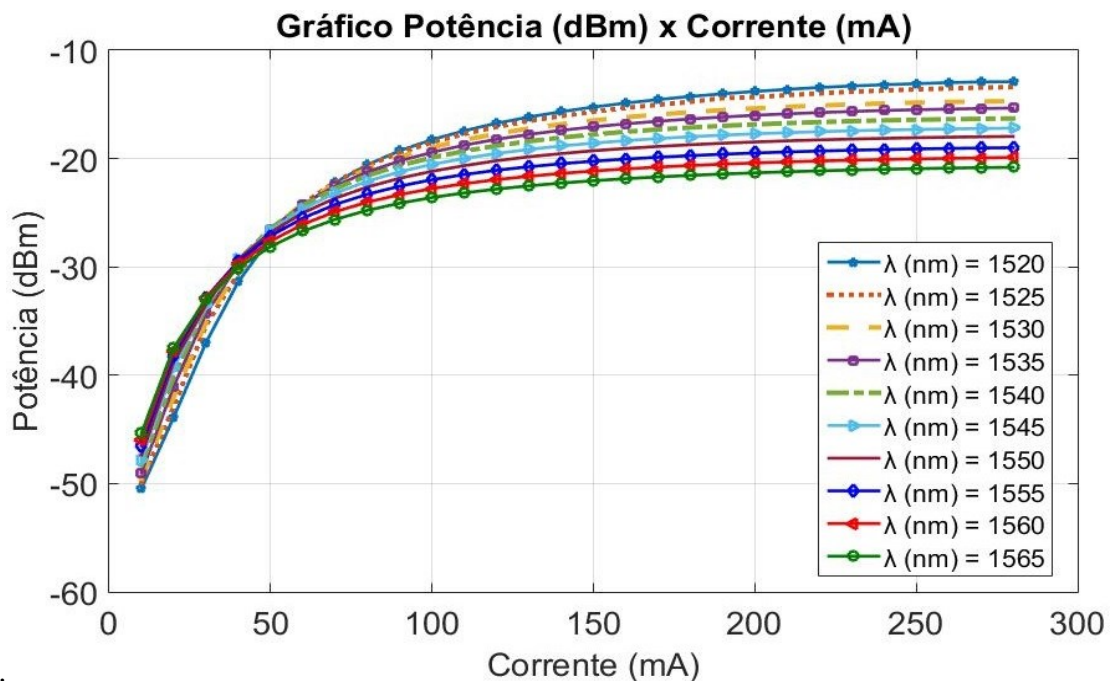


Figura 3.11 Função de transferência ($P \times I_{bias}$) do SOA com sintonização espectral realizada pelo BPF.

A Figura 3.11, mostra a potência óptica emitida pelo SOA quando se utiliza o filtro passa-banda sintonizado dentro da banda espectral 1520-1565 nm. Nota-se que acima de 50 mA, é possível extrair uma maior potência para menores comprimentos de onda. Este último acontece devido ao deslocamento *blue-shift* dos comprimentos de onda de pico da ASE conforme já mostrado pela Figura 3.2. O comprimento de onda de 1520 nm emite uma maior potência para uma corrente de bias de 270 mA, cerca de -13 dBm.

4 Laser Sintonizável em Anel de Fibra Óptica com Amplificador Óptico Semicondutor (SOA) como Meio de Ganho

4.0 Introdução

Este capítulo descreve a montagem e testes de um laser em onda contínua, sintonizável, formado por um anel de fibra óptica contendo um amplificador óptico semicondutor (SOA) como meio de ganho. Um filtro óptico passa-banda com $< 1,2 \text{ nm @ } 3 \text{ dB}$ de largura inserido no anel e ajustável manualmente, foi usado para realizar a referida sintonização ao longo da banda espectral de 45 nm de largura (1520-1565 nm).

4.1 Montagem Experimental

Nesta secção, é descrita a montagem experimental do laser em anel operando em onda contínua. Além do SOA Kamelian SOA-NL-L1-W-ZZ e do filtro passa-banda (BPF) da *Lightwaves2020* (USA) caracterizados no capítulo 3, foram também utilizados diversos acopladores direcionais, com diferentes razões de acoplamento, fabricados pela Optolink (BRA), permitindo então que uma parte da luz fosse extraída e a outra permanecesse circulando no anel de fibra óptica. Uma das portas de um dos referidos acopladores era então conectada a uma terminação óptica a fim de evitar possíveis reflexões espúrias de luz. Um controlador de polarização da Fiberlogix (UK) na configuração 242 [25, Apêndice (pag.99)] otimiza a potência óptica de saída do laser. No anel, está inserido um isolador a fibra óptica que força a luz circular apenas em um sentido, anti-horário no presente caso, formando assim uma cavidade ressonante circular. Finalmente, a luz de saída do laser podia ser analisada com o uso de um medidor de potência óptica (NEWPORT 2931-C), analisador de espectro óptico (*YOKOGAWA PZT0B*) ou elétrico (ROHDE&SCHWARZ FSV 4 GHz). O esquemático e uma foto da montagem experimental podem ser visualizados na figura 4.1.

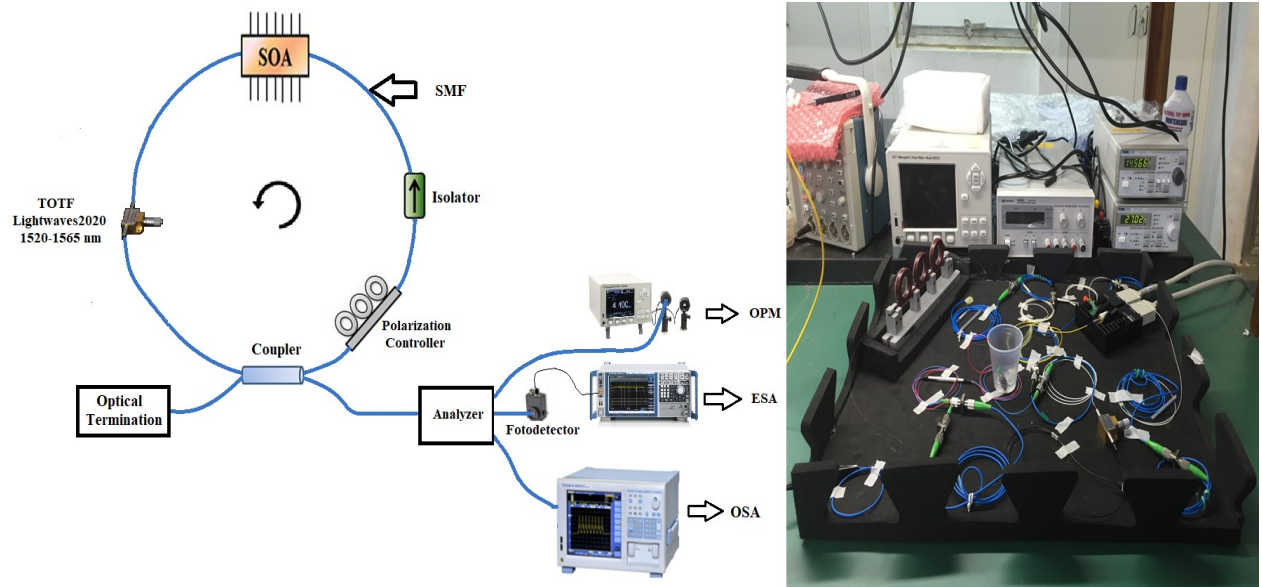


Figura 4.1 Esquema e foto da montagem experimental do laser em onda contínua, sintonizável, em anel de fibra óptica com SOA como meio de ganho óptico.

4.2 Resultados Experimentais

Nesta secção, são descritos os resultados experimentais de caracterização do laser em anel mostrado na Fig. 4.1 e algumas discussões pertinentes são também aqui apresentadas.

A. Corrente Limiar (*Threshold Current*)

Nesta primeira etapa, foi feita a aquisição dos valores de potência óptica emitida pelo laser em função da corrente DC aplicada no SOA e parametrizada pela porcentagem de extração de luz do anel. Este último procedimento, pôde ser realizado simplesmente trocando o acoplador 2x2 mostrado na Figura 4.1 de tal forma que apresente diferentes razões de acoplamento. Uma forma mais prática seria o uso de um acoplador a fibra com razão ajustável manualmente [26], porém não dispomos do referido componente no nosso laboratório.

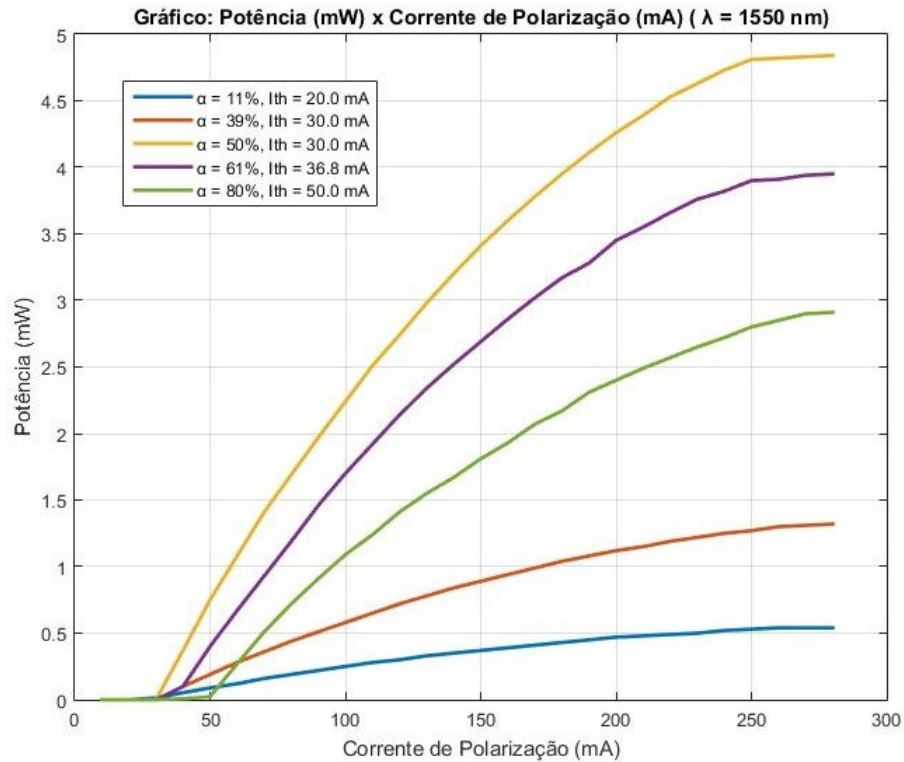


Figura 4.2 Dependência da potência óptica de saída do laser em anel emitindo em 1550 nm em função da corrente de polarização e parametrizado pela razão de acoplamento (extração de luz do anel) de 11/89 até 80/20.

Ao observar o gráfico da Figura 4.2, é importante destacar que quanto maior a porcentagem de luz extraída (razão de acoplamento), maior será a corrente limiar (*threshold current*) necessária. No presente caso, a maior corrente limiar foi de 50 mA para um razão de acoplamento (α) de 80%. A menor corrente limiar foi de 20 mA para uma razão de acoplamento de 11%. Nos casos em que as razões de acoplamento foram de 39% e 61%, obtivemos uma corrente limiar de 30 mA e 36,8 mA, respectivamente. A Figura 4.3 mostra o gráfico da corrente limiar em função da razão de acoplamento do dispositivo. Por fim, é importante ressaltar que para extrair o máximo de potência óptica do laser em anel, cerca de 4,8 mW, utilizou-se um acoplador direcional capaz de extrair 50% da luz do anel com uma corrente limiar de 30 mA. Sendo assim, definimos a configuração utilizando uma razão de acoplamento de 50% como ótimo dado a maior potência laser alcançada dentre todas as configurações aqui apresentadas.

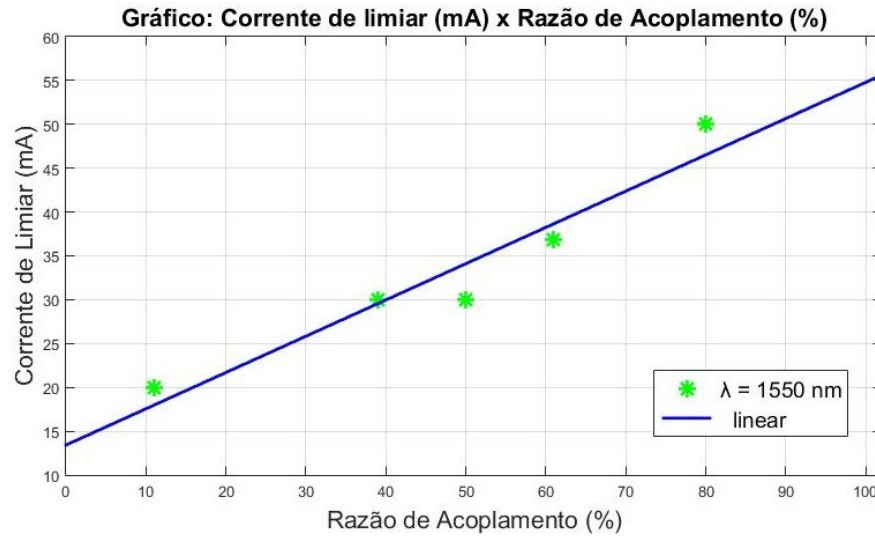


Figura 4.3 Dependência da corrente limiar do laser em anel como função da razão de acoplamento (extração de luz do anel).

Ao observar o gráfico da Figura 4.3, é possível visualizar o aumento da corrente limiar em função da razão de acoplamento (α). Este comportamento é explicado pelo fato do anel óptico comportar-se como uma cavidade ressonante, ao retirar grande parte da luz desta cavidade, torna-se então necessário aplicar uma maior corrente de polarização para uma devida compensação da perda de uma fração da luz que fora retirada do anel, sendo assim se restabelece a inversão de população e, portanto o comportamento laser do dispositivo construído. Observa-se uma variação praticamente linear entre a corrente de limiar e a razão de acoplamento através da reta que melhor se ajusta aos pontos experimentais.

B. Sintonização Espectral

Nesta etapa, o laser está configurado com razão de acoplamento de 80% ($\alpha = 80\%$), sendo assim, foi feita a aquisição do espectro emitido conectando a saída do dispositivo no analisador de espectro óptico (*YOKOGAWA PZT0B*). Na figura 4.4 é possível observar o espectro quando o filtro passa banda (BPF) estava sintonizado em 1550 nm. É importante observar a ASE emitida pelo SOA após a passagem pelo filtro *Lightwaves2020*, neste caso, um dos terminais de saída de luz do SOA no circuito óptico da figura 4.1 encontrava-se em aberto, neste caso, não se têm a ação laser. Já na topologia em anel, além do *Lightwaves2020* filtrar a ASE em torno de 1550 nm, o mesmo, força a ressonância do comprimento de onda de 1550 nm no anel de fibra óptica. Assim, é observado um aumento significativo do ganho e redução da FWHM confirmando o comportamento laser do dispositivo construído.

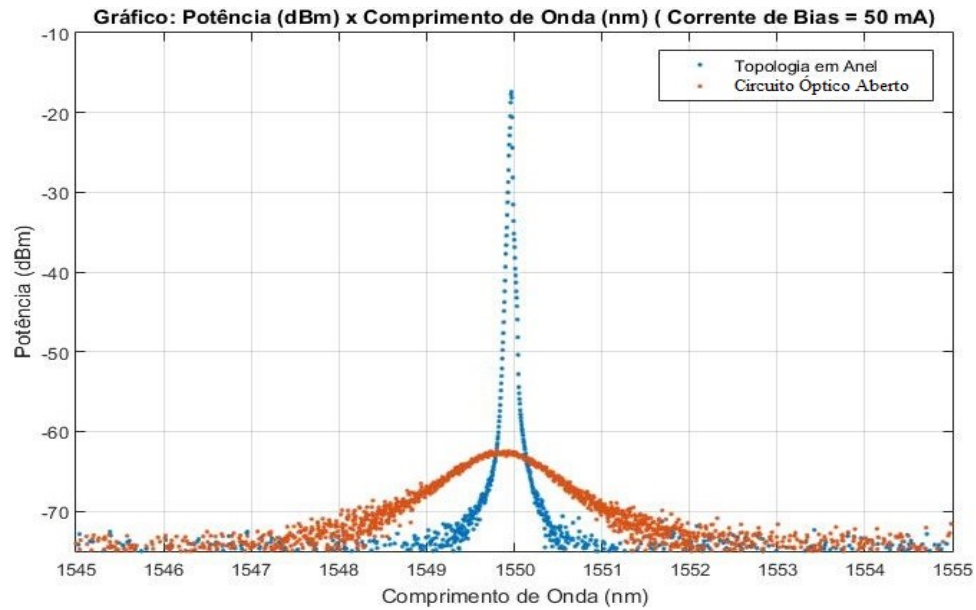


Figura 4.4 Espectro emitido pelo dispositivo com circuito óptico em aberto e na topologia em anel.

A Figura 4.5 mostra diversos espectros que evidenciam a sintonização espectral do laser em anel quando o filtro BPF é ajustado manualmente.

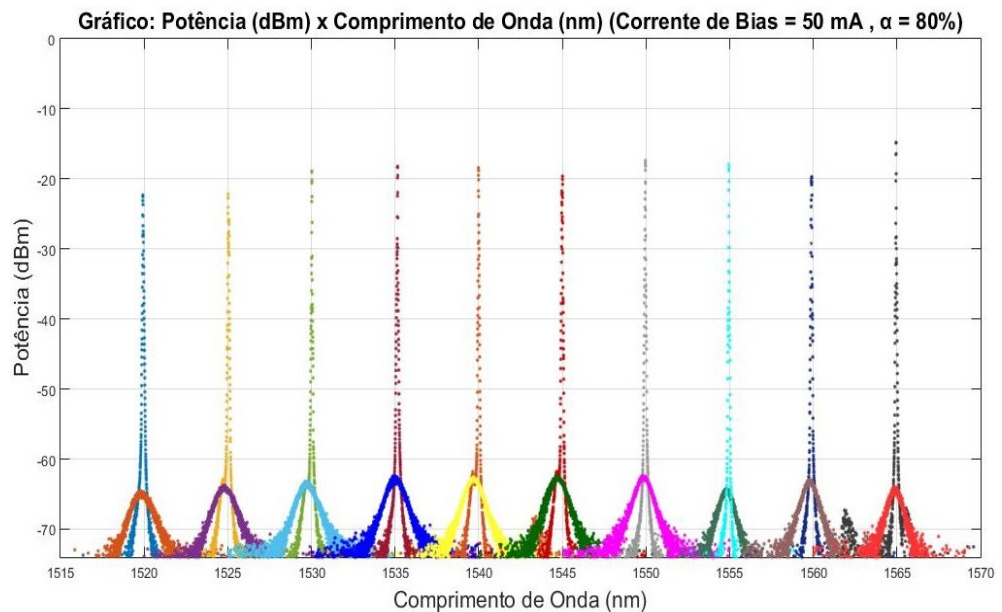


Figura 4.5 Sintonização espectral do laser em anel conforme pode ser coberto pelo ajuste do filtro FPB com $I_{bias} = 50$ mA.

Conforme mostrado na figura 4.5, é importante destacar que ao se extrair 80% da luz do anel para uma corrente de *bias* de 50 mA, verifica-se um aumento de ~ 40 dB da potência óptica emitida em todos os comprimentos de onda sintonizados, em relação a potência da ASE filtrada, além de uma largura espectral menor que 0,02 nm, valor este abaixo da

resolução máxima do OSA (*YOKOGAWA PZT0B*) utilizado. Este resultado também nos permitiu garantir o comportamento laser do dispositivo construído em toda a banda sintonizável através do ajuste do *Lightwaves2020* (1520-1565 nm).

C. Modos Longitudinais

A Equação (2.5), mostra a fórmula para o cálculo teórico do espaçamento entre frequências dos modos longitudinais de um laser de onda contínua em anel conforme já mostrado na subseção 2.1.4 e seção 2.4 deste trabalho.

$$\Delta f = \frac{c}{n_{Fibra} L_{perimetro}} \quad (2.5)$$

Conforme mostrado em (2.5), c é a velocidade da luz no vácuo (3×10^8 m/s), n_{Fibra} (1,46) é o índice de refração promediado que a luz experimenta ao se propagar ao longo da fibra e $L_{perimetro}$ é o perímetro do anel de fibra óptica. Deve-se notar que a fórmula (2.5) é aproximada, pois não leva em conta no denominador, a contribuição do SOA com índice de refração 3,5 e comprimento físico de 1,5 mm (muito pequeno), conforme informa o fabricante [23]. Nesta etapa final de caracterização, o laser CW em anel de fibra óptica está configurado com uma razão de acoplamento de 50 % (configuração ótima). Desta forma mediu-se o comprimento físico do anel de fibra como sendo $L_{perimetro} \sim 14$ m, e de acordo com (2.5), obtivemos $\Delta f \sim 14$ MHz como o espaçamento das frequências de oscilação dos modos longitudinais no anel. Sendo assim foi feita a aquisição do espectro elétrico através da conexão de um fotodetector com banda de 1,2 GHz (THORLABS DET01CFC) acoplado a um ESA (*Electrical Spectrum Analyzer* - ROHDE&SCHWARZ FSV) com 4 GHz de banda.

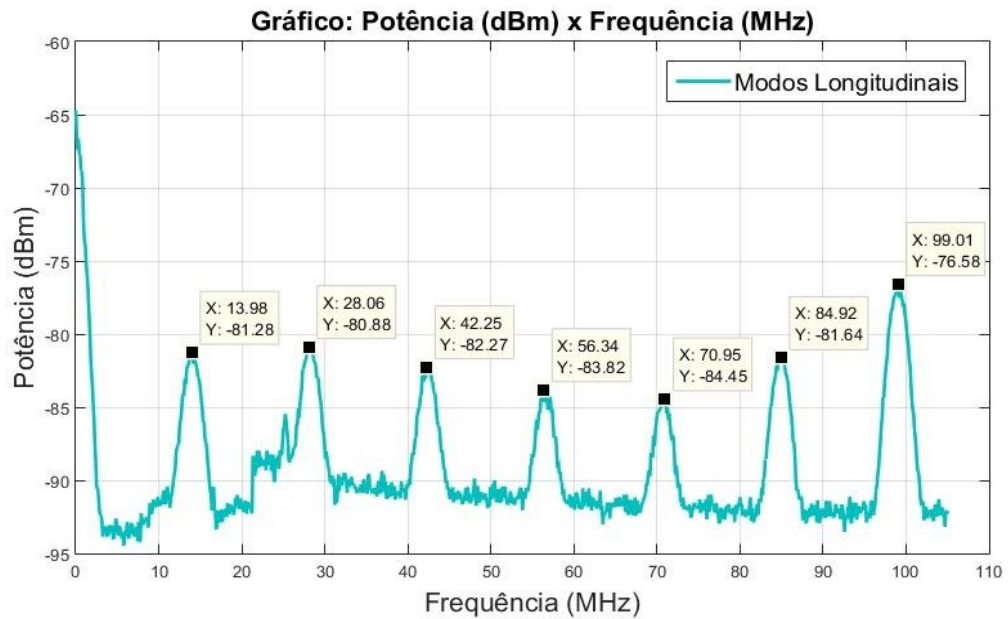


Figura 4.6 Espectro elétrico do laser em anel mostrando o modo longitudinal fundamental e alguns de seus harmônicos (2° ao 7°) para uma RBW = 1 MHz.

Ao observar a figura 4.6, pode-se claramente verificar a detecção do modo longitudinal fundamental centrado em 13,98 MHz, assim como alguns de seus harmônicos por sua vez centrados em 28,06 MHz; 42,25 MHz; 56,34 MHz; 70,95 MHz; 84,92 MHz e 99,01 MHz. Estes resultados obtidos experimentalmente, nos fornecem um espaçamento em frequências de ~ 14 MHz, em acordo com o cálculo teórico.

Este laser em anel de fibra óptica com SOA como meio de ganho, pode ser útil em diversas aplicações como a caracterização e testes de equipamentos em um ambiente de laboratório, e como um sub-circuito óptico como, por exemplo, um laser em regime de *mode-locking*. Este último regime poderá ser atingido desde que tenhamos um laser em multimodo longitudinal, conforme aqui mostrado e que será apresentado no capítulo 6 deste trabalho.

5 Laser em Anel com Amplificador Óptico Semicondutor (SOA) e Filtro por Interferência Multimodal

5.0 Introdução

Este capítulo descreve a montagem e testes de um laser em onda contínua, formado por um anel de fibra óptica monomodo contendo um amplificador óptico semicondutor (SOA) como meio de ganho. Um filtro óptico consistindo de 6 m de fibra óptica multimodo foi inserido no anel. Tal tipo de filtro é conhecido como MMI (*Multimode-Interference*) e é capaz de transmitir um pente de frequências ópticas na banda em torno de 1550 nm.

5.1 Caracterização de Estruturas SMS (Single-Mode-Multimode-Single-Mode)

Nesta primeira etapa de caracterização de estruturas SMS, foi necessário adquirir o espectro do SOA quando I_{bias} era de 280 mA. A normalização física consiste em realizar a divisão da potência da luz após a transmissão na estrutura SMS pela potência emitida pelo SOA para um valor de corrente comum. O objetivo é utilizar SOA como fonte de luz de espectro largo (luz “branca”) para realizar a caracterização de transmitância da estrutura SMS. Isto possibilita determinar a razão de extinção da passagem da luz em torno de 1550 nm conforme mostrado na figura 5.3. Na figura 5.1 é possível visualizar o espectro do SOA para $I_{bias} = 280 \text{ mA}$.

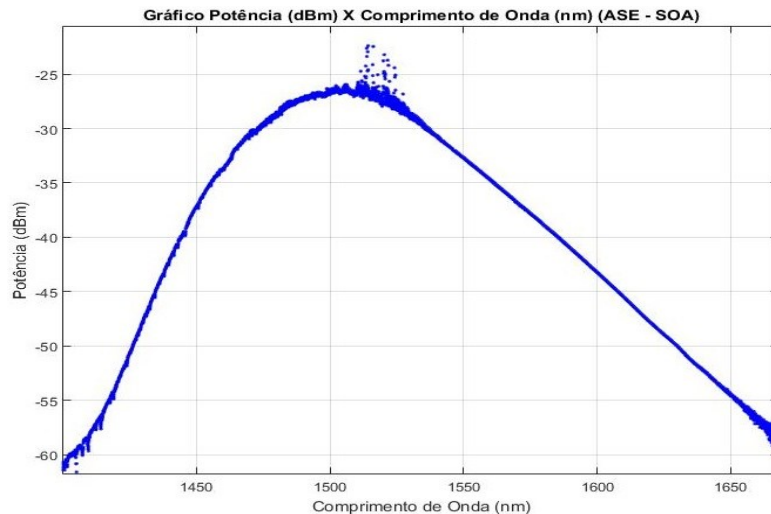


Figura 5.1 Espectro do SOA para $I_{bias} = 280 \text{ mA}$.

