



***AMPLIFICADORES ÓPTICOS
PARA SISTEMAS DE
COMUNICAÇÃO MULTICANAIS
DE ALTA CAPACIDADE***

Carmelo José Albanez Bastos Filho.

Recife, 14 de setembro de 2005

UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO
CENTRO DE TECNOLOGIA E GEOCIÊNCIAS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

**AMPLIFICADORES ÓPTICOS PARA SISTEMAS DE
COMUNICAÇÃO MULTICANAIS DE ALTA
CAPACIDADE**

por

CARMELO JOSÉ ALBANEZ BASTOS FILHO

Tese submetida ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Pernambuco como parte dos requisitos para a obtenção do grau de Doutor em Engenharia Elétrica.

ORIENTADOR: JOAQUIM FERREIRA MARTINS FILHO, PhD.

CO-ORIENTADOR: ANDERSON STEVENS L. GOMES, PhD.

Recife, 14 de setembro de 2005.

© Carmelo José Albanez Bastos Filho, 2005.

Bastos Filho, Carmelo José Albanez
Amplificadores ópticos para sistemas de
comunicação multicanais de alta capacidade /
Carmelo José Albanez Bastos Filho. – Recife : O
Autor, 2005.

176 folhas : il., fig., tab.

Tese (doutorado) – Universidade Federal de
Pernambuco. CTG, Engenharia Elétrica, 2005.

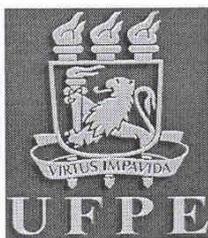
Inclui bibliografia.

1. Comunicações ópticas – Amplificadores
ópticos. 2. Sistemas de comunicação de alta
capacidade – Sistemas multiplexados. 3.
Amplificador à fibra dopada com Túlio – Esquema de
bombeamento duplo. 4. Amplificador à fibra dopada
com Érbio – Travamento de ganho. 5. Amplificadores
híbridos – Bombeamento monocromático. I. Título.

621.391
621.3692

CDU (2.ed.)
CDD (22.ed.)

UFPE
BC2005-473



Universidade Federal de Pernambuco

Pós-Graduação em Engenharia Elétrica

PARECER DA COMISSÃO EXAMINADORA DE DEFESA DE
TESE DE DOUTORADO DE

CARMELO JOSÉ ALBANEZ BASTOS FILHO

TÍTULO

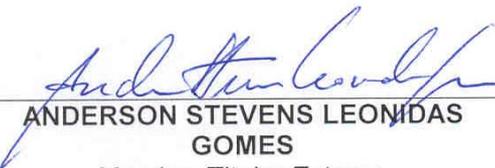
**“AMPLIFICADORES ÓPTICOS PARA SISTEMAS DE
COMUNICAÇÃO MULTICANAIS DE ALTA CAPACIDADE”**

A comissão examinadora composta pelos professores: JOAQUIM FERREIRA MARTINS FILHO, DES/UFPE, FREDERICO DIAS NUNES, DES/UFPE, EDUARDO FONTANA, DES/UFPE, ANDERSON STEVENS LEONIDAS GOMES, DF/UFPE e JEAN PIERRE VON DER WEID, PUC/RJ, sob a presidência do prof. Joaquim Ferreira Martins Filho, Coordenador do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, consideram o candidato **CARMELO JOSÉ ALBANEZ BASTOS FILHO APROVADO.**

Recife, 14 de setembro de 2005.


JOAQUIM FERREIRA MARTINS
FILHO
Orientador e Membro Titular Interno


FREDERICO DIAS NUNES
Membro Titular Interno


ANDERSON STEVENS LEONIDAS
GOMES
Membro Titular Externo


EDUARDO FONTANA
Membro Titular Interno


JEAN PIERRE VON DER WEID
Membro Titular Externo

*Dedico esta tese aos meus pais,
Carmelo Bastos e Rachel Rangel,
eternos mestres que não se limitaram
a ensinar-me somente cálculos e lógica,
mas me mostraram o lado humano da vida .*

Agradecimentos

Aos professores Joaquim F. Martins Filho e Anderson S. L. Gomes pela co-orientação sempre realizada de forma presente e atuante. Ao corpo docente do programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da UFPE, em especial ao professor Joaquim F. Martins Filho, pela orientação neste doutorado, e pela orientação em todos estes anos de trabalhos.

À instituição de suporte a pesquisa CNPq, ao Departamento de Eletrônica e Sistemas da Universidade Federal de Pernambuco, ao Departamento de Física da Universidade Federal de Pernambuco, pelo apoio financeiro e pela concessão de uso de suas estruturas durante o desenvolvimento deste trabalho. À Ericsson do Brasil pelo financiamento da estrutura de pesquisa utilizada no Laboratório de Fotônica e Optoeletrônica da Universidade Federal de Pernambuco.

Aos meus pais, Carmelo José Albanez Bastos e Rachel Rangel de Farias Albanez Bastos, pela educação a mim oferecida com dedicação e boa vontade. Aos meus irmãos, Maria Angélica Rangel Bastos e Petrus Rangel Bastos, pelo convívio agradável e pelo apoio e ajuda quando necessários. À Silvia Monteiro que soube entender a ausência nas horas de trabalho, e por ser a âncora que me segurava nas dificuldades. A todos os colegas e amigos, em especial agradecimentos a Sérgio Campello, Eric de A. Jorge Arantes, Isnaldo J. S. Coelho e Luciana P. Salles pelo conhecimento compartilhado nas horas de dúvida. Ao professor Michael L. Sundheimer, Mariana T. Carvalho e Stefan Lüthi pela colaboração nas atividades realizadas no Departamento de Física da Universidade Federal de Pernambuco. À Filipe Rech, Daniel A. Chaves e Marcela M. Martins pela ajuda necessária para realização de alguns dos experimentos contidas neste documento.

Resumo da Tese apresentada à UFPE como parte dos requisitos necessários
para a obtenção do grau de Doutor em Engenharia Elétrica.

AMPLIFICADORES ÓPTICOS PARA SISTEMAS DE COMUNICAÇÃO MULTICANAIS DE ALTA CAPACIDADE

Carmelo José Albanez Bastos Filho

Setembro / 2005

Orientador: Joaquim Ferreira Martins Filho, PhD.

Co-orientador: Anderson Stevens Leônidas Gomes, PhD.

Área de Concentração: Fotônica

Palavras-chave: Amplificadores ópticos, TDFAs, EDFA, Amplificadores Raman.

Número de Páginas: 176

A crescente demanda por tráfego de dados sugere a expansão da capacidade dos sistemas de comunicações ópticas. Isto pode ser obtido aumentando a quantidade de canais transmitidos utilizando bandas de transmissão alternativas que demandam diferentes amplificadores ópticos. Os amplificadores mais comuns nos sistemas atuais são os EDFAs. Amplificadores Raman e TDFAs são outras possibilidades, principalmente para a *banda S*. Neste documento, foi proposto pela primeira vez e demonstrado um esquema de bombeamento duplo (800 nm + 1050 nm) altamente eficiente para TDFAs. A construção de um protótipo desse TDFAs com lasers de diodo para bombeamento caracterizou uma possibilidade de emprego comercial. A distribuição de ganho ao longo da fibra dopada para o esquema de bombeamento proposto é abordada. Também é apresentado um TDFAs reflexivo com configuração simples, apresentando 38 dB de ganho de pequenos sinais, utilizando apenas 400 mW de bombeamento em 1050 nm. O efeito de saturação cruzada de ganho é discutido para TDFAs e é mostrada pela primeira vez uma dependência com o comprimento de onda do sinal e do esquema de bombeamento utilizado. Para amenizar o efeito de saturação cruzada de ganho deve-se utilizar técnicas de travamento de ganho. Técnicas de travamento de ganho totalmente óptico de baixo ruído em EDFA são investigadas. São implementados pela primeira vez amplificadores híbridos envolvendo TDFAs e FRA utilizando um comprimento de onda único para bombeamento.

Abstract of the Thesis presented to UFPE as a partial fulfillment of the requirements for the PhD degree in Electrical Engineering.

OPTICAL AMPLIFIERS FOR HIGH CAPACITY MULTICHANNEL COMMUNICATION SYSTEMS

Carmelo José Albanez Bastos Filho

September / 2005

Advisor: Joaquim Ferreira Martins Filho, PhD.

Co-advisor: Anderson Stevens Leônidas Gomes, PhD.

Area of concentration: Photonics.

Keywords: Optical amplifiers, TDFA, EDFA, Raman amplifiers.

Number of pages: 176

The ever increasing demand for data traffic suggests the capacity expansion of optical communication systems. One can obtain this by increasing the number of transmitted channels in alternative optical bands. To achieve this it is necessary to develop optical amplifiers for each band. The most common amplifiers are EDFA. Nevertheless, Raman amplifiers and TDFAs are very useful, specially for the *S band*. In this thesis a novel and efficient pump scheme for TDFA is proposed for the first time and demonstrated experimentally, using 800 nm and 1050 nm pump wavelengths. A TDFA pumped by a single diode laser indicated a real possibility for commercial development. The gain distribution along the fiber for dual pump is analysed. A TDFA using double pass configuration is also proposed, featuring gain of 38 dB using only 400 mW of pump power at 1050 nm. The wavelength dependence of the gain cross-saturation effect for TDFAs is discussed for single pump schemes (1050 nm and 1426 nm). To reduce the gain cross-saturation effect one should use gain clamping techniques. Some all-optical gain clamping techniques are investigated to build low noise EDFAs. Hybrid amplifiers composed of Raman amplifier and TDFA pumped with a single wavelength are demonstrated for wide bandwidth amplification in the *S band*.

Sumário

Lista de figuras.....	1
Lista de tabelas.....	8
Acrônimos e termos utilizados.....	9
Lista de parâmetros.....	13
Capítulo 1 – Sistemas de comunicações ópticas.....	16
1.1 – Evolução dos sistemas ópticos.....	17
1.2 – Transmissores ópticos.....	18
1.3 – Fibras ópticas.....	19
1.4 – Receptores ópticos.....	21
1.5 – Regeneradores e amplificadores ópticos.....	21
1.6 – Compensadores de dispersão.....	22
1.7 – Multiplexadores / Demultiplexadores ópticos.....	22
1.8 – Componentes para amplificadores ópticos.....	23
1.8.1 – Acopladores direcionais.....	23
1.8.2 – Isoladores.....	24
1.8.3 – Circuladores ópticos.....	24
1.8.4 – Equalizadores ópticos.....	25
1.9 – Estrutura da tese.....	26
1.10 – Referências bibliográficas.....	28
Capítulo 2 – Amplificadores ópticos para comunicações.....	30
2.1 – Modelagem teórica de ganho em amplificadores ópticos.....	30
2.2 – Modelagem teórica de figura de ruído de amplificadores ópticos.....	32
2.3 – Aplicações.....	35
2.4 – Tipos de amplificadores ópticos.....	36
2.4.1 – Amplificadores ópticos de semiconductor.....	36
2.4.2 – Amplificadores ópticos paramétricos.....	38
2.4.3 – Amplificadores Raman a fibra.....	40
2.4.4 – Amplificadores ópticos a fibra dopada.....	44
2.4.5 – EDFA.....	44
2.4.6 – PDFA e NDFa.....	46
2.4.7 – TDFA.....	47

2.5 – Referências bibliográficas.....	47
Capítulo 3 – Amplificadores a Fibra Dopada com Túlio, uma Revisão Bibliográfica.....	50
3.1 – Histórico sobre o processo de amplificação em fibras dopadas com Túlio.....	50
3.2 – Modelamento teórico do processo de amplificação em TDFA.....	54
3.2.1 - Equações de taxa.....	55
3.2.2 - Modelo de caixa preta (BBM).....	59
3.3 – Aspectos funcionais.....	62
3.4 – Esquemas de bombeamento mais complexos.....	62
3.4.1 - GSA com 1550 nm.....	63
3.4.2 - GSA com 1240 nm.....	64
3.4.3 – GSA com 800 nm.....	65
3.5 – Referências bibliográficas.....	66
Capítulo 4 – TDFA com bombeamento duplo em 800 nm e 1050 nm.....	71
4.1 – Montagem Experimental do amplificador com bombeamento duplo em 800 nm e 1050 nm.....	72
4.2 – Resultados obtidos para o amplificador com bombeamento duplo em 800 nm e 1050 nm.....	73
4.3 – Reflectometria óptica no domínio da frequência para medição de Ganho distribuído.....	76
4.4 – Montagem experimental e resultados de ganho distribuído utilizando a técnica de COFDR.....	80
4.5 – Protótipo de TDFA com bombeamento duplo (800 nm + 1050 nm) utilizando lasers de diodo.....	87
4.6 – Conclusões.....	89
4.7 – Referências bibliográficas.....	90
Capítulo 5 – Amplificadores reflexivos a fibra dopada com Túlio.....	92
5.1 – TDFA reflexivo com 38 dB de ganho com bombeamento monocromático.....	93
5.2 – TDFA reflexivo compacto com bombeamento monocromático.....	101
5.3 – Conclusões.....	104
5.4 – Referências bibliográficas.....	105
Capítulo 6 – Medidas de saturação cruzada de ganho em TDFAs.....	107
6.1 – Dependência espectral da saturação cruzada de ganho em TDFA com bombeamento monocromático.....	109

6.2 – Conclusões.....	114
6.4 – Referências bibliográficas.....	115
Capítulo 7 – Amplificadores a fibra dopada com Érbio com travamento de ganho.....	118
7.1 – Técnicas para travamento de ganho óptico.....	118
7.2 – Análise do efeito da direção do bombeamento no travamento de ganho óptico em EDFA com circuladores na malha de realimentação.....	122
7.3 – Conclusões.....	129
7.4 – Referências bibliográficas.....	130
Capítulo 8 – Amplificadores ópticos híbridos para a banda S.....	132
8.1 – Introdução.....	132
8.2 – Bombeamento: 1426 nm (FRA) + 1050 nm (TDFA).....	137
8.3 – Bombeamento monocromático em 1426 nm.....	142
8.3.1 – Um estágio Raman e um estágio TDFA utilizando uma Fibra altamente dopada com Túlio.....	142
8.3.2 – Um estágio Raman e um estágio TDFA utilizando uma Fibra dopada com Túlio de 18 m de comprimento e dopagem 2000 ppm.....	145
8.3.3 – Configuração com cascadeamento serial: FRA, fibra com dopagem padrão de Túlio e fibra altamente dopada com Túlio.....	147
8.3.4 – Configuração com cascadeamento serial: TDFA com fibra altamente dopada com Túlio, FRA e TDFA padrão.....	153
8.3.5 – Configuração com cascadeamento serial: fibra altamente dopada com Túlio, fibra com dopagem padrão de Túlio e FRA.....	157
8.3.6 – Comparação entre as configurações utilizando duas fibras dopadas com Túlio e uma fibra Raman.....	160
8.3.7 – Um estágio TDFA e um estágio Raman utilizando uma Fibra altamente dopada com Túlio.....	162
8.4 – Conclusões.....	165
8.5 – Referências bibliográficas.....	166
Capítulo 9 – Conclusões, contribuições e trabalhos futuros.....	170
Publicações referentes à tese.....	173
Publicações não referentes à tese.....	174

Lista de Figuras

Fig. 1.1 – Foto do Laboratório de Redes Ópticas do Grupo de Fotônica do Departamento de Eletrônica e Sistemas da Universidade Federal de Pernambuco.....	27
Fig. 1.2 – Foto do Laboratório de Fotônica e Optoeletrônica do Departamento de Física da Universidade Federal de Pernambuco.....	27
Fig. 2.1 – Diagrama de energia ilustrando o processo de amplificação paramétrica.....	39
Fig. 2.2 – Diagrama de energia ilustrando o processo de amplificação Raman.....	41
Fig. 2.3 – Coeficiente de ganho Raman para sílica.....	43
Fig. 2.4 – Diagrama de energia ilustrando o processo de amplificação dos EDFAs.....	45
Fig. 3.1 – Diagrama de energia dos íons de Tm^{3+} em vidros fluorados com bombeamento em 1050 nm.....	52
Fig. 3.2 – Diagrama de energia das possíveis emissões laser dos íons de Tm^{3+} em vidros fluorados.....	53
Fig. 3.3 – Diagrama de energia dos íons de Tm^{3+} em vidros fluorados com bombeamento em 1410 nm.....	54
Fig. 3.4 – Diagrama de energia dos íons de Tm^{3+} em vidros fluorados com bombeamento único em 1050 nm, apresentando as probabilidades de transição entre os níveis de energia envolvidos no modelo do Komukai.....	55
Fig. 3.5 – Diagrama de energia das possíveis absorções de estado fundamental dos íons de Tm^{3+} em vidros fluorados.....	63
Fig. 3.6 – Esquemas de bombeamento duplo para TDFA utilizando 1550 nm para absorção de estado fundamental.	64
Fig. 3.7 – Esquema de bombeamento duplo para TDFA utilizando 1240 nm para absorção de estado fundamental.....	65
Fig. 3.8 – Esquemas de bombeamento duplo para TDFA utilizando 800 nm para absorção de estado fundamental.....	66
Fig. 4.1 – Diagrama de energia para bombeamento duplo de fibras ZBLAN dopadas com Túlio em 1050 nm e 800 nm.	72
Fig. 4.2 – Esquema de montagem do TDFA com bombeamento duplo em 800 nm e 1050 nm.	73

- Fig. 4.3** – Espectro de luminescência gerado pelos lasers de bombeamento de: 73mW em 800nm (linha preta), 80mW em 1050nm (linha vermelha) e a combinação dos dois bombeamentos (linha azul).74
- Fig. 4.4** – Ganho do módulo contendo a TDF para: bombeamento 80 mW em 1050 nm (quadrados) e para bombeamento duplo em 1050 nm (80 mW) e 800 nm (73 mW) (círculos) em função do comprimento de onda do sinal.....75
- Fig. 4.5** – Ganho do módulo contendo a TDF em função da potência de bombeamento de 1050 nm parametrizado pela potência de bombeamento em 794 nm. O comprimento de onda sinal é 1462 nm e a potência é de -27,2 dBm.....76
- Fig. 4.6** – Esquema de funcionamento do OFDR baseado no interferômetro de Michelson.
- Fig. 4.7** – Montagem experimental do equipamento que realiza a reflectometria óptica no domínio da frequência.81
- Fig. 4.8** – Foto da Montagem experimental do COFDR, que contém o acoplador direcional, o oscilador local, o circulador, a fibra com a rede de difração de Bragg e o fotodetector.....81
- Fig. 4.9** – Fotos dos equipamentos utilizados nas medições com a técnica de COFDR. Gerador de funções (esquerda acima), laser sintonizável (esquerda abaixo), osciloscópio (direita acima) e ESA (direita abaixo).....82
- Fig. 4.10** – Espectros no analisador de espectro elétrico do COFDR com bombeamento duplo para 60 mW em 800nm e várias potências em 1050nm.....83
- Fig. 4.11** – Espectros no analisador de espectro elétrico do COFDR com: (a) bombeamento simples em 1050 nm e (b) bombeamento duplo para várias potências em 1050nm.....84
- Fig. 4.12** – Ganho distribuído na fibra com bombeamento simples em 1050nm com 140 mW (círculos) e duplo 1050 nm+ 800 nm em regime de baixa potência (45 mW) de bombeamento em 800 nm (quadrados).....85
- Fig. 4.13** – Ganho distribuído na fibra com bombeamento duplo 1050 nm + 800 nm para alta potência de bombeamento em 800 nm (100 mW). A potência do sinal é 2,7 mW.....86
- Fig. 4.14** – Ganho em função da potência de bombeamento de 1050nm parametrizado para potência de bombeamento em 802nm de 0 mW (quadrados) e 60 mW (círculos). A potência de sianl é de 2,7 mW.....87
- Fig. 4.15** – Ganho da TDF para bombeamento duplo em função da potência de bombeamento em 1050 nm. A potência de sinal em 1470 nm é de -20 dBm. A potência de bombeamento em 800 nm é 28 mW.....88

- Fig. 4.16** – Ganho e figura de ruído da TDF com bombeamento simultâneo em 1050 nm (90 mW) e 800 nm (28 mW) em função do comprimento de onda do sinal. A potência do sinal é de -20dBm.....89
- Fig. 5.1** – Exemplos de configurações de amplificadores ópticos a fibra dopada com Túlio: (a) única passagem do sinal pela fibra dopada e (b) dupla passagem do sinal pela fibra dopada com uso de espelho metálico e (c) dupla passagem do sinal pela fibra dopada com uso de um circulador óptico.....95
- Fig. 5.2** – Ganho e figura de ruído do amplificador em função do comprimento de onda do sinal. A potência de bombeamento é de 300 mW em 1050 nm e a potência do sinal é de -30 dBm.....97
- Fig. 5.3** – Ganho do amplificador em função da potência de bombeamento. O bombeamento monocromático é realizado em 1050 nm e a potência do sinal é de -37 dBm em 1462 nm.....98
- Fig. 5.4** – Figura de ruído do amplificador em função da potência de bombeamento. O bombeamento monocromático é realizado em 1050 nm e a potência do sinal é de -37 dBm em 1462 nm.....99
- Fig. 5.5** – Ganho do amplificador em função da potência do sinal. O bombeamento monocromático é realizado com potência de 250 mW em 1050 nm e o comprimento de onda do sinal é 1462 nm.....100
- Fig. 5.6** – Figura de ruído do amplificador em função da potência do sinal. O bombeamento é realizado com potência de 250 mW em 1050 nm e o comprimento de onda do sinal é 1462 nm.....101
- Fig. 5.7** – Esquemas experimentais de amplificadores a fibra dopada com Túlio nas configurações: (a) única passagem do sinal e (b) dupla passagem do sinal pela fibra dopada com Túlio.....102
- Fig. 5.8** – Ganho (símbolos fechados) e Figura de ruído (símbolos abertos) do amplificador em função da potência de bombeamento em 1050 nm para a técnica de única (quadrados) e dupla passagem (círculos) do sinal pela fibra dopada. A potência do sinal é de -30dBm 103
- Fig. 6.1** – Processo de amplificação utilizando conversão ascendente de energia para bombeamento monocromático nos comprimentos de onda (a) 1050nm e (b) 1400nm.....107
- Fig. 6.2** – Montagem experimental utilizada para medição da dependência espectral da saturação cruzada de ganho em TDFA com bombeamento monocromático.....110

Fig. 6.3 – Espectro de potência de saída do amplificador para bombeamento em 1426 nm com potência de 300 mW e potência de -5 dBm por canal de sinal. A área sombreada em cinza mostra a situação com os sete canais ativos e as curvas com fundo transparente ilustram o espectro de amplificação para cada um dos canais ativos individualmente.....111

Fig. 6.4 - Medidas de saturação cruzada de ganho dependendo do comprimento de onda do canal sobrevivente quando 6 dos 7 canais do sistema são removidos. Várias potências de sinal por canal (entre -12.5 dBm e 0 dBm) são utilizadas. A potência de bombeamento é de 300 mW em 1426 nm.....113

Fig. 6.5 – Medidas de saturação cruzada de ganho dependendo do comprimento de onda do canal sobrevivente quando 6 entre 7 canais do sistema são removidos. Várias potências de sinal por canal (entre -12.5 dBm e 0 dBm) são utilizadas. A potência de bombeamento é de 300 mW em 1050 nm.113

Fig. 6.6 – Medidas de saturação cruzada de ganho dependendo da potência de bombeamento do amplificador para dois canais sobreviventes com comprimentos de onda diferentes quando 6 entre 7 canais do sistema são removidos. A potência de sinal por canal é de 0 dBm.....114

Fig. 7.1 – Configurações para travamento de ganho totalmente óptico utilizando: (a) acopladores direcionais, (b) circuladores ópticos, (c) fibras com redes de Bragg e (d) combinação das técnicas.121

Fig. 7.2 – Configurações para travamento de ganho totalmente óptico utilizando circuladores ópticos com bombeamento no sentido: (a) copropagante e (b) contrapropagante com o sinal.124

Fig. 7.3 – Espectro óptico medido na saída do amplificador para atenuação na malha de realimentação de (a) 34 dB e (b) 18 dB. A potência de bombeamento é de 65 mW. A potência de entrada do sinal é de -29 dBm.....125

Fig. 7.4 – Ganho e figura de ruído do amplificador em função da perda inserida pelo atenuador na realimentação para bombeamento no sentido: (A) copropagante e (B) contrapropagante com o sinal. Três valores de potência de bombeamento foram utilizados: 43 mW (quadrados), 65 mW (círculos) e 75 mW (triângulos). A Potência de entrada do sinal é de -28,7 dBm.....126

Fig. 7.5 – Ganho do amplificador em função da potência de entrada do sinal para bombeamento no sentido: (a) copropagante e (b) contrapropagante com o sinal. A potência de bombeamento é de 75 mW.....127

- Fig. 7.6** – Ganho e figura de ruído do amplificador em função da potência de entrada do sinal para (a) copropagante e (b) contrapropagante com o sinal. Potência de bombeamento de 75 mW em 980 nm. Perdas do atenuador da malha de realimentação: 18 dB (quadrados), 26 dB (círculos) e 34 dB (triângulos).....128
- Fig. 7.7** – Ganho e figura de ruído do amplificador em função da potência de bombeamento para perdas do atenuador da malha de realimentação de (a) 34 dB e (b) 18 dB quando o bombeamento está copropagante (triângulos) e contrapropagante (quadrados). Potência de sinal de -29 dBm.....129
- Fig. 8.1** – Opções para sistemas de amplificação envolvendo várias bandas simultaneamente: (a) Amplificação distinta das bandas em questão e (b) amplificação simultânea de todas as bandas por um amplificador banda larga.....133
- Fig. 8.2** – Configuração do amplificador óptico híbrido: FRA com bombeamento copropagante em 1426 nm e o TDFA com bombeamento copropagante em 1050 nm.....138
- Fig. 8.3** – Fotos do amplificador híbrido FRA + TDFA. À esquerda acima fibra DCF (tabela 8.1), à esquerda abaixo TDF (tabela 8.2), e à direita montagem experimental do sistema.....138
- Fig. 8.4** – Espectros de ASE do amplificador híbrido FRA com bombeamento em 1426 nm e TDFA com bombeamento em 1050 nm.....139
- Fig. 8.5** – Ganho do amplificador híbrido FRA (bombeamento em 1426 nm) + TDFA (bombeamento em 1050 nm), quando acionado apenas o bombeamento do TDFA. A potência de sinal é -30 dBm.....140
- Fig. 8.6** – Ganho do amplificador híbrido FRA (bombeamento em 1426 nm) + TDFA (bombeamento em 1050 nm), quando acionado apenas o bombeamento do FRA. A potência de sinal é -30 dBm.....140
- Fig. 8.7** – Ganho do amplificador híbrido FRA em três situações de bombeamento: 600 mW FRA (círculos), 400 mW TDFA (triângulos) e os dois bombeamentos simultaneamente (quadrados). A potência de sinal é -30 dBm.....141
- Fig. 8.8** – Ganho do amplificador híbrido FRA em três situações de bombeamento: 1 W FRA (círculos), 400 mW TDFA (triângulos) e os dois bombeamentos (quadrados). A potência de sinal é -30 dBm.....142
- Fig. 8.9** – Configuração do amplificador óptico híbrido com bombeamento monocromático em 1426 nm utilizando uma fibra DCF e uma fibra altamente dopada com Túlio.....143

- Fig. 8.10** - Espectro de perdas do amplificador óptico híbrido com bombeamento monocromático em 1426 nm utilizando uma fibra DCF e uma fibra altamente dopada com Túlio.....144
- Fig. 8.11** – Ganho (símbolos fechados) e figura de ruído (símbolos abertos) do amplificador óptico híbrido com bombeamento monocromático em 1426 nm constituído de uma fibra DCF e uma fibra altamente dopada com Túlio. Potência de sinal é -23dBm...144
- Fig. 8.12**– Configuração do amplificador óptico híbrido com bombeamento monocromático em 1426 nm utilizando uma fibra DCF e uma fibra dopada com Túlio de 18 m e dopagem padrão.....145
- Fig. 8.13** – Perdas do amplificador óptico híbrido com bombeamento monocromático em 1426 nm utilizando uma fibra DCF e uma fibra dopada com Túlio de 18 m e dopagem padrão.....146
- Fig. 8.14** – Espectro ASE do amplificador híbrido FRA + TDFA com bombeamento monocromático em 1426 nm para: 298 mW (FRA), 88 mW (TDFA copropagante) e 78 mW (TDFA contrapropagante) (Linha preta) e 520 mW (FRA), 150 mW (TDFA copropagante) e 134 mW (TDFA contrapropagante) (Linha vermelha).....146
- Fig. 8.15** – Ganho do amplificador FRA + TDFA com bombeamento monocromático em 1426 nm. As potências utilizadas foram 520 mW (FRA), 150 mW (TDFA copropagante) e 134 mW (TDFA contrapropagante).....147
- Fig. 8.16** – Configuração do amplificador óptico híbrido com bombeamento monocromático em 1426 nm, composto por um FRA construído por uma fibra DCF, seguido por um TDFA de dois estágios utilizando duas fibras dopadas com Túlio, uma com dopagem padrão e outra com alta dopagem.....148
- Fig. 8.17** – Espectro de ASE junto ao bombeamento remanescente na saída do amplificador híbrido DCF+TDF1+TDF2 com potência de bombeamento 894 mW.....149
- Fig. 8.18** – Espectro de ASE junto ao bombeamento remanescente na saída do amplificador híbrido DCF + TDF1 + TDF2 com potência de bombeamento total de 566 mW (linha preta), 687 mW (linha vermelha), 806 mW (linha verde) e 894 mW.....150
- Fig. 8.19** – Espectro de perdas do amplificador híbrido composto por um FRA seguido por um TDFA de dois estágios.150
- Fig. 8.20** – Espectro de ganho interno (a), ganho (b) e figura de ruído (c) do amplificador DCF + TDF1 + TDF2 para potências de bombeamento totais de 566 mW (quadrados), 687 mW (círculos), 806 mW (triângulos pra cima) e 894 mW (triângulos pra baixo).....151

- Fig. 8.21** – Espectros na entrada (em baixo) e na saída (em cima) quando utilizados cinco canais com potência de -20 dBm por canal. Potência total bombeamento de 894 mW...153
- Fig. 8.22** – Configuração do amplificador óptico híbrido TDF2 + DCF + TDF1 com bombeamento monocromático em 1426 nm.....154
- Fig. 8.23** – Espectro de perdas do amplificador híbrido TDF2 +DCF + TDF1.....154
- Fig. 8.24** – Espectro de ganho interno (a), ganho (b) e figura de ruído (c) do amplificador TDF2 + DCF + TDF1 para potências de bombeamento totais de 566 mW (quadrados), 687 mW (círculos), 806 mW (triângulos pra cima) e 894 mW (triângulos pra baixo).....155
- Fig. 8.25** – Espectros na entrada (vermelho) e na saída (azul) do amplificador híbrido TDF2 + DCF + TDF1 com potência de bombeamento total de 894 mW quando utilizados quatro canais com potência de -20 dBm por canal.....157
- Fig. 8.26** – Configuração do amplificador óptico híbrido TDF2 + TDF1 + DCF com bombeamento em 1426 nm.....158
- Fig. 8.27** – Espectro de perdas do amplificador híbrido TDF2 + TDF1 + DCF.....158
- Fig. 8.28** – Espectros de (a) ganho, (b) ganho interno e (b) figura de ruído do amplificador híbrido TDF2 + TDF1 + DCF, quando as potências de bombeamento total são 566 mW (quadrados), 687 mW (círculos), 806 mW (triângulos pra cima), 894 mW (triângulos pra baixo) e 993 mW (losangos).....159
- Fig. 8.29** – Espectros de (a) ganho e (b) ganho interno para três configurações distintas: FRA + TDFA + TDFA (TDF 5000 ppm); (TDF 5000 ppm) + FRA + TDFA e TDFA (TDF 5000 ppm) + TDFA + FRA. A potência de bombeamento total é 894 mW.....161
- Fig. 8.30** – Espectros de figura de ruído para três configurações distintas: FRA + TDFA + TDFA (TDF 5000 ppm); (TDF 5000 ppm) + FRA + TDFA e TDFA (TDF 5000 ppm) + TDFA + FRA. A potência de bombeamento total é 894 mW.....162
- Fig. 8.31** – Configuração do amplificador óptico híbrido com bombeamento em 1426 nm utilizando uma fibra altamente dopada com Túlio e uma fibra DCF.....163
- Fig. 8.32** – Espectros de perdas amplificador óptico híbrido com bombeamento em 1426 nm utilizando uma fibra altamente dopada com Túlio e uma fibra DCF.....164
- Fig. 8.33** – Ganho do TDFA (quadrados) e FRA (círculos) para potência de bombeamento de 250 mW e 550 mW, respectivamente. A potência de sinal é -20 dBm.....164
- Fig. 8.34** – Ganho (quadrados) e figura de ruído (símbolos abertos) do amplificador híbrido TDFA + FRA para potência de bombeamento de 200 mW e 510 mW, respectivamente. A potência de sinal é -20 dBm.....165

Lista de Tabelas

Tabela 4.1 – Dados da fibra dopada com Túlio, módulo #1.....	73
Tabela 4.2 – Parâmetros experimentais utilizados nas medidas com COFDR.....	81
Tabela 4.3 – Dados da fibra dopada com Túlio, módulo #2.....	87
Tabela 5.1 – Dados da fibra dopada com Túlio, módulo #3.....	96
Tabela 5.2 – Dados da fibra dopada com Túlio, módulo #4.....	103
Tabela 6.1 – Dados da fibra dopada com Túlio, módulo #5.....	110
Tabela 7.1 – Dados da fibra dopada com Érbio.....	123
Tabela 8.1 – Dados da DCF.....	136
Tabela 8.2 – Dados da fibra dopada com Túlio, módulo #3.....	138
Tabela 8.3 – Dados da fibra dopada com Túlio, módulo #5.....	143

Acrônimos e termos utilizados

1. ASE (*Amplified Spontaneous Emission*) – Emissão Espontânea Amplificada.
2. ASON (*Automatic Switched Optical Networks*) – Redes ópticas transparentes de alta capacidade utilizando chaveamento automático.
3. APD (*Avalanche Photodiode*) – Fotodiodo tipo Avalanche.
4. Banda C (*Conventional Band*) – Região Espectral compreendida entre 1530 nm e 1565 nm, segundo o ITU-T.
5. Banda L (*Long Wavelength Band*) – Região Espectral compreendida entre 1565 nm e 1625 nm, segundo o ITU-T.
6. Banda S (*Short Wavelength Band*) – Região Espectral compreendida entre 1460 nm e 1530 nm, segundo o ITU-T.
7. BBM (*Black Box Model*) – Modelo de caixa preta.
8. BER (*Bit Error Rate*) – Taxa de Erro por Bit.
9. COFDR (*Coherent Optical Frequency Domain Reflectometry*) – Reflectometria Óptica Coerente no domínio da frequência.
10. Crosstalk – Interferência entre canais.
11. CW (*Continuous Wave*) – Onda Contínua.
12. DCF (*Dispersion Compensating Fibers*) – Fibras ópticas para compensação de dispersão
13. DEMUX (*Demultiplexer*) – Demultiplexador.
14. DFB (*Distributed Feedback laser*) – Laser com Realimentação Distribuída.
15. DRS (*Double Rayleigh Scattering*) – Espalhamento Rayleigh duplo.
16. DSF (*Dispersion Shifted Fibers*) – Fibras ópticas de transmissão tipo dispersão deslocada.
17. DWDM (*Dense Wavelength Division Multiplexing*) – Multiplexação Densa por Comprimento de Onda.
18. EDF (*Erbium Doped Fiber*) – Fibra Dopada com Érbio.
19. EDFA (*Erbium Doped Fiber Amplifier*) – Amplificador a fibra dopada com Érbio.
20. ESA (*Excited State Absorption*) – Absorção de Estado Excitado.
21. ESA (*Electrical Spectrum Analyser*) – Analisador de espectro Óptico.
22. F – fator de Ruído.
23. FBG (*Fiber Bragg Gratings*) – Fibras com Redes de Bragg.

24. FFT (*Fast Fourier Transform*) – Transformada Rápida de Fourier.
25. FWM (*Four Wave Mixing*) – Mistura de quatro ondas.
26. FRA (*Fiber Raman Amplifiers*) – Amplificadores Raman a fibra
27. FWHM (*Full Width Half Maximum*) – Banda de largura a meia altura
28. GRIN (*Graded Refractive Index*) – Índice de Refração Gradual.
29. GSA (*Ground State Absorption*) – Absorção de Estado Fundamental.
30. GS-TDFA (*Gain Shifted - Thulium Doped Fiber Amplifier*) – Amplificador a fibra dopada com Túlio com curva de ganho deslocada em frequência.
31. IDLER – Banda conjugada ocasionada pelo processo de amplificação paramétrica.
32. IEC (*International Engineering Consortium*) – Consórcio Internacional de engenharia.
33. ITU-T (*International Telecommunication Union – Telecommunication Standardization Sector*) – União internacional de telecomunicações, setor de padronização de telecomunicações.
34. LASER (*Light Amplification by Stimulated Emission Radiation*) – Emissão de Radiação Estimulada por amplificação de Luz.
35. LED (*Light Emitting Diode*) – Diodo Emissor de Luz, fonte de luz incoerente.
36. L-EDFA (*L-band Erbium doped fiber amplifiers*) – Amplificador a fibra dopada com Érbio para a banda L.
37. LPG (*Long Period Gratings*) – Fibras com modulação no índice de refração com longo período.
38. MASER (*Microwave Amplification by Stimulated Emission Radiation*) – Amplificação de Microondas por Emissão de Radiação Estimulada.
39. MPI (*Multipath Interference*) – Interferência de múltiplos caminhos.
40. MUX (*Multiplexer*) – Multiplexador.
41. NDFA (*Neodimium Doped Fiber Amplifier*) – Amplificador a fibra dopada com Neodímio.
42. NF (*Noise Figure*) – Figura de Ruído.
43. NZDSF (*Non Zero Dispersion Shifted Fibers*) – Fibras ópticas de transmissão tipo dispersão deslocada não nula.
44. OADM (*Optical Add-Drop Multiplexer*) – Dispositivos Ópticos que têm a capacidade de adicionar, acessar ou remover um canal em sistema WDM.
45. OFDR (*Optical Frequency Domain Reflectometry*) – Reflectometria Óptica no domínio da frequência.

46. OL – Oscilador Local
47. OTDM (*Optical Time Division Multiplexing*) – Multiplexação óptica por divisão de tempo
48. OTDR (*Optical Time Domain Reflectometry*) – Reflectometria Óptica no domínio do tempo.
49. OPA (*Optical Parametric Amplifier*) – Amplificador Óptico Paramétrico.
50. OSA (*Optical Spectrum Analyser*) – Analisador de Espectro Óptico.
51. PCE (*Power Conversion Efficiency*) – Eficiência de Conversão de Potência.
52. PDFA (*Praseodimium Doped Fiber Amplifier*) – Amplificador a fibra dopada com Prasedímio.
53. pin – Fotodiodo com camada intrínseca interna para absorção de fótons.
54. PMD (*Polarization Mode Dispersion*) – Dispersão do Modo de Polarização.
55. QoS (*Quality of Service*) – Qualidade de serviço.
56. Regenerador 3R – realiza a reformatação, retemporização e reamplificação do sinal.
57. SBS (*Stimulated Brillouin Scattering*) – Espalhamento estimulado Brillouin.
58. S-EDFA (*S-band Erbium doped fiber amplifiers*) – Amplificadores a fibra dopada com Érbio para funcionar na banda S
59. sig-sp (*Signal-Spontaneous Beat*) – Batimento Sinal-Espontâneo.
60. SNR (*Signal to Noise Ratio*) – Relação sinal ruído.
61. SOA (*Semiconductor Optical Amplifier*) – Amplificador Óptico de Semicondutor.
62. SPM (*Self Phase Modulation*) – Automodulação de fase.
63. sp-sp (*Spontaneous -Spontaneous Beat*) – Batimento Espontâneo -Espontâneo.
64. SRS (*Stimulated Raman Scattering*) – Espalhamento Raman estimulado.
65. SSE (*Source Spontaneous Emission*) – Emissão Espontânea da Fonte de Luz.
66. TDF (*Thulium Doped Fiber*) – Fibra dopada com Túlio.
67. TDFA (*Thulium Doped Fiber Amplifier*) – Amplificador a fibra dopada com Túlio.
68. TE (*Transversal Electric*) – Elétrico transversal.
69. TM (*Transversal Magnetic*) – Magnético transversal.
70. TWA (*Travelling Wave Amplifier*) – Amplificador de onda propagante.
71. WDM (*Wavelength Division Multiplexing*) – Multiplexação por Comprimento de Onda.
72. WXC (*Wavelength Cross Connectors*) – conectores cruzados de comprimentos de onda.

73. ZBLAN – Vidros Fluorzirconados (ZrF₄-BaF₂-LaF₃-AlF₃-NaF) na sua composição. Usados como hospedeiro para terras raras que necessitam de vidros com baixa energia por fônons, inclusive os íon trivalentes de Túlio (Tm³⁺).

Lista de parâmetros

1. a – Raio do núcleo da fibra.
2. a_p – Área de seção de choque para o bombeamento na fibra.
3. B_e – Largura de banda no domínio elétrico de medida na figura de ruído.
4. c – velocidade da luz.
5. E – Campo elétrico.
6. f – Freqüência elétrica.
7. F – Fator de ruído do amplificador.
8. $f_e(E^e)$ – Probabilidade de ocupação de um elétron com energia E^e na banda de condução.
9. $f_h(E^h)$ – Probabilidade de ocupação de um buraco com energia E^h na banda de valência.
10. G – Fator de ganho do amplificador.
11. g – Ganho no meio óptico.
12. g_0 – Máximo de ganho no meio óptico.
13. g_R – Coeficiente de ganho Raman.
14. h – Constante de Planck.
15. $\langle i_{SINAL} \rangle$ - Média da fotocorrente gerada no fotodetector.
16. I_P – Intensidade do bombeamento.
17. I_S – Intensidade do sinal.
18. k – Número de onda.
19. L – Comprimento do meio óptico ativo.
20. L_c – Comprimento de coerência.
21. m_0 – Massa do elétron.
22. N – Densidade eletrônica total.
23. N_1 – Densidade eletrônica no estado fundamental.
24. N_2 – Densidade eletrônica no estado excitado.
25. N_a – Potência de ruído adicionado pelo amplificador.
26. N_i – Potência de ruído na entrada.
27. N_j , para $j = 0, 1, 2, 3, 4$ e 5 . – Estado de energia dos íons trivalentes de Túlio.
28. NF – Figura de ruído do amplificador.
29. N_L – Densidade eletrônica no estado inferior.

30. N_U – Densidade eletrônica no estado superior.
31. n_r – Índice de refração.
32. n_{sp} – Fator de inversão de população.
33. P – Potência óptica do sinal.
34. \vec{P} – Polarização elétrica.
35. $P_{entrada}$ – Potência de entrada no amplificador.
36. P_p – Potência de bombeamento.
37. P_{saida} – Potência de saída no amplificador.
38. P_{sat} – Potência de saturação do amplificador.
39. q – Carga fundamental do elétron.
40. R_1 – Refletividade da face de entrada de um SOA.
41. R_2 – Refletividade da face de saída de um SOA.
42. r_p – Raio modal do bombeamento.
43. r_p – Raio modal do sinal.
44. $SNR_{entrada}$ – Relação sinal-ruído na entrada do amplificador.
45. SNR_{saida} – Relação sinal-ruído na saída do amplificador.
46. $S^{dBm}(f)$ – Densidade espectral do ruído na saída do amplificador.
47. $S_e^{dBm}(f)$ – Densidade espectral do ruído na equivalente na entrada do amplificador.
48. $S_{MPI}(f)$ – Densidade espectral de potência da interferência por múltiplos caminhos.
49. $S_p(f)$ – Densidade espectral de potência elétrica.
50. $S_{shot}(f)$ – Densidade espectral de potência do ruído de disparo.
51. $S_{sig,sp}(f)$ – Densidade espectral de potência do batimento do sinal com a emissão espontânea.
52. $S_{sp,sp}(f)$ – Densidade espectral de potência do batimento da emissão espontânea com a emissão espontânea.
53. W_{pi} – Probabilidade de absorção a partir do nível i .
54. W_s – Probabilidade de absorção ou emissão de um fóton de sinal.
55. T – Tempo de relaxação de dipolo.
56. α_p – Coeficiente de absorção.
57. γ_{ij} – Probabilidades de transição entre os níveis i e j por emissão espontânea ou decaimento multifonônico.
58. Δf – Largura de linha do laser.

59. Δk – Máximo descasamento de fase tolerado em um OPA.
60. ΔL – Resolução do COFDR.
61. $\Delta \nu$ – Varredura total de frequência na técnica COFDR.
62. $\Delta \nu_A$ – Largura de banda do amplificador.
63. $\Delta \nu_g$ – Largura de banda do ganho do meio.
64. $\Delta \nu_L$ – Intervalo entre os modos longitudinais de uma cavidade Fabry-Perot.
65. $\langle \Delta^2 i_n \rangle$ – Variância do ruído no fotodetector.
66. ϵ_0 – Permissividade elétrica no vácuo.
67. η – Eficiência quântica.
68. η_p – Fator de confinamento para o bombeamento.
69. ν – Frequência óptica do sinal.
70. ν_m – Frequências de ressonância da cavidade Fabry-Perot.
71. ρ_{ASE} – Densidade espectral de potência da emissão espontânea amplificada.
72. ρ_{total} – Densidade espectral de potência de ruído na saída do amplificador.
73. ρ_{SSE} – Densidade espectral de potência de ruído na entrada do amplificador.
74. σ_a – Seção de choque para absorção.
75. σ_e – Seção de choque para emissão.
76. σ_s – Seção de choque para o sinal.
77. τ_i – Tempo de vida do nível i .
78. $\chi^{(i)}$ – Susceptibilidade elétrica de ordem i .
79. ω – Frequência angular do sinal.
80. ω_0 – Frequência angular de transição atômica.
81. \Re – Responsividade do fotodetector.

Capítulo 1 – Sistemas de comunicações ópticas

Com o crescimento acelerado da demanda por tráfego de telecomunicações, as comunicações por meio de sistemas ópticos estão sendo cada vez mais exploradas. Atualmente, a tecnologia de transmissão de informação por fibra óptica é a principal alternativa para estender a banda de transmissão, podendo atingir até aproximadamente 50 Tb/s, preservando algumas características favoráveis como: baixa atenuação do sinal, baixa distorção do sinal, requerimento de baixa potência para funcionamento, entre outros [1]. Contudo, apesar do estado da arte estar em um estágio bem avançado, tais sistemas ainda têm grande potencialidade a ser desenvolvida. Com o surgimento da tecnologia de multiplexação em comprimento de onda (**WDM**, *Wavelength Division Multiplexing*), onde são transmitidos vários canais com comprimentos de onda distintos em uma única fibra óptica, muitos esforços estão sendo direcionados para o desenvolvimento de amplificadores ópticos eficientes, confiáveis e de baixo custo, para tornar viável a utilização de uma faixa mais larga na região espectral de baixas perdas das fibras de sílica (1450 nm-1630 nm).

As normas do ITU-T (*International Telecommunication Union, Telecommunication Standardization Sector*) definem as seguintes bandas de transmissão para comunicações ópticas [2]: *Banda C (Conventional Band)* como a região espectral compreendida entre 1530 nm e 1565 nm; *Banda L (Long wavelengths band)* como a região espectral de 1565 nm a 1625 nm e *banda S (Short wavelengths band)* como a região espectral de 1460 nm a 1530 nm [3]. O atual estado da arte para máxima capacidade de transmissão em uma única fibra está em 10,92 Tb/s, utilizando 273 canais de 40 Gb/s nestas três principais bandas de transmissão por uma distância de 117 km [4]. É importante frisar que, além de usar amplificadores ópticos a fibra dopada com Érbio (**EDFA**, *Erbium Doped Fiber Amplifiers*) para amplificar os canais das *bandas C e L*, foram utilizados amplificadores a fibra dopada com Túlio (**TDF**, *Thulium Doped Fiber Amplifiers*) para amplificar os 85 canais que foram alocados na *banda S*, demonstrando a concreta possibilidade de utilização de amplificadores ópticos em sistemas comerciais de alta capacidade.

1.1 – Evolução dos sistemas ópticos

O primeiro a propor teoricamente a construção de um amplificador óptico foi o engenheiro russo Valentin A. Fabrikant, em 1939, em sua dissertação não publicada. Em 1954, Charles Townes produziu oscilação de microondas utilizando emissão estimulada. Logo após a invenção do laser em 1958 por Schalow e Tocones [25], Theodore Maiman construiu o primeiro laser em 1960. Em 1962, M. Nathan e seus colaboradores anunciaram a geração de luz coerente, usando diodos de homojunção de GaAs, operados sob polarização direta. Tais componentes funcionavam apenas a temperaturas muito baixas. A solução do problema viria com a maturação da tecnologia do crescimento de camadas epitaxiais sobre um substrato. Zh. I. Alferov foi o pai da nova geração de lasers chamados de heteroestrutura. Neste caso, os dispositivos eram feitos usando-se camadas superpostas de materiais diferentes. Com tais estruturas os lasers passaram a ter as correntes de operação reduzidas de forma a permitir o seu uso à temperatura ambiente e regime contínuo. Em face dos fatos acima citados, os lasers usados nos sistemas atuais de telecomunicação são construídos com tecnologia a base de semicondutor. Isto, associado à diminuição da atenuação das fibras ópticas para níveis aceitáveis a partir de 1970, tornou a comunicação por fibra óptica viável [1].

O sistema de comunicação via fibra óptica mais simples é o ponto a ponto. Esse sistema é constituído dos seguintes elementos básicos: Transmissores (*fontes de luz, ver seção 1.2*), meio de transmissão (*fibra óptica, ver seção 1.3*) e receptores (*fotodetectores, ver seção 1.4*). Nestes sistemas, quando a perda aumenta, parâmetro este que geralmente apresenta uma dependência direta com o comprimento do enlace, é necessária a utilização de elementos que tornem o sinal capaz de atingir seu destino de forma inteligível. Nesses casos são utilizados regeneradores ou amplificadores (*seção 1.5*).

Atualmente, a grande maioria dos sistemas de comunicações via fibra óptica usa modulação de intensidade e detecção direta [5], apesar do esforço no desenvolvimento de sistemas coerentes de modulação e detecção. A maioria dos sistemas ópticos é digital e de alta performance. Tais sistemas admitem taxas de transmissão altas, podendo chegar a 160 Gb/s em um único canal utilizando tecnologia de multiplexação óptica no domínio do tempo (**OTDM**, *Optical Time Domain Multiplexing*) com uma baixa taxa de erro por bit (**BER**, *Bit Error Rate*) [6].

A evolução dos sistemas de comunicações ópticas ocorreu com a implantação da tecnologia de multiplexação por comprimentos de onda. Novos dispositivos, como multiplexadores/demultiplexadores ópticos (*ver seção 1.7*) foram desenvolvidos para esse propósito. Nesses sistemas, os lasers de sinal, oriundos dos transmissores ópticos, são agrupados pelo multiplexador e transmitidos em uma mesma fibra óptica. A recepção é realizada por um conjunto composto do demultiplexador e dos receptores ópticos. O demultiplexador separa as diversas componentes de sinal e entrega cada faixa de comprimento de onda a um receptor.

Um outro aspecto que deve ser abordado é a migração para topologias mais avançadas, constituídas de elementos como componentes ópticos de adição-remoção de canais (**OADM**, *Optical Add-Drop Multiplexer*) e conectores cruzados de comprimento de onda (**WXC**, *Wavelength Cross-Connector*). Com os OADM é possível a construção de topologias em barramento ou em anel. Os WXC possibilitam a implementação de redes com nós com capacidade para roteamento e alocação de comprimentos de onda de formas diversas, tornando possível a construção de redes ópticas automaticamente chaveadas (**ASON**, *Automatic Switched Optical Networks*). Maior detalhamento sobre redes ópticas pode ser encontrado em [7,8].

1.2 – Transmissores ópticos

O transmissor óptico é responsável por converter o sinal elétrico em sinal óptico, de forma que esse sinal óptico possa ser acoplado a uma fibra óptica. Para sistemas de comunicações via fibra óptica, os transmissores são dispositivos à base de semicondutor [9-14]. As vantagens no uso de dispositivos de semicondutor são muitas, entre elas: tamanho compacto, alta eficiência, boa confiabilidade, área de emissão compatível com as dimensões do núcleo de fibras ópticas disponíveis comercialmente e possibilidade de emissão em comprimentos de onda na faixa de baixas perdas das fibras de sílica.

Existem basicamente dois tipos de dispositivo transmissor: o diodo transmissor de luz (**LED**, *Light Emitting Diode*), que consiste em uma junção p-n polarizada diretamente gerando luz por emissão espontânea e o Laser (*Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation*) de semicondutor, que geralmente é composto de heteroestruturas em múltiplas camadas cujas faces formam uma cavidade, gerando emissão estimulada.

As principais características do LED são [11]: emissão incoerente com largura espectral larga (entre 30 nm e 60 nm), baixa capacidade de modulação (frequência máxima de modulação típica 100 MHz para LED de InGaAsP) e divergência angular elevada gerando dificuldade para acoplamento em fibras ópticas (eficiência de acoplamento máxima de 1 %). As aplicações mais importantes dos LEDs em telecomunicações são em redes locais, cujas taxas de transmissão são menores do que 10 Mb/s. O uso de LEDs para comunicação normalmente é associado ao uso de fibras multimodo [11].

As principais características do laser são [11]: emissão coerente com largura espectral estreita, tipicamente de 1 nm para cavidades Fabry-Perot e menor que 0,1 nm para emissão laser com realimentação distribuída (**DFB**, *Distributed Feedback Laser*); capacidade de emissão de alta potência para utilização como sinal em telecomunicações (da ordem de 10 mW); pequena dimensão lateral permitindo melhor acoplamento em fibras ópticas monomodo (eficiência de acoplamento máxima entre 30 % e 50 %); e melhor resposta em altas frequências (até 40 GHz) [10] devido ao menor tempo de recombinação associada à emissão estimulada. As aplicações mais importantes em telecomunicações são em sistemas de longas distâncias principalmente nos que utilizam tecnologia WDM [11].

1.3 – Fibras ópticas

Fibras ópticas são filamentos dielétricos capazes de guiar luz que podem ser usados como meio de transmissão [5, 7, 9, 11-12, 15-16]. Na maior parte dos casos são estruturas cilíndricas concêntricas, compostas de materiais amorfos como vidros ou plásticos. A região central da fibra óptica é chamada de núcleo, enquanto que a região periférica é chamada de casca. O princípio para propagação utilizado é o efeito de reflexão interna total que confina a luz no guia de onda criado pela diferença de índice de refração. Para que haja o efeito de reflexão interna total, o índice de refração do núcleo deve ser maior do que o da casca.

Os maiores limitantes para a transmissão de informação por uma fibra óptica são a atenuação e a dispersão [7]. A atenuação [9-12] faz com que haja perdas no sinal transmitido, prejudicando principalmente o alcance do enlace, e tem várias origens como [5, 9, 11]: a absorção do material que compõe a fibra na região de infravermelho e de ultravioleta, o espalhamento de Rayleigh e a absorção pelos íons que são depositados no material durante o processo de fabricação.

Recentemente, os processos de fabricação melhoraram bastante fazendo com que as fibras ópticas tenham diminuído substancialmente os picos de absorção por íons, tornando o espectro de absorção mais plano, se aproximando muito do limite teórico, e tornando possível a exploração de uma faixa de comprimentos de onda bem mais extensa por meio da tecnologia WDM, inclusive na *banda S*.

A dispersão [5, 7, 9, 11-12, 15-16], que provoca degradação devido à redistribuição de potência no âmbito espacial e temporal ao longo da propagação, pode ser basicamente classificada como: intermodal e intramodal.

A dispersão intermodal depende da resposta do meio a diferentes comprimentos de onda e aparece porque os diferentes modos têm constantes de propagação distintas, ou seja, viajam com velocidades distintas na fibra. A solução mais prática e interessante para este caso é a utilização das fibras monomodo, que só admitem a propagação do modo fundamental (LP01).

A dispersão intramodal ocorre por causa da largura de linha associada à fonte de luz. Os dois fatores principais que compõem a dispersão intramodal são: a dependência do índice de refração do material com o comprimento de onda e o perfil de índices de refração do guia que confina a luz. Atualmente, existem fibras ópticas sofisticadas, como as fibras de dispersão deslocada não nula (**NZDSF**, *Non zero Dispersion Shifted Fiber*), cujo perfil de índices de refração é mais complexo, permitindo uma dispersão baixa e constante por uma faixa de comprimentos de onda bem maior em torno de 1550 nm, sendo assim possível aumentar a capacidade dos sistemas através de tecnologia WDM [9].

A evolução tecnológica das fontes e fibras, o aumento das taxas de repetição e a capacidade de compensação da atenuação e da dispersão da fibra fizeram com que aparecessem fatores que não eram importantes, por estarem associados a efeitos de menor magnitude. Esse é o caso da dispersão por modo de polarização (**PMD**, *Polarization Mode Dispersion*) [17] gerada entre as polarizações ortogonais degeneradas que apresentam velocidades de propagação diferentes decorrentes de imperfeições nas características da fibra óptica. Para sistemas de longas distâncias com altas taxas de transmissão (acima de 10 Gb/s), a PMD deve ser considerada no projeto.

1.4 – Receptores ópticos

Os receptores [9-16] são os elementos responsáveis por converter o sinal óptico em sinal elétrico, capaz de ser processado. O mais importante componente é o fotodetector, que converte luz em corrente elétrica através da absorção de fótons em uma junção p-n. Para sistemas de comunicações via fibra óptica, o receptor deve ter alta sensibilidade, resposta rápida, baixo ruído, baixo custo, boa confiabilidade e dimensões compatíveis com diâmetro do núcleo das fibras ópticas utilizadas [11]. Dois tipos básicos de fotodetectores são usados em sistemas de comunicações via fibra óptica: os fotodiodos tipo *pin* e os do tipo *APD*.

O *pin* consiste em uma junção semicondutora p-n com uma camada de material intrínseco inserido entre as camadas *p* e *n* para que o campo elétrico na região de depleção aumente devido à maior resistividade associada à camada não dopada, melhorando a sua resposta em frequência. A principal diferença entre o *pin* e o fotodiodo é que a componente que domina a corrente é a de deriva. Também é interessante frisar que a largura de banda fica limitada pelo longo tempo de trânsito, devido ao comprimento da camada intrínseca [11].

O fotodiodo tipo avalanche (**APD**, *Avalanche Photodiode*) difere do p-i-n na adição de uma camada onde pares elétron-buraco são multiplicados por meio do processo de ionização por impacto [10-11]. Tal geração de pares provê um fator multiplicativo na responsividade, tornando o *APD* mais sensível do que o *pin* [9-11]. É importante mencionar que o processo de avalanche é intrinsecamente ruidoso [10].

