



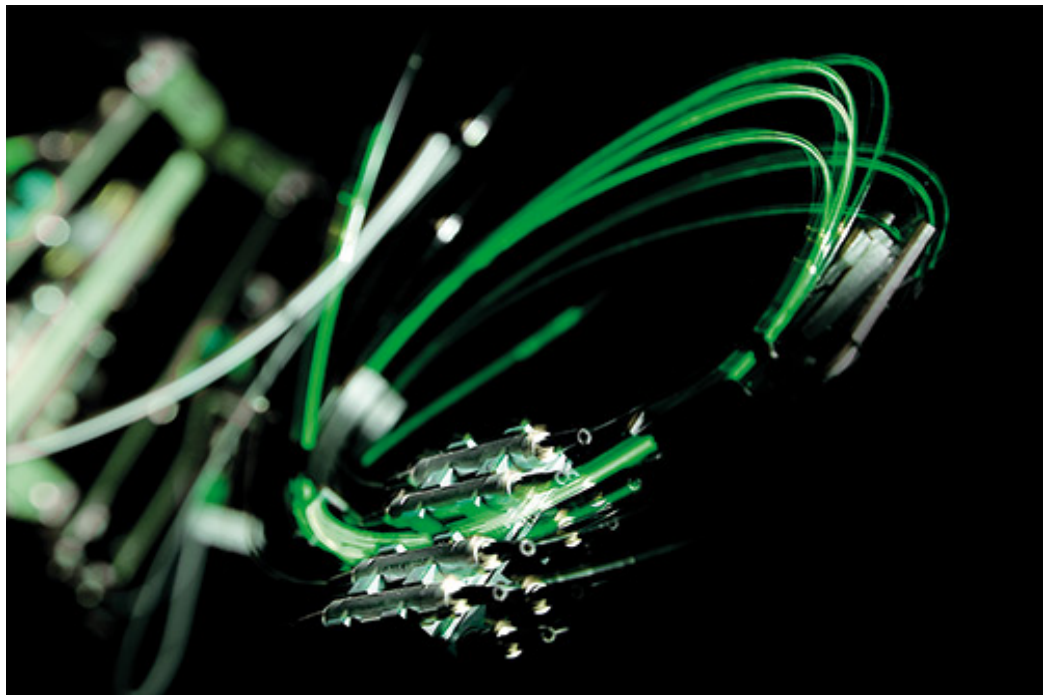
ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΔΥΤΙΚΗΣ ΑΤΤΙΚΗΣ

ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

ΤΜΗΜΑ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ & ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

