



UNIVERSIDADE FEDERAL FLUMINENSE
ESCOLA DE ENGENHARIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA E DE
TELECOMUNICAÇÕES

LAILA JORGE DE SOUSA SOUTO

Estudo e Desenvolvimento de Lasers em Anel
de Fibra Óptica no Regime *Mode-Locking*
Harmônico Passivo

NITERÓI

2023

UNIVERSIDADE FEDERAL FLUMINENSE
ESCOLA DE ENGENHARIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA E DE
TELECOMUNICAÇÕES

LAILA JORGE DE SOUSA SOUTO

Estudo e Desenvolvimento de Lasers em Anel
de Fibra Óptica no Regime *Mode-Locking*
Harmônico Passivo

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 título de Mestre em Engenharia Elétrica e de Telecomunicações. Área de concentração: Sistemas de Comunicações Óticas.

Orientador:

Prof. Ricardo Marques Ribeiro

Co-orientadora:

Prof^a. Cláudia Barucke Marcondes

NITERÓI

2023

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

S726e Souto, Laila Jorge de Sousa
Estudo e Desenvolvimento de Lasers em Anel de Fibra Óptica
no Regime Mode-Locking Harmônico Passivo / Laila Jorge de
Souto. - 2023.
138 f. : il.

Orientador: Ricardo Marques Ribeiro.
Coorientador: Cláudia Barucke Marcondes.
Dissertação (mestrado)-Universidade Federal Fluminense,
Escola de Engenharia, Niterói, 2023.

1. Amplificador óptico semiconductor. 2. Comunicações
ópticas. 3. Dispositivos ópticos. 4. Laser. 5. Produção
intelectual. I. Ribeiro, Ricardo Marques, orientador. II.
Marcondes, Cláudia Barucke, coorientadora. III. Universidade
Federal Fluminense. Escola de Engenharia. IV. Título.

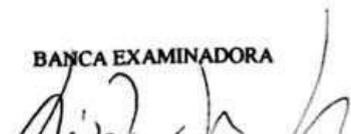
CDD - XXX

LAILA JORGE DE SOUSA

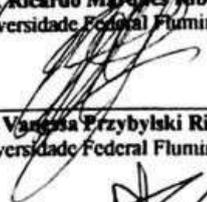
**ESTUDO E DESENVOLVIMENTO DE LASERS EM ANEL DE FIBRA ÓPTICA
NO REGIME MODE-LOCKING HARMONICO PASSIVO**

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



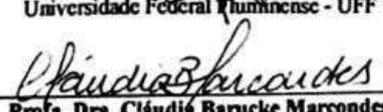
Prof. Dr. Ricardo Marques Ribeiro - Orientador
Universidade Federal Fluminense - UFF



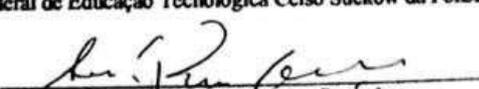
Profa. Dra. Vanessa Przybylski Ribeiro Magri Souza
Universidade Federal Fluminense - UFF



Prof. Dr. Marlon Medeiros Correia
Universidade Federal Fluminense - UFF



Profa. Dra. Cláudia Barucke Marcondes
Centro Federal de Educação Tecnológica Celso Suckow da Fonseca - CEFET



Comdt. Dr. André Paim Gonçalves
Marinha do Brasil - MB

Niterói
(Agosto/2023)

À minha amada filha, Lia.

Agradecimentos

Agradeço primeiramente a Deus, por ter me guiado em toda essa jornada e me dado forças para concluí-la. Por ter me proporcionado a calma necessária nos momentos mais difíceis e por ter me conduzido ao longo do curso para trilhar o caminho mais correto possível.

Agradeço à minha família, que foi minha base para tudo. Em todos os momentos de alegria e estresse estiveram junto comigo. Em especial a minha mãe que sempre me apoiou nesses anos, estando presente em todos os momentos de felicidade e tristeza. Pelo amor, apoio e incentivo que foram fundamentais ao longo dessa trajetória.

A Felipe Souto, por ser meu melhor amigo e amor. Por ter tido um papel fundamental ao longo desse caminho e pelo seu apoio incondicional e paciência nos momentos de maior dificuldade.

Ao meu orientador Ricardo Marques, por ter tido um papel fundamental para meu desenvolvimento nesse trabalho. Por sempre estar presente e me auxiliando sempre que necessário.

Aos meus colegas do LaCOp e a professora Cláudia B. Marcondes pelo auxílio no desenvolvimento deste trabalho.

Agradeço a toda a equipe do Centro de Referência Tecnológica (CRT) da Claro, em especial ao José Silva e ao Walderson Vidal, pela oportunidade de autodesenvolvimento e por serem muito mais do que gestores, impulsionando-me a ser uma pessoa melhor. Também agradeço aos meus colegas de trabalho pela amizade, companheirismo e compreensão.

Aos meus amigos, por sempre me apoiarem. Especialmente agradeço a Mariana Azevedo e Ana Aline Sifuentes por estarem sempre me ajudando e acalmando o meu coração.

A todos que auxiliaram na elaboração desta dissertação e fizeram com que o desenvolvimento dela fosse possível.

Resumo

Esta Dissertação, descreve a montagem, caracterização e testes de dois dispositivos lasers à fibra óptica em configuração de anel utilizando um amplificador óptico semiconductor (*Semiconductor Optical Amplifier* (SOA)) como meio de ganho.

O primeiro dispositivo montado, consiste em um laser em onda contínua, sintonizável em 1520-1565 nm, formado por um anel de fibra óptica contendo um SOA como meio de ganho, filtro óptico passa-banda e um controlador de polarização.

O segundo dispositivo laser à fibra óptica desenvolvido, foi a principal contribuição deste trabalho. A configuração, foi constituída de dois anéis de fibra óptica em figura-de-oito (F8L), também utilizando um amplificador óptico semiconductor (SOA) rápido como meio de ganho.

No F8L, obteve-se *mode-locking* passivo através do ajuste da corrente de *bias* (I_{bias}) aplicada ao SOA a partir de seu valor limiar em 60 mA, juntamente com um ajuste empírico dos controladores de polarização. Foi possível gerar pulsos ópticos de curta duração (< 2 ns), cuja medida de largura temporal ficou limitada pelo osciloscópio disponível, na frequência fundamental de 12,5 MHz e alguns harmônicos até 625 MHz (50^o harmônico) com a mesma cavidade.

Com um aumento de I_{bias} , foi observada a possibilidade de gerar trem de pulsos com taxa de repetição crescente (harmônicos) onde o comprimento físico da cavidade é mantido. A técnica é interessante pois potencialmente pode gerar taxas em multi-GHz a partir de cavidades de ordem de 1 metro.

O F8L aqui apresentado emitiu em 1550 nm e foi todo construído com fibras ópticas monomodo padrão, o que lhe conferiu operação no regime anômalo de dispersão. Então, não houve regeneração dos pulsos através do gerenciamento dispersivo da cavidade. Nestas condições, além do trem de pulsos em *mode-locking* passivo, obteve-se também pulsos retangulares de aproximadamente 10 ns de duração e período de 26 ns. Os diferentes sinais de saída foram observados em função da corrente aplicada ao SOA e ao ajuste manual dos controladores de polarização.

Também foram observados sinais de saída com período de 2 ns, valor este correspondente à frequência de oscilação harmônica de 500 MHz, ou o 40^o HML. Nas condições onde $I_{bias} > 280$ mA e com um ajuste particular do estado de polarização, observou-se uma estrutura no espectro óptico consistindo em uma banda dentada (para fora) sugerindo um comportamento solitônico, porém com aproximadamente 300 mA, obteve-se também uma estrutura óptica indentada (para dentro). No texto, são discutidas as prováveis causas de tais ocorrências.

No melhor do conhecimento da autora, trata-se aqui do primeiro trabalho de um laser 1550 nm na configuração F8L usando um único SOA não linear, de baixo ganho e de recu-

peração rápida (25 ps), com o intuito de gerar trem de pulsos com base em *mode-locking* harmônico passivo. Tal dispositivo, de custo estimado de pouco mais de US\$ 4.000,00 , pode também ser interessante como um instrumento de Laboratório montado "*in home*", potencialmente capaz de gerar um pente temporal de pulsos curtos (picossegundos) de MHz até multi-GHz.

Palavras-chave: Amplificador óptico semiconductor, Comunicações ópticas, Dispositivos ópticos, Laser, *Mode-locking* harmônico.

Abstract

This Dissertation describes the assembly, characterization, and testing of two optical fiber ring laser devices using a semiconductor optical amplifier (SOA) as the gain medium.

The first assembled device consists of a continuous-wave tunable laser operating in the 1520-1565 nm range. It is composed of an optical fiber ring containing an SOA as the gain medium, an optical band-pass filter, and a polarization controller.

The second optical fiber laser device developed represents the primary contribution of this work. The configuration comprises two figure-eight optical fiber rings (F8L), also employing a fast semiconductor optical amplifier (SOA) as the gain medium.

In the F8L configuration, passive mode-locking was achieved by adjusting the bias current (I_{bias}) applied to the SOA from its threshold value of 60 mA, in conjunction with empirical adjustments of the polarization controllers. This approach allowed the generation of short optical pulses (< 2 ns) with the temporal width measurement limited by the available oscilloscope, at the fundamental frequency of 12.5 MHz and several harmonics up to 625 MHz (50th harmonic) within the same cavity.

By increasing I_{bias} , it was observed that it was possible to generate a train of pulses with an increasing repetition rate (harmonics) while maintaining the physical length of the cavity. This technique is noteworthy as it has the potential to generate multi-GHz rates from cavities of approximately 1 meter in length.

The F8L presented here emitted at 1550 nm and was entirely constructed using standard single-mode optical fibers, which resulted in operation in the anomalous dispersion regime. Therefore, there was no pulse regeneration through dispersive cavity management. Under these conditions, in addition to the passive mode-locked pulse train, rectangular pulses with approximately 10 ns duration and a period of 26 ns were also obtained. Different output signals were observed as a function of the current applied to the SOA and manual adjustments of the polarization controllers.

Output signals with a 2 ns period were also observed, corresponding to the 500 MHz harmonic oscillation frequency, or the 40th HML. Under conditions where $I_{bias} > 280$ mA and with a particular polarization state adjustment, a structured optical spectrum was observed, consisting of a toothed band (outwards), suggesting solitonic behavior. However, at approximately 300 mA, an indented optical structure (inwards) was also obtained. The text discusses the likely causes of such occurrences.

To the best of the author's knowledge, this represents the first work on a 1550 nm laser in the F8L configuration using a single nonlinear SOA with low gain and fast recovery (25 ps) for the purpose of generating a passive harmonic mode-locked pulse train. This device, with an estimated cost of just over US\$ 4,000.00 USD, may also be of interest as a laboratory instrument assembled "in-house", potentially capable of generating a comb

of short (picoseconds) temporal pulses ranging from MHz to multi-GHz frequencies.

Keywords: Laser, Semiconductor optical amplifier, Optical communications, Optical devices, Mode locking harmonic.

Lista de Figuras

| | | |
|------|--|----|
| 2.1 | Estados de energia do átomo [14]. | 6 |
| 2.2 | Estrutura do dispositivo laser [17]. | 9 |
| 2.3 | Espectro de Emissão típico em formato Gaussiano [17]. | 10 |
| 2.4 | Modos longitudinais de uma cavidade ressonante [17]. | 12 |
| 2.5 | Níveis de Energia em um semicondutor [18]. | 13 |
| 2.6 | Esquema de um LD baseado em uma Homojunção p-n [18]. | 14 |
| 2.7 | Diagrama de energia da Homojunção p-n [18]. | 14 |
| 2.8 | Esquema de um LD baseado em uma Heterojunção n-p-p [18]. | 15 |
| 2.9 | Diagrama de energia da Heterojunção n-p-p [18]. | 15 |
| 2.10 | Função de transferência de um diodo laser semicondutor [18]. | 16 |
| 2.11 | Amplificador óptico semicondutor baseado no princípio do laser de diodo [21]. | 18 |
| 2.12 | Amplificador óptico semicondutor como amplificador de reforço [21]. | 19 |
| 2.13 | Amplificador óptico semicondutor como amplificador de linha [21]. | 19 |
| 2.14 | Amplificador óptico semicondutor como pré-amplificador [21]. | 20 |
| 2.15 | Conversor de comprimentos de onda baseado em XGM em SOA. [21] | 20 |
| 2.16 | Configuração básica do SOA do tipo onda viajante (TW) [21]. | 21 |
| 2.17 | Configuração do Amplificador óptico semicondutor na estrutura de Fabry-Perot [21]. | 25 |
| 2.18 | Configuração do Amplificador óptico semicondutor de onda viajante [21]. | 26 |
| 2.19 | Configuração do Amplificador óptico semicondutor de cavidade vertical [21]. | 27 |
| 2.20 | Configuração do Amplificador óptico semicondutor de poço quântico [21]. | 28 |

| | | |
|------|--|----|
| 2.21 | Configuração do Amplificador óptico semiconductor de ponto quântico [21]. | 28 |
| 2.22 | Configuração do laser à fibra óptica.[24]. | 30 |
| 2.23 | Diferentes tipos de laser à fibra óptica [24]. | 31 |
| 2.24 | Absorvedor saturável no regime de modo travado passivo [24]. | 32 |
| 2.25 | Representação da variação dos parâmetros do Q-Switching [17]. | 33 |
| 2.26 | Formato temporal de emissão do laser <i>mode locking</i> . [17] | 35 |
| 2.27 | Estrutura espectral da emissão do <i>laser mode locking</i> . [24] | 35 |
| 2.28 | Estrutura da emissão do laser <i>mode locking</i> [24]. | 36 |
| 2.29 | Interferômetro de Sagnac. [29] | 37 |
| 2.30 | Giroscópio. | 38 |
| 2.31 | Interferômetro de Sagnac [28]. | 38 |
| 2.32 | Estrutura do NOLM [28]. | 39 |
| 2.33 | Estrutura do NALM. [28] | 40 |
| 2.34 | Estrutura do Controlador de Lefevre. | 41 |
| 2.35 | Figura extraída de [40] onde temos o esquema experimental bastante simples do F8L lá utilizado. | 45 |
| 2.36 | Figura extraída de [40] onde temos $\approx 50\%$ de <i>duty-cycle</i> para trem de pulsos <i>mode-locking</i> em (a) 1,2 GHz e (b) 1,7 GHz. | 46 |
| 2.37 | Figura extraída de [40] compreendendo o espectro óptico do F8L lá descrito (a) e pulsos de saída no domínio do tempo na taxa de 1,2 GHz (b). | 46 |
| 2.38 | Figura extraída de [9] compreendendo o espectro óptico do F8L lá descrito em função do I_{bias} aplicado. | 47 |
| 2.39 | Figura extraída de [9] compreendendo um trem de pulsos <i>mode-locking</i> de saída e o formato gaussiano de um pulsos. | 47 |
| 2.40 | Figura extraída de [41] compreendendo a saída sob a forma de pulsos retangulares com formação de <i>dark pulses</i> , assim como o espectro óptico correspondente. | 48 |
| 2.41 | Esquema experimental bastante simples (F8L) reportado em [43]. | 48 |

| | | |
|------|--|----|
| 2.42 | Espectro óptico em função de I_{bias} para o F8L reportado em [43]. | 49 |
| 2.43 | Trem de pulsos <i>mode-locking</i> com frequência variável em função de I_{bias} conforme reportado em [43]. | 49 |
| 2.44 | Figura reproduzida de [44] onde é mostrado o espectro óptico da emissão do F8L lá descrito. | 50 |
| 2.45 | Figura extraída de [45] mostra por simulação a formação de pulsos curtos via <i>mode-locking</i> | 51 |
| 2.46 | Figura extraída de [45] que mostra os espectros típicos de saída de um F8L conforme a dispersão líquida da cavidade. | 51 |
| 3.1 | SOA não-linear 1550nm da Kamelian com encapsulamento <i>butterfly</i> . [46] . | 54 |
| 3.2 | Estrutura do receptáculo + SOA. | 55 |
| 3.3 | Esquema experimental para a caracterização do espectro da ASE. | 55 |
| 3.4 | Gráficos Potência x Comprimento de onda das curvas ASE do SOA parametrizados pela corrente de bias. | 56 |
| 3.5 | Esquema experimental para calibração do atenuador óptico variável. | 57 |
| 3.6 | Esquema experimental para verificação do ganho em função da I_{bias} e consequentemente obter a corrente de transparência do SOA. | 57 |
| 3.7 | Gráfico Ganho (G) x Corrente (I_{bias}) que mostra o valor aproximado de corrente mínima para ocorrer amplificação ($I_{bias} = 30$ mA como corrente de transparência), $P_{in} = 0$ dBm e $\lambda = 1550$ nm. | 58 |
| 3.8 | Esquema experimental para calibração da leitura da potência incidente P_{in} pelo braço de 90% onde será inserido o SOA. | 59 |
| 3.9 | Esquema experimental para a medida do ganho de amplificação do SOA em função da potência de entrada P_{in} com $I_{bias} = 270$ mA. | 60 |
| 3.10 | (a) Gráfico Ganho do SOA x Potência incidente (dBm) para $I_{bias} = 270$ mA e (b) Gráfico Ganho do SOA x Potência incidente (mW) para $I_{bias} = 270$ mA. | 60 |
| 3.11 | Gráfico P_{out} x P_{in} do SOA (em mW). | 61 |
| 3.12 | Filtro óptico passa-banda de 1,2 nm de janela espectral utilizado no experimento que pode ser sintonizado na banda C (1520-1565 nm). | 62 |

| | | |
|------|--|----|
| 3.13 | Esquema experimental para a medida do espectro da ASE com filtro passa-banda. | 62 |
| 3.14 | Gráficos filtrados pelo BPF da Potência x Comprimento de onda da ASE produzida pelo SOA. | 63 |
| 3.15 | Gráficos filtrados pelo BPF da Potência x Comprimento de onda da ASE produzida pelo SOA. | 63 |
| 3.16 | Esquema experimental das medidas do espectro da ASE integrado, onde há amostragem com filtro óptico BPF, em função de I_{bias} | 64 |
| 3.17 | Esquema curvas experimentais da potência de saída em função de I_{bias} utilizando um filtro BPF sintonizado em 10 diferentes comprimentos de onda centrais ao longo da banda C. | 65 |
| 4.1 | Esquema experimental para a medida do espectro emitido pela fonte fluorescente em anel. | 67 |
| 4.2 | Gráfico Potência x Comprimento de onda das curvas ASE do SOA com acoplador (ainda sem o filtro BPF). | 68 |
| 4.3 | Esquema experimental para a medida da potência óptica integral de saída do anel (sem filtro BPF) em função da corrente de bias. | 68 |
| 4.4 | Esquema experimental da potência óptica integral de saída do anel (sem filtro BPF) em função da corrente de bias. | 69 |
| 4.5 | Fotografia do esquema experimental do Laser Sintonizável em Anel de Fibra Óptica com Amplificador Óptico Semicondutor na bancada do LACOP. . . | 70 |
| 4.6 | Esquema experimental do Laser Sintonizável em Anel de Fibra Óptica com Amplificador Óptico Semicondutor utilizando um OSA como instrumento de análise. | 71 |
| 4.7 | Espectro emitido pelo dispositivo com circuito óptico em aberto e na topologia em anel, neste último extraíndo 80% da potência circulante para análise. | 71 |
| 4.8 | Esquema experimental do laser em anel. | 72 |
| 4.9 | Potência óptica de saída (em mW) do laser em anel emitindo em 1550 nm em função da corrente de polarização e pela razão de acoplamento como parâmetro. | 73 |

| | | |
|------|---|----|
| 4.10 | Corrente de limiar (≈ 30 mA) do laser em anel com extração de 80% da luz para análise e sintonizado em 1550 nm. | 74 |
| 4.11 | Esquema experimental do laser em anel com extração de 80% da luz e sintonizado em 1550 nm. | 74 |
| 4.12 | Espectro elétrico emitido pelo laser em anel com I_{bias} de 380mA. | 75 |
| 5.1 | Esquema experimental do laser à fibra óptica em uma cavidade em figura-de-oito (F8L) com um SOA como meio de ganho em regime de modo travado passivo. | 77 |
| 5.2 | Foto do esquema experimental do laser à fibra óptica em uma cavidade em figura-de-oito (F8L) com um SOA como meio de ganho em regime de modo travado passivo na bancada do LACOP. | 77 |
| 5.3 | Espectro elétrico emitido pelo laser em anel na configuração de FL8 com I_{bias} de 280mA - RBW de 1 MHz. | 80 |
| 5.4 | Espectro elétrico emitido pelo laser em anel na configuração de FL8 com I_{bias} de 380mA - RBW de 1 MHz. | 80 |
| 5.5 | Espectro óptico emitido pelo FL8 em <i>mode-locking</i> passivo para $I_{bias} = 280$ mA. | 81 |
| 5.6 | Traço de osciloscópio do sinal de saída emitido pelo F8L em <i>mode-locking</i> passivo na frequência fundamental $f_{FLM} = 12,5$ MHz para $I_{bias} = 180$ mA. | 84 |
| 5.7 | Traço de osciloscópio do sinal de saída emitido pelo F8L em <i>mode-locking</i> passivo para $I_{bias} = 280$ mA. Observa-se <i>mode-locking</i> no 11 ^o harmônico e a sua formação incompleta. | 86 |
| 5.8 | Traço de osciloscópio do sinal de saída emitido pelo F8L em <i>mode-locking</i> passivo para $I_{bias} = 380$ mA. Observa-se <i>mode-locking</i> no 50 ^o harmônico, com <i>duty-cycle</i> aparente de $\approx 50\%$ | 86 |
| 5.9 | Traço de osciloscópio em formato "retangular" do sinal de saída emitido pelo F8L em <i>mode-locking</i> passivo para $I_{bias} > 380$ mA. | 87 |
| 5.10 | Potência óptica média de saída do F8L emitindo em função da corrente de <i>bias</i> onde 30 mA é a corrente limiar sob operação CW e ≈ 150 mA a corrente correspondente ao limiar do <i>mode-locking</i> | 88 |

| | | |
|------|--|----|
| 5.11 | Esquema experimental do laser à fibra óptica em uma cavidade em F8L com um SOA como meio de ganho em regime de modo travado passivo com análise simultânea do sinal de saída no ESA, OSA e osciloscópio. . . . | 90 |
| 5.12 | Espectro elétrico emitido pelo laser em anel na configuração F8L para I_{bias} de 180mA e RBW = 1 MHz. | 91 |
| 5.13 | Formato de sinal no tempo emitido pelo laser em anel na configuração F8L para I_{bias} de 180mA. Temos um período de 80 ns e <i>duty-cycle</i> de no máximo 2,5%. | 91 |
| 5.14 | Espectro óptico emitido pelo laser em anel na configuração F8L para I_{bias} de 180mA. | 92 |
| 5.15 | Espectro elétrico emitido pelo laser em anel na configuração F8L para I_{bias} de 280mA e RBW = 1 MHz. | 92 |
| 5.16 | Formato de sinal no tempo emitido pelo laser em anel na configuração F8L para I_{bias} de 280mA. Observam-se pulsos <i>mode-locking</i> distorcidos no 22 ^o HML. | 93 |
| 5.17 | Espectro óptico indentado (possíveis bandas de Kelly) emitido pelo laser em anel na configuração F8L para I_{bias} de 280mA. | 94 |
| 5.18 | Espectro elétrico emitido pelo laser em anel na configuração de F8L para I_{bias} de 380mA e RBW= 1 MHz. | 95 |
| 5.19 | Formato de sinal no tempo emitido pelo laser em anel na configuração F8L para I_{bias} de 380 mA. (40 ^o HML) - Novamente, há um aparente <i>duty-cycle</i> de 50%. | 95 |
| 5.20 | Espectro óptico emitido pelo laser em anel na configuração F8L para I_{bias} de 380mA. Observa-se um espectro com aspecto anti indentado não-simétrico. | 96 |
| 5.21 | Traço de osciloscópio do sinal de saída emitido pelo F8L em <i>mode-locking</i> passivo na forma de pulsos retangulares para $I_{bias} > 380$ mA. | 97 |

Lista de Abreviaturas e Siglas

| | | |
|--------------|---|----|
| ASE | <i>Amplified Spontaneous Emission</i> | 24 |
| BPF | <i>Band Pass Filter</i> | 53 |
| CW | <i>Continuos Wave</i> | 21 |
| DFB | <i>Distributed-feedback Laser</i> | 11 |
| EDFA | <i>Erbium Doped Fiber Amplifier</i> | 2 |
| FPA | <i>Fabry-Perot Amplifier</i> | 25 |
| FWHM | <i>Full Width At Half Maximum</i> | 10 |
| FWM | <i>Four Wave Mixing</i> | 20 |
| F8L | Figura-de-Oito | 3 |
| LD | <i>Laser Diode</i> | 5 |
| LED | <i>Light Emitting Diode</i> | 12 |
| NALM | <i>Nonlinear Amplified Loop Mirror</i> | 18 |
| NOLM | <i>NonLinear Optical Loop Mirro</i> | 39 |
| OPM | <i>Optical Power Meter</i> | 64 |
| OSA | <i>Optical Spectrum Analyzer</i> | 55 |
| PC | <i>Polarization Controler</i> | 39 |
| PON | <i>Passive Optical Network</i> | 37 |
| SESAM | <i>Semiconductor Saturable Absorber Mirrors</i> | 42 |
| SOA | <i>Semiconductor Optical Amplifier</i> | iv |
| TOTF | <i>Tunable Optical Filter</i> | 61 |
| WDM | <i>Wavelength Division Multiplexing</i> | 19 |
| XGM | <i>Cross Gain Modulation</i> | 20 |
| XPM | <i>Cross Phase Modulation</i> | 20 |

Sumário

| | | |
|----------|--|----------|
| 1 | Introdução | 1 |
| 2 | Fundamentos teóricos e metodologia | 5 |
| 2.1 | Fundamentos do laser | 5 |
| 2.2 | Ressonador óptico | 8 |
| 2.3 | Largura espectral | 10 |
| 2.4 | Modos longitudinais | 11 |
| 2.5 | Laser de diodo semiconductor | 12 |
| 2.6 | Corrente limiar | 16 |
| 2.7 | Amplificador óptico semiconductor (SOA) | 17 |
| 2.7.1 | Fundamentos do SOA | 17 |
| 2.7.2 | Algumas aplicações do SOA | 18 |
| 2.7.3 | Teoria da Amplificação dos SOAs | 21 |
| 2.8 | Tipos de SOAs | 24 |
| 2.9 | Lasers à fibra óptica | 29 |
| 2.10 | <i>Q-Switching</i> | 32 |
| 2.11 | <i>Mode Locking</i> | 34 |
| 2.12 | Interferômetro de Sagnac | 37 |
| 2.13 | Espelho óptico não-linear em anel (NOLM) | 39 |
| 2.14 | Espelho não-linear amplificante em anel (NALM) | 40 |
| 2.15 | Controlador de polarização Lefevre | 41 |
| 2.16 | Mecanismos de <i>mode-locking</i> passivo | 42 |

| | | |
|----------|--|-----------|
| 2.17 | O dispositivo F8L e um estudo bibliográfico focado | 44 |
| 2.17.1 | Introdução e o arranjo experimental básico | 44 |
| 2.17.2 | Análise de dispositivos F8L com NALM usando SOA único como amplificador/modulador | 44 |
| 2.17.3 | Análise de dispositivos F8L com NALM de fibra dopada como am- plificador/modulador | 48 |
| 2.17.4 | Análise geral de dispositivos F8L em <i>mode-locking</i> passivo | 50 |
| 3 | Caracterização Estática do Amplificador Óptico Semicondutor (SOA) e do filtro BPF | 53 |
| 3.1 | Emissão Espontânea Amplificada (ASE) e Banda Espectral de Ganho do SOA | 54 |
| 3.1.1 | Experimental | 54 |
| 3.2 | Ganho variando I_{bias} e a Corrente de Transparência para 1550 nm com P_{in} = 0 dBm | 56 |
| 3.2.1 | Experimental | 57 |
| 3.3 | Ganho do SOA função da Potência Incidente P_{in} para 1550 nm e I_{bias} = 270 mA | 59 |
| 3.3.1 | Experimental | 59 |
| 3.4 | Caracterização do filtro BPF | 61 |
| 3.4.1 | Experimental (medida do espectro transmitido com I_{bias} = 70 mA) . | 62 |
| 3.4.2 | Experimental (medida da potência integral transmitida em função de I_{bias} e λ como parâmetro) | 64 |
| 4 | Laser Sintonizável em Anel de Fibra Óptica com Amplificador Óptico Semicondutor (SOA) | 66 |
| 4.1 | Anel de Fibra Óptica com Acoplador (sem filtro BPF) - Fonte fluorescente | 66 |
| 4.1.1 | Experimental | 66 |
| 4.2 | Laser Sintonizável em Anel de Fibra Óptica com Amplificador Óptico Se- micondutor (SOA) | 69 |

| | | |
|----------|---|------------|
| 4.2.1 | Sintonização Espectral (com acoplador) | 70 |
| 4.2.1.1 | Experimental | 70 |
| 4.2.2 | Corrente Limiar | 72 |
| 4.2.2.1 | Experimental | 72 |
| 4.2.3 | Modos Longitudinais | 73 |
| 4.2.3.1 | Experimental | 73 |
| 5 | Laser à Fibra Óptica em Configuração de Figura-de-Oito com Trava- mento Passivo de Modos (<i>Mode-Locking</i>) | 76 |
| 5.1 | Montagem experimental básica do dispositivo F8L | 76 |
| 5.2 | Resultados experimentais e discussões | 79 |
| 5.2.1 | Análise somente do Espectro Elétrico | 79 |
| 5.2.2 | Análise somente do Espectro Óptico | 81 |
| 5.2.3 | Análise somente do Sinal no Tempo | 83 |
| 5.2.4 | Análise somente da Potência Óptica em função do I_{bias} | 88 |
| 5.2.5 | Análise das Medidas Simultâneas (OSA, ESA e osciloscópio) | 89 |
| 6 | Conclusões | 98 |
| | Referências | 100 |
| | Apêndice A | 104 |
| | Apêndice B | 115 |

Capítulo 1

Introdução

A necessidade da implementação de sistemas que permitissem muitas comunicações simultâneas começou a ser inevitável já nas primeiras décadas do século XX. Por volta de 1926 foram criados os sistemas telefônicos com onda portadora, para transmissão de dois ou quatro canais de voz [1].

O aumento na demanda dos serviços de telecomunicações trouxe um congestionamento e uma saturação dos sistemas empregando as faixas tradicionais, incluindo as frequências de microondas. Isto motivou o emprego de valores cada vez mais elevados de frequências, onde as portadoras fossem capazes de transportar um número bem maior de canais, através dos sistemas de multiplexação.

Tornou-se, então, quase natural que as pesquisas se concentrassem na ideia de se empregarem frequências de luz, ainda que não fossem na faixa visível. Desta forma, foram destinados diversos investimentos, em vários países, para o aperfeiçoamento e a criação de componentes, equipamentos e sistemas para o emprego da luz via fibras ópticas em comunicações de elevada capacidade [2].

Atualmente o maior obstáculo mundial das redes de telecomunicações globais, principalmente, quando o assunto é internet, é a rede de acesso. Em meados de 2005 no Brasil, boa parte dessa rede ainda era composta pelo tradicional par metálico, o que limitava a capacidade de banda e, principalmente, no alcance da rede, independente de serem usuários residenciais ou comerciais [3]. Assim, a fibra óptica ganhou força nos últimos 20 anos devido aos avanços alcançados em sua tecnologia e a procura por melhor custo benefício, pois as fibras respondem muito melhor à necessidade atual em banda e alcance do que aos pares metálicos. Segundo um levantamento recente da Anatel, a rede de acesso no país ficou distribuída entre [4]:

- Fibra óptica – 66%
- Cabo coaxial – 21,5%
- Cabo metálico – 7,7%
- Rádio – 4%
- Satélite – 0,8%

Com a alta demanda de banda necessária para atender os novos serviços de convergência, foram realizados grandes investimentos no desenvolvimento e implantação de tecnologias ópticas nos últimos 20 anos, para aumentar a capacidade de transmissão das redes de acesso via fibra óptica. Essa situação é efeito colateral da constante modernização da infraestrutura das telecomunicações no Brasil

Enquanto as redes metálicas são capazes de atingir taxas digitais máximas em torno de 100 Mbit/s, com alcance muito baixo, as redes de fibra óptica conseguem ultrapassar essa taxa com folga e atingir um raio com dezenas de quilômetros, além de ter uma longa vida útil estrutural. Toda essa evolução se deve à enorme capacidade de transporte de dados de suas redes que, durante muito tempo atuaram somente no chamado *Backbone*, ou seja, as fibras ópticas trabalhavam escoando todo o tráfego de dados das outras redes.

O estudo de componentes que compõe uma rede óptica é de relevância na implementação de um enlace óptico. O laser produz potência óptica suficiente para contrabalançar as perdas intrínsecas da fibra e perdas por emenda, e fornecer um sinal suficiente para o fotodetector recuperar as informações enviadas na recepção, principalmente em sistemas de curta distância e assim compor um sistema óptico eficiente.

O problema no processo de conversão dos sinais ópticos recebidos da fibra em sinais elétricos, é que nesse processo era necessário converter o sinal do domínio óptico para o elétrico e depois reconverter para o domínio óptico. Essa dupla conversão era indesejável porque aumentava o custo do sistema, além disso perdia-se muita potência e tempo (banda) fazendo essa conversão $O \rightarrow E \rightarrow O$.

O amplificador óptico foi uma dessas novas tecnologias essenciais para a popularização dos sistemas à fibra óptica pois eliminava essas mudanças $O \rightarrow E \rightarrow O$ e diminuía a quantidade de elementos no meio do enlace. Durante anos essas tecnologias foram se desenvolvendo e atualmente temos no mercado diversos tipos de amplificadores ópticos, como por exemplo: *Erbium Doped Fiber Amplifier* (EDFA), Amplificador Raman e o SOA, todos sendo utilizados comercialmente.

Os lasers à fibra óptica permitem obter confinamento do sinal óptico ao longo da fibra de uma forma eficiente. Com isso, torna-se possível a construção de lasers (à fibra) em uma cavidade longa de forma relativamente simples [5]. Propriedades de propagação como: dispersão cromática, birrefringência e não-linearidades ópticas, naturalmente impactam a operação dos lasers à fibra pelo fato da luz ficar confinada em seu núcleo. As principais desvantagens do confinamento óptico em cavidades longas são: instabilidade espectral e temporal de emissão devido a fatores externos (desvios de temperatura e variação da vibração e etc) [5].

Entretanto, as características de propagação mencionadas podem por um outro lado ser vantajosamente exploradas, como por exemplo, na geração de pulsos solitônicos [6] ou de pulsos de nanossegundos [7].

Uma importante vertente no desenvolvimento de lasers à fibra óptica, é na geração de pulsos curtos ou ultracurtos cobrindo uma larga faixa que vai de dezenas de nanossegundos passando por picossegundos e chegando até dezenas de femtossegundos. Têm-se também obtido taxas de repetição de pulsos de laser que vão de kHz [8] até multi-GHz [9] através de processos de *mode-locking*.

A motivação central do trabalho está em suas possíveis aplicações futuras, como no desenvolvimento de uma fonte de pulsos ópticos curtos, em multi-GHz através de processos de *mode-locking* e com baixo *jitter* que poderia ser uma ferramenta de Laboratório, para uso geral, como por exemplo a geração de sólitons, amostragem totalmente óptica devido aos pulsos de baixo *jitter* que podem ser obtidos, geração ultra-estável de tributários de altas taxas e regeneração digital [10, 11], etc.

Por fim, a motivação central desse trabalho é dispor em Laboratório de um dispositivo capaz de gerar pulsos ópticos na faixa de 1550 nm, de duração típica de picossegundos e taxas em multi-GHz com baixo *jitter*. A escolha foi pela configuração em Figura-de-Oito (F8L) de um laser à fibra, porém utilizando um SOA rápido (25 ps de recuperação do ganho) como meio de ganho, não antes reportado na literatura.

Outras aplicações de pulsos ópticos ultracurtos também têm sido reportadas como a sua utilização na caracterização de fenômenos rápidos em dispositivos ópticos ou optoeletrônicos [12], compostos químicos [13] e estruturas biológicas [13].

O objetivo do presente trabalho é, em um primeiro momento, estudar os fundamentos básicos do laser à fibra e algumas das suas aplicações em redes ópticas. Também serão estudados: a estrutura básica do amplificador óptico semiconductor, os diferentes tipos de

aplicações e o modo de operação desse tipo de amplificador em redes de comunicações ópticas. Alguns estudos de casos de lasers à fibra óptica em configuração de anel utilizando um amplificador óptico semiconductor como meio de ganho em cavidade do tipo anel e figura-de-oito (F8L) também serão realizados como sendo as principais contribuições desta Dissertação.

Devido às limitações de recursos, não foi possível explorar a banda de modulação oferecida pelo SOA. Porém, conforme ficará claro adiante, a principal contribuição deste trabalho foi a de mostrar experimentalmente que diversos formatos de onda de saída podem ser obtidos do mesmo F8L com um SOA rápido.

O presente trabalho está organizado da seguinte forma: O Capítulo 2 fornece a fundamentação teórica a partir de conhecimentos registrados na literatura abordada e pesquisada sobre o assunto.

O Capítulo 3 descreve o processo de caracterização estática de um dispositivo amplificador óptico semiconductor (SOA) com objetivo da verificação do seu comportamento em determinadas aplicações operando como elemento óptico não-linear.

O Capítulo 4 descreve a montagem e testes de um laser sintonizável, composto por um anel de fibra óptica contendo um amplificador óptico semiconductor como meio de ganho. Um filtro óptico passa-banda ajustável manualmente, foi utilizado para realizar a sintonização ao longo da banda C (1520-1565 nm).

O Capítulo 5 descreve a montagem e testes de um laser em figura-de-oito (Interferômetros de Sagnac à fibra interconectados entre si operando no regime de *mode-locking* passivo. Por fim, o Capítulo 6 conclui o trabalho e apresenta desafios futuros.

Capítulo 2

Fundamentos teóricos e metodologia

Nas próximas seções desse capítulo, será mostrada uma breve abordagem teórica de conceitos fundamentais do laser, que são: o processo de emissão estimulada, largura espectral, modos longitudinais e corrente limiar. Também será exposto a conceituação de ressoadores ópticos, laser de diodo semiconductor (*Laser Diode* (LD)) e dos amplificadores ópticos a semiconductor (SOAs) que derivam dos LDs.

Por fim, será exposto uma breve abordagem teórica de conceitos fundamentais das técnicas de *Q-switching* e *mode-locking*, que dão origem a pulsos muito curtos, igualmente espaçados com taxa de repetição estável e com potência alta, essas técnicas ampliam a faixa de operação do laser e também são utilizadas para estabilizar a frequência de operação do laser.

2.1 Fundamentos do laser

Inicialmente serão abordados alguns conceitos básicos do dispositivo laser, tais como: a estrutura atômica, as absorções/emissões, inversão de população, os modos longitudinais e transversais, a origem e propagação da luz, que são fundamentais na teoria do funcionamento do laser.

De acordo com o modelo atômico de Niels Bohr, os elétrons giram ao redor do núcleo em trajetórias circulares bem definidas e nesse movimento de rotação não há emissão de energia pelos elétrons. Quando, de alguma maneira, o elétron passa de uma órbita para outra, ocorre emissão ou absorção quantizada de certa quantidade de energia determinada pela expressão descrita na equação 2.1:

$$E = h\nu \quad (2.1)$$

Sendo h , a constante conhecida como constante de Planck, e ν a frequência linear da radiação. Assim, a quantidade de energia absorvida ou emitida pelo elétron nas suas transições de órbitas é denominada "energia de fóton".

O processo de absorção de um fóton em um sistema atômico, causa a transferência de elétron de um nível de mais baixa energia para um nível de mais alta energia. Depois de certo tempo nessa situação o elétron retorna à órbita inicial, e assim pelo processo de emissão espontânea emite um fóton, ou seja, nesse processo de retorno ao nível mais estável há emissão de um fóton [14].

Na Figura 2.1 - (a), é possível observar que nesse sistema atômico ocorre a absorção de um fóton externo e o elétron usa a energia desse fóton para transitar para o nível de mais alta energia.

Na Figura 2.1 - (b), o elétron volta ao seu estado de mais baixa energia, através da emissão espontânea de um fóton com energia E_0 .

Finalmente, no esquema (c) da Figura 2.1, é possível observar o retorno do elétron ao estado de mais baixa energia, devido à ação de um fóton externo. O resultado é a emissão estimulada de um outro fóton, que no caso seriam "fótons clones" que possuem a mesma energia, fase, direção e polarização, que emerge lado a lado com o primeiro fóton.

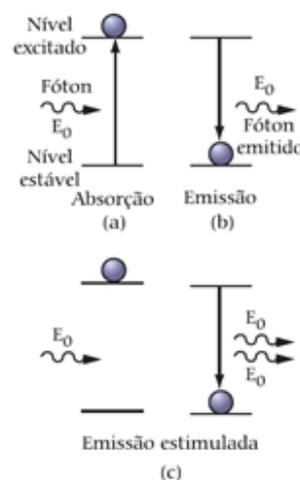


Figura 2.1: Estados de energia do átomo [14].

Um laser consiste principalmente de 3 partes. A primeira parte é o chamado meio

ativo, que pode ser gasoso, sólido ou líquido. Essa parte do laser é a que contém os átomos ou moléculas, as quais contêm os elétrons que, através dos saltos de níveis de energia emitem luz (fótons), que finalmente constituirão a luz laser.

A energia do fóton emitido está diretamente relacionada com seu comprimento de onda. Logo, quando é necessário construir um laser que emita luz com determinado comprimento de onda, deve-se escolher um meio que apresente átomos com elétrons em níveis cujo espaçamento tenha justamente a energia do feixe de luz desejado.

Para que ocorra o processo de emissão estimulada, ou mesmo espontânea é necessário que a maioria dos átomos com elétrons estejam em seus estados excitados (inversão de população). Para que os elétrons saltem para seus níveis mais energéticos, é preciso fornecer energia.

A fonte terá a obrigação de produzir estados excitados, a fim de que nos decaimentos haja produção de luz. Assim, quando a maioria dos átomos apresentam elétrons no estado excitado, dizemos que ocorreu a chamada "inversão de população".

Outra parte importante na constituição do laser é a cavidade óptica ou ressonador. Sua função é justamente a de fazer com que parte dos fótons que emergem do sistema voltem para ele, produzindo mais e mais emissão estimulada. Isso é feito por meio de espelhos que são colocados nas extremidades dessa cavidade e provocam a reflexão dos fótons de volta à amostra.

Temos que para correntes abaixo do limiar, o laser de diodo emite inicialmente fótons espontâneos. Com o aumento da corrente de BIAS (I_{bias}) acima do limiar laser, ocorre um aumento na emissão de fótons estimulados. O momento que ocorre esse fenômeno de "Inversão de População", é quando estes superam os fótons absorvidos, e assim o laser entra no chamado "Regime Laser".

Após a inversão de população ter ocorrido, produzindo a excitação dos elétrons com ajuda de uma fonte externa (que pode ser uma descarga elétrica no meio, outro laser e etc.), o decaimento espontâneo de um dos átomos para o estado fundamental começa a provocar a emissão estimulada dos demais átomos e, conseqüentemente, produz luz laser.

Somente a luz que se propaga ao longo do eixo principal do laser é que vai sofrer as várias reflexões no interior da cavidade ressonante, fazendo com que haja um feixe emergente de luz [15]. As principais características desse feixe emergente são as seguintes:

- Primeiramente, a mais marcante é que a luz laser é apresenta um espectro estreito,

já que a energia carregada pelo fóton estimulante e pelo fóton emitido são as mesmas. Portanto, se medirmos o espectro da luz laser, veremos apenas uma linha, mostrando que ela é composta de apenas uma banda estreita de comprimentos de onda. Naturalmente que a observação da referida linha espectral irá depender da resolução do espectrômetro empregado.