Após apresentados os conceitos fundamentais de estruturas SMS na seção 2.5 deste trabalho, na primeira etapa deste capítulo é descrito a montagem experimental para medir o espectro de transmitância de uma estrutura SMS com 6 metros de comprimento de fibra MM GI (Multimodo de Índice Gradual e núcleo de 62,5 μm) quando testada com a própria luz de ASE (*Amplified Spontaneous Emission*) gerada pelo SOA e analisada pelo OSA (*YOKOGAWA PZT0B*). Na figura 5.2, a ASE propaga-se pela fibra SM em um único modo transversal (modo fundamental) de propagação, porém na primeira emenda por fusão (*Input*) SM/MM, a energia que antes estava concentrada neste único modo distribui-se entre os diversos modos transversais de propagação. Considerando que, a condição de alinhamento das fibras SM e MM sejam satisfeita, apenas o modo de mais baixa ordem (LP_{01}) e mais alguns com simetria azimutal (LP_{0m} , onde m é inteiro > 1) são excitados na fibra GI-MM (espera-se que a maior parte da energia concentre-se no modo LP_{01}). Sendo assim, cria-se um efeito de “filtragem espacial” no momento da re-acoplagem à fibra SM (*Output*), possibilitando a ocorrência de interferência multimodal (MMI).

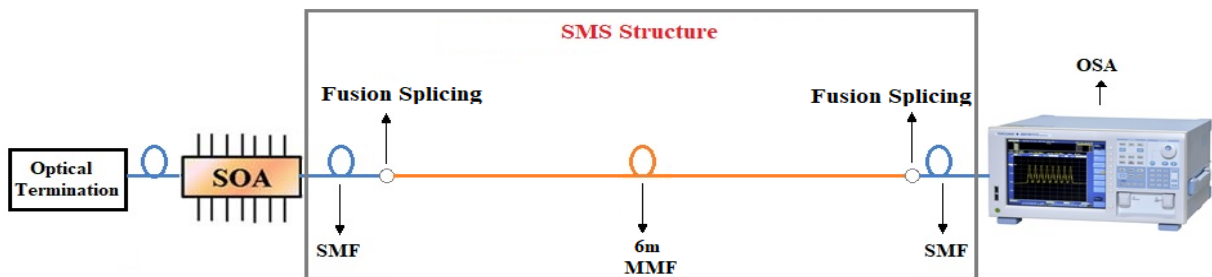


Figura 5.2 Montagem experimental para realizar a caracterização espectral de transmitância da estrutura SMS com 6 metros de fibra MM.

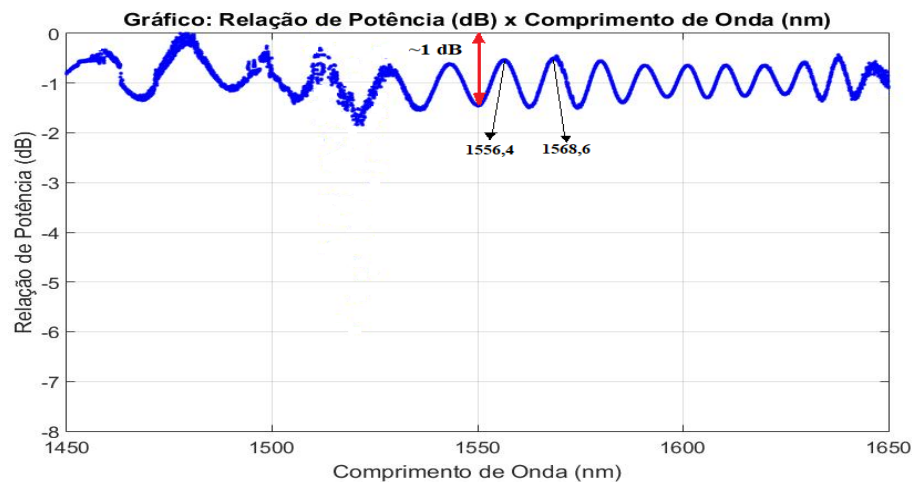


Figura 5.3 Espectro normalizado transmitido por uma estrutura SMS com 6 m de comprimento de fibra óptica MM. Pode-se notar um pente de frequências ópticas com 16 picos não-equiespaçados em comprimento de onda.

Na figura 5.3, pode-se notar dois picos de transmissão em 1556,4 nm e 1568,6 nm e uma razão de extinção de ~ 1 dB em torno de 1550 nm, ou seja, para uma (1) passagem de luz.

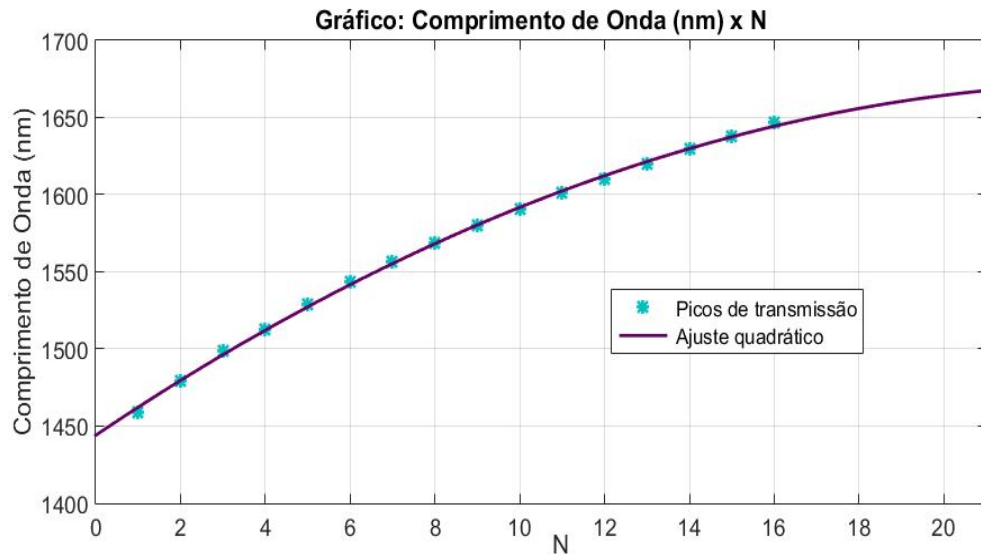


Figura 5.4 Espaçamento entre os 16 picos em comprimento de onda gerados dentro da banda 1450-1650 nm pela estrutura SMS.

A Fig 5.4, mostra o comprimento de onda central de cada um dos 16 picos em comprimento de onda não-equiespaçados que foram gerados dentro da banda 1450-1650 nm representados na figura 5.3. Nota-se que o espaçamento entre os picos gerados vão diminuindo a partir do momento em que se desloca para maiores comprimentos de onda dentro da banda referida. Em torno de 1550 nm nota-se um espaçamento de ~ 12 nm.

Na segunda etapa desta seção, foi introduzido um MS (*Mode Scrambler* – Misturador de Modos) (*Multimode Fiber Scrambler AC Photonics*) [27] em diferentes posições da estrutura SMS. A primeira montagem apresentada se deu com MS inserido no final da estrutura SMS conforme visto na figura 5.5.

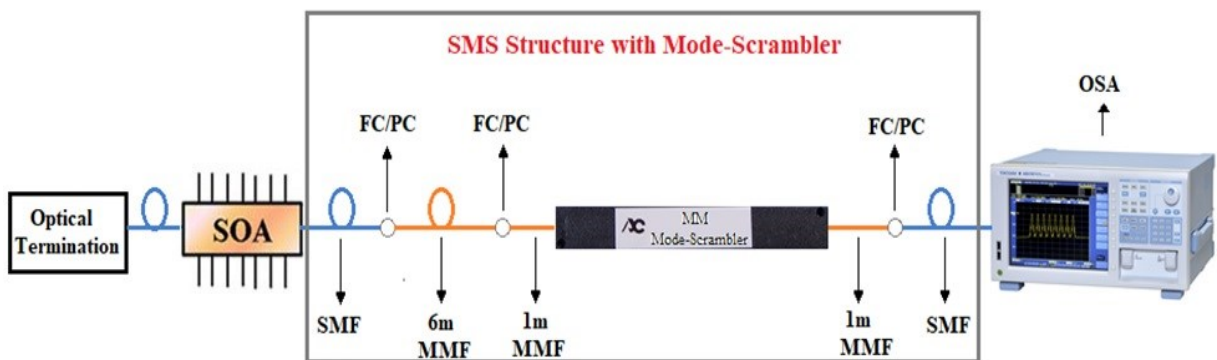


Figura 5.5 Montagem experimental para realizar a caracterização espectral de transmitância da estrutura SMS com 6 metros de fibra MM e MS inserido no final da estrutura.

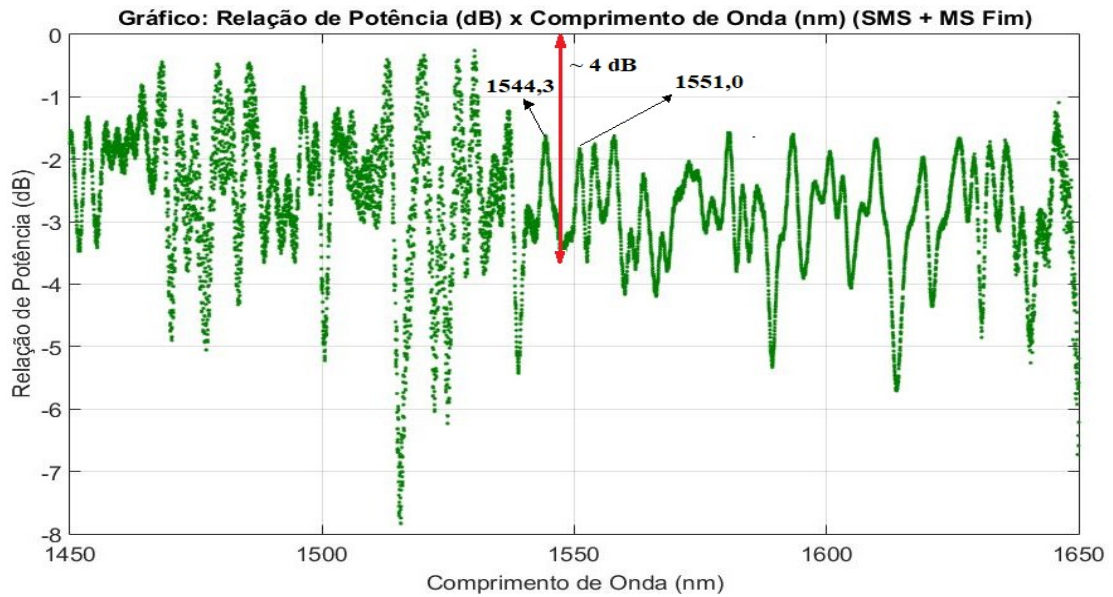


Figura 5.6 Espectro normalizado transmitido por uma estrutura SMS com MS inserido no final e 6 m de comprimento de fibra óptica MM. Observam-se 27 picos principais quase que perfeitamente equiespaçados em comprimento de onda. Pode-se notar que alguns dos picos apresentam uma estrutura fina.

Ao observar o resultado mostrado na figura 5.6, pode-se notar que agora surgem 27 picos principais quase que perfeitamente equiespaçados em comprimento de onda onde alguns destes picos se desdobram em estruturas finas, fornecendo um total de 50 picos. Em torno de 1550 nm, pode-se notar a presença de 2 picos de transmissão em 1544,3 nm e 1551,0 nm e uma razão de extinção agora de ~ 4 dB, ou seja, para uma (1) passagem de luz.

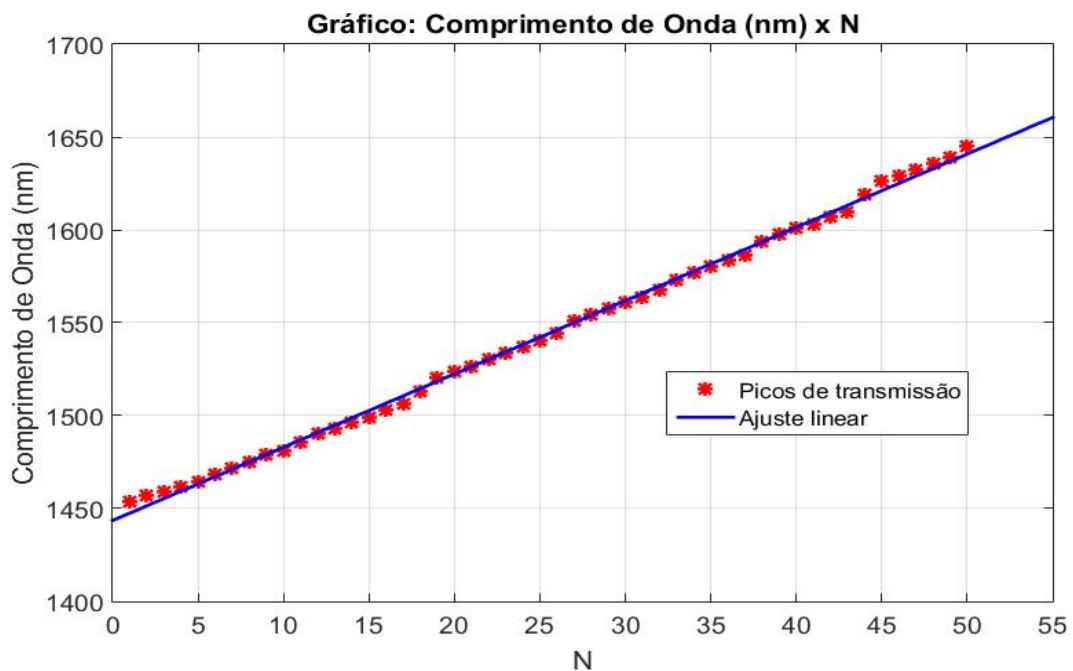


Figura 5.7 Espaçamento entre os 50 picos de comprimento de onda (incluindo as estruturas finas) gerados dentro da banda 1450-1650 nm com MS inserido no final da estrutura SMS.

A Figura 5.7, mostra as posições dos picos de comprimento de onda localizados dentro da banda 1450-1650 nm. Pode-se identificar 27 picos principais quase que perfeitamente equiespaçados em ~ 7 nm de comprimento de onda. Alguns destes picos se desdobram em estruturas finas [12] com espaçamento entre sub-picos consecutivos que chegam a ~ 3 nm. A reta gerada na figura 5.7 permitiu concluir que o MS linearizou o espaçamento entre os comprimentos de onda de pico.

Uma segunda configuração de estrutura SMS com MS foi montada, porém desta vez foi feita a inserção do misturador de modos no centro geométrico dos 6 metros de fibra MM conforme pode ser visualizado na figura 5.8.

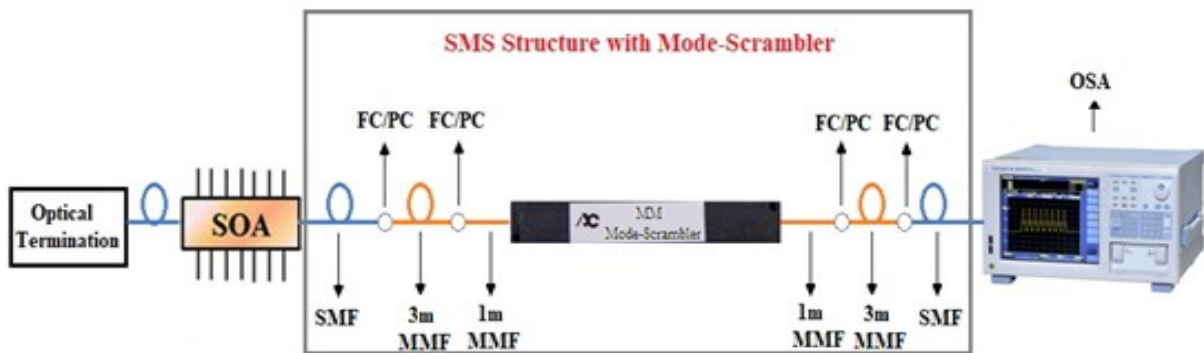


Figura 5.8 Montagem experimental para realizar a caracterização espectral de transmitância da estrutura SMS com 6 metros de fibra MM e MS inserido no centro geométrico dos 6 metros de fibra MM.

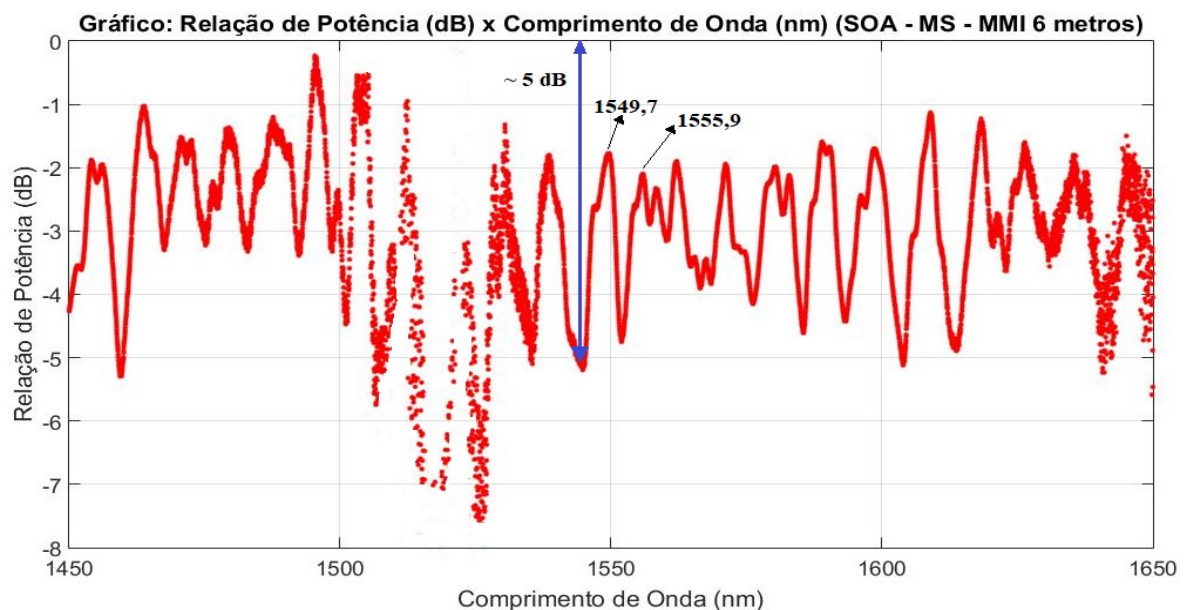


Figura 5.9 Espectro normalizado transmitido por uma estrutura SMS com MS inserido no centro geométrico dos 6 metros de fibra MM. Observam-se 22 picos principais quase que perfeitamente equiespaçados em comprimento de onda. Pode-se notar que alguns dos picos apresentam estrutura fina.

Ao observar a figura 5.9, pode-se notar que agora surgem 22 picos principais quase que perfeitamente equi-espçados em comprimento de onda onde alguns destes picos se desdobram em uma estrutura fina, fornecendo um total de 29 picos. Em torno de 1550 nm, pode-se notar a presença de 2 picos de transmissão em 1549,7 nm e 1555,9 nm, e uma razão de extinção agora de ~ 5 dB, para uma (1) passagem de luz.

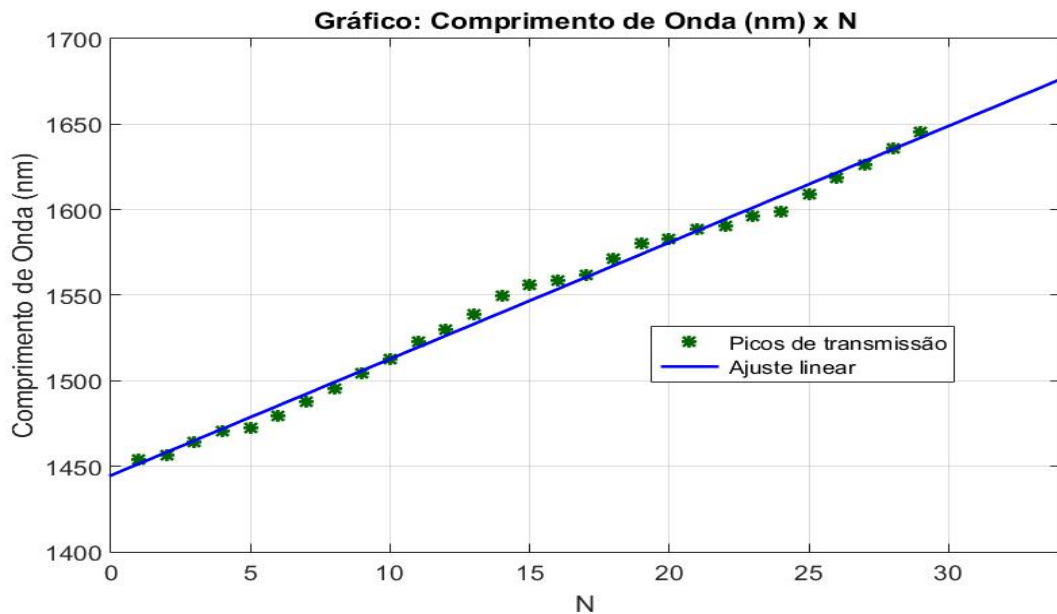


Figura 5.10 Espaçamento entre os 29 picos de comprimento de onda (incluindo as estruturas finas) gerados dentro da banda 1450-1650 nm com MS inserido no centro geométrico nos 6 metros de fibra MM.

A Figura 5.10, mostra as posições dos picos de comprimento de onda de cada um dos 29 localizados dentro da banda 1450-1650 nm. Pode-se identificar 22 picos principais quase que perfeitamente equi-espçados em ~ 9 nm de comprimento de onda. Alguns destes picos se desdobram em uma estrutura fina [12] com espaçamento entre sub-picos consecutivos que chegam a ~ 2 nm. Observa-se novamente o comportamento linear ocasionado pela introdução do MS.

Finalmente, na última configuração, foi feita a inserção de um MS no início da estrutura SMS (ou seja, antes da fibra MM) conforme pode ser visualizado na figura 5.11.

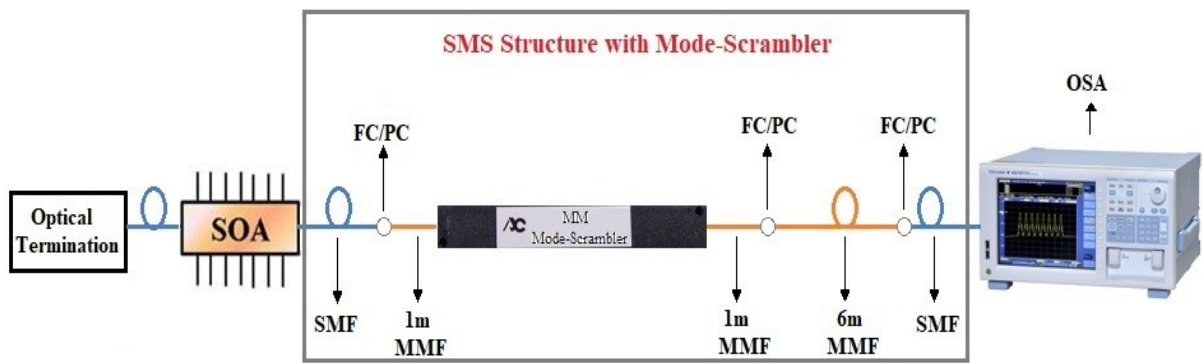


Figura 5.11 Montagem experimental para realizar a caracterização espectral de transmitância da estrutura SMS com 6 metros de fibra MM e MS inserido no início da estrutura.

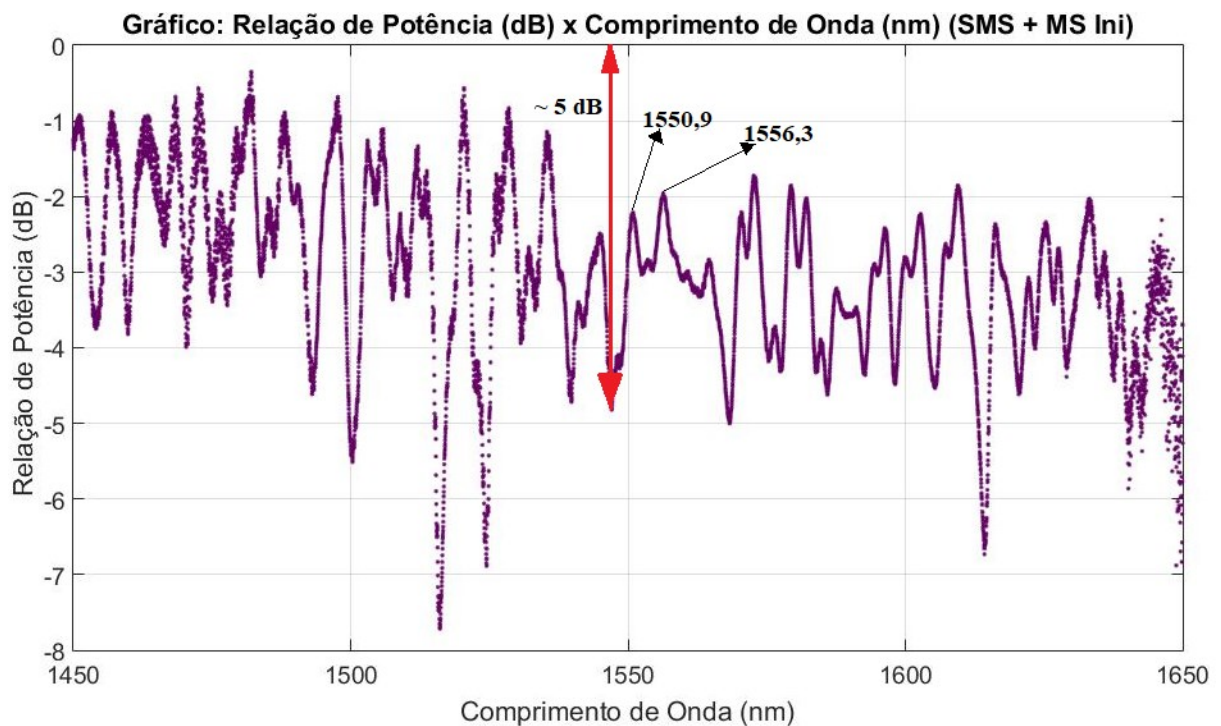


Figura 5.12 Espectro normalizado transmitido por uma estrutura SMS com MS inserido no início e 6 m de comprimento de fibra óptica MM. Observam-se 24 picos principais quase que perfeitamente equiespaçados em comprimento de onda. Pode-se notar que alguns dos picos apresentam uma estrutura fina.

