



ΧΑΡΟΚΟΠΕΙΟ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΑΘΗΝΩΝ
ΤΜΗΜΑ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΚΗΣ ΚΑΙ ΤΗΛΕΜΑΤΙΚΗΣ

ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΩΝ ΣΠΟΥΔΩΝ

Κατεύθυνση: Προηγμένα Τηλεπικοινωνιακά Συστήματα και Εφαρμογές

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

«Τεχνολογία κλειδωμένης έγχυσης σε δίκτυα FTTH»

Αβραμίδα Κων. Μαριάννα

Επιβλέπων Καθηγητής:

Καμαλάκης Θ. *Επίκουρος Καθηγητής*

ΧΑΡΟΚΟΠΕΙΟ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΑΘΗΝΩΝ
ΤΜΗΜΑ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΚΗΣ ΚΑΙ ΤΗΛΕΜΑΤΙΚΗΣ

ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΩΝ ΣΠΟΥΔΩΝ

Κατεύθυνση: Προηγμένα Τηλεπικοινωνιακά Συστήματα και Εφαρμογές

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

«Τεχνολογία κλειδωμένης έγχυσης σε δίκτυα FTTH»

Αβραμίδα Κων. Μαριάννα

Εγκρίθηκε από την τριμελή εξεταστική επιτροπή την 9η Ιουλίου 2015

(Υπογραφή)

(Υπογραφή)

(Υπογραφή)

.....
Καμαλάκης Θ.
Επίκουρος Καθηγητής

.....
Αναγνωστόπουλος Δ.
Καθηγητής

.....
Μιχαλακέλης Χ.
Λέκτορας

Θα ήθελα να ευχαριστήσω τον καθηγητή Θωμά Καμαλάκη, για τη βοήθειά του, καθώς και όλους του διδάσκοντες του τμήματος για τις γνώσεις και την εμπειρία που μου προσέφεραν.

I. Abstract

The increase of broadband services, namely high speed internet, the rapid transmission of data, applications that require more bandwidth and the increase of the devices such as smartphones and computers in every home and business require high transmission rates. If all these requirements are rising rapidly, the new technologies should also respond quickly.

This problem began to get solved with the use of optic fibers and FTTH/FTTP networks. The FTTH network uses mainly the PON architecture as it is more attractive by offering high bandwidth, reliability and easy maintenance. The most common model that is used is the WDM-PON.

Furthermore, an old technology known as "injection locking", but recently it is implemented in networks, is applied for efficient use of the spectrum. Essentially, by using a second laser, the wavelength is getting narrowed for best performance of the system. The first applications were made in Korea, known for its achievements in optic systems, with the use of Fabry-Pérot laser, as it is more effective.

This paper, will show the operation of lasers which are used in FTTH networks (DFB, VCSEL, Fabry-Pérot), their performance according to studies, using the technology of injection locking, the injection locking and the WDM-PON architecture.

II. Περίληψη

Η αύξηση των ευρυζωνικών υπηρεσιών, δηλαδή, οι υψηλές ταχύτητες στο διαδίκτυο, η γρήγορη μετάδοση των δεδομένων, οι εφαρμογές που απαιτούν μεγαλύτερο εύρος ζώνης καθώς και η αύξηση των αντίστοιχων συσκευών, όπως τα smartphones και οι υπολογιστές σε κάθε σπίτι και επιχείρηση, απαιτούν και υψηλούς ρυθμούς μετάδοσης. Εφόσον όλες αυτές οι απαιτήσεις αυξάνονται με γρήγορους ρυθμούς έτσι και οι νέες τεχνολογίες πρέπει να ανταποκρίνονται επίσης γρήγορα σε αυτές.

Το πρόβλημα αυτό άρχισε να λύνεται με τη χρήση των οπτικών ινών και την εφαρμογή των FTTH/FTTP. Το FTTH χρησιμοποιεί κατά κύριο λόγο την αρχιτεκτονική PON καθώς είναι πιο ελκυστική προσφέροντας μεγάλο εύρος ζώνης, αξιοπιστία και εύκολη συντήρηση. Πιο συγκεκριμένα σύνηθες μοντέλο που χρησιμοποιείται είναι το WDM-PON.

Έπειτα, έρχεται μια παλιά τεχνολογία γνωστή ως «κλειδωμένη έγχυση» για αποδοτικότερη χρήση του φάσματος, αλλά με πρόσφατη εφαρμογή σε δίκτυα. Ουσιαστικά, με τη χρήση ενός δεύτερου laser στενεύεται το μήκος κύματος για καλύτερη απόδοση του συστήματος. Οι πρώτες εφαρμογές έγιναν στην Κορέα, γνωστή για τα επιτεύγματά της στα οπτικά συστήματα, με Fabry-Pérot laser, καθώς είναι αποτελεσματικότερα.

Στην παρούσα διπλωματική εργασία θα γίνει παρουσίαση της λειτουργίας των lasers που χρησιμοποιούνται στα δίκτυα FTTH (DFB, VCSEL, Fabry-Pérot), οι αποδόσεις τους σύμφωνα με μελέτες με την χρήση της τεχνολογίας της κλειδωμένης έγχυσης, η κλειδωμένη έγχυση και η αρχιτεκτονική WDM-PON.

III. Περιεχόμενα

I.	Abstract	5
II.	Περίληψη.....	6
III.	Περιεχόμενα.....	7
IV.	Πίνακας Σχημάτων/Πινάκων	10
V.	Κατάλογος των συντομογραφιών και συμβόλων	12
VI.	Επεξήγηση όρων.....	14
1.	Laser	17
1.1	Τι είναι laser	17
1.2	Φαινόμενα λειτουργίας	17
1.3	Αρχή λειτουργίας Laser	19
1.4	Λειτουργία Laser	21
1.5	Χαρακτηριστικά των Lasers.....	22
2.	DFB Laser Diode.....	24
3.	VCSEL Laser Diode	26
3.1	Ιστορικά στοιχεία	26
3.2	Λειτουργία.....	26
3.3	Πλεονεκτήματα	27
4.	Fabry–Pérot Laser Diode	29
4.1	Τεχνολογία Fabry–Pérot.....	29
4.2	Αρχή λειτουργίας.....	29
4.3	Κροσσοί συμβολής	33
4.4	Χαρακτηριστικές παράμετροι συμβολόμετρου Fabry-Pérot.....	34
4.4.1	Ελεύθερη φασματική περιοχή (FSR)	34
4.4.2	Ελάχιστο φασματικό εύρος (FWHM)	37
4.4.3	Λεπτότητα (Finesse) F.....	38
4.4.4	Φασματική διακριτική ικανότητα (RP).....	39
5.	Passive Optical Network-Παθητικό Οπτικό Δίκτυο	41
5.1	Αρχιτεκτονική PON	41
5.2	Άχρωμες Πηγές Φωτός (Colorless Light Sources)	42
5.3	Πλεονεκτήματα PON	42
5.4	Μειονεκτήματα PON	43

5.5 Πρότυπα PON	43
5.6 Wavelength Division Multiplexing PON	44
5.7 Λειτουργία WDM-PON	45
5.8 Πλεονεκτήματα WDM-PON.....	45
5.9 Χαρακτηριστικά συστημάτων WDM-PON.....	46
5.10 Subcarrier Multiplexing (SCM)	47
5.11 DWDM (Dense WDM)	47
6. Κλειδωμένη Έγχυση.....	50
6.1 Τεχνολογία κλειδωμένης έγχυσης	50
6.2 Ιστορικά στοιχεία	53
6.3 Πλεονεκτήματα της τεχνολογία κλειδωμένης έγχυσης	54
6.4 Ποια lasers χρησιμοποιούνται στην τεχνολογία κλειδωμένης έγχυσης.....	55
7. Κλειδωμένη έγχυση με χρήση DFB Diode	58
7.1 Χρήση master και slave DFB laser [29].....	59
8. Κλειδωμένη έγχυση με χρήση VCSEL Laser.....	61
8.1 Single Transverse Mode VCSEL [30]	61
8.2 Multi-Transverse Mode VCSEL [30].....	62
8.3 Χρήση δύο VCSEL Laser [33].....	64
8.4 Δίκτυο PON με δύο στάδια κλειδωμένης έγχυσης VCSEL με χρήση NDF [31]	64
8.5 Περίπτωση τριών σταδίων κλειδωμένης έγχυσης [31].....	66
8.6 Απομακρυσμένη κλειδωμένη έγχυση με δύο VCSEL lasers σε WDM-PON [32]	66
8.7 In-house δίκτυα με κλειδωμένη έγχυση VCSEL σε GI-POF συνδέσεις [39]	68
9. Κλειδωμένη έγχυση με χρήση των Fabry-Pérot Laser Diode	72
9.1 Λειτουργία [35].....	72
9.1.1 Relative intensity noise (Σχετική ένταση του θορύβου)	74
9.1.2 Συχνότητα Roll-off	76
9.1.3 Παράγοντας ενίσχυσης linewidth (linewidth enhancement factor)	76
9.1.4 Επιπτώσεις της εγχεόμενης ισχύος	77
9.2 Κλειδωμένη έγχυση των Fabry-Pérot με QD-MLL [44]	77
9.3 WDM-PON δίκτυα και κλειδωμένη έγχυση στα Fabry-Pérot.....	79
9.3.1 Δίκτυο WDM-PON με χρήση κλειδωμένης έγχυσης στα Fabry-Pérot Laser Diode [25]	79
9.3.2 Οπτική καταστολή θορύβου με χρήση RSOA για δίκτυα WDM/SCM-PON [19]....	82
9.3.3 Κλειδωμένη έγχυση στα Fabry-Pérot από EDFL σε WDM δίκτυα [41].....	83

9.3.4 Δοκιμαστικό σύστημα του WDM-PON με κλειδωμένη έγχυση στα Fabry-Pérot [42]	85
9.3.5 Κλειδωμένη έγχυση σε WDM-PON σε πομπούς FP-LD SFP [18].....	87
9.3.6 VPN σε WDM-PON δίκτυα με χρήση κλειδωμένης έγχυσης στα Fabry-Pérot [34]	88
9.4 Σύστημα DWDM-PON και χρήση κλειδωμένης έγχυσης με laser Fabry Pérot [20].....	90
9.4.1 DWDM-PON με χρήση OOK και κλειδωμένη έγχυση Fabry-Pérot Laser	90
9.4.2 DWDM-PON με χρήση DPSK και κλειδωμένη έγχυση Fabry-Pérot Laser	90
9.4.3 DWDM-PON με χρήση ASE και κλειδωμένη έγχυση Fabry-Pérot Laser	91
10. Συμπεράσματα	92
VII. Βιβλιογραφία.....	93

IV. Πίνακας Σχημάτων/Πινάκων

Σχήμα 1.1: Απορρόφηση

Σχήμα 1.2: Αυθόρμητη εκπομπή

Σχήμα 1.3: Εξαναγκασμένη εκπομπή

Σχήμα 1.4: Laser 3 σταθμών

Σχήμα 1.5: Laser 4 σταθμών

Σχήμα 1.6: Αρχή λειτουργίας laser

Σχήμα 1.7: Λειτουργία Laser

Σχήμα 2.1: Δομή DFB Laser

Σχήμα 3.1: Κλασσική δομή VCSEL

Σχήμα 4.1: Οι διαδοχικές ανακλάσεις των ακτινών ανάμεσα στους δύο καθρέφτες

Σχήμα 4.2: Κατανομή της έντασης των κροσσών σε συμβολή πολλαπλών ακτινών, συναρτήσει της διαφοράς φάσης, για διάφορες τιμές R της ανακλαστικότητας των δύο καθρεφτών

Σχήμα 4.3: Σχηματισμός κροσσών συμβολής

Σχήμα 4.4: (α) Στην κοιλότητα συντηρούνται τρόποι ταλάντωσης συγκεκριμένων μηκών κύματος. (β) Φασματική απόκριση του συμβολόμετρο F-P.

Σχήμα 4.5: Εύρος κροσσών

Σχήμα 4.6: Τρόποι ταλάντωσης ακτινοβολίας δυο μηκών κύματος

Σχήμα 5.1: Αρχιτεκτονική PON

Σχήμα 5.2: Σύστημα WDM

Σχήμα 5.3: WDM-PON

Σχήμα 6.1: Κλειδωμένη έγχυση δύο lasers

Σχήμα 6.2: (α) Απλή λειτουργία laser (β) Λειτουργία laser με κλειδωμένη έγχυση

Σχήμα 6.3: Συμπεριφορά του slave laser όταν το εγχεόμενο σήμα χαμηλής ισχύος είναι συντονισμένο στο εξωτερικό ή στο εσωτερικό του κλειδωμένου εύρους

Σχήμα 6.4: Το πείραμα του Huygens (α) Εκκρεμή ρολόγια εκτός φάσης και συχνότητας τοποθετημένα στον ίδιο τοίχο. (β) Με την πάροδο του χρόνου τα εκκρεμή ρολόγια έχουν κλειδωμένη συχνότητα και αντίθετες φάσεις.

Σχήμα 6.5: Κλειδωμένη έγχυση

Σχήμα 7.1: Κλειδωμένη έγχυση σε δύο DFB lasers

Σχήμα 8.1: Σύγκριση ελεύθερης λειτουργίας και κλειδωμένης έγχυσης για την απόσταση στα VCSEL

Σχήμα 8.2: Σχηματικό διάγραμμα slave MM-VCSEL

Σχήμα 8.3: Σύγκριση ελεύθερης λειτουργίας και κλειδωμένης έγχυσης για την απόσταση στα MM-VCSEL

Σχήμα 8.4: Δύο στάδια κλειδωμένης έγχυσης VCSEL

Σχήμα 8.5: Σχηματικό διάγραμμα ολοκληρωμένου FTTH και GI-POF in-house δικτύου

Σχήμα 8.6: Το μετρούμενο BER των 20 Mbps/5.8 GHz (VCSEL1)

Σχήμα 8.7: Το μετρούμενο BER των 70 Mbps/10 GHz (VCSEL).

Σχήμα 9.1: Το πολύτροπο laser γίνεται μονότροπο

Σχήμα 9.2: Fabry–Pérot Laser Diode Wavelength Locked

Σχήμα 9.3: Χάρτης έγχυσης

Σχήμα 9.4: Απλοποιημένη αρχιτεκτονική του συστήματος πρόσβασης WDM με χρήση κλειδωμένης έγχυσης με Fabry–Pérot και QD-MLL

Σχήμα 9.5: Δίκτυο WDM-PON που βασίζεται σε έγχυση του μήκους κύματος με χρήση Fabry–Pérot

Σχήμα 9.6: Πειραματική διάταξη με πηγή EDFL

Σχήμα 9.7: Μετάδοση B2B και μετά από 25 χιλιόμετρα μονότροπης ίνας

Σχήμα 9.8: Σύστημα WDM-PON 8 αμφίδρομων καναλιών

Σχήμα 9.9: Αμοιβαία κλειδωμένη έγχυση στο Fabry–Pérot laser (**α**) συνεχές κύμα και εγχεόμενο σήμα (**β**) Είσοδος και έξοδος της ακολουθίας των bits

Πίνακας 6.1: Συγκριτικός πίνακας των lasers

Πίνακας 6.2: Οπτικές ζώνες

Πίνακας 8.1: Συγκριτικός πίνακας των downstream σημάτων

Πίνακας 9.1: Relative intensity noise του κλειδωμένου Fabry–Pérot για διαφορετικές τιμές εγχυμένης ισχύος

Πίνακας 9.2: Η εξάρτηση της LEF από την ισχύ της έγχυσης

V. Κατάλογος των συντομογραφιών και συμβόλων

Οι ακόλουθες συντομεύσεις χρησιμοποιούνται καθ' όλη τη διπλωματική.

AR/HR	Anti-Reflection/High-reflection
ASE	Amplified Spontaneous Emission
AWG	Arrayed Waveguide Grating
B2B	Back-to-Back
BER	Bit Error Rate
BLS	Broadband Light Source
CNR	Carrier-to-noise ratio
CO	Central Office
dBc	Decibels Relative to the Carrier
DFB	Distributed Feedback Laser
DPSK	Differential Phase Shift Keying
ECL	External Cavity Laser
EDFA	Erbium Doped Fiber Amplifier
ER	Extinction Ratio
EVM	Error vector magnitude
FP	Fabry–Pérot
FSR	Free Spectral Range
FTTC	Fiber to the Curd
FTTH	Fiber to the Home
FTTN	Fiber to the Node
FTTP	Fiber to the Premises
FWA	Fixed Wireless Access
HPF	High-pass filter
GI-POF	Graded-Index Plastic Optic Fiber
LASER	Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation
LED	Light-Emitting Diode
LEF	Linewidth Enhancement Factor
MPN	Mode Partition Noise
MZ	Mach-Zehnder

NDF	Non-Dispersion Fiber
OBI	Optical Beat Interference
OC	Optical Circulator
OLT	Optical Line Terminal
ONT	Optical Network Terminal
ONU	Optical Network Units
OTF	Optical Tunable Filter
P2MP	Point-to-Multipoint
P2P	Point-to-Point
PD	Photodiodes
POF	Plastic optical fiber
PON	Passive Optical Network
PSK	Phase-Shift Keying
QAM	Quadrature Amplitude Modulation
QD-MLL	Quantum-Dash Mode-Locked Laser
RF	Radio-Frequency
RIN	Relative Intensity Noise
RN	Remote Node
RO	Relaxation Oscillation
RSOA	Reflective Semiconductor Optical Amplifier
SCM	Subcarrier Multiplexing
SFP	Small Form-factor Pluggable
SMF	Single Mode Fiber
SMSR	Side Mode Suppression Ratio
SOA	Semiconductor Optical Amplifier
SSB	Single-SideBand modulation
TDL	Tunable Diode Laser
TDM	Time Division Multiplexing
TOBPF	Tunable Optical Band-Pass Filter
VCSEL	Vertical-Cavity Surface-Emitting Laser
VPN	Virtual Private Network
VOA	Variable Optical Attenuator
WDM	Wavelength Division Multiplexing

VI. Επεξήγηση όρων

ASE: Το φως που παράγεται από αυθόρμητη εκπομπή, η οποία έχει οπτικά ενισχυθεί με τη μέθοδο της εξαναγκασμένης εκπομπής

AWG: Χρησιμοποιούνται ως οπτικοί (από) πολυπλέκτες στα συστήματα WDM

Carrier/Subcarrier (Φέρον/Υποφέρων): Κυματομορφή διαμορφωμένη με ένα σήμα εισόδου για τη διαβίβαση πληροφοριών. Το φέρον κύμα είναι συνήθως μια πολύ υψηλότερη συχνότητα από το σήμα εισόδου./ Ένα ήδη διαμορφωμένο σήμα, το οποίο κατόπιν διαμορφώνεται σε ένα άλλο σήμα υψηλότερης συχνότητας και εύρους ζώνης. Αυτή είναι μια πρώιμη και απλή μέθοδος πολυπλεξίας.

Chirp: Σήμα στο οποίο οι συχνότητες αυξάνονται ή μειώνονται με τον χρόνο (τιτίβισμα)

Decibels Relative to the Carrier: Ο λόγος ισχύος ενός σήματος σε ένα σήμα φέροντος, εκφραζόμενο σε decibels. Για παράδειγμα, ο θόρυβος φάσης εκφράζεται σε dBc / Hz σε μία δεδομένη συχνότητα μετατοπισμένη από το φέρον. Σαν dBc μπορεί επίσης να χρησιμοποιηθεί σαν μέτρηση μεταξύ του επιθυμητού σήματος και των ανεπιθύμητων παρασιτικών εξόδων που προκύπτουν από τη χρήση των μετατροπέων σήματος.

EDFA: Ενισχυτής ίνας με πρόσμιξη ερβίου που ενισχύει ένα σήμα οπτικής ίνας

Edge-emitting lasers (ή in-plane lasers): Το φως του laser διαδίδεται σε μια κατεύθυνση κατά μήκος της επιφάνειας του τσιπ του ημιαγωγού και ανακλάται ή συζεύγεται σε μία διασπασμένη άκρη.

ER: Ο λόγος δύο οπτικών επιπέδων ισχύος ενός ψηφιακού σήματος που παράγεται από μία οπτική πηγή

EVM: Μέτρο που χρησιμοποιείται για την ποσοτικοποίηση της απόδοσης του ψηφιακού πομπού ή δέκτη

FSR: Απόσταση οπτική συχνότητας των αξονικών τρόπων του αντηχείου

FWA: Λειτουργία ασύρματων συσκευών ή συστημάτων που χρησιμοποιούνται για τη σύνδεση δύο σταθερών θέσεων με ασύρματη σύνδεση

Laser Detuning (αποσυντονισμός laser): Η ρύθμιση ενός laser σε μια συχνότητα που είναι ελαφρώς μακριά από την συχνότητα συντονισμού ενός κβαντικού συστήματος.

LEF: Συντελεστής αναλογίας που συσχετίζει τις αλλαγές φάσης με αυτές του κέρδους

Linewidth: Το πλάτος γραμμής του laser, τυπικά ενός laser μονής συχνότητας, είναι το πλάτος του οπτικού φάσματος του

Longitudinal λειτουργία: Μια διαμήκης λειτουργία της κοιλότητας συντονισμού είναι ένα συγκεκριμένο μοτίβο στάσιμου κύματος που σχηματίζεται από τα κύματα που περιορίζονται στην κοιλότητα. Οι διαμήκεις λειτουργίες αντιστοιχούν στα μήκη κύματος του κύματος που ενισχύονται μετά από πολλές αντανakλάσεις. Όλα τα άλλα μήκη κύματος καταστέλλεται από καταστροφική παρεμβολή.

Mode-spacing: Το διάστημα μεταξύ των τρόπων των πολύτροπων laser

MPN: Το jitter της φάση του σήματος που προκαλείται από τον συνδυασμό των επιπτώσεων της οπτικής πηγής και των παραμορφώσεων της ίνας

Near-single sideband Modulation: Επιδρά στη μείωση της χρωματικής διασποράς των ινών

NDF: Ίνες με αρνητική διασπορά

Nonlinearity: ένα μη γραμμικό σύστημα, σε αντίθεση με τα γραμμικά συστήματα, είναι ένα αυτό που δεν πληροί την αρχή της επαλληλίας, δηλαδή, η παραγωγή ενός μη γραμμικού συστήματος δεν είναι ευθέως ανάλογη προς την είσοδο. Τα μη γραμμικά συστήματα κάτω από ορισμένες συνθήκες παρουσιάζουν ευαισθησία στις αρχικές συνθήκες

Quantum-Dash: Ένας τύπος κβαντικού συστήματος. Υπάρχουν τα Quantum-Dash και τα Quantum-Dots συστήματα. Τα Quantum-Dots είναι τα πιο κοινά και εκπέμπουν στα 1 mm έως 1.3 mm, του υλικού InAs/GaAs. Τα Quantum-Dots του υλικού InP, εκπέμπουν κοντά στο 1.5 mm, αλλά είναι δύσκολο να υλοποιηθούν. Για τα υψηλής ποιότητας laser και οπτικούς ενισχυτές για το φάσμα των 1.5 mm, έχουν εφαρμοστεί Quantum-Dash συστήματα με υλικό InAs/InP.

Relaxation Oscillation: Όταν ένα laser έχει διαταραχθεί κατά τη διάρκεια της λειτουργίας του, η ισχύς εξόδου δεν επιστρέφει αμέσως σε σταθερή κατάσταση. Οι αλλαγές στην αντλία ισχύος οδηγούν στις λεγόμενες ταλαντώσεις χαλάρωσης.

RIN: Περιγράφει την αστάθεια στο επίπεδο ισχύος του laser

Roll-off frequency: Συχνότητα αποκοπής

SFP: Πρόκειται για έναν hot-pluggable πομποδέκτη και διασυνδέεται με τη μια μητρική πλακέτα μιας συσκευής δικτύου (switch, router κλ.π.) σε καλώδιο οπτικών ινών ή χαλκού

Sideband: Είναι μία ζώνη συχνοτήτων υψηλότερη από ή μικρότερη από τη συχνότητα του φέροντος, με ισχύ. ως αποτέλεσμα της διαδικασίας διαμόρφωσης. Αυτή η διαμόρφωση πλάτους ενός φέροντος κύματος συνήθως οδηγεί σε δύο

πλευρικές ζώνες (two mirror-image sidebands). Οι συνιστώσες του σήματος πάνω από τη συχνότητα του φέροντος αποτελούν την άνω πλευρική ζώνη (USB-Upper Sideband), και εκείνες κάτω από τη συχνότητα του φέροντος αποτελούν την κάτω πλευρική ζώνη (LSB-Lower Sideband)

SMSR: Η διαφορά πλάτους μεταξύ της κύριας λειτουργίας και της μεγαλύτερης λειτουργίας σε decibels

SSB modulation: Βελτίωση του εύρους διαμόρφωσης που χρησιμοποιεί την ισχύ του πομπού και το εύρος ζώνης πιο αποτελεσματικά.

Συχνότητα Αποκοπής: (-3dB bandwidth) κόβει τις συχνότητες που είναι μικρότερες ή μεγαλύτερες

1. Laser

1.1 Τι είναι laser

Το laser είναι ένας ενισχυτής φωτός. Το ακρωνύμιό του σημαίνει συγκεκριμένα, ενίσχυση φωτός με εξαναγκασμένη εκπομπή ακτινοβολίας. Η λειτουργία του βασίζεται στα φαινόμενα της αυθόρμητης εκπομπής, της απορρόφησης και της εξαναγκασμένης εκπομπής, τα οποία πραγματοποιούνται όταν ένα ηλεκτρομαγνητικό κύμα αλληλεπιδρά με ένα υλικό. Ουσιαστικά, δημιουργείται ένα στάσιμο ηλεκτρομαγνητικό κύμα στην οπτική κοιλότητα του laser, το οποίο σαν έξοδο έχει μια μονοχρωματική, σύμφωνη ακτινοβολία.

1.2 Φαινόμενα λειτουργίας

Απορρόφηση: Ένα άτομο μπορεί να απορροφήσει ένα φωτόνιο και να μεταβεί από μια στάθμη χαμηλότερης ενέργειας E_1 (ζώνη σθένους) σε μία άλλη στάθμη υψηλότερης ενέργειας E_2 (ζώνη αγωγιμότητας) και θα δημιουργηθεί μία οπή. Το φωτόνιο θα πρέπει να έχει κατάλληλη συχνότητα ή το μήκος κύματος για να προσδώσει στο άτομο την ενέργεια που χρειάζεται, ώστε να διεγερθεί σε υψηλότερη ενεργειακή στάθμη.



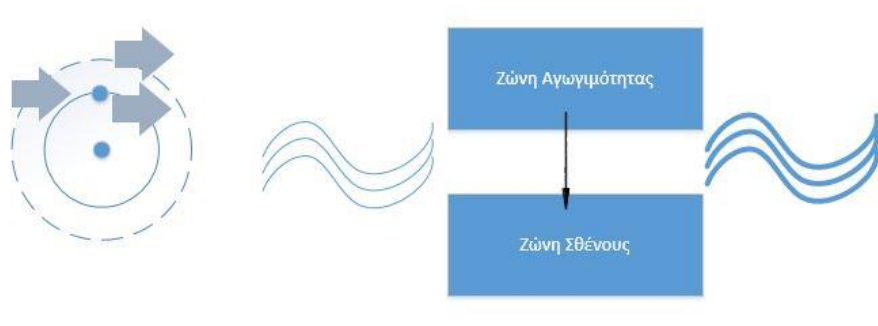
Σχήμα 1.1: Απορρόφηση

Αυθόρμητη εκπομπή: Έπειτα από την απορρόφηση ενέργειας, το άτομο του ημιαγωγού βρίσκεται σε μία κατάσταση διέγερσης, στην οποία δεν θα παραμείνει πολύ. Τα ηλεκτρόνια που είναι ελεύθερα καταλαμβάνουν τις ελεύθερες θέσεις των οπών. Αυτή είναι η διαδικασία αποδιέγερσης και συνοδεύεται από την αυθόρμητη εκπομπή, σε τυχαία διεύθυνση, ενός φωτονίου συχνότητας. Το μήκος κύματος (λ) εξαρτάται από το υλικό του χρησιμοποιούμενου ημιαγωγού.



Σχήμα 1.2: Αυθόρμητη εκπομπή

Εξαναγκασμένη εκπομπή: Τα διεγερμένα ηλεκτρόνια, λόγω της απορρόφησης, μπορούν να εξαναγκαστούν σε αποδιέγερση με πρόσπτωση πρόσθετης φωτεινής ακτινοβολίας κατάλληλης συχνότητας. Από αυτή την αποδιέγερση του ατόμου παράγεται ένα ακόμη φωτόνιο ενέργειας E_2-E_1 , έτσι που τελικά, υπάρχει ταυτόχρονη εκπομπή δύο φωτονίων. Η εκπεμπόμενη ακτινοβολία παρουσιάζει την ίδια φάση με την προσπίπτουσα, την ίδια φορά και το ίδιο μήκος κύματος.



Σχήμα 1.3: Εξαναγκασμένη εκπομπή

Ουσιαστικά, με την εξαναγκασμένη εκπομπή εξασφαλίζεται η οπτική ενίσχυση στα περισσότερα lasers. Για να υπάρξει όμως αυτό το φαινόμενο, θα πρέπει το προσπίπτον φωτόνιο να μην απορροφηθεί από κάποιο άλλο άτομο στη ζώνη σθένους. Όταν θεωρούμε ένα σύνολο ατόμων σε μία διαδικασία ενίσχυσης φωτός, θα πρέπει να έχει εξασφαλιστεί η παρουσία των περισσότερων στη ζώνη αγωγιμότητας, αλλιώς τα προσπίπτοντα φωτόνια θα απορροφηθούν από τα άτομα της ζώνης σθένους. Το φαινόμενο αυτό, ονομάζεται αναστροφή πληθυσμών. Βέβαια, σε συνθήκες θερμοδυναμικής ισορροπίας, δεν είναι δυνατόν να υπάρξει μεγαλύτερος πληθυσμός ατόμων στη ζώνη αγωγιμότητας από τη ζώνη σθένους. Αν όμως μπορέσει

και δημιουργηθεί το φαινόμενο αντιστροφής πληθυσμών, ο ρυθμός εξαναγκασμένης εκπομπής γίνεται μεγαλύτερος από τον ρυθμό απορρόφησης και της αυθόρμητης εκπομπής. Επομένως, τα παραγόμενα φωτόνια προκαλούν συνεχείς επανασυνδέσεις με αποτέλεσμα την παραγωγή φωτεινής ακτινοβολίας μεγάλης ισχύος, δηλαδή, τη λειτουργία του laser.

1.3 Αρχή λειτουργίας Laser

Υπάρχουν πολλών ειδών lasers, με διαφορετικά χαρακτηριστικά το καθένα, αλλά όλα έχουν τρεις βασικές αρχές λειτουργίας.

Ενεργό υλικό: Είναι το υλικό που έχει τις ενεργειακές στάθμες, οι οποίες πρέπει να είναι τουλάχιστον τρεις, για τις μεταπτώσεις των ηλεκτρονίων ώστε να λειτουργήσει το laser. Ουσιαστικά, είναι ο ενισχυτής της οπτικής ακτινοβολίας που περνά από αυτό.

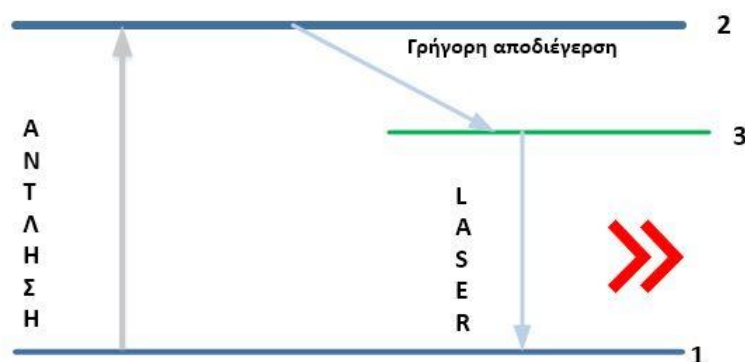
Οπτικό αντηχείο: Αποτελείται από δύο καθρέφτες που τοποθετούνται κάθετα στον οπτικό άξονα του laser και εκεί εγκλωβίζεται η ακτινοβολία. Με αυτό το σύστημα, το ενεργό φαινομενικό μήκος του ενισχυτικού μέσου πολλαπλασιάζεται και δημιουργείται το λεγόμενο φαινόμενο της ανατροφοδότησης (feedback), ώστε το laser να λειτουργεί σε μία αυτοσυντηρούμενη ταλάντωση.

Διαδικασία άντλησης: Αυτή η διαδικασία αφορά την αντιστροφή των πληθυσμών, που αναφέρθηκε προηγουμένως, η οποία δεν μπορεί να επιτευχθεί με δύο ενεργειακές στάθμες. Συνήθως χρησιμοποιούνται συστήματα με τρεις ή τέσσερις ενεργειακές στάθμες.

