

**ĐẠI HỌC QUỐC GIA HÀ NỘI
TRƯỜNG ĐẠI HỌC CÔNG NGHỆ**

-----o0o-----



Bùi Trung Ninh

**NGHIÊN CỨU ẢNH HƯỞNG CỦA NHIỆU TRONG BỘ KHUẾCH
ĐẠI QUANG VÀ TÁC ĐỘNG CỦA NÓ ĐẾN HIỆU NĂNG CỦA
MẠNG TRUY NHẬP**

**LUẬN ÁN TIẾN SĨ NGÀNH CÔNG NGHỆ KỸ THUẬT
ĐIỆN TỬ, TRUYỀN THÔNG**

Hà Nội - 2016

ĐẠI HỌC QUỐC GIA HÀ NỘI
TRƯỜNG ĐẠI HỌC CÔNG NGHỆ
-----o0o-----



Bùi Trung Ninh

**NGHIÊN CỨU ẢNH HƯỞNG CỦA NHIỆU TRONG BỘ KHUẾCH
ĐẠI QUANG VÀ TÁC ĐỘNG CỦA NÓ ĐẾN HIỆU NĂNG CỦA
MẠNG TRUY NHẬP**

Chuyên ngành: Kỹ thuật viễn thông

Mã số: 62.52.02.08

**LUẬN ÁN TIẾN SĨ NGÀNH CÔNG NGHỆ KỸ THUẬT
ĐIỆN TỬ, TRUYỀN THÔNG**

NGƯỜI HƯỚNG DẪN KHOA HỌC:

- 1. PGS. TS. PHẠM VĂN HỘI**
- 2. PGS. TS. NGUYỄN QUỐC TUẤN**

Hà Nội - 2016

LỜI CẢM ƠN

Luận án được hoàn thành với sự hướng dẫn khoa học của PGS.TS. Phạm Văn Hội và PGS.TS. Nguyễn Quốc Tuấn. Với sự chỉ dẫn và định hướng về mặt khoa học, sự động viên khích lệ tận tình của các thầy đã giúp nghiên cứu sinh hoàn thành tốt công việc nghiên cứu. Nghiên cứu sinh cũng xin cảm ơn GS.TS. Phạm Tuấn Anh trường ĐH AiZu, Nhật Bản đã giúp nghiên cứu sinh có cơ hội trao đổi nghiên cứu và thực tập tại Nhật Bản về lĩnh vực liên quan đến luận án.

Nghiên cứu sinh xin cảm ơn lãnh đạo Khoa ĐTVT, Trường Đại học Công nghệ, ĐHQGHN đã tạo môi trường và điều kiện nghiên cứu tốt, hỗ trợ tài chính giúp nghiên cứu sinh tham dự một số hội nghị quốc tế và thực tập tại nước ngoài. Đồng thời, nghiên cứu sinh cũng xin được cảm ơn các thầy, cô Bộ môn Hệ thống viễn thông, các thầy, cô Khoa Điện tử - Viễn thông và Trường Đại học Công nghệ đã hỗ trợ nghiên cứu sinh trong quá trình nghiên cứu và bảo vệ luận án.

Cuối cùng, tác giả cũng xin cảm ơn gia đình và bạn bè đã luôn cảm thông và động viên tác giả trong quá trình hoàn thành luận án.

LỜI CAM ĐOAN

Tôi xin cam đoan luận án “*Nghiên cứu ảnh hưởng của nhiễu trong bộ khuếch đại quang và tác động của nó đến hiệu năng của mạng truy nhập*” là do tôi thực hiện và không chứa bất kỳ nội dung nào được sao chép từ các công trình đã được người khác công bố. Các tài liệu trích dẫn là trung thực và được chỉ rõ nguồn gốc.

Tôi xin hoàn toàn chịu trách nhiệm về lời cam đoan trên.

Hà Nội, ngày 20 tháng 12 năm 2016

Bùi Trung Ninh

MỤC LỤC

LỜI CẢM ƠN	i
LỜI CAM ĐOAN	ii
MỤC LỤC	iii
DANH MỤC CÁC KÝ HIỆU VÀ CHỮ VIẾT TẮT	vi
DANH MỤC CÁC KÝ HIỆU	viii
DANH MỤC CÁC BẢNG	x
DANH MỤC CÁC HÌNH VẼ, ĐỒ THỊ	xi
MỞ ĐẦU	1
CHƯƠNG 1	5
TỔNG QUAN VỀ MẠNG TRUY NHẬP LR-PON	5
1.1. Tổng quan về mạng truy nhập.....	5
1.1.1. Các giải pháp băng rộng đang tồn tại	5
1.1.2. Sợi quang cho mạng truy nhập	6
1.1.3. Mạng truy nhập thế hệ sau.....	7
1.1.4. PON - lựa chọn thích hợp nhất cho mạng truy nhập	8
1.2. Các công nghệ hỗ trợ PON.....	9
1.2.1. Mạng PON ghép kênh theo thời gian (TDM-PON).....	11
1.2.2. Mạng PON ghép kênh theo bước sóng (WDM PON)	12
1.2.3. Mạng PON ghép kênh phân chia theo mã quang (OCDM-PON).....	13
1.3. Mạng quang thụ động khoảng cách dài (LR-PON).....	18
1.4. Một số kiến trúc LR-PON đã được triển khai	20
1.4.1. LR-PON dựa trên TDM.....	20
1.4.2. LR-PON dựa trên GPON hiện có	22
1.4.3. LR-PON dựa trên WDM-PON	23
1.4.4. LR-PON dựa trên TDM và CWDM	23
1.4.5. LR-PON dựa trên TDM và DWDM.....	24
1.4.6. LR-PON dựa trên CDM và DWDM.....	25
1.5. Các tham số đánh giá hiệu năng của hệ thống mạng LR-PON.....	25

1.6. Các yếu tố ảnh hưởng đến hiệu năng của mạng LR-PON	26
1.7. Nhiều và các kỹ thuật xử lý nhiễu trong mạng LR-PON	28
1.7.1. Nhiều của bộ khuếch đại EDFA trong mạng LR-PON	28
1.7.2. Nhiều của bộ khuếch đại Raman trong mạng LR-PON.....	30
1.8. Các nghiên cứu liên quan đến đề tài luận án	33
1.8.1. Tình hình nghiên cứu trên thế giới	33
1.8.1.1. Các công nghệ tăng khoảng cách truyền dẫn	33
1.8.1.2. Sử dụng hiệu ứng tán xạ Raman để mở rộng băng tần khuếch đại	35
1.8.2. Các công trình nghiên cứu trong nước.....	37
1.9. Vấn đề nghiên cứu của luận án.....	38
CHƯƠNG 2	41
THIẾT KẾ CHẾ TẠO VÀ KHẢO SÁT ĐẶC TÍNH CỦA BỘ KHUẾCH ĐẠI QUANG RAMAN	41
2.1. Nghiên cứu thiết kế phần điện tử của thiết bị FRA.....	41
2.1.1. Yêu cầu của nguồn laser bơm cho khuếch đại quang Raman.....	41
2.1.2. Mô hình của bộ khuếch đại quang Raman.....	42
2.1.3. Thiết kế phần điện tử bơm cho laser bán dẫn	43
2.2. Xây dựng phần mềm điều khiển nguồn laser bơm.....	49
2.3. Chế tạo phần điện tử cho laser bán dẫn.....	50
2.4. Thiết kế bộ nguồn bơm cho hệ RFA cấu trúc kiểu cộng công suất quang.....	51
2.5. Thiết kế phần quang tử cho khuếch đại quang sợi Raman.....	52
2.5.1. Laser bán dẫn công suất cao để bơm cho khuếch đại quang Raman	53
2.5.2. Mô-đun laser bán dẫn 34-0250-DW0-300.....	53
2.5.3. Mô-đun laser bán dẫn SLA5653-QD-71/CV1	54
2.5.4. Cấu hình quang tử thụ động của khuếch đại quang Raman.....	55
2.6. Kết quả khảo sát đặc trưng của mô-đun laser bơm	56
2.7. Kết quả khảo sát phổ phát xạ Raman tự phát sử dụng 3 nguồn laser bơm	59
2.8. Kết quả khảo sát khuếch đại quang bằng hiệu ứng Raman cưỡng bức.....	62
2.9. Kết quả khảo sát khuếch đại quang Raman khi sử dụng sợi đệm	68
2.10. So sánh các thông số của khuếch đại Raman thương mại và chế tạo	68
2.11. Thử nghiệm khuếch đại quang Raman đã chế tạo trên tuyến thực	72

2.12. Kết luận và đề xuất các phương án chế tạo khuếch đại quang Raman phục vụ tuyến thông tin quang WDM băng rộng	77
CHƯƠNG 3	80
NÂNG CAO HIỆU NĂNG MẠNG TRUY NHẬP QUANG ĐA BƯỚC SÓNG SỬ DỤNG KỸ THUẬT OCDMA VÀ EDFA	80
3.1. Xây dựng mô hình mạng LR-PON sử dụng OCDMA và EDFA.....	80
3.2. Mô phỏng hệ thống bằng phần mềm Optisystem.....	89
3.3. Phân tích các kết quả mô phỏng và so sánh kết quả với lý thuyết	91
3.4. Đánh giá hiệu năng hệ thống mạng khi sử dụng bộ thu APD.....	95
3.5. Kết luận chương	100
CHƯƠNG 4	102
NÂNG CAO HIỆU NĂNG MẠNG TRUY NHẬP QUANG ĐA BƯỚC SÓNG SỬ DỤNG KỸ THUẬT DWDM VÀ KHUẾCH ĐẠI RAMAN BƠM BẰNG CÔNG SUẤT THẤP.....	102
4.1. Xây dựng mô hình mạng LR-PON sử dụng DWDM và khuếch đại Raman .	102
4.2. Mô phỏng hệ thống bằng phần mềm Optisystem.....	111
4.2.1. Cài đặt mô phỏng.....	111
4.2.2. Các kết quả mô phỏng	112
4.3. Kết luận chương	117
KẾT LUẬN VÀ ĐỊNH HƯỚNG NGHIÊN CỨU TIẾP THEO	118
DANH MỤC CÁC CÔNG TRÌNH KHOA HỌC CỦA TÁC GIẢ LIÊN QUAN ĐẾN LUẬN ÁN	120
TÀI LIỆU THAM KHẢO.....	122

DANH MỤC CÁC KÝ HIỆU VÀ CHỮ VIẾT TẮT

Ký hiệu	Tiếng Anh	Tiếng Việt
ADC	Analog-to-Digital Converter	Chuyển đổi tương tự sang số
ADSL	Asymmetric Digital Subscriber Line	Đường dây thuê bao số bất đối xứng
APD	Avalanche Photodiode	Photo đi ốt thác lũ
ASE	Amplified Spontaneous Emission	Phát xạ tự phát được khuếch đại
ATM	Asynchronous Transfer Mode	Truyền dẫn không đồng bộ
BER	Bit Error Rate	Tỉ lệ lỗi bit
CATV	Community Antenna Television	Truyền hình cáp
CO	Central Office	Tổng đài trung tâm
CWDM	Coarse Wavelength Division Multiplexing	Ghép kênh theo bước sóng mật độ trung bình
DCF	Dispersion Compensating Fiber	Sợi bù tán sắc
DFB	Distributed Feedback Laser	Laser hồi tiếp phân bố
DRA	Distribution Raman Amplifier	Khuếch đại Raman phân bố
DSL	Digital Subscriber Line	Đường dây thuê bao số
DSLAM	Digital Subscriber Line Access Multiplexing	Bộ tập trung đường dây thuê bao số
DWDM	Dense Wavelength Division Multiplexing	Ghép kênh theo bước sóng mật độ cao
EDFA	Erbium Doped Fiber Amplifier	Khuếch đại sợi pha tạp Erbium
EEPROM	Electrically Erasable Programmable Read-Only Memory	Bộ nhớ chỉ đọc có khả năng lập trình được
FBG	Fiber Bragg Grating	Cách tử sợi Bragg
RFA	Raman Fiber Amplifier	Khuếch đại sợi Raman
FTTx	Fiber To The x	Sợi quang tới x
FWM	Four Wave Mixing	Trộn bốn bước sóng
HDSL	High Digital Subscriber Line	Đường dây thuê bao số tốc độ cao
IEEE	Institute of Electrical and Electronics Engineers	Viện kỹ nghệ điện và điện tử
IM-DD	Intensity Modulation-Direct Detection	Điều chế cường độ, tách sóng trực tiếp
ISDN	Integrated Service Digital Network	Mạng số tích hợp dịch vụ
ITU-T	International Telecommunication Union - Telecommunication Standardization	Tiêu chuẩn viễn thông, Tổ chức viễn thông quốc tế
LCD	Liquid crystal display	Màn hình tinh thể lỏng

LR-PON	Long-Reach PON	Mạng PON khoảng cách dài
MAI	Multi-access Interference	Nhiều đa truy nhập
MPCP	Multipoint Control Protocol	Giao thức điều khiển đa điểm
MQC	Modified Quadratic Congruence	Mã trọng số kép được sửa đổi
MQW	Multi-Quantum Well	Giếng lượng tử đa lớp
NF	Noise Figure	Hệ số tạp âm
NRZ	Non-return-to-Zero	Tín hiệu không quay về không
OCDM	Optical Code Division Multiplexing	Ghép kênh theo mã quang
ODN	Optical Distribution Network	Mạng phân phối quang
OLT	Optical Line Terminal	Kết cuối đường dây quang
ONT	Optical Network Terminal	Thiết bị mạng quang
OOK	On-Off Keying	Khóa bật tắt
ORU	Optical Repeat Unit	Bộ lặp quang
OSA	Optical Spectrum Analyzer	Phân tích phổ quang
OSC	Optical Supervisory Channel	Kênh giám sát quang
OSNR	Optical Signal Noise Rate	Tỉ số tín hiệu trên nhiễu quang
P2MP	Point-to-Multipoint	Điểm - đa điểm
P2P	Point-to-Point	Điểm-điểm
PD	Photodiode	Phô tô đi ốt
PMD	Polarization Mode Dispersion	Tán sắc phân cực một
PON	Passive Optical Network	Mạng quang thụ động
PRBS	Pseudorandom Binary Sequence	Bộ tạo chuỗi bit giả ngẫu nhiên
RF	Radio Frequency	Tần số vô tuyến
RISC	Reduced Instructions Set Computer	Máy tính với tập lệnh đơn giản
SAC	Spectral Amplitude Coding	Mã hóa biên độ phổ
SNR	Signal Noise Rate	Tỉ số tín hiệu trên nhiễu
SPI	Serial Peripheral Interface	Giao diện ngoại vi nối tiếp
SOA	Semiconductor Optical Amplifier	Khuếch đại quang bán dẫn
SPC	Spectral Phase Coding	Mã hóa pha phổ
SPM	Self-phase modulation	Tự điều chế pha
SRS	Stimulated Raman Scattering	Tán xạ Raman kích thích
TDM	Time Division Multiplexing	Ghép kênh theo thời gian
USART	Universal Asynchronous Receiver – Transmitter	Truyền thông nối tiếp không đồng bộ
USB	Universal Serial Bus	Chuẩn kết nối tuần tự đa dụng
VDSL	Very high Subscriber Line	Đường dây thuê bao số tốc độ rất cao
VoD	Video on Demand	Video theo yêu cầu
WDM	Wavelength Division Multiplexing	Ghép kênh theo bước sóng
XPM	Cross-phase Modulation	Điều chế pha chéo

DANH MỤC CÁC KÝ HIỆU

λ	Bước sóng
α	Hệ số suy hao (dB/km)
L	Tổng khoảng cách truyền dẫn
L_1	Khoảng cách từ OLT đến bộ khuếch đại EDFA
L_2	Khoảng cách từ EDFA đến bộ chia
N_c	Độ dài của mã
w	Là trọng số của mã
μ	Hệ số tương quan chéo
p	Số nguyên tố
G	Hệ số khuếch đại theo decibel
$\Delta\lambda$	Băng tần khuếch đại
n_1	Mật độ phân bố của Erbium ở trạng thái nền
n_2	Mật độ phân bố của Erbium ở trạng thái giả bền
n_3	Mật độ phân bố của Erbium ở trạng thái bơm
P_p	Công suất bơm
P_s	Công suất tín hiệu
P_{ASE}	Công suất nhiễu phát xạ tự phát
Γ	Hệ số giam quang
f_s	Tần số tín hiệu cần khuếch đại
f_p	Tần số bơm
σ_{12}, σ_{21}	Thiết diện hấp thụ và phát xạ đối với sợi Erbium
S_{ASE}	Mật độ phổ công suất nhiễu phát xạ tự phát
B_{opt}	Băng thông quang
n_{sp}	Hệ số đảo lộn mật độ
E_s	Trường tín hiệu
E_n	Trường nhiễu
P_{in}	Công suất quang tại lõi vào Photodiode
$P_{s,in}$	Công suất tín hiệu quang vào bộ khuếch đại
σ_{shot}^2	Phương sai nhiễu lượng tử

σ_{shot-S}^2	Phương sai nhiễu lượng tử do tín hiệu
$\sigma_{shot-ASE}^2$	Phương sai nhiễu lượng tử do ASE
σ_{beat}^2	Phương sai nhiễu trộn
q	Điện tích của điện tử
\mathfrak{R}	Đáp ứng của bộ thu
B_e	Băng thông điện
Δf_{opt}	Băng thông quang của bộ lọc đặt trước photodiode
σ_{s-ASE}^2	Phương sai nhiễu trộn giữa tín hiệu và ASE
η	Hiệu suất lượng tử
$\sigma_{ASE-ASE}^2$	Phương sai nhiễu giữa ASE và ASE
σ_{total}^2	Phương sai dòng nhiễu tổng cộng
σ_T^2	Phương sai nhiễu nhiệt
k_B	Hằng số Boltzmann
R_L	Giá trị điện trở tải
T	Nhiệt độ
σ_{ph}^2	Phương sai của dòng quang điện
K	Số lượng người dùng
N_w	Số bước sóng trong bộ mã hóa phổ
C_m, C_n	Kí hiệu các từ mã
P_{tx}	Công suất quang tại lối ra bộ phát
R_b	Tốc độ bit
Q	Hệ số phẩm chất
M	Hệ số khuếch đại dòng của APD
P_k	Công suất bơm của laser k
$P_{ASE,k}$	Công suất ASE dọc theo hướng lan truyền $\pm z$
k_p	Phân cực của ánh sáng tín hiệu
$\eta(T)$	Hệ số giam giữ phonon
g_R	Độ lợi Raman hiệu dụng
f_R	Tỉ số công suất tán xạ ngược bị giữ lại bởi một sóng
P_n	Công suất nhiễu
A_{eff}	Diện tích vùng hiệu dụng của sợi quang
γ	Hệ số tán xạ Rayleigh

DANH MỤC CÁC BẢNG

Bảng 2.1: Công suất phát xạ laser phụ thuộc vào dòng bơm.....	57
Bảng 2.2: Các tham số sợi SMF-28 và DCF	59
Bảng 2.3: Công suất phát xạ sóng Stokes phụ thuộc công suất bơm.....	60
Bảng 2.4: Hệ số khuếch đại G và thông số nhiễu phụ thuộc vào công suất bơm.....	64
Bảng 3.1: Các tham số được sử dụng trong mô phỏng.....	91
Bảng 4.1: Các tham số mô phỏng	113

DANH MỤC CÁC HÌNH VẼ, ĐỒ THỊ

Hình 1.1: Các kiểu kết nối sợi quang tới khách hàng	7
Hình 1.2: Kiến trúc mạng TDM-PON	11
Hình 1.3: Kiến trúc điển hình của mạng WDM-PON	12
Hình 1.4: Kiến trúc điển hình của mạng OCDMA-PON.....	14
Hình 1.5: Mã hóa miền thời gian	14
Hình 1.6: Mã hóa biên độ phổ (SAC).....	15
Hình 1.7: Nguyên lý hoạt động của bộ mã hóa và giải mã FBG	15
Hình 1.8 : Hệ thống OCDMA mã hóa phổ pha và biến đổi Fourier quang.....	16
Hình 1.9: Nguyên lý mã hóa biên độ phổ trong hệ thống OCDMA.....	18
Hình 1.10: Cấu trúc mạng LR-PON làm đơn giản mạng viễn thông	19
Hình 1.11: Kiến trúc mạng LR-PON	19
Hình 1.12: Kiến trúc SuperPON [52]	21
Hình 1.13: Kiến trúc mạng LR-PON ở Anh.....	21
Hình 1.14: Kiến trúc mở rộng của GPON [43].....	22
Hình 1.15: Kiến trúc LR-PON dựa trên TDM và CWDM.....	24
Hình 1.16: Kiến trúc LR-PON dựa trên TDM và DWDM.....	25
Hình 2.1: Cấu hình bơm thuận cho khuếch đại quang Raman phân bố.....	42
Hình 2.2: Cấu hình bơm ngược hướng cho khuếch đại quang Raman phân bố	43
Hình 2.3: Sơ đồ chân ra của mô-đun laser bơm DW0-300.....	45
Hình 2.4: Sơ đồ nguyên lý nguồn điều khiển cho mô-đun laser bơm	47
Hình 2.5: Sơ đồ nguyên lý hệ kết nối các mô-đun bơm với máy vi tính.....	48
Hình 2.6: Chương trình trong vi điều khiển được viết trên ngôn ngữ C ⁺⁺	49
Hình 2.7: Sơ đồ hiển thị các thông số thu nhận từ hoạt động của mô-đun laser	50
Hình 2.8: Mạch điện cấp dòng nuôi ổn định cho các mô-đun laser bơm	50
Hình 2.9: Mạch ổn định dòng bơm cho laser diode.....	51

Hình 2.10: Mặt ngoài bộ nguồn bơm kết hợp nhiều modul laser	51
Hình 2.11: Sơ đồ chân của laser bán dẫn SLA phát xạ công suất cao.....	54
Hình 2.12: Sơ đồ phân quang tử của hệ khuếch đại Raman	55
Hình 2.13: Cấu trúc phân quang tử thụ động của thiết bị khuếch đại Raman	56
Hình 2.14: Cấu hình RFA hoàn chỉnh được ghép từ phần quang tử và phần điện tử.....	56
Hình 2.15: Sơ đồ khảo sát đặc trưng của mô-đun laser bơm.....	56
Hình 2.16: Đặc trưng I-P của laser 34-0250-DW0-300 tại bước sóng 1470,1 nm.....	58
Hình 2.17: Cường độ phát xạ sóng Stokes theo công suất bơm khi L là 90 km.....	60
Hình 2.18: Phổ phát xạ Raman tự phát (sóng Stokes) trong vùng 1550 nm dịch 90 nm về vùng sóng dài so với bước sóng laser bơm 1470-1471 nm	61
Hình 2.19: Phổ của tín hiệu quang phát xạ từ laser bán dẫn DFB	62
Hình 2.20: Phổ ASE của sóng Stokes có đỉnh cực đại tại $\lambda = 1561\text{nm}$ và độ rộng phổ $\Delta\lambda = 34\text{nm}$ tại vị trí -3dB so với đỉnh.....	63
Hình 2.21: Hệ số khuếch đại G phụ thuộc công suất quang bơm.....	65
Hình 2.22: Thông số nhiễu NF phụ thuộc công suất bơm.....	66
Hình 2.23: Phổ tín hiệu chưa khuếch đại (1) và tín hiệu đã được khuếch đại (2)	66
Hình 2.24: Phổ ASE và phổ tín hiệu quang đã khuếch đại của EDFA (hình trên) và của khuếch đại quang Raman đã chế tạo (hình dưới)	67
Hình 2.25: Mặt trước của bộ khuếch đại Raman RMPM1300	68
Hình 2.26: Phổ quang các loại có trong tuyến thông tin quang thực tế.....	69
Hình 2.27: Phổ ASE và phổ tín hiệu quang đã khuếch đại của khuếch đại quang Raman thương mại đang sử dụng trên tuyến thực tế.....	70
Hình 2.28: Phổ tín hiệu quang đã khuếch đại của khuếch đại quang Raman qua bộ lọc vào bộ monitor để kiểm soát chất lượng tín hiệu	71
Hình 2.29: Sơ đồ hệ thống thiết bị khảo sát khuếch đại quang Raman trên tuyến thông tin quang WDM thực tế	72
Hình 2.30: Kết quả đo hệ số khuếch đại quang Raman trên tuyến TTQ thực tế.....	74

Hình 2.31: Phổ tín hiệu quang trong tuyến WDM đã được khuếch đại (đường trên) và chưa được khuếch đại (đường dưới) bằng hiệu ứng tán xạ Raman cường bức dọc sợi quang đơn một dài 90 km	75
Hình 2.32: Phổ tín hiệu khuếch đại bằng khuếch đại Raman thương mại (đường màu đen) và do luận án chế tạo (đường màu đỏ).....	75
Hình 2.33: Tỉ số OSNR phụ thuộc công suất bơm trong trường hợp bơm ngược.....	77
Hình 3.1: Sơ đồ khối hệ thống mạng LR-PON dựa trên SAC/OCDM.....	84
Hình 3.2: Công suất nhiễu phụ thuộc vào công suất phát với $K = 3$, $R_b = 1$ Gb/s, $G = 20$ dB	89
Hình 3.3: Sơ đồ mô phỏng hệ thống mạng LR-PON dựa trên SAC/OCDMA.....	90
Hình 3.4: BER phụ thuộc vào công suất phát với $L_1 = 30$ km	92
Hình 3.5: BER phụ thuộc vào công suất phát với $L_1 = 60$ km	92
Hình 3.6: BER phụ thuộc vào vị trí của bộ khuếch đại (L_1) với $P_{tx} = -4$ dBm	93
Hình 3.7: BER phụ thuộc vào vị trí của bộ khuếch đại (L_1) với $P_{tx} = -2$ dBm	93
Hình 3.8: BER theo số lượng user (K) với hai giá trị khác nhau của L_1	94
Hình 3.9: G theo khoảng cách của tuyến với $K = 3$ users, $BER = 10^{-9}$	95
Hình 3.10: BER theo hệ số khuếch đại dòng M của APD.....	96
Hình 3.11: BER phụ thuộc vào công suất phát với $L_1 = 30$ km cho PIN và APD	97
Hình 3.12: BER phụ thuộc vào công suất phát với $L_1 = 60$ km cho PIN và APD	97
Hình 3.13: BER phụ thuộc vào vị trí của bộ khuếch đại (L_1) với $P_{tx} = -2$ dBm khi sử dụng bộ thu PIN và APD	98
Hình 3.14: BER theo số lượng user (K) với $L_1 = 30$ km khi sử dụng PIN và APD	99
Hình 3.15: BER theo số lượng user (K) với $L_1 = 60$ km khi sử dụng PIN và APD	99
Hình 4.1: Sơ đồ khối của hệ thống DWDM sử dụng khuếch đại Raman phân bố.....	112
Hình 4.2: Công suất tín hiệu và công suất bơm như một hàm của chiều dài khuếch đại khi $P_s(0) = -10$ dBm, $P_p = 880$ mW	113
Hình 4.3: Công suất nhiễu như một hàm của chiều dài khuếch đại khi $P_s(0) = -10$ dBm, $P_p = 880$ mW	114

Hình 4.4: Nhiễu NF như một hàm của chiều dài khuếch đại DRA khi $P_s(0) = -10dBm, P_p = 880mW$	114
Hình 4.5: BER theo công suất phát với $R_b = 10Gbps, D = 16 ps/nm.km, L = 90 km$	115
Hình 4.6: BER theo công suất phát với $D = (14, 15, 16) ps/nm.km, L = 90 km$, bơm thuận	116
Hình 4.7: BER theo công suất phát với $D = (14, 15, 16) ps/nm.km, L = 90 km$, bơm ngược	116

MỞ ĐẦU

Tính cấp thiết của luận án

Hiện nay ở Việt Nam mạng thông tin quang đã phát triển rất mạnh cả về độ dài toàn tuyến truyền dẫn lẫn dung lượng thông tin truyền trong cáp quang. Sự tiên bộ này do các công nghệ ghép kênh phân chia theo thời gian (TDM), ghép kênh phân chia theo bước sóng (WDM) và ghép kênh phân chia theo mã quang (OCDM) đã được triển khai tốt ở tất cả các tuyến đường trục, mạng Metro và thậm chí cả mạng truy nhập trong thời gian từ năm 2006 đến nay. Để triển khai có hiệu quả các mạng đa bước sóng ở bất kỳ cấp độ nào thì khuếch đại quang sợi đóng vai trò rất quan trọng do chúng có khả năng khuếch đại trực tiếp tín hiệu quang mà không cần quá trình biến đổi quang điện.

Khuếch đại quang sợi pha tạp Erbium (EDFA) đã được nghiên cứu và phát triển tại Việt Nam từ cuối những năm 90 của thế kỷ XX và hiện nay đã có được công nghệ chế tạo với các thông số đạt yêu cầu sử dụng trên tuyến truyền dẫn quang. Tuy nhiên, EDFA chỉ có thể khuếch đại tín hiệu quang hiệu quả trong dải bước sóng 1530-1565 nm (độ rộng băng tần khoảng 35 nm), trong khi nhu cầu về số lượng bước sóng cần ghép trong sợi quang ngày càng cao để tăng dung lượng thông tin trong toàn tuyến cáp. Ngoài ra, khuếch đại EDFA mới chỉ được triển khai trên mạng đường trục và mạng Metro sử dụng công nghệ WDM, chưa được triển khai trên các mạng truy nhập, đặc biệt là mạng quang thụ động (PON) sử dụng kỹ thuật ghép kênh phân chia theo mã quang (OCDMA).

Vì sự giới hạn về băng tần khuếch đại của EDFA, từ năm 2000 đã có các nghiên cứu về mặt công nghệ sử dụng hiệu ứng tán xạ Raman cưỡng bức để khuếch đại tín hiệu quang trong các vùng nằm ngoài vùng phổ 1530-1565 nm. Hiện nay khuếch đại quang Raman (Fiber Raman Amplifier – FRA) đã trở thành sản phẩm thương mại trên thị trường, tuy nhiên còn rất nhiều vấn đề về khoa học và công nghệ của khuếch đại quang sử dụng hiệu ứng tán xạ Raman cưỡng bức cần được nghiên cứu chuyên sâu nhằm giải quyết các vấn đề về mở rộng băng tần khuếch đại,

phẳng phổ khuếch đại, nâng cao hệ số khuếch đại của FRA và ảnh hưởng của phân cực của chùm bơm và tín hiệu lên tín hiệu khuếch đại của FRA, hoặc việc nghiên cứu chế tạo và sử dụng các bộ khuếch đại FRA với công suất bơm thấp ($<1\text{W}$) trên hệ thống mạng LR-PON sử dụng kỹ thuật DWDM, cũng như việc đánh giá ảnh hưởng của nhiễu phát xạ tự phát được khuếch đại (ASE) và tán sắc màu đến hiệu năng của hệ thống mạng là một vấn đề đáng để quan tâm.

Vì vậy luận án mong muốn đánh giá ảnh hưởng của nhiễu đến hiệu năng của hệ thống mạng truy nhập sử dụng kỹ thuật OCDMA, DWDM với các bộ khuếch đại EDFA và Raman bơm bằng công suất thấp. Các kết quả tính toán và mô phỏng sẽ là công cụ hỗ trợ tốt cho việc nghiên cứu triển khai hệ thống mạng truy nhập LR-PON trên thực tế tại Việt Nam.

Mục tiêu nghiên cứu

Mục tiêu chính của luận án là nghiên cứu và tìm kiếm giải pháp cải thiện hiệu năng của hệ thống mạng LR-PON đa bước sóng sử dụng công nghệ OCDMA và DWDM dưới tác động của nhiễu ASE, NF, chiều bơm (do việc sử dụng các bộ khuếch đại quang EDFA và DRFA) và ảnh hưởng của tán sắc màu. Bên cạnh đó, luận án cũng mong muốn chế tạo một bộ khuếch đại quang Raman được bơm bằng công suất thấp ($< 1\text{W}$) sử dụng trong mạng truy nhập quang đa bước sóng.

Đối tượng nghiên cứu

Mạng truy nhập quang đa bước sóng sử dụng công nghệ DWDM kết hợp với bộ khuếch đại quang Raman phân bố bơm bằng công suất thấp và;

Mạng truy nhập quang đa bước sóng sử dụng công nghệ OCDMA kết hợp với bộ khuếch đại quang EDFA.

Phạm vi nghiên cứu

- Phạm vi nghiên cứu được giới hạn đó là mạng truy nhập quang đa bước sóng sử dụng kỹ thuật OCDMA và DWDM.
- Tham số hiệu năng của hệ thống được đánh giá và khảo sát trong luận án là tỉ lệ lỗi bit (BER) và tỉ số SNR.

Phương pháp nghiên cứu

Phương pháp nghiên cứu được sử dụng trong luận án là kết hợp giữa tính toán, mô phỏng lý thuyết và thực nghiệm công nghệ. Để đạt được các mục tiêu đề ra, các bước nghiên cứu sẽ được tiến hành cụ thể như sau:

- Vận dụng các kiến thức về toán học, vật lý và quang học quang phổ để tính toán cho hệ thống truyền dẫn quang và khuếch đại quang.
- Sử dụng các phần mềm mô phỏng chuyên dụng như Optisystem để thiết kế các hệ thống mạng quang LR-PON.
- Thiết kế chế tạo các bộ khuếch đại quang Raman được bơm bằng công suất thấp bằng kỹ thuật điện tử và quang tử.
- Đo đạc, đánh giá đặc tính của sản phẩm được chế tạo, thử nghiệm trên tuyến truyền dẫn thực tế, so sánh với các sản phẩm thương mại.

Ý nghĩa của luận án

Luận án đánh giá ảnh hưởng của nhiễu phát xạ tự phát được khuếch đại (ASE) trong các bộ khuếch đại, NF và tán sắc màu đến hiệu năng của các hệ thống mạng LR-PON, từ đó chỉ ra vị trí thích hợp để đặt các bộ khuếch đại và cấu hình bơm thích hợp trên mạng.

Nghiên cứu một cách có hệ thống về bộ khuếch đại quang Raman, qua đó đề xuất phương án chế tạo bộ khuếch đại quang Raman bơm bằng công suất thấp, giá thành hạ và sử dụng nó có hiệu quả trong các mạng truy nhập quang đa bước sóng tại Việt Nam.

Cấu trúc của luận án

Chương 1: Tổng quan về mạng truy nhập LR-PON bao gồm: giới thiệu về mạng quang thụ động (PON), mạng LR-PON, các công nghệ ghép kênh được sử dụng trong mạng; các kiến trúc LR-PON đã được triển khai, các yếu tố ảnh hưởng đến hiệu năng của mạng LR-PON, khảo sát các nghiên cứu có liên quan để tìm ra các hạn chế và đề xuất hướng nghiên cứu.

Chương 2: Thiết kế chế tạo và khảo sát đặc tính của bộ khuếch đại quang Raman bao gồm: thiết kế phần điện tử của bộ khuếch đại, thiết kế xây dựng phần mềm điều khiển nguồn bơm laser và thiết kế phần quang tử cho khuếch đại quang Raman. Khảo sát các đặc tính của bộ khuếch đại quang đã chế tạo như: khảo sát phổ phát xạ Raman tự phát, khuếch đại quang bằng hiệu ứng Raman cưỡng bức. Thử nghiệm bộ khuếch đại Raman đã chế tạo trên hệ thống mạng WDM trong thực tế, so sánh công suất nhiễu và tỉ số tín hiệu trên tạp âm quang (OSNR) giữa mô phỏng và kết quả thực nghiệm trên tuyến thực. Đề xuất các phương án chế tạo khuếch đại quang Raman phục vụ tuyến thông tin quang băng rộng.

Chương 3: Đánh giá ảnh hưởng của nhiễu do bộ khuếch đại EDFA gây ra đến hiệu năng của mạng truy nhập quang đa bước sóng LR-PON sử dụng kỹ thuật OCDMA bao gồm: đề xuất kiến trúc mạng, đánh giá ảnh hưởng của nhiễu phát xạ tự phát đến hiệu năng của mạng, tìm ra vị trí thích hợp để đặt bộ khuếch đại trên tuyến.

Chương 4: Khảo sát ảnh hưởng của nhiễu do bộ khuếch đại Raman gây ra đến hiệu năng của mạng truy nhập quang đa bước sóng sử dụng kỹ thuật DWDM và nguồn bơm công suất thấp (<1W) bao gồm: xây dựng mô hình mạng, đánh giá ảnh hưởng của nhiễu ASE, hệ số tạp âm và tán sắc màu trong các cấu hình bơm khác nhau.

Kết luận: Tóm tắt các kết quả nghiên cứu chính của luận án cùng với những thảo luận xung quanh đóng góp mới cả về ưu điểm và nhược điểm từ đó đưa ra những vấn đề cần tiếp tục nghiên cứu.

CHƯƠNG 1

TỔNG QUAN VỀ MẠNG TRUY NHẬP LR-PON

1.1. Tổng quan về mạng truy nhập

Như chúng ta đã biết, những tiến bộ về mặt công nghệ trong mạng đường trục, mạng doanh nghiệp và mạng gia đình cùng với sự bùng nổ của lưu lượng truy cập Internet đã làm chậm đáng kể dung lượng của mạng truy nhập. Tại phần cuối của mạng viễn thông hiện nay vẫn còn tồn tại “điểm tắc nghẽn” giữa mạng LAN dung lượng cao và mạng đường trục.

1.1.1. Các giải pháp băng rộng đang tồn tại

Trước đây hầu hết các giải pháp băng rộng được triển khai rộng rãi là mạng đường dây thuê bao số (DSL) và dịch vụ truyền hình cáp (CATV). Mặc dù chúng đã được cải tiến so với đường kết nối quay số 56 kb/s nhưng chúng cũng không thể cung cấp đủ băng thông cho các dịch vụ mới như video theo yêu cầu (VoD), trò chơi tương tác trực tuyến, hoặc hội nghị truyền hình hai chiều... [1].

a) Đường dây thuê bao số (DSL)

DSL sử dụng chính cặp dây đồng xoắn như đường dây điện thoại tương tự và yêu cầu một modem tại phía thuê bao và một bộ tập trung đường dây thuê bao số (DSLAM) phía tổng đài trung tâm (CO). Tiền đề của công nghệ DSL là chia phổ tần của đường dây cáp đồng thành các kênh con có độ rộng khoảng 4 kHz, trong đó vùng tần số thấp hơn 4 kHz được sử dụng để truyền thoại, còn các tần số cao hơn được cấp phát cho các dịch vụ truyền thông số tốc độ cao hơn. Có bốn kiểu kết nối cơ bản của DSL:

- Mạng số tích hợp đa dịch vụ (ISDN): ISDN tốc độ cơ bản gồm 2 kênh B và 1 kênh D (tốc độ tổng cộng 144 kb/s), cung cấp các dịch vụ về dữ liệu, hình ảnh, thoại...
- Đường dây thuê bao số tốc độ cao (HDSL): Được thiết kế phù hợp với chuẩn T1=1,544 Mb/s và E1=2,048 Mb/s sử dụng một, hai hoặc ba đôi dây để truyền dẫn hai chiều.

- Đường dây thuê bao số bất đối xứng (ADSL): Là đường dây thuê bao được triển khai phổ biến nhất, nó sử dụng đường dây điện thoại để truyền dẫn và có tốc độ bất đối xứng. Trong hướng xuống, ADSL có thể hỗ trợ tốc độ lên tới 8 Mb/s, còn trong hướng lên, tốc độ có thể đạt tới 1,5Mb/s tùy thuộc vào độ dài và trạng thái truyền dẫn, đã trở nên thông dụng trong những thập niên 1990.
- Đường dây thuê bao số tốc độ rất cao (VDSL): Có thể có tốc độ đối xứng hoặc không đối xứng, nó đạt được tốc độ cao hơn nhiều HDSL hoặc ADSL nhưng hoạt động với khoảng cách ngắn hơn nhiều. Tốc độ có thể nằm trong khoảng từ 13 Mb/s đến 52 Mb/s nhưng không được triển khai thương mại vì sự cạnh tranh khốc liệt của mạng di động thế hệ 3, 4G.

b) Các mạng truyền hình cáp (CATV)

Một cách khác để truy nhập băng rộng là thông qua mạng truyền hình cáp (CATV). Các mạng CATV cung cấp dịch vụ Internet bằng cách dành riêng một số kênh tần số vô tuyến (RF) trong cáp để truyền dữ liệu. Tuy nhiên, các mạng CATV được thiết kế chủ yếu để cấp phát các dịch vụ quảng bá, vì vậy chúng không phù hợp cho các ứng dụng của mạng truy nhập. Nếu tải dữ liệu lớn, hiệu năng của mạng thường thấp và không thể thỏa mãn nhu cầu của người dùng.

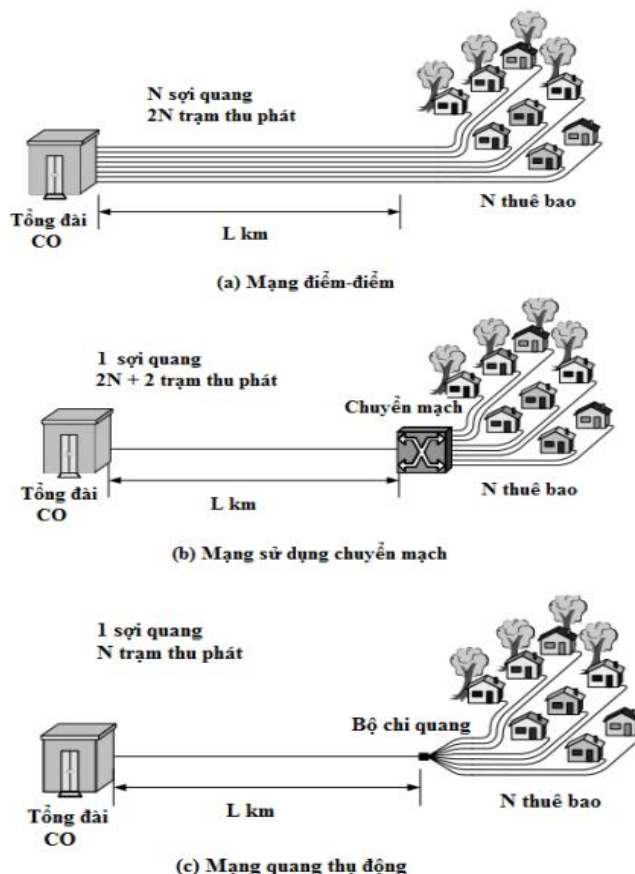
1.1.2. Sợi quang cho mạng truy nhập

Các giải pháp băng rộng đã nêu trên không cho phép cung cấp đủ băng thông cho các dịch vụ mới như VoD, trò chơi tương tác trực tuyến, hoặc hội nghị truyền hình hai chiều... Để giảm bớt “tắc nghẽn” về băng thông, sợi quang và các nút quang được đưa tới gần hơn phía người dùng trong cả mạng DSL và CATV. Trong các mạng truy nhập dựa trên DSL, rất nhiều bộ DSLAM ở xa được kết nối với CO bằng các đường cáp quang. Trong mạng truyền hình cáp, các nút quang được lắp đặt gần phía các thuê bao.

Kế hoạch phát triển hiện tại của mạng truy nhập là mang sợi quang tới các văn phòng, tòa nhà, hoặc thậm chí là từng hộ dân cư. Không giống như các kiến trúc đã

nêu ở trên, tại đó sợi quang chỉ được sử dụng như một đường truyền phân phối để thu hẹp độ dài của các mạng cáp đồng và cáp đồng trục. Các kiến trúc mạng quang hiện nay có thể hỗ trợ các dịch vụ tốc độ lên đến gigabit với mức giá tương đương như các mạng DSL và CATV hiện có.

1.1.3. Mạng truy nhập thế hệ sau



Hình 1.1: Các kiểu kết nối sợi quang tới khách hàng

Sợi quang có khả năng truyền tải các dịch vụ băng thông lớn, thoại tích hợp, dữ liệu và hình ảnh với khoảng cách xa hơn 20 km trong mạng truy nhập. Cách đơn giản để triển khai sợi quang trong mạng truy nhập cục bộ đó là sử dụng công nghệ điểm-điểm (P2P), trong đó sợi quang kết nối từ tổng đài CO tới mỗi đầu cuối thuê bao (hình 1.1a). Trong cấu hình này, nếu có N thuê bao tại khoảng cách L km so với CO thì yêu cầu $2N$ trạm thu phát và chiều dài sợi quang tổng cộng là $N \times L$ (giả sử một sợi quang được sử dụng để truyền dẫn hai chiều).

Để giảm số lượng sợi quang, người ta sử dụng một nút chuyển mạch (bộ tập trung) gần phía khách hàng. Khi đó chiều dài sợi quang tổng cộng chỉ còn L km (giả sử khoảng cách giữa nút chuyển mạch và các thuê bao là không đáng kể), nhưng thực tế cấu hình này lại làm tăng số lượng trạm thu phát lên thành $2N + 2$, bởi vì có thêm một tuyến được bổ sung tới mạng (Hình 1.1b). Ngoài ra, kiến trúc mạng sử dụng chuyển mạch yêu cầu phải có nguồn điện và nguồn nuôi dự phòng tại nút chuyển mạch. Vì vậy, sẽ là hợp lý nếu thay thế nút chuyển mạch tiêu thụ điện năng bằng một bộ chia quang thụ động rẻ tiền. Mạng quang thụ động (PON) là một công nghệ thích hợp cho mạng truy nhập bởi vì nó tiết kiệm được số lượng trạm thu phát, các kết cuối tại CO và chiều dài sợi quang [2] [3].

PON là một mạng quang điểm-đa điểm (P2MP) không sử dụng các phần tử tích cực trên đường truyền dẫn tín hiệu từ nguồn tới đích. Các phần tử được sử dụng trong PON chỉ là các thành phần quang thụ động như: sợi quang, bộ ghép và các bộ chia quang. Một mạng truy nhập dựa trên mạng PON sử dụng sợi quang đơn chỉ yêu cầu N trạm thu phát và L km sợi quang (không tính độ dài sợi quang từ bộ chia tới các thuê bao) (hình 1.1c).

1.1.4. PON - lựa chọn thích hợp nhất cho mạng truy nhập

Công nghệ PON ngày càng được chú ý bởi ngành công nghiệp viễn thông và được xem như giải pháp hữu ích cho mạng truy nhập. Các ưu điểm của mạng PON phải kể đến gồm:

- PON cho phép kéo dài khoảng cách giữa tổng đài CO và thuê bao. Một mạch vòng nội hạt dựa trên PON có thể hoạt động tại khoảng cách lên tới 20km, lớn hơn nhiều khoảng cách tối đa được hỗ trợ bởi DSL.
- PON giảm tối thiểu việc triển khai sợi cả ở tổng đài nội hạt và phía thuê bao. Chỉ cần duy nhất một sợi quang trên đường trung kế, và chỉ một cổng PON được yêu cầu tại tổng đài CO.
- PON cung cấp băng thông cao hơn do sự thâm nhập sâu hơn của sợi quang. Các giải pháp sợi quang tới các tòa nhà (FTTB), sợi quang tới nhà riêng

(FTTH), hoặc thậm chí sợi quang tới tận máy tính (FTTPC) có mục đích chủ yếu là đưa sợi quang theo tất cả các cách đến gần với thiết bị của khách hàng hơn.

- Là một mạng điểm-đa điểm, PON cho phép quảng bá các kênh phát thanh truyền hình. Nhiều kênh chòng chất về bước sóng có thể được bổ sung cho PON mà không cần bất kỳ sự thay đổi nào ở các thiết bị đầu cuối điện.
- PON giúp loại bỏ việc lắp đặt các bộ hợp kênh và phân kênh tại các vị trí của bộ chia, vì vậy giảm đáng kể các công việc liên quan đến bảo trì và cấp nguồn cho nhà mạng. Thay vì sử dụng các thiết bị tích cực, PON có các thành phần thụ động và có thể chôn dưới đất ngay tại thời điểm triển khai mạng.
- PON cho phép dễ dàng nâng cấp lên tốc độ bit cao hơn hoặc bổ sung thêm các bước sóng. Các bộ chia và kết hợp công suất cung cấp các đường truyền dẫn quang hoàn toàn thông suốt.