Ao observar o resultado mostrado na figura 5.12, pode-se notar que agora, surgem 25 picos principais quase que perfeitamente equiespaçados em comprimento de onda onde alguns destes picos se desdobram em uma estrutura fina, fornecendo um total de 43 picos. Em torno de 1550 nm, pode-se notar a presença de 2 picos de transmissão em 1550,9 nm e 1556,3 nm e uma razão de extinção de ~ 5 dB, para uma (1) passagem de luz.

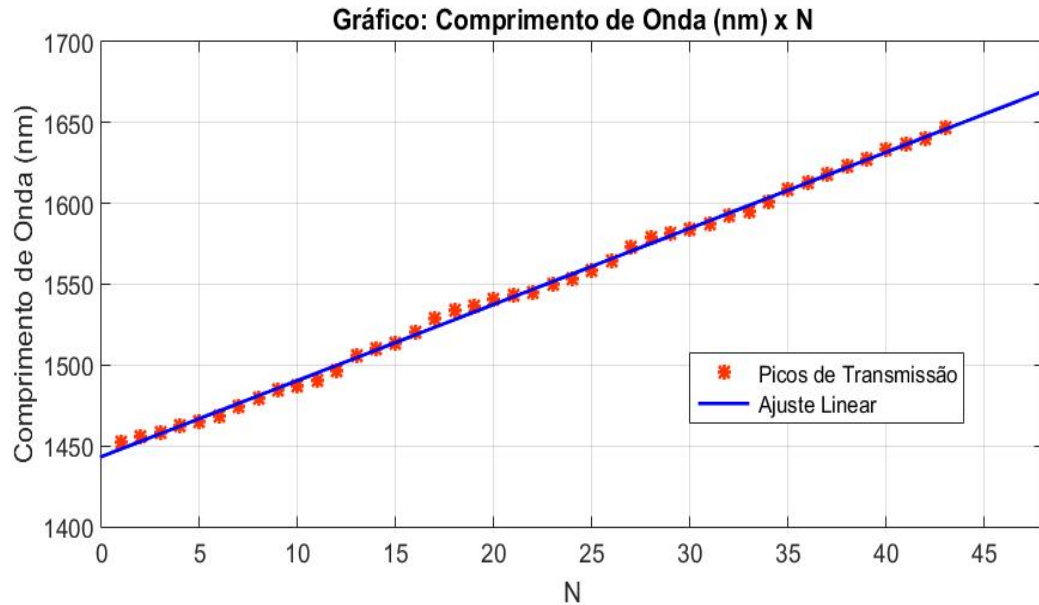


Figura 5.13 Espaçamento entre os 25 picos de comprimento de onda (incluindo as estruturas finas) gerados dentro da banda 1450-1650 nm com MS inserido no início da estrutura SMS.

A Figura 5.13, mostra algumas posições dos picos de comprimento de onda de cada um dos 43 localizados dentro da banda 1450-1650 nm. Pode-se identificar 25 picos principais quase que perfeitamente equi-espçados em ~ 9 nm de comprimento de onda. Alguns destes picos se desdobram em uma estrutura fina [12] com espaçamento entre sub-picos consecutivos que chegam a ~ 2 nm.

Por fim, pode-se concluir que o MS inserido gera um espaçamento linear entre picos independente da posição que ele seja inserido na estrutura SMS. Além do mais, consegue-se reduzir drasticamente o espaçamento de determinados picos graças ao surgimento de estruturas finas, comportamento este vantajoso quando se quer gerar uma saída formada por dois comprimentos de onda muito próximos e então aplicar na construção de um laser em duplo comprimento de onda conforme será mostrado na seção 5.2, e potencialmente útil na geração de ondas terahertzianas, milimétricas ou microondas por batimento óptico, dependendo do intervalo em comprimento de onda entre os picos.

5.2 Montagem Experimental do Laser em Anel de Fibra Óptica com SOA Como Meio de Ganho e Filtro Tipo *Multimode Interference* (MMI)

Nesta secção, é descrita a montagem experimental do laser em anel com filtro MMI inserido. A representação esquemática e uma foto da montagem do laser em anel operando em onda contínua estão mostradas na figura 5.14. Utilizou-se o mesmo SOA de antes como meio de ganho óptico. A estrutura SMS caracterizada anteriormente sem e com MS também foi inserida no anel óptico. O seu uso garante uma filtragem espectral devido ao fenómeno de interferência multimodal [14]. Foram também utilizados diversos acopladores direcionais, com diferentes razões de acoplamento, permitindo então que uma parte da luz seja extraída e a outra permaneça circulando no anel de fibra óptica. Uma das portas de cada um dos referidos acopladores, era então conectada à uma terminação óptica a fim de evitar possíveis reflexões espúrias de luz. O mesmo controlador de polarização de antes foi inserido no anel com o intuito de otimizar a potência óptica de saída do laser. No anel, foi inserido um isolador a fibra óptica que permitia a luz circular apenas em um sentido, anti-horário no presente caso, formando assim uma cavidade ressonante. Finalmente, a luz de saída do laser podia ser analisada com o uso de um analisador de espectro óptico.

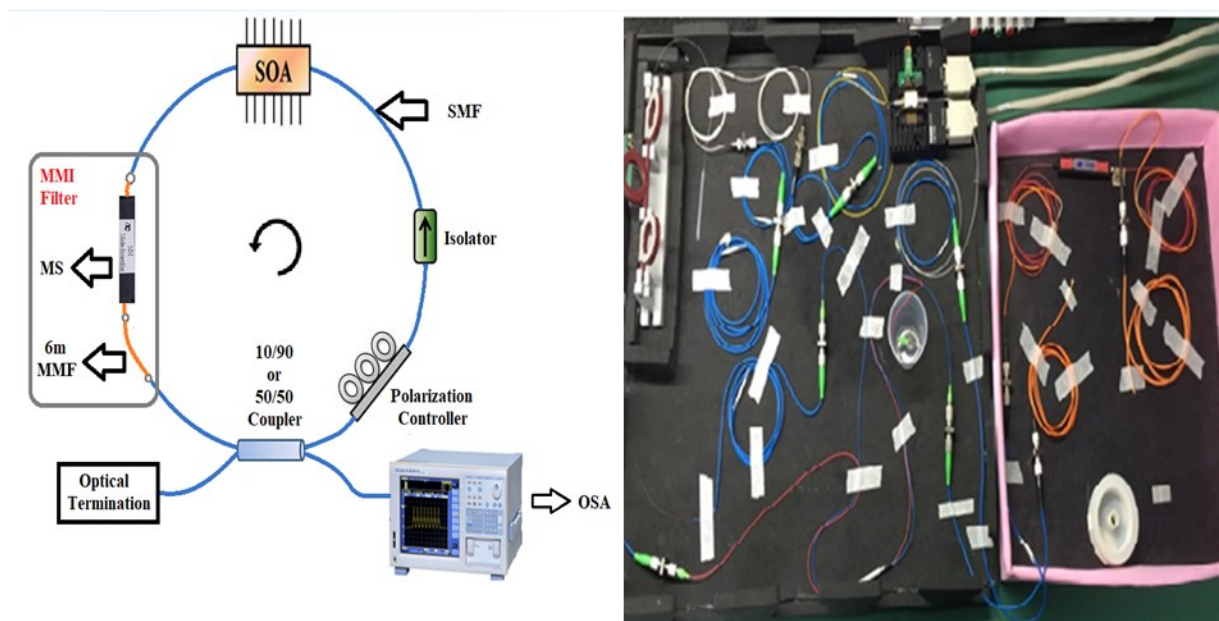


Figura 5.14 Desenho esquemático e fotografia de um laser de onda contínua em anel a fibra óptica com SOA como meio de ganho e o uso de um MS inserido no início da estrutura SMS que funciona como filtro espectral multi-comprimento de onda.

5.3 Resultados Experimentais

Nesta secção, são descritos os resultados experimentais de caracterização do laser em anel mostrado na figura 5.14 e algumas discussões pertinentes são também aqui apresentadas.

A. Análise Espectral

Nesta primeira etapa foi feita a aquisição do espectro emitido pelo laser em anel de fibra óptica com um filtro MMI. A figura 5.15, mostra a dependência da emissão espectral do laser em função da corrente DC aplicada no SOA e extração de 50 % de luz do anel considerando o filtro MMI sem o uso do MS.

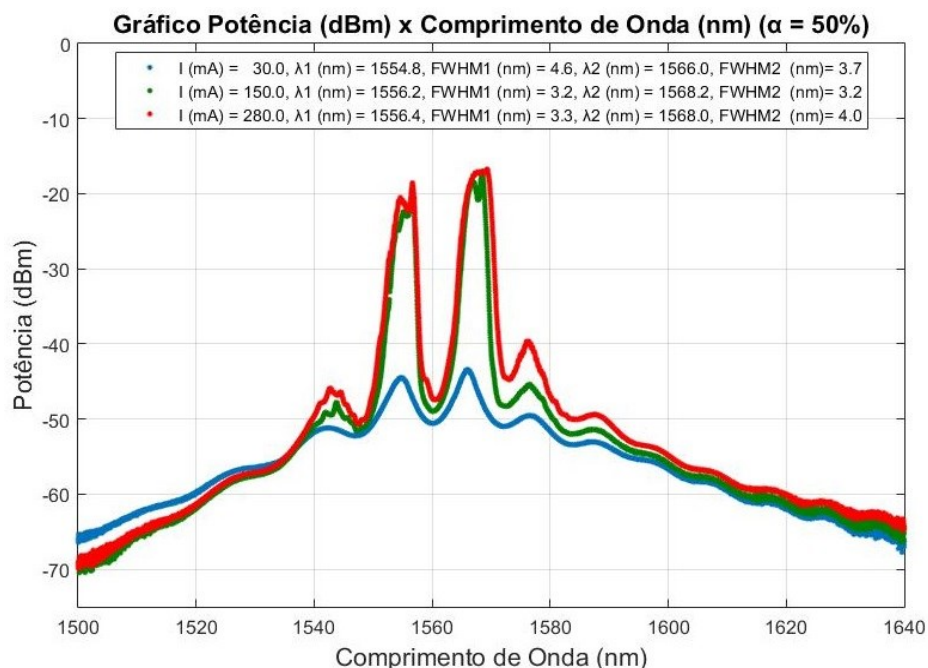


Figura 5.15 Espectro de emissão CW do laser em anel com filtro MMI inserido baseado na estrutura SMS sem MS, em função da corrente de polarização do SOA, usando um acoplador 50/50.

Na Figura 5.15, é importante destacar que o espectro emitido pelo laser é uma sobreposição do espectro transmitido pela estrutura SMS mostrado na Figura 5.3, com o

ganho de amplificação do SOA que é máximo em torno de 1550-1560 nm. Vale também ressaltar, que ao polarizar o SOA com uma corrente de 150-280 mA, valores estes acima de sua corrente de transparência (cerca de 30 mA), comprimentos de onda centrados em 1556,2 nm e 1568,2 nm com a mesma largura espectral a meia altura (FWHM = 3,2 nm) passam a oscilar na cavidade e são emitidos. Observa-se assim um comportamento típico de um laser bi-comprimento de onda com espaçamento da ordem de 12 nm entre os comprimentos de onda emitidos.

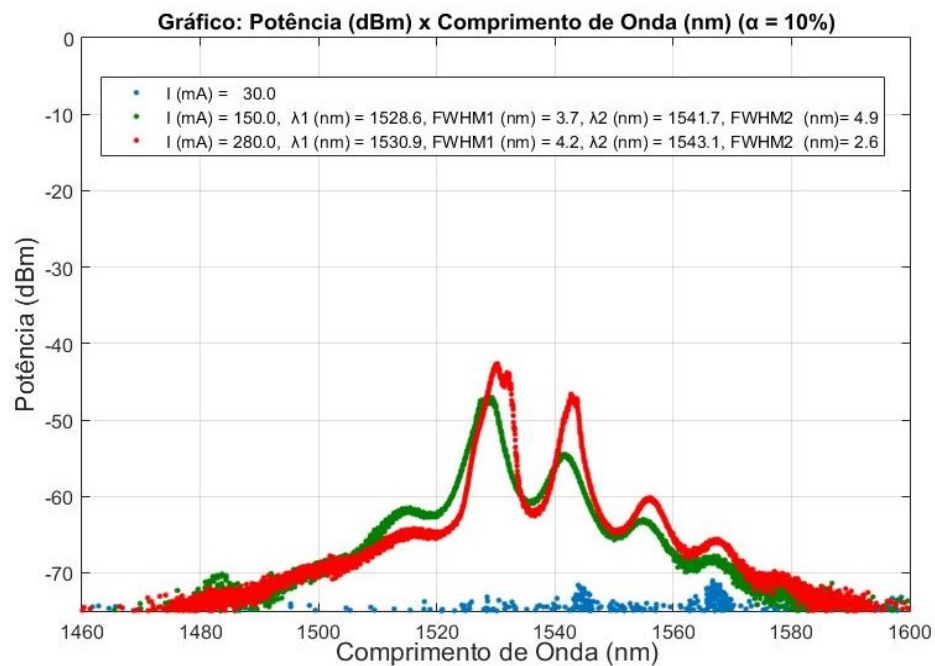


Figura 5.16 Espectro de emissão CW do laser em anel com filtro MMI inserido baseado na estrutura SMS sem MS, em função da corrente de polarização do SOA, usando um acoplador 10/90.

A Figura 5.16, mostra a dependência da emissão espectral do laser em função da corrente DC aplicada no SOA e extração de 10 % de luz do anel. Nesta etapa, realizou-se a troca do acoplador 50/50 que foi utilizado anteriormente por um acoplador 10/90. Pode-se notar que ao variar a porcentagem de extração de luz do anel óptico, neste caso 10%, ocorrem significativas mudanças no espectro emitido e queda de aproximadamente 20 dB da potência emitida. Anteriormente tinha-se emissão de duplo comprimento de onda centrado em torno de 1556 nm e 1568 nm. Nesta nova configuração, para um corrente de polarização de 150 mA, temos a emissão em 1528,6 nm e 1541,7 nm com larguras espectrais a meia altura (FWHM) de 3,7 nm e 4,9 nm respectivamente. O mesmo pode ser destacado para a corrente de polarização em 280 mA, onde obteve-se comprimentos de onda de emissão de 1530,9 nm e 1543,1 nm com larguras espectrais a meia altura (FWHM) de 4,2 nm e 2,6 nm

respectivamente. Foram realizadas várias aquisições do espectro emitido pelo laser para diferentes razões de acoplamento como 20/80, 29/71, 39/61, (não apresentadas neste trabalho). Pôde-se facilmente perceber que existe uma forte dependência dos comprimentos de onda emitidos como função da razão de acoplamento utilizada.

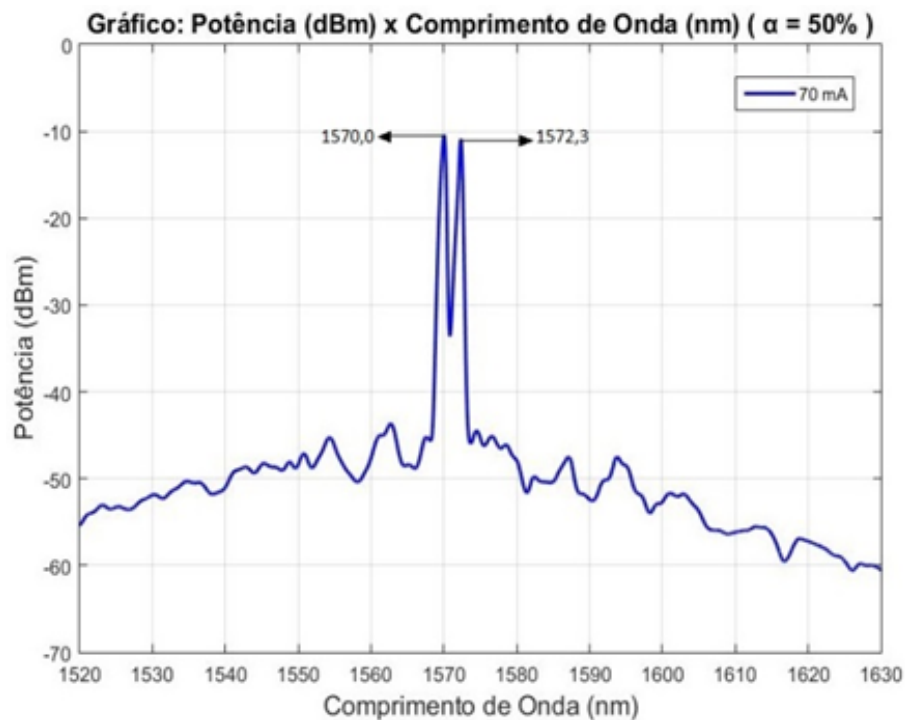


Figura 5.17 Espectro de emissão CW do laser em anel com filtro MMI inserido baseado na estrutura SMS com MS, para uma corrente de polarização do SOA em 70 mA, usando um acoplador 50/50.

Em uma segunda etapa deste trabalho, um MS foi introduzido no laser em anel. A Figura 5.8 mostra o esquemático da estrutura SMS com o MS inserido entre os 6 metros de fibra, sendo agora a nova constituição do filtro MMI integrado no anel. Ao observar a Figura 5.17, nota-se um comportamento típico de um laser bi-comprimento de onda assim como já demonstrado anteriormente. Com a introdução do MS, obteve-se picos com uma profundidade de ~ 24 dB com relação ao nível de ruído, comparável com o obtido na Fig. 5.15 (sem o MS). Entretanto, o espaçamento obtido entre os picos de comprimento de onda foram da ordem de 2,3 nm com emissões em 1570,0 nm e 1572,3 nm e larguras de linha de 0,8 nm e 0,4 nm respectivamente. Estes valores de largura de linha estão superestimados, pois estavam no limite de resolução do OSA (mantida em 0,5 nm durante as medidas), as linhas de emissão são provavelmente mais estreitas. O espaçamento de 2,3 nm está consistente com o espaçamento entre picos de sub-estruturas finas conforme pode-se observar da Figura 5.9. Ao

compararmos os resultados com os que foram obtidos anteriormente, podemos concluir que a introdução do MS possibilitou obter emissão do laser em dois picos com um espaçamento de ~ 2 nm (250 GHz em torno de 1550 nm) e larguras de linha $< 0,5$ nm (< 60 GHz em torno de 1550 nm). Um espaçamento de 250 GHz torna-se interessante para a geração de ondas milimétricas por batimento óptico, enquanto uma largura de linha inferior a 60 GHz pode ser útil quando é necessário dispor de um laser com baixo ruído de fase.



Figura 5.18 Espectro de emissão CW do laser em anel com filtro MMI inserido baseado na estrutura SMS com MS, para uma corrente de polarização do SOA em 150 mA, usando um acoplador 50/50.

Ao observar a Figura 5.18, com o aumento da corrente de polarização de 70 para 150 mA pode-se notar que as duas emissões continuam na prática cada qual num mesmo comprimento de onda. Entretanto, o laser agora emite 1572,5 nm cerca de 15 dB acima de 1569,7 nm, tornando-se quase que longitudinalmente monomodo. As larguras de linha foram medidas como sendo de 0,6 nm e 0,3 nm para o 1º e 2º pico respectivamente, medidas estas mais uma vez limitadas pela resolução do OSA.

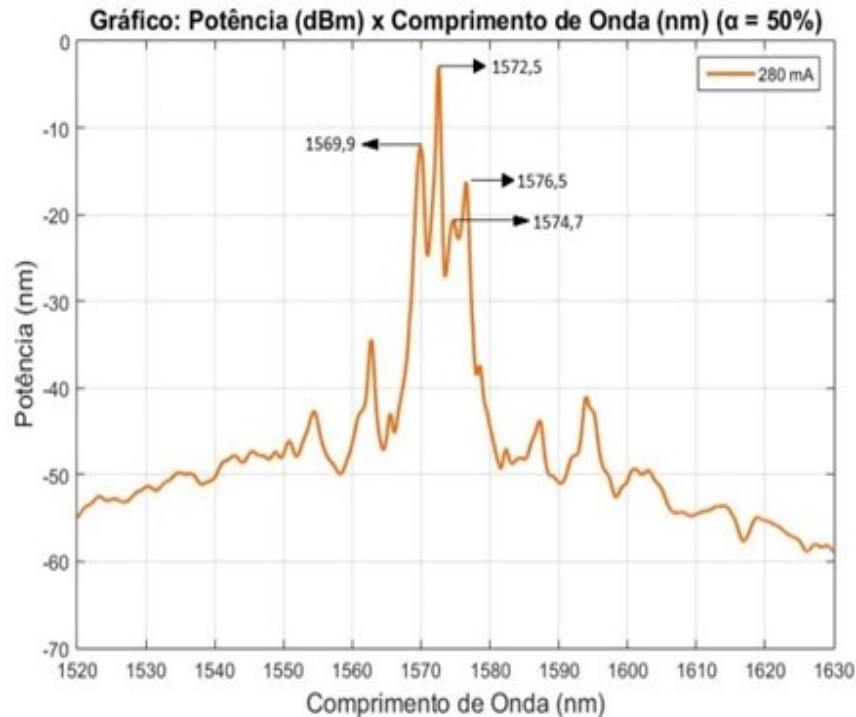


Figura 5.19 Espectro de emissão CW do laser em anel com filtro MMI inserido baseado na estrutura SMS com MS, para uma corrente de polarização do SOA em 280 mA, usando um acoplador 50/50.

O espectro emitido pelo laser conforme mostrado na Figura 5.19, se manteve estável até o SOA ser polarizado por uma corrente de 200 mA. Na Figura 5.19, o SOA foi polarizado por uma corrente de 280 mA. Nota-se então que novos comprimentos de onda passam a oscilar no anel óptico, resultando também em uma determinada instabilidade do comprimento de onda emitido.

B. Medidas de Estabilidade Espectral

Conforme visto na seção A-Análise Espectral, o laser com emissão de duplo comprimento de onda apresentou certa instabilidade espectral quando o MS estava inserido no centro geométrico dos 6 metros de fibra multimodo. Com o objetivo de tentar estabilizar o espectro emitido do laser em anel, a posição do MS foi alterada para o final e início da estrutura SMS conforme visto nas montagens experimentais apresentadas na seção 5.1 deste capítulo.

A primeira etapa, consistiu em colocar o MS inserido no final da estrutura SMS conforme já visto na figura 5.5. Esta nova configuração passou a representar o novo filtro MMI do Laser em anel de fibra óptica. Assim, foi realizada a aquisição do espectro através do OSA de 15 em 15 minutos durante um tempo total de 180 minutos (3 horas). O SOA permaneceu polarizado por uma corrente de *bias* de 200 mA e o controlador de polarização manteve-se fixo em uma posição. O resultado pode ser visualizado na figura 5.20.

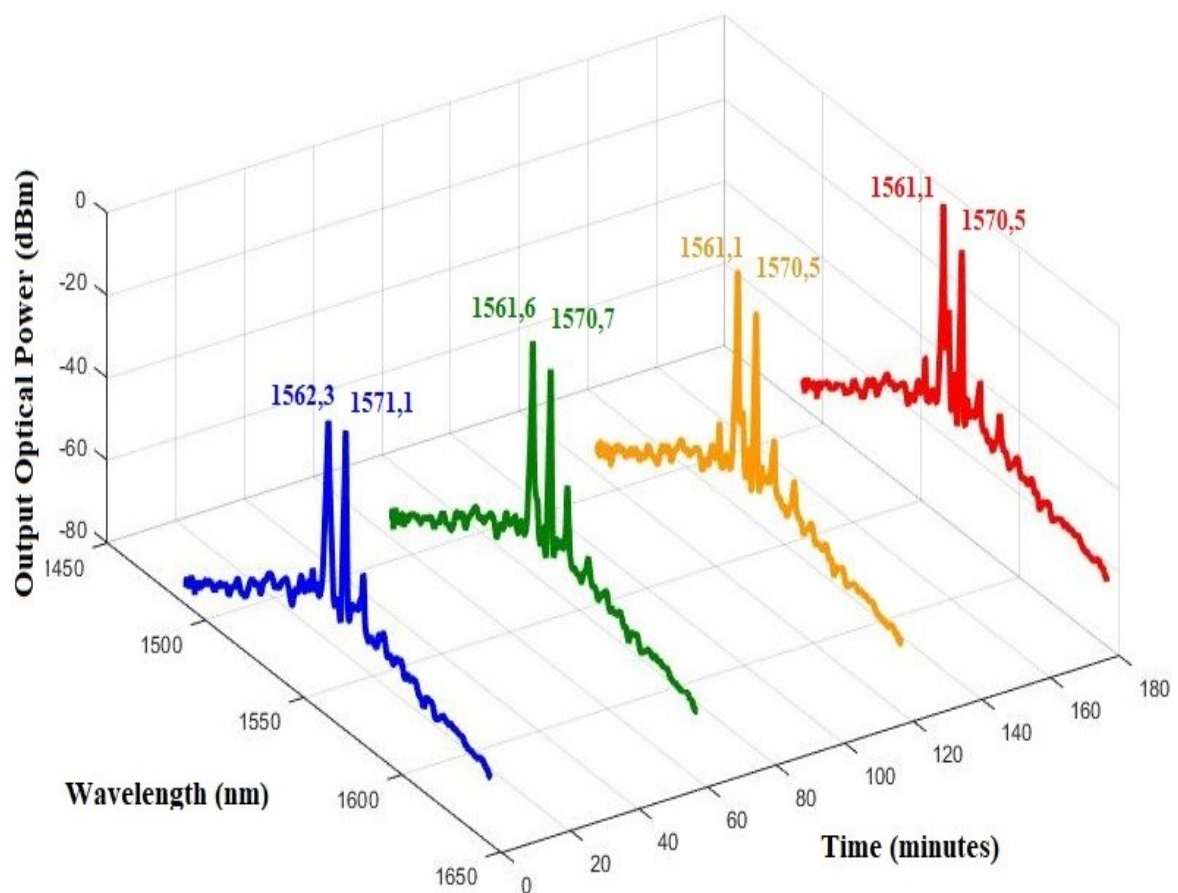


Figura 5.20 Medidas de estabilização espectral do laser em anel de fibra óptica com MS inserido no final da estrutura SMS.