- Uma segunda característica, é o fato de que a intensidade (potência/área) do feixe laser pode ser extremamente grande pois pode-se obter um feixe luminoso bastante colimado, ao contrário das fontes de luz convencionais.
- Em terceiro lugar, temos o caráter direcional do feixe laser. Fótons emitidos inclinados com relação ao eixo central não contribuirão para o feixe de laser final. Esse feixe resultante, é constituído pelas ondas que se propagam na mesma direção, sendo bastante estreito, ou seja, todo feixe propaga-se na mesma direção, havendo um mínimo de divergência.
- A quarta característica importante da luz laser, é a sua coerência. Pode-se dizer que a radiação é espacialmente coerente se as ondas sucessivas da radiação estão em fase, e temporalmente coerente se o trem de pulso das ondas têm todos a mesma direção e o mesmo comprimento de onda. Sendo que as ondas eletromagnéticas associadas possuem também a mesma direção, ou seja, apresenta uma luz coerente e colimada. Entende-se coerência temporal como sendo a capacidade da luz em um ponto de interferir com uma cópia da onda atrasada de um certo intervalo de tempo τ , qualquer que seja o ponto (posição) considerado. Ou seja, está relacionada com a correlação da fase da onda em um determinado ponto alcançado pela mesma em dois instantes de tempo diferentes.
- A quinta característica, é o estado de polarização em geral bem definido com que a luz é produzida. Por exemplo, um LD monomodo na transversal produz uma saída com polarização linear.

2.2 Ressonador óptico

Embora com o processo inversão da população ocorra a amplificação de um sinal via emissão estimulada, esse ganho é pequeno e a maioria dos átomos excitados emitem espontaneamente e não contribuem para o resultado geral. Para transformar esse sistema em laser, é necessário um mecanismo de *feedback* positivo que fará com que a maioria dos átomos da população contribua para a geração de uma saída coerente.

Essa realimentação positiva é ocasionada por um par de espelhos, ou seja, interfaces reflexivas em paralelo com alta capacidade de reflexão. Os espelhos formam uma cavidade óptica ou um ressonador óptico, que usualmente é chamado de cavidade de Fabry-Perrot, permitindo que ocorra esse *feedback* positivo da mesma a partir dos fótons já gerados da emissão estimulada ao longo do eixo [16].

À medida que os átomos excitados começam a decair, eles emitem fótons espontaneamente em todas as direções. Alguns dos fótons viajam ao longo do eixo do meio laser, mas a maioria dos fótons são direcionados para os lados. Os fótons que viajam ao longo do eixo têm a oportunidade de estimular átomos que encontram para emitir outros fótons, porém os que irradiam para os lados não.

Além disso, os fótons que viajam paralelamente ao eixo serão refletidos de volta para o meio laser, tendo a oportunidade de estimular mais átomos excitados. Como os fótons no eixo são refletidos para frente e para trás interagindo com mais e mais átomos, a emissão espontânea diminui, a emissão estimulada é predominante ao longo do eixo e assim temos um laser [17].

Na maioria dos casos, a amplificação da luz gerada pelo dispositivo laser é ocasionada por apenas dois espelhos, com uma alta capacidade de reflexão. Em princípio, estes podem ser dois espelhos planos, conforme apresentado na Figura 2.2, que apresenta uma refletividade $R = 100\%$ e o acoplador (espelho) de saída, $R < 100\%$.

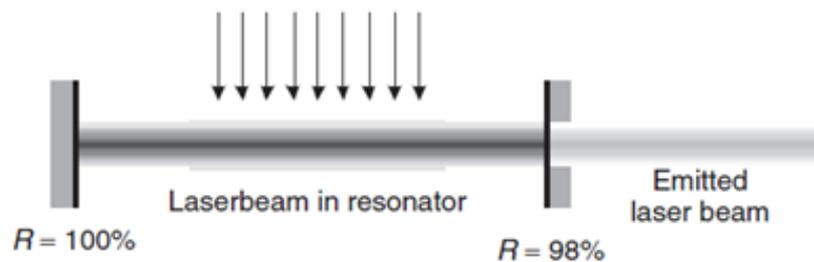


Figura 2.2: Estrutura do dispositivo laser [17].

Como dito anteriormente, os espelhos promovem um ganho no interior da cavidade ressonante e conseqüentemente o aumento da amplitude (amplificação) da luz emitida, desde que a condição de inversão de população seja atendida.

A cavidade deve ser ressonante em torno do comprimento de onda central da radiação estimulada. Assim, a emissão estimulada deve ocorrer dentro de uma cavidade óptica capaz de ressoar no comprimento de onda central emitido.

2.3 Largura espectral

Os lasers são fontes de emissão estimulada, o que faz com que a radiação emitida seja temporal e espacialmente coerente, reduzindo assim a largura espectral do feixe emitido.

Esta redução de largura espectral (alta coerência) permite uma alta eficiência de acoplamento com a fibra, podendo ainda produzir uma potência óptica elevada, comparativamente aos *LEDs* (*Light Emitting Diode*).

A largura espectral é obtida através da distribuição da frequência em função da emissão espontânea, devido a um grupo de átomos nas transições de níveis de energia, quando essa transição é estreita entre dois níveis de energia, a largura espectral será também estreita. Assim, quanto mais estreita a largura de banda, menor será a quantidade de energia para conseguir a inversão de população.

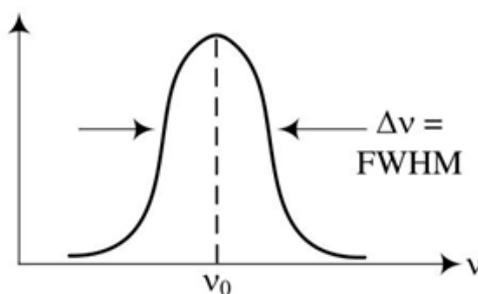


Figura 2.3: Espectro de Emissão típico em formato Gaussiano [17].

Temos a equação 2.2 que é relacionada à Figura 2.3:

$$\Delta\nu = \frac{2v}{\lambda} \quad (2.2)$$

Sendo λ , o comprimento de onda e v a velocidade de propagação do átomo.

Na Figura 2.3, é possível observar a largura espectral à meia altura típica de um laser considerando um certo modo longitudinal. Essa Largura a meia altura, algumas vezes referida como *Full Width At Half Maximum* (FWHM) é um parâmetro de uma curva ou função referente ao seu "alargamento", tal largura é dada pela diferença entre dois valores extremos de uma variável independente no qual ela, a função, atinge metade de seu valor máximo.

Alguns exemplos seriam o LD de Fabry-Perot multimodo longitudinal que tipicamente

apresenta largura a meia-altura de emissão *linewidth* de aproximadamente 4 nm, enquanto que lasers *Distributed-feedback Laser* (DFB) apresentam *linewidth* muito mais estreito e geralmente dado em unidade de frequência ao invés de comprimento de onda, tipicamente da ordem de < 10 MHz.

Outro exemplo, seriam os lasers em anel a fibra óptica que podem atingir *linewidth* de 1 kHz ou abaixo. O *linewidth* de um laser de diodo está diretamente relacionado ao seu ruído fase (*phase noise*) de emissão. Isto significa que quanto mais largo o *linewidth*, maior o ruído de fase, pois mais incerto o comprimento de onda (ou frequência óptica) emitido.

2.4 Modos longitudinais

Os modos longitudinais de um dispositivo laser consistem em um número discreto de componentes de frequência que possuem largura espectral muito estreita e espaçamento muito próximos entre si, essas componentes discretizadas são conhecidas como os modos longitudinais do laser. Conforme será mais detalhado adiante, a distância espectral entre modos longitudinais é inversamente proporcional ao tamanho (axial) físico da cavidade. Além dos modos longitudinais, os LDs exibem modos transversais de propagação no guia de onda, que apresenta o ganho de forma similar aos modos transversais de uma fibra óptica multimodo.

O ganho depende tanto do comprimento físico 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.

Sem elementos adicionais de seleção de frequência, a maioria dos lasers que utilizam ressoadores lineares emite em vários modos axiais. Um ressoador que opera em um único modo transversal pode exibir um espectro de frequência que consiste em várias linhas correspondentes aos modos longitudinais. Na Figura 2.4 é apresentado os modos longitudinais que se propagam em um cavidade ressonante [17].

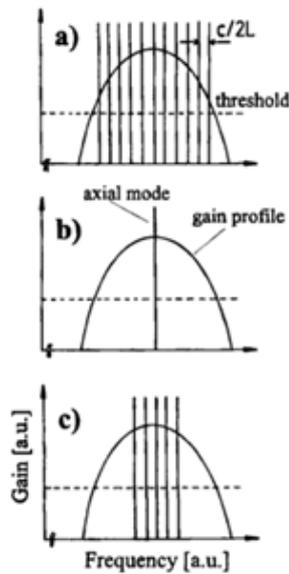


Figura 2.4: Modos longitudinais de uma cavidade ressonante [17].

Quando os modos axiais ocorrem, o número de modos axiais oscilantes aumenta à medida que o ganho é aumentado e/ou alargado. Acima da corrente de limiar do laser, o número de modos axiais observados "n" pode ser aproximado por $\Delta v_{banda} / \Delta \lambda_{linewidth}$ onde $\Delta \lambda_{linewidth} = \frac{c}{2L}$, logo é possível reescrever a relação conforme apresentado na equação 2.3.

$$n = \frac{\Delta v_{banda} 2L}{c} \quad (2.3)$$

Sendo Δv_{banda} a largura de banda de ganho do laser, o modo axial que atinge primeiro o limiar do laser satura o ganho em todas as frequências. Isso garante automaticamente a operação em modo único, porque todos os outros modos axiais são mantidos abaixo do limiar.

2.5 Laser de diodo semiconductor

A primeira demonstração de emissão de luz coerente por parte de um diodo foi a invenção do LD (primeiramente emitindo em 850 nm) realizada no centro de pesquisa da General Electric por Robert N. Hall e pela sua equipe. O primeiro *Light Emitting Diode* (LED) visível foi construído por Nick Holonyak nos finais do ano de 1962 [17]. Como qualquer tipo de laser, o laser semiconductor produz luz fortemente monocromática, coerente, com

polarização e direção bem definidas.

O funcionamento do laser semiconductor é similar ao funcionamento do LED, a diferença está na geração de fótons que, para o caso do diodo emissor de luz, tem origem na emissão espontânea enquanto que no laser semiconductor tem origem na emissão estimulada. Daí se utilizar muito o termo diodo laser para descrever o laser semiconductor.

As cavidades utilizadas no laser semiconductor são tipicamente cavidades do tipo Fabry-Perot. Estas características gerais deste tipo de laser fazem com que seja um dispositivo extremamente pequeno (pode atingir dimensões da ordem dos 0.1 mm) para implementá-lo na tecnologia eletrônica.

O laser diodo utiliza uma junção p-n para gerar luz. As junções p-n podem ser por sua vez junções do tipo "p-p-n". Este tipo de junção confina a zona ativa do laser em uma região muito pequena, os elétrons e lacunas transferem-se de um para o outro lado. Recombinando-se uns com os outros, deixando no lado p uma carga negativa, e no lado n uma carga positiva.

Se a banda de valência (*Valence band*) está parcialmente cheia, esse material é do tipo-p, se a banda de condução (*Conduction band*) está parcialmente cheia, esse material é do tipo-n. O chamado nível de Fermi é utilizado para identificar as condições de ocupação dos elétrons no semiconductor, é o nível de energia ocupado pelos elétrons.

O diodo *laser* utiliza uma corrente elétrica através de junções p-n para injetar elétrons na banda de condução e lacunas na banda de valência, a diferença de energia entre essas bandas é chamada "Gap" de energia ou zona proibida, um exemplo dessa associação está representada na Figura 2.5.

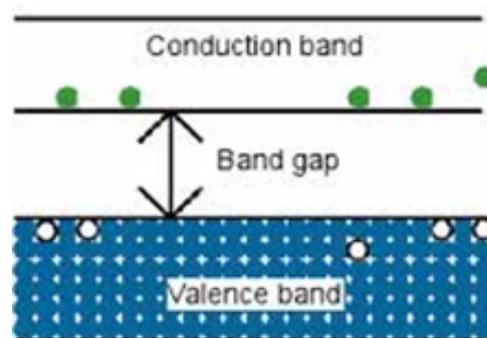


Figura 2.5: Níveis de Energia em um semiconductor [18].

O dispositivo formado por homojunção p-n, ou também conhecida, como homoestru-

tura, é um dispositivo feito a partir do mesmo material semiconductor com uma única junção p-n, sendo considerado pouco eficiente pois a recombinação elétron-buracos ocorre em uma área grande do dispositivo (de 1 a 10mm de largura) e conseqüentemente gera pouco ou nenhum confinamento dos fótons. Esse tipo de estrutura está representado na Figura 2.6, e o diagrama de banda de energia de um diodo laser polarizado eletricamente é apresentado na Figura 2.7 (a) e (b).

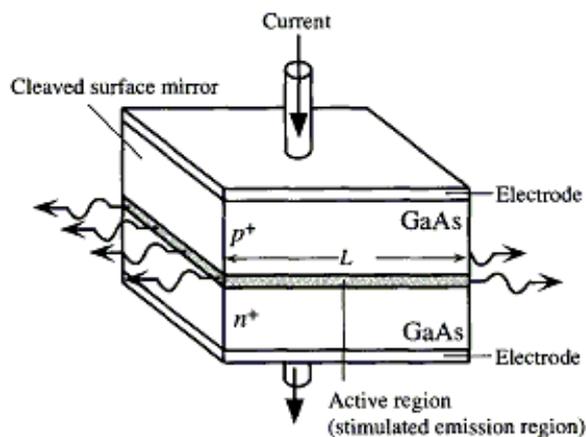


Figura 2.6: Esquema de um LD baseado em uma Homojunção p-n [18].

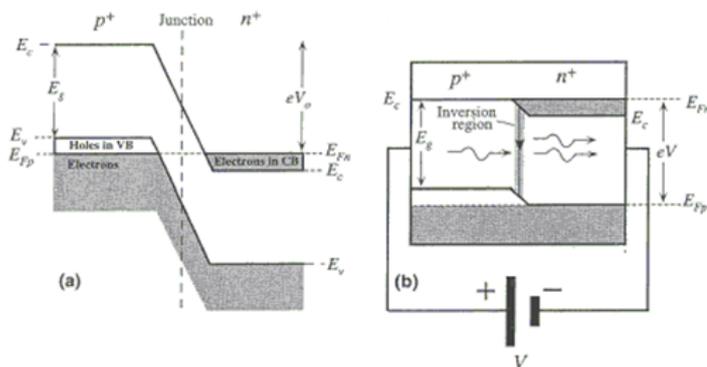


Figura 2.7: Diagrama de energia da Homojunção p-n [18].

A heterojunção dupla tem muitas vantagens. Temos que os semicondutores que apresentam uma banda de *gap* maior, geralmente têm menores índices de refração, esse dispositivo é formado a partir do “ensanduichamento” de um material tipo-p e tipo-n, conforme apresentado na Figura 2.8. Através da Figura 2.9 é possível observar que um material apresenta uma energia de *Gap* (E_{g1}) e o outro material uma energia de *Gap* diferente (E_{g2}), sendo que $E_{g1} < E_{g2}$.

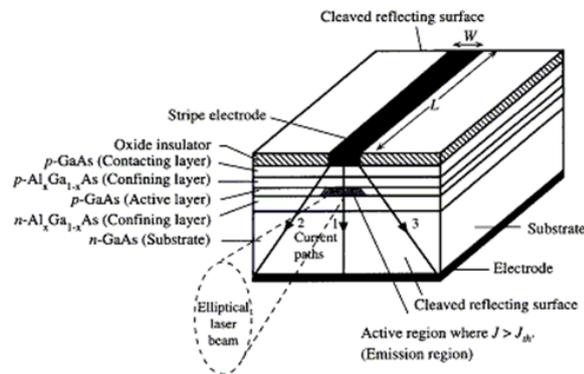


Figura 2.8: Esquema de um LD baseado em uma Heterojunção n-p-p [18].

A mudança entre os índices de refração define um guia de onda dielétrico óptico, que confina os fótons na região ativa da cavidade óptica e assim reduz as perdas de fótons e aumenta a sua concentração. Este aumento na concentração dos fótons aumenta a taxa de emissões estimuladas e conseqüentemente a eficiência do laser.

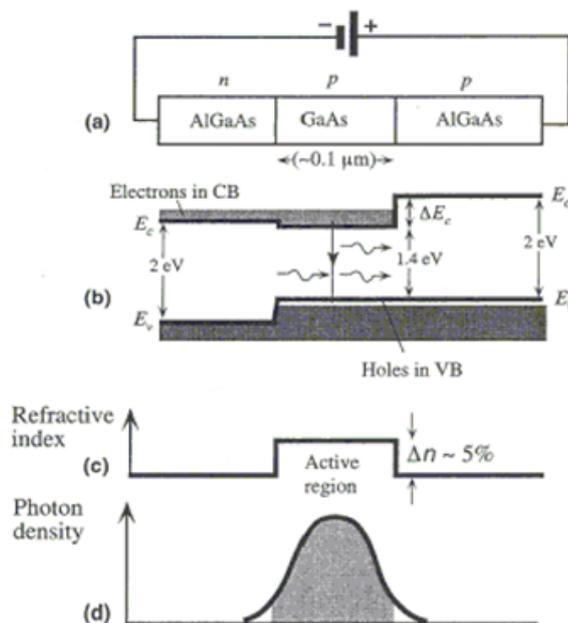


Figura 2.9: Diagrama de energia da Heterojunção n-p-p [18].

No caso da Figura 2.9 os semicondutores são AlGaAs com $E_g = 2eV$ e GaAs com $E_g = 1,4eV$. É possível observar que a região p-GaAs é uma fina camada, normalmente entre $0,1$ e $0,2 \mu m$, e constitui a camada ativa onde a emissão estimulada acontece. Quando é aplicada uma polarização direta, a energia de condução (E_c) do semiconductor n-AlGaAs se aproxima muito da E_c do p-GaAs que leva a uma grande injeção de elétrons da banda

de condução do n-AlGaAs para a do p-GaAs. Esta injeção de elétrons fica confinada na banda de condução do p-GaAs, pois existe uma barreira ΔEc entre os semicondutores p-GaAs e p-AlGaAs, devido à mudança na banda de *gap* [18].

Para alcançar o número necessário de emissões estimuladas de um diodo laser e acumular as oscilações ópticas necessárias dentro da cavidade (para superar todas as perdas ópticas) a corrente aplicada deve exceder certo valor limiar decorrente, conhecida também como *threshold current* (I_{th}).

2.6 Corrente limiar

O diodo laser semiconductor é um dispositivo que varia a natureza da radiação emitida conforme a corrente de operação. A chamada corrente de *threshold* define o ponto limiar entre a emissão espontânea e a emissão estimulada conforme apresentado na Figura 2.10.

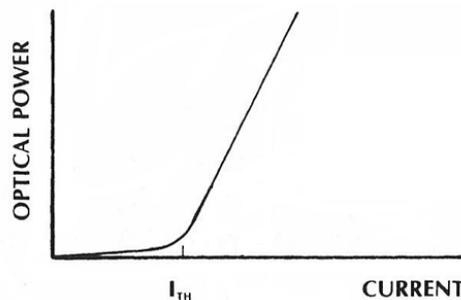


Figura 2.10: Função de transferência de um diodo laser semiconductor [18].

Abaixo da corrente limiar existe uma emissão óptica com pouca eficiência, que é causada pela recombinação de elétrons injetados em “buracos” na camada ativa, o comportamento do diodo laser nesta condição se parece com o de um *LED* fraco. A luz de saída de um *LED*, entretanto aumenta quase que na proporção da corrente do diodo. A luz de saída de um diodo laser é uma radiação coerente quando $I > I_{TH}$, enquanto a de um *LED* é formada de fótons incoerentes qualquer que seja a corrente injetada.

A corrente limiar é um parâmetro fundamental na caracterização do desempenho do diodo laser, menores valores de I_{TH} indicam um melhor desempenho do diodo laser. Assim, abaixo do limiar laser, as perdas na cavidade são maiores do que ganho, no limiar laser, as perdas da cavidade são igual ao ganho e acima do limiar laser, o ganho é maior do que as perdas na cavidade.

2.7 Amplificador óptico semiconductor (SOA)

2.7.1 Fundamentos do SOA

À medida que o sinal óptico se propaga pela fibra óptica, ele sofre atenuação (perda de energia). Em alguns casos o sinal óptico pode ser tão atenuado ao longo do percurso que se torna fraco demais para detecção no fotodetector na recepção do sinal, onde o sinal deve ser detectado a uma BER baixa (Por exemplo, 10^{-9} a 10^{-11}) [19].

Os amplificadores ópticos são os dispositivos chave que reconstituem a amplitude de um sinal óptico atenuado, expandindo o alcance efetivo da fibra entre a transmissão e a recepção das informações. O SOA é um amplificador óptico baseado em um meio de ganho de semiconductor, ou seja, é essencialmente como um diodo laser em que os espelhos terminais são substituídos por revestimentos anti-reflexo [20].

Os amplificadores ópticos amplificam a luz incidente por emissão estimulada, o mecanismo é semelhante ao utilizado pelo diodo laser, conforme descrito anteriormente. Um amplificador óptico semiconductor consiste essencialmente de um diodo laser sem o *feedback* [20], ou seja, a única diferença significativa está na presença ou na ausência de elementos de *feedback* tais como espelhos nas extremidades da guia ou grades.

Os amplificadores ópticos necessitam de energia elétrica ou óptica para excitar (bombear) ou injetar elétrons na banda de condução e/ou buracos na banda de valência. A energia normalmente é fornecida pela injeção de corrente elétrica no caso do SOA ou luz óptica na faixa de IR (980 nm ou 1480 nm) no caso do EDFA, o mais utilizado para a banda C de Telecomunicações [21]. Nas extremidades da estrutura do SOA são utilizados revestimentos antirreflexos (AR) para permitir que a onda (luz) propague uma única vez pelo meio de ganho (região ativa), conforme apresentado na Figura 2.11.

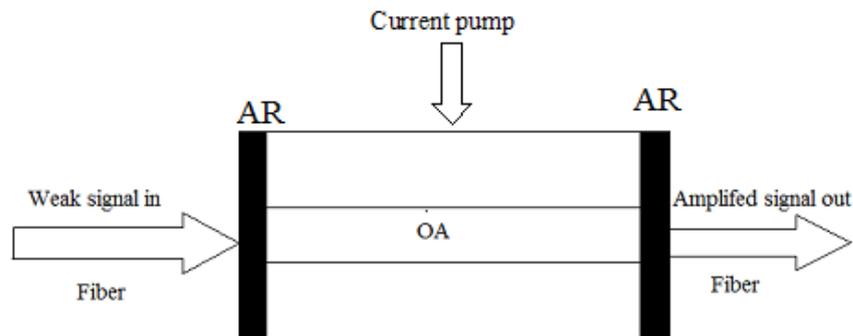


Figura 2.11: Amplificador óptico semiconductor baseado no princípio do laser de diodo [21].

Temos que o ganho óptico não depende apenas da frequência (ou comprimento de onda) do sinal incidente, mas também da intensidade do feixe local em qualquer ponto dentro do amplificador. Tipicamente, um amplificador semiconductor (SOA) comercial opera na janela de 1310 nm ou 1550 nm, porém um EDFA opera apenas na banda C (1530-1570 nm) podendo ser estendido para a banda L (1570-1625 nm)

2.7.2 Algumas aplicações do SOA

Em termos de funcionalidade, o amplificador óptico semiconductor é categorizado em quatro áreas de aplicações: (a) Pós-amplificadores ou Reforço para elevar a potência de um sinal óptico ao nível mais alto, (b) Amplificadores em linha para compensar a perda na fibra e outras perdas de transmissão em links de médio e longo percurso, (c) Pré-amplificadores para melhorar a sensibilidade do receptor e que apresentam um alto ganho e (d) Conversor de comprimento de onda [21].

Existem diversas outras aplicações de SOAs como para o chaveamento e modulação eletro-óptica e outras com base na saturação do ganho assim como o aproveitamento de outras não-linearidades ópticas. Trata-se de um dispositivo bastante versátil. Na principal contribuição da presente Dissertação (ver Capítulo 4), um SOA é incorporado em um interferômetro de Sagnac à fibra formando um *Nonlinear Amplified Loop Mirror* (NALM), ou seja, um interferômetro onde o SOA funciona como um elemento óptico não-linear.

1) Pós-amplificador ou Reforço (booster): É um amplificador de potência que amplia o sinal do transmissor antes de enviá-lo por uma fibra, conforme apresentado na Figura 2.12.

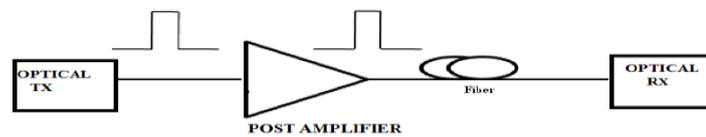


Figura 2.12: Amplificador óptico semiconductor como amplificador de reforço [21].

Esse tipo de amplificador eleva a potência de um sinal óptico ao nível necessário para garantir que ele possa ser detectado pelo receptor, o que maximiza a distância de transmissão. A potência amplificada pode aumentar a distância de transmissão em 100 km ou mais dependendo do ganho do amplificador e das perdas presentes na fibra.

O principal requisito deste tipo de amplificador é a produção de potência máxima de saída, e não ganho máximo (o sinal de entrada é relativamente alto, visto que vem imediatamente do transmissor), até o nível necessário para garantir que ele possa ser detectado pelo receptor. Assim, os amplificadores de reforço geralmente fornecem baixo ganho e alta potência de saída.

Geralmente os amplificadores de reforço são utilizados quando é necessário amplificar simultaneamente uma série de sinais de entrada em diferentes comprimentos de onda, como é o caso de redes de comunicações ópticas que utilizam transmissão *Wavelength Division Multiplexing* (WDM).

2) Amplificador de Linha: São amplificadores que operam com um sinal no meio de um link de fibra óptica, conforme apresentado na Figura 2.13. A função deste amplificador é compensar a perda causadas pela fibra ao longo do link, devido à atenuação da fibra, conexões e distribuição de sinal em uma rede.

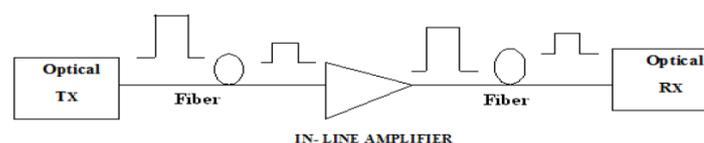


Figura 2.13: Amplificador óptico semiconductor como amplificador de linha [21].

Em redes ópticas, esse tipo de amplificador em linha é instalado no link de fibra óptica a cada 80-100 km. Apresenta um ganho moderado e tem potência de saída semelhante (menor) às do amplificador de reforço.

3) Pré-amplificador: O uso de SOAs como um pré-amplificador permite a integra-

ção monolítica do SOA com o receptor. O objetivo principal é amplificar o sinal óptico até o nível necessário para garantir que ele possa ser detectado pelo receptor. O pré-amplificador óptico amplifica um sinal imediatamente antes de chegar ao receptor como mostrado na Figura 2.14. Utilizando um pré-amplificador, a sensibilidade do receptor é aumentada. Igual ao uso de amplificadores de reforço, a pré-amplificação pode reduzir o número de amplificadores em linha necessários ao longo do link.

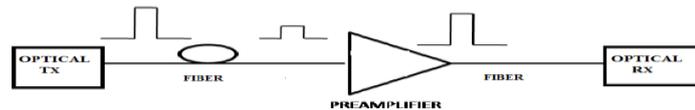


Figura 2.14: Amplificador óptico semiconductor como pré-amplificador [21].

Geralmente, um pré-amplificador deve oferecer alto ganho para garantir que o sinal óptico seja detectável. Uma alta potência óptica de saída de um SOA pré-amplificador em geral não é desejável pois isto poderá saturar o foto-detector.

4) Conversor de comprimento de onda: Os conversores de comprimento de onda desempenham um papel importante nas redes ópticas. O conversor de comprimento de onda é um dispositivo óptico que é usado para converter um sinal de luz injetado de um comprimento de onda para outro comprimento de onda desejado em um sistema ou rede.

O conversor de comprimento de onda óptico é utilizado para evitar o bloqueio do comprimento de onda em conexões cruzadas em sistemas *WDM*.

Existem três formas principais para explorar as propriedades não lineares dos SOAs no processo de conversão de comprimento de onda: ganho de modulação cruzada (*Cross Gain Modulation (XGM)*), modulação cruzada de fase (*Cross Phase Modulation (XPM)*) e mistura de quatro ondas (*Four Wave Mixing (FWM)*) [21]. SOAs operando como em conversores de comprimento de onda que empregam a conversão do tipo mistura de quatro ondas, exigem potências de bombeamento relativamente altas. O princípio baseado na utilização de SOA operando com ganho de modulação cruzada é apresentado na Figura 2.15.

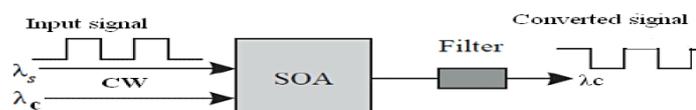


Figura 2.15: Conversor de comprimentos de onda baseado em XGM em SOA. [21]

Um sinal modulado em amplitude de comprimento de onda λ_S é injetado no amplificador e modula o ganho do SOA devido à sua saturação. Um segundo sinal, de onda contínua *Continuos Wave* (CW), em um comprimento de onda λ_C previamente escolhido, é também injetado no amplificador. Este sinal é então modulado pela variação do ganho do SOA, desta maneira o sinal de saída em λ_C terá a mesma informação que o sinal em λ_S . O sinal de saída aparece invertido com relação ao sinal de entrada, em função da não saturação do SOA quando os bits zero do comprimento de onda λ_S entram no sistema, portanto ocorre uma inversão de polaridade do sinal. Um filtro óptico na saída do SOA pode eliminar o sinal em λ_S .

2.7.3 Teoria da Amplificação dos SOAs

Existem algumas formas de operação do SOA, que serão apresentadas a seguir:

Os amplificadores ópticos (SOAs) são essencialmente diodos de laser, sem espelhos nas extremidades e possuem uma fibra conectada a ambas as extremidades. Os SOAs amplificam a luz incidente pelo processo de emissão estimulada usando o mesmo mecanismo do diodo laser. O sinal óptico de entrada é introduzido na região ativa do semiconductor através da óptica de acoplamento, conforme apresentado na Figura 2.16.

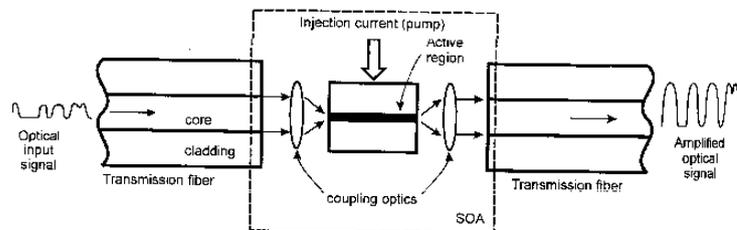


Figura 2.16: Configuração básica do SOA do tipo onda viajante (TW) [21].

O acoplamento é necessário porque o diâmetro do campo de modo (MFD), de uma fibra monomodo é aproximadamente de $10,6 \mu$, correspondente ao diâmetro do núcleo + penetração típica do campo evanescente da ordem de λ . A corrente de injeção fornece energia externa necessária para bombear os elétrons para a banda de condução. O sinal óptico de entrada estimula a transição dos elétrons para a banda de valência e ocorre a emissão de fótons com a mesma energia que do sinal de entrada. Assim, na saída o sinal óptico é amplificado [22].

Os amplificadores ópticos semicondutores (SOAs) possuem um amplo espectro de

ganho, baixo consumo de energia, facilidade de integração com outros dispositivos. O amplificador óptico semiconductor pode ser facilmente integrado como pré-amplificador no receptor final, usando a mesma tecnologia do laser de diodo, e com ganho relativamente independente do comprimento de onda. O ganho externo de amplificação do sinal de SOA pode ser definido pela equação 2.4 envolvendo as potências ópticas de entrada e de saída:

$$G = \frac{P_{out}}{P_{in}} \quad (2.4)$$

O ganho óptico externo é uma figura de mérito de amplificadores (ópticos), definida como a razão entre a potência de saída pela potência de entrada, no caso para um SOA. Em SOAs, o ganho interno é o resultado da diferença líquida entre a emissão estimulada e o somatório dos processos de perdas no interior do semiconductor. Ou seja, haverá ganho óptico interno quando a probabilidade de se ter emissão estimulada for maior que as probabilidades de absorção + de emissão espontânea + somatório das perdas de diversas naturezas. O ganho óptico material por unidade de comprimento físico do SOA, g_m , em uma primeira aproximação, é função linear da densidade "n" de portadores na camada de condução conforme apresentado na equação 2.5:

$$g_m(n) = \alpha(n - n_0) \quad (2.5)$$

onde, α é a variação do ganho em relação a n, ou seja, seria o ganho diferencial, n é a densidade de portadores na região ativa e n_0 é a densidade de portadores na transparência. A medida que a corrente de polarização (I_{bias}) injetada no SOA aumenta, o fenômeno de emissão estimulada cresce e quando se iguala à soma da absorção, emissão espontânea e perdas, tem-se a condição denominada de "transparência", ou seja, teremos $I_{bias} = I_T$ onde I_T é a corrente de transparência. O valor de I_T é típico para cada SOA. Sendo "g" definido como o ganho óptico interno do SOA, tem-se:

$$g(n) = \Gamma v_g g_m(n) = \Gamma v_g \alpha(n - n_0) \quad (2.6)$$

Na Equação 2.6, Γ é o fator de confinamento do campo óptico na região ativa e v_g é a velocidade de grupo do campo incidente. O ganho líquido interno, g_L , é definido como o ganho interno "g" menos as perdas internas, esse ganho líquido pode ser escrito como:

$$g_L(n) = g(n) - \alpha_t \quad (2.7)$$

Em 2.7, α_t representa as perdas totais no dispositivo, ou seja, é a soma das perdas no semiconductor com as perdas devido à refletividade residual das faces do amplificador. A equação diferencial que modela a potência óptica em função da posição axial “z”, é dada pela equação 2.8:

$$\frac{\partial P(n, z')}{\partial z'} = g_L(n)P(n, z') \quad (2.8)$$

A potência $P(n, z')$ é obtida da potência de entrada e a integração feita de forma simples ao longo de todo o comprimento físico do SOA resulta na equação 2.9:

$$P(n, z) = P_{in}e^{g_L(n)z} \quad (2.9)$$

Lembrando que por definição G é a razão das potências de saída e entrada, conforme apresentado na equação 2.4 teremos, $P_{out}(n, L) \equiv P(n, z)|_{z=L} = P_{in}e^{g_L(n)L}$, onde L é o comprimento do físico do amplificador, G é definido através da equação 2.10:

$$G = \frac{P_{in}e^{g_L(n)L}}{P_{in}} = e^{g_L(n)L} \quad (2.10)$$

As equações descritas anteriormente são para as situações de ganho linear, ou seja, esta análise é apenas correta para "pequenos sinais". Para "grandes sinais", é possível ocorrer saturação do amplificador, fazendo com que a análise prévia deva ser adaptada.

A saturação de ganho ocorre quando o ganho do dispositivo se torna não-linear, isto resulta da quantidade finita de portadores disponíveis para que haja ganho. À medida que a potência de sinal aumenta, a disponibilidade de portadores na região ativa diminui ao ponto de acarretar uma redução do ganho do amplificador.

O fenômeno de saturação pode ser entendido pela dependência do ganho interno com a potência de entrada. Quando a potência incidente no amplificador se aproxima da potência de saturação - definida como a potência para a qual o ganho cai à metade - o amplificador deixa de ser linear com a potência.

A saturação de ganho pode distorcer consideravelmente o sinal sendo amplificado e, por isso, é um fator limitante para a aplicação de SOAs em enlaces multicanais, devido aos efeitos prejudiciais da intermodulação e modulação imposta por outros canais. Estes efeitos só são possíveis porque os SOAs possuem tempos de resposta muito rápidos, da ordem de nanossegundos ou picossegundos, o que faz com que as variações em amplitude

presentes em um sinal sejam percebidos em outro. Tal fenômeno de distorção de sinais já não acontece com os EDFAs que tipicamente apresentam um tempo de recuperação do ganho da ordem de 10 ms.

Esta característica de distorção de sinal fez com que os SOAs fossem preteridos em relação aos EDFAs para a amplificação de vários canais WDM. Todavia, é este comportamento que permite a estes amplificadores operarem como conversores de comprimento de onda e em outras funções dentro do que se chama de "*all-optical signal processing*". Além dos sinais de entrada no SOA, o ganho deste também é influenciado pelo ruído gerado internamente pelo processo de amplificação da radiação espontânea (ASE).

A ASE surge no SOA como resposta à emissão espontânea, que é amplificada em seguida no dispositivo. A origem da ASE está, pois, na associação de duas transições de portadores em amplificadores ópticos:

1. Emissão espontânea (*Amplified Spontaneous Emission* (ASE)), que gera fótons de vários comprimentos de onda dentro da banda de emissão espectral do SOA, com fases aleatórias;
2. Emissão estimulada subsequente à emissão espontânea, que amplifica os fótons gerados pela transição anterior, também conhecida como recombinação espontânea amplificada.

Os fótons gerados por emissão espontânea possuem uma grande gama de valores de comprimento de onda. Então, o que se segue é um espectro de fótons de fases e direções aleatórias que são amplificados por todo o espectro de ganho. Este é um fenômeno incoerente, em oposição à emissão estimulada, que, por preservar a frequência e a fase do fóton original, é coerente.

A ASE pode ser um limitante grave para a operação em redes ópticas, podendo se acumular em uma cadeia de amplificadores. Ademais, se a injeção de portadores for muito alta, o SOA pode ficar auto-saturado, ou seja, saturado pela própria emissão espontânea.

2.8 Tipos de SOAs

Existem algumas diferentes estruturas de SOAs, que serão apresentadas a seguir:

1. **Amplificador óptico semiconductor Fabry-Perot (FPSOA)**: esse tipo de am-

plificador é semelhante ao laser Fabry-Perot. As duas superfícies extremas são clivadas para que funcionem como semi-espelhos, conforme mostrado na Figura 2.17.

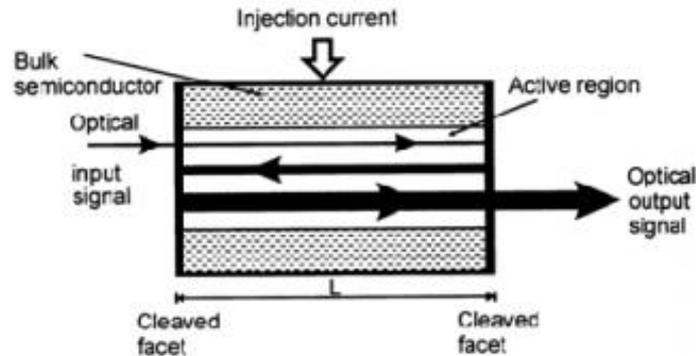


Figura 2.17: Configuração do Amplificador óptico semicondutor na estrutura de Fabry-Perot [21].

A luz entra na região ativa e ocorrem diversas reflexões na direção longitudinal (ou axial) em cada qual a luz vai sendo amplificada. Quando a luz entra no *Fabry-Perot Amplifier* (FPA), o sinal percorre múltiplos caminhos, sendo amplificado à medida que ocorrem as reflexões entre os espelhos até ser emitido com uma intensidade mais alta que a inicial. Utilizando um ressonador de Fabry-Perot, que fornece *feedback* óptico, é possível aumentar o ganho do SOA. O FPA tem um ganho muito alto e apresenta uma largura de banda estreita.

2. **Amplificador óptico semicondutor de onda viajante (TWSOA):** no modo de operação TW, a ressonância na cavidade de Fabry-Perot deve ser suprimida. Para o regime TW, é necessário que a refletividade das extremidades da guia seja extremamente pequena ($< 0,1\%$) para o SOA atuar como amplificador com apenas uma passagem de luz (TW = *Travelling Waves*).

Existem três técnicas que são utilizadas para reduzir a refletividade desses espelhos: através de revestimento anti-reflexo nas duas interfaces. Além disso, pode-se também inclinar a região do guia de ondas em relação à normal da interface ou inserir uma região transparente entre a região ativa e a interface. Neste caso, o raio óptico é desfocalizado antes de chegar à interface semicondutor-ar. A luz refletida diverge mais e não consegue ser re-acoplada satisfatoriamente na região ativa, cuja espessura é bastante delgadas

Assim, o amplificador de onda viajante é um meio ativo sem interfaces reflexivas, de modo que o sinal de entrada é amplificado por uma única passagem através do

meio ativo, conforme apresentado na Figura 2.18.

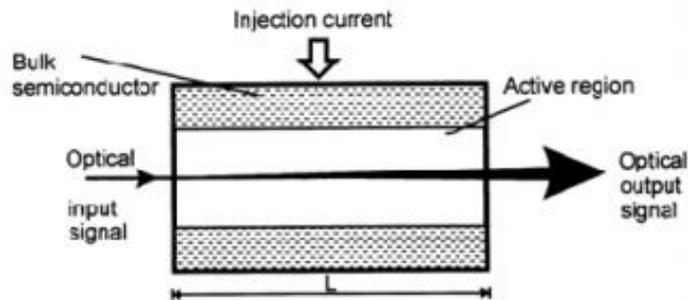


Figura 2.18: Configuração do Amplificador óptico semicondutor de onda viajante [21].

É possível aumentar o ganho no modo de operação TW através da extensão do comprimento físico do meio ativo. TWSOAs são amplamente utilizados devido sua grande largura de banda óptica (dezenas de nm) e baixa sensibilidade de polarização (aproximadamente 1 dB).

3. **Amplificador óptico semicondutor de cavidade vertical (VC SOA):** estes dispositivos são similares em estrutura e partilham muitas características com os lasers de emissão de superfície de cavidade vertical (VCSEL). A diferença principal quando se compara VC SOAs e VCSELS é a reflectividade do espelho reduzida utilizados na cavidade do amplificador.

Com VC SOAs, o *feedback* reduzido é necessário para impedir que o dispositivo atinja o limite chamado *lasing*. Devido ao comprimento da cavidade extremamente curto, e meio de ganho correspondentemente pequeno, estes dispositivos exibem muito baixo ganho de passagem única e também uma grande gama espectral livre ($FSR = Free-Spectral Range$). O pequeno ganho de passagem única requer relativamente alta refletividade dos espelhos para impulsionar o ganho total do sinal, conforme apresentado na Figura 2.19.

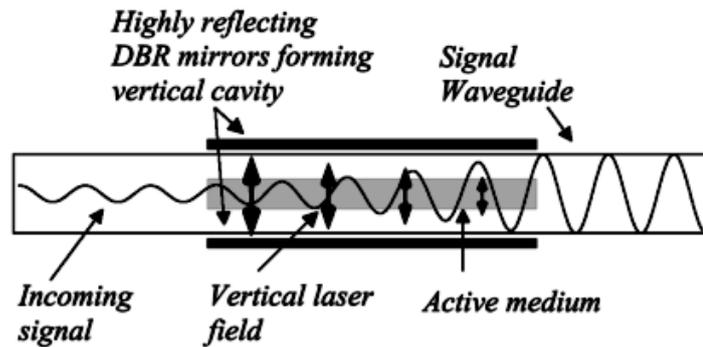


Figura 2.19: Configuração do Amplificador óptico semicondutor de cavidade vertical [21].

Além de aumentar o ganho de sinal total, a utilização da estrutura de cavidade ressonante tem como resultado uma largura de banda de ganho muito estreita, juntamente com a grande FSR da cavidade óptica, o que limita de forma eficaz o funcionamento do VCVOA para amplificação de canal único. Assim, VCVOAs podem ser vistos como filtros de amplificação.

Amplificadores ópticos semicondutores de cavidade vertical (VCVOAs) apresentam um acoplamento eficiente para fibra óptica e, menor figura de ruído devido ambas à sua geometria circular e pequenas dimensões, design compacto, ganho independente de polarização e baixo custo nas técnicas de fabricação.

4. **Amplificador óptico semicondutor do tipo *quantum-well* (QWVOA):** no caso do QWVOA, a região ativa é uma cavidade de espessura muito fina (tipicamente < 10 nm constituindo-se em um poço quântico) impressada entre duas regiões de semicondutores dopados com revestimento anti-reflexo nas faces, conforme mostrado na Figura 2.20.

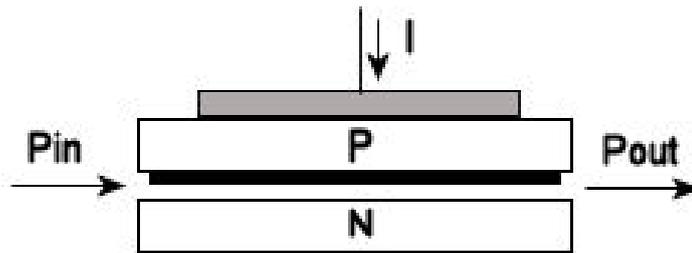


Figura 2.20: Configuração do Amplificador óptico semicondutor de poço quântico [21].