1.5 – Regeneradores e amplificadores ópticos

Antes do aparecimento dos amplificadores ópticos, os regeneradores ópticos eram os únicos dispositivos que tinham a função de corrigir as degradações impostas ao sinal. Um regenerador funciona da seguinte forma: toma o sinal óptico a ser regenerado, converte em sinal elétrico, realiza a reformatação, a retemporização e a reamplificação, e então converte o sinal regenerado para o âmbito óptico, dando continuidade à transmissão do sinal. A capacidade de transmissão dos sistemas aumentou, e conseqüentemente a taxa de transmissão cresceu significativamente e os circuitos eletrônicos responsáveis pela

regeneração do sinal se tornaram caros e complexos. Com isso, surgiu a necessidade de que o processo de amplificação acontecesse no âmbito óptico demandando amplificadores totalmente ópticos (*ver capítulo 2*).

1.6 – Compensadores de dispersão

O uso de amplificadores ópticos em sistemas de longa distância estendeu o comprimento dos enlaces até o ponto onde a dispersão se tornou o fator limitante de desempenho. Para aumentar o alcance do enlace surgiu a necessidade de se construir elementos compensadores de dispersão. Além disso, a compensação de dispersão tem um papel fundamental no controle da degradação induzida por não-linearidades [18], pois a combinação de automodulação de fase (**SPM**, *Self Phase Modulation*) e dispersão cromática pode gerar distorções graves em sistemas de comunicação digital, levando à perda de informação.

Os componentes que podem compensar dispersão são: fibras compensadoras de dispersão, fibras com redes de difração de Bragg, compensadores de modo espacial de mais alta ordem ou por técnicas de inversão espectral [16].

Atualmente, as fibras compensadoras de dispersão constituem o método mais prático, especialmente quando o espectro para compensação requerido é largo. Para obtenção de dispersão negativa em fibra, deve-se aumentar a diferença entre os índices de refração do núcleo e da casca e/ou diminuir o diâmetro do núcleo [9, 16].

1.7 – Multiplexadores / Demultiplexadores ópticos

Para tornar a tecnologia WDM possível são necessários componentes que combinem sinais de várias fontes com comprimentos de onda diferentes em uma única fibra óptica (**MUX**, *Multiplexadores de comprimentos de onda*), bem como componentes que distribuam sinais provenientes de uma única fibra em várias saídas distintas de acordo com o comprimento de onda (**DEMUX**, *Demultiplexador de comprimentos de onda*) [16]. É importante que ambos apresentem baixas perdas de inserção e pequena interferência entre os canais envolvidos. Existem vários métodos para construção destes dispositivos, entre

eles: combinação de acopladores com grades de difração, matrizes de redes de guias de onda, filtros ópticos e divisores de potência com fibras ópticas.

A opção com menor perda de inserção consiste em filtros interferométricos dispostos em zigzag onde canais com pequena largura de linha podem ser adicionados ou retirados através de portas com lentes com variação de índice de refração gradual (**GRIN**, *Graded Refractive Index*) [16].

1.8 – Componentes para amplificadores ópticos

Além do meio ativo, que será explorado posteriormente no capítulo 2, existem componentes ópticos que constituem as peças fundamentais para o projeto e construção de amplificadores ópticos. Entre eles podem ser citados os acopladores direcionais, isoladores, circuladores ópticos e equalizadores.

1.8.1 – Acopladores direcionais

Os acopladores direcionais de comprimentos de ondas [7, 9, 16], também chamados comumente de *WDM*, permitem que feixes de luz com diferentes comprimentos de onda possam ser combinados com uma perda pequena. Os parâmetros mais importantes destes acopladores são a perda de inserção e a isolação entre as portas de saída. A perda de inserção é definida como a relação de potência emergindo da porta de saída e a potência presente em uma dada porta de entrada. Enquanto que a isolação é definida como a razão de potência óptica de um comprimento de onda fora da faixa de operação de uma certa porta em relação à potência de entrada neste comprimento de onda.

Estes dispositivos são tipicamente construídos por acopladores de fibras fundidas [9, 7] ou por filtros refletivos por interferência. Os dispositivos constituídos por fibras fundidas têm em geral menor perda de inserção, maior confiabilidade e custo mais baixo. Enquanto que os baseados em filtros interferométricos têm como vantagens principais maior banda passante, menor perda dependente da polarização e maior isolação entre os canais [16].

Divisores de potência são construídos da mesma forma com ajustes de projeto diferentes para que as curvas de transmissão de potência tenham períodos maiores.

1.8.2 – Isoladores

Reflexões na entrada e na saída dos amplificadores ópticos podem gerar oscilações laser, comprometendo o desempenho do amplificador. Estas reflexões podem ser geradas nos conectores, por espalhamento Rayleigh, ou por outras causas, podendo deteriorar o desempenho em ruído do amplificador. As reflexões de emissão espontânea amplificada (**ASE**, *Amplified Spontaneous Emission*) contrapropagante diminuem a inversão de população no início da fibra [7, 16]. Para evitar estes problemas são utilizados isoladores, que são componentes que permitem transmissão em uma direção, mas que bloqueiam a propagação no sentido contrário. Os parâmetros-chave que descrevem o desempenho dos isoladores são: perda de inserção, que consiste na perda quando o sinal é transmitido na direção direta, e isolação, que consiste na perda quando o sinal é transmitido na direção reversa. Um isolador típico é construído a partir do efeito de rotação de Faraday em conjunto com polarizadores [7]. Tipicamente a isolação é de 30 dB a 40 dB e a perda de inserção é de 0,3 dB a 0,5 dB.

1.8.3 – Circuladores ópticos

O circulador [7, 16] é um componente passivo não recíproco, ou seja, é um dispositivo cuja operação não é a mesma se a entrada for trocada pela saída. O circulador funciona tomando o feixe proveniente de uma porta conectada a uma fibra óptica roteando para outra. O funcionamento se dá da seguinte forma: o sinal proveniente da porta 1 é direcionado para a porta 2; o da porta 2 para a porta 3 e assim em diante, dependendo do número de portas do dispositivo. Esses dispositivos têm normalmente 3 ou 4 portas, mas podem ter até 10 portas. Existem circuladores de 3 portas mais simples e baratos que não permitem a passagem do sinal da porta 3 para a porta 1. A perda de inserção, definida como a perda do dispositivo no sentido de roteamento é tipicamente de 0,5 dB, enquanto que a isolação, definida como a perda do dispositivo no sentido inverso é tipicamente de 50 dB. Os circuladores são construídos com polarizadores e rotacionadores de Faraday [7].

1.8.4 – Equalizadores ópticos

Um dos principais requisitos para a utilização de amplificadores ópticos em redes ópticas com tecnologia WDM é que o ganho e a figura de ruído devem ser aproximadamente o mesmo para cada um dos canais de transmissão [11-12, 19-20]. Quando os canais não são submetidos ao mesmo ganho e figura de ruído, uma diferença na relação sinal ruído destes canais (**SNR**, *Signal to Noise Ratio*) é gerada, tornando diferente a taxa de erro por bit (**BER**, *Bit Error Rate*) de cada canal [9]. Existem várias formas para tornar o ganho de um amplificador óptico plano sobre toda a faixa de comprimentos de onda de transmissão necessária. As duas mais importantes estão descritas a seguir. Ambas consistem na inserção de perdas dependentes do comprimento de onda.

Quando a luz se propaga através de uma fibra óptica com uma modulação espacial periódica no índice de refração, sob certas condições, pode haver um acoplamento com o modo de mesma constante de propagação, porém com direção contrária [9]. Isso acontece sob a condição de Bragg. Tal condição é satisfeita quando a diferença entre as constantes de propagação dos modos a serem acoplados é igual à frequência espacial da rede, formando assim as fibras com redes de Bragg (**FBG**, *Fiber Bragg Gratings*). As FBGs podem ser aplicadas com o auxílio de um circulador para equalização de ganho. Cada rede de Bragg é responsável pelo controle de um comprimento de onda [21].

Também é possível utilizar fibras com modulação no índice de refração de longo período (**LPG**, *Long Period Gratings*) para equalização de ganho em amplificadores e outras aplicações [22-24]. O que ocorre é o acoplamento de luz do modo fundamental guiado (LP01) em modos que se propagam na casca da fibra. Esses modos têm uma perda associada muito alta devido às perdas por espalhamento na interface casca-ar, curvaturas na fibra e outras perturbações. Essas redes têm uma grande variedade de aplicações por conta de sua grande capacidade de selecionar o espectro de perdas e apresentar uma banda relativamente larga. É possível controlar o pico de perda da rede e seu comprimento de onda central no processo de fabricação [22].

1.9 – Estrutura da tese

Esta tese versa sobre a pesquisa e desenvolvimento de métodos e técnicas para construção de amplificadores ópticos que possibilitem a expansão da capacidade de transmissão em sistemas ópticos utilizando tecnologia de multiplexação por divisão de comprimento de onda.

No Capítulo 2 serão abordados os conceitos básicos e parâmetros-chave para os vários tipos de amplificadores ópticos. No Capítulo 3 será realizada uma exploração mais ampla do TDFA, abordando aspectos teóricos e apresentando os resultados mais importantes descritos na literatura referente ao assunto. No Capítulo 4 será descrito o novo esquema de bombeamento para TDFA (800 nm + 1050 nm) com alta eficiência de conversão de potência proposto. Também serão apresentados resultados relevantes de medição de ganho distribuído em fibras dopadas com Túlio utilizando reflectometria óptica no domínio da frequência. O trabalho documentado no capítulo 4 foi realizado em conjunto por um grupo de pesquisadores do Departamento de Eletrônica e Sistemas da Universidade Federal de Pernambuco (Carmelo J. A. Bastos Filho e Prof. Joaquim F. Martins Filho), do Departamento de Física da Universidade Federal de Pernambuco (Prof. Anderson S. L. Gomes, Prof. Michael L. Sundheimer e Mariana T. Carvalho) e por Walter Margulis da ACREO (Suécia). No Capítulo 5, amplificadores de alto ganho de pequenos sinais são propostos utilizando a técnica de dupla passagem do sinal pelo meio ativo (amplificadores reflexivos), trabalho este realizado por Carmelo J. A. Bastos Filho, Prof. Joaquim F. Martins Filho e Prof. Anderson S. L. Gomes. No capítulo 6 serão apresentados resultados inéditos de medição da dependência espectral do efeito de saturação cruzada de ganho em TDFA. Estas medidas foram realizadas no Departamento de Física da Universidade Federal de Pernambuco. No capítulo 7 são abordadas técnicas de travamento de ganho óptico para utilização de amplificadores em redes transparentes. São discutidos os efeitos do sentido do bombeamento e do laser de travamento para diferentes configurações. Os experimentos com travamento de ganho foram realizados no Laboratório de Redes Ópticas DWDM do Grupo de Fotônica do Departamento de Eletrônica e Sistemas da Universidade Federal de Pernambuco. Configurações diversas de amplificadores híbridos (FRA + TDFA) são apresentadas no capítulo 8, inclusive uma solução inédita com um único bombeamento em 1426 nm. Os resultados pertinentes ao capítulo 8 foram obtidos por um grupo de pesquisadores do Departamento de Eletrônica e Sistemas da Universidade

Federal de Pernambuco (Carmelo J. A. Bastos Filho e Prof. Joaquim F. Martins Filho), e do Departamento de Física da Universidade Federal de Pernambuco (Prof. Anderson S. L. Gomes, Stefan Lüthi e Marcia B. Costa e Silva).

Na figura 1.1 está mostrada uma foto do laboratório de Redes Ópticas do Grupo de Fotônica do Departamento de Eletrônica e Sistemas da Universidade Federal de Pernambuco, onde os resultados apresentados no capítulo 7 foram obtidos. Na figura 1.2 está mostrada uma foto do Laboratório de Fotônica e Optoeletrônica do Departamento de Física da Universidade Federal de Pernambuco, onde foram obtidos os resultados apresentados no capítulo 4, 5, 6 e 8.



Figura 1.1 – Foto do Laboratório de Redes Ópticas do Grupo de Fotônica do Departamento de Eletrônica e Sistemas da Universidade Federal de Pernambuco.



Figura 1.2 – Foto do Laboratório de Fotônica e Optoeletrônica do Departamento de Física da Universidade Federal de Pernambuco.

1.10 – Referências bibliográficas

- [1] B. Mukherjee, “WDM Optical Communication Networks: Progress and Challenges”, *IEEE Journal on selected areas in communications*, vol. 18, n. 10, 2000. pp. 1810-1824.
- [2] J. Hecht, “S-band Amplification: Challenges Developers”, *Laser Focus World*, pp. 79-84, Jul., 2002.
- [3] M. A. Arbore, Y. Zhou, G. Keaton, and T. Kane, “36dB gain in S-band EDFA with Distributed ASE Suppression”, *In Postdeadline Papers of Optical Amplifiers and Their Applications 2002*, PD4, Vancouver, Canadá, 2002.
- [4] K. Fukuchi, T. Kasamatsu, M. Morie, R. Ohhira, T. Ito, K. Sekiya, D. Ogasahara, and T. Ono, “10.92Tb/s (273 x 40Gb/s) triple-band/ultra-dense WDM optical-repeated transmission experiment”, *In Postdeadline Papers of Optical Fiber Communication Conference and Exhibit 2001*, PD24, Anaheim, EUA, 2001.
- [5] L. Kazovsky, S. Benedetto, and A. Willner, *Optical Fiber Communication Systems*, Artech House, 1996.
- [6] H. G. Weber, R. Ludwig, C. Schimidt, C. Schubert, J. Berger, E. Hilliger, M. Kroh, V. Marembert, C. Boerner, S. Ferber, and H. J. Ehrke, “160Gbit/s TDM-Transmission Technology”, *In Technical Digest of 28th European Conference on Optical Communications*, vol. 1, Copenhagen, Dinamarca, 2002.
- [7] R. Ramaswami, and K. N. Sivarajan, *Optical Networks – A practical perspective*, 2.ed., San Diego: Morgan Kaufmann Publishers, 2002.
- [8] M. Pióro, and D. Medhi, *Routing, Flow, and Capacity Design in Communication and Computer Networks*, Elsevier, 2004.
- [9] A. Ghatak, and K. Thygarajan, *Introduction to Fiber Optics*, Cambridge: University Press, 1998.
- [10] J. Singh, *Semiconductor Optoelectronics: Physics and Technologies*, McGraw-Hill International Editors, 1995.
- [11] G. P. Agrawal, *Fiber Optics Communication Systems*, 2.ed. New York: John Wiley & sons, 1994.
- [12] E. Desurvire, *Erbium Doped Fiber Amplifiers, Principles and Applications*. New York: John Wiley & sons, 1994.
- [13] A. Yariv, *Optical Electronics in Modern Communications*, 5a. Edição, Oxford University Press, 1997.

- [14] M. Young, *Óptica e Lasers*, Editora da Universidade de São Paulo: São Paulo, 1998.
- [15] A. H. Cherin, *An Introduction to Optical Fibers*, McGraw-Hill Publishing Company, 1983.
- [16] P. C. Becker, N. A. Olsson, and J. R. Simpson, *Erbium-doped fiber amplifiers – Fundamentals and Technologies*, Academic Press, 1999.
- [17] A. Ayer, J. Damask, G. Gray and P. Leo, “Mapping PMD Quantifies System Performance”, *WDM Solutions*, pp. 31-36, Abr., 2002.
- [18] G. P. Agrawal, *Nonlinear Fiber Optics*, 2^a. Edição, New York: Academic Press, 1995.
- [19] H. A. Haus, “The Proper Definition of Noise Figure of Optical Amplifiers”, *In OSA Tops – Optical Amplifiers and their Applications 2001*, vol. 44, pp. 3-17, 2001.
- [20] D. M. Baney, P. Gallion, and R. S. Tucker, “Theory and Measurement Techniques for the Noise Figure of Optical Amplifiers”, *Optical Fiber Technologies*, vol. 6, pp. 122-154, 2000.
- [21] S.-K. Liaw, K.-P. Ho, and S. Chi, “Dynamic Power-Equalized EDFA Module Based on Strain Tunable Fiber Bragg Gratings”, *IEEE Photon. Technol. Lett.*, vol. 11, no.7, pp.797-799, 1999.
- [22] A. M. Vengsarkar, P. J. Lemaire, J. B. Judkins, V. Bhatia, T. Erdogan, and J. E. Sipe, “Long-Period Fiber Gratings as Band-Rejection Filters”, *IEEE J. Lightwave technol.*, vol. 14, no.1, pp. 58-65, 1996.
- [23] P. F. Wysocki, J. B. Judkins, R. P. Espindola, M. Andrejco, and A. M. Vengsarkar, “Broad-Band Erbium-Doped Fiber Amplifier Flattened Beyond 40nm Using Long-Period Grating Filter”, *IEEE Photon. Technol. Lett.*, vol. 9, no.10, pp.1343-1345, 1997.
- [24] A. M. Vengsarkar, “Long period fiber gratings”, *In technical Digest of Optical Fiber Communication Conference and Exhibit 1996*, pp.269-270, Anaheim, EUA, 1996.
- [25] A. E. Siegman, *Lasers*, 1^a. Edição, University Science, 1986.

Capítulo 2 – Amplificadores Ópticos para Comunicações

A principal penalidade responsável pela determinação do alcance máximo de transmissão de um sistema de comunicações por fibra óptica é a atenuação sofrida pelo sinal. Para compensar as perdas impostas pelo meio de transmissão, e assim aumentar o alcance, são utilizados dispositivos capazes de recondicionar o sinal. Existem duas soluções para esse problema: uso de regeneradores optoeletrônicos ou amplificadores ópticos.

Enquanto que os regeneradores optoeletrônicos utilizam conversão óptica/elétrica/óptica, onde o tratamento do sinal é realizado eletronicamente, os amplificadores ópticos executam todo esse processo no domínio óptico. A grande vantagem na utilização de amplificadores ópticos é que estes são indiferentes ao formato da informação e à taxa de transmissão. Outro aspecto importante é que no caso de uma expansão do sistema, muitas vezes não é necessária a troca dos amplificadores contidos no sistema.

A amplificação óptica é baseada no processo de emissão estimulada entre dois níveis de energia que mantêm inversão de população. Nesse processo, novos fótons são gerados com mesma energia, fase, direção e polarização dos fótons incidentes na entrada do dispositivo. Tais amplificadores utilizam o mesmo mecanismo dos lasers, contudo a realimentação capaz de criar a cavidade ressonante é suprimida [2,3]. O elemento que realiza ganho no amplificador é o meio ativo, enquanto que o bombeamento é o responsável por manter a inversão de população entre os níveis de energia envolvidos no processo de amplificação.

2.1 – Modelagem teórica de ganho em amplificadores ópticos

Normalmente o ganho óptico depende do comprimento de onda do sinal incidente, das intensidades do sinal e do bombeamento, comprimento de onda do bombeamento (no caso de bombeamento óptico), vidro hospedeiro (no caso de amplificadores a fibra), além de outros parâmetros. O ganho do meio pode ser modelado, em primeira aproximação, por um sistema com dois níveis de energia alargados homoganeamente, cuja descrição é dada aproximadamente pela função lorentziana [4]:

$$g(\omega) = \frac{g_0}{1 + (\omega - \omega_0)^2 T_2^2 + \frac{P}{P_{sat}}}, \quad (2.1)$$

onde g_0 é o valor máximo de ganho, determinado pela intensidade de bombeamento, ω é a frequência óptica do sinal incidente, ω_0 é a frequência da transição atômica, P é a potência óptica do sinal a ser amplificado. O parâmetro P_{sat} é a potência de saturação para o sinal, que depende de parâmetros do meio gerador de ganho, como tempo de fluorescência e seção de choque da transição. O parâmetro T_2 é conhecido como tempo de relaxação de dipolo e é tipicamente muito pequeno (0,1 ps a 1 ns) [4].

Para o caso em que a potência de sinal é muito menor que a potência de saturação, tem-se:

$$g(\omega) = \frac{g_0}{1 + (\omega - \omega_0)^2 T_2^2}. \quad (2.2)$$

A equação 2.2 mostra que o ganho máximo ocorre quando a frequência do sinal coincide com a frequência de transição atômica.

Considerando a frequência do sinal exatamente sintonizada na frequência de transição atômica, tem-se a partir de (2.1):

$$g = \frac{g_0}{\left(1 + \frac{P}{P_{sat}}\right)}, \quad (2.3)$$

mostrando claramente que, para um dado bombeamento, o ganho do amplificador diminui com o aumento da potência óptica do sinal na entrada do amplificador. Este efeito advém da diminuição do nível de inversão de população à medida que o sinal aumenta.

É importante salientar que para amplificar sinais em diferentes comprimentos de onda simultaneamente, o efeito de saturação do ganho para um dado canal em um certo comprimento de onda é determinado pela potência contida em todos os canais. Isso causa efeitos de saturação cruzada (*ver capítulo 6*), indesejável em amplificadores de sistemas de comunicações ópticas. Todavia tal efeito pode ter aplicações bastante interessantes, como conversão de comprimento de onda.

2.2 – Modelagem teórica de figura de ruído de amplificadores ópticos

A figura de ruído é um parâmetro utilizado para quantificar a degradação da qualidade do sinal devido à inserção de ruído pelo amplificador. As principais fontes de ruído de um amplificador óptico são as seguintes [5]: Batimento Sinal-Espontâneo (**sig-sp**, *Signal-Spontaneous*), que é originado da mistura da luz coerente do sinal com a luz incoerente da emissão espontânea amplificada (**ASE**, *Amplified Spontaneous Emission*), quando estes têm a mesma polarização; batimento Espontâneo-Espontâneo (**sp-sp**, *Spontaneous-Spontaneous*), que é o batimento de componentes copolarizadas de ASE; interferência de múltiplos caminhos (**MPI**, *Multipath Interference*), que aparece devido às flutuações de fase e frequência do sinal refletido em vários pontos dentro do amplificador; e ruído balístico (**sh**, *Shot Noise*), devido à natureza quantizada dos fótons. Em amplificadores com alto ganho, os espalhamentos estimulados Raman (**SRS**, *Stimulated Raman Scattering*) e Brillouin (**SBS**, *Stimulated Brillouin Scattering*) podem contribuir de forma significativa na adição de ruído.

De acordo com a definição clássica, adotada pela ITU-T (*International Telecommunication Union*), utilizada em equipamentos de teste, a figura de ruído é definida por [5]:

$$NF = 10 \log \left[\frac{SNR_{entrada}}{SNR_{saida}} \right], \quad (2.4)$$

onde $SNR_{entrada,saída}$ são as relações entre sinal e ruído (**SNR**, *Signal to Noise Ratio*) na entrada e na saída do amplificador, respectivamente.

Definindo essas relações em termos de parâmetros envolvendo fotocorrentes em um fotodetector, tem-se:

$$SNR = \frac{\langle i_{Sinal} \rangle^2}{\langle \Delta i_{ruído}^2 \rangle}, \quad (2.5)$$

onde, $\langle i_{Sinal} \rangle = \mathfrak{R}P$ é a média da fotocorrente gerada e $\langle \Delta i_{ruído}^2 \rangle = \mathfrak{R}^2 \int_{B_0} S_{ruído}(f) df$ é a variância do ruído, \mathfrak{R} é a responsividade do fotodetector, B_0 é a largura de banda do canal e $S_{ruído}(f)$ é a densidade espectral de potência de ruído.

Dessa forma pode-se escrever a SNR na entrada e na saída da seguinte forma:

$$SNR_{entrada} = \frac{\langle i_{entrada} \rangle^2}{\langle \Delta i_{ruído,ent}^2 \rangle} = \frac{\mathfrak{R}^2 P_{entrada}^2}{2q\mathfrak{R}P_{entrada}B_0} = \frac{\eta P_{entrada}}{2h\nu B_0}, \quad (2.6)$$

$$SNR_{saída} = \frac{\langle i_{saída} \rangle^2}{\langle \Delta i_{ruído,saída}^2 \rangle} = \frac{G^2 \mathfrak{R}^2 P_{entrada}^2}{B_0 \mathfrak{R}^2 \int_{B_0} (S_{sig,sp} + S_{sp,sp} + S_{MPI} + S_{Rayleigh} + \dots + \eta^{-1} S_{shot}) df}. \quad (2.7)$$

onde G é o fator de ganho do amplificador, q é a carga fundamental do elétron e η é a eficiência quântica do fotodetector. O parâmetro $S_{sig,sp}$ é a densidade espectral de potência do batimento Sinal-Espontâneo, $S_{sp,sp}$ é a densidade espectral de potência do batimento Espontâneo-Espontâneo, S_{MPI} é a densidade espectral de potência da interferência de múltiplos caminhos (**MPI**, *Multipath Interference*), $S_{Rayleigh}$ é a densidade espectral de potência por espalhamento Rayleigh e S_{shot} é a densidade espectral de potência de ruído de disparo.

Agrupando todos os ruídos de excesso e definindo uma densidade espectral de ruído de excesso, tem-se:

$$S_e = S_{sig,sp} + S_{sp,sp} + S_{MPI} + S_{Rayleigh} + \dots, \quad (2.8)$$

Com isso pode-se obter:

$$F = \frac{SNR_{entrada}}{SNR_{saída}} = \frac{\eta S_e}{2h\nu G^2 P_{entrada}} + \frac{S_{shot}}{2h\nu G^2 P_{entrada}}, \quad (2.9)$$

onde F é chamado de fator de ruído.

Considerando o batimento sinal-espontâneo como o ruído de excesso mais importante, as densidades de potência de ruído de excesso e balístico são dadas por [5]:

$$S_e \sim S_{sig.sp} = 4\rho_{ASE} GP_{entrada} \quad (2.10)$$

$$S_{shot} = 2h\nu GP_{entrada} \quad (2.11)$$

onde ρ_{ASE} é a densidade espectral de emissão espontânea amplificada.

Substituindo (2.10) e (2.11) em (2.9), obtém-se:

$$F = \frac{2\rho_{ASE}}{h\nu G} + \frac{1}{G} \quad (2.12)$$

Outra forma de abordar a figura de ruído a partir da definição clássica, proposta por H. Friis do Laboratório Bell (EUA) em 1944 [5], considera que o amplificador adiciona uma potência de ruído independente do sinal (perfeito para o caso, onde a emissão espontânea amplificada é a fonte de ruído e, *a priori*, independente da potência do sinal para situação sem depleção de bombeamento). Considerando nestes termos pode-se escrever o fator de ruído como:

$$F = \frac{\left(\frac{S_i}{N_i}\right)}{\left(\frac{G.S_i}{G.N_i + N_a}\right)} = \frac{G.N_i + N_a}{G.N_i} = 1 + \frac{N_a}{G.N_i} \quad (2.13)$$

onde S_i é a potência de sinal na entrada, N_i é a potência de ruído na entrada e N_a é a potência de ruído adicionado pelo amplificador.

Existem modelagens mais modernas tratando a luz de forma quantizada [6-9] e atribuindo distribuições probabilísticas diversas às fontes de ruído. Nessas formulações, o ruído gerado pelo amplificador é modelado como uma distribuição de Bose-Einstein, em que os fótons de sinal apresentam uma distribuição de Poisson e a média de fótons na saída é uma função dos polinômios de Laguerre.

A figura de ruído é influenciada de forma dominante pelo fator de inversão de população n_{sp} , que representa a relação entre as taxas de emissão espontânea e estimulada. O fator de inversão de população é definido como [23]:

$$n_{sp} = \frac{N_2}{N_2 - N_1}, \quad (2.14)$$

onde N_2 é a densidade eletrônica no estado excitado e N_1 é a densidade eletrônica no estado fundamental. É importante frisar que este fator, quando existe inversão de população, somente assume valores maiores do que 1. Com alto fator de inversão de população uma menor figura de ruído é obtida [10].

O fator de ruído está relacionado com o fator de inversão de população por [7]

$$n_{sp} = \frac{F - 1}{1 - \frac{1}{G}}. \quad (2.15)$$

No caso limite, quando se tem alta inversão de população ($n_{sp} = 1$) e alto ganho ($G \gg 1$), o fator de ruído assume o valor 2, o que resulta em uma figura de ruído mínima igual a 3 dB.

2.3 – Aplicações

Dependendo da necessidade, os amplificadores ópticos podem ser empregados de várias formas em projetos de sistemas de comunicações por fibra óptica. Existem várias aplicações como [10-12]: amplificador de linha, amplificador de potência, pré-amplificador e amplificador de distribuição.

Uma importante aplicação é como amplificador de linha em sistemas de longa distância, onde os amplificadores colocados ao longo do sistema são responsáveis pela compensação da potência perdida pelo sinal durante a propagação. Neste tipo de amplificador é importante manter a equalização entre os canais, pois em longos enlaces, vários destes amplificadores podem ser colocados em série, valorizando diferenças na resposta espectral. Também é importante que estes apresentem figura de ruído baixa, para que o sinal não perca a inteligibilidade através da degradação da SNR, e constante, para conservar a taxa de erro por bit dos canais em um mesmo patamar.

Outra forma de utilização é como amplificador de potência, para aumentar a potência transmitida e possibilitar a chegada do sinal aos amplificadores de linha com qualidade aceitável. Pode-se obter um aumento significativo do alcance do sistema através do uso de um amplificador de potência (até 100 km) [4]. Também pode ser aplicado em redes metropolitanas para compensar perdas geradas pelos elementos de redes ópticas.

Pode-se melhorar bastante a sensibilidade do receptor através do emprego de um pré-amplificador. É necessário que a figura de ruído seja baixa, pois o sinal chega ao receptor bastante atenuado.

Já os amplificadores de distribuição têm papel fundamental em aplicações onde é necessária a transmissão de sinais para um grande número de clientes, como em redes de TV a cabo.

2.4 – Tipos de amplificadores ópticos

Existem vários tipos de amplificadores ópticos que são descritos ao longo desta seção. Entre eles: amplificadores ópticos de semicondutor (**SOA**, *Semiconductor Optical Amplifiers*) [2-4,12-14], amplificadores Raman a fibra (**FRA**, *Fiber Raman Amplifiers*) [4, 12-16], amplificadores ópticos paramétricos (**OPA**, *Optical Parametric Amplifiers*) [18, 19], amplificadores ópticos a fibra dopada com Érbio (**EDFA**, *Erbium Doped Fiber Amplifiers*) [1,4,10,12,13,15,22-25], amplificadores ópticos a fibra dopada com Praseodímio (**PDFA**, *Praseodimium Doped Fiber Amplifiers*) [13,23], amplificadores ópticos a fibra dopada com Neodímio (**NDFA**, *Neodimium Doped Fiber Amplifiers*) [23,27-29] e os amplificadores ópticos a fibras dopadas com Túlio (**TDFa**, *Thulium Doped Fiber Amplifiers*) [30-32].

2.4.1 – Amplificadores ópticos de semicondutor

Os amplificadores ópticos de semicondutor (**SOA**, *Semiconductor Optical Amplifiers*) funcionam baseados no conceito de que se pode alterar a intensidade de uma onda em um meio semicondutor ativo, de acordo com as perdas do meio ou devido à injeção de portadores no mesmo para obtenção de ganho. A atenuação é devida à absorção de fótons, fazendo com que um elétron transite da banda de valência para a banda de

condução. A amplificação ocorre quando, através da injeção de portadores é causada uma situação de inversão de população entre a banda de valência e a banda de condução com diferença de energias (GAP) ligeiramente menor do que a energia dos fótons que compõem a onda propagante. Na verdade, um SOA é um laser de diodo sem realimentação. A estrutura é polarizada diretamente abaixo do limiar laser. Quando um sinal entra no meio gerador de ganho, a presença de fótons causa emissão estimulada, então um sinal amplificado e coerente emerge na outra extremidade.

Existem duas formas de operação de um SOA. Como Amplificador de Onda Viajante (TWA) ou Amplificador Fabry-Perot. No modo de operação TWA, o sinal atravessa uma única vez o dispositivo sendo amplificado durante esta passagem. Este modo de operação é particularmente interessante para aplicações de alta velocidade, onde pulsos com largura menor que 1 ps podem ser amplificados. Já em uma cavidade Fabry-Perot, o sinal percorre múltiplos caminhos por causa da reflexão nos semi-espelhos nas extremidades do dispositivo [3]. Para que o SOA opere como um TWA, deve-se diminuir a refletividade das faces. O primeiro passo para isto, consiste em depositar camadas anti-refletoras nas duas interfaces. Além disso, pode-se 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 defocalizado antes de chegar à interface semiconductor-ar. A luz refletida diverge mais e não consegue ser acoplada satisfatoriamente na região ativa, cuja espessura é bastante delgada.

Uma característica indesejável do amplificador é a sensibilidade à polarização, ou seja, o ganho do amplificador é diferente para os modos transversais elétricos (TE) e para os modos transversais magnéticos (TM). Tal discrepância entre os modos tipicamente pode alcançar valores entre 5 dB e 8 dB, ocorrendo por causa da diferença entre os fatores de confinamento e os ganhos diferenciais entre as polarizações. Alguns esquemas foram desenvolvidos para reduzir a sensibilidade à polarização.

Numa primeira elaboração, os amplificadores foram projetados de forma que a largura e espessura da região ativa fossem comparáveis. Com esta técnica conseguiu-se que a diferença de ganho entre os modos TE e TM ficasse menor que 1,3 dB [13]. Outra forma de diminuir esta diferença foi confeccionar uma estrutura com uma maior cavidade óptica, tornando a diferença de ganho menor do que 1 dB [13].

2.4.2 – Amplificadores ópticos paramétricos

Os amplificadores ópticos paramétricos [18,19] são dispositivos baseados na dependência não linear do índice de refração da sílica com a intensidade do feixe propagante. Com estes, é possível a geração de frequências mais altas (*up conversion*), através da geração de fótons anti-Stokes, ou de frequências mais baixas (*down conversion*), através da geração de fótons Stokes.

Para um meio não linear de natureza amorfa a polarização não linear induzida é dada por:

$$\vec{P}_{NL}(r;t) = \epsilon_0 \chi^{(3)} : \vec{E}(r;t) \vec{E}(r;t) \vec{E}(r;t), \quad (2.16)$$

onde o $\chi^{(3)}$ é a susceptibilidade elétrica de terceira ordem com sua parte real relacionada ao ganho paramétrico e a parte imaginária ligada à efeitos Raman. A operação matemática envolvida em (2.16) é um produto tensorial [18].

A mistura de quatro ondas (**FWM**, *Four Wave Mixing*) é um fenômeno que tem dependência direta com $\chi^{(3)}$, onde novas frequências são criadas combinando as frequências dos feixes incidentes. Existem dois tipos de componentes geradas pela mistura de quatro ondas. No primeiro caso, tem-se a transferência de energia de três fótons para um único fóton, com frequência $\omega_4 = \omega_1 + \omega_2 - \omega_3$, responsável pela conversão de frequência. No segundo caso, a energia de dois fótons, de frequências ω_1 e ω_2 , é transferida para dois outros fótons, de frequências ω_3 e ω_4 . Como o processo é paramétrico, este deve ocorrer de tal forma que $\omega_1 + \omega_2 = \omega_3 + \omega_4$. Para o FWM se tornar um processo eficiente, deve-se ter casamento de fase, que no caso da transferência de energia de dois fótons para outros dois fótons, deve obedecer a seguinte equação [18-19]:

$$\Delta k = k_3 + k_4 - k_1 - k_2 = \frac{(\omega_3 n_3 + \omega_4 n_4 - \omega_1 n_1 - \omega_2 n_2)}{c} = 0, \quad (2.17)$$

onde k representa o número de onda, n o índice de refração de cada feixe e c é a velocidade da luz.

Para o caso degenerado, onde $\omega_1 = \omega_2$, é relativamente fácil a obtenção da condição de casamento de fase. Com a aplicação de um bombeamento intenso, são criadas duas bandas laterais alocadas simetricamente em relação à frequência do laser de bombeamento, uma chamada de banda de sinal e a outra chamada de banda ociosa (*Idler*). Com a incidência de um sinal pouco intenso, através do processo mostrado na figura 2.1, absorvendo dois fótons de bombeamento pode-se obter ganho com a simultânea geração de outro fóton na banda ociosa. Este ganho é chamado de ganho paramétrico.

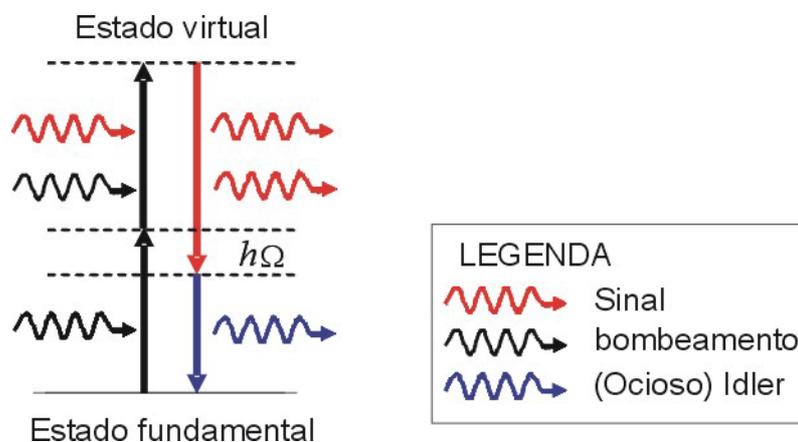


Figura 2.1 – Diagrama de energia ilustrando o processo de amplificação paramétrica.

Para o caso prático da construção de um OPA, as fibras devem apresentar comprimento menor que o comprimento de coerência $\left(L_c = \frac{2\pi}{\Delta k} \right)$ [18,19], onde Δk é o máximo descasamento de fase tolerado. Isto ocorre porque em fibras muito longas, a manutenção do casamento de fase é difícil devido às variações do diâmetro do núcleo. E também por causa da influência do espalhamento Raman estimulado, que compete com o processo de amplificação paramétrica.

É importante frisar que o deslocamento do máximo de amplificação, bem como a largura da banda de amplificação, são altamente dependentes da intensidade do feixe de bombeamento. Outro aspecto importante é que estes amplificadores, apesar da capacidade de geração de uma banda de amplificação larga (maior que 100 nm) [20], utilizam potências de bombeamento muito altas (tipicamente maiores que 1 W) [20].

Para diminuir a potência de bombeamento necessária para gerar ganho compatível com as necessidades práticas de sistemas de comunicações ópticas, pode-se usar fibras

com maior coeficiente de não linearidade, como *holey fibers* que são formadas pela inserção de microestruturas internas periódicas [21].

2.4.3 – Amplificadores Raman a fibra

O princípio básico de amplificação consiste na utilização do espalhamento Raman estimulado (**SRS**, *Stimulated Raman Scattering*) em fibras ópticas [18], como mecanismo de interação da luz com modos vibracionais do material. Nesse processo, durante a propagação de um feixe de bombeamento intenso, ocorre transferência de energia do bombeamento para o sinal, envolvendo a emissão de fônons ópticos.

O SRS foi observado pela primeira vez por Ippen e colaboradores em 1970. Neste experimento, foi utilizada uma fibra de núcleo líquido com seção de choque de espalhamento espontâneo Raman (σ) alta. A primeira demonstração de efeito Raman estimulado em fibras de vidro foi realizada por Stolen e colaboradores em 1971, utilizando uma fibra monomodo fabricada pela *Corning Glass Works*.

A diferença entre o SRS e a emissão estimulada recai em um aspecto fundamental. Na emissão estimulada, um fóton incidente é capaz de gerar outro fóton com mesma energia, enquanto que para o espalhamento Raman estimulado os fótons incidentes podem gerar um fóton com energia reduzida e emitir um fônon óptico que é absorvido por um estado vibracional do meio (*ver figura 2.2*).

À medida que o sinal propaga no meio, ele é amplificado devido à transição eletrônica entre o estado fundamental e um dos estados vibracionais por meio de um estado virtual. Pode ocorrer a emissão de dois ou mais fônons ópticos para apenas um fóton de bombeamento absorvido. As diferenças de energia entre o estado virtual e o estado que o elétron vai decair, emitindo um certo número de fônons ópticos, vão determinar as frequências de Stokes [13].

Comparados com líquidos e cristais, os vidros têm seção de choque de espalhamento Raman menor [18]. Com isto, a diminuição da área efetiva do modo de propagação do bombeamento é essencial para aumentar o ganho do amplificador (*ver equação 2.21*). Vários materiais foram estudados visando descobrir uma opção com maior ganho Raman para construção de fibras ópticas, entre eles: vidros compostos de um único material, vidros de sílica dopados e vidros compostos de vários componentes, incluindo vidros dopados com óxidos de metais pesados. Fibras com baixas perdas fabricadas a partir desses

vidros dopados com óxidos de metais pesados eram praticamente não-realizáveis, apesar do alto valor da seção choque de espalhamento Raman.

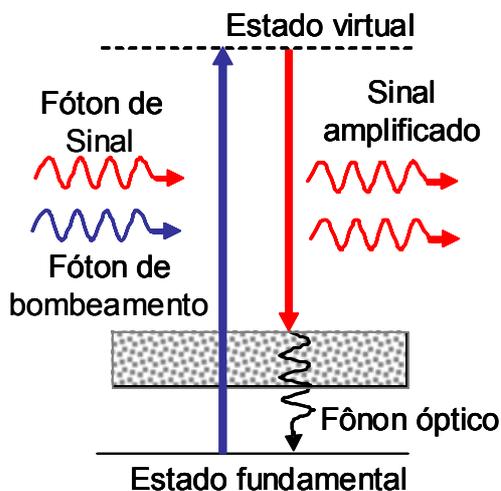


Figura 2.2 – Diagrama de energia ilustrando o processo de amplificação Raman.

Por causa da natureza amorfa dos vidros que compõem as fibras ópticas, os níveis vibracionais se distribuem quase continuamente, gerando uma faixa de ganho homogêneo. Em fibras de sílica, devido ao grande número de estados vibracionais, a frequência angular do sinal (ω_s) pode diferir bastante da frequência angular do bombeamento (ω_p), propiciando um largo espectro de amplificação [13].

A seção de choque de espalhamento espontâneo Raman (σ) é a principal característica de um meio gerador de ganho Raman. A definição de σ decorre de uma equação do número de quanta espalhados espontaneamente (N_S) por comprimento de material (dz) por ângulo sólido ($d\Omega$), que para uma polarização é descrita da seguinte forma:

$$dN_S = N_a N_L \left(\frac{\partial \sigma}{\partial \Omega} \right) d\Omega dz, \quad (2.18)$$

onde N_a é o número de moléculas por unidade do volume no estado fundamental de energia e N_L é o número de fótons do laser incidente.

O espalhamento Raman estimulado é caracterizado pela seguinte equação diferencial que descreve a propagação da onda Stokes:

$$\frac{dN_S}{dz} = g_R N_S, \quad (2.19)$$

onde g_R é o coeficiente de ganho Raman, dado por:

$$g_R(\text{cm}^{-1}) = (N_a - N_b) \left(\frac{\partial \sigma}{\partial \Omega} \right) \frac{c^3 n_L^2 |E_L|^2}{4\pi v_S^2 n_S^3 \Gamma_{ab}}, \quad (2.20)$$

onde E_L é a amplitude do campo elétrico da onda de luz do laser de bombeamento, N_b é o número de moléculas por unidade do volume no estado virtual de energia, n_L e n_S são os índices de refração do meio para as frequências do bombeamento e da componente *Stokes*, respectivamente, e Γ_{ab} é a largura da linha *Stokes*.

A resposta de ganho de um amplificador utilizando espalhamento Raman estimulado pode ser aproximada pela seguinte fórmula:

$$g(\omega) = g_R \cdot \left(\frac{P_p}{A_p} \right), \quad (2.21)$$

onde o coeficiente de ganho Raman (g_R) varia de forma inversamente proporcional com o comprimento de onda de bombeamento, P_p é a potência de bombeamento e A_p é a área de seção de choque para o bombeamento na fibra.

Para aplicações utilizando o efeito Raman em fibras ópticas os parâmetros mais relevantes são: o deslocamento de frequência e a largura do ganho Raman, a área efetiva do modo para o bombeamento, o coeficiente de atenuação para o bombeamento e sinal, o limiar de potência que a fibra e emendas podem suportar e a compatibilidade com outros elementos de sistemas de comunicações ópticas.

Para a otimização da performance, a diferença entre a frequência do bombeamento e a frequência do sinal deve corresponder ao pico da curva que determina o ganho em função desta diferença de frequência. Para fibras de sílica, conforme ilustrado na figura 2.3, a diferença deve ser de aproximadamente 13 THz, que corresponde a aproximadamente 100 nm para comprimentos de onda em torno de 1550 nm [4, 16, 18]. Fibras compensadoras de dispersão (**DCF**, *Dispersion Compensating fibers*) são utilizadas por apresentar núcleo menor, aumentando o ganho Raman 5 a 10 vezes em relação às fibras padrão monomodo com perfil de índice de refração tipo degrau [18].

Exceto para os picos de absorção de hidroxilila na sílica, pode-se obter amplificação Raman para qualquer comprimento de onda entre 300 nm e 2000 nm [12]. Utilizando

vários bombeamentos é possível a geração de espectro de amplificação bastante largo e com poucas variações de amplitude. Em aplicações de banda larga, o espaçamento típico entre os bombeamentos varia entre 20 nm e 30 nm, dependendo da uniformidade de ganho requerida [16]. O perfil de ganho Raman da sílica se concentra em comprimentos de onda maiores, porém outros materiais têm espectros Raman variados, propiciando a possibilidade de equalização e expansão da banda utilizando estágios com fibras compostas de outros materiais [16].

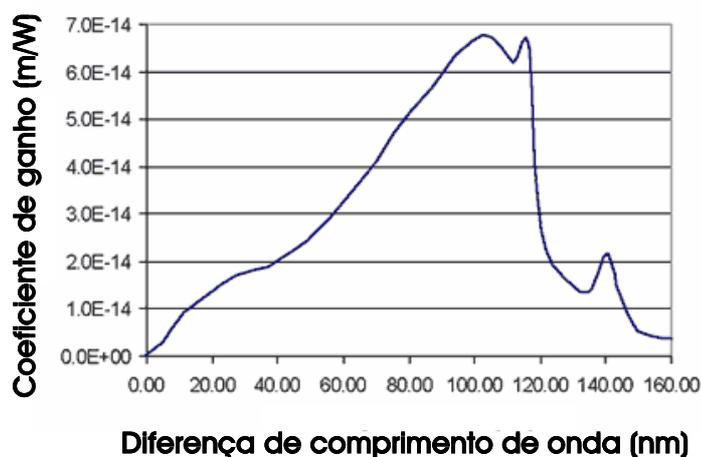


Figura 2.3 – Coeficiente de ganho Raman para sílica.

Estes amplificadores, além de possuírem uma larga banda de amplificação, são bastante flexíveis em relação ao pico de ganho [16], podendo suprir deficiências de banda de outros amplificadores, tornando-os atrativos para aplicações em comunicações por fibra óptica. Porém, ao contrário dos amplificadores construídos a fibra dopada com terras raras e à base de semicondutor, são pouco eficientes requerendo alta potência de bombeamento e fibras extremamente longas (na ordem de quilômetros) [15].

Um aspecto importante que deve ser mencionado é a perda e o ruído associados à transferência de energia de comprimentos de onda na *banda S* para comprimentos de onda na *banda L*, através de processo de espalhamento Raman.

Esses amplificadores são amplamente utilizados para complementar o uso de Amplificadores a fibras dopadas, provendo um ganho adicional de forma distribuída em enlaces muito longos [14].

2.4.4 – Amplificadores ópticos a fibra dopada

Desde 1985, quando na Universidade de Southampton (Inglaterra) [2, 22] foi demonstrada uma nova técnica para fabricação de fibras ópticas dopadas com terras raras apresentando baixas perdas, os amplificadores ópticos com constituição baseada nestas fibras foram imediatamente identificados como dispositivos importantes para aplicações em comunicações por fibras ópticas, principalmente devido ao alto ganho, baixo ruído intrínseco, baixa dependência com polarização, transmissão com taxa de erro por bit (**BER**, *Bit Error Rate*) baixíssima e alta eficiência de conversão de potência (**PCE**, *Power Conversion Efficiency*) [2].

O primeiro elemento de terra rara a ser utilizado foi o Neodímio, melhor dopante para lasers de estado sólido. Estes lasers se mostraram eficientes com um baixo limiar de operação em regime laser. Diante destes resultados encorajadores, outros dopantes foram utilizados para a construção de amplificadores ópticos, como: Túlio, Itérbio e Érbio [1].

Foram desenvolvidos vários amplificadores a fibra dopada com terras raras diferentes, aproveitando as propriedades de fluorescência características de cada uma. Atualmente, o mais importante é o amplificador óptico a fibra dopada com Érbio [1, 4, 10, 12-13, 15, 17, 22-25] que pode prover ganho para as principais bandas de transmissão óptica. Amplificadores ópticos a fibra dopada com Praseodímio [13, 23] e Neodímio [23, 27-29] podem ser usados para obtenção de ganho na janela de 1300 nm. Enquanto que os amplificadores ópticos a fibra dopada com Túlio podem prover ganho para toda a *banda S* de transmissão óptica (1460 nm-1530 nm) [30-32].

2.4.5 – EDFA

No final de 1986, O grupo de Southampton construiu o seu primeiro amplificador óptico a fibra dopada com Érbio [1, 4, 10, 12-13, 15, 22-25]. Em 1986, Emmanuel Desurvire começou a trabalhar nos laboratórios Bell e imediatamente começou a lidar com os EDFAs. E. Desurvire realizou medidas detalhadas, desenvolveu o modelo teórico e realizou a primeira otimização do comprimento da fibra dopada [1]. Os EDFA são os amplificadores ópticos mais utilizados e mais conhecidos, principalmente por seu espectro

de amplificação coincidir exatamente com o mínimo de atenuação da sílica, por volta de 1550 nm.

Para EDFA utilizando a sílica como vidro hospedeiro, todas as possíveis transições entre os níveis de energia do Érbio são altamente não radiativas, devido ao processo de decaimento por múltipla emissão de fônons, exceto a transição que envolve os níveis $^4I_{13/2}$ e $^4I_{15/2}$ que é 100% radiativa. Esta transição exibe um espectro de emissão bastante largo, com pico em 1530 nm, e propicia a amplificação em toda a *banda C* [22]. A amplificação na *banda L* com EDFAs também é possível.

O tempo de vida do nível superior é de 10 ms [10], que é muito maior do que os tempos associados às taxas de transmissão de sinal de interesse prático. Isto, além de facilitar o processo de inversão de população, também torna desprezível a distorção intersimbólica. Devido à multiplicidade dos níveis de energia, a absorção de alguns comprimentos de onda de bombeamento pode ocorrer a partir do nível superior de amplificação diminuindo a eficiência do bombeamento. Este processo é chamado de absorção de estado excitado (**ESA**, *Excited State Absortion*). Os comprimentos de onda de bombeamento em 980 nm e 1480 nm estão livres de absorção de estado excitado. Além disso, estes podem ser gerados a partir de lasers de diodo comerciais [22]. O bombeamento em 980 nm minimiza a figura de ruído e é mais adequado quando o EDFA é utilizado como pré-amplificador [15].

Sem bombeamento suficiente para manter uma determinada inversão de população, os íons de Érbio absorvem o sinal propagante, sendo esta uma característica de um sistema com três níveis. Um parâmetro importante dos EDFAs é a potência de transparência, definida como a potência de bombeamento para a qual o sinal não sofre ganho, nem perda.

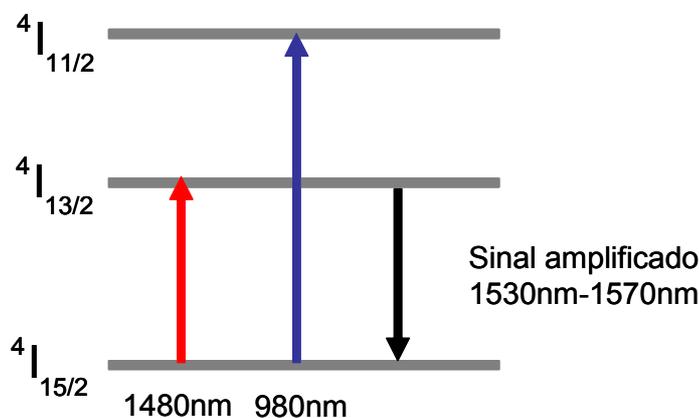


Figura 2.4 – Diagrama de energia ilustrando o processo de amplificação dos EDFAs.

O EDFA também pode gerar ganho na faixa de comprimentos de onda maiores da *banda S*. Um ganho de 36 dB gerado pela fibra em 1512 nm e ganho da fibra maior do que 20 dB entre 1480 nm e 1510 nm, com figura de ruído da fibra menor do que 8 dB foi mostrado por M. A. Arbore e colaboradores [17]. A amplificação nestes comprimentos de onda só é possível com a supressão da emissão espontânea amplificada, gerando alto fator de inversão de população. A supressão de ASE pode ser feita através de filtros entre múltiplos estágios de amplificação [26], tornando o sistema bastante complexo, ou utilizando estruturas de fibras especiais com comprimento de onda de corte por volta de 1530 nm, gerando altas perdas para o ASE [17]. A limitação mais importante a destacar é o não provimento de ganho na faixa de comprimentos de ondas menores da *banda S*.

2.4.6 – PDFA E NDFA

É sabido que uma das janelas de baixa atenuação nas fibras ópticas de sílica é a de comprimento de onda em torno de 1300 nm e antes do desenvolvimento e maturidade da tecnologia dos lasers de diodo compostos da liga quaternária de semicondutor InGaAsP que emitem na faixa de 1550 nm [3] (mínimo de atenuação das fibras de sílica) foram implantados muitos sistemas operando na faixa de 1300 nm. Então, é natural a demanda por amplificadores ópticos que possam operar nesta faixa. E isso pode ser conseguido através da utilização de fibras dopadas com algumas terras raras, como Praseodímio [13, 23], Neodímio [23, 27-29] e Disprósio [30]. É importante salientar que o processo de amplificação nesses materiais funciona como um sistema de quatro níveis com a vantagem de não existir absorção do sinal a partir do estado fundamental.

O Praseodímio emite fluorescência na região espectral de 1300 nm, permitindo amplificação nos comprimentos de onda desejados [13, 23], sendo possível a construção de um amplificador óptico a fibra dopada com Praseodímio. Entretanto, a eficiência de bombeamento para atingir altos fatores de ganho é extremamente baixa. Enquanto que para um EDFA, 20 mW de bombeamento é o suficiente para a obtenção de 20 dB de ganho, para um PDFA são necessárias algumas centenas de mW para atingir o mesmo ganho [13].

O Neodímio, outra terra rara, também emite fluorescência na janela de 1,3 μm [23], sendo possível a construção de amplificadores ópticos [27-28] e lasers sintonizáveis [29] a fibras de composição ZBLAN dopadas com Neodímio. O maior problema relacionado a

estas fibras é a competição com a transição em 1,05 μm (${}^4\text{F}_{3/2} \rightarrow {}^4\text{I}_{11/2}$) que pode suprimir a emissão desejada [29]. Utilizando técnicas para supressão de ganho em 1,05 μm , pode-se obter amplificadores com até 10 dB de ganho [27] ou lasers com eficiência de até 15,7% [29].

Existem também citações na literatura de uso de Disprósio para amplificação na janela de 1,3 μm [30].

2.4.7 – TDFA

Na perspectiva de ampliar a banda de transmissão em sistemas WDM, o amplificador a fibra dopada com Túlio é um forte candidato a permitir a utilização da *banda S* devido à característica de sua fluorescência. É importante salientar que o processo de amplificação se dá por absorção de dois fótons em um sistema que pode ser tratado como tendo três níveis de energia [31, 32]. O próximo capítulo descreve com detalhes as características básicas dos TDFA. Nos capítulos subseqüentes são apresentados vários resultados obtidos de relevância para o cenário atual de desenvolvimento na área.

2.5 – Referências bibliográficas

- [1] J. Hecht, “History of optical amplifiers”, *Optics & Photonics News*, pp. 36-39, Ago., 2002.
- [2] R. Baker, “Optical Amplification”, *Physics World*, Mar., 1990.
- [3] J. Singh, *Semiconductor Optoelectronics: Physics and Technologies*, McGraw-Hill International Editors, 1995.
- [4] G. P. Agrawal, *Fiber Optics Communication Systems*, 2^a. Edição, New York: John Wiley & Sons, 1994.
- [5] D. M. Baney, P. Gallion, and R. S. Tucker, “Theory and Measurement Techniques for the Noise Figure of Optical Amplifiers”, *Optical Fiber Technologies*, vol. 6, pp. 122-154, 2000.
- [6] H. A. Haus, “The Proper Definition of Noise Figure of Optical Amplifiers”, *In OSA Tops of Optical Amplifiers and Their Applications*, vol. 44, pp.3-17, 2001.

- [7] H. A. Haus, “Noise Definitions Valid From RF to Optical Frequencies”, *IEEE J. Selected Topics in Quantum Electronics*, vol. 6, n. 2, pp.240-247, 2000.
- [8] H. A. Haus, “Optimal Noise Performance of Optical Amplifiers”, *IEEE J. of Quantum Electronics*, vol. 37, n. 6, pp.813-823, 2001.
- [9] H. A. Haus, “The Noise Figure of Optical Amplifiers”, *IEEE Photon. Technol. Lett.*, vol. 10, n.11, pp.1602-1604, 1998.
- [10] Y. Sun, A. K. Srivastava, J. Zhou, and J. Sulhoff, “Optical Fiber Amplifiers for WDM Optical Networks”, *Bell Labs Technical J.*, pp.187-206, Jan-Mar, 1999.
- [11] D. Teed, P. Vella, M. Jamensky, and H. Jahani, “Dynamic elements combine functions, manage performance”, *WDM solutions*, pp. 11-13, Jul, 2002.
- [12] D. McCarthy, “Growing by design”, *Photonics Spectra*, pp. 88-98, Jul.,2001.
- [13] L. Kazovsky, S. Benedetto, and A. Willner, *Optical Fiber Communication Systems*, Artech House, 1996.
- [14] R. Ramaswami, and K. N. Sivarajan, *Optical Networks – A practical perspective*, 2^a edição, San Diego: Morgan Kaufmann Publishers, 2002.
- [15] D. A. Trivedi, T. Strite, and G. Van Der Hoven, “EDFAs pump up the power again and again”, *WDM solutions*, pp.14-18, Abr, 2000.
- [16] J. Hecht, “S-band amplification: challenges developers”, *Laser Focus World*, pp.79-84, Jul., 2002.
- [17] M. A. Arbore, Y. Zhou, G. Keaton, and T. Kane, “36dB gain in S-band EDFA with distributed ASE suppression”, *In Postdeadline Papers of Optical Amplifiers and Their Applications 2002*, PD4, Vancouver, Canadá, 2002.
- [18] G. P. Agrawal, *Nonlinear Fiber Optics*, 2^a. Edição, New York: Academic Press, 1995.
- [19] R. H. Stolen, and J. E. Bjorkholm, “Parametric Amplifiers and Frequency Conversion in Optical Fibers”, *IEEE J. Quantum Electron.*, vol. QE-18, n. 7, 1982.
- [20] M. T. Carvalho, “Caracterização de Amplificadores a fibra dopada com Túlio por Reflectometria Óptica Coerente no Domínio das Freqüências”, *Dissertação de Mestrado*, DF – UFPE, Nov., 2002.
- [21] A. Safaai-Jazi, “Holey Fibers: Fundamentals and Applications”, *In Technical Digest of Optical Fiber Communication Conference and Exhibit 2002*, paper TuD1, pp. 19, Anaheim, EUA, 2002.