1.2. Các công nghệ hỗ trợ PON

Trong các mạng PON được triển khai hiện tại, người ta đã lựa chọn kỹ thuật ghép kênh phân chia theo thời gian (TDM) cho mạng PON, kỹ thuật này đạt được hiệu quả về giá do việc chia sẻ giữa nhiều người sử dụng. Các hoạt động chuẩn hóa của TDM-PON 10 Gb/s (10G-PON) đã được hoàn thiện để thỏa mãn nhu cầu ngày càng tăng cho mạng truy nhập quang lớp tốc độ 10 Gb/s [4]. Tuy nhiên, hệ thống TDM-PON sẽ khó khăn để cung cấp đồng thời cho các khách hàng với luồng dữ liệu lên có băng thông mức gigabit do tính chất của giao thức đa truy nhập dựa trên khe thời gian. Vì vậy các mạng PON dựa trên công nghệ ghép kênh phân chia theo thời gian (TDM) và/hoặc ghép kênh phân chia theo bước sóng (WDM) hoặc ghép kênh phân chia theo mã quang (OCDM) được triển khai khá rộng rãi cho các mạng truy nhập thế hệ sau (FTTH) [5] [6] [7] [8] [9] [10].

Ban đầu các mạng là đơn kênh, tức là một bước sóng đơn được chia sẻ giữa nhiều người dùng, sử dụng kỹ thuật TDM. Sau đó, các mạng này sử dụng kỹ thuật WDM cho phép truyền dẫn đồng thời nhiều bước sóng trong cùng một sợi quang,

làm tăng đáng kể dung lượng mạng và sử dụng toàn bộ nguồn tài nguyên băng thông của sợi quang. Ngoài ra, WDM còn có thể dễ dàng tăng dung lượng và hiệu năng được đảm bảo, đặc biệt có thể truy nhập rất nhiều loại hình dịch vụ khác nhau.

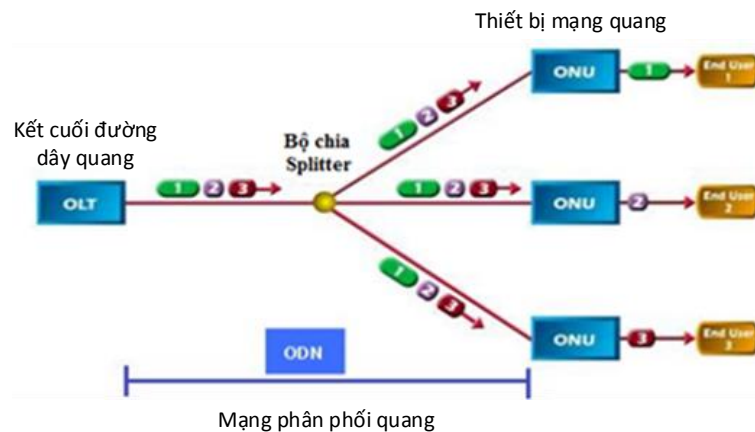
Một mạng PON điển hình bao gồm một kết cuối đường dây quang (OLT) tại văn phòng trung tâm của nhà cung cấp dịch vụ, một số đơn vị mạng quang (ONU) hoặc thiết bị mạng quang (ONT) gần với người dùng đầu cuối, và mạng phân phối quang ở giữa (ODN). Một ODN chủ yếu gồm các sợi quang và các thành phần thụ động, mà không yêu cầu nguồn nuôi. Bởi vì cơ sở hạ tầng sợi của mạng PON dựa trên kiến trúc điểm-đa điểm nên tuyến cáp từ OLT tới nút ở xa được chia sẻ bởi tất cả các ONU, do đó giá một người dùng phải chịu về cơ bản là thấp, vì vậy PON có thể mang lại hiệu quả kinh tế cho các thuê bao [11].

Các hệ thống PON khác nhau được định nghĩa trong các khuyến nghị của ITU-T và các chuẩn của IEEE [12] gồm:

- Công nghệ PON được biết đến đầu tiên là Telephone PON (TPON) được triển khai vào những năm 90 cho mạng điện thoại.
- PON băng rộng (BPON) chuẩn của ITU-T được định nghĩa trong G.983, sử dụng phương thức truyền dẫn không đồng bộ ATM như là giao thức truyền tải với tốc độ dữ liệu kết hợp của 155,52 và 622,08 Mb/s. BPON truyền tải bất kỳ kiểu dữ liệu nào, bất chấp loại khung liên kết dữ liệu.
- PON có khả năng truyền tải tốc độ Gigabit (GPON) được định nghĩa trong khuyến nghị ITU-T G.984 [13], cung cấp khả năng mềm dẻo, truyền tải bất kỳ kiểu dữ liệu nào sử dụng giao thức ATM và phương thức đóng gói GPON (GEM), có khả năng đóng gói các kiểu dữ liệu khác nhau. GPON cung cấp một vài sự kết hợp có thể của các tốc độ dữ liệu lên và xuống (lên tới 2488,32 Mb/s luồng xuống).
- EPON (được định nghĩa trong chuẩn IEEE 802.3) sử dụng giao thức điều khiển truy nhập môi trường đa điểm (MPCP) được thiết kế đơn giản và cho phép truyền dẫn luồng lên và xuống dựa trên gói tại tốc độ dữ liệu 1250 Mb/s sau khi mã hóa 8b/10b.

Với sự phát triển nhanh chóng của công nghệ PON trong những năm gần đây, EPON và GPON đã trở thành các công nghệ PON chủ yếu. Hiện tại, EPON được triển khai mạnh mẽ trong vùng Châu Á- Thái Bình Dương; cụ thể là ở Nhật Bản và Hàn Quốc, trong khi GPON thì phổ biến ở Châu Âu và Bắc Mỹ [14].

1.2.1. Mạng PON ghép kênh theo thời gian (TDM-PON)

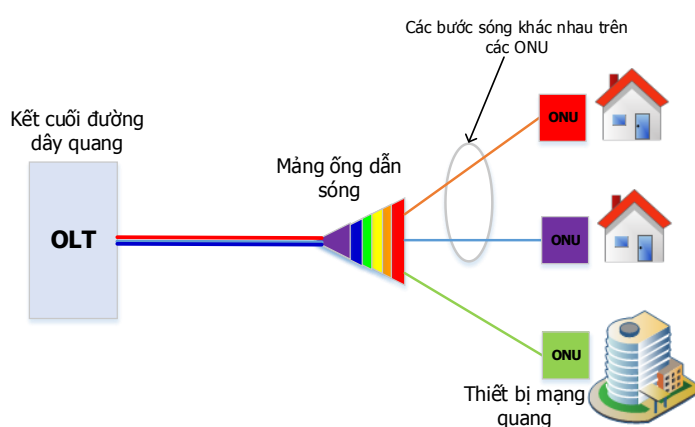


Hình 1.2: Kiến trúc mạng TDM-PON

Hình 1.2 trình bày một kiến trúc điển hình của TDM-PON, là kiến trúc mạng điểm-đa điểm (P2MP), FTTx (ví dụ: cáp sợi quang truyền dẫn đến nhà riêng (FTTH), sợi quang tới doanh nghiệp (FTTP), cáp sợi quang tới lề đường (FTTC)...) [15] [16] [17]. Một OLT được kết nối với nhiều ONU thông qua một nút quang, mà thường bao gồm một hoặc một vài bộ chia công suất quang. Kênh bước sóng xuống 1490 nm và kênh bước sóng lên 1310 nm được sử dụng để truyền tín hiệu dữ liệu và thoại, trong khi kênh bước sóng xuống 1550 nm được sử dụng cho truyền hình tương tự [12]. Trong hướng xuống, tất cả gói tin từ OLT được phát quang bá bởi bộ chia và gửi tới mỗi ONU. Tất cả ONU nhận ra các gói riêng của chúng thông qua các nhãn địa chỉ được gán trong phần tiêu đề của gói [18]. Trong hướng lên, các tín hiệu từ các ONU khác nhau được ghép kênh với nhau bởi bộ chia quang theo miền thời gian và gửi tới OLT. Hầu hết các mạng PON thương mại ngày nay, tức là BPON, EPON và GPON là TDM-PON.

1.2.2. Mạng PON ghép kênh theo bước sóng (WDM PON)

WDM PON là một giải pháp triển vọng cho các hệ thống PON thế hệ mới để cạnh tranh với các hệ thống 10GEPON và NGPON1. Để đạt được băng thông lớn, WDM PON cung cấp cho mỗi thuê bao một bước sóng thay vì chia sẻ bước sóng giữa 32 (hoặc nhiều hơn) thuê bao như trong hệ thống TDM PON. Hình 1.3 trình bày một hệ thống WDM-PON điển hình dựa trên bộ chia bước sóng sử dụng một bộ tách bước sóng thụ động (tức là mảng ống dẫn sóng – AWG) trong nút đầu xa.



Hình 1.3: Kiến trúc điển hình của mạng WDM-PON

Các tín hiệu được mã hóa trên các kênh bước sóng khác nhau, và được định tuyến tới các ONU khác nhau bởi bộ phân kênh. Việc sử dụng bộ phân kênh tránh được sự tổn hao công suất chèn lớn gây ra bởi bộ chia quang, làm cải thiện đáng kể quỹ công suất của toàn bộ hệ thống [19] [20] [21]. Phương thức này tạo ra một liên kết điểm-điểm giữa OLT và mỗi ONU bằng một bước sóng riêng biệt. Vì vậy, mỗi ONU có thể hoạt động tại toàn bộ tốc độ bit của kênh bước sóng riêng của nó.

Mặt khác, mỗi ONU chỉ nhận các tín hiệu riêng của nó, kiến trúc logic điểm-điểm này mang lại tính bảo mật và an toàn hơn nhiều so với công nghệ TDM-PON.

Một kiểu WDM-PON khác được xem như phương thức chia công suất vẫn sử dụng bộ chia quang tại nút đầu xa, nơi mà các tín hiệu dữ liệu với các bước sóng khác nhau được quảng bá tới mỗi ONU. Sau đó, các bộ lọc quang được đặt ngay trước các bộ thu tại ONU giúp chọn lọc và chỉ truyền một kênh bước sóng và chặn

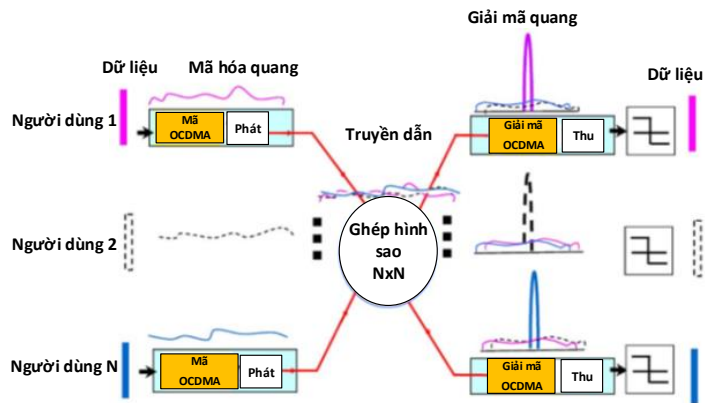
tất cả các bước sóng khác. Loại WDM-PON này có thể được nâng cấp dễ dàng từ kiến trúc TDM-PON hiện tại mà không cần bất kỳ thay đổi nào trong mạng phân phối quang ODN, nhưng nó không thể hạn chế được các vấn đề liên quan đến bảo mật thấp và tổn hao công suất lớn.

1.2.3. Mạng PON ghép kênh phân chia theo mã quang (OCDM-PON)

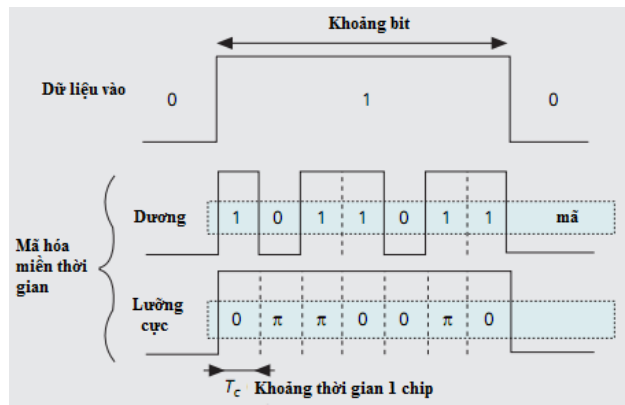
Bên cạnh kỹ thuật TDM và WDM thời gian gần đây cũng xuất hiện kỹ thuật ghép kênh phân chia theo mã quang (OCDM) với các ưu điểm vượt trội đó là: truy nhập không đồng bộ, sử dụng hiệu quả tài nguyên, có khả năng mở rộng và bảo mật cao [22] [23] [24] [25]. OCDM là một kỹ thuật ghép kênh mà trong đó mỗi kênh truyền thông được phân biệt bởi một mã quang thay vì một bước sóng hay một khe thời gian.

Quá trình mã hóa quang là biến đổi các bit dữ liệu trước khi chúng được truyền đi. Tại đầu thu, thao tác giải mã ngược được yêu cầu để khôi phục lại dữ liệu gốc. Đa truy nhập phân chia theo mã quang là sử dụng kỹ thuật OCDM để phân xử việc truy nhập kênh truyền giữa nhiều nút mạng trong một mô hình phân tán.

Thông thường các hệ thống OCDMA được chia thành hai loại đó là không kết hợp và kết hợp. Cơ chế không kết hợp dựa trên kỹ thuật điều chế cường độ và tách sóng trực tiếp (IM-DD). Hoạt động tách sóng trực tiếp làm cho thủ tục đơn giản và giảm giá thành cho bộ thu. Bộ tách sóng quang (photodetector) sẽ phát hiện ra công suất quang của tín hiệu quang chứ không phải là các thay đổi tức thời về pha của tín hiệu quang. Vì vậy, chỉ các kỹ thuật xử lý tín hiệu không kết hợp mới có thể được sử dụng [26]. Trong OCDMA kết hợp, thông tin về pha của sóng mang quang là quan trọng cho quá trình giải mã. Do tính chất truyền dẫn của sợi quang và các hiệu ứng phi tuyến cũng như mức độ phức tạp của bộ thu trong hệ thống OCDMA kết hợp làm cho kỹ thuật này khó triển khai hơn. Tuy nhiên, hiệu năng của cơ chế kết hợp cao hơn nhiều so với cơ chế không kết hợp bởi vì bộ thu có tỉ số tín hiệu trên nhiễu (SNR) nhạy hơn [27] [28].



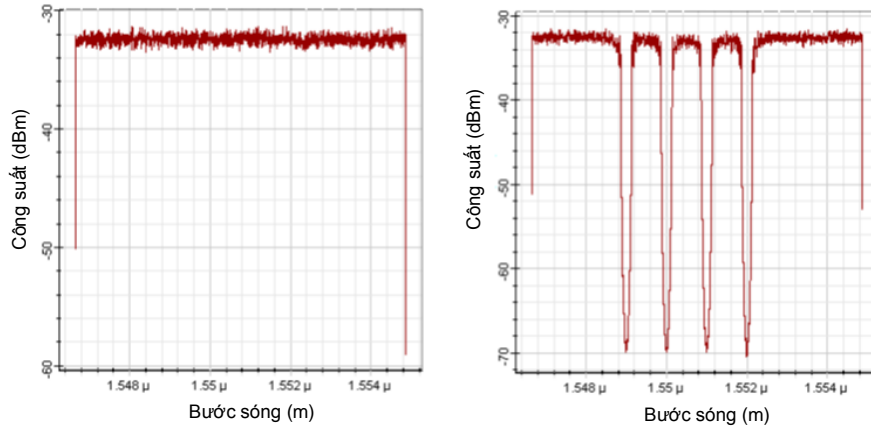
Hình 1.4: Kiến trúc điển hình của mạng OCDMA-PON



Hình 1.5: Mã hóa miền thời gian

Ngoài ra, OCDMA cũng có thể được phân loại theo phương thức mã hóa, đó là mã hóa sử dụng miền thời gian, miền tần số hoặc cả hai. Hình 1.5 và 1.6 mô tả hai kỹ thuật mã hóa này. Trong hệ thống mã hóa miền thời gian, tín hiệu được mã hóa bằng cách nhân bit dữ liệu với một từ mã theo miền thời gian. Hệ thống này không hiệu quả về phổ bởi vì một từ mã dài thường được yêu cầu để duy trì một tương quan chéo thấp. OCDMA trong miền tần số thực hiện mã hóa pha hoặc cường độ phổ của tín hiệu quang bằng rộng bằng việc sử dụng pha hoặc mật độ biên độ, mã hóa biên độ phổ (SAC) có thể cho hiệu quả về phổ tốt hơn. Một ưu điểm quan trọng khác của SAC/OCDM đó là khử được nhiễu đa truy nhập (MAI) (là các tín hiệu không mong muốn xuất hiện như là nhiễu tại bộ giải mã. Đây là nguồn nhiễu chủ yếu trong OCDMA và giới hạn hiệu năng của hệ thống. Tuy nhiên theo lý thuyết, MAI có thể được khử bằng việc sử dụng một bộ tách sóng cân bằng). Ngoài

ra, không giống như các hệ thống miền tần số khác, SAC/OCDM có thể sử dụng các nguồn quang không kết hợp cho phép giá thành rẻ hơn và cấu trúc đơn giản hơn [29] [30].

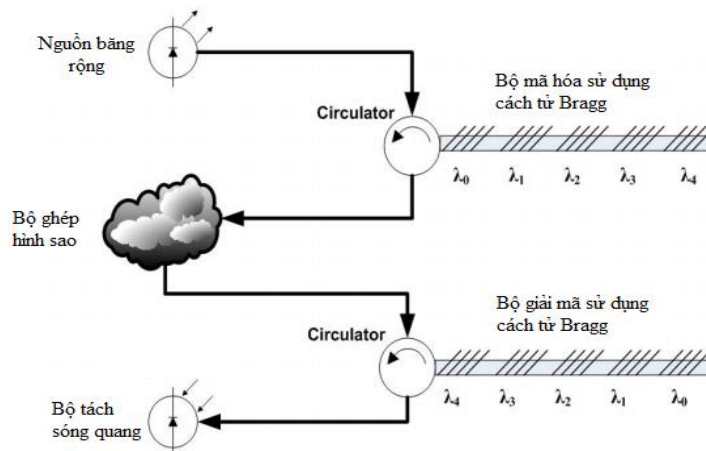


Hình 1.6: Mã hóa biên độ phổ (SAC)

Một số kỹ thuật mã hóa trong miền quang:

a) Mã hóa nhảy bước sóng (tần số)

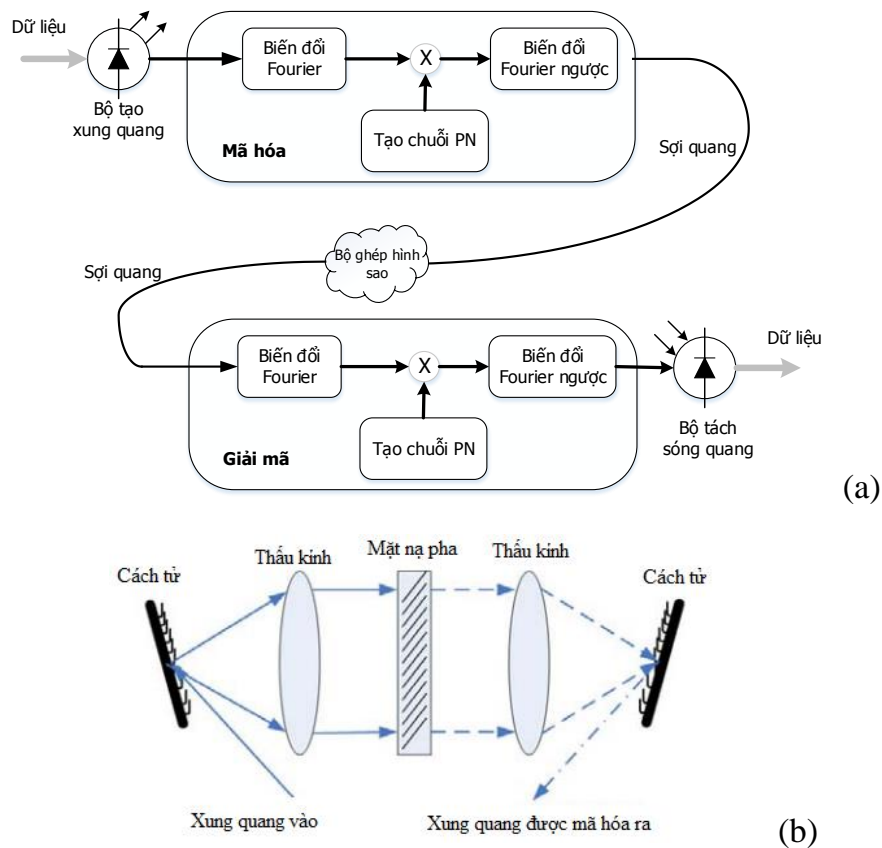
Hệ thống OCDMA nhảy bước sóng nhanh có thể được thực hiện bằng việc sử dụng cách tử Bragg [31] [32] [33]. Nhiều cách tử Bragg (FBG) được sử dụng để tạo ra sự nhảy tần (bước sóng) trong CDMA. Do tính chất vào trước phản xạ trước tuyến tính của các cách tử Bragg, mẫu nhảy tần số theo thời gian được xác định bởi thứ tự các tần số cách tử trong sợi. Thứ tự các tần số cách tử trong bộ giải mã ngược với bộ mã hóa để thực hiện được thủ tục lọc hòa hợp.



Hình 1.7: Nguyên lý hoạt động của bộ mã hóa và giải mã FBG

Hình 1.7 trình bày bộ mã hóa và giải mã trong mạng được ghép theo kiểu hình sao. Nếu bước sóng trung tâm của ánh sáng vào bằng với bước sóng của các tử Bragg, nó sẽ bị phản xạ bởi FBG, còn không nó sẽ bị truyền qua. Với phần mã hóa CDMA được tạo ra thích hợp, trường ánh sáng phản xạ từ FBG sẽ được mã hóa phổ vào một mã địa chỉ. Để giảm ảnh hưởng của MAI, các mã với đặc tính tương quan chéo nhỏ nhất phải được yêu cầu [34].

b) Mã hóa pha phổ (SPC)



Hình 1.8 : Hệ thống OCDMA mã hóa phổ pha và biến đổi Fourier quang

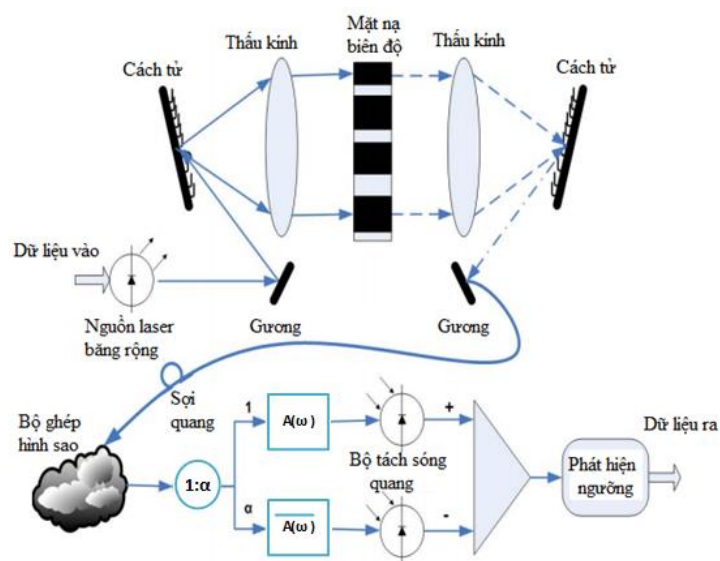
Hình 1.8a trình bày bộ mã hóa và giải mã của một hệ thống mã hóa pha phổ. Nguồn thông tin sẽ điều chế các xung laser rất ngắn, các xung này sau đó sẽ được biến đổi Fourier và các thành phần phổ được nhân bởi một mã tương ứng với độ dịch pha là 0 hoặc π [35]. Biến đổi Fourier có thể được thực hiện bằng các cách tử Bragg và cặp thấu kính như trình bày trong hình 1.8b.

Sau khi được mã hóa pha, xung quang cực ngắn ban đầu được biến đổi thành một tín hiệu có cường độ thấp và thời gian kéo dài hơn. Một bộ điều chế tinh thể lỏng (LCM) có thể được sử dụng để thay đổi pha phổ thành 0 hoặc π . Sau đó xung này sẽ được chia nhỏ thành N_c khoảng tần số (chip) với sự hỗ trợ của một mặt nạ pha. Mỗi chip được gán một độ dịch pha tùy thuộc vào chuỗi địa chỉ mã của người dùng.

c) Mã hóa biên độ phổ (SAC)

Trong hệ thống OCDMA mã hóa biên độ phổ, các thành phần tần số của tín hiệu từ một nguồn phát băng rộng được mã hóa bằng cách bị chặn lại hoặc cho qua tùy thuộc vào từ mã được sử dụng [36] [37]. So sánh với SPC, SAC rẻ hơn do việc sử dụng nguồn quang không kết hợp. Đối với môi trường truy nhập thì giá cả là một trong những nhân tố quyết định, vì vậy mà các hệ thống OCDMA dựa trên SAC dường như có triển vọng hơn. Hình 1.9 trình bày cấu trúc nguyên lý của một hệ thống SAC-OCDMA. Bộ thu lọc tín hiệu vào thông qua một bộ lọc giải mã trực tiếp $A(w)$ giống như tại bộ phát và một bộ giải mã bù có thành phần phổ $\bar{A}(w)$. Lỗi ra của các bộ giải mã này được tách sóng bởi hai bộ tách sóng được kết nối theo cấu trúc cân bằng. Đối với một tín hiệu nhiễu, tùy thuộc vào từ mã được gán, một phần của các thành phần phổ sẽ khớp với bộ giải mã trực tiếp, và phần khác sẽ khớp với bộ giải mã bù. Bởi vì lỗi ra của bộ thu cân bằng tương ứng với hiệu của hai lỗi ra bộ tách sóng nên các kênh nhiễu sẽ bị khử trong khi kênh phù hợp sẽ được giải điều chế, tức là MAI được khử trong hệ thống SAC-OCDMA.

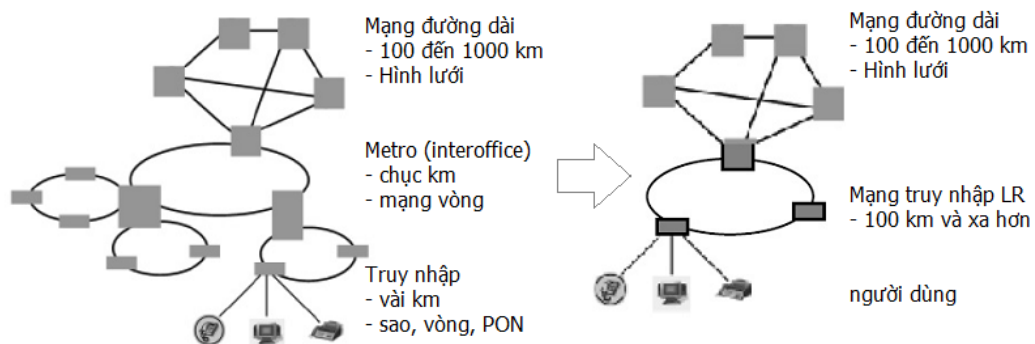
Một vài loại mã đã được đề xuất cho hệ thống SAC-OCDMA bao gồm: chuỗi-M [32], mã Hadamard [38] và mã tương đồng trọng số kép được sửa đổi (MQC) [39]. Mỗi tập từ mã có thể được biểu diễn bởi ký hiệu (N_c, w, μ) , trong đó N_c là độ dài của mã, w là trọng số và μ là hệ số tương quan chéo. Trong mã chuỗi-M, $w = (N_c + 1)/2$ và $\mu = (N_c + 1)/4$; trong mã Hadamard trọng số và hệ số tương quan chéo lần lượt bằng $N_c/2$ và $N_c/4$. Trong mã MQC, $\mu = 1$ và với một số nguyên tố p chúng ta có chiều dài của mã là $N_c = p^2 + p$ và trọng số $w = p + 1$.



Hình 1.9: Nguyên lý mã hóa biên độ phổ trong hệ thống OCDMA

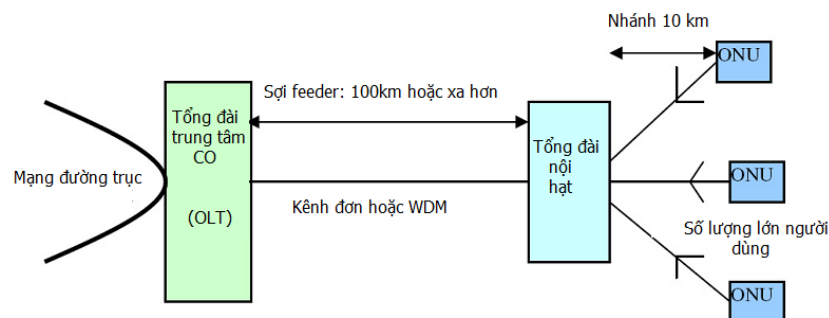
1.3. Mạng quang thụ động khoảng cách dài (LR-PON)

Trong vài năm gần đây, các nhà cung cấp dịch vụ mạng quan tâm đến việc mở rộng khoảng cách truyền dẫn của mạng PON tốc độ gigabit (GPON) lớn hơn 20km và tỉ lệ chia lớn hơn 32 [40] [41] [42]. Việc mở rộng khoảng cách của GPON cũng đã được chuẩn hóa bởi ITU-T (G.984.6) [43]. Tuy nhiên, các cách tiếp cận kéo dài khoảng cách được xem xét trong G.984.6 yêu cầu sử dụng các phần tử sử dụng điện năng như các bộ lặp điện-quang; điều này mang đến nhiều bất tiện trong một hệ thống mạng PON và không hiệu quả về giá, cụ thể trong các môi trường nơi mà không có nguồn điện (ví dụ trong các vùng nông thôn). Các kỹ thuật kéo dài khoảng cách hoàn toàn thụ động sẽ thu hút hơn đối với các nhà mạng. Các nghiên cứu gần đây cho thấy, việc sử dụng các bộ khuếch đại quang tại tổng đài trung tâm (CO) và/hoặc tại tổng đài nội hạt là rất cần thiết để quỹ công suất của mạng PON khoảng cách dài (LR-PON) được đảm bảo [44]. Khuếch đại trong miền quang tạo ra sự tương đồng với tốc độ bit và khuôn dạng dữ liệu, tùy thuộc vào kiểu khuếch đại được sử dụng mà có thể khuếch đại trên một vùng bước sóng rộng. Hai loại khuếch đại được đề xuất gần đây là khuếch đại sợi pha tạp Erbium (EDFA) và khuếch đại quang Raman phân bố (DRA), các bộ khuếch đại này có thể cải thiện quỹ công suất cho mạng GPON và kéo dài khoảng cách truyền dẫn mà không phải sử dụng nguồn điện [45] [46] [47] [48] [49].



Hình 1.10: Cấu trúc mạng LR-PON làm đơn giản mạng viễn thông

Mạng LR-PON là một kiến trúc được đề xuất cho phép kết hợp mạng metro và mạng truy nhập lại với nhau, mở rộng khoảng cách của mạng truy nhập từ 20 km chuẩn tới 100 km [42] [50]. Hình 1.10 trình bày cách mà LR-PON làm đơn giản hóa một mạng viễn thông. Mạng viễn thông truyền thống thường bao gồm mạng truy nhập, mạng metro và mạng đường trục (mạng đường dài). Tuy nhiên, với sự phát triển của các công nghệ cho mạng truy nhập băng rộng LR, mạng metro sẽ gần như nằm trong mạng truy nhập. Khi đó, phân cấp mạng viễn thông sẽ chỉ còn mạng truy nhập được kết nối trực tiếp vào mạng đường trục [51].



Hình 1.11: Kiến trúc mạng LR-PON

Hình 1.11 trình bày kiến trúc chung của mạng LR-PON. Tổng đài trung tâm CO kết nối mạng đường trục với mạng truy nhập và thực hiện chức năng của lớp 2 và lớp 3, tức là cấp phát tài nguyên, tổng hợp dịch vụ, quản lý và điều khiển. Tổng đài nội hạt được đặt trong phạm vi của người dùng nội hạt, gần với thiết bị đầu cuối khách hàng: ONU (khoảng cách 10km). Tín hiệu quang truyền qua sợi quang feeder (khoảng 100 km hoặc xa hơn) giữa CO và tổng đài nội hạt, sau đó tín

hiệu được chia tại các bộ chia và kết nối với một số lượng lớn các ONU. Để bù lại sự tổn hao công suất do khoảng cách truyền dẫn lớn và tỉ lệ chia cao, các bộ khuếch đại quang có thể được sử dụng tại OLT và tổng đài nội hạt [51].

1.4. Một số kiến trúc LR-PON đã được triển khai

Các dịch vụ truyền thông đa phương tiện mới như: ứng dụng thời gian thực độ nét cao (HD) tốc độ bit đối xứng, hội nghị truyền hình, trò chơi trực tuyến, tiếp đến là các phương thức truyền thông kiểu mới như điểm-điểm hoặc điểm-đa điểm, làm tăng đáng kể nhu cầu băng thông của người dùng đầu cuối. Sự gia tăng theo hàm mũ của băng thông sẽ đương đầu với sự phát triển của các mạng truy nhập quang thế hệ mới. Tiến trình phát triển của các công nghệ PON cũ sẽ phải cung cấp các giải pháp với nguồn tài nguyên mạng lớn, hiệu quả về giá để đáp ứng được các ứng dụng mới của người dùng và nhu cầu của các nhà cung cấp dịch vụ.

Các yêu cầu của mạng truy nhập quang LR thế hệ mới bao gồm:

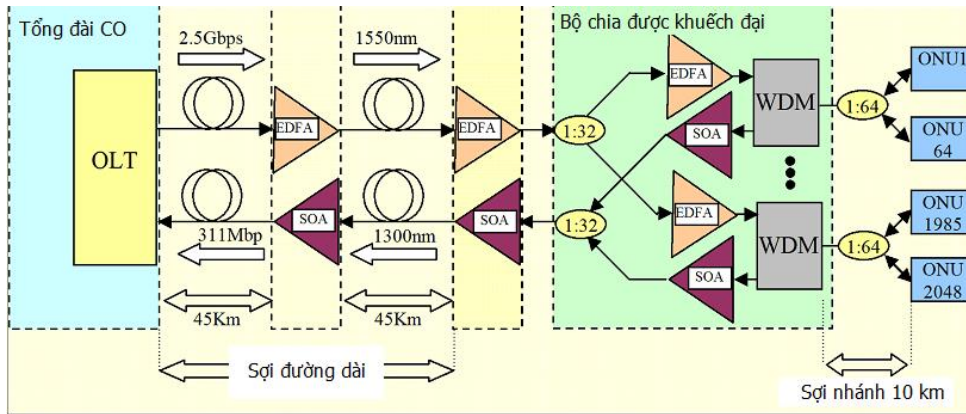
- Tăng khoảng cách truyền dẫn tối thiểu lên đến 100 km
- Tăng tỉ lệ chia lên tới 128 hoặc cao hơn, giảm giá thành cho thuê bao
- Tăng thông lượng của luồng lên và xuống (lên tới 10 Gb/s)
- Thông suốt hoặc thích hợp nhiều nhất có thể với các mạng PON hiện tại
- Giảm nhẹ công việc vận hành, triển khai và bảo trì

Như đã đề cập trong phần 1.3, mạng LR-PON được đề xuất chủ yếu để khắc phục các giới hạn của mạng TDM-PON và WDM-PON như tỉ lệ chia thấp và khoảng cách ngắn. Ban đầu, chúng được đề xuất dựa trên công nghệ TDM, chỉ có một bước sóng được chia sẻ giữa một số lượng lớn các ONU. Sau đó, chúng được đề xuất dựa trên sự kết hợp giữa TDM/CWDM và TDM/DWDM [52].

1.4.1. LR-PON dựa trên TDM

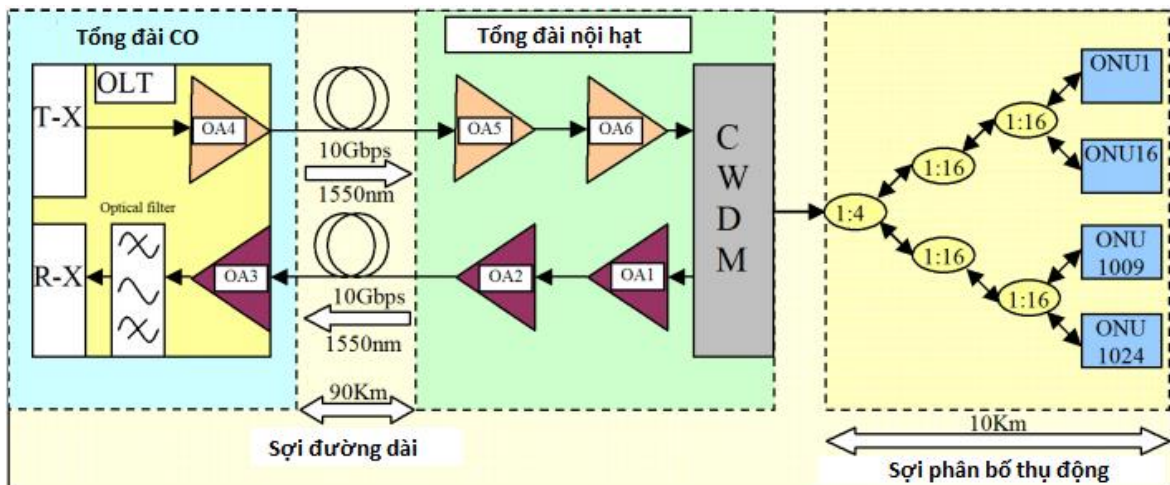
Kiến trúc đầu tiên được triển khai đó là SuperPON (hình 1.12), nó được đề xuất vào giữa thập niên 90, là một mạng cung cấp đầy đủ dịch vụ và hiệu quả về giá. Kiến trúc này với mục đích nâng cấp cho kiến trúc PON băng rộng G.983 (BPON) bao gồm: tăng tỉ lệ chia lên thành 2048, khoảng cách dài hơn (100 km), tốc

độ bit cao hơn (2,5Gb/s cho luồng dữ liệu xuống, và 311 Mb/s cho luồng lên). SuperPON dựa trên ba tầng khuếch đại, tầng thứ nhất được sử dụng để mở rộng khoảng cách, hai tầng còn lại để tăng tỉ lệ chia.



Hình 1.12: Kiến trúc SuperPON [52]

Mặc dù tỉ lệ chia đạt được 2048 trong kiến trúc SuperPON, nhưng nó phải sử dụng một giao thức phức tạp để khắc phục nhiễu gây ra bởi việc đặt song song các bộ khuếch đại trong mạng phân phối. Hình 1.13 trình bày kiến trúc của mạng LR-PON, nó được triển khai cho mạng viễn thông ở Anh, với mục đích làm thỏa mãn nhu cầu tăng băng thông trong tương lai cũng như hợp nhất các tổng đài trung tâm trên toàn lãnh thổ nước Anh [53].



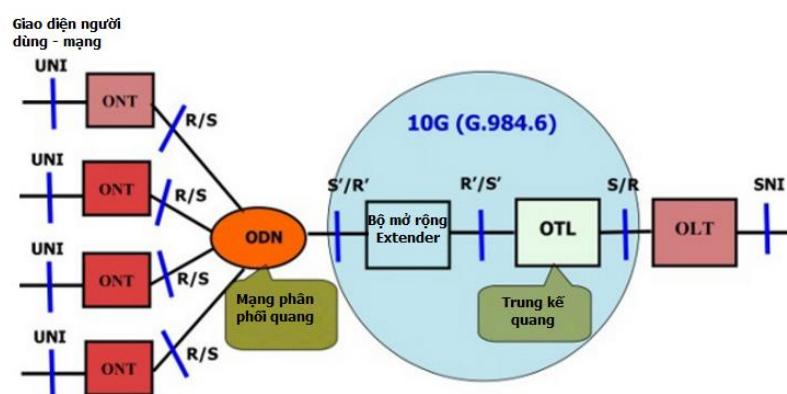
Hình 1.13: Kiến trúc mạng LR-PON ở Anh

Như chúng ta thấy trên Hình 1.13, một tầng khuếch đại quang kép được đặt tại tổng đài nội hạt để bù lại suy hao khi truyền qua sợi đường dài. Một bộ lọc thông

dải quang được đặt trước bộ thu để giảm nhiễu ASE, và tăng cường độ nhạy. Hệ thống có thể hỗ trợ tốc độ dữ liệu luồng lên và luồng xuống lên đến 10 Gb/s trên khoảng cách sợi 100 km. Mặc dù nó có tỉ lệ chia bằng một nửa so với mạng SuperPON (1024), nhưng phần mạng truyền dẫn của nó là hoàn toàn thụ động và không yêu cầu giao thức điều khiển nhiều như trong kiến trúc SuperPON.

1.4.2. LR-PON dựa trên GPON hiện có

Chuẩn G984.6 [43] định nghĩa một cải tiến mới của GPON hiện tại bằng việc tăng cường quỹ công suất quang vì vậy cho phép tăng khoảng cách truyền dẫn và tỉ lệ chia. Việc tăng khoảng cách trong GPON đạt được bằng cách sử dụng các bộ mở rộng khuếch đại quang ở giữa đường truyền (extender) hoặc các bộ tiếp sóng (transponder).



Hình 1.14: Kiến trúc mở rộng của GPON [43]

Sự điều chỉnh này cho phép kéo dài khoảng cách ở giữa đường truyền bằng việc bổ sung một thiết bị chủ động cho mạng phân phối quang thụ động (ODN) (bộ tái tạo hoặc khuếch đại quang) trong tuyến truyền dẫn, giữa OLT và ONT, đạt được khoảng cách truyền dẫn dài hơn lên tới 60 km (Hình 1.14). Thiết bị OLT được kết nối với bộ extender thông qua đường trung kế quang (OTL), các ONU được kết nối với đường truyền thông qua mạng phân phối quang (ODN) bằng các giao diện R/S và S'/R'. GPON được mở rộng (GPON-RE) bổ sung một đường trung kế điểm-điểm (OTL) cho mạng phân phối quang điểm-đa điểm (GPON ODN). GPON-RE tránh được việc triển khai mạng metro, lắp đặt OLT tại tổng đài CO ở xa. Kiến trúc

này làm giảm số lượng CO, đồng thời làm đơn giản hóa quá trình vận hành, bảo trì, bảo dưỡng.

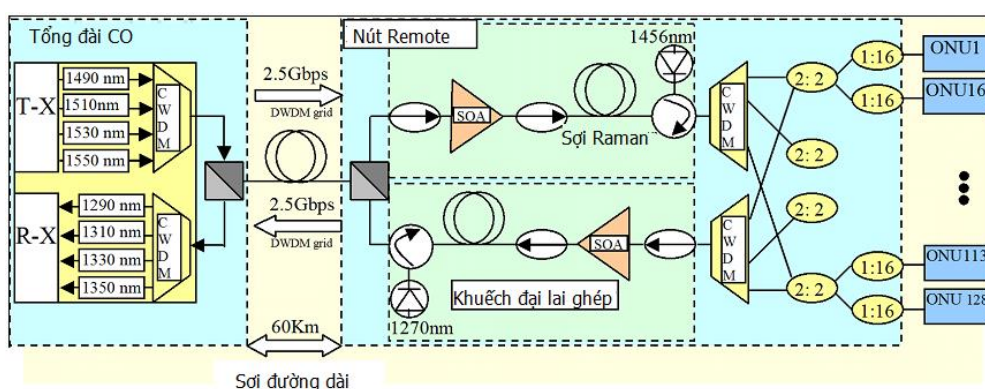
1.4.3. LR-PON dựa trên WDM-PON

WDM-PON là một ứng dụng ghép kênh phân chia theo bước sóng sử dụng các bước sóng riêng cho mỗi mạng PON. Các ONU có các nguồn sáng với các bước sóng được điều chỉnh khác nhau truyền trong cùng sợi quang, làm tăng băng thông tổng cộng và số người dùng được phục vụ trong mạng truy nhập. Liên quan đến phương thức truyền dẫn, WDM-PON có thể sử dụng kiểu truyền dẫn điểm-điểm, điểm-đa điểm (như EPON/GPON) hoặc các giải pháp lai ghép. Trong kiểu truyền dẫn điểm-điểm, không đòi hỏi cơ chế cấp phát băng thông động, còn đối với truyền dẫn điểm-đa điểm nó sử dụng WDM/TDM để đạt được hiệu suất sử dụng tài nguyên cao. ONU/ONT trong WDM-PON được phân loại như sau: không màu hoặc có màu. Trong loại không màu, thiết bị đầu cuối được cấp bước sóng từ OLT đặt tại CO, sử dụng cùng bước sóng cho các kênh lên và xuống. Trong trường hợp này, luồng quang lên được điều chế sử dụng FSK, RZ ngược, hoặc điều chế cường độ (IM) [54] [55]. Bộ chia sẽ được thay thế bằng một bộ lọc chọn lọc bước sóng được thực hiện bằng một mảng ống dẫn sóng (AWG) khi ONU nhạy với màu sắc và cách thức truyền là điểm-đa điểm. LR-PON dựa trên WDM-PON có thể sử dụng AWG với suy hao thấp, trong trường hợp này, suy hao của tuyến là 28 dB và tỉ lệ chia lên tới 64 dB, và khoảng cách tăng lên 80 km [56].

1.4.4. LR-PON dựa trên TDM và CWDM

Trong hệ thống ghép kênh theo bước sóng mật độ trung bình (CWDM), khoảng cách giữa các bước sóng là 20 nm, cho phép truyền đồng thời nhiều bước sóng trên cùng một sợi quang, tuy nhiên số lượng bước sóng sẽ ít hơn trong hệ thống ghép kênh theo bước sóng mật độ cao (DWDM). Khoảng cách bước sóng tương đối lớn này cho phép sự sai lệch bước sóng nhiều hơn, vì vậy có thể sử dụng các laser không được làm lạnh, giá rẻ. Hệ thống LR-PON lai ghép giữa TDM và CWDM được đề xuất trong [57]. Kiến trúc trình bày trong Hình 1.15 cho phép

truyền đồng thời 4 luồng TDM-PON sử dụng CWDM trên khoảng cách 60 km sợi đường dài. Kiến trúc có thể hỗ trợ 128 người dùng bằng việc sử dụng hai bộ khuếch đại lai ghép SOA-Raman tại nút đầu xa, hai bộ ghép CWDM và theo sau là 4 bộ chia (2x2) và 2 bộ chia (1x16). Nhược điểm chính trong cấu hình này là cần phải có bộ khuếch đại quang băng rộng do lưới bước sóng của CWDM tương đối lớn. Ví dụ một hệ thống CWDM 4 kênh yêu cầu độ rộng băng thông khoảng 70 nm. Để đạt được điều này, một bộ khuếch đại lai ghép SOA-Raman được sử dụng để khuếch đại tín hiệu trong cả hai chiều. Bộ khuếch đại lai ghép cung cấp băng thông rộng hơn bộ khuếch đại SOA đơn lẻ được trình bày trong [58].