O sinal óptico é aplicado a uma extremidade da cavidade e o sinal amplificado é emitido na outra extremidade da cavidade. O confinamento de portadores ocorre em uma única direção, ortogonal à de propagação da luz.

5. **Amplificador óptico semicondutor de ponto quântico (QDSOA):** a região ativa consiste em várias estruturas de pontos quânticos (de baixa dimensão). Pontos quânticos (QD) são cristais semicondutores com todas as dimensões da ordem de nanômetros, conforme mostrado na Figura 2.21.

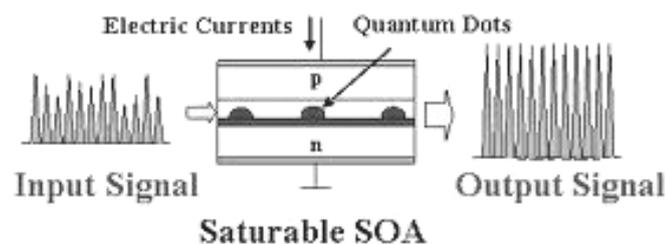


Figura 2.21: Configuração do Amplificador óptico semicondutor de ponto quântico [21].

QDSOAs não apresentam a liberdade de escolha do comprimento de onda como outras estruturas semicondutoras, mas também tem capacidade de expandir drasticamente a largura de banda.

SOAs são caracterizados pelas não linearidades ópticas, baixo consumo de energia,

alta taxa de operação e tamanho pequeno. Os requisitos mínimos de espaço, capacidade opto-eletrônica de integração e recuperação rápida do ganho de amplificação irá garantir que o SOA desempenhe um papel cada vez mais importante nas futuras redes ópticas avançadas.

As características ópticas não-lineares dos SOAs são muito atraente para uma série de aplicações, como processamento de sinal óptico, recuperação de relógio, óptica ultra-rápida multiplexação / demultiplexação no tempo, compensação de dispersão e conversão de comprimento de onda em aplicações WDM.

Finalmente, deve-se aqui observar que a maioria dos tipos descritos de SOAs não estão disponíveis comercialmente, sendo até então objeto de P&D. Quanto aos modelos de mercado, nem sempre tem sua estrutura detalhada pelo fabricante. Devido à maior facilidade de fabricação, SOAs comerciais devem em sua maioria serem baseados na estrutura *bulk* (e não de poços quânticos) em guias do tipo *ridge*, para reduzir a sensibilidade com a polarização da luz. Ao menos, a *bulk-ridge* é a estrutura utilizada nos SOAs não-lineares da Kameliam.

2.9 Lasers à fibra óptica

Os *lasers* podem se basear como meios de ganho, materiais sólidos, líquidos e gasosos. No geral, os *lasers* mais utilizados são os gasosos (HeNe e o CO_2) [23] ou sólidos (como lasers de diodo semicondutores, Nd:YAG e à fibra óptica dopada ou Raman) [20].

No caso do laser à fibra, o meio ativo utilizado é a própria fibra óptica, que foi dopada com elementos do grupo das terras raras como o érbio, itérbio, neodímio, entre outros. Essa dopagem trata-se de um processo de introdução de um elemento químico para mudar as propriedades de um material.

Essa dopagem é realizada pois esses elementos citados possuem índices de aproveitamento de energia extremamente altos. Dessa forma, é possível utilizar o laser à fibra com uma fonte geradora de luz laser mais barata e com características físicas úteis para várias aplicações que podem ser projetadas, quando se compara com os lasers de diodo. Apenas para exemplificar, uma característica importante de lasers à fibra óptica é a possibilidade de gerar luz laser *CW*, pulsada ou em regimes *Q-switching* [16] ou *mode-locking* [16], porém em confinamento monomodo no núcleo da fibra.

Lasers à fibra de érbio utilizam os átomos Er na matriz vítrea como meio de ganho que

pode ser bombeado em 980 nm, 1480 nm e até mesmo em torno de 532 nm. Desta forma, rapidamente os portadores absorvidos decaem para o estado metaestável e em torno de 10 ms decaem espontaneamente emitindo fótons em uma banda de ≈ 35 nm de largura espectral em torno de 1550 nm.

Os átomos de érbio agem como o meio ativo do laser na fibra dopada, e os fótons que são emitidos ficam confinados e se propagam no núcleo da fibra monomodo. Para que se consiga obter oscilação da luz e então a geração do laser, pode-se fazer uso das *Fiber Bragg Grating* (FBG), funcionando como espelhos espectralmente seletivos na banda C para a realimentação da cavidade a fibra. A configuração do dispositivo, porém com a fibra dopada com Ytérbio, é apresentada na Figura 2.22.



Figura 2.22: Configuração do laser à fibra óptica.[24].

Lasers onde a luz se propague em parte ou totalmente no espaço livre são muito sensíveis ao movimento e perdem todo o alinhamento óptico ao sofrerem batidas ou movimentos bruscos. No caso do laser à fibra, apenas o laser de diodo de bombeio (*pump laser*) necessita ter sua luz acoplada na fibra monomodo. Desta forma, conforme adicionalmente ilustrado pela Figura 2.22, o alinhamento óptico fica na prática garantido em um laser à fibra óptica.

Devido à possibilidade de gerar a luz laser no núcleo de uma fibra monomodo, obtém-se uma alta qualidade do padrão luminoso transversal num formato gaussiano com diâmetro micrométrico, o que permite o seu uso focalizado ou não no corte de diversos materiais, pois a intensidade (potência/área) de saída pode ser bastante alta.

Um laser à fibra é bastante eficiente do ponto de vista térmico pois utiliza um grande percentual da energia da entrada entrada (por exemplo em 980 nm) para a conversão da potência luminosa de saída (por exemplo em 1550 nm). Então, menos energia está sendo desperdiçada convertendo-se em calor. Ao mesmo tempo, o pouco calor que é produzido fica distribuído no comprimento da fibra, igualmente, de forma a não superaquecer e danificar os componentes. Por sua composição, o laser à fibra óptica é fácil de refrigerar, mantendo-se eficiente (e espectralmente estável) ao mesmo tempo, ou seja um consumo

menor de energia.

No caso do laser à fibra, o espelho 100% reflexivo pode ser substituído por *loop* de fibra óptica, configurando-se em um interferômetro de Sagnac. O espelho de saída por um acoplador de saída e o meio de laser ativo por um amplificador óptico como o Amplificador de Fibra Dopada com Erbium, na Figura 2.23 são apresentados alguns possíveis tipos de laser à fibra óptica.

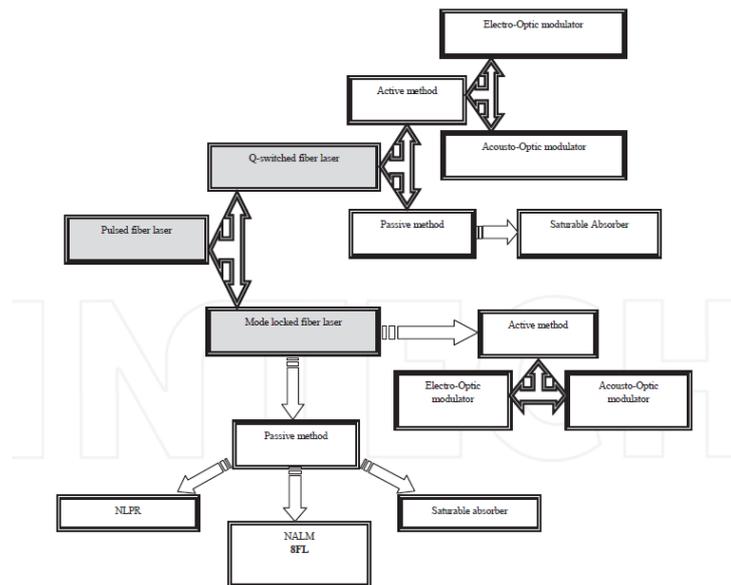


Figura 2.23: Diferentes tipos de laser à fibra óptica [24].

Muitas configurações sofisticadas de ressoador têm sido usadas particularmente para lasers de fibra de modo bloqueado (*mode-locking*), gerando pulsos de picossegundo ou femtossegundo. Um laser à fibra pode conter um modulador eletro-óptico, um modulador acústico-óptico para bloquear de forma ativa ou um absorvedor saturável para bloquear de forma passiva os diferentes modos longitudinais que oscilam na cavidade [24].

Os lasers à fibra no regime de *mode-locking* (modo travado) passivo têm a vantagem de ser inteiramente constituídos por componentes ópticos. Eles não necessitam de componentes elétricos externos e o regime de modo travado na cavidade é realizado automaticamente [24].

No entanto, esses lasers em regime de *mode-locking* passivo através do fenômeno do HML é possível elevar a taxa de repetição sem reduzir o comprimento da cavidade. Assim, a taxa de repetição dos pulsos gerados depende do comprimento da cavidade [25, 26].

O ressoador a laser pode apresentar um absorvedor saturável, tal como SESAM (*Se-*

semiconductor Saturable Absorber Mirror) [24] para bloquear o modo passivo da cavidade, conforme apresentado na Figura 2.24.

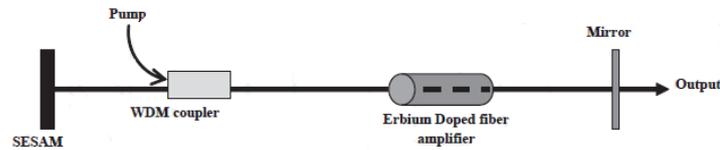


Figura 2.24: Absorvedor saturável no regime de modo travado passivo [24].

2.10 *Q-Switching*

O *Q-Switching* é uma técnica utilizada na geração de pulsos de curta duração e com intensa rajada de irradiação *laser*. Para que se possa obter a geração desse tipo de pulsos é necessário a ocorrência dos modos longitudinais igualmente espaçados oscilando no interior da cavidade ressonante. Adicionalmente, para ocorrer esse tipo de oscilação é também fundamental que ocorra uma inversão de população para que as perdas da cavidade sejam reduzidas e os modos oscilantes sejam dominantes.

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 na equação 2.11:

$$Q = \frac{\nu}{\Delta\nu} \quad (2.11)$$

Sendo ν , a frequência óptica central de operação enquanto $\Delta\nu$ é a largura de linha do dispositivo *laser*.

Conforme os fundamentos básicos do *laser* apresentados anteriormente, é notório que o *laser* precisa realizar a inversão de população para que entre no modo de operação *laser*. No processo de inversão de população, ocorre o armazenamento de portadores de carga no chamado nível metaestável do material que se constitui como o meio de ganho do *laser*.

De forma natural, o bombeamento do *laser* injeta portadores no estado metaestável e também de forma natural, as portadores decaem emitindo fótons por emissão estimulada e então entra no modo de operação *laser*.

Entretanto, o circuito de acionamento do *laser* pode ser tal que o armazenamento de portadores no estado metaestável se prolongue. Logo o meio de ganho acumula energia potencial através de portadores energéticos que estão estocados. Assim, após um certo

tempo o circuito de oscilação é aberto e grande quantidade de portadores energéticos decaem gerando pulsos de luz de grande potência de pico e com curta duração, tipicamente na faixa de nanossegundos.

Atrasando o início da oscilação, é possível obter uma inversão de população maior e, portanto, uma potência de saída mais alta do que seria obtida. Isto é possível através da inserção de um obturador óptico adequado, conhecido como fator Q , na cavidade do *laser*. O obturador é fechado no início do bombeamento do pulso e aberto quando a inversão da população é máxima.

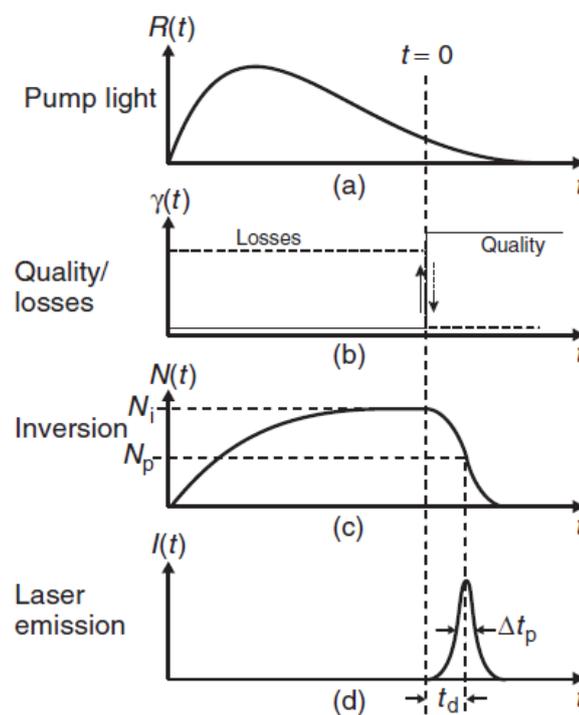


Figura 2.25: Representação da variação dos parâmetros do Q -Switching [17].

A técnica de *Q-switching* é apresentada na Figura 2.25. É possível observar através da Figura 2.25 (a) Formato temporal do pulsos óptico de bombeio; (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. As larguras temporais típicas dos pulsos *Q-switching* são da ordem de micro-segundos à nano-segundos [17].

O fator de qualidade é ajustado no interior do ressonador e a sua performance ocorre quando é inserida uma perda que varia ao longo do tempo [16]. Assim após a ocorrência de uma grande inversão da população, é atingido um fator de qualidade alto, ou seja, a

perda é reduzida e conseqüentemente o ressoador é rapidamente alterado para um alto fator de qualidade (Figura 2.25b), o que permite que o sistema comece a sofrer uma grande inversão da população e emita um pulso de luz com uma alta potência (Figura 2.25 d) [17].

Logo é possível concluir, que quanto menor a perda, maior o fator Q e menor a densidade de inversão de população necessária para a oscilação. Essa mudança no fator de qualidade do ressoador óptico pode ser realizada mecanicamente, colocando uma roda obturadora no ressoador ou girando um espelho em torno de um eixo perpendicular ao eixo do *laser* ou é feito eletricamente, ou opticamente, girando o plano de polarização pelo efeito Faraday ou pelo efeito Kerr [17].

Existem vários métodos de *Q-switching*. Um método simples é o que consiste na rotação de um dos espelhos ressoadores a uma taxa alta em torno de um eixo perpendicular ao eixo óptico da cavidade do *laser*. Isso "estraga" a cavidade e evita a oscilação, exceto por um período muito curto durante o ciclo de rotação. Um segundo método utiliza um obturador eletro-óptico na cavidade do *laser* [17].

As células de Pockels são comumente usadas para esta aplicação. A célula de Pockels é "aberta" com um pulso de alta voltagem que é apropriadamente atrasado em relação ao pulso óptico. Um terceiro método emprega o que é conhecido como um absorvedor saturável. Que consiste em um tipo de absorvedor saturável que quando fortemente irradiado, acaba gerando nos níveis superiores saturação e, portanto, não ocorre mais absorção. Isso é conhecido como método *Q-switching* passiva [17].

Com o uso da comutação Q , é possível obter potências de pico muito altas. Potências cada vez mais altas podem ser obtidas passando o feixe de saída de um *laser Q-switching* através de um amplificador (óptico) ou de uma série de amplificadores. Dessa maneira, é possível produzir pulsos na região de gigawatts (GW) e terawatts (TW). [27]

2.11 *Mode Locking*

Enquanto que na técnica de *Q-switching*, um pulso de curta duração e com intensa rajada de irradiação laser é produzido durante cada bombeamento do laser, no chamado laser em "modo travado", um trem de pulsos extremamente estreitos no tempo, igualmente espaçados (no tempo) e taxa de repetição bastante estável são produzidos, diretamente dependente do material que preenche a cavidade e o seu comprimento físico. Uma cavidade ressonante pode suportar diversos modos longitudinais diferentes no seu interior, oscilando

simultaneamente.

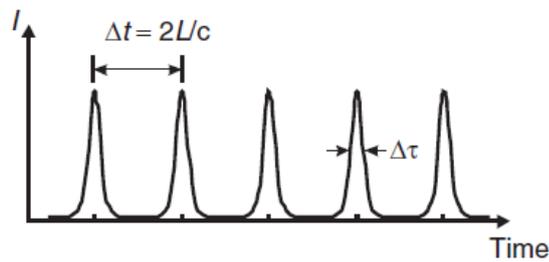


Figura 2.26: Formato temporal de emissão do laser *mode locking*. [17]

Na Figura 2.26 [17] é possível verificar o formato temporal de emissão do laser em regime *mode locking*, o respectivo período e a largura dos pulsos.

Já na Figura 2.27 [24] é possível identificar que o espectro de saída de um laser em regime *mode locking* depende da banda de ganho do laser e os modos longitudinais que se propagam na cavidade ressonante.

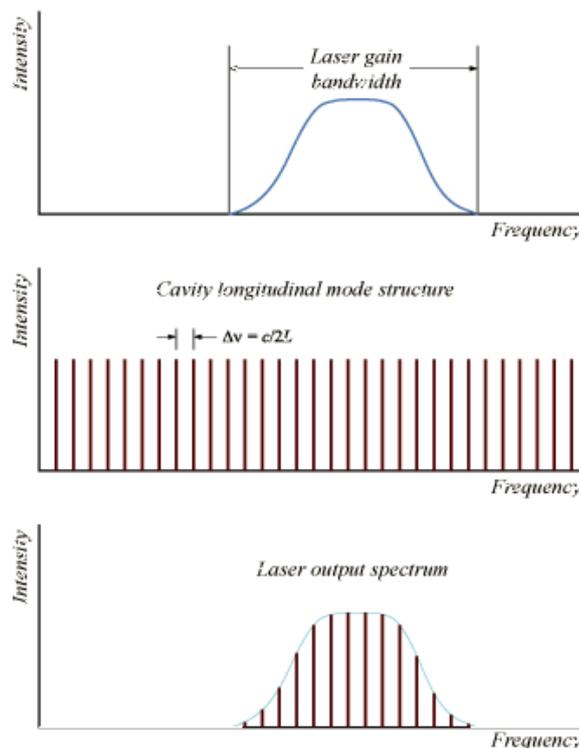


Figura 2.27: Estrutura espectral da emissão do *laser mode locking*. [24]

Na Figura 2.28 [24] é possível verificar que a saída de um laser em função do tempo depende das fases, frequências e amplitudes relativas dos modos, e o campo elétrico total

como uma função do tempo pode ser escrito de acordo com a equação 2.12.

$$\varepsilon(t) = \sum_{n=0}^{N-1} (\varepsilon_0)_n e^{i(\omega_n t + \delta_n)} \quad (2.12)$$

Sendo $(\varepsilon_0)_n$, ω_n e δ_n respectivamente a amplitude, frequência angular e fase do modo n th. Usualmente, esses parâmetros sempre estão variando entre si, então os modos são incoerentes. Assim, a saída de um laser em função do tempo depende das fases, frequências e amplitudes relativas dos modos longitudinais. Nessa situação pode ser demonstrado que a irradiação total, I , é simplesmente a soma das irradiações dos modos individuais, conforme apresentado na Figura 2.28.

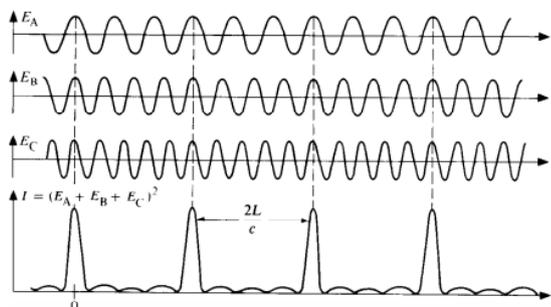


Figura 2.28: Estrutura da emissão do laser *mode locking* [24].

Portanto, se houver N modos ao todo e considerando que todos eles possuem a mesma amplitude ε_0 , então é possível ter a seguinte relação apresentada na 2.13.

$$I = N\varepsilon_0^2 \quad (2.13)$$

Em uma cavidade a laser, as frequências que circulam no ressonador e com mais ganho do que perdas são chamadas de modos longitudinais. Eles podem ser considerados como um conjunto de osciladores independentes. Esses modos aumentam após cada ida e volta pela cavidade. No entanto, quando existe uma relação de fase fixa entre os vários modos, a cavidade emite um trem de pulsos e fica travada na fase.

A Figura 2.28 apresenta o sinal de saída da cavidade laser na situação de "modo travado" ou regime *mode locking*, resultando na propagação de modos longitudinais dependentes de três fases. De fato, essa técnica consiste em criar uma certa relação de fase entre os diferentes modos que oscilam na cavidade.

Os *lasers* à fibra operando em regime *mode locking* são dispositivos ultrarrápidos utilizados para produzirem pulsos da ordem de poucos picosegundos ou até femtosegundos. Este dispositivo pode ser construído utilizando um absorvedor saturável [24] ou através de um par de anéis de fibra óptica não-linear em conjunto com controladores de polarização NALM (*Nonlinear Amplifier Loop Mirror*) [28].

O laser em regime *mode locking* funciona como uma ferramenta experimental para diversas aplicações, por exemplo, em redes ópticas passivas (*Passive Optical Network* (PON)), dispor de um *laser* com baixo ruído de fase, para gerar pulsos ópticos de amostragem na digitalização fotônica [5, 10].

2.12 Interferômetro de Sagnac

O interferômetro de Sagnac é classificado como um interferômetro de duas ondas, pois nele também se propagam duas ondas que percorrem dois caminhos diferentes. No caso dos interferômetros Sagnac, as duas ondas se propagam na mesma fibra, mas em sentidos opostos.

O interferômetro de Sagnac ou interferômetro de anel, o campo de luz incidente é dividido em duas partes. Embora o caminho percorrido pelos dois feixes seja o mesmo, os dois feixes viajam em direções angulares opostas (ou seja, no sentido horário e anti-horário). Depois de completar a trajetória do *loop*, os dois feixes se combinam no ponto de entrada e passam a interferir entre si (Figura 2.29). Como os dois feixes se movem em direções angulares opostas, o sinal de interferência no acoplador é altamente sensível ao movimento angular do próprio Sagnac *loop*. Os interferômetros Sagnac encontraram aplicações em fibra óptica e giroscópios [29].

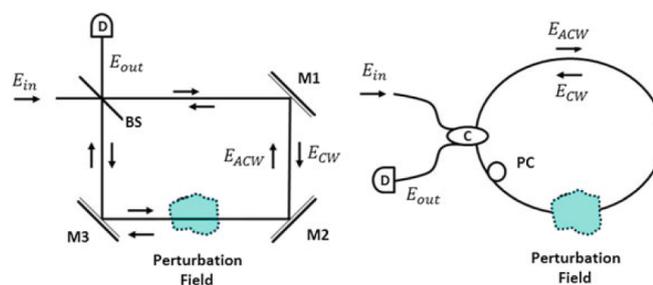


Figura 2.29: Interferômetro de Sagnac. [29]

Um exemplo de uma aplicação em giroscópio é apresentado na Figura 2.30 onde é

possível observar o esquema básico de um interferômetro de Sagnac passivo, onde um acoplador óptico divide a luz proveniente da fonte em duas ondas contra-propagantes, sendo uma no sentido horário (*clockwise*), e outra no sentido anti-horário (*conterclockwise*), as ondas são então recombinadas no fotodiodo.

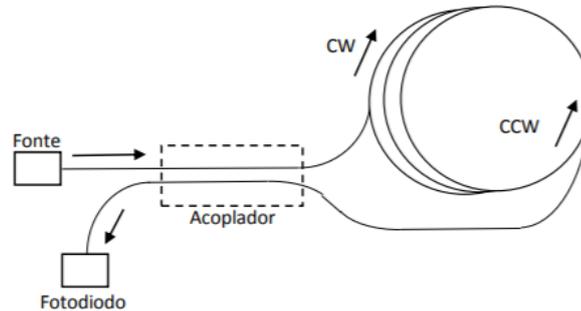


Figura 2.30: Giroscópio.

Essa diferença de fase é então acumulada ao longo da bobina de fibra, o que proporciona uma boa resposta com um dispositivo compacto.

Um interferômetro óptico do tipo Sagnac pode ser construído, conforme apresentado na Figura 2.31, ligando-se uma fibra entre as duas portas de saída de um acoplador para formar um anel. Por uma das portas de entrada do acoplador se envia um sinal luminoso (A_1) e pela outra porta de entrada do acoplador tem-se o sinal transmitido. Esse sinal, ao passar pelo acoplador, é dividido em dois feixes A_f e A_b , "forward" e "backward" respectivamente [28].

Esses sinais, após percorrerem o laço, chegam novamente ao acoplador onde sofrem interferência e parte do sinal sai pela porta de saída transmitida (A_T) e parte pela porta de saída refletida (A_R).

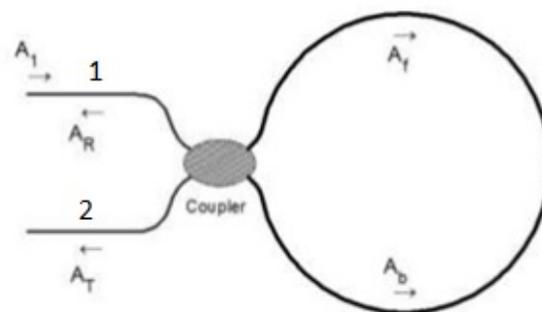


Figura 2.31: Interferômetro de Sagnac [28].

Existem aplicações em que se deseja que uma certa fração de luz retorne para a porta 1 e 2. Sendo necessário controlar a birrefringência da fibra mas sem mexer diretamente na fibra, então para ser possível realizar esse tipo de manipulação é necessário utilizar o *Polarization Controller* (PC).

2.13 Espelho óptico não-linear em anel (NOLM)

O conceito de *NonLinear Optical Loop Mirror* (NOLM) foi proposto por Doran e Wood [30]. É basicamente um interferômetro Sagnac baseado em fibra que usa a mudança de fase não linear de fibra óptica para comutação óptica. Esta configuração é inerentemente estável uma vez que os dois braços da estrutura residem na mesma fibra e no mesmo comprimentos de onda para os sinais que se propagam em ambos os braços.

Não há mecanismo de *feedback* nesta estrutura, uma vez que todas as ondas de luz entram na porta de entrada e saem do *loop* após uma única viagem de ida e volta. O NOLM em sua forma mais simples contém um acoplador de fibra, com duas de suas saídas portas conectadas, como mostrado na Figura 2.32, onde K é o relação de acoplamento, e E_1, E_2, E_3 e E_4 são os campos nas portas 1, 2, 3 e 4, respectivamente. O NOLM considerado aqui apresenta polarização independente [28].

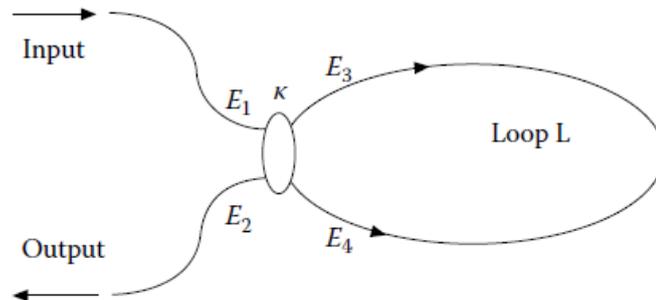


Figura 2.32: Estrutura do NOLM [28].

Sob condição sem perdas, as relações de entrada-saída de um acoplador com relação de acoplamento de K são:

$$E_3 = \sqrt{1 - KE_1} + j\sqrt{KE_2} \quad (2.14)$$

$$E_4 = \sqrt{1 - KE_2} + j\sqrt{KE_1} \quad (2.15)$$

Se uma luz de baixa intensidade é injetada na porta 1, ou seja, nenhum efeito não linear é gerado, a intensidade de transmissão, T , do dispositivo é dada por:

$$T = \frac{P_{out}}{P_{in}} = 1 - 4K(1 - K) \quad (2.16)$$

Temos que se $K = 0,5$, toda a luz será refletida de volta para a entrada, daí o nome espelho em *loop*, caso contrário, as ondas de luz de contra-propagação no *loop* terão diferentes intensidades, levando a diferentes mudanças de fase não lineares. Este dispositivo pode ser projetado para transmitir um sinal de alta potência enquanto o reflete em baixa nível de potência, agindo assim como um "*switch*" totalmente óptico.

2.14 Espelho não-linear amplificante em anel (NALM)

A estrutura do NALM é um pouco semelhante à estrutura do NOLM, e é uma exploração aprimorada do NOLM. Para a configuração NALM, um meio de ganho com coeficiente de ganho, G , é adicionado para aumentar a assimetria da não linearidade dentro do *loop*. O amplificador é colocado em uma extremidade do *loop*, mais perto da porta 3 do acoplador, e é considerado curto em relação ao comprimento total do *loop*, conforme mostrado na Figura 2.33 [28].

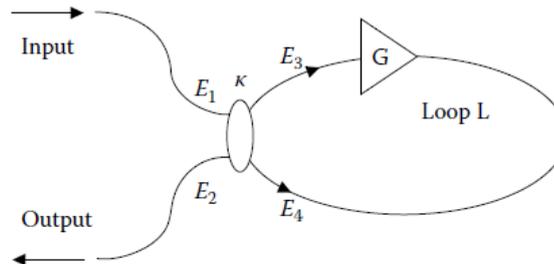


Figura 2.33: Estrutura do NALM. [28]

Uma onda de luz é amplificada na entrada do *loop*, enquanto o outro experimenta a amplificação apenas antes de sair do *loop*. Uma vez que as intensidades das duas ondas de luz diferem por uma grande quantidade ao longo do circuito, a mudança de fase diferencial pode ser bem grande. A sua função de transferência descreve a transmissão (T) e a reflexão (R) periódicas dos pulsos no tempo e é representada pela equação 2.17, onde G_{SOA} é o ganho SOA e $\Delta\phi$ é a diferença de fase não linear entre os feixes de contra-propagação [31].

$$T = \frac{I_2}{I_1} = 0.5G_{SOA}[1 - \cos(\Delta\phi_{NL}(G_{SOA} - 1))] \quad (2.17)$$

Assim, essa estrutura 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 à 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 que pode ocorrer de forma construtiva, destrutiva ou mista [28].

2.15 Controlador de polarização 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 (2,4,2 voltas), onde a bobina de meia onda (HWP) tem o dobro de voltas em relação às bobinas de quarto de onda (QWP). A Figura 2.34 mostra o esquema descrito [32].

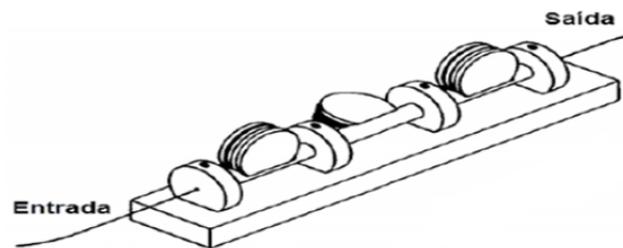


Figura 2.34: Estrutura do Controlador de Lefevre.

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.

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 [32].

Assim, através das curvas é possível aumentar a birrefringência (a birrefringência é uma propriedade óptica de um material que possui diferentes índices de refração para diferentes direções de propagação da luz.), quando a luz faz as duas voltas, os dois componentes de campo elétrico se defasam de $\pi/4$, e isso se torna uma defasagem de $\lambda/4$, no caso de 4 voltas se defasa de $\pi/2$.

2.16 Mecanismos de *mode-locking* passivo

Quatro mecanismos para se obter *mode-locking* passivo em lasers à fibra óptica se destacam e estão listados a seguir com uma breve explicação para cada:

1. Absorvedor saturável “tradicional”

A técnica consiste basicamente em implementar uma estrutura constituída de duas camadas (2) cada qual de um filme fino mono ou multicamada depositado na extremidade da fibra óptica. A 1^a camada serve de fato como um “absorvedor saturável”, enquanto que a 2^a camada serve de refletor (espelho).

A referida estrutura opera essencialmente de forma “tradicional” dentro do *mode-locking* passivo à fibra onde sinais ópticos de baixa intensidade são absorvidos na 1^a camada não havendo reflexão. Os sinais de alta intensidade experimentam uma condição de transparência na mesma 1^a camada, sendo então refletidos de volta a cavidade pela 2^a camada. Como exemplos que aparecem na literatura, podemos citar: o *Semiconductor Saturable Absorber Mirrors* (SESAM), nanotubos de carbono, grafeno, MoS_2 (dissulfeto de molibdênio), etc [33, 34].

2. NOLM (*Nonlinear Optical Loop Mirror*)

Trata-se da versão menos aprimorada do NALM, onde apenas componentes ópticos passivos são usados, como por exemplo: acopladores, fibras e atenuadores. Não há necessidade de energização como no caso do NALM. Para obter fase diferencial não-linear e então o chaveamento, pode-se por exemplo utilizar um interferômetro de Sagnac com um acoplador com razão de acoplamento diferente de 50:50 [35].

Mesmo usando um acoplador 50:50, é possível “quebrar” a simetria do anel então obter o chaveamento. Dentre as técnicas de “quebra” da simetria do anel de Sagnac, podemos destacar: i) Manipulação da polarização levando em conta a birrefringência

da fibra[30]. ii) Inserção não-simétrica no anel de um segmento de HNLF (*High Nonlinear Optical Fibre*) [36]. iii) Inserção não-simétrica no anel de um atenuador, etc. O uso do NOLM como técnica de chaveamento, em geral requer o uso de potências ópticas de entrada mais altas dentro do F8L que no caso do NALM [28].

3. NALM (*Nonlinear Amplifying Loop Mirror*)

É a técnica adotada nesta Dissertação, conforme vem sendo explicada em partes ao longo deste Capítulo 2. Lembrando então que um NALM é constituído essencialmente de um interferômetro de Sagnac à fibra óptica com um amplificador óptico inserido no anel.

Normalmente o amplificador óptico usado é um SOA ou um segmento de fibra óptica dopada com algum(as) terra(s) rara(s). Em um certo sentido, um dispositivo NALM é considerado como sendo um “absorvedor saturável artificial”, no sentido de que não absorve de fato a luz, mas sim realiza um chaveamento entre duas portas de saída, ou seja, braço de reflexão R e de transmissão T, ou seja, braço de reflexão R e de transmissão T conforme mostrado na Figura 2.33 [28].

Pode-se ajustar o estado de polarização de forma que as baixas intensidades ópticas são refletidas pelo interferômetro de Sagnac, saem então pela porta R, sendo então bloqueadas pelo isolador óptico inserido no F8L. As altas intensidades são transmitidas pelo dispositivo, saem pela porta T, e seguem para oscilação no anel de ressonância podendo resultar em uma saída *mode-locking* do F8L.

Esta técnica é por vezes referenciada como uma versão "aprimorada" do NOLM, no sentido da inserção de um amplificador óptico que deve ser energizado. No caso do SOA com corrente de I_{bias} , no caso da fibra dopada, com laser de diodo de bombeio (*pump*). Deve-se notar que não há a entrada de qualquer sinal de RF, mas apenas saída se houver *mode-locking* passivo.

NPR (*Nonlinear Polarization Rotation*)

Trata-se de uma técnica de chaveamento que utiliza um SOA (com I_{bias}) ou fibra dopada (com laser de bombeio). A técnica também utiliza componentes passivos que lidam com a polarização da luz. Enquanto o NALM é baseado no chaveamento via modulação da fase diferencial não-linear, o NPR realiza o processo via modulação não-linear diferencial da polarização [37].

As 4 técnicas para obtenção de *mode-locking* passivo em lasers à fibra anteriormente descritas, apresentam cada uma, vantagens e desvantagens. Porém, uma descrição deta-

lhada foge ao escopo desta Dissertação. Aqui, adotamos o NALM com um único SOA inserido, entre outras razões, pela possibilidade de integração óptica [38]. Fibras ópticas de comunicações ou fibras dopadas para amplificação óptica não são consideradas compatíveis para circuitos ópticos integrados com dimensões da ordem de mm ou cm [38].

2.17 O dispositivo F8L e um estudo bibliográfico focado

2.17.1 Introdução e o arranjo experimental básico

Deve-se aqui lembrar, que o dispositivo F8L não foi diretamente descrito no Capítulo 2 desta Dissertação. Porém, no Capítulo 2 foram descritos os sub-sistemas que compõem o F8L com base na literatura disponível. De acordo com o esquema da Figura 5.1, um dispositivo F8L é classicamente formado por anéis à fibra óptica interconectados entre si, que permite que operação (do F8L) no regime de *mode-locking* passivo. Conforme já é conhecido e aqui neste trabalho confirmado, o F8L pode se auto-iniciar (*self-starting*) no regime de *mode-locking* passivo.

Se o SOA for o meio de ganho, então o self-starting do F8L poderá ocorrer a partir de um certo valor de energia fornecida através da alimentação de I_{bias} do SOA, ou seja, para uma I_{bias} acima de um certo valor limiar. Porém, só um ajuste de I_{bias} não basta, porque o F8L é em geral construído com fibra óptica não-mantenedora de polarização. Sendo assim, torna-se necessário otimizar o estado de polarização da luz que se propaga ao longo do SOA no sentido de se obter um máximo contraste de chaveamento no NALM (ver Capítulo 2) para provocar uma diferença de fase significativa entre os feixes interferentes na junção do “oito” (ver Figura 5.1).

2.17.2 Análise de dispositivos F8L com NALM usando SOA único como amplificador/modulador

Os SOAs além de serem de uso versátil, compactos e compatíveis com a integração óptica, possuem espectro de ganho largo, possibilitando então a produção de pulsos ópticos ultracurtos em sub-picossegundos e em femtossegundos. A maior parte dos artigos publicados que descrevem um dispositivo F8L visando *mode-locking* passivo, faz uso de fibras ópticas dopadas com terras raras (Er, Yb, Ho, etc.) como meio de ganho/modulação, ou seja, usa a técnica de NALM ou NPR (Nonlinear Polarization Rotation) como absorvedores saturáveis “artificiais”. Alguns artigos descrevem o uso de um SOA em combinação com

fibra dopada, por exemplo, com Érbio [39].

Entretanto, apenas alguns poucos artigos foram encontrados reportando um dispositivo F8L em *mode-locking* passivo baseado em um NALM com a inserção de um único SOA como meio de ganho/modulação: como exemplos temos os artigos [40] de 2009, [9] de 2013, [41] de 2015, e os [42, 43] ambos de 2017.

O artigo [40] de 2009, descreve a obtenção de um trem de pulsos HML usando o F8L com SOA que emite em 1536 nm. Em [40] foi obtido *mode-locking* em 1,7 GHz e não foi usado filtro óptico BPF na cavidade. Normalmente um F8L apresenta uma saída em baixo *duty-cycle*, ou seja, pulsos ultra-curtos (< 10 ps) em taxas de repetição de MHz ou poucos GHz. Porém, as comunicações digitais requerem um *duty-cycle* da ordem de $\approx 50\%$. Enfim, o artigo [40] resolve 3 problemas do F8L em *mode-locking* passivo usando uma montagem experimental bastante simples:

1. Consegue altas taxas (> 1 GHz) usando HML = 92.
2. Consegue $\approx 50\%$ de *duty-cycle* usando acoplador 90/10 entre os anéis de Sagnac.
3. Obtém *self-starting* com reprodutibilidade.

Na Figura 1 de [40] reproduzida aqui como Figura 2.35, está o esquema experimental bastante simples de um F8L.

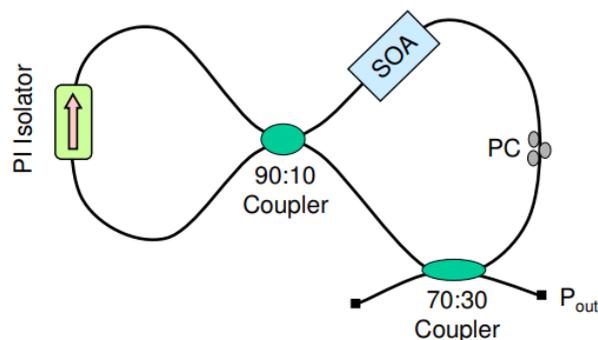


Figura 2.35: Figura extraída de [40] onde temos o esquema experimental bastante simples do F8L lá utilizado.

Na Figura 3 de [40] reproduzida a seguir como Figura 2.36, são mostrados trem de pulsos em 1,2 GHz e em 1,7 GHz, ambos apresentando um *duty-cycle* próximo de 50% porque, segundo os autores de [40], foi utilizado um acoplador 90/10 entre o interferômetro de sagnac e o anel que estabelece a cavidade ressonante.

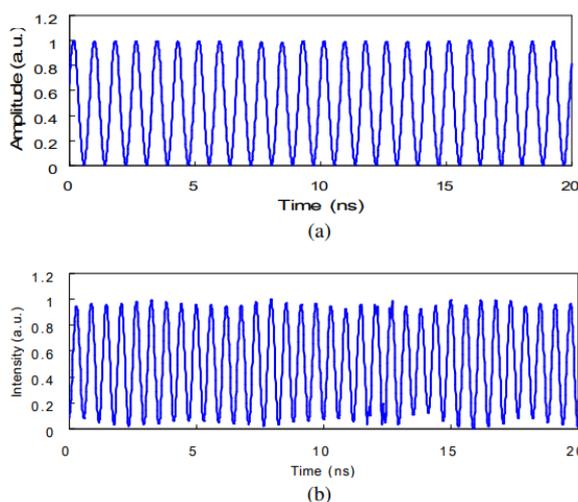


Figura 2.36: Figura extraída de [40] onde temos $\approx 50\%$ de *duty-cycle* para trem de pulsos *mode-locking* em (a) 1,2 GHz e (b) 1,7 GHz.

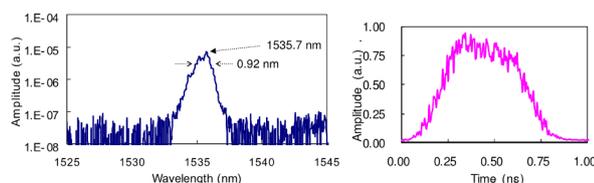


Figura 2.37: Figura extraída de [40] compreendendo o espectro óptico do F8L lá descrito (a) e pulsos de saída no domínio do tempo na taxa de 1,2 GHz (b).

A Figura 2.37 de [40] mostra um espectro óptico com características indentadas e pulsos de saída com formato temporal aproximadamente retangular para 1,2 GHz e duração de ≈ 350 ps. Para 1,7 GHz também foi obtido um formato aproximadamente retangular, porém com duração de ≈ 250 ps. O trabalho [40] conseguiu HML = 92 onde 860 MHz ou 1,7 GHz de frequência de *mode-locking* passivo podiam ser atingidos com um mesmo valor de I_{bias} , só acionando com o PC (*Polarization Controller*). Observou-se também em [40], a geração de algumas frequências seletivas de *mode-locking* e uma potência média de saída de $\approx 0,82$ mW para 180 mA.

Em [9] de 2013, temos o relato de um F8L operando em $1,06 \mu\text{m}$. A Figura 2.38, reproduzindo a Figura 3 de [9], mostra a evolução do espectro óptico de saída com o aumento de I_{bias} .

O padrão obtido a partir de um OSA [9], é de um espectro com modulações (*ripple*) mais acentuadas no seu topo quando se compara com o que foi reportado em [40], e está ligado com a saída de pulsos *mode-locking* de formato gaussiano no tempo que pode ser visto na Figura 5 de [9], conforme reproduzido aqui como Figura 2.39.

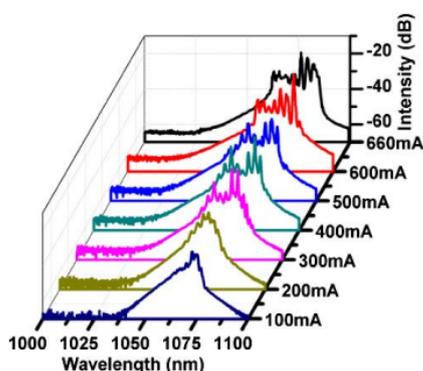


Figura 2.38: Figura extraída de [9] compreendendo o espectro óptico do F8L lá descrito em função do I_{bias} aplicado.

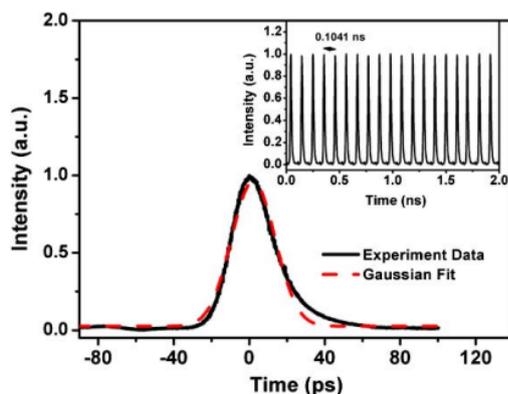


Figura 2.39: Figura extraída de [9] compreendendo um trem de pulsos *mode-locking* de saída e o formato gaussiano de um pulsos.