- [22] E. Desurvire, “Erbium-doped fiber amplifiers for new generations of optical communication systems”, *Optics & Photonics News*, pp. 6-11, Jan., 1991.
- [23] P. C. Becker, N. A. Olsson, and J. R. Simpson, *Erbium-doped fiber amplifiers – Fundamentals and Technologies*, 1^a. edição, San Diego: Academic Press, 1999.
- [24] E. Desurvire, *Erbium Doped Fiber Amplifiers*, John Wiley & sons, 1994.
- [25] A. Ghatak, and K. Thyagarajan, *Introduction to Fiber Optics*, Cambridge University Press, 1998.
- [26] E. Ishikawa, M. Nishihara, Y. Sato, C. Ohshima, Y. Sugaya, and J. Kumasako, “Novel 1500 nm-band EDFA with discrete raman amplifier”, *In Technical Digest of 27th European Conference on Optical Communications*, pp. 48-49, Amsterdã, Holanda, 2001.
- [27] T. Sugawa, Y. Miyajima, and T. Komukai, “10dB Gain and high saturation power in a Nd³⁺-Doped Fluorozirconate Fibre Amplifier”, *Electron. Lett.*, vol.26, n. 24, pp. 2042–2044, 1990.
- [28] Y. Miyajima, T. Sugawa, and T. Komukai, “Efficient 1.3mm-band amplification a Nd³⁺-Doped single-mode Fluoride Fibre”, *Electron. Lett.*, vol. 26, n. 17, pp. 1397–1398, 1990.
- [29] T. Komukai, Y. Fukasaku, T. Sugawa, and Y. Miyajima, “Highly Efficient and tunable Nd³⁺-Doped Fluoride Fibre laser operating in 1.3mm band”, *Electron. Lett.*, vol. 29, n. 9 , pp. 755–757, 1993.
- [30] Heo, J. H. Song, S. H. Park and M. H. Do, “Dysprosium and Thulium-doped chalcogenide glass fibers for 1.3μm and S-band amplification”, *In Technical Digest of Optical Fiber Communication Conference and Exhibit 2002*, ThZ5, pp. 574-575, Anaheim, EUA, 2002.
- [31] T. Komukai, T. Yamamoto, T. Sugawa, and Y. Miyajima, “Upconversion pumped thulium-doped fluoride fiber amplifier and laser operating at 1.47mm”, *IEEE J. Quantum Electron.*, vol. 31, n. 11, pp. 1880-1889, 1995.
- [32] A S. L. Gomes, “Recent progress in Thulium Doped Fiber Amplifiers”, *Technical Summary Digest of Photonics West 2003 - SPIE*, pp. 361, 2003.

Capítulo 3 – Amplificadores a Fibra Dopada com Túlio, uma Revisão Bibliográfica.

Como já foi visto no capítulo anterior, dentre os vários tipos de amplificadores ópticos, amplificadores a fibra dopada com Túlio (**T DFA**, *Thulium Doped Fiber Amplifiers*) se apresentam como uma excelente alternativa para amplificação na *banda S* (região espectral de transmissão compreendida entre 1460 nm e 1530 nm). Como no decorrer deste documento, são apresentados resultados importantes na pesquisa e desenvolvimento de T DFA, faz-se necessária uma revisão bibliográfica minuciosa sobre o assunto. Na seção 3.1 é apresentado um breve histórico sobre os T DFA. Em seguida são mostrados os modelos teóricos para prever o comportamento dos amplificadores. Na seção 3.3, aspectos de cunho prático são apresentados. E por fim são apresentadas as conclusões e referências bibliográficas utilizadas durante a pesquisa.

3.1 – Histórico sobre o processo de amplificação em fibras dopadas com Túlio

Em 1982, B. M. Antipenko e colaboradores propuseram uma transição laser entre os níveis de energia 3F_4 e 3H_4 em íons trivalentes de Túlio (Tm^{3+}), cujo comprimento de onda de emissão correspondia a 1,47 μm [1]. Sete anos mais tarde, J. Y. Allain e colaboradores demonstraram, pela primeira vez, oscilação tipo laser em torno de 1,48 μm . O experimento utilizava uma fibra multimodo composta de Flúor e dopada com Tm^{3+} . Um laser de Criptônio com comprimento de onda de operação em 0,676 μm foi utilizado como fonte de bombeamento [1].

Apesar disso, a comunidade científica ressaltava que dois problemas básicos impediam a utilização prática de íons trivalentes de Túlio. Um dos problemas está relacionado com o decaimento não radiativo por fônons quando o vidro hospedeiro é composto de sílica (SiO_2) [1-2]. Este problema será abordado mais amplamente na seção 3.3. [1-2].

A dificuldade para manter a inversão de população necessária entre os níveis de energia responsáveis pela transição em questão era apontada como o outro grande problema [3]. Isto porque a transição utilizada para amplificação pertence a um sistema de

quatro níveis de energia, onde o tempo do nível superior (1,35 ms para concentração de 2000 ppm) é menor do que o tempo do nível inferior (9 ms para concentração de 2000 ppm) [1-2]. Isto torna o esquema de bombeamento direto do nível de energia fundamental (3H_6) para o nível superior de amplificação (3H_4) com o uso de um único laser em 0,676 μm ou 0,79 μm inviável, pois o sistema é auto terminável [1].

O primeiro passo foi o de resolver o problema do vidro hospedeiro, sofisticando as técnicas de fabricação de fibras a partir de outros vidros. Com a fabricação de fibras monomodo dopadas com Túlio e à base de outros materiais, como o Flúor, apareceram as primeiras soluções para manter a inversão de população entre os níveis de amplificação.

As soluções propostas mais importantes são as seguintes: bombeamento da fibra em 1064nm, utilizando a conversão ascendente de energia, onde dois fótons são absorvidos sequencialmente [1,2]; co-dopar a fibra com íons de Ho^{3+} [4] para diminuir o tempo de vida do nível inferior de amplificação (3F_4); ou gerar uma emissão laser entre os níveis 3F_4 e 3H_6 , correspondente à emissão em aproximadamente 1,9 μm , diminuindo assim a população no nível inferior de amplificação (3F_4). Vale ressaltar que é possível a construção de amplificadores e lasers sintonizáveis operando por volta de 1,9 μm [5,6].

Dentre as três alternativas apresentadas para gerar inversão de população suficiente para amplificação, a mais viável e comum é a primeira, chamada de conversão ascendente de energia. O processo ocorre por meio da absorção seqüencial de dois fótons por um mesmo íon.

Este processo está ilustrado na figura 3.1. Como pode ser observado, ocorre uma primeira excitação, onde elétrons são transferidos do nível 3H_6 para o nível de energia 3H_5 . Este primeiro processo é chamado de absorção de estado fundamental (**GSA**, *Ground State Absortion*). Em seguida, os elétrons decaem do nível 3H_5 para 3F_4 através de emissão de fônons. Assim, acontece uma segunda absorção que transporta elétrons entre os níveis 3H_4 e 3F_2 , esta é chamada de absorção de estado excitado (**ESA**, *Excited State Absortion*). Então, os elétrons decaem do nível 3F_2 para 3H_4 através de emissão de fônons. Com isto, ocorre inversão de população entre 3H_4 e 3F_4 e o processo de amplificação torna-se possível. É importante frisar que, para bombeamento em 1050 nm, pode ocorrer a absorção de fótons a partir do segundo estado excitado (3H_4), diminuindo a eficiência do processo.

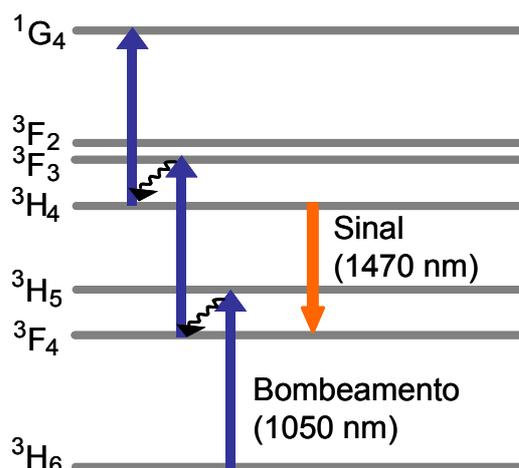


Figura 3.1 – Diagrama de energia dos íons de Tm^{3+} em vidros fluorados com bombeamento em 1050 nm.

Em 1992, T. Komukai e colaboradores demonstraram lasers de fibra utilizando o processo de conversão ascendente de energia (bombeamento em 1064 nm) e emitindo em 1470 nm com eficiência de conversão de potência (**PCE**, *Power Conversion Efficiency*) de 27 % após limiar de 200 mW [7]. Também foram demonstrados lasers operando neste comprimento de onda, com potência de saída de 1 W e PCE de 39 % [8]. PCE é definido como a razão entre potência utilizada pelo processo de amplificação e a potência de bombeamento.

Oscilações do tipo laser em vários comprimentos de onda foram observadas utilizando transições entre os níveis de energia dos íons trivalentes de Túlio em vidros ZBLAN. São elas (ver Figura 3.2): 0,45 μm [9]; 0,48 μm [9]; 0,8 μm [4, 9-10]; 1,47 μm [7, 8, 10, 12]; 1,9 μm [5, 6, 9-11] e 2,3 μm [7-9].

Existem fatores que diminuem o PCE, como a emissão espontânea amplificada (**ASE**, *Amplified Spontaneous Emission*) no infravermelho distante (1,9 μm e 2,3 μm) [1], infravermelho próximo (0,8 μm), visível (0,48 μm) e ultravioleta (0,36 μm) [13].

Além disso, a probabilidade de emissão espontânea da transição ${}^3H_4 \rightarrow {}^3H_6$ (0,8 μm) é maior do que para das transições ${}^3H_4 \rightarrow {}^3F_4$ (1,47 μm) e ${}^3H_4 \rightarrow {}^3H_5$ (2,3 μm). As taxas de emissão espontânea para 0,8 μm , 1,47 μm e 2,3 μm são respectivamente 0,893, 0,083 e 0,024. Como a emissão estimulada depende fortemente da probabilidade de emissão espontânea [1, 3, 14], espera-se que o ganho em 1,47 μm seja saturado pela emissão espontânea em 0,8 μm . Contudo, este problema é evitado porque o bombeamento em 1,064

μm , suprime ASE em $0,8 \mu\text{m}$. Isto ocorre porque a absorção a partir do estado fundamental é pequena e não cria forte inversão de população entre $^3\text{H}_4$ e $^3\text{H}_6$ [13].

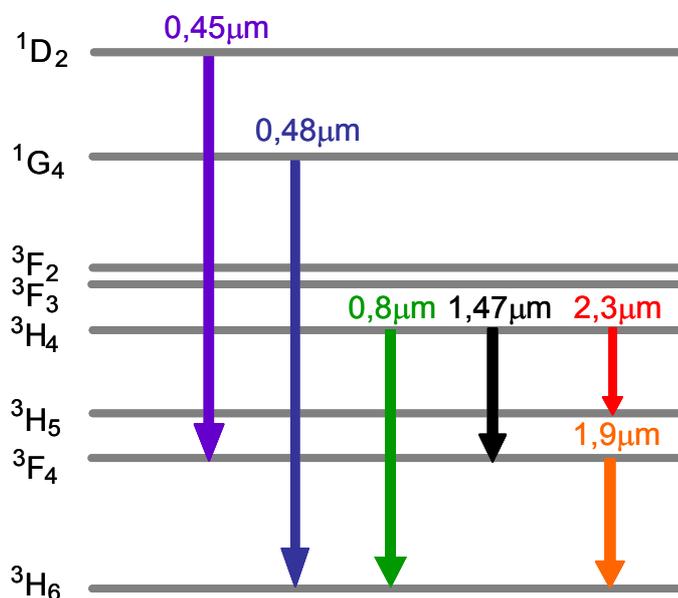


Figura 3.2 – Diagrama de energia das possíveis emissões laser dos íons de Tm^{3+} em vidros fluorados.

Apesar da fibra dopada com Túlio ser considerada transparente para sinais na *banda S*, ou seja, não apresentar perdas, existe um pico de absorção na transição de amplificação em $1,65 \mu\text{m}$ que gera perdas por absorção de estado excitado [3, 13].

Existem dois fatores que limitam a banda de amplificação dos TDFAs. Para comprimentos de onda menores que $1,45 \mu\text{m}$, a absorção de estado excitado a partir do nível superior de amplificação ($^3\text{F}_3 \rightarrow ^1\text{G}_4$) gera perda alta [7]. Para comprimentos de onda maiores que $1,5 \mu\text{m}$ as perdas ocorrem devido à absorção de estado fundamental, cujo pico encontra-se por volta $1,7 \mu\text{m}$ (transição $^3\text{H}_6 \rightarrow ^3\text{F}_4$) [7].

Existe também outro esquema de bombeamento monocromático que é capaz de gerar inversão de população pelo processo de conversão ascendente de energia, $1,4 \mu\text{m}$ [15-17]. O processo de excitação está mostrado na figura 3.3. Uma das principais vantagens na utilização de $1,4 \mu\text{m}$ é que a segunda absorção de estado excitado, entre $^3\text{H}_4$ e $^1\text{G}_4$, não é ressonante, isto evita a geração de luz azul (em $0,48 \mu\text{m}$) [15].

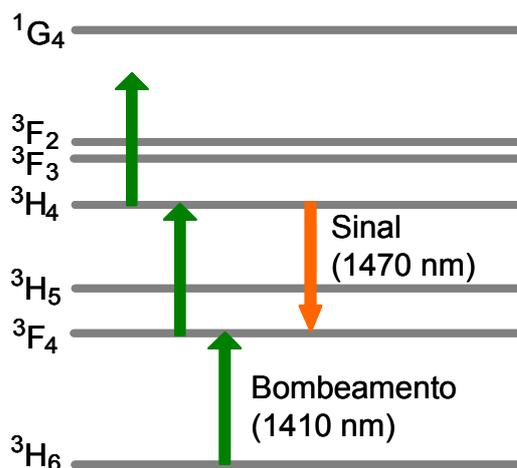


Figura 3.3 – Diagrama de energia dos íons de Tm^{3+} em vidros fluorados com bombeamento em 1410 nm.

É interessante frisar que o bombeamento de TDFA pode ser realizado unicamente com lasers de semiconductor tanto em 1050 nm [18-20] quanto em 1400 nm [15-17] tornando-os mais compactos e com custo mais baixo. Uma abordagem mais abrangente sobre o assunto é realizada na seção 5.2.

3.2 – Modelamento teórico do processo de amplificação em TDFA

A previsão teórica da dinâmica de ganho de um amplificador é de suma importância. No caso do TDFA, os íons trivalentes de Túlio têm o diagrama de energia que pode ser aproximado por quatro níveis. Basicamente existem dois modelos estabelecidos. O primeiro foi proposto por T. Komukai e colaboradores em 1995 [1] e utiliza as equações de taxa para um sistema de quatro níveis de energia, levando em consideração um comportamento Lorentziano do espectro de amplificação. O outro modelo, mais recente, consiste em um modelo de caixa preta (BBM, *Black Box Model*), desenvolvido principalmente pelo grupo de pesquisa do Professor Hugo Fragnito, do Instituto de Física Gleb Wataghin, na Unicamp. É importante ressaltar que os resultados experimentais utilizados para validar o modelo de caixa preta foram produzidos por nós no Laboratório de Fotônica e Optoeletrônica do Departamento de Física da UFPE. Maiores detalhes estão expostos na dissertação de mestrado de Andrés Rieznik (Unicamp, 2003).

3.2.1 - Equações de taxa

Este modelo foi proposto por T. Komukai e colaboradores [1], em 1995. O modelo foi desenvolvido para a conversão ascendente de energia com um único comprimento de onda de bombeamento, no caso 1050 nm. Como simplificação, os níveis 3F_2 e 3F_3 por serem muitos próximos foram considerados como somente um nível. Na figura 3.4 pode se observar os níveis de energia, bem com as principais transições envolvidas no processo com suas respectivas probabilidades de transição.

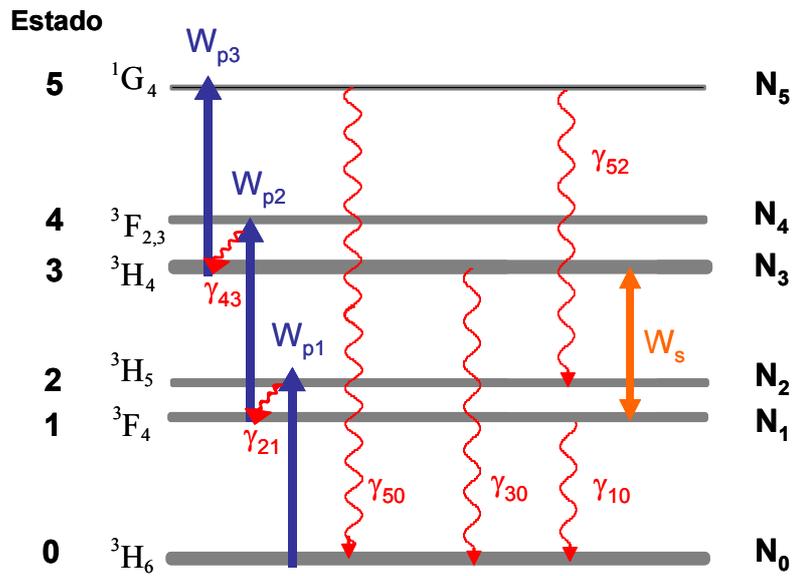


Figura 3.4 – Diagrama de energia dos íons de Tm^{3+} em vidros fluorados com bombeamento único em 1050 nm, apresentando as probabilidades de transição entre os níveis de energia envolvidos no modelo do Komukai.

A partir da Figura 3.4, podem-se escrever as equações de taxas, que regem o comportamento do sistema:

$$\frac{dN_0}{dt} = -W_{p1}N_0 + \gamma_{10}N_1 + \gamma_{30}N_3 + \gamma_{50}N_5, \quad (3.1)$$

$$\frac{dN_1}{dt} = -(W_{p2} + \gamma_{10} + W_s)N_1 + \gamma_{21}N_2 + W_sN_3, \quad (3.2)$$

$$\frac{dN_2}{dt} = W_{p1}N_0 - \gamma_{21}N_2 + \gamma_{52}N_5, \quad (3.3)$$

$$\frac{dN_3}{dt} = W_sN_1 - (\gamma_{30} + W_s + W_{p3})N_3 + \gamma_{43}N_4, \quad (3.4)$$

$$\frac{dN_4}{dt} = W_{p2}N_1 - \gamma_{43}N_4, \quad (3.5)$$

$$\frac{dN_5}{dt} = W_{p3}N_3 - (\gamma_{50} + \gamma_{53})N_5, \quad (3.6)$$

onde os estados ${}^3\text{H}_6$, ${}^3\text{F}_4$, ${}^3\text{H}_5$, ${}^3\text{H}_4$, ${}^3\text{F}_{2,3}$ e ${}^1\text{G}_4$ são definidos respectivamente como estado 0, 1, 2, 3, 4 e 5. As transições de excitação estão definidas na Figura 3.4 e suas probabilidades de transição são dadas por: W_{p1} , para absorção de estado fundamental (${}^3\text{H}_6 \rightarrow {}^3\text{H}_5$); W_{p2} , para absorção a partir do primeiro estado excitado (${}^3\text{F}_4 \rightarrow {}^3\text{F}_{2,3}$) e W_{p3} , para absorção a partir do segundo estado excitado (${}^3\text{H}_4 \rightarrow {}^1\text{G}_4$). Considerou-se também uma outra simplificação: a seção de choque de emissão estimulada é igual à seção de choque de absorção, sendo ambas dadas por W_s . As outras probabilidades de transição por emissão espontânea ou decaimento multifonônico de um nível (i) para outro com menor energia (j) são representadas por γ_{ij} . Devido ao emprego de vidros ZBLAN, γ_{32} é pequeno e pode ser desprezado. Como em regime de amplificação a emissão estimulada é muito maior que a emissão espontânea, também pode-se desprezar γ_{31} . Tem-se que γ_{51} , γ_{53} e γ_{54} são muito menores que γ_{50} e γ_{52} e podem ser descartados. Também tem-se que γ_{52} , γ_{20} , γ_{42} , γ_{41} e γ_{40} são pequenos e podem ser desprezados [1]. E ainda tem-se que:

$$W_{pj} = \frac{I_p \sigma_{pj}^a}{h \nu_p}; j = 1, 2, 3, \quad (3.7)$$

$$W_s = \frac{I_s \sigma_s}{h \nu_s}, \quad (3.8)$$

$$\gamma_{30} = \frac{1}{\tau_3}, \quad (3.9)$$

$$\gamma_{10} = \frac{1}{\tau_1}, \quad (3.10)$$

onde, I_p é a intensidade de bombeamento e I_s é a intensidade do sinal. σ_{p1}^a , σ_{p2}^a e σ_{p3}^a são as seções de choque de absorção das transições ${}^3\text{H}_6 \rightarrow {}^3\text{H}_5$, ${}^3\text{F}_4 \rightarrow {}^3\text{F}_{2,3}$ e ${}^3\text{H}_4 \rightarrow {}^1\text{G}_4$, respectivamente. E, τ_1 e τ_3 são os tempos de vida de ${}^3\text{F}_4$ e ${}^3\text{H}_4$, h é a constante de Planck, ν_p é a frequência óptica do bombeamento e ν_s é a frequência óptica do sinal.

Como os tempos de decaimento não-radiativo das transições ${}^3\text{H}_5 \rightarrow {}^3\text{F}_4$ e ${}^3\text{F}_{2,3} \rightarrow {}^3\text{H}_4$ são muito menores que os tempos de vida dos níveis 1 e 3, a concentração de portadores nos estados 2 e 4 são muito menores do que nos outros estados. Assim, pode-se desprezar as concentrações destes dois níveis e a concentração total (N) será dada por:

$$N = N_0 + N_1 + N_3 + N_5. \quad (3.11)$$

Definindo a inversão de população entre os níveis de interesse para amplificação (estados 1 e 3), como:

$$\Delta N = N_3 - N_1. \quad (3.12)$$

Pode-se mostrar que na condição de estado estacionário:

$$\Delta N = \frac{A}{B} N, \quad (3.13)$$

onde

$$A = (\gamma_{50} + \gamma_{52})W_{p1}(W_{p2} - W_{p3} - \gamma_{30}), \quad (3.14)$$

$$B = (\gamma_{50} + \gamma_{52})[\gamma_{10}\gamma_{30} + \gamma_{30}W_{p1} + \gamma_{30}W_{p2} + W_{p1}W_{p2} + \gamma_{10}W_{p3} + W_{p1}W_{p3} + (\gamma_{10} + \gamma_{30})W_s + 2W_{p1}W_s] \\ (\gamma_{50} + W_{p1})(W_{p2} + W_s)W_{p3}. \quad (3.15)$$

Para atingir a condição de inversão de população, $\Delta N > 0$, deve-se ter:

$$I_p > \frac{h\nu_p}{(\sigma_{p2}^a - \sigma_{p3}^a)\tau_3}. \quad (3.16)$$

Considerando que, para bombeamento não muito intenso, a segunda absorção de estado excitado pode ser ignorada, a população do nível ${}^1\text{G}_4$ torna-se desprezível. Duas equações diferenciais descrevem o comportamento do bombeamento e sinal de uma forma mais simples. São elas:

$$\frac{dI_s}{dz} = \sigma_s \Delta N I_s \quad (3.17)$$

e

$$\frac{dI_p}{dz} = -(\sigma_{p1}^a N_0 + \sigma_{p2}^a N_1) I_p. \quad (3.18)$$

Como o ganho do meio ativo é dado por:

$$g(I_s) = \sigma_s \Delta N, \quad (3.19)$$

pode-se reescrever o ganho do meio para este caso, utilizando as equações 3.17 e 3.18, da seguinte forma:

$$g(I_s) \approx K \frac{\sigma_s N}{1 + \frac{I_s}{I_{ssat}}}, \quad (3.20)$$

$$\text{onde } K = \frac{1}{1 + \frac{(\gamma_{10} + 3\gamma_{30})h\nu_p}{4\sigma_{p1}^a I_p}} \text{ e } I_{ssat} = \frac{1}{2} \left(\frac{\sigma_{p2}^a}{\sigma_s} \right) \left(\frac{\nu_s}{\nu_p} \right).$$

Utilizando a formula fechada de Digonnet [21] para um sistema de quatro níveis com uma fibra de comprimento L, pode-se descrever o ganho do meio por:

$$g(L) = K \frac{\sigma_s \tau_3}{h\nu_p \pi r_p^2} P_p(L) \frac{a^2}{r_s^2 + r_p^2} \frac{1}{\left(1 - e^{-\left(\frac{a}{r_p}\right)^2} \right)}, \quad (3.21)$$

onde a é o raio do núcleo da fibra, r_p é o raio modal do bombeamento, r_s é o raio modal do sinal e P_p é a potência de bombeamento absorvida pelo meio, que é dada por:

$$P_p = P(0) \left(1 - e^{-\alpha_p \eta_p L} \right), \quad (3.22)$$

onde, α_p é o coeficiente de absorção (dado aproximadamente por $\sigma_{p2}^a N_1$), η_p é o fator de confinamento, que expressa a fração de campo confinado ao núcleo da fibra, e $P(0)$ é a potência de bombeamento na entrada da fibra.

O fator de ganho do amplificador é dado por:

$$G_{dB}(L) = 10 \log(e^{gL}). \quad (3.23)$$

Apesar das aproximações este modelo reproduz de forma razoável dados experimentais. O maior problema associado a este tipo de modelo é a necessidade do conhecimento prévio dos parâmetros, como: fator de confinamento, seções de choque para o bombeamento e sinal e tempos de vida dos níveis envolvidos.

3.2.2 - Modelo de caixa preta (BBM)

No modelo de caixa preta (**BBM**, *Black Box Model*) [22, 45] considera-se o TDFA como uma caixa preta com uma função de transferência não-linear. O modelo foi desenvolvido assumindo o sistema com quatro níveis de energia e homogeneamente alargado.

Como já foi visto na seção anterior, a equação 3.17 descreve o comportamento do sinal na fibra dopada com Túlio. Tomando tal equação e reescrevendo para a potência do sinal em vez de intensidade, com a inserção das perdas pelo termo $\gamma(\lambda, z)$ e considerando a população do nível 5 da figura 3.4 desprezível, pode-se obter:

$$\frac{\partial P_s(\lambda, z)}{\partial z} = \{\Gamma(\lambda)(W_s^a + W_s^e)N_3 + \Gamma(\lambda)(W_s^a)N_0 - \Gamma(\lambda)(W_s^a)N - \gamma(\lambda, z)\}P_s(\lambda, z), \quad (3.24)$$

onde, $\Gamma(\lambda)$ é a integral de *overlap* que expressa a fração de campo confinado ao núcleo da fibra dopada [22]. Resolvendo a equação 3.24 e utilizando a equação 3.23, pode-se descrever o ganho como:

$$G_{dB}(\lambda) = \varepsilon(\lambda)n_3 + \alpha(\lambda)n_0 - \alpha(\lambda)L - \gamma'(\lambda), \quad (3.25)$$

onde,

$$\varepsilon(\lambda) = 10 \cdot \log(e) \Gamma(\lambda) N [\sigma_s^e(\lambda) + \sigma_s^a(\lambda)], \quad (3.26)$$

$$\alpha(\lambda) = 10 \cdot \log(e) \Gamma(\lambda) N [\sigma_s^a(\lambda)], \quad (3.27)$$

$$n_i = \frac{1}{N} \int_0^L N_i(z) dz, \quad (3.28)$$

$$\gamma'(\lambda) = 10 \cdot \log(e) \int_0^L \gamma(z) dz. \quad (3.29)$$

Pode-se escrever a equação 3.25 para três comprimentos de onda diferentes (λ , λ_1 , λ_2) e combiná-las para eliminar n_0 e n_3 . Fazendo isto, tem-se:

$$G_{dB}(\lambda) = F_1(\lambda, \lambda_1, \lambda_2) G_{dB}(\lambda_1) + F_2(\lambda, \lambda_1, \lambda_2) G_{dB}(\lambda_2) + F_3(\lambda, \lambda_1, \lambda_2), \quad (3.30)$$

onde,

$$F_1(\lambda, \lambda_1, \lambda_2) = \frac{\varepsilon(\lambda)\alpha(\lambda_2) - \varepsilon(\lambda_2)\alpha(\lambda)}{\varepsilon(\lambda_1)\alpha(\lambda_2) - \varepsilon(\lambda_2)\alpha(\lambda_1)}, \quad F_2(\lambda, \lambda_1, \lambda_2) = \frac{\varepsilon(\lambda_1)\alpha(\lambda) - \varepsilon(\lambda)\alpha(\lambda_1)}{\varepsilon(\lambda_1)\alpha(\lambda_2) - \varepsilon(\lambda_2)\alpha(\lambda_1)} \quad e$$

$$F_3(\lambda, \lambda_1, \lambda_2) = F_1(\lambda, \lambda_1, \lambda_2) \gamma'(\lambda_1) + F_2(\lambda, \lambda_1, \lambda_2) \gamma'(\lambda_2) - \gamma'(\lambda). \quad (3.31)$$

O modelo se baseia nas equações 3.30 e 3.31. Através delas, é possível a determinação do ganho em qualquer comprimento de onda, desde que sejam conhecidas as funções $F_1(\lambda, \lambda_1, \lambda_2)$, $F_2(\lambda, \lambda_1, \lambda_2)$ e $F_3(\lambda, \lambda_1, \lambda_2)$; bem como o ganho em dois comprimentos de onda, medidos na mesma condição de bombeamento. As funções $F_1(\lambda, \lambda_1, \lambda_2)$ e $F_2(\lambda, \lambda_1, \lambda_2)$ contêm informações relacionadas às seções de choque das transições, ou seja, a forma como a resposta espectral se comporta. Enquanto que, $F_3(\lambda, \lambda_1, \lambda_2)$ explicita as perdas do sistema.

Pode-se obter as funções $F_1(\lambda, \lambda_1, \lambda_2)$, $F_2(\lambda, \lambda_1, \lambda_2)$ e $F_3(\lambda, \lambda_1, \lambda_2)$ a partir de três curvas espectrais medidas, cada uma medida com uma condição de saturação diferente. Com este conjunto de equações pode-se obter o seguinte sistema:

$$\begin{pmatrix} G_A(\lambda_1) & G_A(\lambda_2) & 1 \\ G_B(\lambda_1) & G_B(\lambda_2) & 1 \\ G_C(\lambda_1) & G_C(\lambda_2) & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} F_1(\lambda, \lambda_1, \lambda_2) \\ F_2(\lambda, \lambda_1, \lambda_2) \\ F_3(\lambda, \lambda_1, \lambda_2) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} G_A(\lambda) \\ G_B(\lambda) \\ G_C(\lambda) \end{pmatrix}. \quad (3.32)$$

Resolvendo este sistema pode-se calcular o ganho em qualquer situação de bombeamento, desde que sejam conhecidos os ganhos em dois comprimentos de onda diferentes, usados como referência. É importante salientar que as medidas devem ser realizadas com as mesmas condições de saturação, ou seja, a mesma potência de sinal.

Com este modelo, também é possível reproduzir a resposta espectral da ASE. Considerando uma densidade espectral de ruído equivalente na entrada ($S_{eq}^{dBm}(\lambda)$) do amplificador gerando o ASE na saída do mesmo ($S^{dBm}(\lambda)$), descrito pela equação 3.34, pode-se calcular as funções equivalentes a $F_1(\lambda, \lambda_1, \lambda_2)$, $F_2(\lambda, \lambda_1, \lambda_2)$ e $F_3(\lambda, \lambda_1, \lambda_2)$ para a modelagem do ASE. Então,

$$S^{dBm}(\lambda) = S_{eq}^{dBm}(\lambda) + G^{dB}(\lambda). \quad (3.33)$$

No caso, as funções $F_1^{ASE}(\lambda, \lambda_1, \lambda_2)$ e $F_2^{ASE}(\lambda, \lambda_1, \lambda_2)$ se mantêm iguais a $F_1(\lambda, \lambda_1, \lambda_2)$ e $F_2(\lambda, \lambda_1, \lambda_2)$, respectivamente. Porém a função de $F_3^{ASE}(\lambda, \lambda_1, \lambda_2)$ se altera para:

$$F_3^{ASE}(\lambda, \lambda_1, \lambda_2) = F_3(\lambda, \lambda_1, \lambda_2) - F_1^{ASE}(\lambda, \lambda_1, \lambda_2)S_{eq}^{dBm}(\lambda_1) - F_2^{ASE}(\lambda, \lambda_1, \lambda_2)S_{eq}^{dBm}(\lambda_2) + S_{eq}^{dBm}(\lambda) \quad (3.34)$$

O aspecto interessante da possibilidade de modelagem da ASE em amplificadores ópticos a fibras é que, como o fator preponderante na geração de ruído é a ASE, pode-se modelar a figura de ruído teoricamente através do BBM.

Este modelo é bastante poderoso no que concerne a descrever a função de transferência, sem a necessidade do conhecimento dos parâmetros intrínsecos do sistema físico. Alguns experimentos realizados em conjunto mostraram que é possível a aplicação do modelo a TDFAs com esquema de bombeamento duplo. Recentemente, um novo modelo teórico foi proposto e validado para o esquema de bombeamento duplo utilizando 800 nm e 1050 nm [44]. A técnica de COFDR foi utilizada para ratificar o modelo.

3.3 – Aspectos funcionais

Os íons trivalentes de Túlio quando excitados apresentam uma rápida relaxação não radiativa multifonônica de 3H_4 para 3H_5 (*ver figura 3.1*), cuja energia é de aproximadamente 4400 cm^{-1} [1-2, 9]. A sílica tem a energia de fônons de 1100 cm^{-1} , não sendo a melhor alternativa para utilização como vidro hospedeiro [23]. Muitos esforços têm sido feitos para desenvolver técnicas que tornem os compostos a base de sílica viáveis como vidros hospedeiros [23-26]. Contudo, para solução deste problema existem algumas alternativas como: Fluoretos [1], Teluretos [25], Calcohalogênios [23], etc.

Destas alternativas, os compostos mais utilizados são os vidros fluorados ZBLAN ($ZrF_4 - BaF_2 - LaF_3 - AlF_3 - NaF_3$). Estes vidros são capazes de resolver o problema da emissão multifonônica por ter energia de fônons da ordem de 500 cm^{-1} . Contudo, as fibras ZBLAN apresentam certas dificuldades.

Além disso, fibras ZBLAN são higroscópicas (sensíveis à água) e têm o ponto de fusão mais baixo (450°C), complicando o processo de emenda com as fibras de sílica padrão. Até o presente momento, apesar do esforço da comunidade científica em desenvolver técnicas para resolver o problema das emendas [27], este ainda é um fator limitante, pois apenas algumas empresas no mundo detêm tecnologia para realizá-las. Outro problema é a degradação das emendas quando submetidas a alta potência óptica.

3.4 – Esquemas de bombeamento mais complexos

TDFAs com bombeamento monocromático não apresentam PCE satisfatórias. Para melhorar o desempenho existem basicamente duas técnicas: utilizar fibras altamente dopadas [2, 15-17, 28] ou empregar esquemas de bombeamento combinando dois comprimentos de onda [13, 21, 29-43].

O aumento da concentração nas fibras altamente dopadas com Túlio provoca uma relaxação cruzada entre os íons de Túlio no nível 3F_4 , diminuindo o fator de inversão de população, e por consequência deslocando a banda de amplificação para comprimentos de onda maiores [2]. Com o aumento da dopagem de 2000 ppm para 8000 ppm pode-se obter uma variação do pico de amplificação de 1473 nm para 1505 nm [2]. PCE de 70% já foi conseguido com o aumento da concentração para 6000 ppm [15].

Existem diversos comprimentos de onda que podem ser usados para excitar os íons trivalentes de Túlio a partir do estado fundamental, entre eles tem-se os seguintes exemplos (ver figura 3.5): 800 nm [30, 41]; 1240 nm [30, 39]; 1410 nm [15-17, 30] e 1550 nm [13, 21, 29-31, 33-35, 37, 38]. A seguir estão descritos alguns deles.

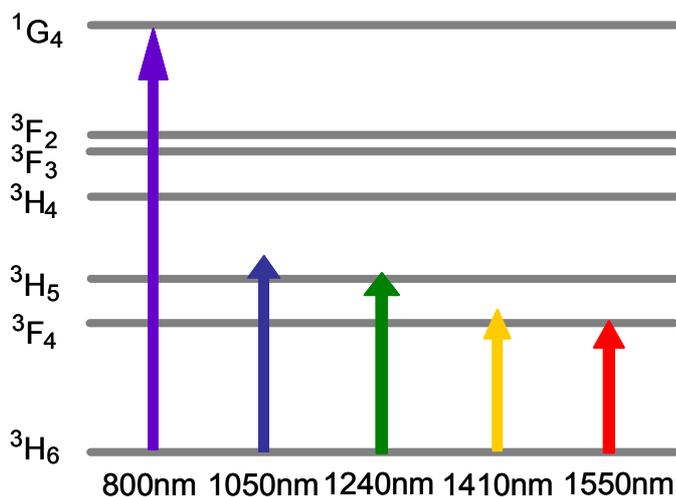


Figura 3.5 – Diagrama de energia das possíveis absorções de estado fundamental dos íons de Tm^{3+} em vidros fluorados.

3.4.1 - GSA com 1550 nm

Com a adição de um bombeamento auxiliar em 1550 nm, cuja tecnologia de lasers de diodo já está bem estabelecida, pode-se melhorar a GSA, pois o pico de absorção para a transição ${}^3H_6 \rightarrow {}^3F_4$ (ver figura 3.6.a) está por volta de 1,7 μm [13]. Neste caso existe deslocamento de banda para comprimentos de ondas maiores porque o fator de inversão de população diminui, isto porque o bombeamento em 1550nm injeta portadores diretamente no nível inferior de amplificação [13, 31]. Em [28] a adição de 12 mW de 1,56 μm aos 110 mW de 1050 nm (proporção de potência de 1,56 μm é de aproximadamente 10 % da potência total) melhora a resposta espectral de ganho entre 5 dB e 8 dB [28]. Esta melhora ocorre porque o bombeamento em 1,56 μm tem seção de choque de absorção a partir do estado fundamental uma ordem de magnitude maior que para 1,05 μm . Em [33-35], está mostrado que a proporção ideal para maximizar o ganho é que a potência em 1550 nm seja aproximadamente 7 % da potência total de bombeamento.

Para melhorar o ESA pode-se usar o bombeamento em 1400 nm em vez de 1050 nm (ver figura 3.6.b) [28], isto aumenta a eficiência (existe relato de PCE de 29 %), contudo torna o amplificador mais ruidoso [30]. A vantagem em utilizar 1410 nm + 1550 nm é a disponibilidade de lasers de diodo comerciais nestes comprimentos de onda [29-30]. F. Roy e colaboradores mostraram que para 1400 nm + 1550 nm, o deslocamento da banda de amplificação é maior que para 1050 nm + 1550 nm [35].

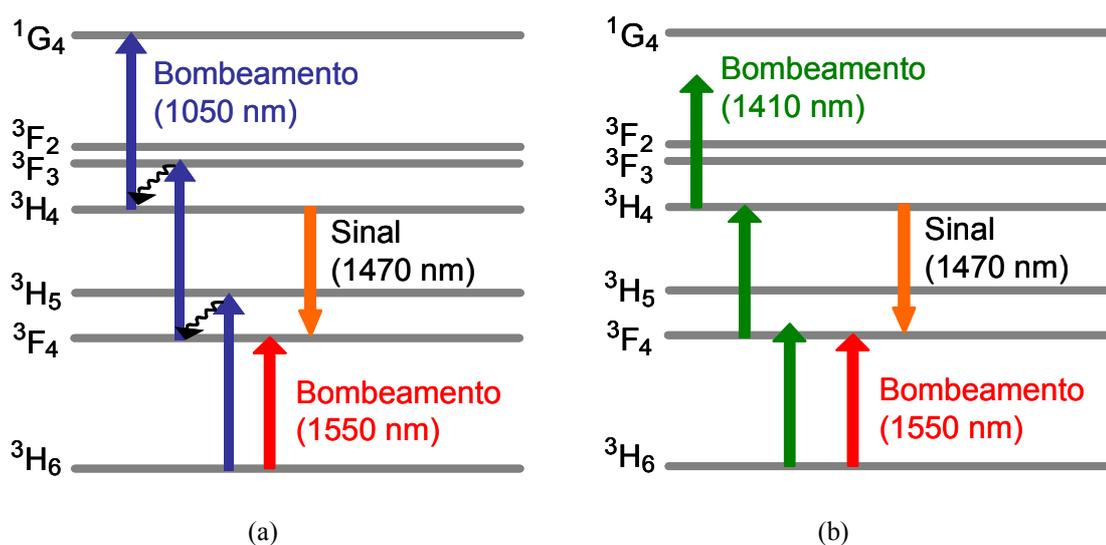


Figura 3.6 – Esquemas de bombeamento duplo para TDFAs utilizando 1550 nm para absorção de estado fundamental.

3.4.2 - GSA com 1240 nm

Uma alternativa para melhorar a GSA é a utilização de 1240 nm [37, 38] (ver figura 3.7) com decaimento não radiativo para 3F_4 , isto porque a transição $^3H_6 \rightarrow ^3F_4$ tem o seu pico de absorção em aproximadamente 1700nm, que é relativamente longe de 1550nm [37, 38]. F. Roy e colaboradores conseguiram PCE de 48% com 410 mW de potência total (20% da potência em 1240 nm) [37-38]. Porém muita potência de 1,56 μm ou 1,24 μm aumenta a população em 3F_4 e isto degrada a performance [30].

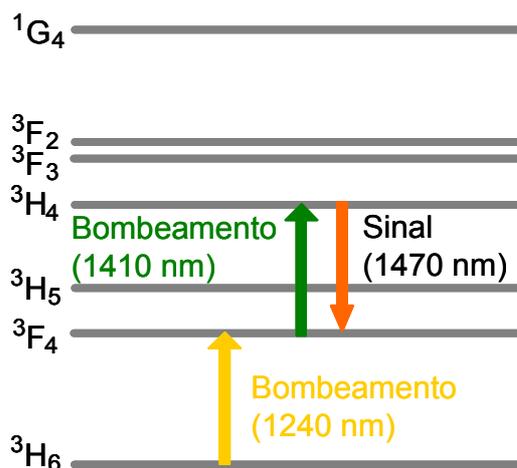


Figura 3.7 – Esquema de bombeamento duplo para TDFFA utilizando 1240 nm para absorção de estado fundamental.

3.4.3 – GSA com 800 nm

Outra forma é o bombeamento direto do estado fundamental para o estado de amplificação superior com 800 nm, juntamente com 1400 nm [30] ou com 1050 nm [41-43] para absorção de estado excitado. No caso da utilização do bombeamento 800 nm + 1400 nm, pode-se conseguir uma PCE maior que 50 % [30]. A utilização de 800 nm, como segundo bombeamento, é interessante, pois existe tecnologia à base de semicondutor. E com a nova possibilidade de emprego de lasers de diodo operando em 1050 nm [19], é possível construir um amplificador compacto operando com bombeamento em dois comprimentos de onda. Um melhor desempenho em ruído é esperado, já que o nível de amplificação superior 3H_4 é bombeado diretamente, e não através de dois fótons [30].

O esquema de bombeamento apresentado na figura 3.8.a foi desenvolvido por nosso grupo de pesquisa. Mais informações, bem como os resultados obtidos estão apresentados no capítulo seguinte.

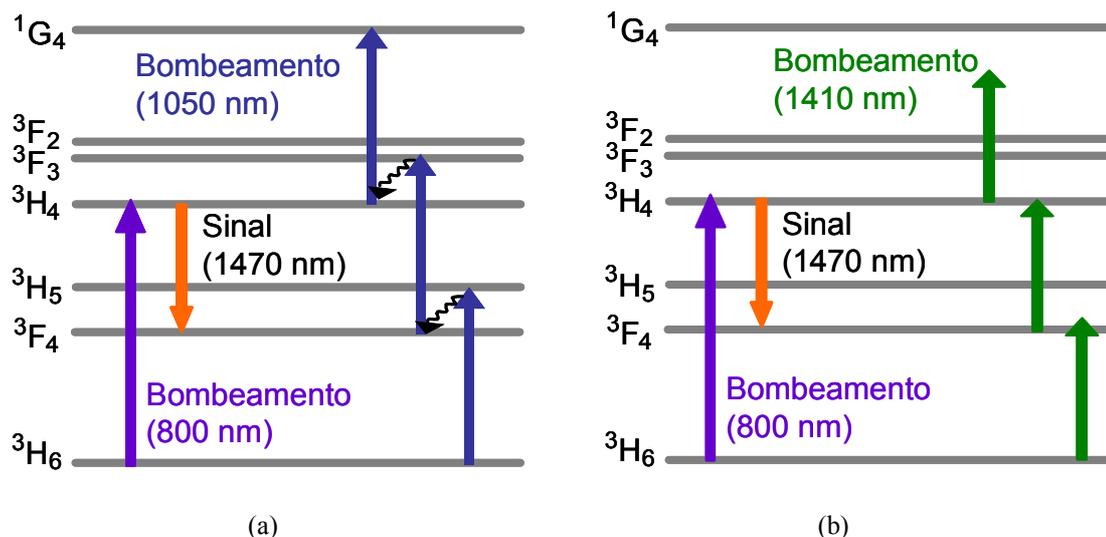


Figura 3.8 – Esquemas de bombeamento duplo para TDFA utilizando 800 nm para absorção de estado fundamental.

3.5 – Referências bibliográficas

- [1] T. Komukai, T. Yamamoto, T. Sugawa, and Y. Miyajima, “Upconversion pumped thulium-doped fluoride fiber amplifier and laser operating at 1.47 μm ”, *IEEE J. Quantum Electron.*, vol. 31, n. 11, pp. 1880-1889, 1995.
- [2] T. Sakamoto, S. Aozasa, T. Kanamori, K. Hoshino, and M. Shimizu, “High gain and low noise TDFA for 1500 nm band employing novel high concentration doping technique”, *In Technical Digest of Optical Fiber Communication Conference and Exhibit 2000*, vol. 4, pp. 178-180, Anaheim, EUA, 2000.
- [3] T. Komukai, T. Yamamoto, T. Sugawa, and Y. Miyajima, “1.47 μm Band Tm³⁺ Doped Fluoride Fiber Amplifier using a 1.064 μm upconversion pumping scheme”, *Electron. Lett.*, vol. 29, n. 1, pp. 110-112, 1993.
- [4] T. Sakamoto, M. Shimizu, T. Kanamori, Y. Terunuma, Y. Ohishi, M. Yamada, and S. Sudo, “1.4- μm -band gain characteristics of a Tm-Ho-doped ZBLYAN fiber amplifier pumped in the 0.8- μm band”, *IEEE Photon. Technol. Lett.*, vol. 7, n. 9, pp. 983-985, 1995.
- [5] T. Yamamoto, Y. Miyajima, T. Komukai, and T. Sugawa, “1.9 μm Tm-Doped Fluoride Fibre Amplifier and Laser pumped at 1.58 μm ”, *Electron. Lett.*, vol. 29, n. 11, pp. 986-987, 1993.

- [6] T. Yamamoto, Y. Miyajima, and T. Komukai, “1.9 μm Tm-Doped Silica Fibre Laser pumped at 1.57 μm ”, *Electron. Lett.*, vol. 30, n. 3, pp. 220–221, 1994.
- [7] T. Komukai, T. Yamamoto, T. Sugawa, and Y. Miyajima, “Efficient upconversion pumping at 1.064 μm of Tm³⁺-Doped Fluoride Fibre Laser operating around 1.47 μm ”, *Electron. Lett.*, vol. 28, n. 9, pp. 830–832, 1992.
- [8] Y. Miyajima, T. Komukai, and T. Sugawa, “1W CW Tm-Doped Fluoride Fiber Laser at 1,47 μm ”, *Electron. Lett.*, vol. 29, n. 8, pp. 660-661, 1993.
- [9] W. Tian, and B. R. Reddy, “Ultraviolet upconversion in thulium-doped fluorozirconate fiber observed under two-color excitation”, *Opt. Lett.*, vol. 26, n. 20, pp. 1580-1582, 2001.
- [10] R. Allen, L. Esterowitz, and I. Aggarwal, “An Efficient 1.46 μm Thulium Fiber Laser via a Cascade Process”, *IEEE J. Quantum Electron.*, vol. 29, n. 2, pp. 303-306, 1993.
- [11] R. M. Percival, D. Szebesta, C. P. Seltzer, S. D. Perrin, S. T. Davey, and M. Louka, “A 1.6 μm Pumped 1.9 μm Thulium-Doped Fluoride Fiber Laser and Amplifier of Very High Efficiency”, *IEEE J. Quantum Electron.*, vol. 31, n. 3, pp. 489-493, 1995.
- [12] R. M. Percival, D. Szebesta, and J. R. Williams, “Highly efficient 1,064 μm upconversion pumped 1,47 μm Thulium doped fluoride fibre laser”, *Electron. Lett.*, vol. 30, n. 13, pp.1057-1058, 1994.
- [13] T. Kasamatsu, Y. Yano, and T. Ono, “Gain-Shifted Dual-Wavelength-Pumped Thulium-Doped Fiber Amplifier for WDM Signals in the 1.48–1.51- μm Wavelength Region”, *IEEE Photon. Technol. Lett.*, vol. 13, n. 1, pp. 31-33, 2001.
- [14] J. Singh, *Semiconductor Optoelectronics: Physics and Technology*. McGraw-Hill International Editors, 1995.
- [15] S. Aozasa, H. Masuda, T. Sakamoto, K. Shikano, and M. Shimizu, “Gain-shifted TDFA employing high concentration doping technique with high internal power conversion efficiency of 70%”, *Electron. Lett.*, vol. 38, n. 8, pp. 361–363, 2002.
- [16] S. Aozasa, H. Masuda, H. Ono, T. Sakamoto, T. Kanamori, Y. Ohishi, and M. Shimizu, “1480-1510nm band Tm-doped fibre amplifier with high power conversion efficiency of 42%”, *Electron. Lett.*, vol. 37, n. 19, pp. 1157-1158, 2001.
- [17] S. Aozasa, H. Masuda, H. Ono, T. Sakamoto, T. Kanamori, Y. Ohishi, and M. Shimizu, “1480-1510 nm-band Tm doped fiber amplifier (TDFA) with a high power conversion efficiency of 42%”, *In Postdeadline Papers of Optical Fiber Communication Conference and Exhibit 2001*, PD1, Anaheim, EUA, 2001.

- [18] T. Hayakawa, F. Akinaga, T. Kuniyasu, K. Matsumoto, and T. Fukunaga., “Highly reliable and high-power operation of 1.05 μ m InGaAs/GaAsP strain-compensated single-quantum-well laser diodes for pumping Tm-Doped fiber amplifiers”, *In Technical Digest of Optical Fiber Communication Conference and Exhibit 2002*, ThN1, pp. 479 – 481, Anaheim, EUA, 2002.
- [19] B. Bourliaguet, F. Émond, S. Mohrdiek, A.-C. Jacob-Poulin, P.-Y. Cortès, and J. Lauzon, “Thulium-doped fibre amplifier using 1055nm Laser diode pumping configuration”, *Electron. Lett.*, vol. 38, n. 10, pp. 447–448, 2002.
- [20] T. Kasamatsu, Y. Yano, and T. Ono, “Laser-Diode-Pumped Highly Efficient Gain-Shifted Thulium-Doped Fiber Amplifier Operating in the 1480–1510-nm Band”, *In Technical Digest of Optical Fiber Communication Conference and Exhibit 2001*, vol. 2, TuQ4, Anaheim, EUA, 2001.
- [21] M. J. F. Dignonet, “Closed Form Expression for the Gain in three- and Four-Level Laser Fibers”, *IEEE J. Quantum Electron.*, vol. 26, n. 10, pp. 1788-1796, 1990.
- [22] A. A. Rieznik, G. S. Wiederhecker, H. L. Fragnito, M. T. Carvalho, M. L. Sundheimer, A. S. L. Gomes, C. J. A. Bastos-Filho, and J. F. Martins-Filho, “Black Box Model for Thulium Doped Fiber Amplifiers”, *In Technical Digest of Optical Fiber Communication Conference and Exhibit 2003*, vol. 2, pp. 627-628, Atlanta, EUA, 2003.
- [23] J. Heo, J. H. Song, S. H. Park, and M. H. Do, “Dysprosium and Thulium-doped chalcide glass fibers for 1.3 μ m and S-band amplification”, *In Technical Digest of Optical Fiber Communication Conference and Exhibit 2002*, ThZ5, pp. 574 – 575, Anaheim, 2002.
- [24] B. Cole, and M. L. Dennis, “S-band amplification in a thulium doped silicate fiber”, *In Technical Digest of Optical Fiber Communication Conference and Exhibit 2001*, vol. 2, TuQ3, Anaheim, EUA, 2001.
- [25] S. Shen, M. Naftaly, A. Jha, and S. J. Wilson, “Thulium-doped tellurite glasses for S-band amplification”, *In Technical Digest of Optical Fiber Communication Conference and Exhibit 2001*, vol. 2, TuQ6, Anaheim, EUA, 2001.
- [26] T. Segi, T. Aizawa, T. Sakai, and A. Wada, “Silica-based composite fiber amplifier with 1480-1560nm seamless gain-band”, *In Technical Digest of 27th European Conference on Optical Communication*, vol. 2, pp. 228-229, Amsterdã, Holanda, 2001.

- [27] Y. Nishida, K. Fujiura, K. Hoshino, M. Shimizu, M. Yamada, K. Nakagawa, and Y. Ohishi, "Reability of Fluoride Fiber Module for Optical Amplifier Use", *IEEE Photon. Technol. Lett.*, vol. 11, n. 12, pp. 1596-1598, 1999.
- [28] S. Aozasa, T. Sakamoto, T. Kanamori, K. Hoshino, and M. Shimizu, "Gain-shifted thulium-doped fibre amplifiers employing novel high concentration doping technique", *Electron. Lett.*, vol. 36, n. 5, pp. 418–419, 2000.
- [29] T. Kasamatsu, Y. Yano, and H. Sekita, "1.50- μm - band gain-shifted thulium-doped fiber amplifier with 1.05- and 1.56- μm dual-wavelength pumping", *Optics Letters*, vol. 24, n. 23, pp. 1684–1686, 1999.
- [30] F. Roy, "Recent advances in Thulium-doped fiber amplifiers", *In Technical Digest of Optical Fiber Communication Conference and Exhibit 2002*, ThZ1, pp. 568 – 570, Anaheim, EUA, 2002.
- [31] S. Tanabe, and T. Tamaoka, "Gain Characteristics of Tm-doped Fiber Amplifier by Dual-wavelength pumping with Tunable L-band Source", *In Technical Digest of Optical Fiber Communication Conference and Exhibit 2002*, ThZ4, pp. 572 – 574, Anaheim, EUA, 2002.
- [32] J. Hecht, "S-band amplification: challenges developers", *Laser Focus World*, pp. 79-84, Jul., 2002.
- [33] J. F. Martins-Filho, C. J. A. Bastos-Filho, M. T. Carvalho, M. L. Sundheimer, and A. S. L. Gomes, "Dual-Wavelength (1050 nm + 1550 nm) Pumped Thulium-Doped Fiber Amplifier Characterization by Optical Frequency-Domain Reflectometry", *IEEE Photon. Technol. Lett.*, vol. 15, no. 1, pp. 24-26, 2003.
- [34] C. J. A. Bastos-Filho, J. F. Martins-Filho, M. T. Carvalho, M. L. Sundheimer, and A. S. L. Gomes, "Dual Wavelength (1050nm + 1550nm) Pumped Thulium Doped Fiber Amplifier Characterization by Optical Frequency Domain Reflectometry", nos anais X Simpósio Brasileiro de Microondas e Optoeletrônica 2002, pp. 526 – 530, Recife/PE, Brasil, 2002.
- [35] C. J. A. Bastos-Filho, "Amplificadores ópticos a fibra dopada com Túlio para a banda S", *Dissertação de mestrado*, Programa de Pós-graduação em Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Pernambuco, Recife/PE, 2003.
- [36] F. Roy, D. Bayart, A. Le Sauze, and P. Baniel, "Noise and gain band management of thulium-doped fiber amplifier with dual-wavelength pumping schemes", *IEEE Photon. Technol. Lett.*, vol.13, n.8, pp. 788-790, 2001.

- [37] F. Roy, P. Baniel, C. Fages, J. J. Girard, A. Le Sauze, and D. Bayart, "Optimal pumping schemes for gain-band management of thulium-doped fiber amplifiers", *In Technical Digest of Optical Fiber Communication Conference and Exhibit 2001*, vol. 2, TuQ7, Anaheim, EUA, 2001.
- [38] T. Sakamoto, "S-band fiber optic amplifiers", *In Technical Digest of Optical Fiber Communication Conference and Exhibit 2001*, vol. 2, TuQ1, Anaheim, EUA, 2001.
- [39] F. Roy, F. Leplingard, L. Lorcy, A. Le Sauze, P. Baniel, and D. Bayart, "48% power conversion efficiency in single pump gain-shifted thulium-doped fibre amplifier", *Electron. Lett.*, vol. 37, n. 15, pp. 943-945, 2001.
- [40] F. Roy, F. Leplingard., L. Lorcy, A. Le Sauze, P. Baniel, and D. Bayart, "48% power conversion efficiency in a single-pump gain-shifted thulium-doped fiber amplifier", *In Postdeadline papers of Optical Fiber Communication Conference and Exhibit 2001*, PD2, Anaheim, EUA, 2001.
- [41] A. S. L. Gomes, M. T. Carvalho, M. L. Sundheimer, C. J. A. Bastos-Filho, J. F. Martins-Filho, J. P. von der Weid, and W. Margulis, "Low pump power, short-fiber co-propagating dual-pumped (800 nm + 1050 nm) thulium doped fiber amplifier", *Opt. Lett.*, vol.28, n.5, pp. 334-336, 2003.
- [42] A. S. L. Gomes, M. L. Sundheimer, M. T. Carvalho, J. F. Martins-Filho, C. J. A. Bastos-Filho, and W. Margulis, "Novel Dual Wavelength (1050nm + 800nm) Pumping Scheme for Thulium Doped Fiber Amplifiers", *In Postdeadline papers Optical Fiber Communication Conference and Exhibit 2002*, paper FB2, Anaheim, EUA, 2002.
- [43] A. S. L. Gomes, M. L. Sundheimer, M. T. Carvalho, J. F. Martins-Filho, C. J. A. Bastos-Filho, and W. Margulis, "Methods and arrangements in a pumped fiber amplifier", Patente n. WO 03077384, disponível em: <http://v3.espacenet.com/origdoc?DB=EPODOC&IDX=WO03077384&QPN=WO03077384,2003>.
- [44] C. Floridia, M. T. Carvalho; M. L. Sundheimer, and A. S. L. Gomes, "Modeling the distributed gain of single (1050 nm or 1400 nm) and dual-wavelength (800 nm + 1050 nm or 800 nm + 1410 nm) pumped TDFAs", *In Technical Digest of Optical Fiber Communication Conference and Exhibit 2004*, vol. 1, Los Angeles, EUA, Feb, 2004.
- [45] E. V. Vanin, U. Persson, and G. Jacobsen, "Spectral Functional Forms for Gain and Noise Characterization of Erbium-Doped Fiber Amplifiers," *J. Lightwave Technol.* Vol. 20, pp. 243-249, 2002.