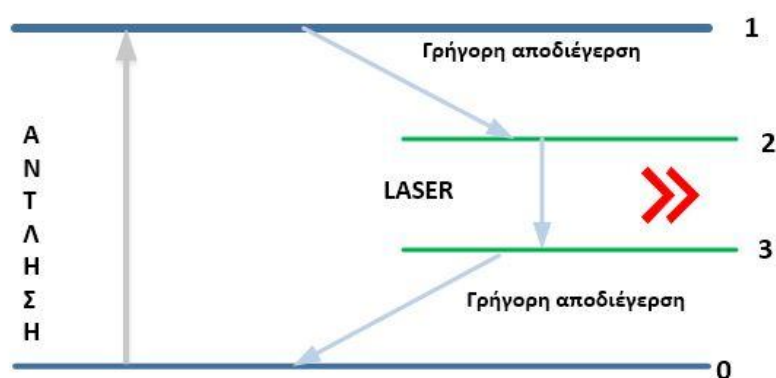
Στο σύστημα των τριών ενεργειακών σταθμών, τα άτομα διεγείρονται από τη βασική στάθμη 1, στην διεγερμένη στάθμη 2. Έπειτα ακολουθεί μια πολύ γρήγορη μετάβαση στην στάθμη 3. Εάν η αποδιέγερση από την στάθμη 3 στην βασική στάθμη 1 είναι πολύ πιο αργή από ότι από την 2 στην 3 τότε επιτυγχάνεται η αντιστροφή πληθυσμού.

Στο σύστημα των τεσσάρων σταθμών, τα άτομα διεγείρονται από τη βασική στάθμη 0 στην διεγερμένη στάθμη 1. Έπειτα, ακολουθεί μία πολύ γρήγορη μετάβαση στην στάθμη 2. Εάν η αποδιέγερση από την στάθμη 2 στην στάθμη 3 είναι πολύ πιο

αργή από ότι από την 1 στην 2, τότε επιτυγχάνεται η αντιστροφή πληθυσμού. Για να επιστρέψει το σύστημα στην βασική του κατάσταση και να κλείσει αυτός ο κύκλος θα πρέπει η μετάβαση από τη στάθμη 3 στη στάθμη 0 να είναι και αυτή πολύ γρήγορη.



Σχήμα 1.4: Laser 3 σταθμών



Σχήμα 1.5: Laser 4 σταθμών

Η διαδικασία της διέγερσης από τη βασική κατάσταση στην ανώτερη διεγερμένη στα παραπάνω συστήματα σταθμών ονομάζεται άντληση. Είναι πιο εύκολο να επιτευχθούν συνθήκες αντιστροφής πληθυσμού στα συστήματα των τεσσάρων σταθμών, διότι στο σύστημα τριών σταθμών για να επιτευχθούν συνθήκες αντιστροφής πληθυσμού θα πρέπει ο πληθυσμός των ατόμων της κατάστασης 2 να είναι μεγαλύτερος από αυτόν της κατάστασης 1

Άρα, θα πρέπει ο πληθυσμός της κατάστασης 2 (δηλ. κατάσταση 3 στο σχήμα 1.4) να γίνει πρώτα ίσος με αυτόν της βασικής κατάστασης 1 ώστε να αρχίσει η διαδικασία λειτουργίας του laser. Αντιθέτως, στα συστήματα των τεσσάρων

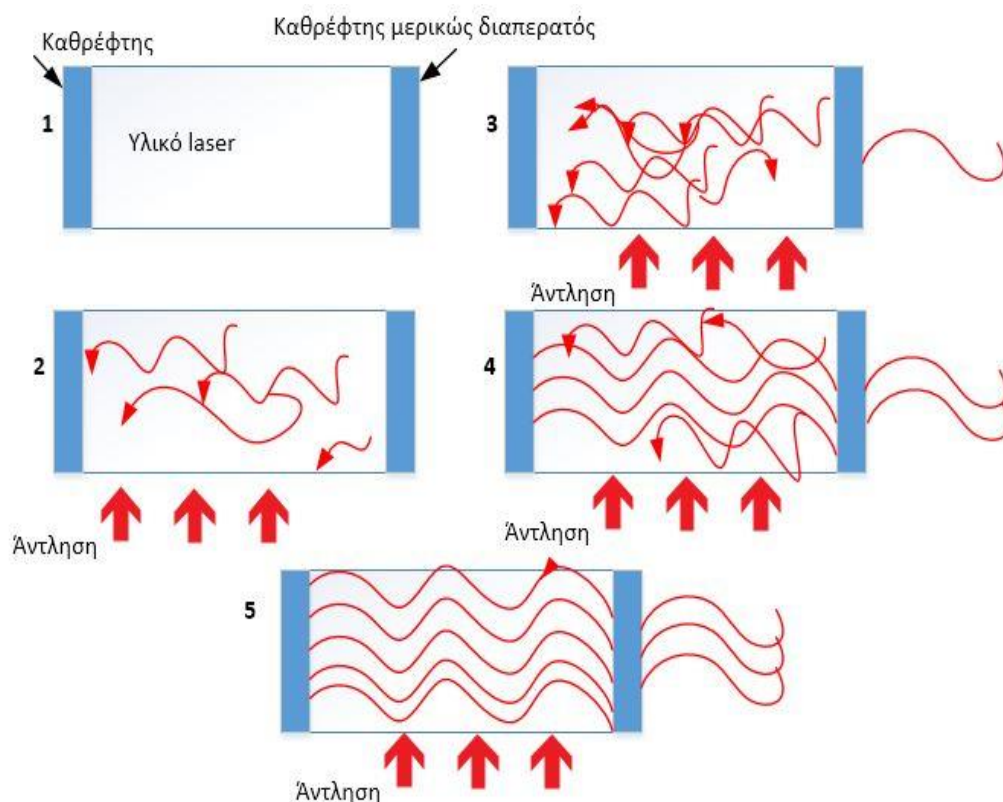
σταθμών, επειδή η κατάσταση 1 (δηλ. κατάσταση 3 στο σχήμα 1.5) είναι άδεια, η αντιστροφή πληθυσμών, άρα η διαδικασία λειτουργίας του laser, ξεκινάει από την πρώτη διέγερση στην κατάσταση 2, δηλαδή αμέσως.



Σχήμα 1.6: Αρχή λειτουργίας laser

1.4 Λειτουργία Laser

Αρχικά το laser, οι δυο καθρέφτες της κοιλότητας και το ενισχυτικό μέσο, αρχίζει να αντλείται (1). Αυτή η άντληση έχει ως αποτέλεσμα την διέγερση των ατόμων του ενισχυτικού μέσου. Εν συνεχεία, τα άτομα αποδιεγείρονται τυχαία σε πολύ μικρούς χρόνους (nanosecond) μέσω της αυθόρμητης αποδιέγερσης (2). Τα φωτόνια που προκύπτουν, εκπέμπονται προς όλες τις διευθύνσεις. Μερικά από αυτά, έστω και ένα, που τυγχάνει να διαδίδονται στον άξονα της κοιλότητας ανακλώνται πολλαπλώς μεταξύ των καθρεφτών επάγοντας έτσι την εξαναγκασμένη αποδιέγερση των ατόμων του ενισχυτικού μέσου (3). Τα προκύπτοντα φωτόνια εκπέμπονται στην ίδια διεύθυνση με τον άξονα της κοιλότητας με αποτέλεσμα το φαινόμενο να παίρνει πολύ γρήγορα διαστάσεις χιονοστιβάδας (4). Έτσι, πολύ γρήγορα, η διαδικασία άντλησης, ενίσχυσης και απώλειες, έρχονται σε μία ισορροπία και το laser τίθεται στην πλήρη λειτουργία του (5).



Σχήμα 1.7: Λειτουργία Laser

1.5 Χαρακτηριστικά των Lasers

Μονοχρωματικότητα: Το laser είναι αυτό που μπορεί να δώσει το καλύτερο δυνατό και ως προς το ιδανικό μονοχρωματικό φως. Αυτό συμβαίνει πρώτον, διότι μόνο η ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία όταν έχει την κατάλληλη συχνότητα μπορεί να ενισχυθεί και δεύτερον αυτή η συχνότητα υποστηρίζεται από το φάσμα συντονισμού της κοιλότητας του laser. Η δεύτερη ιδιότητα έχει ως αποτέλεσμα το φιλτράρισμα του εύρους αυτής της συχνότητας που αντιστοιχεί στη μετάβαση 2 στην 1 από το φάσμα των ιδιοσυχνοτήτων της κοιλότητας. Το τελικό αποτέλεσμα είναι μια πολύ πιο στενή φασματική γραμμή laser από αυτήν της μετάβασης κατά την αυθόρμητη εκπομπή.

Κατευθυντικότητα: Κριτήριο για την κατευθυντικότητα της δέσμης laser είναι το άνοιγμα της το οποίο ορίζεται σαν το διπλάσιο της γωνίας, που σχηματίζει η εξωτερική ακτίνα της δέσμης, με την κεντρική ακτίνα. Η ακτινοβολία ενός laser είναι αυστηρά περιορισμένη σε μια λεπτή δέσμη μικρής εγκάρσιας διατομής. Έτσι, είναι δυνατή η σκόπευση αντικειμένων σε μεγάλες αποστάσεις και με μεγάλη ακρίβεια. Η ιδιότητα αυτή είναι άμεση απόρροια του γεγονότος ότι η διαδικασία της ενίσχυσης

του φωτός γίνεται μέσα στην κοιλότητα laser. Μόνο τα κύματα που διαδίδονται στον άξονα της κοιλότητας μπορούν υπάρξουν, να ενισχυθούν και τελικά να διαδοθούν εκτός της κοιλότητας. Η απόκλιση από την τέλεια κατευθυντικότητα οφείλεται στην ύπαρξη οπών κατά τη διάδοση της δέσμης στις οποίες λαμβάνει χώρα το φαινόμενο της περίθλασης.

Λαμπρότητα: Λαμπρότητα μιας πηγής ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων ορίζεται η ισχύς που εκπέμπεται ανά μονάδα επιφάνειας ανά μονάδα στερεάς γωνίας. Η λαμπρότητα είναι από τα πιο σημαντικά χαρακτηριστικά της δέσμης laser. Μια δέσμη laser ακόμη και μέτριας ισχύος έχει λαμπρότητα πολλές τάξεις μεγέθους από οποιαδήποτε άλλη πηγή φωτός. Ο βασικός λόγος είναι η υψηλή κατευθυντικότητα.

Πόλωση: Τα lasers παράγουν πολωμένο φως εξαιτίας είτε της φύσης τους, είτε της γεωμετρίας του ενεργού υλικού τους είτε επειδή έχουν προστεθεί οπτικά πολωτικά στοιχεία στο οπτικό αντηχείο τους, σε αντίθεση με άλλες πηγές φωτός.

Συμφωνία: Όταν το φως κάποιας πηγής είναι απόλυτα σύμφωνο και διατηρεί την συμφωνία αυτή ως προς τον χώρο και τον χρόνο, τότε υπάρχει απόλυτη συσχέτιση των μεταβολών του ηλεκτρικού πεδίου του φωτεινού σήματος σε κάποιο σημείο του χώρου με τις αντίστοιχες μεταβολές του σήματος σε κάποιο άλλο σημείο του χώρου. Εάν αυτές οι μεταβολές έχουν μετρηθεί και στα δύο σημεία κάποια χρονική στιγμή, τότε είναι δυνατόν να πούμε ποια είναι κατάσταση του ηλεκτρικού πεδίου στο δεύτερο σημείο μετρώντας απλά το πεδίο στο πρώτο σημείο. Αυτό φαίνεται από τη μορφή που παίρνει το πλάτος του ηλεκτρικού πεδίου στις περιπτώσεις της πλήρους συμφωνίας. Μόνο το μονοχρωματικό φως είναι απόλυτα σύμφωνο ως προς τον χώρο και τον χρόνο. Έτσι, οι πηγές laser χαρακτηρίζονται από υψηλό βαθμό χωρικής και χρονικής συμφωνίας, σε αντίθεση με άλλες πηγές οπτικής ακτινοβολίας. Η χωρική συμφωνία ορίζεται η μηδενική διαφορά φάσης μεταξύ δύο σημείων του μετώπου κύματος ενός H.M. κύματος, για κάθε χρονική στιγμή. Ενώ χρονική συμφωνία σημαίνει ότι για δεδομένο σημείο, η διαφορά φάσης του μετώπου κύματος ενός H.M. κύματος παραμένει σταθερή για κάθε t .

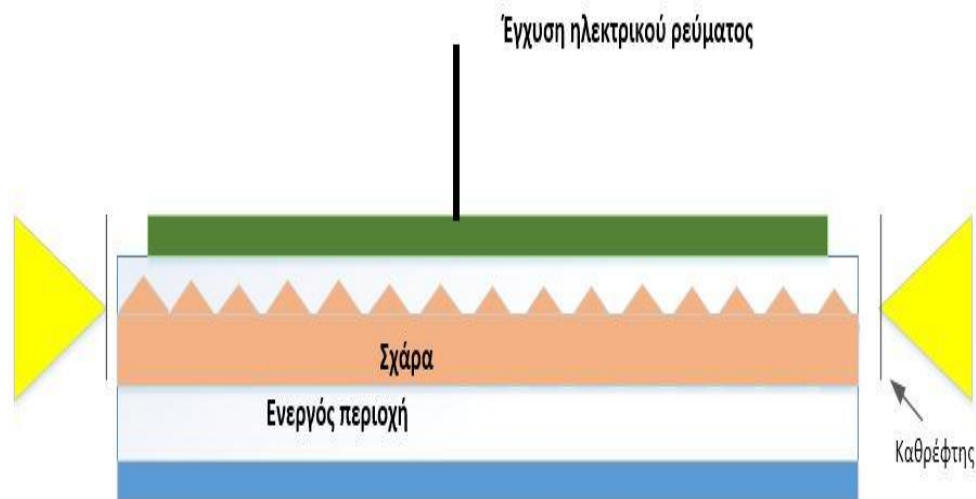
Παλμοί μικρής χρονικής διάρκειας: Τα lasers έχουν την δυνατότητα παραγωγής παλμών εξαιρετικά μικρής χρονικής διάρκειας. Η ιδιότητα της μικρής χρονικής διάρκειας συνεπάγεται συγκέντρωση ενέργειας στον χρόνο και θα μπορούσε να χαρακτηριστεί ως «αντίπαλος» της μονοχρωματικότητας.

2. DFB Laser Diode

Η κοιλότητα του laser DFB διαφέρει από τις σύνηθες. Δεν υπάρχει καμία διάκριση μεταξύ της οπτικής κοιλότητας και των καθρεφτών. Δεν χρησιμοποιούνται καθρέφτες για τον σχηματισμό της οπτικής κοιλότητας. Το φράγμα DFB παρέχει οπισθοανάκλαση που δεν αφήνει τα φωτόνια να διαφύγουν από τις δύο πλευρές. Πιο συγκεκριμένα, η δομή του παρεμβαίνει χτίζοντας μία μονοδιάστατη «σχάρα» (σκέδαση Bragg) η οποία παρέχει μια οπτική ανατροφοδότηση για το laser. Αυτή η διαδικασία, ενεργεί ως επιλεκτικό μήκος κύματος για τουλάχιστον έναν από τους καθρέφτες και παρέχει την ανατροφοδότηση, αντανακλώντας το φως πίσω στην κοιλότητα για να σχηματιστεί το αντηχείο. Η μηχανική αυτή (σχάρα), είναι κατασκευασμένη έτσι ώστε να αντανακλά μόνο μια στενή ζώνη μηκών κύματος, και έτσι να παράγεται ένας ενιαίος διαμήκης τρόπος laser. Η μεταβολή της θερμοκρασίας στο laser προκαλεί κάποια κλίση στη σχάρα και έτσι υπάρχει εξάρτηση του δείκτη διάθλασης και της θερμοκρασίας.

Αυτή η εξάρτηση προκαλείται από μία αλλαγή στην περιοχή κενού του ημιαγωγού laser με τη θερμοκρασία και τη θερμική διαστολή. Η αλλαγή στον δείκτη διάθλασης μεταβάλλει την επιλογή του μήκους κύματος της δομής της σχάρας και έτσι το μήκος κύματος της εξόδου laser, που παράγει ένα μήκος κύματος συντονισμού laser, το TDL. Το εύρος ρύθμισης είναι συνήθως της τάξης των 4 nm για περίπου 50K της μεταβολή της θερμοκρασίας, ενώ το εύρος του DFB είναι μερικά megahertz.

Υπάρχουν εναλλακτικές λύσεις για τα παραδοσιακά DFB lasers. Τα παραδοσιακά DFB έχουν αντανакλαστική επίστρωση στη μία πλευρά της κοιλότητας και μία άλλη επίστρωση για υψηλή ανακλαστικότητα στην άλλη πλευρά (AR/HR). Αυτά τα laser έχουν γενικά υψηλότερη ισχύ εξόδου διότι το φως λαμβάνεται από την πλευρά του AR, και η πλευρά HR εμποδίζει να χαθεί η ενέργεια από την πίσω πλευρά.



Σχήμα 2.1: Δομή DFB Laser

Η περίοδος του φράγματος είναι τέτοια έτσι ώστε να μπορεί να εξασφαλιστεί η ενισχυτική συμβολή της ακτινοβολίας που υπόκειται σε οπισθοσκέδαση και να επιτευχθεί το επιθυμητό μήκος κύματος. Τα διαθέσιμα μήκη κύματος είναι τα εξής: 760, 780, 795, 852, 976, 1064, 1083, 1392, 1655, 1742, 1872, 1950, 2004, 2050, 2330, 2334 και 2740 nm. Αυτά τα lasers εκπέμπουν σε ενιαίο χώρο και κατά μήκος ενός τρόπου.

3. VCSEL Laser Diode

3.1 Ιστορικά στοιχεία

Οι Soda, Iga, Kitahare και Yasuharu, παρουσίασαν το πρώτο VCSEL το 1979, αλλά οι πρώτες διατάξεις για λειτουργία συνεχούς κύματος σε θερμοκρασία δωματίου πραγματοποιήθηκαν το 1988. Οι Axel Scherer και Jack Jewell παρουσίασαν το πρώτο ημιαγωγικό VCSEL. Πλέον, τα VCSEL έχουν αντικαταστήσει τα lasers εκπομπής ακμής (edge-emitting laser) σε διάφορες εφαρμογές για επικοινωνία μικρής εμβέλειας.

3.2 Λειτουργία

Το VCSEL είναι laser ημιαγωγών, και πιο συγκεκριμένα είναι δίοδοι laser με ένα μονολιθικό αντηχείο laser, όπου το εκπεμπόμενο φως εξέρχεται από τη διάταξη σε μια κατεύθυνση κάθετη προς την επιφάνεια του chip. Το αντηχείο (κοιλότητα) υλοποιείται με δύο καθρέφτες ημιαγωγών Bragg. Σε αντίθεση με τα κλασσικά lasers ημιαγωγών, στα VCSEL, ο ημιαγωγός σχηματίζεται με την εναπόθεση εναλλασσόμενων στρωμάτων υψηλού και χαμηλού δείκτη ανακλαστικότητας, με πάχος, το $\frac{1}{4}$ του μήκους κύματος της ακτινοβολίας. Αυτά τα στρώματα διαμορφώνονται σε ακριβή απόσταση μεταξύ τους, έτσι ώστε να αντανακλούν σε συντονισμό την ακτινοβολία και η ισχύς της δέσμης να είναι πολύ υψηλή. Επίσης τα φωτόνια δημιουργούνται σε πολύ μικρότερο ενεργό όγκο και επηρεάζουν την τιμή του ελάχιστου ρεύματος που χρειάζεται για να ξεκινήσει την εκπομπή το VCSEL.

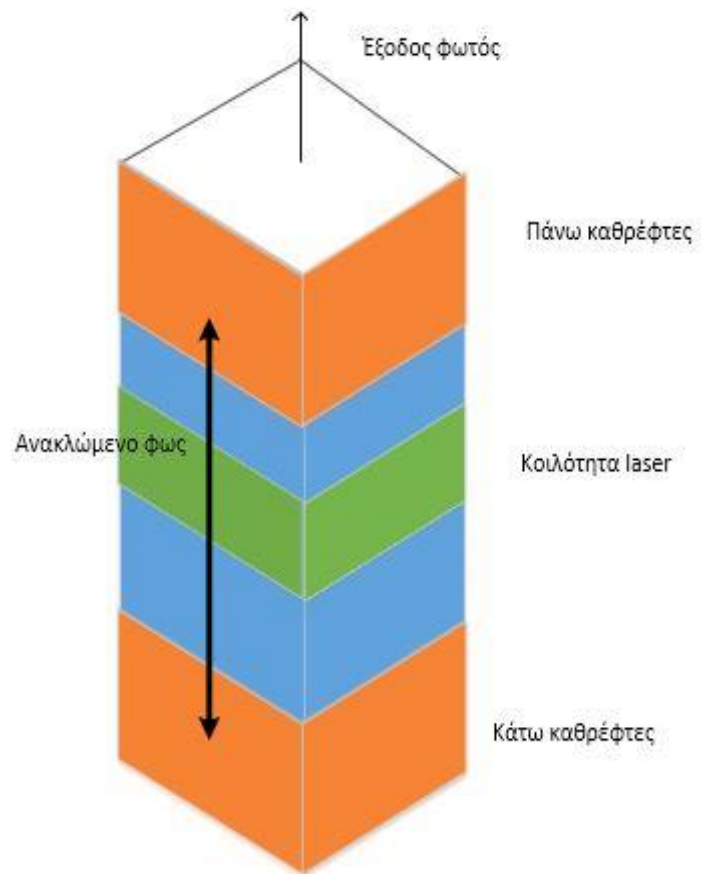
Τα κλασσικά VCSEL αποτελούνται από δύο παράλληλους καθρέφτες όπου ανάμεσά τους παρεμβάλλεται ένα λεπτό ενεργό στρώμα. Το πλήθος των ενεργών στρωμάτων κυμαίνεται από 20 με 30, και στόχος είναι η ανακλαστικότητα των καθρεφτών να είναι μεγαλύτερη του ποσοστού 99.9%, ώστε να επιτευχθεί η εκπομπή του φωτός. Επίσης, θα πρέπει να υπάρχει η δυνατότητα επαρκούς έγχυσης ηλεκτρονίων και οπών μέσα στην ενεργό περιοχή.

Τα πιο κοινά μήκη κύματος εκπομπής των VCSELs είναι στην περιοχή των 750-980 nm (συχνά γύρω 850 nm), με τα υλικά GaAs/AlGaAs. Ωστόσο, στα

μεγαλύτερα μήκη κύματος, (1.300, 1.550 ή ακόμα και μεγαλύτερα από 2 μm) μπορούν να ληφθούν με αραιά νιτρίδια και από συσκευές που βασίζονται σε φωσφορούχο ίνδιο.

3.3 Πλεονεκτήματα

- Με τον μικρό όγκο της κοιλότητας παρουσιάζεται πολύ χαμηλό ρεύμα κατωφλίου που φτάνει επίπεδα μικρότερα και από 1 mA
- Είναι δυνατή η διαφορά του ρεύματος κατωφλίου από το ρεύμα οδήγησης να είναι ακόμα και δύο τάξεις μεγέθους μεγαλύτερη από το ρεύμα κατωφλίου.
- Είναι εφικτή η μονότροπη δυναμική λειτουργία
- Έχουν μεγάλη συχνότητα χαλάρωσης και έτσι διαμορφώνονται σε υψηλές ταχύτητες
- Μεγαλύτερος χρόνος ζωής
- Έχουν μεγάλο βαθμό απόδοσης ισχύος
- Η ακτινοβολία εκπέμπεται κάθετα ως προς τη επιφάνεια
- Η σύζευξη με οπτικές ίνες δεν έχει δυσκολίες διότι μπορεί να επιτευχθεί προσαρμογή μονότροπων VCSEL με πολύτροπες ίνες μεγάλης διάμετρου
- Το κόστος παραγωγής είναι χαμηλό
- Η κόλληση και η στήριξη των δομών δεν παρουσιάζει δυσκολίες άρα έχουν μικρό κόστος συσκευασίας
- Έχουν τη δυνατότητα να αξιολογηθούν σε διάφορα στάδια κατά τη διάρκεια της κατασκευής τους



Σχήμα 3.1: Κλασσική δομή VCSEL

4. Fabry–Pérot Laser Diode

4.1 Τεχνολογία Fabry–Pérot

Το συμβολόμετρο Fabry–Pérot σχεδιάστηκε το 1899 από τους Γάλλους Charles Fabry και Alfred Pérot. Αποτελεί μια εξέλιξη του συμβολόμετρου Michelson. Η διαφορά τους είναι ότι το Fabry–Pérot κάνει χρήση του φαινομένου της συμβολής πολλαπλών ακτινών και για αυτό χρησιμοποιεί δυο παράλληλα μεταξύ τους οπτικά επίπεδα πλακίδια (καθρέφτες), που έχουν την ιδιότητα να ανακλούν μερικώς το φως στην εσωτερική τους πλευρά. Κάθε φορά που μια δέσμη φωτός διαπερνά την επιφάνεια του πρώτου καθρέφτη, ένα τμήμα της θα διέλθει του συστήματος των δυο καθρεφτών και θα περάσει στην άλλη πλευρά, ενώ το υπόλοιπο θα ανακλαστεί στην εσωτερική επιφάνεια του δεύτερου καθρέφτη και θα γυρίσει προς τα πίσω. Έτσι ξεκινάει ένας κύκλος διαδοχικών ανακλάσεων στις εσωτερικές επιφάνειες των καθρεφτών. Το αποτέλεσμα αυτής της διαδικασίας είναι η διάσπαση της αρχικής δέσμης σε πολλές δέσμες που εξέρχονται από την άλλη πλευρά όπου και συμβάλλουν. Οι κροσσοί συμβολής που παρατηρούνται παρουσιάζουν ένα υψηλό επίπεδο καθαρότητας, κάτι που καθιστά το συγκεκριμένο συμβολόμετρο ένα σημαντικό εργαλείο στην οπτική φασματοσκοπία υψηλής ευκρίνειας.

4.2 Αρχή λειτουργίας

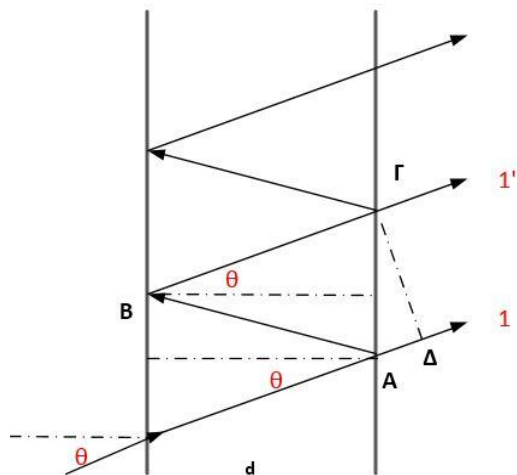
Όπως είπαμε προηγουμένως, το Fabry–Pérot αποτελείται από δύο καθρέφτες. Οι δύο εξωτερικές πλευρές των καθρεφτών είναι συνήθως υπό ελαφριά κλίση ως προς την καθετότητα και ίσως φέρουν μια αντιανακλαστική επίστρωση, ενώ οι εσωτερικές επιφάνειες βρίσκονται σε πλήρη παραλληλισμό, είναι οπτικά επίπεδες και φέρουν μία επίστρωση λεπτού φιλμ από διηλεκτρικό υλικό το οποίο παρουσιάζει μεγάλη ανακλαστικότητα και παράλληλα επιτρέπει ένα τμήμα του φωτός να εξέρχεται από την άλλη πλευρά. Εάν το υλικό που καλύπτει τον ενδιάμεσο χώρο μεταξύ των πλακιδίων είναι αέρας, τότε η οπτική απόσταση ($d_{\text{opt}} = nd$) ισούται με την φυσική απόσταση «d», δεδομένου ότι ο δείκτης διάθλασης του αέρα είναι περίπου $n=1$.

Θεωρούμε μία δέσμη μονοχρωματικού φωτός μήκους κύματος «λ» που προσπίπτει υπό γωνία «θ» στους παράλληλους καθρέφτες που απέχουν μεταξύ τους απόσταση «d» και υφίσταται διαδοχικές ανακλάσεις στις εσωτερικές τους επιφάνειες, όπως είναι στο σχήμα 4.1. Οι ακτίνες που εξέρχονται του συστήματος των καθρεφτών παρουσιάζουν διαφορά φάσης «φ» μεταξύ τους λόγω των διαφορετικών οπτικών δρόμων που ακολουθούν κατά τις διαδοχικές ανακλάσεις μεταξύ των καθρεφτών. Θεωρήσουμε δυο εξερχόμενες γειτονικές ακτίνες (1 – 1') και η διαφορά «ΔΓ» των οπτικών τους δρόμων είναι:

$$\Delta r = (AB) + (B\Gamma) - (A\Delta) \quad (1)$$

Από τριγωνομετρία του «σχήματος 4.1» και μέσω της σχέσης (1) έχουμε τελικά:

$$\Delta r = 2d\cos\theta \quad (2)$$



Σχήμα 4.1: Οι διαδοχικές ανακλάσεις των ακτίνων ανάμεσα στους δύο καθρέφτες

Παρατηρούμε στην σχέση (2) ότι η «ΔΓ» γίνεται μέγιστη όταν $\theta = 0^\circ$. Όπως γνωρίζουμε, για να συμβάλλουν ενισχυτικά δυο δέσμες θα πρέπει η διαφορά των οπτικών τους δρόμων να είναι ακέραιο πολλαπλάσιο του μήκους κύματος «λ»: δηλαδή όταν $\Delta r = m\lambda$, όπου $m = 0, \pm 1, \pm 2, \pm 3 \dots$. Επομένως, η συνθήκη δημιουργίας των φωτεινών κροσσών, οι οποίοι παρουσιάζονται ως ομόκεντροι κυκλικοί

δακτύλιοι, (ενισχυτική συμβολή) για τις δυο ακτίνες «1 – 1'» του σχήματος 4.1 είναι η εξής:

$$2d\cos\theta = m\lambda \quad (3)$$

Εάν το φως που προσπίπτει στους καθρέφτες προέρχεται από σημειακή πηγή και όχι από δέσμη παράλληλων ακτινών, τότε για τη συγκεκριμένη γωνία «θ» θα παρατηρήσουμε σε πέτασμα φωτεινό κυκλικό κροσσό συμβολής που αντιστοιχεί σε όλες τις πιθανές δέσμες φωτός που συμβάλλουν ενισχυτικά, παρουσιάζοντας διαφορά οπτικών δρόμων $m\lambda$. Ο επόμενος προς τα μέσα φωτεινός κυκλικός κροσσός, θα αντιστοιχεί σε μικρότερη γωνία «θ», για την οποία η διαφορά των οπτικών δρόμων θα είναι «(m + 1)λ».

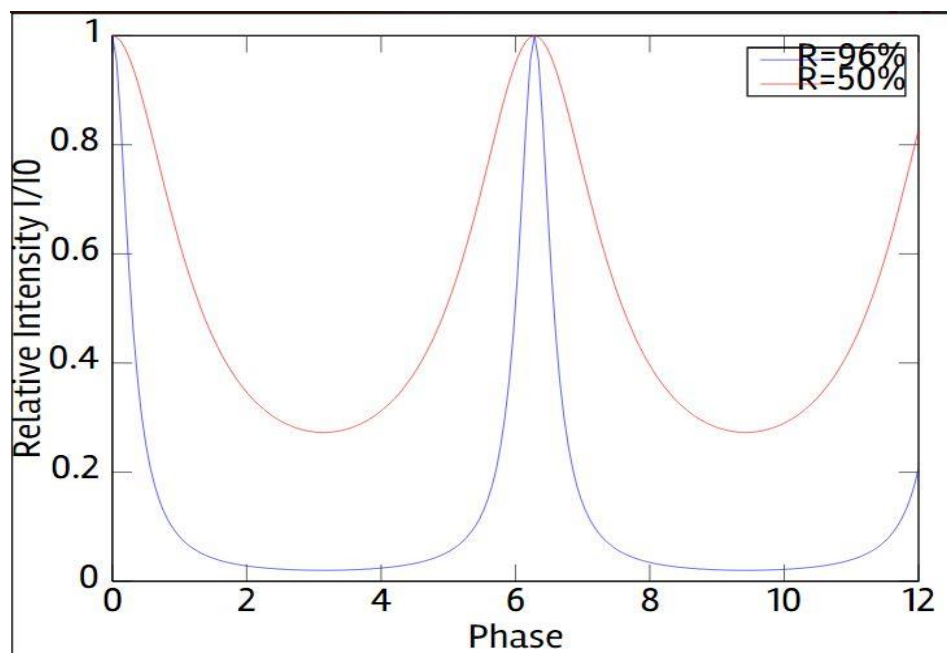
Για ένα συμβολόμετρο του οποίου η λειτουργία του βασίζεται στη συμβολή μόνο δυο ακτίνων, όπως αυτό του Michelson, αποδεικνύεται ότι η ένταση των κροσσών μεταβάλλεται με τη διαφορά φάσης «φ» (όπου $\phi = 2\pi\Delta r/\lambda = (4\pi d \cos\theta)/\lambda$), ως εξής:

$$I = I_0 \cos^2\left(\frac{\phi}{2}\right) \quad (4)$$

Όμως στην περίπτωση της συμβολής πολλαπλών ακτίνων, όπως αυτό που εξετάζουμε, είναι ότι στα Fabry-Pérot η ένταση των παρατηρούμενων κροσσών μεταβάλλεται με τη διαφορά φάσης «φ» ως εξής:

$$I = I_0 \frac{1}{1 + [4R/(1-R)^2] \sin^2(\frac{\phi}{2})} \quad (5)$$

όπου « I_0 » είναι η ένταση της προσπίπτουσας ακτινοβολίας, « I » η ένταση της εξερχόμενης ακτινοβολίας από το σύστημα των δυο καθρεφτών κα « R » η ανακλαστικότητα των καθρεφτών.