No artigo [41] de 2015 é reportado que pulsos *clockwise* (CW) e *counter-clockwise* (CCW) de mesma largura temporal no interferômetro Sagnac à fibra, se superpõem na saída podendo formar um pulso “escuro” (*dark pulse*) onde os pulsos interferentes possuem polarizações distintas, mas não são ortogonais entre si [41]. A Figura 2.40 reproduz as Figuras 3 do artigo [41] onde são mostrados trem de pulsos *mode-locking* retangulares com formação de *dark pulses*, assim como o espectro óptico correspondente.

Mudanças na configuração do NALM podem mudar os pulsos ópticos gerados [41]. Ajustando o tamanho da cavidade e a posição do SOA no anel, foi possível fazer variar a duração dos pulsos retangulares [41]. Estes últimos, centrados em 1550 nm e cobrindo a faixa temporal de 74-20 ns, foram produzidos em *mode-locking* contendo *dark pulses* ultra-curtos [41].

Em [39, 42] são agora reportados também o uso de um único SOA inserido em um dispositivo F8L operando em *mode-locking* passivo mas agora funcionando na banda C e L das comunicações à fibra óptica. As referências [42, 43] relatam que a medida que o

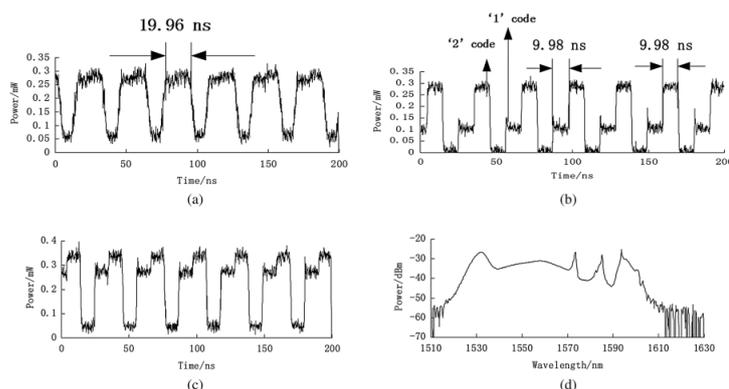


Figura 2.40: Figura extraída de [41] compreendendo a saída sob a forma de pulsos retangulares com formação de *dark pulses*, assim como o espectro óptico correspondente.

I_{bias} aplicado no SOA aumenta, isto favorece o surgimento de emissões HML estáveis. A Figura 2.41 reproduz o esquema experimental bastante simples do F8L que é reportado em [43] onde não há uso de filtro óptico BPF.

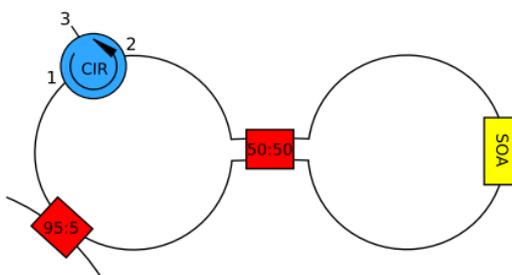


Figura 2.41: Esquema experimental bastante simples (F8L) reportado em [43].

A Figura 2.42 reproduz o espectro óptico do F8L que é reportado em [43] onde deve-se ter em mente que não foi utilizado qualquer filtro óptico na cavidade. Isto torna possível gerar pulsos ultra-curtos. Pode-se notar a presença de idetações e uma assimetria que se forma com um aumento de I_{bias} .

A Figura 2.43 reproduz a saída sob a forma de trem de pulsos *mode-locking* cuja taxa de repetição era observada variar em função de I_{bias} aplicado [43]. Pulsos de 247 fs de duração em formato $sech^2$ puderam ser obtidos [42, 43].

2.17.3 Análise de dispositivos F8L com NALM de fibra dopada como amplificador/modulador

O artigo [44] de 2021, mostra o desenvolvimento de um F8L em *mode-locking* passivo com fibras e componentes mantenedores de polarização utilizando um NALM baseado em

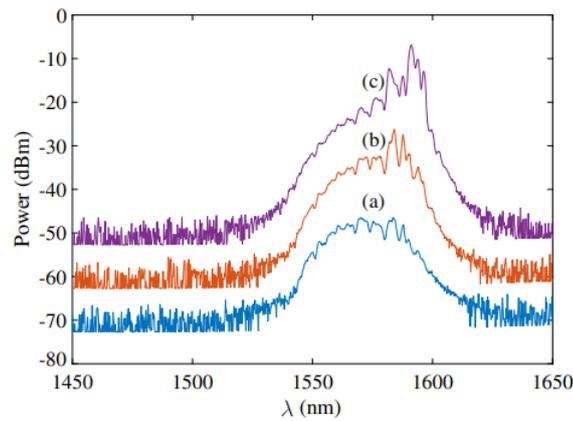


Figura 2.42: Espectro óptico em função de I_{bias} para o F8L reportado em [43].

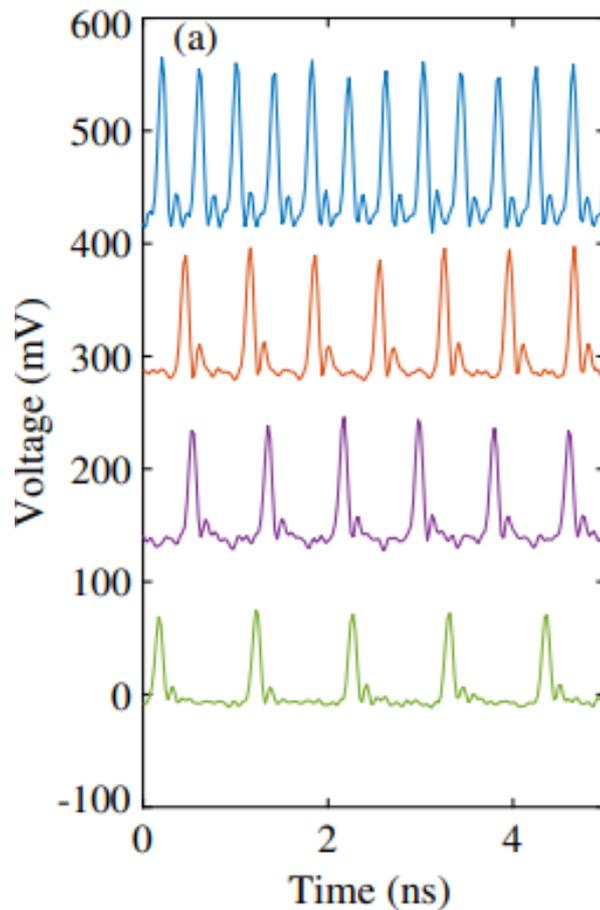


Figura 2.43: Trem de pulsos *mode-locking* com frequência variável em função de I_{bias} conforme reportado em [43].

fibra dopada com Er (EDFA), para aplicações espaciais. Conforme mostrado na Figura 2.44 reproduzido de [44], o espectro óptico na condição de *mode-locking* resultou em um espectro com contorno suave de largura de 45,1 nm. O espectro óptico não possui identificações.

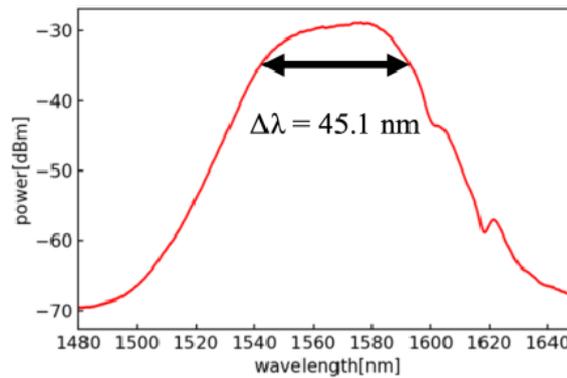


Figura 2.44: Figura reproduzida de [44] onde é mostrado o espectro óptico da emissão do F8L lá descrito.

A largura espectral de 45,1 nm corresponde a aproximadamente 5637,5 GHz, o que de acordo com $\Delta\tau\Delta\nu \approx 0,31$ para pulsos solitônicos com formato de $sech^2$, resulta em $\Delta\tau \approx 55$ fs na faixa de 1550 nm. É um resultado consistente com o 62 fs reportado por [44].

2.17.4 Análise geral de dispositivos F8L em *mode-locking* passivo

Considerando uma grande quantidade de modos longitudinais oscilando em uma cavidade laser bem sincronizados entre si, pode-se obter um trem de pulsos curtos no tempo como resultante da interferência construtiva entre os referidos modos, que consiste no próprio fenômeno de *mode-locking*.

Na Figura 2.45, reprodução da Figura 2 de [45], é mostrado uma simulação numérica para um número crescente de modos sincronizados, implicando na formação de pulsos curtos. Para $N = 3$ os pulsos ainda são largos e entre um pulsos e outro há uma formação que desaparece para maiores valores de N . Então, temos um *mode-locking* imperfeito para pequenos valores de N e vice-versa [45].

Um gerenciamento apropriado da dispersão na cavidade do laser à fibra, permite usar toda a banda de ganho disponível do referido meio de ganho. Quando não houver filtro óptico BPF na cavidade, então grande quantidade de modos longitudinais irá oscilar e o que se espera é um espectro de saída mais alargado, podendo ser da ordem de dezenas de nm para o caso de um SOA.

Sendo o espectro óptico mais largo, o F8L terá um maior potencial para gerar pulsos ultra-curtos, por exemplo até da ordem de dezenas de femtossegundos. Dependendo do projeto da cavidade ressonante e do seu gerenciamento dispersivo, pode-se conseguir pulsos

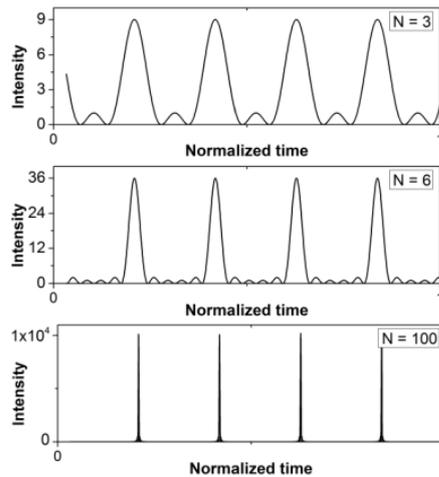


Figura 2.45: Figura extraída de [45] mostra por simulação a formação de pulsos curtos via *mode-locking*.

de saída de formato gaussiano (pulsos convencionais brilhantes) indo até ao formato $sech^2$ (pulsos solitônicos brilhantes) [45].

A diferença no formato temporal é relativamente pequena, mas os efeitos dispersivos em cada caso são bem distintos. A Figura 2.46 extraída de [45] esquematiza o espectro de saída de dispositivos F8L para cavidades com dispersão líquida anômala ($GDD < 0$), normal ($GDD > 0$) e gerenciada com valor líquido perto de zero ou com módulo muito baixo ($|GDD| \approx 0$).

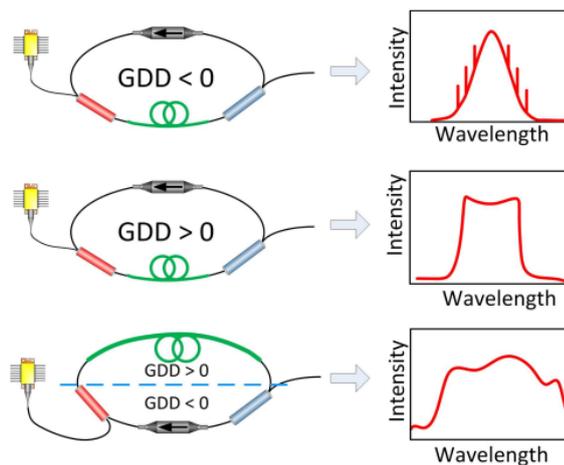


Figura 2.46: Figura extraída de [45] que mostra os espectros típicos de saída de um F8L conforme a dispersão líquida da cavidade.

Detalhando pouco mais a Figura 2.46 a partir do publicado em [45] onde não há filtros espectrais inseridos na cavidade, pode-se então descrever sinteticamente o seguinte:

1. F8Ls operando em 1550 nm construído com fibras ópticas SM padrão com SOAs

ou EDFAs como meios de ganho/modulação, operam no regime dispersivo anômalo ($GDD < 0$). Podem então emitir sólitons ópticos com espectro anômalo contendo as chamadas bandas laterais de Kelly (Kelly sidebands) [45].

2. Um circuito de F8L construído com fibra óptica SM padrão, mas utilizando, por exemplo, fibra dopada com Yb como amplificador/modulador, irá operar no regime dispersivo normal pois irá emitir em 1040 nm. Então, como $1040 \text{ nm} < 1300 \text{ nm}$, teremos e o dispositivo irá operar em ($GDD > 0$). O espectro característico de saída será do tipo *flat very broad top + steep edges* [45].
3. Um circuito de F8L construído com fibras ópticas SM padrão e fibras especiais, podem compor um circuito gerenciado em dispersão de modo a ser do tipo *near-zero dispersion* ($|GDD| \approx 0$). Para este caso está associado um espectro óptico de saída do tipo *very broad spectrum* [45].

Capítulo 3

Caracterização Estática do Amplificador Óptico Semicondutor (SOA) e do filtro BPF

Este capítulo descreve a caracterização estática de um dispositivo amplificador óptico semicondutor com objetivo da verificação do seu comportamento em determinadas aplicações operando como elemento óptico não-linear. Trata-se de uma primeira contribuição desta Dissertação, onde o SOA específico aqui caracterizado em algumas de suas propriedades ópticas estáticas, é o mesmo que mais adiante irá compor o laser sintonizável CW, e a seguir F8L, este último sendo o objetivo maior deste trabalho.

O modelo do SOA aqui descrito em sua caracterização, foi projetado e manufaturado pela Kamelian (UK), modelo 1550 nm Nonlinear SOA-NL-L1-W-ZZ e pode ser visualizado na Figura 3.1 e Apêndice B.

A caracterização aqui descrita se divide em:

1. Análise do espectro das curvas ASE emitido pelo SOA por comprimento de onda em função da corrente de polarização;
2. Banda espectral de ganho de amplificação;
3. Corrente de transparência do SOA;
4. Ganho de amplificação do SOA quando introduzido um sinal óptico externo de potência P_{in} ;
5. Para o filtro *Band Pass Filter* (BPF): Perfil de transmitância e função de transferência.

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

O objetivo da primeira medição (itens 1 e 2 descritos no parágrafo anterior) deste trabalho foi realizar a caracterização da ASE produzida por emissão espontânea, que é opticamente amplificada pelo processo de emissão estimulada no meio de ganho do SOA.

Vale lembrar, que a ASE pode ser um limitante grave em algumas aplicações, ela surge no SOA como resposta à emissão espontânea que é amplificada em seguida no dispositivo, e por isso se torna tão importante a verificação do seu comportamento no sistema.

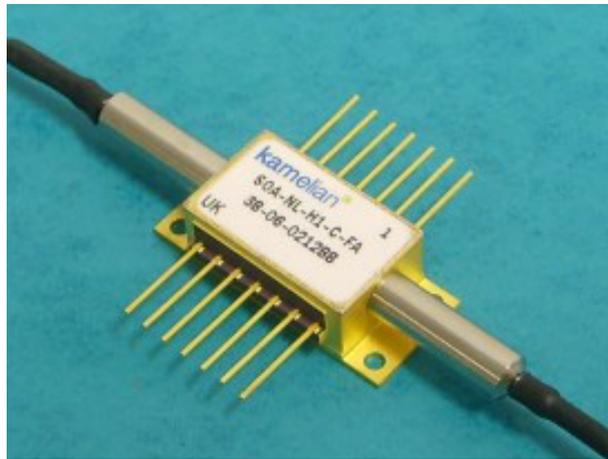


Figura 3.1: SOA não-linear 1550nm da Kamelian com encapsulamento *butterfly*. [46]

O SOA aqui caracterizado, é apropriado para ser operado em aplicações como sendo um elemento óptico não linear.

O SOA é acoplado ao receptáculo THORLABS LM14S2 que permite conexão do chip semiconductor ativo interno do SOA e do termistor também interno ao SOA. A temperatura do SOA era monitorada pelo controlador de temperatura THORLABS modelo TED200C que fornecia corrente ao elemento Peltier interno ao SOA. O controle da corrente de bias era feito pela fonte de corrente THORLABS modelo LDC205C. Na Figura 3.2 é possível verificar uma foto da estrutura completa receptáculo + SOA.

3.1.1 Experimental

O objetivo deste experimento foi determinar o espectro emitido e o comprimento de onda de pico da ASE em função da corrente de polarização (bias) no SOA e assim determinar a largura espectral da ASE. O esquema da montagem experimental pode ser verificado na Figura 3.3.



Figura 3.2: Estrutura do receptáculo + SOA.



Figura 3.3: Esquema experimental para a caracterização do espectro da ASE.

Nessa primeira montagem experimental foi possível verificar as curvas que representam a ASE do SOA em função da corrente de polarização (bias). Foi utilizado na medição dessa curva ASE o instrumental de teste *Optical Spectrum Analyzer* (OSA) (YOKOGAWA PZT0B) para plotagem e visualização gráfica do conjunto de curvas de interesse.

A corrente de bias nesse experimento foi limitada a um valor máximo aplicado de 270mA, o controlador de temperatura apresentou o valor fixo de resistência em torno de 14k Ω , correspondente a cerca de 20 °C. Na Figura 3.4 é possível verificar o resultado dessa medição.

A partir do resultado apresentado na Figura 3.4 é possível identificar a banda espectral de ASE apresentada pelo SOA. O aumento da corrente de polarização introduzida no SOA ocasiona um deslocamento do comprimento de onda de pico para valores menores, esse fenômeno é chamado de *blue-shift* (deslocamento para o azul).

Na primeira medição desse experimento foi introduzida uma corrente de polarização

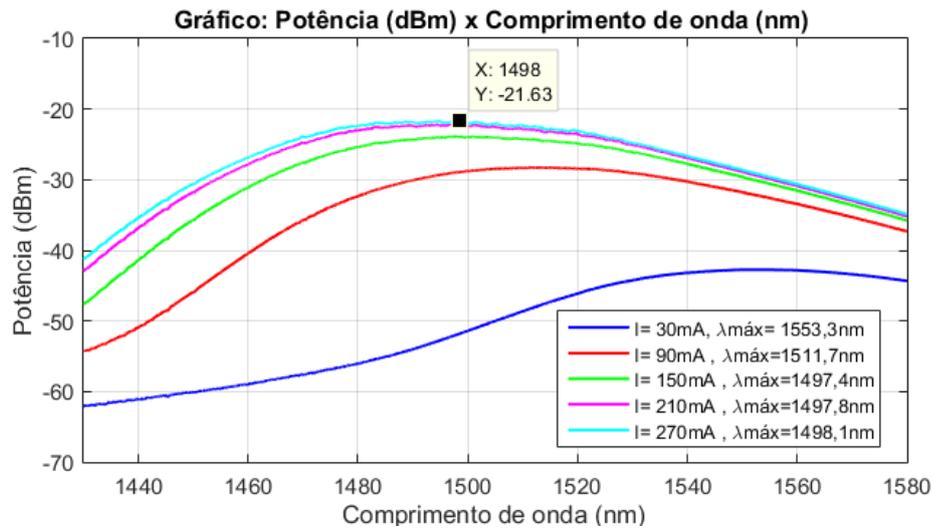


Figura 3.4: Gráficos Potência x Comprimento de onda das curvas ASE do SOA parametrizados pela corrente de bias.

de 30 mA, o comprimento de onda correspondente ao máximo de emissão identificado foi de 1553,3 nm. No caso da corrente de polarização máxima aplicada de 270 mA, o comprimento de onda de máximo identificado foi de 1498,1 nm, ou seja, ocorreu um deslocamento de aproximadamente 55,2 nm no comprimento de onda de pico. Esse efeito é provavelmente provocado pelo preenchimento da banda de condução com o aumento da corrente de alimentação do SOA, ocasionando uma emissão de fótons mais energéticos, ou seja, com menores comprimentos de onda.

3.2 Ganho variando I_{bias} e a Corrente de Transparência para 1550 nm com $P_{in} = 0$ dBm

O objetivo dessa medição foi determinar o ganho de amplificação em função de I_{bias} e a corrente de transparência I_T do SOA para 1550 nm, mantendo $P_{in} = 0$ dBm. Para esse experimento foi necessário utilizar um medidor de potência óptica (NEWPORT 2931-C) que apresenta dois canais independentes e permite a visualização simultânea da potência de dois sinais, um atenuador óptico variável (VOA) para no presente fixar a potência óptica de entrada no SOA em $P_{in} = 0$ dBm e um laser DC (Optolink Laser Source DC 200) que fornece um sinal de entrada com uma potência fixa em cerca de 10 mW no comprimento de onda de 1550 nm.

3.2.1 Experimental

O esquema da montagem experimental de calibração do VOA dessa etapa pode ser verificado na Figura 3.5. Inicialmente foi necessário verificar a potência do laser, visto que o laser disponível no Lacop não era sintonizável em comprimento de onda pois emitia apenas em 1550 nm e em uma potência óptica de saída fixa em cerca de 10 mW (ou 10 dBm). Para a verificação da potência de saída do laser foi utilizado um medidor de potência óptica e um atenuador óptico variável para sintonização na potência de saída de interesse em 0 dBm.

A potência óptica do laser após o atenuador foi ajustada para 1,0002 mW, equivalente a aproximadamente 0 dBm, que é o valor típico que o fabricante do SOA usou para fazer a sua especificação de ganho. De acordo com o fabricante, o SOA apresenta um ganho de no mínimo 10 dB para um sinal óptico com 0 dBm de potência incidente em uma corrente de polarização típica de I_{bias} 300 mA.

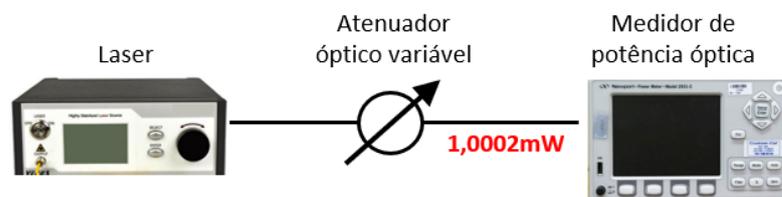


Figura 3.5: Esquema experimental para calibração do atenuador óptico variável.

Após a sintonização da potência de saída do VOA para 1,0002 mW, o esquema da montagem experimental apresentado na Figura 3.6 foi realizado para verificação da corrente de transparência I_T do SOA.

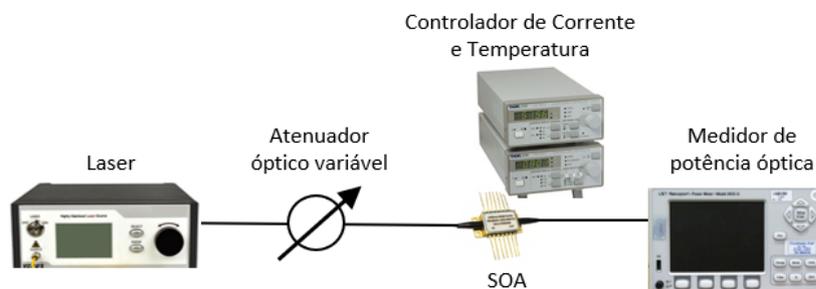


Figura 3.6: Esquema experimental para verificação do ganho em função da I_{bias} e consequentemente obter a corrente de transparência do SOA.

Para esse experimento (Figura 3.6) foi necessário variar a corrente de polarização do SOA até 280 mA, coletando uma amostra de potência no OPM a cada 10 mA e mantendo constante a potência de saída do VOA em 0 dBm. Os valores de potência medidos

através do OPM são verificados na escala linear (mW) e serão convertidos para dBm, essa conversão é realizada através da relação apresentada na equação (3.1).

$$P(dBm) = 10 \log \frac{P(mW)}{1mW} \quad (3.1)$$

Para melhor visualização, o resultado do experimento foi expresso em relação ao Ganho (dB), que pode calculado conforme a equação (3.2), considerando que a potência de entrada (P_{in}) nesse experimento é igual a 1,0002 mW e a P_{out} é medida em função de I_{bias} aplicado. Na Figura 3.7 é possível observar os resultados do experimento.

$$Ganho(dB) = 10 \log \frac{P_{out}}{P_{in}} \quad (3.2)$$

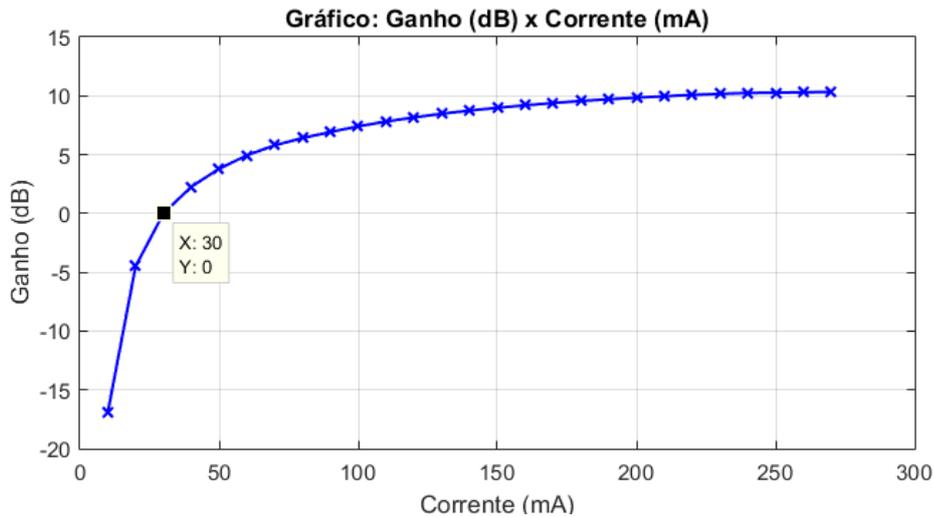


Figura 3.7: Gráfico Ganho (G) x Corrente (I_{bias}) que mostra o valor aproximado de corrente mínima para ocorrer amplificação ($I_{bias} = 30$ mA como corrente de transparência), $P_{in} = 0$ dBm e $\lambda = 1550$ nm.

Pelo gráfico mostrado na Figura 3.7 é possível verificar a curva de ganho de amplificação do SOA em função da corrente de polarização com uma potência injetada mantida fixa num valor igual a 1,0002 mW e $\lambda = 1550$ nm.

Para os valores de corrente menores que 30 mA o ganho apresentado pelo SOA é menor que 0 dB, ou seja, a potência de saída do SOA está com um valor menor do que a potência de entrada. Assim, para esses valores de corrente ($I_{bias} < I_T$) não existe o processo de amplificação. Para os valores maiores que I_T o ganho passa a ser positivo e o processo de amplificação do sinal é estabelecido.

Após o valor da corrente de transparência (30 mA) ocorre a amplificação do sinal

óptica de entrada, até o seu ganho máximo de aproximadamente 10,33 dB. O fabricante informa no *datasheet* um ganho de no mínimo 10 dB para uma potência de entrada de 0 dBm, o que é possível ser verificado através do gráfico da Figura 3.7 [46].

3.3 Ganho do SOA função da Potência Incidente P_{in} para 1550 nm e $I_{bias} = 270$ mA

Nessa seção, é descrito um experimento para analisar o ganho de amplificação do SOA em função da potência óptica P_{in} de entrada (no SOA). Essa análise é realizada através da caracterização do comportamento da amplificação de um sinal externo quando introduzido no SOA, a potência do sinal entrante no SOA é alterada através de um atenuador variável, conforme explicado no item 3.2.

3.3.1 Experimental

Nesse experimento foi utilizado o laser DC (Optolink Laser Source DC 200) com um comprimento de onda fixo de 1550 nm, a potência óptica do laser foi ajustada através de um atenuador óptico variável, também foi utilizado um acoplador direcional (OPTOLINK) com razão 90/10. Inicialmente foi necessário calibrar o sistema conforme apresentado na Figura 3.8, para determinar a relação em cada saída do acoplador direcional para diferentes valores de potência P_{in} .

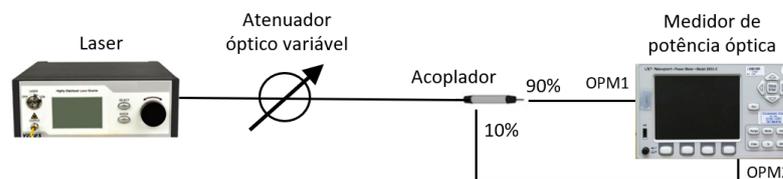


Figura 3.8: Esquema experimental para calibração da leitura da potência incidente P_{in} pelo braço de 90% onde será inserido o SOA.

Foi possível verificar que a relação entre a potência medida no OPM1 e OPM2 é de aproximadamente 6,4, ou seja, a partir dessa relação é possível determinar o ganho G em relação a potência de entrada P_{in} do SOA. Na Figura 3.9 é apresentado o esquema experimental para a caracterização de $G \times P_{in}$ do SOA. Deve-se aqui notar que novamente a Equação 3.2 foi utilizada para obter o ganho G . A diferença é que neste item, a corrente

de bias era fixada (em 270 mA), enquanto que P_{in} era feita variar de poucos microW até valores < 10 mW.

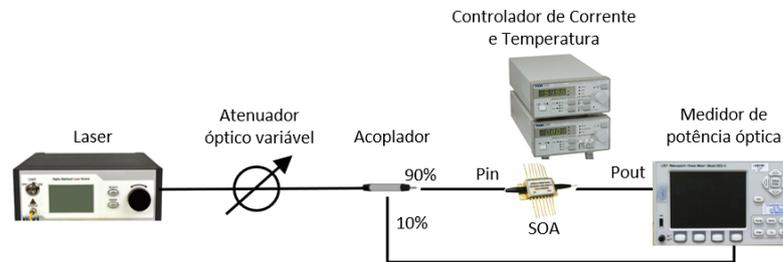


Figura 3.9: Esquema experimental para a medida do ganho de amplificação do SOA em função da potência de entrada P_{in} com $I_{bias} = 270$ mA.

Foi então realizada a variação da potência de entrada do SOA (P_{in}), para uma corrente de polarização de $I_{bias} = 270$ mA, lida em OPM2 e medida a potência de saída P_{out} do SOA através do medidor de potência óptica no canal OPM1.

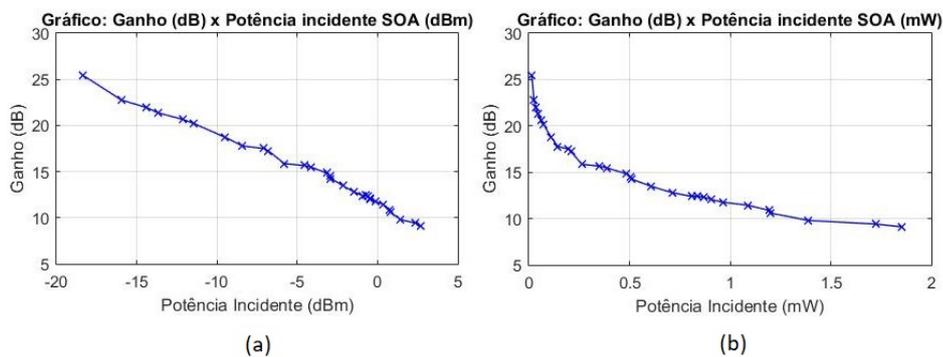


Figura 3.10: (a) Gráfico Ganho do SOA x Potência incidente (dBm) para $I_{bias} = 270$ mA e (b) Gráfico Ganho do SOA x Potência incidente (mW) para $I_{bias} = 270$ mA.

Na Figura 3.10 (a) é apresentado o resultado de medidas do ganho de amplificação do SOA para diferentes potências de entrada. De acordo com o *datasheet* do SOA para uma potência de 0 dBm o ganho mínimo é de 10 dB, o que é confirmado pelo gráfico. Para potências ópticas $P_{in} < -12$ dBm, temos um ganho de pelo menos 20 dB.

Na Figura 3.10 (b) é apresentado o resultado de medidas do ganho de amplificação do SOA em relação à potência de entrada em mW. Pode-se notar que para valores $P_{in} > 1$ mW, o ganho tende rapidamente a um valor saturado de pouco menos que 10 dB, isto indica uma potência de saída saturada de ≈ 15 mW (ganho de 10 dB para $P_{in} = 1,5$ mW fornecendo $P_{out} = 11,8$ dBm = 15 mW). Este último valor não é revelado pelo fabricante

e fornece uma estimativa otimista do máximo de potência óptica CW que poderíamos obter de um laser à fibra construído com o SOA da Kameliam.

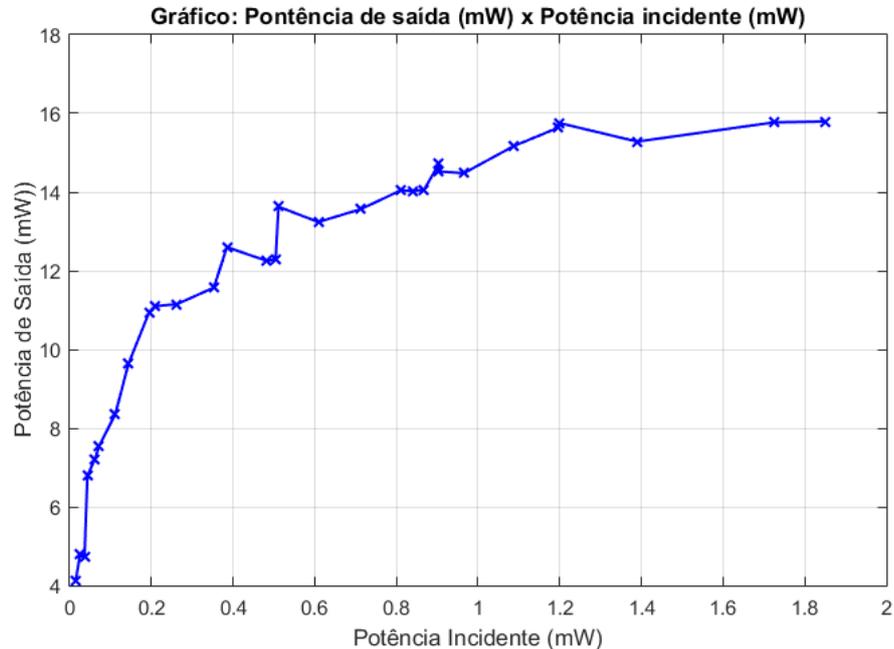


Figura 3.11: Gráfico P_{out} x P_{in} do SOA (em mW).

Já na Figura 3.11 é apresentado o resultado da potência de saída do SOA para diferentes valores de potência incidente. É possível observar que o SOA apresenta uma potência de saída linear em relação a potência de entrada apenas até aproximadamente 0,2 mW. Entre 0,2 mW e 1,2 mW, temos uma região de comportamento claramente não-linear. Para $P_{IN} > 1,2$ mW o SOA entra em saturação e a potência de saturação está em torno de 15 mW em concordância com o que foi dito no parágrafo anterior.

3.4 Caracterização do filtro BPF

Nesse experimento foi realizada a caracterização do filtro passa-banda atuando sobre a ASE. O BPF foi fabricado pela Lightwaves2020, o modelo é o *Tunable Optical Filter* (TOTF) e pode ser visualizado na Figura 3.12.

Esse filtro BPF permite a alteração de sua frequência central (ou comprimento de onda central) de forma manual através de um pequeno parafuso micrométrico integrado ao dispositivo. Também apresenta uma perda por inserção (menor que aproximadamente 2,7 dB) e se torna necessário para estreitamento da largura de banda do sinal no sistema. A calibração do comprimento de onda central no filtro é realizada pelo usuário através da

verificação no espectro do sinal no OSA, ou seja, se o espectro encontra-se no comprimento de onda central de interesse [47].



Figura 3.12: Filtro óptico passa-banda de 1,2 nm de janela espectral utilizado no experimento que pode ser sintonizado na banda C (1520-1565 nm).

3.4.1 Experimental (medida do espectro transmitido com $I_{bias} = 70$ mA)

O objetivo deste experimento foi incluir o filtro passa-banda no sistema e verificar a interação do SOA com o filtro através da ASE produzida pelo SOA. O esquema da montagem experimental pode ser verificado na Figura 3.13.



Figura 3.13: Esquema experimental para a medida do espectro da ASE com filtro passa-banda.

No experimento foi realizada a sintonização do comprimento de onda central no filtro através da calibração manual do parafuso para os comprimentos de onda centrais no intervalo 1520-1565 nm de 5 em 5 nm. Para esse experimento, a corrente de bias do SOA foi mantida constante em 70 mA e após a sintonização do BPF em determinado comprimento de onda, foi observado o espectro no OSA. Após o resultado da amostra selecionada foi realizada a superposição do espectro da ASE produzida pelo SOA no OSA em diferentes comprimentos de onda filtrados pelo BPF, conforme apresentado na Figura 3.14.

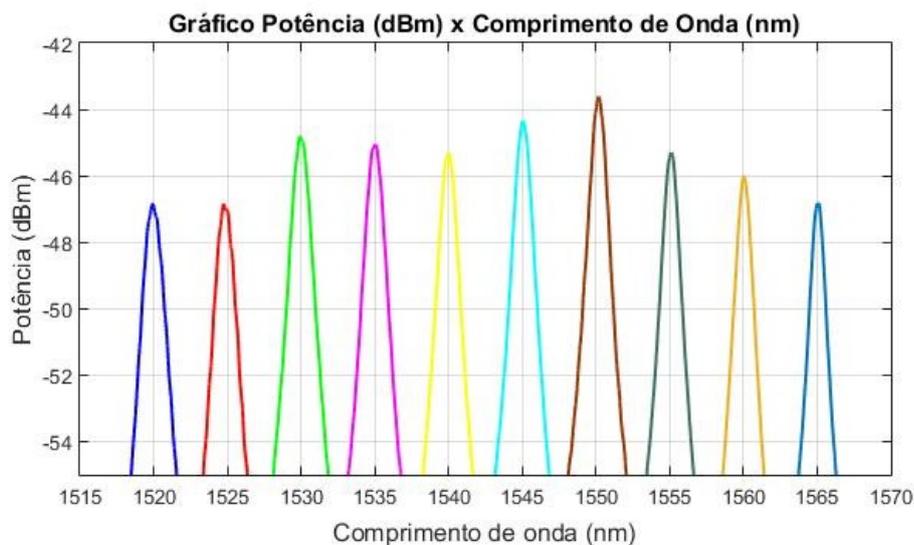


Figura 3.14: Gráficos filtrados pelo BPF da Potência x Comprimento de onda da ASE produzida pelo SOA.

De acordo com a Figura 3.14, como era de se esperar, é possível verificar que ocorreu um estreitamento da banda do espectro da ASE em comparação ao experimento da Figura 3.4. Os valores obtidos da ASE produzida pelo do SOA filtrados pelo BPF estão de acordo com o revelado pelo fabricante para banda C (1520-1565 nm) [47].

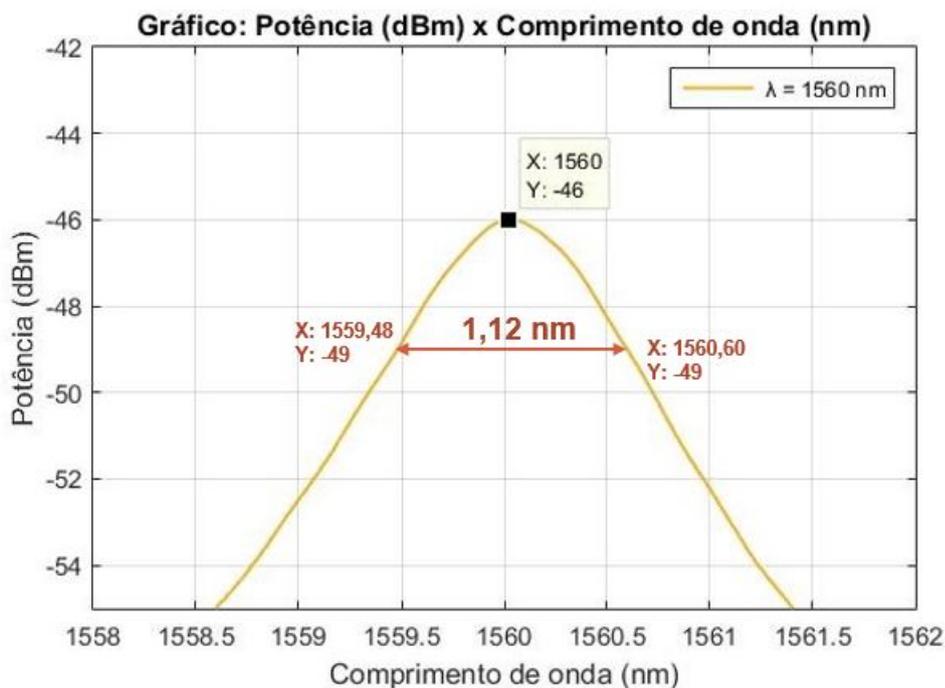


Figura 3.15: Gráficos filtrados pelo BPF da Potência x Comprimento de onda da ASE produzida pelo SOA.

Como exemplo, de acordo com a Figura 3.15 podemos tomar o pico centrado em 1560

nm com -46 dBm. É possível verificar que quando o mesmo pico em 1560 nm estava 3 dB de potência abaixo, ou seja, em -49 dBm, encontramos uma largura espectral de aproximadamente $1,12$ nm em completa concordância com o valor de $1,2$ nm correspondente à largura espectral do BPF fornecido pelo fabricante.

3.4.2 Experimental (medida da potência integral transmitida em função de I_{bias} e λ como parâmetro)

Nessa segunda parte da caracterização do filtro BPF interagindo com o SOA em uma única passagem da luz, é abordado através da análise da potência óptica emitida pelo SOA e filtrada pelo BPF através de um instrumental de teste *Optical Power Meter* (OPM) (NEWPORT 2931-C) em função da variação da corrente de polarização. O esquema da montagem experimental pode ser verificado na Figura 3.16. Deve-se notar que agora ao invés do OSA (Figura 3.13), utiliza-se um medidor de potência óptica que em essência realiza a integral de cada pico de transmissão mostrado na Figura 3.14.

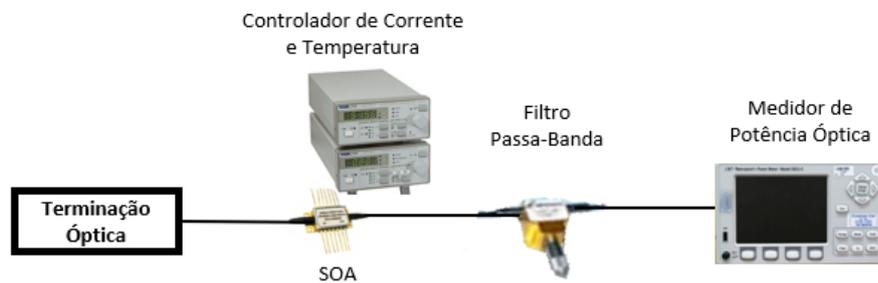


Figura 3.16: Esquema experimental das medidas do espectro da ASE integrado, onde há amostragem com filtro óptico BPF, em função de I_{bias}

Inicialmente foi utilizado o OSA para sintonizar o filtro manualmente no comprimento de onda central de interesse. A partir dessa calibração, a segunda parte dessa caracterização é determinada pela verificação dos valores de potência óptica emitida pelo SOA e filtrada pelo BPF, através do OPM em função da variação da corrente de polarização.

O resultado dessas medições gerou uma família de curvas em diferentes comprimentos de onda em função da variação da corrente de polarização I_{bias} , conforme apresentado na Figura 3.17. É possível verificar que acima de 60 mA ocorre uma maior potência para menores comprimentos de onda devido ao deslocamento *blue-shift* dos comprimentos de onda de pico da ASE, esse comportamento é compatível com o verificado na seção 3.1.