Capítulo 4 – TDFA com bombeamento duplo em 800 nm e 1050 nm

Os esquemas de bombeamento para amplificadores a fibra dopada com Túlio (TDFA, *Thulium Doped Fiber Amplifiers*) utilizam o processo de conversão ascendente de energia, onde um elétron é excitado sequencialmente por dois fótons (*ver detalhamento no capítulo 3*). A forma como estes fótons são absorvidos é determinada pelo esquema de bombeamento empregado. Com o intuito de se construir amplificadores capazes de prover eficiência de conversão de potência mais alta, a busca por novos esquemas de bombeamento tornou-se um ponto importante para o desenvolvimento de configurações comerciais.

No capítulo anterior, foram expostas possibilidades para esquemas de bombeamento monocromático (1050 nm ou 1400 nm), bem como esquemas de bombeamento mais complexos com dois comprimentos de onda distintos. Nestes esquemas de bombeamento, geralmente um dos comprimentos de onda fica praticamente responsável pela absorção de estado fundamental e o outro pela absorção de estado excitado [1].

A Figura 4.1 mostra o diagrama de níveis de energia para o novo esquema de bombeamento duplo (800 nm + 1050 nm) proposto por nosso grupo de pesquisa [2-4]. A maior vantagem deste esquema consiste do emprego do comprimento de onda por volta de 800 nm para gerar população diretamente no nível de amplificação superior (3H_4) cuja transição tem alta seção de choque de absorção associada, enquanto que o bombeamento em 1050 nm torna-se responsável por evitar a diminuição da inversão de população (*ver definição no capítulo 2*), causada pela diferença entre os tempos dos níveis de amplificação inferior (3F_4) e superior (3H_4). Este processo facilita a amplificação, pois embora o bombeamento monocromático em 1050 nm seja capaz de gerar ganho, este necessita de alta potência, devido ao baixo valor da seção de choque de absorção do estado fundamental (3H_6) para o estado 3F_4 por meio do nível 3H_5 .

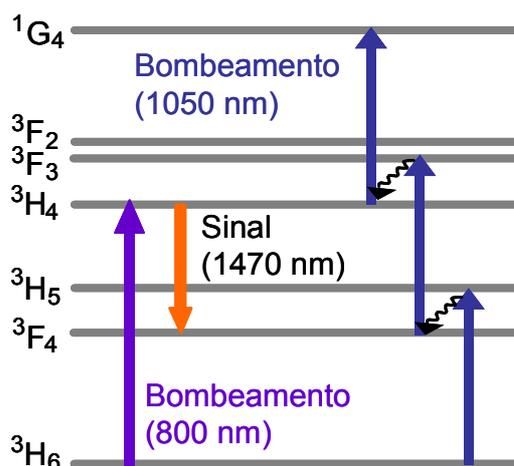


Figura 4.1 – Diagrama de energia para bombeamento duplo de fibras ZBLAN dopadas com Túlio em 1050 nm e 800 nm.

4.1 – Montagem Experimental do amplificador com bombeamento duplo em 800 nm e 1050 nm

A Figura 4.2 mostra o esquema de montagem experimental do TDFA com bombeamento duplo em 800 nm e 1050 nm. O bombeamento em 1050nm é realizado com um laser de fibra de Itérbio bombeado com diodo laser no sentido copropagante com o sinal. O acoplamento deste bombeamento é realizado utilizando um acoplador direcional. A outra saída do WDM foi utilizada para monitorar as potências ópticas na fibra dopada com Túlio. Nas medidas da seção 4.2, um analisador de espectro óptico (**OSA**, *Optical Spectrum Analyser*) foi utilizado para medição de ganho e figura de ruído do amplificador.

A segunda fonte de bombeamento utilizada, com comprimento de onda em torno de 800 nm, é um laser CW (*Continuous Wave*) sintonizável de Titânio-Safira. A inserção do bombeamento é realizada no sentido contrapropagante e esta, bem como a retirada do sinal, foi realizada em espaço livre utilizando um separador de feixe (*beam splitter*). É importante frisar que um laser de diodo também poderia ter sido usado para bombeamento em 800 nm, tornando o amplificador compacto. O laser de sinal tem um único modo longitudinal e é sintonizável continuamente entre 1456 nm e 1584 nm.

A fibra dopada com Túlio, contida dentro de um módulo hermeticamente fechado, tem 15 m de comprimento e é emendada a fibras padrão monomodo de sílica. Demais características da fibra dopada estão descritas na tabela 4.1. A porta de entrada do

amplificador tem um isolador óptico para evitar que algum bombeamento residual seja injetada no laser de sinal e cause danos ao mesmo.

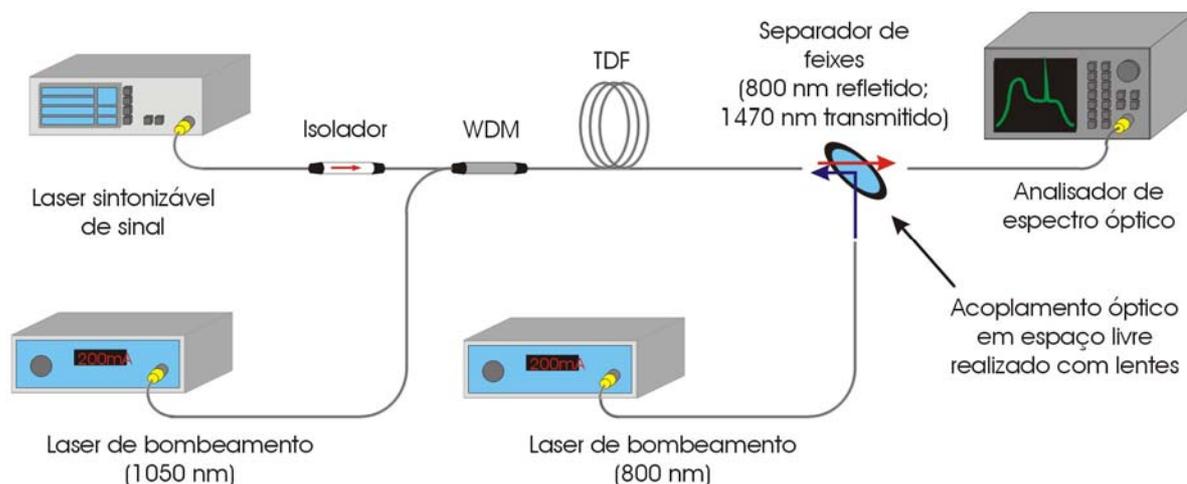


Figura 4.2 – Esquema de montagem do TDFA com bombeamento duplo em 800 nm e 1050 nm.

Tabela 4.1 – Dados da fibra dopada com Túlio, módulo #1.

Composição da fibra	ZrF ₄ -BaF ₂ -LaF ₃ -AlF ₃ -NaF
Dopante	Tm ³⁺
Concentração de dopante	2000 ppm
Abertura numérica	0,238
Comprimento de onda de corte	880 nm
Diâmetro do núcleo	2,8 μm
Diâmetro da casca	125 μm
Comprimento da fibra dopada	15 m

4.2 – Resultados obtidos para o amplificador com bombeamento duplo em 800 nm e 1050 nm

Na figura 4.3, estão expostos os espectros de emissão espontânea amplificada para três situações diferentes de bombeamento: 73 mW de potência de bombeamento em 800 nm, 80 mW de potência de bombeamento em 1050 nm e a combinação dos dois lasers de bombeamento com as respectivas potências. Nota-se o aumento na potência de ASE no caso onde os bombeamentos são combinados, mostrando o aumento de potência de ASE.

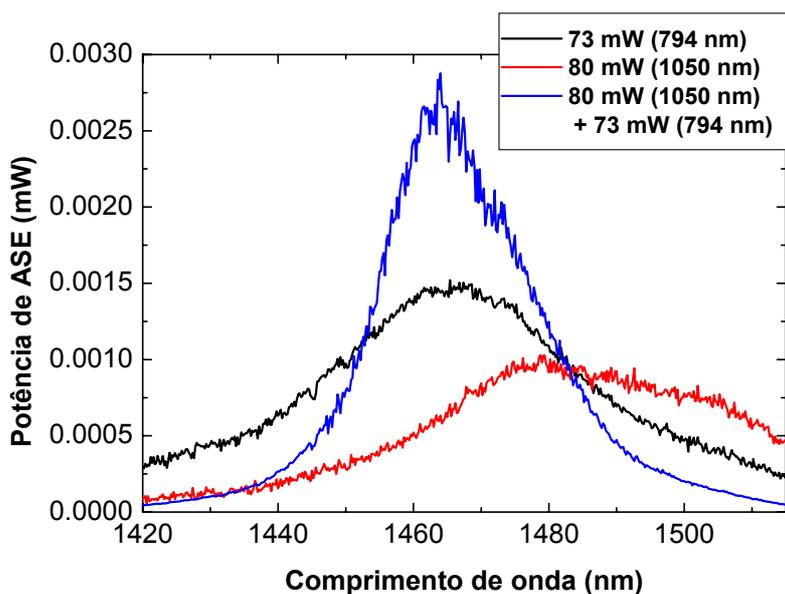


Figura 4.3 – Espectro de luminescência gerado pelos lasers de bombeamento de: 73mW em 800nm (linha preta), 80mW em 1050nm (linha vermelha) e a combinação dos dois bombeamentos (linha azul).

Na Figura 4.4, está mostrado o ganho do módulo contendo a fibra dopada com Túlio em função do comprimento de onda do sinal, para bombeamento monocromático em 1050 nm com potência de 80 mW e para o esquema de bombeamento duplo, onde foram adicionados 73 mW de potência em 794 nm (valor convenientemente próximo à 800 nm fornecido pelo laser de bombeamento disponível). A potência de sinal utilizada foi de -27,2 dBm. O aumento no ganho de pequenos sinais quando adicionado o bombeamento em 794 nm ao de 1050 nm é bastante expressivo, sendo de aproximadamente 20 dB.

É importante salientar que o bombeamento monocromático por volta de 800 nm não é suficiente para criar inversão de população (*ver capítulo 3*) e por isto não foi usado como parâmetro de comparação. Entretanto, para a potência de 1050 nm empregada, valores de ganho muito pequenos (entre 7 dB e 8 dB) foram obtidos. Medidas anteriores nesta fibra mostraram que ganhos acima de 20 dB podem ser obtidos com potência maior do que 300 mW de bombeamento monocromático em 1050 nm. No esquema de bombeamento duplo (800 nm + 1050 nm), um ganho maior que 20 dB em uma banda de 40 nm (*dentro da banda S*) foi obtido para uma potência total de bombeamento de 153 mW. Mostrando uma melhora na PCE, diminuindo a potência incidente sobre as emendas da fibra dopada com Túlio e melhorando assim sua confiabilidade.

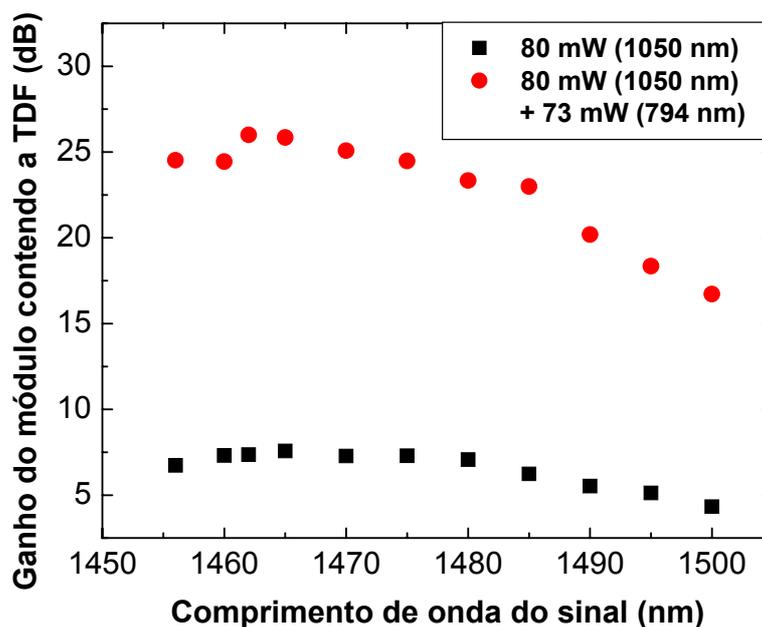


Figura 4.4 – Ganho do módulo contendo a TDF para: bombeamento 80 mW em 1050 nm (quadrados) e para bombeamento duplo em 1050 nm (80 mW) e 800 nm (73 mW) (círculos) em função do comprimento de onda do sinal.

Na Figura 4.5, está apresentado o ganho do módulo contendo a fibra dopada em função da potência de bombeamento de 1050 nm para um conjunto de valores de potência de bombeamento em 794 nm variando entre 0 mW e 80 mW. O comprimento de onda do sinal utilizado foi de 1462 nm com potência -27,2 dBm. Pode-se observar um grande aumento do ganho quando o bombeamento em 794 nm é adicionado.

Nota-se que na ausência do bombeamento de 1050nm, ocorre perda no módulo contendo a fibra. Esta perda aumenta quando ocorre um aumento na potência de bombeamento em 794 nm, devido à absorção de estado excitado do sinal de 1470nm a partir do nível de amplificação inferior (3F_4), que tem um tempo de vida maior do que o nível de amplificação superior (3H_4).

Também é válido ressaltar que a saturação do amplificador em relação à potência de bombeamento não foi atingida, indicando que é possível atingir ganhos mais altos com maior potência de bombeamento.

Para a máxima potência de bombeamento utilizada (100 mW em 1050 nm com 80 mW de 794 nm), foi medido um ganho de 29,5 dB. Fazendo uma extrapolação linear da

curva para bombeamento monocromático em 1050 nm, seriam necessários aproximadamente 300 mW para a obtenção do mesmo ganho, demonstrando uma significativa redução de potência total de bombeamento com a adição do segundo bombeamento.

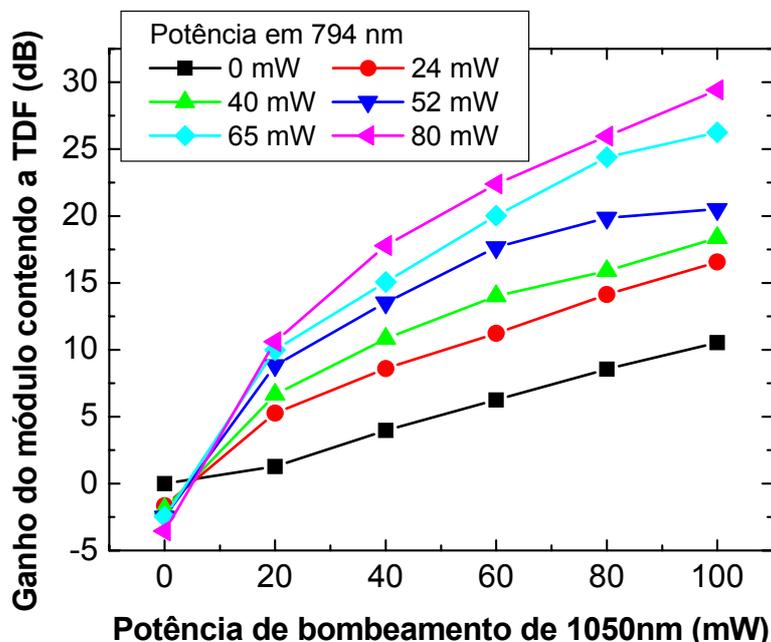


Figura 4.5 – Ganho do módulo contendo a TDF em função da potência de bombeamento de 1050 nm parametrizado pela potência de bombeamento em 794 nm. O comprimento de onda sinal é 1462 nm e a potência é de -27,2 dBm.

4.3 – Reflectometria óptica no domínio da frequência para medição de Ganho distribuído

O aspecto mais importante da técnica de reflectometria óptica coerente no domínio da frequência (COFDR, *Coherent Optical Frequency Domain Reflectometry*) [5-18] é a capacidade de obtenção do ganho distribuído experimentado pelo sinal ao longo da fibra dopada com o intuito de otimizar seu comprimento [5-12]. Existem outras técnicas, como o método de corte ou técnicas no domínio do tempo.

No método de corte, a fibra é cortada até que se encontre o comprimento para o qual o ganho é maximizado, mas esta é uma técnica que além de limitada em sensibilidade e resolução, é destrutiva, gerando desperdício de material.

Já as técnicas no domínio do tempo, que se baseiam na medição do retro-espalhamento Rayleigh, são normalmente usadas para caracterização de vários quilômetros de fibra óptica com resolução de algumas dezenas de metros.

A COFDR é uma alternativa poderosa às técnicas mencionadas acima, sendo baseada na detecção coerente da luz proveniente do dispositivo ou fibra sob teste, melhorando a sensibilidade. Contudo, o alcance é limitado pela largura de linha do laser, sendo necessária uma largura de linha menor para um maior alcance [13]. Um aspecto relevante é que esta técnica filtra naturalmente o ASE.

A técnica consiste basicamente na análise em frequência do batimento entre o sinal proveniente de um oscilador local, utilizado como referência, e o sinal proveniente de reflexões internas do dispositivo sob teste, como ilustrado na figura 4.6. Para distinguir cada ponto interno do dispositivo sob teste, o laser de sinal é modulado linearmente em frequência. A técnica utiliza um esquema baseado no interferômetro de Michelson [9-13]. Com um acoplador direcional de 3 dB, uma parte do sinal refletido pelo espelho (oscilador local), junto com uma parte do sinal refletido ao longo do dispositivo sob teste incidem no fotodetector. Para cada ponto dentro do dispositivo, o sinal refletido apresenta uma certa diferença de frequência em relação à referência devido à diferença de comprimento no caminho óptico. Tomando o batimento realizado no fotodetector, é possível obter o comportamento do dispositivo com um analisador de espectro elétrico (**ESA**, *Electric Spectrum Analyser*) que calcula a Transformada Rápida de Fourier (**FFT**, *Fast Fourier Transform*).

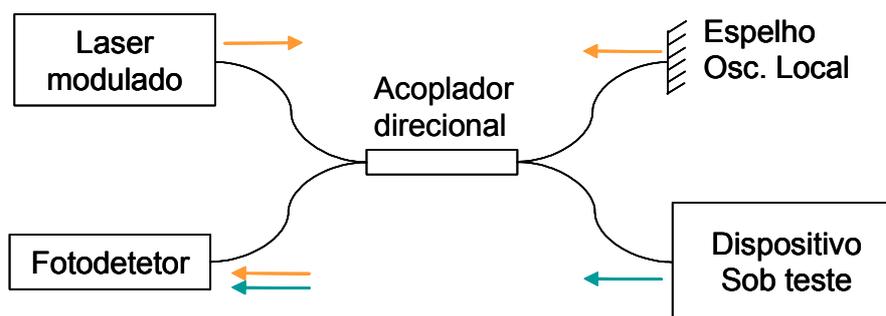


Figura 4.6 – Esquema de funcionamento do OFDR baseado no interferômetro de Michelson.

Considere-se um sinal lançado no sistema e com a potência dividida para dois caminhos ópticos. Para o sinal refletido em uma dada localidade dentro do dispositivo, existe um tempo de atraso (τ) em relação ao sinal refletido pelo oscilador local. Devido a este atraso e à modulação linear da frequência do laser de sinal, para um sinal lançado em

um certo instante de tempo pelo laser, tem-se no fotodetector uma diferença de frequência proporcional ao atraso. Como o atraso depende do caminho óptico percorrido, então a diferença de frequência é diretamente proporcional à distância entre o oscilador local e o ponto em questão [5-11]. Ao mesmo tempo, a intensidade para cada frequência de batimento é dada pelo quadrado da amplitude do sinal de batimento em uma dada frequência, que é proporcional ao campo elétrico da luz refletida.

Para um modelo matemático simples, considere-se um laser de sinal cuja frequência é modulada linearmente de acordo com a seguinte expressão:

$$E(t) = E e^{j\omega(t)t} \quad (4.1)$$

onde, E é a amplitude do campo elétrico inserido pelo laser modulado e $\omega(t)$ é a frequência instantânea. Assumindo que o coeficiente de variação de frequência β é constante e não influi na forma do espectro do laser de sinal, e considerando que após o interferômetro, o termo de interferência na intensidade da luz é dado por:

$$I(t) = 2 \operatorname{Re}[E_{OL}(t)E_R^*(t-\tau)], \quad (4.2)$$

onde $E_{OL}(t)$ é o campo elétrico refletido proveniente do oscilador local e $E_R(t)$ é o campo elétrico proveniente do dispositivo sob teste, tem-se que os campos $E_{OL}(t)$ e $E_R(t)$ têm as seguintes expressões:

$$E_{OL}(t) = |E_{OL}| e^{j\omega_0 t}, \quad (4.3)$$

$$E_R(t-\tau) = |E_R| e^{j(\omega_0 - \beta\tau)(t-\tau)}, \quad (4.4)$$

onde a frequência do sinal refletido no dispositivo sob teste é menor do que a do sinal proveniente do oscilador local devido ao atraso.

Substituindo as equações 4.3 e 4.4 na equação 4.2, tem-se:

$$I(t) = 2|E_{OL}||E_R| \operatorname{Re}[e^{j\omega_0 t} e^{-j(\omega_0 - \beta\tau)(t-\tau)}], \quad (4.5)$$

ou equivalentemente,

$$I(t) = 2|E_{OL}||E_R| \operatorname{Re}\left[e^{j[(\beta\tau)t + (\omega_0\tau - \beta\tau^2)]}\right], \quad (4.6)$$

onde a frequência do sinal detectado é $\beta\tau$, ou seja, é proporcional ao atraso dentro do dispositivo, e por consequência à distância dentro da fibra dopada para o caso de caracterização do ganho distribuído ao longo da fibra.

As principais fontes de ruído envolvidas no processo são [13]: flutuações de intensidade de luz do laser, ruído balístico, ruído de fase do laser, ruído do amplificador eletrônico e dos circuitos de controle. Tais fontes são proporcionais à largura de linha de medida, de forma que diminuindo a largura de linha, pode-se aumentar a sensibilidade.

O ruído de fase do laser, uma das principais componentes de ruído, é responsável pelas flutuações de fase entre o sinal refletido no dispositivo e o sinal de referência e é proporcional à distância do ponto de reflexão no dispositivo sob teste ao oscilador local, bem como à intensidade da reflexão. Portanto, para sistemas de alta sensibilidade pequenas reflexões são requeridas, principalmente em pontos distantes do oscilador local.

A máxima distância detectável é limitada pelo comprimento de coerência do laser, dado por:

$$L_C = \frac{c}{\pi \Delta f}, \quad (4.7)$$

onde Δf é a largura de linha do laser e c é a velocidade da luz.

Além disso, uma pequena diferença entre o caminho óptico do oscilador local e a porta que conecta o dispositivo sob teste, compondo um interferômetro de *Michelson*, pode gerar um batimento em baixas frequências. Isto pode ser resolvido ajustando a frequência mínima percebida pelo fotodetector. A frequência mínima utilizada para detecção nos experimentos mostrados neste capítulo foi de 300 Hz.

Outro aspecto importante para justificar o ajuste de uma frequência mínima na caracterização de um amplificador é a componente de emissão espontânea proveniente do amplificador no comprimento de onda de detecção, pois esta é detectada com frequência de batimento igual a zero.

4.4 – Montagem experimental e resultados de ganho distribuído utilizando a técnica de COFDR

O esquema experimental empregado para a aquisição de dados utilizando a técnica de COFDR está mostrado na figura 4.7. Pode-se distinguir o interferômetro de Michelson formado pelo acoplador direcional de 3 dB e o oscilador local (*OL*), que no caso é um conector de fibra tipo FC/PC com um espelho metálico acoplado. O dispositivo sob teste é o TDFA. Um isolador foi disposto logo após o laser de sinal para evitar que a luz proveniente do oscilador local, bem como a luz retroespalhada pelo TDFA, afete o mesmo.

O laser de sinal é sintonizável e permite modulação interna linear do comprimento de onda através da aplicação de tensão em um material piezo-elétrico. Um gerador de funções operando com uma onda triangular foi usado como sinal modulador do laser, que também foi utilizado para gerar o sinal de sincronismo, necessário para que o analisador de espectro elétrico que calcula a FFT sincronize a aquisição de dados na região onde a onda triangular é mais linear. Para evitar não linearidades um nível de tensão contínuo foi adicionado ao sinal de modulação. O osciloscópio tem a função de monitorar o sinal modulador do laser e o recebido pelo ESA.

Um filtro composto de um circulador óptico associado a uma fibra com rede de difração de Bragg (**FBG**, *Fiber Bragg Grating*) é utilizado. Como a FBG tem um espectro de reflectância estreito, este conjunto é capaz de filtrar a ASE, evitando assim a saturação do fotodetector e diminuindo o ruído nas medidas. A FBG utilizada tem comprimento de onda central em 1480 nm e largura espectral de 0,8 nm.

Na figura 4.8 pode-se ver a foto da caixa contendo os elementos ópticos do sistema que realiza a reflectometria óptica coerente no domínio da frequência. Na figura 4.9 pode-se ver a foto dos equipamentos utilizados durante as medições com a técnica de COFDR, onde estão apresentados: o gerador de funções (esquerda acima), laser sintonizável (esquerda abaixo), osciloscópio (direita acima) e ESA (direita abaixo).

Na tabela 4.2 estão descritos alguns parâmetros com seus respectivos valores utilizados durante os experimentos. O intervalo entre as medidas está relacionado à frequência de modulação do laser de sinal (8 Hz), no caso metade do período (62,5 ms), já que a aquisição de dados ocorreu sempre na rampa de subida de uma onda triangular. O tempo de aquisição de dados para o ESA é de apenas 4 ms. O ponto de aquisição não deve

ser no final da rampa de subida para que não ocorram medidas fora da região linear causada por ruído.

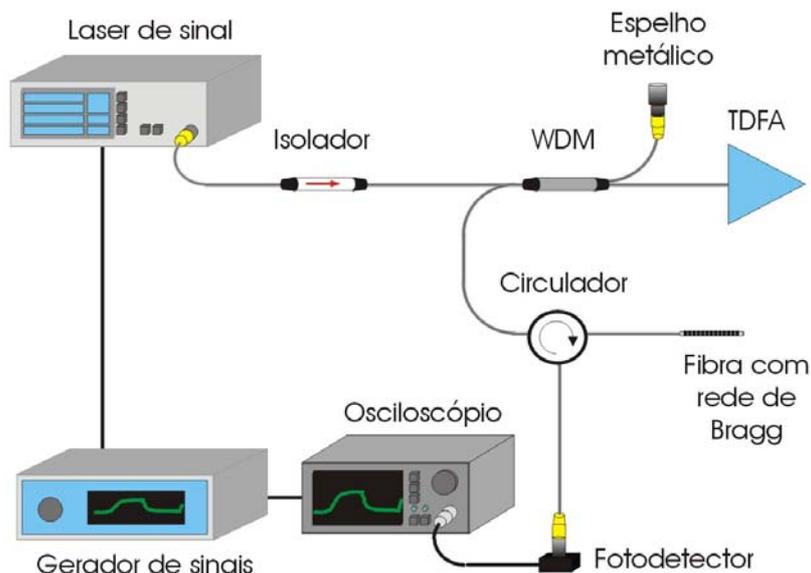


Figura 4.7 – Montagem experimental do equipamento que realiza a reflectometria óptica no domínio da frequência.

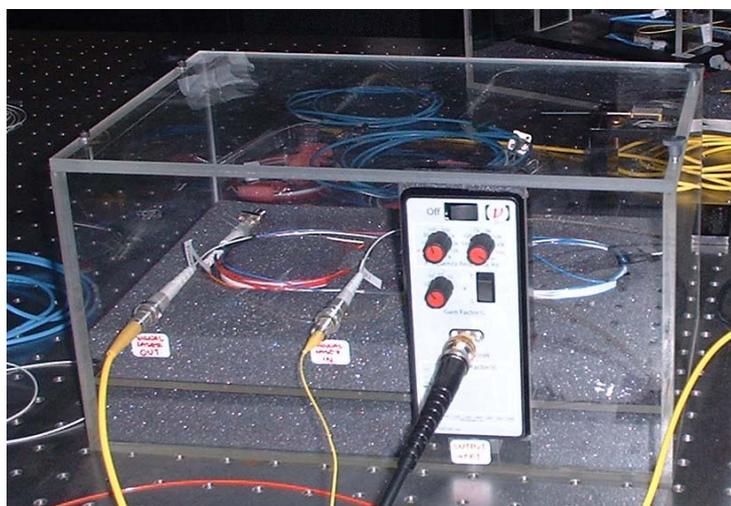


Figura 4.8 – Foto da Montagem experimental do COFDR, que contém o acoplador direcional, o oscilador local, o circulador, a fibra com a rede de difração de Bragg e o fotodetector.

Tabela 4.2 – Parâmetros experimentais utilizados nas medidas com COFDR.

Intervalo entre as medidas	62,5 ms
Tempo de aquisição do ESA	4 ms
Varredura efetiva utilizada	300 MHz
Velocidade de aquisição	960 espectros por minuto
Resolução	30 cm



Figura 4.9 – Fotos dos equipamentos utilizados nas medições com a técnica de COFDR. Gerador de funções (esquerda acima), laser sintonizável (esquerda abaixo), osciloscópio (direita acima) e ESA (direita abaixo).

A resolução está relacionada com a varredura efetiva de frequência do laser, que no caso corresponde a 300 MHz. Para um laser ideal, o espaçamento entre as frequências de Fourier determina a resolução e é dada por:

$$\Delta L = \frac{c}{2n \cdot \Delta \nu}, \quad (4.8)$$

onde $\Delta \nu$ é a varredura total de frequências ópticas e n é o índice de refração do meio.

Considerando o índice de refração aproximadamente 1,5 e varredura efetiva utilizada de 300 MHz, a resolução é de 30 cm. Sendo este um valor razoável para caracterização de amplificadores ópticos a fibras dopadas.

O ganho da fibra é considerado como a diferença entre a intensidade do sinal refletido quando a fibra é bombeada e quando não é bombeada dividida por dois, já que o sinal é submetido ao meio ativo tanto na propagação, quanto na retropropagação [5-8, 10]. É importante frisar que este método é bastante adequado para TDFAs pois estes são praticamente transparentes ao sinal quando não existe bombeamento.

A técnica de COFDR torna possível o entendimento da dinâmica e distribuição de ganho dentro da fibra dopada. O TDFa foi montado utilizando o mesmo esquema experimental da Figura 4.2, porém utilizando uma fibra dopada com Túlio com 18 m de comprimento (demais características iguais às descritas na Tabela 4.1). É interessante lembrar que o comprimento de onda utilizado para o sinal nas medidas desta seção foi de 1480nm, definido pela FBG.

Na Figura 4.10, estão apresentados espectros obtidos pelo ESA para várias potências de bombeamento em 1050 nm (0, 80, 160 e 360 mW) com a potência de bombeamento em 800 nm fixa em 60 mW. A potência do sinal foi mantida constante em 0 dBm (1 mW). Os picos finos representam reflexões dos componentes do TDFA, como WDM e emendas da fibra dopada. As emendas de entrada e saída da fibra dopada estão indicadas. Como a frequência é proporcional à diferença de fase entre o sinal refletido do amplificador e do oscilador local, que por sua vez é proporcional ao caminho óptico, então a partir do comprimento total da fibra dopada pode-se converter o eixo de frequência em distância e obter o ganho distribuído na fibra.

A determinação do comprimento ideal para a fibra dopada pode ser obtida por meio de análise das curvas de ganho distribuído na fibra dopada. Tais curvas são obtidas diretamente das medidas do analisador de espectro elétrico, considerando a região entre as emendas da fibra, subtraindo o valor obtido sem bombeamento do valor obtido com bombeamento, e dividindo o resultado por dois. A divisão por dois é necessária para levar em conta o caminho de volta percorrido pelo sinal que retorna ao COFDR. Para esta fibra e sob as condições apresentadas com sinal de 1 mW, foi obtido um ganho máximo de 24 dB, que está de acordo com o método de medição utilizando analisador de espectro óptico.

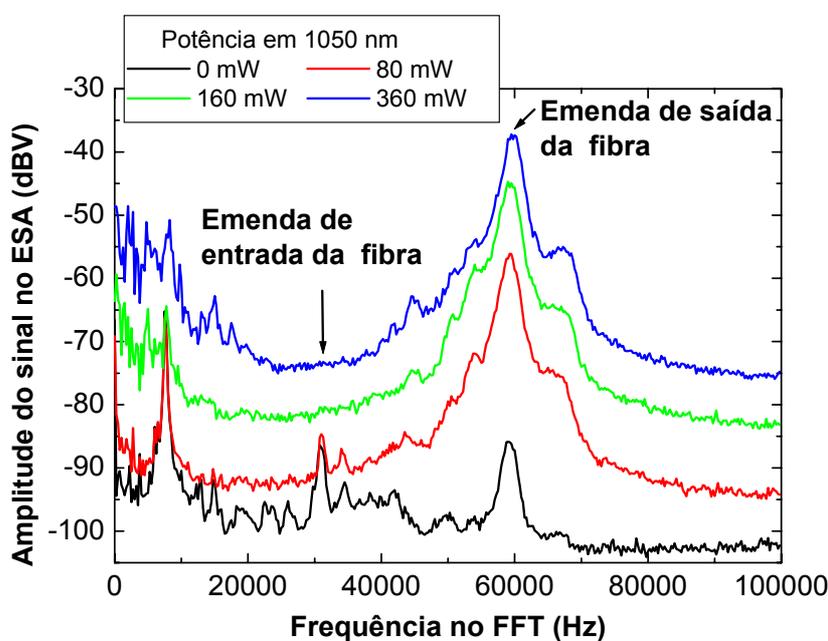
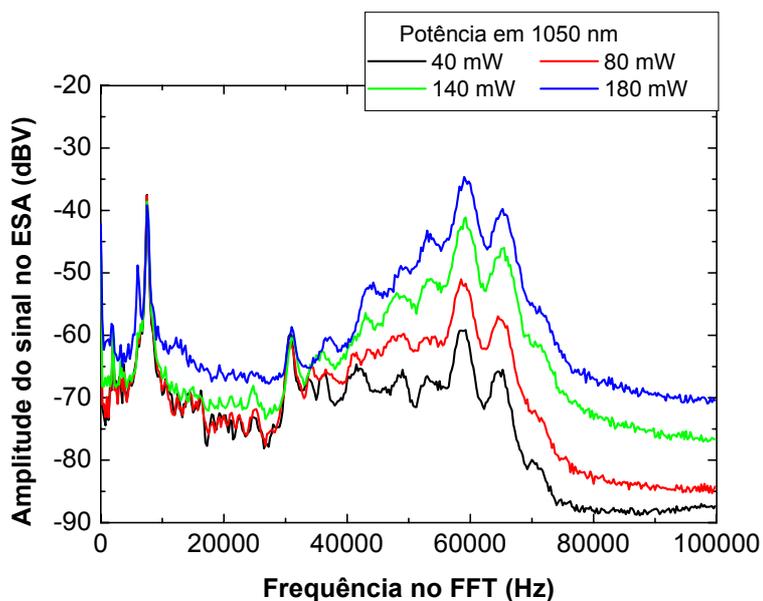
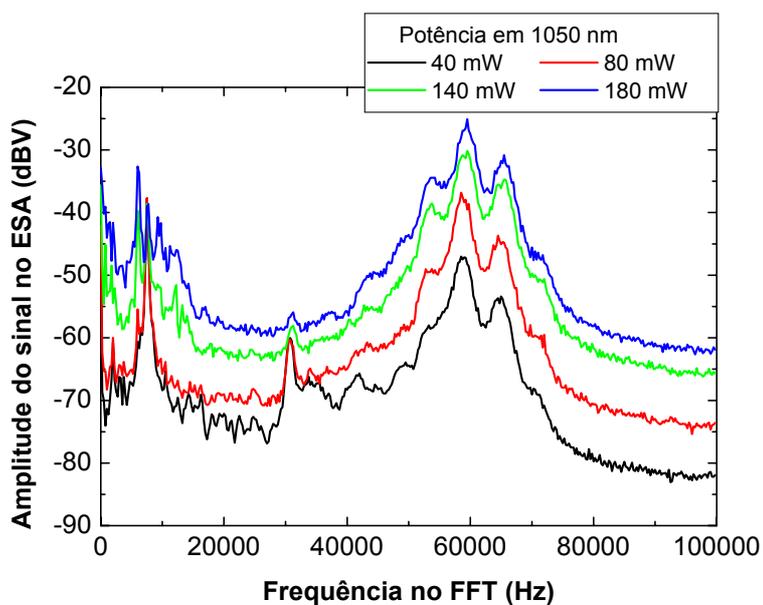


Figura 4.10 – Espectros no analisador de espectro elétrico do COFDR com bombeamento duplo para 60 mW em 800nm e várias potências em 1050nm.

A figura 4.11 apresenta espectros obtidos pelo ESA para várias potências de bombeamento em 1050 nm (40, 80, 140 e 180 mW) sem (a) e com (b) bombeamento em 800 nm, respectivamente. A potência de bombeamento em 800 nm, quando usado é de 45 mW. A potência de sinal é de 2,7 mW. Pode-se notar claramente que com a adição do bombeamento em 800 nm os valores de amplitude do sinal no ESA aumentam.



(a)



(b)

Figura 4.11 – Espectros no analisador de espectro elétrico do COFDR com: (a) bombeamento simples em 1050 nm e (b) bombeamento duplo para várias potências em 1050nm.

A figura 4.12 mostra o ganho distribuído na fibra com bombeamento simples em 1050nm com 140 mW (*círculos*) e duplo (1050 nm + 800 nm) em regime de baixa potência de bombeamento com 140 mW em 1050nm e 45 mW em 800 nm (*quadrados*). A potência do sinal é 2,7 mW. É importante frisar que esta é obtida a partir de figuras como a 4.10 e a 4.11. Como os lasers de bombeamento são absorvidos pela fibra dopada e cada um deles é injetado por uma extremidade da fibra, a interação entre os bombeamentos não é realizada de forma otimizada. A partir de certo comprimento de fibra dopada, o ganho não é alterado significativamente. Pode-se notar que o efeito do bombeamento em 800 nm é mais significativo no final da fibra (6 dB de aumento em relação ao bombeamento de 1050 nm sozinho). A variação de ganho em maior parte da fibra é de 0,5 dB/m, enquanto que na região situada antes da região onde o ganho fica constante a taxa de variação de ganho é de 2,0 dB/m. Concluí-se que no mínimo existe um desperdício de 4 m de fibra dopada com Túlio.

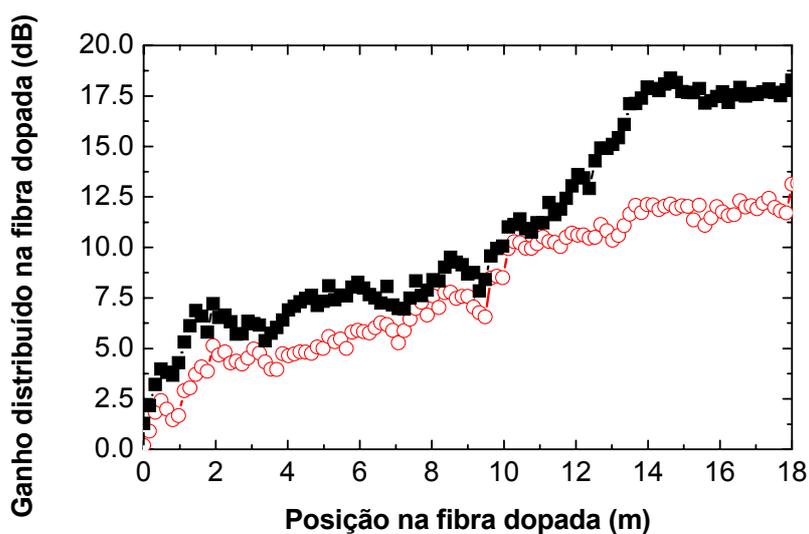


Figura 4.12 – Ganho distribuído na fibra com bombeamento simples em 1050nm com 140 mW (*círculos*) e duplo 1050 nm+ 800 nm em regime de baixa potência (45 mW) de bombeamento em 800 nm (*quadrados*).

A Figura 4.13 mostra medidas com COFDR para condições de bombeamento com altas potências (até 400 mW em 1050 nm e 100 mW em 800 nm). A potência do sinal é 2,7 mW. A variação do ganho é praticamente constante ao longo da fibra (0,9 dB/m), pois nesse caso a potência de bombeamento em 800 nm é suficiente para bombear toda a fibra dopada.

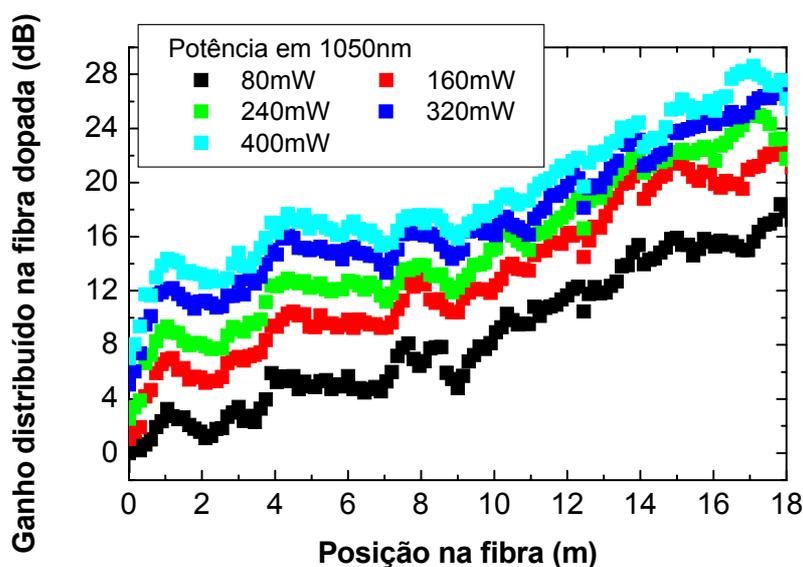


Figura 4.13 – Ganho distribuído na fibra com bombeamento duplo 1050 nm + 800 nm para alta potência de bombeamento em 800 nm (100 mW). A potência do sinal é 2,7 mW.

Para avaliar o efeito da adição do segundo bombeamento (800 nm), foi analisado o ganho obtido da fibra dopada como função da potência de bombeamento em 1050 nm para duas situações: com e sem 60 mW de potência de bombeamento em 800 nm. A figura 4.14 mostra que a contribuição do bombeamento de 800 nm diminui a partir de 200 mW até se tornar insignificante quando 360 mW de potência em 1050 nm são aplicados. A saturação de ganho para o esquema de bombeamento duplo ocorre a partir de 240 mW de 1050 nm. A eficiência de conversão de potência é máxima com 240 mW de 1050 nm e 60 mW de 800 nm. É interessante frisar que a Relação de potência ideal é de aproximadamente de 20% de 800 nm em relação à potência total de bombeamento, para o caso estudado.

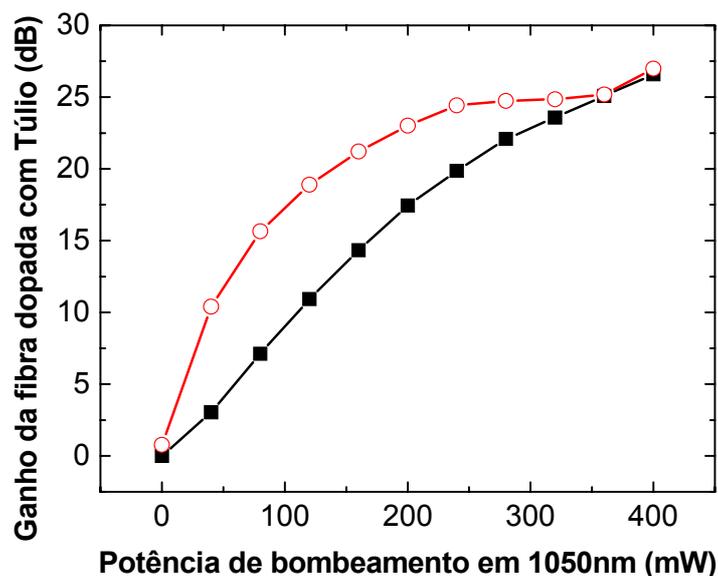


Figura 4.14 - Ganho em função da potência de bombeamento de 1050nm parametrizado para potência de bombeamento em 802nm de 0 mW (quadrados) e 60 mW (círculos). A potência de sinal é de 2,7 mW.

4.5 – Protótipo de TDFA com bombeamento duplo (800 nm + 1050 nm) utilizando lasers de diodo

Com base nos resultados das seções anteriores, foi construído um protótipo de um TDFA com bombeamento duplo em 1050 nm e 800 nm. Nesta configuração os dois lasers de bombeamento são copropagantes com o sinal e uma fibra dopada com Túlio de 5 m e concentração de dopantes de 2000 ppm foi utilizada (detalhes sobre os demais parâmetros da fibra dopada estão na tabela 4.3).

Tabela 4.3 – Dados da fibra dopada com Túlio, módulo #2.

Composição da fibra	ZrF ₄ -BaF ₂ -LaF ₃ -AlF ₃ -NaF
Dopante	Tm ³⁺
Concentração de dopante	2000 ppm
Abertura numérica	0,238
Comprimento de onda de corte	880 nm
Diâmetro do núcleo	2,8 µm
Diâmetro da casca	125 µm
Comprimento da fibra dopada	5 m

A figura 4.15 mostra o ganho da fibra em função da potência óptica de bombeamento em 1050 nm para potência de sinal de -20 dBm em 1470 nm e potência em 800 nm fixa em 28 mW. Nota-se que ocorre saturação de ganho à medida que a potência em 1050 nm aumenta. Este efeito também ocorreu na seção anterior.

A figura 4.16 mostra o espectro de ganho e figura de ruído para bombeamento duplo com potência de 28 mW e 90 mW em 800 nm e 1050 nm, respectivamente. O pico de ganho ocorre na região compreendida entre 1460 nm e 1470 nm. A figura de ruído atinge o valor mínimo de 3,5 dB em 1490 nm. A figura de ruído tem um deslocamento para esquerda por causa da queda mais acentuada da ASE para comprimentos de onda maiores. A análise de ganho e figura de ruído apresentados são para a fibra dopada, isto porque os componentes utilizados não são otimizados para operar na *banda S*. Para componentes adequados a figura de ruído esperada do amplificador deve ter valor por volta de 4,5 dB.

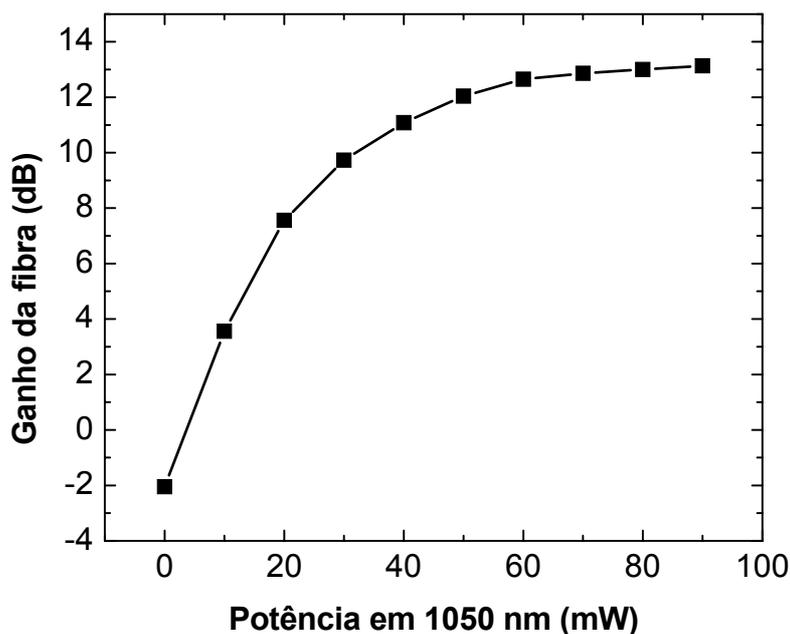


Figura 4.15 – Ganho da TDF para bombeamento duplo em função da potência de bombeamento em 1050 nm. A potência de sinal em 1470 nm é de -20 dBm. A potência de bombeamento em 800 nm é 28 mW.

Medidas de BER em função da potência recebida em um photodetector pin mostraram uma pequena penalidade (menor que 0,2 dB). Isto ocorre devido à degradação do sinal causada na recepção por causa do batimento sinal-espontâneo.

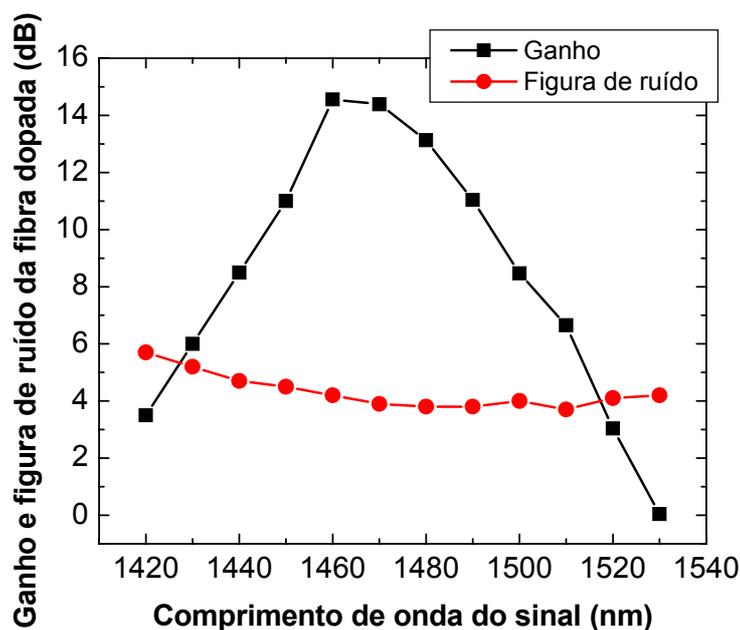


Figura 4.16 – Ganho e figura de ruído da TDF com bombeamento simultâneo em 1050 nm (90 mW) e 800 nm (28 mW) em função do comprimento de onda do sinal. A potência do sinal é de -20dBm.

4.6 – Conclusões

Foi proposto e demonstrado por nossa equipe, pela primeira vez na comunidade científica, um esquema de bombeamento duplo altamente eficiente para TDFAs, empregando lasers em 800 nm e em 1050 nm. Patentes depositadas na Europa e nos Estados Unidos da América, bem como artigos científicos publicados em periódicos e conferências internacionais, denotam a relevância dos resultados apresentados neste capítulo.

O novo esquema de bombeamento duplo apresentou alta eficiência diminuindo bastante a potência de bombeamento total em comparação com o bombeamento monocromático. Com a construção de um protótipo com lasers de diodo ficou caracterizada uma possibilidade de emprego comercial em um futuro próximo. A dinâmica e distribuição de ganho ao longo da fibra dopada para o esquema de bombeamento duplo envolvendo os comprimentos de onda 800 nm e 1050 nm foi observada e discutida, mostrando que com esse esquema de bombeamento duplo pode-se diminuir o comprimento de fibra dopada para se obter o ganho requerido.

4.7 – Referências Bibliográficas

- [1] T. Komukai, T. Yamamoto, T. Sugawa, and Y. Miyajima, “Upconversion pumped thulium-doped fluoride fiber amplifier and laser operating at $1.47\mu\text{m}$ ”, *IEEE J. Quantum Electron.*, vol. 31, n. 11, pp. 1880-1889, 1995.
- [2] A. S. L. Gomes, M. L. Sundheimer, M. T. Carvalho, J. F. Martins-Filho, C. J. A. Bastos-Filho and W. Margulis, “Novel Dual Wavelength (1050nm + 800nm) Pumping Scheme for Thulium Doped Fiber Amplifiers”, *In Postdeadline papers of Optical Fiber Communication Conference and Exhibit 2002*, FB2, Anaheim, EUA, 2002.
- [3] A. S. L. Gomes, M. T. Carvalho, M. L. Sundheimer, C. J. A. Bastos-Filho, J. F. Martins-Filho, M. B. Costa e Silva, J. P. Von Der Weid, and W. Margulis, “Characterization of efficient dual wavelength (1050nm + 800nm) pumping scheme for thulium doped fiber amplifiers”, *IEEE Photon. Technol. Lett.*, vol. 15, n. 2, pp. 200-202, 2003.
- [4] A. S. L. Gomes, M. T. Carvalho, M. L. Sundheimer, C. J. A. Bastos-Filho, J. F. Martins-Filho, J. P. Von Der Weid, and W. Margulis, “Low-pump-power short-fiber copropagating dual-pumped (800nm+1050nm) thulium-doped fiber amplifier”, *Opt. Lett.*, vol. 28, n. 5, pp. 334-336, 2003.
- [5] D. M. Baney, P. Gallion, and R. S. Tucker, “Theory and measurements techniques for the noise figure of optical amplifiers”, *Optical Fiber Technology*, vol. 6, pp. 122–154, 2000.
- [6] C. J. A. Bastos-Filho, J. F. Martins-Filho, M. T. Carvalho, M. L. Sundheimer, and A. S. L. Gomes, “Dual Wavelength (1050nm + 1550nm) Pumped Thulium Doped Fiber Amplifier Characterization by Optical Frequency Domain Reflectometry”, *Nos anais do X Simpósio Brasileiro de microondas e optoeletrônica*, pp. 526-530, Recife/PE, Brasil, 2002.
- [7] J. F. Martins-Filho, C. J. A. Bastos-Filho, A. S. L. Gomes, M. T. Carvalho, And M. L. Sundheimer, “Dual wavelength (1050nm + 1550nm) Pumped Thulium Doped Fiber Amplifier Characterization by Optical Frequency Domain Reflectometry”, *IEEE Photon. Technol. Lett.*, vol.15, n.1, pp. 24-26, 2003.
- [8] M. T. Carvalho, M. L. Sundheimer, A. S. L. Gomes, C. J. A. Bastos-Filho, and J. F. Martins-Filho, “Dual wavelength (1050nm + 1550nm) Pumped Thulium Doped Fiber Amplifier Characterization by Optical Frequency Domain Reflectometry”, *Nos resumos do XX Encontro de físicos do norte nordeste*, pp. 186, 2002.

- [9] J. P. Von Der Weid, R. Passy, B. Huttner, O. Guinard, and N. Gisin, "High-Resolution Distributed-Gain Measurements in Erbium-Doped Fibers", *IEEE Photon. Technol. Lett.*, vol.10, n.7, pp. 949-951, 1998.
- [10] J. P. Von Der Weid, R. Passy, and N. Gisin., "Coherent Reflectometry of Optical Fiber Amplifiers", *IEEE Photon. Technol. Lett.*, vol.9, n.9, pp. 1253-1255, 1997.
- [11] J. P. Von Der Weid, A. O. Dal Forno, J. A. Pereira da Silva, R. Passy, M. R. Avier, B. Huttner, and N. Gisin, "Distributed-Gain and Optimum length of Erbium-Doped Fibre Amplifiers", *In technical Digest of 20th European Conference on Optical Communications*, pp.603-604, Madri, Espanha, 1998.
- [12] M. Wegmuller, P. Oberson, O. Guinnard, B. Huttner, C. Vinegoni, and N. Gisin, "Distributed Gain Measurements in Er-Doped Fibers with High Resolution and Accuracy Using an Optical Frequency Domain Reflectometer", *IEEE J. Lightwave Technol.*, vol. 18, n. 12, pp. 2127-2132, 2000.
- [13] G. Mussi, N. Gisin, R. Passy, and J. P. Von Der Weid, "-152.5dB sensitivity high dynamic-range Optical Frequency-domain Reflectometry", *Electron. Lett.*, vol. 32, n. 10, pp.926-927, 1996.
- [14] R. Passy, N. Gisin., and J. P. Von Der Weid, "High-Sensitivity-Coherent Optical Frequency-Domain Reflectometry for Characterization of Fiber-Optic Network Components", *IEEE Photon. Technol. Lett.*, vol. 7, n. 6, pp. 667-669, 1995.
- [15] R. Passy, and J. P. Von Der Weid, "Jaggedness Free C-OFDR for Optical Components Characterization", *In Proceedings SBMO/IEEE MTS International Microwave and Optoelectronics Conference 1995*, pp. 590-595, Rio de Janeiro, Brazil, 1995.
- [16] J. P. Von Der Weid, R. Passy, G. Mussi, and N. Gisin, "On the Characterization of Optical Fiber Network Components with Optical Frequency Domain Reflectometry", *IEEE J. Lightwave Technol.*, vol. 15, n. 7, pp.1131-1141, 2002.
- [17] J. A. P. da Silva, C. H. Prola Jr., and J. P. Von Der Weid, "Optical Low Coherence Reflectometry for Characterization of Optical Devices", *In Proceedings SBMO/IEEE MTS International Microwave and Optoelectronics Conference 1995*, pp. 596-600, Rio de Janeiro, Brazil, 1995.
- [18] J. P. Von Der Weid, R. Passy, A. O. Dal Forno, B. Huttner, and N. Gisin, "Return Loss Measurements of WDM Filters with Tunable Coherent Optical Frequency-Domain Reflectometry", *IEEE Photon. Technol. Lett.*, vol. 9, n. 11, pp. 1508-1510, 1997.

Capítulo 5 – Amplificadores reflexivos a fibra dopada com Túlio

Devido à crescente demanda por amplificadores ópticos para explorar faixas de comprimentos de onda alternativas do espectro de baixas perdas da sílica, tornou-se relevante o desenvolvimento de amplificadores a fibra dopada com Túlio. Dada esta necessidade, constata-se diferentes configurações de TDFA, cujo o desempenho das mesmas vem mostrando um excelente potencial para emprego em sistemas operando na *banda S* (região espectral de transmissão compreendida entre 1450 nm e 1530 nm) [1-4]. Existem outros tipos de amplificadores ópticos que podem ser utilizados como alternativa prática em sistemas de transmissão operando na *banda S*, entre eles: amplificadores Raman a fibra (*ver seção 2.4.3*) e amplificadores a fibra dopada com Érbio para funcionar na *banda S* (*ver seção 2.4.5*). Entretanto, avanços tecnológicos na engenharia dos TDFA denotam-se de forma sucessiva, tornando-os mais atrativos comercialmente. As contribuições mais substanciais ocorreram no processo de fabricação das fibras fluoradas [5] e no desenvolvimento de lasers de diodo para bombeamento em 1055 nm [6, 7], que corresponde ao comprimento de onda mais eficiente para bombeamento monocromático.

