

Rafael de Oliveira Ribeiro

Caracterização da conversão de
comprimento de onda por
modulação de ganho cruzado em
amplificadores ópticos
semicondutores

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA
Programa de Pós-graduação em Engenharia
Elétrica

Rio de Janeiro
Setembro de 2005



Rafael de Oliveira Ribeiro

**Caracterização da conversão de comprimento
de onda por modulação de ganho cruzado
em amplificadores ópticos semicondutores**

Dissertação de Mestrado

Dissertação apresentada como requisito parcial para obtenção do grau de Mestre pelo Programa de Pós-graduação em Engenharia Elétrica do Departamento de Engenharia Elétrica da PUC-Rio

Orientador : Prof. Maria Cristina Ribeiro Carvalho
Co-Orientador: Prof. Maria Thereza Miranda Rocco Giraldi

Rio de Janeiro
Setembro de 2005



Rafael de Oliveira Ribeiro

**Caracterização da conversão de comprimento
de onda por modulação de ganho cruzado
em amplificadores ópticos semicondutores**

Dissertação apresentada como requisito parcial para obtenção do grau de Mestre pelo Programa de Pós-graduação em Engenharia Elétrica do Departamento de Engenharia Elétrica do Centro Técnico Científico da PUC-Rio. Aprovada pela Comissão Examinadora abaixo assinada.

Prof. Maria Cristina Ribeiro Carvalho

Orientador

Departamento de Engenharia Elétrica — PUC-Rio

Prof. Maria Thereza Miranda Rocco Giraldi

Co-Orientador

SE/3 — IME

Prof. Maria José Pontes

SE/3 — IME

Prof. Paula Medeiros Proença de Gouvêa

PósMQI — PUC-Rio

Prof. José Eugenio Leal

Coordenador Setorial do Centro Técnico Científico — PUC-Rio

Rio de Janeiro, 13 de Setembro de 2005

Todos os direitos reservados. É proibida a reprodução total ou parcial do trabalho sem autorização da universidade, do autor e do orientador.

Rafael de Oliveira Ribeiro

Graduou-se em Engenharia de Telecomunicações na Universidade Federal Fluminense (Niterói, Rio de Janeiro), Especializou-se em Comunicações Ópticas, construindo durante o projeto de fim de curso um protótipo de um equipamento de FSO - *Free Space Optics*. Formou-se em Técnico em Eletrônica pelo Instituto de Tecnologia ORT.

Ficha Catalográfica

Ribeiro, Rafael de Oliveira

Caracterização da conversão de comprimento de onda por modulação de ganho cruzado em amplificadores ópticos semicondutores / Rafael de Oliveira Ribeiro; orientador: Maria Cristina Ribeiro Carvalho; co-orientador: Maria Thereza Miranda Rocco Giral di. — Rio de Janeiro : PUC-Rio, Departamento de Engenharia Elétrica, 2005.

v., 103 f: il. ; 29,7 cm

1. Dissertação (mestrado) - Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Departamento de Engenharia Elétrica.

Inclui referências bibliográficas.

1. Engenharia Elétrica – Tese. 2. Conversão de comprimento de onda. 3. Amplificadores ópticos semicondutores. 4. Óptica não-linear. 5. Modulação de ganho cruzado. 6. Emissão espontânea. 7. Emissão estimulada. 8. Comunicações ópticas. I. Carvalho, Maria Cristina Ribeiro. II. Giral di, Maria Thereza Miranda Rocco. III. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Departamento de Engenharia Elétrica. IV. Título.

CDD: 621.3

Agradecimentos

Às minhas orientadoras Professoras Maria Cristina Ribeiro Carvalho e Maria Thereza Miranda Rocco Giraldi pelo apoio e a simpatia de sempre durante a realização deste trabalho.

À Maria José Pontes, pelo incentivo de sempre e pelas discussões valiosas.

À CAPES e à PUC-Rio, pelos auxílios concedidos, sem os quais este trabalho não poderia ter sido realizado.

Aos meus pais, Roberto de Oliveira Ribeiro e Neusa Maria Ribeiro, a minha irmã Paula de Oliveira Ribeiro e a minha namorada Débora Alves Melo Coutinho, pelo apoio incondicional nas horas mais difíceis.

Aos meus amigos, pela ajuda e pelo incentivo sem igual. Em especial: Caio Hajime Yoshida, Danilo Moret Rodrigues, Mário de Pinho Alho Júnior, Mauricio Oliveira Carneiro, Romulo Rios Rosa e Tiago Travassos Vieira Vinhoza.

Aos meus colegas do CETUC, que me fizeram sentir em casa durante a realização deste trabalho.