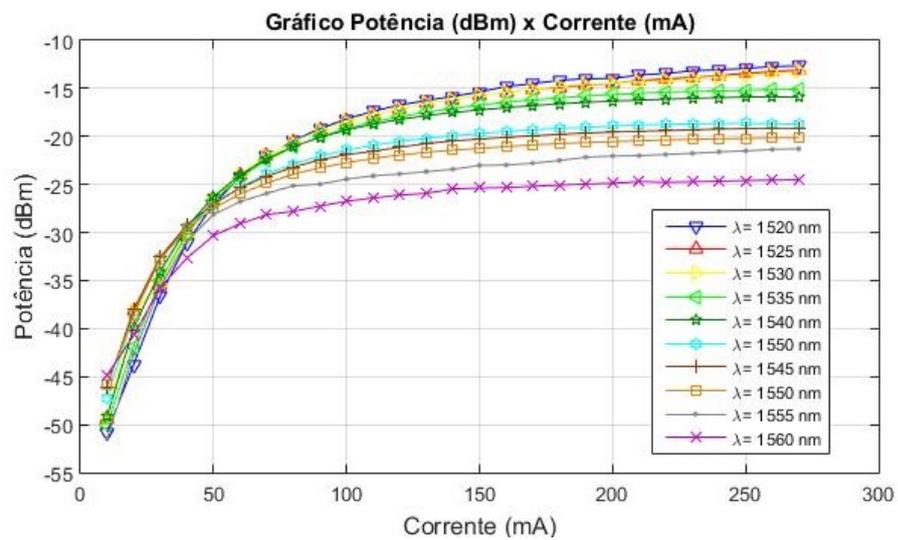


Figura 3.17: Esquema curvas experimentais da potência de saída em função de I_{bias} utilizando um filtro BPF sintonizado em 10 diferentes comprimentos de onda centrais ao longo da banda C.

Capítulo 4

Laser Sintonizável em Anel de Fibra Óptica com Amplificador Óptico Semicondutor (SOA)

Este capítulo descreve uma segunda contribuição desta Dissertação que consiste na montagem e testes de um laser sintonizável em onda contínua, composto por um anel de fibra óptica contendo um amplificador óptico semicondutor (SOA) como meio de ganho.

Um filtro óptico passa-banda ajustável manualmente, foi utilizado para realizar a sintonização do laser ao longo da banda C (1520-1565 nm).

4.1 Anel de Fibra Óptica com Acoplador (sem filtro BPF) - Fonte fluorescente

O objetivo da primeira medição desse capítulo foi a de obter o espectro do sinal no anel de fibra óptica com a introdução de um acoplador (tipo *tap*) 90/10. Neste caso, cerca de 90% da potência óptica circulante no anel era a P_{out} retirada como potência de saída útil que era medida em um OSA ou OPM. O restante (aproximadamente 10%) da potência óptica, permanecia circulando no anel a cada *round-trip*.

4.1.1 Experimental

O objetivo deste experimento foi determinar o espectro emitido pelo anel de fibra óptica, ou seja, da potência (dBm) em função do comprimento de onda. O esquema da montagem experimental pode ser verificado na Figura 4.1.

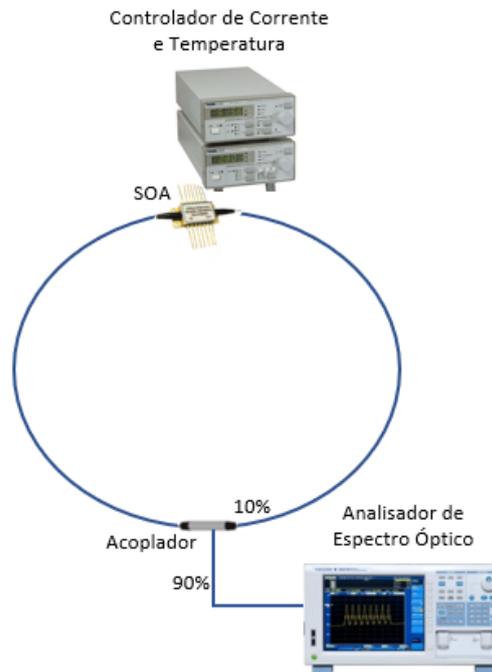


Figura 4.1: Esquema experimental para a medida do espectro emitido pela fonte fluorescente em anel.

Foi utilizado nessa medição o instrumental de teste um OSA (YOKOGAWA PZT0B) para a medida, plotagem e visualização gráfica do conjunto de curvas espectrais de interesse. A corrente de bias no SOA nesse experimento foi selecionada em 10 mA, 30 mA, 90 mA, 150 mA, 210 mA e 270 mA.

Na Figura 4.2 é possível verificar o resultado dessas medições. Também foi utilizado um acoplador direcional (OPTOLINK) com razão 90/10. Temos que 90% da potência é medida pelo medidor de potência, e os outros 10% são reinjetados no SOA.

É possível observar que as curvas da ASE do SOA em anel com o acoplador 90/10 apresentam o mesmo comportamento verificado na seção 3.1, porém como uma potência menor visto que a maior parte do sinal é utilizada para análise. Como era de se esperar, não se observou emissão laser pois não foi inserido qualquer elemento espectralmente seletivo no anel de fibra.

O segundo experimento dessa seção foi medir a potência integral do sinal através de um medidor de potência óptica conforme apresentado na Figura 4.3.

Foi realizada a variação da corrente de polarização do SOA e medida uma amostra do sinal P_{out} com o medidor de potência óptica. Na Figura 4.4 é apresentada a curva que representa essa medida. Pode-se notar uma saturação na potência óptica de saída

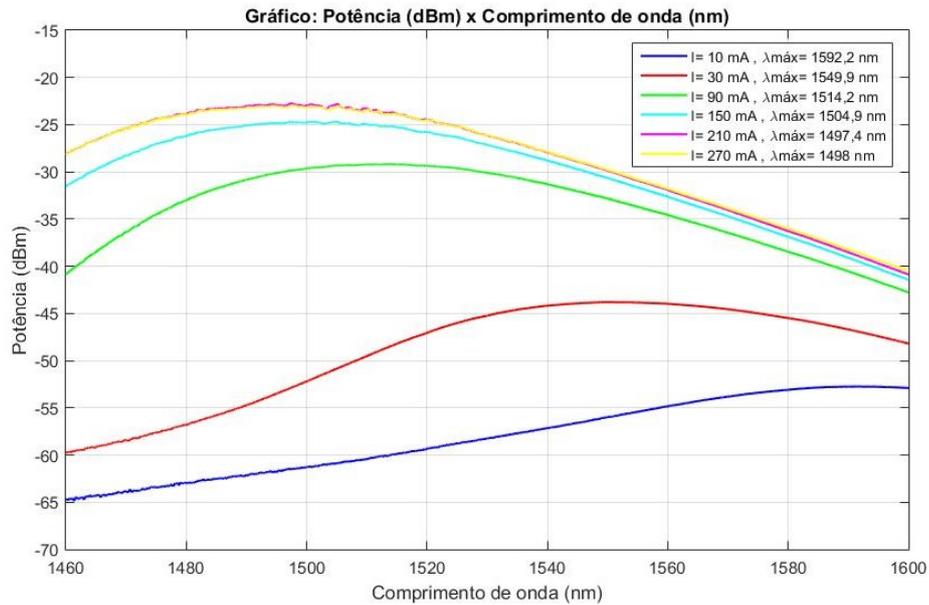


Figura 4.2: Gráfico Potência x Comprimento de onda das curvas ASE do SOA com acoplador (ainda sem o filtro BPF).

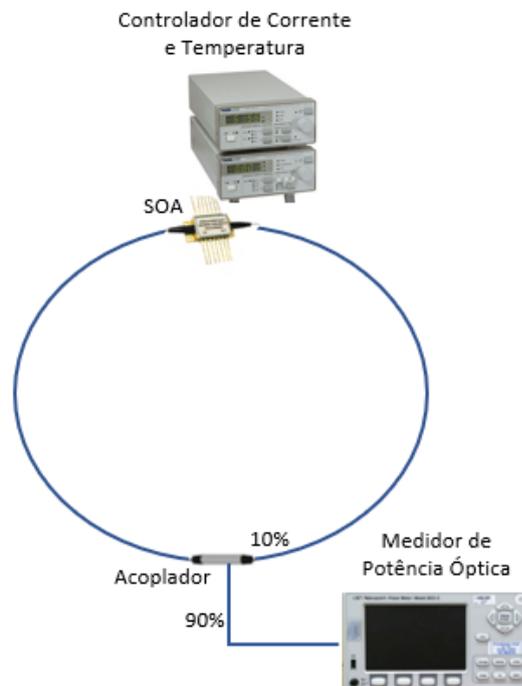


Figura 4.3: Esquema experimental para a medida da potência óptica integral de saída do anel (sem filtro BPF) em função da corrente de bias.

a partir de aproximadamente 210 mA de I_{bias} . Pode-se também notar, na Figura 4.4 a inexistência de um valor de corrente limiar, já que de fato não temos emissão laser nessa situação, mas sim algo do tipo fonte óptica fluorescente na banda C.

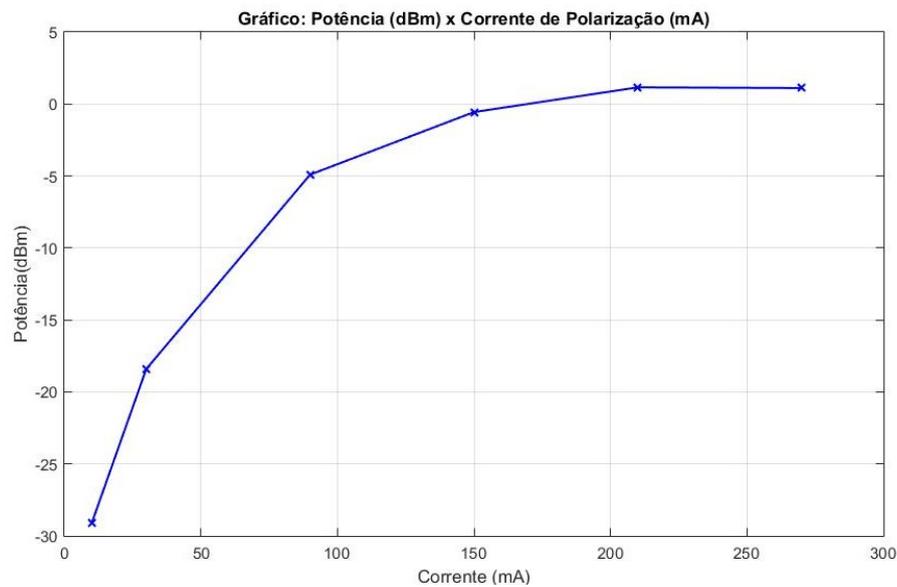


Figura 4.4: Esquema experimental da potência óptica integral de saída do anel (sem filtro BPF) em função da corrente de bias.

4.2 Laser Sintonizável em Anel de Fibra Óptica com Amplificador Óptico Semicondutor (SOA)

O objetivo das medições descritas nesta secção, foi descrever a montagem e testes de um laser sintonizável, formado por um anel de fibra óptica contendo um amplificador óptico semicondutor (SOA) como meio de ganho. Foi utilizado um filtro óptico passa-banda caracterizado no capítulo 3 inserido no anel e ajustável manualmente na banda 1520-1565 nm.

Nesta secção, é então descrita a montagem experimental do laser em anel, utilizando o SOA Kamelian SOA-NL-L1-W-ZZ e o filtro passa-banda da Lightwaves2020 que foram caracterizados no capítulo 3. Também foi utilizado um acoplador direcional. Este último, apresenta duas fibras de entrada e duas de saída e tem um fator de acoplamento específico. O acoplador foi fabricado pela Optolink, permitindo então que uma parte da luz fosse extraída e a outra permanecesse circulando no anel de fibra óptica.

O isolador óptico inserido no anel de fibra, tem a função de forçar que a onda eletromagnética circule apenas em um sentido, nesse caso, circulará apenas no sentido anti-horário conforme indicado na Figura 4.6 (e fotografia na Figura 4.5). Um controlador de polarização da Fiberlogix otimizado para operação em torno de 1550 nm é utilizado na configuração 242, onde a bobina de meia onda (HWP) tem o dobro de voltas em relação às bobinas de quarto de onda (QWP) [32].

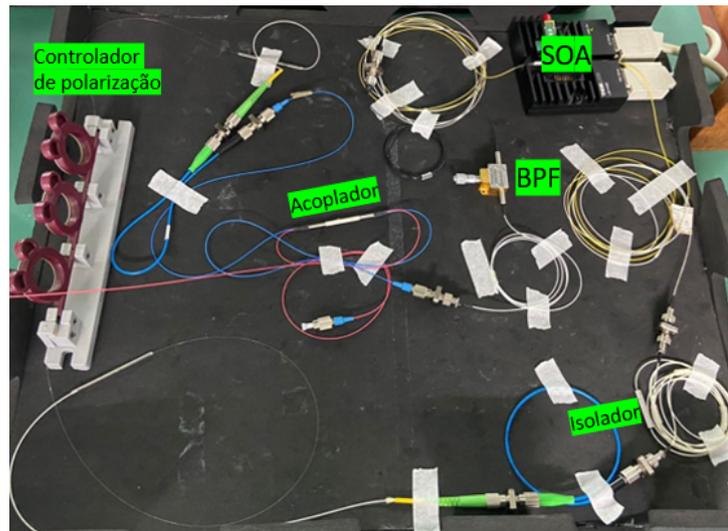


Figura 4.5: Fotografia do esquema experimental do Laser Sintonizável em Anel de Fibra Óptica com Amplificador Óptico Semicondutor na bancada do LACOP.

O controlador de polarização otimiza a potência óptica de saída do laser, ou seja, tem como função fazer variar estado de polarização dos sinais ópticos propagantes na fibra óptica ou no dispositivo como um todo. Conforme já mencionado, no anel está inserido um isolador à fibra óptica que força a luz circular apenas no sentido anti-horário no presente caso, formando assim uma cavidade ressonante circular.

4.2.1 Sintonização Espectral (com acoplador)

4.2.1.1 Experimental

Nesse experimento foi utilizado um acoplador direcional que apresenta a razão de acoplamento 80/20, fabricado pela Optolink. Desta forma, 80% da luz é retirada para a análise e os outros 20% reintroduzidos no anel. Assim, 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). Antes deste último, era utilizado um foto-detector de InGaAs (1550 nm) com 1,2 GHz de banda para realizar a conversão óptica/elétrica. Um esquema da montagem experimental usando um OSA para análise pode ser visualizada na Figura 4.6

Para esse experimento, com o laser em anel em uma configuração 80/20, foi realizada a verificação do espectro óptico através do analisador de espectro óptico (YOKOGAWA PZT0B) com o filtro BPF sintonizado em 1550 nm. A Figura 4.7 mostra o resultado para o caso em que o filtro passa banda estava sintonizado no comprimento de onda de interesse (1550 nm) e a ASE emitida pelo SOA quando o anel é aberto, ou seja, não

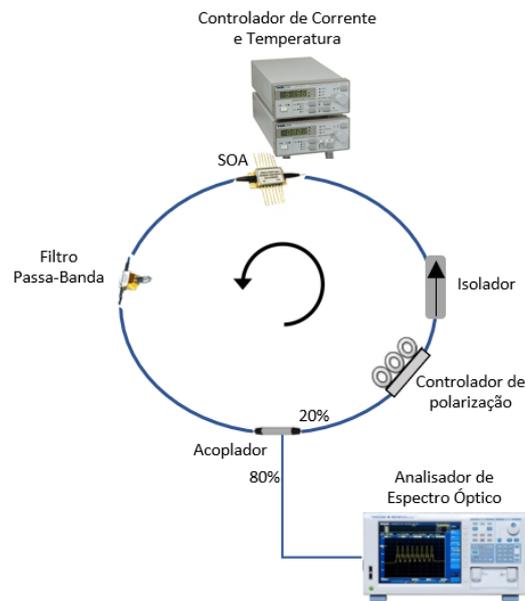


Figura 4.6: Esquema experimental do Laser Sintonizável em Anel de Fibra Óptica com Amplificador Óptico Semicondutor utilizando um OSA como instrumento de análise.

ocorre ação do laser. Pode-se notar na Figura 4.7 que em 1550 nm houve um aumento – 6 dBm – (-48 dBm) = 42 dB na potência óptica emitida, ou seja, quando se compara a emissão laser (em anel) com a emissão ASE.

No caso da topologia de anel, além de filtro realizar a sintonização em torno de 1550 nm, o mesmo força a ressonância do comprimento de onda de 1550 nm no anel de fibra óptica gerando um aumento significativo do ganho e estreitamento da banda espectral.

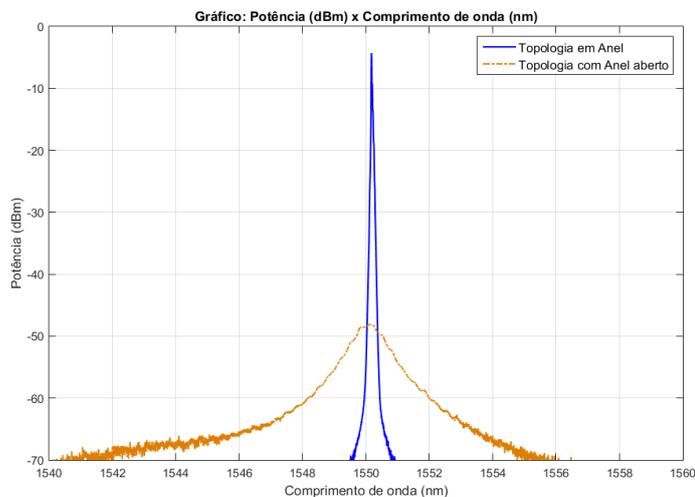


Figura 4.7: Espectro emitido pelo dispositivo com circuito óptico em aberto e na topologia em anel, neste último extraíndo 80% da potência circulante para análise.

4.2.2 Corrente Limiar

4.2.2.1 Experimental

Adicionalmente foi realizado um experimento para verificação do melhor valor de acoplamento e extração de luz do anel através da aquisição dos valores de potência óptica emitida pelo laser em função da corrente DC (bias) aplicada no SOA, conforme apresentado na Figura 4.8.

Este procedimento é realizado através da troca do acoplador 2x2 para diferentes razões de acoplamento (50/50, 20/80 e 80/20).

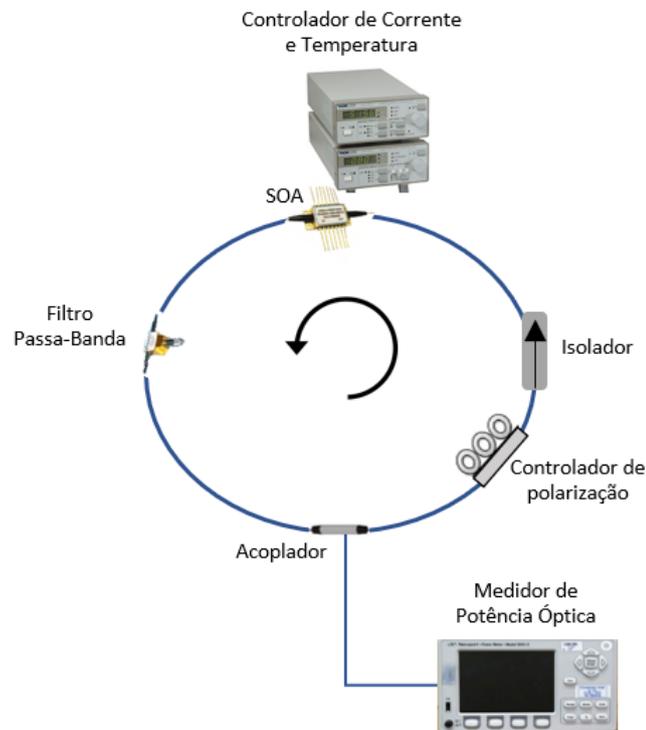


Figura 4.8: Esquema experimental do laser em anel.

Na Figura 4.9 é apresentado o resultado para as diferentes razões de acoplamento: Para o caso que 50% da luz é retirada para análise e os outros 50% é introduzida no laser em anel, o caso que 20% da luz é retirada para análise e os outros 80% é introduzida no laser em anel e por fim o caso que 80% da luz é retirada para análise e os outros 20% é introduzida no laser em anel.

É possível verificar que os resultados na escala vertical linear são próximas entre si, porém, a razão de acoplamento 80/20 (80% da luz é extraída para análise e 20% permanece

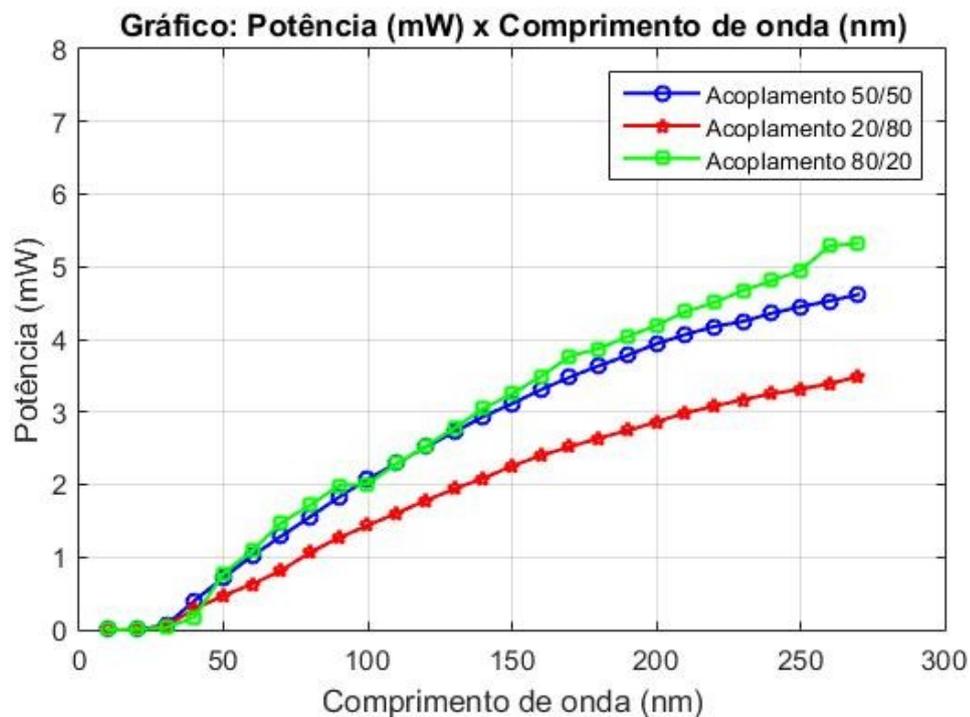


Figura 4.9: Potência óptica de saída (em mW) do laser em anel emitindo em 1550 nm em função da corrente de polarização e pela razão de acoplamento como parâmetro.

no anel) apresentou os maiores valores de potência para a mesma corrente de polarização, assim será utilizado essa razão de acoplamento nos próximos experimentos.

Conforme verificado a melhor razão de acoplamento é na configuração 80/20, essa configuração apresentou os maiores valores de potência de saída do anel em 1550 nm e será utilizada nos próximos experimentos, sendo que apresenta uma corrente de limiar de aproximadamente 30 mA na saída CW do laser em anel sintonizado em 1550 nm conforme apresentado na Figura 4.10.

4.2.3 Modos Longitudinais

4.2.3.1 Experimental

Nesta etapa final de caracterização CW, o laser em anel de fibra óptica está configurado com uma razão de acoplamento de 80/20. Foi realizada 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) que foi utilizado como instrumento de análise, com 4 GHz de banda. O esquema experimental dessa etapa é verificada na Figura 4.11.

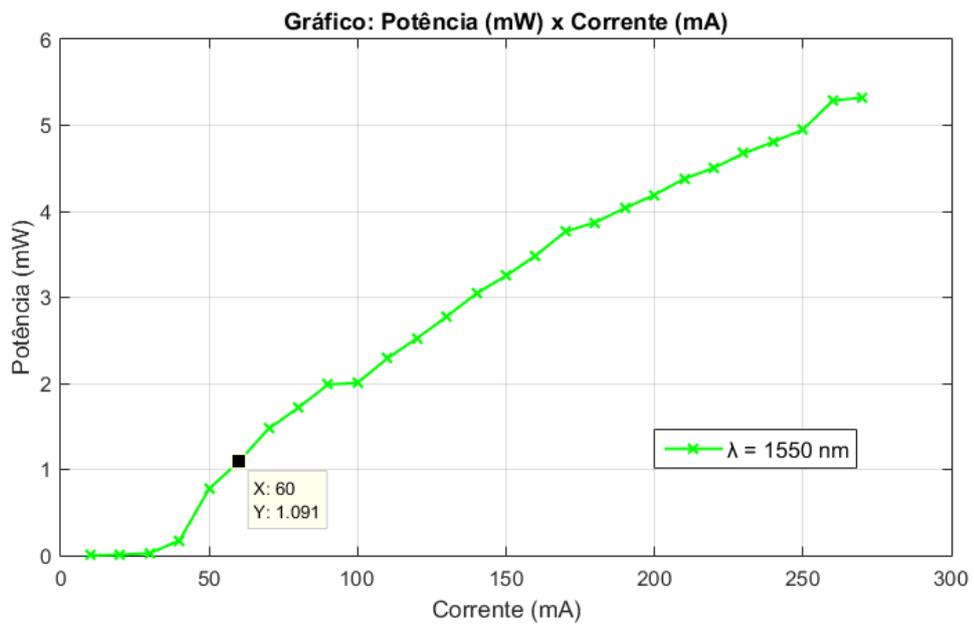


Figura 4.10: Corrente de limiar (≈ 30 mA) do laser em anel com extração de 80% da luz para análise e sintonizado em 1550 nm.

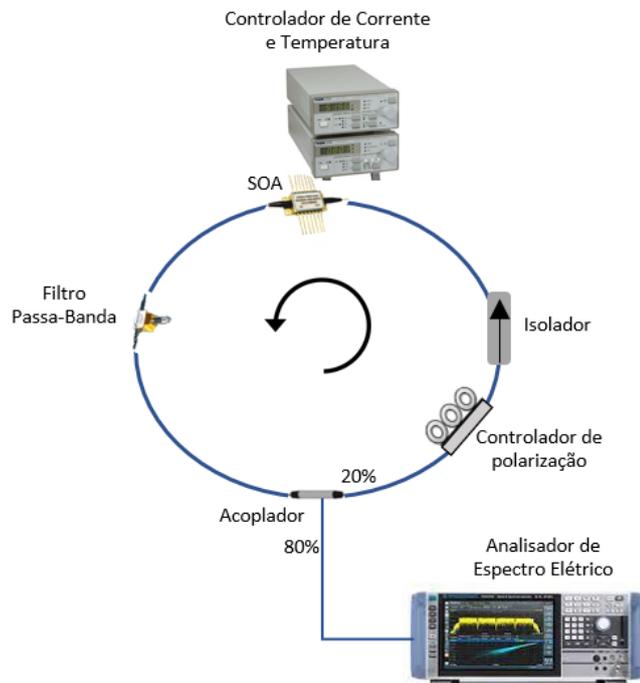


Figura 4.11: Esquema experimental do laser em anel com extração de 80% da luz e sintonizado em 1550 nm.

A fim de obter o espaçamento teórico entre os modos longitudinais gerados, no anel de fibra, foi utilizada a Equação 4.1.

$$\Delta f = \frac{c}{n_{fibra} L_{perimetro}} \quad (4.1)$$

Sendo c a velocidade da luz no vácuo (3×10^8 m/s), n_{fibra} (1,46) é o índice de refração da luz ao se propagar ao longo da fibra e $L_{perimetro}$ é o perímetro físico total do anel de fibra óptica de ≈ 12 m.

De acordo com a Equação 4.1 é possível obter um valor de $\Delta f = 17$ MHz como o espaçamento das frequências de oscilação dos modos longitudinais na cavidade do anel.

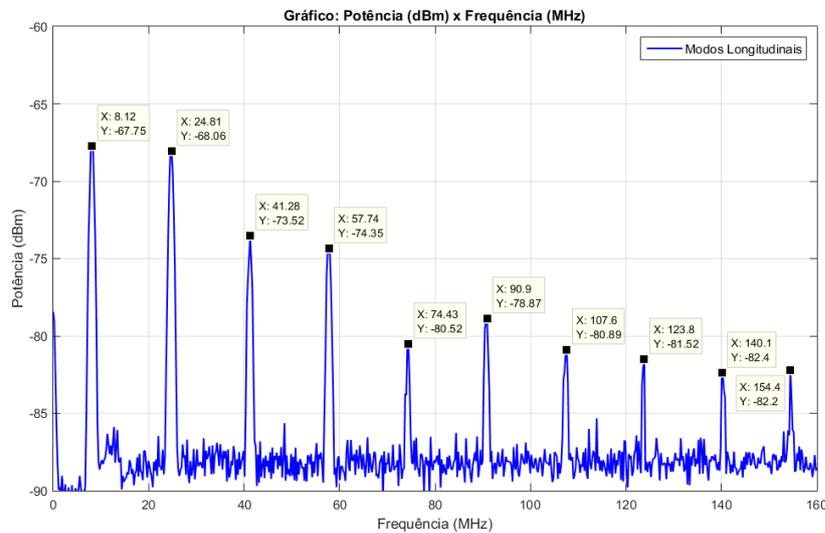


Figura 4.12: Espectro elétrico emitido pelo laser em anel com I_{bias} de 380mA.

Ao observar a Figura 4.12, pode-se verificar a detecção do modo longitudinal fundamental centrado em 8,12 MHz, assim como alguns de seus harmônicos por sua vez centrados em 24,81 MHz; 41,28 MHz; 57,74 MHz; 74,43 MHz; 90,9 MHz; 107,6 MHz; 123,8; 140,1 MHz e 154,4 MHz.

Estes resultados obtidos experimentalmente, nos fornecem um espaçamento das frequências de oscilações dos modos de 17 MHz, em acordo com o cálculo teórico. O fato do laser em anel apresentado exibir um comportamento multimodal quanto aos modos longitudinais, justifica o seu uso adiante para compor um dispositivo em regime *mode-locking*. No experimento em questão foi verificado que dispositivo entra em regime laser apenas no comprimento de onda em 1550 nm, não foi verificada a operação na banda de 1520-1565 nm.

Capítulo 5

Laser à Fibra Óptica em Configuração de Figura-de-Oito com Travamento Passivo de Modos (*Mode-Locking*)

Este Capítulo 5, descreve uma 3^a e principal contribuição desta Dissertação, ou seja, a montagem, testes e interpretação dos resultados de um laser na figura-de-oito ou F8L (Interferômetros de Sagnac à fibra interconectados entre si) operando no regime de *mode-locking* passivo.

5.1 Montagem experimental básica do dispositivo F8L

De acordo com a Figura 5.1, é possível observar que nesta Dissertação o dispositivo F8L foi construído na configuração tradicional, sendo então baseado em um par de anéis de fibra óptica (interferômetros de Sagnac à fibra) em conjunto com controladores de polarização (PC_1 e PC_2). A Figura 5.2 mostra uma fotografia do F8L montado em Laboratório.

No anel do NALM (anel número 2), foi inserido um SOA da Kamelian conforme caracterizado no Capítulo 3 e utilizado para compor um laser em anel CW no Capítulo 4. O referido SOA opera como meio de ganho do F8L. Deve-se notar, que não há qualquer entrada de sinais elétricos ou ópticos em alta frequência, mas somente sinais ópticos ou elétricos rápidos de saída. O referido SOA operante em 1550 nm, apresenta características ópticas fortemente não-lineares, ganho de 10 dB para 0 dBm de potência óptica de entrada e resposta temporal rápida (25 ps) de recuperação do ganho. Trata-se de um SOA comercial, porém pouco usual [46]. A maior parte dos SOAs comerciais apresentam

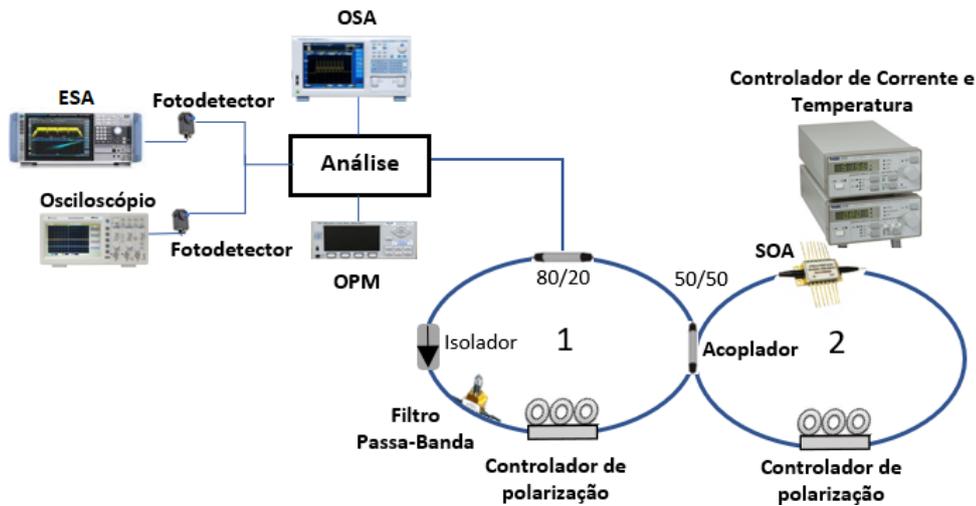


Figura 5.1: Esquema experimental do laser à fibra óptica em uma cavidade em figura-de-oito (F8L) com um SOA como meio de ganho em regime de modo travado passivo.

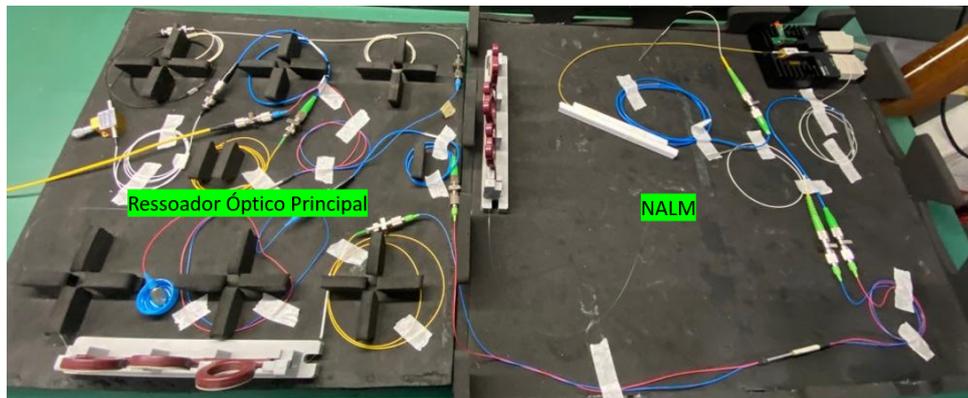


Figura 5.2: Foto do esquema experimental do laser à fibra óptica em uma cavidade em figura-de-oito (F8L) com um SOA como meio de ganho em regime de modo travado passivo na bancada do LACOP.

recuperação de ganho entre 500 ps e 1 ns.

O anel NALM tem a função de realizar o chaveamento, a amplificação e a estabilização dos pulsos, que ocorre da diferença de fase não-linear entre os modos longitudinais da luz ao se propagar ao longo do anel. Logo, ocorre o travamento de modos [29], ou seja, quando entra em sincronia o chaveamento da luz no NALM, no sentido determinado pelo isolador, com o tempo de trânsito óptico no circuito formado pelos dois anéis.

Conforme detalhado no Capítulo 2, deve-se notar que o SOA opera então como meio de ganho do laser e simultaneamente faz parte do NALM, que por sua vez funciona como um absorvedor saturável “artificial”. Isto ocorre porque o NALM funciona como uma chave, rejeitando baixas intensidades (refletidas pelo NALM) que acabam sendo bloqueadas pelo isolador, enquanto transmite (transmitidas pelo NALM) as mais altas intensidades dos

pulsos ópticos que ressoam no anel de ressonância unidirecional [9].

O NALM ou anel número 2, é conectado através de um acoplador 2x2 ao ressoador unidirecional óptico principal (anel nº 1), unidirecional devido à inserção de um isolador óptico. O acoplador tem como objetivo ditar o sentido que a luz irá circular no ressoador, de acordo com a 2.17 praticamente quase 100% da luz é transmitida para o ressoador no sentido ditado pelo isolador presente no NALM. Este anel número 1 tem como objetivo o estreitamento do espectro pelas múltiplas passagens pelo filtro óptico passa-banda (BPF) de 1,2 nm (≈ 150 GHz) de largura espectral.

Uma parte da luz da cavidade é extraída por um acoplador 80/20, e uma parte da luz é extraída para análise em um OSA, ESA, OPM ou Osciloscópio e os outros 20% permanecem no F8L.

Conforme mostrado na Figura 5.1, um filtro óptico passa-banda ajustável manualmente está também contido no anel ressoador, permitindo realizar a sintonização espectral na faixa 1520-1565nm. Entretanto, no Capítulo 5 desta Dissertação, só foram mostrados resultados experimentais em 1550 nm. Tanto as fibras ópticas monomodo quanto os componentes passivos utilizados, foram *standard* de forma que o F8L operava no regime de dispersão anômala em 1550 nm. Nenhum gerenciamento da dispersão cromática no F8L foi aqui realizado.

No caso das análises realizadas através de um osciloscópio digital e do analisador de espectro elétrico, a luz incidia antes em um fotodetector de InGaAs modelo DET01CFC da Thorlabs, sem amplificação, com banda de 1,2 GHz.

Conforme relatado mais adiante, ao ser aplicada uma corrente I_{bias} no SOA igual ou superior a um certo valor, e simultaneamente, através de um ajuste empírico dos controladores de polarização, foi possível obter a formação de pulsos *mode-locking*, ou seja, o F8L podia operar no regime de *mode-locking* passivo.

A configuração experimental aqui proposta conforme esquema apresentado na Figura 5.1, é similar ao arranjo da Figura 2.35 extraída de [40], assim como também da Figura 2.41 por sua vez extraída de [43]. As diferenças do arranjo experimental proposto e os da literatura são:

1. O presente F8L contém um filtro óptico BPF.
2. Utiliza um SOA comercial não-usual com 25 ps de recuperação do ganho.

5.2 Resultados experimentais e discussões

Nesta secção são descritos os resultados experimentais de caracterização do laser à fibra óptica em configuração de F8L de acordo com a topologia da Figura 5.1.

No que se segue, ou seja, nas subsecções 5.2.1 até 5.2.4, são descritos resultados experimentais individuais para cada instrumento de análise acoplado ao F8L. Em 5.2.5, são apresentados os resultados experimentais obtidos simultaneamente em cada um dos instrumentos de análise acoplados ao F8L. Desta forma, os resultados experimentais apresentados nas subsecções 5.2.1 até 5.2.5 seguem a cronologia do trabalho.

5.2.1 Análise somente do Espectro Elétrico

Inicialmente, foi realizada a análise do espectro elétrico do F8L em modo travado através do instrumental ESA.

A fim de obter o espaçamento em frequências dos modos longitudinais oscilantes na cavidade F8L foi utilizada a Equação 5.1.

$$\Delta f = \frac{c}{n_{fibra} L_{perimetro}} \quad (5.1)$$

Sendo c a velocidade da luz no vácuo ($3 \times 10^8 \text{ m/s}$), n_{fibra} (1,46) é o índice de refração da luz ao se propagar ao longo da fibra e $L_{perimetro} = 17 \text{ m}$ é o perímetro total dos dois anéis de fibra óptica. Deve-se perceber que $L_{perimetro}$ é o deslocamento físico da luz para percorrer toda a cavidade do F8L.

De acordo com a Equação 5.1, obtém-se o valor de $\Delta f = 12,1 \text{ MHz}$ como o espaçamento das frequências de oscilação dos modos longitudinais na cavidade em F8L.

Para que se consiga obter *mode-locking*, em especial para o dispositivo F8L aqui sendo caracterizado, deve-se obter uma “assinatura” no espectro elétrico composta de um pente de frequências que no caso terão um espaçamento de aproximadamente 12,1 MHz. Dito de outra forma, para que se possa obter *mode-locking*, é necessário que o laser seja multimodal em modos longitudinais. Então, o procedimento foi o de ajustar $I_{bias} = 280 \text{ mA}$ (ver Figura 5.3) e depois $I_{bias} = 380 \text{ mA}$ (ver Figura 5.4), e para cada um dos dois valores de corrente, os controladores de polarização eram ajustados manualmente de forma empírica até que se conseguisse maximizar o número de picos espectrais na faixa 0-500 MHz.

Sem muito rigor, pode-se notar que o pente de frequências gerado para $I_{bias} = 380$ mA foi “mais completo” que para $I_{bias} = 280$ mA. Em cada um dos casos, logo que o pente elétrico era estabelecido, observava-se o sinal no OSA e no osciloscópio (não aqui mostrado) para confirmar no domínio do tempo de que de fato se tratava do regime de *mode-locking* passivo. Isto será confirmado na subsecção 5.2.5.

Deve-se mais uma vez enfatizar que nos relatos nas sub-secções de 5.3.1 até 5.3.4, as medidas realizadas não foram feitas de forma simultânea, ou seja, após a observação no ESA, os cabos eram removidos e re-conectados no osciloscópio e depois no OSA.

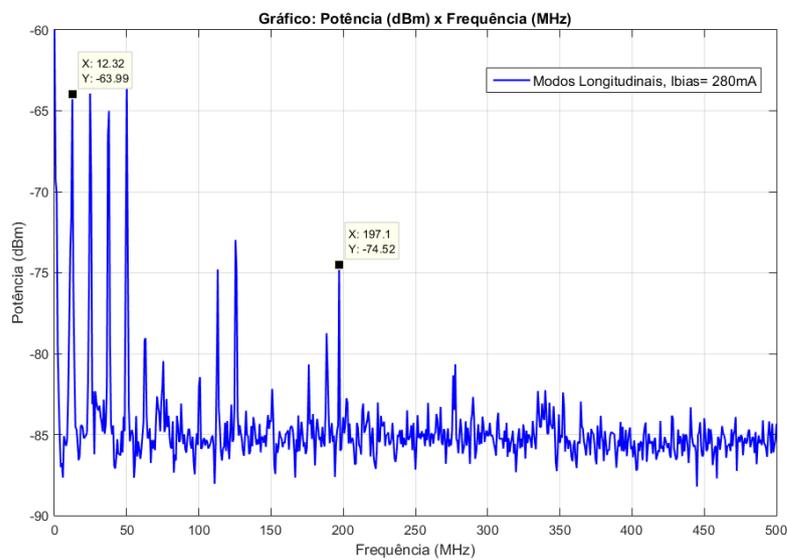


Figura 5.3: Espectro elétrico emitido pelo laser em anel na configuração de FL8 com I_{bias} de 280mA - RBW de 1 MHz.

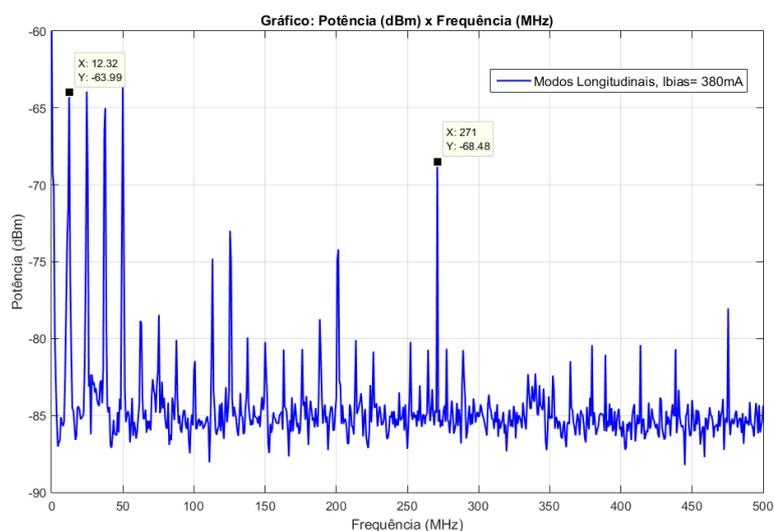


Figura 5.4: Espectro elétrico emitido pelo laser em anel na configuração de FL8 com I_{bias} de 380mA - RBW de 1 MHz.

Ao observar as Figuras 5.3 e 5.4, pode-se verificar a detecção do modo longitudinal fundamental centrado em 12,32 MHz, assim como alguns de seus harmônicos. No caso da corrente de polarização de 280 mA, é possível verificar até o 16^o harmônico centrado em 197,1 MHz e $\approx 10,5$ dB abaixo do nível do modo fundamental. Com o aumento da corrente de polarização até 380 mA é possível verificar o surgimento de novos harmônicos até o 22^o harmônico centrado em 271 MHz, este último agora com somente $\approx 4,5$ dB abaixo do nível fundamental. Estes resultados obtidos experimentalmente nos fornecem um espaçamento em frequências de aproximadamente 12,32 MHz, em acordo com o cálculo teórico realizado. Preliminarmente, já se pode inferir que modos longitudinais de maiores frequências e com maior intensidade podem ser obtidos com um aumento de I_{bias} no F8L.

5.2.2 Análise somente do Espectro Óptico

Nesse experimento, foi realizada a aquisição do espectro óptico emitido pelo F8L através de um OSA ajustada em 0,5 nm. Na Figura 5.5 é apresentado o espectro óptico emitido pelo F8L para uma corrente de polarização de 280 mA aplicada no SOA e o ajuste dos controladores de polarização foi feito de forma empírica.