Ao observar os resultados obtidos na figura 5.20, percebe-se que ao decorrer do tempo ocorrem significativas mudanças no espectro emitido do laser com MS inserido no final da estrutura SMS. O 1º pico apresenta uma variação do comprimento de onda emitido de até 1,2 nm ($\Delta\lambda = 1,2$ nm) e um ganho de potência de aproximadamente 4 dB ao compararmos o

resultado do início da medição (Tempo = 0 minutos) com o resultado após os 180 minutos (Tempo = 180 minutos). Já o 2º pico, apresenta uma variação do comprimento de onda emitido de até 0,6 nm ($\Delta\lambda = 0,6$ nm) e uma perda de potência de aproximadamente 4 dB ao comparamos o resultado do início da medição (Tempo = 0 minutos) com o resultado após os 180 minutos (Tempo = 180 minutos). Assim, pode-se concluir que a inserção do MS ao final da estrutura SMS resultou em uma grande instabilidade espectral, resultado este que pode ser comprovado devido a alta variação do comprimento de onda emitido e principalmente de uma variação abrupta da potência óptica emitida por cada um dos picos de emissão. Estas variações, ocorrem provavelmente em decorrência do fenômeno de acoplamento modal (troca de energia entre modos transversais de propagação).

A segunda etapa, consistiu em realizar a mesma metodologia que foi feita anteriormente, porém desta vez o MS é inserido no início da estrutura SMS conforme já mostrado na figura 5.11. Esta nova configuração passou a representar o novo filtro MMI do laser em anel de fibra óptica. O resultado pode ser visualizado na figura 5.21.

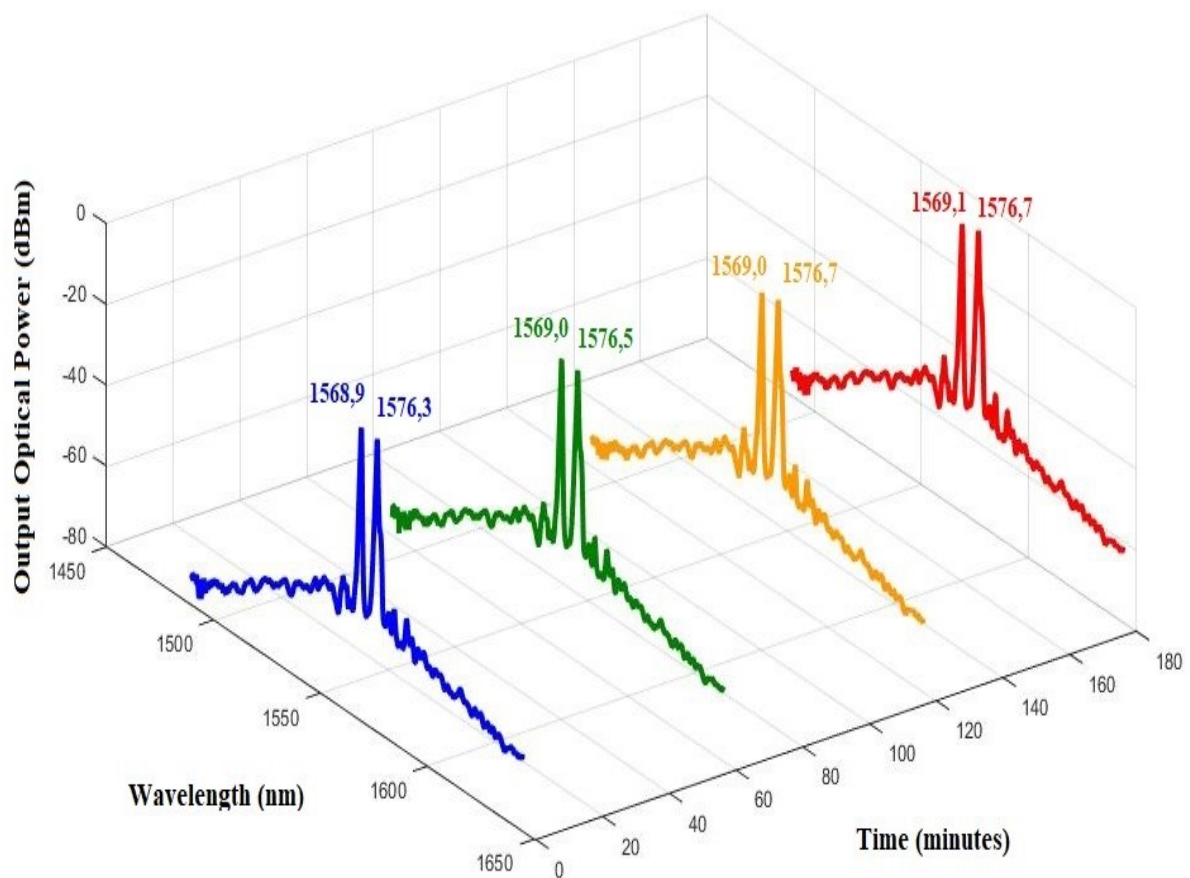


Figura 5.21 Medidas de estabilização espectral do laser em anel de fibra óptica com MS inserido no início da estrutura SMS.

Ao observar os resultados obtidos na figura 5.21, percebe-se que com o decorrer do tempo, ocorrem poucas mudanças no espectro emitido pelo laser com MS inserido no início da estrutura SMS. O 1º pico apresenta uma variação do comprimento de onda emitido de até 0,2 nm ($\Delta\lambda = 0,2$ nm) e um ganho de potência de aproximadamente 1 dB ao compararmos o resultado do início da medição (Tempo = 0 minutos) com o resultado após os 180 minutos (Tempo = 180 minutos). Já o 2º pico, apresenta uma variação do comprimento de onda emitido de até 0,4 nm ($\Delta\lambda = 0,4$ nm) e uma perda de potência de aproximadamente 0,2 dB ao compararmos o resultado do início da medição (Tempo = 0 minutos) com o resultado após os 180 minutos (Tempo = 180 minutos). Enfim, pode-se concluir que a inserção do MS no início da estrutura SMS resultou em uma grande estabilidade espectral, esta configuração apresentou pequena variação do comprimento de onda e potência óptica emitida por cada um dos picos ante o que foi obtido anteriormente como demonstrado na figura 5.20. Neste último caso, o MS estava inserido no final da estrutura SMS. Dado os resultados obtidos, a estabilidade espectral com MS inserido no início da estrutura SMS ocorre possivelmente por permitir que a luz propague-se ao longo dos 6 metros de fibra multimodo com o seu modo transversal já com o EMD (*Equilibrium Mode Distribution* - Distribuição Equilibrada de Modos) alcançado. Na figura 5.22, é possível visualizar uma tabela com os resultados de cada configuração.

	MS/FINAL	MS/INICIO
$\Delta\lambda_1$ (nm)	1,2	0,2
$\Delta\lambda_2$ (nm)	0,6	0,4
ΔP_1 (dB)	4	1
ΔP_2 (dB)	-4	-0,2

$\Delta\lambda \rightarrow$ Variação do comprimento de onda emitido em nm.

$\Delta P \rightarrow$ Variação da potência emitida em dB.

Tabela 5.1 Tabela que apresenta os resultados de variação ao longo de 180 minutos do comprimento de onda e potência para as configurações com MS no início e no final da estrutura SMS.

6 Laser a Fibra Óptica em Configuração de Figura-de-Oito com Travamento Passivo de Modos (*Mode-Locked*)

6.0 Introdução

Este capítulo, descreve a montagem e testes de um laser em figura-de-oito (Interferômetros de Sagnac a fibra interconectados entre si) operando no regime de *mode-locking* (modo travado). O dispositivo é formado por um anel de fibra óptica monomodo contendo um amplificador óptico semiconductor (SOA) como meio de ganho e um anel que comporta-se como ressoador principal. Um filtro óptico passa-banda com $< 1,2 \text{ nm @ } 3 \text{ dB}$ de largura é inserido no anel e ajustável manualmente para realizar a referida sintonização ao longo da banda espectral de 45 nm de largura (1520-1565 nm). O regime de *mode-locking* poderá ser atingido desde que tenhamos um laser em multimodo longitudinal, conforme mostrado no capítulo 4 do presente trabalho.

6.1 Montagem Experimental do Laser em Anel de Fibra Óptica em Configuração de Figura-de-Oito

Os lasers a fibra óptica operando em regime de modo travado são dispositivos ultrarrápidos utilizados para produzirem pulsos da ordem de poucos picosegundos ou até femtosegundos. Este dispositivo pode ser construído utilizando um absorvedor saturável (subsecção 2.6.2) ou através de um par de anéis de fibra óptica operando em regime óptico não-linear em conjunto com controladores de polarização. Esta última configuração simula artificialmente um absorvedor saturável com inicialização do travamento dos modos [28,29].

O absorvedor saturável artificial funciona a partir da rotação não linear de polarização da luz (NPR – *Nonlinear Polarization Rotation*). Esta técnica permite uma mudança não linear (isto é, dependente da intensidade da luz) no estado de polarização de um pulso óptico intenso que se propaga em uma fibra óptica e não mantém a mesma polarização. Isso não é exatamente uma rotação de uma direção de polarização linear, mas sim a mudança para algum

estado de polarização elíptica. Neste caso, o laser em figura-de-oito possui controladores de polarização que podem ser ajustados de forma que a transmissão máxima (perda mínima) no polarizador ocorra para a maior intensidade óptica possível, ou seja, quando os modos longitudinais se interferem de forma construtiva no interior da cavidade ressonante [30]. O dispositivo desenvolvido utiliza um SOA como meio de ganho e um filtro passa-banda (BPF) operando na faixa de 1520-1565 nm de forma a obter um laser a fibra ultrarrápido operando em diferentes comprimentos de onda. Na figura 6.1, é possível observar o laser a fibra em configuração de figura-de-oito utilizando um SOA como meio de ganho e operando no regime de modo travado passivo.

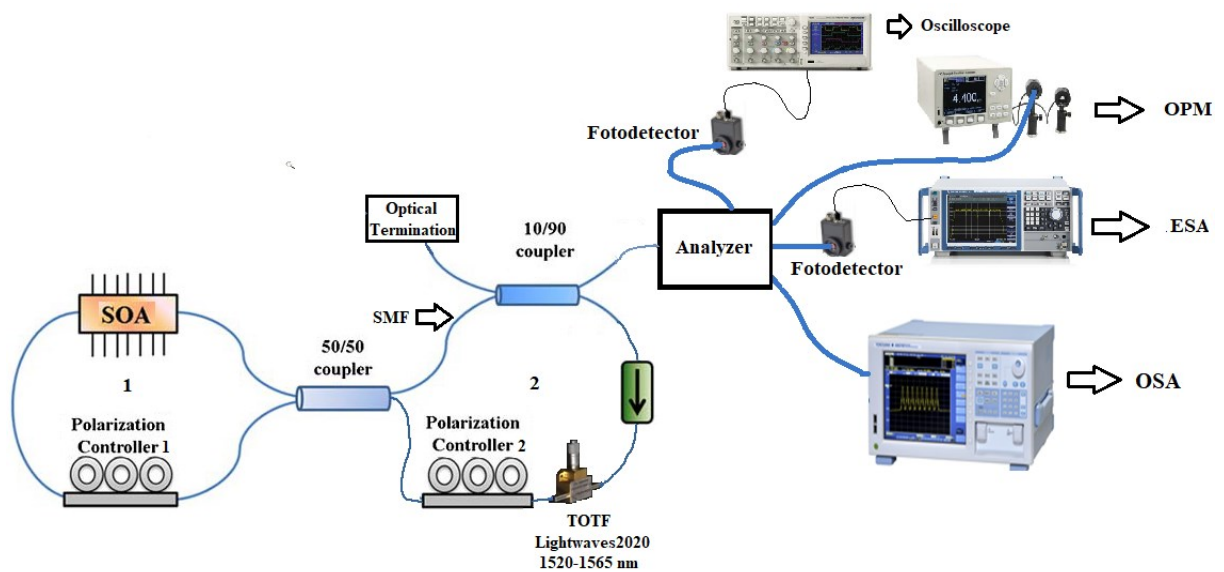


Figura 6.1 Esquemático do laser a fibra óptica em configuração de figura-de-oito com um SOA como meio de ganho não-linear e operação em regime de modo travado passivo.

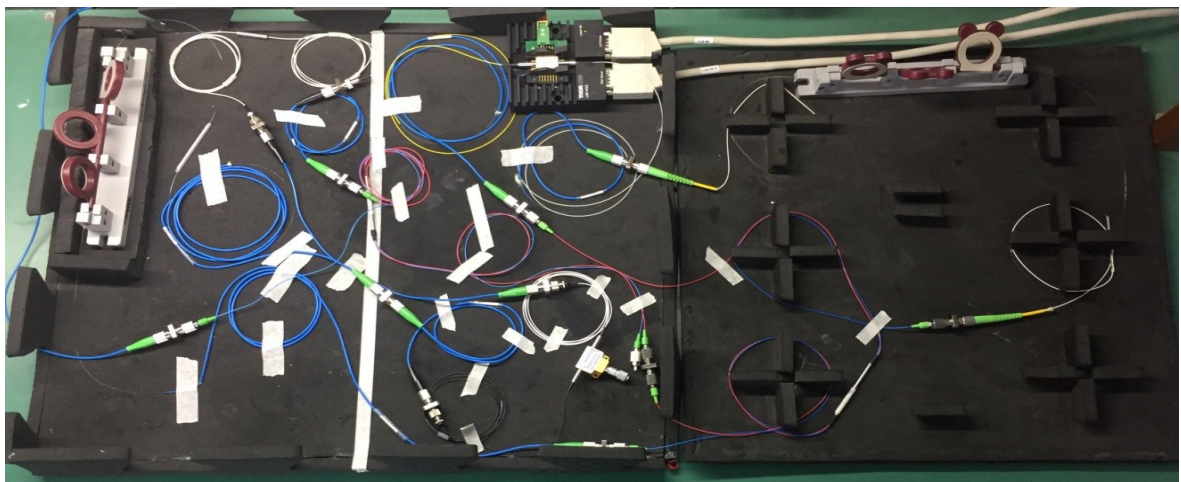


Figura 6.2 Fotografia da montagem experimental do laser a fibra óptica em configuração de figura-de-oito com um SOA como meio de ganho não-linear e operação em regime de modo travado passivo.

Ao observar o esquemático da figura 6.1 é importante destacar que o dispositivo é contruindo baseado em um par de anéis de fibra óptica não-linear em conjunto com controladores de polarização para simular artificialmente um absorvedor saturável como já explicado anteriormente. Não há qualquer entrada de sinais elétricos ou ópticos em alta frequência ou não-modulados, mas apenas saída. O anel de fibra óptica nº 1, também conhecido como NALM (*Nonlinear Amplifier Loop Mirror*), tem a função de realizar a amplificação, formatação e estabilização dos pulsos ultra curtos, pois neste anel (*loop*) desenvolve-se uma diferença adequada de fase entre os modos longitudinais devido a pequena diferença entre os percursos experimentados pela luz ao se propagar pela fibra. Sendo assim, é inicializado o travamento de modos através do fenômeno interferométrico (Interferômetro de Sagnac) que pode ocorrer de forma construtiva, destrutiva ou mista. Já o anel nº 2 tem a função de ressoador óptico principal realizando o estreitamento do espectro e fazendo um papel similar aos espelhos ópticos de uma cavidade Fabry-Perrot de um laser semiconductor comum, para isto é utilizado um isolador que permite a luz circular em apenas um sentido (anti-horário no presente caso) [31,32] e um acoplador que retira uma fração da luz da cavidade. Neste anel, também é extraída parte da luz da cavidade em uma razão de 10% enquanto os outros 90% permanecem no interior do ressoador óptico, assim, é possível analisar a luz a partir de um OSA (YOKOGAWA PZT0B), ESA (ROHDE&SCHWARZ FSV 4 GHz), OPM (NEWPORT 2931-C) ou Osciloscópio (TEKTRONIX TDS2022B).

6.2 Resultados Experimentais

Nesta secção são descritos os resultados experimentais de caracterização do laser a fibra óptica em configuração de figura-de-oito mostrado na Fig. 6.2 e algumas discussões pertinentes são também aqui apresentadas.

A. Análise do Espectro Elétrico

A primeira etapa de caracterização do laser a fibra óptica de modo travado em configuração de figura-de-oito foi a de realizar a aquisição do espectro elétrico através de um

ESA. Como já mencionado anteriormente é necessário um laser multimodo longitudinal para operar no regime de modo travado. Assim, o mesmo procedimento experimental abordado na subseção 4.2C (Resultados Experimentais – C. Modos longitudinais) para o laser CW em configuração de anel com SOA como meio de ganho será utilizado no laser de modo travado.

A Equação (2.5) aqui transcrita do Capítulo 2, mostra a fórmula para o cálculo teórico do espaçamento entre frequências dos modos longitudinais de um laser em anel conforme já mostrado na seção 2.4 e nas subseções 2.1.4 e 4.2C deste trabalho.

$$\Delta f = \frac{c}{n_{Fibra} L_{perímetro}} \quad (2.5)$$

Conforme mostrado em (2.5), c é a velocidade da luz no vácuo (3×10^8 m/s), n_{Fibra} (1,46) é o índice de refração promediado que a luz experimenta ao se propagar ao longo da fibra e $L_{perímetro}$ é a soma dos perímetros dos dois *loops* (anéis) de fibra óptica. Desta forma mediu-se o comprimento físico dos dois anéis de fibra como sendo $L_{perímetro} \sim 19$ m, e de acordo com (2.5), obtivemos $\Delta f = 10,81$ MHz ~ 11 MHz como o espaçamento das frequências de oscilação dos modos longitudinais no anel. Sendo assim foi feita a aquisição do espectro elétrico através da conexão de um fotodetector (THORLABS DET01CFC) com banda de 1,2 GHz acoplado a um ESA (ROHDE&SCHWARZ FSV) com 4 GHz de banda. O resultado pode ser visto na figura 6.3.

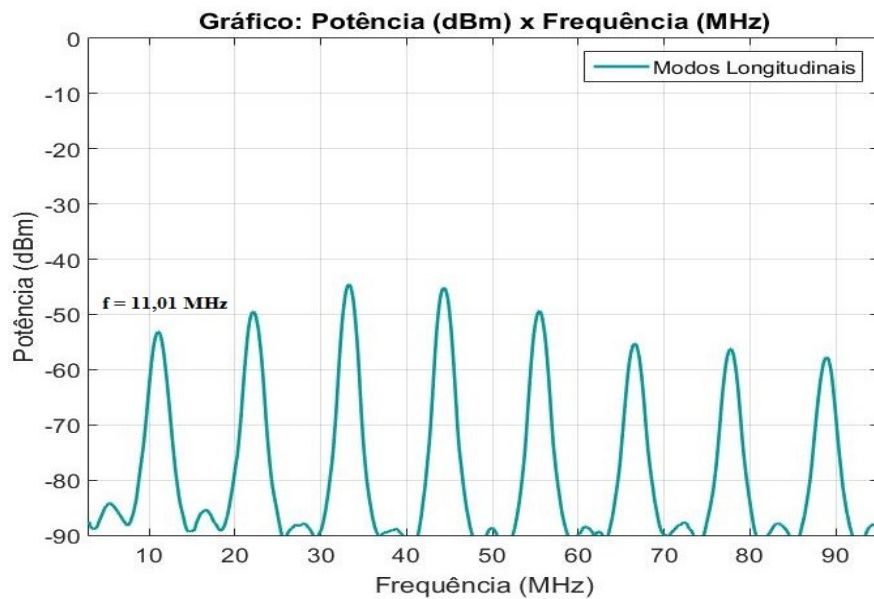


Figura 6.3 Espectro elétrico do laser em anel de fibra óptica em configuração de figura-de-oito mostrando o modo longitudinal fundamental e alguns de seus harmônicos (2º ao 8º) com RBW = 1 MHz.

Ao observar a figura 6.3, pode-se claramente verificar a detecção do modo longitudinal fundamental centrado em 11,01 MHz assim como alguns de seus harmônicos por sua vez centrados em 22,17 MHz; 33,33 MHz; 44,35 MHz; 55,51 MHz; 66,52 MHz; 77,68 MHz; 88,89 MHz. Estes resultados obtidos experimentalmente, nos fornecem um espaçamento em frequências de ~ 11 MHz e garantem um laser multimodo longitudinalmente que poderá operar em regime de modo travado, em acordo com o cálculo teórico.

B. Análise do Espectro Óptico

Nesta segunda etapa foi feita a aquisição do espectro óptico emitido pelo laser a fibra óptica em configuração de figura-de-oito. A figura 6.4, mostra o espectro emitido pelo laser dada uma corrente de *bias* de 280 mA aplicada no SOA.

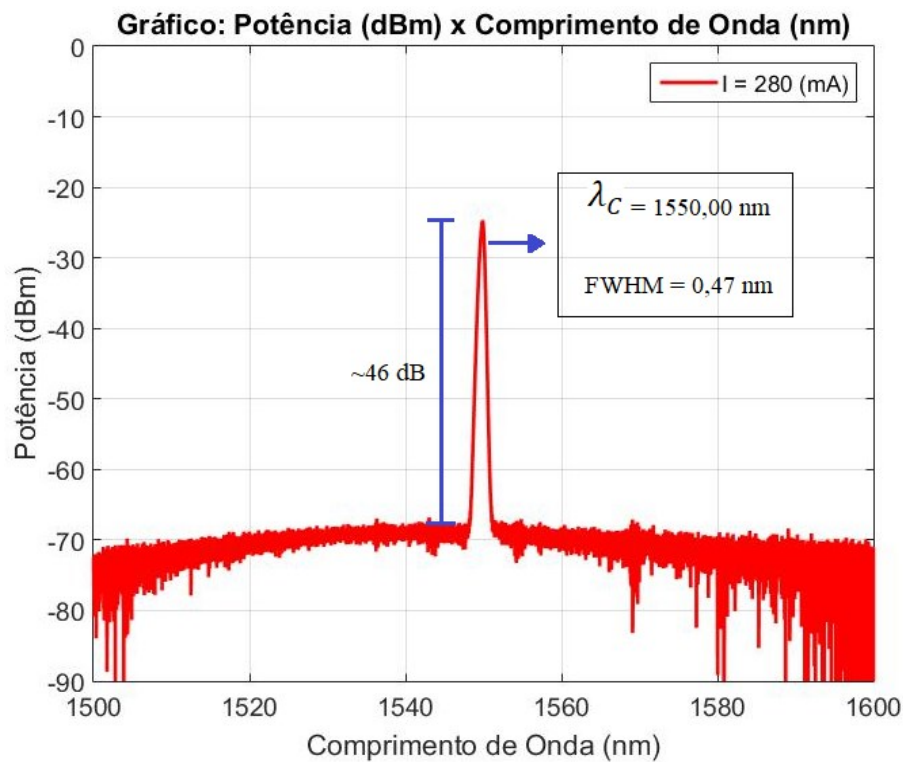


Figura 6.4 Espectro óptico emitido pelo laser em anel em configuração de figura-de-oito.

Ao observar a figura 6.4 é importante destacar uma relação sinal ruído (SNR – *Signal-to-Noise Ratio*) de aproximadamente 46 dB dado uma emissão em um comprimento central de 1550,00 nm e uma largura a meia altura (FWHM) de 0,47 nm (58,75 GHz). Ao obter a FWHM do laser é possível através da equação teórica 2.7 obter o número máximo de modos longitudinais que oscilam no ressonador óptico do laser construído.

$$N = \Delta\nu / \Delta f = \frac{58,75 \text{ (GHz)}}{11,01 \text{ (MHz)}} \simeq 5336 \text{ modos} \quad (6.1)$$

Nesta equação (6.1), $\Delta\nu$ é a largura de linha em frequência (58,75 GHz) do laser e Δf o espaçamento em frequência (11,01 MHz) dos modos longitudinais. É importante destacar que este resultado obtido é puramente teórico, neste caso seria necessário tanto um fotodetector quanto um analisador de espectro elétrico com largura de banda de aproximadamente 60 GHz para conseguir visualizar e comprovar todos os modos longitudinais existentes na cavidade ressonante laser.

C. Análise do Sinal no Tempo

A terceira etapa de caracterização do laser a fibra óptica de modo travado em configuração de figura-de-oito ocorreu a partir da aquisição do sinal no tempo. Ao verificar o sinal no tempo, de fato pode-se garantir o travamento dos modos longitudinais e verificar a formação de um pulso ultracurto e estável com uma taxa de repetição periódica no tempo.

A Equação (2.10) mostra a fórmula para o cálculo teórico do espaçamento no tempo do trem de pulsos emitido pelo laser em regime de modo travado. Deve-se utilizar a relação básica entre período e frequência como mostra a equação 2.8 e apresentado na subseção 2.6.3 (Espaçamento no Tempo do Trem de Pulsos) deste trabalho.

$$\Delta t = \frac{n(L_{\text{perímetro}})}{c} \quad (2.10)$$

Conforme mostrado em (2.10), c é a velocidade da luz no vácuo (3×10^8 m/s), n_{Fibra} (1,46) é o índice de refração promediado que a luz experimenta ao se propagar ao longo da fibra e $L_{\text{perímetro}}$ é a soma dos perímetros dos dois *loops* de fibra óptica. Desta forma mediu-se o comprimento físico dos dois *loops* de fibra como sendo $L_{\text{perímetro}} \sim 19$ m, e de acordo com (2.10), obtivemos $\Delta t = 91$ ns como o espaçamento no tempo entre os pulsos. Sendo assim, foi feita a aquisição do sinal no tempo através da conexão de um fotodetector (THORLABS DET01CFC) com banda de 1,2 GHz acoplado a um Osciloscópio (TEKTRONIX TDS2022B) com 200 MHz de banda e com uma carga de 50Ω em paralelo com a entrada de $1M\Omega$ característica de osciloscópios de banda estreita com o utilizado nestes experimentos. Desta forma, pode-se utilizar toda a banda de 200 MHz disponibilizada pelo osciloscópio. O resultado pode ser visto na figura 6.5.