Embora tenha sido demonstrado que esquemas de bombeamento duplo são mais eficientes no processo de conversão de energia, amplificadores com bombeamento monocromático, na faixa de comprimentos de onda entre 1050 nm e 1064 nm, podem funcionar satisfatoriamente. No trabalho reportado por F. Borliaguet e colaboradores em [7] foi demonstrada a possibilidade de construção de TDFA compactos e de grande praticidade, já que até então as únicas fontes de bombeamento disponíveis nesta faixa de comprimentos de onda eram lasers de Nd:YAG, lasers Nd:YLF, ou lasers de Itérbio bombeados por lasers de diodo.

Considerando os TDFAs, aparece a necessidade de construção de configurações convenientes para que estes operem como pré-amplificadores ou amplificadores de linha, cuja característica fundamental é apresentar alto ganho de pequenos sinais. Nestas condições nota-se claramente a premência da amplificação dos sinais de baixa potência antes do processo de fotodeteção no receptor, ou ainda antes de reenviar por mais um enlace de fibra óptica.

Para construir TDFAs capazes de obter ganho de pequenos sinais acima de 35 dB, geralmente são usadas configurações complexas com diversas fibras dopadas e alguns lasers de bombeamento operando com emissão de alta potência [8, 9]. Além do alto custo associado às fibras dopadas, realizar o bombeamento com alta potência pode degradar alguns componentes do amplificador, como: emendas das fibras dopadas, conectores, acopladores direcionais, etc. Portanto, a alta potência diminui o tempo de vida e confiabilidade do amplificador. Outro aspecto importante que deve ser frisado é que para aplicações sistêmicas é sempre desejável obter maior ganho com menor potência de bombeamento. Pré-amplificadores ou amplificadores de linha requerem características indispensáveis como alto ganho e baixa figura de ruído. Para este propósito, o objetivo é sempre de maximizar o ganho de pequenos sinais e otimizar a eficiência de conversão de potência, mantendo a figura de ruído do amplificador relativamente baixa. Para esta finalidade, pode ser utilizada a técnica de dupla passagem do sinal pelo meio gerador de ganho. Quando este princípio é utilizado em amplificadores ópticos, estes são denominados amplificadores reflexivos.

Nas próximas seções estão expostas as contribuições relevantes obtidas com o uso da técnica de dupla passagem pelo meio gerador de ganho, ou seja, pela fibra dopada com Túlio. Na seção 9.1, são propostas duas diferentes configurações utilizando a técnica supracitada para obtenção de alto ganho de pequenos sinais, a primeira utiliza um espelho como elemento refletor e a segunda utiliza um circulador adaptado para realizar a mesma função do espelho. As devidas comparações são verificadas através da análise de desempenho. Em seguida foi desenvolvida uma configuração compacta com ganho em patamar razoável, utilizando o espelho como dispositivo refletor, e mostrando-se uma alternativa viável para aplicações como pré-amplificador.

5.1 – T DFA reflexivo com 38 dB de ganho com bombeamento monocromático

Visando uma maximização da eficiência de conversão de potência em T DFA [10, 11], S. Aozasa e colaboradores propuseram uma nova configuração, onde o sinal passa duas vezes pelo meio gerador de ganho, ou seja, pela fibra dopada. Para isto, foi utilizado um espelho em um dos terminais da fibra dopada e um circulador no outro terminal. Tal

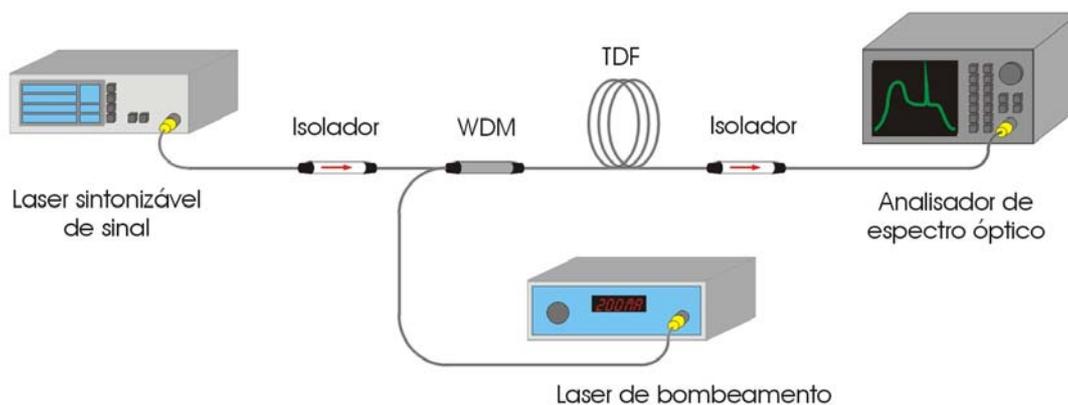
alternativa possibilita que o fluxo de entrada e saída do sinal ocorra em apenas um dos terminais da fibra dopada. Com esta configuração, foi conseguindo uma PCE de 70%, um ganho de pequenos sinais de 43 dB, um coeficiente de ganho de 57 dB/W e um aumento de ganho de 8 dB em relação à configuração de única passagem do sinal pela fibra dopada. Para isto, fez-se uso de dois lasers de bombeamento no sentido contrapropagante com potência total de 755mW.

S. W. Harun e colaboradores [12] conseguiram um aumento de ganho de 11 dB utilizando a mesma técnica em um amplificador a fibra dopada com Érbio para a banda L (**L-EDFA**, *L-band Erbium Doped Fiber Amplifiers*), contudo fez uso de um circulador como refletor no terminal de saída da fibra dopada. S. Hwang e colaboradores [13] demonstraram uma redução considerável na potência de bombeamento e no comprimento da fibra dopada utilizando esta mesma técnica de dupla passagem do sinal pelo meio gerador de ganho em um amplificador a fibra dopada com Érbio (**EDFA**, *Erbium doped fiber amplifiers*).

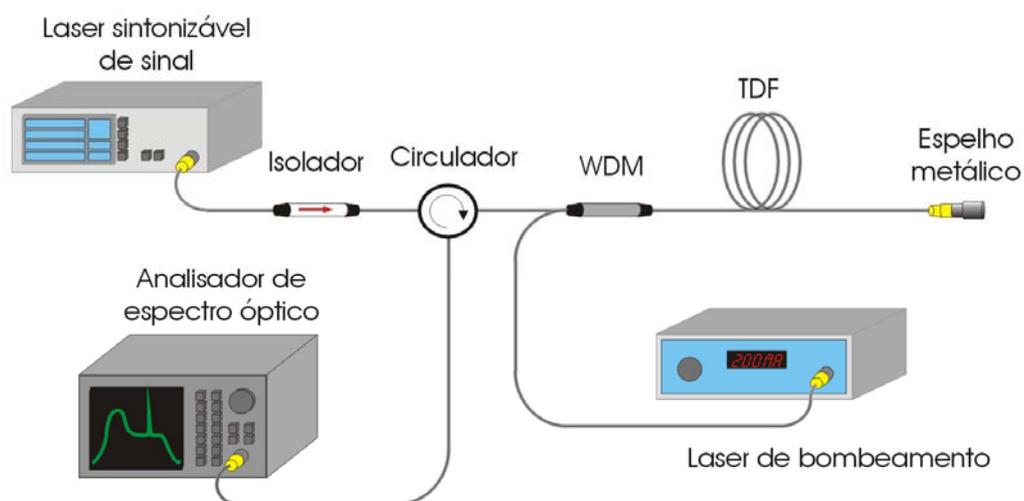
É importante frisar que todas as configurações propostas para TDFAs reflexivos são complexas e demandam várias fibras dopadas e/ou diversas fontes de bombeamento. Objetivando a proposição de um amplificador de alto ganho de pequenos sinais mais simples, foram construídas algumas configurações de TDFA, mostradas na figura 5.1.

A título de comparação foi montada uma configuração convencional de passagem única do sinal pelo meio gerador de ganho com bombeamento monocromático em 1050 nm no sentido copropagante com o sinal (*apresentada na figura 5.1-a*).

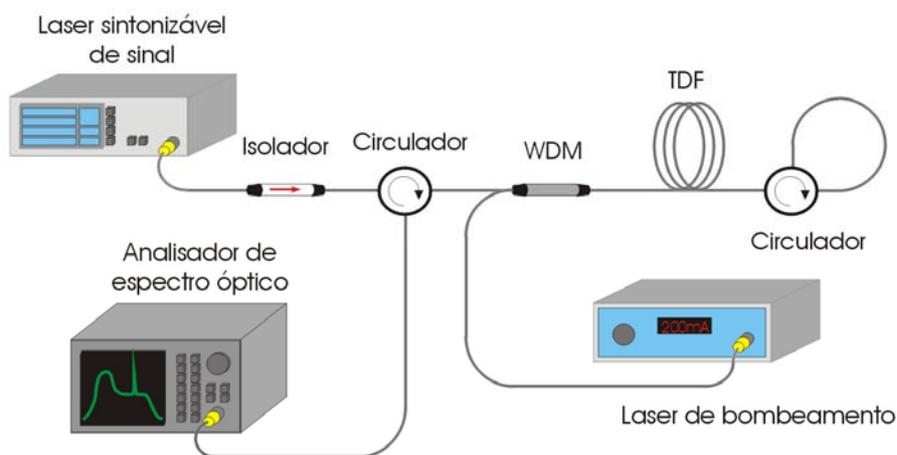
Duas configurações distintas estão destacadas nas figuras 5.1-b e 5.1-c, onde a técnica de dupla passagem pela fibra dopada com Túlio é empregada. Em ambas as configurações, um circulador óptico está disposto no terminal de entrada da fibra dopada com Túlio para funcionar como terminal de entrada e saída para o sinal.



(a)



(b)



(c)

Figura 5.1 – Exemplos de configurações de amplificadores ópticos a fibra dopada com Túlio: (a) única passagem do sinal pela fibra dopada e (b) dupla passagem do sinal pela fibra dopada com uso de espelho metálico e (c) dupla passagem do sinal pela fibra dopada com uso de um circulator óptico.

Um analisador de espectro óptico (**OSA**, *Optical Spectrum Analyzer*) foi utilizado para medir ganho e figura de ruído. Um medidor de potência óptica foi usado para monitorar a potência de bombeamento a partir da porta de controle do multiplexador de comprimentos de onda (**WDM**, *Wavelength Division Multiplexer*). O WDM é utilizado para combinar o laser de bombeamento com o sinal na *banda S*.

A fonte de bombeamento utilizada é um laser de fibra de Itérbio bombeado com laser de diodo emitindo em 1050 nm. O laser de sinal é proveniente de um laser de diodo com um único modo longitudinal continuamente sintonizável entre 1435 nm e 1515 nm. A fibra dopada com Túlio (**TDF**, *Thullium Doped Fiber*) consiste em um módulo contendo uma fibra dopada com 18 m de comprimento e dopagem de 2000 ppm de íons trivalentes de Túlio. As extremidades da TDF são emendadas a segmentos de fibra padrão monomodo de sílica (demais características estão descritas na tabela 5.1).

Tabela 5.1 – Dados da fibra dopada com Túlio, módulo #3.

Composição da fibra	ZrF ₄ -BaF ₂ -LaF ₃ -AlF ₃ -NaF
Dopante	Tm ³⁺
Concentração de dopante	2000 ppm
Abertura numérica	0,238
Comprimento de onda de corte	880 nm
Diâmetro do núcleo	2,8 µm
Diâmetro da casca	125 µm
Comprimento da fibra dopada	18 m

A diferença básica entre as configurações apresentadas nas figuras 5.1-b e 5.1-c, é o dispositivo responsável por refletir o sinal proveniente da fibra dopada, propiciando assim a dupla passagem do sinal pelo meio gerador de ganho. Na figura 5.1-b, o elemento refletor é um espelho metálico próprio para ser utilizado acoplado a um conector FC/PC. Enquanto que na figura 5.1-c, o elemento refletor é construído interligando convenientemente duas das portas do circulador óptico.

Quanto ao sinal, o que importa é a perda associada ao dispositivo refletor. O espelho metálico apresenta uma perda de 1,8 dB, enquanto que o circulador tem uma perda um pouco maior (2,2 dB), a princípio isto já confere um melhor desempenho à configuração que utiliza o espelho. Existe ainda outro aspecto relevante que é a alta perda do circulador

óptico para o comprimento de onda de bombeamento, ou seja, com o emprego do espelho é possível refletir o bombeamento residual no final da fibra, enquanto que com o circulador isto não é possível.

A figura 5.2 mostra o ganho e figura de ruído em função do comprimento de onda do sinal para as três configurações mostradas na figura 5.1. As três configurações são: a de simples passagem do sinal pela fibra dopada (*quadrados*), a reflexiva utilizando espelho (*círculos*) e a reflexiva utilizando circulador (*triângulos*). A potência de bombeamento para estas medidas é de 300 mW, enquanto que a potência do laser de sinal é de -30 dBm.

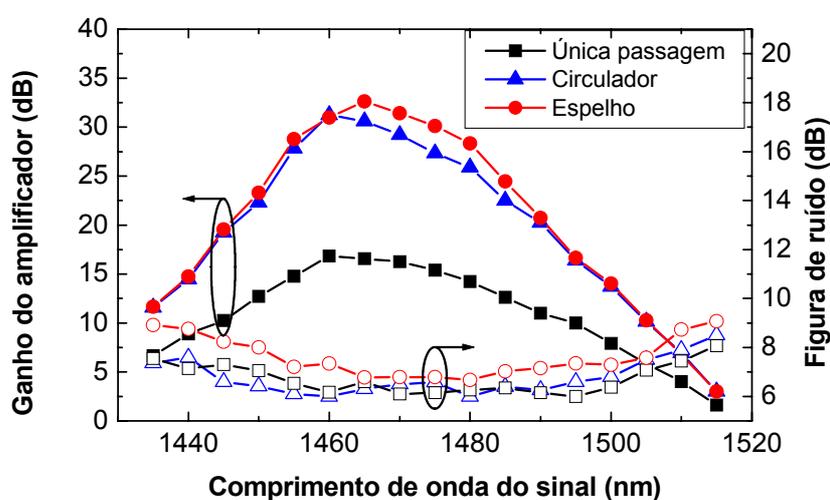


Figura 5.2 – Ganho e figura de ruído do amplificador em função do comprimento de onda do sinal. A potência de bombeamento é de 300 mW em 1050 nm e a potência do sinal é de -30 dBm.

É facilmente observável na figura 5.2 que nos casos dos amplificadores reflexivos pode-se obter ganhos superiores a 20 dB sobre uma região espectral de 45 nm de largura, desde 1445 nm até 1490 nm. A figura 5.2 também mostra que a configuração para o amplificador reflexivo utilizando o espelho provê um ganho um pouco maior que no caso onde o circulador é empregado. O aumento de ganho nas configurações reflexivas ocorre simplesmente devido ao fato que o sinal é refletido para o amplificador não saturado e assim experimenta um ganho extra. As medidas de figura de ruído da figura 5.2 mostram que a configuração utilizando o espelho apresenta um pequeno aumento na figura de ruído quando comparada com a configuração convencional. Isto ocorre porque quando o sinal chega passa pela segunda vez na fibra recebe ganho e chega à entrada da fibra com alta potência, diminuindo a inversão de população e aumentando a figura de ruído. É

importante frisar que S. W. Harun e colaboradores [16] reportaram uma penalidade na figura de ruído de 2 dB em EDFA reflexivo operando na *Banda L*.

As configurações reflexivas não apresentaram deslocamento espectral de ganho, conquanto S. Aozasa e colaboradores já tenham demonstrado que o efeito de deslocamento espectral de ganho ocorre principalmente devido à utilização de fibras altamente dopadas ou devido ao emprego de esquemas de bombeamento duplo [8, 10, 11].

A Figura 5.3 mostra o ganho do amplificador em função da potência de bombeamento para as três configurações mostradas na figura 5.1. O aumento do ganho de pequenos sinais para as configurações reflexivas em relação à configuração original é clara e está de acordo com os resultados apresentados na figura 5.2. Para potência de bombeamento de 400 mW na configuração reflexiva com espelho foi obtido um ganho de pequenos sinais de 38 dB em 1462 nm, representando um aumento de ganho de aproximadamente 16 dB em relação à configuração de única passagem do sinal pela fibra dopada. A média de coeficiente de ganho obtido é de 95 dB/W.

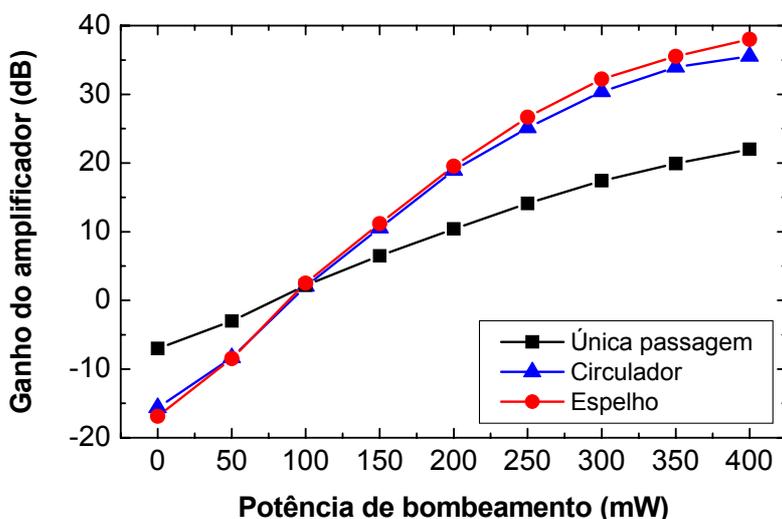


Figura 5.3 – Ganho do amplificador em função da potência de bombeamento. O bombeamento monocromático é realizado em 1050 nm e a potência do sinal é de -37 dBm em 1462 nm.

Além disso, é importante enfatizar que o ganho interno da fibra dopada é de 55 dB, já que as perdas para o sinal quando o amplificador não está sob condição de bombeamento são de 17 dB. Estes altos valores de perda são atribuídos principalmente à utilização de componentes não otimizados para a *banda S*. Este alto ganho foi obtido com quase a metade da potência de bombeamento e utilizando configurações mais simples que

as relatadas em trabalhos anteriores [10]. Aumentar a potência de bombeamento para valores acima de 400 mW provoca instabilidades, devido ao aparecimento de oscilações laser nas configurações reflexivas. Estas podem ser minimizadas escolhendo conectores e componentes mais adequados, projetados para a *banda S*.

A Figura 5.4 mostra a figura de ruído do amplificador em função da potência de bombeamento para as três configurações mostradas na figura 5.1. Pode-se notar que para potências de bombeamento intermediárias (entre 200 mW e 350 mW) a figura de ruído é quase a mesma para as três configurações (menos de 0,7 dB de diferença). Para baixas potências de bombeamento, a figura de ruído aumenta devido ao baixo ganho, mostrado na figura 5.3. No caso de bombeamento com 400 mW na configuração reflexiva utilizando espelho, o aumento na figura de ruído é de 1,7 dB. Isto acontece graças ao aumento da potência de emissão estimulada amplificada (*ASE, Amplified Stimulated Emission*) causada pela realimentação inerente das configurações reflexivas, cuja causa está na reflexão do ASE pelo elemento responsável por refletir o sinal.

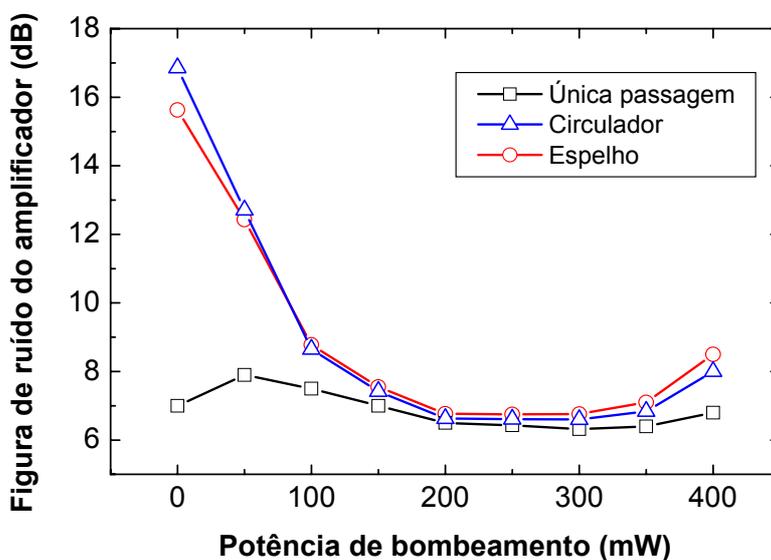


Figura 5.4 – Figura de ruído do amplificador em função da potência de bombeamento. O bombeamento monocromático é realizado em 1050 nm e a potência do sinal é de -37 dBm em 1462 nm.

A figura 5.5 mostra o ganho do amplificador em função da potência de entrada do sinal para as três configurações da figura 5.1. É visível que o acréscimo de ganho, devido ao emprego da técnica de dupla passagem pela fibra dopada, diminui para potências de sinal mais altas. Isto ocorre devido à saturação do meio com o aumento da potência de

sinal, não provendo ganho extra para o sinal refletido. Para potência de bombeamento de 250 mW e potência de sinal na entrada do amplificador de 0 dBm, a potência de saída do sinal é +10 dBm para as três configurações. Isto indica que os esquemas reflexivos não aumentam a potência de saturação de saída do amplificador, apesar de aumentar o ganho de pequenos sinais, e assim não devem ser utilizados para aplicações como amplificador de potência.

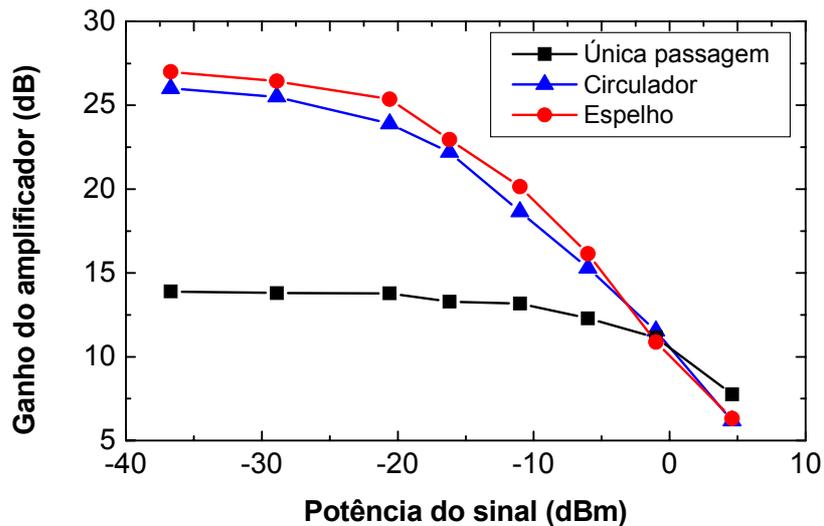


Figura 5.5 – Ganho do amplificador em função da potência do sinal. O bombeamento monocromático é realizado com potência de 250 mW em 1050 nm e o comprimento de onda do sinal é 1462 nm.

Tanto nos resultados descritos na figura 5.3 quanto nos da figura 5.5, o ganho do amplificador reflexivo é um pouco maior quando o espelho é empregado como dispositivo refletor. Mesmo havendo uma perda para o sinal no espelho (1,8 dB), esta é menor que a perda inserida pelo circulador (2,2 dB). Além disso, o espelho metálico é capaz de refletir a potência residual de bombeamento. Em relação à potência de bombeamento de 300 mW na entrada da TDF, existe aproximadamente 40 mW de bombeamento residual, que no caso do espelho é refletido para a TDF, gerando uma pequena potência extra de bombeamento.

Outro ponto a ressaltar é a maior simplicidade e menor custo do espelho metálico quando comparado com o circulador óptico. Entretanto, as instabilidades e o limiar para processos laser ocorreram para uma potência de bombeamento um pouco menor no caso do amplificador reflexivo com espelho metálico.

A figura 5.6 mostra a figura de ruído do amplificador em função da potência de entrada do sinal para as três configurações da figura 5.1. Seguindo a tendência, o espelho

mostrou um pior desempenho, enquanto que o amplificador reflexivo que emprega o circulador tem um desempenho em ruído equivalente ao desempenho da configuração convencional para potências de sinal menores do que -15 dBm. Nota-se que à medida que a potência de sinal aumenta, a figura de ruído dos amplificadores reflexivos torna-se crítica. Isto ocorre porque o sinal quando realiza a dupla passagem pela fibra, atinge o terminal de entrada da fibra com alta potência e diminui a inversão de população no início da fibra, criando uma degradação da figura de ruído do amplificador.

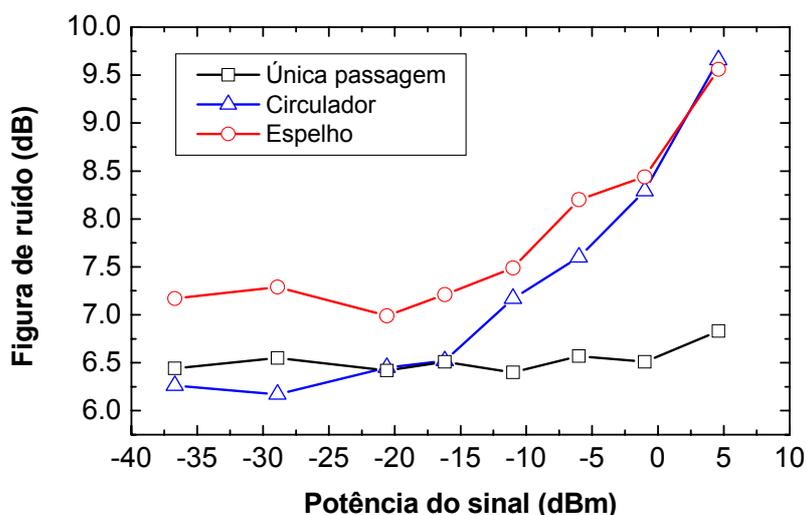


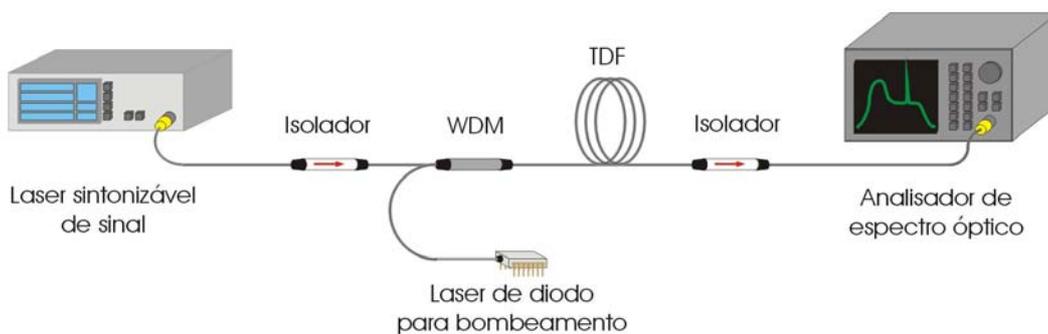
Figura 5.6 – Figura de ruído do amplificador em função da potência do sinal. O bombeamento é realizado com potência de 250 mW em 1050 nm e o comprimento de onda do sinal é 1462 nm.

5.2 – TDFA reflexivo compacto com bombeamento monocromático

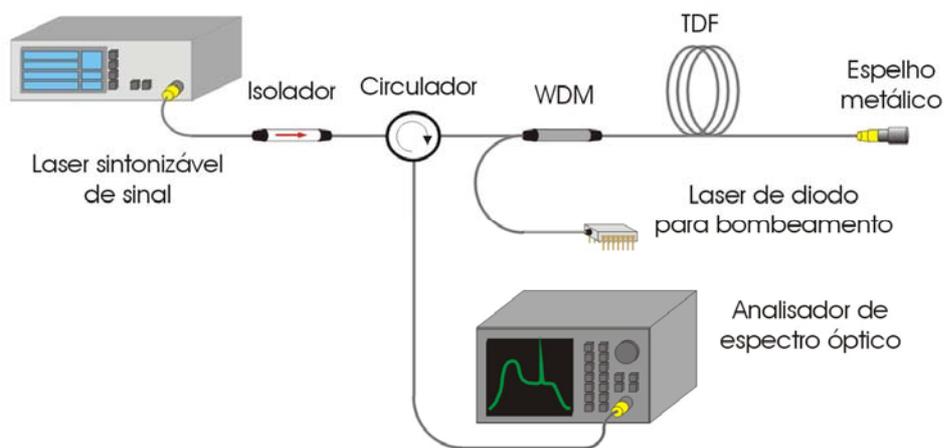
Expostos alguns aspectos constatados na seção anterior, tornou-se interessante a proposição de uma configuração compacta para um TDFA que possa ser aplicado como pré-amplificador, utilizando apenas um laser de diodo para bombeamento e aplicando a técnica de dupla passagem do sinal pela fibra dopada.

Na Figura 5.7 estão apresentadas as duas configurações básicas utilizando laser de diodo emitindo em 1055 nm. Nas figuras 5.7-a e 5.7-b, estão mostradas as configurações convencional e reflexiva, respectivamente.

O laser de diodo para bombeamento emite em 1055 nm, foi fabricado pela *Nortel Networks Optical Components* (Zurique, Suíça), tem encapsulamento tipo Butterfly e saída a partir de uma fibra monomodo padrão. Este laser é uma versão modificada de um laser com emissão em 980 nm com mudanças no projeto epitaxial. A alimentação do laser de diodo para emitir em 1055 nm é realizada a partir de uma fonte de corrente com controle de temperatura. O laser de diodo apresentou potência máxima de 153 mW. O sinal e o bombeamento em 1055 nm são acoplados através de um WDM que é emendado por fusão ao módulo contendo a fibra dopada com Túlio.



(a)



(b)

Figura 5.7 – Esquemas experimentais de amplificadores a fibra dopada com Túlio nas configurações: (a) única passagem do sinal e (b) dupla passagem do sinal pela fibra dopada com Túlio.

A fibra dopada com Túlio consiste em uma fibra altamente dopada com Túlio com 5 m de comprimento e dopagem de 5000 ppm de íons trivalentes de Túlio. As extremidades da TDF são emendadas a segmentos de fibra padrão monomodo de sílica (demais

características estão descritas na tabela 5.2). Um analisador de espectro óptico (OSA, *Optical Spectrum Analyser*) foi utilizado para medir ganho e figura de ruído.

Tabela 5.2 – Dados da fibra dopada com Túlio, módulo #4.

Composição da fibra	ZrF ₄ -BaF ₂ -LaF ₃ -AlF ₃ -NaF
Dopante	Tm ³⁺
Concentração de dopante	5000 ppm
Abertura numérica	0,238
Comprimento de onda de corte	950 nm
Diâmetro do núcleo	3 μm
Diâmetro da casca	125 μm
Comprimento da fibra	5 m

Na figura 5.8 são mostrados ganho (*símbolos fechados*) e figura de ruído (*símbolos abertos*) do amplificador em função da potência de bombeamento em 1055 nm para a configuração convencional (*quadrados*) e reflexiva (*círculos*). A potência de sinal utilizada foi -30 dBm.

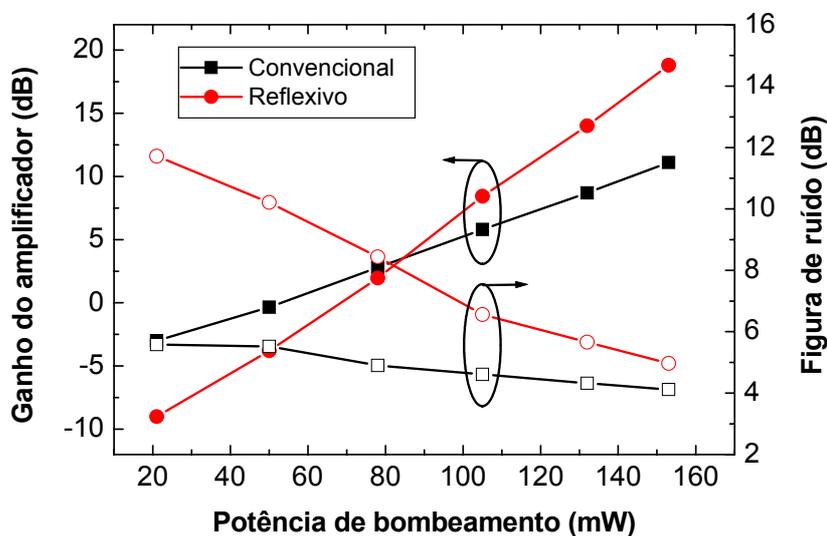


Figura 5.8 – Ganho (*símbolos fechados*) e Figura de ruído (*símbolos abertos*) do amplificador em função da potência de bombeamento em 1050 nm para a técnica de única (*quadrados*) e dupla passagem (*círculos*) do sinal pela fibra dopada. A potência do sinal é de -30 dBm.

Com o esquema de dupla passagem do sinal foi obtido um ganho de pequenos sinais de 19 dB, o que representa um aumento do ganho de pequenos sinais de

aproximadamente 8 dB, e um acréscimo de apenas 0,8 dB na figura de ruído do amplificador, em relação à configuração convencional.

5.3 – Conclusões

Foi construído um TDFA reflexivo com uma TDF de 18 m de comprimento e dopagem padrão cujo ganho de pequenos sinais atingiu 38 dB utilizando apenas 400 mW de bombeamento em 1050 nm. O aumento de ganho obtido foi de 16 dB em relação à configuração convencional (única passagem do sinal pela fibra dopada). Sendo esta configuração reflexiva adequada para aplicações como pré-amplificador e amplificador de linha. Apesar destas vantagens, a técnica de dupla passagem não aumenta a potência de saturação de saída do amplificador, tornando-a não adequada para uso em amplificadores de potência.

Utilizar espelho como elemento refletor do sinal em uma das extremidades da fibra dopada gera um ganho de pequenos sinais maior (aproximadamente 2 dB) em relação ao uso de um circulador óptico adaptado. Entretanto, a penalidade na figura de ruído é até 1 dB maior quando o circulador é utilizado. Além disso, o espelho é capaz de refletir o bombeamento não absorvido pela fibra dopada, gerando ganho extra, propriedade que o circulador não é capaz de produzir devido à alta perda do dispositivo no comprimento de onda do bombeamento. Fora isso, existe o custo associado, que é bem menor no caso do espelho metálico. Estes resultados estão publicados em [15]. Também foi demonstrado que é possível construir um TDFA compacto usando apenas um laser de diodo de potência relativamente baixa para bombeamento [16].

5.4 – Referências bibliográficas

- [1] A. S. L. Gomes, “Recent progress in Thulium Doped Fiber Amplifiers”, *Technical Summary Digest of Photonics West 2003 - SPIE*, pp. 361, 2003.
- [2] F. Roy, “Recent advances in thulium-doped fiber amplifiers”, *In Technical Digest of Optical Fiber Communication Conference and Exhibit 2002*, paper ThZ1, pp. 568-569, Anaheim, EUA, 2002.

- [3] T. Kasamatsu, Y. Yano, and T. Ono, "Gain-shifted dual-wavelength-pumped thulium-doped fiber amplifier for WDM signals in the 1.48-1.51- μm wavelength region", *IEEE Photon. Technol. Lett.*, vol. 13, n. 1, pp. 31-33, 2001.
- [4] F. Roy, D. Bayart, A. Le Sauze, and P. Baniel, "Noise and gain band management of thulium-doped fiber amplifier with dual-wavelength pumping schemes", *IEEE Photon. Technol. Lett.*, vol. 13, n. 8, pp. 788-790, 2001.
- [5] S. Guy, W. Meffre, A. M. Jurdyc, B. Jacquier, F. Roy, P. Baniel, D. Bayart, A. Le Sauze, C. Collet and J. J. Girard, "Spectroscopic studies of Tm doped glasses for S-band amplifiers", *In Proceedings of the Optical Amplifiers and Their Applications Conference 2001*, pp. 39-41, 2001.
- [6] M. Yuda, T. Sasaki, J. Temmyo, M. Sugo and C. Amano, "High power, highly reliable 1.05 μm InGaAs strained quantum well laser diodes as pump sources for thulium doped fiber amplifiers", *Electron. Lett.*, vol. 38, n. 1, pp. 45-46, 2002.
- [7] B. Bourliaguet, E. Emond, S. Mohrdiek, A.-C. Jacob-Poulin, P.-Y. Cortes, and J. Lauzon, "Thulium-doped fiber amplifier using 1055 nm laser diode pumping configuration" *Electron. Lett.*, vol. 38, n. 10, pp. 447-448, 2002.
- [8] T. Kasamatsu, Y. Yano, and H. Sekita, "1.50- μm -band gain-shifted thulium-doped fiber amplifier with 1.05- and 1.56- μm dual-wavelength pumping", *Opt. Lett.*, vol. 24, n. 23, pp. 1684-1686, 1999.
- [9] I. Clarke, M. Meleshkevich, M. Martin, and J. Poirier, "S-band amplifier with variable gain tilt control", *In Technical Digest of Optical Fiber Communication Conference and Exhibit 2001*, TuQ2, Anaheim, EUA, 2001.
- [10] S. Aozasa, H. Masuda, T. Sakamoto, K. Shikano and M. Shimizu, "Gain-shifted TDFA employing high concentration doping technique with high internal power conversion efficiency of 70%", *Electron. Lett.*, vol. 38, n. 8, pp. 361-363, 2002.
- [11] S. Aozasa, H. Masuda, H. Ono, T. Sakamoto, T. Kanamori, Y. Ohishi and M. Shimizu, "1480-1510nm band Tm-doped fibre amplifier with high power conversion efficiency of 42%", *Electron. Lett.*, vol. 37, n. 19, pp. 1157-1158, 2001.
- [12] S. W. Harun, P. Poopalan, and H. Ahmad, "Gain enhancement in L-band EDFA through a double-pass technique", *IEEE Photon. Technol. Lett.*, vol. 14, n. 3, pp. 296-297, 2002.

- [13] S. Hwang, Kwan-Woong Song, Hyung-Jin Kwon, Junho Koh, Yun-Je Oh, and Kyuman Cho, "Broad-Band Erbium-Doped Fiber Amplifier With Double-Pass Configuration", *IEEE Photon. Technol. Lett.*, vol. 13, n. 12, pp. 1289-1291, 2001.
- [14] J. F. Martins-Filho, C. J. A. Bastos-Filho, M. T. Carvalho, M. L. Sundheimer, and A. S. L. Gomes, "Dual-Wavelength (1050 nm + 1550 nm) Pumped Thulium-Doped Fiber Amplifier Characterization by Optical Frequency-Domain Reflectometry", *IEEE Photon. Technol. Lett.*, vol. 15, no. 1, pp. 24-26, 2003.
- [15] C. J. A. Bastos-Filho, J. F. Martins-Filho, and A. S. L. Gomes, "38 dB gain from a Double-pass Single-pump thulium doped fiber amplifier", *In Proceedings of International Microwave and Optoelectronics Conference 2003*, vol. 1, pp. 125-128, Foz do Iguaçu/PR, Brasil, 2003.
- [16] C. J. A. Bastos-Filho, J. F. Martins-Filho, A. S. L. Gomes, and M. T. Carvalho, "Gain characterization of a single-diode pumped TDFA employing a highly concentrated Thulium Doped fibre", *Resumos do I workshop do OSA chapter de Campinas*, Campinas/SP, Brasil, 2003.

Capítulo 6 – Medidas de saturação cruzada de ganho em TDFA

Amplificadores a fibra dopada com Túlio (TDFA, *Thulium-Doped Fiber Amplifiers*) têm se mostrado como uma excelente alternativa para utilização na região espectral denominada *banda S*. Apesar dos problemas tecnológicos inerentes, têm ocorrido muitos avanços na engenharia dos TDFA, entre eles: melhora do processo de fabricação das fibras baseadas em materiais a base de Flúor e Telúrio [1, 2], descobrimento de esquemas de bombeamento mais eficientes envolvendo mais de um laser de bombeamento [3-6] e, mais recentemente, o desenvolvimento de laser de diodo emitindo em 1055 nm [7, 8].

Já foi mostrado que para esquemas de bombeamento monocromático, a melhor alternativa é a utilização de laser de bombeamento emitindo em 1050 nm [9], embora também possa ser utilizado bombeamento monocromático utilizando lasers com emissão em comprimentos de onda por volta de 1400 nm, onde a tecnologia dos diodos lasers já está mais avançada. O processo de bombeamento monocromático é realizado pelo processo de conversão ascendente de energia, e está mostrado na figura 6.1-a para 1050nm e na figura 6.1-b para 1426nm. Detalhes sobre o processo podem ser encontrados no capítulo 3.

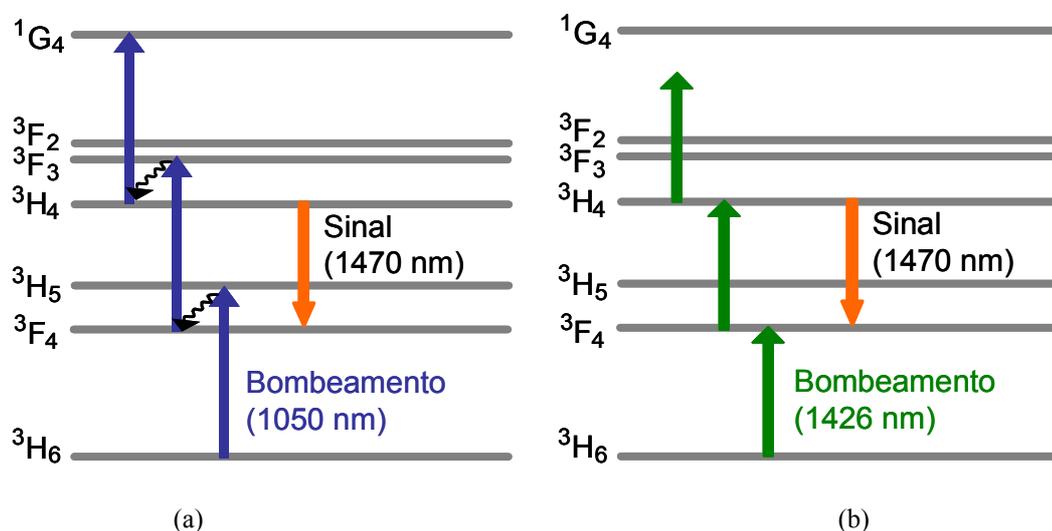


Figura 6.1 - Processo de amplificação utilizando conversão ascendente de energia para bombeamento monocromático nos comprimentos de onda (a) 1050nm e (b) 1400nm.

Embora esquemas de bombeamento com dois comprimentos de onda apresentem maior eficiência que bombeamento monocromático em TDFA [10], o bombeamento monocromático apresenta configurações mais simples e, em muitos casos, pode prover um

desempenho satisfatório. C. J. A. Bastos-Filho e colaboradores demonstraram uma configuração compacta para TDFA com bombeamento monocromático utilizando apenas um diodo laser emitindo em 1055 nm [11] (*ver capítulo 5*).

Para caracterizar o desempenho sistêmico de um amplificador existem alguns parâmetros sistêmicos como: penalidade por taxa de erro por bit (**BER**, *Bit Error Rate*), efeito de saturação cruzada do ganho e resposta a transiente dos canais sobreviventes devido à inserção ou remoção de canais em sistemas com multiplexação por divisão de comprimentos de onda (**WDM**, *Wavelength Division Multiplexing*). A medição destes parâmetros deve ser realizada para quantificar o impacto causado pela inserção de amplificadores nos sistemas de transmissão WDM.

Amplificadores ópticos que utilizam fibras dopadas com terras raras quando utilizados em sistemas WDM apresentam uma resposta espectral de ganho variante no tempo, dependendo do número de canais utilizados e dos comprimentos de onda destes canais. Este efeito, chamado de saturação cruzada de ganho, é causado pela mudança do estado de saturação do amplificador observada em um dado canal, devido à adição ou remoção de outros canais dentro da banda de amplificação.

Existem vários trabalhos científicos que apresentam medidas de saturação cruzada de ganho em amplificadores ópticos a fibra dopada com Érbio (**EDFA**, *Erbium Doped Fiber Amplifiers*) [12-15], amplificadores ópticos de semicondutor (**SOA**, *Semiconductor Optical Amplifiers*) [16] e amplificadores a fibra Raman (**FRA**, *Fiber Raman Amplifiers*) [17]. Algumas técnicas, como travamento de ganho (*ver capítulo 7*), podem reduzir as conseqüências produzidas por este efeito indesejado na maioria dos casos. Como exemplo pode-se citar a diminuição da saturação cruzada de ganho de 4 dB para 0,27 dB em um EDFA empregando o travamento de ganho [12] em um sistema com 9 canais.

É importante evitar a saturação cruzada de ganho por dois motivos básicos. Primeiro, a remoção de canais pode fazer com que a potência dos canais sobreviventes aumente, ultrapassando o limiar de efeitos não lineares, e conseqüentemente, ocorrendo a geração de erros na recepção do sinal. Por outro lado, a inserção de canais pode diminuir a potência dos canais que já estavam ativos devido à saturação cruzada de ganho do amplificador e esta nova potência pode estar abaixo do limite de sensibilidade do fotodetector, gerando erros. Além disso, em casos de enlaces ópticos longos, onde o cascadeamento de amplificadores é grande, a penalidade por saturação cruzada de ganho torna-se mais problemática, devido ao acúmulo do efeito [13,14].

Embora o efeito de saturação cruzada do ganho tenha um impacto decisivo no desempenho de sistemas operando com vários canais em comprimentos de onda diferentes, não existem trabalhos relevantes sobre as características espectrais do efeito de saturação cruzada do ganho em TDFA, apesar de existirem alguns trabalhos relacionados à resposta temporal nos canais sobreviventes por causa da adição ou remoção de canais nestes sistemas [18-20]. Neste capítulo estão descritas medidas de saturação cruzada de ganho dentro da banda de amplificação de um TDFA construído a partir de uma fibra altamente dopada com íons de Túlio, com bombeamento monocromático em dois comprimentos de onda distintos (1426 nm e 1050 nm). Além disso, estão descritos resultados sobre saturação cruzada de ganho levando em consideração a influência do comprimento de onda de um canal sobrevivente quando outros seis canais são removidos de um sistema.

6.1 – Dependência espectral da saturação cruzada de ganho em TDFA com bombeamento monocromático

A figura 6.2 mostra a montagem experimental utilizada para medição da dependência espectral da saturação cruzada de ganho em TDFA com bombeamento monocromático. No caso foram utilizados dois lasers para bombeamento do amplificador (não simultaneamente) e em ambos os casos o bombeamento foi injetado na fibra dopada no sentido contrapropagante em relação ao sinal. Foram utilizados um laser de fibra de Itérbio com bombeamento realizado através de um laser de diodo emitindo em 1050 nm e um laser Raman emitindo em 1426 nm. Os sinais utilizados como referência para as medidas são sete lasers de diodo monomodo emitindo dentro da *banda S*. Os comprimentos de onda dos lasers de sinal são: 1457,5 nm; 1469 nm; 1478 nm; 1487,5 nm; 1497 nm; 1507,5 nm e 1517 nm, onde o espaçamento é de aproximadamente 10 nm entre eles. Cada um destes lasers de sinal tem potência máxima de +10 dBm. Um combinador óptico com oito entradas, com perdas de 10 dB, foi utilizado para multiplexar os sinais. Com isso, a potência máxima dos sinais na entrada da fibra é de 0 dBm por canal.

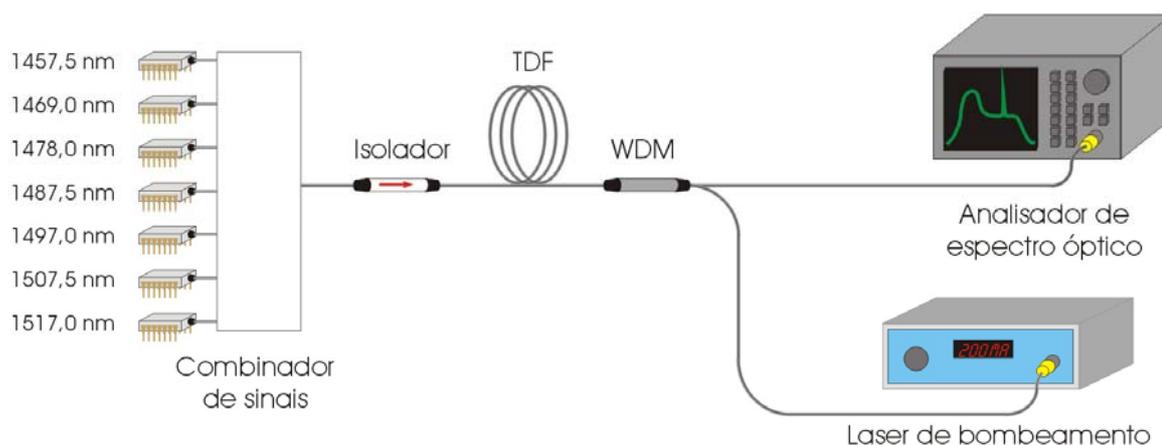


Figura 6.2 – Montagem experimental utilizada para medição da dependência espectral da saturação cruzada de ganho em TDFa com bombeamento monocromático.

A fibra dopada com Túlio (**TDF**, *Thulium Doped Fiber*) consiste em um módulo comercial contendo 6 m de fibra ZBLAN dopada com 5000 ppm de íons trivalentes de Túlio (Tm^{3+}), conectada a fibras padrão de sílica. O restante dos dados sobre a fibra dopada está mostrado na tabela 6.1. As medidas de ganho e figura de ruído foram feitas utilizando um analisador de espectro óptico (**OSA**, *Optical Spectrum Analyser*).

Tabela 6.1 – Dados da fibra dopada com Túlio, módulo #5.

Composição da fibra	ZrF ₄ -BaF ₂ -LaF ₃ -AlF ₃ -NaF
Concentração de dopante	5000 ppm
Abertura numérica	0,238
Comprimento de onda de corte	880 nm
Diâmetro do núcleo	2,8 μ m
Diâmetro da casca	125 μ m
Comprimento da fibra	6 m

A figura 6.3 mostra uma superposição dos espectros de potência de saída do amplificador para várias situações na entrada. Nesse caso, foi utilizado bombeamento monocromático em 1426 nm com 300 mW de potência e canais com potência individual de -5 dBm. A área sombreada mostra a situação com os sete canais ativos e as curvas com fundo transparente ilustram o espectro de amplificação para cada um dos canais ativos em momentos distintos. O ganho do amplificador nestas condições é de 11 dB para 1497 nm quando todos os canais de sinais estão ativos (*ver figura 6.3*). Quando apenas o canal em

1497 nm está ativo o ganho neste canal é de 13,2 dB. O cálculo do valor da saturação cruzada de ganho é feito para cada canal tomando a diferença de potência do canal da saída (em dBm) quando os outros canais estão ativos e inativos. Dessa forma, a saturação cruzada de ganho para o canal em 1497 nm é de 2,2 dB. A figura 6.3 mostra claramente que o efeito de saturação cruzada de ganho é mais pronunciado para comprimentos de onda menores, variando de 1,8 dB para o maior comprimento de onda (1517 nm) até 5,5 dB para o menor comprimento de onda (1457,5 nm).

Para bombeamento em 1050 nm o pico de ganho foi deslocado para 1478 nm com valor de 13,7 dB. O ganho para 1497 nm (pico de ganho para bombeamento em 1426 nm) é de 13,4 dB, mostrando que o bombeamento em 1050 nm é ligeiramente mais eficiente.

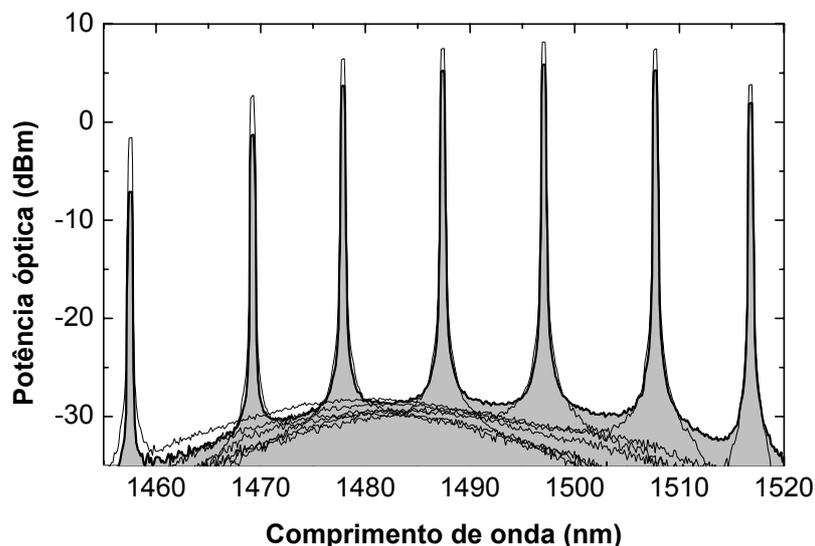


Figura 6.3 – Espectro de potência de saída do amplificador para bombeamento em 1426 nm com potência de 300 mW e potência de -5 dBm por canal de sinal. A área sombreada em cinza mostra a situação com os sete canais ativos e as curvas com fundo transparente ilustram o espectro de amplificação para cada um dos canais ativos individualmente.

Nas figuras 6.4 e 6.5 estão mostrados os valores medidos de saturação cruzada de ganho dependendo do comprimento de onda do canal sobrevivente quando 6 dos 7 canais do sistema são removidos para bombeamento monocromático em 1426 nm e 1050 nm, respectivamente. Várias potências de sinal por canal foram utilizadas: -12,5 dBm (quadrados); -10 dBm (círculos); -7,5 dBm (triângulos para cima); -5 dBm (triângulos para baixo); -2,5 dBm (losangos) e 0 dBm (cruzes). A potência de bombeamento é de 300 mW

em ambos os casos. As figuras mostram que o efeito de saturação cruzada de ganho aumenta com o aumento da potência do sinal. Também mostram que o efeito é mais danoso à medida que o comprimento de onda do sinal diminui, de acordo com o que mostra a figura 6.3.

Este comportamento ocorre devido à dependência do ganho do amplificador com a inversão de população entre os níveis de energia envolvidos no processo de amplificação, como também é resultado da dependência do comportamento das seções de choque de emissão e absorção dos níveis de energia utilizados no processo de amplificação. É sabido que o ganho do amplificador óptico é dado por [21]:

$$G(\lambda) \propto [\bar{N}_2 \sigma_s^{(e)}(\lambda) - \bar{N}_1 \sigma_s^{(a)}(\lambda)] \Gamma_s(\lambda) L \quad (6.1)$$

onde \bar{N}_2 e \bar{N}_1 são as populações médias dos níveis superior e inferior de amplificação, respectivamente. L é o comprimento da fibra dopada e Γ_s é o fator de *overlap*. $\sigma_s^{(e)}(\lambda)$ e $\sigma_s^{(a)}(\lambda)$ são as seções de choque de emissão do nível superior de amplificação e absorção do nível inferior de amplificação, respectivamente.

Para o caso onde existe apenas um canal de sinal, o amplificador óptico está operando sob regime não saturado, ou seja, neste caso existe uma forte inversão de população, e assim \bar{N}_1 pode ser considerado desprezível e o espectro de ganho segue o espectro da seção de choque de emissão de estado superior de amplificação. À medida que a potência de sinal total aumenta, ou seja, a potência do canal aumenta ou mais canais são adicionados na entrada do amplificador, o amplificador começa a operar sob regime saturado. Com isso, a inversão de população diminui e \bar{N}_1 torna-se considerável, significando uma diminuição no ganho. É importante frisar que, neste caso, o espectro da seção de choque de absorção vai interferir no ganho gerado pelo meio ativo.

Além disso, o pico da seção de choque de absorção é em 1420 nm e o pico da seção de choque de emissão de estado superior de amplificação é em 1470 nm [22], portanto comprimentos de onda menores vão sofrer um maior decréscimo no ganho, levando a um valor mais alto de saturação cruzada de ganho.

Outro aspecto importante a ser frisado é que quanto maior for a potência de sinal por canal, mais saturado se tornará o meio gerador de ganho, levando a uma maior saturação cruzada de ganho. Também pode ser observado, nas figuras 6.4 e 6.5, que o efeito de

saturação cruzada de ganho é maior quando o esquema de bombeamento em 1426 nm é utilizado. Isto ocorre porque o bombeamento em 1050 nm consegue manter uma inversão de população maior do que o bombeamento em 1426 nm.

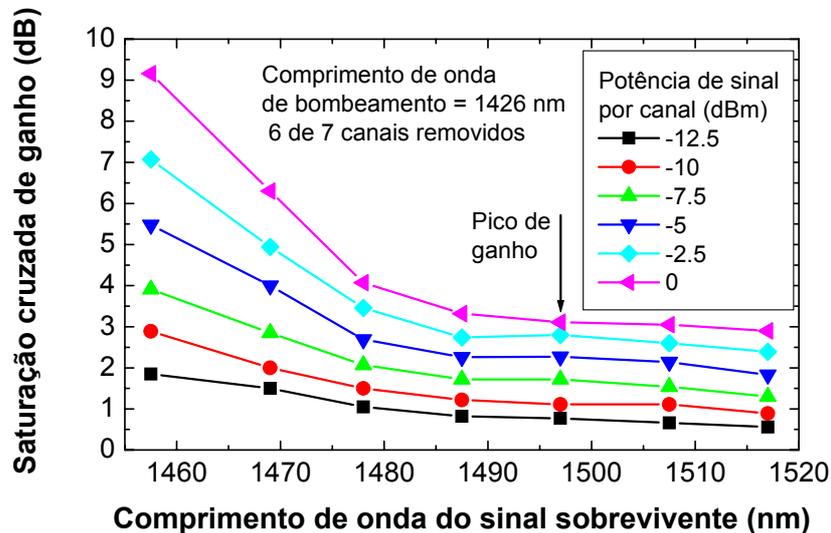


Figura 6.4 - Medidas de saturação cruzada de ganho dependendo do comprimento de onda do canal sobrevivente quando 6 dos 7 canais do sistema são removidos. Várias potências de sinal por canal (entre -12.5 dBm e 0 dBm) são utilizadas. A potência de bombeamento é de 300 mW em 1426 nm.