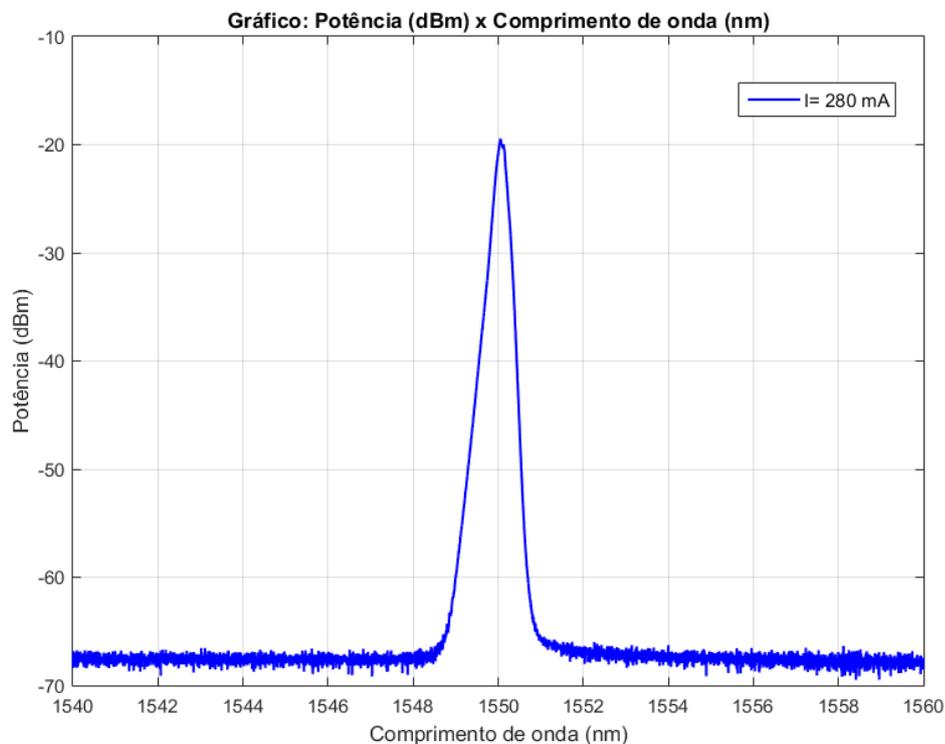


Figura 5.5: Espectro óptico emitido pelo FL8 em *mode-locking* passivo para $I_{bias} = 280$ mA.

Quando um filtro BPF como, por exemplo, o utilizado nesta Dissertação com 1,2 nm

de banda espectral, correspondente a 150 GHz, então espera-se obter um espectro de saída bem mais estreito em relação à situação de não usar um filtro BPF. Este estreitamento deve-se ao fato da luz efetuar diversas voltas no anel. De acordo com a Figura 5.5, é possível verificar uma relação sinal ruído de aproximadamente 46 dB para um comprimento central de 1550 nm. Obtém-se também da Figura 5.5, uma largura a meia altura (FWHM) de aproximadamente 0,28 nm que corresponde a uma largura em frequências de 35 GHz.

Ao obter a $FWHM = 35\text{GHz}$ do F8L é possível através da Equação 2.3 calcular o número máximo teórico de modos longitudinais que oscilam no ressonador óptico do laser construído. A equação 2.3 pode ser reescrita em função dos parâmetros conforme apresentado na Equação 5.2.

$$N = \frac{\Delta v}{\Delta f} \quad (5.2)$$

Sendo Δv a largura do espectro óptico (largura de linha) em frequência do laser e Δf o espaçamento em frequência dos modos longitudinais calculados anteriormente, sendo respectivamente 35 GHz e 12,1 MHz. Assim, o número de modos será dado pela largura de linha do laser sobre o espaçamento em frequência entre cada modo longitudinal, que foi calculado como sendo $N = 35\text{ GHz}/12,1\text{ MHz} = 2892$ modos.

A largura do espectro óptico mostrado na Figura 5.5 com $FWHM = \Delta v = 35\text{ GHz}$ é significativamente maior que o $FWHM \ll 2,5\text{ GHz}$ (ver Figura 4.7), onde 2,5 GHz é a melhor resolução, correspondente a 0,02 nm, que se pode obter com o OSA aqui utilizado. A razão da diferença, é que na Figura 4.7 temos o espectro óptico de um laser em anel operando em CW, ou seja, não são produzidos pulsos de *mode-locking*. A Figura 5.5 mostra o espectro óptico de saída de um F8L operando em *mode-locking* passivo. Então, o seu alargamento em relação ao espectro do laser em CW pode ser explicado pela produção de pulsos curtos no tempo. De acordo com a limitação imposta pelo produto $\Delta\tau\Delta v \sim 0,44$ (teoria de Fourier assumindo pulsos Gaussianos), uma banda de frequências ópticas deve ser criada.

Assumindo que os pulsos *mode-locking* produzidos sejam limitados pela transformada de Fourier, então para $\Delta v = 35\text{ GHz}$ pode-se calcular que tais pulsos poderão teoricamente apresentar uma largura temporal de $\Delta\tau \sim 0,44/35\text{ GHz} = 12,6\text{ ps}$. Na realidade, os pulsos produzidos terão uma largura temporal sempre maior que 12,6 ps. De qualquer forma, a combinação fotodiodo + osciloscópio disponível não possui resolução temporal suficiente,

conforme ficará claro na próxima sub-seção. Para a medição da largura temporal de pulsos na escala em torno de 10 ps e indo até femtossegundos, é necessário o uso de auto correlacionadores [Thorlabs, Femtochrome, Inrad (fechou)] [48, 49], também não disponível para esta Dissertação.

Uma vez que o I_{bias} seja o suficiente (acima do limiar), pode-se ajustar os controladores de polarização e monitorar o espectro óptico de saída com o auxílio de um OSA. Uma vez que se obtenha um máximo de largura espectral, da ordem de algumas dezenas GHz com a inclusão do BPF na cavidade, poder-se-á inferir que neste ponto, pulsos *mode-locking* passivo estão sendo gerados. Deve-se notar que a condição de *mode-locking* é obtida via monitoramento da “assinatura” espectral no domínio óptico. Isto será confirmado na subseção 5.2.5.

5.2.3 Análise somente do Sinal no Tempo

Para a análise do sinal de saída no tempo, foi realizada a caracterização do F8L de modo travado através de um fotodetector + osciloscópio. O objetivo nesta subseção, é o de verificar a formação de pulsos estáveis e curtos no tempo com uma taxa de repetição temporal periódica.

A Equação 5.3 apresenta a relação para o cálculo teórico do espaçamento no tempo (período) do trem de pulsos emitido pelo F8L. Trata-se do inverso do espaçamento em frequências para o caso do *mode-locking* no fundamental (FML ou *Fundamental Mode-Locking*).

$$\Delta t = \frac{n_{fibra} L_{perimetro}}{c} \quad (5.3)$$

De acordo com [50], a duração temporal T de cada pulso *mode-locking* pode ser calculado pela razão do espaçamento no tempo Δt entre os pulsos, dividido pelo número de modos longitudinais N de acordo então com a Equação 5.4.

$$T = \frac{\Delta t}{N} \quad (5.4)$$

Substituindo a Equação 5.3 em 5.4, é possível estimar a largura no tempo T do pulso emitido pelo laser em regime de *mode-locking*, utilizaremos a Equação 5.5 para a verificação desse valor teórico.

$$T = \frac{1}{N} \frac{n(L_{perimetro})}{c} \quad (5.5)$$

Na Equação 5.5, c é a velocidade da luz no vácuo ($3 \times 10^8 \text{ m/s}$), n_{fibra} (1,46) é o índice de refração que a luz experimenta ao se propagar ao longo da fibra e $L_{perimetro}$ é o perímetro total dos dois anéis de fibra óptica. Sendo o comprimento físico do anel de fibra = 17m, medido de forma independente, então $N = 2892$ é aproximadamente o número de modos longitudinais que oscilam na cavidade ressonante, conforme calculado pela Equação 5.2.

De acordo com a Equação 5.3 é possível obter um valor de $\Delta t = 80 \text{ ns}$ correspondente a $f_{FLM} = 12,5 \text{ MHz}$ onde f_{FLM} é a frequência de oscilação do modo fundamental. Então, Δt é o espaçamento no tempo entre os pulsos que são formados na cavidade do F8L. É possível verificar que a largura temporal estimada dos pulsos *mode-locking*, considerando pulsos limitados pela transformada de Fourier é de 12,6 ps. Deve-se desde já notar que o osciloscópio mais rápido de que dispomos (500 MHz) limita a medida de largura temporal dos pulsos ópticos em 1-2 ns.

Os traços de osciloscópio da saída do laser em *mode-locking* passivo para $I_{bias} = 180 \text{ mA}$, 280 mA, 380 mA e $> 380 \text{ mA}$ estão mostrados nas Figuras 5.6, 5.7, 5.8 e 5.9 respectivamente.

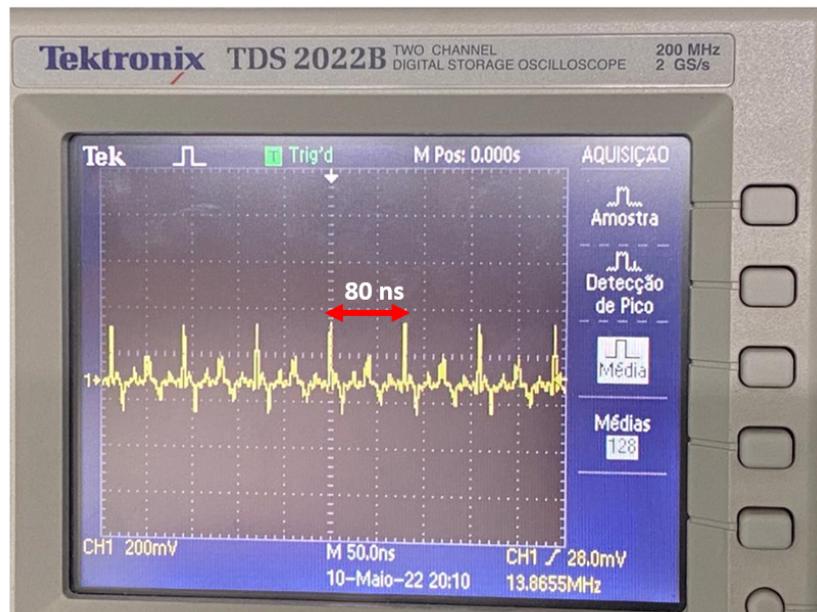


Figura 5.6: Traço de osciloscópio do sinal de saída emitido pelo F8L em *mode-locking* passivo na frequência fundamental $f_{FLM} = 12,5 \text{ MHz}$ para $I_{bias} = 180 \text{ mA}$.

A Figura 5.6 mostra o traço médio de saída para $I_{bias} = 180 \text{ mA}$ onde foi possível

detectar três comportamentos temporais distintos.

Primeiramente, e aqui o mais relevante, observa-se um trem de pulsos mais intensos onde a condição de *mode-locking* com período de 80 ns entre os pulsos é medida. O valor $\Delta t = 80$ ns corresponde à frequência de oscilação longitudinal fundamental de 12,5 MHz. Pode-se estimar um *duty-cycle* de no máximo $2\text{ns} / 80\text{ns} = 1/40 = 0,025 = 2,5\%$ para 12,5 MHz, um valor muito baixo como de se esperar.

Em segundo lugar, é possível verificar a presença de 2-3 pulsos menos intensos surgindo exatamente entre cada dois pulsos mais intensos consecutivos. Os pulsos menos intensos, acredita-se que possam corresponder a algum artifício de foto-deteção ou mais provavelmente a formação de sub-cavidades dentro do F8L. Na hipótese plausível de formação de sub-cavidades já que conectores FC/PC foram utilizados, parte da energia é retirada dos pulsos *mode-locked* em 12,5 MHz.

Em terceiro lugar, a Figura 5.6 mostra também a ocorrência de “pulsos negativos”, temporalmente aparecendo logo à direita de cada um dos pulsos no fundamental. É provável que tais “pulsos negativos” ou “pulsos escuros” (*dark pulses*) sejam apenas um artifício de foto-deteção, pois os referidos pulsos surgem abaixo do nível de terra do osciloscópio. Esta interpretação pode ser suportada por [41] (ver secção 5.1.2 e as Figuras 2.40 nesta Dissertação) que de fato descreve a possibilidade de um F8L com SOA gerar "*dark pulses*". Os "*dark pulses*" verdadeiros surgem a partir de um certo nível luminoso.

A Figura 5.7 mostra que para $I_{bias} = 280$ mA foi possível detectar a condição de *mode-locking* com período de 7,2 ns entre os pulsos, valor este correspondente à frequência de oscilação harmônica de 138,8 MHz, ou o 11^o harmônico *mode-locking* (HML).

Pode-se comparar o traço de osciloscópio da Figura 5.7 com a Figura 2.45, reprodução da segunda figura de [45]. É mostrado uma simulação numérica de uma sequência alternada temporal de um pulso forte e outro fraco, que a princípio pode parecer um tom harmônico e outro dobrado em frequência querendo se formar. No entanto, acredita-se que isto se deve a um *mode-locking* imperfeito, ou seja, um *locking* com um pequeno número de modos [45] e pode ser também devido as reflexões espúrias dos conectores FC/PC presentes no sistema que geram essas sub-cavidades harmônicas.

Tal interpretação pode eventualmente ser aplicada ao comportamento mostrado na Figura 5.6. A Figura 5.7 mostra também pulsos com 2 ns de duração, valor este severamente limitado pela banda em 200 MHz do osciloscópio utilizado. Pode-se agora estimar um *duty-cycle* de no máximo $2\text{ns}/7,2\text{ns} = 1/3,6 = 0,278 = 27,8\%$ para 137,5 MHz.

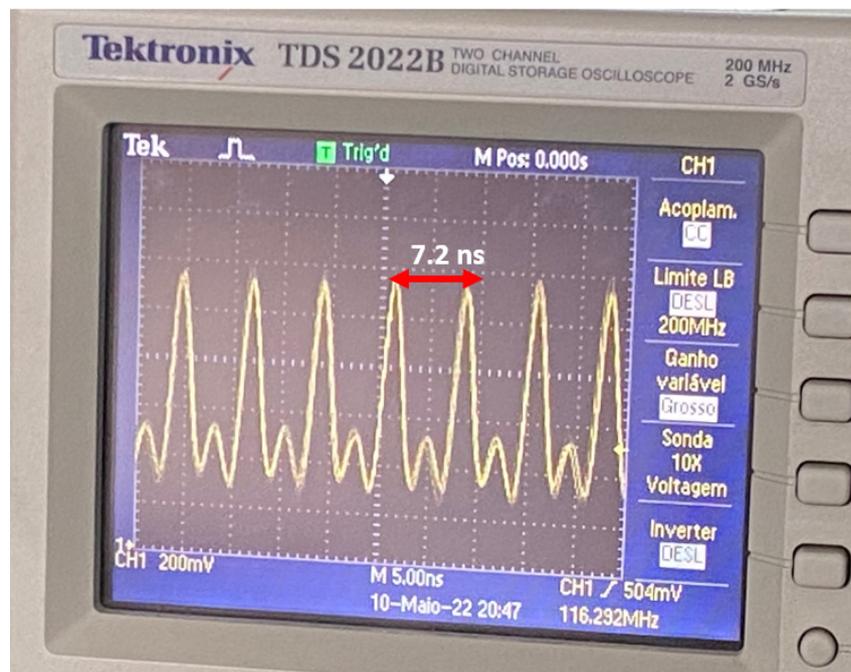


Figura 5.7: Traço de osciloscópio do sinal de saída emitido pelo F8L em *mode-locking* passivo para $I_{bias} = 280$ mA. Observa-se *mode-locking* no 11^o harmônico e a sua formação incompleta.

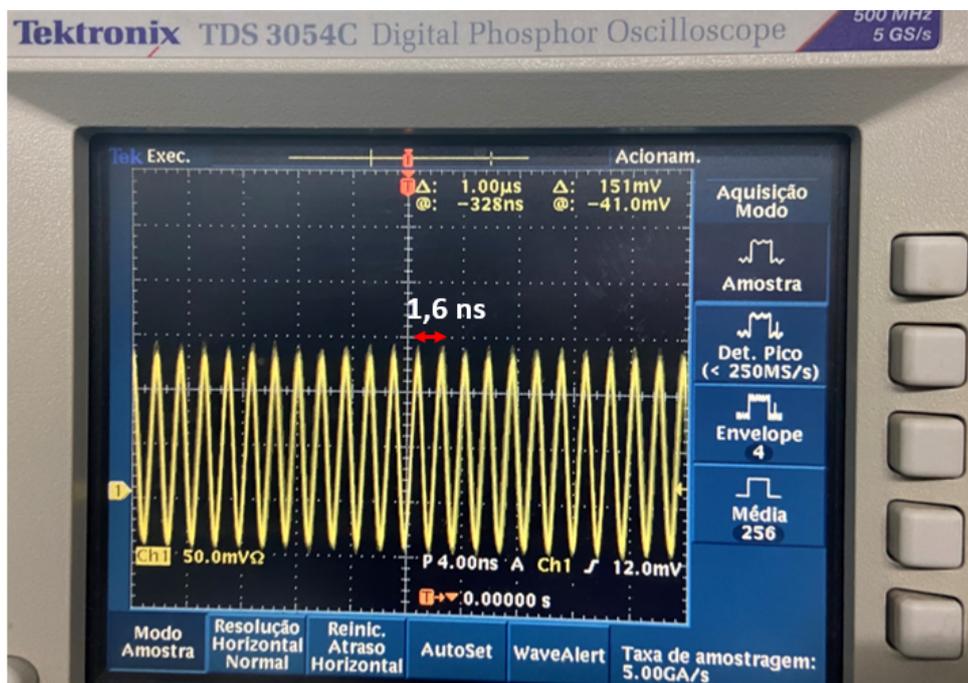


Figura 5.8: Traço de osciloscópio do sinal de saída emitido pelo F8L em *mode-locking* passivo para $I_{bias} = 380$ mA. Observa-se *mode-locking* no 50^o harmônico, com *duty-cycle* aparente de $\approx 50\%$.

A Figura 5.8, mostra que para $I_{bias} = 380$ mA foi possível detectar a condição de *mode-locking* com período de 1,6 ns entre os pulsos, valor este correspondente à frequência de

oscilação harmônica de 625 MHz, ou o 50^o HML.

A Figura 5.8 mostra também pulsos com aproximadamente 1 ns de duração, valor este também severamente limitado pela banda de 500 MHz do outro osciloscópio utilizado. S.-Sik Min *et al.* [51, 40] também obtiveram em osciloscópio pulsos *mode-locking* que são semelhantes com o tom verificado na Figura 5.8. Tal verificação corrobora com a interpretação dada para o respectivo gráfico. Isto também está mostrado na secção 5.1.2, Figuras 2.36 extraídas de [40]. Agora, para 625 MHz, temos $\approx 50\%$ de *duty-cycle* aparente, pois a resolução temporal aqui é limitada e os pulsos devem ter largura temporal menor, portanto o *duty-cycle* aqui obtido é na realidade $< 50\%$. Isto é diferente do que é mostrado em [40] onde foi utilizado uma combinação rápida de foto-detector + osciloscópio.

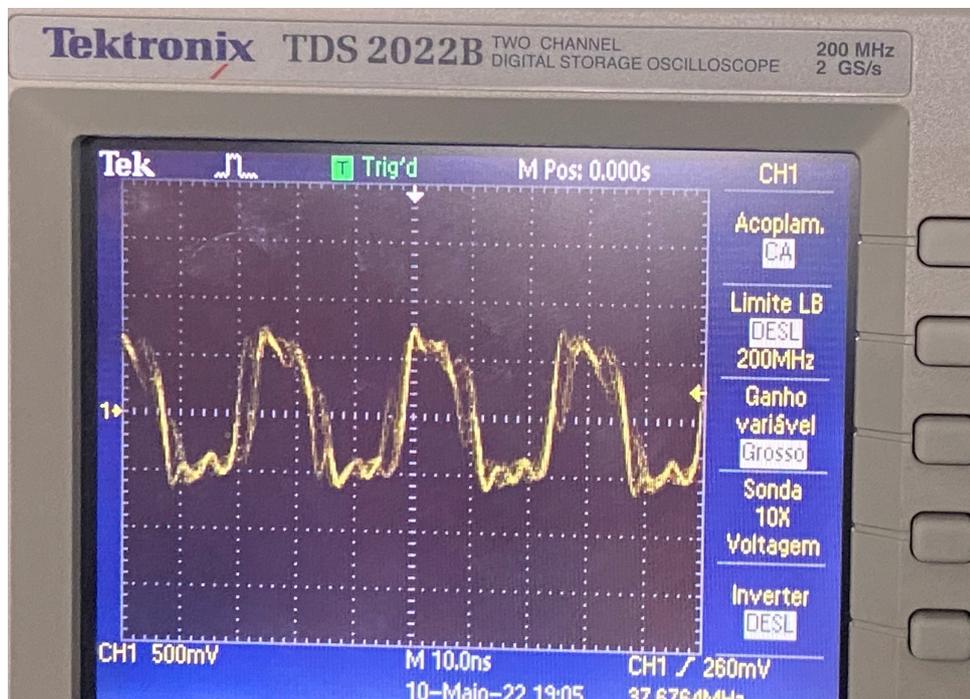


Figura 5.9: Traço de osciloscópio em formato "retangular" do sinal de saída emitido pelo F8L em *mode-locking* passivo para $I_{bias} > 380$ mA.

A Figura 5.9 mostra que para $I_{bias} > 380$ mA foi possível gerar e detectar pulsos ópticos "retangulares", porém apresentando *ripple*, na taxa de 38,5 MHz ($\Delta t = 26$ ns), correspondente ao 3^o HML. Os pulsos obtidos, apresentaram largura temporal à meia-altura de aproximadamente 10 ns, ainda dentro da banda do osciloscópio utilizado. A possibilidade de gerar via *mode-locking* um trem de pulsos em variados formatos como gaussiano, $sech^2$ ou retangular, está reportado na literatura como o artigo [52] de 1980, [41] usando F8L com apenas um SOA e recentemente conforme mostrado na Figura 4.4 da página 74 da tese de Doutorado [53]. Os pulsos gerados não necessariamente estarão limitados pela transformada de Fourier.

Com relação às atividades experimentais relatadas até então neste Capítulo 5, foi possível verificar um trem de pulsos *mode-locking* estáveis numa escala temporal tipicamente < 1 minuto para $I_{bias} < 300$ mA. Observou-se também estabilidade em ao menos durante vários minutos para valores de $I_{bias} > 300$ mA. Porém, foi observado simultaneamente muita sensibilidade para com o ajuste dos controladores de polarização.

5.2.4 Análise somente da Potência Óptica em função do I_{bias}

Nesse experimento foi feita a aquisição dos valores de potência óptica média (em mW) emitida pelo F8L em função do aumento da corrente de polarização (I_{bias}) aplicada no SOA (em mA). De acordo com a Figura 5.1, apenas o OPM foi utilizado como instrumento de medida.

Mais uma vez, para obter a condição de *mode-locking* é necessário o ajuste da corrente de bias e o ajuste dos controladores de polarização, este último de forma empírica. Na Figura 5.10 é apresentado o resultado do experimento.

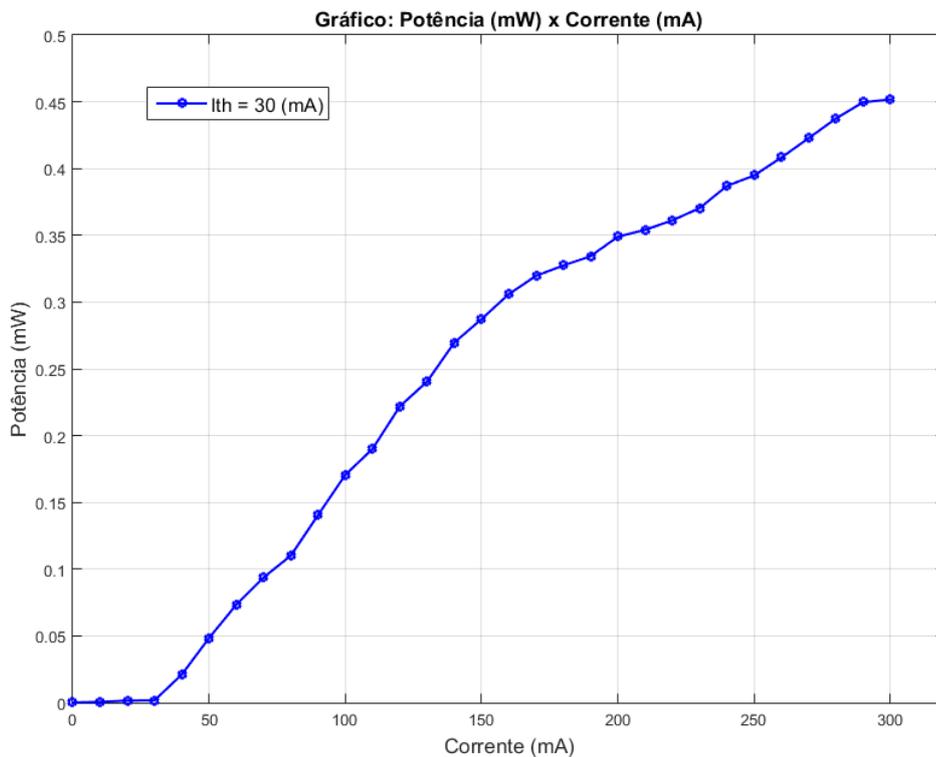


Figura 5.10: Potência óptica média de saída do F8L emitindo em função da corrente de *bias* onde 30 mA é a corrente limiar sob operação CW e ≈ 150 mA a corrente correspondente ao limiar do *mode-locking*.

Através do resultado apresentado na Figura 5.10, é possível observar que a existência de uma corrente limiar (I_{th} - *threshold current*) de 30 mA que é o ponto para o laser

entrar em operação, ou seja, o ponto em que a emissão estimulada supera as perdas na cavidade.

Vale destacar que no caso da estrutura F8L, a corrente de limiar medida (30 mA) é a mesma que no caso do anel simples em CW, conforme verificado na subseção 4.2.2 (Figura 4.10) do Capítulo 4.

A corrente de limiar para inicializar o travamento dos modos longitudinais na cavidade em configuração de F8L, foi observado em valores pouco maiores que 150 mA. Destacando aqui que mesmo injetando $I_{bias} > 150$ mA, para que o travamento passivo ocorra, é sempre necessário realizar um ajuste manual de forma empírica dos controladores de polarização. Pode-se observar do gráfico da Figura 5.10 que a partir da corrente limiar de emissão laser em 30 mA até a corrente limiar de *mode-locking* em 150 mA, temos um comportamento $P \times I_{bias}$ bastante linear, enquanto que para $I_{bias} > 150$ mA, pode-se observar um comportamento sub-linear que tende à saturação.

Uma parte da luz da cavidade é extraída por um acoplador 80/20, ou seja, 20% da luz permanece no anel e os outros 80% são retirados para análise do sinal através do OPM. Por esse motivo a potência média máxima emitida é de cerca de 0,45 mW medido na condição de *mode-locking* conforme é mostrado na Figura 5.10. Observou-se também em [40] frequências seletivas de *mode-locking*, e uma potência média de saída de $\approx 0,82$ mW para 180 mA [40] comparável com 0,45 mW aqui foi obtido, porém para $I_{bias} = 300$ mA.

5.2.5 Análise das Medidas Simultâneas (OSA, ESA e osciloscópio)

Embora o dispositivo F8L continuasse a ser o mesmo do apresentado na Figura 5.1, uma modificação na montagem experimental foi proposta e realizada com o objetivo de verificar e analisar simultaneamente o espectro óptico (OSA), elétrico (ESA) e o formato de onda (osciloscópio) no tempo. Na Figura 5.11 é apresentado esse novo esquema experimental.

Para ser possível a análise simultânea dos sinais de saída foram utilizados mais dois acopladores a fibra óptica em adição ao que está apresentada na topologia inicial da Figura 5.1.

Uma parte da luz da cavidade é extraída por um acoplador 80/20, ou seja, 20% da luz permanece no F8L e os outros 80% são retirados para análise. Temos que 20% da luz passa por um novo acoplador 90/10 que é introduzido, sendo que 10% da luz é para análise no OSA. Então, 90% da luz é enviada para outro acoplador 60/40, sendo 60%

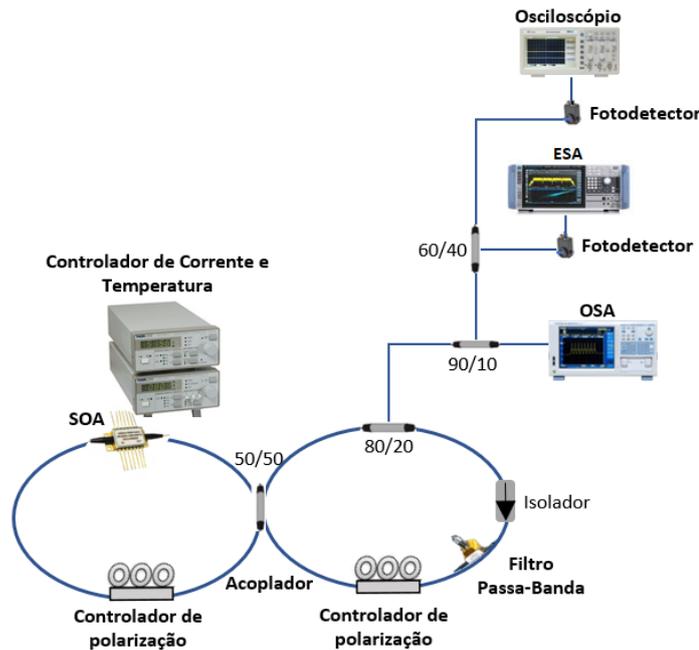


Figura 5.11: Esquema experimental do laser à fibra óptica em uma cavidade em F8L com um SOA como meio de ganho em regime de modo travado passivo com análise simultânea do sinal de saída no ESA, OSA e osciloscópio.

para análise do osciloscópio e os demais 40% para análise do espectro elétrico no ESA.

Tanto antes do osciloscópio quanto do antes do ESA, foram utilizados dois fotodetectores da Thorlabs iguais, com banda de 1,2 GHz, e sem pré-amplificação, apenas com tensão *bias*. A ideia dessas medições é verificar de forma simultânea o regime de *mode-locking* com suas “assinaturas” nos respectivos instrumentos.

Resultados e discussões para $I_{bias} = 180$ mA

Nas Figuras 5.12, 5.13 e 5.14 são mostrados os gráficos de medidas para uma corrente de $I_{bias} = 180$ mA aplicada no SOA do F8L, correspondendo respectivamente ao espectro elétrico (ESA), traço temporal (osciloscópio) e espectro óptico (OSA).

Na Figura 5.12 é possível verificar que para uma corrente de I_{bias} de 180 mA ocorre o surgimento de algumas frequências de oscilação dos modos longitudinais na cavidade em F8L, em particular o modo fundamental em torno de 12,5 MHz e alguns harmônicos. Pode-se notar que o pente em frequências com $\approx 12,5$ MHz de espaçamento aparece com picos bem fracos e quase em 800 MHz surge mais claramente um pico correspondendo ao 64^o harmônico.

Na Figura 5.13, sendo o traço de osciloscópio em tempo real, é possível observar a condição de *mode-locking* com período de 80 ns entre os pulsos, o que está de acordo com

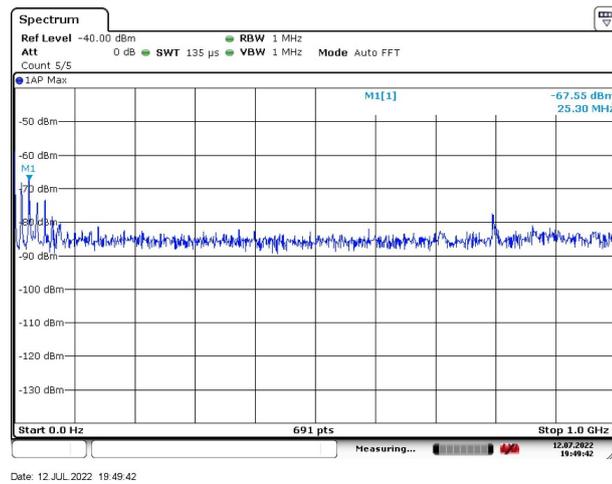


Figura 5.12: Espectro elétrico emitido pelo laser em anel na configuração F8L para I_{bias} de 180mA e RBW = 1 MHz.

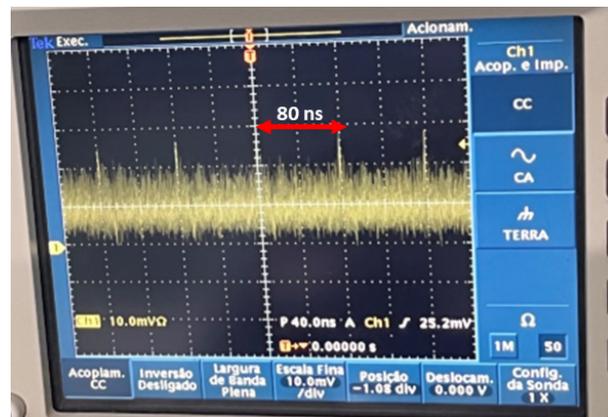


Figura 5.13: Formato de sinal no tempo emitido pelo laser em anel na configuração F8L para I_{bias} de 180mA. Temos um período de 80 ns e *duty-cycle* de no máximo 2,5%.

o valor encontrado na Figura 5.6, sendo esta última um traço de osciloscópio em média no tempo. O período de 80 ns é correspondente à frequência de oscilação fundamental de 12,5 MHz em boa concordância com o resultado do cálculo teórico em 12,1 MHz. Pode-se notar da Figura 5.13, um nível de ruído bastante alto quando se compara com a amplitude baixa dos pulsos *mode-locking*.

Na Figura 5.14 é apresentado o espectro óptico emitido que está centrado em 1550 nm para $I_{bias} = 180$ mA. Estima-se uma largura espectral de 0,0476 nm (ou ≈ 6 GHz) que implica em pulsos gaussianos de largura temporal de 73 ps se for limitado pela transformada de Fourier. Este último valor bem além da resolução temporal (≈ 2 ns) do sistema de medição aqui disponível. Deve-se observar que o filtro BPF de 1,2 nm corresponde a 150 GHz, onde o estreitamento espectral deve-se às múltiplas voltas pelo anel. Este resultado sugere a não ocorrência de sólitons, porém da geração de pulsos curtos na frequência

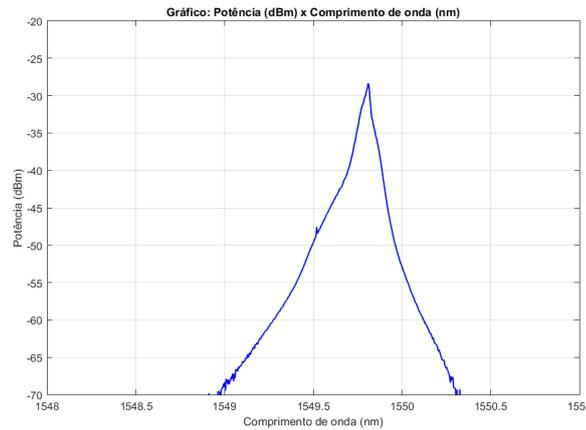


Figura 5.14: Espectro óptico emitido pelo laser em anel na configuração F8L para I_{bias} de 180mA.

fundamental. Esta possibilidade está de acordo com a literatura, onde é mostrado a ocorrência de sólitons utilizando F8L no regime anômalo, porém com dispersão gerenciada [54], que não é aqui o caso.

Resultados e discussões para $I_{bias} = 280$ mA

Nas Figuras 5.15, 5.16 e 5.17 são mostrados os gráficos de medidas para uma corrente de $I_{bias} = 280$ mA aplicada no SOA do F8L, correspondendo respectivamente ao espectro elétrico (ESA), traço temporal (osciloscópio) e espectro óptico (OSA).

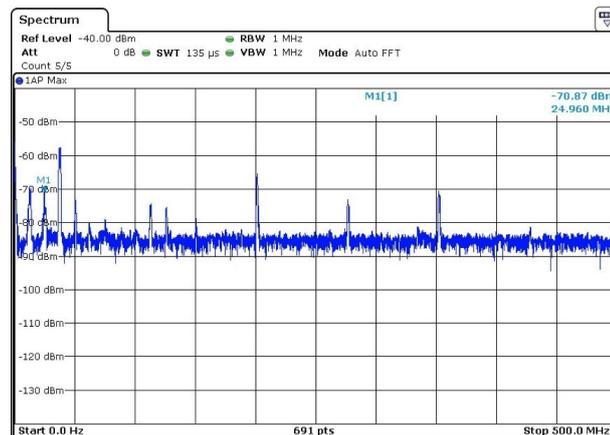


Figura 5.15: Espectro elétrico emitido pelo laser em anel na configuração F8L para I_{bias} de 280mA e RBW = 1 MHz.

Ao observar as Figura 5.15, é possível verificar que para uma corrente de I_{bias} de 280mA ocorre o surgimento de algumas frequências de oscilação, ou 8 harmônicos dos modos longitudinais na cavidade em F8L, em número maior que o observado para $I_{bias} = 180$ mA quando então apenas 4 harmônicos foram detectados em até 500 MHz.

Pode-se então observar o modo fundamental em torno de 12,5 MHz e alguns harmô-

nicos. Entretanto alguns harmônicos não aparecem, o que pode ser devido à existência de conexões PC/PC no circuito à fibra do F8L. Tais conexões PC/PC se não estiverem de fato “face-a-face”, podem se comportar como um interferômetro de Fabry-Perot que sua sua vez pode suprimir algumas frequências, pois comporta-se como um filtro rejeita-banda (*notch-filter*). De qualquer forma, isto ainda tem de ser verificado em trabalhos posteriores à esta Dissertação. Podem ser notados picos oscilantes em ≈ 277 e em ≈ 350 MHz, correspondentes ao 22^o e ao 28^o harmônicos, respectivamente.

Na Figura 5.7, foi mostrado que para $I_{bias} = 280$ mA foi possível atingir a condição de *mode-locking*, ainda que incompleta, com período de 7,2 ns entre os pulsos. Este último valor correspondente à frequência de oscilação harmônica de 138,8 MHz, ou o 11^o harmônico *mode-locking* (HML). A Figura 5.7 mostra também pulsos com 2 ns de duração, valor este severamente limitado pela banda em 200 MHz do osciloscópio utilizado.

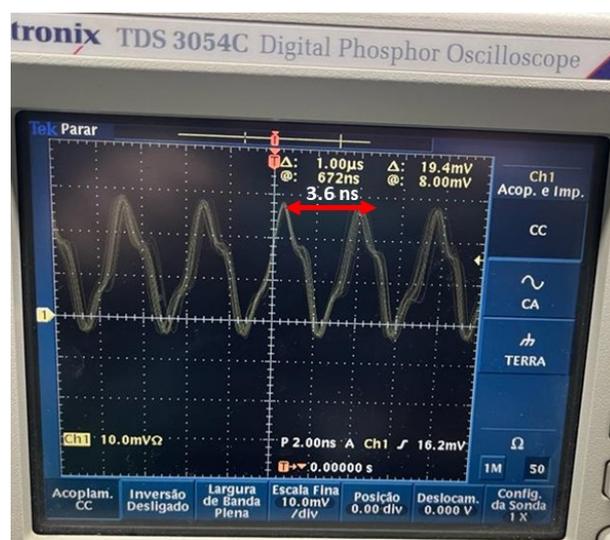


Figura 5.16: Formato de sinal no tempo emitido pelo laser em anel na configuração F8L para I_{bias} de 280mA. Observam-se pulsos *mode-locking* distorcidos no 22^o HML.

Porém, através de um ajuste fino dos controladores de polarização, foi possível conforme mostrado na Figura 5.16, obter a condição de *mode-locking* com período de 3,6 ns entre os pulsos. Esse último valor, correspondente à frequência de oscilação harmônica de 277,8 MHz ou o 22^o HML.

Entretanto, pode-se observar que os pulsos *mode-locking* saem distorcidos e limitados em ≈ 2 ns que é a resolução temporal do sistema foto-detector + osciloscópio. Um *duty-cycle* $< 50\%$ foi obtido. Pode-se daqui inferir que a condição de *mode-locking* possui um comportamento discreto (seletivo) fazendo um *locking* em alguma frequência harmônica f_{HML} conforme um estado de polarização exato ajustado para um certo valor fixo de I_{bias} .

Para $f_{HML} = 350$ MHz, por exemplo, não foi observado a condição de *mode-locking*, pelo menos para $I_{bias} = 280$ mA.

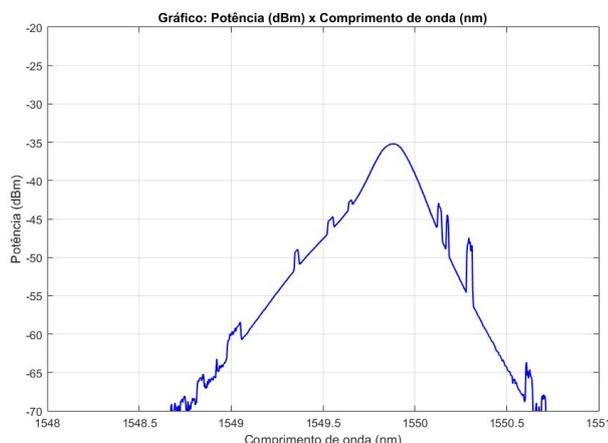


Figura 5.17: Espectro óptico indentado (possíveis bandas de Kelly) emitido pelo laser em anel na configuração F8L para I_{bias} de 280mA.

Na Figura 5.17 é apresentado o espectro óptico emitido e centrado em 1550 nm. Deste gráfico, pode-se extrair 1549,85 nm como o comprimento de onda de pico e $FWHM = 0,28$ nm correspondente a 35 GHz como largura espectral, assim é possível calcular o número de modos como sendo $N = 35 \text{ GHz} / 277,8 \text{ MHz} = 126$ modos, e uma largura temporal $T \approx 289$ ps, considerando pulsos gaussianos limitados pela transformada de Fourier.

Os espectros das Figuras 5.5 e 5.17 são similares quanto ao seu pico em 1550 nm e $FWHM = 35$ GHz, em princípio garantido pelo filtro óptico BPF centrado em 1550 nm e largura espectral de 150 GHz. Conforme já explicado, o estreitamento de 150 GHz para 35 GHz ocorre primariamente devido às múltiplas passagens pela cavidade do F8L.

Entretanto, surge agora uma diferença entre os espectros ópticos (das Figuras 5.5 e 5.17) e esta diferença aparece apenas devido à estados de polarização distintos através do controle dos PCs. Pode-se observar um espectro óptico “suave” na Figura 5.5 e um espectro óptico “indentado” de forma não-simétrica na Figura 5.17. De acordo com o explicado na secção 5.14, mais especificamente conforme esquematizado pela Figura 2.46 extraída de [45], é sugerido que a Figura 5.17 esteja mostrando um espectro óptico com as bandas laterais de Kelly ainda que com não-simetria [54].

As bandas laterais de Kelly consistem em uma “assinatura” no domínio óptico da saída de pulsos solitônicos para sistemas operando no regime de dispersão anômala ($GDD < 0$) como é o caso presente. Apesar da diferença na escala horizontal, o espectro óptico da Figura 5.5 mostra essencialmente um mesmo formato que o da Figura 5.17, com exceção da presença das bandas de Kelly neste último. Então, pode-se inferir que nas condições da

Figura 5.5 tenhamos no *mode-locking* a formação de pulsos não-solitônicos, em formato mais para gaussiano.

Resultados e discussões para $I_{bias} = 380$ mA

Foi verificado experimentalmente, que mesmo aumentando a resolução espectral do ESA, ou seja, diminuindo o RBW para 100 kHz e depois para 10 kHz, nenhum pico se revelou no espectro elétrico do F8L. No sentido contrário para $RBW = 10$ MHz, também nenhum pico novo surgiu.