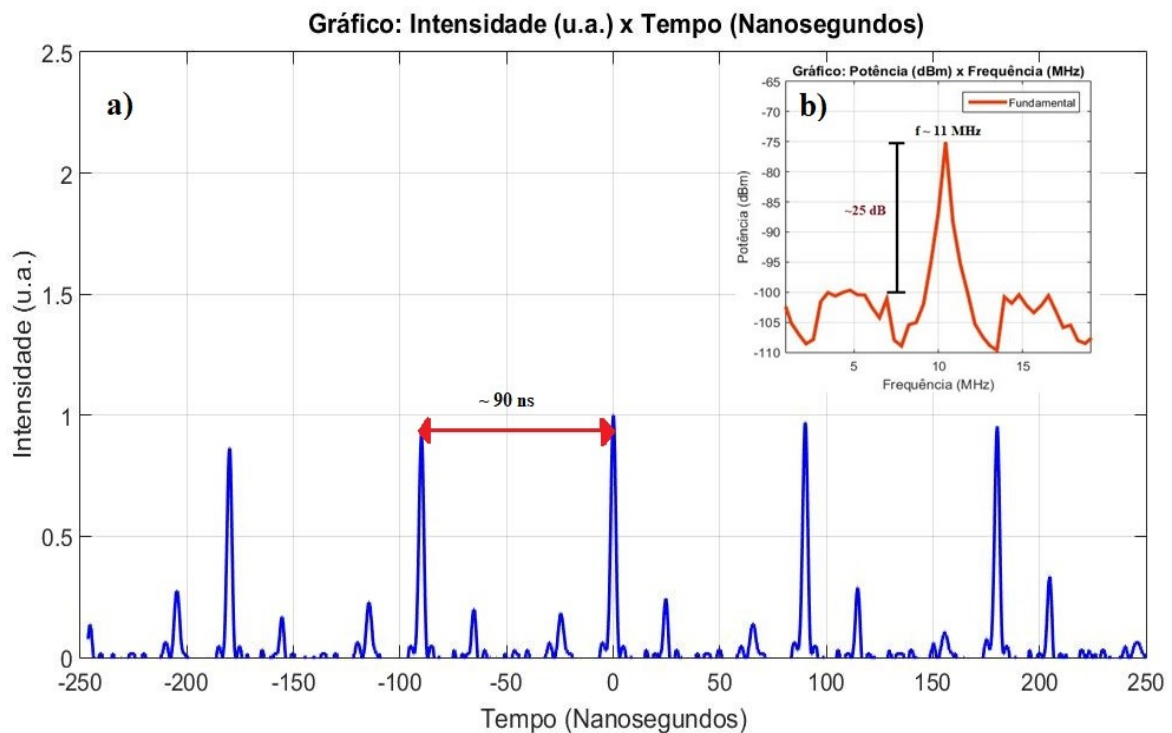


Figura 6.5 Em a) Trem de pulsos periódicos espaçados de 90 nanosegundos com travamento dos modos longitudinais e taxa de repetição dos pulsos na frequência do fundamental, b) Modo fundamental em 11 MHz com RBW = 5 kHz. Pode-se também observar os pulsos relativos a geração do 2º harmônico (espaçados de ~ 45 ns) em menor amplitude que os picos fundamentais.

Ao observar a figura 6.5 é importante destacar o espaçamento periódico no tempo de 90 ns para o trem de pulsos ultracurtos e estáveis para uma corrente de *bias* de 280 mA no SOA. Este resultado garante de fato que o dispositivo construído opera no regime de modo

travado e está de acordo com o cálculo teórico desenvolvido e realizado até o momento. Na Fig. 6.5 a) nota-se pulsos com menor intensidade próximo ao pulso principal formado pelo travamento dos modos longitudinais, estes pulsos com menor intensidade surgem a partir de harmônicos (2º harmônico neste caso) e ocorrem também de forma periódica a partir da ressonância dos modos harmônicos na cavidade óptica principal. Na Fig. 6.5 b) nota-se o modo fundamental em 11 MHz com uma SNR de ~25 dB quando a resolução do ESA encontrava-se em 5 kHz.

Com o objetivo de encontrar a largura no tempo do pulso emitido pelo laser em regime de *mode-locking*, utilizaremos a equação (2.12) apresentada na subseção 2.6.3 (Largura no Tempo do Pulso) deste trabalho.

$$T = \frac{1}{N} \frac{n(L_{perimetro})}{c} \quad (2.12)$$

Conforme mostrado em (2.12), c é a velocidade da luz no vácuo (3×10^8 m/s), n_{Fibra} (1,46) é o índice de refração promediado que a luz experimenta ao se propagar ao longo da fibra, $L_{perimetro}$ (19 m) é a soma dos perímetros dos dois anéis de fibra óptica e N (5336) é o número de modos longitudinais que oscilam na cavidade ressonante. De acordo com (2.12), obtivemos $T \approx 17$ ps como a largura temporal do pulso. Na figura 6.6 é possível visualizar o pulso gerado pelo laser construído.

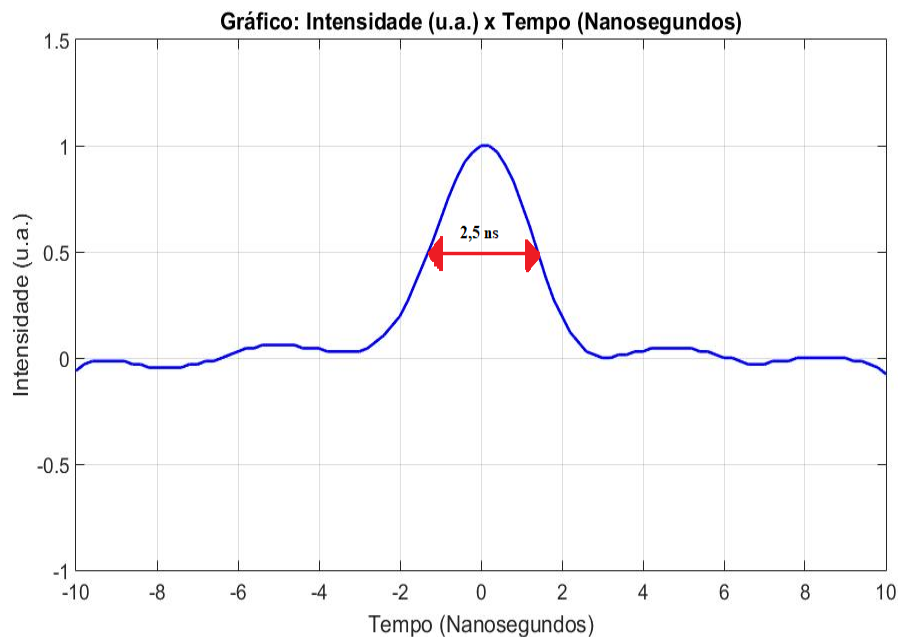


Figura 6.6 Largura do pulso no tempo limitado pela resolução temporal do osciloscópio (TEKTRONIX TDS2022B 200 MHz).

Na figura 6.6 observa-se que a largura temporal do pulso (2,5 ns) está limitada pela largura de banda do osciloscópio (200 MHz – 5 ns) inviabilizando a medição. Neste caso seria necessário o uso de um foto-detector e osciloscópio ambos com banda de dezenas de GHz ou um autocorrelacionador, como por exemplo, o modelo *Femtosecond Autocorrelator* HAC–200, capaz de caracterizá-los quanto a sua largura temporal, porém infelizmente não dispomos de nenhum destes equipamentos em nosso laboratório. Assim, espera-se que a medição prática real de largura temporal do pulso convirja com os resultados teóricos de ~ 17 ps, como já demonstrado pela equação 2.12 (teórica).

D. Sintonização Espectral

Nesta etapa foi feita a aquisição do espectro emitido conectando a saída do dispositivo construído no analisador de espectro óptico. Na figura 6.7 é possível observar o espectro quando o filtro passa-banda (BPF) estava sintonizado em diferentes comprimentos de onda na faixa 1520 – 1565 nm.

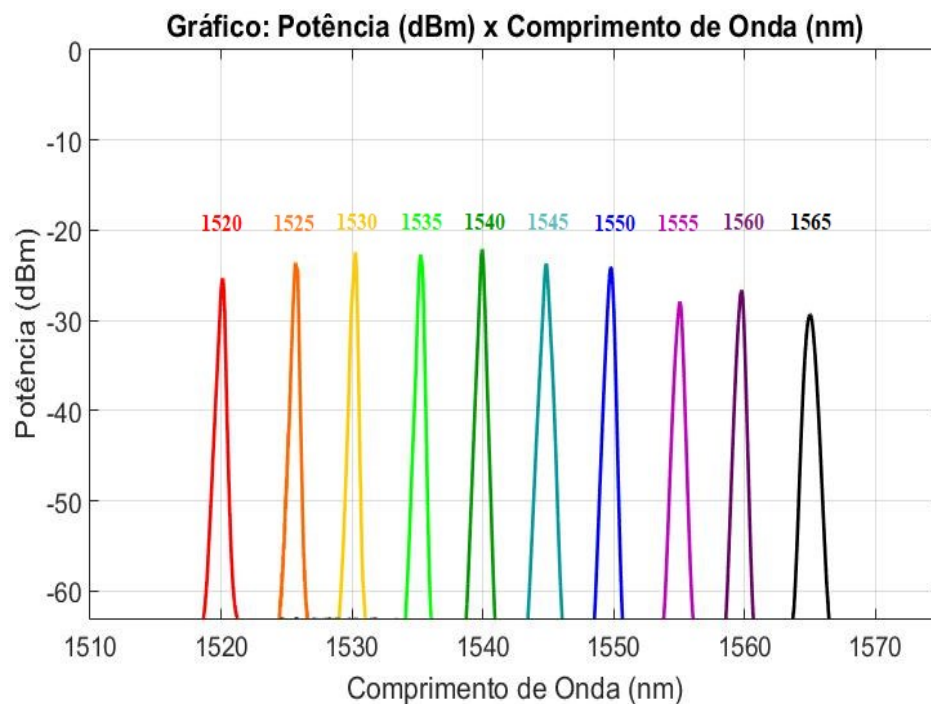


Figura 6.7 Sintonização espectral do laser em configuração de figura-de-oito operando no regime de modo travado podendo ser sintonizado pelo ajuste do filtro BPF com $I_{bias} = 280$ mA.

Conforme mostrado na figura 6.7, a utilização de um filtro passa-banda (BPF) permite que o dispositivo aqui construído possua duas funcionalidades. Além de operar no regime de modo travado e gerar um sinal de RF (radiofrequência) a partir de um sinal óptico gerado internamente, o mesmo também pode operar em regime CW com uma FWHM aceitável (0,47 nm p/ $\lambda=1550$ nm) para algumas aplicações como, por exemplo: caracterização de instrumentos e dispositivos ópticos em laboratório.

E. Análise da Corrente Limiar (*Threshold* e *Mode-Locking Current*) e Potência Óptica

Nesta 5ª etapa foi feita a aquisição dos valores de potência óptica emitida pelo laser em função da corrente DC aplicada no SOA. Como mencionado anteriormente na etapa de sintonização espectral, vale ressaltar que o dispositivo opera de duas formas diferentes: em CW e em *mode-locking*. Para obter o regime *mode-locking*, era necessário ajustar o I_{bias} e os controladores de polarização de uma forma bastante empírica. Logo será possível visualizar duas correntes de limiar como mostra a figura 6.8.

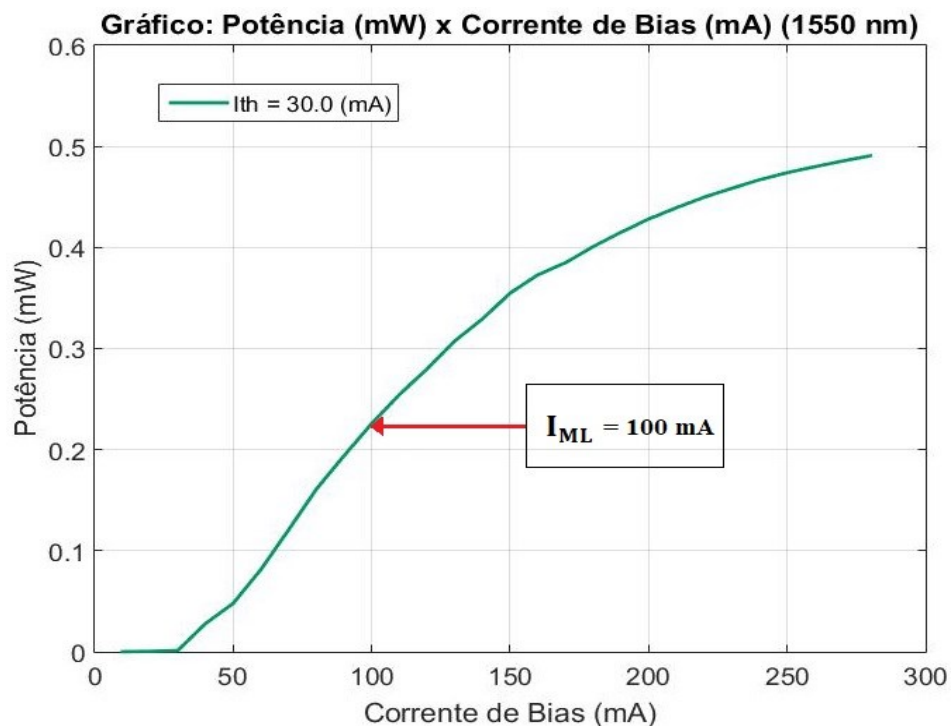


Figura 6.8 Dependência do laser em figura-de-oito emitindo em 1550 nm em função da corrente de polarização.

Ao observar o gráfico da Figura 6.8 é importante destacar a existência de dois valores de correntes de limiar. A corrente limiar (I_{th} - *threshold current*) de 30 mA representa o ponto entre a emissão espontânea e a emissão estimulada conforme já explicado na subseção 2.2.2 deste trabalho, já a corrente de limiar (I_{ML} - *mode locking current*) de 100 mA representa o momento em que se inicializa o travamento dos modos longitudinais na cavidade ressonante construída e a formação de pulsos espaçados periodicamente no tempo desde que os PCs encontrem-se ajustados de forma prévia e correta. Note que, a potência média máxima emitida é de cerca de 0,5 mW que acontece devido ao uso de um acoplador direcional com razão 10/90, onde apenas 10% da potência é extraída da cavidade, pois em um laser em operação de regime travado é mais importante uma maior potência no interior da cavidade do que a extraída da mesma. O objetivo aqui é excitar os modos harmônicos de mais alta ordem (vários MHz) e obter assim maiores taxas de repetição de pulsos. Sendo assim, se tem uma potência no interior da cavidade ($P_{cavidade}$) estimada em cerca de 4,5 mW. Um dos desafios para um futuro trabalho, é obter taxas de repetição multi-gigahertz para uma menor potência óptica intra cavidade possível [32] que é obtido através do travamento de modos longitudinais com taxas de repetições de pulsos nas frequências dos harmônicos de alta ordem.

6.3 Laser a Fibra Óptica em Configuração de Figura-de-Oito em Regime HML (*Harmonic Mode-Locked*)

Conforme visto nos resultados apresentados na subseção 6.2-C deste trabalho, a taxa de repetição dos pulsos em *mode-locking* dos lasers à fibra óptica são fortemente dependentes do comprimento físico da cavidade ressonante. Este longo comprimento é necessário, devido à necessidade de se obter mudança de fase não linear adequada, pois assim é possível gerar pulsos a partir do travamento dos modos longitudinais. Com objetivo de obter taxas de repetição de pulsos superiores a frequência fundamental, torna-se necessário excitar modos harmônicos de mais alta ordem no qual permitirão uma maior taxa de repetição de pulsos sem alterar o comprimento físico da cavidade ressonante construída.

A taxa de repetição de um laser operando no regime HML (*Harmonic Mode Locking*) pode ser alterada ajustando os controladores de polarização e alterando a corrente de *bias* no SOA. O aumento da corrente de *bias* provoca um aumento da potência intracavidade e

consequentemente a excitação de modos harmônicos de mais alta ordem, assim, basta ajustar o controlador de polarização a fim de obter uma rotação não linear de polarização (NPR – *Nonlinear Polarization Rotation*) de forma adequada e permitir o travamento dos modos longitudinais para uma maior taxa de repetição de pulsos de acordo com a frequência do harmônico gerado. Na figura 6.9 é possível observar o travamento dos modos longitudinais com uma taxa de repetição referente à excitação do 5º harmônico para mesma cavidade construída na montagem experimental da figura 6.2.

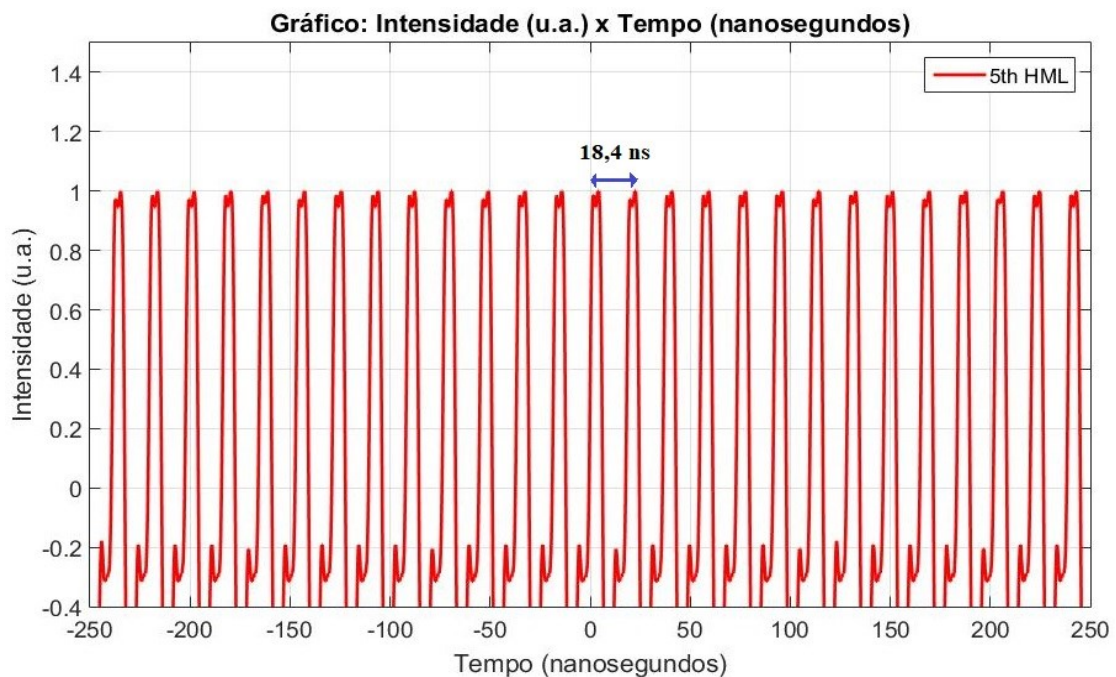


Figura 6.9 Trem de pulsos periódicos espaçados de 18,4 nanosegundos com excitação e taxa de repetição de pulsos referente à frequência do 5º harmônico.

O resultado obtido na figura 6.9 foi gerado para uma corrente de *bias* de 280 mA no SOA, nestas condições os controladores de polarização foram devidamente ajustados e o sinal de saída pode ser visualizado a partir de um osciloscópio com banda (TEKTRONIX TDS2022B) de 200 MHz. A figura 6.10, mostra a relação de supressão de potência do 5º harmônico em relação aos modos secundários quando a saída do laser foi conectada a um ESA (ROHDE&SCHWARZ FSV) com banda de 4 GHz.

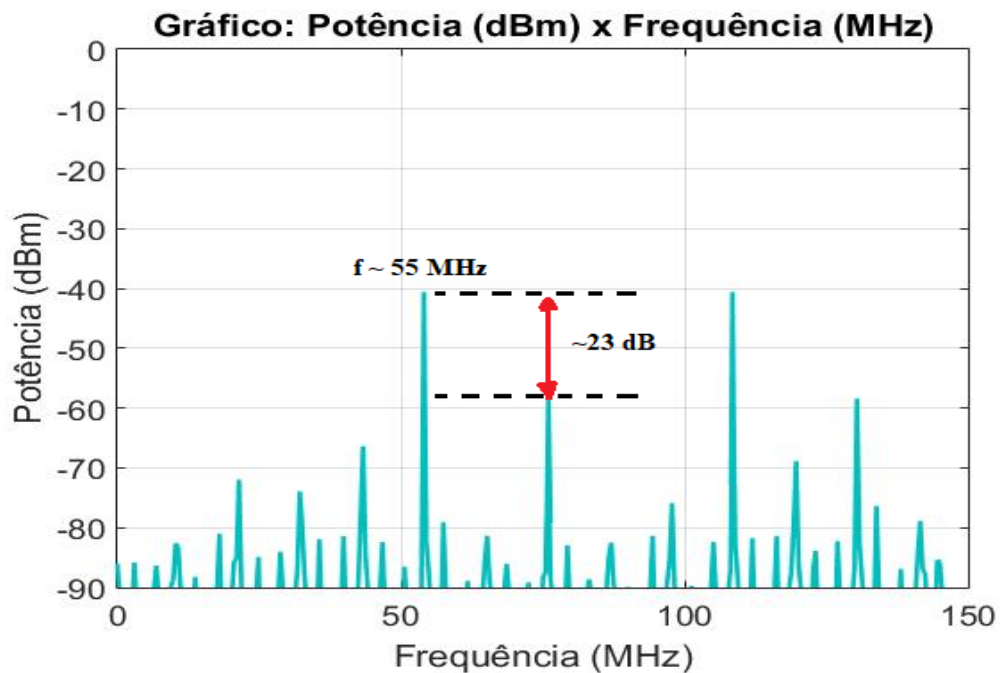


Figura 6.10 Espectro elétrico do laser em anel de fibra óptica em configuração de figura-de-oito mostrando o 5º harmônico com relação de supressão de potência de modo secundário de 23 dB para uma RBW = 100 kHz.

Ao observar os resultados da figura 6.9, pode-se concluir que o espaçamento entre pulsos no tempo foi de 18,4 ns quando operava com taxa de repetição na frequência do 5º harmônico. O gráfico da figura 6.5 deste capítulo mostra um espaçamento cinco vezes maior (~90 ns) quando o dispositivo operava com uma taxa de repetição de pulsos na frequência do fundamental. De fato, o resultado demonstrado na figura 6.9 pode ser comprovado a partir da figura 6.10, onde o 5º harmônico aparece com uma relação de supressão de potência de modo secundário de ~23,0 dB, comprovando de fato que o 5º harmônico efetivamente sofre a menor perda (transmissão máxima) ao se ajustar os controladores de polarização adequadamente.

7 Conclusões e Sugestões Futuras

Primeiramente, foi aqui mostrado que o SOA em conjunto com BPF poderão ser utilizados para construção de um laser sintonizável em anel de fibra óptica.

Este trabalho mostrou então de forma simples o desenvolvimento de um laser a fibra sintonizável (1520-1565 nm) em onda contínua, na configuração de anel, utilizando um SOA de recuperação rápida como meio de ganho óptico. O dispositivo mostrou-se capaz de emitir aproximadamente 5 mW de potência óptica para uma razão de 50 % de extração de luz do anel numa largura espectral menor do que 0,02 nm quando sintonizado em 1550 nm. Modos longitudinais de oscilação espaçados de ~ 14 MHz foram observados no domínio elétrico. Pode-se então concluir de forma geral, que esta 1ª etapa de desenvolvimento em direção a um laser em anel operando no regime *mode-locked* usando o SOA simultaneamente como meio de ganho e modulador óptico está terminada.

Este trabalho também mostrou de forma relativamente simples e pela 1ª vez, no melhor do conhecimento dos autores, o desenvolvimento de um laser bi-comprimento de onda em anel de fibra óptica, incorporando um amplificador óptico semiconductor como meio de ganho óptico e uma estrutura SMS com fibra MM comercial longa (6 m no padrão 62,5/125 μm) para realizar filtragem por interferência multimodal.

A filtragem com o SMS foi demonstrada sem e com acoplamento modal, para este último inserindo um misturador de modos (MS). No primeiro caso, obteve-se um espectro de saída com ~ 12 nm de espaçamento entre os dois picos com 3-5 nm de largura de linha, no segundo caso, pode-se obter os dois picos espaçados de ~ 2 nm, significativamente mais próximos entre si e com largura de linha $< 0,4$ nm, já limitada pela resolução do OSA. Com o MS inserido e $I_{\text{bias}} = 70$ mA, obteve-se os dois picos em 1570,0 nm e 1572,3 nm com potências equalizadas em ~ 24 dB acima do nível de ruído. Com um aumento de I_{bias} , pode-se forçar a oscilação no anel de apenas um pico espectral ou mais que dois. Pode-se então concluir sobre a possibilidade de obter sintonização espectral do dispositivo utilizando componentes ópticos comerciais, e não, por exemplo, projetar e construir dispositivos MMI tipo filtro passa-banda. Nestes últimos, se ajusta o seu comprimento físico, o que em princípio só permite a saída de um pico espectral devido ao seu comprimento reduzido de poucos centímetros ou milímetros [12].

Este trabalho, também nos permitiu concluir que a sintonização do laser pode ser realizada mudando a razão de acoplamento de luz e/ou a corrente de *bias* no SOA. Além do

mais, pôde-se inserir um MS no anel, o que modificou significativamente o espectro de saída. Com a ajuda de um atenuador óptico variável (não aqui mostrado), pode-se antever a possibilidade de regular a potência óptica de saída do laser.

Uma possibilidade de um futuro trabalho consiste em explorar a sintonização do laser ainda em onda contínua, não só fazendo I_{bias} variar, mas também ao incorporar no anel: um acoplador com razão ajustável, o uso de uma fibra MM enrolada em uma bobina de pequeno diâmetro ao invés de usar MS e posicionar um atenuador óptico variável na saída do dispositivo. Uma segunda possibilidade é operar o dispositivo em regime de *Q-switching* ou *mode-locking* ativo, para isto usando o SOA simultaneamente como meio de ganho e modulador óptico.

Este trabalho, também mostrou de forma relativamente simples o desenvolvimento de um laser a fibra óptica em configuração de figura-de-oito em regime de *mode-locked* harmônico passivo, obteve-se travamento dos modos longitudinais com taxa de repetição de pulsos de 11 MHz, corrente limiar (I_{th} - *threshold current*) de 30 mA, corrente de limiar de formação do pulso (I_{ML} - *mode locking current*) de 100 mA e sintonização espectral entre 1520 – 1565 nm. Ao ajustar os controladores de polarização e manter a corrente de bias do SOA em 280 mA, foi possível excitar o 5 ° harmônico para o mesmo comprimento físico de cavidade, onde a taxa de repetição de pulsos foi de 55 MHz e relação de supressão de potência de modo secundário de ~23,0 dB.