Διπλωματική Εργασία

Ανάπτυξη και πειραματικός χαρακτηρισμός Fiber Laser



**Φοιτήτρια: Ζήνα Κουλτούκη
ΑΜ: 45080**

Επιβλέπων Καθηγητής

**Νικόλαος Σταθόπουλος
Καθηγητής**

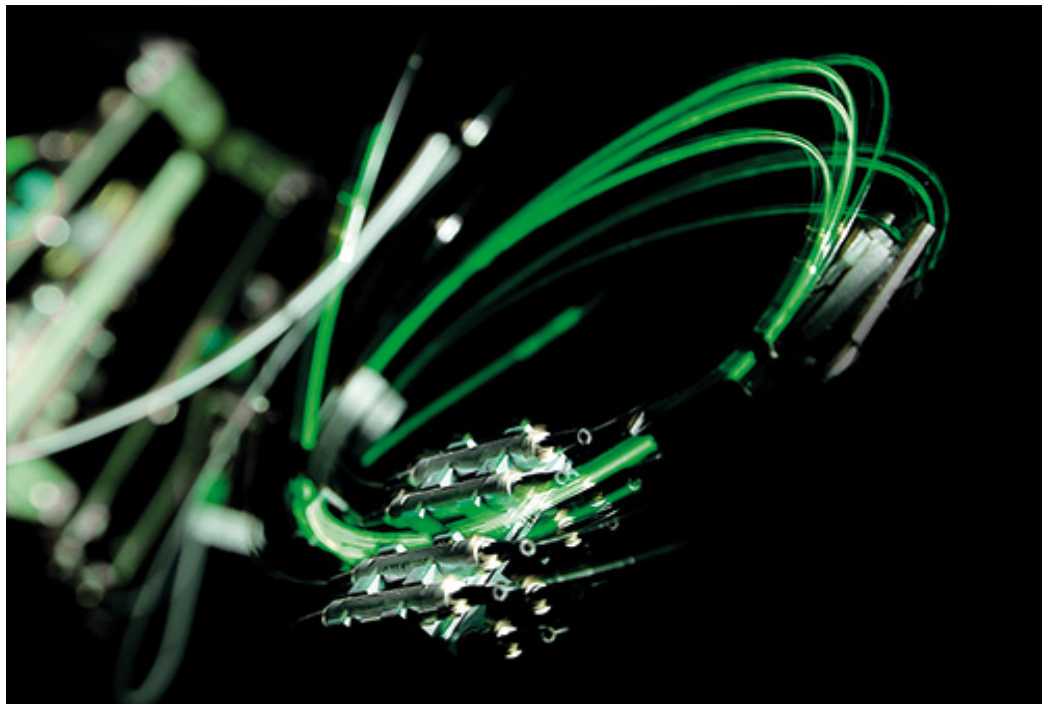
ΑΘΗΝΑ-ΑΙΓΑΛΕΩ, ΦΕΒΡΟΥΑΡΙΟΣ 2022



UNIVERSITY OF WEST ATTICA
FACULTY OF ENGINEERING
DEPARTMENT OF ELECTRICAL & ELECTRONICS ENGINEERING

Diploma Thesis

Development and characterization of a Fiber Laser



Student: Zina Koulouki
Registration Number: 45080

Supervisor

N. Stathopoulos
Professor

ATHENS-EGALEO, FEBRUARY 2022

Copyright © Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος. All rights reserved.

Κουλτούκη Ζήνα, Φεβρουάριος, 2022

Απαγορεύεται η αντιγραφή, αποθήκευση και διανομή της παρούσας εργασίας, εξ ολοκλήρου ή τμήματος αυτής, για εμπορικό σκοπό. Επιτρέπεται η ανατύπωση, αποθήκευση και διανομή για σκοπό μη κερδοσκοπικό, εκπαιδευτικής ή ερευνητικής φύσης, υπό την προϋπόθεση να αναφέρεται η πηγή προέλευσης και να διατηρείται το παρόν μήνυμα. Ερωτήματα που αφορούν τη χρήση της εργασίας για κερδοσκοπικό σκοπό πρέπει να απευθύνονται προς τους συγγραφείς.

Οι απόψεις και τα συμπεράσματα που περιέχονται σε αυτό το έγγραφο εκφράζουν τον/την συγγραφέα του και δεν πρέπει να ερμηνευθεί ότι αντιπροσωπεύουν τις θέσεις του επιβλέποντος, της επιτροπής εξέτασης ή τις επίσημες θέσεις του Τμήματος και του Ιδρύματος.

ΔΗΛΩΣΗ ΠΕΡΙ ΠΝΕΥΜΑΤΙΚΩΝ ΔΙΚΑΙΩΜΑΤΩΝ ΚΑΙ ΛΟΓΟΚΛΟΠΗΣ

Με πλήρη επίγνωση των συνεπειών του νόμου περί πνευματικών δικαιωμάτων, δηλώνω ενυπόγραφα ότι η παρούσα εργασία προετοιμάστηκε και ολοκληρώθηκε από εμένα αποκλειστικά και ότι είμαι ο αποκλειστικός συγγραφέας του κειμένου της.

Η εργασία μου δεν προσβάλλει οποιασδήποτε μορφής δικαιώματα πνευματικής ιδιοκτησίας, προσωπικότητας ή προσωπικών δεδομένων τρίτων, δεν περιέχει έργα/εισφορές τρίτων για τα οποία απαιτείται άδεια των δημιουργών/δικαιούχων και δεν είναι προϊόν μερικής ή ολικής αντιγραφής ή λογοκλοπής.

Κάθε βοήθεια που έλαβα για την ολοκλήρωση της εργασίας είναι αναγνωρισμένη και αναφέρεται λεπτομερώς στο κείμενό της. Ειδικότερα, έχω αναφέρει ευδιάκριτα μέσα στο κείμενο και με την κατάλληλη παραπομπή όλες τις πηγές δεδομένων, κώδικα προγραμματισμού Η/Υ, απόψεων, θέσεων και προτάσεων, ιδεών και λεκτικών αναφορών που χρησιμοποιήθηκαν, είτε κατά κυριολεξία είτε βάσει επιστημονικής παράφρασης, και η σχετική αναφορά περιλαμβάνεται στο τμήμα των βιβλιογραφικών αναφορών με πλήρη περιγραφή. Επιπλέον, όλες οι πηγές που χρησιμοποιήθηκαν περιορίζονται στις βιβλιογραφικές αναφορές και μόνον και πληρούν τους κανόνες της επιστημονικής παράθεσης κατά τα διεθνή πρότυπα.