Resumo

Ribeiro, Rafael de Oliveira; Carvalho, Maria Cristina Ribeiro; Giralardi, Maria Thereza Miranda Rocco. **Caracterização da conversão de comprimento de onda por modulação de ganho cruzado em amplificadores ópticos semicondutores**. Rio de Janeiro, 2005. 103p. Dissertação de Mestrado — Departamento de Engenharia Elétrica, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

A conversão de comprimento de onda de sinais por meio de técnicas totalmente ópticas é um assunto inovador e de extrema necessidade para as redes com roteamento de comprimento de onda; a técnica de conversão de comprimentos de onda por modulação de ganho cruzado é uma das mais simples, em princípio, que atinge este objetivo. Duas modalidades são apresentadas neste trabalho: a clássica, também conhecida por *pump & probe*, e uma nova, a de modulação de ganho cruzado do espectro da ASE em um SOA. A técnica *pump & probe* é apresentada, assim como um experimento baseado nesta. A técnica de modulação de ganho cruzado da ASE é explorada como alternativa à técnicas de conversão de comprimento de onda que necessitam de outra fonte de luz, para a qual o sinal deve ser convertido. Na modulação de ganho cruzado da ASE, o sinal é convertido de luz coerente para *incoerente*; e, uma vez modulado o espectro da ASE do SOA, este é filtrado no comprimento de onda que se deseja obter a conversão. Assim, este conversor pode ser sintonizável, já que não é um parâmetro de entrada que define o comprimento de onda convertido, e sim um filtro passa-faixa ao fim do dispositivo. Para se avaliar os tempos de resposta da técnica, a conversão é feita utilizando-se pulsos elétricos ultracurtos (50 ps), o que não havia sido feito até então.

Palavras-chave

Conversão de comprimento de onda. Amplificadores ópticos semicondutores. Óptica não-linear. Modulação de ganho cruzado. Emissão espontânea. Emissão estimulada. Comunicações ópticas.

Abstract

Ribeiro, Rafael de Oliveira; Carvalho, Maria Cristina Ribeiro; Giraldi, Maria Thereza Miranda Rocco. **Characterisation of all-optical wavelength conversion by cross-gain modulation in semiconductor optical amplifiers**. Rio de Janeiro, 2005. 103p. M.Sc. Thesis — Department of Engenharia Elétrica, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

Wavelength conversion of optical signals by all-optical techniques is an innovative and necessary technology for wavelength routed networks in the near future; the cross-gain modulation method is one of the simplest, in form, to attain this goal. Two categories of the main technique are presented: the classic, also known as “pump & probe”, and a novel one, named cross-gain modulation of the ASE spectrum of a SOA. The cross-gain modulation of the ASE spectrum is explored here as an alternative to previous all-optical wavelength conversion techniques that require another light source, to which the incoming signal is to be converted; the signal is converted from coherent to incoherent light; and, once modulated throughout the SOA’s ASE spectrum, the signal is then filtered at the central wavelength it is desired to be converted. Thus, this particular wavelength converter can be tunable, in the sense that it is reconfigurable, since a band pass filter located at the end of the device selects what wavelength the signal will be converted to. In order to assess the response times of the technique, the conversion is made for ultra short electrical pulses (50 *ps*), a feature unknown until now.

Keywords

Wavelength conversion. Semiconductor optical amplifiers. Nonlinear optics. Cross-gain modulation. Spontaneous emission. Stimulated emission. Optical communications.

Sumário

1	Introdução	15
1.1	Motivação	15
1.2	Aplicações da conversão de comprimento de onda	16
1.3	Objetivo	17
1.4	Escopo do trabalho	17
2	Amplificador óptico semiconductor	18
2.1	Conceitos básicos	18
2.2	Ganho	22
2.2.1	Saturação de ganho	23
2.2.2	Ruído do amplificador	24
2.2.3	Dinâmica de ganho	26
2.2.4	Espectro de ganho e largura de banda	27
2.3	Materiais e estruturas	28
2.3.1	Materiais	28
2.3.2	Estruturas	29
3	Técnicas de conversão de comprimento de onda utilizando SOAs	32
3.1	Conversão opto-eletro-ótica	32
3.2	Métodos totalmente ópticos	33
3.2.1	Modulação de ganho cruzado	34
3.2.1.1	Modulação de ganho cruzado do espectro da ASE	36
3.2.2	Modulação de fase cruzada	38
3.2.3	Mistura de quatro ondas	40
4	Conversão de comprimento de onda utilizando XGM em SOAs	43
4.1	Conversão utilizando a técnica de <i>pump & probe</i>	44
4.1.1	Configuração experimental	44
4.1.2	Resultados experimentais para o SOA sub-montado	45
4.1.3	Resultados experimentais para o SOA encapsulado	53
4.2	Conversão utilizando a técnica ASE-XGM	60
4.2.1	Configuração experimental	60
4.2.2	Resultados experimentais para o SOA sub-montado	62
4.2.3	Resultados experimentais para o SOA encapsulado	68
4.3	Comparação entre as técnicas apresentadas	75
4.3.1	Amplitudes de pulsos	75
4.3.2	Durações de pulsos	75
4.3.2.1	Taxas máximas de conversão	76
5	Conclusões	77
5.1	Sugestões para trabalhos futuros	78
	Referências Bibliográficas	79
A	Caracterização dos dispositivos empregados	86