Possíveis futuras implementações do dispositivo construído abrangem: substituição de todos conectores PC por APC ou a realização de emendas por fusão, pois assim evita-se uma maior perda de energia no interior da cavidade e principalmente a ocorrência de reflexões espúrias (reflexões de Fresnel), sendo esta elevada potência intracavidade fundamental para a excitação de modos harmônicos de mais alta ordem, além disto, a troca de todos conectores PC para APC evita-se a utilização de conversores PC/APC que acabam aumentando o comprimento físico total da cavidade ressonante; reduzir ao máximo de acordo com o possível o comprimento de fibra óptica dos dispositivos utilizados, assim se terá uma cavidade ressonante menor e, por conseguinte uma maior taxa de repetição de pulsos na frequência fundamental bem como dos seus harmônicos; e por fim avaliar a continuidade ou troca da utilização do SOA produzido e manufaturado pela Kamelian por um SOA com maior capacidade de injeção de corrente de *bias*. Ao seguir todas as sugestões acredita-se na obtenção de um laser em regime HML com taxas de repetições de pulsos em multi-gigahertz.

Referências Bibliográficas

- [1] Emmanuel Desurvire, “Erbium-doped fiber amplifiers: principles and applications”, Wiley-Interscience, New York, 2002.
- [2] Clifford Headley and Govind P. Agrawal, editors, “Raman Amplification in Fiber Optical Communication Systems,” Elsevier Academic Press, USA, 2005.
- [3] M. S. Ab-Rahman, “A review of the configuration and performance limitation parameters in optical amplifiers,” *Optica Applicata*, vol. XLIV, No. 2, pp. 251-266, 2014.
- [4] Y. Said and H. Rezig, “All-Optical Signal Processing by Using SOA Nonlinearities: Prospects for the Evolution of Next Generation of Optical Networks”, *Recent Patents on signal Processing*, vol. 2, no. 1, pp. 76-81, April 2012.
- [5] Michel J. F. Digonnet, editor, “Rare-Earth-Doped Fiber Lasers and Amplifiers,” 2nd edition, Marcel Dekker, Inc., New York, 2001.
- [6] V. R. Supradeepa, Y. Feng and J. W. Nicholson, “Raman fiber lasers,” *Journal of Optics*, vol. 19, No. 2, 023001, January 2017.
- [7] Y. Xu, L. Zhang, L. Chen and X. Bao, “Single-mode SOA-based 1kHz-linewidth dual-wavelength random fiber laser,” *Optics Express*, vol. 25, No. 14, pp. 15828-15837, July 2017.
- [8] R. J. Williams, N. Jovanovic, G. D. Marshall and M. J. Withford, “All-optical, actively Q-switched fiber,” *Optics Express*, vol. 18, no. 8, pp. 7714-7723, March 2010.
- [9] F. Sanchez, F. Amrani, A. Niang, M. Salhi and A. Komarov, “Characterization of a high-power erbium-doped fiber laser,” *Int. J. of Microwaves Applications*, vol. 2, no. 2, pp. 89-92, March-April 2013.
- [10] S. Fu et al, “Review of recent progress on single-frequency fiber laser,” *J. of Optical Soc. of America B*, vol. 34, no. 3, pp. A49-A62, March 2017.
- [11] C. Qin and D. Yang, “Numerical simulation of ring cavity wavelength-swept laser based on semiconductor optical amplifier,” *IEEE J. of Quantum Electronics*, vol. 50, no. 10, pp. 831-839, October 2014.

- [12] R.M. Ribeiro and M. M. Werneck, "An intrinsic graded-index multimode optical fibre strain-gauge," *Sensors and Actuators A: Physical*, vol. 111, no 2-3, pp. 210-215, March 2004.
- [13] L. B. Soldano and E. C. M. Pennings, "Optical multi-mode interference devices based on self-imaging: principles and applications," *Journal of Lightwave Technology*, vol. 13, no 4, pp. 615-627, April 1995.
- [14] A. Kumar, R. K. Varshney, C. S. Antony and P. Sharma, "Transmission characteristics of SMS fiber optic sensor structures," *Opt. Communications*, vol. 219, pp. 215-219, April 2003.
- [15] Ricardo M. Ribeiro, Frédéric Lucarz and Bruno Fracasso "An All-Optical Sampler for Digitising Radioover-Fibre Transceivers", *European Conference on Optical Communications (NOC-OC&I)*, At Graz, Austria, July 2013.
- [16] Wilson, J; Hawkes, J.F.B. *Lasers Principles and Applications*, Prentice Hall International Series in Optoelectronics, 1987.
- [17] Wikipédia Foundation, Imagem do Processo de Emissão Estimulada, Disponível em: <https://pt.m.wikipedia.org/wiki/Ficheiro:Emissao_Estimulada.png>, Acesso em: 25 de Maio de 2018.
- [18] Carlos M. Neves, Seminário Laser em Medicina, Imagem Cavidade Óptica Ressonante, Disponível em: <<https://slideplayer.com.br/slide/10219364/>>, Acesso em: 10 de Junho de 2018.
- [19] Andrés P.L. Barbero, "Notas de Aula da disciplina de Comunicações Ópticas do curso de Bacharelado em Engenharia de Telecomunicações da Universidade Federal Fluminense", Niterói, 2016.
- [20] Roithner Laser Technik GmbH, Datasheet Roithner Laser Technik LD-520-50MG, Disponível em: <http://www.roithner-laser.com/datasheets/ld_div/ld-520-50mg.pdf>, Acesso em: 13 de Julho 2018.
- [21] Zuxing Zhang, Jian Wu, Kun Xu, Xiaobin Hong, and Jintong Lin, "Tunable multiwavelength SOA fiber laser with ultra-narrow wavelength spacing based on nonlinear polarization rotation," *Opt. Express* 17, 17200-17205 (2009)

- [22] Ricardo I. Álvarez-Tamayo, José G. Aguilar-Soto¹, Manuel Durán-Sánchez¹, José E. Antonio-López, Baldemar Ibarra-Escamilla and Evgeny A. Kuzin, “MMI filters configuration for dual wavelength generation in a ring cavity erbium-doped fibre laser “Journal of the European Optical Society-Rapid Publications, 2016.
- [23] Kamelian, Datasheet 1550 nm Nonlinear SOA, Disponível em: <http://www.kamelian.com/data/nlsoa_ds.pdf>, Acesso em: 15 de Junho de 2018.
- [24] Lightwaves2020, Datasheet Tunable Optical Filter (TOTF), Disponível em: <http://www.lightwaves2020.com/productinfo_word.php?prono=14>, Acesso em: 17 de Junho de 2018.
- [25] H. C. Lefevre, “Single-mode fibre fractional wave devices and polarisation controllers,” Electronics Letters, vol. 16, no. 20, pp. 778-780, September 1980.
- [26] Evanescent Optics Inc., Datasheet Variable Ratio Couplers model 905 SM non-PM version, Disponível em: <<http://www.evanescentoptics.com/products/?id=21>>, Acesso em: 25 de Agosto de 2018.
- [27] AC Photonics Inc., Datasheet Multimode Fiber Scrambler, Disponível em: <<http://www.acphotonics.com/products/PDF%20File/Tools%20and%20Accessories/MM%20Fiber%20Scrambler.pdf>>, Acesso em: 13 de Janeiro de 2019.
- [28] RP Photonics Encyclopedia, Teoria do regime Mode-Locking Passivo, Disponível em: <https://www.rp-photonics.com/passive_mode_locking.html>, Acesso em: 20 de Outubro de 2018.
- [29] RP Photonics Encyclopedia, Teoria de Lasers a Fibra Óptica, Disponível em: <https://www.rp-photonics.com/fiber_lasers.html>, Acesso em: 20 de Outubro de 2018.
- [30] RP Photonics Encyclopedia, Teoria da Técnica de Rotação Não-Linear de Polarização, Disponível em: <https://www.rp-photonics.com/nonlinear_polarization_rotation.html>, Acesso em: 20 de Outubro de 2018.
- [31] RP Photonics Encyclopedia, Teoria de Lasers a Fibra Óptica operando em Regime Mode-Locked, Disponível em: https://www.rp-photonics.com/mode_locked_fiber_lasers.html>, Acesso em: 20 de Outubro de 2018.

[32] Hou-Ren Chen, Kuei-Huei Lin, Chih-Ya Tsai, Hsiao-Hua Wu, Chih-Hsuan Wu, Chieh-Han Chen, Yu-Chieh Chi, Gong-Ru Lin, and Wen-Feng Hsieh, "12 GHz passive harmonic mode-locking in a 1.06 μm semiconductor optical amplifier-based fiber laser with figure-eight cavity configuration," *Opt. Lett.* 38, 845-847 (2013)

APÊNDICE

Caracterização Estática de um Amplificador Óptico Semicondutor (SOA)

André Felipe T. M. Monteiro, Marlon M. Correia, Vinicius N. H. Silva e Ricardo M. Ribeiro.

Resumo— Este artigo de Iniciação Científica, descreve a caracterização estática de um amplificador óptico semicondutor (SOA) concebido e desenvolvido para aplicações envolvendo óptica não-linear. Obteve-se: corrente de transparência em 29 mA, espectro ASE, curvas potência óptica x corrente e ganho saturado em 18 dB relativamente plano em torno de 1550 nm.

Palavras-Chave— *Amplificador óptico semicondutor, comunicações ópticas, dispositivos ópticos, óptica não-linear.*

Abstract— This paper of Scientific Initiation describes the static characterization of a semiconductor optical amplifier (SOA) conceived and developed for non-linear optics applications. It was measured: 29 mA transparency current, ASE spectrum, optical power x current curves and 18 dB saturated gain that is flat around 1550 nm.

Keywords— *Optical semiconductor amplifier, optical communications, optical devices, non-linear optics.*

INTRODUÇÃO

Em comunicações a fibra óptica, os amplificadores ópticos mais utilizados são os EDFAs (amplificador à fibra dopada com érbio) [1] e a seguir os amplificadores Raman [2]. Porém os amplificadores ópticos a semicondutor (SOAs) [3] também podem ser utilizados, dado que suas características permitem um uso vantajoso em determinadas situações específicas.

Os amplificadores ópticos a semicondutor (SOAs), assim como os lasers de diodo (LD), são construídos a partir de junções semicondutora. SOAs são uma espécie de LD frustrado pois suas faces de saída de luz possuem muito baixa refletividade. Em comparação com os EDFAs, os SOAs possuem recuperação rápida do ganho de amplificação, permitindo assim que venham sendo amplamente utilizados na construção de diversos circuitos ópticos para o processamento totalmente fotônico de sinais em Telecomunicações [4].

Este artigo de Iniciação Científica (IC), descreve a caracterização estática de um SOA não-usual concebido, desenvolvido e manufaturado pela Kamelian (UK), modelo 1550 nm Nonlinear SOA. Este último, foi construído para apresentar um alto grau de não-linearidade óptica com 25 ps de tempo de recuperação do ganho [5]. Este artigo de IC, descreve então algumas medidas de caracterização estática do SOA não-linear da Kamelian. Tal conjunto de caracterizações, consiste em uma etapa preliminar do desenvolvimento em curso no nosso Laboratório de um laser sintonizável em anel de fibra óptica (o laser não está aqui apresentado).

MONTAGENS EXPERIMENTAIS

A Fig.1, mostra o esquema de uma primeira montagem experimental para medir com um OSA (Analisador de Espectro Óptico), o espectro emitido e o comprimento de onda de pico da ASE (Amplified Spontaneous Emission) em função da corrente de polarização no SOA. A Fig.2, mostra um segundo esquema experimental. Neste esquema utilizou-se um laser sintonizável (Agilent 8163B) e um atenuador óptico variável (VOA) para injetar 0,1 mW de potência óptica em 1550 nm na entrada do SOA através de um acoplador direcional com razão 80/20. Então, 20% da potência é medida pelo OPM₁ (Medidor de Potência Óptica), enquanto os outros 80% são injetados no SOA. Posteriormente variou-se o comprimento de onda emitido pelo laser sintonizável (1520-1630 nm) para uma dada corrente constante de polarização do SOA.

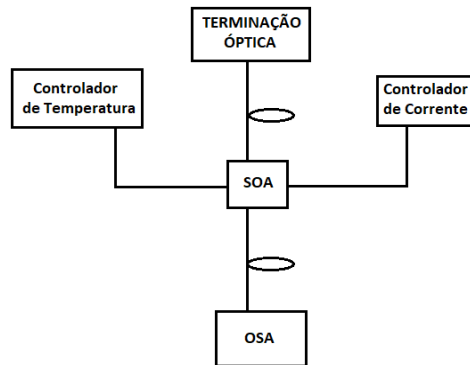


Fig.1. Montagem experimental para a ASE do SOA.

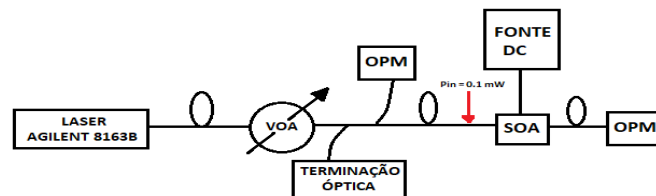


Fig.2. Montagem experimental para medir a curva de amplificação do SOA.

A Fig. 3, mostra esquematicamente uma montagem experimental para caracterizar o filtro óptico passa banda (BPF) Lightwaves 2020 [5] quanto à sua sintonização manual e transmitância na faixa de 1520-1565 nm.

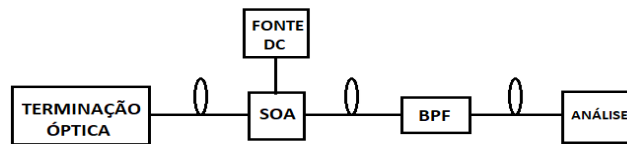
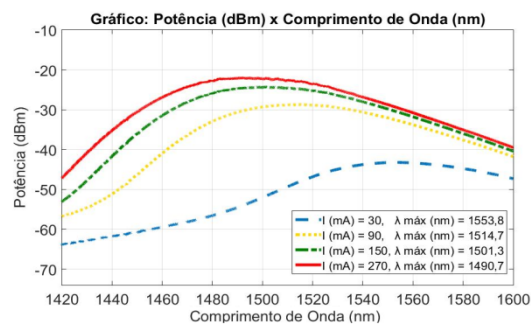


Fig.3. Montagem de caracterização da banda de sintonização do filtro passa banda (BPF).

RESULTADOS E CONCLUSÕES

Com relação a Fig.1, variou-se a corrente I_{bias} até 280 mA para medir o espectro ASE do SOA conforme visto na Fig.4

Fig. 4. Espectro de ASE gerado pelo SOA x I_{bias} .

A Fig.4, mostra um deslocamento do pico para menores comprimentos de onda (*blue-shift*) quando I_{bias} é aumentada. Este último efeito, deve-se provavelmente ao enchimento da banda com o aumento de I_{bias} no SOA.

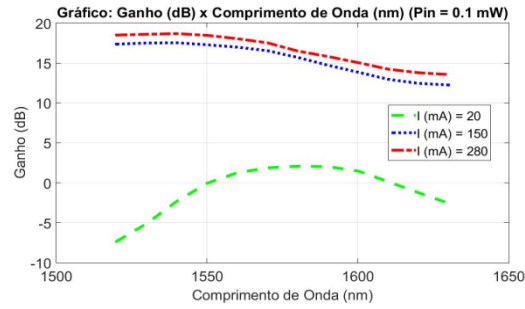


Fig.5. Curva de ganho de amplificação do SOA em função do comprimento de onda em 1520-1630 nm, considerando alguns valores de I_{bias} e $P_{in} = 0,1$ mW.

A Fig. 5 mostra o resultado de medidas do ganho de amplificação do SOA na faixa 1520-1630 nm considerando um baixo sinal de entrada (0,1 mW) com I_{bias} em 20 mA (abaixo da transparência), 150 mA e 280 mA. Pode-se notar, que acima da corrente de transparência (29 mA), o pico de ganho relativamente plano de 18 dB em ~ 1550 nm, conforme informado pelo fabricante [6].

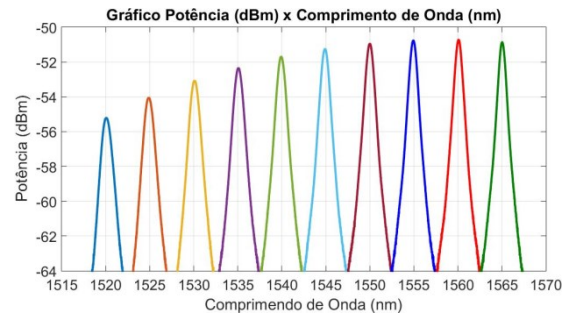


Fig. 6. Espectro de transmitância do filtro BPF.

A Fig. 6, mostra que a largura espectral em 3dB do filtro passa-banda utilizado é de aproximadamente 1,1 nm e o mesmo é sintonizável na banda 1520-1565 nm.

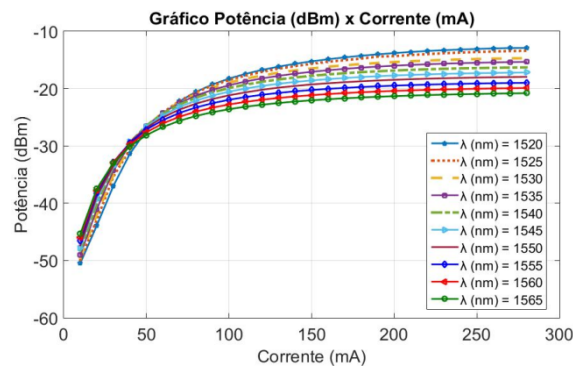


Fig.7. Função de transferência do SOA com sintonização espectral realizada pelo BPF.

A Fig. 7, mostra a potência óptica emitida pelo SOA quando utiliza-se o filtro passa banda (BPF) sintonizado dentro da banda de 1520-1565 nm. Nota-se que acima de 50 mA, é possível extrair uma maior potência para menores comprimentos de onda. Este último acontece devido ao deslocamento *blue-shift* dos comprimentos de onda de pico da ASE conforme já mostrado pela Fig. 4.

CONCLUSÕES

Em conclusão, o SOA aqui utilizado mostrou-se um dispositivo capaz de produzir um ganho de amplificação de ~ 18 dB com pico relativamente plano para 0.1 mW de potência de entrada em 1550 nm. Além disso, o BPF aqui utilizado apresentou uma largura de banda de $\sim 1,1$ nm @ 3dB com sintonização entre 1520-1565 nm e uma maior potência transmitida nos menores comprimentos de onda da banda devido a um forte *blue-shift*.

Finalmente destaca-se que o SOA em conjunto com BPF poderão serem utilizados em conjunto para construção de um laser sintonizável em anel de fibra óptica.

AGRADECIMENTOS

Os autores gostariam de agradecer ao apoio financeiro recebido do CNPq.

REFERÊNCIAS

- [1] Emmanuel Desurvire, "Erbium-doped fiber amplifiers: principles and applications", Wiley-Interscience, New York, 2002.
- [2] Clifford Headley and Govind P. Agrawal, editors, "Raman Amplification in Fiber Optical Communication Systems," Elsevier Academic Press, USA, 2005.
- [3] M. S. Ab-Rahman, "A review of the configuration and performance limitation parameters in optical amplifiers," Optica Applicata, vol. XLIV, No. 2, pp. 251-266, 2014.
- [4] Y. Said and H. Rezig, "All-Optical Signal Processing by Using SOA Nonlinearities: Prospects for the Evolution of Next Generation of Optical Networks", Recent Patents on Signal Processing, vol. 2, no. 1, pp. 76-81, April 2012.
- [5] Tunable Optical Filter (TOTF) (<http://www.lightwaves2020.com>).
- [6] 1550 nm Nonlinear SOA (www.kamelian.com).

[IC] Laser sintonizável em anel de fibra óptica com amplificador óptico semiconductor como meio de ganho

André F. Monteiro, Marlon M. Correia, Vinicius N. H. Silva e Ricardo M. Ribeiro

Depto. de Engenharia de Telecomunicações, Universidade Federal Fluminense, Niterói, RJ, Brasil, 24.210-240
marloncorreia95@gmail.com

Resumo — Este artigo de Iniciação Científica descreve a montagem e testes de um laser em onda contínua, sintonizável, formado por um anel de fibra óptica contendo um amplificador óptico semiconductor (SOA) como meio de ganho. Um filtro óptico passa-banda com $< 1,2$ nm @ 3 dB de largura inserido no anel e ajustável manualmente, foi usado para realizar a referida sintonização ao longo da banda espectral de 45 nm de largura (1520-1565 nm). Obteve-se potências ópticas de saída em até 5 mW com largura espectral $< 0,02$ nm, abaixo do limite de resolução do analisador de espectro óptico utilizado.

Palavras-chave — laser; amplificador óptico semiconductor; processamento óptico de sinais; circuitos ópticos; comunicações ópticas.

INTRODUÇÃO

Os amplificadores ópticos mais utilizados em comunicações a fibra óptica são os EDFAs (amplificador à fibra dopada com érbio) [1] e a seguir os amplificadores Raman [2]. Em algumas situações específicas, os amplificadores ópticos a semiconductor (SOAs) também são utilizados [3]. Porém, além de amplificar a luz, esses amplificadores podem servir como meio de ganho óptico e serem utilizados na montagem de lasers [4-6].

O confinamento do sinal óptico providenciado pela fibra óptica permite que os lasers a fibra sejam extremamente eficientes. Estes lasers apresentam como principal desvantagem, a existência de uma cavidade óptica longa, o que pode resultar em uma instabilidade espectral de emissão. Entretanto, é relativamente fácil construir um laser a fibra, e suas aplicações são variadas na área industrial, comunicações ópticas, para a caracterização de dispositivos ópticos e em sensores a fibra [4,6].

Os SOAs em particular possuem a característica de recuperação rápida do ganho de amplificação, permitindo assim que venham sido amplamente utilizados na construção de diversos circuitos ópticos para o processamento totalmente fotônico de sinais em Telecomunicações [7]. Ao serem inseridos em um laser em anel, os SOAs podem simultaneamente fazer o papel de meio de ganho e de modulador. SOAs também podem ser integrados ópticamente.

Este artigo de Iniciação Científica (IC), descreve o desenvolvimento experimental de um laser a fibra óptica em configuração de anel operando em onda contínua (CW), onde utiliza-se um SOA como meio de ganho óptico e um filtro óptico passa-banda (FPB) com ajuste manual na faixa espectral de 1520-1565 nm e banda de $< 1,2$ nm @ 3dB que permite a sua sintonização. O SOA aqui utilizado não é usual, pois foi concebido para apresentar um alto grau de não-linearidade óptica com 25 ps de tempo de recuperação do ganho. Pode então, ser aplicado, por exemplo, em dispositivos de demultiplexação óptica operando em taxas de 80 Gb/s [8]. Este artigo de IC, mostra então uma *primeira* etapa do desenvolvimento em curso de um laser em anel que numa etapa *posterior* irá operar no regime de *mode-locked* (este último não aqui apresentado). A principal motivação, é utilizar o laser em *mode-locked* como uma ferramenta experimental para diversas aplicações, por exemplo, em redes ópticas passivas (PON), dispor de um laser com baixo ruído de fase [6], para gerar pulsos ópticos de amostragem na digitalização fotônica, etc. Este trabalho, está então organizado de forma que na secção II está descrito a caracterização estática do SOA, na III a montagem experimental do laser, na IV os resultados obtidos e discussões pertinentes e finalmente em V as conclusões do artigo.

CARACTERIZAÇÃO ESTATICA DO SOA

Nesta secção, estão descritos os procedimentos e os resultados de caracterização estática do SOA, que adiante é usado na montagem do laser em configuração de anel em fibra óptica.

O SOA aqui utilizado foi desenvolvido manufaturado pela Kamelian (UK), modelo 1550 nm

Nonlinear SOA, na configuração de heteroestrutura enterrada o que garante um tempo de recuperação do ganho muito curto (25 ps), além de baixa sensibilidade à polarização [8].

A Fig. 1 mostra o espectro de ASE (*Amplified Spontaneous Emission*) emitido pelo SOA quando alimentado por corrente elétrica DC. Deve-se notar que sua faixa espectral de 1420-1670 nm engloba o espectro na faixa de 1520-1565 nm coberto com o uso do filtro óptico passa-banda disponível. Adicionalmente, há um deslocamento do pico para menores comprimentos de onda (*blue-shift*) quando a corrente de polarização é aumentada. Este último efeito, deve-se provavelmente ao enchimento da banda com o aumento da corrente de alimentação do SOA.

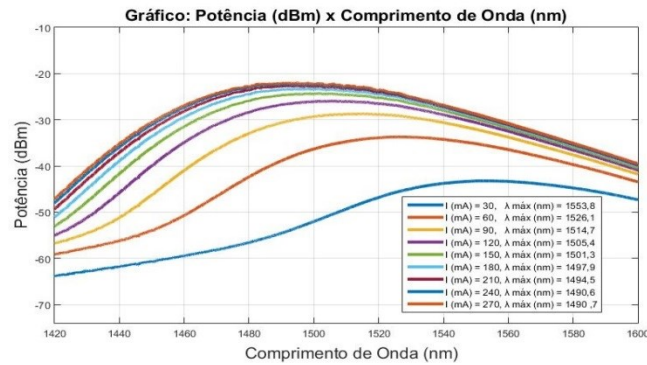


Fig.1. Espectro de ASE gerado pelo SOA utilizado, em função da corrente de polarização (*bias*) DC aplicada.

A Fig. 2 mostra o resultado de medidas do ganho de amplificação do SOA na faixa espectral 1520-1630 nm considerando um baixo sinal de entrada (0,1 mW) nos valores de corrente de *bias* em 20 mA (abaixo da transparência), 150 mA e 280 mA. O sinal injetado e sua variação em comprimento de onda, foi realizado através do uso de um laser sintonizável e a potência de saída medida com um medidor de potência óptica. Pode-se claramente notar, que acima da corrente de transparência o pico de ganho relativamente plano está em torno de 1550 nm, conforme revelado pelo fabricante [8].