Σχήμα 4.2. Κατανομή της έντασης των κροσσών σε συμβολή πολλαπλών ακτίνων, συναρτήσει της διαφοράς φάσης, για διάφορες τιμές R της ανακλαστικότητας των δύο καθρεφτών

Παρατηρούμε στο σχήμα 4.2 ότι όσο αυξάνει η « R », τόσο οι κροσσοί γίνονται πιο αιχμηροί, δηλαδή αυξάνει η διακριτική ικανότητα του οργάνου.

Ας αναλύσουμε κάποιους όρους της σχέσης (5). Η ποσότητα $f = 4R/(1-R)^2$ καλείται συντελεστής λεπτότητας (coefficient of finesse) και είναι ένα μέτρο της αιχμηρότητας των κροσσών συμβολής. Εάν η παράμετρος « $\phi/2$ » είναι ακέραιο πολλαπλάσιο του π , δηλαδή όταν έχουμε $\phi = (4\pi d \cos \theta)/\lambda = 2\pi m$, τότε η συνάρτηση παίρνει τη μέγιστη τιμή της που είναι το 1, για οποιαδήποτε τιμή της ποσότητας « f » και επομένως $I = I_0$. Αν η ανακλαστικότητα « R » είναι πολύ μικρή, οι κροσσοί συμβολής είναι πιο ευρείς και μη ευκρινείς (σχήμα 4.3), ενώ στην περίπτωση που η τιμή της βρίσκεται κοντά στη μονάδα (το οποίο διαμορφώνει μεγάλο f) οι κροσσοί είναι καθαροί και αιχμηροί.

Όλα αυτά, ισχύουν για ένα μήκος κύματος. Αν στους καθρέφτες προσπέσει φως με δύο μήκη κύματος τότε το σχήμα 4.2 θα διαμορφωθεί από δυο ξεχωριστές ομάδες κροσσών που θα παρουσιάζουν σχετική μετατόπιση η μια από την άλλη, κατά τον οριζόντιο άξονα. Αν η ανακλαστικότητα « R » των πλακιδίων είναι αρκετά υψηλή, τότε οι κροσσοί θα είναι αιχμηροί και η μια ομάδα θα ξεχωρίζει εύκολα από την άλλη.

4.3 Κροσσοί συμβολής

Ας παρατηρήσουμε δυο από τους κροσσούς συμβολής. Έναν στο κέντρο ($\theta=0$) και τον αμέσως επόμενο προς τα έξω (θ_1).

Στην πρώτη περίπτωση η σχέση (3) διαμορφώνεται ως εξής:

$$2d = m_0 \lambda$$

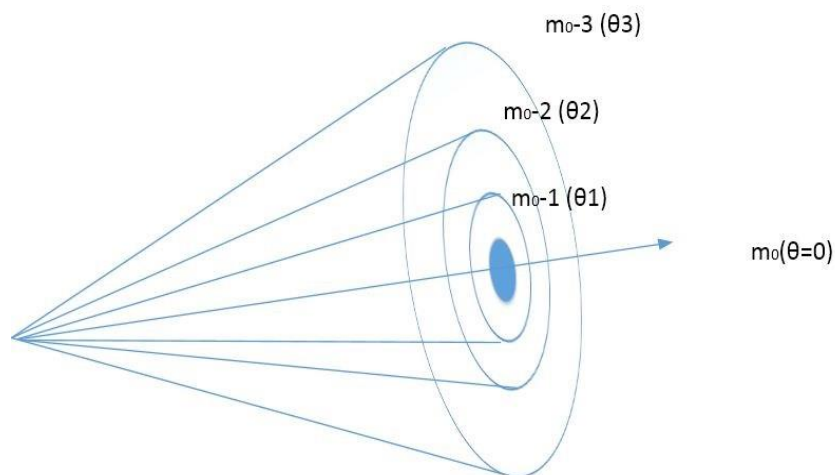
Και στη δεύτερη περίπτωση ως εξής:

$$2d \cos \theta_1 = (m_0 - 1) \lambda$$

Αν αρχίσουμε να μετακινούμε τον έναν καθρέφτη κατά τέτοιο τρόπο που να ελαττώνουμε την απόσταση «d», τότε και η γωνία « θ_1 » που σχηματίζει τον δεύτερο κροσσό θα ελαττώνεται για να διατηρηθεί η ισορροπία στην τελευταία σχέση. Δηλαδή, ο δεύτερος κροσσός θα αρχίσει να καταρρέει προς το κέντρο (θα συμβεί ακριβώς το αντίθετο εάν αυξήσουμε το «d»), ενώ οι υπόλοιποι κροσσοί θα συρρικνώνονται. Τελικά για κάποια τιμή «d'» ο δεύτερος κροσσός θα πάρει τη θέση του κεντρικού κροσσού, ενώ ο αρχικός κεντρικός κροσσός θα εξαφανιστεί. Στην περίπτωση αυτή το πλακίδιο θα έχει μετακινηθεί κατά:

$$d - d' = m_0 \frac{\lambda}{2} - (m_0 - 1) \frac{\lambda}{2} = \frac{\lambda}{2} \quad (6)$$

Επομένως, κάθε φορά που ένας κροσσός καταρρέει στο κέντρο ή ξεκινάει απ' αυτό, η απόσταση «d» μεταξύ των καθρεφτών θα έχει μεταβληθεί κατά « $\frac{\lambda}{2}$ ».



Σχήμα 4.3. Σχηματισμός κροσσών συμβολής

4.4 Χαρακτηριστικές παράμετροι συμβολόμετρου Fabry-Pérot

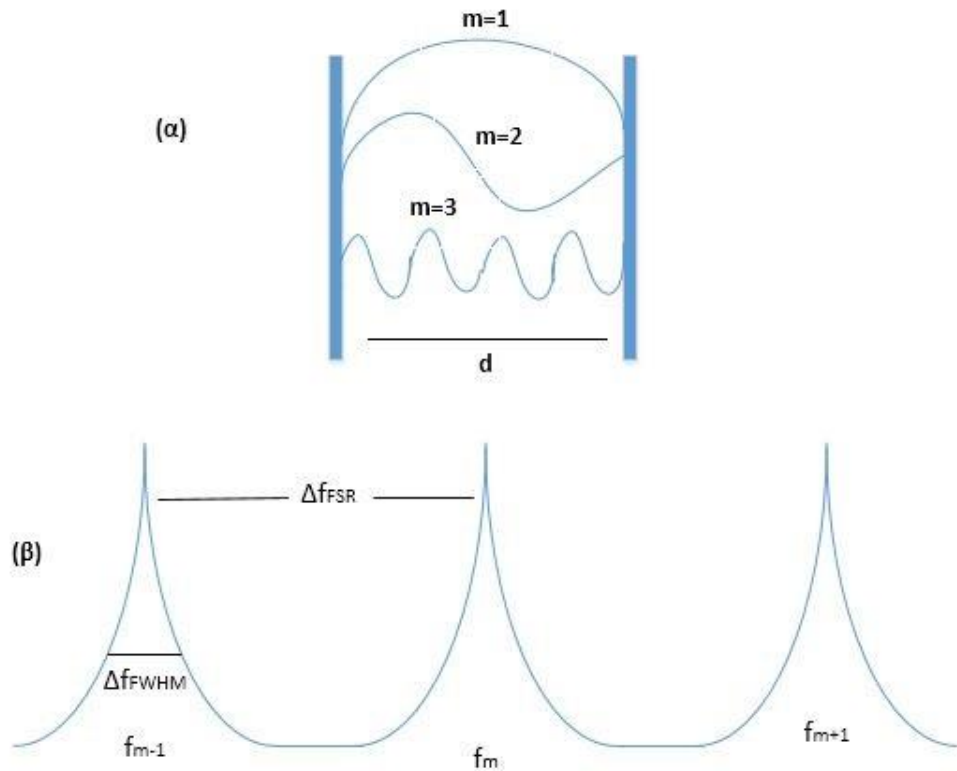
4.4.1 Ελεύθερη φασματική περιοχή (FSR)

Η διαδικασία των ανακλάσεων των οπτικών κυμάτων ανάμεσα στους δύο καθρέφτες οδηγεί σε φαινόμενα ενισχυτικής και αποσβεστικής συμβολής αυτών των κυμάτων στον ενδιάμεσο χώρο μεταξύ των καθρεφτών (θεωρούμε ότι ο ενδιάμεσος χώρος καλύπτεται από αέρα). Τα κύματα που έχουν ανακλαστεί στον πρώτο καθρέφτη οδεύουν προς τα δεξιά και συμβάλλουν με τα κύματα που έχουν ανακλαστεί στον δεύτερο καθρέφτη και οδεύουν προς τα αριστερά. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα τη δημιουργία μιας σειράς στάσιμων ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων με δεσμούς επάνω στα πλακίδια. Τα κύματα αυτά καλούνται και τρόποι ταλάντωσης.

Έτσι, τα στάσιμα κύματα που παρατηρούνται, είναι αποτέλεσμα ενισχυτικής συμβολής και για να συντηρηθεί εντός της οπτικής κοιλότητας ένα τέτοιο κύμα θα πρέπει να ισχύει η σχέση (3). Θεωρώντας κάθετη πρόσπτωση ($\theta = 0^\circ$) η σχέση (3) γίνεται:

$$d = m \frac{\lambda}{2}, \text{ με } m=1,2,3\dots \quad (7)$$

Κάθε μήκος κύματος « λ_m » που ικανοποιεί τη σχέση (7) για συγκεκριμένο « m », προσδιορίζει και έναν τρόπον ταλάντωσης όπως φαίνεται και στο σχήμα 4.4.



Σχήμα 4.4.(α) Στην κοιλότητα συντηρούνται τρόποι ταλάντωσης συγκεκριμένων μηκών κύματος. (β) Φασματική απόκριση του συμβολόμετρο F-P.

Αν στη σχέση (7) αντικαταστήσουμε το $\lambda = \frac{c}{f}$, μπορούμε να βρούμε τις αντίστοιχες συχνότητες των τρόπων ταλάντωσης που αποτελούν και τις συχνότητες συντονισμού της οπτικής κοιλότητας, δηλαδή:

$$f_m = m \frac{c}{2d} \quad (8)$$

Στο σχήμα 4.4 (β) παρουσιάζεται η σχετική ένταση των τρόπων ταλάντωσης συναρτήσει της συχνότητας f . Η απόσταση μεταξύ δύο διαδοχικών τρόπων ταλάντωσης (δηλαδή των συχνοτήτων συντονισμού που αντιστοιχούν σε μέγιστη διαπερατότητα) ονομάζεται ελεύθερη φασματική περιοχή-FSR. Θεωρούμε δύο διαδοχικούς τρόπους ταλάντωσης « m » και « $m-1$ » και από τη σχέση (8) θα έχουμε αντιστοίχως:

$$m - 1 = \frac{2d}{c} f_{m-1} \quad \text{και}$$

$$m = \frac{2d}{c} f_m$$

Αφαιρώντας κατά μέλη έχουμε:

$$1 = \frac{2d}{c} (f_m - f_{m-1}) = \frac{2d}{c} \Delta f_{FSR}$$

Τελικά, η ελεύθερη φασματική περιοχή σε σχέση με τη συχνότητα είναι:

$$\Delta f_{FSR} = \frac{c}{2d} \text{ (σε HZ)} \quad (9)$$

Το αντίστοιχο FSR που σχετίζεται με το μήκος κύματος, δίνεται από:

$$\Delta \lambda_{FSR} = \frac{\lambda^2}{2d} \text{ (σε nm)} \quad (10)$$

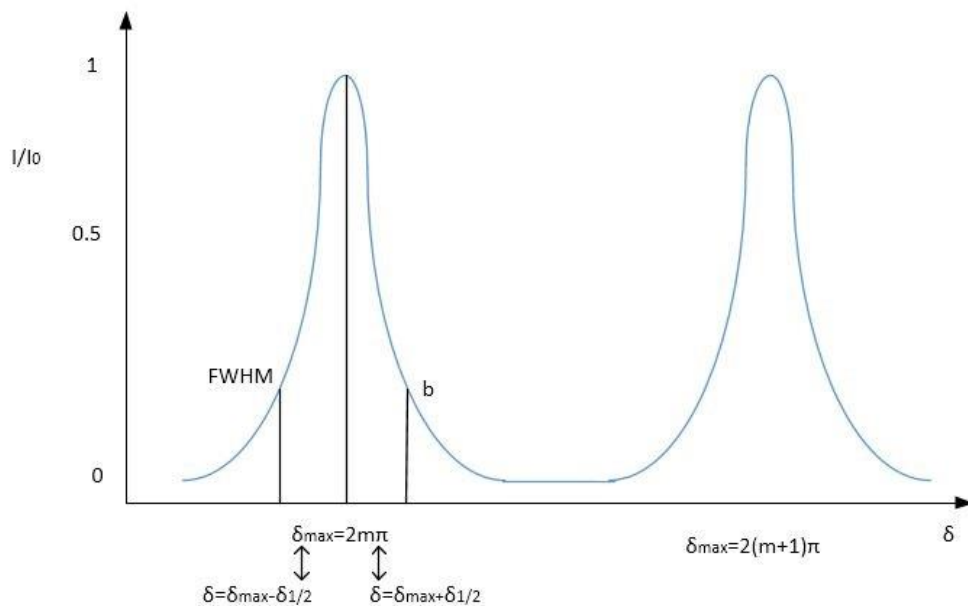
Επίσης το FSR δίνεται σε cm^{-1} από:

$$FSR = \frac{1}{2d} \text{ (σε cm}^{-1} \text{)} \quad (11)$$

Πρακτικά η ελεύθερη φασματική περιοχή αποτελεί το παράθυρο μετρήσεων του συμβολόμετρου. Οι σχέσεις (10) και (11) δείχνουν ότι εξαρτάται από την απόσταση «d» μεταξύ των καθρεφτών του συμβολόμετρου και επομένως είναι δυνατόν να διαλέξουμε το επιθυμητό FSR, δηλαδή την κατανομή συχνοτήτων που θέλουμε να περάσει από το συμβολόμετρο, ρυθμίζοντας κατάλληλα την απόσταση «d».

4.4.2 Ελάχιστο φασματικό εύρος (FWHM)

Το ελάχιστο διακριτό φασματικό εύρος Δf_{FWHM} , σχήμα 4.5, ή εύρος κροσσών είναι το πλάτος του στάσιμου κύματος που δημιουργείται κατά τη λειτουργία του συμβολόμετρου και μετρείται στο μισό της τιμής της κορυφής. Η τιμή του εξαρτάται από τη γωνία πρόσπτωσης της ακτινοβολίας του υλικού μεταξύ των καθρεφτών, από την ανακλαστικότητα των καθρεφτών και από την μεταξύ τους απόσταση «d».



Σχήμα 4.5. Εύρος κροσσών

Από το σχήμα 4.5 παρατηρούμε ότι στο μισό της μέγιστης διαπερατότητας η μεταβολή της φάσης από $\varphi_{\max} = 2m\pi$ θα είναι $\varphi = \varphi_{\max} \pm \varphi_{1/2}$ οπότε:

$$\sin\left(\frac{\varphi_{\max}}{2} \pm \frac{\varphi_{1/2}}{2}\right) = -\sin\left(\frac{\varphi_{1/2}}{2}\right)$$

Το « $\varphi_{\max}$ »είναι πολλαπλάσιο του « π ».

Από τη σχέση (5) έχουμε:

$$\frac{1}{2} = \frac{1}{1 + [4R/(1 - R)^2] \sin^2(\frac{\varphi_{1/2}}{2})} = \frac{1}{1 + f \sin^2(\frac{\varphi_{1/2}}{2})}$$

Θεωρώντας ότι

$$\sin \frac{\varphi_{1/2}}{2} \cong \frac{\varphi_{1/2}}{2}$$

επιλύουμε την τελευταία σχέση ως προς $\frac{\varphi_{1/2}}{2}$

Και έχουμε:

$$\frac{\varphi_{1/2}}{2} = \frac{1}{\sqrt{f}}$$

Το πλήρες εύρος του κροσσού στο μισό του μέγιστου θα είναι το διπλάσιο της τιμής $\delta_{1/2}$ και επομένως:

$$b = 2\delta_{1/2} = \frac{4}{\sqrt{f}}$$

4.4.3 Λεπτότητα (Finesse) F

Η λεπτότητα «F» είναι μια βασική παράμετρος που προσδιορίζει την απόδοση του συμβολόμετρου Fabry-Perrot, ειδικά σε λειτουργία φίλτρου συχνοτήτων. Για να κατανοηθεί καλύτερα ο όρος, είναι πιο εύκολο να φανταστούμε τη λεπτότητα ως το πλήθος των ακτίνων που συμβάλλουν εντός της κοιλότητας και δημιουργούν το στάσιμο κύμα. Η μεγαλύτερη τιμή της λεπτότητας υποδηλώνει και μεγαλύτερο αριθμό ακτίνων που συμβάλλουν άρα υπάρχει και μια πιο ολοκληρωμένη διαδικασία συμβολής. Στην πιο απλή της μορφή, η λεπτότητα ορίζεται ως το πηλίκο της ελεύθερης φασματικής περιοχής ΔF_{FSR} προς το ελάχιστο διακριτό φασματικό εύρος Δf_{FWHM} , δηλαδή,

$$F = \frac{\Delta F_{FSR}}{\Delta f_{FWHM}} \quad (13)$$

Ο βασικός παράγοντας που επηρεάζει τη λεπτότητα είναι η ανακλαστικότητα «R» των καθρεφτών και αυτό γιατί η ανακλαστικότητα προσδιορίζει ευθέως το

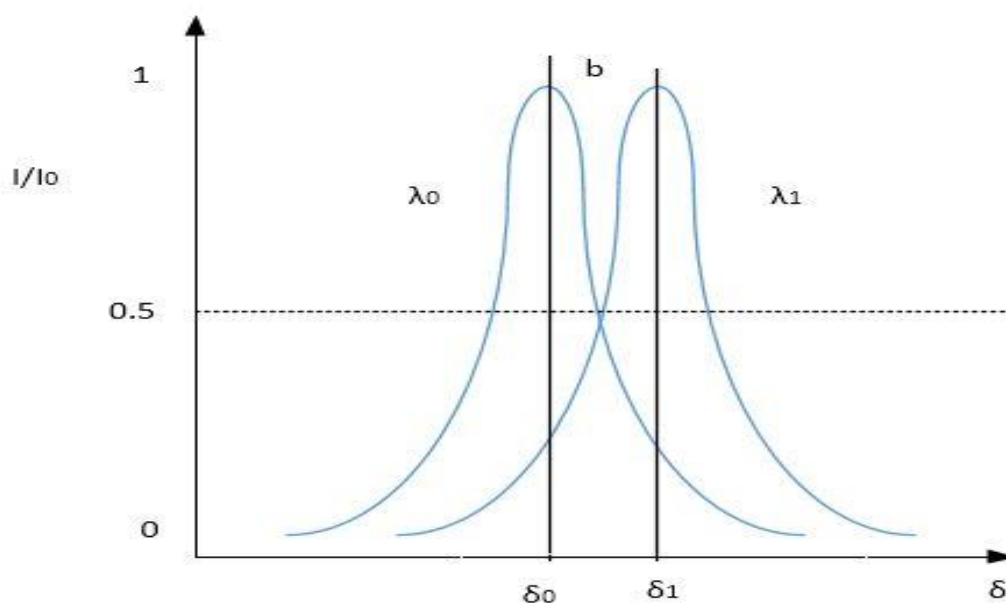
πλήθος των ακτίνων που υπάρχουν στην κοιλότητα. Αποδεικνύεται ότι η λεπτότητα ως συνάρτηση της ανακλαστικότητας, δίνεται από:

$$F = \frac{\pi\sqrt{R}}{1-R} \quad (14)$$

Η σχέση (14) δείχνει ότι η λεπτότητα «F» αυξάνεται όταν απλά αυξηθεί η ανακλαστικότητα «R» των καθρεφτών. Όμως η αύξηση της ανακλαστικότητας έχει ως αποτέλεσμα τη μείωση της φωτεινής ακτινοβολίας που εξέρχεται από το συμβολόμετρο. Μαζί με την ανακλαστικότητα, ένας άλλος παράγοντας που επηρεάζει τη λεπτότητα είναι και οι μεταβολές της θερμοκρασίας.

4.4.4. Φασματική διακριτική ικανότητα (RP)

Στην περίπτωση που η ακτινοβολία δεν είναι μονοχρωματική και παρουσιάζει περισσότερα από ένα μήκη κύματος, η φασματική κατανομή θα διαμορφωθεί από ξεχωριστές ομάδες κροσσών, μια για κάθε μήκος κύματος, οι οποίες θα είναι σχετικά μετατοπισμένες ή μια από την άλλη κατά τον οριζόντιο άξονα.



Σχήμα 4.6. Τρόποι ταλάντωσης ακτινοβολίας δυο μηκών κύματος

Σύμφωνα με το κριτήριο του Taylor, για να είναι δυνατή η ανάλυση των δυο μηκών κύματος, θα πρέπει η τομή των κροσσών να βρίσκεται στο μισό της μέγιστης έντασης. Όπως αναφέρθηκε, η διαφορά φάσης μεταξύ δυο διαδοχικών ακτίνων

δίνεται από $\phi = 2\pi\Delta r/\lambda$, όπου « Δr » είναι η διαφορά των οπτικών τους δρόμων. Στην συγκεκριμένη περίπτωση το « Δr » είναι περίπου το ίδιο και για τα δυο μήκη κύματος ($\Delta r = m\lambda$). Αν οι μέγιστες τιμές φάσης που αντιστοιχούν στα « λ_0 » και « λ_1 » είναι « δ_0 » και « δ_1 » αντίστοιχα, τότε:

$$\delta_0 = \frac{2\pi}{\lambda_0} \Delta r \quad \text{και}$$

$$\delta_1 = \frac{2\pi}{\lambda_1} \Delta r, \quad \text{όπου } \lambda_1 = \lambda_0 + \Delta\lambda$$

Αφαιρώντας κατά μέλη θα έχουμε:

$$\delta_1 - \delta_0 = b = \frac{2\pi\Delta r}{\lambda^2} \Delta\lambda$$

Αν θέσουμε όπου « b » το ίσο του από τη σχέση (12) και $\Delta r = m\lambda$, έχουμε:

$$\frac{\lambda}{\Delta\lambda} = \frac{m\pi\sqrt{f}}{2}$$

Η τελευταία σχέση μας δίνει τη διακριτική ικανότητα του συμβολόμετρου Fabry-Perrot σε σχέση με το συντελεστή λεπτότητας « f ».

Αντικαθιστώντας όπου $f = \frac{4R}{(1-R)^2}$ θα έχουμε:

$$\frac{\lambda}{\Delta\lambda} = \frac{m\pi\sqrt{R}}{1-R} \quad \text{και από τη σχέση (14) έχουμε:}$$

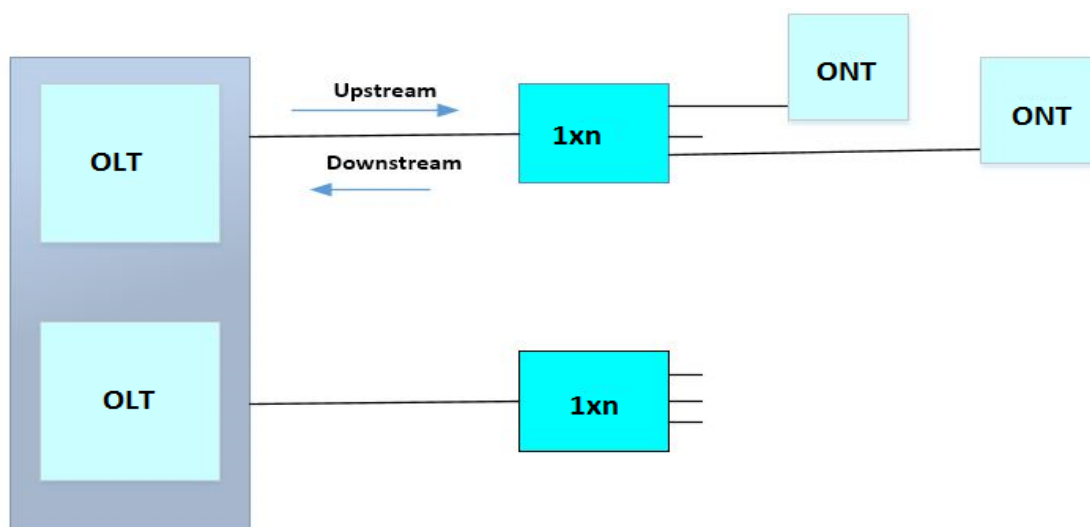
$$\text{Διακριτική Ικανότητα: } RP = \frac{\lambda}{\Delta\lambda} = \frac{m\pi\sqrt{R}}{1-R} = mF \quad (15)$$

5. Passive Optical Network-Παθητικό Οπτικό Δίκτυο

5.1 Αρχιτεκτονική PON

Πρόκειται για δίκτυα point-to-multipoint, που δεν περιέχουν ενεργά στοιχεία, δεν υπάρχουν δηλαδή διατάξεις που να μετατρέπουν το σήμα από οπτικό σε ηλεκτρικό από την πηγή μέχρι τον τελικό προορισμό. Τα στοιχεία που χρησιμοποιούνται είναι οι παθητικοί ζεύκτες (couplers), οι διαιρέτες (splitters) και οι συνδυαστές (combiners). Αυτό που χαρακτηρίζει το PON, είναι η δενδροειδής δομή του. Το οπτικό σήμα εισέρχεται στους παθητικούς διαχωριστές, που βρίσκονται σε διαδοχικά σημεία διακλάδωσης και έτσι διαχωρίζεται. Με αυτόν τον τρόπο, μία μονάχα οπτική ίνα που εξέρχεται από το τοπικό κέντρο μπορεί να συνδεθεί με διάφορα και πολλά σημεία τερματισμού και έτσι δημιουργούνται οι συνδέσεις point-to-multipoint, που αναφέραμε προηγουμένως, μεταξύ του OLT στο κέντρο μεταγωγής του τηλεπικοινωνιακού παρόχου και των ONU στο μέρος του χρήστη.

Έτσι, τα PON φέρνουν την οπτική ίνα πολύ κοντά στον τελικό χρήστη, τυπικά από 32 έως 128, και αναλόγως με τον τερματισμό του, το σύστημα μπορεί να περιγραφεί ως FTTN, FTTC, FTTH. Πρόκειται για μία πολύ καλή λύση όσον αφορά το δίκτυο πρόσβασης, αφού επιτρέπουν τη χρήση υπηρεσιών ευρείας ζώνης οικονομικά, ώστε να είναι εφικτή η πρόσβαση από μεμονωμένους χρήστες και μικρές επιχειρήσεις που δεν έχουν τη οικονομική δυνατότητα χρησιμοποίησης οπτικών ινών αποκλειστικής χρήσης.



Σχήμα 5.1: Αρχιτεκτονική PON

5.2 Άχρωμες Πηγές Φωτός (Colorless Light Sources)

- Το φάσμα κομμένο σε «φέτες» ευρυζωνικών πηγών φωτός
 - ✓ LED / SLED / SOA ως άχρωμες πηγές φωτός
 - ✓ Το φάσμα κομμένο σε «φέτες» για τα κατάλληλα κανάλια
- Reflective Semiconductor Optical Amplifier
 - ✓ Ημιαγωγικοί οπτικοί ενισχυτές ως πηγή φωτός
 - ✓ Εξωτερική έγχυση κύματος φωτός που ενισχύεται, διαμορφώνεται και αντανακλάται στο CO
 - ✓ Χρησιμοποιώντας την ιδιότητα κορεσμού του SOA, το downstream μήκος κύματος μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως έγχυση στο SOA και έτσι να επαναχρησιμοποιηθεί για την upstream μετάδοση
- Συντονίσια lasers
 - ✓ Ευρεία συντονίσια lasers ημιαγωγών ως άχρωμες πηγές φωτός
 - ✓ Χρειάζεται πρωτόκολλο για ρύθμιση του μήκος κύματος λειτουργίας
- Κλειδωμένη έγχυση με FP laser (με το οποίο και θα ασχοληθούμε)
 - ✓ Ειδικά σχεδιασμένα lasers FP ως άχρωμη πηγή φωτός
 - ✓ Το FP laser λειτουργεί στο μήκος κύματος εξωτερικού εγχεόμενου κύματος φωτός

5.3 Πλεονεκτήματα PON

- Επιτρέπουν μεγαλύτερες αποστάσεις μεταξύ του κέντρου σύνδεσης και του συνδρομητή. Μια ενσύρματη γραμμή που χρησιμοποιεί την τεχνολογία DSL επιτρέπει μέγιστη απόσταση 5,5 km μεταξύ του κέντρου και του συνδρομητή, ενώ ένας τοπικός βρόχος PON μπορεί να λειτουργήσει με αποστάσεις 20 km ή και μεγαλύτερες.
- Μειώνουν το πλήθος και συνεπώς το κόστος των οπτικών ινών στον τοπικό βρόχο.
- Παρέχουν μεγάλο εύρος ζώνης, εξαιτίας της εγκατάστασης οπτικών ινών μέχρι τον χρήστη.
- Είναι δίκτυα σημείου προς πολλαπλά σημεία άρα είναι κατάλληλα για κοινοποίηση πληροφορίας, όπως η αναμετάδοση video.

- Εξαλείφουν την ανάγκη χρήσης πολυπλεκτών και αποπολυπλεκτών στα σημεία διαχωρισμού, και έτσι απαλλάσσει τους διαχειριστές του δικτύου από την επίπονη και ακριβή διαδικασία συντήρησης και τροφοδότησης των στοιχείων αυτών. Αντί για ενεργά στοιχεία στα σημεία διαχωρισμού εγκαθίστανται παθητικά στοιχεία τα οποία παρουσιάζουν το πλεονέκτημα ότι δεν χρειάζονται τροφοδοσία, και μπορούν να θαφτούν στο έδαφος κατά την εγκατάσταση του δικτύου χωρίς να απαιτούν συντήρηση μελλοντικά.
- Επιτρέπουν την εύκολη αναβάθμιση σε υψηλότερους ρυθμούς μεταφοράς δεδομένων καθώς και τη χρήση πολλαπλών μηκών κύματος.
- Αφού η οπτική υποδομή του είναι πλήρως παθητική, είναι ανεξάρτητη από τους ρυθμούς μετάδοσης δικτύου και τις τεχνικές διαμόρφωσης.

5.4 Μειονεκτήματα PON

- Το ίδιο εύρος ζώνης πρέπει να διαιρεθεί μεταξύ των χρηστών.
- Η οπτική ισχύς διαχωρίζεται μεταξύ των θυρών εξόδου και έτσι περιορίζεται η μέγιστη απόσταση.
- Το ίδιο οπτικό σήμα παραλαμβάνεται από όλα τα ONU δημιουργώντας ανησυχίες ως προς την ασφάλεια του δικτύου.
- Το εύρος ζώνης που χρησιμοποιείται για το uploading δεν είναι broadcast (λιγότερο εύρος ζώνης από το P2P).
- Απαιτήση για ένα αυστηρό αλγόριθμο για την σύλληψη upstream κυκλοφορίας (καταμερισμός χρόνου για την upstream σύνδεση).
- Πιο σύνθετοι πομποδέκτες.