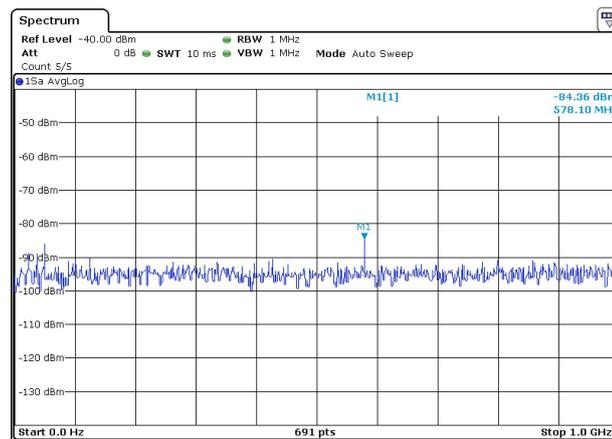


Figura 5.18: Espectro elétrico emitido pelo laser em anel na configuração de F8L para I_{bias} de 380mA e $RBW = 1$ MHz.

Ao observar a Figura 5.18, é possível verificar que para uma corrente de I_{bias} de 380 mA ocorre o surgimento apenas de uma frequência em 578,1 MHz com cerca de 11 dB de nível acima do nível de ruído.

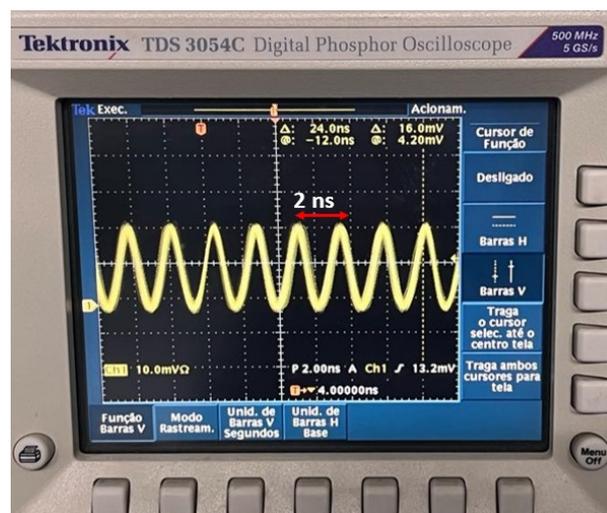


Figura 5.19: Formato de sinal no tempo emitido pelo laser em anel na configuração F8L para I_{bias} de 380 mA. (40^o HML) - Novamente, há um aparente *duty-cycle* de 50%.

A Figura 5.19 mostra que para $I_{bias} = 380$ mA foi possível detectar a condição de

mode-locking com período de 2 ns entre os pulsos aparentemente não-distorcidos, valor de período este correspondente à frequência de oscilação harmônica de 500 MHz, ou o 40^o HML. O valor dos pulsos com 2 ns de duração é super-estimado limitado pela banda em 500 MHz do osciloscópio utilizado. Alguns autores verificaram um comportamento semelhante. Analisando os resultados verificados em [51], pode-se observar que os autores obtiveram em osciloscópio pulsos *mode-locking* que semelhantes com 4,8 ns de período e largura temporal de 2,28 ns. Isto corrobora a interpretação dada para o gráfico da Figura 5.19, mas os autores de [51] não mostraram o respectivo espectro elétrico.

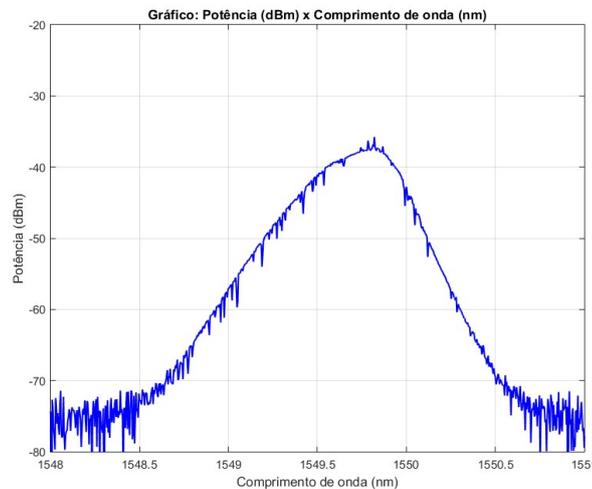


Figura 5.20: Espectro óptico emitido pelo laser em anel na configuração F8L para I_{bias} de 380mA. Observa-se um espectro com aspecto anti indentado não-simétrico.

O espectro óptico emitido é apresentado na Figura 5.20, sendo centrado em ≈ 1550 nm com um valor de potência -42,77 dBm. Pode-se também extrair o FWHM = 0,38 nm, o que corresponde a 47,5 GHz de largura espectral e mais uma vez assumindo pulsos limitados pela transformada de Fourier, obteremos $N = 47,5 \text{ GHz} / 0,5 \text{ GHz} = 95$ modos e $T \approx 383$ ps, valor mais curto quando comparado com o F8L alimentado com 280 mA.

Agora, curiosamente o que se observa, é um espectro óptico anti-indentado de forma não simétrica, algo em um certo sentido "invertido" com relação ao espectro óptico mostrado na Figura 5.17 para $I_{bias} = 280$ mA.

Pode-se comparar os resultados mostrados na Figura 5.20 com o reportado em [40], onde observa-se um espectro óptico e formato temporal correspondente muito semelhante ao aqui descrito. O formato de onda temporal da Figura 5.19 sugere pulsos não tão curtos (duração de ≈ 1 ns) e um trem de ondas com *duty-cycle* próximo de 50%, similar ao relato em [40].

A Figura 5.21, mostra que para $I_{bias} > 380$ mA foi possível detectar pulsos ópticos

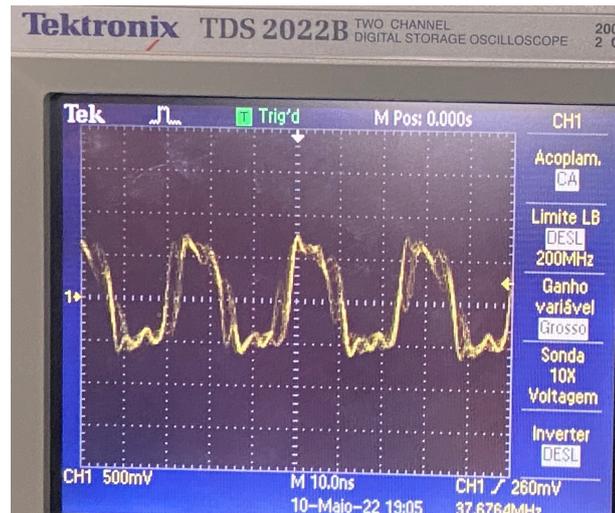


Figura 5.21: Traço de osciloscópio do sinal de saída emitido pelo F8L em *mode-locking* passivo na forma de pulsos retangulares para $I_{bias} > 380$ mA.

retangulares em formato temporal na taxa de 38,5 MHz ($T \approx 26$ ns), correspondente ao 3^o HML. Os pulsos se apresentam com largura temporal a meia-altura de ≈ 10 ns, ainda dentro da banda do osciloscópio utilizado. A possibilidade de gerar via *mode-locking* um trem de pulsos em variados formatos como o gaussiano, *sech*² ou retangular [52], está reportado em [41] usando a configuração F8L com apenas um SOA.

Os pulsos não necessariamente estarão limitados pela transformada de Fourier. Para $I_{bias} > 350$ mA observou-se pulsos *mode-locked* estáveis numa escala temporal tipicamente de poucos a vários minutos, porém com muita sensibilidade para com o ajuste dos controladores de polarização.

Capítulo 6

Conclusões

Esta Dissertação descreveu um laser na configuração de figura-de-oito (F8L) no regime de dispersão anômala, em *mode-locking* passivo. No F8L aqui descrito, foi utilizado como meio de ganho um SOA ultrarrápido (25 ps) limitado em $I_{bias} = 400$ mA e de ganho em 10 dB, relativamente menor que outros SOAs comerciais.

Adicionalmente, o SOA compôs um NALM que fez o papel de absorvedor saturável "artificial". Não foi encontrado na literatura qualquer registro de F8Ls utilizando como meio de ganho um SOA com as características do aqui utilizado.

Pôde-se preliminarmente concluir pela possibilidade de gerar certa variedade de padrões de saída conforme mostrado pelas "assinaturas" de espectro óptico em função de I_{bias} e o ajuste de polarização. Foi também observado a geração de pulsos retangulares, mesmo sendo mais propensos a surgirem sob o regime de dispersão normal. Um confronto de simulações numéricas a partir de modelos adequados com os resultados experimentais, é aqui necessário para uma continuação e aprofundamento da pesquisa.

A autora acredita que esta Dissertação contribuiu para um avanço significativo no desenvolvimento de lasers à fibra óptica no LaCOP/UFF. De forma mais específica, pode-se elencar algumas conclusões listadas a seguir:

1. Lasers sintonizáveis em anel à fibra com SOA como meio de ganho operando em CW, podem facilmente ser construídos como instrumento de Laboratório e qualquer outro uso.
2. Lasers em anel na configuração de figura-de-oito (F8L), este último no regime de dispersão anômala em 1550 nm, pode sem grandes dificuldades, operar em regime de *mode-locking* passivo.

3. Pôde-se concluir sobre a possibilidade de se obter sintonização HML (não-linear) em até 50^o harmônico no F8L ao ser aumentada a corrente de polarização do SOA, devido as propriedades ópticas não-lineares da fibra que forma o NALM que realiza a comutação mais rápida, assim como um ajuste preciso do estado de polarização.
4. Pode-se gerar de pulsos retangulares mesmo no regime anômalo. Estes últimos são mais propensos a surgirem sob o regime de dispersão normal.
5. Para $I_{bias} = 280$ e 380 mA na condição de *mode-locking* do F8L, observou um espectro óptico em formato de sino com sub-picos e com incrustações espectrais, respectivamente.
6. Deve-se ressaltar que no F8L aqui descrito, foi utilizado como meio de ganho um SOA ultra-rápido (25 ps) limitado em $I_{bias} = 400$ mA e de ganho relativamente menor (10 dB para $P_{in} = 0$ dBm) que outros SOAs comumente encontrados no mercado. Adicionalmente, o SOA compôs o NALM que fez o papel de absorvedor saturável artificial. Não foi encontrado na literatura qualquer registro de F8Ls utilizando como meio de ganho um SOA com as características do aqui utilizado.
7. Pode-se também concluir sobre a variedade e complexidade de sinais que podem ser gerados com simples ajustes de I_{bias} e de estado de polarização na cavidade.

Uma continuação natural deste trabalho é aprofundar a caracterização do F8L com medidas de potência óptica na cavidade, espectros óptico e elétrico de saída. Um modelo teórico e simulações numéricas também são aqui necessárias para a continuação desta pesquisa. Em particular, deve-se incluir no modelo SOAs ultra-rápidos como o aqui utilizado.

Referências

- [1] CHERRY, E.; HOOPER, D. The design of wide-band transistor feedback amplifiers. v. 110, p. 375–389, 1963.
- [2] RIBEIRO, J. A. J. Características da propagação em fibras ópticas. *Instituto Nacional de Telecomunicações*, p. 14, 1999.
- [3] BANOVA, J. T. M. Abordagem evolutiva para o planejamento multi-período da expansão da rede de acesso aos serviços de telecomunicações. [sn], 2005.
- [4] FIBRA óptica domina banda larga fixa no Brasil. [Online; Acessado em 22/09/2022]. Disponível em: <<https://olhardigital.com.br/2022/08/01/internet-e-redes-sociais/fibra-optica-domina-banda-larga-fixa-no-brasil>>.
- [5] DIGONNET, M. J. *Rare-earth-doped fiber lasers and amplifiers, revised and expanded*. [S.l.]: CRC press, 2001.
- [6] ALESHKINA, S. S.; BUBNOV, M. M.; LIKHACHEV, M. E. Nanosecond pulse generation near 1.55 micron in the all-fiber figure-eight mode-lock laser with passive nonlinear loop mirror. In: IEEE. *2016 4th International Conference on Photonics, Optics and Laser Technology (PHOTOPTICS)*. [S.l.], 2016. p. 1–6.
- [7] WANG, S.-K.; NING, Q.-Y.; LUO, A.-P.; LIN, Z.-B.; LUO, Z.-C.; XU, W.-C. Dissipative soliton resonance in a passively mode-locked figure-eight fiber laser. *Optics express*, Optica Publishing Group, v. 21, n. 2, p. 2402–2407, 2013.
- [8] LI, Z.; JIA, D.; SUN, X.; JIN, Y. Generation of square pulse in an all-fiber yb-doped figure-of-eight fiber laser. In: OPTICA PUBLISHING GROUP. *Asia Communications and Photonics Conference*. [S.l.], 2018. p. Su2A–101.
- [9] CHEN, H.-R.; LIN, K.-H.; TSAI, C.-Y.; WU, H.-H.; WU, C.-H.; CHEN, C.-H.; CHI, Y.-C.; LIN, G.-R.; HSIEH, W.-F. 12 ghz passive harmonic mode-locking in a 1.06 μm semiconductor optical amplifier-based fiber laser with figure-eight cavity configuration. *Optics Letters*, Optica Publishing Group, v. 38, n. 6, p. 845–847, 2013.
- [10] WADA, O. Femtosecond all-optical devices for ultrafast communication and signal processing. *New Journal of Physics*, IOP Publishing, v. 6, n. 1, p. 183, 2004.
- [11] RIBEIRO, R. M.; LUCARZ, F.; FRACASSO, B. An all-optical sampler for digitising radio-over-fibre transceivers. In: IEEE. *Proceedings of the 2013 18th European Conference on Network and Optical Communications & 2013 8th Conference on Optical Cabling and Infrastructure (NOC-OC&I)*. [S.l.], 2013. p. 27–34.

- [12] DUDLEY, J. M.; BARRY, L. P.; HARVEY, J. D.; THOMSON, M. D.; THOMSEN, B. C.; BOLLOND, P. G.; LEONHARDT, R. Complete characterization of ultrashort pulse sources at 1550 nm. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, IEEE, v. 35, n. 4, p. 441–450, 1999.
- [13] ZHOU, Y.; ZHANG, K.; WANG, T.; BI, W.; LIAO, M.; ZHAO, G.; FANG, Y. Recent progress in passively mode-locked fiber lasers based on low dimensional nanomaterials. *Results in Optics*, Elsevier, p. 100302, 2022.
- [14] BAGNATO, V. S. Os fundamentos da luz laser. *Física na escola*, v. 2, n. 2, p. 4–9, 2001.
- [15] GRIOT, M. Basic laser principles. *Melles Griot*, 2009.
- [16] WILSON, J.; HAWKES, J. *Lasers Principles and Applications*. [S.l.]: Prentice-Hall, Englewood Cliffs, New Jersey, 1987.
- [17] FOTH, H.-J. Principles of lasers. *Willey-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, Weinheim ISBN*, 2008.
- [18] BARBERO, A. P. Notas de aula, *Notas de Aula da disciplina de Comunicações Ópticas do curso de bacharelado em Engenharia de Telecomunicações da Universidade Federal Fluminense*. Niterói, RJ, Brasil: [s.n.], 2017.
- [19] WASFI, M. Optical fiber amplifiers-review. *International Journal of Communication Networks and Information Security (IJCNIS)*, v. 1, n. 1, p. 42–47, 2009.
- [20] AGRAWAL, G. P. *Fiber-optic communication systems*. [S.l.]: John Wiley & Sons, 2012.
- [21] RANI, A.; DEWRA, M. S. Semiconductor optical amplifiers in optical communication system-review. *Int J Eng Res Technol (IJERT)*, v. 2, p. 2710–19, 2013.
- [22] SCHEMER, D. K. M. L. L. *Fiber optic communication technology*. [S.l.]: Pearson Education, 2000.
- [23] ENDO, M.; WALTER, R. F. *Gas lasers*. [S.l.]: CRC Press, 2018.
- [24] ENNEJAH, T.; ATTIA, R. Mode locked fiber lasers. *Current Developments in Optical Fiber Technology*, IntechOpen, p. 405–426, 2013.
- [25] THEIMER, J.; HAUS, J. Figure-eight fibre laser stable operating regimes. *Journal of modern Optics*, Taylor & Francis, v. 44, n. 5, p. 919–928, 1997.
- [26] HOFER, M.; OBER, M.; HABERL, F.; FERMAN, M. Characterization of ultrashort pulse formation in passively mode-locked fiber lasers. *IEEE journal of quantum electronics*, IEEE, v. 28, n. 3, p. 720–728, 1992.
- [27] FOWLES, G. R. *Introduction to modern optics*. [S.l.]: Courier Corporation, 1989.
- [28] BINH, N. Q. N. L. N. *Ultra-fast fiber lasers*. [S.l.]: CRC Press, 2011.
- [29] SHARMA, U.; WEI, X. Fiber optic interferometric devices. In: *Fiber Optic Sensing and Imaging*. [S.l.]: Springer, 2013. p. 29–53.

- [30] DORAN, N.; WOOD, D. Nonlinear-optical loop mirror. *Optics letters*, Optica Publishing Group, v. 13, n. 1, p. 56–58, 1988.
- [31] FERMAN, M. E.; HABERL, F.; HOFER, M.; HOCHREITER, H. Nonlinear amplifying loop mirror. *Optics Letters*, Optica Publishing Group, v. 15, n. 13, p. 752–754, 1990.
- [32] LEFEVRE, H. Single-mode fibre fractional wave devices and polarisation controllers. *Electronics letters*, v. 20, n. 16, p. 778–780, 1980.
- [33] ROSA, H. G. Estudo das propriedades ópticas do grafeno e sua aplicação como absorvedor saturável em lasers à fibra dopada com érbio. Universidade Presbiteriana Mackenzie, 2015.
- [34] HAUS, H. A. Theory of mode locking with a fast saturable absorber. *Journal of Applied Physics*, American Institute of Physics, v. 46, n. 7, p. 3049–3058, 1975.
- [35] WU, S.; STRAIT, J.; FORK, R. L.; MORSE, T. High-power passively mode-locked er-doped fiber laser with a nonlinear optical loop mirror. *Optics letters*, Optica Publishing Group, v. 18, n. 17, p. 1444–1446, 1993.
- [36] HOLMES, M.; WILLIAMS, D.; MANNING, R. Highly nonlinear optical fiber for all optical processing applications. *IEEE Photonics Technology Letters*, IEEE, v. 7, n. 9, p. 1045–1047, 1995.
- [37] KOMAROV, A.; LEBLOND, H.; SANCHEZ, F. Passive harmonic mode-locking in a fiber laser with nonlinear polarization rotation. *Optics communications*, Elsevier, v. 267, n. 1, p. 162–169, 2006.
- [38] DAVENPORT, M. L.; LIU, S.; BOWERS, J. E. Integrated heterogeneous silicon/iii-v mode-locked lasers. *Photonics Research*, Optica Publishing Group, v. 6, n. 5, p. 468–478, 2018.
- [39] CORREIA, J. P. v. d. W. M. M. 2.5-ghz passively mode-locked fiber ring laser employing a semiconductor optical amplifier as nonlinear polarization rotator device. *20^o Simpósio Brasileiro de Micro-Ondas e Optoeletrônica (SBMO 2022)*, Natal, 13-16 de Novembro, 2022.
- [40] MIN, S.-s.; ZHAO, Y.; FLEMING, S. Semiconductor optical amplifier based high duty-cycle, self-starting figure-eight 1.7 ghz laser source. *Optics express*, Optica Publishing Group, v. 17, n. 8, p. 6187–6193, 2009.
- [41] PAN, H. G.; YU, J. L.; WANG, W.; LIU, Y.; YANG, E. Dark pulse optical fiber laser based on semiconductor optical amplifier. *Optical Engineering*, Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers, v. 54, n. 1, p. 011002–011002, 2015.
- [42] CHAPARRO, D.; FURFARO, L.; BALLE, S. 247 fs time-localized structures from a passively mode-locked figure-of-eight semiconductor laser. In: IEEE. *2017 Conference on Lasers and Electro-Optics Europe & European Quantum Electronics Conference (CLEO/Europe-EQEC)*. [S.l.], 2017. p. 1–1.

- [43] CHAPARRO, D.; FURFARO, L.; BALLE, S. Subpicosecond pulses in a self-starting mode-locked semiconductor-based figure-of-eight fiber laser. *Photonics Research*, Optica Publishing Group, v. 5, n. 1, p. 37–40, 2017.
- [44] TAKEUCHI, Y.; SAITO, R.; ENDO, S.; KURIHARA, T.; MUSHA, M. Self-started figure-8 mode-locked fiber laser for space borne optical frequency comb. In: OPTICA PUBLISHING GROUP. *The European Conference on Lasers and Electro-Optics*. [S.l.], 2021. p. cf_p_7.
- [45] SOBOŃ, G.; ABRAMSKI, K. Fiber-based laser frequency combs. *Bulletin of the Polish Academy of Sciences. Technical Sciences*, Polska Akademia Nauk. Czytelnia Czasopism PAN, v. 60, n. 4, p. 697–706, 2012.
- [46] DATASHEET 1550 nm Nonlinear SOA. [Online; Acessado em 14/12/2021]. Disponível em: <<http://www.kamelian.com/data/nlsoa>>.
- [47] DATASHEET Tunable Optical Filter (TOTF). [Online; Acessado em 14/12/2021]. Disponível em: <<http://www.lightwaves2020.com/productinfo>>.
- [48] THORLABS, Inc. [S.l.]. [Online; Acessado em 19/08/2022]. Disponível em: <<https://www.thorlabs.com/>>.
- [49] FEMTOCHROME Research, Inc. [S.l.]. [Online; Acessado em 19/08/2022]. Disponível em: <<https://www.femtochrome.com/>>.
- [50] WILSON, J.; HAWKES, J. *Lasers, principles and applications*. [S.l.]: Prentice hall, 1987.
- [51] MIN, S.-s.; ZHAO, Y.; FLEMING, S. Passively modelocked self-starting figure-eight fiber laser with semiconductor optical amplifier. In: IEEE. *OECC/ACOFT 2008-Joint Conference of the Opto-Electronics and Communications Conference and the Australian Conference on Optical Fibre Technology*. [S.l.], 2008. p. 1–2.
- [52] SALA, K.; KENNEY-WALLACE, G.; HALL, G. Cw autocorrelation measurements of picosecond laser pulses. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, IEEE, v. 16, n. 9, p. 990–996, 1980.
- [53] CORREIA, J. P. v. d. W. M. M. *Mode-locked fiber lasers for optical time-domain reflectometry and sensing*. Tese (Doutorado) — Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, 2023.
- [54] NING, Q.-Y.; WANG, S.-K.; LUO, A.-P.; LIN, Z.-B.; LUO, Z.-C.; XU, W.-C. Bright–dark pulse pair in a figure-eight dispersion-managed passively mode-locked fiber laser. *IEEE photonics journal*, IEEE, v. 4, n. 5, p. 1647–1652, 2012.

APÊNDICE A

Publicações

Resposta Óptica de um Laser-1550 nm em *Mode-Locking* na Cavity de Figura-de-8

Laila J. S. Souto, Filipe L. T. da Silva, Cláudia B. Marcondes, Marlon M. Correia e Ricardo M. Ribeiro

Resumo— Este artigo descreve a montagem e caracterização de resposta no espectro óptico de um dispositivo laser à fibra em configuração de Figura-de-Oito (F8L) utilizando um único amplificador óptico semiconductor como meio de ganho e modulador. O F8L foi feito operar em *mode-locking* passivo com diferentes ajustes de corrente de *bias* e estado de polarização. Observou-se espectros ópticos estreitos de saída ($< 0,4$ nm), porém com diferentes formatos que revelam diferentes padrões temporais que podem ser gerados.

Palavras-Chave— Amplificador Óptico Semiconductor, Comunicações Ópticas, Dispositivos Ópticos, Laser em Figura-de-Oito.

Abstract— This paper describes the assembly and characterization of the optical spectrum response of a fiber laser device in a Figure-of-Eight (F8L) configuration using a single semiconductor optical amplifier as the gain medium and modulator. The F8L was made to operate in passive mode-locking with different settings of bias current and polarization state. Narrow optical output spectra (< 0.4 nm) were observed, but with different formats that reveal different temporal patterns that can be generated.

Keywords— Figure-of-Eight Laser, Optical Communications, Optical Devices, Semiconductor Optical Amplifier.

I. INTRODUÇÃO

Os lasers à fibra óptica permitem obter confinamento do sinal ao longo da fibra de uma forma extremamente eficiente. Com isso, torna-se possível a construção de lasers (à fibra) em uma cavidade longa de forma relativamente simples com alinhamento automático. Então, lasers à fibra compactos podem se constituir em uma alternativa prática aos lasers convencionais de estado sólido para diversas aplicações [1]. As principais vantagens do laser à fibra quando se compara com os de estado sólido são: alta qualidade da seção transversal do feixe óptico, alta eficiência na conversão elétrico-óptica, compactação, robustez e dissipação térmica bastante eficiente [1]. As propriedades de propagação como dispersão cromática, birrefringência e não-linearidades ópticas, naturalmente impactam a operação dos lasers à fibra pelo fato da luz ficar confinada em seu núcleo. As principais desvantagens do confinamento óptico em cavidades longas são: instabilidade espectral e temporal de emissão da luz devido a fatores externos como distúrbios acústicos e térmicos [1]. Entretanto, as características de propagação mencionadas podem, por outro lado, ser vantajosamente exploradas, como por exemplo:

Laila Souto, Filipe Silva, Marlon Correia e Ricardo Ribeiro - Laboratório de Comunicações Ópticas, Universidade Federal Fluminense, Niterói-RJ, Brasil e Cláudia Marcondes - CEFET-RJ, Rio de Janeiro-RJ, Brasil, e-mails: laila_sousa@id.uff.br, filipe.engtel@gmail.com, claudia.marcondes@cefet-rj.br e rnr@telecom.uff.br. Este trabalho foi parcialmente financiado pela Faperj e CNPq.

na geração de pulsos retangulares de nanossegundos [2] ou de pulsos curtos solitônicos na faixa de picossegundos ou femtossegundos [3].

Uma importante vertente no desenvolvimento de lasers à fibra óptica sendo também de interesse para as Telecomunicações, é na geração de pulsos curtos ou ultracurtos cobrindo uma larga faixa que vai de dezenas de nanossegundos até dezenas de femtossegundos [2-5]. Têm-se também obtido taxas de repetição de pulsos de laser que vão de kHz [4] até multi-GHz através de processos de *mode-locking* ou *Q-switching* [6].

As aplicações são diversas nas comunicações à fibra óptica, como exemplos: na geração de solitons, na realização de amostragem totalmente óptica devido ao baixo *jitter* que pode ser obtido, na geração ultra-estável de padrões de altas taxas (exemplo: OC-192/STM-64/10G SONET/SDH) e na regeneração digital tipo 3R [7,8]. Outras aplicações de pulsos ultracurtos também têm sido reportadas como a sua utilização na caracterização de fenômenos rápidos em dispositivos ópticos ou optoeletrônicos [9], compostos químicos [10] e estruturas biológicas [10].

Os amplificadores ópticos semicondutores (SOAs) disponíveis no mercado apresentam uma rápida recuperação do ganho de amplificação que tipicamente pode ir de ≈ 1 ns até 15 ps. Isto permite a aplicação de SOAs em diversos circuitos ópticos para o processamento fotônico de sinais [11]. Quando inseridos na montagem dos lasers à fibra óptica, os SOAs podem desempenhar simultaneamente o papel de meio de ganho óptico e de modulador. Os SOAs além de serem de uso versátil, compactos e compatíveis com a integração óptica, possuem espectro de ganho largo, possibilitando então a geração de pulsos ópticos ultracurtos em sub-picossegundos e em femtossegundos.

A maior parte dos artigos publicados que descrevem um dispositivo laser em Figura-de-Oito (F8L) visando *mode-locking* passivo, faz uso de fibras ópticas dopadas com terras raras (Er, Yb, Ho, etc.) como meio de ganho/modulação. O F8L usa a técnica “ativa” de NALM (*Nonlinear Amplifying Loop Mirror*) ou NPR (*Nonlinear Polarization Rotation*) como absorvedores saturáveis “artificiais”. Alguns artigos descrevem o uso de um SOA em combinação com fibra dopada, por exemplo, com Érbio [12]. Entretanto, apenas alguns poucos artigos foram encontrados reportando um dispositivo F8L em *mode-locking* passivo baseado em um NALM com a inserção de um único SOA como meio de ganho/modulação [5,6,13-15].

Este artigo descreve o desenvolvimento experimental de um dispositivo laser à fibra óptica na configuração de Figura-de-

XLI SIMPÓSIO BRASILEIRO DE TELECOMUNICAÇÕES E PROCESSAMENTO DE SINAIS - SBt 2023, 08-11 DE OUTUBRO DE 2023, SÃO JOSÉ DOS CAMPOS, SP

Oito (F8L) operando em 1550 nm (dispersão anômala) em uma cavidade de aproximadamente 17 m no regime de *mode-locking* passivo. Em particular, o trabalho mostra diferentes padrões de espectro óptico e formatos temporais correspondentes para 180, 280, 380 e > 380 mA de corrente de *bias*. Um único SOA de resposta ultra rápida (25 ps) está presente na cavidade.

Na seção II está descrita a montagem experimental do F8L, na III os resultados experimentais obtidos e discussões pertinentes, e finalmente na seção IV as conclusões do artigo.

II. BREVE ANÁLISE DA LITERATURA

O F8L descrito em [14] reporta o uso de um amplificador a fibra dopada com Er⁺ combinado com um SOA, este último com 20 dB de ganho e 30 ns de tempo de subida máximo. Obtiveram *mode-locking* em 210 MHz ($T = 4,8$ ns), ou o 28° HML em torno de 1550 nm.

No artigo [6], é descrito um F8L usando um SOA como meio de ganho, porém com emissão centrada em 1,06 μm . Foi observado *mode-locking* passivo na faixa de 30 MHz – 12,02 GHz, correspondente até o 1202° HML. A sintonização em frequência de repetição foi obtida variando o I_{bias} na faixa 80 - 660 mA. A operação deste F8L [6] foi no regime de dispersão normal (para 1,06 μm) onde o mecanismo de formação dos pulsos é completamente diferente dos gerados por F8Ls operando no regime anômalo (sólitons convencionais). Foi mostrado em [6] que apenas 46 mW de potência óptica dentro da cavidade era suficiente para o dispositivo gerar taxas em multi-GHz com 10 MHz de frequência fundamental.

O artigo [2] mostra 3 regimes distintos (em 1550 nm) usando um NOLM (*Nonlinear Optical Loop Mirror*) como chave passiva para compor um absorvedor saturável artificial e fibra dopada com Er⁺ como meio de ganho. O 1° regime foi o solitônico, onde um pente irregularmente periódico de pulsos curtos com espectro típico (de sólitons) foi observado. O 2° regime observado, foi o de sólitons cooperativos resultando na saída de pulsos de quase 1 μs de duração na frequência fundamental. Finalmente, o 3° regime observado foi de pulsos retangulares de poucos nanossegundos (< 10 ns) de duração.

No artigo [3], foi observado que um F8L podia gerar um trem de pulsos retangulares com duração na faixa 46-66 ns, porém usando fibra dopada com Er⁺ como meio de ganho. Tais pulsos retangulares ficam mais largos à medida que se aumenta a potência óptica de bombeio da fibra com Er⁺, mas a amplitude dos pulsos se mantém travada num valor máximo [3]. O mecanismo de geração de tais pulsos retangulares, foi identificado como sendo o de *Dissipative Soliton Resonance* (DSR).

O artigo [4] mostra também a geração de pulsos quadrados chaveados com NOLM usando um F8L operando com base no mecanismo de DSR. Trata-se de uma forma de gerar pulsos com alta energia em baixas taxas de repetição com base no DSR que funciona no regime de dispersão normal, mas que também pode ser observado no regime anômalo [4]. No artigo [4], foi reportado a obtenção de uma taxa em 201,5 kHz de pulsos quadrados com duração na faixa 30 ns – 190 ns.

Finalmente em [16], é mostrado a geração de formas de onda variadas no tempo utilizando um F8L com um único SOA

operando em 1,3 μm . Também foram observados espectros ópticos distintos para cada formato temporal.

III. MONTAGEM EXPERIMENTAL

Na Figura 1 é apresentado esquematicamente o dispositivo F8L. É constituído de duas partes interconectadas com um acoplador 2x2: Um interferômetro de *Sagnac* e um anel de ressonância unidirecional (UR), onde a unidirecionalidade é garantida por um isolador óptico inserido. O interferômetro de *Sagnac* funciona com uma chave óptica não-linear (NALM) com base em um único SOA inserido, também responsável pela amplificação óptica. O SOA utilizado foi fabricado pela *Kamelian* (UK), modelo 1550 nm-*Nonlinear* SOA com 10 dB de ganho e 25 ps de recuperação do ganho. Aplicando uma corrente I_{bias} ao SOA igual ou superior ao valor limiar (150 mA), através de um ajuste empírico dos controladores de polarização, foi possível obter o F8L operando no regime de pulsos *mode-locking* passivo.

Deve-se notar que o SOA opera como meio de ganho e simultaneamente integra o NALM que é conhecido como ser capaz de funcionar como um absorvedor saturável artificial [14]. Absorvedores saturáveis são necessários para que o regime de *mode-locking* passivo seja obtido em um laser. O chaveamento pode ser obtido porque o NALM pode refletir baixas intensidades que acabam sendo bloqueadas pelo isolador, enquanto transmite altas intensidades dos pulsos ópticos que ressoam no UR. Um filtro óptico passa-banda (1,2 nm) ajustável manualmente em seu comprimento de onda central está também contido no UR, permitindo através do seu ajuste realizar a sintonização ao longo de pouco mais que a banda C (1520-1565nm). Entretanto, este artigo só mostrou resultados experimentais no comprimento de onda central em 1550 nm. Tanto as fibras ópticas monomodo quanto os componentes utilizados, foram *standard* de forma que o F8L operava no regime de dispersão anômala em 1550 nm.

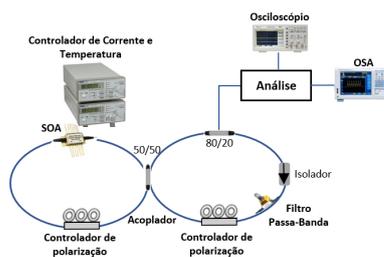


Fig. 1. Esquema experimental do F8L com um único SOA como meio de ganho.

De acordo com a Figura 1, é possível observar que não há qualquer entrada de sinais elétricos ou ópticos em alta frequência, somente a saída. A única entrada é a de corrente de *bias* (DC).

O anel NALM tem a função de realizar o chaveamento, a amplificação e a estabilização dos pulsos, que ocorre da

XLI SIMPÓSIO BRASILEIRO DE TELECOMUNICAÇÕES E PROCESSAMENTO DE SINAIS - SBt 2023, 08–11 DE OUTUBRO DE 2023, SÃO JOSÉ DOS CAMPOS, SP

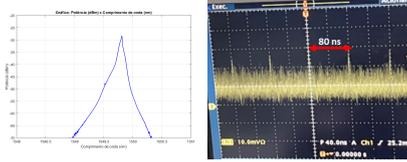


Fig. 2. Espectro óptico e traço de osciloscópio do sinal de saída emitido pelo F8L em *mode-locking* passivo para $I_{bias} = 180$ mA.

diferença de fase não-linear entre os modos longitudinais da luz ao se propagar ao longo do anel. Logo, ocorre o travamento de modos, ou seja, quando entra em sincronia o chaveamento da luz no NALM, no sentido determinado pelo isolador, com o tempo de trânsito óptico no circuito formado pelos dois anéis.

O anel UR tem como objetivo obter o estreitamento do espectro pelas múltiplas passagens pelo filtro. O acoplador retira uma fração da luz da cavidade e injeta no outro anel. Uma parte da luz da cavidade é extraída por um acoplador 80/20, ou seja, 80% da luz permanece no anel e os outros 20% são retirados para análise óptica (OSA) e temporal do sinal (osciloscópio). Antes do osciloscópio, a luz incide em um fotodetector de InGaAs modelo DET01CFC da *Thorlabs*, sem amplificação, com banda de 1,2 GHz.

IV. RESULTADOS E DISCUSSÕES

A fim de calcular o espaçamento teórico em frequências entre os modos longitudinais gerados no F8L, foi utilizada a Equação 1.

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

Em 1, $(3 \times 10^8 \text{ m/s})$ é a velocidade da luz, $n_{fibra} = 1,46$ o índice de refração efetivo da luz ao se propagar ao longo da fibra e $L_{perimetro} \approx 17$ m o perímetro físico total dos dois anéis de fibra. Obteve-se então $\Delta f \approx 12,1$ MHz.

Os espectros ópticos e respectivos traços de osciloscópio da saída do F8L em *mode-locking* passivo para $I_{bias} = 180$ mA, 280 mA e 380 mA estão mostrados nas Figuras de 2 a 4, respectivamente.

No espectro óptico da Figura 2 centrado em 1550 nm, obtém-se uma largura espectral de 0,0476 nm (≈ 6 GHz), o que implica na geração de pulsos gaussianos de largura temporal de 73 ps se for limitado pela transformada de Fourier, valor este bem mais curto que a resolução temporal de ≈ 2 ns do sistema de medição aqui disponível. Deve-se observar que o filtro BPF de 1,2 nm corresponde a 150 GHz, onde o estreitamento espectral deve-se às múltiplas voltas pelo anel.

A Figura 2 mostra que para $I_{bias} = 180$ mA foi possível detectar um trem de pulsos onde a condição de *mode-locking* com período de 80 ns entre os pulsos é medida. O valor de $T = 80$ ns corresponde à frequência de oscilação longitudinal fundamental de 12,5 MHz, em boa concordância com o cálculo teórico em 12,1 MHz. Este resultado sugere a não ocorrência de sólitons, porém da geração de pulsos curtos na frequência fundamental. Esta possibilidade está de acordo com a literatura, onde é mostrado a ocorrência de sólitons

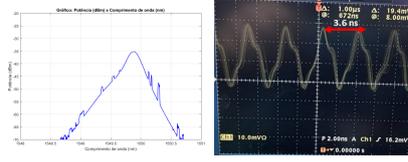


Fig. 3. Espectro óptico e traço de osciloscópio do sinal de saída emitido pelo F8L em *mode-locking* passivo para $I_{bias} = 280$ mA.

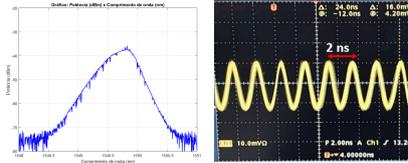


Fig. 4. Espectro óptico e traço de osciloscópio do sinal de saída emitido pelo F8L em *mode-locking* passivo para $I_{bias} = 380$ mA.

utilizando F8L no regime anômalo, porém com dispersão gerenciada [17].

O espectro óptico da Figura 3 se apresenta bem diferente do mostrado na Figura 2. Temos agora uma largura espectral de 0,28 nm (35 GHz), correspondente a $\approx 12,5$ ps na largura temporal considerando pulsos gaussianos limitados pela transformada de Fourier. Pode-se também verificar uma estrutura espectral similar as bandas de Kelly [17,18]. As bandas laterais de Kelly consistem em uma “assinatura” no domínio óptico da saída de pulsos solitônicos para sistemas operando no regime de dispersão anômala ($GDD < 0$) como é o presente caso [18]. A Figura 3 mostra que para $I_{bias} = 280$ mA foi possível detectar a condição de *mode-locking* com período de 3,6 ns entre os pulsos, valor este correspondente à frequência de oscilação harmônica de 278 MHz, ou o 22º harmônico *mode-locking* (HML). A Figura 3 mostra também pulsos com ≈ 2 ns de duração, valor este severamente limitado pela banda em 200 MHz do osciloscópio utilizado.

Do espectro óptico da Figura 4, pode-se extrair 0,38 nm ou 47,5 GHz de largura espectral óptica implicando na possibilidade de gerar pulsos gaussianos limitados pela transformada de Fourier de $\approx 9,3$ ps de largura temporal. Agora observa-se uma estrutura espectral “indentada para dentro”, num certo sentido “invertida” ao ser comparada com o espectro obtido para $I_{bias} = 280$ mA (Fig. 3).

A Figura 4 mostra que para $I_{bias} = 380$ mA foi possível detectar a condição de *mode-locking* com período de 2 ns entre os pulsos, valor este correspondente à frequência de oscilação harmônica de 500 MHz, ou o 40º HML, valor este também limitado pela banda de 500 MHz do osciloscópio. Pode-se comparar os resultados mostrados na Figura 4 com o reportado em [13], onde observa-se um espectro óptico e formato temporal correspondente muito semelhante ao aqui descrito. O formato de onda temporal da Figura 4 sugere pulsos não tão curtos (duração de ≈ 1 ns) e um trem de ondas com *duty-cycle* próximo de 50%, similar ao relatado em [13].

A Figura 5 mostra que para $I_{bias} > 380$ mA foi possível detectar pulsos ópticos retangulares em formato temporal na

XLI SIMPÓSIO BRASILEIRO DE TELECOMUNICAÇÕES E PROCESSAMENTO DE SINAIS - SBrt 2023, 08–11 DE OUTUBRO DE 2023, SÃO JOSÉ DOS CAMPOS, SP



Fig. 5. Traço de osciloscópio do sinal de saída emitido pelo F8L em *mode-locking* passivo na forma de pulsos retangulares para $I_{bias} > 380$ mA.

taxa de 38,5 MHz ($T \approx 26$ ns), correspondente ao 3° HML. Os pulsos se apresentam com largura temporal a meia-altura de ≈ 10 ns, ainda dentro da banda do osciloscópio utilizado. A possibilidade de gerar via *mode-locking* um trem de pulsos em variados formatos como o gaussiano, *sech*² ou retangular [19], está reportado em [20] usando a configuração F8L com apenas um SOA e recentemente conforme mostrado na Figura 4.4 da página 74 da tese de Doutorado [21]. Os pulsos não necessariamente estarão limitados pela transformada de Fourier.

Para $I_{bias} > 350$ mA observou-se pulsos *mode-locked* estáveis numa escala temporal tipicamente de poucos a vários minutos, porém com muita sensibilidade para com o ajuste dos controladores de polarização.

V. CONCLUSÕES

Este artigo descreveu um laser na configuração de figura-de-oito (F8L) no regime de dispersão anômala, em *mode-locking* passivo. No F8L aqui descrito, foi utilizado como meio de ganho um SOA ultrarrápido (25 ps) limitado em $I_{bias} = 400$ mA e de ganho relativamente menor (10 dB) que outros SOAs comerciais. Adicionalmente, o SOA compôs o NALM que fez o papel de absorvedor saturável. Não foi encontrado na literatura qualquer registro de F8Ls utilizando como meio de ganho um SOA com as características do aqui utilizado. Pôde-se preliminarmente concluir pela possibilidade de gerar certa variedade de padrões de saída conforme mostrado pelas “assinaturas” de espectro óptico em função de I_{bias} e o ajuste de polarização. Foi também observado a geração de pulsos retangulares, mesmo sendo mais propensos a surgirem sob o regime de dispersão normal. Um confronto de simulações numéricas a partir de modelos adequados com os resultados experimentais, é aqui necessário para uma continuação e aprofundamento da pesquisa.

AGRADECIMENTOS

Os autores gostariam de agradecer aos colegas do Laboratório de Comunicações Ópticas (LaCOP) da Universidade Federal Fluminense (UFF).