Τέλος δηλώνω ενυπόγραφα ότι αναλαμβάνω πλήρως, ατομικά και προσωπικά, όλες τις νομικές και διοικητικές συνέπειες στην περίπτωση κατά την οποία αποδειχθεί, διαχρονικά, ότι η εργασία αυτή ή τμήμα της είναι προϊόν λογοκλοπής.

Ημερομηνία 24/2/2022

Ζήνα Κουλτούκη



Η Διπλωματική εργασία έγινε αποδεκτή και βαθμολογήθηκε από την εξής τριμελή επιτροπή:

Σταθόπουλος Νικόλαος Καθηγητής	Σίμος Ηρακλής Αναπληρωτής Καθηγητής	Γουστουρίδης Δημήτριος Αναπληρωτής Καθηγητής
(Υπογραφή)	(Υπογραφή)	(Υπογραφή)

Αφιερώνεται στην οικογένεια μου που με στήριξε καθ' όλη την διάρκεια των μαθητικών και φοιτητικών μου χρόνων. Θέλω να ευχαριστήσω ιδιαίτερα τον εμπνευστή αυτής της μελέτης κ. Σταθόπουλο Νικόλαο, ο οποίος στάθηκε στο πλευρό μου ως συνοδοιπόρος και καθοδηγητής καθ' όλη την διάρκεια εκπόνησης της παρούσας διπλωματικής εργασίας. Τέλος, θέλω να ευχαριστήσω όλους όσους με υποστήριξαν κατά τη διάρκεια αυτής της διαδικασίας.

Περίληψη

Στην παρούσα διπλωματική εργασία αναλύονται πειραματικά τοπολογίες Laser οπτικών ινών χαμηλής ισχύος. Πραγματοποιήθηκε ανάλυση και πειραματική μελέτη της τοπολογίας cavity με coupler εξόδου, χρησιμοποιώντας διάφορα μήκη ίνας EDF, αλλά και διαφορετικά grating, ενώ εξετάστηκε και η τοπολογία cavity με χρήση loop mirror χρησιμοποιώντας ένα grating. Επίσης, πραγματοποιήθηκε μελέτη της τοπολογίας ring cavity, χρησιμοποιώντας διαφορετικά grating και διατηρώντας σταθερό το μήκος της ίνας EDF. Τέλος, εξετάστηκαν οι παράμετροι του μήκους της ίνας Ερβίου και της ισχύος οπτικής άντλησης, ενώ παράλληλα αξιολογήθηκε το κριτήριο έναυσης του Laser.

Λέξεις – κλειδιά

Ίνα Ερβίου, οπτικός ενισχυτής, Fiber Laser, τοπολογία δακτυλίου, τοπολογία cavity, Fiber Bragg Grating.

Abstract

In the present Thesis, low power fiber laser topologies are experimentally analyzed. An analysis and experimental study of the cavity topology was performed with an output coupler, using different lengths of EDF, but also different gratings. Next, a study of the ring cavity topology has been conducted, using different grating and keeping fixed the length of EDF. Finally, the parameters of the Erbium fiber length and the optical pumping power were examined, while at the same time the laser ignition criterion was evaluated.

Keywords

Erbium doped fiber, optical amplifier, optical spectrum analyzer, source, loop mirror topology, ring topology, cavity topology, Fiber Bragg Grating .