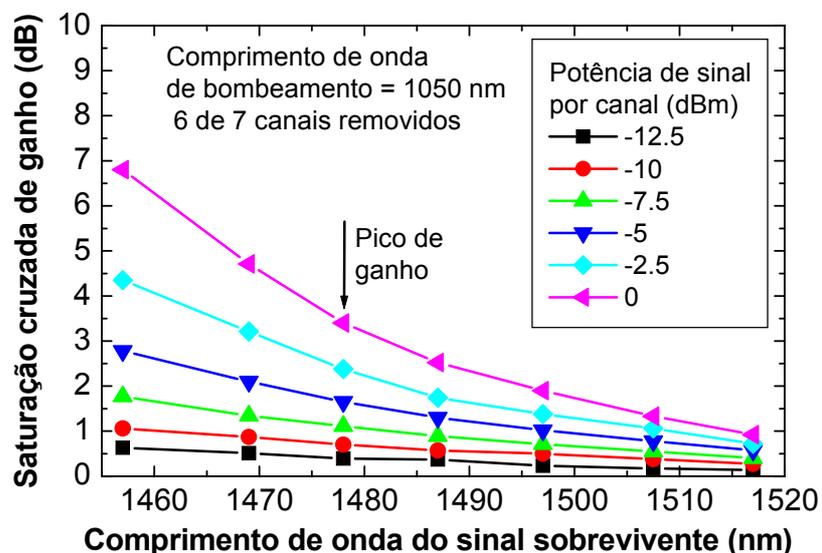


Figura 6.5 – Medidas de saturação cruzada de ganho dependendo do comprimento de onda do canal sobrevivente quando 6 entre 7 canais do sistema são removidos. Várias potências de sinal por canal (entre -12.5 dBm e 0 dBm) são utilizadas. A potência de bombeamento é de 300 mW em 1050 nm.

Na figura 6.6 são apresentadas medidas de saturação cruzada de ganho em função da potência de bombeamento do amplificador para dois casos distintos de canais sobreviventes, com comprimentos de onda diferentes (1469 nm e 1497 nm), quando seis entre sete canais do sistema são removidos. Foi utilizada uma potência de sinal por canal de 0 dBm e o comprimento de onda do bombeamento para estas medidas foi de 1426 nm. Nota-se que a saturação cruzada de ganho aumenta com o aumento da potência de bombeamento.

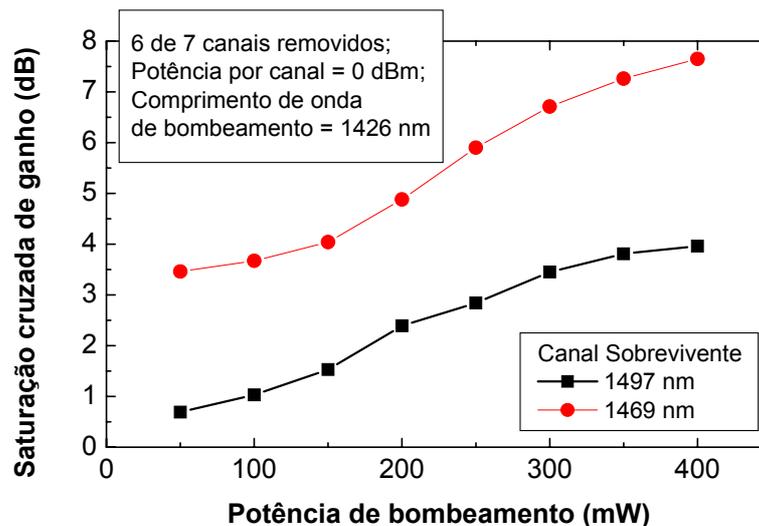


Figura 6.6 – Medidas de saturação cruzada de ganho dependendo da potência de bombeamento do amplificador para dois canais sobreviventes com comprimentos de onda diferentes quando 6 entre 7 canais do sistema são removidos. A potência de sinal por canal é de 0 dBm.

6.2 - Conclusões

Neste capítulo, foi descrita a importância em minimizar o efeito de saturação cruzada de ganho em TDFAs, bem como foi apresentada pela primeira vez, a dependência espectral do efeito em TDFAs. Estes resultados foram publicados em [23, 24].

Foi demonstrado que o efeito de saturação cruzada de ganho aumenta à medida que a potência de sinal aumenta. O efeito também aumenta com a diminuição do comprimento de onda do canal sobrevivente. Para bombeamento monocromático de TDFA em 1426 nm o efeito é mais pronunciado que para bombeamento em 1050 nm. Estas dependências ocorrem devido a fatores como nível de inversão de população e diferença entre as seções de choque de emissão e absorção.

O efeito de saturação cruzada de ganho pode chegar a 5 dB numa banda de 30 nm quando 6 entre 7 canais são removidos da entrada de um amplificador com configuração simples. Esta penalidade tende a aumentar à medida que o número de canais também aumenta.

Com estes experimentos realizados fica evidente que o entendimento do efeito de saturação cruzada é de fundamental importância para o emprego de amplificadores em redes ópticas transparentes de alta capacidade utilizando chaveamento automático (**ASON**, *Automatic Switch Optical Networks*), onde métodos que minimizem este efeito devem ser aplicados. Travamento de ganho óptico pode ser utilizado para esta finalidade porque torna a inversão de população no meio gerador de ganho moderadamente invertido, e assim o ganho do amplificador torna-se menos dependente da potência do sinal na entrada. As técnicas mais utilizadas para travamento de ganho totalmente óptico estão descritas e discutidas no capítulo seguinte.

É esperado que esquemas de bombeamentos, como os discutidos no capítulo 4, apresentem comportamento transitório mais complexo, fazendo com que o controle transitório de ganho seja mais complexo para TDFA do que para EDFA.

6.3 – Referências bibliográficas

- [1] S. Guy, W. Meffre, A. M. Jurdyc, B. Jacquier, F. Roy, P. Baniel, D. Bayart, A. Le Sauze, C. Collet, and J. J. Girard, “Spectroscopic studies of Tm doped glasses for S-band amplifiers” *In Proceedings of Optical Amplifiers and Applications 2001, Technical Digest*, pp. 39-41, 2001.
- [2] E. R. Taylor, L. N. Ng, N. P. Sessions, and H Buerger, “Spectroscopy of Tm³⁺-doped tellurite glasses for 1470 nm fiber amplifier”, *J. Applied Phys.*, vol. 92, pp. 112-117, 2002.
- [3] A. S. L. Gomes, “Recent progress in Thulium Doped Fiber Amplifiers”, *Technical Summary Digest, Photonics West 2003*, SPIE, pp. 361, 2003.
- [4] F. Roy, “Recent advances in thulium-doped fiber amplifiers,” *OSA Trends in Optics and Photonics - Optical Fiber Communication Conference, Technical Digest*, Post-conference Edition (OSA, Washington DC, 2002), vol. 70, pp. 568-569, 2002.
- [5] S. Aozasa, H. Masuda, T. Sakamoto, K. Shikano, and M. Shimizu, “Gain-shifted TDFA employing high concentration doping technique with high internal power conversion efficiency of 70%”, *Electron. Lett.*, vol. 38, n. 8, pp. 361-363, 2002.

- [6] T. Kasamatsu, Y. Yano, and T. Ono, "Gain-shifted dual-wavelength-pumped thulium-doped fiber amplifier for WDM signals in the 1.48-1.51- μm wavelength region", *IEEE Photon. Technol. Lett.*, vol. 13, n. 1, pp. 31-33, 2001.
- [7] M. Yuda, T. Sasaki, J. Temmyo, M. Sugo, and C. Amano, "High power, highly reliable 1.05 μm InGaAs strained quantum well laser diodes as pump sources for thulium doped fiber amplifiers", *Electron. Lett.*, vol. 38, n. 1, pp 45-46, 2002.
- [8] B. Bourliaguet, F. Emond, S. Mohrdiek, A.-C Jacob-Poulin, P.-Y Cortes, and J Lauzon, "Thulium-doped fiber amplifier using 1055 nm laser diode pumping configuration", *Electron. Lett.*, vol. 38, n. 10, pp. 447-448, 2002.
- [9] A. S. L. Gomes, M. T. Carvalho, and M. L. Sundheimer, "Comparison of distributed gain in two dual-wavelength pumping schemes for Thulium-doped fiber amplifiers", *Electron. Lett.*, vol. 39, n. 8, pp. 647-648, 2003.
- [10] A. S. L. Gomes, M. T. Carvalho, M. L. Sundheimer, C. J. A. Bastos-Filho, J. F. Martins-Filho, J. P. von der Weid, and W. Margulis, "Low pump power, short-fiber co-propagating dual-pumped (800 nm + 1050 nm) thulium doped fiber amplifier", *Opt. Lett.*, vol. 28, n. 5, pp. 334-336, 2003.
- [11] C. J. A. Bastos-Filho, J. F. Martins-Filho, A. S. L. Gomes, and M. T. Carvalho, "Gain characterization of a single-diode pumped TDFA employing a highly concentrated Thulium Doped fibre", *Resumos do I workshop do OSA chapter de Campinas, Campinas/SP, Brasil*, 2003.
- [12] D. A. Carter, and J. Korn, "Cross-Gain saturation reduction in a double-stage over-pumped EDFA with pump re-use", *In Technical Digest of Conference on Lasers and Electro-Optics 1999*, Paper CtuW6, pp. 218-219, 1999.
- [13] M. Karásek, "Optical Amplifiers in Dynamic Networks with All-Optical Routing", *In Proceedings of 4th International Conference on Transparent Optical Networks*, Paper Mo.C.3, vol. 1, pp. 57-61, 2002.
- [14] D. H. Richards, and M. Ali, "EDFA chain control: A comparison of two all-optical approaches", *In Proceedings of Lasers and Electro-Optics Society conference 1997*, pp. 70-71, 1997.
- [15] Y. Sun, A. K. Srivastava, J. L. Zyskind, J. W. Sulhoff, C. Wolf, and R. W. Tkach, "Fast power transient in WDM optical networks with cascaded EDFAs", *Electron. Lett.*, vol. 33, n. 4, pp. 313-314, 1997.

- [16] S. I. Pegg, M. J. Fice, M. J. Adams, and A. Hadjifotiou, "The effect of amplified spontaneous emission on wavelength conversion by cross gain modulation in a semiconductor optical amplifier", *In Proceedings of IEE CoINDOA 1998*, Paper 6, pp. 1-4, 1998.
- [17] M. Menif, M. Karásek, and L. A. Rusch, "Cross-Gain Modulation in Raman Fiber Amplifier: Experimentation and Modeling", *IEEE Photon. Technol. Lett.*, vol. 14, n. 9, pp. 1261-1263, 2002.
- [18] Jae-Oh Byun, Pilhan Kim, Won Jae Lee, Choong Hee Lee, and Namkyoo Park, "Analysis on the Transient Response of 1.55- μm /1.4- μm Dual-Wavelength Pumped Thulium-Doped Fiber Amplifiers", *IEEE Photon. Technol. Lett.*, vol. 14, n. 11, pp. 1503-1505, 2002.
- [19] M. T. Carvalho, and A. S. L. Gomes, "Study on Transient Response of 1.05 μm single- and 1.05/1.55 μm dual wavelength pumped TDFAs", *In Proceedings of Optical Fiber Communication Conference and Exhibit 2004*, Paper MF17, Los Angeles, EUA, 2004.
- [20] S. S-H Yam, J. Kim, M. E. Marhic, Y. Akasaka, and L. G. Kazovsky, "Gain Dynamics of 14XX-nm pumped Thulium-doped fiber amplifier", *IEEE Photon. Technol. Lett.*, vol. 16, n. 7, pp. 1646-1648, 2004.
- [21] P. C. Becker, N. A. Olsson, and J. R. Simpson, *Erbium-Doped Fiber Amplifiers – Fundamentals and Technologies*, Academic Press, San Diego, CA, USA, 1999.
- [22] S. Yam, F. An, M. Marhic, and L. Kazovsky, "Gain-clamped Thulium-doped fiber amplifier using a single pumping at 1050 nm", *In Proceedings of Optical Fiber Communication Conference and Exhibit 2003*, paper FB3, Atlanta, EUA, 2003.
- [23] C. J. A. Bastos-Filho, J. F. Martins-Filho, M. T. Carvalho, and A. S. L. Gomes, "Measurements of Gain Cross-Saturation and Transient Response in Single Pump TDFAs", *Opt. Commun.*, vol. 246, pp. 79-84, 2005.
- [24] C. J. A. Bastos-Filho, J. F. Martins-Filho, M. T. Carvalho, and A. S. L. Gomes, "Measurements of Gain Cross-Saturation and Transient Response in Single Pump TDFAs", *Nos anais do simpósio Brasileiro de Microondas, Optoeletrônica e Magnetismo 2004, MOMAG 2004*, São Paulo/SP, Brasil, 2004.

Capítulo 7 – Amplificadores a fibra dopada com Érbio com travamento de ganho

A evolução das redes ópticas estáticas para redes ópticas transparentes dinâmicas com chaveamento automático (**ASON**, *Automatic Switched Optical Networks*) permite que ocorra inserção ou remoção de canais na rede, bem como o roteamento de circuitos ópticos. Este processo torna o número de canais ativos em cada um dos enlaces que compõem a rede variável no tempo. A variação do número de canais na entrada de um amplificador implica na mudança da inversão de população do meio gerador de ganho, resultando em uma mudança no ganho gerado pelo amplificador. Com a flutuação no ganho óptico em canais previamente ativos a qualidade de serviço (**QoS**, *Quality of Service*) na rede óptica pode ser afetada. Então, torna-se necessário o controle automático de ganho dos amplificadores ópticos existentes em redes desta natureza para que a variação do ganho e, por consequência o impacto no desempenho dos canais ativos, seja o menor possível.

Na seção 7.1 é realizada uma revisão sobre o estado da arte e também são apresentadas as técnicas e configurações utilizadas. Na seção 7.2 está descrita uma análise experimental do efeito causado pela mudança na direção do laser de bombeamento em amplificadores ópticos a fibra dopada com Érbio com travamento de ganho totalmente óptico utilizando circuladores ópticos para compor a malha de realimentação positiva. Na seção 7.3, são apresentadas as conclusões.

7.1 – Técnicas para travamento de ganho óptico

Basicamente, existem duas soluções práticas para evitar a variação de ganho imposta pela variação da potência total de sinal na entrada de um amplificador óptico. Estas serão doravante tratadas ao longo deste capítulo como técnicas de travamento de ganho. Uma delas consiste do emprego de um circuito de realimentação optoeletrônico [1] e a outra utiliza uma malha de realimentação totalmente óptica [2-11].

No caso da realimentação optoeletrônica a potência de bombeamento é ajustada levando em consideração a potência óptica do sinal na entrada do amplificador. Uma implementação interessante desta técnica foi proposta por Konishi e colaboradores em [1].

Eles construíram um amplificador onde um circuito optoeletrônico conta o número de comprimentos de onda ativos utilizando um filtro acústico-óptico sintonizável. Com base nesta informação, um controlador regula a potência do laser de bombeamento, ajustando assim o ganho para um valor pré-determinado.

Na técnica de travamento totalmente óptico cria-se uma cavidade para oscilação Laser utilizando uma região espectral dentro da faixa de emissão espontânea do amplificador, mas que não seja utilizada para amplificação de canais WDM. O laser resultante do processo de oscilação nesta cavidade doravante será chamado de laser de travamento. O laser de travamento mantém o meio gerador de ganho moderadamente saturado, com inversão de população praticamente constante para uma faixa mais extensa de valores de potência óptica do sinal de entrada. Com isso, a dependência do ganho com a potência total de entrada do sinal diminui. Além disso, é importante salientar que em estado estacionário o ganho gerado pelo meio ativo para o comprimento de onda do laser de travamento deve ser igual às perdas da cavidade de realimentação [2]. A realimentação optoeletrônica e o travamento totalmente óptico também podem ser utilizados em conjunto, como em [12].

Muitas configurações com realimentação totalmente óptica têm sido propostas e implementadas. As mais utilizadas estão apresentadas na figura 7.1. A maioria das configurações utiliza acopladores direcionais para criar as cavidades de realimentação (*ver figura 7.1-a*). Nelas uma fração da potência de ASE é separada e inserida na malha de realimentação, passando por um filtro sintonizável, que é o responsável pela determinação do comprimento de onda do laser de travamento, e depois por um atenuador variável que determina o limiar de operação do laser de travamento. Então, este sinal é introduzido no meio gerador de ganho por outro acoplador, criando um processo de realimentação positiva e saturando o meio gerador de ganho. Estes acopladores podem utilizar várias razões de potência entre as portas de saída, como: (50/50) [2], (10/90) [3] ou (5/95) [11].

Outra possibilidade é a construção de configurações utilizando circuladores ao invés de acopladores direcionais como mostrado na figura 7.1-b [5]. O emprego de circuladores ópticos apresenta vantagens como diminuir as perdas para o sinal, diminuir a figura de ruído e, ao mesmo tempo, suprimir o laser de travamento na saída do amplificador.

Outra configuração utiliza fibras com redes de Bragg (**FBG**, *Fiber Bragg Grating*) para refletir somente o comprimento de onda especificado para o laser de travamento e criar uma cavidade de realimentação positiva (*ver figura 7.1-c*) [4, 5].

Além disso, S. W. Harun e H. Ahmad [9] relatam uma combinação das técnicas anteriores utilizando um acoplador direcional, um circulador óptico e uma FBG para compor a cavidade de realimentação positiva que propicia o processo de travamento de ganho óptico (*ver figura 7.1-d*).

Existem também outras técnicas citadas na literatura onde podem ser empregados, por exemplo, um *Loop Mirror* para diminuir a interação entre o laser de travamento e o laser de sinal [10] ou uma fibra compensadora de dispersão (**DCF**, *Dispersion Compensating Fiber*) que é capaz de gerar um componente de laser a partir do efeito *Brillouin* sendo este laser responsável pela saturação do meio [13, 14].

Em 1996, J. Chung e colaboradores [3] mostram a influência do comprimento de onda do laser de travamento utilizando a configuração mostrada na figura 7.1-a, com acopladores direcionais 10/90. Foi demonstrado que à medida que o laser de travamento se aproxima do pico de emissão de ASE, o desempenho em ruído melhora.

Também é conveniente salientar que transientes gerados pelo efeito de saturação cruzada de ganho em amplificadores (*ver capítulo 6*) com travamento ativo são críticos para o desempenho, podendo tornar a taxa de erro por bit (**BER**, *Bit Error Rate*) inadmissível [11]. A supressão destes transientes ocorre com a diminuição das perdas da malha de realimentação óptica, mas isso implica em redução do ganho do amplificador [3].

A saturação de ganho causada pelo laser de travamento e a adição de perdas causada pela inserção de componentes para a composição da malha de realimentação implicam em uma degradação da figura de ruído do amplificador [3, 15]. O comportamento da figura de ruído é determinado pela inversão de população distribuída ao longo da fibra dopada. Foi mostrado em [15] que a figura de ruído depende fortemente da inversão de população no início da fibra dopada com Érbio. Sendo assim, o laser de travamento copropagante com o sinal mostrou um melhor desempenho em ruído tanto para bombeamento copropagante quanto para bombeamento bidirecional. O sentido do bombeamento também é fundamental para o desempenho em ruído do amplificador. Em [15] o bombeamento bidirecional gerou uma penalidade de 1 dB sobre a figura de ruído em relação ao bombeamento copropagante.

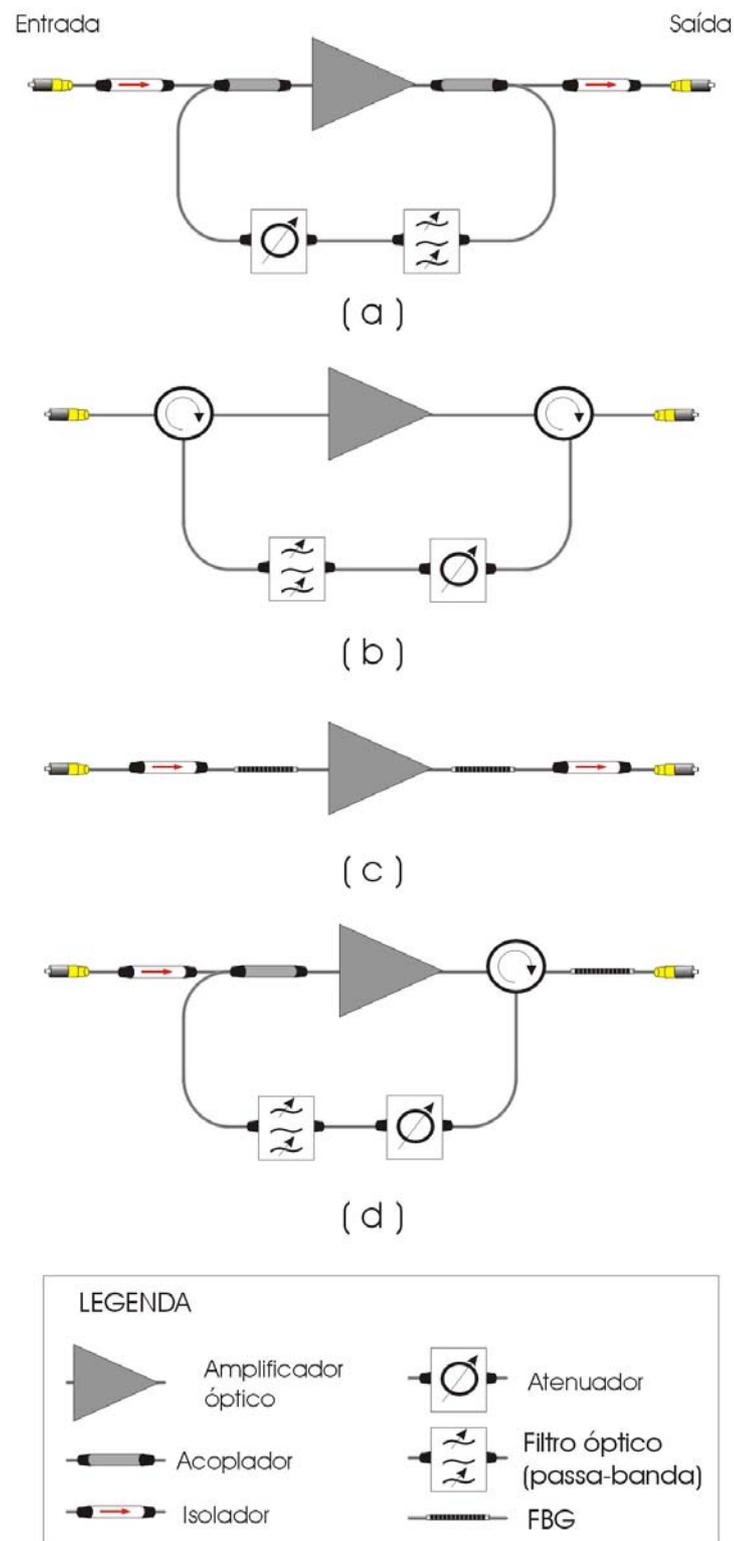


Figura 7.1 – Configurações para travamento de ganho totalmente óptico utilizando: (a) acopladores direcionais, (b) circuladores ópticos, (c) fibras com redes de Bragg e (d) combinação das técnicas.

Em 1999, utilizando a configuração 7.1-b e laser de travamento contrapropagante com o sinal, M. Kobayashi [6] demonstrou que a utilização de duas fibras distintas intercaladas por um filtro, sendo este responsável pela inserção de perdas no comprimento de onda do laser de travamento, diminui a potência deste laser na extremidade de entrada do sinal na fibra dopada, aumentando o nível de inversão de população e, por consequência, diminuindo a figura de ruído.

É importante frisar que os resultados acima foram obtidos com EDFA. Contudo outros tipos de amplificadores ópticos também já foram reportados com esquemas de travamentos de ganho utilizando malhas de realimentação óptica, como: Amplificadores Raman a fibra (**FRA**, *Fiber Raman Amplifiers*) (mais informações sobre FRA ver capítulo 2) [16], Amplificadores a fibra dopada com Érbio para banda S (**S-EDFA**, *S-Band Erbium Doped Fiber Amplifiers*) (mais informações sobre S-EDFA ver capítulo 2) [17] e amplificadores a fibra dopada com Túlio (**T DFA**, *Thulium Doped Fiber Amplifiers*) [18] (mais informações sobre T DFA ver capítulo 3).

7.2 – Análise do efeito da direção do bombeamento no travamento de ganho óptico em EDFA com circuladores na malha de realimentação

Como mencionado na seção anterior, configurações de travamento utilizando circuladores para construir a malha de realimentação apresentam vantagens sobre configurações que utilizam acopladores direcionais para compor a malha de realimentação [6]. As perdas de inserção dos circuladores são menores que as perdas impostas pelos acopladores, e o uso de circuladores dispensa o uso dos isoladores de entrada e saída. Com isso as perdas para o sinal são menores. Além disso, o laser de travamento é suprimido na saída do amplificador, devido a disposição dos circuladores.

Deve ser observado que o laser de travamento é necessariamente contrapropagante com o sinal devido à disposição dos circuladores. Todavia, para um melhor desempenho em ruído, o laser de travamento deve ser copropagante com o sinal, como mostrado por S. H. Lee em [14]. Isto porque a potência do laser de travamento é menor na entrada da fibra quando o laser de travamento é copropagante com o sinal. Haja vista a importância da determinação da influência de parâmetros como a direção do bombeamento no processo de

amplificação e dado que esta análise comparativa de desempenho utilizando circuladores nunca foi abordada, foram montadas as configurações utilizando circuladores apresentadas na figura 7.3. Na figura 7.3-a, o bombeamento está no sentido copropagante com o sinal, enquanto que na configuração da figura 7.3-b o bombeamento é realizado no sentido contrapropagante.

Uma fibra de sílica dopada com Érbio de 11 metros, cujas especificações estão mostradas na tabela 7.1, foi utilizada na montagem experimental. Foram empregados dois circuladores para criar a malha de realimentação, cada um com perda de inserção de 0,8 dB, um acoplador tipo WDM para agrupar o laser de sinal e o laser de travamento com o laser de bombeamento, dois atenuadores variáveis em série para controlar a quantidade de potência fornecida pela malha de realimentação, um filtro óptico passa-faixa sintonizável com largura de banda a 3 dB de 1 nm para determinar o comprimento de onda do laser de travamento e um acoplador tipo TAP de 1% para monitorar a potência na malha de realimentação. O bombeamento foi realizado com um laser de diodo emitindo em 980 nm com potência máxima de 82 mW. O comprimento de onda do sinal utilizado nas medidas realizadas nesta seção é 1542,6 nm. As medidas de ganho e figura de ruído foram realizadas com um analisador de espectro óptico.

Tabela 7.1 – *Dados da fibra dopada com Érbio.*

Composição da fibra	La ₂ O ₃ - Al ₂ O ₃ - SiO ₂
Dopante do núcleo	Er ³⁺
Absorção em 980 nm	> 4 dB
Abertura numérica	0,26
Comprimento de onda de corte	950 nm
Diâmetro modal em 1550 nm	5 µm
Diâmetro da casca	125 µm
Comprimento da fibra	11 m

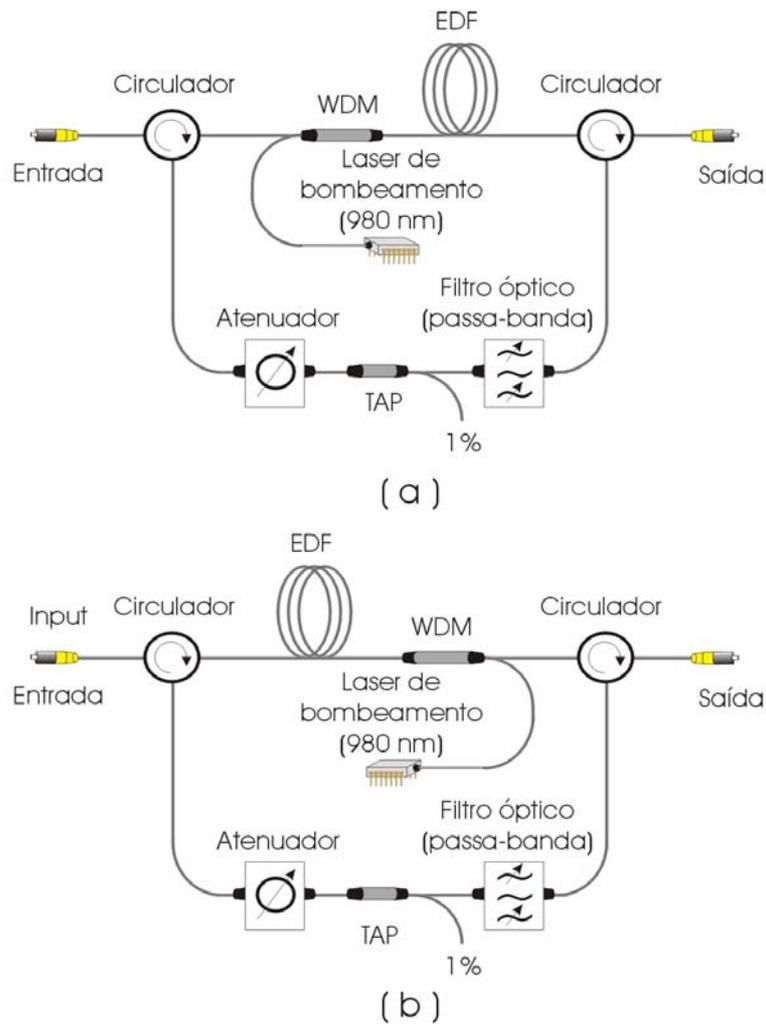


Figura 7.2 – Configurações para travamento de ganho totalmente óptico utilizando circuladores ópticos com bombeamento no sentido: (a) copropagante e (b) contrapropagante com o sinal.

A figura 7.3 mostra o espectro óptico medido na saída do amplificador para duas situações: (a) sem travamento e (b) com travamento. Foi utilizada potência de bombeamento de 65 mW e potência de sinal de -29 dBm. Foi utilizada a configuração apresentada na figura 7.2-a. O filtro passa-faixa foi sintonizado em 1530,8 nm que corresponde ao pico de ASE. No caso da operação sem travamento, a perda do atenuador variável na realimentação é de 34 dB, sendo este superior ao ganho gerado pela fibra dopada com Érbio, não atingindo assim a condição de oscilação laser no comprimento de onda de travamento. Pode-se constatar na figura 7.3-a que a potência do sinal na saída é de aproximadamente 2 dBm, correspondendo a um ganho de aproximadamente 31 dB. O pico de ASE em 1530,7 nm está em -9,1 dBm.

Quando a perda do atenuador da malha de realimentação é diminuída para 18 dB, o ganho da fibra dopada é suficiente para compensar as perdas para o laser de travamento em 1530,8 nm. Com isso ocorre oscilação laser no comprimento de onda destinado ao travamento e este laser compete com o laser de sinal por população invertida, levando a uma diminuição do ganho para o sinal. Nota-se que, devido à concorrência por população invertida, ocorre uma diminuição da potência de ASE em todo espectro. O pico de ASE nesse caso é de -16,5 dBm, e o pico do sinal passa para -5 dBm, correspondendo a um ganho de 24 dB.

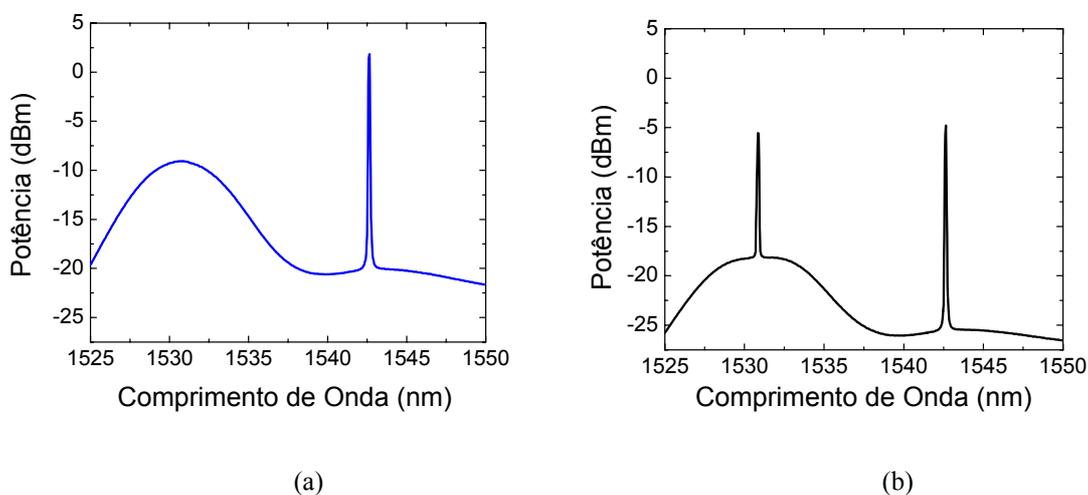


Figura 7.3 – Espectro óptico medido na saída do amplificador para atenuação na malha de realimentação de (a) 34 dB e (b) 18 dB. A potência de bombeamento é de 65 mW. A potência de entrada do sinal é de -29 dBm.

A figura 7.4 mostra o ganho e figura de ruído dos amplificadores em função da perda inserida pelo atenuador disposto na malha de realimentação para sentido de bombeamento (a) copropagante e (b) contrapropagante com o sinal, respectivamente. Quando a condição de travamento é satisfeita, a perda na realimentação determina o limiar de oscilação do laser de travamento, determinando assim o ganho gerado pela fibra dopada para o sinal.

Para perdas inseridas pelos atenuadores na malha de realimentação maiores do que 30 dB, o processo de travamento de ganho não ocorre porque o ganho gerado pelo meio não é capaz de compensar o total de perdas da malha de realimentação. Por outro lado, para valores menores de perdas, a variação de ganho (em decibéis) é linear com a perda inserida na malha de realimentação. Em ambos os casos, um aumento no ganho de 0,55 dB é constatado para cada 1 dB de perda acrescida na malha de realimentação.

A figura de ruído também muda à medida que a perda da realimentação varia. Isto ocorre porque quanto menor a perda, maior a potência do laser de travamento. Como o laser de travamento é contrapropagante com o sinal, quanto maior a potência do laser de travamento, menor a inversão de população na extremidade de entrada do sinal na fibra dopada. Como a inversão de população no início da fibra determina a figura de ruído ocorre um aumento da figura de ruído (*ver capítulo 2*).

Observa-se uma figura de ruído maior para a configuração com bombeamento contrapropagante (maior do que 6 dB), apesar do maior ganho na ausência do travamento de ganho. Para condição de travamento extremo a figura de ruído é de 8,5 dB, valor este muito alto para aplicações sistêmicas. Entretanto, para a configuração com bombeamento copropagante, a figura de ruído varia entre 5 dB e 6,5 dB, que são valores razoáveis para utilização prática.

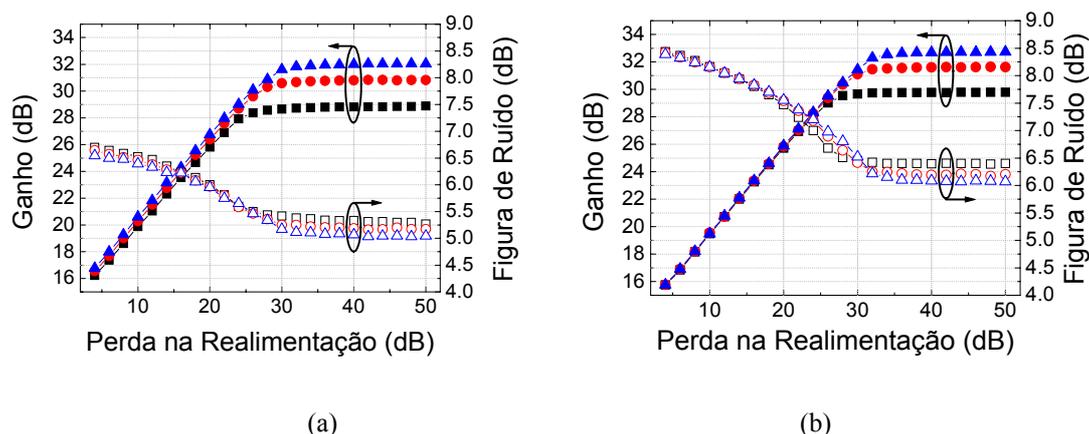


Figura 7.4 – Ganho e figura de ruído do amplificador em função da perda inserida pelo atenuador na realimentação para bombeamento no sentido: (a) copropagante e (b) contrapropagante com o sinal. Três valores de potência de bombeamento foram utilizados: 43 mW (quadrados), 65 mW (círculos) e 75 mW (triângulos). A Potência de entrada do sinal é de -28,7 dBm.

A figura 7.5 mostra o ganho do amplificador em função da potência de sinal na entrada do amplificador para vários valores de perda inserida pelo atenuador disposto na malha de realimentação, para sentido de bombeamento copropagante e contrapropagante com o sinal, respectivamente. É notória a influência da perda na malha de realimentação. A diminuição na perda da realimentação implica na diminuição do ganho de pequenos sinais do amplificador.

Alguns dados importantes podem ser extraídos para comparação. Na configuração com bombeamento copropagante para perda de realimentação de 50 dB tem-se o ganho

não saturado do amplificador de 31,6 dB e a potência de saturação na saída é de 10,8 dBm. Já para perda de realimentação de 6 dB tem-se o ganho não saturado do amplificador de 18,4 dB e a potência de saturação na saída é de 14,25 dBm. Na configuração com bombeamento contrapropagante para perda de realimentação de 50 dB tem-se o ganho não saturado do amplificador de 32,6 dB e a potência de saturação na saída é de 12,15 dBm. Para perda de realimentação 6 dB tem-se ganho não saturado do amplificador de 16,9 dB e a potência de saturação na saída é de 15,6 dBm. Estes resultados mostram que a configuração com bombeamento contrapropagante apresenta maior ganho travado e maior potência de saturação de saída que a configuração com bombeamento copropagante. Por outro lado, ela tem o ganho menor quando o travamento de ganho é aplicado.

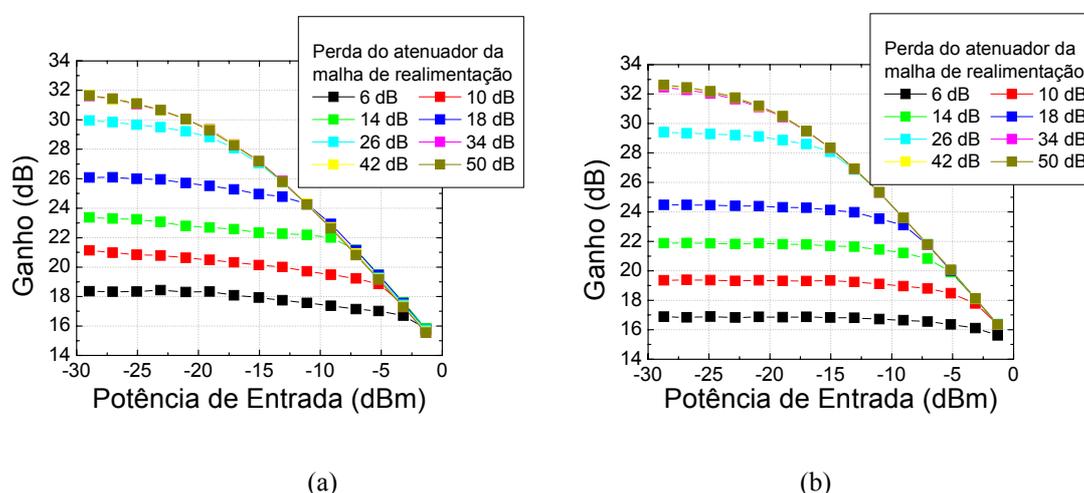


Figura 7.5 – Ganho do amplificador em função da potência de entrada do sinal para bombeamento no sentido: (a) copropagante e (b) contrapropagante com o sinal. A potência de bombeamento é de 75 mW.

A figura 7.6 mostra o ganho e a figura de ruído do amplificador em função da potência de sinal na entrada do amplificador para três valores distintos de perda inserida pelo atenuador disposto na malha de realimentação, para sentido de bombeamento (a) copropagante e (b) contrapropagante com o sinal, respectivamente. Em ambos os casos têm-se 75 mW de potência de bombeamento em 980 nm. A configuração cujo bombeamento é copropagante com o sinal apresenta um melhor desempenho em ruído para baixas potências de sinal.

Na figura 7.6-b, pode-se notar que à medida que a potência de sinal aumenta, a figura de ruído atinge um mínimo. Contudo, se a potência de sinal continuar a subir a partir deste ponto, a figura de ruído também aumenta. Este comportamento também ocorre na referência [15]. A figura de ruído é maior para baixos valores de potência de sinal por

causa da degradação causada pelo laser de travamento. Com o aumento da potência de sinal, este começa a competir com o laser de travamento por população invertida do meio gerador de ganho. Entretanto, se a potência de sinal continua aumentando, não existirá bastante população invertida para manter o processo de amplificação, implicando em figuras de ruído mais altas. Apesar disso, este comportamento ocorre fora da região de operação normal de um amplificador com travamento de ganho, onde o amplificador não está operando sob condição de travamento.

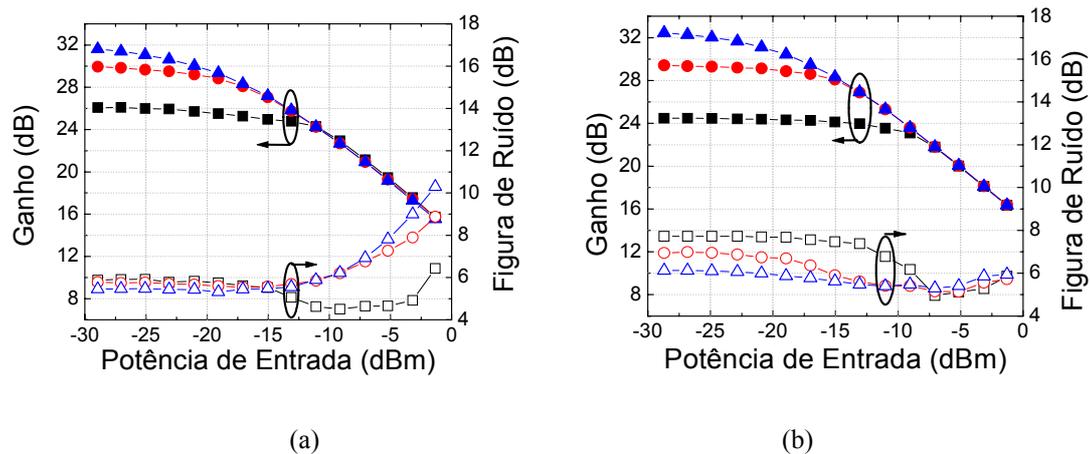


Figura 7.6 – Ganho e figura de ruído do amplificador em função da potência de entrada do sinal para (a) copropagante e (b) contrapropagante com o sinal. Potência de bombeamento de 75 mW em 980 nm. Perdas do atenuador da malha de realimentação: 18 dB (quadrados), 26 dB (círculos) e 34 dB (triângulos).

A figura 7.7 mostra o ganho e a figura de ruído em função da potência de bombeamento, para bombeamento copropagante (*triângulos*) e contrapropagante (*quadrados*) com o sinal, para perdas do atenuador da malha de realimentação de 34 dB (*figura 7.7-a*) e 18 dB (*figura 7.7-a*), respectivamente. Em ambos os casos, a potência de sinal é -29 dBm. Quando as perdas do atenuador da malha de realimentação são de 34 dB (*figura 7.7-a*), o amplificador não está travado e apesar do ganho ser 1 dB menor para bombeamento copropagante, este apresenta figura de ruído 1 dB menor (por volta de 5 dB), mostrando um melhor desempenho em ruído. Na condição de travamento (com perdas do atenuador da malha de realimentação de 18 dB, veja *figura 7.8-b*), a diferença da figura de ruído entre as duas configurações aumenta. Para potência de bombeamento de 80 mW, a diferença na figura de ruído é de aproximadamente 2 dB. Isso indica que deve-se usar bombeamento copropagante quando circuladores ópticos são utilizados para compor a malha de realimentação.

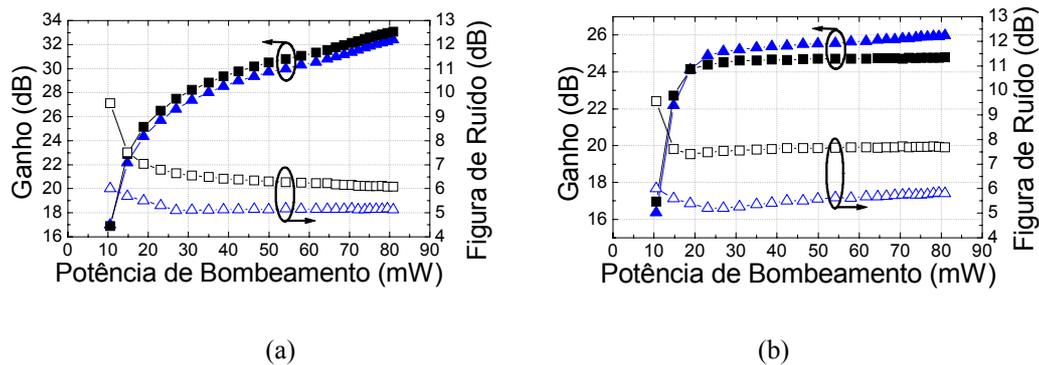


Figura 7.7 – Ganho e figura de ruído do amplificador em função da potência de bombeamento para perdas do atenuador da malha de realimentação de (a) 34 dB e (b) 18 dB quando o bombeamento está copropagante (triângulos) e contrapropagante (quadrados). Potência de sinal de -29 dBm.

7.3 - Conclusões

Neste capítulo, foram expostas as diversas técnicas e configurações para travamento de ganho utilizando o método optoeletrônico e totalmente óptico. Foi demonstrado experimentalmente que o desempenho em ruído de EDFAs com travamento de ganho é altamente dependente do sentido do laser de bombeamento por causa das mudanças na dinâmica de ganho na fibra dopada. Foi averiguado que a direção do laser de travamento deve ser copropagante com o sinal, já que a figura de ruído depende da saturação no início da fibra dopada. Nesse caso, a figura de ruído é de 1 dB a 2 dB menor do que no caso onde o bombeamento é contrapropagante com o sinal. Foi mostrado que um EDFA com travamento de ganho utilizando circuladores para compor a malha de realimentação podem apresentar desempenho em ruído adequado para utilização prática. O fato de não serem necessários isoladores na entrada e saída do amplificador que utiliza circuladores torna atrativo para aplicações comerciais.

7.4 – Referências bibliográficas

- [1] C. Konishi, T. Yoshida, S. Hamada, K. Asahi, and S. Fujita, “Dynamic gain-controlled Erbium Doped Fiber Amplifier repeater for WDM network”, *In Technical Digest of Optical Fiber Communication Conference and Exhibit 1997*, pp. 18-19, Anaheim, EUA, 1997.
- [2] M. F. Krol, Y. Liu, J. J. Watkins, and M. J. Dailey, “Gain Variation in Optically Gain Clamped Erbium Doped Fiber Amplifiers”, *In Technical Digest of 24th European Conference on Optical Communication*, vol. 1, pp. 43-44, Madrid, Espanha, 1998.
- [3] J. Chung, S. Y. Kim, and C. J. Chae, “All-optical gain-clamped EDFAs with different feedback wavelengths for use in multiwavelength optical networks”, *Electron. Lett.*, v. 32, n. 23, pp. 2159-2161, 1996.
- [4] J. Bryce, G. Yoffe, Y. Zhao, and R. Minasian, “Tunable, gain clamped EDFA incorporating chirped fibre Bragg Grating”, *Electron. Lett.*, v. 34, n. 17, pp. 1680-1681, 1998.
- [5] S. Yamashita, and M. Nishihara, “L-band Erbium-Doped Fiber Amplifiers incorporating an Inline Fiber Bragg Grating”, *IEEE J. Selected Topics in Quantum Electron.*, v. 7, n. 1, pp. 44-48, 2001.
- [6] M. Kobayashi, “Noise figure improvement of optical gain-clamped fibre amplifier by mid-point band reject filter to lasing light”, *Electron. Lett.*, v. 35, n. 6, pp. 486-487, 1999.
- [7] Y. Tasushima, and K. Kikuchi, “Gain spectrum equalization of all-optical gain-clamped erbium-doped fiber amplifier”, *IEEE Photon. Technol. Lett.*, v. 11, n. 2, pp. 176-178, 1999.
- [8] J. T. Ahn, and K. H. Kim, “All-Optical Gain-Clamped Erbium-Doped Fiber Amplifier with improved Noise figure and freedom from relaxation oscillation”, *IEEE Photon. Technol. Lett.*, v. 16, n. 1, pp. 84-86, 2004.
- [9] S. W. Harun, and H. Ahmad, “L-band Erbium-Doped Fiber Amplifier with clamped-and flattened-gain using FBG”, *Electron. Lett.*, v. 39, n. 17, pp. 1238-1240, 2003.
- [10] K. Inoue, “Gain-clamped fiber amplifier with a loop mirror configuration”, *IEEE Photon. Technol. Lett.*, v. 11, n. 5, pp. 533-535, 1999.
- [11] L. Zhou, S. Wang, Q. Yu, Z. Jiang, H. Wang, and C. Fan, “Influence of power transients from Gain-clamped EDFA on optical receiver BER performance”, *International Conference on Communication Technology Proceedings, WCC - ICCT 2000*, vol. 1, pp.

406-409, 2000.

[12] M. Hashimoto, M. Yoshida, and H. Tanaka, "The characteristics of WDM systems with hybrid AGC EDFA in the photonics network", *In Technical Digest of Optical Fiber Communication Conference and Exhibit 2002*, pp. 517-518, Anaheim, EUA, 2002.

[13] S. H. Lee, and S. H. Kim, "All-optical gain-clamped erbium-doped fiber amplifier for wavelength-division multiplexed networking using stimulated Brillouin scattering", *In Technical Digest of Optical Fiber Communication Conference and Exhibit 1998*, pp. 241-242, Anaheim, EUA, 1998.

[14] S. H. Lee, and S. H. Kim, "All-optical gain-clamping in erbium-doped fiber amplifier for using stimulated Brillouin scattering", *IEEE Photon. Technol. Lett.*, v. 10, n. 9, pp. 1316-1318, 1998.

[15] M. Cai, X. Liu, J. Cui, P. Tang, and J. Peng, "Study on Noise Characteristic of Gain-Clamped Erbium-Doped Fiber-Ring Lasing Amplifier", *IEEE Photon. Technol. Lett.*, v. 9, n. 8, pp. 1093-1095, 1997.

[16] Y. Gong, W. Qi, X. Zhou, P. Shum, C. Lu, and T. X. Cheng, "Investigation of Raman Fiber Amplifier with all optical gain clamping", *In Technical Digest of Lasers and Electro-Optics Society 2002*, pp. 480, 2002.

[17] C.-H. Yeh, C.-C. Lee, C.-Y. Chen, and S. Chi, "S band Gain-Clamped Erbium-Doped Fiber Amplifier by using optical feedback method", *IEEE Photon. Technol. Lett.*, v. 16, n. 1, pp. 90-92, 2004.

[18] S. S. H. Yam, Y. Akasaka, M. E. Marhic, and L. G. Kazovsky, "Gain-Clamped Thulium-Doped Fiber Amplifier with single pump at 1050 nm", *Electron. Lett.*, v. 40, n. 1, pp. 13-15, 2004.

Capítulo 8 – Amplificadores ópticos híbridos para a banda S

Com a grande difusão dos sistemas com multiplexação em comprimento de onda, a expansão dos sistemas de comunicações via fibra óptica tende a utilizar bandas alternativas à banda **C** (*Conventional band*, 1530-1565 nm). As bandas mais promissoras para este propósito são as bandas **L** (*Long wavelengths*, 1565-1610 nm) e **S** (*Short wavelengths*, 1460-1530 nm), regiões espectrais com comprimentos de onda maiores e menores do que os da banda **C**, respectivamente. Amplificadores com largo espectro de amplificação são de fundamental importância para sistemas envolvendo um grande número de canais com comprimentos de onda diferentes. Estes amplificadores são comumente chamados de amplificadores banda larga. Amplificadores ópticos diferentes podem ser combinados para prover amplificação em uma faixa de comprimentos de onda mais extensa, sendo estes chamados de amplificadores híbridos.

Neste capítulo são apresentadas configurações para amplificadores híbridos utilizando TDFAs e FRAs. São consideradas configurações com esquemas de bombeamento em comprimentos de onda diferentes, como também para bombeamento monocromático em 1426 nm.

8.1 – Introdução

Sistemas que utilizam conjuntos de canais em diversas bandas simultaneamente podem ter o processo de amplificação conduzido de duas formas distintas. A mais simples, porém mais custosa, consiste em separar os canais das diversas bandas utilizando demultiplexadores de banda, amplificar as bandas com amplificadores distintos para cada banda, e depois multiplexar todas as bandas numa mesma fibra óptica de transmissão (*como mostrado na figura 8.1-a*). Para este tipo de arquitetura é relativamente fácil obter banda de amplificação com largura acima de 100 nm, como reportado em [1-4]. A outra opção consiste na utilização de amplificadores banda larga que, apesar de apresentarem arquiteturas mais complexas, torna-se interessante por minimizar o número de componentes (*como mostrado na figura 8.1-b*).

Normalmente, esses amplificadores banda larga são construídos em arquiteturas híbridas a partir de amplificadores ópticos simples, já descritos no capítulo 2. Para cada banda de transmissão existem amplificadores ópticos específicos. Os amplificadores ópticos à fibra dopada com Érbio (**EDFA**, *Erbium Doped Fiber Amplifier*) (ver seção 2.4.5) têm espectro de amplificação localizado na *banda C* (1530 nm -1565 nm), mas podem ser modificados para operar na *banda L* (1565 nm -1610 nm) ou na região superior da *banda S* (1500 nm -1530 nm). Os amplificadores ópticos à fibra dopada com Túlio (**T DFA**, *Thulium Doped Fiber Amplifier*) (ver capítulo 3) podem ser utilizados para amplificação na *banda S*, cobrindo uma região de aproximadamente 30 nm, onde o centro da região de amplificação pode variar entre 1470 nm e 1500 nm, dependendo de alguns parâmetros do amplificador, como concentração de dopante na fibra ou esquema de bombeamento empregado. Além dos amplificadores a fibra dopada com terras raras existem amplificadores baseados em efeitos não-lineares, como amplificadores Raman a fibra (**FRA**, *Fiber Raman Amplifier*) (ver seção 2.4.3) ou amplificadores paramétricos (**OPA**, *Parametric Amplifiers*) (ver seção 2.4.2), que têm o pico de ganho determinado basicamente pelo comprimento de onda do seu bombeamento.

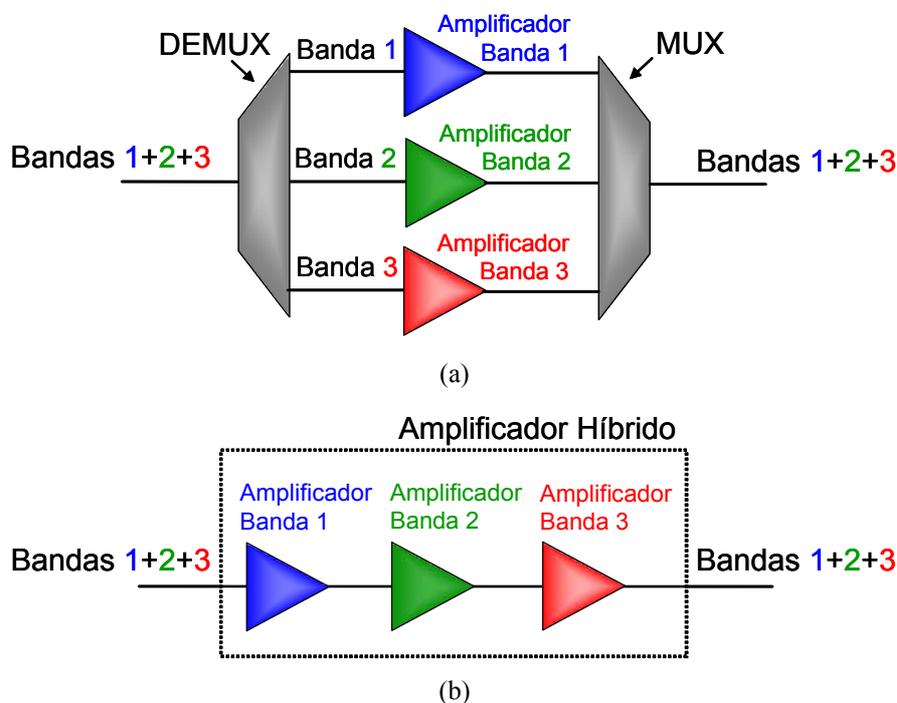


Figura 8.1 – Opções para sistemas de amplificação envolvendo várias bandas simultaneamente: (a) Amplificação distinta das bandas em questão e (b) amplificação simultânea de todas as bandas por um amplificador banda larga.

Existem vários trabalhos científicos que citam a construção de amplificadores híbridos com cascadeamento serial (*ver Figura 9.1-b*) dos amplificadores citados anteriormente. Entre eles estão: FRA em conjunto com EDFA [5-14], OPA em conjunto com FRA [15,16], vários FRA com bombeamentos diferentes [17], TDFA em conjunto com OPA [18], Amplificador Óptico de semicondutor (**SOA**, *Semiconductor Optical Amplifier*) em conjunto com FRA [19], TDFA em conjunto com EDFA [20, 21], e FRA em conjunto com TDFA [22-26].

O maior número de publicações científicas relacionadas a amplificadores híbridos com cascadeamento serial descrevem os avanços na combinação de amplificadores Raman a fibra e amplificadores a fibra dopada com Érbio. Estes amplificadores estão separados em dois grupos distintos: os que usam a amplificação Raman distribuída, onde o ganho por efeito Raman ocorre na fibra de transmissão, e os que utilizam amplificação por efeito Raman de forma discreta, através de um módulo contido no amplificador híbrido.

Várias propostas para amplificação Raman de forma distribuída, em conjunto com amplificadores a fibra dopada com Érbio, foram publicadas. H. Masuda e colaboradores [5, 6] apresentaram uma banda de amplificação com 75 nm de largura a 3 dB (1531 nm - 1606 nm), utilizando EDFA de dois estágios com bombeamento em 1480 nm copropagante, e ganho Raman distribuído na *banda L* (bombeamento em 1505nm) sendo a fibra de transmissão do tipo dispersão deslocada (**DSF**, *Dispersion Shifted Fiber*). Logo após, H. Masuda e colaboradores [7] propuseram uma configuração com um EDFA de apenas um estágio, porém com dois comprimentos de onda para bombeamento Raman (1476 nm e 1535 nm) para maximizar a largura de banda, e obtiveram 90,5 nm (1556 nm – 1646,5 nm).

A amplificação Raman de forma discreta em conjunto com amplificadores a fibra dopada com Érbio foi proposta por S. Kawai e colaboradores em [10, 11], resultando em uma banda de amplificação com 75 nm de largura a 3 dB (1531 nm - 1606 nm), obtida utilizando uma combinação EDFA (bombeamento contrapropagante em 1480 nm) + FRA (bombeamento contrapropagante em 1510 nm) + EDFA (bombeamento copropagante em 1480 nm). Foi utilizada uma fibra compensadora de dispersão (**DCF**, *Dispersion Compensating Fiber*) no FRA.