A.1	Laser semiconductor	86
A.2	Gerador de pulsos curtos	87
A.3	Modulador externo	88
A.4	Amplificadores ópticos semicondutores	90
A.4.1	Ganho dos SOAs	92
A.4.2	Espectro de ganho dos SOAs	94
A.4.3	Espectro da ASE dos SOAs	97
A.5	Amplificador a fibra dopada com Érbio	99
A.5.1	Ganho do EDFA	99
A.5.2	Espectro de ganho do EDFA	100
A.5.3	Espectro da ASE do EDFA	101
A.6	Filtro óptico passa-faixa sintonizável	102

Lista de figuras

2.1	Estrutura de região ativa angulada para construção de TWAs.	19
2.2	Estrutura de material transparente para construção de TWAs.	20
2.3	Transições radiativas principais em um semiconductor.	20
2.4	Exemplo de curva de saturação de ganho, para $G_0 = 30 \text{ dB}$.	24
2.5	Diagrama de bandas de energia, no equilíbrio térmico.	29
2.6	Diagrama de bandas de energia, polarizadas diretamente.	30
3.1	Método opto-eletro-óptico de conversão de comprimento de onda.	32
3.2	Método XGM para conversão de comprimento de onda.	35
3.3	Método ASE-XGM para conversão de comprimentos de onda.	37
3.4	Método XPM para conversão de comprimento de onda.	39
3.5	Método FWM para conversão de comprimento de onda.	41
4.1	Diagrama do experimento <i>pump & probe</i> .	44
4.2	Pulsos elétricos utilizados para a caracterização.	46
4.3	Curva de transferência do modulador externo.	46
4.4	Pulsos ópticos na saída do modulador externo.	47
4.5	Forma dos pulsos convertidos, no tempo. $V_{bias} = 0V$, SOA sub-montado.	48
4.6	Forma dos pulsos convertidos, no tempo. $V_{bias} = V_{\pi}$, SOA sub-montado.	49
4.7	Amplitude de pulsos convertidos, para variação de I_{SOA} . SOA sub-montado.	51
4.8	Duração de pulsos convertidos, para variação de I_{SOA} . SOA sub-montado.	51
4.9	Amplitude de pulsos convertidos, para variação de P_{probe} . SOA sub-montado, $V_{bias} = 0V$.	52
4.10	Duração de pulsos convertidos, para variação de P_{probe} . SOA sub-montado, $V_{bias} = 0V$.	53
4.11	Foto de pulsos convertidos, para $I_{SOA} = 200 \text{ mA}$. SOA encapsulado, $V_{bias} = V_{\pi}$.	54
4.12	Foto de pulsos convertidos, para $I_{SOA} = 240 \text{ mA}$. SOA encapsulado, $V_{bias} = V_{\pi}$.	55
4.13	Foto de pulsos convertidos. SOA encapsulado, $V_{bias} = 0 \text{ V}$.	56
4.14	Foto de pulsos convertidos. SOA encapsulado, $V_{bias} = V_{\pi}$.	56
4.15	Amplitude de pulsos convertidos em função de P_{probe} . SOA encapsulado.	57
4.16	Duração de pulsos convertidos em função de P_{probe} . SOA encapsulado.	58
4.17	Amplitude de pulsos convertidos em função de λ_{probe} . SOA encapsulado.	59
4.18	Duração de pulsos convertidos em função de λ_{probe} . SOA encapsulado.	59
4.19	Diagrama do experimento ASE-XGM.	61
4.20	Espectros da ASE, grandes e pequenos sinais na saída do SOA sub-montado.	63