5.5 Πρότυπα PON

Τα βασικά πρότυπα PON είναι οι παρακάτω:

APON (Asynchronous Transfer Mode PON)

BPON (Broadband PON)

EPON (Ethernet PON)

GEAPON (Gigabit ethernet PON)

GPON (Gigabit PON)

10G-EPON (10 Gigabit Ethernet PON)

RFoG (Radio Frequency over Glass)

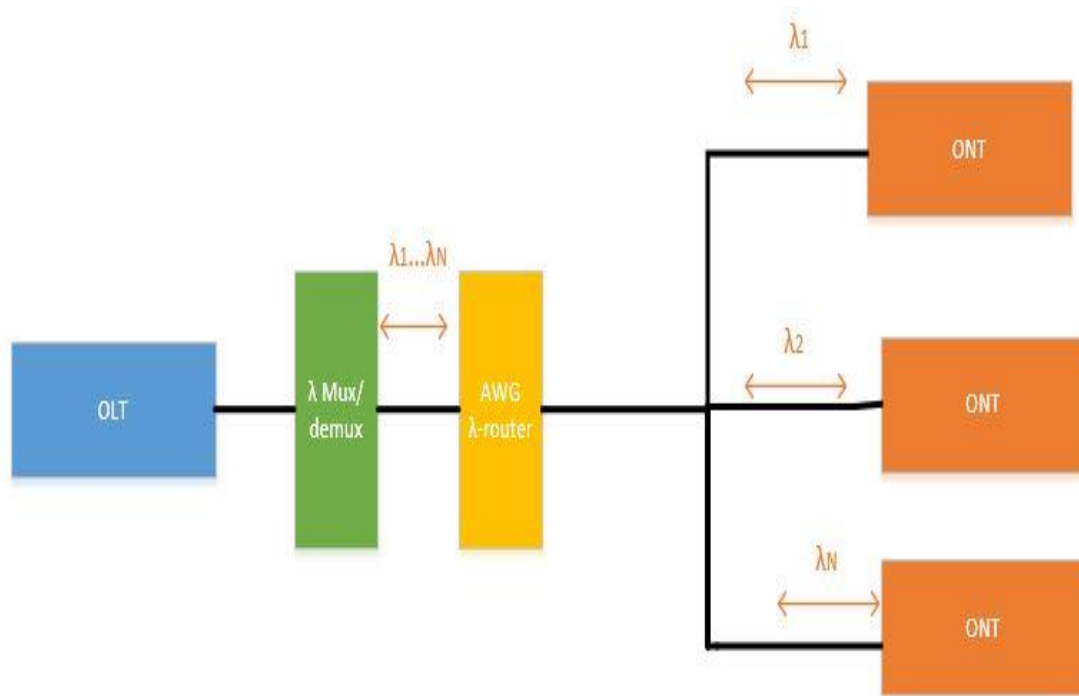
WDM PON το οποίο και θα αναλυθεί παρακάτω.

5.6 Wavelength Division Multiplexing PON

Πρόκειται για μια εναλλακτική προσέγγιση για την αναβάθμιση της ήδη υπάρχουσας οπτικής ίνας. Είναι η πολυπλεξία διαίρεσης μήκους κύματος πάνω σε ένα παθητικό δίκτυο πρόσβασης. Βασικά χαρακτηριστικά αυτής της τεχνολογίας είναι η υψηλή χωρητικότητα και οι συμμετρικές ταχύτητες που έχει και είναι πολύ υψηλότερες από τις αντίστοιχες που βασίζονται με TDM-PON. Εξομαλύνει σε μεγάλο βαθμό προβλήματα που σχετίζονται με το πλήθος των διαθέσιμων οπτικών ινών και με αυτό των αντίστοιχων συγκολλήσεων και τερματισμών που χρειάζονται. Η WDM-PON είμαι μια άχρωμη (colorless) τεχνολογία και οι ταχύτητες που προσφέρει είναι της τάξεως 100 Mbps-1 Gbps.

Τα συστήματα αυτά χαρακτηρίζονται από τον σωστό σχεδιασμό του δικτύου και των μηκών κυμάτων που θα πρέπει να χρησιμοποιηθούν σε κάθε ζεύξη. Επειδή οι συσκευές που χρησιμοποιούν αυτά τα συστήματα, αντιστοιχούν ένα οπτικό σήμα της περιοχής των 1310 nm σε ένα συγκεκριμένο μήκος κύματος της μπάντας ITU G.694, η αντιστοίχιση θα πρέπει να είναι και στα δύο άκρα της ζεύξης μοναδική.

Με το WDM-PON εξοικονομείται μεγάλος αριθμός των οπτικών ινών και εξαλείφονται όσοι διάφοροι περιορισμοί συναντούνται στα TDM-PON. Εξάλλου, αυξάνεται κατά πολύ η περιοχή κάλυψης του δικτύου και προφέρονται αυξημένες δυνατότητες κλιμάκωσης και υψηλού επιπέδου ασφάλειας δεδομένων, από ένα πράγματι, ολοκληρωμένο δίκτυο οικιακών και εταιρικών υπηρεσιών.



Σχήμα 5.2: Σύστημα WDM

5.7 Λειτουργία WDM-PON

Ένα απλό μήκος κύματος, ξεκινά από τον πάροχο προς τον τελικό χρήστη, μέσω ενός παθητικού οπτικού δρομολογητή ο οποίος βρίσκεται εγκατεστημένος εξωτερικά, κατά μήκος της ενδιάμεσης διαδρομής. Αντίθετα με τα TDM-PON, τα μήκη κύματος είναι ανεξάρτητα μεταξύ τους, αφού εκχωρούνται κάθε φορά σαν να είναι μοναδικές ζεύξεις point-to-point. Έτσι, ένα μήκος κύματος μπορεί να χρησιμοποιηθεί για οικιακές υπηρεσίες και να έχει ταχύτητα 100 Mrbs και ταυτόχρονα ένα άλλο με ταχύτητα 1 Gbps να χρησιμοποιείται για εταιρικές υπηρεσίες.

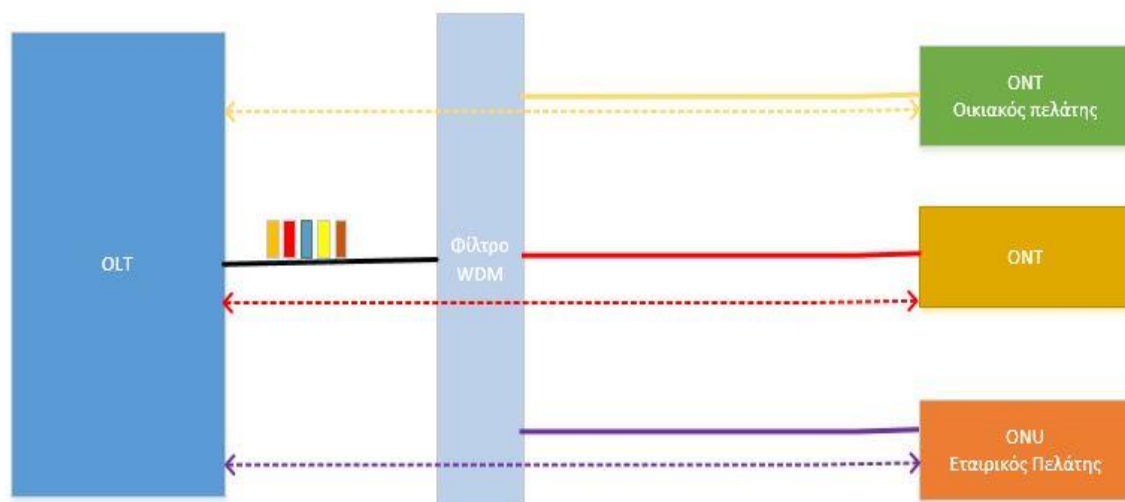
5.8 Πλεονεκτήματα WDM-PON

- **Απλός σχεδιασμός και ευκολία εγκατάστασης:** Οι colorless οπτικές τερματικές συσκευές plug & play εξασφαλίζουν την ανεξαρτησία της υποδομής από το αυξανόμενο πλήθος των συνδρομητών.
- **Ευελιξία:** Δυνατότητα δημιουργίας ζεύξεων point-to-point αλλά και multipoint συνδέσεων ικανών να υποστηρίξουν οικιακές και εταιρικές υπηρεσίες στην ίδια υποδομή.

- **Αυξημένη απόδοση:** Συμμετρικό εύρος ζώνης και αφιερωμένα μήκη κύματος ανά χρήστη που εξασφαλίζουν εξαιρετικές επιδόσεις σε όλες τις απαιτητικές εφαρμογές.
- Κάθε μήκος κύματος μπορεί να σηκώσει διαφορετικές ταχύτητες και να χρησιμοποιήσει διαφορετικά πρωτόκολλα κάνοντας εύκολη την αναβάθμισή τους.
- Κάθε χρήστης λαμβάνει το δικό του μήκος κύματος και έτσι το WDM-PON προσφέρει εξαιρετική προστασία των ιδιωτικών δεδομένων.
- Η μονάδα οπτικής διανομής εξακολουθεί να είναι παθητική και έχει τις ίδιες ιδιότητες με χαμηλό κόστος συντήρησης και υψηλή αξιοπιστία
- Εύκολη pay-as-you-grow αναβάθμιση. Κάθε μήκος κύματος σε WDM-PON τρέχει με διαφορετική ταχύτητα, καθώς και με ένα διαφορετικό πρωτόκολλο. Κάθε χρήστης πληρώνει για τη δική του αναβάθμιση
- Οι συνδέσεις P2P μεταξύ OLT και την ONU πραγματοποιούνται στον τομέα του μήκους κύματος. Δεν απαιτείται P2MP έλεγχος πρόσβασης και απλοποιεί σημαντικά το επίπεδο MAC

5.9 Χαρακτηριστικά συστημάτων WDM-PON

- Χαμηλό κόστος ανά συνδρομητή
- 32, 64, 128 μήκη κύματος
- Εμβέλεια 20-100 χλμ.
- Απλή λειτουργία



Σχήμα 5.3: WDM-PON

5.10 Subcarrier Multiplexing (SCM)

Πρόκειται για μια μέθοδο πολυπλεξίας πολλών σημάτων διαφορετικών επικοινωνιών, ώστε να μπορούν να μεταδίδονται κατά μήκος μιας μόνο οπτικής ίνας. Χρησιμοποιείται σε παθητικό οπτικό δίκτυο (PON), σαν υποδομή πρόσβασης ως μια παραλλαγή της διαίρεσης μήκους κύματος (WDM).

Το SCM ακολουθεί διαφορετική προσέγγιση σε σύγκριση με το WDM. Στο WDM το οπτικό φέρον διαμορφώνεται με ένα σήμα baseband. Σε μια υποδομή SCMA, τα baseband δεδομένα πρώτα διαμορφώνονται σε GHz ευρείας υποφέρουσας, τα οποία στη συνέχεια διαμορφώνονται επί του οπτικού φορέως. Με αυτόν τον τρόπο, κάθε σήμα καταλαμβάνει ένα διαφορετικό τμήμα του οπτικού φάσματος που περιβάλλει την κεντρική συχνότητα του οπτικού φορέως. Από την πλευρά λήψης, ο δέκτης είναι συντονισμένος στη σωστή συχνότητα του υποφέροντος, φιλτράροντας τις άλλες υποφέρουσες.

Η λειτουργία της πολυπλεξίας και της αποπολυπλεξίας τα ενιαίων υποφερουσών γίνεται ηλεκτρονικά. Η μετατροπή σε οπτικό φέρον γίνεται στην πλευρά πολυπλέκτη. Αυτό δίνει ένα πλεονέκτημα σε σχέση με την καθαρή πρόσβαση WDM, λόγω του χαμηλότερου κόστους των ηλεκτρικών εξαρτημάτων σε σύγκριση με έναν οπτικό πολυπλέκτη.

Το SCM έχει το μειονέκτημα ότι περιορίζεται σε μέγιστες συχνότητες των υποφορέων και των ρυθμών δεδομένων από το διαθέσιμο εύρος ζώνης των ηλεκτρικών και οπτικών εξαρτημάτων. Ως εκ τούτου, το SCM πρέπει να χρησιμοποιείται σε συνδυασμό με το WDM, προκειμένου να επωφεληθεί από το μεγαλύτερο μέρος του διαθέσιμου εύρους ζώνης των ινών, αλλά μπορεί να χρησιμοποιηθεί αποτελεσματικά για χαμηλότερης ταχύτητας, συστήματα πολλών χρηστών με χαμηλότερο κόστος.

5.11 DWDM (Dense WDM)

Όπως αναφέρθηκε προηγουμένως, τα συστήματα WDM μπορούν μέχρι στιγμής να μεταδώσουν μέχρι και 32 κανάλια. Στο μέλλον δείχνουν όμως, ότι η χωρητικότητα μπορεί και να αυξηθεί στα 128 και ίσως περισσότερα κανάλια μέσα από μια ίνα.

Για αυτόν τον λόγο έχει έρθει στο προσκήνιο η τεχνική DWDM. Τεχνικά πρόκειται για την ίδια μεθοδολογία αλλά έχει περισσότερα κανάλια και μεγαλύτερο εύρος ζώνης.

Η τεχνολογία DWDM είναι μια πολλά υποσχόμενη τεχνολογία και φαίνεται να είναι μονόδρομος για την υλοποίηση μελλοντικών σχεδίων όπως το Gigabit Internet. Η τεχνολογία αυτή συνίσταται σε περιπτώσεις πολυπλεξίας σημάτων διαφορετικού μήκους κύματος και στην μετάδοσή τους μέσω μιας οπτικής ίνας. Το αποτέλεσμα αυτού, είναι η αύξηση του συνολικού ρυθμού μεταφοράς δεδομένων ανά οπτική ίνα.

Αυτό προκύπτει από την άθροιση των ρυθμών μεταφοράς του κάθε σήματος με διαφορετικό μήκους κύματος. Σήμερα, πραγματοποιείται πολυπλεξία σαράντα σημάτων σε μια οπτική ίνα. Κάθε σήμα έχει τη δυνατότητα να μεταφέρει δεδομένα με ρυθμό 10 Gbps, με άλλα λόγια είναι δυνατός ο συνολικό ρυθμός μεταφοράς δεδομένων των 400 Gbps.

Σε αυτό το σύστημα, τα μήκη κύματος βρίσκονται πολύ κοντά μεταξύ τους, απέχουν 100 GHz ή αλλιώς 0,75 nm μεταξύ τους. Επίσης, χρησιμοποιούν DFB laser επικεντρωμένα σε συγκεκριμένα μήκη κύματος και διαχωρισμένα μεταξύ τους σε 100, 200 ή 50 GHz δηλαδή, στα 1,5 nm, 0,75 nm ή 0,38 nm αντίστοιχα. Σε ένα DWDM laser, το chip πρέπει είναι τοποθετημένο σε ένα θερμοηλεκτρικό ψύκτη για να ελέγχεται έτσι η θερμοκρασία του άρα και το μήκος του κύματος.

Η τεχνολογία WDM αναφέρεται στο physical layer των δικτύων και χρησιμοποιείται διότι βελτιώνει ουσιαστικά, τα φυσικά μέσα που χρησιμοποιούνται στις καλωδιώσεις. Έτσι μαζί με την χρήση των οπτικών ενισχυτών έγινε δυνατή η παράλληλη μετάδοση σημάτων μέσα από τις ήδη υπάρχουσες οπτικές ίνες.

Επίσης το DWDM-PON μπορεί να λύσει τα προβλήματα που αντιμετωπίζει το TDM-PON με την κατανομή του διαφορετικού μήκους κύματος σε κάθε συνδρομητή. Το TDM-PON περιορίζει κάθε συνδρομητή σε ένα ορισμένο χρονικό διάστημα και έτσι το εύρος ζώνης ανά συνδρομητή μειώνεται. Αυτό παρέχει ένα ξεχωριστό και ασφαλή point-to-point, υψηλό ρυθμό δεδομένων του καναλιού μεταξύ κάθε συνδρομητή και του CO. Επίσης, η ασφάλεια της μετάδοσης δεν είναι εγγυημένη δεδομένου ότι κάθε συνδρομητής στην TDM-PON λαμβάνει όλες τις πληροφορίες που αποστέλλονται στους άλλους συνδρομητές του δικτύου.

Η διαχείριση του DWDM δικτύου είναι πολύ πιο απλή από ό,τι ένα TDM-PON και όλες οι μελλοντικές υπηρεσίες μπορούν να παρέχονται σε μια ενιαία πλατφόρμα του δικτύου. Στην περίπτωση που για χρήση ενός μόνο μήκους κύματος σε κάθε συνδρομητή δεν είναι οικονομική ή ανέφικτη, το DWDM μπορεί να χρησιμοποιηθεί υβριδικά σαν TDM / DWDM-PON.

Η ανάπτυξη της τεχνολογίας DWDM-PON είναι ακριβή λόγω του ότι πηγές πολλαπλών μηκών κύματος απαιτούνται στο OLT. Επιπλέον, είναι και οι πηγές laser που χρειάζονται επίσης στο ONU για τη μετάδοση των upstream πληροφοριών από τον συνδρομητή προς το CO. Ως εκ τούτου, υπάρχει η ανάγκη για την ανάπτυξη της κεντρικής αρχιτεκτονικής DWDM-PON, όπου όλα τα upstream και downstream μήκη κύματος να συνυπάρχουν στο OLT.

6. Κλειδωμένη Έγχυση

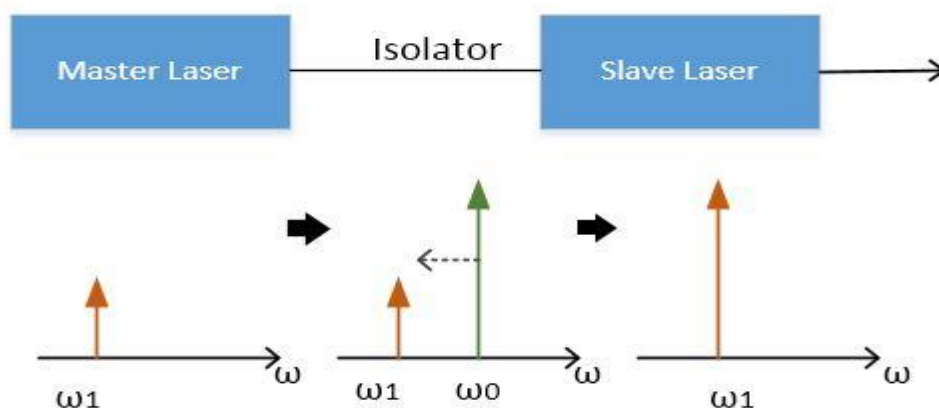
6.1 Τεχνολογία κλειδωμένης έγχυσης

Η τεχνολογία κλειδωμένης έγχυσης έχει μελετηθεί για την ικανότητά της να βελτιώνει την απόδοση των lasers. Είναι ένα φαινόμενο των συχνοτήτων που συμβαίνει όταν ένας αρμονικός ταλαντωτής διαταράσσεται από έναν δεύτερο ταλαντωτή, που λειτουργεί σε κοντινή συχνότητα. Όταν η σύζευξη είναι αρκετά ισχυρή και οι συχνότητες πολύ κοντά, ο δεύτερος ταλαντωτής μπορεί να «αποθηκεύσει» τη λειτουργία του πρώτου ταλαντωτή με αποτέλεσμα να έχουν την ίδια συχνότητα.

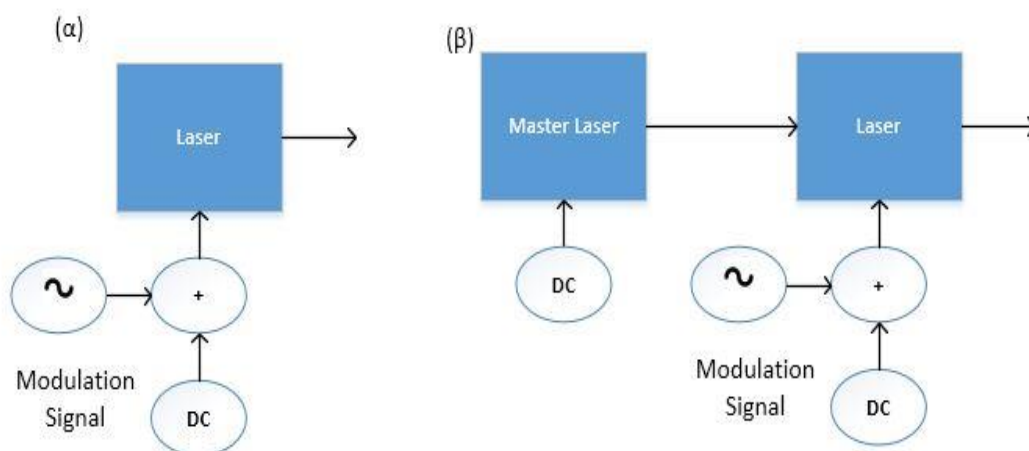
Πιο συγκεκριμένα στα lasers, είναι μια τεχνική για την εφαρμογή της λειτουργίας του laser σε μια ορισμένη οπτική συχνότητα με έγχυση φωτός με την εν λόγω συχνότητα μέσα στο αντηχείο laser. Εφαρμόζεται κυρίως σε συνεχούς κύματος μονής συχνότητας πηγές laser, όταν χρειάζεται μια υψηλή ισχύς εξόδου που πρόκειται να συνδυαστεί με ένα πολύ χαμηλό θόρυβο έντασης και του θορύβου φάσης. Οι επιδόσεις αυτές του χαμηλού θορύβου, ή ακόμα και η ακριβής λειτουργία μονής συχνότητας, είναι πολύ πιο δύσκολο να επιτευχθούν σε laser υψηλής ισχύος, επειδή τείνουν να είναι πιο επιρρεπή σε μηχανικές δονήσεις και δεν μπορούν να χρησιμοποιηθούν πολύ χαμηλού θορύβου πηγές αντλίας γιατί υπόκεινται σε σημαντικές θερμικές επιδράσεις. Επιπλέον, δεν είναι σκόπιμο να ενσωματωθούν οπτικά φίλτρα στο αντηχείο laser, καθώς τέτοια φίλτρα θα μπορούσαν να υποβαθμίσουν την απόδοση ισχύος και να μην είναι σε θέση να ανεχτούν το υψηλό επίπεδο ισχύος.

Η προαναφερθείσα τεχνολογία είναι η διαδικασία του κλειδώματος ενός laser, που ονομάζεται slave laser, σε ένα άλλο, συνήθως πιο σταθερό laser, που ονομάζεται master laser. Στο σχήμα 6.1 οι « ω_1 » και « ω_0 » είναι οι ελεύθερης-λειτουργίας γωνιακές συχνότητες του master laser και του slave laser αντίστοιχα. Η κλειδωμένη έγχυση πραγματοποιείται με τη σύζευξη του φωτός από το master laser μέσα στην κοιλότητα του slave laser, μέσω μιας κατάλληλης μεθόδου σύζευξης. Η ισχύς του εγχεόμενου σήματος είναι συνήθως πολύ χαμηλότερη από αυτή στην έξοδο του σήματος του slave laser. Αν η συχνότητα αυτής της έγχυσης είναι μέσα σε ένα εύρος

συχνοτήτων που ονομάζεται κλειδωμένο εύρος, η συχνότητα του slave laser θα κλειδωθεί στη συχνότητα του εγχεόμενου σήματος.



Σχήμα 6.1: Κλειδωμένη έγχυση δύο lasers

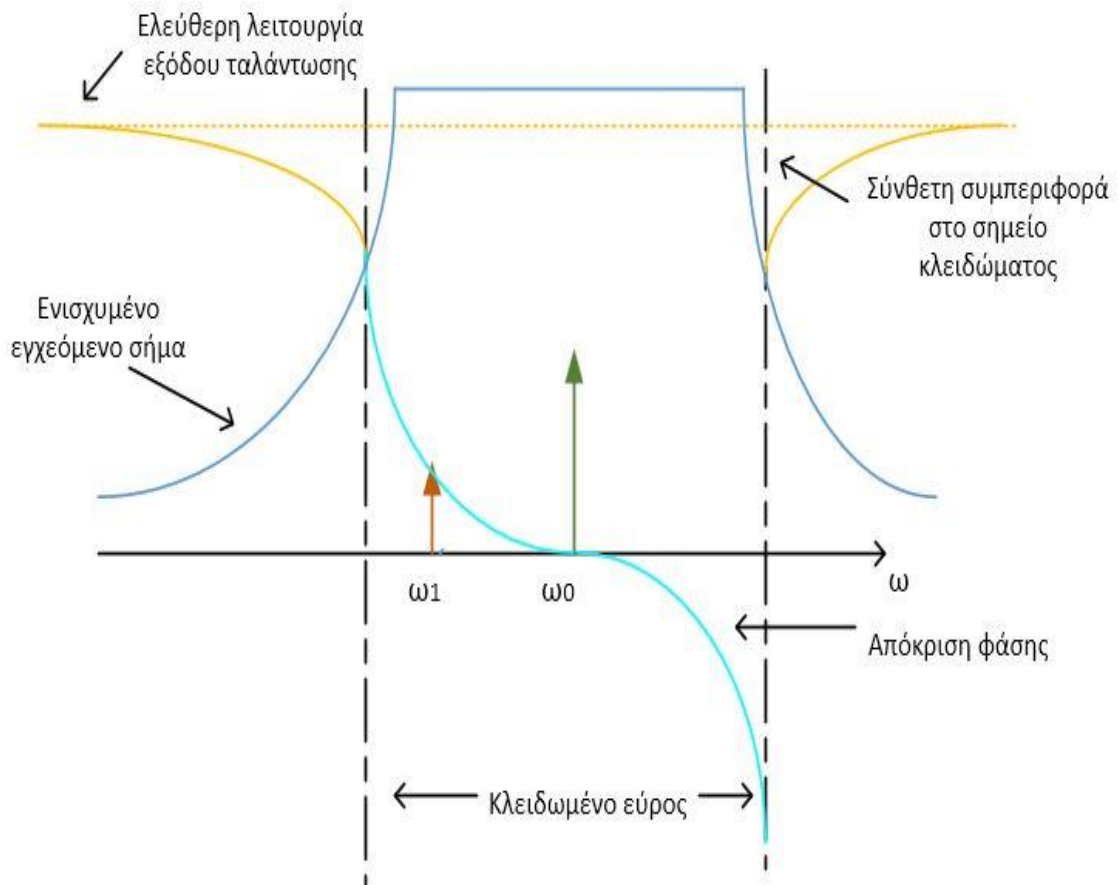


Σχήμα: 6.2: (α) Απλή λειτουργία laser (β) Λειτουργία laser με κλειδωμένη έγχυση

Αναλόγως με τον αποσυντονισμό της συχνότητας και της ισχύος της έγχυσης, το laser κλειδωμένης έγχυσης μπορεί να κλειδωθεί σταθερά, ασταθώς ή να παρουσιάσει μια χαοτική συμπεριφορά. Στη σταθερή συμπεριφορά κλειδώματος, η κλειδωμένη έγχυση βελτιώνει την απόδοση του slave laser. Στο σχήμα 6.3 βλέπουμε

τη συμπεριφορά του slave laser σε δύο περιπτώσεις: α) Το εγχεόμενο σήμα χαμηλής ισχύος βρίσκεται εκτός του κλειδωμένου εύρους και β) το εγχεόμενο σήμα χαμηλής ισχύος συντονίζεται στο κλειδωμένο εύρος. Όταν η συχνότητα του master slave βρίσκεται εκτός του κλειδωμένου εύρους, το εγχεόμενο σήμα χαμηλής ισχύος ανατροφοδοτείται ενισχυμένο από το slave laser. Σε αυτήν την περίπτωση, το φως έχει τις συχνότητες « ω_1 » και « ω_0 » στην έξοδο του slave laser. Χαοτική συμπεριφορά παρατηρείται στα άκρα του κλειδωμένου εύρους όταν για παράδειγμα υπάρχουν συγκρούσεις μεταξύ των συχνοτήτων των master και slave lasers.

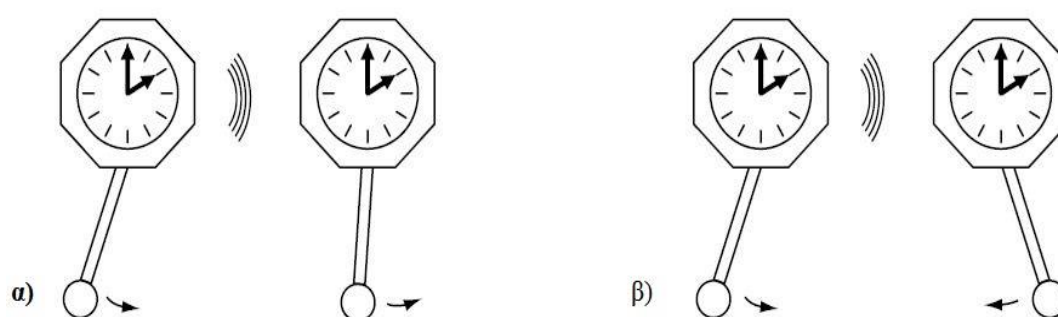
Όταν η συχνότητα του master laser βρίσκεται εντός του κλειδωμένου εύρους, το slave laser ακολουθεί το master laser. Εκτός από την περίπτωση των lasers ημιαγωγών όπου η σύζευξη μεταξύ κέρδους και του δείκτη διάθλασης είναι το αποτέλεσμα της μεταβολής της ισχύος εξόδου της κλειδωμένης έγχυσης εντός του κλειδωμένου εύρους, σταθεροποιείται σε μία τιμή.



Σχήμα 6.3: Συμπεριφορά του slave laser όταν το εγχεόμενο σήμα χαμηλής ισχύος είναι συντονισμένο στο εξωτερικό ή στο εσωτερικό του κλειδωμένου εύρους

6.2 Ιστορικά στοιχεία

Ο Christiaan Huygens (1629–1695), εφευρέτης του εκκρεμούς ρολογιού, θεωρείται ο πρώτος που ανακάλυψε την τεχνολογία κλειδωμένης έγχυσης μέσω της παρατήρησης δύο εκκρεμών ρολογιών τοποθετημένα στον ίδιο τοίχο, που μπορούν να κλειδώσουν τις συχνότητες και να ανταλλάξουν φάση. Υποστήριξε ότι το ένα ρολόι μπορεί να επηρεάσει το άλλο, εκπέμποντας τις δονήσεις μέσω του τοίχου όπου είχαν τοποθετηθεί. Συγκεκριμένα το ένα εκκρεμές αποστέλλει τις δονήσεις μέσω του τοίχου και έτσι εγχείει στο άλλο εκκρεμές μικρές διαταραχές. Το αποτέλεσμα είναι να κλειδώσουν την συχνότητα και τη φάση τους.



Σχήμα 6.4: Το πείραμα του Huygens (α) Εκκρεμή ρολόγια εκτός φάσης και συχνότητας τοποθετημένα στον ίδιο τοίχο. (β) Με την πάροδο του χρόνου τα εκκρεμή ρολόγια έχουν κλειδωμένη συχνότητα και αντίθετες φάσεις. [38]

Ο R. Adler το 1946 ήταν αυτός που πρωτοδημοσίευσε μία εργασία για την τεχνολογία της κλειδωμένης έγχυσης. Ο R. Adler κλείδωσε έναν ηλεκτρικό ταλαντωτή εγχέοντας συχνότητα εξωτερικής πηγής. Ο ταλαντωτής ελεύθερης λειτουργίας (Free-running-χωρίς την έγχυση της εξωτερικής πηγής) θα ταλαντώνεται στη φυσική του συχνότητα. Ο R. Adler έδειξε ότι όταν ένα εξωτερικό σήμα σε μια άλλη συχνότητα εγχέεται εντός του ταλαντωτή, το κύκλωμα θα ταλαντεύεται σύμφωνα με την εγχυμένη συχνότητα, με την προϋπόθεση ότι η εγχυμένη συχνότητα θα είναι πολύ κοντά στη φυσική συχνότητα του ταλαντωτή.

Είκοσι χρόνια αργότερα, η τεχνολογία της κλειδωμένης έγχυσης εφαρμόστηκε στο φως, όταν μία πηγή για συνεκτικό (coherent) φως επινοήθηκε με τη μορφή του laser. Το 1965, ο Pantell επέκτεινε τη θεωρία του R. Adler για την κλειδωμένη έγχυση με την συμπεριλαβή του laser. Ένα χρόνο αργότερα, οι Stover και Steier

έδειξαν την πρώτη κλειδωμένη έγχυση φωτός με laser χρησιμοποιώντας δύο κόκκινα HeNe lasers. Εδώ, η κοιλότητα του laser λειτουργεί ως ταλαντωτής και η αρχική συχνότητα είναι η free-running συχνότητα του laser.

