

PONTIFÍCIA UNIVERSIDADE CATÓLICA
DO RIO DE JANEIRO



Giancarlo Vilela de Faria

**Estudo da amplificação Raman por reflectometria óptica
sintonizável**

Dissertação de Mestrado

Dissertação apresentada como requisito parcial para
obtenção do título de Mestre pelo Programa de Pós-
Graduação em Engenharia Elétrica da PUC-Rio.

Orientador: Jean Pierre von der Weid

Rio de Janeiro, Setembro de 2005

Giancarlo Vilela de Faria

**Estudo da amplificação Raman por reflectometria óptica
sintonizável**

Dissertação apresentada como requisito parcial para obtenção do título de Mestre pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da PUC-Rio. Aprovada pela Comissão Examinadora abaixo assinada.

Dr. Jean Pierre von der Weid
Orientador
PUC-Rio

Dr. Rogério Passy
MLS Wireless

Dr. Alexandre Bessa dos Santos
INMETRO - UCP

Prof. José Eugenio Leal
Coordenador(a) Setorial do Centro Técnico Científico - PUC-Rio

Rio de Janeiro, 01 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.

Giancarlo vilela de Faria

Formado em Engenharia Elétrica com ênfase em eletrônica pela PUC-Rio em 2002. Suas atuais áreas de interesse incluem comunicações ópticas, metrologia óptica e instrumentação eletrônica.

Ficha Catalográfica

Faria, Giancarlo Vilela de

Estudo da amplificação Raman por reflectometria óptica sintonizável / Giancarlo Vilela de Faria ; orientador: Jean Pierre Von der Weid. – Rio de Janeiro : PUC, Departamento de Engenharia Elétrica, 2005.

63 f. ; 30 cm

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

Inclui referências bibliográficas.

1. Engenharia elétrica – Teses. 2. Reflectometria óptica. 3. Amplificação Raman. 4. Comunicações ópticas. I. Weid, Jean Pierre von der. II. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Departamento de Engenharia Elétrica. III. Título.

CDD: 621.3

Agradecimentos

Ao Professor Jean Pierre von der Weid não só pelos ensinamentos profissionais e pessoais, mas pela sincera amizade e pela confiança depositada.

Aos professores Passy, Dalforno e Guto pelos ensinamentos e apoio logo no meu início no CETUC.

Aos atuais e antigos amigos e companheiros de laboratório em ordem alfabética: Bessa, Breno, Claiton, Djeisson, Felipe, Filipe, Janaina, Luiz Linares, Guilherme, Marçal, Márcia, Tatiana e Temporão pelo apoio, discussões e incentivo.

A todos os amigos e companheiros do laboratório de instrumentação e em especial a Amália e Luiz Domingos.

Ao professor Anderson Gomes pelo empréstimo do LASER Raman.

Ao pessoal do laboratório de transdutores em especial à Adriana Triques, pela confecção das redes de Bragg utilizadas.

Aos demais professores e funcionários do CETUC pelos ensinamentos e apoio.

Aos demais amigos da PUC-Rio pelo companheirismo nesses anos.

Aos meus pais Haroldo e Rita e irmãos Álvaro e Vagner que sempre me apoiaram e educaram.

À minha esposa pelo amor, carinho e compreensão.

Resumo

Vilela de Faria, Giancarlo. **Estudo da amplificação Raman por reflectometria óptica sintonizável.** Rio de Janeiro, 2005. 63p. Dissertação de Mestrado - Departamento de Engenharia Elétrica, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

Diante do crescimento do interesse pelos amplificadores Raman faz-se necessário um estudo mais detalhado destes. Uma técnica tradicionalmente já utilizada para análise de atenuação em enlaces, a reflectometria óptica no domínio do tempo, é empregada de maneira inovadora neste trabalho para a observação da amplificação Raman distribuída. O objetivo principal deste trabalho não é a análise de amplificadores Raman, mas sim a apresentação desta técnica como nova ferramenta observação do ganho Raman distribuído em fibras ópticas.

Palavras-chave

Reflectometria óptica, amplificação Raman, comunicações ópticas.

Abstract

Vilela de Faria, Giancarlo. **A Raman amplification study using tunable optical reflectometry**. Rio de Janeiro, 2005. 63p. MSc. Dissertation - Departamento de Engenharia Elétrica, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

Due to increased interest in Raman amplifiers, a more detailed study of them is required. A technique traditionally used for analysis of attenuation on optical links, time domain optical reflectometry, is used in an innovative way in this work for observation of distributed Raman amplification. The main objective of this work is not the analysis of Raman amplifiers, but the introduction of this technique as a new tool for the observation of distributed Raman gain in optical fibers.

Keywords

Optical reflectometry, Raman amplification, optical communication.