Em 1999, H. Masuda e S. Kawai [12] obtiveram uma banda de amplificação com 80 nm de largura a 3 dB (1530 nm-1610 nm), utilizando um EDFA seguido de dois estágios discretos de amplificação Raman. O aspecto mais interessante neste trabalho é a utilização

de bombeamentos copropagante e contrapropagante nos dois estágios Raman, sendo os quatro lasers de bombeamento com comprimentos de onda diferentes para deixar a banda de amplificação mais plana.

Outro exemplo interessante de cascadeamento de EDFA com amplificadores Raman discretos está descrito em [14], onde dois EDFA com bombeamento em 980 nm utilizando fibras co-dopadas com Cério e de comprimentos diferentes geram uma banda de amplificação de aproximadamente 90 nm.

Amplificadores envolvendo mais de um efeito não linear, como efeito Raman e amplificação paramétrica, também se tornaram uma possibilidade para construção de amplificadores de banda de amplificação larga [15, 16]. Em [15], os autores conseguiram aumentar a banda de amplificação de um OPA de 30 nm para 40 nm com auxílio de ganho Raman.

Por outro lado, também é possível a construção de amplificadores de banda larga fazendo associação serial de amplificadores baseados em fibras dopadas com terras raras. Um exemplo interessante foi reportado em [20], onde um EDFA foi cascadeado com um TDFA, gerando uma banda de amplificação de 82 nm. Em 2003, foi mostrada a geração de ASE com banda de 90 nm em uma fibra codopada com Érbio e Túlio, onde foi usado um bombeamento duplo em 980 nm e 1064 nm, mostrando a possibilidade de construção de amplificadores com banda larga através da codopagem de fibras com diferentes terras raras [21].

Como o foco do trabalho apresentado neste capítulo é a construção de um amplificador híbrido que possa cobrir uma faixa extensa da *banda S*, e sabendo que o TDFA tem a capacidade de amplificação na faixa de menores comprimentos de onda e considerando a flexibilidade do FRA em relação ao comprimento de onda do pico de ganho, a combinação FRA + TDFA mostra-se como uma opção promissora pra este propósito.

J. Masum-Thomas e colaboradores [22] cascadearam um TDFA com bombeamento em 1060 nm e um FRA com bombeamento em 1413 nm, conseguindo uma banda de amplificação de aproximadamente 50 nm (1460 nm-1510 nm). J. Kani e M. Jinno [23] cascadearam um TDFA com bombeamento em 1047 nm e um FRA de dois estágios com bombeamento em 1415 nm, conseguindo uma banda de amplificação de 50,5 nm (1460 nm-1510 nm), bem mais plana que no caso anterior.

H. Masuda e colaboradores [24] obtiveram 76 nm (1462 nm-1538 nm) de banda de amplificação utilizando um TDFA entre dois estágios discretos de amplificação Raman. O aspecto interessante neste trabalho é a utilização de três comprimentos de onda diferentes para tornar a banda de amplificação mais plana. H. Miyamoto e colaboradores [25] ainda mostram um caso de utilização de um TDFA com amplificação Raman distribuída.

Nossa maior contribuição nesta área está descrita em [26], e mais detalhadamente ao longo deste capítulo, onde estão apresentados resultados inéditos do cascadeamento serial de TDFA e FRA com uma única fonte de bombeamento em 1426 nm para todo o amplificador híbrido.

O máximo de ganho devido ao efeito Raman ocorre quando a frequência do bombeamento é aproximadamente 13 THz maior que a frequência do sinal. Como a amplificação devido ao efeito Raman deve cobrir a faixa de comprimentos de onda da *Banda S* mais próxima à *Banda C*, o bombeamento deve ter comprimento de onda em torno de 1426 nm, para que o pico de ganho devido ao efeito Raman ocorra por volta de 1520nm.

É importante frisar que existem vários possíveis esquemas de bombeamentos para realizar a inversão de população a partir da conversão ascendente de energia nos TDFAs (*ver capítulo 3*). Levando em consideração estas variadas possibilidades de esquemas de bombeamento para TDFA, e sabendo que o comprimento de onda de bombeamento da fibra responsável pelo ganho devido ao efeito Raman deve ser 1426 nm, foram implementadas duas diferentes possibilidades para bombeamento do amplificador híbrido: 1426 nm + 1050 nm (*ver seção 8.2*) e 1426 nm (*ver seção 8.3*).

Tabela 8.1 – Dados da DCF.

Comprimento da fibra	10 km
Diâmetro do núcleo	3,32 μm
Diâmetro da casca	125 μm
Composição do núcleo	Sílica / Germânio
Composição da casca	Sílica / Fluoreto
Comprimento de onda de corte	980 nm
Atenuação (sem conectores)	0,37 dB/km
Dispersão (em 1550 nm)	- 45,47 ps/nm/km
Área efetiva	9 μm^2
Coefficiente de ganho Raman	2,2 $\text{W}^{-1}\text{km}^{-1}$

Nas seções subseqüentes, o laser utilizado como sinal de prova é um laser sintonizável continuamente entre 1456 nm e 1584 nm, com um único modo longitudinal e potência máxima de 5 dBm. A fibra óptica utilizada para obtenção do ganho a partir do efeito Raman é uma fibra compensadora de dispersão (**DCF**, *Dispersion Compensating Fiber*) com 10 km de comprimento, cujas características técnicas estão mostradas na tabela 8.1. O laser de bombeamento consiste de um laser Raman com bombeamento realizado por lasers de diodo que emite em 1426 nm, tem potência máxima de 2 W, comprimento de onda central de emissão de 1425,92 nm e largura de linha de 1,09 nm.

8.2 – Bombeamento: 1426 nm (FRA) + 1050 nm (TDFA)

O comprimento de onda para bombeamento monocromático mais eficiente para TDFA é 1050 nm (*ver capítulo 3*). Levando isso em consideração, foi construída a configuração mostrada na figura 8.2, consistindo de um cascadeamento serial de um TDFA e um FRA, ambos com o laser de bombeamento copropagante em relação ao laser de sinal. Os comprimentos de onda de bombeamento para o FRA e para o TDFA são 1426 nm e 1050 nm, respectivamente. O laser de sinal e os lasers de bombeamento são acoplados através de multiplexadores de comprimentos de onda comerciais (**WDM**, *Wavelength Division Multiplexer*). O módulo TDF consiste em uma fibra dopada com Túlio emendada a fibras padrão monomodo de sílica, cujas características estão mostradas na tabela 8.2. As portas de entrada e saída do amplificador têm isoladores ópticos para suprimir oscilações do tipo laser, devido à criação de possíveis cavidades Fabry-Perot. Os isoladores também têm a função de suprimir a propagação de componentes de sinal refletidas nos conectores de entrada e saída do amplificador. Foi utilizada a outra saída do WDM para monitorar a potência de bombeamento entrando no módulo, através de um medidor de potência. O laser de bombeamento do TDFA é um laser de fibra de Itérbio bombeado com laser de diodo emitindo em 1050 nm.

A figura 8.3 mostra as fotos da fibra DCF utilizada para gerar ganho a partir do efeito Raman (à esquerda acima), do módulo contendo a fibra dopada com Túlio (à esquerda abaixo) e montagem experimental com os outros componentes (à direita).

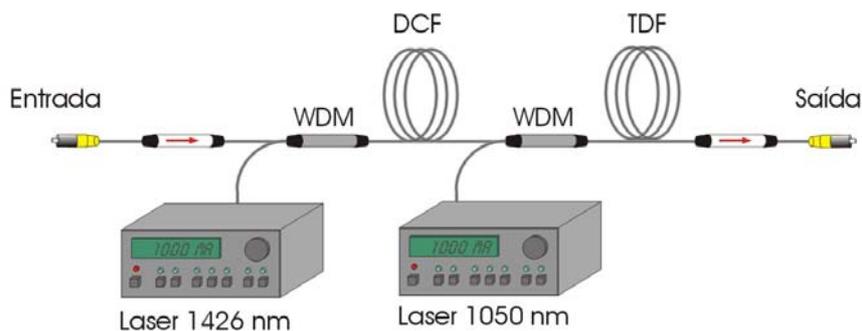


Figura 8.2 – Configuração do amplificador óptico híbrido: FRA com bombeamento copropagante em 1426 nm e o TDFA com bombeamento copropagante em 1050 nm.

Tabela 8.2 – Dados da fibra dopada Tíulio, módulo #3.

Composição da fibra	ZrF ₄ -BaF ₂ -LaF ₃ -AlF ₃ -NaF
Dopante	Tm ³⁺
Concentração de dopante	2000 ppm
Abertura numérica	0,238
Comprimento de onda de corte	880 nm
Diâmetro do núcleo	2,8 μm
Diâmetro da casca	125 μm
Comprimento da fibra	18 m

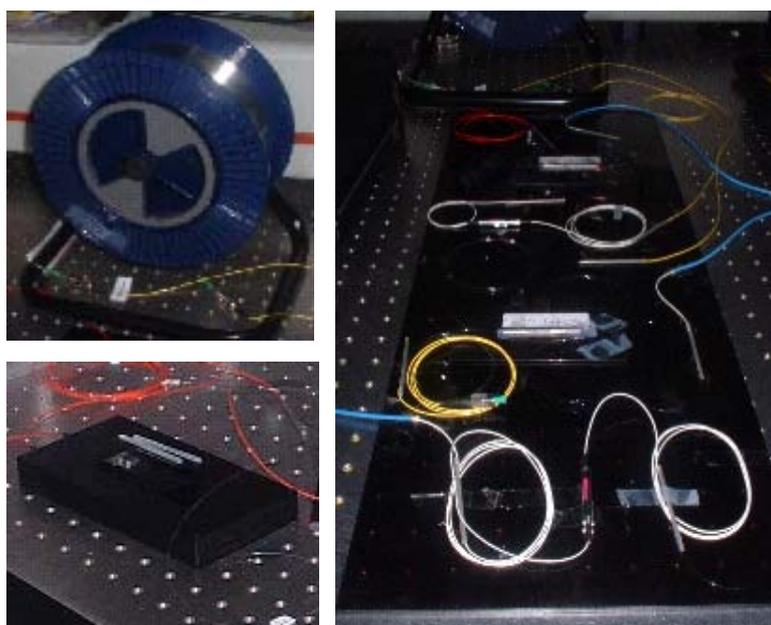


Figura 8.3 – Fotos do amplificador híbrido FRA + TDFA. À esquerda acima fibra DCF (tabela 8.1), à esquerda abaixo TDF (tabela 8.2), e à direita montagem experimental do sistema.

Na figura 8.4 estão mostrados os espectros de emissão espontânea amplificada (ASE, *Amplified Spontaneous Emission*) em três situações; Bombeamento apenas no TDFA com 300 mW e 400 mW de potência, bombeamento apenas no FRA com 600 mW, 800 mW e 1000 mW de potência e bombeamento simultâneo dos dois amplificadores com 400mW de potência para o TDFA e 600 mW, 800 mW e 1000 mW de potência para o FRA. Sobre estes espectros é importante notar que quando adicionado o bombeamento do FRA ao bombeamento do TDFA, existe uma absorção do ASE gerado pelo TDFA, gerando uma maior potência de ASE na faixa de amplificação do FRA. Essa transferência de energia ocorre por meio de processo não linear utilizando efeito Raman. Outro aspecto interessante é a possível construção de uma fonte de luz com banda larga com aproximadamente 60 nm de largura de banda, como no caso de bombeamento do FRA com 800 mW em 1426 nm e do TDFA com 400 mW em 1050 nm.

As perdas do amplificador são altas (maiores que 11 dB), prejudicando o desempenho do amplificador. Para comprimentos de onda maiores, a perda é bastante alta, tornando o amplificador inviável para comprimentos de onda acima de 1520 nm.

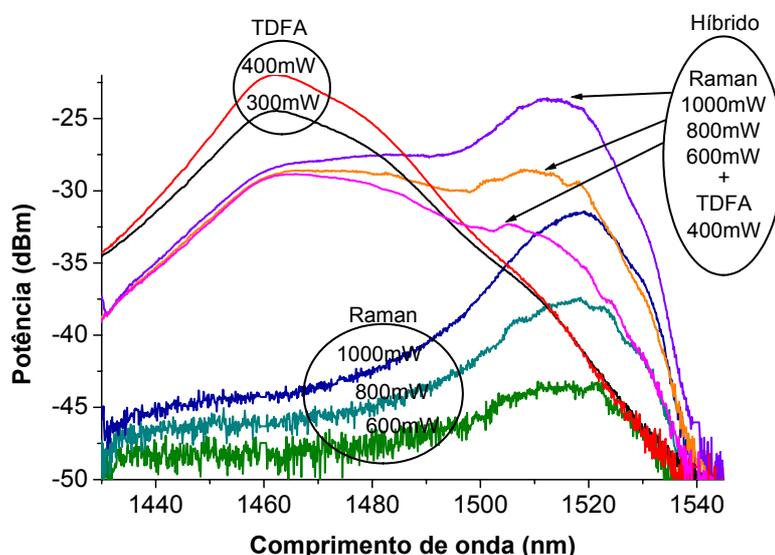


Figura 8.4 – Espectros de ASE do amplificador híbrido FRA com bombeamento em 1426 nm e TDFA com bombeamento em 1050 nm.

Nas figuras 8.5 e 8.6 são mostrados os ganhos do amplificador híbrido da figura 8.2. Na figura 8.5 apenas o bombeamento do TDFA é acionado, com potências de 300 mW (*quadrados*) e 400 mW (*círculos*). Na figura 8.6 apenas o bombeamento do FRA em 1426

nm é acionado com potências de 600 mW, 800 mW e 1000 mW, respectivamente. A potência de sinal utilizada foi de -30 dBm. Para o TDFA o ganho máximo do amplificador foi de 16 dB. Considerando a perda no pico de ganho (11 dB), calcula-se ganho interno de 27 dB. Para o FRA o ganho máximo do amplificador é de 17 dB. Considerando a perda no pico de ganho (15 dB), calcula-se ganho interno de 32 dB.

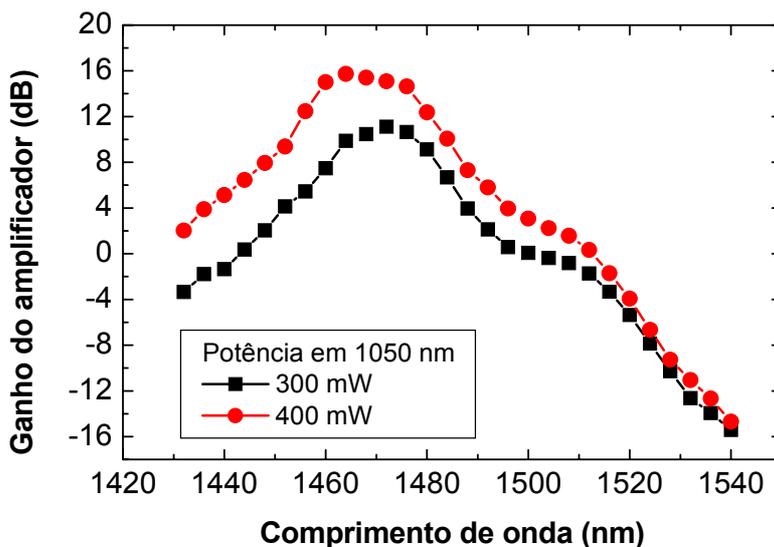


Figura 8.5 – Ganho do amplificador híbrido FRA (bombeamento em 1426 nm) + TDFA (bombeamento em 1050 nm), quando acionado apenas o bombeamento do TDFA. A potência de sinal é -30 dBm.

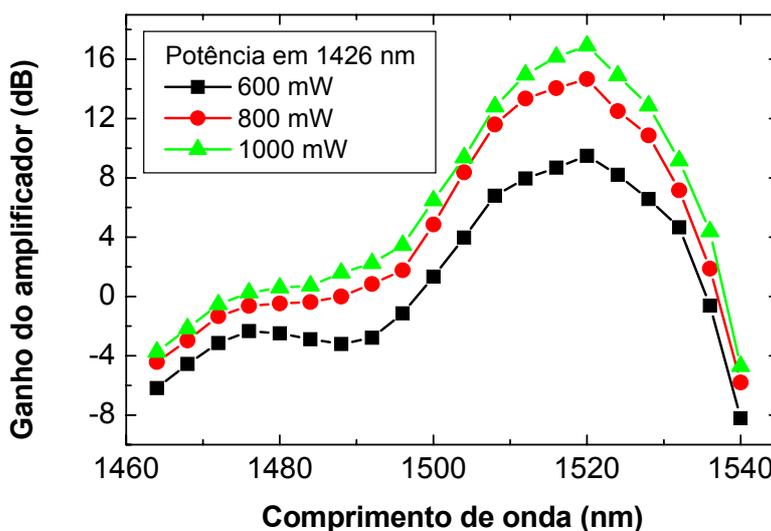


Figura 8.6 – Ganho do amplificador híbrido FRA (bombeamento em 1426 nm) + TDFA (bombeamento em 1050 nm), quando acionado apenas o bombeamento do FRA. A potência de sinal é -30 dBm.

Na figura 8.7 estão apresentadas curvas de ganho de pequenos sinais do amplificador híbrido para três situações distintas: quando acionado apenas o bombeamento do FRA (*círculos*) com potência de 600 mW, quando acionado apenas o bombeamento do TDFA (*triângulos*) com potência de 400 mW e os dois bombeamentos simultaneamente (*quadrados*). A potência de sinal utilizada foi de -30 dBm. O amplificador, apesar do baixo ganho (por volta de 10 dB), apresenta banda larga (60 nm) e espectro razoavelmente plano nesta faixa (diferença menor que 2 dB).

Na figura 8.8 estão apresentados resultados similares aos da figura 8.7 com a diferença na potência de bombeamento do FRA, que neste caso é 1 W. O ganho do TDFA não é suficiente para aplainar o ganho resultante do amplificador híbrido. Para aumentar o ganho do TDFA seria necessário aumentar a potência de bombeamento, porém devido à limitação de potência imposta às emendas do módulo de fibra dopada com Túlio isto não é possível. Além disso, o módulo contendo a fibra dopada com Túlio apresentou uma perda de 4,5 dB devido à degradação das emendas. Combinando estes fatores não foi possível construir um amplificador aplicável.

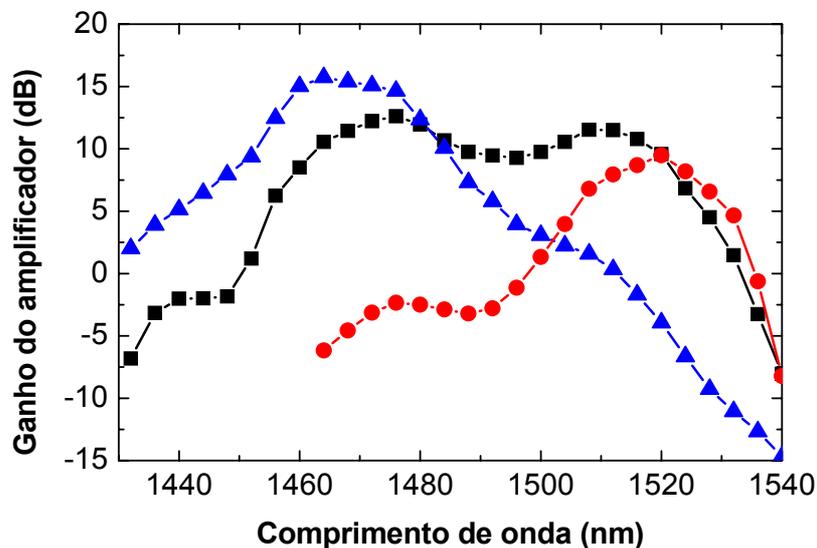


Figura 8.7 – Ganho do amplificador híbrido FRA em três situações de bombeamento: 600 mW FRA (*círculos*), 400 mW TDFA (*triângulos*) e os dois bombeamentos simultaneamente (*quadrados*). A potência de sinal é -30 dBm.

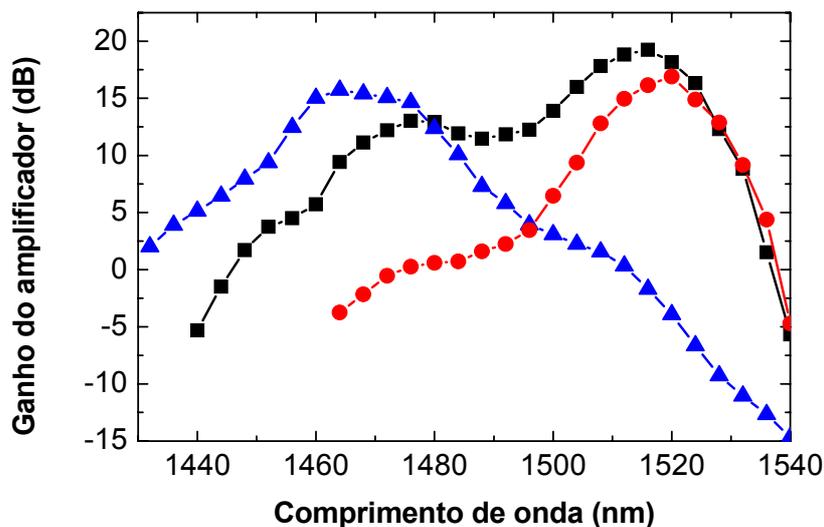


Figura 8.8 – Ganho do amplificador híbrido FRA em três situações de bombeamento: 1 W FRA (círculos), 400 mW TDFA (triângulos) e os dois bombeamentos (quadrados). A potência de sinal é -30 dBm.

8.3 – Bombeamento monocromático em 1426 nm

Apesar dos resultados apresentados na seção anterior mostrarem a possibilidade de implementação de um amplificador híbrido com larga banda de amplificação, a utilização de vários lasers de bombeamento dificulta o processo de comercialização destes amplificadores. Sendo assim, dada a possibilidade de bombeamento simultâneo do FRA e do TDFA com um único laser em 1426 nm, foram montadas várias configurações (mostradas a seguir) utilizando apenas o laser Raman emitindo em 1426 nm. A principal vantagem deste procedimento é que a tecnologia de lasers de diodo comerciais de alta potência emitindo entre 1400 nm e 1600 nm está cada vez mais avançada, facilitando a implementação prática de amplificadores com estes lasers.

8.3.1 Um estágio Raman e um estágio TDFA utilizando uma Fibra altamente dopada com Túlio

Foi construída a configuração mostrada na figura 8.9, consistindo de um cascadeamento serial de um FRA e um TDFA, sendo o FRA com o laser bombeamento copropagante e o TDFA com o laser bombeamento contrapropagante com o laser de sinal.

É interessante frisar que a potência de bombeamento não absorvida pelo FRA vai servir como bombeamento no sentido copropagante para o TDFA. Na montagem, o laser de sinal e os lasers de bombeamento são acoplados utilizando o WDM. A fibra dopada com Túlio, emendada a fibras padrão monomodo de sílica, está contida em um módulo. Demais características da fibra dopada estão mostradas na tabela 8.3.

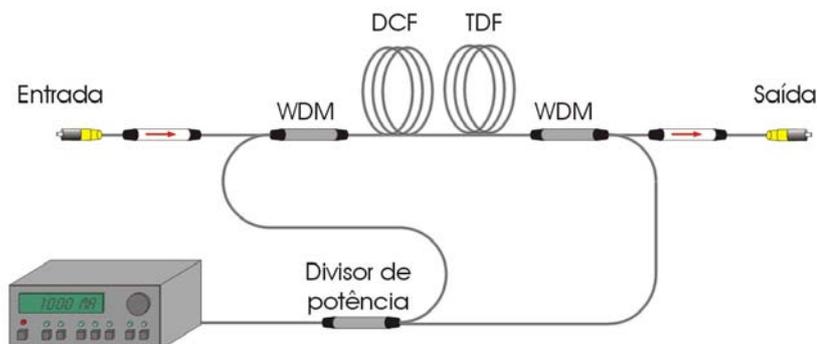


Figura 8.9 – Configuração do amplificador óptico híbrido com bombeamento monocromático em 1426 nm utilizando uma fibra DCF e uma fibra altamente dopada com Túlio.

Tabela 8.3 – Dados da fibra dopada com Túlio, módulo #5.

Composição da fibra	ZrF ₄ -BaF ₂ -LaF ₃ -AlF ₃ -NaF
Dopante	Tm ³⁺
Concentração de dopante	5000 ppm
Abertura numérica	0,238
Comprimento de onda de corte	880 nm
Diâmetro do núcleo	2,8 μm
Diâmetro da casca	125 μm
Comprimento da fibra	6 m

Na figura 8.10 está apresentado o espectro de perdas do amplificador quando o bombeamento está inativo. Para comprimentos de onda maiores do que 1525 nm e menores do que 1460 nm, a perda é bastante alta, tornando inviável uma maior expansão espectral, principalmente devido aos acopladores direcionais. Também é conveniente notar que o mínimo de perdas do amplificador é alto (13,9 dB), prejudicando o desempenho.

Na figura 8.11 está apresentado o ganho de pequenos sinais (símbolos fechados) e figura de ruído (símbolos abertos) do amplificador óptico híbrido com bombeamento monocromático em 1426 nm utilizando uma fibra DCF e uma fibra altamente dopada com Túlio. As potências de bombeamento utilizadas foram de 363 mW e 830 mW para o TDFA

e o FRA, respectivamente. A potência de sinal adotada para estas medições foi de -23 dBm. Pode-se observar que apesar de valores razoáveis de figura de ruído (por volta de 6 dB), o ganho do TDFA não é plano o suficiente.

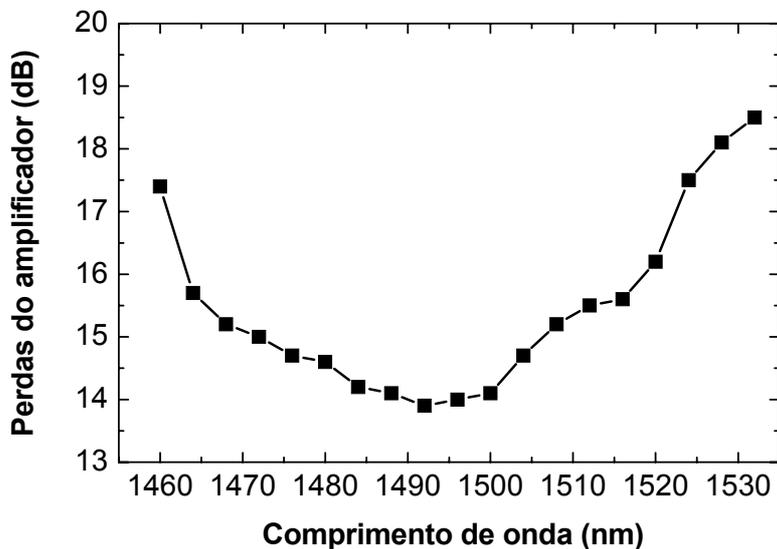


Figura 8.10 – Espectro de perdas do amplificador óptico híbrido com bombeamento monocromático em 1426 nm utilizando uma fibra DCF e uma fibra altamente dopada com Túlio.

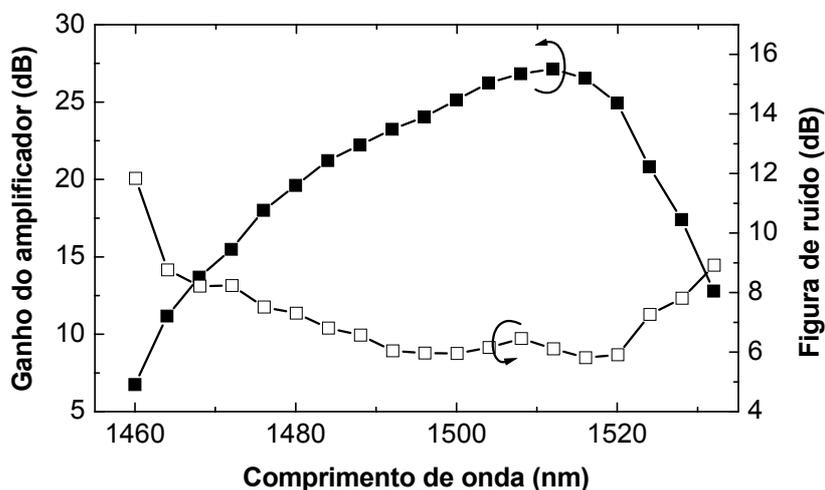


Figura 8.11 – Ganho (símbolos fechados) e figura de ruído (símbolos abertos) do amplificador óptico híbrido com bombeamento monocromático em 1426 nm constituído de uma fibra DCF e uma fibra altamente dopada com Túlio. A potência de sinal é -23 dBm.

8.3.2 – Um estágio Raman e um estágio TDFA utilizando uma Fibra dopada com Túlio de 18 m de comprimento e dopagem 2000 ppm

Para verificar a viabilidade da construção de um amplificador híbrido monocromático em 1426 nm foi montada uma configuração de dois estágios, como na seção anterior. Porém a fibra utilizada para esta configuração, apresentada na figura 8.12, utiliza uma fibra mais longa (18 m) com dopagem padrão de Túlio (2000 ppm) para gerar mais ganho (ver especificações da TDF na tabela 8.2). A perda mínima (*figura 8.13*) em 1485 nm é de 13,5 dB e as perdas aumentam quando o comprimento de onda aumenta devido às características de perda dos WDM utilizados (*círculos*), que não são componentes para aplicações banda larga.

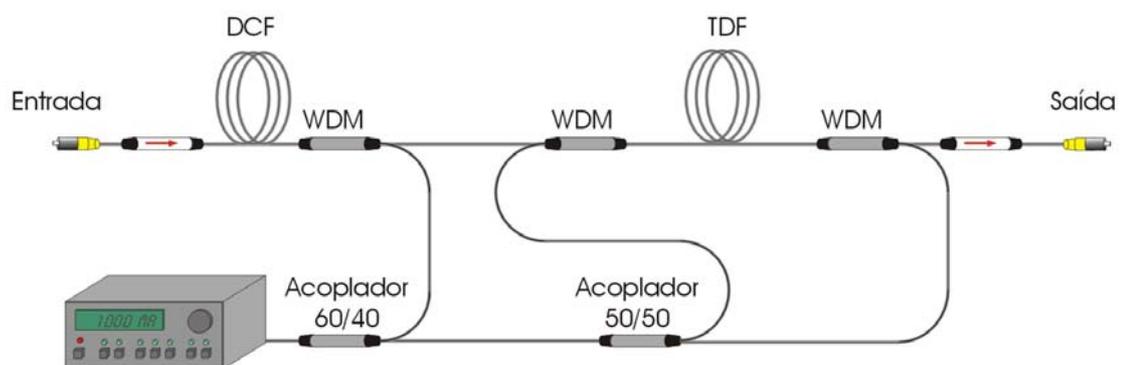


Figura 8.12 – Configuração do amplificador óptico híbrido com bombeamento monocromático em 1426 nm utilizando uma fibra DCF e uma fibra dopada com Túlio de 18 m e dopagem padrão.

Na figura 8.14 estão mostrados os espectros de ASE do amplificador híbrido com bombeamento monocromático em 1426 nm para baixa potência (Linha preta), com 298 mW no FRA e 88 mW (copropagante) e 78 mW (contrapropagante) no TDFA, e mais alta potência (Linha vermelha), com 520 mW no FRA e 150 mW (copropagante) e 134 mW (contrapropagante) no TDFA. Para baixa potência foi possível obter um espectro plano e bastante interessante para aplicações onde se necessita de fontes de luz com espectro largo. Todavia, com o aumento da potência a ASE da seção Raman supera a ASE da seção Túlio, mostrando que é necessário aumentar o comprimento da fibra utilizada no amplificador a fibra dopada com Túlio.

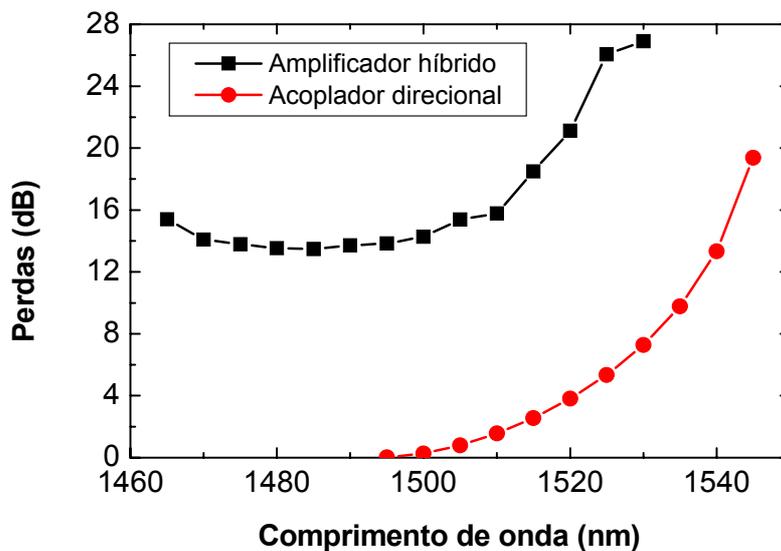


Figura 8.13 – Perdas do amplificador óptico híbrido com bombeamento monocromático em 1426 nm utilizando uma fibra DCF e uma fibra dopada com Túlio de 18 m e dopagem padrão.

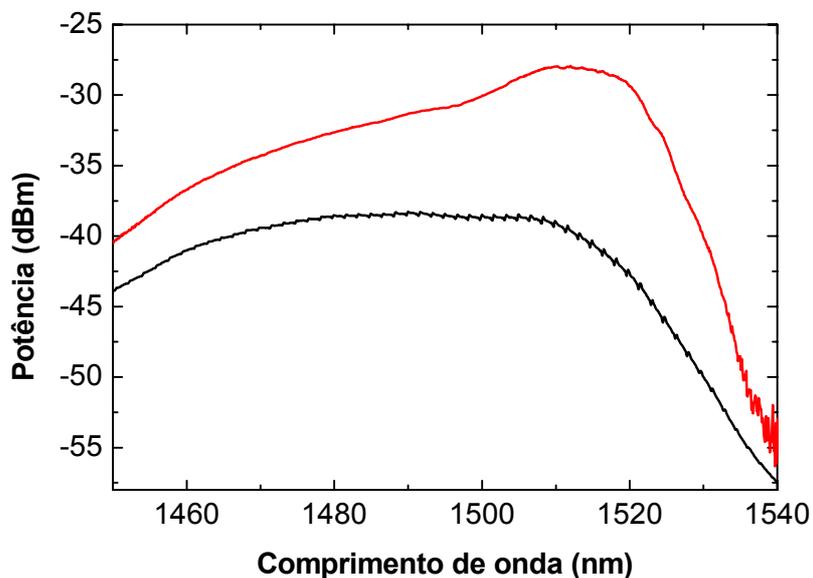


Figura 8.14 – Espectro ASE do amplificador híbrido FRA + TDFA com bombeamento monocromático em 1426 nm para: 298 mW (FRA), 88 mW (TDFA copropagante) e 78 mW (TDFA contrapropagante) (Linha preta) e 520 mW (FRA), 150 mW (TDFA copropagante) e 134 mW (TDFA contrapropagante) (Linha vermelha).

Na figura 8.15 está mostrado o ganho do amplificador híbrido com bombeamento monocromático em 1426 nm. As potências para bombeamento foram 520 mW no FRA,

150 mW de bombeamento copropagante no TDFA e 134 mW de bombeamento contrapropagante no TDFA. O ganho provido pelo TDFA não é suficiente, mostrando que é preciso aumentar o ganho do TDFA.

Como alternativa acrescentou-se ao sistema outra fibra dopada com Túlio, com uma dopagem mais alta (5000 ppm), para que junto com a fibra de 18 m com dopagem padrão (2000 ppm) pudesse prover mais ganho na região pertinente ao TDFA. As fibras dopadas com Túlio com concentração mais alta deslocam o pico de ganho para comprimentos de onda maiores, assim deve-se esperar que o ganho provido pelo TDFA de dois estágios além de maior, apresente um espectro mais plano. Para este propósito, foram construídas três configurações distintas que estão apresentadas nas seções seguintes.

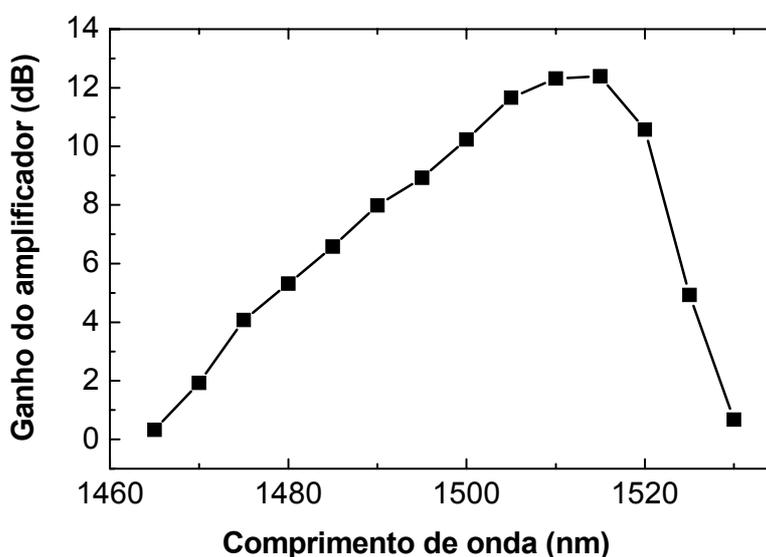


Figura 8.15 – Ganho do amplificador FRA + TDFA com bombeamento monocromático em 1426 nm. As potências utilizadas foram 520 mW (FRA), 150 mW (TDFA copropagante) e 134 mW (TDFA contrapropagante).

8.3.3 – Configuração com cascadeamento serial: FRA, fibra com dopagem padrão de Túlio e fibra altamente dopada com Túlio

A primeira configuração proposta (ver figura 8.16) consistiu no cascadeamento serial de um FRA de um estágio, seguido de um TDFA de dois estágios. Sendo o amplificador Raman montado a partir da DCF (descrita na tabela 8.1), bombeada com uma fração do laser em 1426 nm no sentido contrapropagante com o sinal. O

bombeamento no sentido contrapropagante é útil para evitar flutuações de ganho no amplificador Raman. O TDFA com dois estágios consiste de uma fibra com dopagem de íons trivalentes de Túlio padrão de 2000 ppm e comprimento de 18 m, que doravante será mencionada como TDF1 (ver tabela 8.2), conectada diretamente a uma outra fibra, altamente dopada com Túlio (5000 ppm) e comprimento de 6 m (ver tabela 8.3), que doravante será chamada como TDF2. Uma parcela de bombeamento do TDFA é copropagante e outra é contrapropagante, ambos em 1426 nm. A divisão da potência para bombeamento das fibras foi realizada utilizando um arranjo de componentes divisores de potência. Para bombeamento do amplificador Raman uma maior quantidade de potência é requerida, então foi utilizada aproximadamente 60% da potência total. O restante da potência (40% da potência total) foi dividida igualmente para o bombeamento copropagante e contrapropagante do TDFA. No final da montagem foram medidas as potências no FRA, no sentido copropagante e no sentido contrapropagante com o sinal no TDFA, e as porcentagens de potência obtidas experimentalmente foram 62%, 19% e 19%, respectivamente para vários valores de potência total. Foram utilizados isoladores para proteger a fonte de sinal (isolador da entrada) e para evitar o aparecimento de cavidades Fabry-Perot que podem desencadear processos do tipo Laser, danificando principalmente as conexões das fibras dopadas com Túlio com seus respectivos cordões ópticos.

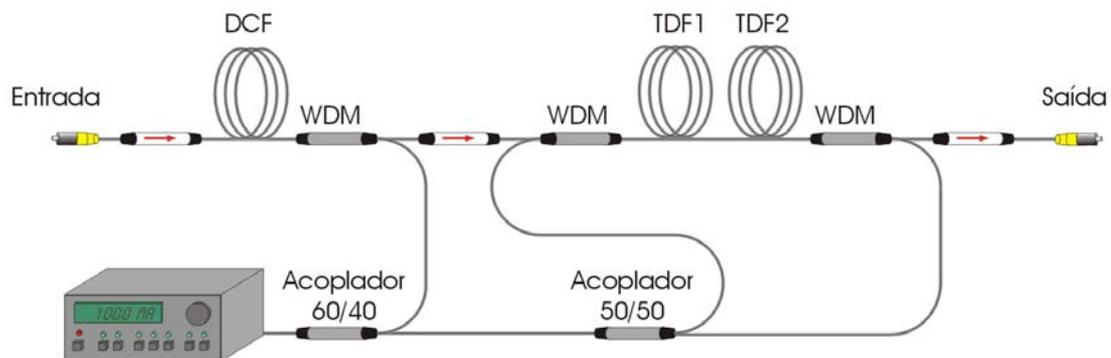


Figura 8.16 – Configuração do amplificador óptico híbrido com bombeamento monocromático em 1426 nm, composto por um FRA construído por uma fibra DCF, seguido por um TDFA de dois estágios utilizando duas fibras dopadas com Túlio, uma com dopagem padrão e outra com alta dopagem.

Pode-se observar abaixo (figura 8.17) o espectro de ASE junto ao bombeamento remanescente na saída do amplificador quando as potências de bombeamento são de 557 mW, 169 mW e 168 mW, no FRA, no sentido copropagante e no sentido contrapropagante com o sinal no TDFA, respectivamente. A potência de bombeamento remanescente na

saída do amplificador em 1426 nm é de -7,6 dBm. Uma excelente planaridade foi obtida na região de amplificação.

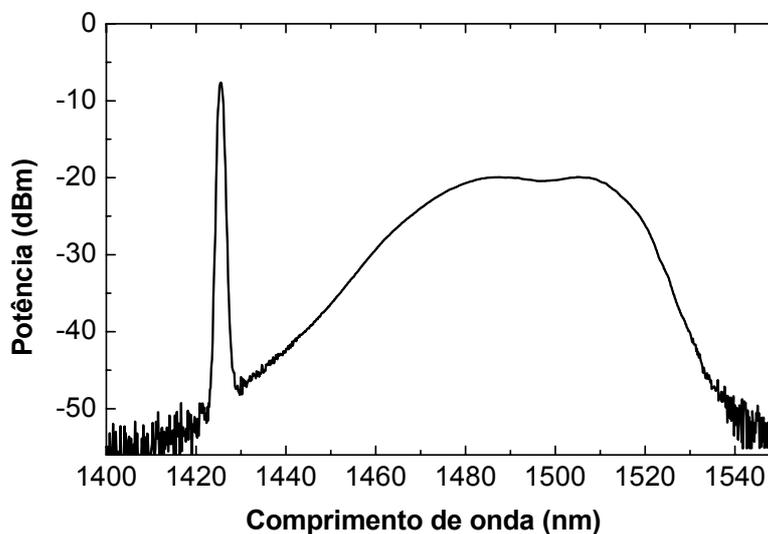


Figura 8.17 – Espectro de ASE junto ao bombeamento remanescente na saída do amplificador híbrido DCF + TDF1 + TDF2 com potência de bombeamento total de 894 mW.

Na figura 8.18, estão mostrados os espectros de ASE na saída do amplificador para quatro situações diferentes de bombeamento. As potências totais de bombeamento são: 566 mW (linha preta), 687 mW (linha vermelha), 806 mW (linha verde) e 894 mW (linha azul). As bandas de 3 dB destes espectros de ASE são de aproximadamente 42 nm.

Na figura 8.19, está mostrado o espectro de perdas do amplificador. Uma perda mínima de 17 dB é obtida para sinal com comprimento de onda 1475 nm. A perda aumenta em ambos os lados do espectro de perdas devido às perdas dos WDM utilizados. A perda para comprimentos de onda maiores é maior e pode chegar a 35 dB em 1530 nm devido à absorção de estado fundamental dos íons trivalentes de Túlio.

Na figura 8.20 estão mostrados os espectros de ganho interno, ganho e figura de ruído do amplificador para quatro situações diferentes de bombeamento, respectivamente. As potências totais de bombeamento são: 566 mW (quadrados), 687 mW (círculos), 806 mW (triângulos pra cima) e 894 mW (triângulos pra baixo). A potência de sinal utilizada foi de -20 dBm. Um ganho interno máximo de 42,7 dB em 1515 nm foi obtido para esta configuração.

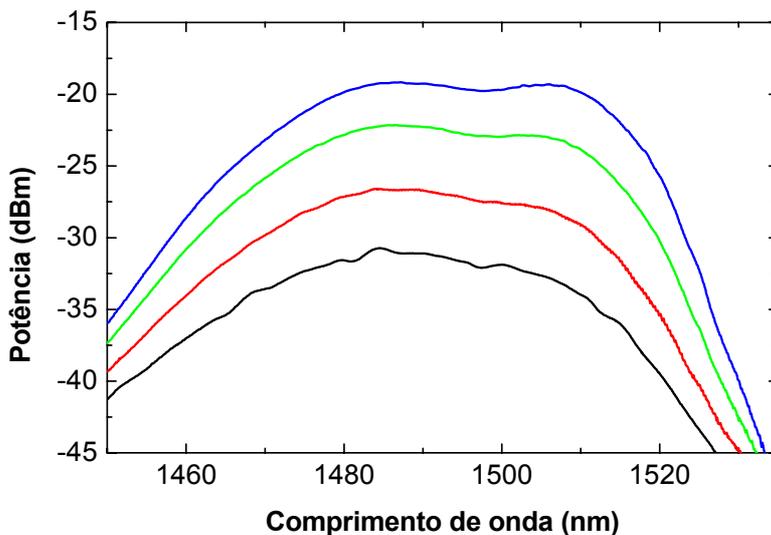


Figura 8.18 – Espectro de ASE junto ao bombeamento remanescente na saída do amplificador híbrido DCF + TDF1 + TDF2 com potência de bombeamento total de 566 mW (linha preta), 687 mW (linha vermelha), 806 mW (linha verde) e 894 mW (linha azul).

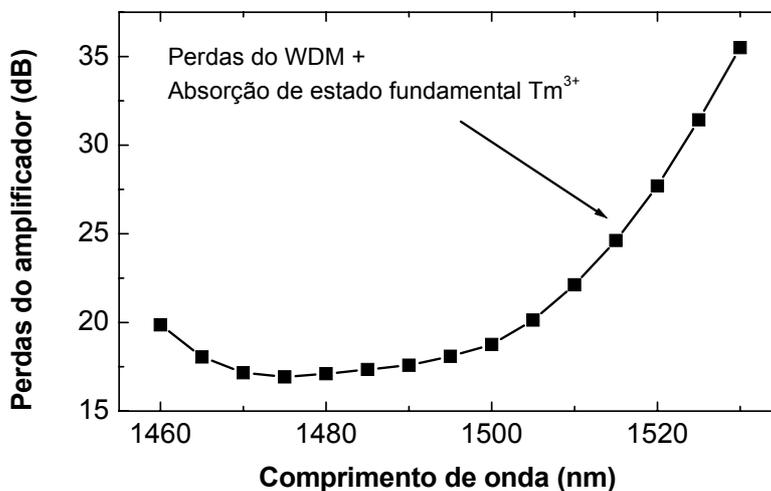
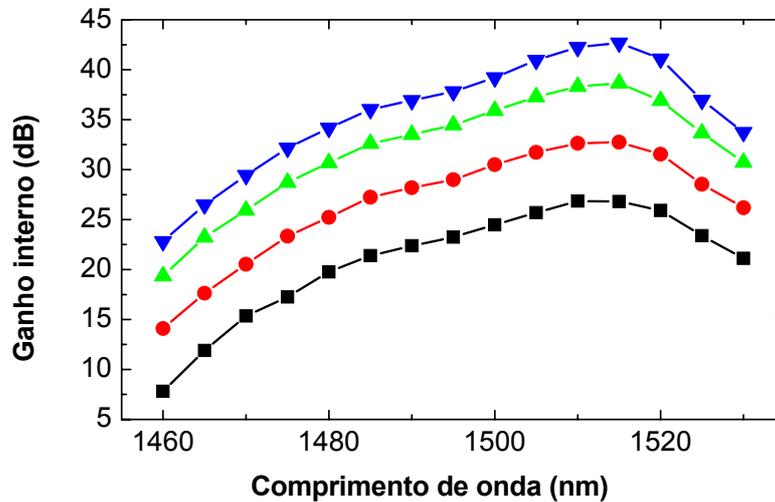


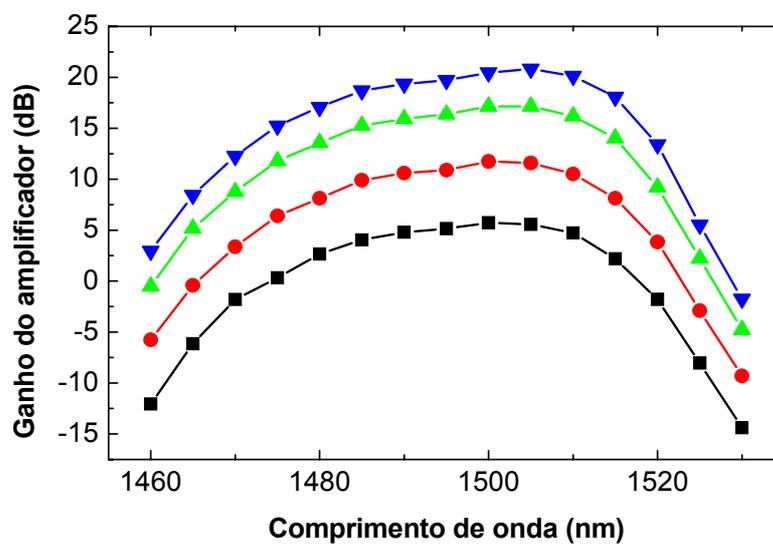
Figura 8.19 – Espectro de perdas do amplificador híbrido composto por um FRA seguido por um TDFA de dois estágios.

Na figura 8.20-b, pode-se observar um ganho máximo de 5,72 dB, 11,83 dB, 17,15 dB e 20,83 dB, para potências totais de bombeamento de 566 mW (*quadrados*), 687 mW (*círculos*), 806 mW (*triângulos para cima*) e 894 mW (*triângulos para baixo*), respectivamente. No caso de bombeamento com potência total de 894 mW (*triângulos*

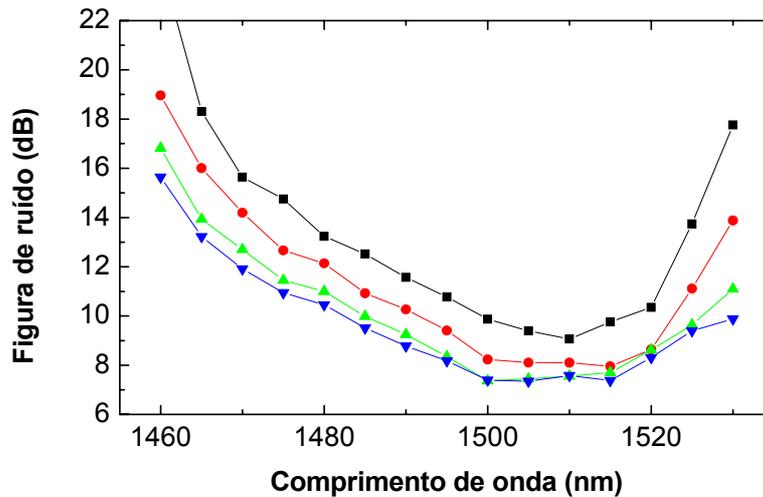
para baixo), o ganho é maior que 15 dB entre 1474,5 nm e 1518,5 nm, resultando em uma banda que pode ser utilizada para amplificação de 44 nm.



(a)



(b)



(c)

Figura 8.20 – Espectro de (a) ganho interno, (b) ganho e (c) figura de ruído do amplificador DCF + TDF1 + TDF2 para potências de bombeamento totais de 566 mW (quadrados), 687 mW (círculos), 806 mW (triângulos pra cima) e 894 mW (triângulos pra baixo).

Quanto maior a potência de bombeamento, menor a figura de ruído amplificador para qualquer comprimento de onda de operação. A figura de ruído aumenta à medida que o comprimento de onda do sinal se afasta do centro da banda de amplificação. Além disso, um valor mínimo de 7,3 dB foi obtido para potência total de bombeamento de 894 mW. Mesmo com potência total de bombeamento de 894 mW (linha azul), onde a figura de ruído é mínima, tomando a banda de ganho maior que 15 dB entre 1474,5 nm e 1518,5 nm, vê-se que para 1475 nm a figura de ruído é de 11 dB, valor este proibitivo para muitos sistemas de comunicações ópticas.

Na figura 8.21 estão mostrados os espectros na entrada e na saída quando utilizados cinco canais com potência por canal de -20 dBm. A potência total bombeamento é de 894 mW. Neste caso, ganhos de 17,4 dB, 19,2 dB, 19,2 dB, 18,6 dB e 16 dB, foram obtidos para os canais em 1478 nm, 1488 nm, 1498 nm, 1508 nm e 1517 nm, respectivamente. Nota-se uma diferença de ganho do amplificador máxima de 3,2 dB em uma banda de amplificação de 50 nm, mostrando a viabilidade para uso em sistemas com multiplexação por comprimento de onda.

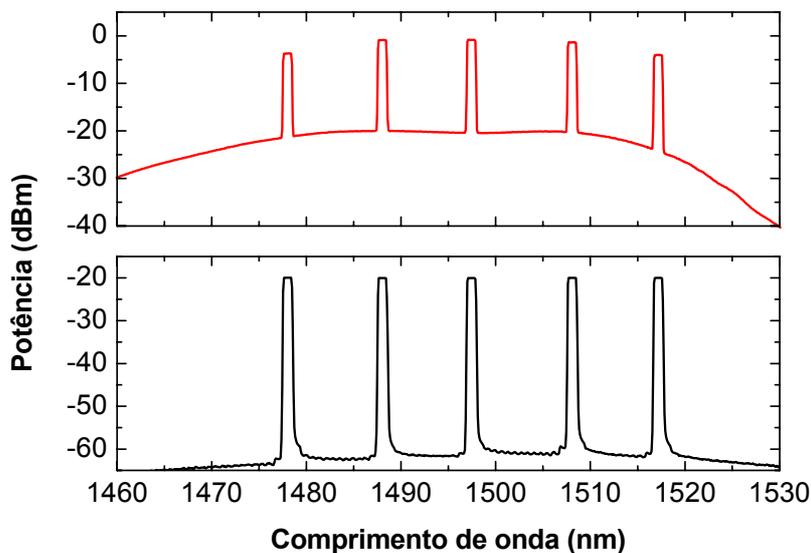


Figura 8.21 – Espectros da entrada (em baixo) e da saída (em cima) quando utilizados cinco canais com potência de -20 dBm por canal. A potência total bombeamento é de 894 mW.

8.3.4 – Configuração com cascadeamento serial: TDFA com fibra altamente dopada com Túlio, FRA e TDFA padrão

A segunda configuração proposta (ver figura 8.22) consistiu em uma mudança na ordem das fibras. Foi colocada como primeiro estágio, a fibra altamente dopada com Túlio (TDF2, ver tabela 8.3) com bombeamento copropagante, já que esta pode manter uma maior inversão de população, e assim diminuir a figura de ruído total do amplificador híbrido. A fibra DCF (descrita na tabela 8.1) foi colocada logo após a fibra altamente dopada com Túlio, sendo esta bombeada no sentido contrapropagante, isto tem um efeito positivo, pois a potência residual no terminal de entrada (para o sinal) da fibra DCF vai ser utilizada para bombeamento contrapropagante na fibra altamente dopada (primeiro estágio). O último estágio é um TDFA utilizando apenas uma fibra dopada com Túlio (TDF1, ver tabela 8.2) e com bombeamento contrapropagante. A divisão de potência para bombeamento das fibras foi realizada de forma idêntica à configuração anterior. Isoladores para proteger a fonte (isolador da entrada) e o laser de bombeamento da potência residual do bombeamento Raman no segundo estágio (isolador intermediário) são utilizados.

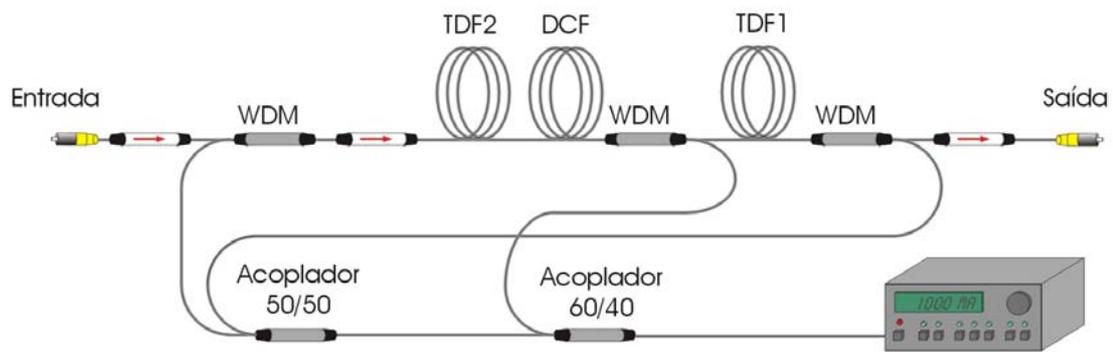


Figura 8.22 – Configuração do amplificador óptico híbrido TDF2 + DCF + TDF1 com bombeamento monocromático em 1426 nm.

Na figura 8.23 está mostrado o espectro de perdas do amplificador óptico híbrido com bombeamento monocromático em 1426 nm. Uma perda mínima de 17,5 dB é obtida para sinal com comprimento de onda 1480 nm. A perda aumenta em ambos os lados do espectro de perdas devido às perdas dos WDM utilizados. A perda para comprimentos de onda maiores é maior e pode chegar a 39 dB em 1530 nm devido à absorção de estado fundamental dos íons trivalentes de Tíulio.