Την επόμενη δεκαετία οι μελέτες πάνω σε αυτή την τεχνολογία επιβραδυνθήκαν, καθώς το laser ήταν από μόνο του μία ανερχόμενη τεχνολογία. Το 1980 η τεχνολογία κλειδωμένης έγχυσης ήρθε ξανά στο προσκήνιο, όταν η πρώτη επίδειξη σε laser ημιαγωγών έγιναν από τους Kobayashi και Kimura με τη χρήση GaAs lasers. Λόγω της κλειδωμένης έγχυσης μπορούν να «τραβήξουν» τα lasers στο ίδιο μήκος κύματος κι έτσι έγιναν ελκυστικοί οι τοπικοί ταλαντωτές σε συνεκτικά συστήματα ανίχνευσης, που ήταν μία από τις κορυφαίες μεθόδους οπτικών επικοινωνιών για μεγάλες αποστάσεις.

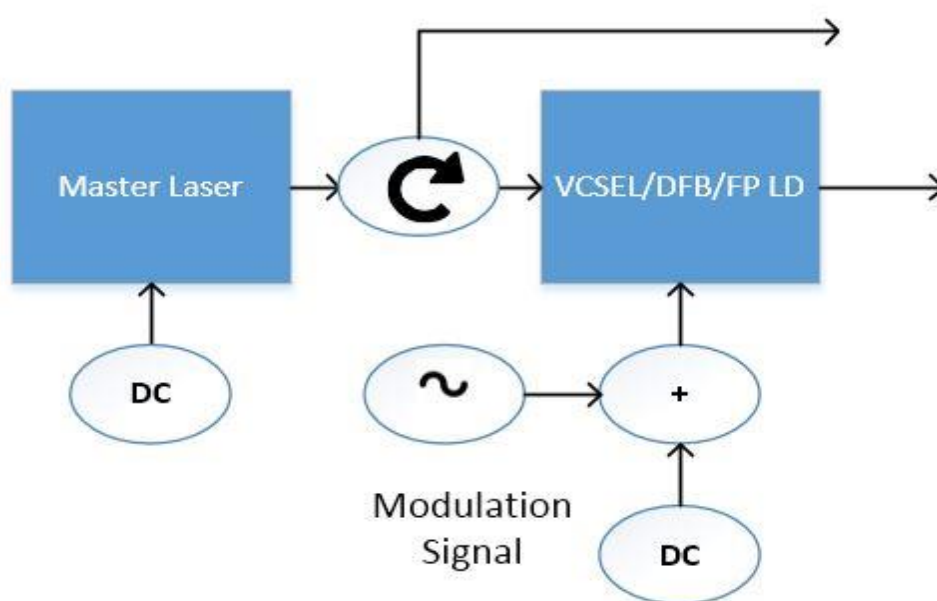
Το 1990 ανακαλύφθηκαν τα τρία πιο σημαντικά οφέλη: Καταστολή θορύβου, μείωση μη γραμμικών στρεβλώσεων και βελτίωση του εύρους ζώνης.

6.3 Πλεονεκτήματα της τεχνολογία κλειδωμένης έγχυσης

- Ενιαίος τρόπος με καταστολή του side-mode (Single mode with side-mode suppression)
- Ενισχυμένη χαλάρωση ταλάντωσης συχνότητας (Enhanced relaxation oscillation frequency)
- Μείωση της μη γραμμικότητας (Reduced nonlinearities)
- Μείωση του RIN (Reduced RIN)
- Μείωση του chirp (Reduced chirp)
- Αύξηση κέρδους στον σύνδεσμο (Increased link gain)
- Διαμόρφωση του Near-single-sideband (Near-single-sideband modulation)

6.4 Ποια lasers χρησιμοποιούνται στην τεχνολογία κλειδωμένης έγχυσης

Έχουν γίνει πειράματα και με τους τρεις τύπους των lasers που αναφερθήκαν. Η χρήση των DFB και VCSEL δεν έχει εφαρμοστεί σε δίκτυο, όπως έχει γίνει με τα Fabry-Pérot στην Κορέα, έχουν όμως γίνει προσομοιώσεις για την απόδοση τους, κυρίως στα VCSEL. Η χρήση των lasers για κλειδωμένη έγχυση, έχει σημασία όταν εφαρμόζονται σαν slave lasers, αφού μέσω αυτών γίνεται η επιλογή του μήκους κύματος για μετάδοση, με τη δική τους ισχύ.



Σχήμα 6.5: Κλειδωμένη έγχυση

	<u>Fabry-Pérot</u>	<u>DFB</u>	<u>VCSEL</u>
Πλεονεκτήματα	Οικονομικά	Γρηγορότερα	Μικρός κόστος
	Υψηλή ισχύς	Παρέχει οπισθοανάκλαση (λόγω Bragg)	Αποτελεσματικό σε λειτουργία υψηλών ρυθμών
	Υψηλός βαθμός απόδοσης (MQW)	Υψηλός βαθμός απόδοσης	Μεγάλος βαθμός απόδοσης
	Χαμηλός θόρυβος (MQW)	Σχεδόν αθόρυβες συσκευές	Σταθερό σε μεγάλο εύρος θερμοκρασιών
	Χαμηλό κατώτατο όριο ρεύματος (MQW)	Στενό φασματικό πλάτος	Χαμηλό κατώτατο όριο ρεύματος
	Καλύτερη γραμμικότητα (MQW)	Καλύτερη γραμμικότητα	Αξιολόγηση συσκευής σε διάφορα στάδια παραγωγής
	Σταθερότητα στις θερμοκρασίες (MQW)	Είναι μονοχρωματικά	Εφικτή η μονότροπη λειτουργία
			Μεγάλος χρόνος ζωής
Μειονεκτήματα	Αργές συσκευές	Υψηλό κόστος	Δύσκολη η παραγωγή των καθρεφτών
	Επιρρεπή στα φαινόμενα back-reflection (MQW)		Περιορισμένη απόδοση στη διαμόρφωση
	Διακριτά μήκη κύματος		Μεγάλο chirp της συχνότητας
Μήκη κύματος (nm)	780 έως 1640	760, 780, 795, 852, 976, 1064, 1083, 1392, 1655, 1742, 1872, 1950, 2004, 2050, 2330, 2334, 2740	750-980 (GaAs /AlGaAs) 1300, 1550 ή και πάνω από 2000 (με αραιά νιτρίδια)

Πίνακας 6.1: Συγκριτικός πίνακας των lasers

Στον συγκριτικό πίνακα βλέπουμε τα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματα των lasers. Να σημειώσουμε πως τα Fabry-Pérot lasers χωρίζονται σε δύο τύπους. Τα buried hetero (BH) και τα multiquantum well (MQW). Τα BH τα χρησιμοποιούσαν για πολλά χρόνια, αλλά τώρα τα MQW είναι πολύ πιο διαδεδομένα και για αυτόν τον λόγο (και των πλεονεκτημάτων που αναφέρονται στον πίνακα) οι κατασκευαστές laser προμηθεύουν αυτό τον τύπο σε μεγαλύτερες ποσότητες.

Τα Fabry-Pérot έχουν επιλεχθεί κυρίως επειδή είναι πιο οικονομικά και έχουν υψηλή ισχύ. Όπως, όμως βλέπουμε, έχει περισσότερο εύρος μηκών κύματος άρα και περισσότερες εφαρμογές σε δίκτυα PON, που βλέπουμε στον πίνακα. Τέλος, το μειονέκτημα της πολυτροπικότητας του laser, με την τεχνολογία κλειδωμένης έγχυσης απαλείφεται, καθώς έτσι μετατρέπεται σε μονοτροπικό laser.

Όνομα ζώνης (band)	Μήκη κύματος (nm)	Περιγραφή
O-band	1260 – 1360	Αρχική ζώνη, PON upstream
E-band	1360 – 1460	Ζώνη του Water peak (περίπου στα 1383)
S-band	1460 – 1530	PON downstream
C-band	1530 – 1565	Αρχική ζώνη του DWDM, συμβατό με ενισχυτές ίνας, CATV, χαμηλότερη εξασθένηση
L-band	1565 – 1625	Χαμηλή εξασθένηση, επέκταση ζώνης του DWDM
U-band	1625 – 1675	Ultra-long wavelength

Πίνακας 6.2: Οπτικές ζώνες

7. Κλειδωμένη έγχυση με χρήση DFB Diode

Σε αυτά τα lasers η πλευρά της διαμήκους λειτουργίας, μπορεί να κατασταλεί λόγω του κατανεμημένου τριψίματος (χρήση «σχάρας»). Έτσι, η τεχνολογία κλειδωμένης έγχυσης, μπορεί να υποστηριχθεί ακόμα και σε συνθήκες στις οποίες η σχέση φάσης μεταξύ του ηλεκτρικού πεδίου στην κοιλότητα του laser και της εξωτερικής έγχυσης να είναι τέτοια έτσι ώστε η κατώτατη τιμή του κέρδους να είναι υψηλότερη από αυτή της ελεύθερης λειτουργίας του laser. Αυτές οι συνθήκες δεν επιτυγχάνονται με τη χρήση των Fabry-Pérot lasers, λόγω της αναπήδησης μεταξύ των διαφορετικών τρόπων που έχει.

Λόγω αυτής της διαφοράς, πειραματικά αποτελέσματα έχουν δείξει ότι υπάρχει συμμετρικό και σταθερό κλείδωμα του εύρους στα DFB lasers σε χαμηλή έγχυση, όπου τα Fabry-Pérot lasers εμφανίζουν μια ασυμμετρία. Με τη λειτουργία της έγχυσης έχουν διακριθεί πειραματικά τέσσερα συστήματα λειτουργίας:

- 1) Ένα συμμετρικά σταθερό εύρος κλειδώματος
- 2) Δύο σταθερά εύρη κλειδώματος και θετικές και αρνητικές τιμές της αποσυντονισμένης συχνότητας που χωρίζεται από μία μη σταθερή περιοχή
- 3) Σταθερό κλείδωμα εύρους για αρνητικές τιμές αποσυντονισμού
- 4) Μία δισταθή (bistable) περιοχή

Επίσης, έχει αποδειχθεί ότι ακόμα και αν το μη γραμμικό κέρδος έχει αμελητέα επίδραση στις διακυμάνσεις της πυκνότητας των στατικών φωτονίων, επηρεάζει έντονα τις δυναμικές ιδιότητες της κλειδωμένης έγχυσης στα lasers ημιαγωγών. Μπορεί να μετρηθεί ο συντελεστής ενίσχυσης linewidth. Αυτό επιτυγχάνεται με βάση την συμμετρία του κλειδώματος του εύρους στα DFB lasers και δεν απαιτεί τη γνώση της απόλυτης στιγμής στο επίπεδο έγχυσης. Πρόκειται μια ειδική και σημαντική παράμετρο στα lasers ημιαγωγών, με την οποία πολλές ιδιότητες που είναι μοναδικές για αυτά τα lasers μπορούν να ανιχνευθούν με βάση αυτήν την παράμετρο η οποία, δεν είναι δυνατόν να μετρηθεί άμεσα (π.χ. στα Fabry-Pérot lasers δύσκολα μετριέται με ακρίβεια). Επιπλέον, μπορούν τα DFB lasers να χρησιμοποιηθούν για οπτική διαμόρφωση PSK. Η δυνατότητα αυτή έχει εξεταστεί

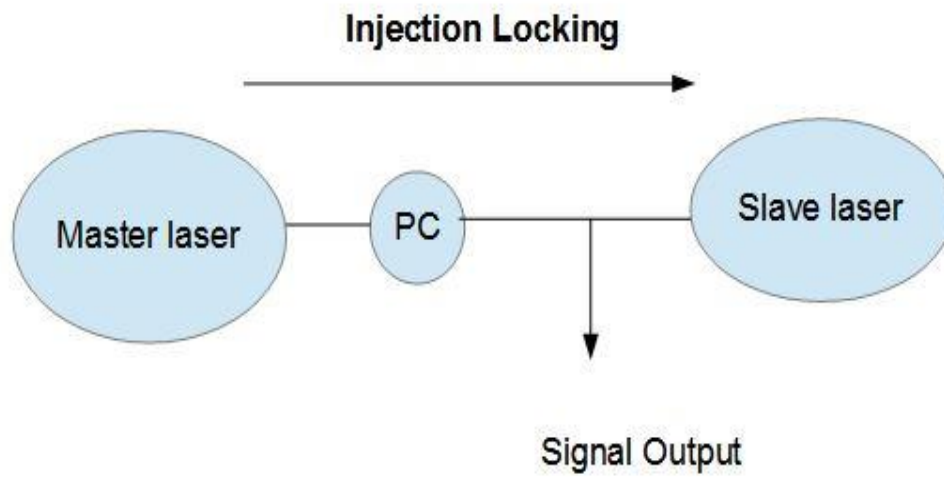
χρησιμοποιώντας και τις δύο αναλύσεις μικρού σήματος και μεγάλου σήματος από αριθμητικές προσομοιώσεις.

7.1 Χρήση master και slave DFB laser [29]

Παρακάτω θα δούμε μία εφαρμογή δύο DFB lasers σαν master και slave laser. Αρχικά πρέπει να ληφθεί προσοχή στην απομόνωση του master laser από κάθε έγχυση φωτός του slave laser και να ταιριάζουν οι πολώσεις των δύο lasers στην κοιλότητα του slave laser. Μια σημαντική παράμετρος είναι το στατιστικό κλείδωμα του εύρους, $\Delta\nu_{max}$, το οποίο αντιστοιχεί στη μέγιστη διαφορά μεταξύ των συχνοτήτων της ελεύθερης λειτουργίας και των master και slave lasers, καθιστώντας εφικτό το κλείδωμα της συχνότητας του slave laser πάνω στην κύρια συχνότητα. Σύμφωνα με το πρότυπο, το στατικό κλείδωμα εύρους συνδέεται με την αναλογία «ρ» μεταξύ του εγχέομενου master laser και της εκπομπής ισχύος του slave laser στην κοιλότητα του slave laser.

$$\Delta\nu_{max} = \frac{Vg}{2L} \sqrt{(1 + \beta_c^2)\rho}$$

Η παραπάνω εξίσωση δείχνει ότι όσο μεγαλύτερη είναι η αναλογία της εγχέομενης ισχύος «ρ», τόσο ευρύτερο είναι και το $\Delta\nu_{max}$. Ισχύει πράγματι, ότι στα πρότυπα των DFB για τιμές του «ρ» παραπάνω της τάξεως $2 \cdot 10^{-5}$, παρατηρούνται ανεπιθύμητοι κραδασμοί στο φάσμα του slave laser. Για τιμή του ρ, πάνω από $2 \cdot 10^{-4}$, το φάσμα είναι τελείως χαοτικό. Για «ρ» ίσο με $2 \cdot 10^{-5}$, το $\Delta\nu_{max}$ είναι συνήθως μεταξύ 500 MHz και 1 GHz. Αυτό σημαίνει ότι οι συχνότητες της ελεύθερης λειτουργίας των δύο lasers θα πρέπει να είναι αρχικά πολύ κοντά ώστε να παρατηρηθεί η κλειδωμένη έγχυση. Αντιστρόφως, εάν το «ρ» είναι μικρότερο του 10^{-6} , η εγχέομενη ισχύς είναι τόσο χαμηλή που κυριαρχείται από σκεδάσεις Rayleigh. Οπότε, η καλύτερη τιμή για να επιτευχθεί η κλειδωμένη έγχυση πρέπει το «ρ» να είναι κοντά στην τιμή του $2 \cdot 10^{-5}$.



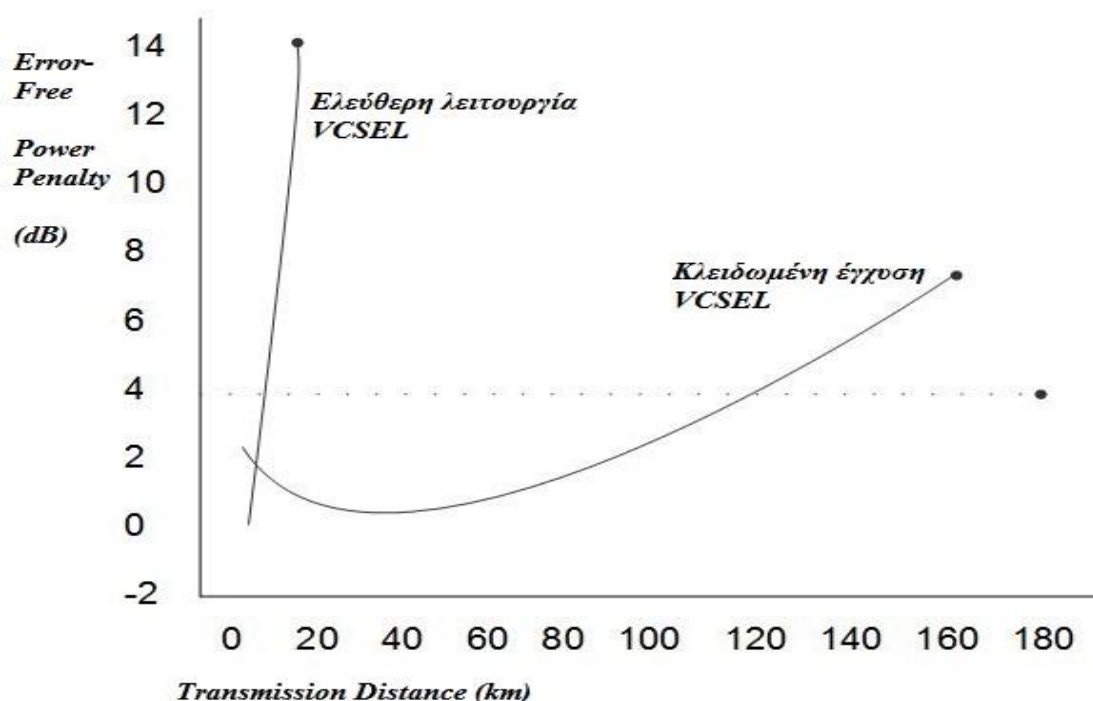
Σχήμα 7.1: Κλειδωμένη έγχυση σε δύο DFB lasers

8. Κλειδωμένη έγχυση με χρήση VCSEL Laser

Τα VCSEL έχουν κάποια μειονεκτήματα όπως η περιορισμένη απόδοση στην διαμόρφωση και το μεγάλο chirp της συχνότητας που περιορίζει την ταχύτητα της μετάδοσης στην οπτική ίνα αλλά και την απόσταση, οι οποίες είναι βασικές παράμετροι στην χρήση των οπτικών συστημάτων. Με την τεχνολογία κλειδωμένης έγχυσης μπορούν να ξεπεραστούν αυτοί οι περιορισμοί χωρίς ανασχεδιασμό των VCSEL lasers. Κλειδώνοντας τη συχνότητα και τη φάση του VCSEL, με την άμεση έγχυση του φωτός από ένα άλλο laser, βελτιώνεται η απόδοση της συσκευής. Με την τεχνολογία κλειδωμένης έγχυσης σε αυτά τα lasers, μειώνεται η πολυπλοκότητα, το κόστος και το μέγεθος των ψηφιακών και αναλογικών οπτικών συστημάτων.

8.1 Single Transverse Mode VCSEL [30]

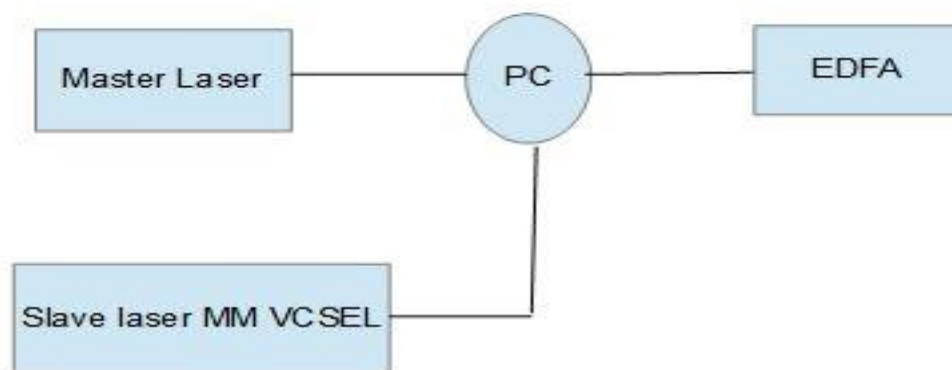
Η χρήση της κλειδωμένης έγχυσης στα VCSEL, έχει αρκετά καλά αποτελέσματα. Για παράδειγμα, με χρήση μονότροπης οπτικής ίνας με ταχύτητα δεδομένων 10 Gbps και σαν υψηλότερη αποδεκτή τιμή θορύβου τα 4 dB, η απόδοση σε σχέση με την ελεύθερη λειτουργία δίνει σαν βέλτιστη απόσταση τα 25 χιλιόμετρα, όπου το αρνητικό chirp αντισταθμίζει τη χρωματική διασπορά της ίνας. Επίσης, μπορεί να φτάσει μέχρι τα 100 χιλιόμετρα, όταν η απόσταση της ελεύθερης λειτουργίας δεν ξεπερνά τα 10 χιλιόμετρα. Η περιγραφή αφορά το VCSEL laser, ως slave laser και σαν master laser χρησιμοποιείται ένα DFB laser.



Σχήμα 8.1: Σύγκριση ελεύθερης λειτουργίας και κλειδωμένης έγχυσης για την απόσταση στα VCSEL

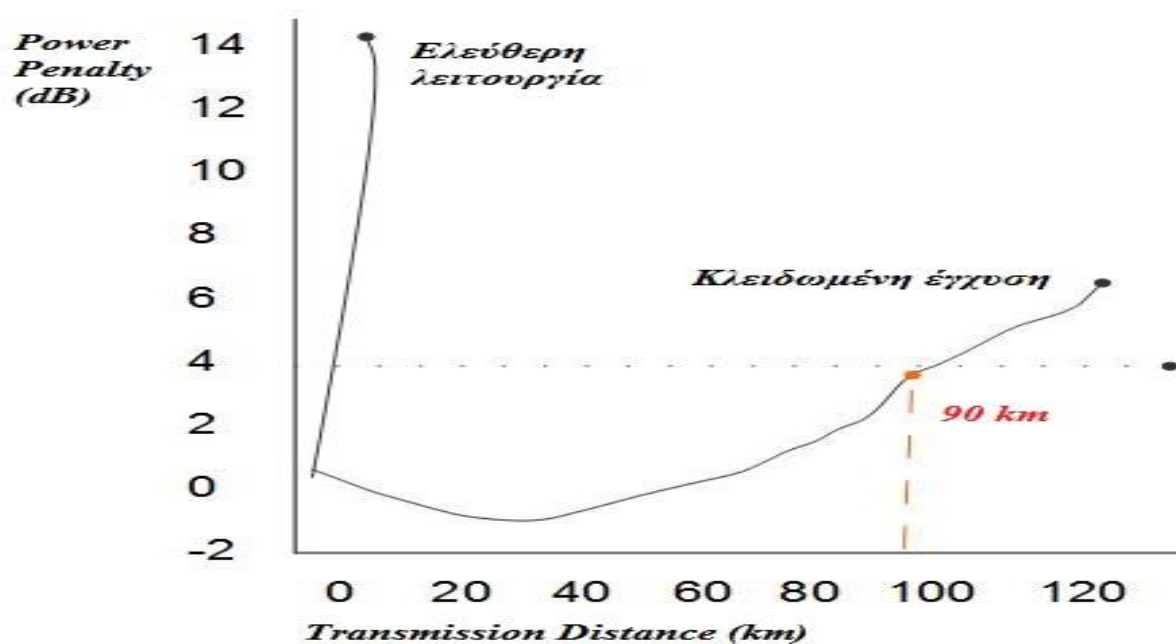
8.2 Multi-Transverse Mode VCSEL [30]

Τα άμεσα διαμορφωμένα MM-VCSEL, χρησιμοποιούνται ευρέως σε τοπικά δίκτυα και για χώρους αποθήκευσης των δικτύων λόγω του χαμηλού κόστους τους και του μεγάλου εύρου ζώνης. Όμως η χρωματική διασπορά τα αποτρέπει για χρήση σε μεγαλύτερης εμβέλειας δίκτυα. Θα πρέπει να υλοποιηθεί μείωση του chirp στην συχνότητα και στένεμα του φάσματος ώστε να επιτευχθεί μετάδοση σε μεγαλύτερη απόσταση πάνω από μία μονότροπη οπτική ίνα. Η κλειδωμένη έγχυση μπορεί να μετατρέψει ένα MM-VCSEL αποτελεσματικά σε SM-VCSEL μετριάζοντας έτσι την τροπική διασπορά. Με τη ρύθμιση της πολικότητας του chirp τη συχνότητας χρησιμοποιώντας κλειδωμένη έγχυση, το chirp μπορεί να αλλάξει από θετικό σε αρνητικό. Έτσι αντισταθμίζεται η χρωματική διασπορά και μεγαλώνει η απόσταση μετάδοσης.



Σχήμα 8.2: Σχηματικό διάγραμμα slave MM-VCSEL

Παρατηρώντας τα σχήματα 8.1 και 8.3, βλέπουμε ότι η απόδοση των VCSEL και των MM-VCSEL, έπειτα από την εφαρμογή της κλειδωμένης έγχυσης είναι συγκρίσιμη, σε σχέση με την ελεύθερη λειτουργία και των δύο περιπτώσεων.



Σχήμα 8.3: Σύγκριση ελεύθερης λειτουργίας και κλειδωμένης έγχυσης για την απόσταση στα MM-VCSEL

Φυσικά, ο σκοπός της κλειδωμένης έγχυσης έχει επιτύχει καθώς το φάσμα έπειτα από τη χρήση της, είναι πολύ καλύτερο. Πιο συγκεκριμένα, στην ελεύθερη λειτουργία το φάσμα από 1542 nm μέχρι 1546 nm δίνει 4 διαφορετικά φάσματα, ενώ τη με την κλειδωμένη έγχυση μεταξύ των 1542 nm και 1544 nm έχουμε μία τιμή, αυτή των 1543 nm.

Ένας σημαντικός παράγοντας στην κλειδωμένη έγχυση, είναι η ισχύς της έγχυσης (injection power ή injection ratio), που βελτιώνει την απόδοση της απόστασης. Στην περίπτωση της ελεύθερης λειτουργίας η απόσταση μετάδοσης δεν ξεπερνά τα 5 χιλιόμετρα ενώ με ισχύ έγχυσης της τάξης των 3 dB φτάνει μέχρι τα 8 χιλιόμετρα και με ισχύ έγχυσης στα 6 dB η απόσταση μετάδοσης φτάνει μέχρι τα 32 χιλιόμετρα, το οποίο δείχνει πόσο φανερό είναι η βελτίωση του σήματος.

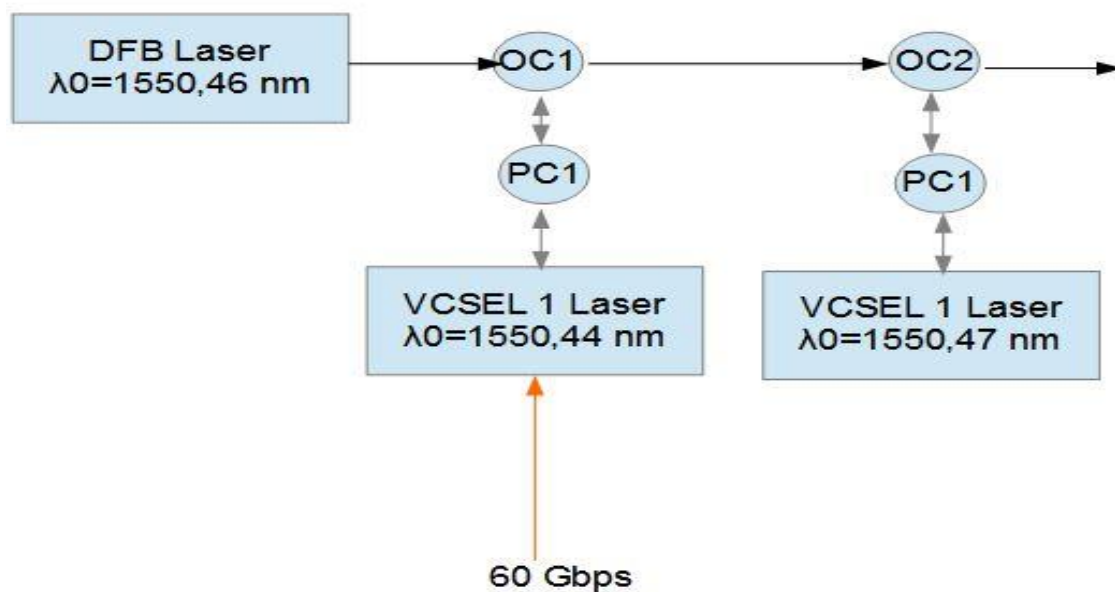
8.3 Χρήση δύο VCSEL Laser [33]

Σε αντίθεση με την προηγούμενη περιγραφή, θα δούμε ότι σαν master και σαν slave laser, χρησιμοποιούνται μόνο VCSEL lasers. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα μικρότερη έγχυση εξωτερικής ισχύος, 30 μ W αντί για 1,5 mW στην περίπτωση του SM-VCSEL. Έτσι, αφού τα δύο lasers είναι ίδιου τύπου, μπορεί να πραγματοποιηθεί μείωση του chirp συχνότητας με ασθενή ισχύ.

Στο chirp της συχνότητας σε απόσταση 50 χιλιομέτρων, παρατηρείται σημαντική μείωσή του σε σχέση με πριν και μετά την κλειδωμένη έγχυση. Στην ελεύθερη λειτουργία το chirp είχε αυξομειώσεις από -2 έως 2 GHz, ενώ μετά την εφαρμογή της κλειδωμένης έγχυσης το chirp ήταν πολύ κοντά στα 0 GHz.

8.4 Δίκτυο PON με δύο στάδια κλειδωμένης έγχυσης VCSEL με χρήση NDF [31]

Παρακάτω παρουσιάζεται πείραμα που έχει διεξαχθεί σε συνθήκες PON δικτύου και χρήση δύο VCSEL lasers, ίδιας απόκρισης συχνότητας, για εφαρμογή κλειδωμένης έγχυσης, όπως βλέπουμε στο σχήμα 8.4 αλλά και χρήση ινών τύπου NDF.



Σχήμα 8.4: Δύο στάδια κλειδωμένης έγχυσης VCSEL

Η κλειδωμένη έγχυση δύο σταδίων VCSEL, ενσωματώνει τα πλεονεκτήματα των ιδιοτήτων και δίνει μία υποσχόμενη μέθοδο λειτουργίας με υψηλή ταχύτητα. Η απλή εφαρμογή, ενός σταδίου, κλειδωμένης έγχυσης έχει αποδειχτεί αποτελεσματική για την ενίσχυση της απόκρισης της συχνότητας του VCSEL. Η κλειδωμένη έγχυση δύο σταδίων μπορεί να ενισχύσει περισσότερο την απόκριση της συχνότητας του VCSEL, τρόπος με τον οποίο αναμένεται εξαιρετική απόδοση μετάδοσης στο PON δίκτυο.

Η αλληλεπίδραση της χρωματικής διασποράς των ινών με το chirp του άμεσα διαμορφωμένου πομπού είναι από τους πιο σοβαρούς περιοριστικούς παράγοντες του αμφίδρομου PON. Αυτός ο περιορισμός προκαλεί μεγάλα ποσά στρεβλώσεων. Για αυτόν τον λόγο θα πρέπει μία συσκευή αντιστάθμισης διασποράς να χρησιμοποιηθεί ώστε να ξεπεραστεί το πρόβλημα της διασποράς και κατά συνέπεια να μειωθούν οι στρεβλώσεις. Οι ίνες τύπου NDF έχουν αρνητική διασπορά και έχουν την ικανότητα να αντισταθμίσουν το θετικό chirp και να βελτιώσουν την ανοχή στη διασπορά σε ένα άμεσα διαμορφωμένο PON.

Σαν master laser είναι ένα DFB με οπτική ισχύ τα 40 mW και μήκος κύματος $\lambda_0=1550.46$ nm. Η οπτική έξοδος του εγχέεται στο VCSEL-1, με ισχύ έγχυσης γύρω στα 10 dB. Εν τω μεταξύ, το VCSEL-2 με μήκος κύματος 1550.47 nm έχει κλειδωθεί από το VCSEL-1 με ισχύ έγχυσης περίπου στα 14 dB.

Για το πρώτο στάδιο κλειδωμένης έγχυσης το μήκος κύματος του master laser (DFB) πρέπει να είναι ελαφρώς μεγαλύτερο από εκείνο του slave laser (VCSEL-1) ώστε να ληφθεί μία επίπεδη απόκριση συχνότητας. Δηλαδή, θετικό μήκος κύματος αποσυντονισμού. Ωστόσο, για το δεύτερο στάδιο κλειδωμένης έγχυσης, το μήκος κύματος του master laser (από το πρώτο στάδιο κλειδωμένης έγχυσης, άρα το VCSEL-1) πρέπει να είναι ελαφρώς μικρότερο από εκείνο του slave laser (VCSEL-2) για να ληφθεί μία κορυφή συντονισμού υψηλής συχνότητας. Δηλαδή, αρνητικό μήκος κύματος αποσυντονισμού.