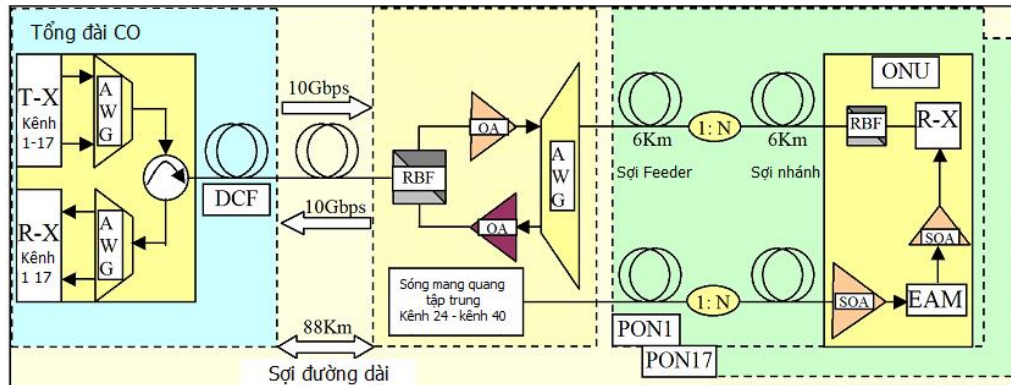


Hình 1.15: Kiến trúc LR-PON dựa trên TDM và CWDM

1.4.5. LR-PON dựa trên TDM và DWDM

Để tránh phải sử dụng các laser có bước sóng cố định, giá cao trong các ONU, hệ thống LR-PON dựa trên TDM và DWDM được đề xuất trong [59] dựa trên việc sử dụng cơ chế phân phối sóng mang quang tập trung và điều chế từ xa không phụ thuộc bước sóng. Bộ phát sử dụng một bộ điều chế hấp thụ điện (EAM) tích hợp với hai bộ khuếch đại quang SOA. Sóng mang quang tập trung nhận tại lõi vào ONU được khuếch đại bởi bộ SOA thứ nhất, được điều chế bởi EAM và được khuếch đại bởi bộ SOA thứ hai, sau đó được phát đi trên sợi quang. Băng C được phân tách bởi dải bảo vệ có độ rộng 5 nm và được cấp phát cho cả hai chiều truyền dẫn, vùng bước sóng từ 1529 nm đến 1541,6nm được cấp phát cho luồng xuống trong khi vùng bước sóng từ 1547,2nm tới 1560,1 nm được cấp phát cho luồng lên. Kiến trúc trình bày trong Hình 1.16 có thể kết hợp 17 luồng TDM-PON, mỗi luồng có tốc độ

dữ liệu 10 Gb/s sử dụng lưới DWDM (0,8 nm) và truyền trên khoảng cách 100 km. Sợi bù tán sắc (DCF) được đặt tại tổng đài CO để bù tán sắc khi tốc độ bit tăng (10 Gb/s). Sợi DCF được chia sẻ bởi cả luồng lên và luồng xuống trước khi được phân tách tại bộ cách ly vòng [52].



Hình 1.16: Kiến trúc LR-PON dựa trên TDM và DWDM

1.4.6. LR-PON dựa trên CDM và DWDM

PON dựa trên DWDM và CDM (ghép kênh phân chia theo mã) kết hợp ghép kênh phân chia theo bước sóng và theo mã, đạt được khoảng cách truyền dẫn lớn do độ lợi của mã, băng thông cao và truyền dẫn hai chiều trên cùng một bước sóng và với một sợi quang đơn. Hệ thống PON DWDM-CDM điển hình là 16 bước sóng với công suất suy hao 42 dB trên 100 km, sử dụng 32 mã trực giao (32 người dùng). Một vài cơ chế LR cung cấp tỉ lệ chia cao, khoảng cách lớn hơn 60 km và băng thông đối xứng/không đối xứng cao được trình bày trong [60].

1.5. Các tham số đánh giá hiệu năng của hệ thống mạng LR-PON

Hiệu năng của một hệ thống mạng LR-PON có thể được xem xét và đánh giá thông qua rất nhiều tham số khác nhau. Tuy nhiên, khi đánh giá hiệu năng của hệ thống truyền dẫn dưới tác động của các tham số ở lớp vật lý như suy hao, tán sắc, tạp âm, nhiễu... thì thường được đánh giá thông qua tỉ số lỗi bit (BER), hệ số phẩm chất Q và chúng là một hàm của tỉ số tín hiệu trên nhiễu (SNR).

- Tỉ số tín hiệu trên nhiễu SNR: Được định nghĩa là tỉ số giữa công suất tín hiệu và công suất nhiễu. Một hệ thống có tỉ số SNR lớn sẽ cho hiệu năng

tốt, tức là tỉ số BER nhỏ. SNR phụ thuộc vào công suất tín hiệu tại đầu thu do đó, nó sẽ bị chi phối bởi các tham số như suy hao, tán sắc, và nhiễu...

- Tỉ lệ lỗi bit BER: Là tỉ số giữa số bit thu được bị lỗi trên tổng số bit được phát đi trong một đơn vị thời gian. Để xác định BER trên thực tế chúng ta sử dụng máy đo, còn trong nghiên cứu, BER thường được xác định thông qua tính toán và mô phỏng.

1.6. Các yếu tố ảnh hưởng đến hiệu năng của mạng LR-PON

Đối với mạng LR-PON đa bước sóng sử dụng công nghệ OCDMA và DWDM thì giới hạn về hiệu năng chủ yếu do các yếu tố sau:

a) Suy hao

Khi tín hiệu truyền trong sợi quang nó sẽ bị suy giảm theo hàm mũ. Thông thường, hệ số suy hao của sợi quang G.652 tại bước sóng 1550 nm khoảng 0,25 dB/km. Các nguyên nhân gây suy hao là do hấp thụ, do tán xạ tuyến tính và do uốn cong...Đối với các hệ thống LR-PON khi mà khoảng cách truyền dẫn tăng lên khoảng 100 km thì hệ số suy hao là đáng kể.

b) Tán sắc

Tán sắc gây ra bởi đặc tính phổ quang của bộ phát và tán sắc sợi quang, là yếu tố chủ yếu giới hạn dung lượng truyền dẫn. Trong sợi quang đơn mode, tán sắc chủ yếu bao gồm tán sắc vật liệu và tán sắc dẫn sóng (chúng được gọi chung là tán sắc màu). Nguyên nhân là do các thành phần tần số khác nhau có độ trễ khác nhau khi truyền qua sợi quang sẽ đến bộ thu tại các thời điểm khác nhau. Trong miền thời gian, nó làm giãn rộng các xung quang, gây ra nhiễu xuyên kênh và làm giảm độ mở của giản đồ mắt và làm giảm hiệu năng của hệ thống.

c) Nhiễu của bộ khuếch đại quang

Ngoài việc khuếch đại tín hiệu, các bộ khuếch đại quang cũng gây ra phát xạ tự phát được khuếch đại (ASE) [61]. ASE là một hiệu ứng phụ của cơ chế khuếch đại, tạo ra bởi phát xạ tự phát, được khuếch đại bởi quá trình phát xạ kích thích trong môi trường khuếch đại. ASE có thể ảnh hưởng xấu đến hiệu năng của hệ thống. Nhiễu ASE thường tích lũy theo chiều dài của sợi EDF, kết quả là, tỉ số SNR có thể giảm đáng kể. Để khuếch đại tín hiệu quang trong khi vẫn duy trì được nhiễu ở mức thấp, người ta đã đề xuất một cơ chế gọi là khuếch đại trung gian hai tầng.

Tầng khuếch đại thứ nhất bao gồm bộ tiền khuếch đại với nhiễu thấp tạo ra tỉ số SNR cao bằng việc duy trì ASE của nó ở mức thấp; và tầng thứ hai bao gồm một bộ khuếch đại với công suất đủ lớn để bù lại suy hao lớn trong sợi feeder.

d) Nhiễu đa truy nhập (MAI)

Đối với các hệ thống LR-PON sử dụng kỹ thuật OCDMA thì một trong những yếu tố ảnh hưởng đáng kể đến hiệu năng của hệ thống chính là nhiễu đa truy nhập (MAI). Sự tồn tại của nhiễu người dùng cùng truy nhập vào một môi trường, tại cùng một thời điểm và cùng các tần số để phát đồng thời dòng dữ liệu của chúng trong các hệ thống OCDMA sẽ gây ra nhiễu MAI.

e) Hiệu ứng tự điều pha (SPM)

Khi một xung quang đơn được truyền trong sợi quang, do chỉ số khúc xạ phụ thuộc vào công suất (cường độ ánh sáng), sườn trước của xung làm tăng chỉ số khúc xạ, sườn sau làm giảm chỉ số khúc xạ. Sườn trước của xung dịch về phía bước sóng dài hơn và sườn sau của xung dịch về phía bước sóng ngắn hơn. Hiện tượng này được gọi là tự điều pha (SPM), làm cho xung bị giãn rộng ra. Trong các hệ thống đa bước sóng có khoảng cách kênh hẹp, sự mở rộng bước sóng gây ra bởi SPM có thể dẫn tới nhiễu giữa các kênh liền kề.

f) Hiệu ứng điều chế xuyên pha (XPM)

Trong các hệ thống đa bước sóng thì chỉ số khúc xạ của lõi sợi không chỉ phụ thuộc vào cường độ ánh sáng của một kênh (một bước sóng), mà còn phụ thuộc vào cường độ sáng của các kênh còn lại. Nói một cách khác, dịch pha xung quang trong một kênh nào đó có sự đóng góp của cường độ sáng các kênh khác. Hiện tượng này được gọi là hiệu ứng điều chế xuyên pha (XPM). Hiệu ứng XPM làm giãn xung tín hiệu quang. Trong các hệ thống ghép kênh sử dụng sợi SMF có thể giảm hiệu ứng XPM bằng cách tăng khoảng cách giữa các bước sóng hoặc sắp xếp khoảng cách giữa các bước sóng không đều nhau.

g) Hiệu ứng trộn bốn bước sóng (FWM)

FWM xảy ra trong trường hợp hai hay ba sóng ánh sáng với các bước sóng khác nhau tương tác với nhau và tạo nên các sóng ánh sáng mới tại các bước sóng khác nhau. Do tạo ra tần số mới nên hiệu ứng FWM làm giảm công suất tín hiệu các kênh. Mặt khác các tần số mới này có thể trùng với tần số tín hiệu, gây nên xuyên

nhiều giữa chúng. Ảnh hưởng của FWM càng lớn khi cường độ của kênh càng lớn, khoảng cách truyền càng dài và khoảng cách kênh càng hẹp. Do đó hiệu ứng FWM hạn chế dung lượng và cự ly truyền dẫn của các hệ thống đa bước sóng.

h) Tán sắc một phân cực (PMD)

Tán sắc một phân cực (PMD) là một đặc tính quan trọng của sợi quang đơn một, trong đó năng lượng tín hiệu tại một bước sóng bất kỳ được chuyển vào hai thành phần phân cực trực giao có tốc độ lan truyền khác nhau do sự không đồng đều và không đối xứng của sợi quang (chỉ số khúc xạ thay đổi) sẽ làm cho xung quang bị giãn rộng ra, hiệu ứng này sẽ giới hạn tốc độ truyền của hệ thống mạng.

1.7. Nhiễu và các kỹ thuật xử lý nhiễu trong mạng LR-PON

Như đã trình bày trong phần 1.6 một trong những yếu tố ảnh hưởng đáng kể đến hiệu năng của mạng LR-PON đó chính là nhiễu trong bộ khuếch đại quang, khi các bộ khuếch đại này được sử dụng trong mạng. Trong phần này chúng ta sẽ khảo sát cụ thể về loại nhiễu này cũng như các kỹ thuật đã và đang được sử dụng để khắc phục ảnh hưởng của chúng.

1.7.1. Nhiễu của bộ khuếch đại EDFA trong mạng LR-PON

Như chúng ta đã biết, nhiễu chủ yếu trong bộ khuếch đại quang EDFA là nhiễu phát xạ tự phát được khuếch đại (ASE). Đây là sự tái hợp giữa điện tử và lỗ trống trong môi trường khuếch đại. Nhiễu ASE tạo ra một phổ nền rộng xung quanh tín hiệu được khuếch đại, và bản thân chúng cũng được khuếch đại khi đi qua bộ khuếch đại [61]. Vì ASE được tạo ra trước photodiode nên nó làm tăng ba thành phần nhiễu khác trong bộ thu quang đó là nhiễu lượng tử ASE, nhiễu trộn giữa tín hiệu và ASE và nhiễu trộn giữa các thành phần phổ ASE khác nhau.

Ngoài ra, trong các hệ thống mạng sử dụng kỹ thuật OCDMA, do tính chất đồng bộ của truyền dẫn nên sẽ xảy ra nhiễu đa truy nhập (MAI) giữa những người sử dụng đồng thời và nhiễu trộn giữa các thành phần bước sóng khác nhau của các người dùng khác nhau (do sử dụng cùng lúc nhiều bước sóng) cũng như giữa các thành phần phổ ASE khác nhau (do sử dụng bộ khuếch đại quang trên đường truyền), điều này sẽ làm giảm đáng kể hiệu năng của hệ thống. Một số giải pháp đã và đang được đề xuất để hạn chế các nguồn nhiễu này là:

- Tăng độ dài mã quang được sử dụng có thể giảm nhiễu trộn, tuy nhiên kỹ thuật này chỉ thành công nếu bộ thu có băng thông lớn hơn tốc độ dữ liệu của tín hiệu phát. Về nguyên tắc có thể sử dụng một bộ tách sóng quang với băng thông rộng và loại bỏ nhiễu trong miền điện, tuy nhiên kỹ thuật này thường tốn kém và tăng độ phức tạp của hệ thống.
- Nhiễu MAI có thể được khử thông qua việc sử dụng bộ hấp thụ bão hòa dựa trên sợi (SA) hoặc cửa sổ thời gian quang (OTG): SA là thiết bị có đáp ứng hàm truyền công suất phi tuyến, đối với các xung có biên độ lớn (chẳng hạn như tín hiệu OCDMA được giải mã đúng) sẽ cho phép truyền qua bộ SA và suy hao rất ít. Tuy nhiên với các xung quang có công suất thấp hơn (chẳng hạn như nhiễu MAI), sẽ bị suy hao lớn khi đi qua thiết bị này [62]. OTG là thiết bị cho phép trích xuất tín hiệu OCDMA được giải mã tại một khoảng thời gian đã cho trong sự có mặt của nhiễu MAI không mong muốn. Thông qua việc lựa chọn cẩn thận một bộ mã thích hợp có thể thiết kế một hệ thống đồng bộ mà đỉnh tín hiệu cần thu xảy ra trong một khe thời gian đã cho trong khi năng lượng của MAI được tạo ra rơi vào bên ngoài khoảng thời gian này. Vì vậy, bằng việc sử dụng OTG có thể khôi phục được tín hiệu gốc mong muốn trong khoảng thời gian đã cho và khử được nhiễu không mong muốn. Nhược điểm của việc sử dụng OTG là yêu cầu một chuỗi xung clock quang để mở cửa sổ chuyển mạch của OTG. Do đó, tại bộ thu cũng cần phải khôi phục lại xung clock để thực hiện việc đồng bộ với các đỉnh tín hiệu thu được. Hai dạng thức chung nhất của OTG đó là gương lật quang phi tuyến (NOLM) và bộ phân kênh bất đối xứng quang terahertz (TOAD) được trình bày chi tiết trong [63] [64].
- Tách sóng quang dựa trên bộ hấp thụ hai photon (TPA): TPA là một thiết bị cho phép biến đổi quang-điện phi tuyến mà trong đó năng lượng vùng cấm của thiết bị lớn hơn năng lượng của một photon đơn nhưng nhỏ hơn hai lần năng lượng của photon tức là $E_{ph} < E_g < 2E_{ph}$ [65]. Điều này tạo ra một sự chuyển đổi quang-điện phi tuyến của ánh sáng tới thành dòng quang điện. Do tính chất này, một thiết bị TPA có thể hoạt động như một bộ xác định ngưỡng và chỉ cho phép các tín hiệu quang có công suất quang lớn hơn đi qua và được chuyển đổi. Bằng cách sử dụng một bộ SA trực tiếp trước bộ tách sóng dựa trên TPA có thể khử thêm được nhiễu MAI. Tuy nhiên, mức

công suất nhiễu trộn có mặt trên tín hiệu quang có thể sẽ tăng lên do đáp ứng phi tuyến của cả hai thiết bị này.

- Một bộ thu kết hợp giữa bộ khuếch đại quang bán dẫn có hệ số khuếch đại nằm trong vùng bão hòa và bộ SA (SA-SOA) cũng cho phép cải thiện hiệu năng của mạng quang thụ động tương đương với kỹ thuật xác định ngưỡng dựa trên sợi (bộ lọc Mamyshev). Sở dĩ nhiễu trộn giảm khi sử dụng bộ SOA có hệ số khuếch đại bão hòa đó là cả sóng mang quang và thành phần phổ tạo ra ở hai bên ánh sáng tín hiệu được điều chế đều bị giảm khi đi qua bộ khuếch đại này, phụ thuộc vào đặc tính lọc thông cao của bộ SOA [66]. Nhiễu trộn của vùng tần số thấp bị nén bởi vì toàn bộ sóng mang quang đều giảm. Nhiễu xung quanh tín hiệu quang cũng được hạn chế bởi vì sự tương tác giữa các thành phần phổ tín hiệu giảm. Người ta đã chứng minh bằng thực nghiệm một bộ thu dựa trên SA-SOA-TPA cho phép hạn chế cả ảnh hưởng của nhiễu MAI và nhiễu trộn.

Một số vấn đề gặp phải với các giải pháp này đó là yêu cầu chiều dài của sợi phi tuyến và/hoặc xung clock đồng bộ để khôi phục thành công tín hiệu gốc trong sự có mặt của MAI, dễ bị ảnh hưởng bởi những thay đổi trong điều kiện môi trường, chi phí cao, tăng độ phức tạp của hệ thống thu hoặc phát.

1.7.2. Nhiễu của bộ khuếch đại Raman trong mạng LR-PON

Trong bộ khuếch đại Raman các nguồn nhiễu được sinh ra bởi các quá trình sau:

a) Nhiễu do tán xạ Raman tự phát

Tán xạ Raman tự phát xảy ra trong sợi quang khi một sóng bơm bị tán xạ bởi các phân tử silica. Hiện tượng này có thể giải thích dựa trên giản đồ mức năng lượng, một số photon bơm từ bỏ năng lượng của mình để tạo ra các photon có năng lượng thấp hơn, phần năng lượng còn lại bị hấp thụ bởi các phân tử silica. Tán xạ Raman tự phát là một quá trình ngẫu nhiên, xảy ra theo mọi hướng. Nhiễu tạo ra được cộng vào tín hiệu khuếch đại bởi vì pha ngẫu nhiên kết hợp với các photon được tạo ra một cách tự phát. Hệ số tán xạ tự phát phụ thuộc vào nhiệt độ của bộ khuếch đại và được xác định theo công thức:

$$n_{sp} = \frac{1}{1 - \exp\left(\frac{-h\Omega_R}{k_B T}\right)} \quad (1.1)$$

Trong đó Ω_R là độ dịch Raman, T là nhiệt độ, k_B là hằng số Boltzmann.

Đối với bộ khuếch đại Raman $n_{sp} \approx 1,13$ tương ứng với quá trình đảo lộn mật độ hoàn toàn. Nhiễu phát sinh bởi tán xạ Raman tự phát trên chiều dài sợi quang được tích lũy và gọi là nhiễu phát xạ tự phát được khuếch đại (ASE). Để tránh ảnh hưởng của nhiễu ASE chúng ta có thể sử dụng các bộ lọc dải phổ hoặc bộ lọc miền thời gian để giảm nhiễu trộn của ASE trong băng và ngoài băng hoặc có thể dựa vào tính chất phân cực của nhiễu và tín hiệu để khử nhiễu ASE [67].

b) Nhiễu tán xạ ngược Rayleigh

Tán xạ ngược Rayleigh xảy ra trong tất cả các sợi quang và là sự mất mát cơ bản của công suất tín hiệu. Nhiễu này xuất hiện khi ASE truyền theo chiều ngược với chiều truyền tín hiệu và nó không đáng kể so với công suất tín hiệu. Tuy nhiên, khi khoảng cách truyền dẫn tăng lên nó có thể làm cho ASE bị phản xạ ngược lại theo hướng thuận và được tái khuếch đại, kết quả là làm tăng nhiễu tổng cộng, đây gọi là tán xạ ngược Rayleigh kép (DRS) [68], do có thể xảy ra ở bất kỳ vị trí nào trên sợi quang nên nó được xem như nhiễu đa đường (MPI). Nhiễu MPI là yếu tố giới hạn quan trọng trong các bộ khuếch đại có hệ số khuếch đại lớn. Nhiễu MPI xảy ra khi ánh sáng tín hiệu truyền tới bộ thu bởi nhiều hơn một đường truyền và nhiễu pha kết hợp được biến đổi thành nhiễu cường độ. MPI có thể là rời rạc, tại các điểm ghép, nối sợi quang hoặc cũng có thể là phân bố theo đường truyền như tán xạ Rayleigh hoặc tán xạ Brillouin (SBS). Tán xạ Rayleigh là một cơ chế cơ bản mà ánh sáng bị phản xạ đàn hồi bởi sự không đồng nhất về chỉ số khúc xạ trong sợi quang. Khi ánh sáng bị phản xạ kép truyền qua sợi quang, nó truyền qua một khoảng cách lớn hơn chiều dài của sợi quang vì vậy sẽ bị ảnh hưởng nhiều hơn bởi quá trình suy hao hoặc khuếch đại. Trong một bộ khuếch đại Raman với hệ số khuếch đại dương, mức ánh sáng MPI tại lối ra sợi quang sẽ tăng theo hệ số khuếch đại tín hiệu và chiều dài sợi quang và có thể trở nên rất lớn đối với trường hợp hệ số khuếch đại cao. MPI thông thường được xác định bởi tỉ số công suất phản xạ kép và công suất tín hiệu tại lối ra bộ khuếch đại. MPI góp phần làm giảm tỉ số SNR của tín hiệu. Để giảm nhiễu tán xạ Rayleigh kép có thể sử dụng các bộ cách ly quang đặt giữa các bộ

khuyếch đại. Ví dụ với các hệ thống sử dụng 2 bộ khuyếch đại Raman tập trung và bộ cách ly quang sẽ cho hệ số tạp âm thấp hơn 5,5 dB.

c) Nhiễu do thời gian đáp ứng nhanh (thời gian sống của các điện tử ở mức năng lượng cao ngắn)

Trong khuếch đại Raman, thời gian sống của các điện tử ở mức năng lượng cao thường rất ngắn (3 - 6 fs). Thời gian đáp ứng nhanh của quá trình tán xạ Raman sẽ tạo ra sự khuếch đại tức thì, làm cho cường độ ánh sáng của tín hiệu bị ảnh hưởng bởi sự thay đổi cường độ của sóng bơm - nhiễu tương quan cường độ (RIN) [68]. Tuy nhiên, việc truyền nhiễu RIN từ sóng bơm sang tín hiệu chỉ trở nên quan trọng khi sóng bơm và tín hiệu truyền cùng chiều và phụ thuộc chủ yếu vào mức RIN của laser bơm. Để giảm ảnh hưởng của nhiễu RIN, các cấu hình bơm ngược được sử dụng để thay đổi thời gian sống (tại trạng thái năng lượng cao) cân bằng với thời gian truyền dẫn qua sợi, còn nếu cấu hình bơm thuận được sử dụng, thì yêu cầu các nguồn bơm phải có độ ổn định cao và nhiễu thấp để tránh ảnh hưởng của nhiễu RIN.

d) Noise figure

Tạp âm (NF) là tỉ số tín hiệu trên nhiễu của đầu vào so với đầu ra của một bộ khuếch đại. Nó phụ thuộc vào công suất bơm và hệ số khuếch đại thực của hệ thống:

$$NF = 2n_{sp} \frac{g_R}{A_{eff}} \int_0^L \frac{P_p}{G(z)} dz + \frac{1}{G_L} \quad (1.2)$$

Trong đó $G(z)$ là hệ số khuếch đại thực tại khoảng cách z của sợi quang và G_L hệ số khuếch đại thực tại cuối của sợi quang. Các yếu tố ảnh hưởng đến NF bao gồm tán xạ DRS, nhiễu ASE, nhiễu RIN, sự suy giảm của công suất bơm (nghèo bơm) và tán sắc một phân cực (PMD). Để tăng tỉ số OSNR và giảm NF cấu hình bơm thuận thường được sử dụng.

Trong một hệ thống mạng LR-PON sử dụng kỹ thuật ghép kênh WDM và bộ khuếch đại Raman các loại nhiễu được tạo ra trên cơ sở của nhiễu ASE (gây ra do sử dụng bộ khuếch đại) sẽ gồm: nhiễu lượng tử của ASE, nhiễu trộn giữa tín hiệu và ASE, nhiễu trộn giữa các thành phần ASE có tần số khác nhau với nhau, nhiễu DRS và RIN.

Các phương pháp xử lý nhiễu nêu trên mới chỉ được nghiên cứu và áp dụng trên các mạng đường trục mà chưa được nghiên cứu triển khai trong các hệ thống mạng truy nhập, đặc biệt là mạng LR-PON sử dụng kỹ thuật ghép kênh DWDM và khuếch đại Raman.

1.8. Các nghiên cứu liên quan đến đề tài luận án

1.8.1. Tình hình nghiên cứu trên thế giới

Trên thế giới đã có rất nhiều công nghệ truy nhập quang LR được đề xuất. Ban đầu các mạng là đơn kênh, tức là một bước sóng được chia sẻ giữa những người sử dụng, sử dụng kỹ thuật ghép kênh phân chia theo thời gian (TDM). Tiếp đến là kỹ thuật ghép kênh phân chia theo bước sóng (WDM), một số lượng lớn các bước sóng được chia sẻ giữa những người sử dụng. Và gần đây, xuất hiện kỹ thuật ghép kênh phân chia theo mã quang (OCDM), kỹ thuật này được xem như một giải pháp hữu hiệu nhờ những ưu điểm của nó so với các kỹ thuật truyền thống như: truy nhập không đồng bộ, sử dụng hiệu quả tài nguyên, tính bảo mật cao... Tuy nhiên, việc triển khai các hệ thống LR-PON trên thực tế vẫn còn nhiều hạn chế do những rào cản về mặt công nghệ. Với sự phát triển nhanh chóng của công nghệ linh kiện quang-tử cùng với nhu cầu kết nối băng thông rộng của các dịch vụ mới ngày càng tăng, việc triển khai LR-PON trong mạng truy nhập đang là vấn đề thu hút các nhà nghiên cứu. Các hướng nghiên cứu chính hiện nay về hệ thống LR-PON bao gồm: tăng khoảng cách truyền dẫn, tăng tỉ lệ chia, giảm ảnh hưởng của nhiễu do các bộ khuếch đại quang gây ra, sử dụng hiệu ứng tán xạ Raman kích thích để mở rộng băng tần khuếch đại...

1.8.1.1. Các công nghệ tăng khoảng cách truyền dẫn

Phần phân phối quang của mạng LR-PON thường bao gồm một sợi feeder (được kéo dài khoảng cách) kết nối CO với tổng đài nội hạt, các sợi quang phân phối kết nối tổng đài nội hạt với người sử dụng. Trong một số mạng LR-PON, một bộ kéo dài khoảng cách được đặt tại tổng đài nội hạt để bù lại tổn hao công suất do

khoảng cách truyền dẫn lớn và tỉ lệ chia cao. Một vài công nghệ mở rộng khoảng cách được sử dụng là:

a) Sử dụng khuếch đại quang

Khuếch đại quang tại CO và/hoặc tổng đài nội hạt rất quan trọng để đảm bảo rằng quỹ công suất của mạng LR-PON được cung cấp đủ. Trong mạng Metro và mạng truy nhập được mở rộng tích hợp quang WDM-TDMA (PIEMAN), bộ khuếch đại EDFA được triển khai tại OLT và nút đầu xa để khuếch đại đồng thời 32 bước sóng tín hiệu trên khoảng cách 100km. Mỗi bước sóng được đưa vào một bộ chia PON 1x128 [69]. EDFA cung cấp độ lợi về công suất và hiệu năng nhiều tốt trong băng C và L. Tuy nhiên, khuếch đại quang bị giới hạn trong dải bước sóng này, nếu muốn khuếch đại trong vùng bước sóng khác thì cần phải có cơ chế điều khiển làm phẳng phổ khuếch đại hoặc thay đổi công suất bơm, ngoài ra, tốc độ điều chỉnh hệ số khuếch đại tương đối chậm làm cho EDFA không thích hợp với tính chất “burst” của luồng dữ liệu lên trong TDMA.

Ngoài EDFA, chúng ta có thể sử dụng các bộ khuếch đại quang bán dẫn SOA bởi vì nó có thể hoạt động tại bất kỳ bước sóng nào bao gồm cả băng O và cho hệ số khuếch đại động tốt hơn EDFA [70]. SOA còn có các ưu điểm khác như sự nhỏ gọn, khả năng tạo thêm chức năng bổ sung như chuyển đổi bước sóng và tái tạo tín hiệu toàn quang...Tuy nhiên, SOA hoạt động cơ bản trên một kênh nên nó không thể khuếch đại đồng thời nhiều bước sóng.

Một lựa chọn khác hiệu quả hơn đó là sử dụng các bộ khuếch đại Raman phân bố (DRA) trong các cấu hình bơm thuận và bơm ngược cho phép khuếch đại một vùng bước sóng rộng trên một tuyến truyền dẫn hai chiều. Các bộ khuếch đại Raman có băng tần khuếch đại rộng và phẳng hơn nhiều các bộ khuếch đại thông thường. Nếu sử dụng nhiều bước sóng bơm, DRA có thể đạt được băng tần khuếch đại phẳng lên tới 100 nm. Vì vậy DRA có thể khuếch đại đồng thời nhiều tín hiệu, tốc độ khuếch đại nhanh và động, đồng thời có thể khuếch đại tại bất kỳ bước sóng tín hiệu nào. Tuy nhiên, sử dụng các bộ khuếch đại DRA yêu cầu công suất bơm lớn, vì vậy tiêu thụ thêm công suất điện tại tổng đài nội hạt và CO.

b) Sử dụng các bộ lặp điện

Một phương án thay thế cho các bộ khuếch đại quang đó là sử dụng một bộ lặp điện tại tổng đài nội hạt [71] [72]. Bộ lặp điện có thể tái tạo tín hiệu cả luồng lên và luồng xuống, ngoài ra nó có thể có thêm chức năng chuyển đổi bước sóng và làm bằng công suất quang của các tín hiệu truyền theo dạng burst trong hướng lên. Tuy nhiên, nhược điểm của các bộ lặp này đó là yêu cầu các bộ thu hoạt động theo một burst cũng phải có khả năng xử lý trong một vùng động rộng.

c) Mạng LR-PON hoàn toàn thụ động

Phần phân phối quang của các mạng LR-PON mà sử dụng các bộ khuếch đại quang hoặc bộ lặp điện thì không còn tính chất thụ động nữa bởi vì có một thiết bị tiêu thụ điện năng đặt tại tổng đài nội hạt. Tuy nhiên, vẫn có thể đảm bảo được kế hoạch kéo dài khoảng cách hoàn toàn thụ động thông qua việc sử dụng các kỹ thuật điều chế tiên tiến và/hoặc kỹ thuật tách sóng kết hợp, nhưng đổi lại cấu hình mạng giữa CO và ONU sẽ phức tạp hơn. Ví dụ, trong [73] sử dụng một sợi G.652 suy hao thấp cùng với khuôn dạng điều chế nhị phân kép cho phép triển khai mạng TDMA-PON trên khoảng cách 100 km với tỉ lệ chia 1:128. Sợi suy hao thấp cho phép kéo dài thêm khoảng cách tương đương với 2,5-3dB, ngoài ra, sử dụng khuôn dạng điều chế nhị phân kép cho phép tăng thêm 2 dB trong ngưỡng phi tuyến trên khoảng cách 100 km, vì vậy hạn chế được tán sắc và các hiệu ứng phi tuyến.

1.8.1.2. Sử dụng hiệu ứng tán xạ Raman để mở rộng băng tần khuếch đại

Các nghiên cứu về khuếch đại quang sợi đã được đẩy mạnh từ giữa những thập niên 80 của thế kỷ trước, đặc biệt là sau khi EDFA được các nhà khoa học Anh của đại học Souththampton chứng minh các ion Erbium pha tạp trong thủy tinh có khả năng khuếch đại quang rất mạnh trong vùng bước sóng 1550 nm [74] [75] [76] và sau đó là các kết quả nghiên cứu của Phòng thí nghiệm AT&T Bell cho thấy băng tần khuếch đại của EDFA vào khoảng 4 THz (tương đương 32 nm) và bơm được bằng Laser bán dẫn [77]. Trên cơ sở khuếch đại quang trực tiếp, công nghệ

WDM đã được phát triển, và đã mang lại hiệu quả to lớn cho mạng viễn thông cáp quang trên khắp thế giới.

Do sự phát triển mạnh về công nghệ thông tin và truyền thông, nhu cầu về băng tần truyền tải của các tuyến thông tin tăng lên từng ngày, chính vì vậy việc nghiên cứu mở rộng dải khuếch đại quang trực tiếp trong sợi đã trở nên cấp thiết trong thập niên vừa qua. Các nghiên cứu về khuếch đại quang được mở rộng từ khuếch đại quang bán dẫn (SOA), các loại sợi pha tạp đất hiếm (REDFA) và các loại khuếch đại quang trên cơ sở các hiệu ứng phi tuyến trong vật liệu quang tử kiểu mới đã mang lại nhiều kết quả rất khả quan về mở rộng băng tần cho mạng thông tin quang. Hiện nay băng tần thông tin quang về lý thuyết có thể mở rộng đến 200 nm (từ 1420 đến 1620 nm) với điều kiện tiêu chuẩn về độ lệch của hệ số suy hao trong sợi quang theo bước sóng trong vùng sử dụng ghép kênh quang là $\Delta\alpha \leq 0,3$ dB. Đây là vùng sóng quang đang được quan tâm nhất hiện nay để nghiên cứu phát triển các linh kiện và thiết bị cho mạng thông tin cáp quang, trong đó khuếch đại quang và các nguồn phát tín hiệu quang (Laser bán dẫn) là các linh kiện được ưu tiên hàng đầu.

Các nghiên cứu về khuếch đại quang trong sợi quang cho thấy khuếch đại quang FRA trên cơ sở tán xạ Raman cưỡng bức (Stimulated Raman Scattering) là giải pháp tiềm năng nhất cho hướng mở rộng băng tần của hệ thống thông tin quang sợi cho cả vùng S; L và E [21] [78] [79] [80] [81]. Các nghiên cứu gần đây nhất trong lĩnh vực khuếch đại quang sợi Raman trên thế giới là:

- Nghiên cứu FRA phổ rộng trên cơ sở bơm bằng nhiều bước sóng khác nhau [17] [82];
- Nghiên cứu FRA với hệ số khuếch đại cao, phẳng phổ độ lợi kết hợp với bù tán sắc cho tín hiệu thông tin quang [83] [84] [85] [86];
- Nghiên cứu khuếch đại Raman trong sợi sử dụng các loại sợi có cấu trúc đặc biệt với khuếch đại ghép FRA/EDFA hoặc với các linh kiện quang tử mới [87] [88] [89] [90] [91];

- Nghiên cứu các vật liệu quang tử mới có hiệu ứng Raman cường bức mạnh nhằm chế tạo FRA công suất lớn và kích thước nhỏ [92].

1.8.2. Các công trình nghiên cứu trong nước

Các mạng truyền thông cáp quang ở trong nước đã được phát triển rất mạnh trong thập kỷ vừa qua. Hiện nay có thể đánh giá mạng viễn thông cáp quang Việt Nam thuộc loại tiên tiến trong khu vực Đông Nam Á. Việt Nam đã tham gia nhiều mạng truyền thông quang quốc tế kết nối các nước trong khu vực trên đất liền cũng như ngoài biển với tốc độ truyền thông từ 560 Mb/s đến 40Gb/s. Các tuyến thông tin đường trục và mạng vùng trong nội địa nước ta đã sử dụng công nghệ WDM với dung lượng thiết kế lên đến 40 Gb/s. Các tuyến này có các thiết bị phát thu tín hiệu quang tốc độ cao với độ nhạy đầu thu thấp và tỷ số lỗi bit nhỏ ($BER < 10^{-11}$) và đều sử dụng khuếch đại quang để khuếch đại công suất quang trên tuyến. Mạng đường trục và mạng metro được đầu tư phát triển là vậy nhưng phần mạng truy nhập thì chưa được quan tâm nhiều, mặc dù đã có một số nhà cung cấp dịch vụ mạng triển khai lắp đặt cáp sợi quang đến các văn phòng và tòa nhà theo công nghệ PON, tuy nhiên khoảng cách truyền dẫn vẫn còn ngắn và tỉ lệ chia còn thấp và chỉ dừng lại ở việc sử dụng công nghệ TDM nên tốc độ thực tế mà một thuê bao có được là chưa cao. Tại Việt Nam chưa có các đề tài nghiên cứu nào đề cập đến lĩnh vực LR-PON cũng như việc sử dụng các kỹ thuật ghép kênh khác nhau và các bộ khuếch đại quang để tăng khoảng cách truyền dẫn cho mạng truy nhập và tăng băng thông cho người sử dụng.

Ngoài ra, chúng ta cũng cần chú ý rằng các bộ khuếch đại quang EDFA đang sử dụng trên toàn mạng thông tin quang ở trong nước đều đang phải nhập từ nước ngoài với giá thành khá cao. Đây cũng chính là một trong những nguyên nhân hạn chế việc mở rộng các mạng vùng và các mạng truy nhập diện rộng ở Việt nam.

Từ những năm cuối thập kỷ 90 của thế kỷ XX đến nay Viện Khoa học Vật liệu đã tiến hành nghiên cứu cơ bản và nghiên cứu công nghệ chế tạo khuếch đại quang sợi (EDFA) và khuếch đại quang bán dẫn (SOA) với mục tiêu hoàn thiện quy trình

chế tạo khuếch đại quang với các tính năng phù hợp với các tiêu chuẩn sử dụng trên tuyến thông tin quang (tiêu chuẩn ITU). Tuy nhiên, những nghiên cứu về khuếch đại Raman cưỡng bức, bù trừ tán sắc màu và tán sắc phân cực một, các hiệu ứng quang phi tuyến trong mạng WDM đường trục và truy nhập chưa được tiến hành một cách đồng bộ và có hệ thống, vì vậy hiện nay đã ảnh hưởng trực tiếp đến sự phát triển bền vững của hệ thống thông tin quang ở trong nước khi tiếp thu công nghệ mạng DWDM với tốc độ bit lên đến hàng Tb/s. Tại Việt Nam, nhiều tuyến thông tin quang đường trục có tốc độ bit cao mới được lắp đặt trong thời gian gần đây đã sử dụng các bộ FRA trong tuyến. FRA đóng vai trò kết hợp với EDFA để tăng công suất và độ phẳng phổ cho các kênh quang trong mạng thông tin WDM. Tuy nhiên, các bộ FRA hoàn toàn nhập ngoại và chưa có các nghiên cứu thực nghiệm về chế tạo hoặc khảo sát FRA có hệ thống ở trong nước, vì vậy việc duy trì, bảo hành và sửa chữa FRA gặp rất nhiều khó khăn và kết quả là hoàn toàn phụ thuộc vào đối tác bên ngoài. Về mặt tiếp cận, có một số nhóm nghiên cứu đã tìm hiểu trên tài liệu về các bộ FRA nhập ngoại đang sử dụng trên tuyến để phục vụ cho việc thiết kế tổng thể tuyến thông tin quang có sử dụng FRA. Một số nghiên cứu lý thuyết về khuếch đại Raman và laser Raman, trong đó có tính toán độ lớn của sóng Stoke và đối Stoke trong môi trường Raman mạnh (luận án tiến sĩ của NCS Chu Văn Lanh, Trường Đại học Vinh, năm 2009) [93] có kết quả về định hướng chung, tuy nhiên phần thực nghiệm về khuếch đại quang sử dụng hiệu ứng tán xạ Raman cưỡng bức hầu như chưa được tiến hành.

1.9. Vấn đề nghiên cứu của luận án

Như đã trình bày ở trên, mạng LR-PON là một kiến trúc được đề xuất cho phép kết hợp các mạng metro và mạng truy nhập lại với nhau, mở rộng khoảng cách của mạng truy nhập từ 20km chuẩn lên tới 100 km [71], [50]. Tuy nhiên, khi khoảng cách truyền dẫn tăng lên thì tín hiệu sẽ bị suy hao nhiều hơn, do đó giải pháp là sử dụng các bộ khuếch đại quang như đã đề cập ở phần 1.8.1.1 chúng ta có thể tăng công suất tín hiệu trong khi truyền mà không cần thông qua bất kỳ sự chuyển đổi tín hiệu nào. Phương pháp này vì vậy đơn giản hơn và rẻ tiền hơn rất

hiều so với việc sử dụng các bộ lặp. Trong số các bộ khuếch đại quang thì bộ khuếch đại quang pha tạp Erbium (EDFA) đã được sử dụng khá phổ biến trong các mạng metro và các mạng đường dài. Trong các hệ thống PON chuẩn, các bước sóng luồng lên và luồng xuống nằm trong vùng 1310 và 1490 nm. Việc sử dụng EDFA để mở rộng khoảng cách của các mạng PON đã được báo cáo trong [94], tuy nhiên, để thích hợp với hoạt động của các OLT và ONU tại các bước sóng PON chuẩn (1310 và 1490) có thể sử dụng các bộ khuếch đại Raman để thay thế. Vì theo phương pháp khuếch đại này chỉ cần lựa chọn bước sóng bơm và công suất bơm phù hợp ghép với sợi quang ngay tại trung tâm (OLT) sẽ cho phép khuếch đại bất kỳ bước sóng tín hiệu nào. Đã có báo cáo gần đây về việc sử dụng khuếch đại Raman phân bố trong mạng GPON [95], tuy nhiên hệ thống này xa rời so với các chuẩn của GPON về một số khía cạnh như bước sóng luồng lên nằm ngoài dải 1300-1320 nm (G.984.5).

Trên cơ sở kết quả phân tích các hạn chế của các nghiên cứu liên quan, vấn đề nghiên cứu được đề xuất trong luận án này là: (1) đề xuất thiết kế và chế tạo bộ khuếch đại quang Raman được bơm bằng công suất thấp ($<1\text{W}$) có phổ khuếch đại rộng theo kiểu cộng công suất, với hệ số khuếch đại đủ lớn và NF thấp để kéo dài khoảng cách truyền dẫn cho mạng truy nhập quang đa bước sóng sử dụng công nghệ DWDM (DWDM LR-PON); (2) nghiên cứu giải pháp cải thiện hiệu năng cho hệ thống mạng LR-PON sử dụng kỹ thuật OCDMA và bộ khuếch đại EDFA có sẵn trên thị trường; phân tích, đánh giá ảnh hưởng của nhiễu ASE, tán sắc màu và cấu hình bơm đến hiệu năng của hệ thống mạng; so sánh các kết quả tính toán lý thuyết, mô phỏng với các kết quả thử nghiệm trên hệ thống mạng thực tế. Từ đó đưa ra các giải pháp tối ưu nhất cho việc triển khai hệ thống mạng truy nhập quang đa bước sóng (WDM, OCDM) tại Việt Nam.

Mục tiêu chính của luận án là: (1) chế tạo thành công bộ khuếch đại quang Raman sử dụng cho hệ thống truyền dẫn quang trong thực tế thay thế cho bộ khuếch đại quang thương mại của hãng Alcatel-Lucent, với các tham số cơ bản tương đương nhưng sử dụng mức công suất bơm thấp hơn chỉ bằng 880mW, có độ ổn định cao (để giảm thiểu tối đa ảnh hưởng của nhiễu RIN từ nguồn bơm), sử dụng cách thức bơm phân bố theo chiều thuận với sự góp mặt của sợi đệm để tăng cường hiệu

ứng tán xạ Raman cưỡng bức và bù trừ tán sắc mạnh, giúp tăng cường hệ số khuếch đại và cải thiện thông số tạp âm. (2) Đưa ra giải pháp hạn chế tối đa ảnh hưởng của nhiễu trong các hệ thống OCDMA có sử dụng bộ khuếch đại EDFA, tìm ra vị trí thích hợp để đặt các bộ khuếch đại EDFA trên tuyến truyền dẫn sao cho hiệu năng thu được là lớn nhất.

CHƯƠNG 2

THIẾT KẾ CHẾ TẠO VÀ KHẢO SÁT ĐẶC TÍNH CỦA BỘ KHUẾCH ĐẠI QUANG RAMAN

Một trong những mục tiêu của luận án là thiết kế chế tạo bộ khuếch đại quang Raman với công suất bơm thấp theo kiểu cộng công suất, có độ ổn định cao hoạt động hiệu quả trên tuyến thông tin, do đó chúng tôi đã thiết kế và chế tạo các mạch điện tử thực hiện các chức năng sau:

- Điều khiển hoạt động của laser bơm phát ra công suất ổn định để bơm cho hệ khuếch đại.
- Mạch điện tử điều khiển hệ Raman phải tương thích với hệ thống trung tâm mạng và hoạt động theo sự điều khiển của của mạng thông tin.
- Ngoài ra mạch điện tử điều khiển Raman phải giao tiếp được với máy vi tính để kiểm tra các thông số hoạt động của hệ khuếch đại quang.

Các kết quả nghiên cứu trình bày trong chương 2 bao gồm: Thiết kế, chế tạo mạch điện, xây dựng phần mềm điều khiển cho mô-đun Raman, khảo sát các tham số của bộ khuếch đại và các kết quả thử nghiệm trên tuyến.

2.1. Nghiên cứu thiết kế phần điện tử của thiết bị RFA

2.1.1. Yêu cầu của nguồn laser bơm cho khuếch đại quang Raman

Như đã trình bày trong Chương 1, bộ khuếch đại quang Raman sử dụng trong hệ thống thông tin quang dựa trên nguyên lý tán xạ Raman cưỡng bức trong sợi quang cần có nguồn bơm quang có bước sóng phù hợp để sóng Stokes của tán xạ Raman nằm trong vùng bước sóng tín hiệu. Đối với sợi quang thông thường SMF-28, hệ số độ lợi quang khá nhỏ (do vật liệu silica có hệ số tán xạ Raman thấp trong vùng 1000-1700 nm), vì vậy các nghiên cứu tập trung vào các sợi quang thông tin có cấu trúc đặc biệt (sợi DCF) hoặc sợi có pha tạp GeO_2 nồng độ cao (sợi nhạy quang để chế tạo cách tử Bragg trong sợi). Để có thể nghiên cứu hiệu ứng Raman cưỡng bức trong sợi quang silica, chúng tôi tiến hành thiết kế và chế tạo nguồn bơm

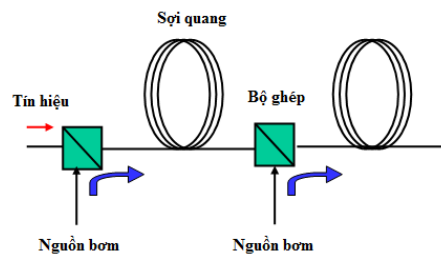
quang công suất thấp ($< 1\text{W}$) sử dụng laser bán dẫn với độ ổn định về công suất điện bơm và bước sóng phát xạ, nhiệt độ để laser khi bơm dòng cao... Các nghiên cứu này trực tiếp phục vụ cho việc chế tạo thiết bị khuếch đại quang sợi Raman trong khuôn khổ luận án.

Để có một bộ khuếch đại quang hoạt động được trên tuyến thông tin quang thực thì các thông số sau phải thỏa mãn yêu cầu:

1. Độ ổn định của hệ số khuếch đại trong quá trình hoạt động;
2. Thời gian hoạt động (thời gian sống danh định) của bộ khuếch đại đạt yêu cầu trên tuyến ($t > 15000$ giờ);
3. Có thể kiểm soát và điều hành bộ khuếch đại trong mạng thông tin chung;
4. Giá thành bảo trì, sửa chữa, thay thế và tương thích của thiết bị có tính kinh tế cao và thuận tiện.

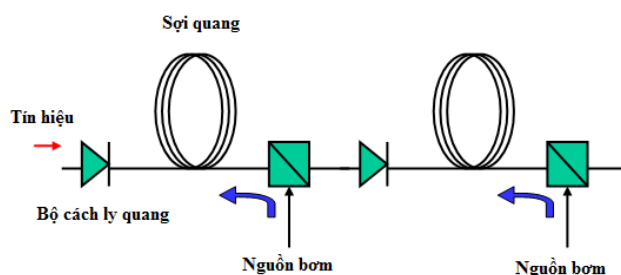
2.1.2. Mô hình của bộ khuếch đại quang Raman

Cũng như bộ khuếch đại quang sợi pha tạp Erbium, cấu hình bơm cho khuếch đại quang Raman có thể dùng cách bơm thuận (chùm sáng bơm cùng chiều với chùm sáng mang tín hiệu), bơm ngược (chùm sáng bơm ngược chiều với hướng truyền tín hiệu) hoặc cấu hình bơm cả hai hướng (chùm sáng bơm từ cả 2 hướng của sợi quang). Cấu trúc tiêu biểu của một bộ khuếch đại Raman được trình bày trên các Hình 2.1 và 2.2. Các thành phần quang-điện tử và quang tử của khuếch đại quang gồm:



Hình 2.1: Cấu hình bơm thuận cho khuếch đại quang Raman phân bố

- Nguồn laser bơm bán dẫn có công suất cao (có thể 1 hoặc nhiều laser bán dẫn ghép nối kiểu cộng công suất quang) dùng để bơm quang học vào sợi quang silica tạo hiệu ứng tán xạ Raman tự phát.