4.21 Razão de extinção do sinal convertido por ASE-XGM. SOA sub-montado.	64
4.22 Espectro de ASE a 200 mA de corrente de polarização e fotos de pulsos convertidos. SOA sub-montado.	65
4.23 Eficiência de conversão em função do $\lambda_{conv.}$, para variação de P_{pump} . SOA sub-montado.	66
4.24 Amplitude de pulsos convertidos para variação de P_{pump} . SOA sub-montado.	67
4.25 Duração de pulsos convertidos para variação de P_{pump} . SOA sub-montado.	67
4.26 Amplitude de pulsos convertidos em função de I_{SOA} . SOA encapsulado.	69
4.27 Duração de pulsos convertidos em função de I_{SOA} . SOA encapsulado.	69
4.28 Amplitude de pulsos convertidos em função de P_{pump} . SOA encapsulado.	70
4.29 Duração de pulsos convertidos em função de P_{pump} . SOA encapsulado.	71
4.30 Razão de extinção de saída, para variação do λ_{pump} , SOA encapsulado.	72
4.31 Diferença entre λ_{pump} e $\lambda_{ER,max}$. SOA encapsulado.	73
4.32 Valor de máximo da razão de extinção de saída em função do λ_{pump} . SOA encapsulado.	74
A.1 Diagrama para a medição da curva do laser empregado.	86
A.2 Curva $P \times I$ do laser utilizado.	87
A.3 Diagrama para a geração de pulsos curtos.	87
A.4 Exemplo de pulsos elétricos curtos.	88
A.5 Diagrama de medição da curva do modulador externo.	89
A.6 Curva de transferência do modulador externo, em mW.	89
A.7 Curva de transferência do modulador externo em dB, normalizada.	89
A.8 Exemplo de pulsos elétricos curtos.	90
A.9 Foto da montagem do SOA sub-montado.	91
A.10 Foto da montagem do SOA encapsulado.	91
A.11 Diagrama para a medição do ganho dos SOAs.	92
A.12 Ganho do SOA sub-montado, por P_{OUT} .	93
A.13 Ganho do SOA encapsulado, por P_{OUT} .	94
A.14 Diagrama para as medições de espectro de ganho do SOA.	94
A.15 Espectro de ganho para pequenos sinais do SOA sub-montado.	95
A.16 Espectro de ganho para grandes sinais do SOA sub-montado.	96
A.17 Espectro de ganho para pequenos sinais do SOA encapsulado.	96
A.18 Espectro de ganho para grandes sinais do SOA encapsulado.	97
A.19 Diagrama para as medições do espectro da ASE.	97
A.20 Espectro da ASE do SOA sub-montado, para uma variação de I_{SOA} .	98
A.21 Espectro da ASE do SOA encapsulado, para uma variação de I_{SOA} .	98
A.22 Diagrama para a medição do ganho.	99
A.23 Ganho do EDFA por P_{IN} .	100
A.24 Diagrama para as medições de espectro de ganho do EDFA.	100
A.25 Espectro de ganho do EDFA.	101
A.26 Diagrama para as medições do espectro da ASE do EDFA.	101

A.27 Espectro da ASE do EDFA.	102
A.28 Diagrama para a caracterização do filtro óptico utilizado.	102
A.29 Espectros do LED e do filtro, para $\lambda = 1552 \text{ nm}$.	103
A.30 Perda de inserção do filtro utilizado, para $\lambda = 1552 \text{ nm}$.	103

Lista de tabelas

- 4.1 Durações mínimas medidas de pulsos convertidos para as técnicas e amplificadores considerados. 76

Sumário das notações

AM	Amplitude Modulation
AR	Anti Reflexivo
ASE	Amplified Spontaneous Emission
ASE-XGM	Cross-Gain Modulation of the ASE
CW	Continuous Wave
DC	Direct Current
DFB	Distributed Feedback
DFG	Difference Frequency Generation
EDFA	Erbium-Doped Fiber Amplifier
ER	Extinction Ratio
FC/PC	Ferrule Connector/Physical Contact
FPA	Fabry-Perot Amplifier
FWHM	Full Width at Half-Maximum
FWM	Four-Wave Mixing
GRIN	Graded-Index
LED	Light-Emitting Diode
NRZ	Non-Return to Zero
OEO	Opto-Eletro-Óptico
OSA	Optical Spectrum Analyser
OXC	Optical Cross-Connect
PD	Photodetector
RF	Rádio Frequência
SOA	Semiconductor Optical Amplifier
SPM	Self-Phase Modulation
SSE	Source Spontaneous Emission
TWA	Travelling Wave Amplifier
WDM	Wavelength Division Multiplexing
WRON	Wavelength-Routed Optical Networks
XGM	Cross-Gain Modulation
XPM	Cross-Phase Modulation
ZIF	Zero Insertion Force

*Two roads diverged in a yellow wood,
And sorry I could not travel both
And be one traveler, long I stood
And looked down one as far as I could
To where it bent in the undergrowth;*

*Then took the other, as just as fair,
And having perhaps the better claim,
Because it was grassy and wanted wear;
Though as for that the passing there
Had worn them really about the same,*

*And both that morning equally lay
In leaves no step had trodden black.
Oh, I kept the first for another day!
Yet knowing how way leads on to way,
I doubted if I should ever come back.*

*I shall be telling this with a sigh
Somewhere ages and ages hence:
Two roads diverged in a wood, and I —;
I took the one less traveled by,
And that has made all the difference*

Robert Frost, *The Road Not Taken*