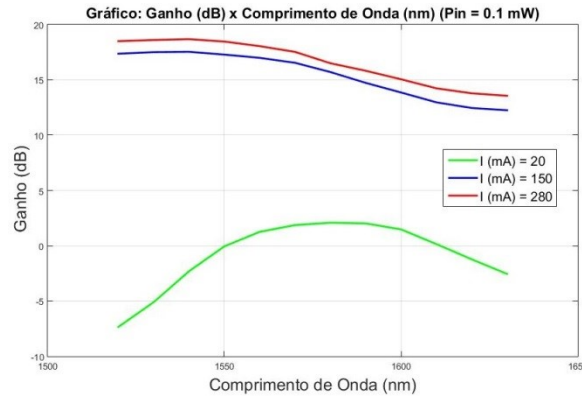


Fig.2. Curva de ganho de amplificação do SOA em função do comprimento de onda entre 1520 nm e 1630 nm, considerando alguns valores de corrente de *bias* e potência óptica injetada de 0,1 mW.

A Fig. 3, mostra a curva de ganho de amplificação do SOA em função da corrente de *bias* aplicada com uma potência óptica injetada de $P_{in} = 1$ mW em 1550 nm. Mostra em particular um ganho nulo em 29 mA, o que caracteriza a sua corrente de transparência. Esta última, refere-se ao valor a partir do qual o SOA passa amplificar o sinal óptico de entrada, até o seu ganho máximo em torno de 11,4 dB (valor saturado). O fabricante [8] garante um ganho de amplificação de no mínimo 10 dB para 0 dBm (1 mW) de potência óptica injetada, o que está confirmado pelo gráfico da Fig. 3.

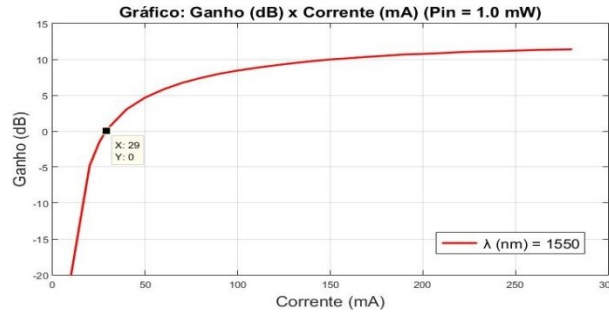


Fig.3. Curva de ganho do SOA em função da corrente de polarização considerando a potência óptica injetada de 1,0 mW em 1550 nm.

MONTAGEM EXPERIMENTAL DO LASER EM ANEL

Nesta secção, é descrita a montagem experimental do laser em anel operando em onda contínua, conforme esquematizado pela Fig. 4. Além do SOA já caracterizado anteriormente, utilizou-se um filtro passa-banda (FPB) da Lightwaves 2020 (USA) com banda de $< 1,2 \text{ nm @ } 3\text{dB}$ na qual a sintonização é obtida girando-se manualmente um pafuso micrométrico integrado ao dispositivo até o comprimento de onda central desejado dentro da banda 1520-1565 nm. Foram também utilizados diversos acopladores direcionais, com diferentes razões de acoplamento, fabricados pela Optolink (BRA), permitindo então que uma parte da luz seja extraída e a outra permaneça circulando no anel de fibra óptica. Uma das portas de um dos referidos acopladores, era então conectada a uma terminação óptica a fim de evitar possíveis reflexões espúrias de luz. Um controlador de polarização da Fiberlogix (UK) na configuração 242 [10] otimiza a potência óptica de saída do laser. No anel, está inserido um isolador a fibra óptica que permite a luz circular apenas em um sentido, anti-horário no presente caso, formando assim uma cavidade ressonante. Finalmente, a luz de saída do laser podia ser analisada com o uso de um medidor de potência óptica (OPM), analisador de espectro óptico (OSA) ou elétrico (ESA).

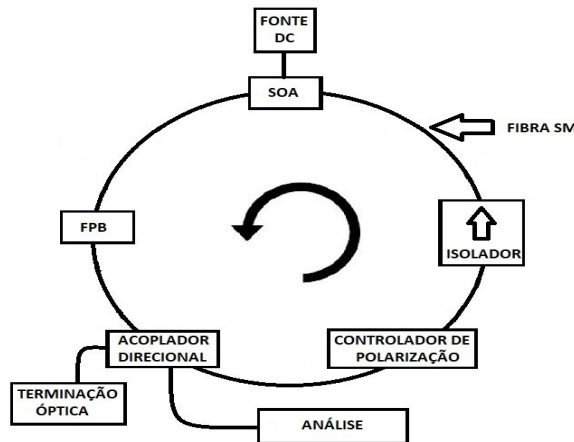


Fig. 4. Esquema experimental do laser em onda contínua, sintonizável, em anel de fibra óptica com SOA como meio de ganho óptico.

RESULTADOS E DISCUSSÕES

Nesta secção, são descritos os resultados experimentais de caracterização do laser em anel mostrado na Fig. 4 e algumas discussões pertinentes são também aqui apresentadas.

A. Corrente limiar (*threshold current*)

A Fig. 5 mostra a dependência da potência óptica emitida pelo laser em função da corrente DC aplicada no SOA e parametrizada pela porcentagem de extração de luz do anel. Este último procedimento, pôde ser realizado simplesmente trocando o acoplador 2x2 mostrado na Fig. 4 de tal forma que apresente diferentes razões de acoplamento. Uma forma mais prática, seria o uso de um acoplador a fibra com razão ajustável manualmente [9], porém não dispomos do referido componente no nosso Laboratório.

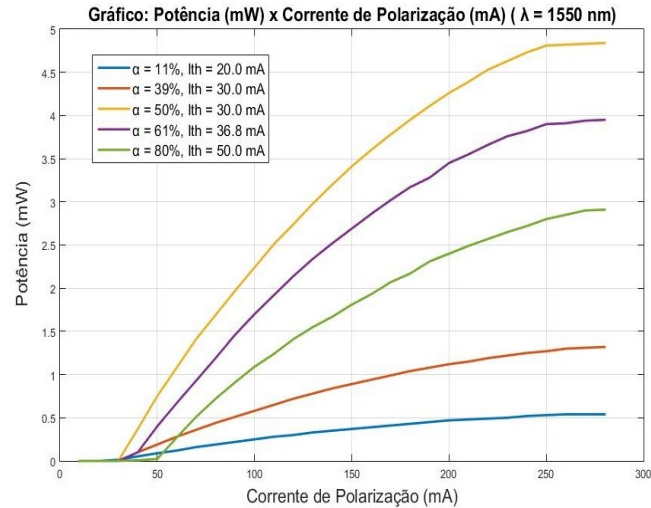


Fig. 5. Dependência do laser em anel emitindo em 1550 nm em função da corrente de polarização e parametrizado pela razão de acoplamento (extração de luz do anel) de 11/89 até 80/20.

Ao observar o gráfico da Fig. 5, é importante destacar que quanto maior a porcentagem de luz extraída (*razão de acoplamento*), maior será a corrente limiar (*threshold current*) necessária. No presente caso, a maior corrente limiar foi de 50 mA para um razão de acoplamento de 80%. A menor corrente limiar foi de 20 mA para uma razão de acoplamento de 11%. Nos casos em que as razões de acoplamento foram de 39% e 61%, obtivemos uma corrente limiar de 30 mA e 36,8 mA, respectivamente. A Fig. 6 mostra o gráfico da corrente limiar em função da razão de acoplamento do dispositivo. Por fim, é importante ressaltar que para extrair o máximo de potência óptica do laser em anel, cerca de 4,8 mW, utilizou-se um acoplador direcional capaz de extrair 50% da luz do anel com uma corrente limiar de 30 mA. Sendo assim definimos a configuração utilizando uma razão de acoplamento de 50% como ótimo dado a maior potência laser alcançada dentre todas as configurações aqui apresentadas.

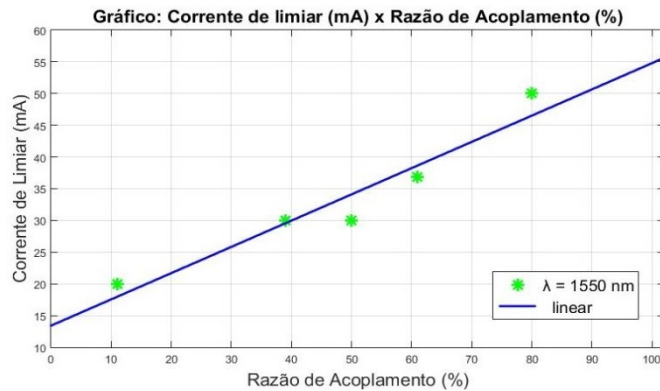


Fig. 6. Dependência da corrente limiar do laser em anel como função da razão de acoplamento (extração de luz do anel).

Ao observar o gráfico da Fig. 6, é possível visualizar o aumento da corrente limiar em função da razão de acoplamento. Este comportamento é explicado pelo fato do anel óptico comportar-se como uma

cavidade ressonante, ao retirar grande parte da luz desta cavidade, torna-se então necessário aplicar uma maior corrente de polarização para uma devida compensação da perda de uma fração da luz que fora retirada do anel, sendo assim se restabelece a inversão de população e, portanto o comportamento laser do dispositivo construído.

B. Sintonização espectral

A Fig. 7 mostra diversos espectros que evidenciam a sintonização espectral do laser em anel quando o filtro FPB é ajustado manualmente.

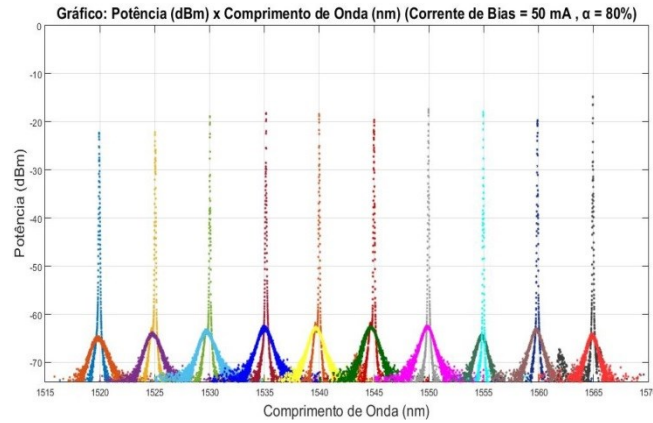


Fig. 7. Sintonização espectral do laser em anel conforme pode ser coberto pelo ajuste do filtro BPF com $I_{bias} = 50$ mA.

Conforme mostrado na Fig. 7, é importante destacar que ao se extrair 80% da luz do anel para uma corrente de *bias* de 50 mA, verifica-se um aumento de ~ 40 dB da potência óptica emitida em todos os comprimentos de onda sintonizados em relação a potência da ASE, além de uma largura espectral menor que 0,02 nm, valor este abaixo da resolução do OSA utilizado. Este resultado também nos permitiu garantir o comportamento laser do dispositivo construído em toda a banda sintonizável através do ajuste do FPB (1520-1565 nm).

C. Modos longitudinais

A Equação (1) mostra a fórmula para o cálculo teórico do espaçamento entre frequências dos modos longitudinais de um laser de onda contínua em anel.

$$\Delta f = \frac{c}{n_{fibra} L_{perimetro}} \quad (1)$$

Conforme mostrado em (1), c é a velocidade da luz no vácuo (3×10^8 m/s), n_{fibra} (1,46) é o índice de refração promediado que a luz experimenta ao se propagar ao longo da fibra e $L_{perimetro}$ é o perímetro do anel de fibra óptica. Deve-se notar que a fórmula (1) é aproximada, pois não leva em conta no denominador, a contribuição do SOA com índice de refração 3,5 e comprimento físico de 1,5 mm (muito pequeno), conforme informa o fabricante [8]. Desta forma, mediu-se o comprimento físico do anel de fibra como sendo $L_{perimetro} \sim 14$ m, e de acordo com (1), obtivemos $\Delta f \sim 14$ MHz como o espaçamento das frequências de oscilação dos modos longitudinais no anel.

A Fig. 8 mostra os resultados obtidos do espectro elétrico de saída do laser. Para a sua obtenção, foi utilizado um foto-detector com banda de 1,2 GHz acoplado a um ESA com 4 GHz de banda. Pode-se claramente verificar a detecção do modo longitudinal fundamental centrado em 13,98 MHz, assim como alguns de seus harmônicos por sua vez centrados em 28,06 MHz; 42,25 MHz; 56,34 MHz; 70,95 MHz; 84,92 MHz e 99,01 MHz. Estes resultados obtidos experimentalmente, nos fornecem um espaçamento em frequências de ~ 14 MHz, em acordo com o cálculo teórico.

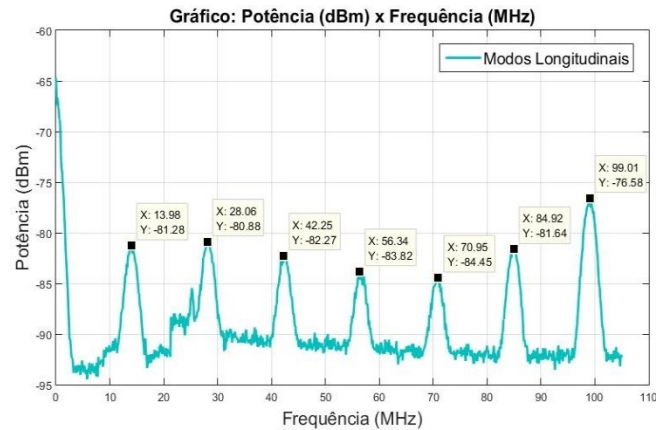


Fig.8. Espectro elétrico do laser em anel mostrando o modo longitudinal fundamental e alguns de seus harmônicos (2º ao 7º) .

CONCLUSÕES

Este artigo de IC, mostrou de forma simples o desenvolvimento de um laser a fibra sintonizável (1520-1565 nm) em onda contínua, na configuração de anel, utilizando um SOA de recuperação rápida como meio de ganho óptico. O dispositivo mostrou-se capaz de emitir aproximadamente 5 mW de potência óptica para uma razão de 50 % de extração de luz do anel numa largura espectral menor do que 0,02 nm quando sintonizado em 1550 nm. Modos longitudinais de oscilação espaçados de ~ 14 MHz foram observados no domínio elétrico. Pode-se então concluir de forma geral, que esta 1ª etapa de desenvolvimento em direção a um laser em anel operando no regime *mode-locked* ativo usando o SOA simultaneamente como meio de ganho e modulador óptico está terminada.

AGRADECIMENTOS

Os autores gostariam de agradecer ao apoio financeiro parcial recebido da Faperj e do CNPq.

REFERÊNCIAS

- [1] Emmanuel Desurvire, "Erbium-doped fiber amplifiers: principles and applications", Wiley-Interscience, New York, 2002.
- [2] Clifford Headley and Govind P. Agrawal, editors, "Raman Amplification in Fiber Optical Communication Systems," Elsevier Academic Press, USA, 2005.
- [3] M. S. Ab-Rahman, "A review of the configuration and performance limitation parameters in optical amplifiers," Optica Applicata, vol. XLIV, No. 2, pp. 251-266, 2014.
- [4] Michel J. F. Digonnet, editor, "Rare-Earth-Doped Fiber Lasers and Amplifiers," 2nd edition, Marcel Dekker, Inc., New York, 2001.
- [5] V. R. Supradeepa, Y. Feng and J. W. Nicholson, "Raman fiber lasers," Journal of Optics, vol. 19, No. 2, 023001, January 2017.
- [6] Y. Xu, L. Zhang, L. Chen and X. Bao, "Single-mode SOA-based 1kHz-linewidth dual-wavelength random fiber laser," Optics Express, vol. 25, No. 14, pp. 15828-15837, July 2017.
- [7] Y. Said and H. Rezig, "All-Optical Signal Processing by Using SOA Nonlinearities: Prospects for the Evolution of Next Generation of Optical Networks", Recent Patents on signal Processing, vol. 2, no. 1, pp. 76-81, April 2012.
- [8] 1550 nm Nonlinear SOA (www.kamelian.com).
- [9] Variable Ratio Couplers model 905 SM non-PM version (www.evanescentoptics.com).
- [10] H. C. Lefevre, "Single-mode fibre fractional wave devices and polarisation controllers", Electronic Letters, vol. 16, no. 20, pp. 778-780, September 1980.

Laser em anel com amplificador óptico semicondutor e filtro por interferência multimodal

Marlon M. Correia, André F. Monteiro, Cláudia B. Marcondes, Vinicius N. H. Silva e Ricardo M. Ribeiro
 Depto. de Engenharia de Telecomunicações, Universidade Federal Fluminense, Niterói, RJ, Brasil, 24.210-240
 marloncorreia95@gmail.com

Resumo— Este artigo, descreve a montagem e testes de um laser em onda contínua, formado por um anel de fibra óptica monomodo contendo um amplificador óptico semicondutor (SOA) como meio de ganho. Um filtro óptico consistindo de 6 m de fibra óptica multimodo foi inserido no anel. Tal tipo de filtro, é conhecido como MMI (*Multimode-Interference*) e é capaz de transmitir um pente de frequências ópticas na banda em torno de 1550 nm. Com a inclusão deste último e a sua estabilização modal, obteve-se um dispositivo laser capaz de gerar simultaneamente dois comprimentos de onda separados por cerca de ~ 2 nm, potencialmente útil para gerar ondas milimétricas ou terahertzianas via batimento óptico.

Palavras-chave—laser; amplificador óptico semicondutor; comunicações ópticas; filtro óptico; interferência multimodal.

I. INTRODUÇÃO

Lasers a fibra óptica são aqueles onde a fibra é o próprio meio de ganho. Os tipos mais comuns são formados por fibra óptica dopada com Érbio (Er) [1] ou com co-dopagem de Itérbio (Yb) [2], porém outros dopantes são possíveis. Lasers a fibra óptica nas configurações linear [1] e em anel [2,3], tem sido reportados na literatura. São úteis em diversas aplicações industriais e em Telecomunicações [3].

Um amplificador óptico semicondutor (SOA) consiste essencialmente em um laser semicondutor frustrado onde suas faces apresentam refletividade virtualmente nula [4]. Um SOA funciona então como um meio de ganho óptico eficaz. Se estiver, por exemplo, inserido em um anel de fibra óptica juntamente com algum tipo de filtro em linha, poderá se constituir como um laser em anel onde a fibra neste caso só terá o papel de condutora de luz [5]. Redes de Bragg gravadas na própria fibra podem ser utilizadas como elementos espectralmente seletivos determinando a banda (espectral) que oscila na cavidade de lasers a fibra na configuração linear [1]. Lasers em anel de fibra óptica, podem também utilizar filtros ópticos inseridos para limitar a banda espectral oscilante [5]. Adicionalmente, os SOAs devido à sua característica de recuperação rápida do ganho de amplificação [4], tem sido amplamente utilizados na construção de diversos circuitos ópticos para o processamento totalmente fotônico de sinais [6] para Telecomunicações. SOAs podem então servir simultaneamente como meio de ganho e como modulador óptico rápido.

O efeito de auto-imageamento óptico é melhor conhecido como aquele que ocorre ao longo da propagação da luz em fibras ópticas multimodo com perfil de índice gradual (GI) onde a grosso modo, diz-se que os raios seguem trajetórias de padrão senoidal com periodicidade espacial (*pitch*) de ~ 1 mm [7]. Dispositivos baseados no efeito de auto-imageamento em guias de ondas ou fibras ópticas multimodo (MM), são genericamente chamados de dispositivos MMI (*Multimode Interference*) [8]. Um dispositivo MMI a fibra MM pode ser facilmente construído fazendo uma emenda de suas extremidades com fibra monomodo (SM), para formar uma estrutura comumente chamada de SMS (*Single-mode-Multimode-Single-mode*) [9]. Estas últimas estruturas, possuem propriedades de filtragem óptica via interferência multimodal [9].

Este artigo, descreve o desenvolvimento experimental de um laser na configuração em anel de fibra óptica, operando em onda contínua (CW), usando um SOA como meio de ganho e uma estrutura SMS com 6 m de fibra MM inserida de forma a operar como um filtro óptico multi-comprimento de onda dentro da faixa espectral de 1450-1650 nm. O emprego de 6 m de fibra MM é não-usual. Além disto, aspectos originais de estabilização modal e sintonização do laser são também apresentados e discutidos. Na secção II está descrito a caracterização espectral do SMS com 6 m de fibra MM sem e com misturador modal, na III a montagem experimental do laser em anel, na IV os resultados obtidos e discussões pertinentes, e finalmente em V as conclusões do trabalho.

II. CARACTERIZAÇÃO DE ESTRUTURAS SMS

A Fig. 1, mostra esquematicamente a montagem experimental para medir o espectro de transmitância de uma

estrutura SMS com 6 m de comprimento de fibra MM quando testada com a própria luz de ASE (*Amplified Spontaneous Emission*) gerada pelo SOA. O resultado mostrado na Fig. 2 foi obtido sem o uso de um misturador de modos (*Mode-Scrambler* ou MS). Pode-se notar 2 picos de transmissão em 1556,4 nm e 1568,6 nm e uma razão de extinção de ~ 1 dB em torno de 1550 nm, ou seja, para uma (1) passagem de luz. A luz transmitida era analisada com um *Optical Spectrum Analyzer* (OSA).

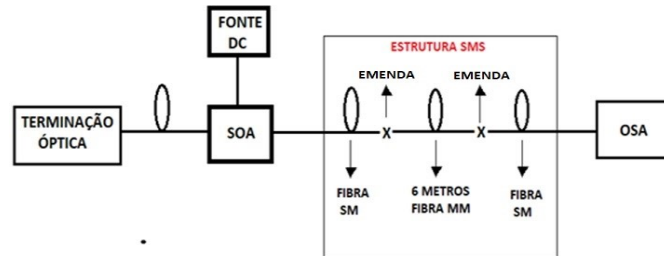


Fig.1. Montagem experimental para realizar a caracterização espectral da estrutura SMS com 6 metros de fibra MM.

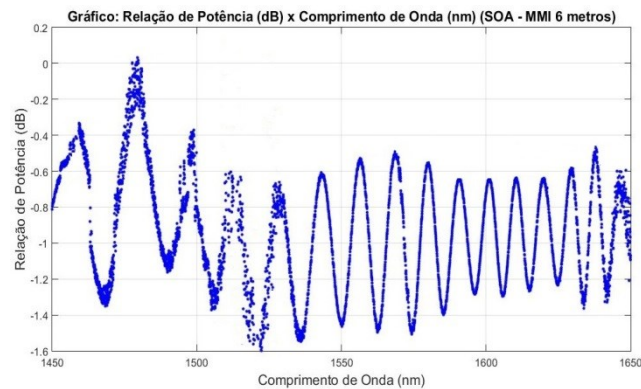


Fig. 2. Espectro normalizado transmitido por uma estrutura SMS com 6 m de comprimento de fibra óptica MM. Pode-se notar um pente de frequências ópticas com 16 picos não-equiespaçados em comprimento de onda.

A Fig. 3, mostra o comprimento de onda central de cada um dos 16 picos em comprimento de onda não-equi-espaciaados que foram gerados dentro da banda 1450-1650 nm. Nota-se que o espaçamento entre os picos gerados vão diminuindo a partir do momento em que se desloca para maiores comprimentos de onda dentro da banda referida. Em torno de 1550 nm nota-se um espaçamento de ~ 12 nm.



Fig. 3. Espaçamento entres os 16 picos em comprimento de onda gerados dentro da banda 1450-1650 nm.

Conforme mostra a Fig. 4, uma segunda configuração de estrutura SMS foi montada, desta vez foi feita a inserção de um misturador de modos (*Mode-Scrambler* ou MS) a fibra aproximadamente na metade do comprimento de 6 m de fibra MM.

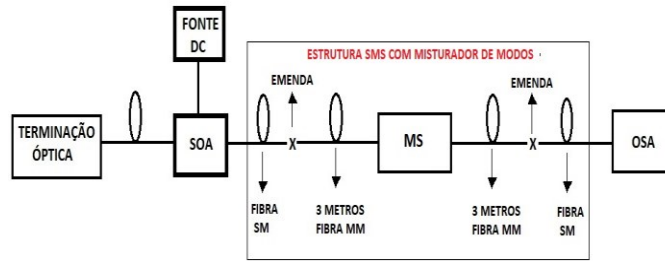


Fig.4. Montagem experimental para realizar a caracterização espectral da estrutura SMS com 6 metros de fibra MM e MS inserido.

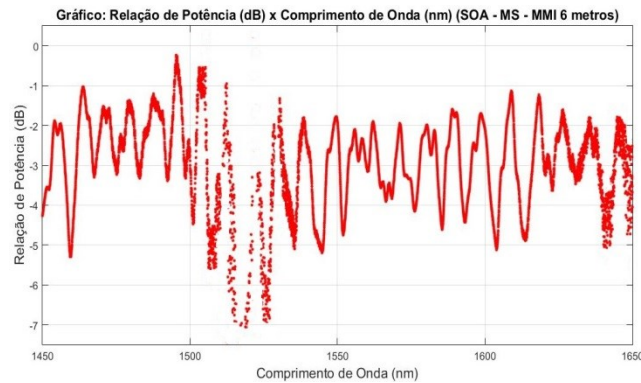


Fig. 5. Espectro normalizado transmitido por uma estrutura SMS com MS e 6 m de comprimento de fibra óptica MM. Observa-se 22 picos principais quase que perfeitamente equiespaçados em comprimento de onda. Pode-se notar que alguns dos picos apresentam uma estrutura fina.

O resultado mostrado na Fig. 5, foi obtido a partir da montagem da Fig. 4, usando um MS. Pode-se notar que agora, surgem 22 picos principais quase que perfeitamente equiespaçados em comprimento de onda onde alguns destes picos se desdobram em estruturas finas, fornecendo um total de 29 picos. Em torno de 1550 nm, pode-se notar a presença de 2 picos de transmissão em 1549,7 nm e 1555,9 nm e uma razão de extinção agora de ~ 5 dB, ou seja, para uma (1) passagem de luz.

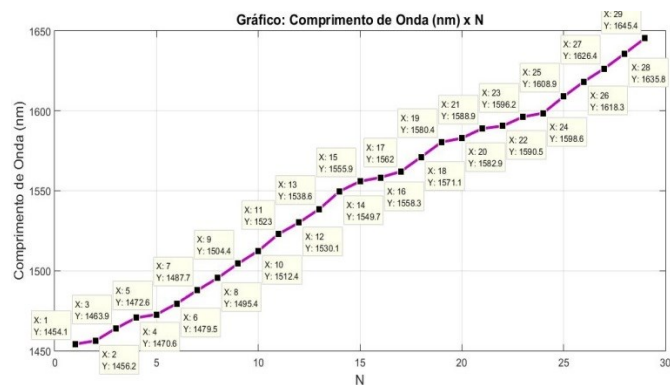


Fig. 6. Espaçamento entre os 29 picos de comprimento de onda (incluindo as estruturas finas) gerados dentro da banda 1450-1650 nm.