Hình 2.2: Cấu hình bơm ngược hướng cho khuếch đại quang Raman phân bố

- Môi trường khuếch đại quang trên cơ sở tán xạ Raman cưỡng bức có thể sử dụng sợi nhạy quang, sợi DCF hoặc sợi quang SMF-28 có độ dài thích hợp.
- Linh kiện cách ly quang (Isolator) dùng để cho ánh sáng chỉ đi theo một chiều trong sợi và ngăn chặn ánh sáng phản xạ ngược vào môi trường khuếch đại gây nhiễu cho tín hiệu khuếch đại.
- Linh kiện ghép bước sóng quang WDM dùng để kết hợp nguồn bơm và tín hiệu tạo hiệu ứng Raman cưỡng bức cũng như dùng để đưa tín hiệu vào và ra khỏi bộ khuếch đại.

2.1.3. Thiết kế phần điện tử bơm cho laser bán dẫn

Để khuếch đại tín hiệu quang trong cửa sổ 1550 nm (vùng có suy hao quang thấp nhất trong sợi silica hiện đang sử dụng rộng rãi trong mạng thông tin quang), sóng Stokes của tán xạ Raman cần nằm trong vùng 1530-1560 nm được thực hiện bởi chùm laser bán dẫn có bước sóng trong vùng 1420-1485 nm. Công suất quang của laser bán dẫn phụ thuộc vào cấu trúc đặc biệt của laser và độ ổn định của công suất và bước sóng phát xạ laser, phụ thuộc rất mạnh vào hai đại lượng là nhiệt độ của đế laser bán dẫn và dòng điện bơm qua laser. Như vậy để công suất quang bơm cho sợi được ổn định, mạch điện điều khiển hai đại lượng dòng bơm và nhiệt độ phải được thiết kế chính xác. Sử dụng phối hợp cả hai phương pháp (xử lý tín hiệu tương tự và xử lý tín hiệu số) để đạt được sự ổn định nhiệt độ tốt nhất trong quá trình hoạt động của laser bơm.

Để thực hiện luận án, chúng tôi đã sử dụng các laser bán dẫn phát xạ đơn một có cách tử Bragg trên sợi quang để ổn định bước sóng bơm. Các mô-đun laser là

loại laser bán dẫn hồi tiếp phân bố (DFB), dùng cách tử Bragg để chọn lọc bước sóng phát, nên bước sóng quang phát ra khá ổn định và có độ rộng phổ hẹp. Công suất phát quang có thể lên đến 350 mW, hoạt động được với dòng bơm đến hơn 1 Ampe. Thông số của laser bán dẫn và các linh kiện quang tử sẽ được trình bày chi tiết trong phần tiếp theo của chương này.

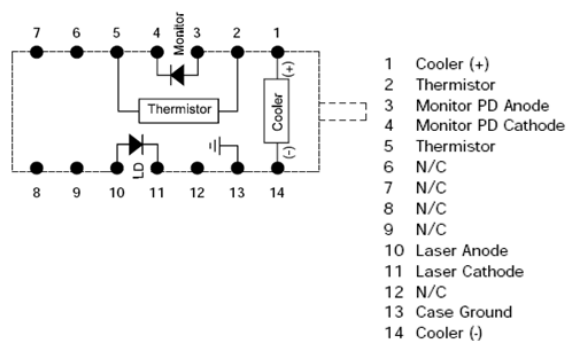
Để có thể ổn định nhiệt độ và công suất quang người ta đã tích hợp các linh kiện khác nhau vào trong một mô-đun (Hình 2.3), các linh kiện gồm có:

- LD: Laser Diode
- N/C: Chân không được kết nối
- Monitor: Photodiode chỉ thị công suất quang phát
- Thermistor: Sensor nhiệt
- Cooler: Bộ làm lạnh cho laser bán dẫn.
- Điện trở nhiệt là linh kiện bán dẫn có điện trở thay đổi theo nhiệt độ, thông thường điện trở của nó ở 25⁰C là 10 k Ω .
- Pin Peltier: Là linh kiện giữ cho nhiệt độ của laser bán dẫn không đổi, chiều và cường độ dòng điện chạy qua pin Peltier thích hợp sẽ ổn định được nhiệt độ này.
- Photodiode nằm ở gương sau của laser bán dẫn có nhiệm vụ đo công suất quang phát ra, trên sơ đồ được gọi là monitor.
- Diode laser bán dẫn là thành phần chính có nhiệm vụ phát laser để bơm cho sợi.

Chúng tôi đã nghiên cứu thiết kế mạch điều khiển nhiệt độ cho laser bán dẫn theo nguyên lý hoạt động như sau:

- Cảm biến nhiệt độ bên trong mô-đun laser sẽ tạo ra điện áp phụ thuộc vào nhiệt độ của laser.
- Từ điện áp này mạch điện tử sẽ xác định nhiệt độ của laser có đúng so với nhiệt độ chuẩn hay không (nhiệt độ chuẩn thường đặt ở 25⁰C). Kết quả xử lý của mạch so sánh sẽ tạo ra mức điện áp điều khiển.

- Điện áp này sẽ điều khiển dòng điện chạy qua pin Peltier. Chiều và độ lớn của dòng điện qua pin Peltier được thiết kế thích hợp sao cho nhiệt độ của laser luôn luôn đúng với giá trị chuẩn.



Hình 2.3: Sơ đồ chân ra của mô-đun laser bơm DW0-300

Nguyên lý điều khiển dòng điện qua laser

Bởi vì sự thay đổi công suất bơm sẽ gây ra tạp âm cho hệ khuếch đại nên mạch điều khiển dòng điện đòi hỏi phải đáp ứng rất nhanh với sự thay đổi công suất quang của diode laser. Do đó, yêu cầu mạch điện tử phải kiểm soát được cả hai yếu tố là dòng qua diode laser và công suất quang phát ra.

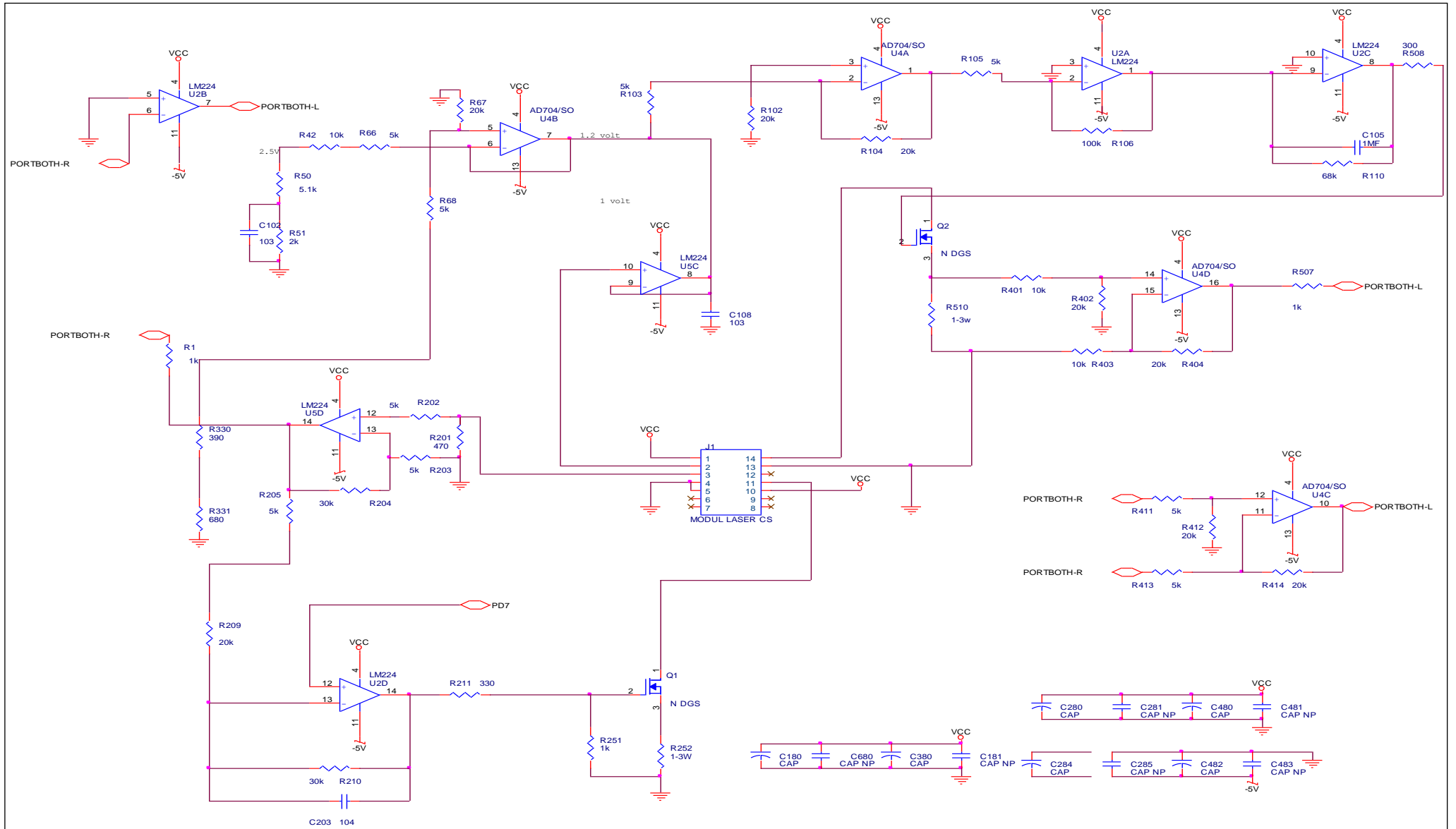
Chúng tôi đã sử dụng vi điều khiển họ AVR Atmega 32, đây là loại vi điều khiển mới dựa trên công nghệ RISC tốc độ cao có thể thực hiện được bốn đến tám triệu lệnh trong một giây. Đồng thời IC còn được tích hợp thêm nhiều chức năng hỗ trợ cho thiết kế mạch như: 8 đường ADC 10 bit, điện áp chuẩn chính xác bên trong, 32 Kb bộ nhớ chương trình, 2 Kb bộ nhớ động, 1 Kb bộ nhớ EEPROM, chuẩn giao tiếp USART, SPI, I²C. Đồng thời việc nạp, chạy chương trình hệ thống trên vi điều khiển này rất dễ dàng và có thể thực hiện trực tiếp trên bo mạch qua cổng SPI.

Sau khi tính toán và xây dựng mô hình lý thuyết chúng tôi tiến hành thiết kế mạch điện điều khiển bằng phần mềm chuyên dùng ORCAD 10.5, sơ đồ thiết kế được mô tả trên Hình 2.4.

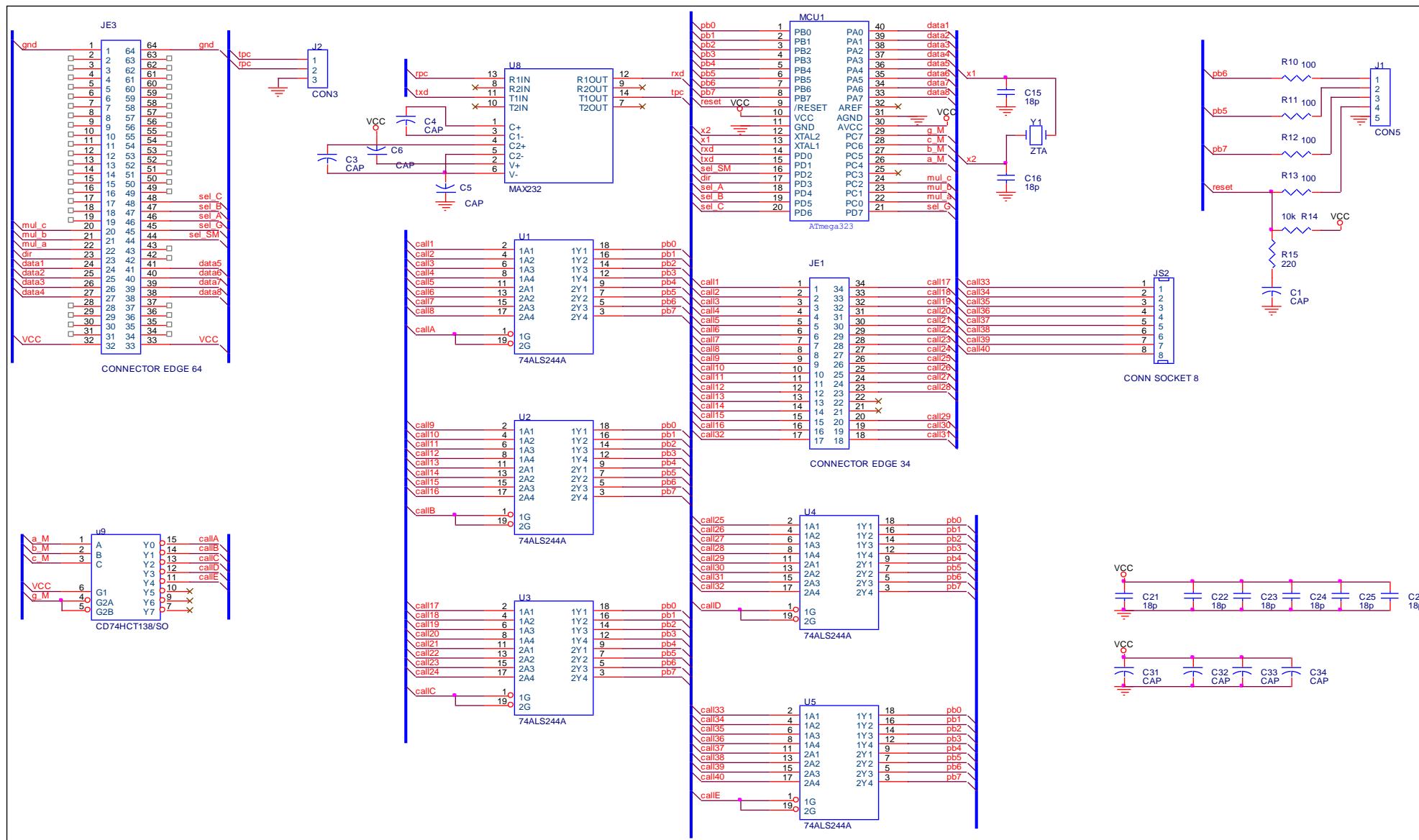
Các mạch điện thiết kế có thể bơm đồng thời ba mô-đun laser bán dẫn có công suất cao, mỗi laser bán dẫn có thể phát đạt được công suất quang đến 1W. Các mô-đun được điều khiển riêng biệt. Mạch điện có cổng ghép nối máy tính để nạp

chương trình điều khiển từ máy tính cho bộ vi điều khiển. Sơ đồ nguyên lý hệ kết nối các mô-đun bom với máy vi tính được trình bày trong Hình 2.5.

Chương trình trong vi điều khiển được viết trên ngôn ngữ C⁺⁺. Ngôn ngữ C là một ngôn ngữ cấp thấp có ưu điểm là: mã gọn, ít chiếm dung lượng bộ nhớ, hoạt động với tốc độ nhanh, và nó có hiệu suất tốt hơn so với các chương trình viết bằng ngôn ngữ bậc cao khác. Chương trình C được chuyển đổi qua mã lệnh (hay còn gọi là mã máy) của vi điều khiển, quá trình chuyển đổi được thực hiện bằng chương trình dịch. Các mã lệnh sau đó được nạp vào bộ nhớ chương trình của vi điều khiển để thực hiện.



Hình 2.4: Sơ đồ nguyên lý nguồn điều khiển cho mô-đun laser bơm



Hình 2.5: Sơ đồ nguyên lý hệ kết nối các mô-đun bơm với máy vi tính

2.2. Xây dựng phần mềm điều khiển nguồn laser bơm

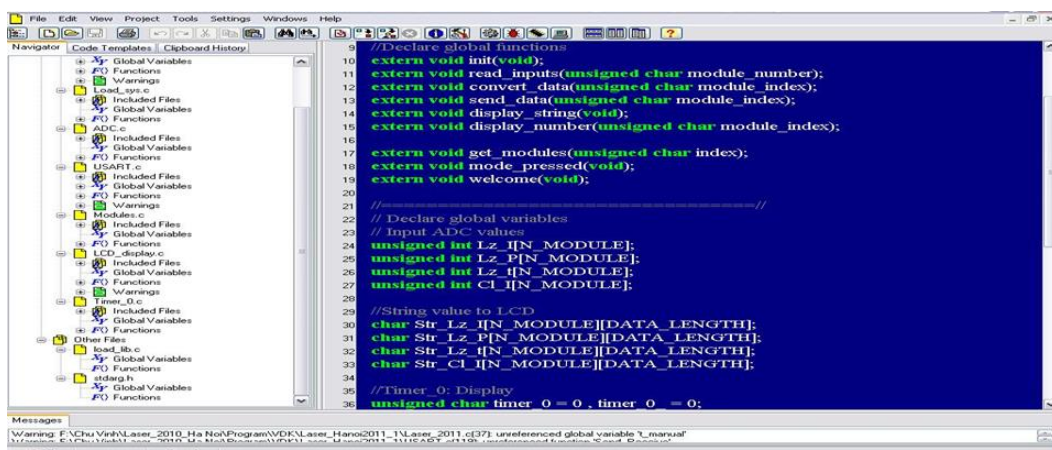
Chương trình được ghi lên vi điều khiển ATmega32 qua cổng SPI, đây là một ưu điểm của vi điều khiển này vì chúng ta có thể thay đổi, sửa lỗi và nâng cấp chương trình dễ dàng trong quá trình hoạt động. Các thông số hoạt động của module được cài đặt và lưu trữ trong bộ nhớ EEPROM của vi điều khiển, bộ nhớ này có thể ghi xóa nhiều lần mà không ảnh hưởng đến chất lượng hoạt động.

Chương trình chính bao gồm nhiều chương trình con, trong đó phần điều khiển nội tại của mô-đun bao gồm:

- Kiểm tra logic từ mạch chính;
- Chương trình con ngắt timer1

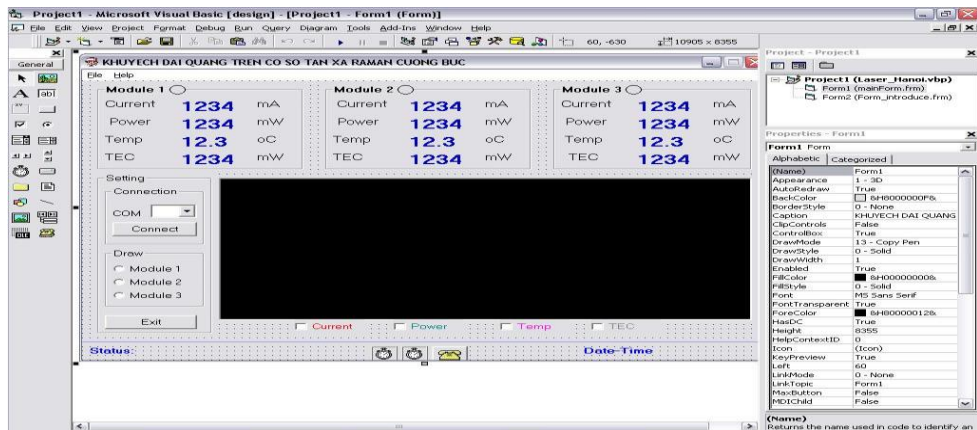
Bo mạch chính của hệ thống thông tin điều khiển modul khuếch đại qua điện áp của cổng PD.3. Hệ thống yêu cầu ngắt dòng bơm của SOA khi điện áp điều khiển này là 5V. Sau khi điều khiển ngắt dòng bơm, chương trình sẽ trả lời cho hệ thống qua tín hiệu (Ans shutdown) trên cổng P.D.2 bằng điện áp 5V.

Ngoài ra hệ khuếch đại RAMAN có thể ghép nối với máy tính qua cổng truyền thông tin theo tiêu chuẩn USB, chương trình ghép nối này nhằm thực hiện theo dõi các thông số của hệ khuếch đại RAMAN. Chương trình theo dõi các thông số của hệ khuếch đại trên máy vi tính được viết bằng ngôn ngữ Visual basic.



```
9 //Declare global functions
10 extern void init(void);
11 extern void read_inputs(unsigned char module_index);
12 extern void convert_data(unsigned char module_index);
13 extern void send_data(unsigned char module_index);
14 extern void display_string(void);
15 extern void display_number(unsigned char module_index);
16
17 extern void get_modules(unsigned char index);
18 extern void mode_pressed(void);
19 extern void welcome(void);
20
21
22 // Declare global variables
23 // Input ADC values
24 unsigned int Lz_I[N_MODULE];
25 unsigned int Lz_P[N_MODULE];
26 unsigned int Lz_I[N_MODULE];
27 unsigned int CL_I[N_MODULE];
28
29 //String value to LCD
30 char Str_Lz_I[N_MODULE][DATA_LENGTH];
31 char Str_Lz_P[N_MODULE][DATA_LENGTH];
32 char Str_Lz_I[N_MODULE][DATA_LENGTH];
33 char Str_CL_I[N_MODULE][DATA_LENGTH];
34
35 //Timer 0: Display
36 unsigned char timer_0 = 0; timer_0 = 0;
```

Hình 2.6: Chương trình trong vi điều khiển được viết trên ngôn ngữ C++



Hình 2.7: Sơ đồ hiển thị các thông số thu nhận từ hoạt động của mô-đun laser

Chương trình hoạt động trên máy tính được viết bằng ngôn ngữ Visual Basic. Chương trình được chúng tôi viết thành các module để dễ quản lý (Hình 2.7), kiểm tra, và sửa lỗi. Để modul giao tiếp với máy tính bên ngoài, chúng tôi thực hiện kết nối qua cổng RS232.

2.3. Chế tạo phần điện tử cho laser bán dẫn

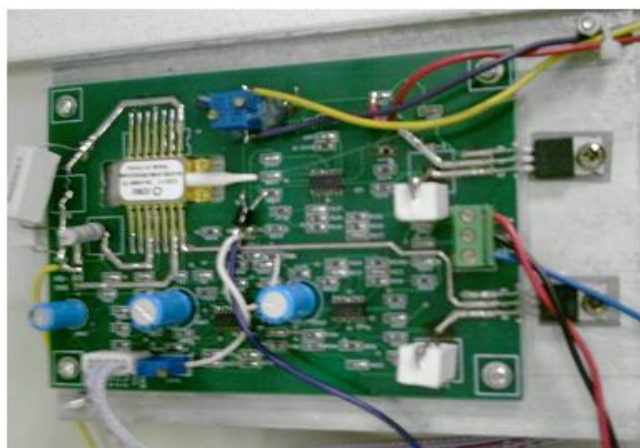
Với sơ đồ mạch được thiết kế, chúng tôi chế tạo và lắp ráp mạch điện điều khiển cho bộ khuếch đại RAMAN như Hình 2.8 dưới đây:



Hình 2.8: Mạch điện cấp dòng nuôi ổn định cho các mô-đun laser bơm

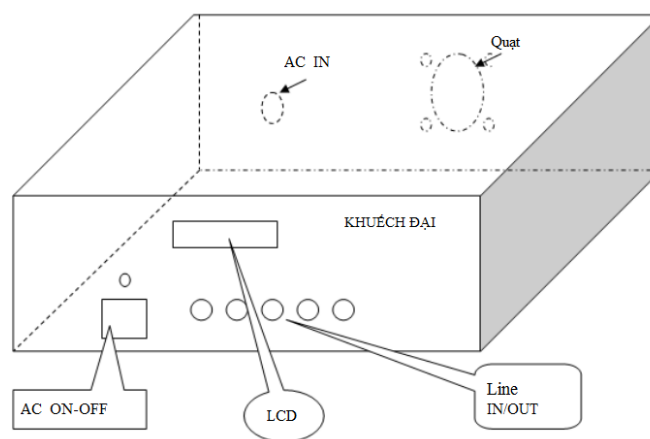
Sau khi tiến hành nghiên cứu mạch điện ổn định nguồn cho laser công suất cao và chế tạo mạch in chúng tôi tiến hành hàn nối các linh kiện điện tử và mô-đun laser diode tạo thành nguồn bơm cho khuếch đại quang Raman với công suất bơm quang ổn định cao về bước sóng phát, công suất phát và nhiệt độ để laser. Nguồn bơm

quang bao gồm một laser diode công suất cao có bước sóng phát xạ trong vùng 1470 -1471 nm; hai tranzitor lưỡng cực được mắc theo sơ đồ đẩy kéo để ổn định dòng bơm vào cho laser; ngoài ra còn có các linh kiện như điện trở, tụ điện, IC có nhiệm vụ định thiên cho tranzitor, lọc nguồn, điều khiển dòng bơm và dòng qua pin Peltier của mô-đun laser để đảm bảo cho laser hoạt động ổn định (Hình 2.9).



Hình 2.9: Mạch ổn định dòng bơm cho laser diode

2.4. Thiết kế bộ nguồn bơm cho hệ RFA cấu trúc kiểu cộng công suất quang



Hình 2.10: Mặt ngoài bộ nguồn bơm kết hợp nhiều môđun laser

Để khuếch đại tín hiệu sử dụng hiệu ứng Raman trong sợi quang đòi hỏi công suất bơm phải lớn (cỡ 1W), trong khi nguồn phát laser công suất cao thì lại khá đắt tiền, do vậy chúng tôi phải kết hợp nhiều môđun laser để đủ công suất bơm cho hệ khuếch đại. Hình 2.10 trình bày phần thiết kế bộ nguồn kết hợp nhiều môđun laser bơm. Màn hình vi tính theo dõi các thông số của hệ khuếch đại RAMAN như nhiệt

độ của laser bơm, dòng điện qua laser, công suất quang bơm cho sợi, dòng điện qua pin Peltier. Kết quả lưu lại các thông số hoạt động của khuếch đại RAMAN được thực hiện tại phòng thí nghiệm cho thấy hoạt động của hệ rất ổn định trong các điều kiện thí nghiệm khác nhau. Các thông số hoạt động của module khuếch đại RAMAN như nhiệt độ, dòng điện qua laser, công suất quang bơm cho sợi pha tạp hầu như không thay đổi trong thời gian thí nghiệm.

Ngoài ra hệ khuếch đại RAMAN có thể ghép nối với máy tính qua cổng truyền thông tin theo chuẩn USB, chương trình ghép nối này nhằm thực hiện theo dõi các thông số của hệ khuếch đại RAMAN. Chương trình theo dõi các thông số của hệ khuếch đại trên máy vi tính được viết bằng ngôn ngữ Visual basic. Với mạch điện tử tự thiết kế, lắp ráp này chúng tôi đã chế tạo được các hệ khuếch đại RAMAN có chất lượng đạt được yêu cầu. Các hệ khuếch đại RAMAN này có thể thay đổi công suất của laser bơm dễ dàng nhằm nghiên cứu các chế độ hoạt động khác nhau.

2.5. Thiết kế phần quang tử cho khuếch đại quang sợi Raman

Phần quang tử của khuếch đại quang Raman gồm các linh kiện chính như sau:

- Mô-đun laser bơm ghép nối với sợi quang đơn một tiêu chuẩn;
- Bộ ghép kênh quang sợi theo bước sóng (bộ WDM);
- Bộ cách ly quang sợi;
- Bộ cộng công suất quang;
- Sợi quang tăng cường hiệu ứng tán xạ Raman;
- Sợi quang truyền thông tin và khuếch đại đồng thời (sợi SMF-28 dài 90km, sợi bù tán sắc DCF dài 4km, sợi nhạy quang pha tạp GeO_2 nồng độ 18% dài 0,5km).

Để thiết kế chính xác phần quang tử cho khuếch đại quang Raman, chúng tôi đã tham khảo khuếch đại quang Raman (RMPM1300) đang được sử dụng trên tuyến thông tin quang quân sự với cấu hình bơm, cấu hình cộng công suất quang

nhằm chế tạo khuếch đại quang Raman thích hợp cho việc sử dụng trên tuyến thông tin quang thực tế.

2.5.1. Laser bán dẫn công suất cao để bơm cho khuếch đại quang Raman

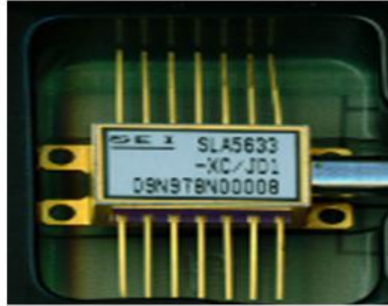
Laser bơm được lựa chọn trong vùng bước sóng 1420-1480 nm có công suất danh định từ 150 mW đến 400 mW. Lý do chọn loại laser bơm trong vùng sóng nêu trên là độ dịch của bước sóng Stokes trong tán xạ Raman nằm trong khoảng 70-100 nm, chúng tôi muốn khảo sát hiệu ứng Raman cưỡng bức trong vùng cửa sổ thông tin quang 1530 – 1580nm. Công suất phát xạ của laser bị hạn chế chủ yếu do giá thành của laser. Hiện nay laser bơm cho khuếch đại quang Raman có thể đạt đến 1000 mW ở chế độ phát đơn môđ, tuy nhiên giá thành của chúng quá cao. Chúng tôi chọn lựa loại laser bơm có công suất thích hợp nêu trên và có so sánh với thiết bị khuếch đại quang Raman hiện đang được sử dụng trên tuyến của tuyến viễn thông quân sự (RMPM1300).

2.5.2. Mô-đun laser bán dẫn 34-0250-DW0-300

Các thông số của mô-đun laser

- Loại laser InGaAsP có cấu trúc giếng lượng tử đa lớp (MQW) phát đơn môđ sử dụng cách tử Bragg để chọn lọc bước sóng phát.
- Bước sóng laser 1470,1 nm với độ rộng phổ 1,0 nm
- Nhiệt độ đế laser danh định khi hoạt động: 25⁰C
- Hiệu điện thế trên bộ làm lạnh Peltier: 2,68V tại 70⁰C
- Dòng nuôi bộ làm lạnh Peltier: 2,1A tại 70⁰C
- Điện trở của cảm biến nhiệt độ trên laser: 9,97 kOhm tại nhiệt độ 25⁰C
- Dòng ngưỡng của laser: 79,0 mA
- Hiệu điện thế bão hòa trên laser: 2,03 V
- Công suất quang phát xạ: 400mW tại dòng bơm 1368,1 mA
- Dòng quang điện photodiode chỉ thị tại công suất quang 400mW: 0,116mA.

2.5.3. Mô-đun laser bán dẫn SLA5653-QD-71/CV1



Hình 2.11: Sơ đồ chân của laser bán dẫn SLA phát xạ công suất cao

Các thông số của mô-đun laser

- Loại laser InGaAsP cấu trúc MQW phát đơn một sử dụng cách tử Bragg để chọn lọc bước sóng phát.
- Bước sóng laser 1471,5 nm với độ rộng phổ 1.0 nm
- Nhiệt độ để laser danh định khi hoạt động: 25⁰C
- Hiệu điện thế trên bộ làm lạnh Peltier: 2,23V tại 70⁰C
- Dòng nuôi bộ làm lạnh Peltier: 1,06A tại 70⁰C
- Điện trở của cảm biến nhiệt độ trên laser: 10 kOhm tại nhiệt độ 25⁰C
- Dòng ngưỡng của laser: 25,1 mA
- Hiệu điện thế bão hòa trên laser: 2,2 V
- Công suất quang phát xạ: 210 mW tại dòng bơm 1000 mA
- Dòng quang điện photodiode chỉ thị tại công suất quang 200mW: 0,867mA.

Khảo sát các thông số của mô-đun laser bơm, chúng ta thấy các thông số của laser rất khác nhau và có thể dẫn đến sự phức tạp khi chế tạo nguồn bơm để điều khiển cho laser trong một thiết bị sử dụng nhiều loại laser bơm. Sự khác nhau này gây ra khó khăn nhất định khi bảo trì, bảo hành thiết bị trong quá trình hoạt động. Vì vậy trong quá trình thiết kế, chúng tôi đặc biệt lưu ý đến sự đồng nhất trong điều khiển laser bơm trên các điểm chung (nhiệt độ để laser, thế bão hòa...).

Kết quả khảo sát laser bơm khi lắp vào mạch điều khiển laser đã chế tạo đạt được các thông số cơ bản như sau:

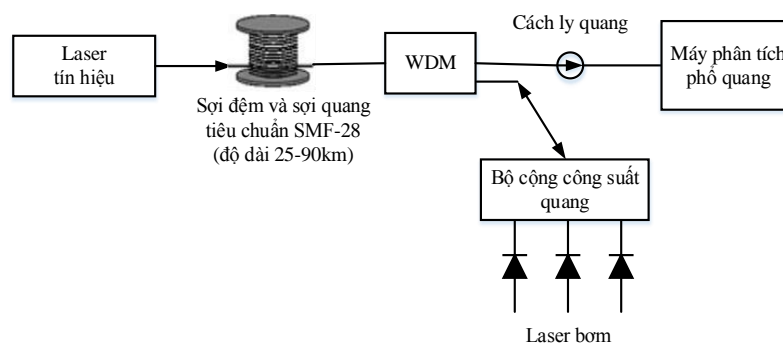
- Nhiệt độ của laser ở 25⁰C có sai số nhỏ hơn 0,1 °C.

- Dòng điện qua laser bán dẫn thay đổi được từ 0 đến 3000 mA, độ sai số của dòng bơm <1%.
- Công suất quang của laser bơm có công suất phát danh định 400 mW đạt được 350mW, công suất laser danh định 210mW đạt được 180 mW. Kết quả khảo sát chi tiết mô-đun laser công suất cao cho thấy công suất danh định của hãng chế tạo và công suất thực tế đo được có sự chênh lệch nhất định, vì vậy khi mua các laser công suất cao cần phải chọn lựa cẩn thận.
- Độ rộng phổ của phát xạ laser đạt 1,0 nm trong toàn bộ dải bơm.
- Phần nguồn bơm cho khuếch đại quang Raman chế tạo đã được đo đạc đánh giá tại Viện Đo lường Việt nam.

2.5.4. Cấu hình quang tử thụ động của khuếch đại quang Raman

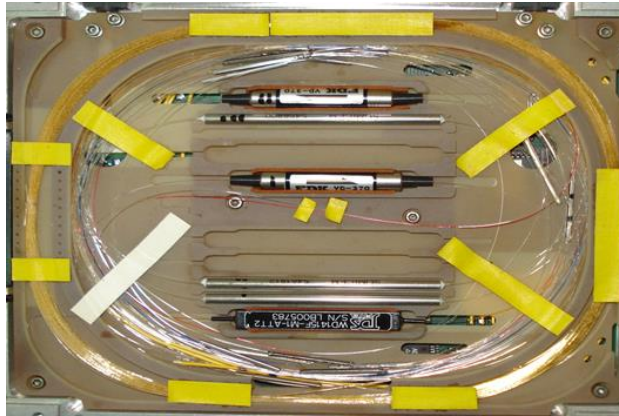
Phần quang tử thụ động của khuếch đại quang Raman, tương tự bộ khuếch đại quang sợi pha tạp Erbium (EDFA), gồm có các linh kiện quang sợi như: linh kiện ghép/tách kênh quang với bước sóng khác nhau, linh kiện cách ly quang sợi, linh kiện cộng công suất quang và sợi quang.

Sơ đồ phần quang tử thụ động của khuếch đại quang Raman được trình bày trong Hình 2.12. dưới đây.

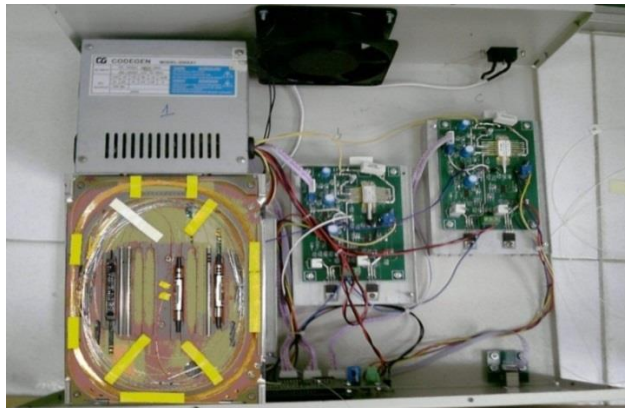


Hình 2.12: Sơ đồ phần quang tử của hệ khuếch đại Raman

Hình 2.13 và 2.14 trình bày cấu trúc điện tử và quang tử của thiết bị khuếch đại quang Raman hoàn chỉnh, trong đó có bộ nguồn có thể cấp dòng đồng thời cho 02 laser với dòng bơm mỗi laser có thể đạt đến 1,5A với độ ổn định +/- 1% dòng bơm cấp và ổn định nhiệt độ cho để laser đạt +/- 0,2⁰C.

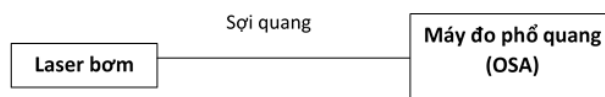


Hình 2.13: Cấu trúc phân quang tử thụ động của thiết bị khuếch đại Raman



Hình 2.14: Cấu hình RFA hoàn chỉnh được ghép từ phần quang tử và phần điện tử

2.6. Kết quả khảo sát đặc trưng của mô-đun laser bơm



Hình 2.15: Sơ đồ khảo sát đặc trưng của mô-đun laser bơm

Mô-đun laser bơm được lắp ráp vào phần điện tử đã chế tạo ở trên để khảo sát các đặc trưng phát xạ của laser gồm: công suất phát xạ, bước sóng phát xạ, độ rộng phổ phát xạ, độ ổn định của phổ và cường độ phát xạ, độ ổn định của nhiệt độ để laser khi hoạt động ở các chế độ bơm khác nhau...Sơ đồ thí nghiệm đo các đặc trưng laser bơm được trình bày trên Hình 2.15.

Sợi quang ló ra của mô-đun laser bơm được nối với máy đo phổ quang (OSA) bằng sợi quang tiêu chuẩn 9/125 micro-mét có hai đầu sợi gắn với connector FC

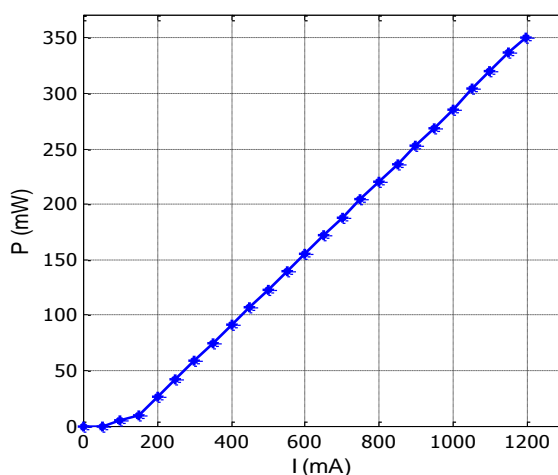
tương thích với thiết bị đo. Với việc thay đổi dòng bơm cho laser bằng cách điều chỉnh các điện trở xoay định dòng (thô hoặc tinh) của bộ nguồn nuôi cho laser công suất quang của laser sẽ thay đổi từ ngưỡng phát laser (công suất khoảng 1mW) đến công suất phát cực đại (khoảng 400mW theo danh định của nhà chế tạo). Phổ phát xạ và công suất phát của laser bơm được thu nhận bằng thiết bị đo phổ quang (OSA) có độ chính xác về bước sóng 0,01nm và công suất quang đến 200 mW (23dBm) và thiết bị đo công suất quang tổng (Optical Powermeter). Để an toàn cho thiết bị đo phổ và công suất phát xạ của mô-đun laser, chúng tôi sử dụng bộ suy hao quang 10dB (giảm công suất phát đi 10 lần) hoặc 20 dB (giảm đi 100 lần). Chúng tôi thu nhận được kết quả về phổ của laser không thay đổi bước sóng phát và độ rộng phổ khi tăng dòng bơm cho laser và nhiệt độ để laser được giữ nguyên. Tại nhiệt độ để laser được cố định ở 25⁰C, phổ phát xạ của mô-đun laser SLA5653-QD-71/CV1 là 1471,5nm với độ rộng phổ 1.0nm; phổ phát xạ của mô-đun laser 34-0250-DW0-300 là 1470,1nm với độ rộng phổ 1,0nm. Khi nhiệt độ để laser thay đổi phổ phát xạ của laser hầu như không đổi do chúng được cố định bằng cách tử Bragg trong sợi quang (FBG), tuy nhiên công suất phát xạ của laser bị thay đổi theo nhiệt độ (do thay đổi dòng ngưỡng laser theo nhiệt độ).

Kết quả khảo sát công suất phát xạ của modul laser 34-0250-DW0-300 được trình bày trong Bảng 2.1.

Bảng 2.1: Công suất phát xạ laser phụ thuộc vào dòng bơm

I(mA)	0	50	100	150	200	250	300	350	400	450
P(mW)	0	0	5	10	26,2	42,4	58,5	74,7	90,9	107,1
500	550	600	650	700	750	800	850	900	950	1000
123,2	139,4	155,6	171,8	187,9	204,1	220,3	236,5	252,6	268,8	285
1050	1100	1150	1197							
304,2	319,8	335,1	350							

Theo nhà cung cấp thông báo, công suất phát xạ danh định của laser đạt 400 mW tại dòng bơm 1368 mA, chúng tôi đã thu được công suất phát xạ laser là 350 mW tại dòng bơm 1197 mA.



Hình 2.16: Đặc trưng I-P của laser 34-0250-DW0-300 tại bước sóng 1470,1 nm

Ngưỡng phát laser xấp xỉ 80 mA phù hợp với số liệu của nhà cung cấp. Hình 2.16 biểu diễn đặc trưng dòng bơm-công suất phát (I-P) của mô-đun laser 34-0250-DW0-300 là tuyến tính trong dải bơm rộng từ 80 đến 1200 mA. Đây là đặc trưng I-P tiêu biểu cho laser bán dẫn phát xạ đơn một dọc.

Mô-đun laser công suất cao SLA5653-QD-71/CV1 có các thông số khảo sát tương tự như thông số của nhà sản xuất công bố, trong đó công suất quang phát xạ đạt được 185mW khi bơm dòng gần 1000 mA. Trên thực tế, để thời gian hoạt động của laser dài, dòng bơm công tác của laser được khuyến cáo chỉ bằng 80% dòng bơm cực đại khi thử nghiệm, vì vậy các thông số của laser làm việc trong bộ khuếch đại Raman đã chế tạo có các thông số sau:

- Mô-đun laser 34-0250-DW0-300 phát xạ công suất 350mW ổn định tại dòng bơm 1197 mA (nhiệt độ đế laser 23-25⁰C).
- Mô-đun laser SLA5653-QD-71/CV1 phát xạ công suất 180 mW ổn định tại dòng bơm 857 mA (nhiệt độ đế laser 23-25⁰C).

2.7. Kết quả khảo sát phổ phát xạ Raman tự phát sử dụng 3 nguồn laser bơm

Trên Hình 2.12 chúng tôi đã trình bày sơ đồ quang tử của khuếch đại quang Raman. Để tiến hành khảo sát hiệu ứng tán xạ Raman tự phát trong sợi quang đơn một tiêu chuẩn SMF-28 khi được bơm bằng laser diode công suất thấp có bước sóng phát xạ trong vùng 1470 – 1471 nm khi không có tín hiệu quang cần khuếch đại, chúng tôi đã sử dụng các kỹ thuật thực nghiệm sau:

- Sử dụng 1-3 laser bơm có thể hoạt động độc lập với nhau và lối ra của từng laser được nối với bộ cộng công suất quang do vậy chúng tôi có thể sử dụng tùy ý một hoặc cả ba laser nhờ đó có thể thay đổi công suất quang bơm của laser vào sợi quang.
- Sử dụng hoặc không sử dụng sợi đệm CAVO-OTTICO-SMR/KM1 trong thực nghiệm nhằm thu thập thông tin về vai trò của sợi đệm.
- Sử dụng bộ ghép/tách kênh theo bước sóng WDM 1480/1550nm để kết hợp nguồn quang bơm và tín hiệu cần khuếch đại.
- Sử dụng bộ cộng công suất để cộng công suất quang cho các bước sóng 1470nm (cổng 1470) 1471nm (cho cổng 1475) và 1480nm (cổng 1480).
- Môi trường Raman là sợi nhạy quang, sợi DCF và sợi quang đơn một tiêu chuẩn SMF – 28 có chiều dài từ 25 km đến 90 km trong phòng thí nghiệm.
- Máy phân tích phổ quang OSA có nhiệm vụ đo và ghi nhận các thông số của hiệu ứng tán xạ Raman tự phát của hệ khi bơm laser vào sợi quang.
- Các tham số của sợi SMF-28 và sợi DCF được trình bày trong Bảng 2.2:

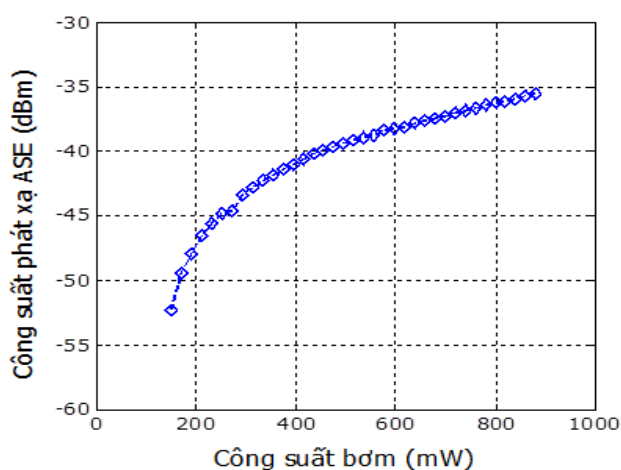
Bảng 2.2: Các tham số sợi SMF-28 và DCF

Các tham số	Sợi SMF-28	Sợi bù tán sắc DCF
Hệ số tán sắc D (ps/nm.km)	16,75	-85
Hệ số suy hao α (dB/km)	0,2	0,65
Đường bao tán sắc S (ps/nm ² km)	0,075	-0,17
Thiết diện vùng hiệu dụng A_{eff} (μm^2)	80	22

Do vùng bước sóng tán xạ Raman tự phát (sóng Stokes) phải trùng với vùng bước sóng của tín hiệu quang cần khuếch đại và cần có cường độ phát xạ Stokes đủ mạnh nên chúng tôi đã tiến hành nghiên cứu sự phụ thuộc của công suất phát xạ Raman tự phát vào công suất của laser bơm để đưa ra công suất bơm tối ưu. Kết quả khảo sát hiệu ứng tán xạ Raman tự phát trong sợi quang được trình bày trong Bảng 2.3. Công suất bơm được thay đổi từ 150 mW đến 881 mW để có thể thu nhận rõ phổ phát xạ sóng Stokes trong vùng 1550nm được khuếch đại (ASE) dọc theo sợi quang.