Το 3-dB bandwidth (συχνότητα αποκοπής) είναι ένα από τα πιο σημαντικά χαρακτηριστικά ως προς την απόδοση των VCSEL. Έτσι, για την ίδια απόκριση, το πρώτο στάδιο κλειδωμένης έγχυσης φτάνει μέχρι και τα 48 GHz, ενώ το δεύτερο στάδιο έχει αυξηθεί στα 63 GHz. Αυτό σημαίνει ότι η κλειδωμένη έγχυση δύο σταδίων για VCSEL στα 1550 nm, είναι αρκετά ισχυρή για μετάδοση 60 Gbps.

8.5 Περίπτωση τριών σταδίων κλειδωμένης έγχυσης [31]

Σε περίπτωση εφαρμογής τριών σταδίων κλειδωμένης έγχυσης, το μήκος κύματος του master laser (από το δεύτερο στάδιο κλειδωμένης έγχυσης, άρα το VCSEL-2 θα πρέπει επίσης να είναι ελαφρώς μικρότερο από εκείνο του slave laser (VCSEL-3) ώστε να ληφθεί μία κορυφή συντονισμού υψηλής συχνότητας. Δηλαδή, να υπάρξει ξανά αρνητικό μήκος κύματος αποσυντονισμού. Για τα τρία στάδια κλειδωμένης έγχυσης, υπάρχει αύξηση του 3-dB bandwidth μέχρι τα 80 GHz. Αυτό σημαίνει ότι κλειδωμένη έγχυση τριών σταδίων είναι ικανή για μετάδοση δεδομένων 80 Gbps.

8.6 Απομακρυσμένη κλειδωμένη έγχυση με δύο VCSEL lasers σε WDM-PON [32]

Σε αυτή την περίπτωση σαν master και σαν slave lasers είναι δύο VCSEL, αλλά με τη διαφορά ότι το slave laser βρίσκεται στο ONU, δηλαδή στην πλευρά του χρήστη. Πρόκειται για τη χαμηλού κόστους και άχρωμη WDM-PON αρχιτεκτονική, όπου τα VCSEL λειτουργούν σαν μεταδότες και στο OLT και στο ONT. Για την

άχρωμη λειτουργία του ONU, το master VCSEL που μεταφέρει τα downstream δεδομένα, εγχέει στο slave VCSEL, κλειδώνοντας το upstream μήκος κύματος στο downstream μήκος κύματος, Θα δούμε μία αμφίδρομη μετάδοση με 2.5 Gbps και 5 Gbps πάνω σε μονότροπη οπτική ίνα 26 χιλιομέτρων.

Για παράδειγμα, στην ελεύθερη λειτουργία του upstream σήματος και στο κλείδωμα των upstream και downstream σημάτων, που έχουν συντονιστεί, το slave laser μετατοπίστηκε στο μεγαλύτερο μήκος κύματος και έχει στενότερο πλάτος.

Η σύγκριση των σημάτων στα BER των περιπτώσεων B2B και σε ίνα 26 χιλιομέτρων σε μεταδόσεις 5 και 2,5 Gbps γίνεται παρακάτω.

Στα 2,5 Gbps, η ευαισθησία του δέκτη για BER of 10^{-9} είναι -21.1 dBm στην B2B περίπτωση και -19.6 dBm μετά τη μετάδοση στην ίνα, με 1,5 dBm ποινή μετάδοσης (transmission penalty).

Αντίστοιχα, στα 5 Gbps, η ευαισθησία του δέκτη για BER of 10^{-9} είναι -20 dBm στην B2B περίπτωση και -18 dBm μετά τη μετάδοση στην ίνα, με 2 dBm ποινή μετάδοσης. Αυτή η διαφορά, 0,5 dBm περισσότερη ποινή ισχύος VCSEL που αλληλεπιδρά με τη διασπορά της ίνας.

2.5 Gbps B2B	-21.1 dBm
2.5 Gbps 26 χμλ ίνα	-19.6 dBm
5 Gbps B2B	-20 dBm
5 Gbps 26 χμλ ίνα	-18 dBm

Πίνακας 8.1: Συγκριτικός πίνακας των downstream σημάτων

Παρατηρούμε ότι η ευαισθησία του δέκτη αφού περάσει από την ίνα δεν έχει μεγάλη διαφορά από την B2B περίπτωση και στις δύο ταχύτητες. Αυτό δείχνει την απόδοση της κλειδωμένης έγχυσης.

Για τα upstream σήματα στους δύο ρυθμούς μετάδοσης, 2,5 Gbps και 5 Gbps, με κλειδωμένη έγχυση στο VCSEL έχουμε τα εξής:

Στα 2,5 Gbps, η ευαισθησία του δέκτη είναι -22.8 dBm στην B2B περίπτωση και -20,8 dBm μετά τη μετάδοση στην ίνα, με 2 dBm ποινή μετάδοσης και στα 5 Gbps, η ευαισθησία του είναι -20,9 dBm στην B2B περίπτωση και -18,5 dBm μετά τη μετάδοση στην ίνα, με 2,4 dBm ποινή μετάδοσης, σε αντίθεση με την ελεύθερη

λειτουργία που ξεπερνούσε τις τιμές της κλειδωμένης έγχυσης, αντίστοιχα για κάθε περίπτωση.

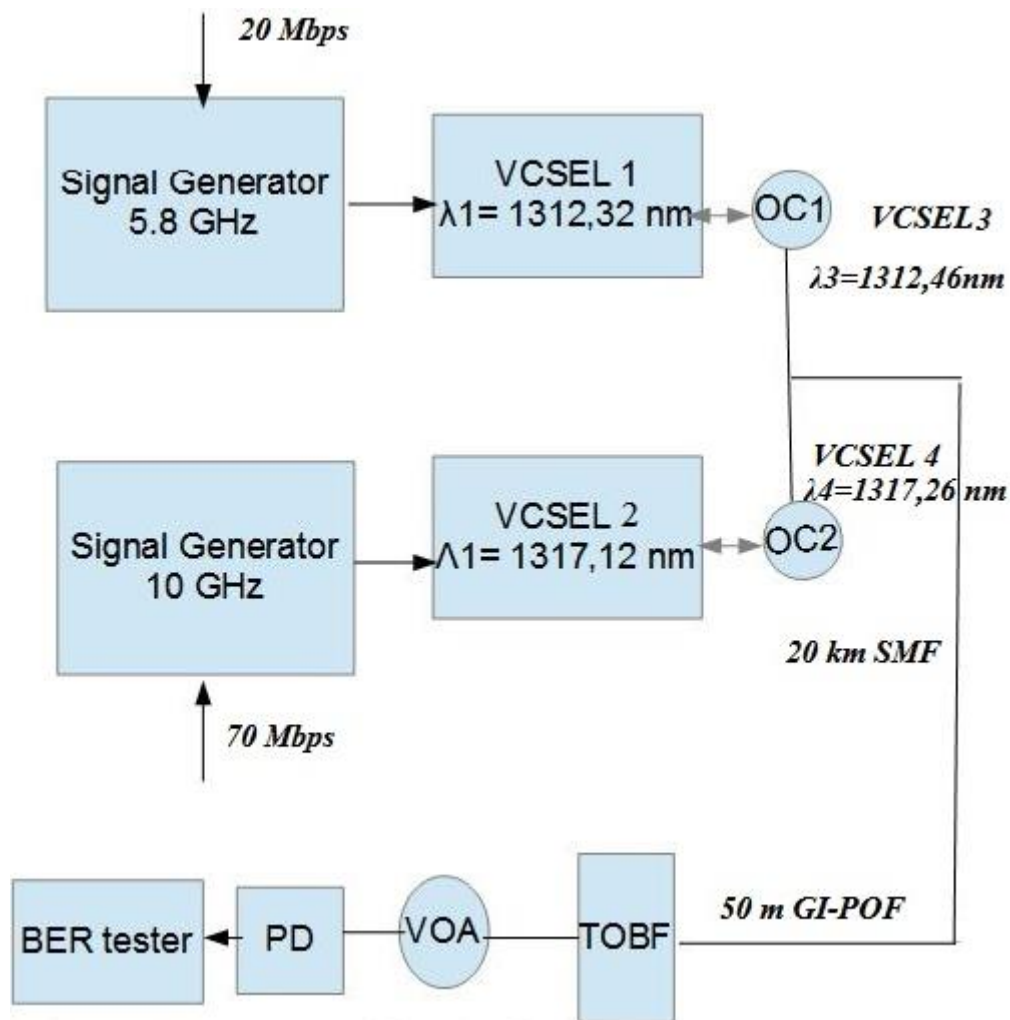
Η διαφορά στην ποινή μετάδοσης μεταξύ των ρυθμός μεταδόσεων, μειώθηκε στα 0.4 dBm, που υπάρχει λόγω του chirp. Παρόλα αυτά, η απόδοση του slave laser βελτιώθηκε λόγω της κλειδωμένης έγχυσης και στους δύο ρυθμούς μετάδοσης.

8.7 In-house δίκτυα με κλειδωμένη έγχυση VCSEL σε GI-POF συνδέσεις [39]

Το πιο διαδεδομένο μέσο είναι η μονότροπη οπτική ίνα SMF, καθώς έχει καλύτερες επιδόσεις σε σχέση με την πλαστική (POF) όσον αφορά την εξασθένηση και τη διασπορά. Ωστόσο, η SMF για την εγκατάσταση των δικτύων στο σπίτι, το κόστος εγκατάστασης και η ευκολία είναι θέματα πρέπει να επιλυθούν. Η SMF έχει μικρότερο μέγεθος πυρήνα και απαιτεί εκπαιδευμένα άτομα, συσκευές υψηλής ακρίβειας και υψηλότερο κόστος εγκατάστασης και συντήρησης. Αντιθέτως, η POF έχει πολύ μεγαλύτερο μέγεθος πυρήνα, μικρότερη ακτίνα κάμψης και είναι πιο εύκολο να εγκατασταθεί και να συντηρηθεί. Κατά συνέπεια, η σύνδεση με το σπίτι είναι ένα κρίσιμο σημείο για να μεταδοθούν με επιτυχία τα σήματα υψηλής ποιότητας από το CO στις εγκαταστάσεις του πελάτη. Για να επιτευχθεί αυτό, ένα νέο είδος In-house δικτύου πρέπει να αντικαταστήσει τα ομοαξονικά δίκτυα. Κλιμακωτού δείκτη POF (GI-POF) έχουν αναπτυχθεί με καλή απόδοση μετάδοσης και χαμηλότερο κόστος. Έτσι μπορεί να γίνει η διασύνδεση του backbone δικτύου με το in-house δίκτυο. Εδώ θα παρουσιαστεί μία μελέτη της ενσωμάτωσης του FTTH και των GI-POF in-house δικτύων που βασίζονται στην κλειδωμένη έγχυση με VCSEL και RF σήματα που μεταδίδονται από το CO προς τις εγκαταστάσεις του πελάτη και στη συνέχεια στα υπόλοιπα δωμάτια.

Στο σχήμα 8.5 απεικονίζεται το σχηματικό διάγραμμα του ολοκληρωμένου FTTH και GI-POF in-house δικτύων με συνδυασμό 20 χιλιομέτρων SMF και 50 μέτρων GI-POF για μετάδοση. Το CO αποτελείται από τέσσερα VCSEL, δύο οπτικούς κυκλοφορητές (OC), και δύο γεννήτριες σήματος. Ο ρυθμός δεδομένων των 20 Mbps αναμιγνύεται με 5,8 GHz φέροντος RF διαμορφωμένο άμεσα στο VCSEL-1 και ο ρυθμός δεδομένων των 70 Mbps αναμιγνύεται με 10 GHz φέροντος RF

διαμορφωμένο άμεσα στο VCSEL-2. Το εγχεόμενο φως εγχέεται μέσω του 3-port του OC με ισχύς έγχυσης στα 4 dBm ανά οπτικό κανάλι και συνδυάζονται οπτικά. Έπειτα διέρχονται μέσω ενός οπτικού φίλτρου διέλευσης ζώνης συχνοτήτων (TOBPF), ρυθμίζονται από έναν μεταβλητό οπτικό εξασθενητή (VOA) ανιχνεύονται από το PD και τέλος τροφοδοτούνται στον BER tester για την ανάλυση του BER.



Σχήμα 8.5: Σχηματικό διάγραμμα ολοκληρωμένου FTTH και GI-POF in-house δικτύου

Το οπτικό φάσμα του απευθείας διαμορφωμένου VCSEL-1 έχει το οπτικό φέρον και δυο πλευρικές ζώνες (μορφή διπλής πλευρικής ζώνης (DSB)). Όπως αναφέρθηκε, ένα βασικό χαρακτηριστικό της κλειδωμένης έγχυσης, είναι ότι το laser αναγκάζεται να ταλαντωθεί στη συχνότητα της έγχυσης αντί της αρχικής συχνότητας στην ελεύθερη λειτουργία και έτσι γίνεται αυτή κυρίαρχη συχνότητα. Η συμπεριφορά της κλειδωμένης έγχυσης συμβαίνει καθώς ένα laser εγχύσεως (VCSEL-3) είναι

ελαφρώς αποσυντονισμένο στη χαμηλότερη συχνότητα από εκείνη του εγγεόμενου laser. Αυτό σημαίνει ότι χρησιμοποιείται αρνητικός αποσυντονισμός συχνότητας για να επιτευχθεί μια συμπεριφορά κλειδώματος ένεση η κλειδωμένη έγχυση. Έτσι, οπτικό φάσμα του μετατοπίζεται ελαφρώς στο μεγαλύτερο μήκος κύματος (1.312,46 nm). Όταν ένα κλειδωμένο laser με αρνητικό αποσυντονισμό συχνότητας διαμορφώνεται με ένα σήμα RF, η άνω πλευρική ζώνη θα ενισχυθεί. Η κλειδωμένη έγχυση ενισχύει την ένταση της άνω πλευρικής ζώνης και παράγει το οπτικό φάσμα σχεδόν με μορφή DSB, δηλαδή πέρα από το κεντρικό φάσμα που θα δημιουργείται, θα δημιουργούνται δίπλα από αυτό και άλλα δύο, λιγότερο ενισχυμένα και συμμετρικά.

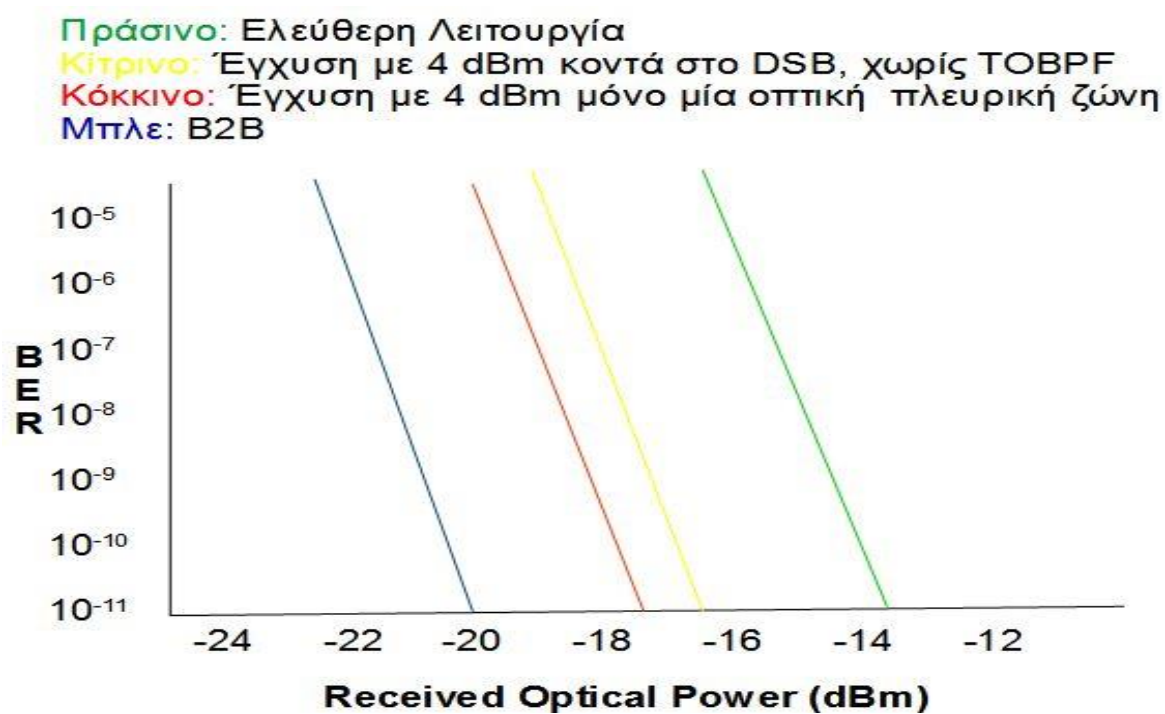
Εφαρμόζοντας οπτική διαμόρφωση SSB, η υποβάθμιση ισχύος των RF που προκαλείται από την διασπορά ινών μπορεί να κατασταλεί, αλλά όχι να εξαλειφθεί τελείως. Για μετατροπή κοντά σε DSB σε μία μόνο οπτική πλευρά, το TOBPF στις εγκαταστάσεις ρυθμίζεται έτσι ώστε μόνο η ανώτερη πλευρική ζώνη των συχνοτήτων να μπορεί να διαβαστεί.

Το μετρούμενο BER των 20 Mbps/5.8 GHz (VCSEL-1) και των 70 Mbps/ 10 GHz (VCSEL-2), είναι στα σχήματα 8.6 και 8.7 αντίστοιχα.. Φαίνεται ότι η ευαισθησία του δέκτη των συστημάτων χωρίς το TOBPF (DSB και κοντά στο DSB: Αποδιαμόρφωση RF) είναι χειρότερη από εκείνη των συστημάτων με TOBPF (μόνο μία οπτική πλευρική ζώνη) .

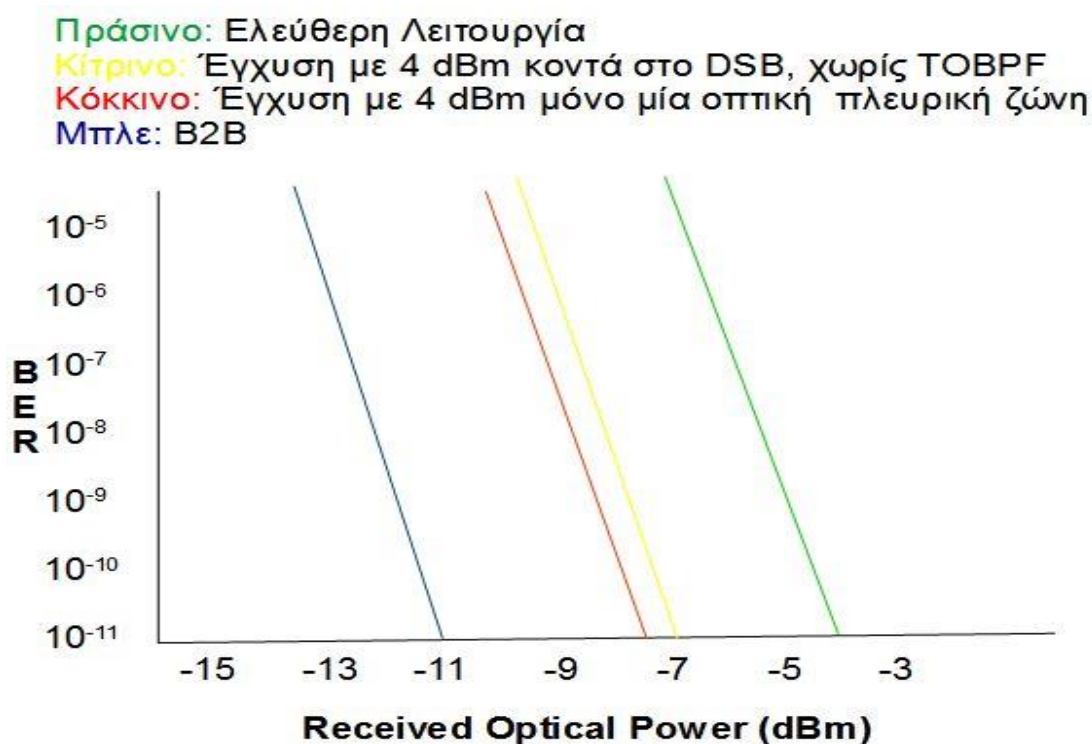
Στο BER 10^{-9} , υπάρχει μια μεγάλη ποινή ισχύος της τάξης των 6.2 dB (σχήμα 8.6) και των 6.3 dB (σχήμα 8.7), μεταξύ των περιπτώσεων B2B και αυτής της ελεύθερης λειτουργίας (DSB) λόγω της χρωματικής διασποράς ινών στην SMF και την τροπική διασπορά στην GI-POF.

Επίσης, στο BER 10^{-9} , υπάρχει μια μικρή ποινή ισχύος της τάξης των 2,9 dB (σχήμα 8.6) και των 3.3 dB (σχήμα 8.7), μεταξύ των περιπτώσεων πλάτη B2B και αυτής στην περίπτωση της έγχυσης ισχύος των 4 dBm (μόνο μία οπτική πλευρική ζώνης).

Τέλος, στο BER 10^{-9} , υπάρχει πολύ μικρή ποινή ισχύος της τάξης των 0,6 dB (σχήμα 8.6) και των 0.5 dB (σχήμα 8.7) μεταξύ της περίπτωση της έγχυσης ισχύος των 4 dBm (μόνο μία οπτική πλευρικής ζώνης) και αυτής της περίπτωση της έγχυσης ισχύος των 4 dBm (κοντά στο DSB: χωρίς TOBPF). Είναι προφανές ότι τα αποτελέσματα αυτής της βελτίωσης είναι περιορισμένα.



Σχήμα 8.6: Το μετρούμενο BER των 20 Mbps/5.8 GHz (VCSEL1)

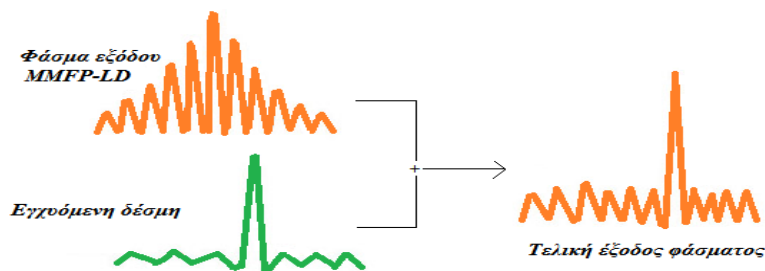


Σχήμα 8.7: Το μετρούμενο BER των 70 Mbps/10 GHz (VCSEL).

9. Κλειδωμένη έγχυση με χρήση των Fabry-Pérot Laser Diode

9.1 Λειτουργία [35]

Είναι γνωστό ότι το Fabry-Pérot έχει πολύτροπη ταλάντωση. Η έξοδος του έχει μεγάλο ποσοστό θορύβου όταν ένας μόνο τρόπος επιλέγεται ανάμεσα στους πολλούς. Πρόκειται για ένα εγγενές χαρακτηριστικό του πολύτροπου laser με ομοιογενώς διευρυμένο μέσο κέρδος. Ο ανταγωνισμός μεταξύ των τρόπων του laser προκαλείται από τη διακύμανση της αυθόρμητης εκπομπής που αποτρέπει τη σταθερή ταλάντωση του κάθε τρόπου στον χρόνο. Το Fabry-Pérot δείχνει πολύτροπη ταλάντωση καθώς η αυθόρμητη εκπομπή είναι σχεδόν ανεξάρτητη με το μήκος κύματος και το φάσμα του κέρδους είναι ευρύ σε σύγκριση με την απόσταση λειτουργίας. Έτσι, είναι αδύνατον να χρησιμοποιηθεί ενός τρόπου φως για το Fabry-Pérot για οπτικές επικοινωνίες. Αυτός όμως ο ένας τρόπος φωτός μπορεί να δημιουργηθεί σαν ένα διάμηκες φως με έγχυση μιας περιορισμένης μπάντας αυθόρμητης εκπομπής στο Fabry-Pérot. Σε αυτήν την περίπτωση, η εγχέομενη αυθόρμητη εκπομπή ενισχύεται επιλεκτικά όταν η εγχέομενη ισχύς του φωτός είναι πολύ υψηλότερη από την αυθόρμητη εκπομπή που παράγεται από το μέσο κέρδος.



Σχήμα 9.1: Το πολύτροπο laser γίνεται μονότροπο



Σχήμα 9.2: Fabry-Pérot Laser Diode Wavelength Locked

Πιο συγκεκριμένα, η οπτική έγχυση σε laser ενός τρόπου είναι γνωστή με την εμφάνιση πολλών δυναμικών φαινομένων όπως το κλείδωμα, ανάμιξη κυμάτων, η χαλάρωση και το χάος. Στην περίπτωση της οπτικής έγχυσης σε Fabry–Pérot για εφαρμογές σε WDM, μόνο το κλείδωμα του μήκους κύματος είναι επιθυμητό. Για τον λόγο αυτό, τα Fabry–Pérot που χρησιμοποιούνται για έγχυση είναι συχνά πολωμένα σε χαμηλό ρεύμα ώστε το εύρος ζώνης κλειδώματος να μεγιστοποιείται και να αποφεύγονται πιο πολύπλοκα φαινόμενα όπως η ανάμιξη κύματος και η χαοτική συμπεριφορά.

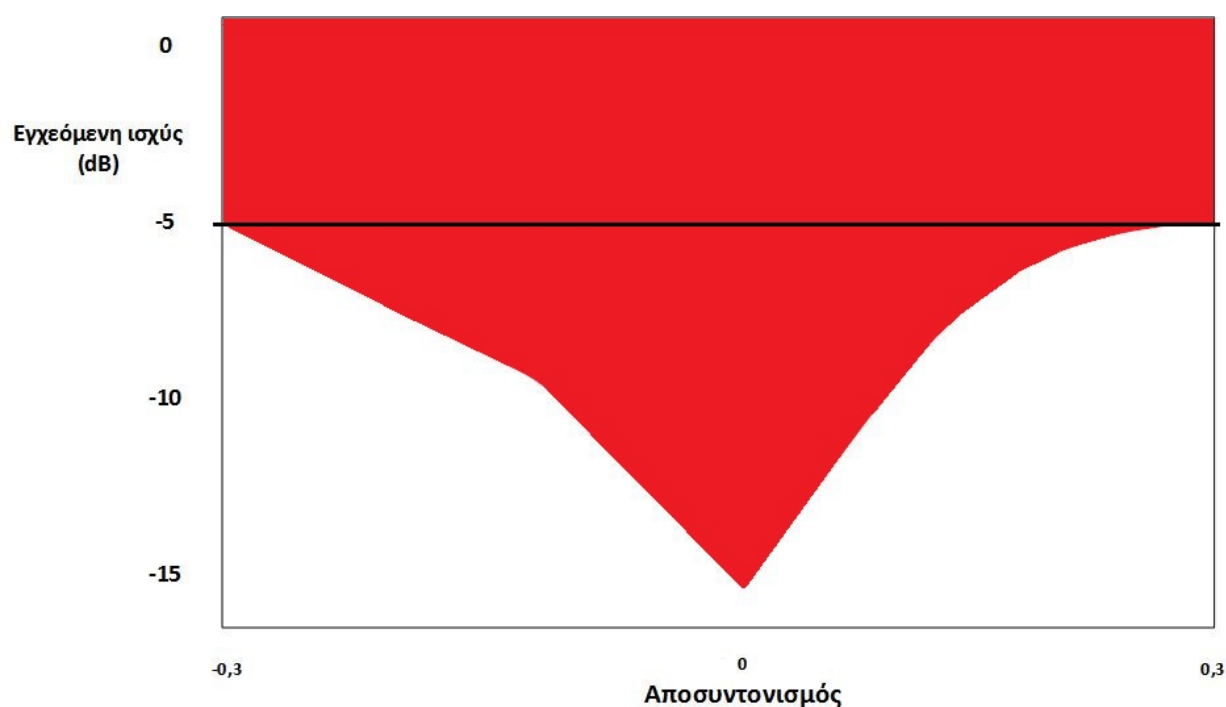
Για τον προσδιορισμό των συνθηκών (οπτικής ισχύς, μήκος κύματος του εγχέομένου σήματος) κατά τις οποίες το Fabry–Pérot κλειδώνεται, είναι ουσιώδης η χαρτογράφηση των φαινομένων λειτουργίας σε ένα γράφημα που ορίζεται από δύο παραμέτρους, η ισχύς της έγχυσης και ο αποσυντονισμός που αντιστοιχεί στη διαφορά μεταξύ των μηκών κύματος του εγχέομένου σήματος και εκείνης του ενός συγκεκριμένου τρόπου του Fabry–Pérot που υποβάλλεται σε οπτική έγχυση. Είναι ο λεγόμενος χάρτης έγχυσης (injection map), που είναι γνωστός για μονότροπο laser.

Στο κλειδωμένο καθεστώς, ο τρόπος που υποβάλλεται σε έγχυση είναι κλειδωμένος με το μήκος κύματος του master laser, ενώ οι άλλες λειτουργίες είναι έντονα εξασθενημένες. Έτσι, υπάρχει μία καταστολή (SMSR) μεγαλύτερη από 30 dB, η λειτουργία της κλειδωμένης έγχυσης σε Fabry–Pérot μπορεί να θεωρηθεί ως μονός τρόπος λειτουργίας.

Στο σχήμα 9.3 είναι ο στατικός χάρτης έγχυσης του Fabry–Pérot, σε ένα τυχαίο τρόπο (λ). Η κόκκινη περιοχή αντιστοιχεί στο κλειδωμένο καθεστώς. Στο παράδειγμα, το τελευταίο αυτό καθεστώς ξεκινά με μια ισχύς έγχυσης της τάξης των -15 dBm, σε μηδενικό αποσυντονισμό. Το φασματικό εύρος της ασφάλισης καθεστώς αυξάνεται με την ισχύς της έγχυσης.

Με μια ισχύ έγχυσης μεγαλύτερη από -5 dBm, η φασματική περιοχή του κλειδώματος καλύπτει την ελεύθερη φασματική περιοχή (FSR) του Fabry–Pérot, δηλαδή το Fabry–Pérot μπορεί να κλειδωθεί με οποιαδήποτε έγχυση μήκους κύματος μέσα σε αυτόν τον συγκεκριμένο τρόπο.

Η λευκή περιοχή αντιστοιχεί σε μη κλειδωμένο καθεστώς. Σε αυτό το καθεστώς, το σήμα εξόδου του Fabry–Pérot είναι απλά ένα άθροισμα των δύο σημάτων (ελεύθερη λειτουργία και έγχυση σήματος) ή αντιστοιχεί σε ένα αδύναμο καθεστώς κλειδώματος με SMSR <30 dB.



Σχήμα 9.3: Χάρτης έγχυσης

9.1.1 Relative intensity noise (Σχετική ένταση του θορύβου)

Ένα από τα σημαντικότερα χαρακτηριστικά της κλειδωμένης έγχυσης είναι η μεταφορά της σχετικής έντασης θορύβου (RIN) από το master laser στο slave laser. Το RIN του στο slave laser μειώνεται όταν είναι κλειδωμένο με χαμηλό θόρυβο του master laser, και αντιστρόφως. Αυτό μπορεί να είναι ένα μεγάλο πλεονέκτημα για τη μείωση της έντασης του θορύβου του Fabry-Pérot εάν η master πηγή έχει χαμηλή ένταση θορύβου. Αντιθέτως, θα γίνει μειονέκτημα, αν η master πηγή έχει υψηλότερο RIN από τη slave.

Αυτή είναι η περίπτωση όταν η οπτική έγχυση πραγματοποιείται με φασματικές «φέτες» από το BLS. Τελική τιμή του RIN ενός φασματικά κομμένου σε «φέτες» BLS είναι της τάξης των -110 dBc/Hz. Αυτή η τιμή καθιστά πολύ δύσκολη την κλειδωμένη έγχυση του Fabry-Pérot από το BLS όταν λειτουργεί με υψηλό ρυθμό δεδομένων.