A Fig. 6, mostra as posições dos picos de comprimento de onda de cada um dos 29 localizados dentro da banda 1450-1650 nm. Pode-se identificar 22 picos principais quase que perfeitamente equiespaçados em ~ 9 nm de comprimento de onda. Alguns destes picos se desdobram em estruturas finas [9] com espaçamento entre sub-picos consecutivos que chegam a 2 nm.

III. MONTAGEM EXPERIMENTAL DO LASER EM ANEL COM FILTRO MMI

A representação experimental do laser em anel operando em onda contínua está esquematizada na Fig. 7, e sua montagem pode ser vista na Fig. 8. Utilizou-se um SOA como meio de ganho óptico desenvolvido e manufaturado pela Kamelian (UK), modelo 1550 nm Nonlinear SOA, na configuração de heteroestrutura enterrada o que garante um tempo de recuperação do ganho muito curto (25 ps), além de baixa sensibilidade à polarização. A estrutura SMS caracterizada anteriormente sem e com MS também foi inserida no anel óptico. O seu uso garante uma filtragem espectral devido ao fenômeno de interferência multimodal [9]. Foram também utilizados diversos acopladores direcionais, com diferentes razões de acoplamento, fabricados pela Optolink (BR), permitindo então que uma parte da luz seja extraída e a outra permaneça circulando no anel de fibra óptica. Uma das portas de cada um dos referidos acopladores, era então conectada à uma terminação óptica a fim de evitar possíveis reflexões espúrias de luz. Um controlador de polarização da Fiberlogix (UK) na configuração 242 [10] foi inserido no anel com o intuito de otimizar a potência óptica de saída do laser. No anel, foi inserido um isolador a fibra óptica que permitia a luz circular apenas em um sentido, anti-horário no presente caso, formando assim uma cavidade ressonante. Finalmente, a luz de saída do laser podia ser analisada com o uso de um analisador de espectro óptico (OSA).

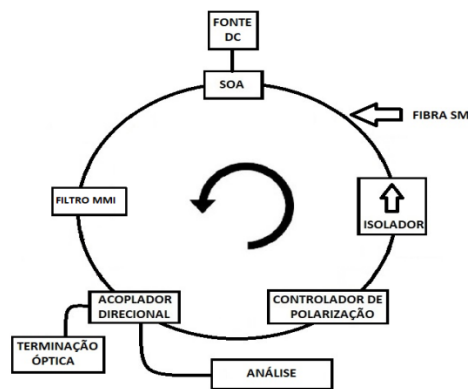


Fig. 7. Esquema experimental do laser de onda contínua em anel a fibra óptica com SOA como meio de ganho e o uso de uma estrutura SMS (com ou sem MS) como filtro espectral multi-comprimento de onda.

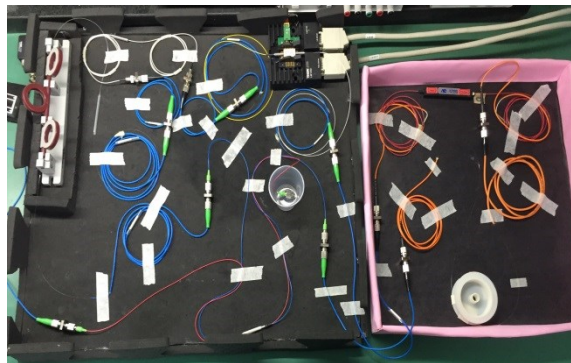


Fig. 8. Montagem experimental do laser de onda contínua em anel a fibra óptica com SOA como meio de ganho e o uso de uma estrutura SMS (com ou sem MS) como filtro espectral multi-comprimento de onda.

IV. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Nesta secção, são descritos os resultados experimentais de caracterização do laser em anel mostrado na Fig. 7 e algumas discussões pertinentes são também aqui apresentadas.

A Fig. 9, mostra a dependência da emissão espectral do laser em função da corrente DC aplicada no SOA e extração de 50 % de luz do anel considerando o filtro MMI sem MS.

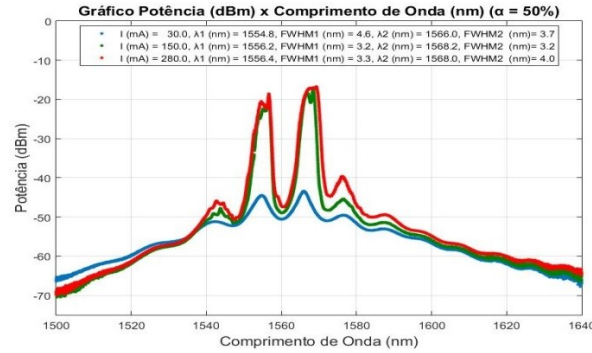


Fig. 9. Espectro de emissão CW do laser em anel com filtro MMI inserido baseado na estrutura SMS sem MS, em função da corrente de polarização do SOA, usando um acoplador 50/50.

Na Fig. 9, é importante destacar que o espectro emitido pelo laser é uma sobreposição do espectro transmitido pela estrutura SMS mostrado na Fig. 2, com o ganho de amplificação do SOA que é máximo em torno de 1550-1560 nm. Vale também ressaltar, que ao polarizar o SOA com uma corrente de 150-280 mA, valores estes acima de sua corrente de transparência (cerca de 30 mA), comprimentos de onda centrados em 1556,2 nm e 1568,2 nm com a mesma largura espectral a meia altura (FWHM = 3,2 nm) passam a oscilar na cavidade e são emitidos. Observa-se assim um comportamento típico de um laser bi-comprimento de onda com espaçamento da ordem de 12 nm entre os comprimentos de onda emitidos.

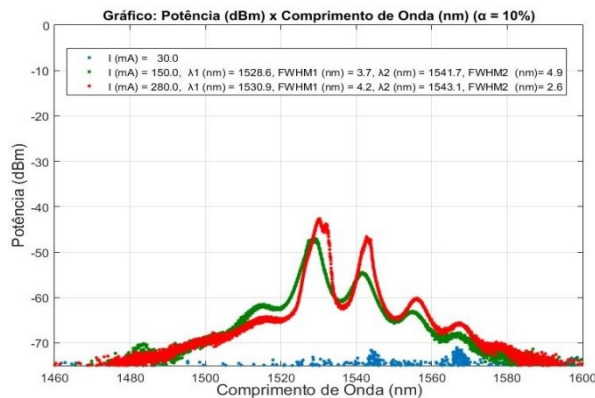


Fig. 10. Espectro de emissão CW do laser em anel com filtro MMI inserido baseado na estrutura SMS sem MS, em função da corrente de polarização do SOA, usando um acoplador 10/90

A Fig. 10, mostra a dependência da emissão espectral do laser em função da corrente DC aplicada no SOA e extração de 10 % de luz do anel. Nesta etapa realizou-se a troca do acoplador 50/50 que foi utilizado anteriormente por um acoplador 10/90. Pode-se notar que ao variar a porcentagem de extração de luz do anel óptico, neste caso 10%, ocorrem significativas mudanças no espectro emitido e queda de aproximadamente 20 dB da potência emitida. Anteriormente tinha-se emissão de duplo comprimento de onda centrado em torno de 1556 nm e 1568 nm. Nesta nova configuração, para um corrente de polarização de 150 mA, temos a emissão em 1528,6 nm e 1541,7 nm com larguras espectrais a meia altura (FWHM) de 3,7 nm e 4,9 nm respectivamente. O mesmo pode ser destacado para a corrente de polarização em 280 mA, onde obteve-se comprimentos de onda de emissão de 1530,9 nm e 1543,1 nm com larguras espectrais a meia altura (FWHM) de 4,2 nm e 2,6 nm respectivamente. Foram realizadas várias aquisições do espectro emitido pelo laser para diferentes razões de acoplamento como 20/80, 29/71, 39/61, (não apresentadas neste trabalho). Pode-se facilmente perceber que existe uma forte dependência dos comprimentos de onda emitidos como função da razão de acoplamento utilizada. O uso de acopladores direcionais com razão de acoplamento fixa dificulta uma melhor percepção do uso deste grau de liberdade para realizar a sintonização do laser. Sendo

assim, é aqui sugerido o uso de um acoplador a fibra com razão ajustável manualmente [11], não disponível no nosso Laboratório.

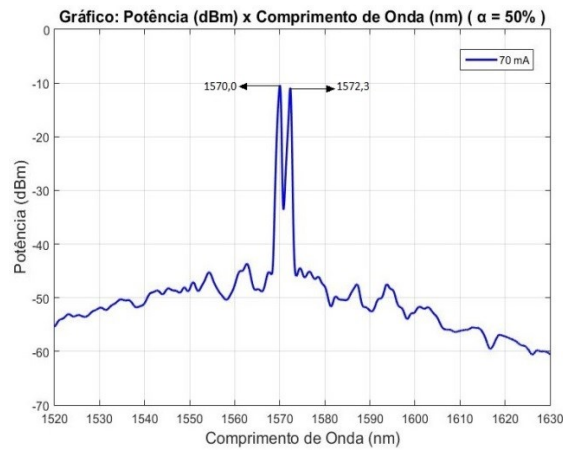


Fig. 11. Espectro de emissão CW do laser em anel com filtro MMI inserido baseado na estrutura SMS com MS, para uma corrente de polarização do SOA em 70 mA, usando um acoplador 50/50.

Em uma segunda etapa deste trabalho, um MS foi introduzido no laser em anel. A Fig. 4 mostra o esquemático da estrutura SMS com o MS inserido, sendo agora a nova constituição do filtro MMI integrado no anel. Ao observar a Fig. 11, nota-se um comportamento típico de um laser bi-comprimento de onda assim como já demonstrado anteriormente. Com a introdução do MS, obteve-se picos com uma profundidade de ~ 24 dB com relação ao nível de ruído, comparável com o obtido na Fig. 9 (sem o MS). Entretanto, o espaçamento obtido entre os picos de comprimento de onda foram da ordem de 2,3 nm com emissões em 1570,0 nm e 1572,3 nm e larguras de linha de 0,8 nm e 0,4 nm respectivamente. Estes valores de largura de linha estão super-estimados pois estavam no limite de resolução do OSA (mantida em 0,5 nm durante as medidas), as linhas de emissão são provavelmente mais estreitas. O espaçamento de 2,3 nm está consistente com o espaçamento entre picos de sub-estruturas finas conforme pode-se observar da Fig. 5. Ao compararmos os resultados com os que foram obtidos anteriormente, podemos concluir que a introdução do MS possibilitou obter emissão do laser em dois picos com um espaçamento de ~ 2 nm (250 GHz em torno de 1550 nm) e larguras de linha $< 0,5$ nm (< 60 GHz em torno de 1550 nm). Um espaçamento de 250 GHz torna-se interessante para a geração de ondas milimétricas por batimento óptico, enquanto que uma largura de linha inferior a 60 GHz pode ser útil quando é necessário dispor de um laser com baixo ruído de fase.

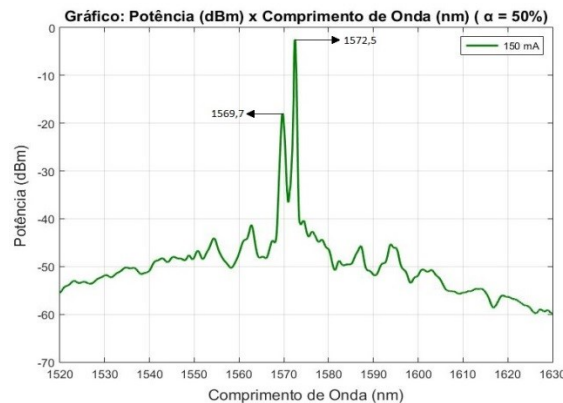


Fig. 12. Espectro de emissão CW do laser em anel com filtro MMI inserido baseado na estrutura SMS com MS, para uma corrente de polarização do SOA em 150 mA, usando um acoplador 50/50.

Ao observar a Fig. 12, com o aumento da corrente de polarização de 70 para 150 mA, pode-se notar que as duas emissões continuam na prática cada qual num mesmo comprimento de onda. Entretanto, o laser agora emite 1572,5 nm cerca de 15 dB acima de 1569,7 nm, tornando-se quase que longitudinalmente monomodo. As larguras de linha foram medidas como sendo de 0,6 nm e 0,3 nm para o 1º e 2º pico respectivamente, medidas estas mais uma vez limitadas pela resolução do OSA.

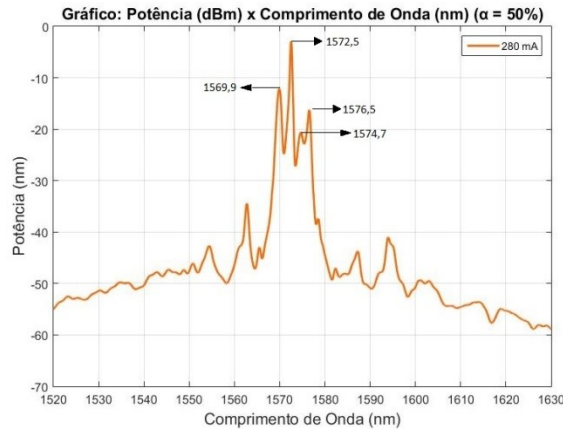


Fig. 13. Espectro de emissão CW do laser em anel com filtro MMI inserido baseado na estrutura SMS com MS, para uma corrente de polarização do SOA em 280 mA, usando um acoplador 50/50.

O espectro emitido pelo laser conforme mostrado na Fig. 12 se manteve estável até o SOA ser polarizado por uma corrente de 200 mA. Na Fig. 13, o SOA foi polarizado por uma corrente de 280 mA. Nota-se então que novos comprimentos de onda passam a oscilar no anel óptico, resultando em uma determinada instabilidade do comprimento de onda emitido.

V. CONCLUSÕES

Este artigo, mostrou de forma relativamente simples e pela 1ª vez, no melhor do conhecimento dos autores, o desenvolvimento de um laser bi-comprimento de onda em anel de fibra óptica, incorporando um amplificador óptico semiconductor como meio de ganho óptico e uma estrutura SMS com fibra MM comercial longa (6 m no padrão 62,5/125 μm) para realizar filtragem por interferência multimodal.

A filtragem com o SMS foi demonstrada sem e com acoplamento modal, para este último inserindo um misturador de modos (MS). No primeiro caso, obteve-se um espectro de saída com ~ 12 nm de espaçamento entre os dois picos com 3-5 nm de largura de linha, no segundo caso, pode-se obter os dois picos espaçados de ~ 2 nm, significativamente mais próximos entre si e com largura de linha $< 0,4$ nm, já limitada pela resolução do OSA. Com o MS inserido e $I_{\text{bias}} = 70$ mA, obteve-se os dois picos em 1570,0 nm e 1572,3 nm com potências equalizadas em ~ 24 dB acima do nível de ruído. Com um aumento de I_{bias} , pode-se forçar a oscilação no anel de apenas um pico espectral ou mais que dois. Pode-se então concluir sobre a possibilidade de obter sintonização espectral do dispositivo utilizando componentes ópticos comerciais, e não, por exemplo, projetar e construir dispositivos MMI tipo filtro passa-banda. Neste últimos, se ajusta o seu comprimento físico, o que em princípio só permite a saída de um pico espectral devido ao seu comprimento reduzido de poucos centímetros ou milímetros [12].

Este trabalho, também nos permitiu concluir que a sintonização do laser pode ser realizada mudando a razão de acoplamento de luz e/ou a corrente de bias no SOA. Além do mais, pode-se inserir um MS no anel, o que modificou significativamente o espectro de saída. Com a ajuda de um atenuador óptico variável (não aqui mostrado), pode-se antever a possibilidade de regular a potência óptica de saída do laser.

Uma possibilidade de um futuro trabalho, consiste em explorar a sintonização do laser ainda em onda contínua, não só fazendo I_{bias} variar, mas também ao incorporar no anel: um acoplador com razão ajustável, a inserção do MS em outras posições com relação a fibra MM, o uso desta última enrolada em uma bobina de

pequeno diâmetro ao invés de usar MS e posicionar um atenuador óptico variável na saída do dispositivo. Uma segunda possibilidade, é operar o dispositivo em regime de Q-switching ou mode-locking ativo, para isto usando o SOA simultaneamente como meio de ganho e modulador óptico.

AGRADECIMENTOS

Os autores gostariam de agradecer ao apoio financeiro recebido do CNPq.

REFERÊNCIAS

- [1] R. J. Williams, N. Jovanovic, G. D. Marshall and M. J. Withford, "All-optical, actively Q-switched fiber," *Optics Express*, vol. 18, no. 8, pp. 7714-7723, March 2010.
- [2] F. Sanchez, F. Amrani, A. Niang, M. Salhi and A. Komarov, "Characterization of a high-power erbium-doped fiber laser," *Int. J. of Microwaves Applications*, vol. 2, no. 2, pp. 89-92, March-April 2013.
- [3] S. Fu *et al*, "Review of recent progress on single-frequency fiber laser," *J. of Optical Soc. of America B*, vol. 34, no. 3, pp. A49-A62, March 2017.
- [4] Michael J. Connelly, "Semiconductor Optical Amplifiers," Springer Science + Business Media, New York, 2002.
- [5] C. Qin and D. Yang, "Numerical simulation of ring cavity wavelength-swept laser based on semiconductor optical amplifier," *IEEE J. of Quantum Electronics*, vol. 50, no. 10, pp. 831-839, October 2014.
- [6] V. Sasikala and K. Chitra, "All-optical switching and associated technologies: a review", *Journal of Optics*, pp. 1-11, March 2018.
- [7] R.M. Ribeiro and M. M. Werneck, "An intrinsic graded-index multimode optical fibre strain-gauge," *Sensors and Actuators A: Physical*, vol. 111, no 2-3, pp. 210-215, March 2004.
- [8] L. B. Soldano and E. C. M. Pennings, "Optical multi-mode interference devices based on self-imaging: principles and applications," *Journal of Lightwave Technology*, vol. 13, no 4, pp. 615-627, April 1995.
- [9] A. Kumar, R. K. Varshney, C. S. Antony and P. Sharma, "Transmission characteristics of SMS fiber optic sensor structures," *Opt. Communications*, vol. 219, pp. 215-219, April 2003.
- [10] H. C. Lefevre, "Single-mode fibre fractional wave devices and polarisation controllers," *Electronics Letters*, vol. 16, no. 20, pp. 778-780, September 1980.
- [11] Variable Ratio Couplers model 905 SM non-PM version (www.evanescentoptics.com).
- [12] A. Castillo-Guzman, J. E. Antonio-Lopez, R. Selvas-Aguilar, D. A. May-Arrioja, J. Estudillo-Ayala and P. LiKamWa, "Widely tunable erbium-doped fiber laser based on multimode interference effect," *Optics Express*, vol. 18, no. 2, pp. 591-597, January 2010.

Controlador de Lefevre

O controlador de Lefevre, também chamado de controlador "Mickey Mouse", é um dispositivo que contém múltiplas bobinas. A fibra óptica é enrolada nessas bobinas em uma configuração 242, onde a bobina de meia onda (HWP) tem o dobro de voltas em relação às bobinas de quarto de onda (QWP) [25]. A figura 1 mostra o esquema descrito.

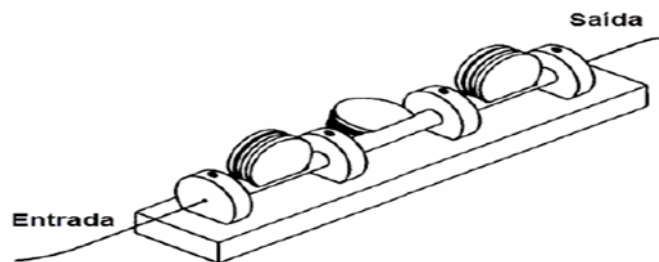


Figura 1 Controlador de polarização "Mickey Mouse"

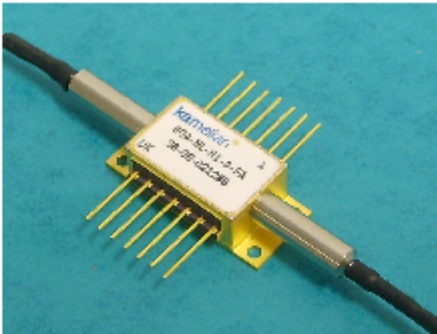
O primeiro QWP (1ª bobina) converte qualquer estado de polarização arbitrário de entrada em uma polarização linear. O HWP (bobina central) então rotaciona a polarização linear para um ângulo desejado para que o segundo QWP (3ª bobina) possa transformar a polarização linear em qualquer estado de polarização desejado. Ao enrolar a fibra é induzido um estresse que ocasiona uma birrefringência inversamente proporcional à raiz do diâmetro da bobina [25]. Esta birrefringência altera a diferença de fase das componentes do campo elétrico, portando altera-se a polarização da luz. Ao ajustar o diâmetro e número de voltas, pode-se produzir qualquer tipo de polarização. Ao dobrar a fibra, geralmente, se induz uma perda por inserção, logo, o diâmetro da bobina deve permanecer relativamente grande.

ANEXOS

1550nm NONLINEAR SOA

Description

This high performance semiconductor optical amplifier is primarily intended for use as an optical nonlinear element in ultra high bit rate all optical switching applications. The buried heterostructure device offers short gain recovery times with low polarisation dependence. The nonlinear SOA includes a thermistor and thermo-electric cooler in a 14-pin butterfly package with single mode fiber pigtails.



FEATURES

- 1550nm WINDOW
- HIGH GAIN
- LOW POLARISATION DEPENDENCE
- SHORT GAIN RECOVERY TIME
- COMPACT PACKAGE
- USED AT SPEEDS UP TO 80Gbit/s

Applications

This product is appropriate for use as a nonlinear optical element in a range of applications which use Cross Gain Modulation, Cross Phase Modulation or Four Wave Mixing. Devices of this type have used successfully in a range of configurations including UNI, SLALOM and DI interferometers at speeds up to 80 Gbit/s.

Specifications

(1529-1563 nm with 0dBm input)

PARAMETER	MIN SPECIFICATION	TYPICAL SPECIFICATION	MAX SPECIFICATION
Fiber-to-fiber gain - (Min)	10dB		
Noise figure		8dB	10dB
Gain recovery time (1/e)		25ps	
Polarisation dependence		1dB	2dB
ASE Centre Wavelength	1530nm		1570nm
Bias current		300mA	400mA
Operating temp	-5°C		70°C
TEC Drive Max		0.7A/1.5V	



Tunable Optical Filter

Features / Benefits

- 40nm wavelength tuning range
- Operating wavelength: C, L or S band
- Low insertion loss
- Low PDL
- Cost-effective
- Tuning with micrometer or stepper motor

Applications

- Tuning components for tunable laser and white light source
- Optical testing
- Sensor source
- Channel selection in WDM network

Specifications

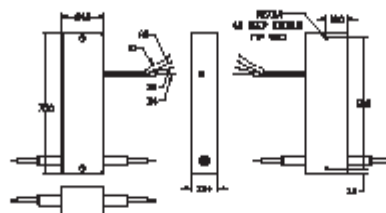
Parameters	Unit	C-band	L-band	S-band	O-band
Nominal Wavelength	nm	1520 - 1565	1570 - 1610	1485 - 1520	1290 - 1320
Maximum Insertion Loss	dB	< 2.7			
PDL*	dB	< 0.1			
Optical Return Loss	dB	> 50			
Bandwidth*	-	<1.2nm @ 3dB down, 10nm @ 20dB down			
Tuning Resolution*	-	continuously tunable for manual type 0.01 nm for stepper motor			
Operating Temperature	°C	0 to 70			
Storage Temperature	°C	-40 to 85			
Dimension	mm	24 x 50 x 15 (manual type) 24 x 75 x 15.4 (stepper motor)			

Note: All specification referenced without connectors

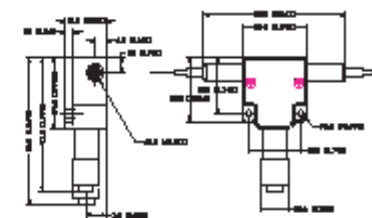
* Measured at the wavelength of 1550nm for C-band

Dimensions

Stepper motor



Manual type



Units: mm (inch)

Ordering Information

T	O	T	F			0	1	2	0	0	0			
Type				Wavelength				Fiber Type		Fiber Length		Connector		
M= manual S= stepper motor				C = C-band L = L-band S = S-band O = O-band				0= SMF-28		1= 1.0m 5= 1.5m		0= None 1= FC/UPC 2= FC/APC 3= SC/UPC 4= SC/APC 5= LC/UPC 6= MU/APC		
										Rigtail Type				
										0= 250µm bare fiber 1= 900µm loose tube				

This product information is subject to change without notice.



Multimode Fiber Scrambler



Features

- Low Insertion Loss
- Fully Filled Mode Distribution
- High Environmental Stability

Applications

- Test and Measurement
- Instrumentation

Application Notes

Multimode Scrambler is a device that generates a fully filled mode condition inside a multimode fiber, and removes all cladding modes. It will make testing results of multimode fiber optic devices more accurate and repeatable.



PERFORMANCE SPECIFICATIONS

Parameter	Specification
Operate Wavelength (nm)	850 or 1310 or 1550 40, or custom wavelength
Insertion Loss (Port 1 to 2) (dB)	<0.8
Insertion Loss (Port 2 to 1) (dB)	<0.8
Fiber Type	See Ordering Information
Packaging	See Ordering Information
Dimension (mm)	L83xW15xH10
Connector	See Ordering Information
Fiber Length	See Ordering Information
Operating Temperature(°C)	-40 ~+85
Storage Temperature(°C)	-40 ~+85

Ordering Information

MSC	☐ ☐	0101	☐	☐	☐	☐ ☐
	Wavelength		Fiber Type	Pigtail Style	Fiber Length	In/Out Connector
	85=850nm 13=1310nm 15=1550nm	0101=1x1	1=62.5/125um 2=50/125um	1=Bare Fiber 2=900um Jacket 3=3mm Cable	1=1m 2=2m	0=None 1=FC/APC 2=FC/PC 3=SC/APC 4=SC/PC 5=ST 6=LC