Bảng 2.3: Công suất phát xạ sóng Stokes phụ thuộc công suất bơm

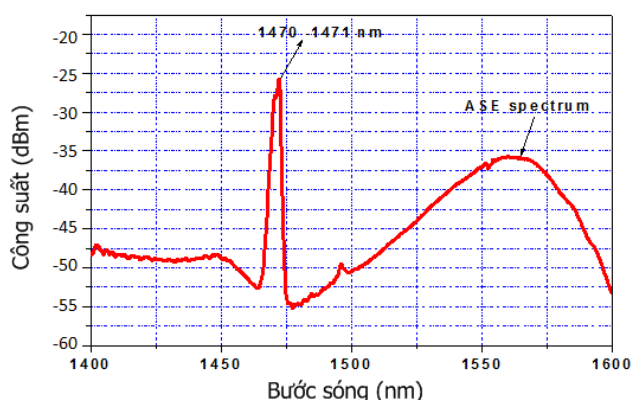
P_p (mW)	150	170,3	190,6	210,9	231,2	251,5	271,8	292,1	312,4	332,7	353,1	
P_{ASE} (dBm)	-52,3	-49,4	-47,9	-46,5	-45,6	-44,8	-44,6	-43,4	-42,8	-42,2	-41,8	
373,4	393,7	414	434,3	454,6	474,9	495,2	515,5	535,8	556,1	576,4	596,7	617
-41,4	-41,0	-40,6	-40,1	-39,9	-39,6	-39,3	-39,1	-38,9	-38,7	-38,3	-38,2	-38,1
637,3	657,6	677,9	698,2	718,5	738,8	759,2	779,5	799,8	820,1	840,4	860,7	881
-37,8	-37,6	-37,4	-37,2	-37	-36,8	-36,6	-36,4	-36,2	-36,1	-35,9	-35,7	-35,5



Hình 2.17: Cường độ phát xạ sóng Stokes theo công suất bơm khi L là 90 km

Hình 2.17 biểu diễn đồ thị thay đổi cường độ của ASE của sóng Stokes đo tại bước sóng 1550nm dọc theo sợi quang phụ thuộc vào công suất bơm. Chúng tôi nhận thấy cường độ phát xạ sóng Stokes thu được khi bơm bằng laser có bước sóng 1470-1471nm sẽ tăng nhanh trong vùng công suất bơm từ 200 mW đến 800 mW

trong sợi DCF (4km) kết hợp với sợi SMF-28 (25-90 km). Ngoài vùng công suất bơm này cường độ phát xạ sóng Stokes có thể sẽ tăng chậm dần và gần như đạt giá trị bão hòa khi công suất bơm lớn hơn 1000 mW, tuy nhiên vì điều kiện công suất nguồn bơm không cho phép nên chúng tôi chưa khảo sát được. Đây có thể là vấn đề cần được nghiên cứu sâu hơn nữa về cấu trúc và vật liệu cấu tạo sợi quang khi cường độ bơm giảm dần dọc theo sợi quang truyền tín hiệu.



Hình 2.18: Phổ phát xạ Raman tự phát (sóng Stokes) trong vùng 1550 nm dịch 90 nm về vùng sóng dài so với bước sóng laser bơm 1470-1471 nm

Hình 2.18 mô tả phổ phát xạ sóng Stokes của hiệu ứng tán xạ Raman tự phát dọc theo sợi quang thử nghiệm (DCF+SMF-28). Phổ tán xạ Stokes trong sợi quang silica lần đầu tiên được quan sát thấy tại Việt nam do: có nguồn quang bơm đủ mạnh và thích hợp với sợi silica thương mại SMF-28, cấu trúc của bộ khuếch đại quang Raman là tiêu chuẩn. Phổ phát xạ Stokes trong sợi quang silica SMF-28 có các đặc trưng như sau: độ rộng phổ 34nm tại vùng cường độ phát xạ giảm -3dB (tương tự độ rộng phổ FWHM đo bằng đơn vị công suất mili-watt); đỉnh cực đại của phổ Stokes dịch 90 nm về vùng bước sóng dài so với bước sóng bơm. Các kết quả đo ASE của sóng Stokes phù hợp với các kết quả nghiên cứu trên thế giới [96].

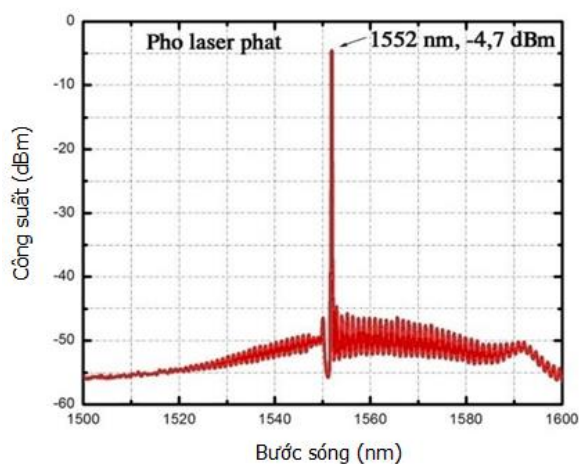
Với công suất laser bơm cực đại 880mW tại bước sóng 1470-1471nm và chiều dài sợi quang là 90 km chúng tôi thu được cường độ sóng Stokes trong sợi quang silica đạt đến -35 dBm trong vùng bước sóng 1550 nm trùng khớp hoàn toàn với vùng phổ tín hiệu quang cần khuếch đại đang sử dụng trong mạng viễn thông quang

WDM. Kết quả nhận được này có ý nghĩa quan trọng trong việc chế tạo khuếch đại quang Raman cho tuyến thông tin quang hiện hành.

2.8. Kết quả khảo sát khuếch đại quang bằng hiệu ứng Raman cưỡng bức

Các thiết bị khuếch đại tín hiệu quang hoặc điện đều phải đưa ra các thông số chung như sau:

- Băng tần khuếch đại của thiết bị. Trong khuếch đại quang, băng tần được tính bằng vùng bước sóng có khuếch đại $\Delta\lambda$ (nm).
- Hệ số khuếch đại của thiết bị. Trong các hệ thống thông tin, hệ số khuếch đại có đơn vị là decibel: G (dB) = $10 \log [(P_{out} \text{ (mW)})/P_{in} \text{ (mW)}]$.
- Công suất ra bão hòa của thiết bị khuếch đại được tính bằng đơn vị miliwatt hoặc bằng dBm: P_s (dBm) = $10 \log [P_s \text{ (mW)} / 1 \text{ (mW)}]$.
- Thông số nhiễu của thiết bị khuếch đại. Trong hệ thống thông tin, hệ số tạp âm (Noise Figure-NF) được tính bằng đơn vị decibel (dB).

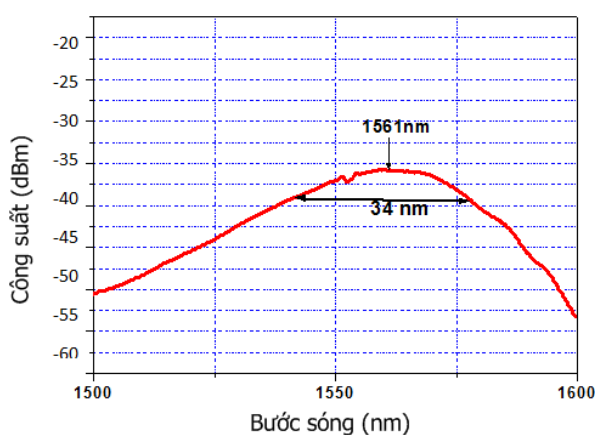


Hình 2.19: Phổ của tín hiệu quang phát xạ từ laser bán dẫn DFB

Để tiến hành khảo sát các tính chất của khuếch đại quang sử dụng hiệu ứng tán xạ Raman cưỡng bức, chúng tôi sử dụng nguồn laser bán dẫn đơn một DFB phát xạ tại bước sóng 1552nm. Tín hiệu quang cần khuếch đại tại bước sóng 1552nm có công suất $-4,7\text{dBm}$ được đưa vào sợi quang thông tin SMF-28 đồng thời với chùm laser bơm bước sóng 1470-1471nm qua bộ ghép kênh quang WDM 1480/1550nm.

Độ rộng phổ của tín hiệu quang phát xạ từ laser DFB đo được là 0.1nm (xem Hình 2.19). Hiệu ứng tán xạ Raman cưỡng bức xảy ra khi đồng thời có mặt hai bước sóng ánh sáng trong môi trường Raman (sợi quang).

Băng tần của khuếch đại quang Raman đã chế tạo được xác định bằng phổ ASE của sóng Stokes được khuếch đại dọc sợi quang trong quá trình lan truyền. Thực nghiệm thu được băng tần khuếch đại $\Delta\lambda$ (nm) = 34nm với đỉnh phổ tại bước sóng 1561nm. Cần lưu ý rằng, phổ ASE của khuếch đại Raman không đối xứng qua đỉnh phổ như các loại khuếch đại quang EDFA hoặc SOA. Tuy nhiên, theo quy tắc chọn lựa băng tần khuếch đại của thiết bị, chúng ta lấy các điểm cường độ phát xạ giảm một nửa (3dB) so với cường độ đỉnh về hai phía của cực đại phổ để xác định băng tần khuếch đại. Hình 2.20 biểu diễn băng tần khuếch đại của thiết bị xác định bằng độ rộng phổ của ASE của sóng Stokes.



Hình 2.20: Phổ ASE của sóng Stokes có đỉnh cực đại tại $\lambda = 1561\text{nm}$ và độ rộng phổ $\Delta\lambda = 34\text{nm}$ tại vị trí -3dB so với đỉnh

Công suất ra bão hòa của thiết bị khuếch đại quang Raman chưa xác định được trong khuôn khổ luận án do công suất nguồn bơm còn bị hạn chế ở mức dưới 1W. Cần lưu ý rằng hiệu ứng tán xạ Raman cưỡng bức là hiệu ứng quang phi tuyến, vì vậy hệ số khuếch đại và công suất của tín hiệu khuếch đại tỷ lệ với bình phương của công suất quang bơm, nhưng trong môi trường dẫn sóng là sợi quang, chúng ta phải đối mặt với nhiều hiệu ứng suy hao quang, vì vậy mật độ năng lượng bơm

giảm theo quy luật mũ theo chiều dài sợi quang, và có thể gây ra hiệu ứng hấp thụ tín hiệu quang khi mật độ năng lượng bơm nhỏ hơn ngưỡng khuếch đại.

Hai thông số quan trọng nhất của thiết bị khuếch đại quang Raman đã chế tạo là hệ số khuếch đại G và hệ số tạp âm NF được khảo sát rất chi tiết nhằm đánh giá khả năng đưa vào tuyến thông tin quang thực tế. Hệ số G và thông số NF được đo đạc khi thay đổi công suất quang bơm từ 200 mW đến 880 mW tại các bước sóng 1470 nm và 1471 nm. Các thông tin về hệ số G và thông số NF của thiết bị khuếch đại cho phép nhà khai thác mạng quyết định sử dụng chúng vào các mục đích khác nhau trên tuyến thông tin quang. Bảng 2.4. trình bày các kết quả đo hệ số G và thông số NF của thiết bị khuếch đại khi bơm bằng 02 bước sóng 1470nm và 01 bước sóng 1471 nm trong cấu hình không sử dụng sợi đệm CAVO-OTTICO-SMR/KM1. Thí nghiệm này cho phép đánh giá hiệu ứng tán xạ Raman cưỡng bức xảy ra trong môi trường sợi quang silica thuần nhất.

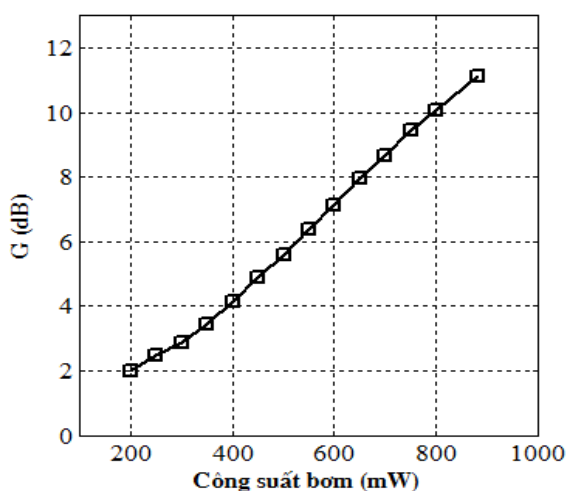
Chúng tôi có nhận xét rằng hệ số khuếch đại G đạt 3 dB (khuếch đại 2 lần cường độ tín hiệu quang vào) khi công suất quang bơm > 300 mW. Tuy nhiên, thông số NF nằm trong vùng 8-9dB sẽ gây ra nhiễu khá lớn cho tín hiệu quang khuếch đại. Hệ số khuếch đại quang đạt 11,11 dB và thông số NF=3,68 dB khi công suất quang bơm đạt đến 880 mW cho thấy khuếch đại quang Raman đã chế tạo đáp ứng được yêu cầu sử dụng trên tuyến thông tin quang thực tế. Thiết bị khuếch đại quang Raman đang sử dụng trên tuyến thông tin tại Việt nam có hệ số G xấp xỉ 10-12 dB và thông số NF ≤ 3,7 dB, vì vậy có thể đánh giá bộ khuếch đại quang chế tạo trong khuôn khổ luận án đã đáp ứng được mục tiêu đặt ra. Phần so sánh các thông số của các thiết bị khuếch đại Raman thương mại và chế tạo sẽ trình bày trong phần cuối cùng của chương này.

Bảng 2.4: Hệ số khuếch đại G và thông số nhiễu phụ thuộc vào công suất bơm

P_{bơm} (mW)	Hệ số tạp âm NF (dB)	Hệ số khuếch đại G (dB)
200	11,12	2,0076
250	10,22	2,46768
300	9,54	2,88827
350	8,74	3,46388

400	7,97	4,13425
450	7,24	4,88535
500	6,67	5,58029
550	6,1	6,37701
600	5,61	7,12109
650	5,13	7,9494
700	4,75	8,65838
750	4,38	9,44808
800	4,09	10,09389
880	3,68	11,11524

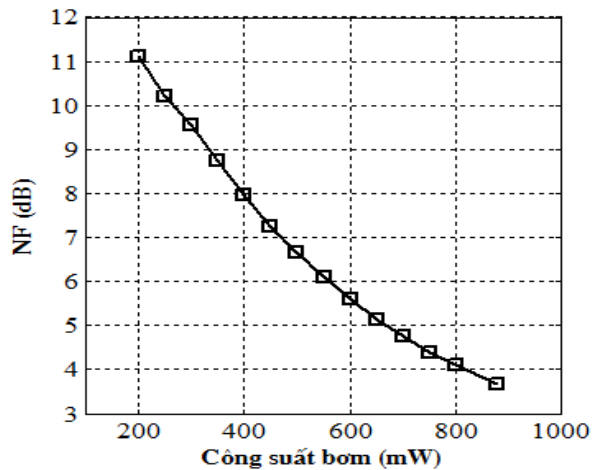
Hình 2.21 chỉ ra đường cong phụ thuộc của hệ số khuếch đại G vào công suất quang bơm tại bước sóng 1470-1471nm. Chúng tôi nhận thấy rằng đồ thị phụ thuộc $G(P)$ không thực sự tuyến tính, quy luật biến đổi của G theo P là phức tạp, có thể do nhiều yếu tố ảnh hưởng đến hệ số G trong môi trường sợi quang silica chưa được khảo sát kỹ lưỡng. Thí dụ, khi công suất quang bơm tăng từ 200 mW đến 400 mW, đường cong biểu thị theo quy luật mũ, tuy nhiên trong vùng công suất 400-800mW quy luật này bị phá vỡ, đường cong mũ gần như trở thành tuyến tính. Bản chất của các hiện tượng này cần được nghiên cứu kỹ hơn trong các công việc tiếp theo.



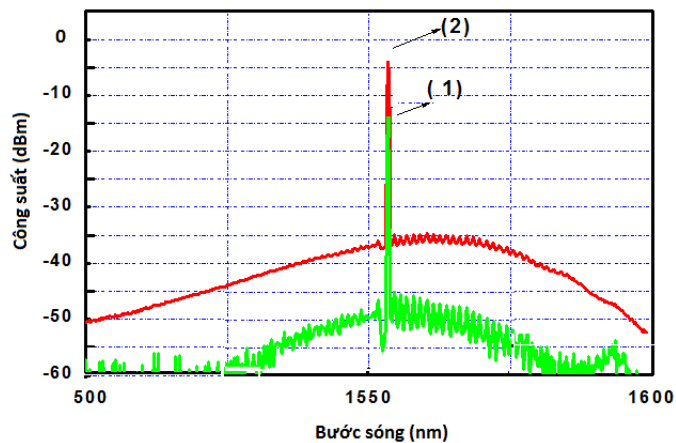
Hình 2.21: Hệ số khuếch đại G phụ thuộc công suất quang bơm

Hình 2.22 trình bày sự phụ thuộc của thông số NF vào công suất bơm. Sự phụ thuộc của NF vào công suất bơm là phi tuyến và phù hợp với các tính toán về NF cho khuếch đại quang Raman. Cần lưu ý rằng các kết quả nghiên cứu về khuếch đại quang Raman đã chỉ ra thông số NF của chúng luôn luôn nhỏ hơn NF của các bộ khuếch đại quang EDFA hoặc SOA đã sử dụng đại trà trên tuyến thông tin quang

hàng thập kỷ qua. Tuy nhiên, khi công suất bơm yếu, thông số NF khá cao, vì vậy tính ưu việt của khuếch đại quang Raman không còn (khi so sánh với NF của SOA trong khoảng 6-8dB và EDFA >4dB).



Hình 2.22: Thông số nhiễu NF phụ thuộc công suất bơm



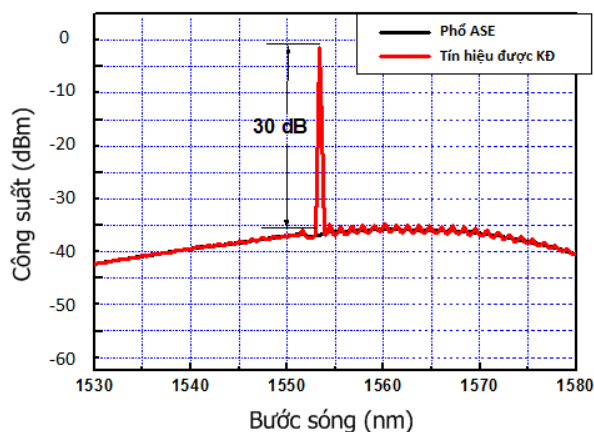
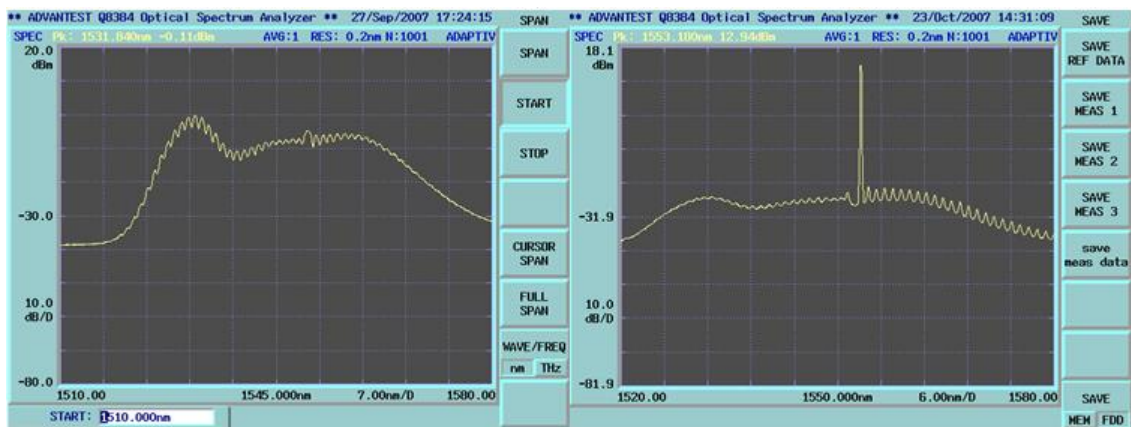
Hình 2.23: Phổ tín hiệu chưa khuếch đại (1) và tín hiệu đã được khuếch đại (2)

khi $L = 90 \text{ km}$, $P_p = 880 \text{ mW}$)

Hình 2.23 mô tả phổ phát xạ của tín hiệu quang chưa được khuếch đại (đường 1) và đã được khuếch đại bằng hiệu ứng tán xạ Raman cưỡng bức (đường 2) khi chiều dài sợi quang là 90km. Kết quả chỉ ra rằng tín hiệu đã được khuếch đại lên 11dB, độ rộng phổ và bước sóng tín hiệu không thay đổi trong quá trình khuếch đại.

So sánh phổ tín hiệu quang đã khuếch đại và phổ ASE của thiết bị, chúng tôi nhận thấy rằng mặc dù tín hiệu khuếch đại đã tăng lên 11 dB, nhưng phổ ASE

không thay đổi cả về cường độ và độ rộng phổ. Kết quả này khác với phổ tín hiệu đã khuếch đại của EDFA như sau: đối với EDFA khi tín hiệu quang được khuếch đại, cường độ phổ ASE giảm mạnh do nguyên lý phát xạ cưỡng bức trong môi trường 3 mức năng lượng có đảo mật độ phân bố, còn đối với RFA cường độ phổ ASE hầu như không thay đổi (xem Hình 2.24) do không có mô hình đảo mật độ phân bố các ion pha tạp được kích thích, phát xạ cưỡng bức về một hướng chỉ xảy ra cho một bước sóng phù hợp với dao động quay riêng biệt của phân tử mạng nền, còn các phát xạ Stokes do các dao động quay khác vẫn không thay đổi (phát xạ trong góc đặc 4π như cũ). Đây cũng là đặc trưng cơ bản để đánh giá thông số NF của khuếch đại quang Raman nhỏ hơn so với EDFA do cường độ ASE của chúng nhỏ hơn (SNR nhỏ).



Hình 2.24: Phổ ASE và phổ tín hiệu quang đã khuếch đại của EDFA (hình trên) và của khuếch đại quang Raman đã chế tạo (hình dưới)

2.9. Kết quả khảo sát khuếch đại quang Raman khi sử dụng sợi đậm

Chức năng của sợi đậm làm tăng cường hiệu ứng tán xạ Raman tự phát của nguồn bơm khi đưa vào trong sợi quang cùng với tín hiệu cần khuếch đại. Sợi đậm có cấu trúc đặc biệt về dẫn sóng (tạo bù trừ tán sắc mạnh) và thành phần pha tạp (nồng độ GeO_2 cao hơn so với sợi SMF-28), độ dài của sợi đậm tùy thuộc vào chức năng của bộ khuếch đại.

Trong các thiết bị khuếch đại quang Raman, hiện đang sử dụng tại Việt nam, sợi đậm có độ dài khoảng 70 - 100m và được ghép nối ngay trước nguồn laser bơm vào sợi. Trong thử nghiệm của chúng tôi, sợi đậm CAVO-OTTICO-SMR/KM1 (sợi được pha tạp 18% GeO_2) được sử dụng nhằm tăng cường hiệu ứng tán xạ Raman cường bức trong thiết bị. Các kết quả thí nghiệm thu được có giá trị công nghệ nhất định như: thu thập thông tin đầy đủ về vai trò của sợi đậm về tăng cường hệ số G và thông số NF trong thiết bị khuếch đại Raman bơm ngược và bơm cùng chiều, đánh giá kỹ thuật ghép nối sợi đậm trong cấu hình của khuếch đại...

Thực nghiệm cho thấy khi có sợi đậm nối với nguồn quang bơm, hệ số khuếch đại quang của thiết bị Raman đã tăng lên hơn 2 dB khi bơm công suất quang 300 mW và tăng đến 5 dB khi bơm ngược chiều với công suất quang 880 mW (trên độ dài sợi quang 90 km trong phòng thí nghiệm).

2.10. So sánh các thông số của khuếch đại Raman thương mại và chế tạo

Khuếch đại quang Raman đang sử dụng trên tuyến thông tin quang quân sự 1A & QB là loại RMPM1300 của hãng Alcatel – Lucent. Bộ khuếch đại này được sử dụng cho những tuyến có cự ly dài, tốc độ bit từ 10 Gb/s trở lên với thiết bị ghép bước sóng 1626LM. Nó được lắp vào trước bảng mạch khuếch đại đường dây phía đầu thu (LOFA) của thiết bị 1626LM (bơm ngược).

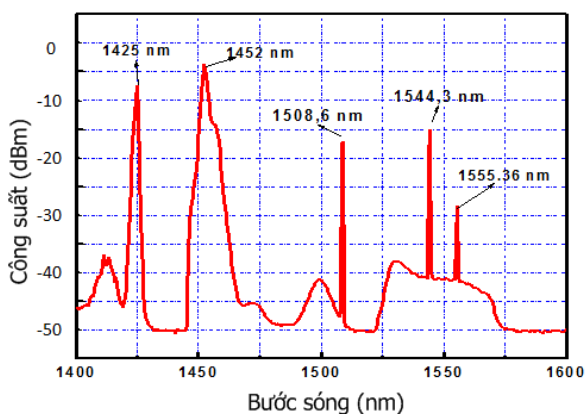


Hình 2.25: Mặt trước của bộ khuếch đại Raman RMPM1300

Các thông số kỹ thuật của Bộ khuếch đại:

- Bơm bằng kỹ thuật cộng công suất quang với 03 laser bán dẫn, công suất mỗi nguồn laser 500 mW, tổng cộng công suất bơm thực lớn hơn 1200mW.
- Bước sóng của các nguồn bơm: 1425,3 nm và 1452 +/- 0,3 nm (02 laser có phổ gần giống nhau).
- Vùng hệ số khuếch đại với 3 nguồn bơm trên sợi G.652 là khoảng 14,5 dB.
- Hệ số khuếch đại G tại công suất bơm 1200 mW là: 11dB
- Băng tần khuếch đại tín hiệu quang của thiết bị Raman RMPM1300 đang hoạt động kéo dài toàn bộ dải 1500-1570 nm với mục đích: khuếch đại tín hiệu giám sát quang (OSC) tại bước sóng 1508,6 nm và khuếch đại tín hiệu quang trong toàn dải 1530-1570 nm (băng C) của mạng WDM.
- Sử dụng sợi đệm E2000 với độ dài khoảng 70 – 100 m

Trong mạng thông tin quang WDM luôn tồn tại tín hiệu giám sát quang tại bước sóng quang 1508,6 nm tách rời hẳn băng tần tín hiệu thông tin 1530-1570 nm và tín hiệu quang chuẩn cho bước sóng WDM tại 1544,3 nm (nằm giữa vùng khuếch đại quang của EDFA), vì vậy khi không có tín hiệu thông tin lõi vào, phổ quang trong cáp quang vẫn tồn tại 02 bước sóng chuẩn 1508,6nm và 1544,3 nm.

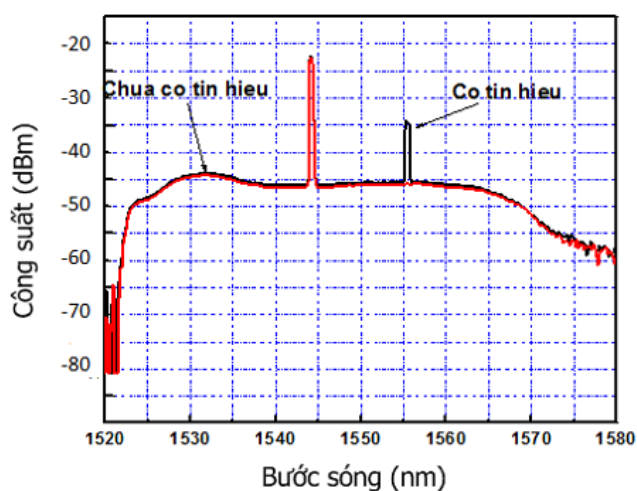


Hình 2.26: Phổ quang các loại có trong tuyến thông tin quang thực tế

Hình 2.26 trình bày tổng phổ quang trong tuyến thông tin quang sử dụng khuếch đại Raman RMPM1300 tại Bộ Tư lệnh Thông tin Liên lạc (TLTTLL), trong

đó hiển thị đầy đủ các bước sóng quang tồn tại trong tuyến thông tin quang WDM gồm: sóng bơm cho Raman (02 bước sóng), sóng giám sát quang OSC (1508,6 nm) sóng chuẩn bước sóng WDM (1544,3 nm) và sóng tín hiệu mang thông tin cần khuếch đại tại bước sóng 1555,36 nm.

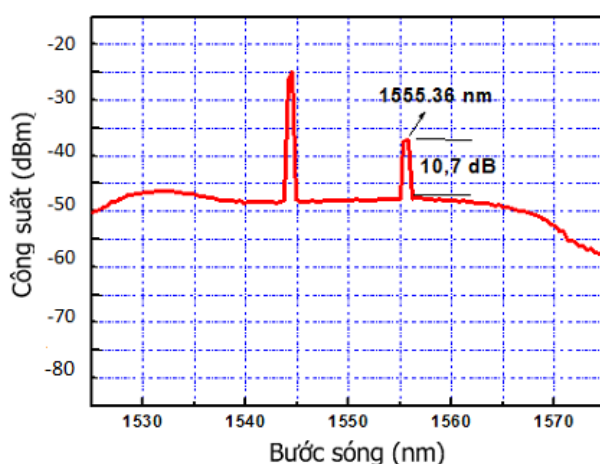
Hình 2.27 biểu diễn so sánh phổ quang không có tín hiệu và phổ tín hiệu quang khuếch đại bằng thiết bị khuếch đại quang Raman RMPM1300 đang hoạt động trên tuyến thông tin quang WDM. Chúng tôi nhận thấy cường độ phổ ASE (đường màu đỏ) không thay đổi khi có tín hiệu quang khuếch đại (đường màu đen) phù hợp với kết quả của luận án đã trình bày và giải thích trong mục 2.8. Các hiệu ứng vật lý đã được giải thích rõ ràng đối với sợi quang silica cấu trúc đơn một dựa trên phản xạ toàn phần, tuy nhiên còn có hiệu ứng mới trong tán xạ Raman khi sử dụng sợi quang tinh thể quang tử.



Hình 2.27: Phổ ASE và phổ tín hiệu quang đã khuếch đại của khuếch đại quang Raman thương mại đang sử dụng trên tuyến thực tế

Cần lưu ý rằng các tín hiệu quang có trong mạng (ngoài sóng bơm) đều được khuếch đại trong môi trường tán xạ Raman, tuy nhiên thông số quan trọng nhất là tín hiệu quang mang thông tin được khuếch đại. Hệ số G đo được trên tuyến sử dụng sợi G.652 với 3 nguồn bơm là 10-12 dB phù hợp với thông tin của nhà cung cấp thiết bị.

Hình 2.28 biểu diễn phổ quang trong tuyến thông tin quang đang hoạt động khi qua bộ lọc quang vào thiết bị hiển thị (monitor) để tính toán các thông số tín hiệu. Thành phần phổ quang đến bộ monitor chỉ còn tín hiệu chuẩn bước sóng và tín hiệu quang được khuếch đại bằng Raman. Chúng ta nhận thấy rằng tỷ số tín hiệu trên nhiễu của tín hiệu quang khuếch đại khoảng 10 dB đã đáp ứng được yêu cầu của tuyến thông tin.



Hình 2.28: Phổ tín hiệu quang đã khuếch đại của khuếch đại quang Raman qua bộ lọc vào bộ monitor để kiểm soát chất lượng tín hiệu

Bảng 2.5: So sánh bộ khuếch đại RMPM1300 và bộ khuếch đại chế tạo

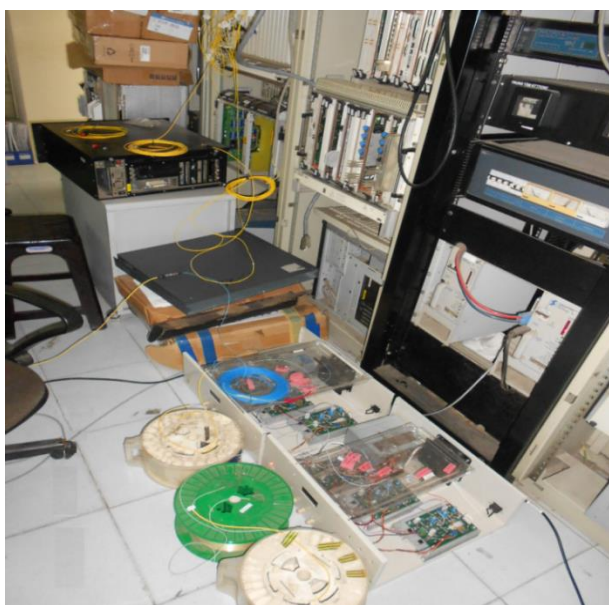
Các thông số so sánh	Bộ khuếch đại RMPM1300	Bộ khuếch đại chế tạo
Sợi quang sử dụng	G.652, G.653, G.654, G.655	G.652, G.653, G.654, G.655
Bước sóng bơm	1425,3 và 1452 nm	1470 và 1471 nm
Khoảng bước sóng tín hiệu	1530 – 1570 nm	1545 – 1585 nm
Khoảng bước sóng OSC	1500 - 1520	Ít hỗ trợ
Số bước sóng	1 – 40	1 – 40
Vùng công suất tín hiệu vào khi tắt bơm	-40 ÷ +5 dBm	-40 ÷ +10 dBm
Công suất 3 nguồn bơm kết hợp	> 1200 mW	< 1000 mW
Vùng hệ số khuếch đại – ba nguồn bơm trên sợi G.652	10 ÷ 18 dB	11 ÷ 16 dB
Hệ số NF tại công suất bơm 880mW, bơm ngược	< 3,7 dB	3,68 dB
Dòng cung cấp với 3 nguồn bơm	1,5 A	1,1 A
Nhiệt độ hoạt động	-5 ÷ 55 °C	0 ÷ 70 °C

Từ bảng so sánh chúng ta có thể thấy rằng bộ khuếch đại quang Raman do chúng tôi chế tạo có hệ số khuếch đại tương đương với bộ khuếch đại quang thương

mại đang sử dụng trên tuyến trong khi công suất bơm yêu cầu là thấp hơn và dòng cung cấp cho nguồn bơm cũng thấp hơn. Sở dĩ đạt được kết quả như vậy là do chúng tôi đã thiết kế và chế tạo được mạch điều khiển hai đại lượng: dòng bơm và nhiệt độ với độ chính xác cao (sử dụng cả hai phương pháp xử lý tín hiệu tương tự và tín hiệu số), sử dụng sợi đệm CAVO-OTTICO-SMR/KM1 với nồng độ pha tạp G_eO_2 cao (18%) để tăng cường hiệu ứng tán xạ Raman cưỡng bức và bù trừ tán sắc mạnh, giúp tăng cường hệ số khuếch đại G và cải thiện thông số NF.

2.11. Thử nghiệm khuếch đại quang Raman đã chế tạo trên tuyến thực

Chúng tôi đã tiến hành thử nghiệm bộ khuếch đại quang Raman trên tuyến WDM thực tế nhằm đánh giá các thông số của thiết bị hoạt động trên tuyến và so sánh với kết quả khảo sát tĩnh trong phòng thí nghiệm cũng như các kết quả mô phỏng. Hình 2.29 mô tả hệ thống thiết bị thông tin quang WDM tại Bộ TLTTLL để khảo sát các thông số của thiết bị khuếch đại quang Raman đã chế tạo.



Hình 2.29: Sơ đồ hệ thống thiết bị khảo sát khuếch đại quang Raman trên tuyến thông tin quang WDM thực tế

Nguồn tín hiệu quang để khảo sát gồm các bước sóng 1508,6 nm; 1544,3 nm và bước sóng tín hiệu quang 1555,36 nm nằm trong mạng lưới bước sóng chuẩn của mạng WDM theo tiêu chuẩn ITU. Chức năng của các bước sóng 1508,6 nm và

1544,3 nm đã được giải thích tại mục 2.10. Thực nghiệm tiến hành trong thời gian dài đủ để đánh giá độ ổn định của thiết bị khảo sát và các thông số được ghi nhận bởi thiết bị phân tích phổ OSA (Advantest Q8384) có độ phân giải phổ 0,01 nm và độ nhạy công suất quang -90 dBm. Các số liệu về hệ số khuếch đại quang, OSNR, và BER của tín hiệu được ghi nhận trên thiết bị monitor chuyên dụng cho mạng thông tin quang WDM.

Nguồn bơm cho khuếch đại quang Raman gồm 02 laser bước sóng 1470 nm công suất danh định 400 mW (thực tế đã khảo sát đạt 350 mW khi bơm tại dòng 1197 mA) và 01 laser bước sóng 1471 nm công suất danh định 210 mW (thực tế đạt 180 mW tại dòng bơm 857 mA).

Sợi quang đơn mode SMF-28 truyền dẫn tín hiệu là môi trường tán xạ Raman có độ dài tổng cộng 90 km. Cấu hình bơm được sử dụng là bơm ngược gồm 02 laser bước sóng 1470 nm (công suất 350 mW) và 01 laser bước sóng 1471 nm (công suất 180 mW) được kết hợp với nhau thông qua bộ cộng công suất quang tại điểm cuối của tuyến truyền dẫn quang (90km). Sợi đệm CAVO-OTTICO-SMR/KM1 (E2000) dài 70 m với nồng độ pha tạp G_eO_2 18% được ghép nối với lõi ra của bộ cộng công suất quang và sau đó được nối vào sợi quang tại điểm cuối của tuyến truyền dẫn. Tín hiệu quang mang thông tin cần khuếch đại có thể điều chỉnh kiểu bật/tắt (on/off) nhằm khảo sát hệ số khuếch đại quang và tỷ số lỗi bit BER của bản thân tín hiệu. Cần lưu ý rằng hai bước sóng định thời (sóng giám sát quang) và sóng chuẩn bước sóng WDM (1544,3 nm) luôn luôn có mặt trong tuyến WDM, dù có tín hiệu thông tin hay không.

Hình 2.30 trình bày kết quả đo hệ số khuếch đại quang của thiết bị Raman đã chế tạo ghi nhận trên thiết bị monitor của hệ thống kiểm tra tuyến TTQ. Công suất tín hiệu quang lõi vào khuếch đại được ghi nhận là -21,5 dBm và công suất tín hiệu lõi ra đạt -5,5 dBm. Như vậy, hệ số khuếch đại G cho tín hiệu bước sóng 1555,36 nm đạt 16 dB.

Location	Measurement point	Measurement	Value	Unit
r01sr1/board#10	Theoretical Flatness constant		37.3	dB
r01sr1/board#10	unit temperature	Temperature	30.0	°C
r01sr1/board#10	VOA attenuation		1.5	dB
r01sr1/board#10	2nd stage output	Transmission power	15.0	dBm
r01sr1/board#10	1st stage output power	Transmission power	1.5	dBm
r01sr1/board#10	2nd stage input	Reception power	-0.2	dBm
r01sr1/board#10	1st stage input	Reception power	-21.5	dBm

Refresh

Print Export cabling to xml Cancel Help

Location	Measurement point	Measurement	Value	Unit
r01sr1/board#10	Theoretical Flatness constant		37.3	dB
r01sr1/board#10	unit temperature	Temperature	30.0	°C
r01sr1/board#10	VOA attenuation		14.7	dB
r01sr1/board#10	2nd stage output	Transmission power	15.0	dBm
r01sr1/board#10	1st stage output power	Transmission power	1.5	dBm
r01sr1/board#10	2nd stage input	Reception power	-13.7	dBm
r01sr1/board#10	1st stage input	Reception power	-5.5	dBm

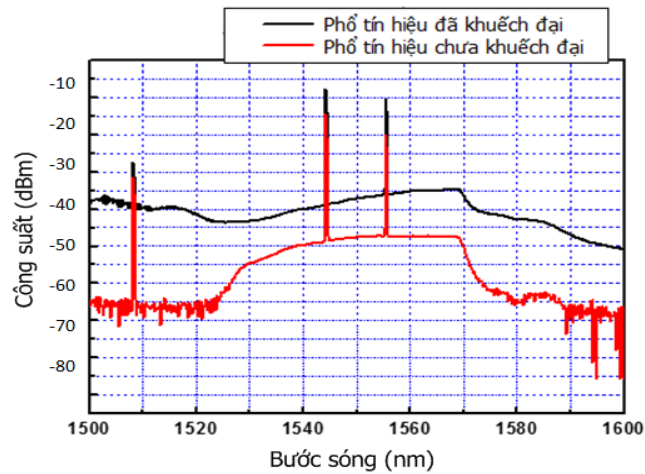
Refresh

Print Export cabling to xml Cancel Help

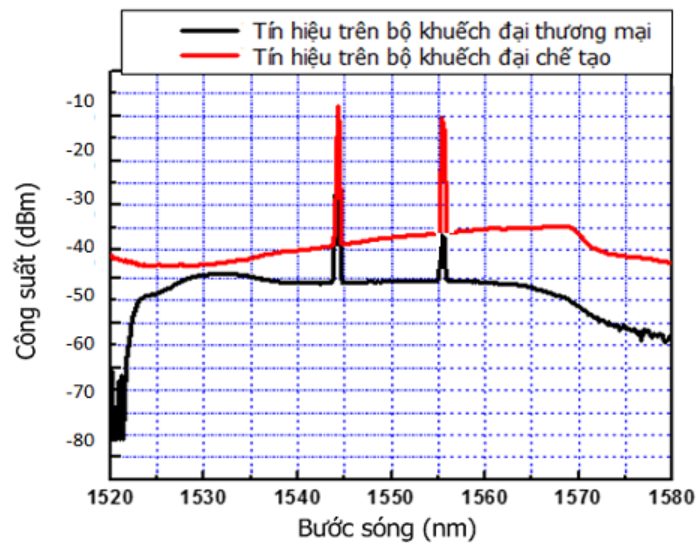
Hình 2.30: Kết quả đo hệ số khuếch đại quang Raman trên tuyến TTQ thực tế.

Các kết quả thu nhận được về hệ số khuếch đại G tương thích với thiết bị khuếch đại quang Raman hiện đang sử dụng trên tuyến. Cần lưu ý rằng trong thiết bị khuếch đại quang thương mại đang sử dụng, bước sóng bơm cho Raman là 1452 nm để có hệ số khuếch đại đỉnh nằm trong khoảng 1530-1570 nm, còn trong thiết bị được chế tạo trong khuôn khổ luận án, bước sóng bơm 1470 nm sẽ có đỉnh khuếch đại dự kiến nằm trong vùng bước sóng 1545-1585 nm của lưới bước sóng cho mạng WDM.

Hình 2.31 biểu thị phổ của tín hiệu khuếch đại cho hai bước sóng 1544,3 nm và 1555,36 nm trong tuyến WDM. Bước sóng định thời 1508.6 nm được khuếch đại rất yếu (2dB) trong thiết bị khuếch đại Raman do chúng tôi chế tạo, lý do là nguồn bơm Raman không thích hợp (1470 nm) cho sóng Stokes ở bước sóng này.



Hình 2.31: Phổ tín hiệu quang trong tuyến WDM đã được khuếch đại (đường trên) và chưa được khuếch đại (đường dưới) bằng hiệu ứng tán xạ Raman cường độ dọc sợi quang đơn một dài 90 km



Hình 2.32: Phổ tín hiệu khuếch đại bằng khuếch đại Raman thương mại (đường màu đen) và do luận án chế tạo (đường màu đỏ)

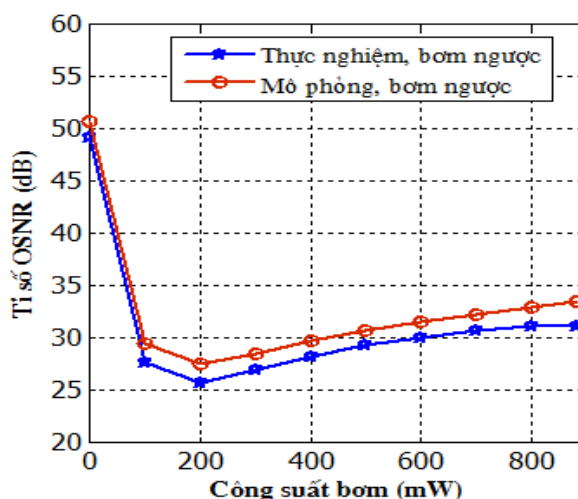
Hình 2.32 trình bày kết quả đo phổ tín hiệu khuếch đại trên thiết bị Raman thương mại và bộ khuếch đại chế tạo. Các bước sóng khuếch đại hoàn toàn trùng khớp nhau về phổ, tuy nhiên nền ASE có khác nhau đôi chút nhưng điều này không ảnh hưởng nhiều đến tỉ số SNR giữa hai thiết bị. Điều này có thể lý giải như sau: mặc dù phổ khuếch đại của bộ khuếch đại Raman thương mại phẳng hơn và có nền

hiệu ASE thấp hơn nhưng đổi lại bộ khuếch đại chế tạo lại cho công suất tín hiệu được khuếch đại lớn hơn nên về cơ bản tỉ số SNR không khác nhau nhiều.

Nhận xét về kết quả thử nghiệm trên tuyến thông tin quang WDM thực tế cho thấy phổ sóng Stokes của hai bộ khuếch đại quang Raman thương mại (đang sử dụng trên tuyến) và thiết bị đã chế tạo của đề tài khác nhau do nguồn bơm với bước sóng lệch đến 20 nm. Với bước sóng bơm 1452 nm (thiết bị thương mại RMPM1300) vùng sóng khuếch đại đạt hiệu quả cao trong dải từ 1525 nm đến 1565 nm, nhưng với bước sóng bơm 1470nm (thiết bị của đề tài chế tạo) khuếch đại quang tối ưu trong vùng 1540- 1570nm. Kết quả này phù hợp với các kết quả nghiên cứu đã công bố về phát xạ sóng Stokes trong sợi quang silica pha tạp Germani khi bơm tổ hợp đa bước sóng. Đây cũng là kết quả thực nghiệm thu được tại Việt nam để khẳng định sử dụng hiệu ứng tán xạ Raman cưỡng bức có thể sắp xếp vùng sóng khuếch đại hiệu quả bằng bước sóng bơm mà không cần phải lựa chọn môi trường pha tạp như trong các bộ khuếch đại quang EDFA hoặc SOA thông thường. Ưu điểm của khuếch đại Raman nổi bật trong mạng thông tin WDM băng rộng do chúng luôn có sóng định thời (sóng giám sát quang OSC) và sóng chuẩn lưới bước sóng không bị hiệu ứng xuyên kênh như khi sử dụng các khuếch đại quang khác.

Hình 2.33 trình bày kết quả đạt được từ thực nghiệm và mô phỏng (được thực hiện trong Chương 4) cho tỉ lệ tín hiệu trên tạp âm quang (OSNR) trong trường hợp bơm ngược khi đo tại lối ra của bộ khuếch đại quang Raman. Như chúng ta có thể thấy trên hình, khi sóng bơm chưa được đưa vào sợi quang thì tỉ số OSNR là lớn nhất. Sau đó OSNR giảm theo hàm mũ trong cả hai trường hợp khi công suất bơm nhỏ hơn 200 mW. Điều này là bởi vì công suất bơm trên vùng này là yếu và không thể bù được suy hao tín hiệu khi nó truyền qua sợi quang. Khi công suất bơm lớn hơn 200 mW, OSNR tăng nhanh trong cả hai trường hợp thực nghiệm và mô phỏng. Tuy nhiên tại công suất bơm lớn hơn 800 mW thì trong trường hợp thực nghiệm OSNR có khuynh hướng giảm, điều này là bởi vì tán xạ Rayleigh kép đáng kể hơn tại mức công suất bơm cao hơn, đặc biệt là trong trường hợp bơm ngược. Trong khi

hiệu ứng này không được xem xét trong trường hợp mô phỏng, do đó hai đường cong là không trùng nhau. Điều này một lần nữa cho thấy sự hợp lý của việc sử dụng các bộ khuếch đại Raman được bơm bằng công suất thấp cho các mạng có khoảng cách trung bình và nhỏ (tránh ảnh hưởng của nhiễu).



Hình 2.33: Tỉ số OSNR phụ thuộc công suất bơm trong trường hợp bơm ngược

2.12. Kết luận và đề xuất các phương án chế tạo khuếch đại quang Raman phục vụ tuyến thông tin quang WDM băng rộng

Chương này đã hoàn thành việc thiết kế và chế tạo bộ khuếch đại Raman sử dụng laser bán dẫn có công suất 350 mW, có độ ổn định và công suất phát quang $\pm 1\%$, ổn định nhiệt độ để laser bơm $\pm 0,1^{\circ}\text{C}$ tại chế độ dòng bơm cho laser đến 1200 mA. Nguồn laser bơm công suất cao kiểu cộng công suất được chế tạo trong một hộp để thuận tiện cho lắp ráp nhiều laser có điều khiển đồng bộ và thích hợp với thiết bị khuếch đại quang sử dụng trên tuyến thông tin quang thực tế.