Στον πίνακα 9.1 είναι το RIN του Fabry-Pérot σε ελεύθερη λειτουργία και στη λειτουργία κλειδωμένης έγχυσης. Για κάθε τιμή έγχυσης, όσο μικραίνει, αυξάνεται ο ρυθμός δεδομένων. Η κατώτατη τιμή του laser είναι περίπου 32 mA. Η ελεύθερη λειτουργία του Fabry-Pérot είναι πολωμένη στα 50 mA με κατώφλι τιμής

του RIN υψηλότερο από -130 dBc/Hz. Έτσι, όταν είναι κλειδωμένο από μια εξωτερική κοιλότητα laser (ECL) που παρουσιάζει μικρό RIN (<-150 dBc/Hz), η κατώτατη τιμή του RIN του κλειδωμένου Fabry-Pérot μειώνεται κάτω από τα -140 dBc/Hz. Αυτό αντιστοιχεί σε μείωση του θορύβου πάνω από 10 dB. Παρατηρείται, λοιπόν, ότι όσο μεγαλύτερη είναι η τιμή έγχυσης, μικραίνει το όριο του RIN που δημιουργείται όπως και το μέγιστο RIN. Αυτό σημαίνει ότι σε υψηλή έγχυση έχουμε μικρότερο RIN και μεγαλύτερο ρυθμό δεδομένων και ότι η χρήση της κλειδωμένης έγχυσης είναι σαφώς καλύτερη από την ελεύθερη λειτουργία, ανεξαρτήτως τιμής έγχυσης ισχύος.

	Μέγιστο RIN	Όριο RIN
Ελεύθερη λειτουργία	≈ -122 dB	≈ -132 dB
-20 dB έγχυση ισχύος	≈ -110 dB	≈ -143 dB
-15 dB έγχυση ισχύος	≈ -125 dB	≈ -143 dB
-10 dB έγχυση ισχύος	≈ -138 dB	≈ -143 dB
0 dB έγχυση ισχύος	≈ -142 dB	≈ -150 dB

Πίνακας 9.1: *Relative intensity noise του κλειδωμένου Fabry-Pérot για διαφορετικές τιμές εγχυμένης ισχύος*

Ένα άλλο σημαντικό σημείο που βγαίνει από τις μετρήσεις RIN είναι η ενίσχυση της ταλάντωσης χαλάρωσης (RO) της συχνότητας του Fabry-Pérot σε καθεστώς κλειδωμένης έγχυσης. Σε ελεύθερη λειτουργία το πολωμένο Fabry-Pérot στα 50 mA έχει συχνότητα RO μόνο 3 GHz. Αλλά σε καθεστώς κλειδώματος με μια ισχύς έγχυσης των -10 dBm, η συχνότητα RO της κλειδωμένης έγχυσης με Fabry-Pérot βελτιώνεται μέχρι και 20 GHz, η οποία αντιστοιχεί σε μια αύξηση πάνω από 6 φορές από την αρχική συχνότητα. Επιπλέον, η κορυφή της RO εξασθενεί όταν η ισχύς της έγχυσης αυξάνεται. Και οι δύο από αυτές τις ιδιότητες της κλειδωμένης έγχυσης είναι πλεονεκτήματα για την άμεση διαμόρφωση της κλειδωμένης έγχυσης με Fabry-Pérot με υψηλό ρυθμό δεδομένων.

9.1.2 Συχνότητα Roll-off

Παρόλο που η συχνότητα RO ενισχύεται έντονα από την κλειδωμένη έγχυση, το ηλεκτρικό εύρος ζώνης της κλειδωμένης έγχυσης με Fabry-Pérot εξακολουθεί να περιορίζεται από την χαμηλή συχνότητα roll-off, η οποία προκαλείται από τις παρασιτικές επιδράσεις. Ένας τρόπος για τη βελτίωση της συχνότητας roll-off είναι να αυξηθεί η πυκνότητα των φωτονίων της κλειδωμένης έγχυσης με Fabry-Pérot με την αύξηση της τάσης του ρεύματος. Ωστόσο, το εύρος ζώνης κλειδώματος μειώνεται υπό αυτές τις συνθήκες κάτι που δεν είναι επιθυμητό.

Όσον αφορά τη διαμόρφωση απόκρισης του Fabry-Pérot σε καθεστώς ελεύθερης λειτουργίας και σε καθεστώς κλειδωμένης έγχυσης, στο καθεστώς κλειδωμένης έγχυσης, λόγω του roll-off, η διαμόρφωση απόκρισης πάσχει από ισχυρή απόσβεση. Κατά συνέπεια, το ηλεκτρικό εύρος ζώνης των -3 dB της κλειδωμένης έγχυσης του Fabry-Pérot μειώνεται περίπου στα 2 GHz. Επιπλέον, η απόσβεση της απόκρισης της διαμόρφωσης είναι ισχυρότερη όταν αυξάνεται η ισχύς της έγχυσης, ενώ σε μικρότερες τιμές έγχυσης υπάρχει μια ομαλότητα στην απόσβεση.

9.1.3 Παράγοντας ενίσχυσης linewidth (linewidth enhancement factor)

Τα πειραματικά αποτελέσματα δείχνουν ότι η LEF της κλειδωμένης έγχυσης του Fabry-Pérot είναι σχεδόν σταθερή ως συνάρτηση της συχνότητας διαμόρφωσης. Αυτό είναι τελείως διαφορετικό σε σύγκριση με μια τυπική καμπύλη της ελεύθερης λειτουργίας laser μονού τρόπου που συνήθως αυξάνει στο τμήμα χαμηλής συχνότητας. Η LEF μειώνεται όταν η εγχεόμενη ισχύς αυξάνεται. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι η αύξηση της εγχεόμενης ισχύος προκαλεί μείωση της πυκνότητας των φερόντων. Ωστόσο, για μία πιο υψηλή ισχύ έγχυσης, η LEF αυξάνεται με ταχείς ρυθμούς, το οποίο πιθανόν να προκαλείται από τον κορεσμό του κέρδους.

Εγγεόμενη Ισχύς	Τιμή LEF
-9	4.5
-6	2
-3	≈ 1.5
0	≈ 2.5
3	≈ 7.5

Πίνακας 9.2: Ηεξάρτηση της LEF από την ισχύ της έγχυσης

9.1.4 Επιπτώσεις της εγγεόμενης ισχύος

Μία από τις σημαντικότερες παραμέτρους ενός οπτικού πομπού που χρησιμοποιείται για τη μετάδοση υψηλών ταχυτήτων είναι ο λόγος απόσβεσης (ER). Το ER αυξάνεται όταν αυξάνεται και η ισχύς της έγχυσης. Το υποβαθμισμένο ER είναι πιο σημαντικό από την ισχυρή έγχυση. Έτσι, η ευαισθησία του δέκτη υποβαθμίζεται όταν αυξάνεται η έγχυση ισχύος. Ως εκ τούτου, σε υψηλή έγχυση ισχύος, ένα μεγάλο εύρος ζώνης κλειδώματος επιτυγχάνεται, αλλά σε βάρος του ER.

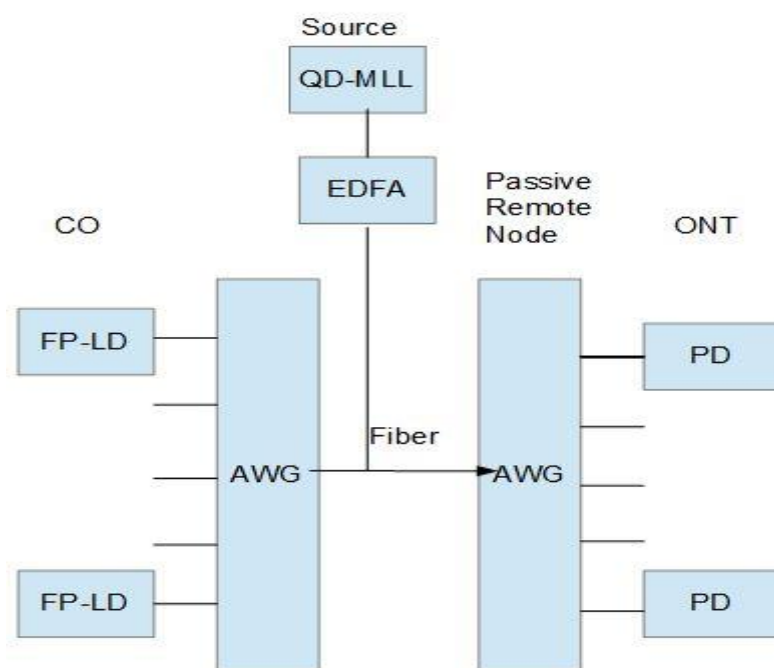
9.2 Κλειδωμένη έγχυση των Fabry-Pérot με QD-MLL [44]

Η πρακτική εφαρμογή του, σε δίκτυο πρόσβασης απαιτεί μια κύρια πηγή χαμηλού κόστους, η οποία είναι δύσκολο να επιτευχθεί για ρυθμιζόμενα lasers. Όπως αναφέρθηκε, η κλειδωμένη έγχυση του Fabry-Pérot, βασίζεται στις φασματικές «φέτες» του BLS, αλλά οι αποδόσεις αυτής της λύσης περιορίζονται στα 1,25 Gbps λόγω της υψηλής έντασης θορύβου.

Για αυτό έχει γίνει πείραμα, με ένα σύστημα πρόσβασης WDM με χρήση κλειδωμένης έγχυσης του Fabry-Pérot στα 2,5 Gbps με τη χρήση ενός νέου πολλαπλού μήκους κύματος της master πηγής που βασίζεται στο Quantum-Dash Mode-Locked Laser. Μια απλοποιημένη αρχιτεκτονική του συστήματος περιγράφεται στο σχήμα 9.4.

Τα Fabry-Pérot που ενεργούν ως άχρωμοι πομποί κλειδώνονται από μια κοινή master πηγή που αποτελείται από ένα ενισχυμένο QD-MLL. Η «χτένα» του QD-

MLL, το φάσμα του δηλαδή, πρέπει να ταιριάζει στα κανάλια της διατάξεως κυματοδηγού σχάρας (AWG). Έτσι, κάθε τρόπος του QD-MLL που επιλέγεται από ένα AWG εγχέεται σε ένα Fabry-Pérot. Το QD-MLL ενισχύεται από ένα EDFA, προκειμένου να φτάσει σε μία επαρκή ισχύς για κάθε τρόπο και να επιτευχθεί η κλειδωμένη έγχυση. Σύμφωνα με την έγχυση, τα Fabry-Pérot κλειδώνονται στα αντίστοιχα εγχεόμενα σήματα και οι μονότροπες λειτουργίες των Fabry-Pérot επιτυγχάνονται. Τα Fabry-Pérot στη συνέχεια διαμορφώνονται απευθείας από μία ηλεκτρική ακολουθία. Τα σήματα εξόδου των Fabry-Pérot πολυπλέκονται μέσω του πρώτου AWG στο CO πριν από την διάδοση πάνω σε οπτική ίνα 25 χιλιομέτρων. Έπειτα, τα σήματα πολυπλέκονται μέσω του δεύτερου AWG στον παθητικό απομακρυσμένο κόμβο προτού ανιχνευτεί από φωτοδιόδους (PD) στους δέκτες του οπτικού δικτύου. Το οπτικό φάσμα του QD-MLL ενεργεί ως πολλαπλού μήκους κύματος master πηγή για την κλειδωμένη έγχυση των Fabry-Pérot.



Σχήμα 9.4: Απλοποιημένη αρχιτεκτονική του συστήματος πρόσβασης WDM με χρήση κλειδωμένης έγχυσης με Fabry-Pérot και QD-MLL

Το laser είναι κλειδωμένο στον τρόπο των 42,7 GHz, που αντιστοιχεί στην ελεύθερη φασματική περιοχή (FSR). Ως εκ τούτου, χρησιμοποιούνται συντονίσιμα AWG στο πείραμα, για να χωρέσει τη «χτένα» του QD-MLL με τα κανάλια. Ωστόσο,

η υλοποίηση του QD-MLL έχοντας μια «χτένα» συμβατή με τυποποιημένα τα κανάλια WDM είναι δυνατή. Το ευρύ και επίπεδο φάσμα του QD-MLL δείχνει τις υψηλές δυνατότητες του για πολλαπλά μήκη κύματος της master πηγής προκειμένου να υποστηρίξει ένα μεγάλο αριθμό των καναλιών WDM. Επίσης, ένα χαμηλό επίπεδο ASE παρατηρείται λόγω της αναλογίας της μικρής αυθόρμητης εκπομπής του υλικού του quantum-dash. Έτσι, το QD-MLL έχει χαμηλή ένταση θορύβου.

Μια έγχυση του Fabry-Pérot έχει κλειδωθεί από έναν τρόπο του QD-ML, είναι άκρως συνεκτικό και έχει SMSR μεγαλύτερο από 30 dB (έτσι μπορεί να θεωρηθεί ως μονότροπο).

Λόγω της πολύ χαμηλής έντασης του θορύβου του QD-MLL, το επίπεδο RIN είναι ακόμη χαμηλότερο από -150 dBc/Hz. Ωστόσο, λόγω του θορύβου λειτουργίας κατάτμησης (MPN), ο RIN αυξάνεται έντονα, κυρίως για τις χαμηλές συχνότητες, όταν επιλέγεται μόνο ένας τρόπος φιλτραρίσματος. Ωστόσο, χάρη στον μηχανισμό κλειδωμένης έγχυσης το MPN καταστέλλεται όταν ένας τρόπος εγχέεται στο Fabry-Pérot. Το επίπεδο του RIN της έγχυσης του QD-MLL μειώνεται σε -135 dBc/Hz για τα -6 dBm της εγχεόμενης ισχύος.

Τέλος, αξιολογήθηκαν οι αποδόσεις 5 καναλιών μεταξύ των 16 καναλιών του WDM που λαμβάνονται με κλειδωμένη έγχυση του Fabry-Pérot, χρησιμοποιώντας μία master πηγή πολλαπλών μηκών κύματος με βάση το QD-MLL για πρόσβαση σε WDM. Μια αμελητέα ποινή ισχύος παρατηρείται για μετάδοση πάνω των 25 χιλιομέτρων. Η ευαισθησία του δέκτη στα BER των 10^{-9} κυμαίνεται από -32 dBm έως -31 dBm. Αυτή η μικρή μεταβολή οφείλεται στην μικρή διαφορά των συνθηκών έγχυσης μεταξύ των καναλιών (έγχυση ισχύος, αποσυντονισμός). Έτσι διατηρείται μια καλή ομοιογένεια.

9.3 WDM-PON δίκτυα και κλειδωμένη έγχυση στα Fabry-Pérot

9.3.1 Δίκτυο WDM-PON με χρήση κλειδωμένης έγχυσης στα Fabry-Pérot Laser Diode [25]

Το WDM-PON έχει αποδειχθεί ως η απόλυτη broadband πρόσβαση δικτύου αλλά και διαχρονική αφού εγγυάται μεγάλο εύρος ζώνης, υψηλή ασφάλεια, εύκολη αναβάθμιση και διαφάνεια πρωτοκόλλου. Έχουν προταθεί αρκετοί τύποι του WDM-

PON για να λυθούν τα προβλήματα, όπως πηγές φωτός LED με ενισχυμένη αυθόρμητη εκπομπή (ASE), διότι το φάσμα του LED είναι ανεπαρκές ή θα πρέπει να χρησιμοποιηθεί ακριβός διαμορφωτής σε συνεργασία με την ASE. Πρόσφατες μελέτες, έχουν προτείνει την τεχνολογία κλειδωμένης έγχυσης στο μήκος κύματος σε laser τύπου Fabry-Pérot, καθώς είναι η πιο οικονομική πηγή και έχει «άχρωμη» λειτουργία, δηλαδή η λειτουργία είναι ανεξάρτητη από το μήκος κύματος. Αυτή η έγχυση αναγκάζει το laser να λειτουργήσει σε έναν σχεδόν μονό τρόπο και εν μέρει καταστέλλει τον θόρυβο λειτουργίας.

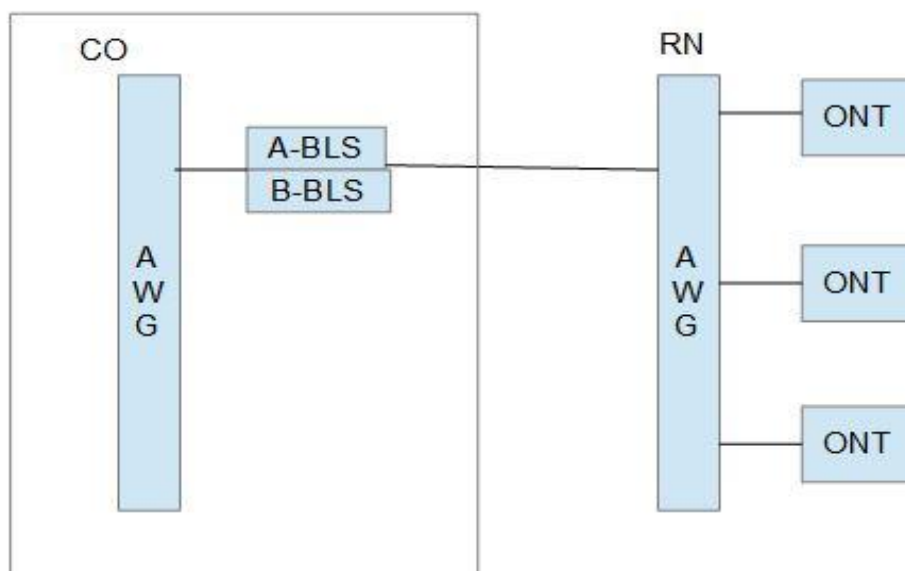
Παρά τα πλεονεκτήματα που παρουσιάζει το WDM-PON υπάρχουν προβλήματα όπως το υψηλό κόστος, η διαχείριση και η καταγραφή των προβλημάτων που σχετίζονται με τις πηγές, το μήκος κύματος μεταξύ των συσκευών που πρέπει να ταιριάζουν και οι αλλαγές του περιβάλλοντος σε σχέση με τις οπτικές πηγές. Αυτό μπορεί να λυθεί με ένα ONT χαμηλού κόστους, που λειτουργεί ανεξάρτητα με το μήκος κύματος. Δηλαδή ένας συγκεκριμένος μόνο τύπος ONT μπορεί να χρησιμοποιηθεί ανά συνδρομητή, το οποίο ονομάζεται «άχρωμο ONT» (colorless ONT). Μία ανεξάρτητη από τη θερμοκρασία AWG συσκευή μπορεί να χρησιμοποιηθεί ώστε να λύσει το πρόβλημα της αντιστοίχισης μεταξύ των δύο αυτών συσκευών.

Ας δούμε ένα παράδειγμα υλοποίησης του WDM-PON με την τεχνολογία έγχυσης του μήκους κύματος. Το OLT αποτελείται από δύο BLS, ένα AWG στους οπτικούς μεταδότες στο CO και την ίνα διανομής που καταλήγει σε αυτό. Στην άλλη πλευρά της οπτικής ίνας το AWG βρίσκεται στο RN, στο οποίο διακλαδίζεται η ίνα διανομής προς τους συνδρομητές. Πρόκειται για μία point-to-multipoint αρχιτεκτονική που υποστηρίζει point-to-point συνδεσιμότητα με δύο μήκη κύματος για κάθε συνδρομητή. Το BLS που αναφέρεται είναι ένα από τα κύρια στοιχεία του δικτύου με χαμηλό θόρυβο και αποτελείται από δύο Fabry-Pérot με τη χρήση της έγχυσης στο πεδίο του μήκους κύματος και ενισχύεται με τυχαία εκπομπή.

Για την upstream μετάδοση χρησιμοποιείται η A-band και η μετάδοση από τον χρήστη γίνεται μέσω της ίνας διανομής και περνά από το AWG, που βρίσκεται στο RN. Τα φασματικά «κομμάτια» ή «φέτες» του μεταδιδόμενου φωτός εγχέονται στο Fabry-Pérot που βρίσκεται στον χώρο του χρήστη. Οι έξοδοι των Fabry-Pérot διαδίδονται στην upstream κατεύθυνση και πολυπλέκονται μεταξύ τους στο πεδίο του μήκους κύματος στον AWG που βρίσκεται στο RN. Τα πολυπλεγμένα σήματα

διαβιβάζονται στο OLT μέσω της ίνας διανομής. Έπειτα, τα πολυπλεγμένα σήματα αποπολυπλέκονται από το AWG, που βρίσκεται στο OLT και λαμβάνονται από τον οπτικό δέκτη. Η B-band χρησιμοποιείται στο CO για την downstream μετάδοση. Οι φασματικές «φέτες» της B-band περνούν από το AWG που βρίσκεται στο OLT και εγχέεται στο Fabry-Pérot. Αντίστοιχα με την upstream μετάδοση, τα πολυπλεγμένα σήματα περνούν από την ίνα διανομής και αποπολυπλέκονται από το AWG που βρίσκεται στο RN. Ο οπτικός δέκτης του χρήστη λαμβάνει τα downstream δεδομένα. Οι A-band και B-band διαχωρίζονται από πολλαπλάσια του FSR του AWG. Έτσι υπάρχει μία συγχωνευμένη πολυπλεξία και αποπολυπλεξία σε ένα AWG. Πρέπει να σημειωθεί, ότι το μήκος κύματος καθορίζεται από την θύρα εξόδου του AWG αντί του ίδιου του laser. Τότε το Fabry-Pérot λειτουργεί σαν διαμορφωτής ευρείας ζώνης με ένα κέρδος.

Τέλος για τον πομποδέκτη των A-band και B-band, χρειάζεται ένας διπλέκτης στο OLT και στο ONT αφού για την μετάδοση χρησιμοποιείται μία ίνα. Για να είναι οικονομικός ο διπλέκτης, πρέπει να χρησιμοποιηθεί ένα ποσό ικανό μεταξύ των ζωνών για upstream και downstream μεταδόσεων.



Σχήμα 9.5: Δίκτυο WDM-PON που βασίζεται σε έγχυση του μήκους κύματος με χρήση Fabry-Pérot

9.3.2 Οπτική καταστολή θορύβου με χρήση RSOA για δίκτυα WDM/SCM-PON

[19]

Πρόκειται για πείραμα με χρήση RSOA, για να δημιουργηθεί ένα σύστημα τύπου WDM/SCM. Στα συστήματα SCM ο θόρυβος OBI είναι ο πιο κυρίαρχος παράγοντας για την υποβάθμιση της απόδοσης του συστήματος. Στα RSOA με βάση το WDM / SCM-PON, οι θόρυβοι OBI δημιουργούνται στην εμβέλεια των χαμηλών συχνοτήτων και στην περιοχή των συχνοτήτων των υποφερόντων σημάτων. Αυτοί οι θόρυβοι επηρεάζουν αρνητικά τους δείκτες απόδοσης του συστήματος, όπως το SNR και το BER.

Ένα σύστημα με χρήση κλειδωμένης έγχυσης με Fabry-Pérot με τις ιδιότητες φίλτρου διέλευσης υψηλών συχνοτήτων (HPF) στο CO έχει σκοπό τη μείωση του θορύβου OBI.

Η λειτουργία έχει ως εξής: Το διαμορφωμένο φως από το υποφέρον του RSOA στο ONT, μεταδίδεται ξανά στο CO, έπειτα το οπτικό σήμα εγχέεται στο RSOA στο ONT. Σε γενικές γραμμές, το απευθείας διαμορφωμένο φως από το υποφέρον σήμα αποτελείται από το οπτικό φέρον και διπλούς πλευρικούς λοβούς. οι θόρυβοι OBI των χαμηλών συχνοτήτων και αυτοί που είναι γύρω από το υποφέρον σήμα δημιουργούνται μετά τη διαμόρφωση του φωτός από τα ONT, οι οποίοι ανιχνεύονται από τον φωτο-ανιχνευτή στο CO. Το πρώτο συμβαίνει λόγω των παρεμβολών μεταξύ των οπτικών φορέων και το τελευταίο επίσης λόγω της ίδιας επίδρασης του πρώτου μεταξύ των οπτικών φορέων του οπτικού σήματος από ένα ONT και τους διπλούς πλευρικούς λοβούς από ένα άλλο ONT.

Η αιτία αυτών των θορύβων συμβαίνει διότι τα διαμορφωμένα οπτικά σήματα από διάφορα ONT των χρηστών έχουν το ίδιο μήκος κύματος και γίνονται ασυσχέτιστα, όταν και το μήκος της μετάδοσης σε κάθε ONU από το από splitter και οι διαφορές τους, γίνονται μεγαλύτερες από ό,τι είναι το μήκος συνοχής του DFB (slave laser). Οι θόρυβοι λόγω παρεμβολών μεταξύ αυτών των ασυσχέτιστων πηγών, είναι θόρυβοι OBI τύπου Lorentzian. Έτσι, είναι αναμενόμενο ότι το SNR ή το BER θα υποβαθμιστούν αρκετά από τον θόρυβο OBI, στις χαμηλές συχνότητες και των γύρω υποφερόντων σημάτων. Για την μείωση των θορύβων OBI, γίνεται χρήση κλειδωμένης έγχυσης με Fabry-Pérot στο CO. Αυτό συμβαίνει διότι το οπτικό φέρον και οι διπλοί πλευρικοί λοβοί στο διαμορφωμένο φως μειώνονται μέσω της κλειδωμένης

έγχυσης με το Fabry-Pérot, αναλόγως με τα χαρακτηριστικά του HPF της κλειδωμένης έγχυσης. Ο θόρυβος OBI καταστέλλεται διότι όλοι οπτικοί φορείς μειώνονται, όπως και οι θόρυβοι γύρω από τα υποφέροντα σήματα και η ένταση του υποφέροντος σήματος μειώνεται διότι μειώνονται και διπλοί πλευρικοί λοβοί.

Αντιθέτως, ο λόγος του φέροντος προς τον θόρυβο (CNR) του σήματος υποφέρουσας είναι βελτιωμένος. Αυτό συμβαίνει γιατί ο θόρυβος OBI γύρω από τη συχνότητα του σήματος υποφέροντος αποτελείται από τον θόρυβο του οπτικού φορέα και των παρεμβολών μεταξύ του οπτικού φορέα και των διπλών πλευρικών λοβών.

Τα σήματα RF που ανιχνεύτηκαν από τον φωτο-ανιχνευτή στο CO, για τον έλεγχο της επιρροής το θορύβου OBI, πριν και μετά την εφαρμογή της κλειδωμένης έγχυσης, δείχνουν ότι όσον αφορά το downlink σήμα στα 0.1 GHz από τα -20dBm (μέγιστο) μειώθηκε περίπου στα -40 dBm (μέγιστο).

Επίσης, έχει γίνει και αισθητή η μείωση των θορύβων αφού για απόσταση 10 χιλιομέτρων και ρυθμό μετάδοσης 10 Mbps, εκτός του ότι το φάσμα είναι ελαφρώς πιο στενό, η λαμβανόμενη ισχύς πριν την κλειδωμένη έγχυση φτάνει στα -65 dBm και μεά τη χρήση της κλειδωμένης έγχυσης έχει φτάσει στα -60 dBm.

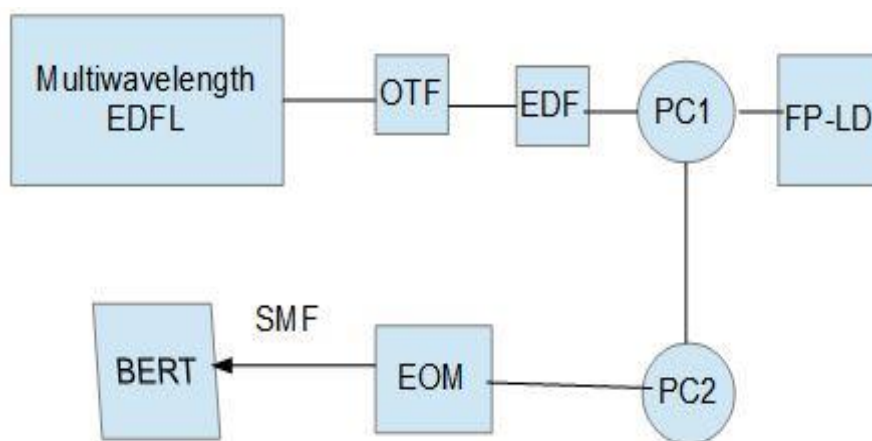
Μαζί με την μείωση του θορύβου OBI επιτεύχθηκε και μείωση του μεγέθους του λάθους (EVM), όπου το μέγιστο EVM σε ελεύθερη λειτουργία είναι 10% ενώ στην κλειδωμένη έγχυση φτάνει το 4%, για το ίδιο ποσό dBm.

9.3.3 Κλειδωμένη έγχυση στα Fabry-Pérot από EDFL σε WDM δίκτυα [41]

Συνήθως χρησιμοποιούνται πηγές πολλαπλών καναλιών CW, ενώ τώρα θα δούμε μία πολυκυματική πηγή όπως είναι το EDFL, που είναι πιο οικονομικό, το οποίο κλειδώνει ένα Fabry-Pérot, σε αρχιτεκτονική WDM. Η πηγή έχει σταθερού μήκους κύματος διάστημα, 0.8 nm και η αρχιτεκτονική φαίνεται στο σχήμα 9.6.

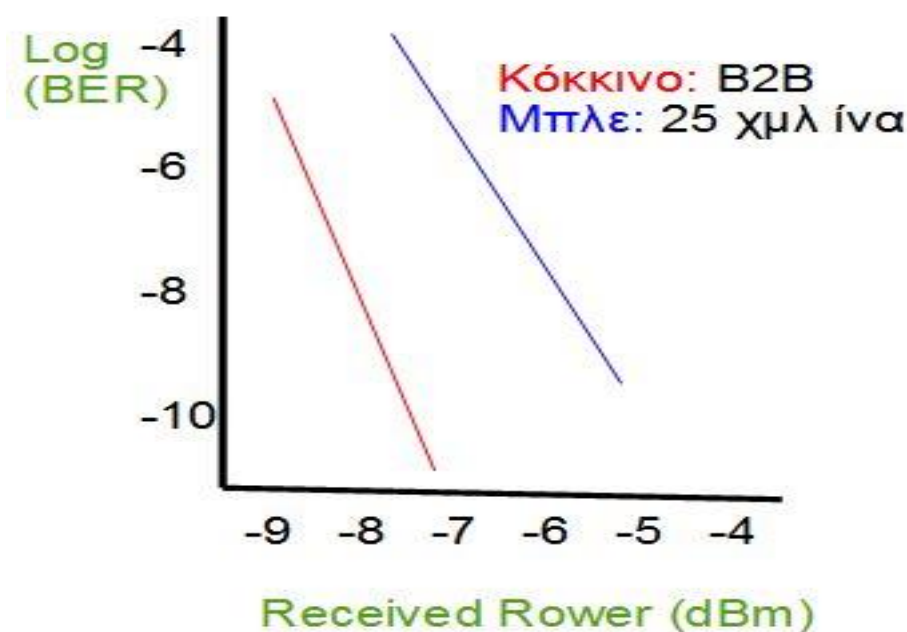
Έχει χρησιμοποιηθεί ένας νέος μηχανισμός ελέγχου αρνητικής ανατροφοδότησης για την εξασφάλιση της σταθερής λειτουργίας του μήκους κύματος. Έχουν επιτευχθεί μέχρι και 28 μήκη κύματος στην λειτουργία του laser με ομοιόμορφη ισχύ εξόδου. Το μετρούμενο 3-dB bandwidth κάθε καναλιού είναι περίπου 0.04 nm. Ένα μήκος κύματος φιλτράρεται από ένα συντονισμό οπτικό φίλτρο (OTF) για ένα ONU ώστε να κλειδώσει το Fabry-Pérot. Ένα EDF και ένας PC χρησιμοποιήθηκαν πριν από το Fabry-Pérot για τη βέλτιστη απόδοση της

κλειδωμένης έγχυσης. Στη συνέχεια, η έξοδος από το Fabry–Pérot διαμορφώθηκε εξωτερικά στα 10Gb/s non-return-to-zero signal με διαμορφωτή MZ. Ένας PC χρησιμοποιήθηκε πριν από το διαμορφωτή για τη βέλτιστη απόδοση της διαμόρφωσης. Το BER μετρήθηκε με τον BER tester μετά από 25 χιλιόμετρα μετάδοσης με SMF.



Σχήμα 9.6: Πειραματική διάταξη με πηγή EDFA

Το σχήμα 9.7 δείχνει το μετρούμενο BER για μεταδόσεις B2B και μετά από 25 χιλιόμετρα μονότροπης ίνας. Όπως φαίνεται, η ποινή ισχύος αυξάνεται περίπου 2.8 dB. Για μεγαλύτερη ίνα μετάδοσης, το επίπεδο BER είναι μεγαλύτερο από 10^{-9} και αυτό οφείλεται κυρίως στην περιορισμένη απόδοση της εξόδου της έγχυσης και στη χρωματική διασπορά. Αυτό μπορεί να βελτιωθεί σημαντικά με τη χρήση πολλαπλών μηκών κύματος EDFA της οποίας τα κανάλια εξόδου τα οποία είναι από single-longitudinal λειτουργίες.