Sumário

Introdução	11
1 Aspectos Teóricos	14
1.1. A amplificação óptica	14
1.2. O espalhamento Raman estimulado	15
1.3. A amplificação Raman	16
1.4. Espectro do ganho Raman	18
1.5. Limiar Raman	20
1.6. Amplificador Raman	23
1.7. O OTDR e o espalhamento Rayleigh	28
2 Montagem experimental	33
3 Resultados	35
3.1. Testes com o OTDR convencional	35
3.2. Primeiras medidas sintonizáveis	38
3.3. Medidas nas bandas S e C com bombeio co-propagante.	41
3.4. Medidas para enlaces com bombeio remoto	43
3.5. Medidas para bombeio duplo “co e contrapropagante”	48
3.6. Depleção do ganho Raman	50
3.7. Observação e análise do duplo espalhamento Rayleigh	54
4 Conclusões	60
5 Referências Bibliográficas	61
6 Glossário	63

Lista de figuras

Figura 1 – Espectro óptico normalmente estudado na transmissão de dados e os possíveis amplificadores para cada faixa	12
Figura 2 – (a) Processo Raman para uma molécula no estado fundamental e (b) processo Raman para uma molécula no estado vibracional excitado.	15
Figura 3 – Esquema básico de um amplificador Raman.	17
Figura 4 - Espectro de ganho Raman para fibra de sílica fundida com um bombeio localizado em $\lambda_p = 1\mu\text{m}$.	19
Figura 5 - Variação do fator de amplificação em função da potência de bombeio.	24
Figura 6 – Ilustração da reflexão do pulso lançado pelo OTDR em um conector.	29
Figura 7 – Ilustração do retroespalhamento do pulso lançado na fibra.	29
Figura 8 – Esquema de um OTDR comercial	30
Figura 9 – Ilustração de um exemplo de medida feito por OTDR	31
Figura 10 – Montagem experimental do T-OTDR acoplado a um enlace com amplificação Raman com um bombeio co-propagante.	34
Figura 11 – Montagem simplificada do sistema para análise de amplificação Raman distribuída.	35
Figuras 12 – Curvas pelo OTDR comercial para diversas potências de bombeio copropagantes.	36
Figura 13 - Curvas pelo OTDR comercial para diversas potências de bombeio contrapropagantes.	36
Figura 14 – Pulso visto no final da fibra pelo OSA no caso copropagante para as mesmas potências de bombeio.	37
Figura 15 – Comparação entre os ganhos obtidos pelo OTDR e pelo OSA.	37
Figura 16 – Esquema básico do T-OTDR.	38
Figura 17 – Medidas de ganho Raman distribuído para comprimentos de onda na banda S+ e C.	39
Figura 18 – Montagem para análise do ganho on-off com utilizando o OSA	40
Figura 19 – Curvas obtidas pelo OSA para o ganho nos casos de bombeios isolados e juntos.	40
Figura 19 – Curvas obtidas pelo T-OTDR para $\lambda = 1517\text{nm}$ e variação da potência de bombeio	42

Figura 20 – Curvas obtidas pelo T-OTDR para vários λ s e potência de bombeio fixa	42
Fig. 21 – Esquema montado para emulação de enlace de 60Km com aplicação de bombeio local e remoto.	43
Figura 22 – Curvas com e sem bombeio, do enlace a ser estudado, com indicações dos eventos.	44
Figura 23 – Curvas feitas pelo T-OTDR para diversas potências de bombeio local e sinal de prova em 1527nm.	44
Figura 24 – Curvas feitas pelo T-OTDR para diversas potências de bombeio local + remoto e sinal de prova em 1527nm.	45
Figura 25 – Curvas feitas pelo T-OTDR para diversas potências de bombeio local e sinal de prova em 1537nm.	46
Figura 26 – Curvas feitas pelo T-OTDR para diversas potências de bombeio local + remoto e sinal de prova em 1537nm.	46
Figura 27 – Curvas feitas pelo T-OTDR para diversas potências de bombeio local e sinal de prova em 1547nm.	46
Figura 28 – Curvas feitas pelo T-OTDR para diversas potências de bombeio local + remoto e sinal de prova em 1547nm.	47
Figura 29 – Montagem do enlace com bombeios copropagante e contrapropagante.	48
Figura 30 – Curvas obtidas pelo T-OTDR para sistema com bombeios copropagante e contrapropagante. Recorde mundial de distância observada com a técnica.	49
Figura 31 – Comparação da atenuação do WDM vista pelo T-OTDR a do fabricante.	50
Figura 32 – Ganho on-off e ajustes teóricos (linhas) obtidos dos traços do OTDR na banda L.	51
Figura 33 – Atenuação da potência de bombeio dada pelo ajuste do crescimento exponencial do ganho on-off mostra o efeito da depleção.	52
Figura 34 – Depleção do ganho visto pelo OTDR e ajuste do traço inferior pontilhado mostra o ganho real.	53
Figura 35a e 35b – Curvas obtidas a partir da resolução numérica das equações 1.6.2.	53
Figura 36 – Curvas obtidas pelo OTDR com variação de potência do sinal.	54
Figura 37 – Ilustração do sinal e retroespalhamentos dentro da fibra	55
Figura 38 – Curvas do T-OTDR para diversas potências de bombeio mostrando	

os ecos. 55

Figura 39 – Ilustração do sistema apontando a pontos com perdas de retorno com reflexões voltadas para o enlace. 56

Figura 40 – Traço do OTDR mostrando pontos com perda de retorno a serem avaliados. 57

Figura 42 – Curvas da amplificação no enlace obtidas pelo T-OTDR para atenuação do sinal de retorno (e bombeio) no LASER Raman. 58

Figura 43 – Relações entre atenuação entre o ponto máximo do primeiro Rayleigh P0 e do segundo Rayleigh P1. 59