Bên cạnh đó, chúng tôi cũng đã thiết kế và chế tạo thành công tổ hợp quang tử cho khuếch đại quang sợi Raman theo cấu trúc phân bố kiểu cộng công suất quang. Sợi quang thông tin tiêu chuẩn SMF-28 kết hợp với sợi đệm đã được thiết kế để đưa vào thử nghiệm tán xạ Raman cưỡng bức. Các linh kiện quang tử thụ động đã được khảo sát kỹ để phù hợp với các bước sóng Stokes và bước sóng tín hiệu nhằm thu được hệ số khuếch đại quang tối ưu với công suất quang hiện có.

Các kết quả nghiên cứu thiết kế, chế tạo và khảo sát khuếch đại quang Raman trên tuyến thông tin WDM cho phép có thể đưa ra đề xuất phương án chế tạo loạt nhỏ các thiết bị khuếch đại quang Raman dựa trên các tiêu chí sau:

- Mạng thông tin quang WDM luôn có bước sóng định thời sử dụng bước sóng 1508 nm (nằm cách xa các bước sóng mang thông tin khác), vì vậy khuếch đại quang cần phải khuếch đại cả tín hiệu này. Phương án tối ưu là sử dụng sóng bơm Raman trong vùng 1420-1430 nm để khuếch đại tín hiệu quang trong vùng 1500-1520 nm.
- Mạng thông tin quang WDM có bước sóng chuẩn để định dạng lưới bước sóng thông tin (thường nằm trong vùng “lỗm” của khuếch đại EDFA là 1545 nm), khuếch đại quang bắt buộc phải khuếch đại bước sóng này với cường độ đủ lớn cho toàn tuyến. Các bước sóng bơm Raman trong vùng 1450-1470 nm đáp ứng tốt yêu cầu này.
- Để mở rộng băng tần khuếch đại quang cho toàn dải 1525-1600 nm, cấu hình bơm đa bước sóng cần được sử dụng. Công suất quang bơm có yêu cầu > 300 mW cho độ dài sợi quang > 30km. Hệ số khuếch đại Raman phụ thuộc bước sóng bơm là thông số tham khảo có ích cho thiết kế khuếch đại Raman. Kết quả so sánh băng tần khuếch đại Raman khi bơm bằng bước sóng 1452 nm và 1470 nm cho thấy hoàn toàn có thể mở rộng băng tần khuếch đại quang đến vài chục nano-mét trong vùng bước sóng 1550 nm. Đây là ưu điểm chính và quan trọng của khuếch đại quang Raman cho thông tin WDM.
- Kết hợp các bộ khuếch đại quang sợi EDFA và RFA cho phép nâng cao hiệu năng của tuyến thông tin quang WDM cả về băng tần, hệ số tạp âm NF và điều chỉnh công suất tín hiệu thu.

Kết quả mô phỏng so sánh với thực nghiệm bộ khuếch đại quang Raman trên tuyến truyền dẫn thông tin thực tế nêu trên sẽ được trình bày trong Chương 4 của luận án. Ngoài ra, chương này cũng tiến hành thử nghiệm bộ khuếch đại quang Raman trên tuyến truyền dẫn WDM thực tế, các kết quả thu được phản ánh rằng bộ khuếch đại chế tạo đáp ứng được các tiêu chí đặt ra như hệ số khuếch đại cao (lên đến 16dB cho bước sóng 1555,36nm), có phổ khuếch đại phù hợp với các bộ

khuếch đại đang được sử dụng trên tuyến, khuếch đại đồng thời bước sóng định thời 1508,6nm (tuy chưa cao do nguồn bơm có bước sóng khác với nguồn bơm đang được sử dụng trên tuyến thực).

CHƯƠNG 3

NÂNG CAO HIỆU NĂNG MẠNG TRUY NHẬP QUANG ĐA BƯỚC SÓNG SỬ DỤNG KỸ THUẬT OCDMA VÀ EDFA

3.1. Xây dựng mô hình mạng LR-PON sử dụng OCDMA và EDFA

Như đã trình bày trong Chương 1, mặc dù có một số kiến trúc mạng LR-PON đã được triển khai để tăng khoảng cách truyền dẫn và tỉ lệ chia trong thời gian gần đây như: LR-PON dựa trên TDM (SuperPON); LR-PON dựa trên GPON; LR-PON dựa trên WDM, CWDM và DWDM. Tuy nhiên, các giải pháp này chưa đem lại bằng chứng thực sự lớn cho người sử dụng, ngoài ra, trong các cấu hình này đã đề cập đến việc sử dụng các bộ khuếch đại quang để tăng khoảng cách truyền dẫn cho mạng nhưng chưa giải quyết được bài toán làm thế nào để giảm được nhiễu do các bộ khuếch đại gây ra. Chính vì vậy, trong chương này chúng tôi đề xuất một kiến trúc mạng truy nhập quang thụ động đa bước sóng khoảng cách dài (LR-PON) sử dụng kỹ thuật mã hóa biên độ phổ kết hợp với đa truy nhập phân chia theo mã quang (SAC/OCDMA). Để đạt được khoảng cách truyền dẫn dài hơn hợp nhất phần mạng metro và mạng truy nhập giúp giảm giá thành cho nhà cung cấp dịch vụ mạng, chúng tôi đề xuất sử dụng một bộ khuếch đại EDFA được đặt trên tuyến giữa thiết bị OLT và thiết bị ONU. Tuy nhiên, khi sử dụng một bộ khuếch đại quang như vậy cũng sẽ sinh ra nhiễu phát xạ tự phát ASE làm giới hạn hiệu năng của hệ thống. Dựa trên mô hình mạng được đề xuất, chúng tôi phân tích các ảnh hưởng của nhiễu EDFA, tức là nhiễu ASE đến hiệu năng của mạng. Các nhiễu khác như nhiễu lượng tử, nhiễu nhiệt, nhiễu trộn và nhiễu đa truy nhập (MAI) cũng được nhắc đến trong phân tích lý thuyết và mô phỏng của chúng tôi. Để đạt được hiệu năng tốt nhất chúng tôi sẽ cố gắng tìm ra vị trí tốt nhất để đặt các bộ khuếch đại EDFA trên tuyến.

3.1.1. Nhiễu gây ra bởi bộ khuếch đại EDFA

Như đã phân tích trong phần 1.7 nhiều chủ yếu trong bộ khuếch đại quang là nhiễu phát xạ tự phát được khuếch đại (ASE). Nhiễu ASE sẽ tạo ra một phổ nền rộng xung quanh tín hiệu được khuếch đại, và bản thân chúng cũng được khuếch đại khi đi qua bộ khuếch đại [61].

Ở đây bộ khuếch đại được mô hình như một giản đồ ba mức năng lượng [97], có ba mức phân bố của các nguyên tử Erbium cân quan tâm đó là: 1) trạng thái nền với mật độ phân bố n_1 ; 2) mức giả bền với mật độ phân bố n_2 ; 3) mức bơm với mật độ phân bố n_3 . Trên thực tế, việc chuyển trạng thái từ 3 về 2 thì lớn hơn rất nhiều các chuyển tiếp về trạng thái nền (3 về 1) hoặc tốc độ phát xạ tự phát từ trạng thái 2 do đó $n_3 \approx 0$. Phương trình tốc độ miêu tả các ảnh hưởng của công suất sóng bơm (P_p), tín hiệu (P_s) và ASE (P_{ASE}) giảm theo n_2 là [97]:

$$\frac{\partial n_2(z,t)}{\partial t} = \frac{\Gamma_s \sigma_{12}}{hf_s A} (P_s + P_{ASE}) n_1 - \frac{\Gamma_s \sigma_{21}}{hf_s A} (P_s + P_{ASE}) n_2 - \frac{n_2}{\tau} - \frac{\Gamma_p \sigma_{13}}{hf_p A} P_p n_2 \quad (3.1)$$

A là thiết diện hiệu dụng của lõi sợi quang, σ_{12} là thiết diện hấp thụ và σ_{21} thiết diện phát xạ đối với sợi Erbium, Γ là hệ số giam quang (là phần chồng chập của tín hiệu/sóng bơm lên lõi sợi), nếu Γ mà lớn thì nhiễu ASE sẽ tăng. Trong các loại sợi hiện nay chúng ta có thể bỏ qua tán xạ và các suy hao khác, vì vậy các phương trình biến đổi của sóng bơm, tín hiệu và ASE trong sợi sẽ là [97]:

$$\frac{\partial P_s(z,t)}{\partial z} = P_p \Gamma_s (\sigma_{21} n_2 - \sigma_{12} n_1) \quad ; \quad \frac{\partial P_p(z,t)}{\partial z} = P_p \Gamma_p (\sigma_{13} n_3) \quad (3.2)$$

$$\frac{\partial P_{ASE}(z,t)}{\partial z} = P_{ASE} \Gamma_s (\sigma_{21} n_2 - \sigma_{12} n_1) + 2\sigma_{21} \Gamma_s hf_s \Delta f n_2 \quad (3.3)$$

Mật độ phổ công suất của nhiễu ASE được tính theo công thức:

$$S_{ASE}(f) = hf n_{sp} [G(f) - 1] = P_{ASE} / B_{opt} \quad (3.4)$$

P_{ASE} là công suất nhiễu ASE trong băng thông quang B_{opt} , n_{sp} là hệ số đảo lộn mật độ trạng thái ion đất hiếm Erbium.

$$n_{sp} = \frac{n_2}{n_2 - n_1} \quad (3.5)$$

Vì ASE được tạo ra trước photodiode, nó làm tăng ba thành phần nhiễu khác nhau trong bộ thu quang. Vì dòng quang điện bao gồm một số tín hiệu trộn giữa tín hiệu và các trường nhiễu nên trường quang tổng cộng = trường tín hiệu + trường nhiễu tự phát.

$$i_{tot} \propto (E_s + E_n)^2 = E_s^2 + E_n^2 + 2E_s E_n \quad (3.6)$$

Hai thành phần đầu trong phương trình (3.6) là tín hiệu và nhiễu, đại lượng thứ ba là trộn giữa tín hiệu và nhiễu (beat noise). Các thành phần này có thể rơi vào băng thông của bộ thu và làm giảm tỉ số SNR.

Khi đó công suất tại lối vào của Photodiode sẽ trở thành:

$$P_{in} = GP_{s,in} + P_{ASE} = GP_{s,in} + S_{ASE}B_{opt} \quad (3.7)$$

Và phương sai dòng nhiễu lượng tử bình phương trung bình gây ra bởi tín hiệu và ASE sẽ là:

$$\sigma_{shot}^2 = \sigma_{shot-S}^2 + \sigma_{shot-ASE}^2 = 2q\mathcal{R}GP_{s,in}B_e + 2q\mathcal{R}S_{ASE}\Delta f_{opt}B_e \quad (3.8)$$

Ở đây B_e là băng thông điện của bộ thu, R là đáp ứng của bộ thu được tính theo đơn vị A/W, Δf_{opt} là băng thông quang của bộ lọc đặt trước photodiode.

Hai thành phần nhiễu khác đến từ việc trộn giữa các thành phần tần số khác nhau giữa tín hiệu và ASE. Vì tín hiệu và ASE có tần số quang khác nhau nên nhiễu trộn giữa chúng là:

$$\sigma_{s-ASE}^2 = 4(\mathcal{R}GP_{s,in})(\mathcal{R}S_{ASE}B_e) \quad (3.9)$$

Ngoài ra nhiễu ASE trải ra trên một vùng tần số rộng nên nó có thể trộn với chính nó và làm tăng dòng nhiễu tại bộ thu:

$$\sigma_{ASE-ASE}^2 = \mathcal{R}^2 S_{ASE}^2 (2\Delta f_{opt} - B_e)B_e \quad (3.10)$$

Vậy phương sai dòng nhiễu tổng cộng tại bộ thu sẽ là:

$$\sigma_{total}^2 = \sigma_T^2 + \sigma_{shot-s}^2 + \sigma_{shot-ASE}^2 + \sigma_{s-ASE}^2 + \sigma_{ASE-ASE}^2 \quad (3.11)$$

Ở đây nhiễu nhiệt σ_T^2 được cho bởi phương trình:

$$\sigma_T^2 = \frac{4k_B T}{R_L} B_e \quad (3.12)$$

Nhiều nhiễu thông thường có thể bỏ qua khi khuếch đại đủ lớn. Vì công suất tín hiệu được khuếch đại $GP_{s,in}$ lớn hơn nhiễu công suất nhiễu ASE ($S_{ASE}B_{opt}$). Nhiễu trộn ASE-ASE nhỏ đáng kể so với nhiễu trộn giữa signal-ASE nên:

$$\sigma_{shot}^2 \approx 2q\Re GP_{s,in} B_e \quad (3.13)$$

Tỉ số SNR tại lối ra photodiode là:

$$\left(\frac{S}{N}\right)_{out} = \frac{\sigma_{ph}^2}{\sigma_{total}^2} = \frac{\Re^2 G^2 P_{s,in}^2}{\sigma_{total}^2} \approx \frac{\Re P_{s,in}}{2qB_e} \frac{G}{1 + 2\eta n_{sp}(G-1)} \quad (3.14)$$

Ở đây η là hiệu suất lượng tử của photodiode và phương sai của dòng quang điện là

$$\sigma_{ph}^2 = \Re^2 G^2 P_{s,in}^2 \quad (3.15)$$

Mặt khác tỉ số SNR tại đầu vào là:

$$\left(\frac{S}{N}\right)_{in} = \frac{\Re P_{s,in}}{2qB_e} \quad (3.16)$$

Hệ số Noise figure được xác định như sau:

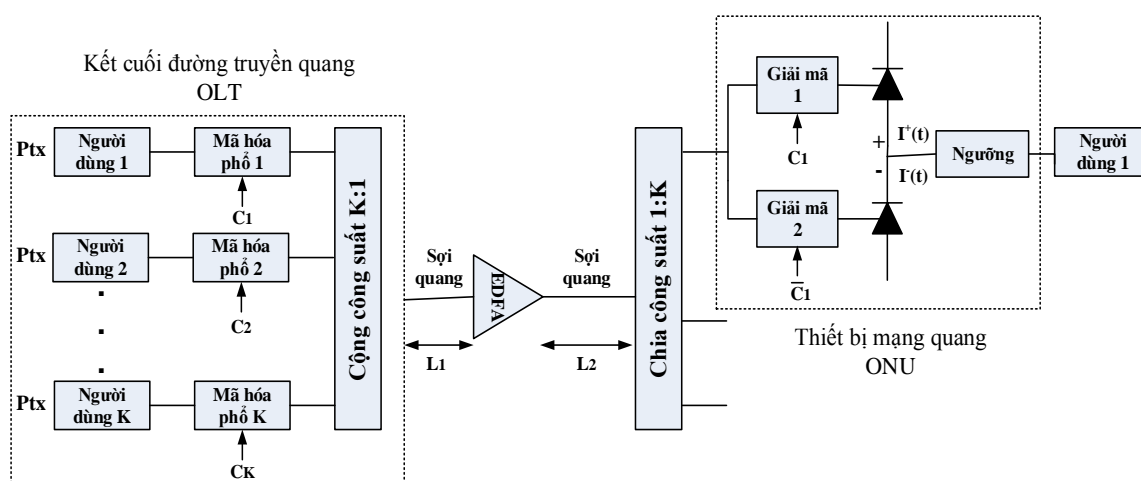
$$Noise\ figure = F_{EDFA} = \frac{(S/N)_{in}}{(S/N)_{out}} = \frac{1 + 2n_{sp}(G-1)}{G} \quad (3.17)$$

Khi G lớn thì biểu thức trở thành $2n_{sp}$. Một bộ khuếch đại hoàn hảo có $n_{sp} = 1$, vì vậy $NF=2$ (hay 3dB), giả sử rằng $\eta = 1$, tức là sử dụng một bộ thu lý tưởng với bộ khuếch đại hoàn hảo sẽ làm giảm tỉ số SNR đi một nửa. Thông thường n_{sp} xung quanh 2, SNR đầu vào sẽ giảm đi 4 lần, một bộ EDFA thực tế có NF khoảng 4 – 5 dB.

3.1.2. Phân tích lý thuyết

Kiến trúc mạng LR-PON dựa trên kỹ thuật SAC/OCDMA được minh họa trong Hình 3.1. Nó bao gồm một sợi quang dùng chung xuất phát từ OLT, tại điểm gần thiết bị tiền khách hàng, một bộ chia quang được sử dụng để kết nối mỗi ONU với sợi quang chính. Tại OLT, dữ liệu luồng xuống được gửi tới K người dùng sẽ được mã hóa bởi các bộ mã hóa phổ, các bộ mã hóa này được xây dựng từ cấu trúc cách tử Bragg [98]. Các bộ mã hóa phổ được điều khiển bởi các mã khác nhau được ký hiệu là C_m với $m = 1, 2, \dots, K$. Tại mỗi bộ mã hóa phổ một nguồn quang băng rộng (nhiều bước sóng), có số bước sóng là N_W , sẽ được điều chế theo kiểu khóa bật-tắt (OOK) bằng dữ liệu nhị phân. Tiếp theo, tùy thuộc vào từ mã (C_m), các bước sóng tương ứng với chip bằng 1 trong từ mã sẽ bị chặn lại, trong khi các bước sóng khác thì cho phép truyền qua. Kết quả là, mỗi bit nhị phân “1” được biểu diễn bởi một xung quang đa bước sóng trong khi sẽ không có tín hiệu được phát đi nếu bit nhị phân là “0”. Xung đa bước sóng từ mỗi bộ mã hóa sau đó được kết hợp với nhau tại bộ kết hợp công suất K: 1 và rồi chúng được truyền vào sợi quang.

Để bù lại công suất bị mất mát trên sợi quang và tại các bộ ghép nối, một bộ khuếch đại quang EDFA được đặt trên tuyến tại khoảng cách L_1 (km) tính từ OLT trong khi khoảng cách từ EDFA đến bộ chia là L_2 (km). Tất cả các bước sóng sẽ được khuếch đại đồng thời nhờ tính chất băng rộng của bộ khuếch đại. Hệ số khuếch đại trung bình của bộ khuếch đại quang được ký hiệu là G.



Hình 3.1: Sơ đồ khối hệ thống mạng LR-PON dựa trên SAC/OCDM

Mỗi thiết bị ONU sẽ nhận các tín hiệu không chỉ từ bộ mã hóa mong muốn (tức là tín hiệu dữ liệu của nó) mà còn nhận từ các bộ mã hóa còn lại (tức là tín hiệu nhiễu đa truy nhập MAI). Có hai bộ giải mã tại mỗi ONU, bộ giải mã thứ nhất có tính chất giống như bộ mã hóa trước đó, trong khi bộ giải mã thứ hai có tính chất ngược lại (tính chất bù). Điều này nghĩa là tất cả bước sóng tương ứng với các chip bằng “0” của (C_m) bị chặn lại bởi bộ giải mã thứ hai.

Các từ mã được sử dụng trong các hệ thống SAC/OCDMA được thiết kế có giá trị tương quan chéo cùng pha cố định vì vậy mà số bước sóng đi qua mỗi bộ giải mã trong trường hợp của một tín hiệu nhiễu (từ các bộ giải mã không mong muốn) là giống nhau. Bởi vì tín hiệu được giải mã từ hai bộ giải mã được tách sóng bởi hai photodiode (PD1 và PD2) được kết nối theo cơ chế cân bằng trên nhánh dương và nhánh âm, do đó tất cả các tín hiệu nhiễu (tức là MAI) sẽ được khử [99].

Một vài loại mã có thể được sử dụng cho hệ thống SAE/OCDMA bao gồm chuỗi m (m -sequence), mã Hadamard và mã đoàn bậc hai sửa đổi (MQC). Mỗi một bộ mã có thể được biểu diễn bằng độ dài, trọng số và hệ số tương quan chéo cùng pha của nó N_c, w, μ . Trong chuỗi m , $w = (N_c + 1)/2$ và $\mu = (N_c + 1)/4$; trọng số và hệ số tương quan chéo cùng pha của mã Hadamard là $N_c/2$ và $N_c/4$. Trong mã MQC, $\mu = 1$, với một số nguyên tố lẻ p , chúng ta có chiều dài mã $N_c = p^2 + p$ và trọng số $w = p + 1$. Cấu trúc của các mã này được trình bày trong [99] [36] [100].

Trong hệ thống này, chúng tôi sử dụng mã Hadamard. Mã này thu được bằng cách mỗi một từ mã là một hàng trong ma trận Hadamard [101]. Như chúng ta đã biết một ma trận Hadamard với N_c hàng, N_c cột ($N_c \times N_c$) với các số ‘0’ và ‘1’ có tính chất là bất kỳ một hàng nào đều khác những hàng khác chính xác $N_c/2$ vị trí. Nghĩa là tất cả các hàng ngoại trừ hàng đầu tiên đều chứa $N_c/2$ số ‘0’ và $N_c/2$ số ‘1’. Ví dụ với $N_c = 8$ chúng ta có ma trận như dưới đây.

Gọi $\mu = \sum_{i=1}^N x_i y_i$ là hệ số tương quan chéo cùng pha của hai véc tơ từ mã khác nhau trong ma trận $C_m = (x_1, x_2, \dots, x_N)$ và $C_n = (y_1, y_2, \dots, y_N)$ thì μ có thể được biểu diễn theo độ dài N_c của nó, và kí hiệu mã bằng biểu thức (N_c, w, μ) với w

là trọng số của từ mã thì bộ mã như vậy sẽ cho phép $N_c - 1$ người dùng đồng thời (trừ mã đầu tiên chứa toàn '1' sẽ bị loại bỏ). Với H_8 ở trên chúng ta có $N_c = 8$; $w = 4$; $\mu = 2$ và ta sẽ có tất cả 7 từ mã tương ứng với 7 người dùng.

$$H_8 = \begin{pmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 \\ 1 & 1 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 1 \\ 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 \\ 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 1 & 1 & 0 \end{pmatrix}$$

Gọi C_m và C_n là hai véc tơ mã, thì tương quan giữa chúng được biểu diễn bằng biểu thức:

$$R_{C_m, C_n} = \sum_{i=1}^{N_c} (C_{m,i} C_{n,i}) = \begin{cases} N_c / 2 & (m = n) \\ N_c / 4 & (m \neq n) \end{cases} \quad (3.18)$$

Gọi \mathcal{R} là đáp ứng (Responsivity) của photodiode và P_{tx} là công suất quang phát, N_w là số bước sóng trong phổ ánh sáng, K là số người dùng hoạt động, dòng dữ liệu được tạo ra bởi tín hiệu dữ liệu (của người dùng đang xét) quang tại lối ra của PD1 và PD2 sẽ là:

$$\begin{aligned} I_{data}^+ &= \frac{1}{2K} \mathcal{R} G \frac{P_{tx}}{N_w} (N_w - \frac{N_c}{2}) 10^{-\alpha(L_1+L_2)/10} \\ I_{data}^- &= \frac{1}{2K} \mathcal{R} G \frac{P_{tx}}{N_w} (N_w - N_c) 10^{-\alpha(L_1+L_2)/10} \end{aligned} \quad (3.19)$$

Ở đây α là hệ số suy hao sợi quang tính theo đơn vị dB/km. Vì vậy dòng dữ liệu tổng cộng sẽ là:

$$I_{data} = I_{data}^+ - I_{data}^- = \begin{cases} \frac{1}{2K} \mathcal{R} G \frac{P_{tx}}{N_w} \frac{N_c}{2} 10^{-\alpha(L_1+L_2)/10} & (bit\ 1) \\ 0 & (bit\ 0) \end{cases} \quad (3.20)$$

Các dòng quang điện gây ra bởi nhiễu đa truy nhập MAI từ các bộ mã hóa khi chúng đi qua PD1 và PD2 được cho bởi công thức

$$I_{MAI}^+ = I_{MAI}^- = \frac{1}{2K} \Re G \frac{P_{tx}}{N_w} \left(N_w - \frac{3N_c}{4} \right) 10^{-\alpha(L_1+L_2)/10} \quad (3.21)$$

Do nhiễu phát xạ tự phát gây ra bởi bộ khuếch đại nên sẽ có dòng nhiễu ASE tại lối ra của hai bộ tách sóng quang PD1 và PD2

$$I_{ASE}^+ = I_{ASE}^- = \frac{1}{2K} \Re h f n_{sp} (G-1) B_{opt} 10^{-\alpha L_2/10} \quad (3.22)$$

Ở đây h là hằng số Planck, f là tần số quang, B_{opt} là băng thông quang và n_{sp} là hệ số phát xạ tự phát (hay hệ số đảo lộn mật độ phân bố).

Một số nhiễu khác cũng nên được xem xét tại thiết bị ONU bao gồm nhiễu nhiệt, nhiễu lượng tử, và nhiễu trộn [102]. Phương sai của nhiễu nhiệt được biểu diễn như trong phương trình (3.12).

Tiếp theo, chúng ta xét đến phương sai của nhiễu lượng tử, nó được tạo ra bởi dữ liệu, ASE, và tín hiệu MAI sẽ là:

$$\begin{aligned} \sigma_{shot}^2 &= 2qB_e(I_{data}^+ + I_{data}^-) + 2qB_e(I_{MAI}^+ + I_{MAI}^-) \\ &\quad + 2qB_e(I_{ASE}^+ + I_{ASE}^-) \\ &= \frac{1}{K} qB_e \Re G \frac{P_{tx}}{N_w} \left(2N_w - \frac{3N_c}{2} \right) 10^{-\alpha(L_1+L_2)/10} \\ &\quad + \frac{2}{K} (K-1) qB_e \Re G \frac{P_{tx}}{N_w} \left(N_w - \frac{3N_c}{4} \right) 10^{-\alpha(L_1+L_2)/10} \\ &\quad + \frac{2}{K} qB_e \Re h f n_{sp} (G-1) B_{opt} 10^{-\alpha L_2/10} \end{aligned} \quad (3.23)$$

Cuối cùng là dòng nhiễu trộn, nó bao gồm nhiễu trộn giữa tín hiệu và ASE, ASE với ASE, MAI và ASE và tín hiệu với tín hiệu. Dòng nhiễu trộn này được cho bởi phương trình 3.24.

$$\begin{aligned}
\sigma_{beat}^2 &= (I_{data}^+ I_{ASE}^+ + I_{data}^- I_{ASE}^-) \frac{B_e}{B_{opt}} + \frac{1}{2} [(I_{ASE}^+)^2 + (I_{ASE}^-)^2] \frac{B_e (2B_{opt} - B)}{B_{opt}^2} \\
&\quad + (I_{MAI}^+ I_{ASE}^+ + I_{MAI}^- I_{ASE}^-) \frac{B_e}{B_{opt}} + \frac{1}{2} (K-1) (I_{data}^+ I_{MAI}^+ + I_{data}^- I_{MAI}^-) \frac{B_e (2B_{opt} - B_e)}{B_{opt}^2} \\
&\quad + \frac{1}{2} (K-1) \left(\frac{K}{2} - 1\right) [(I_{MAI}^+)^2 + (I_{MAI}^-)^2] \frac{B_e (2B_{opt} - B_e)}{B_{opt}^2} \\
&= \frac{1}{2K} \Re G \frac{P_{tx}}{N_w} \left(2N_w - \frac{3N_c}{2}\right) 10^{-\alpha(L_1+L_2)/10} I_{ASE} \frac{B_e}{B_{opt}} + \frac{B(2B_{opt} - B_e)}{B_{opt}^2} (I_{ASE})^2 \\
&\quad + \frac{1}{K} (K-1) \Re G \frac{P_{tx}}{N_w} \left(N_w - \frac{3N_c}{4}\right) 10^{-\alpha(L_1+L_2)/10} I_{ASE} \frac{B_e}{B_{opt}} \tag{3.24} \\
&\quad + \frac{1}{8K^2} (K-1) \Re^2 G^2 \left(\frac{P_{tx}}{N_w}\right)^2 [(N_w - \frac{N_c}{2})(N_w - \frac{3N_c}{4}) \\
&\quad + (N_w - N_c)(N_w - \frac{3N_c}{4})] \frac{B_e (2B_{opt} - B_e)}{B_{opt}^2} 10^{-\alpha(L_1+L_2)/10} \\
&\quad + \frac{1}{4K^2} (K-1) \left(\frac{K}{2} - 1\right) \Re^2 G^2 \left(\frac{P_{tx}}{N_w}\right)^2 (N_w - \frac{3N_c}{4}) \frac{B_e (2B_{opt} - B_e)}{B_{opt}^2} 10^{-\alpha(L_1+L_2)/10}
\end{aligned}$$

Phương sai tổng cộng của dòng nhiễu là tổng của tất cả các phương sai của nhiễu nhiệt, nhiễu lượng tử và nhiễu trộn có thể được viết như sau:

$$\sigma_{total}^2 = \sigma_{th}^2 + \sigma_{shot}^2 + \sigma_{beat}^2 \tag{3.25}$$

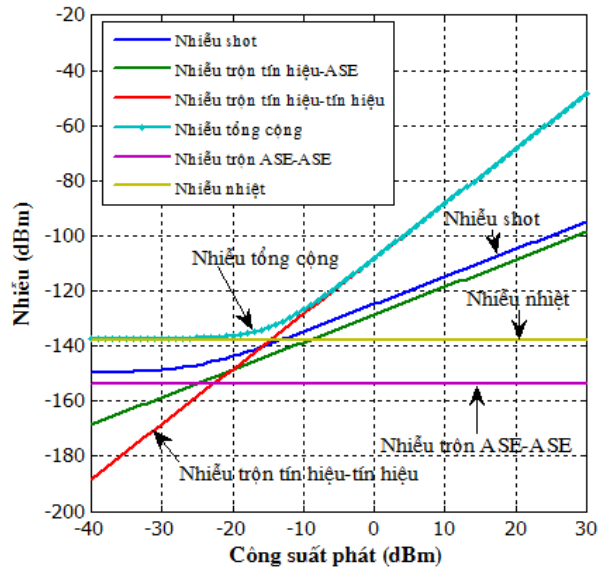
Và tỉ lệ lỗi bit (BER) được tính theo công thức [103]:

$$BER = 1/2 \operatorname{erfc}(Q/\sqrt{2}) \tag{3.26}$$

Trong đó $\operatorname{erfc}(\cdot)$ là hàm lỗi bù, và Q được tính theo biểu thức [103]:

$$Q = \frac{I_{data}(1) - I_{data}(0)}{\sqrt{\sigma_{total}^2(1) + \sigma_{total}^2(0)}} \tag{3.27}$$

Ở đây $I_{data}(1)$ và $I_{data}(0)$ là dòng dữ liệu mà được xác định từ phương trình 3.20 cho bit “1” và bit “0”. Cả $\sigma_{total}^2(1)$ và $\sigma_{total}^2(0)$ được tính toán sử dụng phương trình 3.26. Tuy nhiên, khi $\sigma_{total}^2(0)$ được tính thì giá trị của I_{data}^+ và I_{data}^- sẽ bằng 0 trong tất cả các phương trình liên quan.



Hình 3.2: Công suất nhiễu phụ thuộc vào công suất phát với $K = 3$, $R_b = 1 \text{ Gb/s}$, $G = 20 \text{ dB}$

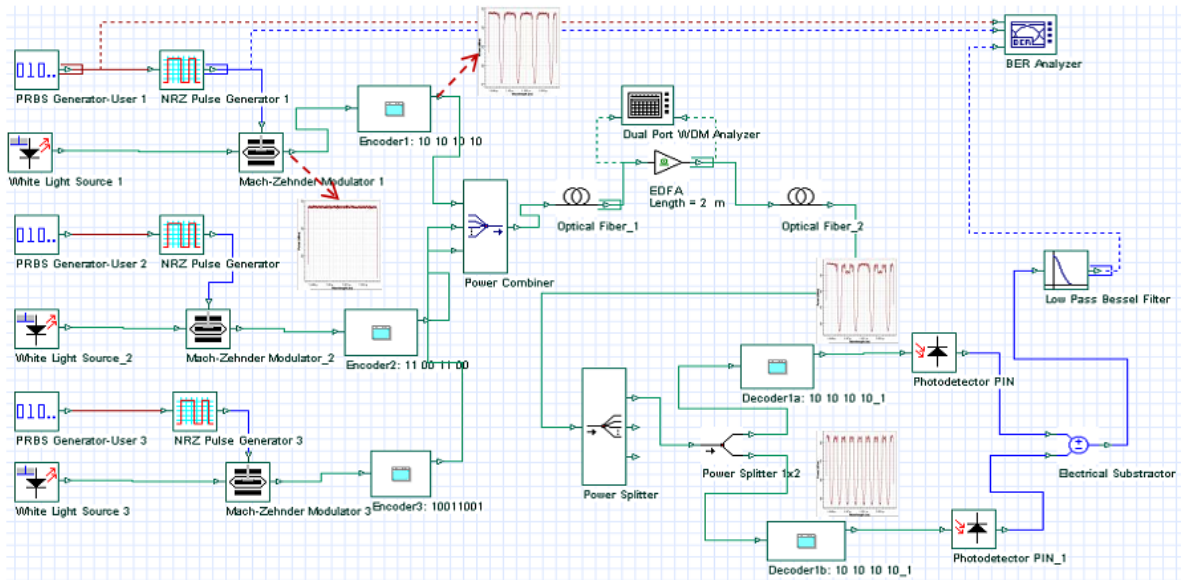
Hình 3.2 trình bày phân tích lý thuyết sự phụ thuộc của công suất nhiễu vào công suất tín hiệu phát cho 3 người dùng với tốc độ bit của mỗi người dùng là 1 Gb/s, băng thông quang bằng 100 nm và hệ số khuếch đại quang là 20dB, với $L_1 = 30 \text{ km}$ và $L_2 = 60 \text{ km}$ và $n_{sp} = 1,5$. Các thành phần nhiễu đóng góp đáng kể cho nhiễu tổng cộng σ_{total}^2 được vẽ riêng. Trong đó nhiễu trộn giữa tín hiệu-tín hiệu và tín hiệu-ASE rõ ràng chiếm đa số so với các loại nhiễu khác. Chúng ta có thể nói rằng nhiễu ASE có ảnh hưởng đáng kể đến hiệu năng của hệ thống.

3.2. Mô phỏng hệ thống bằng phần mềm Optisystem

Trong phần này chúng tôi sử dụng phần mềm OptiSystem, một phần mềm thương mại cho phép người sử dụng lập kế hoạch, kiểm tra và mô phỏng các tuyến truyền dẫn quang trong lớp truyền dẫn của các mạng quang hiện đại [104].

Sơ đồ khối của hệ thống được cho trên Hình 3.3. Phổ tín hiệu tại lối ra của các bộ điều chế, mã hóa và giải mã cũng được minh họa trên hình này. Ba luồng dữ liệu xuống được tạo ra bởi ba bộ tạo bit ngẫu nhiên PRBS mà tạo ra các chuỗi bit giả ngẫu nhiên. Các chuỗi bit này sau đó được sử dụng để điều khiển các bộ tạo xung NRZ tạo ra các tín hiệu non-return-to-zero (không trở về không). Bộ điều chế

Mach-Zender sẽ thực hiện điều chế theo kiểu on-off (OOK) giữa một tín hiệu NRZ và tín hiệu đa bước sóng (được tạo ra bởi một nguồn ánh sáng trắng). Cuối cùng, các tín hiệu OOK đa bước sóng được mã hóa tại các bộ mã hóa được cấu tạo từ các cách tử Bragg.



Hình 3.3: Sơ đồ mô phỏng hệ thống mạng LR-PON dựa trên SAC/OCDMA

Trong sơ đồ này chúng tôi sử dụng một bộ kết hợp công suất để kết hợp các tín hiệu từ các bộ mã hóa khác nhau sau đó truyền chúng vào sợi quang thứ nhất (chiều dài L_1). Các tín hiệu tiếp tục được khuếch đại bởi một bộ khuếch đại EDFA và tiếp đến là đi vào sợi quang thứ hai (chiều dài L_2).

Tại phía thu, có hai bộ chia công suất được sử dụng. Bộ thứ nhất chịu trách nhiệm phân phối tín hiệu tới tất cả các ONU. Bộ thứ hai được đặt tại mỗi ONU để chia các tín hiệu nhận được thành hai phần cho hai bộ giải mã, các bộ giải mã này cũng được cấu tạo từ các cách tử Bragg. Các tín hiệu sau khi được giải mã sẽ được biến đổi thành dòng quang điện sử dụng hai bộ tách sóng quang PIN, các tín hiệu đi ra từ các PIN sẽ được kết nối với một bộ trừ tín hiệu điện (Electrical Subtractor) để tạo ra cơ chế tách sóng cân bằng. Cuối cùng, chúng tôi sử dụng một bộ phân tích tỉ lệ lỗi bit BER analyzer kết hợp với bộ lọc thông thấp Bessel để phân tích tín hiệu thu được.

3.3. Phân tích các kết quả mô phỏng và so sánh kết quả với lý thuyết

Các thí nghiệm mô phỏng được thực hiện để nghiên cứu ảnh hưởng của nhiễu ASE và vị trí của bộ khuếch đại EDFA đến hiệu năng của mạng truy nhập quang đa bước sóng LR-PON dựa trên công nghệ SAC/OCDM. Các tham số chính được sử dụng trong mô phỏng được liệt kê trong Bảng 3.1.

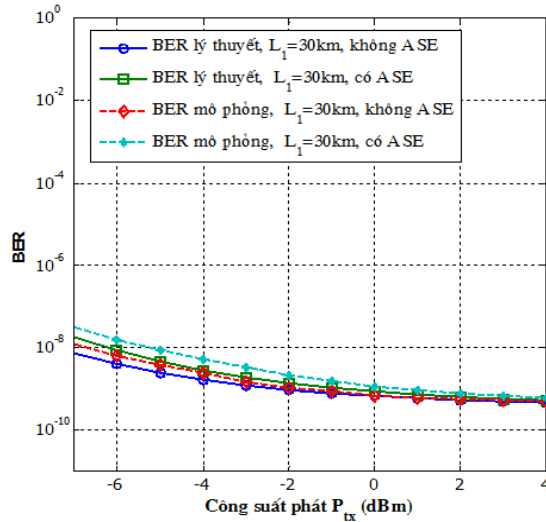
Bảng 3.1: Các tham số được sử dụng trong mô phỏng

Ký hiệu	TÊN	Giá trị
K_B	Hằng số Boltzmann	$1,38 \times 10^{-23} \text{ W/K/Hz}$
q	Điện tích của điện tử	$1,6 \times 10^{-19} \text{ C}$
R_L	Điện trở tải	1000Ω
T	Nhiệt độ bộ thu	300 K
\mathfrak{R}	Hệ số đáp ứng (responsivity) của PD	1 A/W
N_c	Độ dài của từ mã	8
N_w	Số bước sóng	17
K	Số người dùng	3
R_b	Tốc độ bit của một người dùng	1 Gbps
NF	Hệ số tạp âm	$3,5 \text{ dB}$

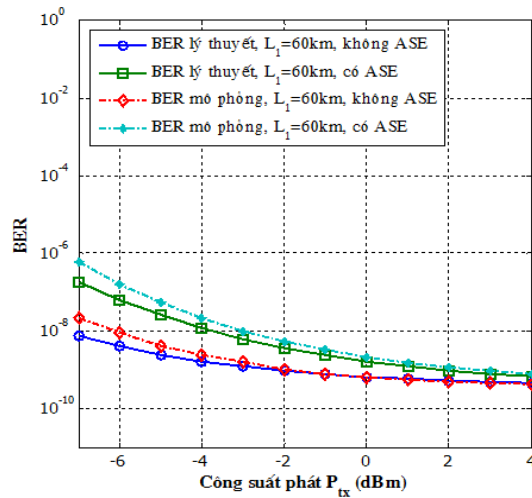
Chúng ta có thể quan sát phổ của các tín hiệu tại lối ra của bộ điều chế, mã hóa và giải mã như trình bày trong Hình 3.3. Sau khi đi qua bộ mã hóa, phổ tín hiệu bị bỏ đi $N_c/2$ (tức là 4) bước sóng. Số bước sóng còn lại sẽ được giữ nguyên khi đi qua bộ giải mã thứ nhất, và tiếp tục bị bỏ đi $N_c/2$ (4 bước sóng) nữa khi đi qua bộ giải mã thứ hai. Vì vậy, số bước sóng còn lại trong phổ của tín hiệu tại đầu ra của bộ giải mã thứ hai là 9 bước sóng ($N_w - N_c$).

Trong hình 3.4 và 3.5, chúng tôi đặt $G = 20 \text{ dB}$ và tổng khoảng cách truyền dẫn của hai sợi quang ($L_1 + L_2$) bằng 90 km. Chúng tôi khảo sát tỉ lệ lỗi bit BER theo công suất phát cho hai giá trị của L_1 ($L_1 = 30 \text{ km}$ và $L_1 = 60 \text{ km}$) từ OLT đến ONU. Trong đó, sẽ khảo sát hai trường hợp có và không có nhiễu ASE. Từ đây nhận thấy rằng ảnh hưởng của ASE tăng khi khoảng cách L_1 tăng (bộ khuếch đại xa OLT). Trong hai hình này, đường nét đứt là các kết quả mô phỏng, còn

đường nét liền là các kết quả tính toán theo lý thuyết. Chúng khá gần nhau (cách nhau khoảng 0,5dB) điều này cũng có thể giải thích là trong kết quả tính toán chúng tôi chưa tính đến các suy hao kết nối khi chèn các bộ điều chế và mã hóa.



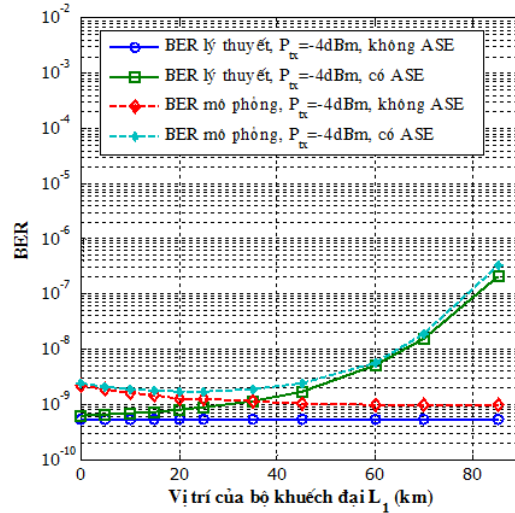
Hình 3.4: BER phụ thuộc vào công suất phát với $L_1 = 30 \text{ km}$



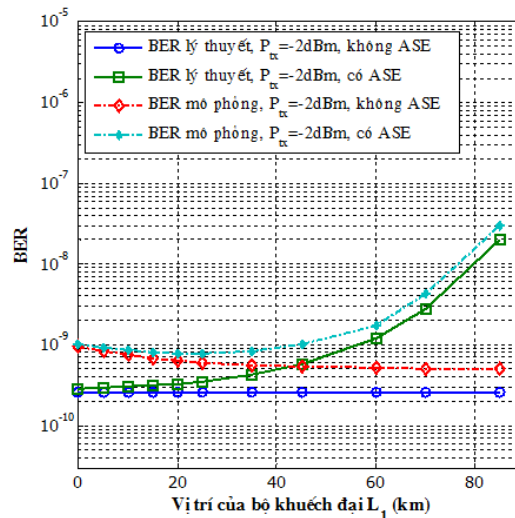
Hình 3.5: BER phụ thuộc vào công suất phát với $L_1 = 60 \text{ km}$

Các kết quả cho thấy BER theo mô phỏng là hoàn toàn phù hợp với các tính toán lý thuyết trong phần 3.1.2. Ngoài ra công suất đánh đổi do nhiễu ASE tại $\text{BER} = 10^{-9}$ là khoảng 2 dB trong trường hợp $L_1 = 30 \text{ km}$, nhưng khi $L_1 = 60 \text{ km}$ thì nó tăng lên 4 dB. Điều này là bởi vì theo phương trình 3.22, dòng nhiễu ASE tỉ

lệ nghịch với khoảng cách L_2 , tức là dòng nhiễu I_{ASE} lớn khi L_2 ngắn hoặc L_1 dài. Sự sai khác này cũng đúng cho cả kết quả mô phỏng và kết quả lý thuyết.



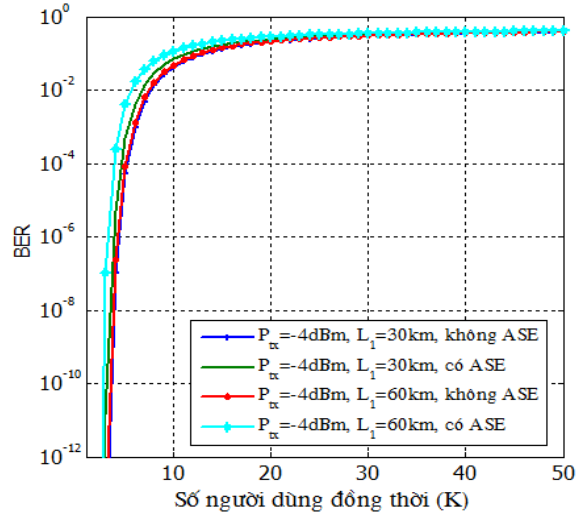
Hình 3.6: BER phụ thuộc vào vị trí của bộ khuếch đại (L_1) với $P_{tx} = -4$ dBm



Hình 3.7: BER phụ thuộc vào vị trí của bộ khuếch đại (L_1) với $P_{tx} = -2$ dBm

Hình 3.6 và 3.7 trình bày sự phụ thuộc của BER vào vị trí của bộ khuếch đại EDFA trên tuyến cho hai trường hợp khác nhau của công suất phát, $P_{tx} = -4$ dBm và $P_{tx} = -2$ dBm. Chúng ta có thể thấy trong trường hợp không có ASE, BER giảm khi khoảng cách L_1 tăng. Tuy nhiên, khi xem xét đến nhiễu ASE thì khoảng cách L_1 càng dài thì BER càng tồi. Giá trị của L_1 mà tại đó BER có giá trị thấp nhất nằm trong khoảng từ 10 km đến 20 km. Trong các hình này, các kết quả mô phỏng

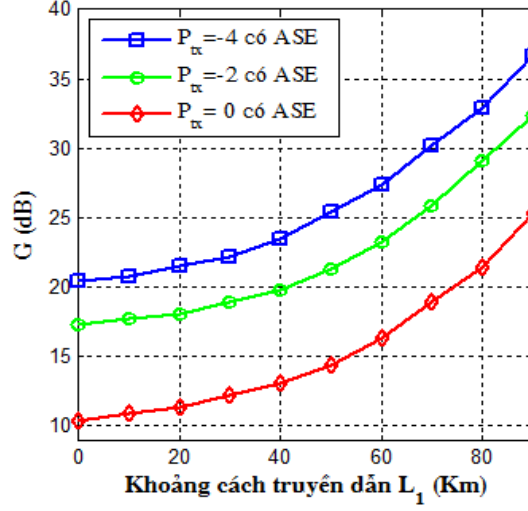
được biểu diễn bằng các đường nét đứt, trong khi các kết quả tính toán lý thuyết được biểu diễn bằng các đường nét liền, và chúng gần như song song và rất gần nhau, điều này chứng tỏ rằng các kết quả mô phỏng là hoàn toàn tin cậy.



Hình 3.8: BER theo số lượng user (K) với hai giá trị khác nhau của L_1

Hình 3.8 trình bày sự phụ thuộc của BER theo số lượng user hoạt động đồng thời, vì khi tăng số lượng user lên thì quá trình chạy mô phỏng sẽ mất rất nhiều thời gian nên trong phạm vi luận án này chúng tôi chỉ dừng lại ở việc khảo sát lý thuyết, tuy nhiên theo dự đoán thì các kết quả mô phỏng nếu có cũng sẽ cho kết quả tương tự. Ở đây chúng tôi đặt tốc độ của mỗi user là 1 Gb/s, công suất phát là $P_{tx} = -4$ dBm và khảo sát cho hai giá trị khác nhau của L_1 (30 và 60 km), có và không có sự tham gia của nhiễu ASE. Kết quả cho thấy khi $L_1 = 30$ km thì hai đường cong nằm rất gần nhau, tuy nhiên số lượng user sẽ giảm khi tăng khoảng cách L_1 thành 60 km và với sự có mặt của ASE. Điều này có nghĩa rằng, ảnh hưởng của vị trí bộ khuếch đại EDFA và nhiễu ASE lên số lượng user hoạt động đồng thời là đáng kể.