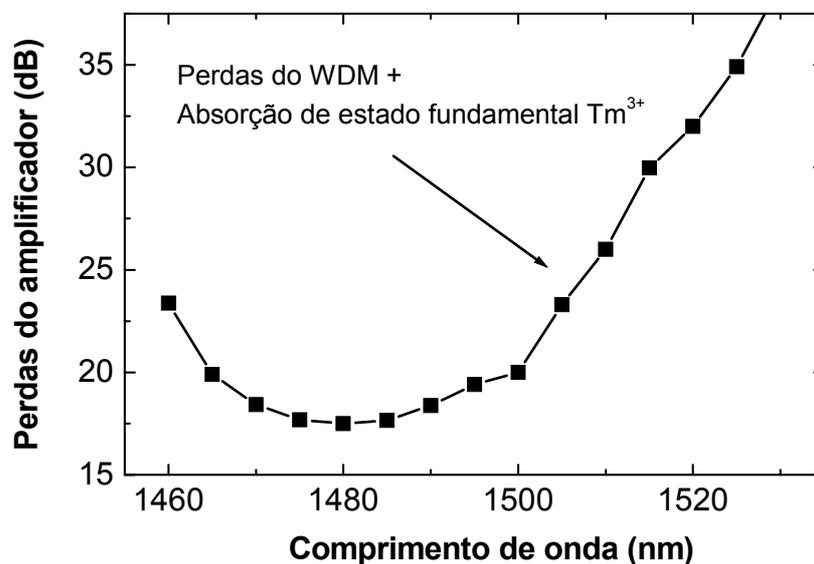
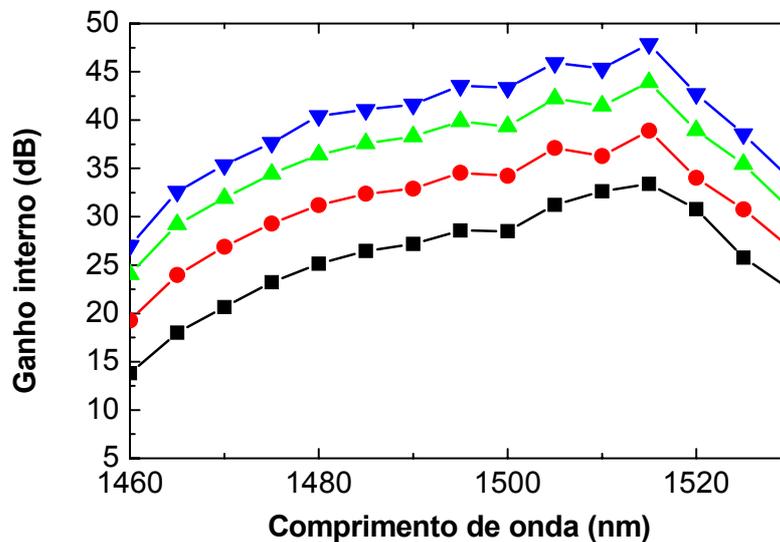


Figura 8.23 – Espectro de perdas do amplificador híbrido TDF2 + DCF + TDF1.

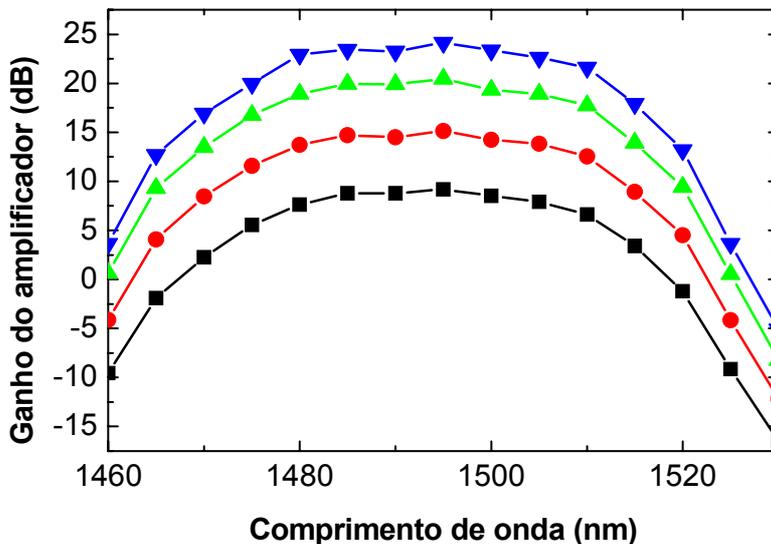
Na figura 8.24 estão mostrados os espectros de ganho interno, ganho e figura de ruído do amplificador para quatro situações diferentes de bombeamento, respectivamente.

As potências totais de bombeamento são: 566 mW (quadrados), 687 mW (círculos), 806 mW (triângulos pra cima) e 894 mW (triângulos pra baixo). A potência de sinal utilizada foi de -23 dBm. Um ganho interno máximo de 47,7 dB em 1515 nm foi obtido para esta configuração. Observa-se um ganho máximo de 9,18 dB, 15,14 dB, 20,45 dB e 24,15 dB, para potências totais de bombeamento de 566 mW (quadrados), 687 mW (círculos), 806 mW (triângulos pra cima) e 894 mW (triângulos pra baixo), respectivamente. No caso de bombeamento com potência total de 894 mW, a banda de amplificação de 3 dB é de 35 nm (1476 nm - 1511 nm). O ganho é maior que 15 dB entre 1467,5 nm e 1518 nm, resultando em uma banda de 50,5 nm que pode ser utilizada para amplificação.

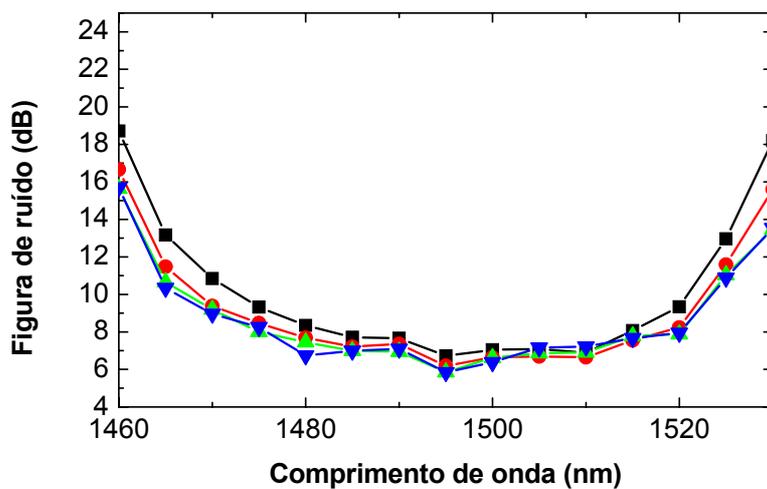
A figura de ruído do amplificador aumenta à medida que o comprimento de onda do sinal se afasta do centro da banda de amplificação. A figura de ruído mínima obtida foi de 5,8 dB para o caso de bombeamento com potência total de 894 mW (linha azul), bem abaixo do valor obtido com a configuração anterior. Além disso, a figura de ruído é bem mais plana e, para potência de bombeamento total de 894 mW, é menor que 8 dB na banda de interesse (1475 nm – 1520 nm).



(a)



(b)



(c)

Figura 8.24 – Espectro de (a) ganho interno, (b) ganho e (c) figura de ruído do amplificador TDF2 + DCF + TDF1 para potências de bombeamento totais de 566 mW (quadrados), 687 mW (círculos), 806 mW (triângulos pra cima) e 894 mW (triângulos pra baixo).

Na figura 8.25 estão mostrados os espectros na entrada e na saída quando utilizados quatro canais com potência por canal de -20 dBm por canal. A potência total bombeamento é de 894 mW. Ganhos de 21 dB, 22,1 dB, 20,3 dB e 22,3 dB, foram obtidos para os canais em 1478 nm, 1488 nm, 1498 nm e 1508 nm, respectivamente. É importante

frisar uma diferença de ganho do amplificador máxima de 2 dB em uma banda de amplificação de 40 nm.

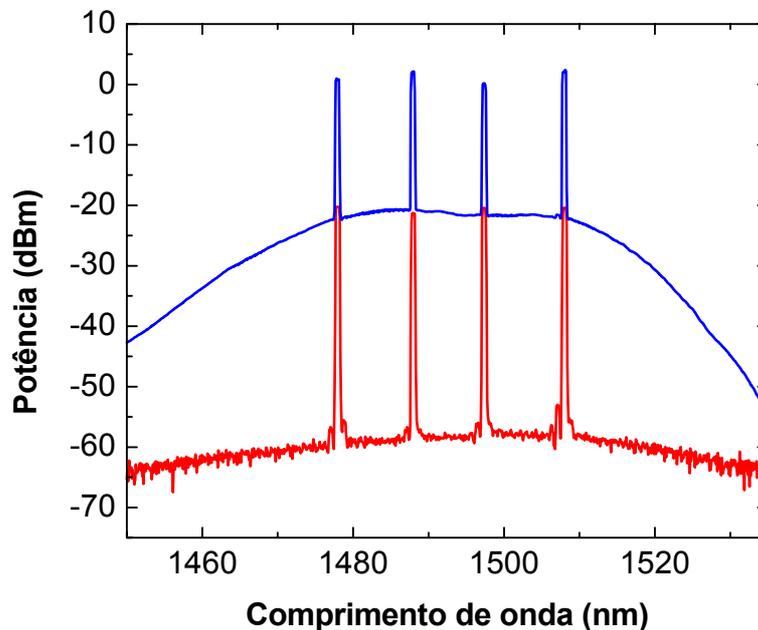


Figura 9.25 – Espectros na entrada (vermelho) e na saída (azul) do amplificador híbrido TDF2 + DCF + TDF1 com potência de bombeamento total de 894 mW quando utilizados quatro canais com potência de – 20 dBm por canal.

8.3.5 – Configuração com cascadeamento serial: fibra altamente dopada com Túlio, fibra com dopagem padrão de Túlio e FRA

A última configuração proposta (ver figura 8.26) tem como objetivo comparar o desempenho. Foram utilizados isoladores para proteger a fonte (isolador da entrada), proteger o laser de bombeamento da potência residual do bombeamento Raman (isolador intermediário) e para evitar o aparecimento de cavidades Fabry-Perot que podem desencadear processos do tipo laser, danificando principalmente as conexões das fibras dopadas com Túlio.

Na figura 8.27, está mostrado o espectro de perdas do amplificador óptico híbrido com bombeamento monocromático em 1426 nm, composto por um TDFA utilizando uma fibra altamente dopada com Túlio, um TDFA padrão e um FRA. Uma perda mínima de 20,5 dB é obtida para sinal com comprimento de onda 1480 nm. A perda aumenta em

ambos os lados do espectro de perdas devido às perdas dos WDM utilizados. A perda para comprimentos de onda maiores é maior e pode chegar a 53 dB em 1530 nm devido à absorção de estado fundamental dos íons trivalentes de Túlio.

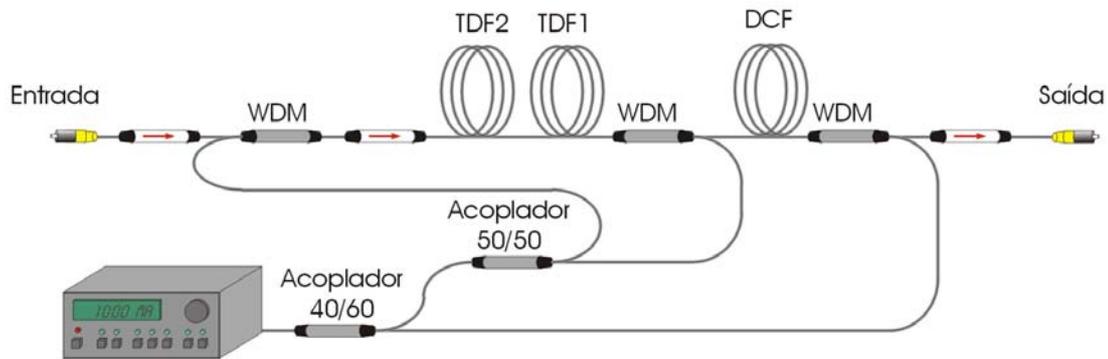


Figura 8.26 – Configuração do amplificador óptico híbrido TDF2 + TDF1 + DCF com bombeamento em 1426 nm.

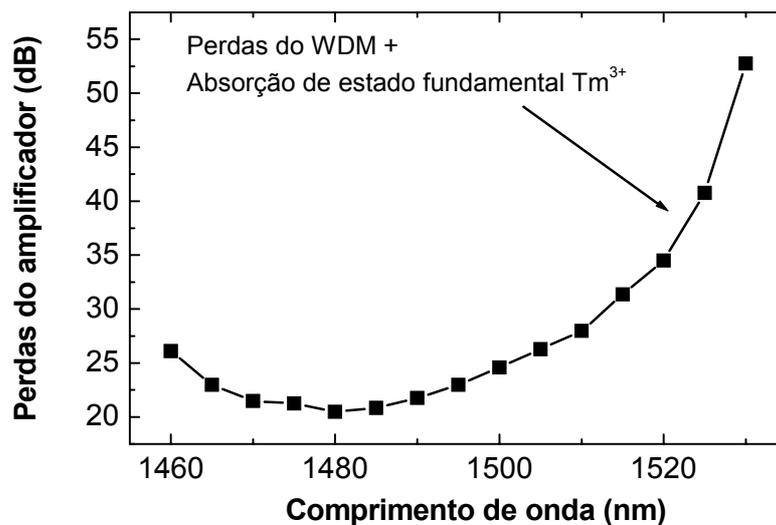
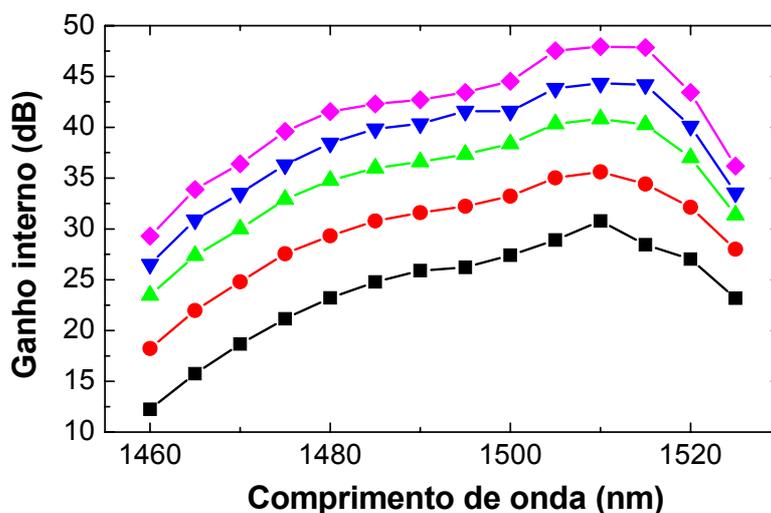


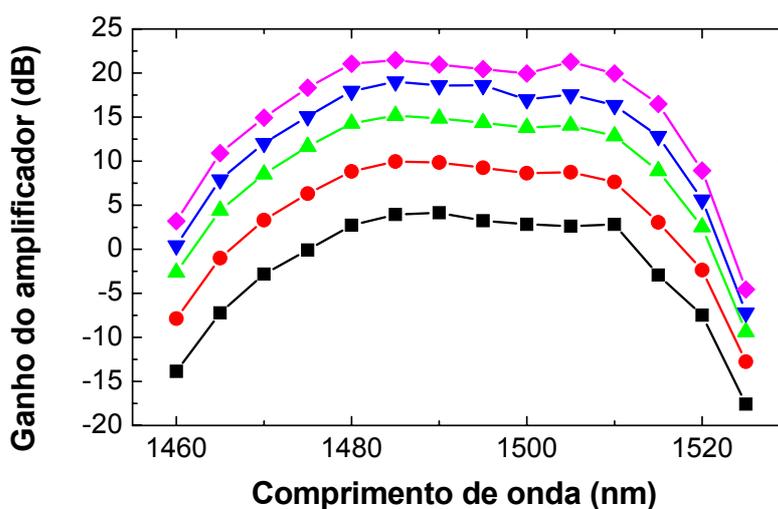
Figura 8.27 – Espectro de perdas do amplificador híbrido TDF2 + TDF1 + DCF.

Na figura 8.28 estão mostrados os espectros de ganho interno, ganho e figura de ruído do amplificador para cinco situações diferentes de bombeamento, respectivamente. As potências totais de bombeamento são: 566 mW (quadrados), 687 mW (círculos), 806 mW (triângulos pra cima) e 894 mW (triângulos pra baixo) e 993 mW (losangos). A potência de sinal utilizada foi de -23 dBm. Um ganho interno máximo de 47,9 dB em 1510 nm foi obtido para esta configuração.

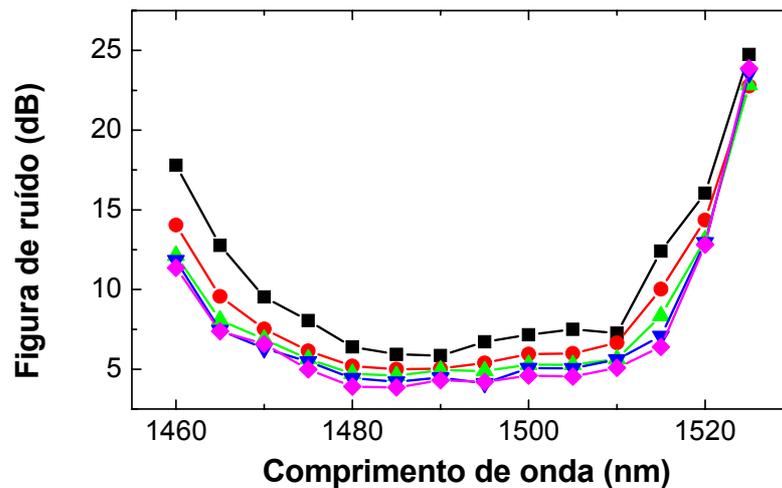
Para potência total de bombeamento de 993 mW, o ganho máximo obtido foi de 21,46 dB, figura de ruído mínima de 4 dB e a banda de amplificação de 3 dB é de 37 nm (1475 nm - 1512 nm). O ganho é maior que 15 dB entre 1470 nm e 1516 nm, resultando em uma banda que pode ser utilizada para amplificação eficiente de 46 nm. A configuração mostrou espectros de figura de ruído planos (menor que 5 dB entre 1475 nm e 1515 nm para 993 mW de potência de bombeamento total), com valores bem menores do que com a configuração anterior.



(a)



(b)



(c)

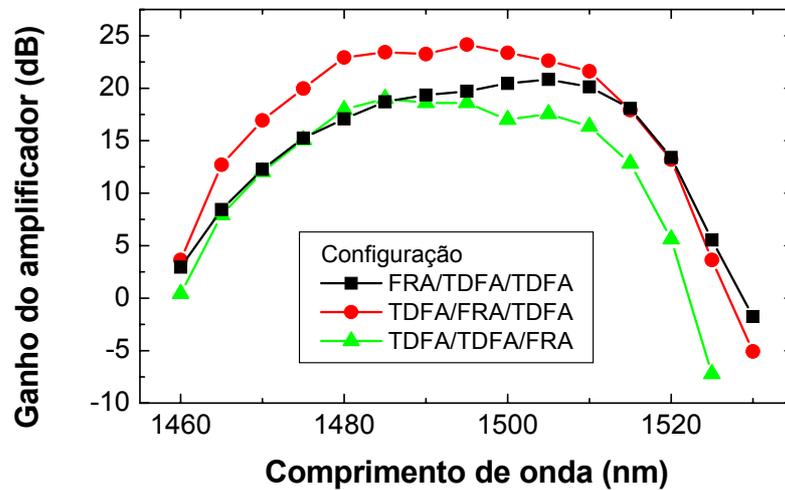
Figura 8.28 – Espectros de (a) ganho, (b) ganho interno e (c) figura de ruído do amplificador híbrido TDF2 + TDF1 + DCF, quando as potências de bombeamento total são 566 mW (quadrados), 687 mW (círculos), 806 mW (triângulos pra cima), 894 mW (triângulos pra baixo) e 993 mW (losangos).

8.3.6 – Comparação entre as configurações utilizando duas fibras dopadas com Túlio e uma fibra Raman

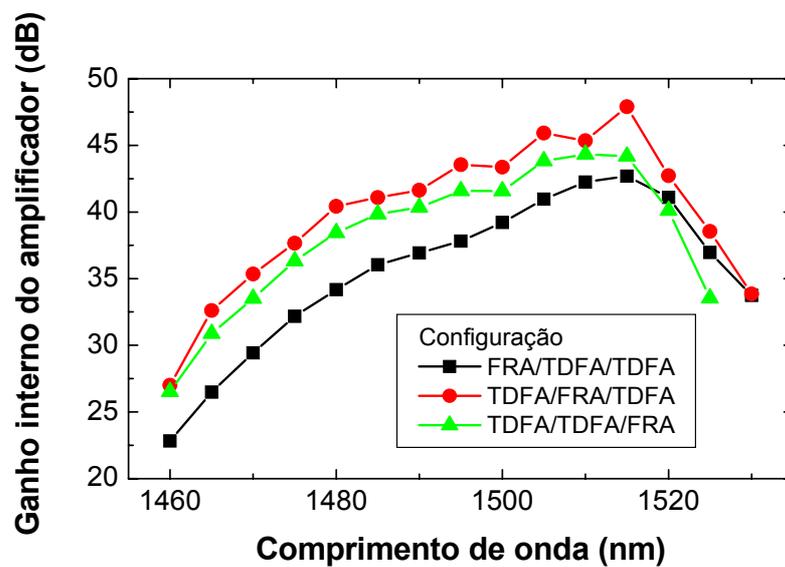
A figura 8.29 mostra os espectros de ganho e ganho interno do amplificador híbrido para três configurações distintas: DCF, TDF e TDF altamente dopada (quadrados), que doravante será chamada de *configuração 1*; TDF altamente dopada, DCF e TDF (círculos), que doravante será chamada de *configuração 2*; TDF altamente dopada, TDFa e FRA (triângulos), que doravante será chamada de *configuração 3*. A potência de bombeamento é 894 mW. Duas TDF com concentrações diferentes foram escolhidas para aumentar a banda de amplificação e tornar o ganho mais plano.

A *configuração 2* apresentou o espectro de ganho mais plano e com valores mais elevados. Também obteve os valores de ganho interno (ver figura 8.29-b) mais altos (por volta de 48 dB no pico em 1515 nm). Isto porque o bombeamento residual do FRA é utilizado como bombeamento contrapropagante no primeiro estágio de amplificação (TDF altamente dopada). A *configuração 3* tem um menor ganho, apesar de apresentar valores de ganho interno maior, isto ocorre devido à maior absorção do estado fundamental quando as fibras dopadas estão juntas. Na *configuração 1* há uma inclinação no espectro de ganho

e isto ocorre devido às perdas sofridas pelos sinais com menor comprimento de onda antes do TDFA.



(a)



(b)

Figura 8.29 – Espectros de (a) ganho e (b) ganho interno para três configurações distintas: FRA + TDFA + TDFA (TDF 5000 ppm); (TDF 5000 ppm) + FRA + TDFA e TDFA (TDF 5000 ppm) + TDFA + FRA. A potência de bombeamento total é 894 mW.

Na figura 8.30 a configuração 3 apresenta menor figura de ruído no centro da banda (por volta de 5 dB), porém apresenta um valor maior para comprimentos de onda maiores,

mostrando uma maior dependência com a absorção de estado fundamental dos íons trivalentes de Túlio. A *configuração 2* apresenta um desempenho razoável em termos de ruído. A figura de ruído se mantém entre 7 e 8 dB na banda de interesse e pode ser melhorada com a utilização de dispositivos mais adequados na construção do amplificador.

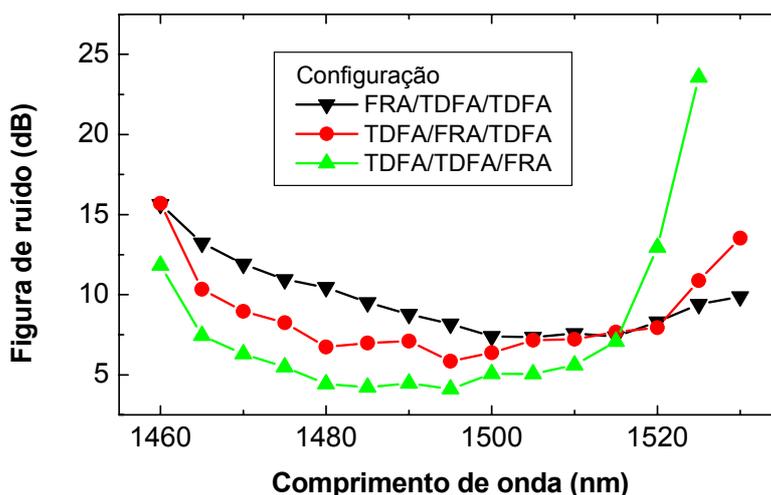


Figura 8.30 – Espectros de figura de ruído para três configurações distintas: FRA + TDFA + TDFA (TDF 5000 ppm); (TDF 5000 ppm) + FRA + TDFA e TDFA (TDF 5000 ppm) + TDFA + FRA. A potência de bombeamento total é 894 mW.

8.3.7 – Um estágio TDFA e um estágio Raman utilizando uma Fibra altamente dopada com Túlio

Foi construída a configuração mostrada na figura 8.31, consistindo de um cascadeamento serial de um TDFA e um FRA, sendo o TDFA com o laser bombeamento copropagante e o FRA com o laser bombeamento contrapropagante com o laser de sinal. A potência de bombeamento não absorvida pelo FRA vai servir como bombeamento no sentido contrapropagante para o TDFA. Na montagem, o laser de sinal e os lasers de bombeamento são acoplados através de WDM. O módulo consiste em uma fibra dopada com Túlio, emendada a fibras padrão monomodo de sílica, cujas características estão mostradas na tabela 8.3.

Na figura 8.32 está apresentado o espectro de perdas do amplificador quando o bombeamento está inativo incluindo todos os componentes (*quadrados*) e retirando a fibra dopada para evidenciar o efeito da absorção de estado fundamental (**GSA**, *Ground State*

Absortion) da fibra dopada (*círculos*). A perda mínima sem GSA é de 8,5 dB para 1480 nm. Tanto a dependência com o comprimento de onda, quanto o alto valor das perdas, ocorrem devido ao fato dos componentes não serem projetados para a *banda S*.

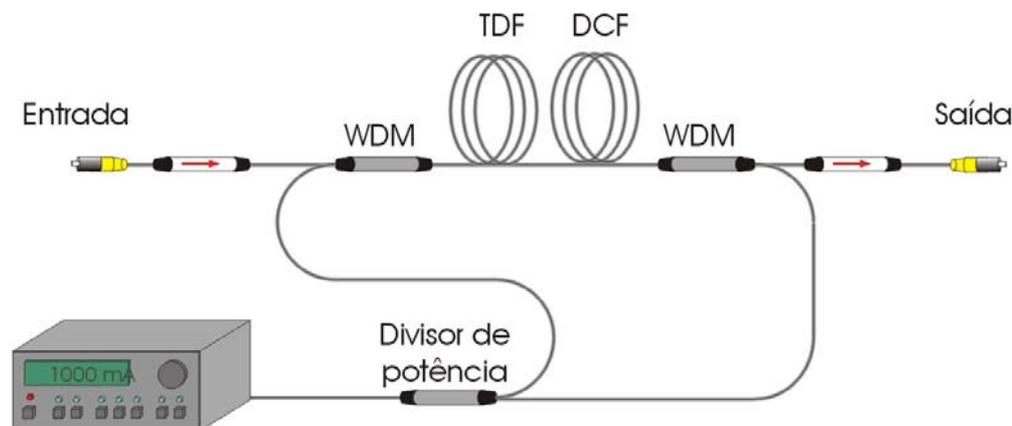


Figura 8.31 – Configuração do amplificador óptico híbrido com bombeamento em 1426 nm utilizando uma fibra altamente dopada com Túlio e uma fibra DCF.

Na figura 8.33 está apresentado o ganho de pequenos sinais dos dois estágios de amplificação separadamente. O pico de ganho do TDFA ocorre em 1480 nm e o pico de ganho do FRA ocorre em 1520 nm. Cada uma das curvas foram caracterizadas para potência de sinal de -20 dBm. As potências de bombeamento foram de 250 mW e 550 mW para o TDFA e o FRA, respectivamente. A curva de ganho do amplificador híbrido construído a partir desses dois módulos deve ser aproximadamente a superposição dessas curvas. A escolha apropriada da potência de cada estágio é de suma importância para tornar a curva de ganho a mais plana possível.

Na figura 8.34 está apresentado o ganho e figura de ruído do amplificador híbrido. A potência de sinal é de -20 dBm. As potências de bombeamento foram de 200 mW e 510 mW para o TDFA e o FRA, respectivamente. A curva de ganho apresenta valores acima de 20 dB para a região espectral compreendida entre 1480 nm e 1515 nm. A figura de ruído mínima obtida foi de 7 dB em 1495 nm, e atinge 13 dB em ambos os lados do espectro de amplificação.

A configuração é similar à configuração apresentada na seção 8.3.2. A diferença básica está na inversão da ordem das fibras e na melhor distribuição de potência para equalizar o ganho do amplificador.

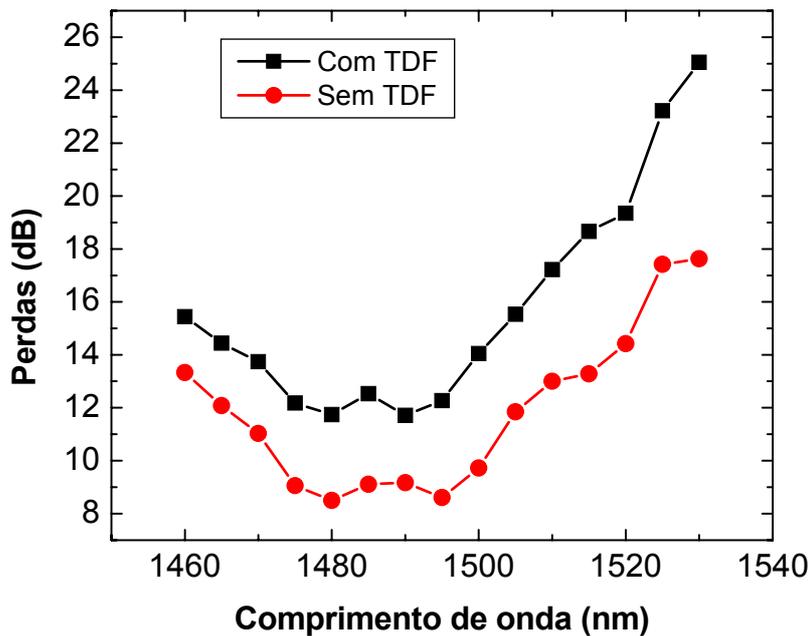


Figura 8.32 – Espectros de perdas amplificador óptico híbrido com bombeamento em 1426 nm utilizando uma fibra altamente dopada com Túlio e uma fibra DCF.

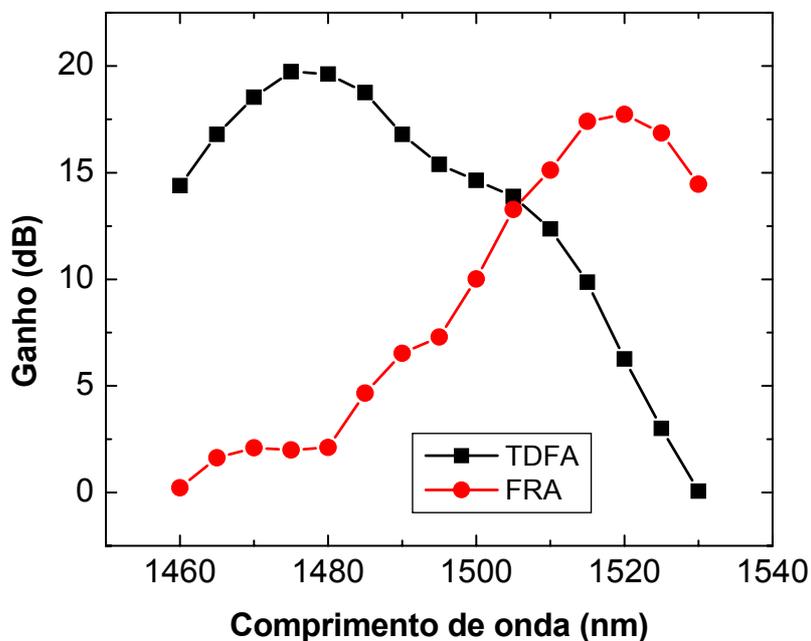


Figura 8.33 – Ganho do TDFA (quadrados) e FRA (círculos) para potência de bombeamento de 250 mW e 550 mW, respectivamente. A potência de sinal é -20 dBm.

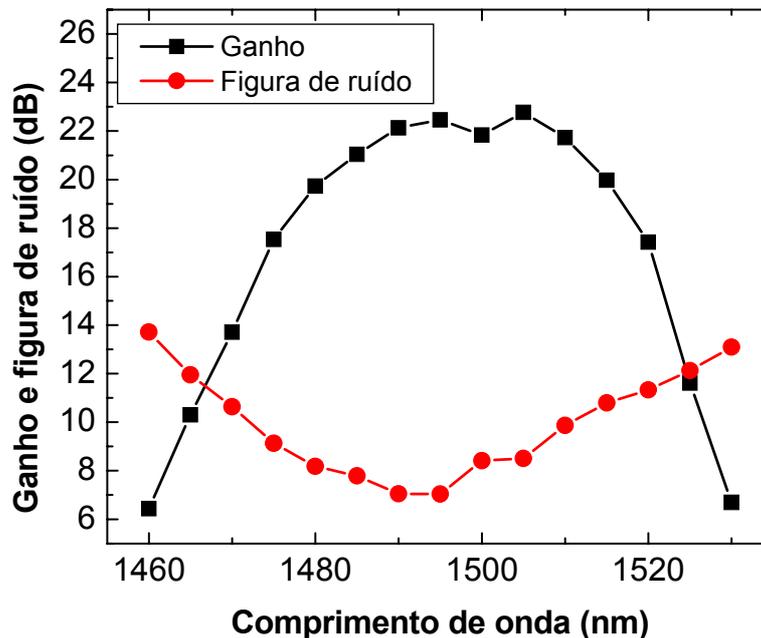


Figura 8.34 – Ganho (quadrados) e figura de ruído (símbolos abertos) do amplificador híbrido TDFA + FRA para potência de bombeamento de 200 mW e 510 mW, respectivamente. A potência de sinal é -20 dBm.

8.4 – Conclusões

Neste capítulo foram apresentadas várias configurações para construção de amplificador híbridos para *banda S* utilizando TDFAs e FRAs. Foi proposta uma configuração utilizando bombeamento monocromático para TDFA em 1050 nm e para FRA em 1426 nm. Os resultados obtidos não foram muito bons por causa do ganho insuficiente gerado pela fibra dopada com Túlio utilizada no experimento. Todavia, utilizar uma fibra dopada com Túlio mais adequada e componentes mais adequados, torna possível a construção desses amplificadores [22].

Este documento cita o primeiro esforço para construção de amplificadores híbridos cascadeando amplificadores Raman a fibra e amplificadores a fibra dopada com Túlio utilizando apenas um laser de bombeamento sendo capaz de amplificar em toda a *banda S*. O maior problema detectado para construção destes amplificadores é o impacto no desempenho causado pelas perdas dos componentes, principalmente porque estes componentes não são construídos para operar especificamente na *banda S*. A utilização de

componentes adequados para esta banda pode melhorar bastante as características destas configurações apresentadas. A configuração com o TDFA utilizando a fibra altamente dopada, o FRA e o TDFA com a fibra com dopagem padrão, cascateados nesta ordem, apresentou boas características ópticas. Figura de ruído mínima de 5,8 dB, ganho interno máximo de 47,7 dB e ganho interno mínimo de 27 dB para toda a banda utilizada, mostram que esta proposta é promissora para o desenvolvimento de amplificadores híbridos de banda larga na *banda S*. Utilizar duas fibras com diferentes dopagens de íons trivalentes de Túlio torna o espectro de ganho mais plano sem a necessidade de inserção de outros dispositivos, como filtros. Contudo, foi mostrado que a utilização de um estágio TDFA com fibra altamente dopada com Túlio e um estágio FRA podem ser suficientes para atingir resultados compatíveis, como ganho máximo de 22 dB e figura de ruído mínima de 7 dB, com custo mais baixo. Todavia, a figura de ruído apresenta uma dependência maior com o comprimento de onda.

Além disso, o desenvolvimento de diodos confiáveis de alta potência, em torno de 1426 nm, torna amplificadores híbridos fortes candidatos para sistemas de comunicação óptica na *banda S*.

8.5 – Referências bibliográficas

- [1] T. Sakamoto, A. Mori, and M. Shimizu, “Rare-earth-doped Fiber Amplifier for Eight-channel CWDM Transmission Systems”, *In Technical Digest of Optical Fiber Communication Conference and Exhibit 2004*, paper ThJ5, Los Angeles, EUA, 2004.
- [2] D. Bayart, P. Baniel, A. Bergonzo, J.-Y. Boniort, P. Bousselet, L. Gasca, D. Hamoir, F. Leplingard, A. Le Sauze, P. Nouchi, F. Roy, and Sillard, “Broadband Optical Fibre Amplification over 17.7THz Range”, *Electron. Lett.*, v. 36, n. 18, pp. 1569-1571, 2000.
- [3] C.-H. Yeh, C.-C. Lee, and S. Chi, “120-nm Bandwidth Erbium-Doped Fiber Amplifier in Parallel Configuration”, *IEEE Photon. Technol. Lett.*, v. 16, n. 7, pp. 1637-1639, 2004.
- [4] Y. B. Lu, P. L. Chu, A. Alphones, and P. Shum, “A 105-nm Ultrawide-band Gain-Flattened Amplifier Combining C- and L-Band Dual-Core EDFAs in a Parallel Configuration”, *IEEE Photon. Technol. Lett.*, v. 16, n. 7, pp. 1640-1642, 2004.
- [5] H. Masuda, S. Kawai, K.-I. Suzuki, and K. Aida, “75-nm 3-dB Gain-band Optical Amplification with Erbium-doped Fluoride Fibre Amplifiers and Distributed Raman

Amplifiers in 9 x 2.5-Gb/s WDM Transmissions Experiment”, *In Technical Digest of European Conference on Optical Communications 1997*, pp. 73-76, 1997.

[6] H. Masuda, S. Kawai, K.-I. Suzuki, and K. Aida, “Ultrawide 75-nm 3-dB gain-band Optical Amplification with Erbium-doped Fluoride Fiber and Distributed Raman Amplifiers”, *IEEE Photon. Technol. Lett.*, v. 10, n. 4, pp. 516-518, 1998.

[7] H. Masuda, S. Kawai, K.-I. Suzuki, and K. Aida, “Wide-band and Low Noise Optical Amplification using Distributed Raman Amplifiers and Erbium-doped Fiber Amplifiers”, *In Technical Digest of European Conference on Optical Communications 1998*, pp. 51-52, 1998.

[8] H. Masuda, S. Kawai, and K. Aida, “Ultra-wideband Hybrid Amplifier comprising distributed Raman Amplifier and Erbium Doped Fiber Amplifier”, *Electron. Lett.*, v. 34, n. 13, pp. 1342-1344, 1998.

[9] H. Kawakami, H. Masuda, and Y. Myiamoto, “Online OTDR Monitoring in Novel Remotely-Pumped EDF/distributed Raman Hybrid Amplifier Scheme with Directional bypass Configuration”, *In Technical Digest of Optical Fiber Communication Conference and Exhibit 2004*, paper WJ4, Los Angeles, EUA, 2004.

[10] S. Kawai, H. Masuda, K.-I. Suzuki, and K. Aida, “Ultra-wide, 75nm 3dB gain-band Optical Amplifier Utilizing Gain-Flattened Erbium-doped fibre Amplifier and Discrete Raman Amplification”, *Electron. Lett.*, v. 34, n. 9, pp. 897-898, 1998.

[11] S. Kawai, H. Masuda, K.-I. Suzuki, and K. Aida, “Ultra-wide, 75nm 3dB gain-band Optical Amplifier Utilizing Erbium-doped Fluoride fibre and Raman fiber”, *In Technical Digest of Optical Fiber Communication Conference and Exhibit 1998*, paper TuG3, pp. 32-33, Anaheim, EUA, 1998.

[12] H. Masuda, and S. Kawai, “Wide-Band and Gain-Flattened Hybrid Fiber Amplifier Consisting of an EDFA and a Multiwavelength Pumped Raman Amplifier”, *IEEE Photonics Technology Letters*, v. 11, n. 6, pp. 647-649, 1999.

[13] A. Carena, V. Curri, and P. Poggiolini, “On the Optimization of Hybrid Raman/Erbium-Doped Fiber Amplifiers”, *IEEE Photon. Technol. Lett.*, v. 13, n. 11, pp. 1170-1172, 2001.

[14] Y Akasaka, Y. Kubota, S. Sakaguchi, I. White, and J. Pan, “100 nm Gain Bandwidth amplifier based on 980 nm pumped cerium codoped Fluoride EDF”, *Electron. Lett.*, v. 39, n. 11, pp. 836-838, 2003.

[15] M.-C. Ho, K. Uesaka, M. Marhic, Y. Akasaka, and L. Kazovsky, “200-nm-Band

Fiber Optical Amplifier Combining Parametric and Raman Gain”, *J. Lightwave Technol.*, v. 19, n. 7, pp. 977-980, 2001.

[16] Y. Akasaka, K. K. Y. Wong, M.-C. Ho, M. Marhic, and L. Kazovsky, “Novel S-band Amplification and Wavelength Conversion Technique using Dual Nonlinear Phenomena”, *In Technical Digest of Optical Fiber Communication Conference and Exhibit 2001*, WWD31, pp. 1-4, Anaheim, EUA, 2001.

[17] H. Masuda, A. Mori, K. Oikawa, K. Kato, and M. Shimizu, “Ultra-wide-band Hybrid Tellurite/Silica Fiber Raman Fiber”, *In Technical Digest of Optical Fiber Communication Conference and Exhibit 2002*, ThB6, pp. 388-390, Anaheim, EUA, 2002.

[18] Y. Akasaka, “Gain Bandwidth expansion to S-plus Band using Fiber OPA pumped by Gain-Clamped signal of a GS-TDFA”, *In Technical Digest of Optical Fiber Communication Conference and Exhibit 2002*, ThGG30, pp. 653-654, Anaheim, EUA, 2002.

[19] Y. Chen, R. Pavlik, C. Visone, F. Pan, E. Gonzalez, A. Turukhin, L. Lunardi, D. Al-Salameh, S. Lumish, “40 nm Broadband SOA-Raman Hybrid Amplifier”, *In Technical Digest of Optical Fiber Communication Conference and Exhibit 2002*, ThB7, pp. 390-391, Anaheim, USA, 2002.

[20] T. Sakamoto, S. Aozasa, M. Yamada, and M. Shimizu, “High-gain Hybrid Amplifier Consisting of cascaded fluoride-based TDFA and Silica-based EDFA in 1458-1540 nm Wavelength Region”, *Electron. Lett.*, v. 39, n. 7, pp. 597-599, 2003.

[21] H. Jeong, K. Oh, S. R. Han, and T. F. Morse, “High-gain Hybrid Amplifier Consisting of cascaded fluoride-based TDFA and Silica-based EDFA in 1458-1540 nm Wavelength Region”, *Opt. Lett.*, v. 28, n. 3, pp. 161-163, 2003.

[22] J. Masum-Thomas, D. Crippa, and A. Maroney, “A 70 nm wide S-band Amplifier by Cascading TDFA and Raman Fibra Amplifier”, *In Technical Digest of Optical Fiber Communication Conference and Exhibit 2001*, WWD9, pp. 1-3, Anaheim, EUA, 2001.

[23] J. Kani, and M. Jinno, “Wideband and flat-gain Optical Amplification from 1460 to 1510 nm by Serial Combination of a Thulium-doped Fluoride Fibre Amplifier and Fibre Raman Amplifier”, *Electron. Lett.*, v. 35, n. 12, pp. 1004-1006, 1999.

[24] H. Masuda, S. Aozasa, and M. Shimizu, “Ultra-wide-band Hybrid Amplifier Consisting of two Dispersion-compesating Fibres for Raman Amplification ant Thulium-doped Fibre”, *Electron. Lett.*, v. 38, n. 11, pp. 500-502, 2002.

[25] Y. Miyamoto, H. Masuda, A. Hirano, S. Kuwahara, Y. Kisaka, H. Kawakami, M.

Tomizawa, Y. Tada, and S. Aozasa, "S-band WDM Coherent Transmission of 40 x 43-Gbit/s CS-RZ DPSK Signals over 400 km DSF using Hybrid GS-TDFAs/Raman Amplifiers", *Electron. Lett.*, v. 38, n. 24, pp. 1569-1570, 2002.

[26] S. R. Lüthi, C. J. A. Bastos-Filho, M.B. Costa e Silva, J.F. Martins-Filho, and A.S.L. Gomes, "Single-Pump Raman/TDFA Hybrid Amplifier Covering the Entire S-Band", *In Technical Digest of European Conference on Optical Communications 2004*, Estocolmo, Suécia, 2004.

Capítulo 9 – Conclusões, contribuições e trabalhos futuros

Esta tese apresentou vários aspectos sobre o projeto e construção de amplificadores ópticos que possam ser utilizados num futuro próximo para expansão da capacidade dos sistemas de comunicações ópticas utilizando multiplexação por comprimentos de onda. Abaixo estão descritas as principais contribuições ao estado da arte, bem como algumas sugestões para trabalhos futuros.

Contribuições

Como alternativa para utilização da *banda S* de transmissão óptica foram abordados os amplificadores a fibra dopada com Túlio. Uma das importantes contribuições consistiu na proposição de um novo esquema de bombeamento duplo (800 nm + 1050 nm) altamente eficiente que pode viabilizar amplificadores com potência de bombeamento total baixa utilizando lasers de diodo comerciais. Baixa potência de bombeamento é bastante interessante, pois aumenta a confiabilidade das emendas das fibras dopadas com Túlio. Com a adição de 73 mW de bombeamento em 800 nm à 80 mW de bombeamento em 1050 nm foi conseguido um aumento de ganho de 20 dB para um sinal de -27,2 dBm de potência..

A distribuição de ganho ao longo da fibra dopada com Túlio para o esquema de bombeamento proposto também foi abordada utilizando a técnica de reflectometria óptica coerente no domínio da frequência, mostrando que muitas vezes se utiliza um comprimento de fibra dopada maior que o necessário. Com esta técnica foi mostrado que a proporção ideal de bombeamento em 800 nm é de aproximadamente 20% da potência total de bombeamento.

À respeito do esquema de bombeamento duplo (800 nm + 1050 nm) também foi construído um protótipo utilizando lasers de diodo comerciais com características ópticas compatíveis com aplicações práticas. Todavia, o emprego de dispositivos projetados para operação na *banda S* pode prover melhor desempenho.

Técnicas de dupla passagem do sinal pelo meio gerador de ganho do amplificador também são aplicadas a TDFAs, mostrando que é possível a construção de amplificadores

com alto ganho de pequenos sinais com configuração simples e bombeamento monocromático. No caso, obteve-se 38 dB de ganho em 1462 nm, com potência de bombeamento de 400 mW em configuração empregando um espelho metálico como elemento refletor, representando um aumento de ganho de aproximadamente 16 dB em relação à configuração de única passagem do sinal pela fibra dopada. A média de coeficiente de ganho obtido é de 95 dB/W. Esses amplificadores podem ter aplicações práticas como amplificadores de linha ou pré-amplificadores.

O efeito de saturação cruzada de ganho foi discutido para TDFAs com bombeamento monocromático. Foi mostrado pela primeira vez que o comprimento de onda de bombeamento influencia bastante na saturação cruzada de ganho resultante e que sinais com comprimentos de onda menor estão mais susceptíveis ao efeito. Foi mostrado que o bombeamento monocromático em 1426 nm é mais sensível a este efeito do que o bombeamento monocromático em 1050 nm. Também foi reportado que sinais com comprimentos de onda menores são mais afetados por causa do comportamento espectral das seções de choque de emissão e absorção dos níveis de energia envolvidos no processo de amplificação.

Técnicas de travamento de ganho totalmente óptico de baixo ruído em EDFA foram investigadas. Foi mostrado que EDFAs com travamento automático de ganho utilizando circuladores para constituir a malha de realimentação apresentam menor figura de ruído e melhor desempenho que a configuração que usa acopladores direcionais.

Foram implementados, pela primeira vez, amplificadores híbridos envolvendo TDFa e FRA utilizando um comprimento de onda único para bombeamento em 1426 nm. Esse amplificador apresenta largura de banda de amplificação de 50,5 nm na Banda S. A utilização de um único comprimento de onda de bombeamento pode viabilizar o emprego comercial destes amplificadores, já que a tecnologia para lasers de diodo emitindo em 1426 nm está em uma fase avançada de maturação.

Sugestões para trabalhos futuros

1. Dado o modelo desenvolvido para prever o comportamento de amplificadores a fibra dopada com Túlio em regime de bombeamento duplo em 800 nm e 1050 nm (ver referência [44] do capítulo 3), pode-se criar mecanismos de ação inteligente (como

algoritmos genéticos) para obtenção de soluções satisfatórias para alocação de comprimentos de onda em enlaces ópticos, levando em consideração o comprimento ideal da fibra dopada com Túlio e as potências de bombeamento.

2. Como solução para amenizar o efeito de saturação cruzada de ganho pode-se empregar técnicas de travamento de ganho, analisando a resposta de diferentes configurações de travamento de ganho automático em TDFAs.

3. Investigação de novas configurações para travamento de ganho totalmente óptico de baixo custo de implementação e de pequeno efeito transiente.

4. Reconstrução e análise das configurações de amplificadores híbridos (FRA + TDFA) propostas no capítulo 8 com componentes mais adequados à *banda S*.

Publicações referentes à tese

Artigos – Periódicos Internacionais

1. S. R. Lüthi, M. B. Costa e Silva, C. J. A. Bastos-Filho, J. F. Martins-Filho, A. S. L. Gomes, “Raman/TDFA Hybrid Amplifier Covering the Entire S-Band Pumped by a Single Laser”, *IEEE Photon. Technol. Lett.*, a ser publicado em outubro de 2005.
2. C. J. A. Bastos-Filho, J. F. Martins-Filho, M. T. Carvalho, and A. S. L. Gomes, “Measurements of Gain Cross-Saturation and Transient Response in Single Pump TDFAs”, *Optics Communications*, vol. 246, pp. 79-84, 2005.
3. A. S. L. Gomes, M. T. Carvalho, M. L. Sundheimer, C. J. A. Bastos-Filho, J. F. Martins-Filho, M. B. Costa e Silva, J. P. Von Der Weid, and W. Margulis, “Characterization of efficient dual wavelength (1050nm + 800nm) pumping scheme for thulium doped fiber amplifiers”, *IEEE Photon. Technol. Lett.*, vol. 15, n. 2, pp. 200-202, 2003.
4. A. S. L. Gomes, M. T. Carvalho, M. L. Sundheimer, C. J. A. Bastos-Filho, J. F. Martins-Filho, J. P. von der Weid, and W. Margulis, “Low pump power, short-fiber co-propagating dual-pumped (800 nm + 1050 nm) thulium doped fiber amplifier”, *Opt. Lett.*, vol. 28, n. 5, pp. 334-336, 2003.

Artigos - Conferências

5. C. J. A. Bastos-Filho, and J. F. Martins-Filho, “Influence of Pump Direction in All-Optical Gain-Clamped Erbium Doped Fiber Amplifier”, *IMOC 2005, International Microwave and Optoelectronics Conference*, Brasília/DF, Brasil, 2005.
6. S. R. Lüthi, C. J. A. Bastos-Filho, M. B. Costa e Silva, J. F. Martins-Filho, and A. S. L. Gomes, “Single-Pump Raman/TDFA Hybrid Amplifier Covering the Entire S-Band”, *ECOC 2004, European Conference on Optical Communications*, Estocolmo-Suécia, 2004.
7. C. J. A. Bastos-Filho, J. F. Martins-Filho, M. T. Carvalho, and A. S. L. Gomes, “Measurements of Gain Cross-Saturation and Transient Response in Single Pump TDFAs”, Nos anais do simpósio Brasileiro de Microondas, Optoeletrônica e Magnetismo 2004, MOMAG 2004, São Paulo/SP, Brasil, 2004.
8. C. J. A. Bastos-Filho, J. F. Martins-Filho, A. S. L. Gomes, and M. T. Carvalho, “Gain characterization of a single-diode pumped TDFA employing a highly concentrated

Thulium Doped fibre”, Resumos do I workshop do OSA chapter de Campinas, Campinas/SP, Brasil, 2003.

9. C. J. A. Bastos-Filho, J. F. Martins-Filho, and A. S. L. Gomes, “38dB gain from a double-pass single-pump thulium doped fiber amplifier”, *IMOC 2003, International Microwave and Optoelectronics Conference*, vol. 1, pp. 125-128, Foz do Iguaçu/PR, Brazil, 2003.

10. A. S. L. Gomes, M. T. Carvalho, M. L. Sundheimer, C. J. A. Bastos-Filho, J. F. Martins-Filho, M. B. Costa e Silva, J. P. Von Der Weid, and W. Margulis, “Characterization of efficient dual wavelength (1050nm + 800nm) pumping scheme for thulium doped fiber amplifiers”, *OFC 2003, Optical Fiber Communication Conference and Exhibit*, Paper FB-5, pp. 632, Atlanta, EUA, 2003.

11. A. S. L. Gomes, M. L. Sundheimer, M. T. Carvalho, J. F. Martins-Filho, C. J. A. Bastos-Filho, and W. Margulis, “Novel Dual Wavelength (1050nm + 800nm) Pumping Scheme for Thulium Doped Fiber Amplifiers”, In: *Optical Fiber Communication Conference and Exhibit, OFC 2002, Postdeadline papers*, FB2, Anaheim, EUA, 2002.

12. M. T. Carvalho, M. L. Sundheimer, A. S. L. Gomes, C. J. A. Bastos-Filho, and J. F. Martins-Filho, “Novel Dual Wavelength (1050nm + 800nm) Pumping Scheme for Thulium Doped Fiber Amplifiers”, *XX Encontro de Físicos do Norte Nordeste, XX EFNNE*, Resumos, pp. 156, Recife/PE, Brasil, 2002.

Patente - Internacional

13. A. S. L. Gomes, M. L. Sundheimer, M. T. Carvalho, J. F. Martins-Filho, C. J. A. Bastos-Filho, and W. Margulis, “Methods and arrangements in a pumped fiber amplifier”, Patente número WO 03077384, depositada em março de 2003, disponível em: <http://v3.espacenet.com/origdoc?DB=EPODOC&IDX=WO03077384&QPN=WO03077384>

Publicações não referentes à tese

14. C. J. A. Bastos-Filho, and J. F. Martins-Filho, “Noise Figure Model for Transmission Performance Evaluation Considering Four Wave Mixing and Source Spontaneous Emission”, *IMOC 2005, International Microwave and Optoelectronics Conference*, Brasília/DF, Brasil, 2005.

15. J. F. Martins-Filho, C. J. A. Bastos-Filho, M. T. Carvalho, A. S. L. Gomes, and M. L. Sundheimer, "Dual wavelength (1050nm + 1550nm) Pumped Thulium Doped Fiber Amplifier Characterization by Optical Frequency Domain Reflectometry", *IEEE Photon. Technol. Lett.*, vol. 15, n. 1, pp. 24-26, 2003.
16. C. J. A. Bastos-Filho, J. F. Martins-Filho, E. A. J. Arantes, and S. C. Oliveira, "The Influence of Amplifier Position and OXC Fabric Technologies in the Performance of Metro Networks", *MOMAG 2004, Simpósio nacional de microondas, optoeletrônica e magnetismo*, São Paulo/SP, Brasil, 2004.
17. C. J. A. Bastos-Filho, and J. F. Martins-Filho, "A Formulation to Evaluate Four Wave Mixing as Noise Figure", *MOMAG 2004, Simpósio nacional de microondas, optoeletrônica e magnetismo*, São Paulo/SP, Brasil, 2004.
18. S. C. Oliveira, C. J. A. Bastos-Filho, E. A. J. Arantes, and J. F. Martins-Filho, "A Novel Configuration of Optical Cross-Connects Based on 1 x 2 Switch Elements", *ICT 2004, International Conference on Telecommunications*, Fortaleza/CE, Brasil, 2004.
19. J. F. Martins-Filho, L. P. Salles, C. J. A. Bastos-Filho, F. W. B. Rech, T. F. Vieira, "2 x 40 Gbit/s WDM Soliton Transmission Improvement by Initial Time Delay Technique", *ICT 2004, International Conference on Telecommunications*, Fortaleza/CE, Brasil, 2004.
20. J. F. Martins-Filho, C. J. A. Bastos-Filho, E. A. J. Arantes, S. C. Oliveira, R. G. Dante, F. D. Nunes, E. Fontana, "Impact of device characteristics on network performance from a physical-impairment-based routing algorithm", *OFC 2004, Optical Fiber Communication Conference and Exhibit*, Paper MF93, Los Angeles, EUA, 2003.
21. J. F. Martins-Filho, C. J. A. Bastos-Filho, S. C. Oliveira, E. A. J. Arantes, E. Fontana, and F. D. Nunes, "Novel Routing Algorithm for Optical Networks based on Noise Figure and physical impairment", *ECOC 2003, European Conference on Optical Communications*, Rimini, Itália, 2003.
22. C. J. A. Bastos-Filho, S. C. Oliveira, E. A. J. Arantes, and J. F. Martins-Filho, "Impact of Optical Switch and Amplifier Characteristics on Physical Impairment-based Wavelength-Routed Optical Networks", *SBT 2003, Simpósio Brasileiro de Telecomunicações*, Rio de Janeiro/RJ, Brasil, 2003.
23. J. F. Martins-Filho, C. J. A. Bastos-Filho, E. A. J. Arantes, S. C. OLIVEIRA, L. D. Coelho, J. P. G. de Oliveira, R. G. Dante, E. Fontana, and F. D. Nunes, "Novel Routing

Algorithm for Transparent Optical Networks Based on Noise Figure and Amplifier Saturation”, *IMOC 2003, International Microwave and Optoelectronics Conference*, vol. 2, pp. 919-923, Foz do Iguaçu/PR, Brasil, 2003.

24. L. D. Coelho, C. J. A. Bastos-Filho, and J. F. Martins-Filho, “160 Gbit/s Soliton Transmission in the S and C Bands”, *IMOC 2003, International Microwave and Optoelectronics Conference*, vol. 1, pp. 245-249, Foz do Iguaçu/PR, Brasil, 2003.

25. A. A. Rieznik, G. S. Widerhecker, H. L. Fragnito, M. T. Carvalho, M. L. Sundheimer, A. S. L. Gomes, C. J. A. Bastos-Filho, and J. F. Martins-Filho, “Black Box Model for Thulium Doped Fiber Amplifiers”, *Optical Fiber Communication Conference and Exhibit 2003*, Paper FB-2, pp. 627-628, Atlanta, EUA, 2003.

26. C. J. A. Bastos-Filho, J. F. Martins-Filho, M. T. Carvalho, M. L. Sundheimer, and A. S. L. Gomes, “Dual Wavelength (1050nm + 1550nm) Pumped Thulium Doped Fiber Amplifier Characterization by Optical Frequency Domain Reflectometry”, Nos anais do *X Simpósio Brasileiro de Microondas e Optoeletrônica 2002*, pp. 526 – 530, Recife/PE, Brasil, 2002.

27. M. T. Carvalho, M. L. Sundheimer, A. S. L. Gomes, C. J. A. Bastos-Filho, and J. F. Martins-Filho, “Dual wavelength (1050nm + 1550nm) Pumped Thulium Doped Fiber Amplifier Characterization by Optical Frequency Domain Reflectometry”, Nos resumos do *XX Encontro de Físicos do Norte Nordeste*, pp. 156, Recife/PE, Brasil, 2002.

28. H. A. Pereira, C. J. A. Bastos-Filho, D. A. R. Chaves, and J. F. Martins-Filho, “Otimização da Alocação de Comprimentos de Onda Considerando o Efeito de Mistura de Quatro Ondas”, *SBT 2005, Simpósio Brasileiro de Telecomunicações*, Campinas/SP, Brasil, 2005.