Σχήμα 9.7: Μετάδοση B2B και μετά από 25 χιλιόμετρα μονότροπης ίνας

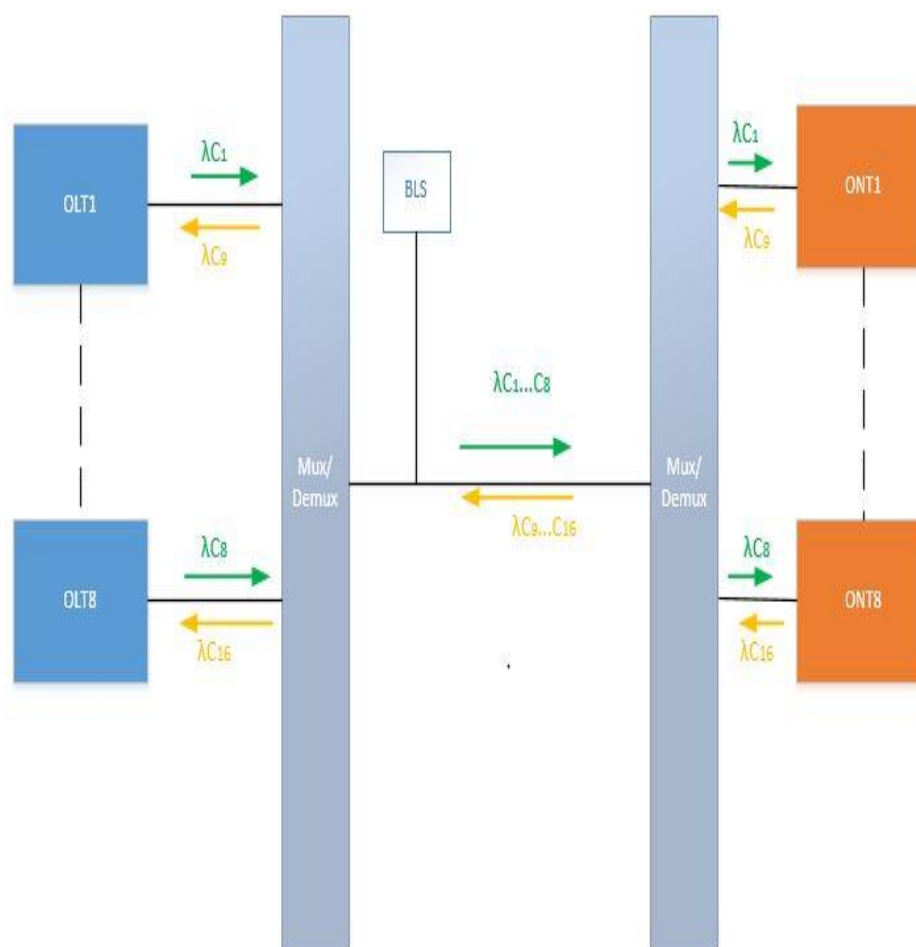
9.3.4 Δοκιμαστικό σύστημα του WDM-PON με κλειδωμένη έγχυση στα Fabry-Pérot [42]

Παρακάτω θα δούμε δοκιμαστικά τεστ που έγιναν από τη Chunghwa Telecommunication Laboratories από τον Δεκέμβριο του 2010 έως τον Ιούνιο του 2011 σε πραγματικό χώρο, για την εξέταση του WDM-PON δικτύου.

Τα chip του εν λόγω Fabry-Pérot έχουν μήκος κοιλότητας 600 μm και αντανακλαστική επίστρωση (AR) 1% στην μπροστινή πλευρά και στη συνέχεια συνδέθηκαν με ένα pigtail. Η ευρυζωνική πηγή φωτός (BLS), με 200 GHz Mux/Demux (πολυπλεξία/αποπολυπλεξία) σχημάτισε την φωτεινή πηγή στενής ζώνης και στη συνέχεια εγχύθηκε στο Fabry-Pérot.

Με εξωτερική έγχυση, η χαμηλής ανακλαστικότητας μπροστινή πλευρά του Fabry-Pérot μπορεί να σχηματίσει ένα σχεδόν μονότροπο laser με SMSR περίπου στα 30 dB. Τα downstream μήκη κύματος είναι από 1533.417 nm έως 1544.430 nm, και τα upstream μήκη κύματος είναι από 1547.819 nm έως 1558.938 nm.

Το σύστημα WDM-PON 8 αμφίδρομων καναλιών με 1 Gbps ρυθμό μετάδοσης φαίνεται στο σχήμα 9.8.



Σχήμα 9.8: Σύστημα WDM-PON 8 αμφίδρομων καναλιών

Από τα 8 κανάλια, τα 1-5 χρησιμοποιήθηκαν σε σύνδεση μέχρι την κατοικία και τα 6-8 χρησιμοποιήθηκαν για τον έλεγχο της απόδοσης του WDM-PON. Η ίνα τροφοδοσίας από το CO προς τους οικιακούς χρήστες ήταν 1,2 χιλιόμετρα.

Η μέγιστη απώλεια από το ONU έως CO ήταν περίπου 10 dB που προκύπτουν από την απώλεια της εισόδου του πολυπλέκτη/αποπολυπλέκτη. Οι τριπλές υπηρεσίες που προσφέρθηκαν ήταν: HD-MOD, Internet (20M/3M), και i-MICE (M: Monitor, I: Information, C: communication, E: Entertainment) smart telephone.

Για την απόδοση του 1 Gbps σχεδιάστηκε ένα πλάνο 8 ασυμπίεστων προγραμμάτων video υψηλής ποιότητας και μαζί με το HD-MOD, το Internet, το i-MICE και τον αναλυτή κίνησης, μεταφέρθηκαν από το CO στους χρήστες ταυτόχρονα.

Το throughput του downstream των 8 ασυμπίεστων προγραμμάτων video που μετρήθηκε σε έναν χρήστη περίπου στα 278 Mbps. Το throughput του downstream και του upstream του αναλυτή κίνησης ήταν 550 Mbps και 888 Mbps αντίστοιχα. Το

συνολικό εύρος ζώνης των downstream και των upstream ανά χρήστη πλησίασε τα 900 Mbps.

Αυτά τα αποτελέσματα δείχνουν ότι με αυτόν τον τρόπο μπορούν να προσφερθούν υπηρεσίες υψηλής ποιότητας με πολύ καλό ρυθμό.

9.3.5 Κλειδωμένη έγχυση σε WDM-PON σε πομπούς FP-LD SFP [18]

Πρόκειται για δοκιμή δικτύου σε υπάρχουσα περιοχή (για την Chunghwa Telecom το 2012) σε σύστημα colorless WDM-PON με χρήση κλειδωμένης έγχυσης σε πομπούς Fabry-Pérot SFP, στις C-/L-band (1535.036 nm-1558.983 nm και 1574.655 nm-1599.208 nm αντίστοιχα) για συμμετρική μετάδοση με ρυθμό 1 Gbps σε σύστημα 16 καναλιών με απόσταση 20 χιλιομέτρων. Για τον σχηματισμό των ONT και OLT, χρησιμοποιήθηκαν τα L-band και C-band στους πομποδέκτες SFP ως πηγές φωτός.

Το mode-spacing είναι 0,52 nm για να εξασφαλιστεί ότι τουλάχιστον ένας τρόπος laser θα μπορεί να ταιριάζει φασματικά με την έγχυση της στενής ζώνης του ASE, ανεξαρτήτως θερμοκρασίας αποσυντονισμού.

Για να εφαρμοστεί το σύστημα WDM-PON ενσωματώθηκε ένας αναλογικός εξοπλισμός για την παροχή πολλαπλών ψηφιακών υπηρεσιών και υποστηρίζεται η ταξινόμηση των υπηρεσιών που βασίζονται σε VLAN, MAC, και 802.1p.

Για τη downstream μετάδοση των video, έγινε μετάδοση ασυμπίεστου video σε υψηλή ανάλυση και υψηλή ροή απομακρυσμένου ελέγχου για την upstream μετάδοση για την δοκιμή σε υψηλά επίπεδα κίνησης δεδομένων. Το throughput των downstream και upstream video μετρήθηκε περίπου στα 200 Mbps και 100 Mbps, αντίστοιχα και των δεδομένων από τον αναλυτή της κυκλοφορίας στα 750 Mbps και 850 Mbps για downstream και upstream αντίστοιχα. Το αποτέλεσμα δείχνει ότι το συνολικό downstream και upstream εύρος ζώνης που συνδυάζει βίντεο και μετάδοση δεδομένων πλησιάζουν τα 950 Mbps, και το throughput μόνο την κίνηση δεδομένων είναι 980 Mbps.

Με βάση αυτά, αποδεικνύεται ότι είναι ένα απλό, οικονομικά αποδοτικό, και προσφέρεται υψηλό εύρος ζώνης σε δίκτυο πρόσβασης και ότι η τεχνολογία κλειδωμένης έγχυσης Fabry-Pérot με SFP πομποδέκτες μπορούν να είναι μαζική παραγωγή, χαμηλού κόστους, και ώριμη για να χρησιμοποιηθεί σε WDM-PON συστήματα.

9.3.6 VPN σε WDM-PON δίκτυα με χρήση κλειδωμένης έγχυσης στα Fabry-Pérot [34]

Παρακάτω γίνεται μια παρουσίαση επαναδιαμόρφωσης ενός VPN δικτύου σε καθαρά οπτικό δίκτυο, για παροχή on-demand υπηρεσιών με αφιερωμένες οπτικές συνδέσεις σε λίγους τελικούς χρήστες. Ωστε να απελευθερωθεί η χωρητικότητα του CO και να γίνει πλήρη χρήση του εύρους ζώνης στο CO.

Το πλήρες οπτικό VPN σε WDM-PON δίκτυο, γίνεται με πρόσθετο εξοπλισμό στο RN, ONT ή/και OLTs. Η επικοινωνία μεταξύ των ONT και του RN επιτυγχάνεται με τη χρήση ενός συζεύκτη αστεριού. Ωστόσο, η δομή είναι πολύπλοκη και ισχύει μόνο για στατικά δίκτυα. Επιπλέον, αν και οι εικονικές συνδέσεις έχουν δείξει ότι είναι σε θέση να καθοριστούν με ειδικούς οπτικούς πομποδέκτες στα ONT, η προσθήκη μερικώς ανακλαστικών φίλτρων κάνουν αυτή την αρχιτεκτονική μη ελκυστική στην πράξη.

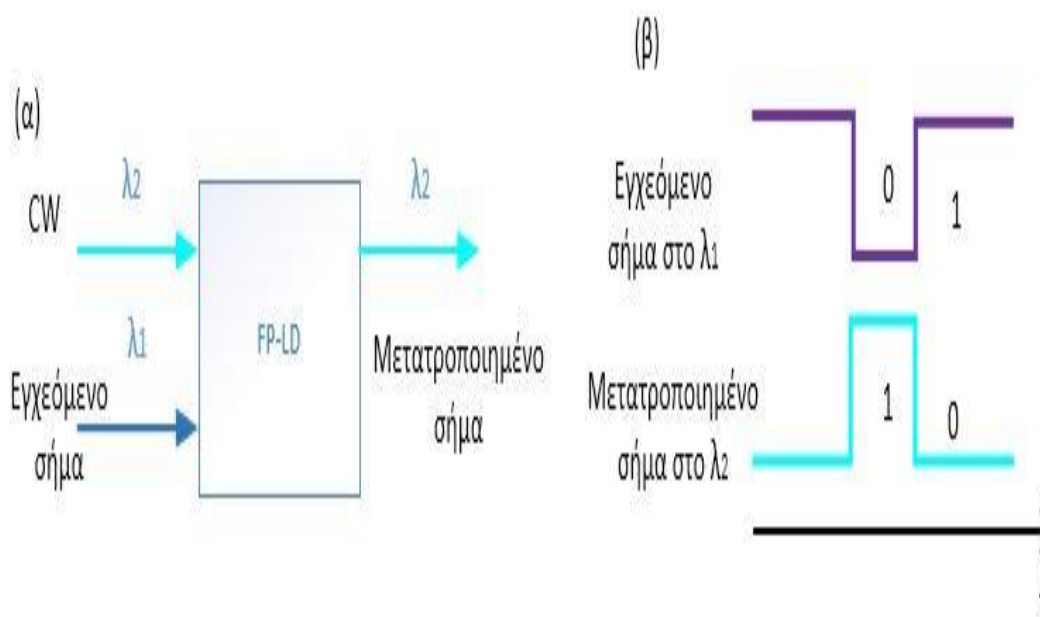
Μια οπτική εικονική σύνδεση πραγματοποιείται με τη χρήση της μετατροπής του μήκους κύματος από έναν ημιαγωγό οπτικού ενισχυτή (SOA) στο OLT που απαιτεί υψηλή ισχύ εισόδου, αφού η μετατροπή του μήκους κύματος βασίζεται στο φαινόμενο της μη γραμμικής επίδρασης του SOA, καταλήγοντας έτσι σε ένα σύστημα κατανάλωσης υψηλής ισχύος που είναι ανεπιθύμητο στα PON δίκτυα.

Έτσι, το επαναδιαμορφωμένο οπτικό VPN βασίζεται στη χρήση κλειδωμένης έγχυσης με Fabry-Pérot laser στο CO του ενός WDM-PON. Το upstream οπτικό VPN σήμα από την πηγή ONT μετατρέπεται με την κλειδωμένη έγχυση στο OLT σε διαφορετικό μήκος κύματος και στη συνέχεια διαβιβάζεται στο ONT. Σε σύγκριση με συστήματα VPN που έχουν πρόσθετα εξαρτήματα τοποθετημένα στο RN, στο εν λόγω VPN τοποθετούνται στο OLT για να είναι συμβατό με το πρότυπο του PON, αλλά θα υποφέρει περισσότερο από απώλειες κατά τη μετάδοση στην τροφοδοτική ίνα. Η κλειδωμένη έγχυση βασίζεται στην μετατροπή του μήκους κύματος χρησιμοποιώντας ένα Fabry-Pérot laser που απαιτεί χαμηλότερη κατανάλωση έγχυσης ενέργειας από το ONT, σε σχέση με αυτή που απαιτείται από ένα SOA. Επιπλέον, αυτή η αρχιτεκτονική VPN είναι μετατρέψιμη, λόγω της πολύτροπης φύσης του Fabry-Pérot laser.

Η αρχή της μετατροπής του μήκους κύματος που βασίζεται στην αμοιβαία κλειδωμένη έγχυση στο Fabry-Pérot όπως απεικονίζεται στο σχήμα 9.9. Στο 9.9 (α), το οπτικό σήμα σε μήκος κύματος λ_1 από την ONU πηγή και του συνεχούς κύματος

(CW) σε μήκος κύματος λ_2 , εγχέονται στο Fabry-Pérot ταυτόχρονα. Τα μήκη κύματος των δύο σημάτων είναι εντός των περιοχών κλειδώματος δύο διαφορετικών τρόπων εκπομπής του Fabry-Pérot αντίστοιχα. Το σχήμα 9.9 (β) δείχνει τις ακολουθίες των bit εισόδου και εξόδου του Fabry-Pérot.

Όταν το εγχεόμενο σήμα λ_1 είναι χαμηλό, που αντιστοιχεί στο bit "0", το εγχεόμενο φως συνεχούς κύματος λ_2 θα το κλειδώσει με το Fabry-Pérot στον τρόπο του λ_2 και θα καταστείλει όλους τους άλλους τρόπους. Η μετατροπή του bit εξόδου λ_2 θα είναι «1». Εάν το εγχεόμενο σήμα λ_1 είναι υψηλό, που αντιστοιχεί στο bit "1", το φως του λ_1 θα κλειδωθεί στο Fabry-Pérot και θα κατασταλούν το λ_2 και οι υπόλοιποι τρόποι. Το bit εξόδου σε λ_2 θα είναι «0». Έτσι, η αλληλουχία bit εξόδου στην λ_2 θα είναι η αναστροφή της ακολουθίας δυαδικών ψηφίων εισόδου σε λ_1 .



Σχήμα 9.9: Αμοιβαία κλειδωμένη έγχυση στο Fabry-Pérot laser (α) συνεχές κύμα και εγχεόμενο σήμα (β) Είσοδος και έξοδος της ακολουθίας των bits

9.4 Σύστημα DWDM-PON και χρήση κλειδωμένης έγχυσης με laser Fabry Pérot [20]

9.4.1 DWDM-PON με χρήση OOK και κλειδωμένη έγχυση Fabry-Pérot Laser

Αυτό το σύστημα χρησιμοποιεί ένα laser Fabry-Pérot στο ONU, όπου η ένταση διαμορφωμένου καναλιού στο downstream μήκος κύματος αξιοποιείται μερικώς για την downstream λήψη δεδομένων, ενώ η υπόλοιπη ισχύς του μήκους κύματος αποστέλλεται στο laser Fabry-Pérot για κλειδωμένη έγχυση. Η τεχνική κλειδωμένης έγχυσης χρησιμοποιείται για τη βελτίωση του SMSR του πολύτροπου laser. Αυτό είναι σημαντικό για τις εφαρμογές του DWDM όπου αποστάσεις του καναλιού θα μπορούσαν να είναι πολύ χαμηλές, για παράδειγμα στα 50 GHz.

Εάν το extinction ratio του εγχεόμενου σήματος είναι πάνω από ένα ορισμένο όριο, η κλειδωμένη έγχυση του Fabry-Pérot laser θα εκπέμπει στο ίδιο μήκος κύματος με το downstream σήμα, με το αρχικό περιεχόμενο των δεδομένων να περιορίζεται σε μεγάλο βαθμό.

Αυτή η ρύθμιση χρησιμοποιεί δύο ίνες για upstream και downstream μεταδόσεις, η οποία δεν είναι οικονομική για τους παρόχους του δικτύου. Επίσης, ένας in-line EDFA θα πρέπει να χρησιμοποιείται για την downstream μετάδοση πάνω από 50 χιλιόμετρα, κάτι που καθιστά την εγκατάσταση όχι εντελώς παθητική. Τέλος, το extinction ratio της ισχύος του downstream σήματος πρέπει να ελέγχεται προσεκτικά ώστε να αποφευχθούν οι αλληλοπαρεμβολές μεταξύ των εγχεόμενων και εκπεμπόντων σημάτων.

9.4.2 DWDM-PON με χρήση DPSK και κλειδωμένη έγχυση Fabry-Pérot Laser

Πρόκειται για μία αναβάθμιση του προηγούμενου συστήματος, που απαιτούσε υψηλή εγχεόμενη ισχύ και θυσιάζει το extinction ratio των downstream δεδομένων για τη μείωση του crosstalk (αλληλοπαρεμβολή) που συμβαίνουν στο upstream σήμα. Η χρήση του DPSK στην κλειδωμένη έγχυση έχει πολλά πλεονεκτήματα έναντι αυτής το OOK σε laser Fabry-Pérot. Ένας διαμορφωτής DPSK κοστίζει συνήθως λιγότερο από ένα διαμορφωτή OOK. Επίσης, η συνεχής ένταση της φύσης του DPSK μειώνει τις μη γραμμικές επιδράσεις που παρουσιάζονται κατά τη μετάδοση. Το

σημαντικότερο, είναι ότι το DPSK διαμορφωμένο downstream σήμα μπορεί να ελέγχεται για να καταστείλει ουσιαστικά το crosstalk μεταξύ των upstream και downstream δεδομένων κατά τη διάρκεια της διαδικασίας της κλειδωμένης έγχυσης.

Αυτή η ρύθμιση χρησιμοποιεί δύο ίνες για upstream και downstream μεταδόσεις. Χρησιμοποιεί επίσης, πρόσθετη διασπορά αντιστάθμισης ινών, η οποία είναι ακριβό. Επιπλέον, η απόδοση της αποδιαμόρφωσης DPSK πρέπει να είναι πολύ σταθερή στο ONT.

9.4.3 DWDM-PON με χρήση ASE και κλειδωμένη έγχυση Fabry-Pérot Laser

Ο θόρυβος του ευρυζωνικού ASE που παράγεται από ένα EDFA, είναι το φάσμα κομμένο σε «φέτες» που χρησιμοποιείται από ένα AWG στο OLT. Οι στενές πηγές ASE χρησιμοποιούνται για την κλειδωμένη έγχυση των laser Fabry-Pérot. Η διαδικασία κλειδωμένης έγχυσης επιτρέπει το laser να λειτουργεί σε έναν μόνο διαμήκη τρόπο. Αυτό επιτρέπει μεγαλύτερη μετάδοση απόστασης όσο το SMSR του laser αυξάνεται από 2,4 dB έως 29 dB. Τα laser Fabry-Pérot είναι άμεσα διαμορφωμένα στα 155 Mbps και η μετάδοση γίνεται μέσω ίνας NDSF 120 χιλιομέτρων. Το κύριο πρόβλημα της κλειδωμένης έγχυσης με ASE είναι ο περιορισμός του εύρους ζώνης λόγω του μεγάλου φασματικού πλάτους των διαμορφωμένων σημάτων. Το κύριο πλεονέκτημα αυτής της τεχνικής είναι η σταθερότητα του συστήματος στη θερμοκρασία.

10. Συμπεράσματα

Οι περισσότερες μελέτες έχουν γίνει πάνω στη χρήση του Fabry-Pérot ως slave laser, λόγω της ισχύος του, του κόστους του αλλά και της τελικής απόδοσής του. Σε πολλές περιπτώσεις το Fabry-Pérot παρέχει καλές υπηρεσίες, αλλά επειδή παράγει ένα σχετικά ευρύ φασματικό εύρος στην ελεύθερη λειτουργία, δεν θεωρείται κατάλληλο για εφαρμογές οι οποίες απαιτούν μεγάλες αποστάσεις μεταδόσεων, συνεκτική λήψη, ή πολυπλεξία μήκους κύματος. Υπάρχουν διάφορες μέθοδοι για την επιλογή μίας συχνότητας. Μία από αυτές είναι η πρόσφατη, σε οπτικά συστήματα, χρήση της τεχνολογίας της κλειδωμένης έγχυσης που έχει δείξει πολύ καλά αποτελέσματα, τόσο σε προσομοιώσεις, όσο και σε πειραματικά ή πραγματικά δίκτυα.

Αυτό που ενδιαφέρει και τελικά έχει συγκριθεί, είναι τα αποτελέσματα των laser όταν εκπέμπουν αυτόνομα και όταν «καθοδηγούνται» από ένα άλλο, το master. Στη δεύτερη περίπτωση ήταν σαφώς πολύ καλύτερες οι επιδόσεις, καθώς το φάσμα στο πεδίου του μήκους κύματος μίκρυνε, άρα και οι τρόποι του laser, δηλαδή διαφορετικές ταχύτητες για κάθε μήκος κύματος, καθώς είναι γνωστό ότι όταν η πηγή έχει μεγάλο φασματικό εύρος, εμφανίζεται μεγάλη χρωματική διασπορά.

Σαν master lasers χρησιμοποιούνται κυρίως μονοτροπικά lasers, εκτός και αν, όπως είδαμε, σε πολυτροπικό laser επιλεγεί μέσω φίλτρων ένα μόνο μήκος κύματος για να κλειδώσει ένα πολύτροπο.

Οι συνολικές αποδόσεις του Fabry-Pérot laser, αποτελούν ένα σημαντικό κίνητρο για την ευρύτερη χρήση του σαν πομπό, ως slave laser, λόγω της βελτίωσης του CNR, των θορύβων OBI και έχει λιγότερες απώλειες. Ως αποτέλεσμα αυτού, είναι η προσφορά υπηρεσιών υψηλής ποιότητας με γρήγορες ταχύτητες.

Πρέπει επίσης να ληφθεί υπ' όψιν, ότι η τεχνολογία κλειδωμένης έγχυσης είναι μια διαδικασία πολύπλοκη όσον αφορά την επιλογή της τιμής της έγχυσης ισχύος, καθώς σε υψηλή τιμή έχουμε κάποια πλεονεκτήματα, όπως μικρό RIN, βελτίωση της roll-off συχνότητας, μεγάλο εύρος ζώνης και μόνο σε απότομη αύξησή της αυξάνεται και η LEF. Αντιθέτως, μια μικρή έγχυση ισχύος προσφέρει υψηλό ρυθμό δεδομένων, μικρό ER και υψηλή LEF. Αρά, για να επιλεγεί η τιμή της έγχυσης ισχύος πρέπει να ζυγιστούν αυτά που χρειάζεται να επιτευχθούν και ποια να θυσιαστούν.

VII. Βιβλιογραφία

- [1]. «Αρχές λειτουργίας και εφαρμογές αισθητήρων οπτικών ινών» του *Διάλεκτου Μιχαήλ-Σάββα*
- [2]. «Οπτικές Επικοινωνίες και οπτικά δίκτυα» του *Δημήτρη Συβρίδη*
- [3]. «Γενικές Ιδιότητες των laser, σύγκριση με συμβατικές πηγές φωτός»
- [4]. «Φυσική των laser» του *Μ. Μπενή*
- [5]. «Συμβολομετρία Fabry–Pérot» του *Γ. Μήτσου*, Εργαστήριο Φυσικής Οπτικής-Οπτοηλεκτρονικής & Laser, τμήμα Φυσικής-Χημείας & T/Y
- [6]. «Συμβολομετρία Fabry–Pérot» του *Δημήτρη Κουζή Λουκά*
- [7]. «Μελέτη και αποτίμηση υβριδικών, ασυρμάτων, οπτικών, ευρυζωνικών δικτύων» του *Παπακυπριανού Νικόλαου*
- [8]. «Σχεδιασμός και Υλοποίηση Πρωτοκόλλου MAC για Παθητικά Οπτικά Δίκτυα GPON», των *Γεωργίου Μαυρογονάτου και Νικόλαου Χατζή*
- [9]. «Δίκτυα πρόσβασης νέας γενιάς, τεχνολογίας WDM PON» των *Αλέξανδρου Ρούστα και Θρασύβουλου Ταμπακάκη*
- [10]. «Πρωτόκολλα προσπέλασης για παθητικά οπτικά δίκτυα» του *Σταματούδη Αντώνιου*
- [11]. «Σχεδιασμός και Ανάπτυξη συστήματος για την τεχνοοικονομική ανάλυση αυτόνομων γνωσιακών συστημάτων (οπτικών δικτύων)» του *Γεώργιου Ψωμαδέλλη*
- [12]. «Σχεδίαση και ψηφιακή χαρτογράφηση μητροπολιτικού δικτύου οπτικών ινών» του *Σάββα Σάββα*
- [13]. «Οπτικές επικοινωνίες και οπτικά δίκτυα» του *Δημήτριου Συβρίδη*
- [14]. «Οπτικήηλεκτρονική» του *Α. Τσιπούρα*
- [15]. «Υλοποίηση Gigabit Ethernet με χρήση οπτικών ινών» των *Λουκάκη Εμμανουήλ και Νιαουνάκη Γεωργίου*
- [16]. «Πειραματική Μελέτη και Αξιολόγηση Ταχύρυθμων Laser Κάθετης Κοιλότητας για Υλοποίηση Οπτικών Διασυνδέσεων σε Υπολογιστικά Συστήματα» της *Ελένης Δ. Κοσμά*
- [17]. «Fiber to the Home ή Fear to the Haul» του *Δημήτρη Φιλίππου*
- [18]. «Demonstration of WDM-PON System Based on Injection-Locked SFP Transceivers» by *Hai-Lin Wang, Gong-Cheng Lin, Sengda Tu, Ching-Sheu Wang, Hsin-Han Liao, Rong-Ruey Lee, Shian-Ming Chen and Jy-Wang Liaw*
- [19]. «Centralized Optical Beat Noise Suppression by Injection Locking in RSOA based WDM/SCM-PON Optical Links» by *Yong-Yuk Won, Hyuk-Choon Kwon and Sang-Kook Han*
- [20]. «Bi-Directional Dense Wavelength Division Multiplexed Systems for broadband access networks» by *Oladeji Akanbi*
- [21]. «WDM PON: Systems and Technologies» by *Ning Cheng and Frank Effenberger*

- [22]. «Injection-locked semiconductor lasers for realization of novel RF photonics components» by *Nazanin Hoghooghi*
- [23]. «Microwave photonics», by *Chi H. Lee*
- [24]. «Dense WDM-PON Based on Wavelength-Locked Fabry-Pérot Laser Diodes» by *Sang-Mook Lee, Ki-Man Choi, Sil-Gu Mun, Jung-Hyung Moon, and Chang-Hee Lee*
- [25]. «WDM-PON experiences in Korea» by *Chang-Hee Lee, Sang-Mook Lee, Ki-Man Choi, Jung-Hyung Moon, Sil-Gu Mun, Ki-Tae Jeong, Jin Hee Kim, and Byoungwhi Kim*
- [26]. «Multi-input injection locking in a single-mode Fabry-Pérot laser for all-optical gates» by *Bikash Nakarmi and Yong Hyub Won*
- [27]. «Distributed Feedback (DFB) Laser Narrow Linewidth, Tunable Diode Lasers for Applications in Industry and Science»
- [28]. «Injection Locking in Distributed Feedback Semiconductor Lasers» by *Rongqing Hui, Alessandro D'Ottavi, Antonio Mecozzi, and Paolo Spano*
- [29]. «Generation of high-quality signals for optical sensing using DFB lasers injection locking» by *L. Thévenaz, D. Alasia, S. Le Floch and J. Troger*
- [30]. «Optical Injection Locking of Vertical Cavity Surface-Emitting Lasers: Digital and Analog Applications» by *Devang Parekh*
- [31]. «A 20-km/60-Gb/s Two-Way PON Based on Directly Modulated Two-Stage Injection-Locked 1.55-μm VCSEL Transmitters and Negative Dispersion Fibers» by *Chengying Ying, Hai-Han Lu, Chung-Yi Li, Chun-Yu Lin, Che-Yu Lin and Peng-Chun Peng*
- [32]. «Colorless ONU Based on All-VCSEL Sources with Remote Optical Injection for WDM-PON» by *Lei Deng, Ying Zhao, Xiaodan Pang, Xianbin Yu, J. Bevensee Jensen, Deming Liu and I. Tafur Monroy*
- [33]. «Study of Long-Wavelength VCSEL-VCSEL Injection Locking for 2.5-Gb/s Transmission» by *Chih-Hao Chang, Lukas Chrostowski, Connie J. Chang-Hasnain and Weng W. Chow*
- [34]. «10-Gb/s All-Optical VPN in WDM-PON Using Injection-Locked Fabry-Pérot Laser Diodes» by *Yazhi Luo, Feng Li, Jie Liu, Liqing Gan, Chao Lu and Ping Kong Alexander Wai*
- [35]. «Using optical injection of Fabry-Pérot lasers for high-speed access in optical telecommunications» by *Quoc Thai Nguyen, Pascal Besnard, Laurent Bramerie, Alexandre Shen, Alexandre Garreau, Olivier Vaudel, Christophe Kazmierski, Guang-Hua Duan and Jean-Claude Simon*
- [36]. «Trends in optical access and in-building networks» by *T. Koonen*
- [37]. «Optical Passive Networks: Principles and Practice» by *Cedric Lam*
- [38]. «Microwave Photonics» by *Chi H. Lee*
- [39]. «Integration of FTTH and GI-POF in-house networks based on injection locking and direct-detection techniques» by *Hsiao-Chun Peng, Hai-Han Lu, Chung-Yi Li, Heng-Sheng Su and Chin-Tai Hsu*

- [40]. «Integrated Microsystems: Electronics, Photonics, and Biotechnology» by *Krzysztof Iniewski*
- [41]. «WDM-PON using Fabry-Pérot laser diodes injection locked by multiwavelength erbium-doped fiber laser» by *Xinhuan Feng, Jie Li, Yi Dong, Zhaohui Li, Linghao Cheng and Bai-ou Guan*
- [42]. «Investigation of WDM-PON Based on Injection-Locked FP-LDs in CHTL Trial System» by *Hai-Lin Wang, Gong-Cheng Lin, Sengda Tu, Ting-Chung Chang, Ching-Sheu Wang and Jy-Wang Liaw*
- [43]. «FTTH - Fiber to the Home: High-impact Strategies - What You Need to Know» by *Kevin Roebuck*
- [44]. «16x2.5 Gbit/s Downstream Transmission in Colorless WDM-PON based on Injection-Locked Fabry-Perot Laser Diode using a single Quantum Dash mode-locked Fabry-Perot laser as multi-wavelength seeding source» by *Q.T. Nguyen, L. Bramerie, G. Girault, O. Vaudel, P. Besnard, J.-C. Simon, A. Shen, G.H. Duan and C. Kazmierski*
- [45]. http://www.rp-photonics.com/injection_locking.html
- [46]. http://en.wikipedia.org/wiki/Injection_locking
- [47]. http://www.rp-photonics.com/vertical_cavity_surface_emitting_lasers.html
- [48]. http://en.wikipedia.org/wiki/Distributed_feedback_laser
- [49]. <http://www.thefoa.org/tech/ref/basic/SMbands.html>
- [50]. <http://www.micronoptics.com>
- [51]. <http://www.techopedia.com>
- [52]. http://en.wikipedia.org/wiki/Subcarrier_multiplexing
- [53]. http://imedeia.uib-csic.es/~salvador/coms_optiques/addicional/ibm/ch03/03-09.html