Ngoài ra, một kết quả hữu ích khác cho việc thiết kế mạng có thể đạt được từ Hình 3.9, ở đây chúng tôi khảo sát sự phụ thuộc của G vào khoảng cách truyền dẫn của tuyến tại giá trị $BER = 10^{-9}$ khi công suất phát lần lượt bằng -4 dBm, -2 dBm, và 0 dBm. Dựa trên kết quả này chúng ta có thể xác định được hệ số khuếch đại G tương ứng với giá trị cụ thể của tuyến truyền dẫn.



Hình 3.9: G theo khoảng cách của tuyến với $K = 3$ users, $BER = 10^{-9}$

3.4. Đánh giá hiệu năng hệ thống mạng khi sử dụng bộ thu APD

Trong sơ đồ hệ thống mạng Hình 3.1 và 3.3 chúng tôi thay thế bộ thu PIN bằng các bộ thu photodiode thác lũ (APD) và khảo sát các ảnh hưởng của nhiễu ASE đến hiệu năng của hệ thống như trên, ngoài ra chúng tôi cũng đánh giá tầm quan trọng của bộ thu APD và tìm ra hệ số khuếch đại dòng của APD phù hợp nhất cho hệ thống.

Gọi M là hệ số khuếch đại của APD ($M = I_{APD}/I_{PIN}$) thì biểu thức dòng dữ liệu trong phương trình (3.20) trở thành:

$$I_{data} = I_{data}^+ - I_{data}^- = \begin{cases} \frac{1}{2K} M \mathfrak{R} G \frac{P_{tx}}{N_w} \frac{N_c}{2} 10^{-\alpha(L_1+L_2)/10} & (bit\ 1) \\ 0 & (bit\ 0) \end{cases} \quad (3.29)$$

Khi đó dòng nhiễu đa truy nhập MAI và dòng nhiễu ASE cũng sẽ được nhân thêm hệ số M như trong hai phương trình dưới đây:

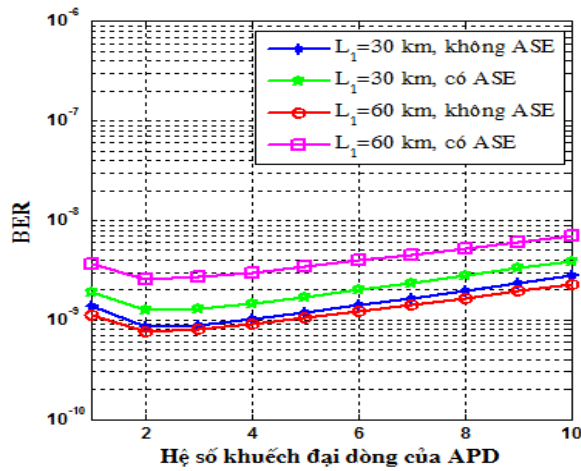
$$I_{MAI}^+ = I_{MAI}^- = \frac{1}{2K} M \mathfrak{R} G \frac{P_{tx}}{N_w} (N_w - \frac{3N_c}{4}) 10^{-\alpha(L_1+L_2)/10} \quad (3.30)$$

$$I_{ASE}^+ = I_{ASE}^- = \frac{1}{2K} M \mathfrak{R} h f n_{sp} (G-1) B_{opt} 10^{-\alpha L_2/10} \quad (3.31)$$

Cơ chế khuếch đại nội trong APD làm tăng dòng tín hiệu dữ liệu vào bộ khuếch đại thu và do đó cải thiện tỉ số SNR bởi vì điện trở tải và nhiễu của bộ khuếch đại thu không bị ảnh hưởng (vì nhiễu nhiệt và nhiễu noise figure không đổi). Tuy nhiên dòng nhiễu lượng tử sẽ tăng bởi quá trình thác lũ và có thể trở thành hệ số giới hạn hiệu năng hệ thống. Điều này là bởi vì cơ chế khuếch đại ngẫu nhiên gây ra nhiễu ô ạt vào bộ thu theo nghĩa nhiễu lượng tử tăng vượt quá mức so với dòng nhiễu lượng tử sơ cấp. Vì vậy nếu dòng dữ liệu tăng theo hệ số M thì dòng nhiễu lượng tử sẽ tăng bởi hệ số nhiễu ô ạt M^x , tức là dòng nhiễu lượng tử trong phương trình (3.7) sẽ bằng:

$$\sigma_{shot}^2 = 2qB(I_{data}^+ + I_{data}^-)M^{1+x} + 2qB(I_{MAI}^+ + I_{MAI}^-)M^{1+x} + 2qB(I_{ASE}^+ + I_{ASE}^-)M^{1+x} \quad (3.32)$$

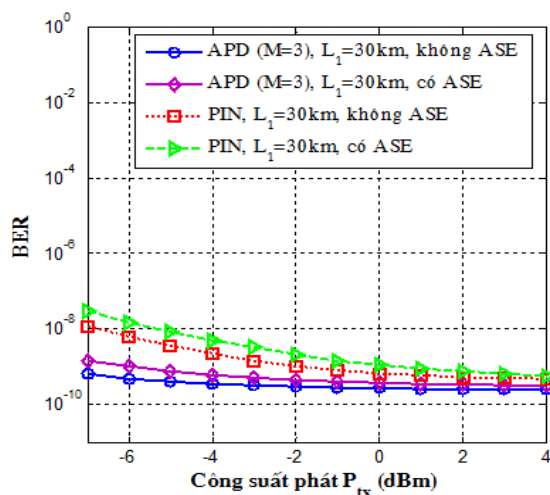
Trong đó x nằm trong khoảng 0,3 – 0,5 đối với các APD silicon và trong khoảng 0,7 – 1 đối với các APD chế tạo bằng germani hoặc các hợp chất nhóm III-V. Và hoàn toàn tương tự ta cũng tính toán được dòng nhiễu trộn, nhiễu tổng cộng và tỉ lệ lỗi bit giống như các phương trình từ (3.25) – (3.28).



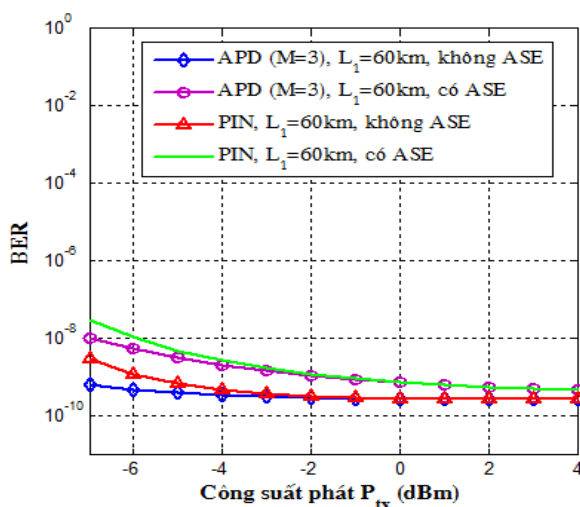
Hình 3.10: BER theo hệ số khuếch đại dòng M của APD

Hình 3.10 trình bày sự phụ thuộc của BER theo hệ số khuếch đại dòng của bộ thu APD trong các trường hợp có và không có nhiễu ASE khi bộ khuếch đại được đặt cách OLT lần lượt là 30 và 60km, công suất phát $P_{tx} = -2dBm$ và tổng khoảng cách vẫn là 90 km. Như ta có thể thấy trên hình, trong trường hợp không có ASE thì

hai đường cong tại $L_1 = 30$ và 60 km là gần sát nhau, nhưng khi có mặt của nhiễu ASE thì đường cong với $L_1 = 60$ km xấu hơn nhiều khi $L_1 = 30$ km. Điều này chứng tỏ rằng ngay cả khi sử dụng bộ thu APD thì vị trí của bộ khuếch đại vẫn đóng vai trò quan trọng trong việc giảm ảnh hưởng của nhiễu ASE. Ngoài ra từ hình vẽ ta cũng có thể thấy giá trị tốt nhất của hệ số khuếch đại dòng của bộ thu APD là 2 hoặc 3, còn trường hợp tăng hệ số khuếch đại dòng M lên cao hơn thì BER sẽ càng xấu hơn trong tất cả các trường hợp. Điều này là do khi hệ số khuếch đại dòng càng lớn thì nhiễu lượng tử của tín hiệu, ASE và MAI tăng cao (tăng lên M^x lần) làm giảm tỉ số SNR và BER sẽ tăng.



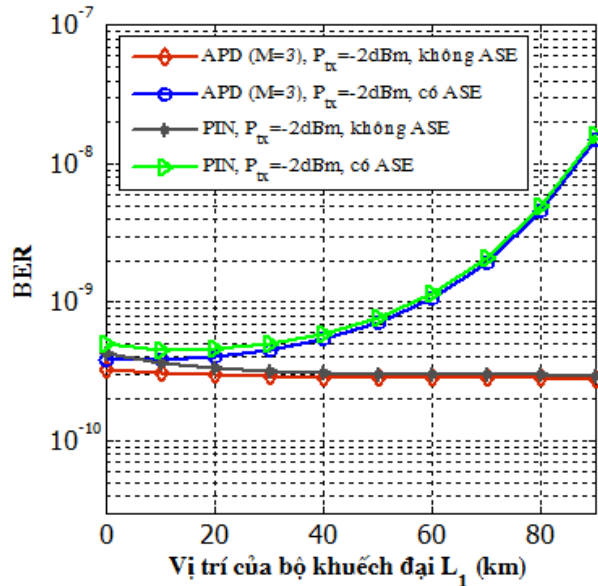
Hình 3.11: BER phụ thuộc vào công suất phát với $L_1 = 30$ km cho PIN và APD



Hình 3.12: BER phụ thuộc vào công suất phát với $L_1 = 60$ km cho PIN và APD

Trong hình 3.11 và 3.12, đặt $G = 20\text{dB}$ và tổng khoảng cách truyền dẫn của hai sợi quang vẫn bằng 90 km . Chúng tôi chạy mô phỏng để so sánh tỉ lệ lỗi bit BER theo công suất phát cho hai giá trị khác nhau của L_1 ($L_1 = 30\text{ km}$ và $L_1 = 60\text{ km}$) từ OLT đến ONU khi sử dụng bộ thu là PIN hoặc APD (với $M = 3$). Trong đó, vẫn sẽ khảo sát hai trường hợp có và không có nhiễu ASE.

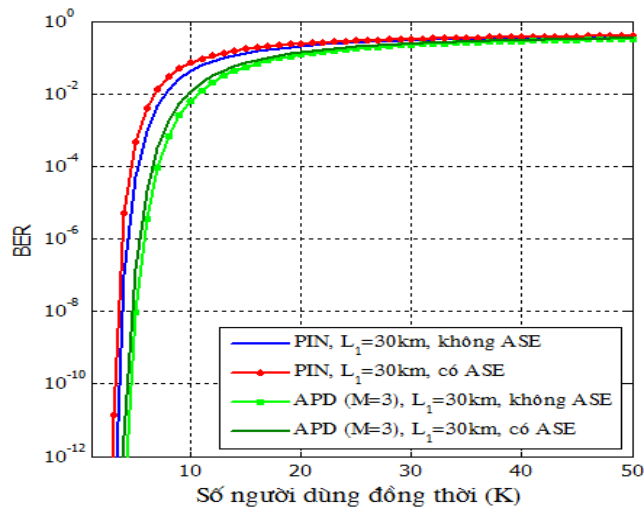
Từ hai hình này ta nhận thấy rằng: thứ nhất ảnh hưởng của ASE tăng khi khoảng cách L_1 tăng, thứ hai khi sử dụng bộ thu APD (với $M = 3$) đường cong BER sẽ được cải thiện hơn so với việc sử dụng bộ thu PIN. Tuy nhiên khi $L_1 = 30\text{ km}$ (Hình 3.11) đường cong BER được tăng cường rõ rệt hơn trong cả hai trường hợp có và không có ASE khi thay đổi từ bộ thu PIN sang APD. Nhưng khi $L_1 = 60\text{ km}$ (Hình 3.12) thì vai trò của bộ thu APD không còn được chiếm ưu thế nữa, và nó chỉ có ý nghĩa khi công suất phát $P_{tx} < -3\text{dBm}$ còn khi công suất phát $> -3\text{dBm}$ thì hai đường cong BER khi sử dụng PIN và APD là đồng nhất. Điều này chứng tỏ rằng vị trí của bộ khuếch đại cũng khá quan trọng trong việc lựa chọn bộ thu.



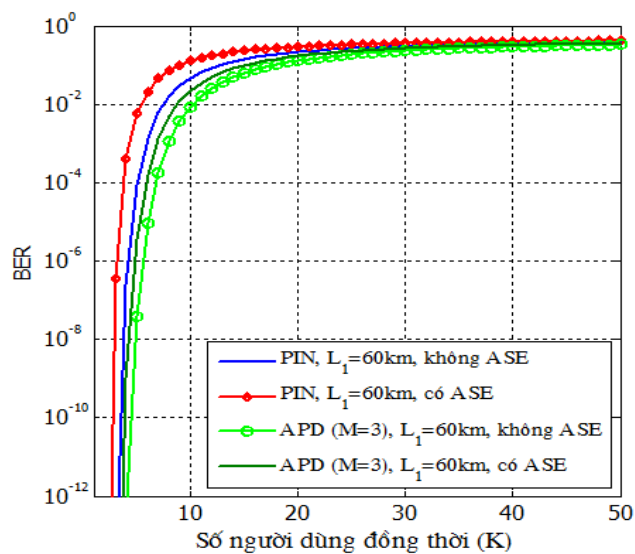
Hình 3.13: BER phụ thuộc vào vị trí của bộ khuếch đại (L_1) với $P_{tx} = -2\text{ dBm}$ khi sử dụng bộ thu PIN và APD

Hình 3.13 trình bày sự phụ thuộc của BER vào vị trí của bộ khuếch đại EDFA trên tuyến khi công suất phát $P_{tx} = -2\text{ dBm}$ trong trường hợp sử dụng bộ thu PIN

và APD (với $M = 3$). Chúng ta có thể thấy trong trường hợp không có ASE, BER giảm nhẹ khi khoảng cách L_1 tăng. Tuy nhiên, khi xem xét đến nhiễu ASE thì vị trí bộ khuếch đại càng xa OLT (L_1 càng lớn) thì BER càng tồi. Giá trị của L_1 mà tại đó BER có giá trị thấp nhất nằm trong khoảng từ 10 km đến 20 km. Đặc biệt khi $L_1 < 30$ km thì đường cong BER khi sử dụng APD tốt hơn chút ít so với khi sử dụng PIN. Còn đối với $L_1 > 30$ km thì hai đường cong gần như trùng nhau. Điều này một lần nữa khẳng định rằng vị trí của bộ khuếch đại gần phía phát sẽ có ảnh hưởng của nhiễu ASE thấp hơn, cũng như vai trò của bộ thu APD được thể hiện rõ rệt hơn.



Hình 3.14: BER theo số lượng user (K) với $L_1 = 30$ km khi sử dụng PIN và APD



Hình 3.15: BER theo số lượng user (K) với $L_1 = 60$ km khi sử dụng PIN và APD

Hình 3.14 và 3.15 trình bày sự phụ thuộc của BER theo số lượng user hoạt động đồng thời cho hai trường hợp bộ thu khác nhau là PIN và APD. Trong phần này chúng tôi vẫn đặt tốc độ của mỗi user là 1 Gb/s, công suất phát là $P_{tx} = -4$ dBm và khảo sát cho hai giá trị khác nhau của L_1 (30 và 60 km), có và không có sự tham gia của nhiễu ASE. Kết quả cho thấy khi sử dụng bộ thu APD số lượng người dùng được tăng lên khoảng 3 đến 4 user. Trong cả hai trường hợp bộ thu PIN và APD thì vị trí của bộ khuếch đại cũng như nhiễu ASE cũng vẫn ảnh hưởng đáng kể đến số lượng người dùng đồng thời của hệ thống.

3.5. Kết luận chương

Trong phạm vi chương này, chúng tôi đã đề xuất một kiến trúc mạng truy nhập quang thụ động khoảng cách dài (LR-PONs) sử dụng kỹ thuật mã hóa biên độ phổ/đa truy nhập phân chia theo mã quang (SAC/OCDMA). Trong cấu hình hệ thống, nghiên cứu sinh có sử dụng một bộ khuếch đại quang EDFA được đặt trên tuyến giữa thiết bị đầu cuối sợi quang (OLT) và thiết bị đầu cuối người dùng quang (ONU) để kéo dài khoảng cách truyền dẫn. Tuy nhiên khi sử dụng một bộ khuếch đại quang như vậy sẽ sinh ra nhiễu phát xạ tự phát ASE làm giới hạn hiệu năng của hệ thống. Dựa trên mô hình mạng được đề xuất, chúng tôi đã khảo sát ảnh hưởng của nhiễu ASE và các loại nhiễu khác. Theo các kết quả tính toán và mô phỏng, để đạt được tỉ lệ lỗi bit thấp thì bộ khuếch đại EDFA nên được đặt gần phía phát (tức OLT) cụ thể là trong khoảng từ 10 đến 20 km từ OLT với tổng khoảng cách tuyến truyền dẫn là 90km. Chúng tôi cũng đã khảo sát hệ thống trong trường hợp sử dụng bộ thu là PIN hoặc APD và thấy rằng khi sử dụng bộ thu APD do có hệ số khuếch đại dòng thích hợp ($M=3$) sẽ cho phép cải thiện hiệu năng của hệ thống. Trong các thí nghiệm trên đây chúng tôi mới chỉ mở rộng khoảng cách truyền dẫn của mạng PON từ 20 km chuẩn lên đến 90 km. Trong thời gian tới chúng tôi sẽ khảo sát ở các khoảng cách dài hơn, và có xét đến ảnh hưởng của tán sắc cũng như các hiệu ứng phi tuyến khác, hoặc kết hợp giữa WDM và kỹ thuật OCDM để đạt được số lượng người dùng nhiều hơn. Ngoài kỹ thuật OCDMA và bộ khuếch đại quang EDFA

được triển khai hiệu quả trên mạng truy nhập quang đa bước sóng thì bên cạnh nó còn một công nghệ khác đó là DWDM và bộ khuếch đại Raman cũng giúp nâng cao được hiệu năng, tăng số lượng người truy nhập cũng như băng thông và khoảng cách của mạng truy nhập, nội dung này sẽ được chúng tôi trình bày trong Chương 4 của luận án.

CHƯƠNG 4

NÂNG CAO HIỆU NĂNG MẠNG TRUY NHẬP QUANG ĐA BƯỚC SÓNG SỬ DỤNG KỸ THUẬT DWDM VÀ KHUẾCH ĐẠI RAMAN BƠM BẰNG CÔNG SUẤT THẤP

Như chúng ta đã biết, các bộ khuếch đại quang Raman đã được triển khai trên hầu hết các hệ thống truyền dẫn sợi quang đường dài (đặc biệt là các bộ khuếch đại Raman phân bố) do các bộ khuếch đại này có khả năng cải thiện được tạp âm NF và giảm mất mát phi tuyến của các hệ thống sợi quang, cho phép kéo dài các đoạn truyền dẫn, tăng tốc độ bit, giảm khoảng cách kênh và hoạt động gần bước sóng tán sắc bằng không. Trên các hệ thống truyền dẫn đường trục, khuếch đại Raman kết hợp với các bộ khuếch đại EDFA không những kéo dài được khoảng cách truyền dẫn mà còn mở rộng được băng tần khuếch đại, làm phẳng phổ khuếch đại trên một vùng băng tần rộng lớn (ngoài băng C), cải thiện hiệu năng của hệ thống WDM và DWDM. Ngày nay, khi mà công nghệ ghép kênh WDM đã được triển khai trên cả mạng truy nhập thì nhu cầu về việc tăng dung lượng và khoảng cách truyền dẫn để giảm phân cấp và chi phí cho các nhà mạng là một vấn đề đáng để quan tâm. Chính vì vậy, việc nghiên cứu và sử dụng khuếch đại quang Raman trên mạng truy nhập LR-PON là một việc làm hết sức có ý nghĩa. Tuy nhiên, cũng giống như các mạng đường trục, khi đưa các bộ khuếch đại quang vào sử dụng, nhiễu quang sinh ra từ bộ khuếch đại sẽ đóng vai trò nhất định trong việc tác động đến hiệu năng truyền dẫn của mạng. Do vậy mục tiêu của chương này là xây dựng một mô hình mạng LR-PON sử dụng DWDM và khuếch đại Raman bơm bằng công suất thấp, từ đó đánh giá ảnh hưởng của nhiễu trong bộ khuếch đại quang đến hiệu năng của hệ thống mạng.

4.1. Xây dựng mô hình mạng LR-PON sử dụng DWDM và khuếch đại Raman

Các hiệu ứng phi tuyến trong sợi quang như tán xạ Raman kích thích, tán xạ Brillouin kích thích cũng có thể được sử dụng để tạo ra khuếch đại quang bằng cách bơm một chùm laser công suất cao vào trong sợi quang. Trong số các hiệu ứng này, khuếch đại Raman có ưu điểm là tự kết hợp pha giữa sóng bơm và tín hiệu cùng với băng thông độ lợi rộng, phẳng phổ so với các hiệu ứng phi tuyến khác. Vì vậy nó

hấp dẫn hơn cho các hệ thống ghép kênh phân chia theo bước sóng mật độ cao (DWDM) bởi vì nó cung cấp độ lợi trên toàn bộ dải của sợi quang [105]. Một trong những thành phần được sử dụng nhiều nhất trong các hệ thống truyền dẫn đường dài mặt đất hoặc cáp ngầm dưới biển hiện tại là các bộ khuếch đại quang Raman phân bố (DRA) sử dụng hiệu ứng tán xạ Raman kích thích (SRS) vì các bộ khuếch đại này có các ưu điểm như: khuếch đại Raman có thể xảy ra trong bất kỳ sợi quang nào tại bất kỳ bước sóng nào bằng việc chọn một bước sóng bơm thích hợp; quá trình khuếch đại Raman xảy ra rất nhanh và tạp âm hiệu dụng (NF) của DRA nhỏ hơn rất nhiều so với các bộ khuếch đại pha tạp Erbium (EDFA) và/hoặc khuếch đại quang bán dẫn [106] [107].

Để khắc phục được nhược điểm của các hệ thống LR-PON đã triển khai như trình bày trong phần đầu của Chương 3, đồng thời mở rộng được băng tần khuếch đại cho hệ thống mạng. Nghiên cứu sinh đề xuất một kiến trúc mạng LR-PON sử dụng kỹ thuật DWDM (khoảng cách bước sóng 0.4 nm) và bộ khuếch đại Raman phân bố DRA được bơm bằng công suất thấp. Tuy nhiên khi sử dụng một bộ khuếch đại như vậy cũng sẽ tạo ra nhiễu phát xạ tự phát được khuếch đại (ASE) [108] làm giới hạn hiệu năng của hệ thống, ảnh hưởng trực tiếp đến tỉ số tín hiệu trên tạp âm (SNR) tại bộ thu được xác định bởi nhiễu trộn giữa: nhiễu ASE với ASE và giữa tín hiệu với ASE. Đã có một số thí nghiệm truyền dẫn sử dụng khuếch đại Raman phân bố được công bố, tuy nhiên có rất ít các báo cáo về cả lý thuyết và thực nghiệm liên quan đến việc so sánh hiệu năng nhiễu giữa các cấu hình bơm của hệ thống khuếch đại Raman bơm bằng nguồn bơm công suất thấp (<1W) cho các mạng truy nhập LR-PON. Vì vậy dựa trên kiến trúc mạng được đề xuất, chúng tôi phân tích ảnh hưởng của nhiễu ASE lên hiệu năng của hệ thống mạng. Trong luận án này, nghiên cứu sinh sử dụng mô hình lý thuyết và mô phỏng của các bộ khuếch đại quang Raman phân bố trong sợi quang hai hướng SMF-28 sử dụng hai cấu hình bơm khác nhau tại bước sóng bơm 1470 nm và công suất bơm 880 mW, công suất bơm này nhỏ hơn công suất bơm của các bộ khuếch đại Raman truyền thống. Chúng tôi cũng sẽ tính toán công suất nhiễu ASE và ảnh hưởng của nó tới tỉ lệ lỗi bit và hệ số tạp âm NF của hệ thống. Ngoài ra, nghiên cứu sinh cũng sẽ so sánh công suất nhiễu này với các kết quả thực nghiệm đã được trình bày trong Chương 3.

4.1.1. Mô hình khuếch đại quang sử dụng tán xạ Raman kích thích

Mô hình lý thuyết để giải thích hiệu ứng tán xạ Raman cưỡng bức sử dụng trong khuếch đại quang dựa trên hệ thống các cặp phương trình vi phân mô tả sự thay đổi của công suất nguồn bơm, công suất phát xạ ngẫu nhiên và công suất tín hiệu khuếch đại dọc theo trục sợi quang (trục z). Các hệ phương trình này có thể áp dụng cho kiểu bơm một hoặc bơm nhiều bước sóng cho khuếch đại Raman, đồng thời cũng chỉ ra sự ảnh hưởng của chiều bơm, chiều tín hiệu và sự ảnh hưởng của nhiệt độ tới bức xạ Raman tự phát được khuếch đại (ASE) [109].

Sự thay đổi của công suất bơm dọc theo sợi quang được mô tả bằng phương trình (4.1), trong đó bao gồm phát xạ Raman tự phát và sự phụ thuộc nhiệt độ của nó, phát xạ tự phát được khuếch đại (ASE) và các tương tác tùy ý giữa một số sóng bơm với tín hiệu từ mỗi hướng: các tương tác bơm-bơm, bơm-tín hiệu, tín hiệu-tín hiệu.

$$\begin{aligned} \frac{dP_k^\pm}{dz} = & \mp \alpha_k P_k^\pm \pm \gamma P_k^\mp \pm P_k^\pm \sum_{j=1}^{k-1} \frac{g_r(\Delta f_{j,k})}{A_{eff} k_p} (P_j^\pm + P_{ASE,j}^+ + P_{ASE,j}^-) \mp \\ & \mp P_k^\pm \sum_{j=k+1}^N \frac{f_k}{f_j} \frac{g_r(\Delta f_{j,k})}{A_{eff} k_p} (P_j^\pm + P_{ASE,j}^+ + P_{ASE,j}^-) \mp \\ & \mp P_k^\pm \sum_{j=k+1}^N \frac{f_k}{f_j} \frac{g_r(f\nu_{j,k})}{A_{eff} k_p} 2hf_k \Delta f \eta_{i,k}(T) \end{aligned} \quad (4.1)$$

Công suất phát xạ tự phát dọc theo sợi quang được tính bằng phương trình:

$$\begin{aligned} \frac{dP_{ASE,k}^\pm}{dz} = & \mp \alpha_k P_{ASE,k}^\pm \pm \gamma P_{ASE,k}^\mp \pm P_{ASE,k}^\pm \sum_{j=1}^{k-1} \frac{g_r(\Delta f_{j,k})}{A_{eff} k_p} (P_j^\pm + P_{ASE,j}^+ + P_{ASE,j}^-) \mp \\ & \mp P_{ASE,k}^\pm \sum_{j=k+1}^N \frac{f_k}{f_j} \frac{g_r(\Delta f_{j,k})}{A_{eff} k_p} (P_j^\pm + P_{ASE,j}^+ + P_{ASE,j}^-) \mp \\ & \mp P_{ASE,k}^\pm \sum_{j=k+1}^N \frac{f_k}{f_j} \frac{g_r(f_{j,k})}{A_{eff} k_p} 2hf_k \Delta f \eta_{i,k}(T) \pm \\ & \pm \sum_{j=1}^{k-1} \frac{g_r(\Delta f_{j,k})}{A_{eff} k_p} 2hf_k \Delta f (P_j^\pm + P_{ASE,j}^+ + P_{ASE,j}^-) \eta_{i,k}(T) \end{aligned} \quad (4.2)$$

Trong các phương trình trên P_k là công suất bơm của laser k , $P_{ASE,k}$ là công suất phát xạ tự phát được khuếch đại (ASE) dọc theo hướng lan truyền $\pm z$, h là

hằng số Planck, k_p là phân cực của ánh sáng tín hiệu, A_{eff} là diện tích hiệu dụng của sợi quang, $\eta(T) = 1 + \frac{1}{e^{h(f_k - f_j)/k_B T} - 1}$ là hệ số giam giữ phonon. Số hạng đầu tiên bên phải của phương trình (4.1) là suy hao sợi quang, số hạng thứ hai là tán xạ Rayleigh, số hạng thứ ba biểu diễn khuếch đại Raman do các sóng ngắn hơn ($f_j > f_k$) truyền năng lượng cho P_k , số hạng thứ tư chỉ sự nghèo bơm (sự giảm sút công suất của P_k) do nó bơm cho các bước sóng dài hơn ($f_j < f_k$) và số hạng cuối cùng biểu thị suy hao do phát xạ tự phát cho các bước sóng dài hơn. Số hạng thứ ba bên phải của phương trình (4.2) là sự bổ sung của nhiễu ASE tạo ra trong băng thông Δf rất nhỏ xung quanh tần số f_k bởi các tín hiệu quang với các bước sóng ngắn hơn. Các số hạng còn lại trong phương trình (4.2) có ý nghĩa tương tự như trong phương trình (4.1). Với việc lựa chọn các giá trị $\alpha = 0,2$ dB/km; $k_p = 2$; $\eta(300\text{K}) = 0,1226$ và $A_{eff} = 80\mu\text{m}^2$ ta có thể đánh giá được hệ số khuếch đại $G_{on/off}$ và thông số tạp âm.

$$G_{on/off} = 10 \log \left(\frac{P_{s,pump-on}}{P_{s,pump-off}} \right) \quad (4.3)$$

$$NF_{eff} = 10 \log \left[\frac{1}{G_{on/off}} \left(\frac{2P_{ASE}}{hf \Delta f} \right) + 1 \right] \quad (4.4)$$

Trong đó P_s là công suất tín hiệu; P_{ASE} là công suất nhiễu ASE thuận; Δf là băng thông; f là tần số của tín hiệu. Băng thông khuếch đại này có thể đạt từ 45-50 nm tính từ hệ số khuếch đại cực đại $G_{max} = \exp(g_R \cdot L)$, trong đó g_R là độ lợi Raman hiệu dụng và L là độ dài của môi trường khuếch đại quang (sợi quang có hiệu ứng tán xạ Raman cưỡng bức).

Các bộ khuếch đại Raman băng rộng được thiết kế bằng cách sử dụng nhiều nguồn bơm và được mô hình bằng số bao gồm các tương tác giữa sóng bơm với sóng bơm, tán xạ ngược Rayleigh và tán xạ Raman tự phát. Mô hình này xem xét

mỗi thành phần tần số riêng rẽ và yêu cầu nghiệm của một tập các phương trình ghép có dạng [103] [110].

$$\begin{aligned} \frac{dP_t(f)}{dz} = & \int_{\mu > f} g_r(\mu, f)[P_t(\mu) + P_n(\mu)] \times [P_t(f) + 2hfn_{sp}(\mu - f)] d\mu \\ & - \int_{\mu > f} g_r(\mu, f)[P_t(\mu) + P_n(\mu)] \times [P_t(f) + 4hfn_{sp}(f - \mu)] d\mu \\ & - \alpha(f) P_t(f) + f_R \alpha_R P_n(f) \end{aligned} \quad (4.5)$$

Trong đó μ và f là các thành phần tần số quang và chỉ số t và n cho biết sóng bơm là thuận hay ngược. Tham số n_{sp} được định nghĩa như sau:

$$n_{sp}(\Omega) = [1 - \exp(-h\Omega / k_B T)]^{-1} \quad (4.6)$$

Ở đây $\Omega = |\mu - f|$ là độ dịch Raman và T là nhiệt độ tuyệt đối của bộ khuếch đại. Trong phương trình 4.5 số hạng thứ nhất và số hai là tính toán cho sự truyền công suất gây ra bởi Raman từ tần số này sang tần số khác. Hệ số 2 trong số hạng đầu tiên biểu thị cho hai một phân cực của sợi. Còn thêm một hệ số 2 trong số hạng thứ hai biểu thị phát xạ tự phát trong cả hướng thuận và hướng ngược. Các suy hao sợi quang và tán xạ ngược Rayleigh cũng được tính toán trong hai số hạng cuối cùng và được chi phối bởi tham số α và α_R . f_R biểu diễn tỉ số công suất tán xạ ngược bị giữ lại bởi một sợi. Tương tự chúng ta có thể biểu diễn các phương trình cho trường hợp sóng truyền ngược.

Giống như các bộ khuếch đại EDFA, khuếch đại Raman cũng bị ảnh hưởng bởi các nguồn nhiễu, có bốn nguồn nhiễu chủ yếu trong khuếch đại Raman [111]. Nguồn nhiễu thứ nhất đó là tán xạ Rayleigh kép (DRS), tương đương với hai hiện tượng tán xạ (tán xạ theo chiều thuận và theo chiều ngược) do cấu tạo không đồng nhất rất nhỏ của thủy tinh. Nhiễu phát xạ tự phát được khuếch đại (ASE) truyền theo hướng ngược sẽ bị phản xạ trong hướng thuận bởi tán xạ DRS và được khuếch đại do tán xạ Raman kích thích. Cứ thế nhiễu ASE trải qua nhiều lần phản xạ và làm giảm tỉ số SNR. Thêm vào đó, nhiễu đa đường của tín hiệu từ DRS cũng sẽ làm giảm SNR. DRS tỉ lệ với chiều dài của sợi và hệ số khuếch đại trong sợi, vì vậy nó đặc biệt quan trọng trong các bộ khuếch đại Raman do sợi quang khá dài (chỉ ít là vài km). Từ các nghiên cứu thực tế cho thấy, tán xạ DRS giới hạn hệ số khuếch đại

trên một tầng khuếch đại xấp xỉ 10 đến 15dB. Các bộ khuếch đại có hệ số khuếch đại cao hơn có thể đạt được thông qua việc sử dụng các bộ cách ly quang giữa nhiều tầng khuếch đại. Ví dụ, một bộ khuếch đại Raman tập trung với hệ số khuếch đại 30 dB đã được chứng minh với hai tầng khuếch đại và hệ số tạp âm ít hơn 5,5 dB [112].

Nguồn nhiễu thứ hai đến từ thời gian sống ở trạng thái cao hơn của khuếch đại Raman ngắn, khoảng 3 đến 6 fs. Hệ số khuếch đại gần như ngay lập tức này có thể dẫn tới việc truyền năng lượng của các dao động bơm sang tín hiệu. Cách thông thường để tránh hiện tượng này là cho sóng bơm và tín hiệu truyền ngược chiều nhau. Khi đó thời gian sống ở trạng thái cao hơn bằng với thời gian truyền qua sợi quang. Nếu sóng bơm và tín hiệu được truyền cùng chiều thì các laser bơm phải có mức công suất bơm ổn định, tức là chúng phải có nhiễu cường độ tương đối (RIN) thấp. Ví dụ các nguồn bơm cùng chiều sử dụng laser Fabry-Perot thay vì laser cách tử ổn định [113].

Nguồn nhiễu chủ yếu thứ ba trong các bộ khuếch đại Raman là nhiễu phát xạ tự phát ASE. Nhiễu này sẽ tạo ra nhiễu trộn giữa tín hiệu và ASE, ASE với ASE. Trong đó nhiễu trộn giữa tín hiệu và ASE thường chiếm phần lớn. Nhưng trong các bộ khuếch đại Raman thì nhiễu này cũng tương đối thấp vì một hệ thống Raman thường hoạt động như một hệ thống đảo lộn mật độ hoàn toàn. Mật độ phổ công suất ASE có thể được viết như sau:

$$S_{ASE}(f) = (G-1)hf \frac{n_2}{n_2 - n_1} \quad (4.7)$$

Trong đó n_2, n_1 là tập hợp ở trạng thái cao hơn và thấp hơn. Đối với các bộ khuếch đại Raman thì tỉ số $n_2/(n_2 - n_1)$ luôn luôn bằng một. Còn đối với các bộ khuếch đại EDFA thì tỉ số này luôn lớn hơn một [114]. Và hệ số tạp âm được tính toán theo công thức:

$$NF = \frac{1}{G} \left(\frac{2S_{ASE}(f)}{hf} + 1 \right) \quad (4.8)$$

Cuối cùng, nguồn nhiễu thứ tư đến từ nhiễu quang kích thích phonon tạo ra khi các bước sóng tín hiệu được khuếch đại có phổ gần bước sóng bơm sử dụng cho

khuyến đại. Nói cách khác, tại nhiệt độ phòng hoặc cao hơn có một sự tập trung của các phonon gây ra bởi nhiệt trong sợi thủy tinh mà có thể được khuyến đại tự phát từ các nguồn bơm, do đó tạo ra nhiễu cộng tính cho các tín hiệu có bước sóng gần sóng bơm. Người ta đã chứng minh rằng hiệu ứng này có thể làm tăng hệ số tạp âm lên tới 3 dB cho các tín hiệu gần sóng bơm [115] [116]. Các thành phần nhiễu này sẽ được tính toán và khảo sát trong phần cuối của chương này.

4.1.2. Phân tích lý thuyết mô hình mạng đề xuất

Trong phần này chúng tôi phân tích khuyến đại Raman phân bố trong các hệ thống truyền dẫn DWDM sử dụng cả hai cấu hình bơm thuận và bơm ngược. Xem xét trường hợp đơn giản nhất mà trong đó một nguồn bơm sóng liên tục (CW) đơn được ghép vào sợi quang đơn một có chiều dài L để khuyến đại một vài tín hiệu CW. Gọi công suất tín hiệu vào của kênh i trong hệ thống DWDM là P_{si} và công suất bơm vào là P_p truyền theo sợi quang đơn một (đo bằng mW) có thể được biểu diễn bằng các phương trình vi phân gọi là phương trình truyền bao gồm các tương tác Raman giữa bơm-bơm, tín hiệu-tín hiệu và bơm-tín hiệu, phát xạ Raman tự phát và sự phụ thuộc vào nhiệt độ của nó, tán xạ Raman kích thích, sự nghèo bơm, tán xạ Rayleigh đa đường, suy hao sợi quang và nhiễu phát xạ tự phát được trình bày trong các phương trình 4.9, 4.10 và 4.11 [117] [118] [119] [120] [121]. Nhiễu truyền theo hai hướng có công suất lần lượt là P_{ASE}^+ và P_{ASE}^- .

$$\frac{dP_p^\pm}{dz} = \mp \alpha_p P_p^\pm \pm \gamma P_p^\mp \mp \sum_{i=1}^N \frac{f_p}{f_{si}} g_R P_p^\pm P_{si}^\pm \mp \left(\sum_{i=1}^N g_R P_p^\pm h f_{si} \Delta f \right) \left[1 + \frac{1}{e^{h(f_p - f_{si})/k_B T} - 1} \right] \quad (4.9)$$

$$\frac{dP_{si}^\pm}{dz} = -\alpha_{si} P_{si}^\pm + \gamma P_{si}^\mp + g_R P_p^\pm P_{si}^\pm + 2h f_{si} \Delta f g_R P_p^\pm \left[1 + \frac{1}{e^{h(f_p - f_{si})/k_B T} - 1} \right] \quad (4.10)$$

$$\frac{dP_{ASE}^\pm}{dz} = \mp \alpha_n P_{ASE}^\pm \pm \gamma P_{ASE}^\mp \pm g_R P_p^\pm P_{ASE}^\pm \pm g_R P_p^\pm h f_{ASE} \Delta f \left[1 + \frac{1}{e^{h(f_p - f_n)/k_B T} - 1} \right] \quad (4.11)$$

Ở đây g_R là độ lợi Raman hiệu dụng (tính bằng $W^{-1}km^{-1}$) của sợi được chuẩn hóa theo diện tích vùng hiệu dụng $A_{eff} = \pi r^2$ của sợi, α_p , α_{si} và α_{ASE} là các hệ số suy hao đo bằng km^{-1} tại các tần số bơm, kênh tín hiệu thứ i của WDM và các tần số

nhiều (f_p , f_{si} , và f_{ASE}), γ là hệ số tán xạ Rayleigh đo bằng km^{-1} . Các dấu bên trên của (\pm) và (\mp) trong ba phương trình tương ứng với trường hợp bơm thuận và các dấu bên dưới tương ứng với trường hợp bơm ngược. k_p là hệ số phân cực ($g_R = g_r/k_p A_{eff}$), Δf là khoảng cách tần số, h là hằng số Plank, k_B là hằng số Boltzmann's và T là nhiệt độ tuyệt đối. Hai số hạng đầu tiên trong các phương trình này là suy hao sợi quang và tán xạ Rayleigh, hai số hạng cuối cùng trong phương trình (4.9) liên quan tới tín hiệu và nhiễu ASE gây ra bởi sự nghèo bơm. Số hạng thứ ba và thứ tư trong phương trình (4.10) bao gồm khuếch đại Raman kích thích và tự phát. Số hạng cuối cùng trong phương trình (4.11) liên quan tới công suất nhiễu phát xạ tự phát tạo ra tại tần số f_{ASE} trên băng tần Δf . Chúng ta có thể thu được nghiệm giải tích của phương trình bằng việc sử dụng phương pháp lặp đơn giản [117] cho cả hai cấu hình bơm thuận và bơm ngược.

a) Bơm thuận

Trong trường hợp bơm thuận, tín hiệu và nguồn bơm được truyền cùng chiều từ $z=0$ tới $z=L$ theo hướng $+z$. Các phương trình vi phân được giải bằng phương pháp giải tích không có sự nghèo bơm tại điểm z như sau [120]:

$$P_p^+(z) = P_p(0) \exp(-\alpha_p z) \quad (4.12)$$

$$P_{si}(z) = P_{si}(0) \exp \left[-\alpha_{si} z + g_R P_p(0) \frac{1 - \exp(-\alpha_p z)}{\alpha_p} \right] \quad (4.13)$$

$$P_{ASE}^+(z) = [hf_{ASE} \Delta f \exp(-q_{ASE}^+) (q_{ASE}^+)^{\alpha_{ASE}/\alpha_p} \times (\Gamma_1(1 + \frac{\alpha_{ASE}}{\alpha_p}, q_{ASE}^+) - \Gamma_1(1 + \frac{\alpha_{ASE}}{\alpha_p}, q_{ASE}^+ \exp(-\alpha_s z)))] \times \exp(-\alpha_{ASE} z + q_{ASE}^+ (1 - \exp(-\alpha_p z))) \quad (4.14)$$

$$P_{ASE}^-(z) = [hf_{ASE} \Delta f \exp(q_{ASE}^+) (q_{ASE}^+)^{-\alpha_{ASE}/\alpha_p} \times (\Gamma_2(1 + \frac{\alpha_{ASE}}{\alpha_p}, q_{ASE}^+ \exp(-\alpha_s z)) - \Gamma_2(1 + \frac{\alpha_{ASE}}{\alpha_p}, q_{ASE}^+))] \times \exp(-\alpha_{ASE} z - q_{ASE}^+ (1 - \exp(-\alpha_p z))) \quad (4.15)$$

Ở đây:

$$q_{ASE}^+ = \frac{g_R P_p(0)}{\alpha_p} \quad (4.16)$$

$$\Gamma_1(\alpha, u) = \int_0^u t^{-\alpha+1} \exp(t) dt \quad (4.17)$$

$$\Gamma_2(\alpha, u) = \int_0^u t^{\alpha-1} \exp(-t) dt \quad (4.18)$$

b) Bơm ngược

Trường hợp bơm ngược có thể được xem xét một cách tương tự. Ở đây sóng bơm được truyền từ $z = L$ tới 0 theo hướng $-z$, các nghiệm của phương trình (4.9 – 4.11) với sự nghèo bơm do quá trình kích thích ngược được bỏ qua [120] là:

$$P_p^-(z) = P_p(L) \exp(-\alpha_p(L-z)) \quad (4.19)$$

$$P_{si}(z) = P_{si}(0) \exp[-\alpha_{si}z + g_R P_p(L) \times \exp(-\alpha_p L) \frac{\exp(-\alpha_p z) - 1}{\alpha_p}] \quad (4.20)$$

$$P_{ASE}^+(z) = [hf_{ASE} \Delta f \exp(q_{ASE}^-) (q_{ASE}^-)^{-\alpha_{ASE}/\alpha_p} \times (\Gamma_2(1 + \frac{\alpha_{ASE}}{\alpha_p}, q_{ASE}^- \exp(\alpha_s z)) - \Gamma_2(1 + \frac{\alpha_{ASE}}{\alpha_p}, q_{ASE}^-)) \times \exp(-\alpha_{ASE}z + q_{ASE}^- (\exp(\alpha_p z) - 1))] \quad (4.21)$$

$$P_{ASE}^-(z) = [hf_{ASE} \Delta f \exp(-q_{ASE}^-) (q_{ASE}^-)^{\alpha_{ASE}/\alpha_p} \times (\Gamma_1(1 + \frac{\alpha_{ASE}}{\alpha_p}, q_{ASE}^- \exp(\alpha_s L)) - \Gamma_1(1 + \frac{\alpha_{ASE}}{\alpha_p}, q_{ASE}^- \exp(\alpha_s z))) \times \exp(\alpha_{ASE}z - q_{ASE}^- (\exp(-\alpha_p z) - 1))] \quad (4.22)$$

Ở đây:

$$q_{ASE}^- = \frac{g_R P_p(L) \exp(-\alpha_p L)}{\alpha_p} \quad (4.23)$$

Phương sai tổng cộng của dòng nhiễu là tổng của các phương sai của nhiễu nhiệt, nhiễu lượng tử, nhiễu trộn và được viết theo biểu thức:

$$\sigma_{total}^2 = \sigma_{th}^2 + \sigma_{shot}^2 + \sigma_{beat}^2 \quad (4.24)$$

Ở đây σ_{th} là nhiễu nhiệt, σ_{shot} là nhiễu lượng tử được tạo ra bởi tín hiệu, sóng bơm và ASE, σ_{beat} là nhiễu trộn, nó bao gồm nhiễu trộn giữa tín hiệu với ASE, nhiễu trộn giữa ASE với ASE (trộn giữa các thành phần phổ khác nhau của nhiễu sinh ra do bộ khuếch đại), trộn giữa sóng bơm với ASE và nhiễu trộn giữa tín hiệu với tín hiệu [122]. Cách tính phương sai của các dòng nhiễu này cũng tương tự như các phương trình (3.23-3.25), tuy nhiên dòng quang điện I_{signal} được tính toán khác so với phương trình (3.20) do hệ thống là DWDM chứ không phải OCDMA.

Từ đó ta có thể tính toán tỉ lệ lỗi bit (BER) cho như sau:

$$BER_{WDM} = \frac{1}{2} \operatorname{erfc}(SNR) \quad (4.25)$$

Ở đây $\operatorname{erfc}(\cdot)$ là hàm bù lỗi và tỉ số tín hiệu trên tạp âm được tính như sau [106]:

$$SNR = \frac{I_{signal}(ith)}{\sigma_{total} \sqrt{2}} \quad (4.26)$$

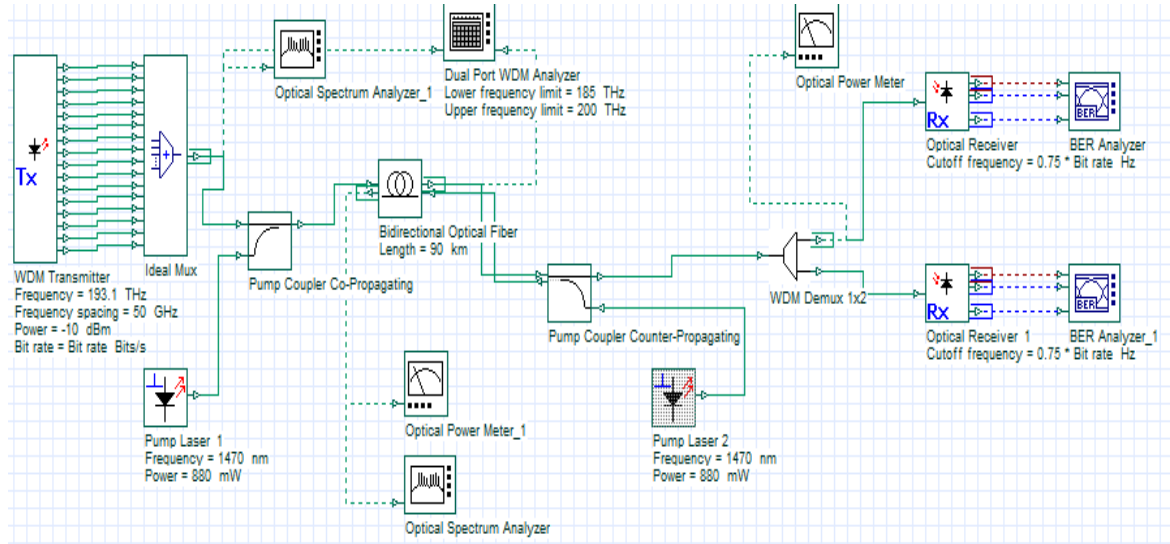
$I_{signal}(ith)$ là dòng quang điện của kênh thứ i tại lối ra của photodiode.