REFERÊNCIAS

- [1] Digonnet, Michel JF, ed. Rare-earth-doped fiber lasers and amplifiers, revised and expanded. CRC press, 2001.
- [2] Aleshkina, Svetlana S., Mikhail M. Bubnov, and Mikhail E. Likhachev. "Nanosecond pulse generation near 1.55 micron in the all-fiber figure-eight mode-lock laser with passive nonlinear loop mirror." 2016 4th International Conference on Photonics, Optics and Laser Technology (PHOTOPTICS). IEEE, 2016.
- [3] Wang, Shi-Ke, et al. "Dissipative soliton resonance in a passively mode-locked figure-eight fiber laser." *Optics express* 21.2 (2013): 2402-2407.
- [4] Li, Zihao, et al. "Generation of Square Pulse in an All-Fiber Yb-Doped Figure-of-Eight Fiber Laser." *Asia Communications and Photonics Conference*. Optica Publishing Group, 2018.
- [5] Chaparro, D., L. Furfaro, and Salvador Balle. "Subpicosecond pulses in a self-starting mode-locked semiconductor-based figure-of-eight fiber laser." *Photonics Research* 5.1 (2017): 37-40.
- [6] Chen, Hou-Ren, et al. "12 GHz passive harmonic mode-locking in a 1.06 μ m semiconductor optical amplifier-based fiber laser with figure-eight cavity configuration." *Optics Letters* 38.6 (2013): 845-847.
- [7] Wada, Osamu. "Femtosecond all-optical devices for ultrafast communication and signal processing." *New Journal of Physics* 6.1 (2004): 183.
- [8] Ribeiro, Ricardo M., Frédéric Lucarz, and Bruno Fracasso. "An all-optical sampler for digitising radio-over-fibre transceivers." *Proceedings of the 2013 18th European Conference on Network and Optical Communications and 2013 8th Conference on Optical Cabling and Infrastructure (NOC-OCI)*. IEEE, 2013.
- [9] Dudley, John M., et al. "Complete characterization of ultrashort pulse sources at 1550 nm." *IEEE Journal of Quantum Electronics* 35.4 (1999): 441-450.
- [10] Zhou, Yan, et al. "Recent progress in passively mode-locked fiber lasers based on low dimensional nanomaterials." *Results in Optics* (2022): 100302.
- [11] Said, Youssef, and Houria Rezig. "All-Optical Signal Processing by Using SOA Nonlinearities: Prospects for the Evolution of Next Generation of Optical Networks." *Recent Patents on Signal Processing (Discontinued)* 2.1 (2012): 76-81.
- [12] Marlon M. Correia and Jean Pierre von der Weid, "2.5-GHz passively mode-locked fiber ring laser employing a semiconductor optical amplifier as nonlinear polarization rotator device", 20o Simpósio Brasileiro de Micro-Ondas e Optoeletrônica (SBMO 2022), Natal, 13-16 de Novembro, 2022.
- [13] Min, Seong-sik, Yucheng Zhao, and Simon Fleming. "Semiconductor optical amplifier based high duty-cycle, self-starting figure-eight 1.7 GHz laser source." *Optics express* 17.8 (2009): 6187-6193.
- [14] Min, Seong-sik, Yucheng Zhao, and Simon Fleming. "Passively mode-locked self-starting figure-eight fiber laser with semiconductor optical amplifier." *OECC/ACOFT 2008-Joint Conference of the Opto-Electronics and Communications Conference and the Australian Conference on Optical Fibre Technology*. IEEE, 2008.
- [15] Chaparro, Daniel, Luca Furfaro, and Salvador Balle. "247 fs Time-localized structures from a passively mode-locked figure-of-eight semiconductor laser." *2017 Conference on Lasers and Electro-Optics Europe and European Quantum Electronics Conference (CLEO/Europe-EQEC)*. IEEE, 2017.
- [16] Wang, J -Y., K -H. Lin, and H -R. Chen. "Generation of optical waveforms in 1.3- μ m SOA-based fiber lasers." *Laser Physics* 22 (2012): 216-220.
- [17] Ning, Qiu-Yi, et al. "Bright-dark pulse pair in a figure-eight dispersion-managed passively mode-locked fiber laser." *IEEE photonics journal* 4.5 (2012): 1647-1652.
- [18] Sobon, G., and K. Abramski. "Fiber-based laser frequency combs." *Bulletin of the Polish Academy of Sciences. Technical Sciences* 60.4 (2012): 697-706.
- [19] Sala, K., G. Kenney-Wallace, and G. Hall. "CW autocorrelation measurements of picosecond laser pulses." *IEEE Journal of Quantum Electronics* 16.9 (1980): 990-996.
- [20] Pan, Hong Gang, et al. "Dark pulse optical fiber laser based on semiconductor optical amplifier." *Optical Engineering* 54.1 (2015): 011002-011002.
- [21] Marlon M. Correia, "Mode-locked fiber lasers for optical time-domain reflectometry and sensing", Tese de Doutorado, PUC-Rio, Março (2023).

XL SIMPÓSIO BRASILEIRO DE TELECOMUNICAÇÕES E PROCESSAMENTO DE SINAIS – SBFT2022, 25/09/2022–28/09/2022, STA RITA DO SAPUCAÍ, MG

Laser-1550 nm à Fibra em *Mode-Locking* Harmônico Passivo na Cavidade de Figura-de-8

Laila J. S. Souto, Filipe L. T. da Silva, Cláudia B. Marcondes e Ricardo M. Ribeiro

Resumo— Este artigo descreve um dispositivo laser à fibra óptica em configuração de anéis em figura-de-oito (F8L) utilizando um amplificador óptico semiconductor (SOA) rápido como meio de ganho. Obteve-se *mode-locking* então gerando pulsos de curta duração na frequência fundamental e até 625 MHz (50^o harmônico) com a mesma cavidade. Pulsos retangulares de 10 ns de duração e período de 26 ns também foram obtidos. Os diferentes sinais de saída foram observados em função da corrente aplicada ao SOA e ao ajuste manual dos controladores de polarização, e nunca foram antes reportados para uma mesma configuração F8L com um SOA rápido.

Palavras-Chave— Amplificador óptico semiconductor; comunicações ópticas; dispositivos ópticos; laser; *mode-locking* harmônico.

Abstract— This article describes the assembly and characterization of a fiber optic laser device in a figure-of-eight (F8L) ring configuration using a semiconductor optical amplifier (SOA) as medium of gain. The assembled F8L device consists of a laser operating in the harmonic mode-locking. Longitudinal modes locking were obtained with a repetition rate of short duration pulses at the fundamental frequency and up to the 50th harmonic with the same cavity. Different output patterns were observed depending on the current applied to the SOA and the adjustment of the polarization controllers.

Keywords— Semiconductor optical amplifier; optical communications; optical devices; laser; harmonic mode-locking.

I. INTRODUÇÃO

Os lasers à fibra óptica permitem obter confinamento do sinal óptico ao longo da fibra de uma forma eficiente. Com isso, torna-se possível a construção de lasers (à fibra) em uma cavidade longa de forma relativamente simples. Propriedades de propagação como dispersão cromática, birrefringência e não-linearidades ópticas naturalmente impactam a operação dos lasers à fibra pelo fato da luz ficar confinada em seu núcleo. As principais desvantagens do confinamento óptico em cavidades longas são: instabilidade espectral e temporal de emissão devido a fatores externos [1]. Entretanto, as características de propagação mencionadas podem por um outro lado serem vantajosamente exploradas, como por exemplo na geração de pulsos solitônicos [2] ou de pulsos de nanossegundos [3].

Uma importante vertente no desenvolvimento de lasers à fibra óptica, é na geração de pulsos curtos ou ultracurtos cobrindo uma larga faixa que vai de dezenas de nanossegundos passando por picossegundos e chegando até dezenas de femtossegundos [4,5]. Têm-se também obtido taxas de repetição de pulsos de laser que vão de kHz [4] até multi-GHz através de processos de *mode-locking* ou *Q-switching* [6]. Lasers à fibra encontram diversas aplicações nas comunicações ópticas: geração de solitons, amostragem totalmente óptica devido aos pulsos de baixo *jitter* que podem ser obtidos, geração ultra-estável de tributários de altas taxas

(exemplo: OC-192/STM-64/10G SONET) e regeneração digital 3R [7,8]. Outras aplicações de pulsos ultracurtos também têm sido reportadas como a sua utilização na caracterização de fenômenos rápidos em dispositivos ópticos ou optoeletrônicos [9], compostos químicos e estruturas biológicas.

O F8L descrito em [10] reporta o uso de um amplificador à fibra dopada com Er⁺ combinado com um SOA, este último com 20 dB de ganho e 30 ns de tempo de subida máximo. Obtiveram *mode-locking* em 210 MHz (T = 4,8 ns), ou o 28^o HML em torno de 1550 nm.

No artigo [6], é descrito um F8L usando um SOA como meio de ganho, porém centrado em 1,06 μ m. Foi observado *mode-locking* passivo na faixa de 30 MHz – 12,02 GHz, correspondente até o 1202^o HML. A sintonização em frequência de repetição foi obtida variando o I_{bias} na faixa 80-660 mA. A operação deste F8L [6] foi no regime de dispersão normal (para 1,06 μ m) onde o mecanismo de formação dos pulsos é completamente diferente dos gerados por F8Ls operando no regime anômalo (solitons convencionais). Foi mostrado [6] que apenas 46 mW de potência óptica dentro da cavidade era suficiente para o dispositivo gerar taxas em multi-GHz com 10 MHz de frequência fundamental.

O artigo [2] mostra 3 regimes distintos (1550 nm) usando NOLM (*Nonlinear Optical Loop Mirror*) como chave passiva para compor um absorvedor saturável artificial e fibra dopada com Er⁺ como meio de ganho. O 1^o regime foi solitônico onde um pente irregularmente periódico de pulsos curtos com espectro típico (de solitons) foi observado. O 2^o regime observado, foi o de solitons cooperativos resultando na saída de pulsos de quase 1 μ s de duração na frequência fundamental. Finalmente, o 3^o regime observado foi de pulsos retangulares de poucos nanossegundos (< 10 ns) de duração.

No artigo [3], foi observado que um F8L podia gerar um trem de pulsos retangulares com duração na faixa 46-66 ns, porém usando fibra dopada com Er⁺ como meio de ganho. Tais pulsos retangulares ficam mais largos à medida que se aumenta a potência óptica de bombeio da fibra com Er⁺, mas a amplitude dos pulsos se mantém travada num valor máximo [3]. O mecanismo de geração de tais pulsos retangulares, foi identificado como sendo o de *Dissipative Soliton Resonance* (DSR).

O artigo [4] mostra também a geração de pulsos quadrados chaveados com NOLM usando um F8L operando com base no mecanismo de DSR. Trata-se de uma forma de gerar pulsos com alta energia em baixas taxas de repetição com base no DSR que funciona no regime de dispersão normal, mas que também pode ser observado no regime anômalo [4]. Neste trabalho [4] de 2018, foi reportado a obtenção de uma taxa em 201,5 kHz de pulsos quadrados com duração na faixa 30 ns – 190 ns.

Laila J. S. Souto, Filipe L. T. da Silva e Ricardo M. Ribeiro - Laboratório de Comunicações Ópticas, Universidade Federal Fluminense, Niterói-RJ e Cláudia B. Marcondes - CEFET-RJ, Rio de Janeiro-RJ, e-mails: laila_sousa@id.uff.br, filipe.engtel@gmail.com, rnr@telecom.uff.br e claudia.marcondes@cefet-rj.br.

XL SIMPÓSIO BRASILEIRO DE TELECOMUNICAÇÕES E PROCESSAMENTO DE SINAIS – SBFT2022, 25/09/2022–28/09/2022, STA RITA DO SAPUCAÍ, MG

Fazendo uso de componentes e fibras mantenedoras de polarização (PM), D. Chaparro e colegas conseguiram uma melhor estabilidade maior [5]. O artigo [5] mostra então uma montagem F8L com um SOA dicroico (18 dB de contraste) todo montado com componentes de fibra PM onde não são usados controladores de polarização. Foi observado *mode-locking* passivo do fundamental em 18 MHz até o 136^o HML em 2,45 GHz, onde os pulsos possuíam duração de poucas centenas de femtossegundos.

Os amplificadores ópticos semicondutores (SOAs) disponíveis no mercado apresentam uma rápida recuperação do ganho de amplificação que tipicamente pode ir de ~1 ns até 25 ps, permitindo a sua aplicação em diversos circuitos ópticos para o processamento fotônico de sinais [11]. Quando inseridos na montagem dos lasers à fibra óptica, os SOAs podem desempenhar simultaneamente o papel de meio de ganho óptico e de modulador.

O presente artigo, foi originalmente motivado pela necessidade de realizar amostragem totalmente óptica [8], e desta forma dispor em Laboratório de um dispositivo capaz de gerar pulsos ópticos na faixa de 1550 nm, de duração típica de picossegundos e taxas em multi-GHz com baixo *jitter*. A escolha foi pela configuração F8L de um laser à fibra, porém utilizando um SOA rápido (25 ps de recuperação do ganho) como meio de ganho, não antes reportado na literatura. Devido às limitações de recursos, não foi possível explorar a banda de modulação oferecida pelo SOA. Porém, conforme ficará claro adiante, a principal contribuição deste trabalho foi a de mostrar experimentalmente que diversos formatos de onda de saída podem ser obtidos do mesmo F8L com um SOA rápido.

Na secção II está descrita a montagem experimental do F8L, na III os resultados experimentais obtidos e discussões pertinentes e na secção IV as conclusões do artigo.

II. MONTAGEM EXPERIMENTAL

Na Figura 1 é apresentado esquematicamente um laser em figura-de-oito (F8L). É constituído por um interferômetro de Sagnac à fibra com SOA (Kamelian, 1550 nm-Nonlinear SOA com 10 dB de ganho e 25 ps de recuperação do ganho), formando então um NALM (*Nonlinear Amplified Loop Mirror*). O NALM é conectado através de um acoplador 2x2 a um anel de ressonância unidirecional (UR), devido à inserção de um isolador óptico. O UR se comporta como o ressoador principal e contém um isolador óptico que força um sentido de oscilação. Aplicando uma corrente I_{bias} ao SOA igual ou superior ao valor limiar (~ 70 mA), através de um ajuste empírico dos controladores de polarização, foi possível obter uma transmissão máxima de pulsos *mode-locking* ou seja, o F8L podia operar no regime de *mode-locking* passivo.

Deve-se notar que o SOA opera como meio de ganho e simultaneamente constitui o NALM que funciona como um absorvedor saturável artificial [10]. Isto ocorre porque o NALM funciona como uma chave, rejeitando baixas intensidades que acabam sendo bloqueadas pelo isolador, enquanto transmite as mais altas intensidades dos pulsos ópticos que ressoam no UR. Um filtro óptico passa-banda ajustável manualmente está também contido no UR, permitindo realizar a sintonização na faixa 1520-1565nm. Entretanto, este artigo só mostrou resultados experimentais em 1550 nm. Tanto as fibras ópticas monomodo quanto os componentes utilizados, foram *standard*

de forma que o F8L operava no regime de dispersão anômala em 1550 nm.

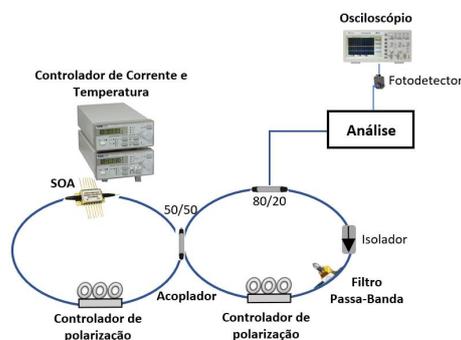


Fig. 1. Esquema experimental do laser à fibra óptica em uma cavidade em figura-de-oito (F8L) com um SOA como meio de ganho em regime de modo travado passivo.

De acordo com a Figura 1, é possível observar que o dispositivo é baseado em um par de anéis de fibra óptica em conjunto com controladores de polarização, sendo utilizado um SOA como meio de ganho, ou seja, não há qualquer entrada de sinais elétricos ou ópticos em alta frequência, mas somente sinais de saída.

O anel NALM tem a função de realizar o chaveamento, a amplificação e a estabilização dos pulsos, que ocorre da diferença de fase não-linear entre os modos longitudinais da luz ao se propagar ao longo do anel. Logo, ocorre o travamento de modos [12], ou seja, quando entra em sincronia o chaveamento da luz no NALM, no sentido determinado pelo isolador, com o tempo de trânsito óptico no circuito formado pelos dois anéis.

A função do UR tem como objetivo o estreitamento do espectro pelas múltiplas passagens pelo filtro. O acoplador retira uma fração da luz da cavidade e injeta no outro anel. Uma parte da luz da cavidade é extraída por um acoplador 80/20, ou seja, 80% da luz permanece no anel e os outros 20% são retirados para análise do sinal. As análises foram realizadas através de um osciloscópio digital. Antes, porém, a luz, incide em um fotodetector de InGaAs modelo DET01CFC da Thorlabs, sem amplificação, com banda de 1,2 GHz.

III. RESULTADOS E DISCUSSÕES

A fim de calcular o espaçamento teórico em frequências entre os modos longitudinais gerados no F8L, foi utilizada a Equação (1).

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

Sendo a velocidade da luz no vácuo $c = 3 \times 10^8$ m/s, $n_{\text{fibra}} = 1,46$ o índice de refração efetivo da luz ao se propagar ao longo da fibra e $L_{\text{perimetro}} \sim 17$ m o perímetro físico total dos dois anéis de fibra, obteve-se então $\Delta f \sim 12,1$ MHz.

Os traços de osciloscópio da saída do F8L em *mode-locking* passivo para $I_{bias} = 180$ mA, 280 mA e 380 mA estão mostrados nas Figuras 2 a 4, respectivamente.

XL SIMPÓSIO BRASILEIRO DE TELECOMUNICAÇÕES E PROCESSAMENTO DE SINAIS – SBRT2022, 25/09/2022–28/09/2022, STA RITA DO SAPUCAÍ, MG

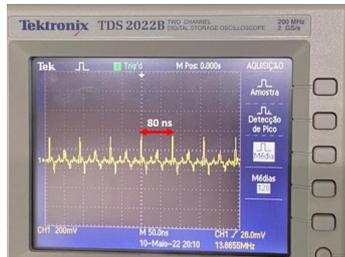


Fig. 2. Traço de osciloscópio do sinal de saída emitido pelo F8L em *mode-locking* passivo para $I_{bias} = 180$ mA.

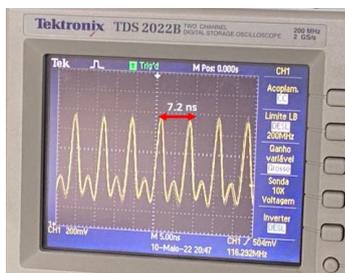


Fig. 3. Traço de osciloscópio do sinal de saída emitido pelo F8L em *mode-locking* passivo para $I_{bias} = 280$ mA.

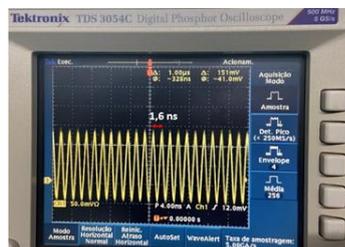


Fig. 4. Traço de osciloscópio do sinal de saída emitido pelo F8L em *mode-locking* passivo para $I_{bias} = 380$ mA.

A Fig. 2 mostra que para $I_{bias} = 180$ mA foi possível detectar três comportamentos temporais distintos. Primeiramente, observa-se um trem de pulsos mais intensos onde a condição de *mode-locking* com período de 80 ns entre os pulsos é medida. O valor de $T = 80$ ns corresponde à frequência de oscilação longitudinal fundamental de 12,5 MHz, em boa concordância com o cálculo teórico em 12,1 MHz. Em segundo lugar, pode-se notar pulsos menos intensos surgindo exatamente entre dois pulsos mais intensos consecutivos.

Os pulsos menos intensos correspondem ao surgimento de um 2º harmônico (2º HML) com $T = 40$ ns. Na realidade, os pulsos mais intensos são compostos da superposição de um pulso fundamental com o seu 2º harmônico. A Fig. 2 mostra também a ocorrência de “pulsos negativos”, temporalmente aparecendo logo à direita de cada um dos pulsos no fundamental. Este resultado sugere a ocorrência de sólitons “brilhantes” correspondendo aos pulsos “positivos” no fundamental, enquanto que os pulsos “negativos” correspondem aos sólitons “escuros”. Esta possibilidade está de acordo com a literatura,

onde é mostrado tal ocorrência utilizando F8L no regime anômalo [13].

A Fig. 3 mostra que para $I_{bias} = 280$ mA foi possível detectar a condição de *mode-locking* com período de 7,2 ns entre os pulsos, valor este correspondente à frequência de oscilação harmônica de 138,8 MHz, ou o 11º harmônico *mode-locking* (HML). A Fig. 3 mostra também pulsos com ~ 2 ns de duração, valor este severamente limitado pela banda em 200 MHz do osciloscópio utilizado. Pode-se também notar a formação do 22º HML de forma similar ao relatado no parágrafo anterior, relacionado à Fig. 2.

A Fig. 4 mostra que para $I_{bias} = 380$ mA foi possível detectar a condição de *mode-locking* com período de 1,6 ns entre os pulsos, valor este correspondente à frequência de oscilação harmônica de 625 MHz, ou o 50º HML. A Fig. 4 mostra também pulsos com ~ 1 ns de duração, valor este também severamente limitado pela banda de 500 MHz do osciloscópio. Se a Fig. 2(a) de [10] for examinada, pode-se observar que os autores obtiveram em osciloscópio pulsos *mode-locking* que se parecem com um tom senoidal com 4,8 ns de período e largura temporal de 2,28 ns. Isto corrobora a interpretação dada para o gráfico da Fig. 4, mas os autores [10] não mostraram o espectro elétrico.

Entretanto, em experimentos realizados após a submissão deste artigo, obteve-se alguns resultados aparentemente discrepantes. Para altos valores de corrente ($I_{bias} > 300$ mA) e ajustando empiricamente os controladores de polarização, obteve-se saída sob a forma de tons senoidais “puros” em 352 MHz e após um reajuste, um outro tom em 578 MHz foi obtido.

A confirmação foi primeiramente realizada visualmente, na tela do osciloscópio. Simultaneamente, o sinal foi observado em um analisador de espectro elétrico (ESA) nas resoluções (RBW) de 10 kHz, 100 kHz, 1 MHz e 10 MHz. Para todos os valores de RBW apenas um pico foi detectado, em 352 MHz (e depois em 578 MHz). Isto nos levou a concluir sobre a possibilidade de termos uma saída no formato de um tom senoidal ao invés de pulsos. No entanto, é possível que frequências mais altas que 352 MHz (ou 578 MHz) estejam sendo atenuadas pelo dispositivo.

A Fig. 5 mostra que para $I_{bias} > 350$ mA foi possível detectar pulsos ópticos retangulares na taxa de 38,5 MHz ($T = 26$ ns), correspondente ao 3º HML, e com largura temporal à meia-altura de ~ 10 ns, ainda dentro da banda do osciloscópio utilizado. Com base em [3] e [4], é possível que o mecanismo por trás da geração dos pulsos retangulares da Fig. 5 seja o DSR, porém acontecendo em um F8L no regime anômalo [4].

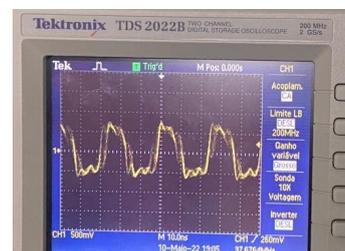


Fig. 5. Traço de osciloscópio do sinal de saída emitido pelo F8L em *mode-locking* passivo na forma de pulsos retangulares para $I_{bias} > 350$ mA.

XL SIMPÓSIO BRASILEIRO DE TELECOMUNICAÇÕES E PROCESSAMENTO DE SINAIS – SBRT2022, 25/09/2022–28/09/2022, STA RITA DO SAPUCAÍ, MG

Observou-se pulsos estáveis numa escala temporal tipicamente < 1 minuto ou ao menos vários minutos para $I_{\text{bias}} > 300$ mA, porém muita sensibilidade para com o ajuste dos controladores de polarização.

IV. CONCLUSÕES

Este artigo mostrou o desenvolvimento de lasers à fibra em anéis na configuração de figura-de-oito (F8L) no regime de dispersão anômala em 1550 nm, em *mode-locking* passivo. Pôde-se concluir sobre a possibilidade de se obter sintonização HML (não-linear) no F8L ao ser aumentada a corrente de polarização do SOA, devido às propriedades ópticas não-lineares destes últimos. Além dos HMLs até a 50ª ordem, também foi observado uma possível ocorrência de sólitons “escuros” assim como a geração de pulsos retangulares. Estes últimos são mais propensos a surgirem sob o regime de dispersão normal. Pôde-se também concluir sobre a variedade e complexidade de sinais que podem ser gerados com simples ajustes de I_{bias} e de estado de polarização na cavidade.

Deve-se ressaltar que no F8L aqui descrito, foi utilizado como meio de ganho um SOA ultra-rápido (25 ps) limitado em $I_{\text{bias}} = 400$ mA e de ganho relativamente menor (10 dB) que outros SOAs comumente encontrados no mercado. Adicionalmente, o SOA compôs o NALM que fez o papel de absorvedor saturável. Não foi encontrado na literatura qualquer registro de F8Ls utilizando como meio de ganho um SOA com as características do aqui utilizado. Pôde-se finalmente concluir, ao menos de forma preliminar, que o tipo de SOA utilizado pode ter causado os variados tipos de pulsos na saída do F8L.

Uma continuação natural deste trabalho é aprofundar a caracterização do F8L com medidas de potência óptica na cavidade, espectros óptico e elétrico de saída. Um modelo teórico e simulações numéricas também são aqui necessárias para a continuação desta pesquisa.

AGRADECIMENTOS

Os autores gostariam de agradecer aos colegas do Laboratório de Comunicações Ópticas (LaCOp) da Universidade Federal Fluminense (UFF).

REFERÊNCIAS

- [1] Digonnet, Michel JF. *Rare-earth-doped fiber lasers and amplifiers*, revised and expanded. CRC press, 2001.
- [2] S. S. Aleshkina, M. M. Bubnov and M. E. Likhachev, “Nanosecond pulse generation near 1.55 micron in the all-fiber figure-eight mode-lock laser with passive nonlinear loop mirror.”, 4th PHOTOPTICS, Rome, Italy, February 27-29 (2016).
- [3] Shi-Ke Wang *et al.*, “Dissipative soliton resonance in a passively mode-locked figure-eight fiber laser”, *Optics Express*, 21, 2, pp. 2402-2407 (2013).
- [4] Z. Li, D. Jia, X. Sun and Y. Jin, “Generation of square pulse in an all-fiber Yb-doped figure-of-eight fiber laser”, 2018 Asia Communications and Photonics Conference (ACP), 2018.
- [5] D. Chaparro, L. Furfaro and S. Balle, “Subpicosecond pulses in a self-starting mode-locked semiconductor-based figure-of-eight fiber laser”, *Photon. Res.* 5,1, pp. 37-40 (2017).
- [6] Hou-Ren Chen *et al.*, “12 GHz passive harmonic mode-locking in 1.06 mm semiconductor optical amplifier-based fiber laser with figure-eight cavity configuration”, *Optics Letters*, 38, 6, pp. 845-847 (2013).
- [7] WADA, Osamu. *Femtosecond all-optical devices for ultrafast communication and signal processing*. New Journal of Physics, v. 6, n. 1, p. 183, 2004.
- [8] Ribeiro, Ricardo M., Frédéric Lucarz, and Bruno Fracasso. “An all-optical sampler for digitising radio-over-fibre transceivers.” Proceedings of the 2013 18th European Conference on Network and Optical Communications 2013 8th Conference on Optical Cabling and Infrastructure (NOC-OCD). IEEE, 2013.
- [9] J. M. Dudley *et al.*, “Complete characterization of ultrashort pulse sources at 1550 nm”, *IEEE J. of Quantum Electronics*, 35, 4, pp. 441-450 (1999).
- [10] S.-Sik Min, Y. Khao and S. Fleming, “Passively modelocked self-starting figure-eight fiber laser with semiconductor optical amplifier, OECC/ACOFT, Sydney, Australia, 07-10 July (2008).
- [11] Said, Youssef, and Houria Rezig. “All-Optical Signal Processing by Using SOA Nonlinearities: Prospects for the Evolution of Next Generation of Optical Networks.” *Recent Patents on Signal Processing (Discontinued)* 2.1 (2012): 76-81.
- [12] Sharma, Utkarsh, and Xing Wei. “Fiber optic interferometric devices.” *Fiber Optic Sensing and Imaging*. Springer, New York, NY, 2013. 29-53.
- [13] Qiu-Yi *et al.*, “Pulse pair in a figure-eight dispersion-managed passively modelocked fiber laser”, *IEEE Photonics Journal*, 4, 5, pp. 1646-1652 (2012).

XXXVII SIMPÓSIO BRASILEIRO DE TELECOMUNICAÇÕES E PROCESSAMENTO DE SINAIS – SBt2019, 29/09/2019–02/10/2019, PETRÓPOLIS, RJ

Laser Sintonizável em Regime Mode-Locking Harmônico (HML) em Cavidade em Figura-de-Oito

Marlon M. Correia, Flávio A. N. Sampaio, Laila J. S. Souto, Vinicius N. H. Silva e Ricardo M. Ribeiro

Resumo — Este artigo de Iniciação Científica descreve a montagem e testes de um laser baseado em uma cavidade em figura-de-oito operando no regime de modo travado passivo (*passive mode-locking*). O dispositivo é formado por um anel de fibra óptica monomodo contendo um amplificador óptico semiconductor (SOA - *Semiconductor Optical Amplifier*) como meio de ganho. Obteve-se travamento dos modos longitudinais (Mode-Locking) com taxa de repetição dos pulsos na frequência fundamental e harmônicas, todas em MHz (*Harmonic Mode-Locking*).

Palavras-Chave— laser em anel de fibra óptica; amplificador óptico semiconductor; harmonic mode-locking; figura-de-oito.

Abstract — This paper of Scientific Initiation describes the assembly and testing of a mode-locked laser operating on passive mode in a figure-of-eight cavity. The laser is composed by a single-mode fiber optic ring containing a SOA as medium of gain. Mode-Locking was obtained with MHz repetition rate of the fundamental and harmonic frequencies (*Harmonic Mode-Locking*).

Keywords— ring fiber laser, semiconductor optical amplifier, harmonic mode-locking; figure-of-eight.

I. INTRODUÇÃO

O estudo de um laser a fibra óptica pode ser direcionado para geração de pulsos ultracurtos na qual a duração no tempo pode variar na faixa de femto e pico segundos. Recentemente, a taxa de repetição de pulsos em GHz de lasers mode-locking tem atraído muita atenção e pode ser utilizado para muitas aplicações, incluindo comunicações ópticas de altas taxas, metrologia e amostragem óptica (*optical sampling*) na digitalização fotônica de sinais de telecomunicações [1, 2].

O regime HML (*Harmonic Mode-Locking*), foi observado pela primeira vez em um laser a fibra dopada com érbio por Grudinin et al, em 1993 [3]. Neste regime é possível excitar harmônicos da frequência fundamental definida pela dimensão física da cavidade, e assim, obter taxas de repetição de pulsos mode-locking maiores que a frequência fundamental sem alterar o comprimento físico da cavidade ressonante. Estudos recentes mostram que muitos lasers a fibra dopada com érbio ou ytérbio (*Er-doped or Yb-doped*) ou com um SOA como meio de ganho, são capazes de operar em regime de HML para taxas de repetição de pulsos em multi-GHz mediante a excitação de harmônicos de alta ordem. Zhou et al, em 2006, mostrou essa capacidade para o 31º harmônico (1,3 GHz) com potência de bombeamento de 400 mW [4] e Chen et al, em 2013 comprovou esta capacidade para 1202º harmônico (12,02 GHz) para uma corrente de injeção de 660 mA [5], respectivamente.

Este artigo descreve o desenvolvimento experimental de um laser sintonizável (1520-1565 nm) a fibra óptica operando em regime HML passivo em MHz, onde utiliza-se um SOA como meio de ganho óptico. Na secção II está descrito a montagem

experimental do laser, na III os resultados obtidos e discussões pertinentes e finalmente em IV às conclusões do artigo.

II. MONTAGEM EXPERIMENTAL

A Fig. 1 mostra uma cavidade em figura-de-oito de um laser a fibra óptica em que utiliza-se um SOA não-linear como meio de ganho. Esta montagem experimental é formada por dois anéis (*loops*) de fibra óptica conectados entre si através de um acoplador 50/50. O anel nº 1 é formado pelo SOA e por um PC (*Polarization Controller*). Já o anel nº 2 é formado por um PC, por um acoplador que retira 10% da potência óptica da cavidade, por um filtro passa-banda (BPF - *Band Pass Filter*) e por um isolador que permite a luz circular apenas em um sentido. O anel nº 1 funciona como um NALM (*Nonlinear Amplifier Loop Mirror*) [5], onde realiza uma transmissão e reflexão periódica dos pulsos ópticos em função da potência instantânea de entrada e do deslocamento não linear de fase entre os modos longitudinais contra-propagantes suportados pela cavidade. Portanto, se um pulso óptico é formado no anel nº 1 e sua potência de pico satisfaz as condições de transmissão do NALM, o pulso irá se propagar na cavidade, por outro lado se não satisfazer, o pulso será refletido pelo NALM e caso se propague será bloqueado pelo isolador.

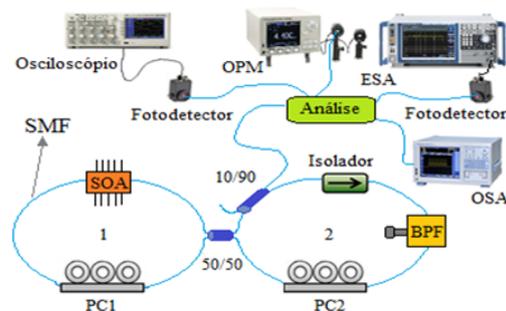


Fig. 1 Esquemático experimental do laser em anel a fibra óptica baseado em uma cavidade em figura-de-oito com um SOA como meio de ganho.

O NALM (anel nº 1) possui um PC que pode ser ajustado de forma a controlar a birrefringência na fibra e maximizar a interferência dos modos longitudinais contra-propagantes no acoplador 50/50, e assim, se obter transmissão máxima para maior intensidade óptica possível e transmissão mínima para menor intensidade. O anel nº 2 tem a função de ressoador óptico principal e realiza em conjunto com o BPF o estreitamento da ASE (*Amplified Spontaneous Emission*) gerada pelo SOA e consequentemente do espectro emitido pelo laser a fibra. Desta forma, a saída do dispositivo pode ser analisada através de um OSA, ESA OPM ou Osciloscópio.

Marlon M. Correia¹, Flávio A. N. Sampaio², Laila J. S. Souto², Vinicius N.H. Silva² e Ricardo M. Ribeiro², ¹Centro de Estudos de Telecomunicações, Pontifícia Universidade Católica, Rio de Janeiro-RJ e ²Departamento de Engenharia de Telecomunicações e Laboratório de Comunicações Ópticas, Universidade Federal Fluminense, Niterói-RJ, Brasil. E-mails: marloncorreia@cetuc.puc-rio.br, laila_sousa@id.uff.br, rmr@telecom.uff.br. Agradecemos a FAPERJ, CNPQ e CAPES pelo financiamento deste projeto.

III. RESULTADOS E DISCUSSÕES

A Fig. 2 mostra o espectro CW (*Continuous Wave*) sintonizável emitido pelo laser em figura-de-oito a partir do ajuste manual de um BPF (*Band Pass Filter*) com banda de 1,2 nm na faixa de 1520 até 1565 nm. A FWHM (*Full Width at Half Maximum*) medida foi de 0,47 nm em 1550 nm.

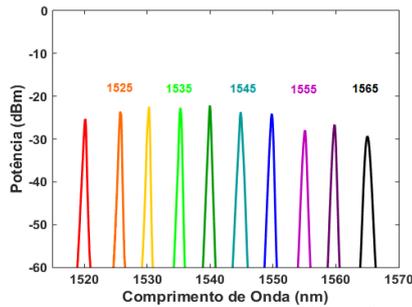


Fig. 2 Espectro óptico de saída do laser em anel de fibra em figura-de-oito sintonizado em diferentes comprimentos de onda na faixa de 1520 até 1565 nm.

A Fig. 3 mostra a intensidade do espectro de RF (*Radio Frequency*) e os pulsos mode-locking gerados de forma passiva na cavidade. Assim, utilizou-se a equação (1) a fim de obter o espaçamento temporal teórico entre os pulsos gerados.

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

Onde c é a velocidade da luz no vácuo (3×10^8 m/s), n (1,46) é o índice de refração promediado que a luz experimenta ao se propagar ao longo da fibra e $L_{perimetro}$ é a soma dos perímetros dos dois *loops* de fibra óptica. Como o comprimento físico dos dois *loops* de fibra é de aproximadamente 19 m, obtemos $\Delta t = 92$ 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 com banda de 1,2 GHz acoplado a um osciloscópio com 200 MHz ou a um ESA com banda de 4 GHz para verificar o espaçamento no tempo dos pulsos gerados e a frequência do modo fundamental, respectivamente.

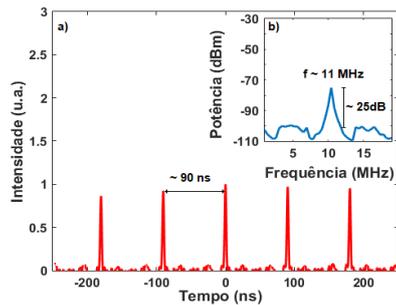


Fig. 3 Em a) Trem de pulsos mode-locked ultracurtos espaçados periodicamente no tempo de 90 ns com taxa de repetição fundamental de 11 MHz da cavidade figura-de-oito. Em b) Modo longitudinal fundamental com SNR (*Signal-Noise-Ratio*) de ~25 dB e RBW (*Resolution Bandwidth*) = 5 kHz.

A taxa de repetição de um laser operando no regime HML (*Harmonic Mode Locking*) pode ser alterada ajustando os controladores de polarização (PCs) e/ou alterando a corrente de *bias* no SOA [5]. O aumento da corrente de *bias* provoca um aumento da potência no interior da cavidade e consequentemente promove a excitação de modos harmônicos

de mais alta ordem. Ao modificar a configuração dos PCs ajustamos a polarização no interior da cavidade, que por sua vez, altera o ganho e o deslocamento não linear de fase do pulso óptico a medida que passa pelo SOA. Este ajuste de polarização também altera a comutação (*switching*) dependente da intensidade óptica no NALM, resultando assim na variação e aumento da taxa de repetição (*Harmonic Mode-Locking*) dos pulsos [5] como demonstrado pela Fig. 4.

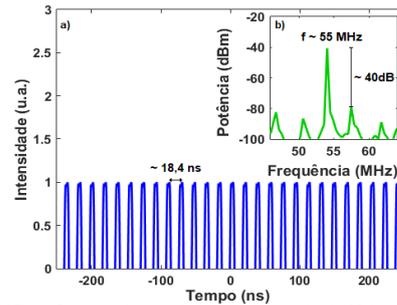


Fig.4 Em a) Pulsos mode-locked ultracurtos espaçados de 18,4 ns e definidos pela taxa de repetição na frequência do 5º harmônico. Em b) Espectro de RF do 5º Harmônico com SNR de ~40 dB e RBW = 100 KHz.

IV. CONCLUSÕES

Este artigo mostrou o desenvolvimento de um laser em anel à fibra óptica na configuração de figura-de-oito em regime mode-locking passivo. Obteve-se taxa de repetição de pulsos na frequência fundamental de 11 MHz definida pelo comprimento físico total da cavidade (19m), corrente de *threshold* (I_{th} - *threshold current*) de 30 mA que define o limiar entre a emissão espontânea e a emissão estimulada, corrente limiar de formação do pulso (I_{ML} - *mode locking current*) de 100 mA e sintonização espectral entre 1520 – 1565 nm. Ao ajustar os PCs, obteve-se um *Harmonic Mode-Locking* com taxa de repetição de pulsos na frequência do 5º harmônico (55 MHz) para o mesmo comprimento físico de cavidade. A largura temporal dos pulsos não foi medida dado a banda limitada do osciloscópio (200 MHz – 5 ns) utilizado e disponível em nosso laboratório.

AGRADECIMENTOS

Os autores gostariam de agradecer as agências de pesquisa FAPERJ, CNPQ e CAPES pelo apoio financeiro fornecido e aos colegas do laboratório de comunicações ópticas (LACOP) da Universidade Federal Fluminense (UFF).

REFERÊNCIAS

- [1] O. Wada, "Femtosecond all-optical devices for ultrafast communication and signal processing", *New J. Phys.* 6, 183 (2004).
- [2] 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.
- [3] A. B. Grudinin, D. J. Richardson, and D. N. Payne, "Passive harmonic mode-locking of fibre soliton ring lasers", *Electronics Letters*, 29, 1860, 1993.
- [4] S. Zhou, D. G. Ouzounov, and F. W. Wise, "Passive harmonic mode-locking of a soliton Yb fiber laser at repetition rates to 1.5 GHz", *Opt. Lett.* 31, 1041 (2006).
- [5] 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 B

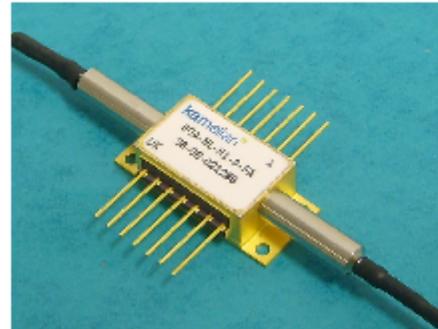
DATASHEET



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 been 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)

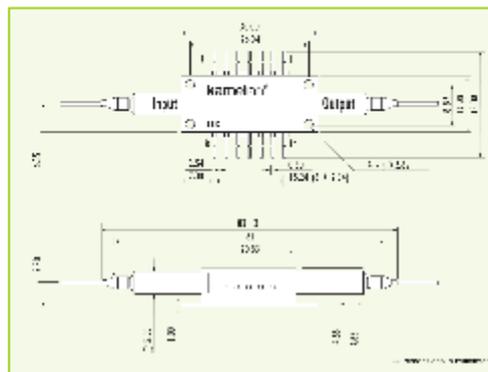
| PARAMETER | MIN SPECIFICATION | TYPICAL SPECIFICATION | MAX SPECIFICATION |
|-----------------------------|-------------------|-----------------------|-------------------|
| Fiber-to-fiber gain - (Min) | 10dB | | |
| Noise figure | | 8dB | 10dB |
| Gain recovery time (1/e) | | 25ps | |
| Polarisation 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 | |





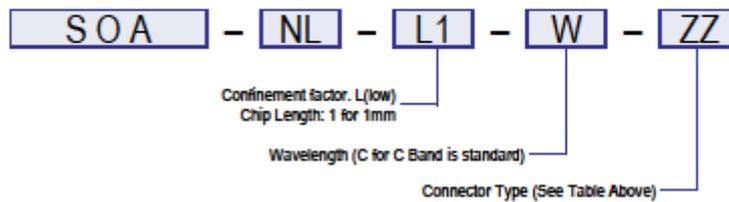
Pin Allocation & Package Dimensions

| PIN | DEFINITION | PIN | DEFINITION |
|-----|------------|-----|-----------------|
| 1 | TEC + | 8 | NC |
| 2 | THERMISTOR | 9 | NC |
| 3 | NC | 10 | SOA ANODE (+) |
| 4 | NC | 11 | SOA CATHODE (-) |
| 5 | THERMISTOR | 12 | NC |
| 6 | NC | 13 | CASE GND |
| 7 | NC | 14 | TEC - |



| FIBER CONNECTOR | |
|-----------------|----------------|
| CODE | CONNECTOR TYPE |
| FP | FC/PC |
| FA | FC/APC |
| FU | FC/UPC |
| LP | LC/PC |
| LA | LC/APC |
| LU | LC/UPC |
| SP | SC/PC |
| SA | SC/APC |
| SU | SC/UPC |
| ØØ | None |

Ordering Information



Amphotonix reserves the right to make changes in design, specifications and other information at any time, and without prior notice. The information contained within this Data Sheet is believed to be accurate. However, no responsibility is assumed for possible inaccuracy or omission. Any information contained herein shall legally bind Amphotonix only if it is specifically incorporated into the terms and conditions of a sales agreement.

CST GLOBAL LTD t/a AMPHOTONIX

4 Stanley Boulevard, Hamilton International Technology Park, High Blantyre, Glasgow, G72 0BN, United Kingdom
Tel: +44 (0) 1698 722074 Fax: +44 (0) 1698 821101 www.kamelian.com Email: amplifiers@amphotonix.com



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

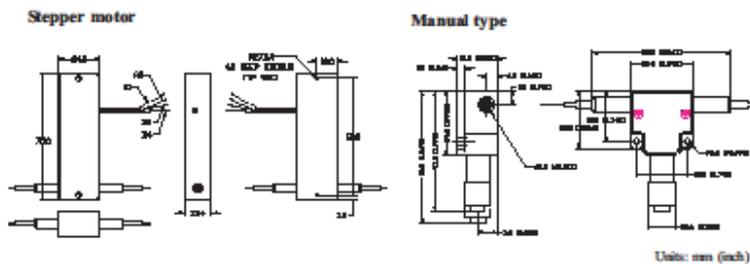
- Tuning components for tunable laser and white light source
- Optical testing
- Sensor source
- Channel selection in WDM network

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) | | | |

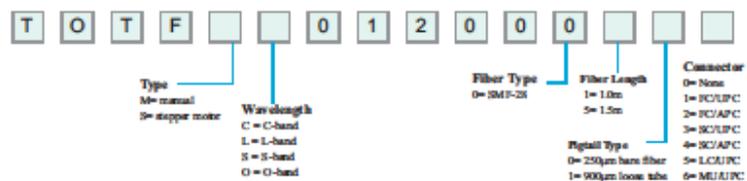
Note: All specification referenced without connectors
* Measured at the wavelength of 1550nm for C-band

Dimensions



Units: mm (inch)

Ordering Information



This product information is subject to change without notice.