4.2. Mô phỏng hệ thống bằng phần mềm Optisystem

4.2.1. Cài đặt mô phỏng

Trong phần này chúng tôi thiết lập một mô hình mạng DWDM LR-PON bằng việc sử dụng phần mềm Optisystem 7 để so sánh công suất nhiễu ASE với các kết quả thực nghiệm trong chương 2. Trong mô hình này, chúng tôi sử dụng một bộ khuếch đại Raman phân bố với hai cơ chế bơm khác nhau là bơm thuận và bơm ngược. Hình 4.1 trình bày hệ thống với việc truyền 16 kênh DWDM nằm giữa dải tần số 193,1 THz và 193,85 THz, khoảng cách giữa các kênh là 50 GHz, và bước sóng bơm là 1470 nm. Một bộ tạo chuỗi bit giả ngẫu nhiên (PRBS) tạo ra dòng dữ liệu xuống của mỗi kênh. Chuỗi bit này sau đó được sử dụng để điều khiển các bộ tạo xung NRZ tạo ra các tín hiệu NRZ. Điều chế theo kiểu bật – tắt (OOK) giữa tín

hiệu NRZ và một nguồn laser phát sóng liên tục được thực hiện bằng việc sử dụng bộ điều chế Mach-Zehnder.



Hình 4.1: Sơ đồ khối của hệ thống DWDM sử dụng khuếch đại Raman phân bố

Các tín hiệu được ghép kênh tại một bộ ghép kênh và sau đó chúng được kết hợp với tín hiệu bơm tại một bộ ghép tín hiệu WDM mà truyền chúng vào sợi quang đơn một hai chiều theo cùng một hướng, kiểu bơm này được gọi là bơm thuận. Ngoài ra, cũng có một laser bơm được đặt tại lối ra của sợi quang, nó được gọi là bơm ngược. Tín hiệu sau đó sẽ được khuếch đại bằng cơ chế tán xạ Raman cưỡng bức trong môi trường sợi đơn một. Ở phía thu, tín hiệu được biến đổi thành dòng quang điện nhờ bộ tách sóng PIN. Tỷ số lỗi bit (BER) của tín hiệu thu được phân tích bằng việc sử dụng một thiết bị phân tích BER kết hợp với bộ lọc thông thấp Bessel.

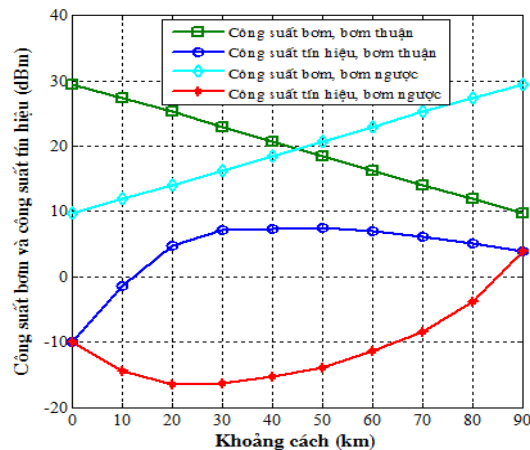
4.2.2. Các kết quả mô phỏng

Mô phỏng được thực hiện để đánh giá ảnh hưởng của nhiễu ASE, NF, và tán sắc màu đến hiệu năng của mạng trong các cấu hình bơm khác nhau. Các tham số chính được sử dụng trong mô phỏng được liệt kê trong bảng 4.1. Trong mô hình này chúng tôi kích hoạt đầy đủ cả bốn thành phần nhiễu như đã được đề cập trong phần 4.1.1, tuy nhiên, sẽ chỉ đánh giá riêng ảnh hưởng của nhiễu ASE đến hiệu năng của hệ thống để đạt được mục tiêu của luận án đặt ra.

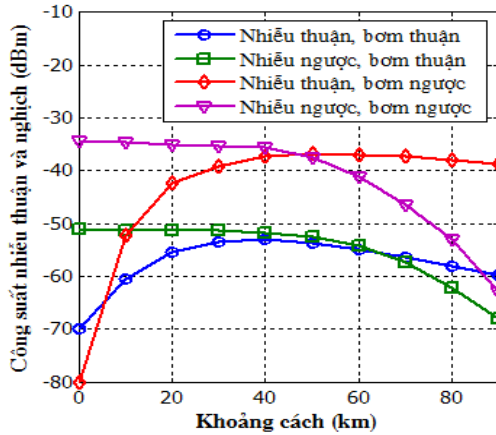
Bảng 4.1: Các tham số mô phỏng

Tên	Ký hiệu	Giá trị
Độ dài khuếch đại DRA	L	$0 \div 90$ km
Diện tích vùng hiệu dụng	A_{eff}	$80 \mu^2$
Tốc độ bit	R_b	10 Gbps
Tần số tín hiệu	f_s	193,1 – 193,85 THz
Bước sóng bơm	λ_p	1470 nm
Công suất bơm	P_p	880 mW
Tán sắc màu	D	14, 15, 16 ps/nm.km
Hệ số tán xạ Rayleigh	γ	5×10^{-5} 1/km
Hệ số khuếch đại Raman	G	13÷17 dB

Hình 4.2 trình bày sự thay đổi của công suất tín hiệu và công suất bơm theo chiều dài khuếch đại DRA. Chúng ta có thể quan sát được rằng, khi chiều dài khuếch đại tăng công suất bơm sẽ tăng trong cấu hình bơm ngược. Còn đối với trường hợp bơm thuận thì công suất bơm sẽ giảm. Mặt khác, trong trường hợp bơm thuận, chúng ta thu được độ lợi lớn hơn trong công suất tín hiệu. Kết quả này làm tăng các ảnh hưởng của các hiệu ứng phi tuyến theo chiều dài sợi quang [117]. Trong trường hợp bơm ngược, độ lợi xảy ra về phía cuối của sợi quang sau khi công suất tín hiệu đã bị suy hao một phần theo sợi quang. Sự mất mát công suất này sẽ tăng khả năng của nhiễu và làm thay đổi chất lượng tín hiệu.



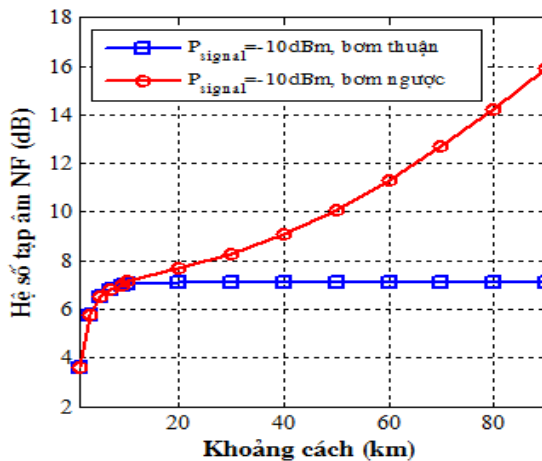
Hình 4.2: Công suất tín hiệu và công suất bơm như một hàm của chiều dài khuếch đại khi $P_s(0) = -10\text{dBm}$, $P_p = 880\text{mW}$



Hình 4.3: Công suất nhiễu như một hàm của chiều dài khuếch đại khi

$$P_s(0) = -10\text{dBm}, P_p = 880\text{mW}$$

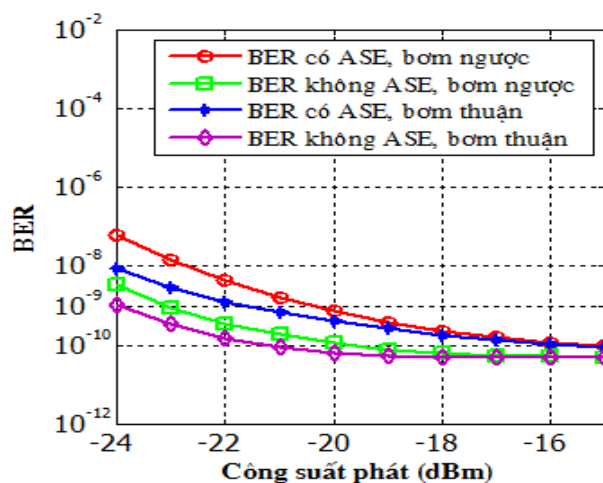
Hình 4.3 trình bày công suất nhiễu theo hướng thuận và hướng ngược như một hàm của chiều dài sợi cho kênh tín hiệu đầu tiên (193.1 THz) khi công suất tín hiệu vào $P_s = -10\text{dBm}$. Chúng ta có thể thấy rằng trong trường hợp bơm thuận cả công suất nhiễu DRA thuận và ngược đều nhỏ hơn công suất nhiễu trong trường hợp bơm ngược. Như vậy bơm thuận có nhiều ưu điểm hơn bơm ngược đứng trên quan điểm tối ưu về nhiễu. Ngoài ra, so sánh với phổ ASE của bộ khuếch đại đã chế tạo trong Hình 2.23 và 2.24 chúng ta thấy rằng chúng là tương đồng (khoảng -35dBm), điều này chứng tỏ rằng các kết quả khảo sát bằng mô phỏng là đáng tin cậy và phù hợp với thực nghiệm.



Hình 4.4: Nhiễu NF như một hàm của chiều dài khuếch đại DRA khi

$$P_s(0) = -10\text{dBm}, P_p = 880\text{mW}$$

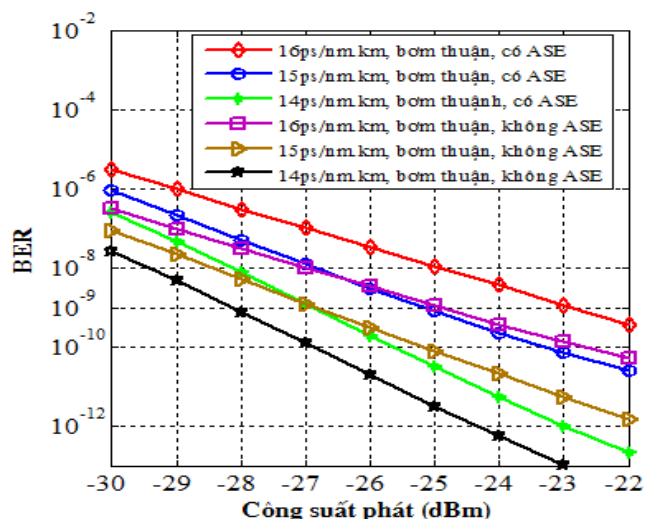
Hình 4.4 trình bày hệ số tạp âm NF như một hàm của chiều dài khuếch đại DRA cho các cấu hình bơm thuận và bơm ngược. Như chúng ta có thể quan sát trên hình, khi chiều dài khuếch đại ngắn NF là giống nhau, nhưng khi chiều dài khuếch đại dài hơn thì sự tích lũy của nhiễu theo sợi quang là khác nhau trong hai trường hợp. Nhiễu NF hầu như không thay đổi khi chiều dài khuếch đại tăng trong cấu hình bơm thuận. Tuy nhiên nó lại tăng rất nhanh trong trường hợp bơm ngược. Điều này là bởi vì trong cơ chế bơm thuận sự khuếch đại Raman chủ yếu tập trung tại đầu vào sợi quang khi mà công suất tín hiệu vẫn còn lớn, còn trong cấu hình bơm ngược sự khuếch đại tín hiệu hầu như xảy ra gần đầu ra của sợi quang. Ngoài ra, khi công suất bơm lớn hơn 800 mW thì ảnh hưởng của tán xạ Rayleigh kép cũng làm tăng hệ số NF trong cấu hình bơm ngược, còn trong trường hợp bơm thuận thì hầu như không có. Đây là một yếu tố quan trọng để lựa chọn các bộ khuếch đại Raman được bơm bằng công suất thấp cho các mạng có độ dài trung bình và nhỏ.



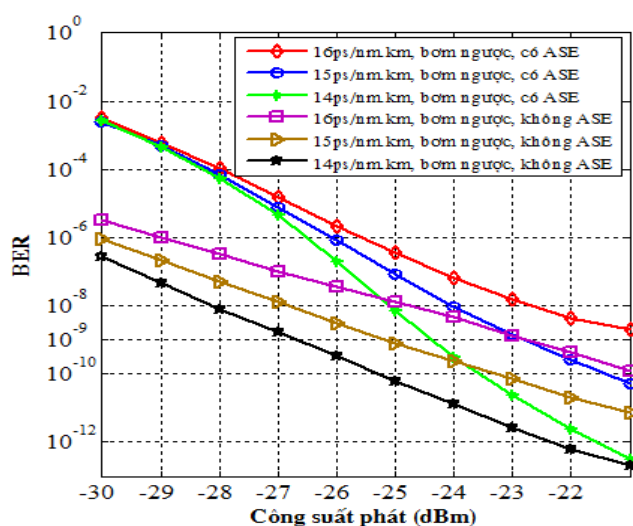
Hình 4.5: BER theo công suất phát với $R_b = 10\text{Gbps}$, $D = 16\text{ ps/nm.km}$, $L = 90\text{ km}$

Trong Hình 4.5, chúng tôi đặt hệ số tán sắc màu $D = 16\text{ ps/nm.km}$ và chiều dài khuếch đại bằng 90 km. Chúng tôi ước lượng BER theo công suất phát cho hai trường hợp, có và không có nhiễu ASE trong các cấu hình bơm thuận và bơm ngược (cho kênh tín hiệu 193,4THz – kênh trung bình). Có thể thấy rằng ảnh hưởng của nhiễu ASE tăng trong trường hợp bơm ngược. Đặc biệt hơn, công suất đánh đổi

do nhiễu ASE tại $BER = 10^{-9}$ là khoảng 2dB khi bơm thuận. Còn đối với trường hợp bơm ngược, nó tăng lên 2,3dB. Điều này là bởi vì, theo các phương trình 4.6, 4.7, 4.12 và 4.13) và Hình 4.3, các công suất nhiễu ASE trong cơ chế bơm ngược lớn hơn trong trường hợp bơm thuận.



Hình 4.6: BER theo công suất phát với $D = (14, 15, 16) \text{ ps/nm.km}$, $L=90 \text{ km}$, bơm thuận



Hình 4.7: BER theo công suất phát với $D = (14, 15, 16) \text{ ps/nm.km}$, $L=90 \text{ km}$, bơm ngược

Hình 4.6 và 4.7 trình bày sự phụ thuộc của BER vào công suất phát cho hai trường hợp bơm thuận và bơm ngược với ba giá trị khác nhau của tán sắc màu D (14, 15 và 16 ps/nm.km). Chúng ta có thể thấy rằng, BER tăng khi D tăng.

Công suất đánh đổi gây ra bởi chiều bơm tại $BER = 10^{-9}$ khi hệ số tán sắc màu $D = 16 \text{ ps/nm.km}$ trong trường hợp có ASE là $> 2\text{dB}$. Ngoài ra, trong hình 4.6, trường hợp bơm thuận, công suất đánh đổi tại $BER = 10^{-9}$ không có mặt ASE là khoảng 2dB ($D = 16\text{ps/nm.km}$) trong khi nó tăng lên thành 2,3 dB khi nhiễu ASE được xem xét như trình bày trong Hình 4.7.

4.3. Kết luận chương

Trong chương này, chúng tôi đề xuất mô hình mạng LR-PON (Hình 4.1) sử dụng kỹ thuật DWDM và bộ khuếch đại quang Raman phân bố để tăng khoảng cách truyền dẫn và làm phẳng băng thông độ lợi. Thông qua mô hình được khảo sát, chúng tôi so sánh ảnh hưởng của nhiễu ASE, hệ số tạp âm NF và tán sắc màu trong các cấu hình bơm khác nhau.

Các kết quả mô phỏng cho thấy cấu hình bơm thuận có nhiều ưu điểm hơn cấu hình bơm ngược đứng trên quan điểm tối ưu về nhiễu (nhiều ASE). Hệ số tạp âm NF cũng cho kết quả tốt hơn khi công suất bơm tăng cao trong cấu hình bơm thuận, điều này là do nó ít bị ảnh hưởng bởi tán xạ Rayleigh kép, đây chính là nhân tố quyết định việc lựa chọn các bộ khuếch đại Raman bơm bằng công suất thấp ($<1\text{W}$) cho các cấu hình mạng truy nhập có khoảng cách vừa phải.

KẾT LUẬN VÀ ĐỊNH HƯỚNG NGHIÊN CỨU TIẾP THEO

1. KẾT LUẬN

Luận án tập trung giải quyết vấn đề nâng cao hiệu năng cho mạng truy nhập quang đa bước sóng sử dụng công nghệ đa truy nhập phân chia theo mã quang OCDMA, ghép kênh phân chia theo bước sóng mật độ cao DWDM và các bộ khuếch đại quang EDFA, khuếch đại quang Raman phân bố được bơm bằng công suất thấp ($<1W$). Phân tích ảnh hưởng của các loại nhiễu gây ra trong quá trình khuếch đại, hệ số tạp âm NF, tán sắc màu, đặc biệt là nhiễu phát xạ tự phát được khuếch đại (ASE) làm giới hạn hiệu năng của các hệ thống truyền dẫn thông tin quang. Các kết quả đóng góp mới về mặt khoa học của luận án bao gồm:

1. Chế tạo thành công bộ khuếch đại Raman, bằng việc khảo sát và đo đạc thực nghiệm đã xây dựng được các bộ dữ liệu về các tham số của bộ khuếch đại Raman bơm bằng công suất thấp ($<1W$) đã chế tạo này.
2. Xây dựng được cơ sở lý thuyết và khảo sát bằng mô phỏng ảnh hưởng của nhiễu do bộ khuếch đại EDFA gây ra (nhiễu ASE) đến hiệu năng của mạng truy nhập LR-PON đa bước sóng dựa trên kỹ thuật OCDMA.
3. Xây dựng được cơ sở lý thuyết và khảo sát bằng mô phỏng ảnh hưởng của nhiễu do bộ khuếch đại Raman gây ra (nhiễu ASE và NF) và tán sắc màu đến hiệu năng của mạng truy nhập LR-PON sử dụng kỹ thuật DWDM trong các cấu hình bơm khác nhau.

Bên cạnh những kết quả đạt được, chắc chắn luận án không tránh khỏi những thiếu sót. Nghiên cứu sinh rất mong nhận được nhiều ý kiến đóng góp hữu ích của các thầy, cô và bạn đọc.

2. ĐỊNH HƯỚNG NGHIÊN CỨU TIẾP THEO

- Đánh giá ảnh hưởng của tán sắc màu đến hiệu năng của mạng truy nhập LR-PON sử dụng công nghệ OCDMA.

- Kết hợp giữa kỹ thuật WDM và kỹ thuật OCDMA để tăng dung lượng và số lượng người dùng trên mạng truy nhập.
- Chế tạo các bộ khuếch đại quang Raman đảm bảo khuếch đại tốt cả bước sóng giám sát quang.
- Sử dụng cấu hình bơm hai hướng hoặc bơm rải rác trên tuyến để đạt được hệ số khuếch đại cao nhất và hệ số tạp âm thấp nhất trong bộ khuếch đại Raman.

DANH MỤC CÁC CÔNG TRÌNH KHOA HỌC CỦA TÁC GIẢ LIÊN QUAN ĐẾN LUẬN ÁN

1. Nguyen The Anh, Nguyen Thuy Van, Nguyen Thanh Hai, Pham Thanh Son, Bui Huy, Tran Thi Cham, **Bui Trung Ninh**, Ha Xuan Vinh, Pham Van Hoi (2011), “Optical amplifier based on simulated Raman scattering effect”, *Proceedings of the second Academic Conference on Natural Science for Master and PhD Students from Cambodia-Laos-Malaysia-Vietnam*, ISBN 978-604-913-088-05, pp. 312-316.
2. Pham Thanh Son, Nguyen The Anh, Nguyen Thuy Van, Hoang Thi Hong Cam, Bui Huy, Ha Xuan Vinh, **Bui Trung Ninh** and Pham Van Hoi (2012), “Stimulated Raman scattering effect in the Silica-alumina fibers”, *Proceedings of the 7th International Conference on Photonics and Applications (ICPA-7)*, ISSN: 1859-4271, pp. 666-670.
3. **Bui Trung Ninh**, Pham Van Hoi (2012), “The Effects of ASE Noise on the Performance of Multi-wavelength OCDMA Systems using APD Receiver”, *Proceedings of the 7th International Conference on Photonics and Applications (ICPA-7)*, ISSN: 1859-4271, pp. 188-192.
4. **Bui Trung Ninh**, Ngoc T. Dang, Anh T. Pham (2012), “The Effects of EDFA Noise on the Performance of Multi-wavelength OCDM-based Long-Reach Passive Optical Networks”, *Proceedings of the IEEE Tencon 2012*, Cebu, Philippines, Nov. 19-22, 2012.
5. **Bùi Trung Ninh**, Phạm Văn Hội, Đặng Thế Ngọc, Phạm Tuấn Anh, Nguyễn Quốc Tuấn (2014), “The Effects of ASE Noise and the Position of EDFA Amplifier on Multi-Wavelength OCDM-Based Long- Reach Passive Optical Networks”, *VNU Journal of Natural Sciences and Technology*, Vol. 30, No. 1, pp. 58-67.

6. **Ninh T. Bui**, Tuan Q. Nguyen and Hoi V. Pham (2014), “Effects of ASE Noise and Dispersion Chromatic on Performance of DWDM Networks using Distributed Raman Amplifiers”, *International Journal of Communication Networks and Information Security (IJCNIS)*, Vol. 6, No. 2, pp. 168-172, ISSN: 2073-607X (Online).
7. **Bui Trung Ninh**, Nguyen Quoc Tuan, Pham Van Hoi (2015), “Influence of ASE noise on performance of DWDM networks using low-power pumped Raman amplifiers”, *IETE Journal of Research*, Vol. 62, No. 2, pp.239-245, ISSN: 0974-780X (Online).

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1] G. Kramer, *Ethernet Passive Optical Networks.*: McGraw-Hill, 2005.
- [2] G. Pesavento and M. Kelsey, "PONs for the broadband local loop," *Lightwave*, vol. 16, no. 10, pp. 68-74, September 1999.
- [3] B. Lung, "PON architecture 'futureproofs' FTTH," *Lightwave*, vol. 16, no. 10, pp. 104-107, September 1999.
- [4] "IEEE P802.3av Task Force, [Online]. Available: <http://www.ieee802.org/3/av> .,".
- [5] R. P. Davey et al., "DWDM reach extension of a GPON to 135 km," *J. Lightwave Technol.* 24, pp. 29-31, (2006).
- [6] I. T. Monroy , R. Kjaer, B. Palsdottir, A. M. J. Koonen, and P. Jeppesen, "10 Gb/s bidirectional single fibre long reach PON link with distributed Raman amplification," in *Proc. Eur. Conf. Optical Communication 2006*, Cannes, France, Sep.2006, p. We3.P.166.
- [7] H. H. Lee, K. C. Reichmann, P. P. Lannone, X. Zhou, and B. Palsdottir, "A hybrid-amplified PON with 75-nm downstream band-width, 60 km reach, 1:64 split and multiple video services," in *Proc. OFC/NFOEC 2007*, (Anaheim, CA, USA, Mar. 2007), OWL2.
- [8] C. H. Kim, J. H. Lee, and K. Lee, "Analysis of maximum reach in WDM PON architecture based on distributed Raman amplification and pump recycling technique," *Opt. Express* 15, pp. 14942-14947, (2007).
- [9] K. Kitayama and et al., "OCDMA Over WDM PON—Solution Path to Gigabit-Symmetric FTTH," *J. Lightw. Technol.*, vol. 24, no. 4, pp. 1654-1662, 2006.
- [10] B. Chandru, J. Helina Rajini, and S. TamilSelvi, "Performance Analysis of Downstream Transmission of 10Gbps WDM PON Using Single and Hybrid Optical Amplifiers," in *IEEE International Conference on Advanced Communication Control and Computing Technologies*, 2014, pp. 828-832.
- [11] D. Chrissan, "Uni-DSL: one DSL for universal service," *Texas Instruments White Paper (Spay018)*, 2004.
- [12] A. Girard, "FTTx PON technology and testing," *EXFO Electro-Optical Engineering Inc.*, 2005.
- [13] "ITU-T Series Recommendation G.984.6, Gigabit-capable passive optical networks: Reach extension," 03/2008.
- [14] Y. Zhang, P. Chowdhury, M. Tornatore, and B. Mukherjee, "Energy efficiency in telecom optical networks," *IEEE Communications Surveys & Tutorial*, vol. 12, pp. 441-458, 2010.
- [15] L. Hutcheson, "FTTx: current state and the future," *IEEE Communication Magazine*, vol. 08,

pp. 90-95, 2008.

- [16] C., Sorin, W. Lee and B. Kim, "Fiber to the home using a PON infrastructure," *J. Lightwave*, vol. 24, pp. 4568-4583, 2006.
- [17] Tommaso Muciaccia, Fabio Gargano, and Vittorio M. N. Passaro, "A TWDM-PON with Advanced Modulation Techniques and a Multi-Pump Raman Amplifier for Cost-Effective Migration to Future UDWDM-PONs," *IEEE JOURNAL OF LIGHTWAVE TECHNOLOGY*, vol. 33, no. 14, pp. 2986-2996, July 2015.
- [18] Darren P. Shea and John E. Mitchell, "Long-reach optical access technologies," *IEEE Network*, vol. 21, pp. 5-11, 2007.
- [19] Y. C. Chung, "A review of optical performance monitoring techniques," in *Proc. International Conference on Photonics in Switching*, 2008, pp. 1-2.
- [20] L. Kazovsky and et al., "Next-generation optical access networks," *J. Lightwave Technol.*, vol. 25, pp. 3428-3442, 2007.
- [21] O., Yu, J. Akanbi and G. Chang, "A new scheme for bidirectional WDM-PON using upstream and downstream channels generated by optical carrier suppression and separation technique," *IEEE Photonic. Tech. L.*, vol. 18, pp. 340-342, 2006.
- [22] A. Stok and E. H. Sargent, "The role of optical CDMA in access networks," *IEEE Commun. Mag.*, vol. 40, no. 9, pp. 83-87, 2002.
- [23] K. Fouli and M. Maier, "OCDMA and Optical Coding: Principles, Applications, and Challenges," *IEEE Communications Magazine*, pp. 27-34, 2007.
- [24] X. Wang, "Recent Progresses in OCDMA," in *ICTON 2008*, 2008.
- [25] N. Kataoka, "OCDMA Technologies for the Future Optical Access Network," in *Proceedings of COIN2008 copyright (c) 2008 IEICE 08 SB 0064*, 2008.
- [26] M. Azizoglu, J. A. Salehi, and Y. Li, "Optical CDMA via temporal codes," *IEEE Trans on Comm.*, vol. 40, no. 8, pp. 1162-1170, 1992.
- [27] M. Kaverad and D. Zaccarin, "Optical code division-multiplexed systems based on spectral encoding of noncoherent sources," *J. Lightw. Technol.*, vol. 13, no. 3, pp. 534-545, 1995.
- [28] G. J. Foschini and G. Vannucci, "Noncoherent detection of coherent lightwave signals corrupted by phase noise," *IEEE Trans on Comm.*, vol. 36, no. 3, pp. 306-314, 1988.
- [29] J. B. Rosas-Fernandez, "Investigations of Transmission Nonlinearities and Mode-Locked Laser Encoders for Ultrafast Optical CDMA Networks," 2005.
- [30] H. Fathallah, "Optical CDMA Communications and the Use of OFCs," *Optical Fiber Components: Design and Applications*, 2006.
- [31] C. C. Yang, "Optical CDMA-based passive optical network using arrayed-waveguide-grating,"

in *IEEE Int'l Conf. on Communications, Circuits and Systems*, 2006.

- [32] J. Huang, Y. T. Chang, C. C. Sue, and C. C. Hsu, "Hybrid WDM and optical CDMA implemented with M-sequence coded waveguide gratings over fiber-to-the-home network," in *IEEE Int'l Conf. on Communications, Circuits and Systems*, 2006.
- [33] W.T. Tsang, R.M. Kapre, R.A. Logan, and T. Tanbun-Ek, "Control of lasing wavelength in distributed feedback lasers by angling the active stripe with respect to the grating," *IEEE Photonics Tech. Letters*, vol. 5, no. 9, pp. 978-980, 1993.
- [34] Z. Wei and H. Ghafouri-Shiraz, "Proposal of a novel code for spectral amplitude coding optical CDMA systems," *IEEE Photonics Tech. Letters*, vol. 14, no. 3, pp. 414-416, 2002.
- [35] J. P. Heritage, J. A. Salehi, and A. M. Weiner, "Coherent ultrashort light pulse code-division multiple access communication systems," *J. Lightw. Technol.*, vol. 8, no. 3, pp. 478-491, 1990.
- [36] E. D. J. Smith, R. J. Blaikie, and D. P. Taylor, "Performance enhancement of spectral-amplitude-coding optical CDMA using pulse position modulation," *IEEE Trans. on Comm.*, vol. 46, no. 9, pp. 1176-1185, 1998.
- [37] M. Kaverad and D. Zaccarin, "Optical code division-multiplexed systems based on spectral encoding of noncoherent sources," *J. Lightw. Technol.*, vol. 13, no. 3, pp. 534-545, 1995.
- [38] P. R. Prucnal, *Optical code division multiple access: Fundamentals and Applications.*: Taylor & Francis, 2005.
- [39] Z. Wei and H. Ghafouri-Shiraz, "Codes for spectral-amplitude-coding optical CDMA systems," *J. Lightw. Technol.*, vol. 20, no. 8, pp. 1284-1291, 2002.
- [40] K. Suzuki, Y. Fukada, D. Nisset, and R. Davey, "Amplified gigabit PON systems," *J. Opt. Netw.*, vol. 6(5), no. 422, 2007.
- [41] P. Iannone, H. H. Lee, K. C. Reichmann, X. Zhou, and M. Du, "Hybrid CWDM amplifier shared by multiple TDM PONs," in *Proc. Optical Fiber Communications Conference (OFC/NFOEC'07), PDP-13*, 2007.
- [42] R. P. Davey et al., "Long reach passive optical networks," *J. Lightwave Technol.*, vol. 27, no. 3, pp. 273-291, 2009.
- [43] "ITU-T Series Recommendation G.984.6, Gigabit-capable passive optical networks: Reach extension," 03/2008.
- [44] H. Song, B. -W. Kim, and Mukherjee, "Multi-thread polling: A dynamic bandwidth scheme in long-reach PON," *J. Sel. Areas Commun.*, vol. 27, no. 2, pp. 133-142, Feb. 2009.
- [45] B. Zhu and D. Nisset, "GPON reach extension to 60km with entirely passive fiber using Raman amplifiers," in *Proc. European Conference on Optical Communication (ECOC'09), 8.5.5*, 2009.
- [46] D. Nisset and P. Wright, "Raman extender GPON using 1240nm semiconductor quantum-dot

- lasers," in *Proc. Optical Fiber Communications Conference (OFC/NFOEC'10)*, OThW6, 2010.
- [47] B. Zhu, "Entirely passive reach extended GPON using Raman amplification," in *Opt. Express* 18(22), 23428–23434, 2010.
- [48] D. Nasset, K. Farrow, and P. Wright, "Bidirectional, Raman extended GPON with 50 km reach and 1:64 split using wavelength stabilized pumps," in *Proc. European Conference on Opt. Comm. (ECOC'11)*, Th.12.C.1, 2011.
- [49] Elaine Wong, "Next-Generation Broadband Access Networks and Technologies," *Journal of Lightwave Technology*, vol. 30, no. 4, pp. 597-608, Feb. 15, 2012.
- [50] D. P. Shea and J. E. Mitchell, "Long-Reach Optical Access Technologies," *IEEE Network*, vol. 21, no. 5, pp. 5–11, 2007, vol. 21, no. 5, pp. 5-11, Sept. –Oct. 2007.
- [51] H. Song, B.W. Kim, and B. Mukherjee, "Long-Reach Optical Access Networks: A Survey of Research Challenges, Demonstrations, and Bandwidth Assignment Mechanisms," *IEEE COMMUNICATIONS SURVEYS & TUTORIALS*, vol. 12, no. 1, pp. 112-123, 2010.
- [52] S.R. Mohammad and M. M. Ibrahim, "Next-generation Optical Access Technologies," *Electrical and Electronic Engineering*, vol. 3, no. 6, pp. 178-183, 2013.
- [53] D. P. Shea and J. E. Mitchell, "A 10 Gb/s 1024-Way Split 100-km Long Reach Optical Access Network," *J. Lightwave Tech.*, vol. 25, no. 3, Mar. 2007., vol. 25, no. 3, Mar. 2007.
- [54] D. P. Shea and J. E. Mitchell, "Architecture to integrate multiple PONs with long reach DWDM backhaul," *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, vol. 27, no. 2, pp. 126-133, 2007.
- [55] J. J. Martinez et al., "Novel WDM-PON Architecture Based on a Spectrally Efficient IM-FSK Scheme Using DMLs and RSOAs," *Journal of Lightwave Technology*, vol. 26, no. 3, pp. 350-356, 2008.
- [56] B. Mukherjee, *Optical WDM networks*. New York: Springer, 2006.
- [57] P.P. Iannone et al., "Four extended-reach TDM PONs sharing a bidirectional hybrid CWDM amplifier," *J. Lightwave Technol.*, vol. 26, no. 1, pp. 138-143, 2008.
- [58] H. Lee, P. Iannone, K. Reichmann, J. Lee, and B. Palsdottir, "A C/L-band gain-clamped SOA-Raman hybrid amplifier for CWDM access networks," *IEEE Photon. Technol. Lett.*, vol. 20, no. 3, pp. 196-198, 2008.
- [59] G. Talli and P. D. Townsend, "Hybrid DWDM-TDM long-reach PON for next-generation optical access," *Lightwave Technology*, vol. 24, pp. 2827-2834, 2006.
- [60] H. Iwamura et al., "42dB Loss Budget Hybrid DWDM-CDM-PON without Optical Amplifier," in *OFC/NFOEC*, 2007, p. Conference on Optical Fiber Communication and the National Fiber Optic Engineers.
- [61] G. Keiser, *Optical fiber communications. Fourth edition.*: McGraw-Hill, 2011.

- [62] L. et al. Bramerie, "Cascadability and Wavelength Tunability Assessment of a 2R Regeneration Device Based on a 8 Channel Saturable Absorber Module," in *in Proc. OFC*, San Diego, CA, 2007.
- [63] J. P. Sokoloff, P. R. Prucnal, I. Glesk, and M. Kane, "A terahertz optical asymmetric demultiplexer (TOAD)," *IEEE Photonics Technology Letters*, vol. 5, no. 7, pp. 787-790, 1993.
- [64] J. H. Lee, P. C. Teh, P. Petropoulos, M. Ibsen, and D. J. Richardson, "Reduction of interchannel interference noise in a two-channel grating-based ocdma system using a nonlinear optical loop mirror," *IEEE Photonics Technology Letters*, vol. 13, no. 5, pp. 529-531, 2001.
- [65] H. et al. Folliot, "Two-photon absorption photocurrent enhancement in bulk AlGaAs semiconductor microcavities," *Appl. Phys. Lett.*, vol. 80, no. 8, pp. 1328-1330, 2002.
- [66] K. Sato and H. Toba, "Reduction of mode partition noise by using semiconductor optical amplifiers," *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron.*, vol. 2, pp. 328-333, 2001.
- [67] H. Y. Choi, S. B. Jun, S. K. Shin, and Y. C. Chung, "Simultaneous monitoring technique for ASE and MPI noises in distributed Raman amplified," *OPTICS EXPRESS*, vol. 15, no. 14, pp. 8660-8666, 2007.
- [68] C. R. S. Fludger, V. Handerek, and R. J. Mears, "Pump to Signal RIN transfer in Raman Fiber Amplifiers," *Journal of Lightwave Technology*, vol. 19, pp. 1140-1148, Feb. 2001.
- [69] P. D. Townsend, G. Talli, E. K. MacHale, and C. Antony, "Long reach PONs," in *Tech. Dig. Conf. Opt. Internet*, 2008, pp. 1-2.
- [70] N. Suzuki and J. Nakagawa, "First demonstration of full burst optical amplified GEAPON uplink with extended system budget of up to 128 ONU and 58 km reach," in *Proc. Eur. Conf. Opt. Commun.*, Sep. 2005.
- [71] R. P. Davey et al., "Long-reach passive optical networks," *J. of Lightwave Technol.*, vol. 27, no. 3, pp. 273-291, 2009.
- [72] N. Nadarajah, C. J. Chae, A. V. Tran, and A. Nirmalathas, "10 Gb/s upgrade for high-split and long-reach PON using remote repeater," in *Tech. Dig. Opto-Electron. Commun. Conf.*, Jul. 7-10, 2008, pp. 1-2.
- [73] A. B. Ruffin and J. D., Hurley, J. Downie, "Purely passive long reach 10 GE-PON architecture based on duobinary signals and ultra-low loss optical fiber," in *Proc. Opt. Fiber Commun. Conf. Nat. Fiber Optic Eng. Conf.*, Feb. 2008.
- [74] R.J. Mears, I. Reekie, I. M. Jauncey, and D.N. Payne, "Low-noise erbium-doped fibre amplifier operating at 1,54 μm ," *Electronics Letters*, vol. 23, no. 19, p. 1026, 1987.
- [75] R.I. Laming et al., "Efficient pump wavelengths of erbium-doped fibre optical amplifier," *Electron. Lett.*, vol. 25, pp. 12-14, 1989.
- [76] E. Desurvire, *Erbium Doped Fiber Amplifiers, Principles and Applications*. New York: Wiley, 1995.

- [77] E. Desurvire, "Analysis of erbium-doped fibre amplifier pumped in the 4I13/2 - 4I15/2 band.," *IEEE Photonics Technol. Lett.*, vol. 1, no. 10, p. 293, 1989.
- [78] J. Bromage, H. J. Thiele, and L. E. Nelson, "Raman amplification in the S-band," in *Optical Fiber Communication Conf. Tech. Dig.*, Paper ThB3, pp. 383–385, 2002.
- [79] Yoshihiro Emori, Soko Kado, and Shu Namiki, "Broadband flat-gain and low-noise Raman Amplifiers pumped by wavelength-multiplexed high-power laser diodes," *J. Opt. Fiber Technol.*, vol. 8, pp. 107-122, 2002.
- [80] M. N. Islam, "Raman Amplifiers for Telecommunications," *IEEE Journal of selected topics in quantum electronics* , vol. 8, no. 3, pp. 548-559, 2002.
- [81] C. R. S. Fludger, V. Handerek, and R. J. Mears, "Ultra-wide bandwidth Raman amplifiers," in *Optical Fiber Communication Conf. Technical Dig.*, Paper TuJ3, pp. 60–62, 2002.
- [82] Sun Hyok Chang, Hee Sang Chung, Kwang Joon Kim, and Je Soo Ko, "Automatic gain control in Raman amplifiers with multi-wavelength pumps," *Opt. Comm.*, vol. 266, pp. 521-526, 2006.
- [83] Meenakshi Sharma and Vivek Ruder Sharma, "Gain Flattening of EDFA in C-Band using RFA for WDM application," in *International Conference on Signal Processing and Integrated Networks*, 2015, pp. 346-351.
- [84] T. Tanaka et al., "Comparison between dispersion management for long-haul WDM systems using all-Raman-amplifier repeaters," in *OFC'2002, WXI*, 2002.
- [85] Charu Kakkar and K. Thyagarajan, "High gain Raman amplifier with inherent gain flattening and dispersion compensations," *Opt. Comm.*, vol. 250, no. 1-3, pp. 77-83, 2005.
- [86] S. Singh and R. S. Kaler, "Flat-Gain L-Band Raman-EDFA Hybrid Optical Amplifier for Dense Wavelength Division Multiplexed System," *IEEE photonics technology letters* , vol. 25, no. 3, pp. 250-252, 2013.
- [87] Johann Gest and Lawrence R.Chen, "Dynamic gain variation in discrete fiber Raman amplifiers subjects to multi-channel packet traffic," *Opt. Comm.*, vol. 280, no. 1, pp. 68-78, 2007.
- [88] Umesh Tiwari, Krishnan Rajan, and K. Thyagarajan, "Multi-channel gain and noise figure evaluation of Raman/EDFA hybrid amplifiers," *J. Opt. Comm.*, vol. 281, pp. 1593-1597, 2008.
- [89] M.M.J. Martini, C.E.S. Castellani, M.J. Pontes, M.R.N. Ribeiro, and H.J. Kalinowski, "Multi-pump optimization for Raman+EDFA hybrid amplifiers under pump residual recycling," in *Microwave and Optoelectronics Conference (IMOC), 2009 SBMO/IEEE MTT-S International*, Belem, 2009.
- [90] Hong-Seok Seo, Joon Tae Ahn, Bong Je Park, and Woon Jin Chung, "Wideband Hybrid Fiber Amplifier Using Er-Doped Fiber and Raman Medium," *ETRI Journal*, vol. 29, no. 6, pp. 779-784, 2007.
- [91] V. Bobrovs, S. Olonkins, A. Alsevska, L. Gegere, and G. Ivanovs, "Comparative performance of Raman-SOA and Raman-EDFA hybrid optical amplifiers in DWDM transmission systems,"

International Journal of Physical Sciences, vol. 8, no. 39, pp. 1898-1906, 2013.

- [92] Raymond K. Boncek et al., "Solving The Issues Associated with High Power Raman Amplification," in *OFS Documentation of Furukawa Electric Inc.*, 2002.
- [93] Chu Van Lanh, "Một số đặc trưng động học của laser Raman," Vinh, 2008.
- [94] F. J. Effenberger, "Methods for PON reach enhancement," in *Presented at the Optical Hybrid Access Network IFSAN Conference*, Florence, Italy, 10–12 June 2002.
- [95] K. L. Lee, J. L. Riding, A. V. Tran, and R. S. Tucker, "Extended-reach gigabit passive optical network for rural areas using distributed Raman amplifier," in *Proceedings of OFC 2009, paper NME3*.
- [96] O. Frazao, C. Correia, and et al., "Stimulated Raman scattering and it applications in Optical communications and optical sensors," in *The Open Optics J.3*, 2009, pp. 1-11.
- [97] C. Giles and D. Emmanuel, "Propagation of Signal and Noise in Concatenated Erbium-Doped Fiber Optical Amplifiers," *J. Lightwave Technol.*, vol. 9, no. 2, pp. 147-154, February 1991.
- [98] A. Grunnet-Jepsen et al., "Fiber Bragg grating based spectral encoder/decoder for lightwave CDMA," *Electron. Lett.*, vol. 35, no. 13, pp. 1096-1097, 1999.
- [99] D. Zaccarin and M. Kavehrad, "An optical CDMA system based on spectral encoding of LED," *IEEE Photon. Technol. Lett.*, vol. 4, no. 4, pp. 479-482, 1993.
- [100] Z. Wei and H. Ghafouri-Shiraz, "Modified Quadratic Congruence Codes for Fiber Bragg-Grating-Based Spectral-Amplitude-Coding Optical CDMA Systems," *J. of Lightwave Tech.*, vol. 19, no. 9, pp. 1274-1281, 2001.
- [101] M. Kavehrad and D. Zaccarh, "Optical Code-Division-Multiplexed Systems Based on Spectral Encoding of Noncoherent Sources," *JOURNAL OF LIGHTWAVE TECHNOLOGY*, vol. 13, no. 3, pp. 534-545, 1995.
- [102] W. Mathlouthi, M. Menif, and Leslie A. Rusch, "Beat noise effects on spectrum-sliced WDM," in *Proc. SPIE 5260, Applications of Photonic Technology 6*, December 12, 2003.
- [103] Govind P. Agrawal, *Fiber-Optic Communications Systems.*: John Wiley & Sons, Inc., 2002.
- [104] [Online]. http://www.optiwave.com/products/system_ove
- [105] J. N. Senior, *Optical fiber communications: principles and practice. Third edition.*: Prentice Hall, 2009.
- [106] Ch Headley and G. P. Agrawal, *Raman amplification in fiber optical communication systems.*: Publisher Elsevier Acad. Press, 2005.
- [107] M. Wasfi, "Optical Fiber amplifiers-Review," *Internat. J. of Comm. Net. & Inform. Secur. (IJCNIS)*, vol. 1, no. 1, pp. 42-47, 2009.
- [108] R. Róka and F. Čertík, "Modeling of environmental influences at the signal transmission in the optical transmission medium," *Internat. J. of Comm. Net. & Inform. Secur. (IJCNIS)*, vol. 4, no.

3, pp. 144-162, 2012.

- [109] A.P. Lopez-Barbero, M.J. Pontes, M.T.M.R. Giraldi, and et al, "Numerical routines for the optimization of pump power and wavelength in distributed Raman amplifiers," in *Fiber Integr. Opt.* 25, pp.347-361, 2006.
- [110] J. Bromage, "Raman amplification for fiber communication systems," in *Optical Fiber Communications Conference, 2003. OFC 2003*, 2003.
- [111] Mohammed N. Islam, "Raman Amplifiers for Telecommunications," *IEEE JOURNAL OF SELECTED TOPICS IN QUANTUM ELECTRONICS*, vol. 8, no. 3, pp. 548-559, 2002.
- [112] A. B. Puc et al., "Long-haul WDM NRZ transmission at 10.7 Gb/s in S-band using cascade of lumped Raman amplifiers," in *Optical Fiber Communication Conf. OSA Tech.*, Washington, DC, 2001.
- [113] V. Dominic et al., "Distributed Raman amplification with co-propagating pump light," in *Optical Amplifiers and Their Applications OSA Tech. Dig.*, Washington, DC, 2001.
- [114] E. Desurvire, *Erbium-Doped Fiber Amplifiers Principles and Applications*. New York: Wiley, 1994.
- [115] C. R. S. Henderek, V. Fludger, "Fundamental noise limits in broadband Raman amplifiers," in *Optical Fiber Communication Conf. OSA Tech. Dig.*, Washington, DC, 2001.
- [116] S. A. Lewis, S. V. Chernikov, and J. R. Taylor, "Temperature-dependent gain and noise in fiber Raman amplifiers," *Opt. Lett.*, vol. 24, no. 24, pp. 1823-1825, 1999.
- [117] L. Zhang, S. Wang, and C. Fan, "Transient analysis in discrete fiber Raman amplifiers," *Opt. Commun.*, vol. 197, pp. 459-465, 2001.
- [118] D. Dahan and G. Eisenstein, "Numerical comparison between distributed and discrete amplification in a point-to-point 40-Gb/s 40-WDM-based transmission system with three different modulation formats," *J. Lightwave Technol.*, vol. 20, no. 3, pp. 379-388, 2002.
- [119] I. Mandelbaum and M. Bolshtyansky, "Raman amplifier model in single-mode optical fiber," *IEEE Photonics Technology Letters*, vol. 15, no. 12, pp. 1704-1706, 2003.
- [120] D. Dahan and G. Eisenstein, "The properties of amplified spontaneous emission noise in saturated fiber Raman amplifiers operating with CW signals," *Optics Communications*, vol. 236, pp. 279-288, 2004.
- [121] M.A.P.M. de Andrade, J. Anacleto, and J.M.M.M. de Almeida, "Simulation of various configurations of single-pump dispersion-compensating Raman/EDFA hybrid amplifiers," in *Proc. of SPIE, Vol. 6468, Physics and Simulations of Optoelectronic devices XV, 646807 (12ps) 2007*. doi: 10.1117/12.70980; <http://dx.doi.org/10.1117/12.701908>.
- [122] M. Jazayerifar et al., "Performance evaluation of DWDM communication systems with fiber optical parametric amplifiers," *J. Lightware Technol.*, vol. 31, no. 9, pp. 1454-1461, 2013.