Περιεχόμενα

Κατάλογος Εικόνων – Κατάλογος Σχημάτων.....	10
Αλφαβητικό Ευρετήριο.....	12
1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	13
2 Ίνες ιόντων Ερβίου	14
2.1 Σπάνιες Γαίες.....	14
2.2 Ενεργειακές Στάθμες Ερβίου	16
2.3 Φαινόμενο Stark Splitting.....	16
2.4 Εξαναγκασμένη Εκπομπή	18
2.5 Επίδραση επιπέδου ισχύος άντλησης.....	19
2.6 Οπτική ενίσχυση.....	20
3 Ανάλυση και τοπολογίες EDFL	21
3.1 Τοπολογίες EDFL.....	22
3.1.1 Τοπολογία οπτικής κοιλότητας (cavity).....	22
3.1.2 Πρώτη εκδοχή τοπολογίας οπτικής κοιλότητας	24
3.1.3 Δεύτερη εκδοχή τοπολογίας οπτικής κοιλότητας.....	25
3.1.4 Τρίτη εκδοχή τοπολογίας οπτικής κοιλότητας	26
3.1.5 Τοπολογία δακτυλίου (ring).....	26
4 Πειραματική ανάπτυξη και χαρακτηρισμός EDFL.....	28
4.1 Εισαγωγή.....	28
4.2 Επιλογή και παρουσίαση οργάνων και εξαρτημάτων για την πειραματική διάταξη	28
4.2.1 Laser άντλησης στα 980 nm	28
4.2.2 Controller θερμοκρασίας.....	28
4.2.3 Controller ρεύματος	29
4.2.4 Coupler 50:50	29
4.2.5 WDM coupler για σύζευξη 1550 nm & 980 nm.....	29
4.2.6 Οπτικός κυκλοφορητής	30
4.2.7 Optical power meter.....	30
4.2.8 Optical spectrum analyser (OSA).....	31
4.2.9 Χαρακτηρισμός των διαθέσιμων FBG	31
4.2.10 Ίνα Ερβίου	33
4.3 Τοπολογία με coupler εξόδου εντός του cavity	34
4.3.1 Περιγραφή συνδεσμολογίας της τοπολογίας.....	34
4.3.2 Τοπολογία μέτρησης θορύβου ASE με χρήση ίνας EDF	35
4.3.3 Τοπολογία μέτρησης θορύβου ASE με χρήση FBG2 και ίνα EDF μήκους 10cm	36
4.3.4 Τοπολογία μέτρησης θορύβου ASE με χρήση FBG2 και ίνα EDF μήκους 54cm	37
4.3.5 Τοπολογία μέτρησης με χρήση FBG3 στην είσοδο του cavity και του FBG2 στην έξοδο και με μήκος ίνας 21cm.....	38
4.3.6 Τοπολογία μέτρησης με χρήση FBG3 στην είσοδο του cavity και του FBG2 στην έξοδο και με μήκος ίνας 10cm.....	39
4.3.7 Τοπολογία μέτρησης με χρήση FBG3 στην είσοδο του cavity και του FBG2 στην έξοδο και με μήκος ίνας 54cm.....	41
4.3.8 Τοπολογία μέτρησης με χρήση FBG1 στην είσοδο του cavity και του FBG2 στην έξοδο και με μήκος ίνας 54cm.....	42
4.4 Τοπολογία ring cavity	45
4.4.1 Περιγραφή συνδεσμολογίας της τοπολογίας.....	45
4.4.2 Τοπολογία μέτρησης ring cavity με χρήση του FBG1.....	46
4.4.3 Τοπολογία μέτρησης ring cavity με χρήση του FBG4.....	48
4.4.4 Τοπολογία μέτρησης ring cavity με χρήση του FBG5.....	51

<i>Ανάπτυξη και πειραματικός χαρακτηρισμός fiber laser</i>	
4.5	Τοπολογία cavity με χρήση loop mirror 53
4.5.1	Περιγραφή συνδεσμολογίας της τοπολογίας..... 53
4.5.2	Τοπολογία μέτρησης με χρήση του FBG6 στην έξοδο..... 54
5	ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ 57
5.1	Σχετικά με τις μετρήσεις χρησιμοποιώντας την τοπολογία εξόδου εντός του cavity 57
5.2	Σχετικά με τις μετρήσεις χρησιμοποιώντας την τοπολογία ring cavity 57
5.3	Σχετικά με τις μετρήσεις χρησιμοποιώντας την τοπολογία loop mirror..... 57
5.4	Μελλοντικές επεκτάσεις και συνέχεια 58
Βιβλιογραφία – Αναφορές - Διαδικτυακές Πηγές 59	
Παράρτημα Α..... 60	

Κατάλογος Εικόνων – Κατάλογος Σχημάτων

Σχήμα 1: Σχηματική απεικόνιση διέγερσης και αποδιέγερσης μεταξύ των ενεργειακών σταθμών του Ερβίου.....	16
Σχήμα 2: Η διάσπαση των ενεργειακών σταθμών του Ερβίου σε πολλά επίπεδα, λόγω της ύπαρξης του φαινομένου stark splitting.....	17
Σχήμα 3: Το φάσμα εκπομπής ίνας νοθευμένης με ιόντα Ερβίου.....	18
Σχήμα 4: Γραφική απεικόνιση της απολαβής ή απορρόφησης του Ερβίου σε συνάρτηση με την ισχύ άντλησης [5].....	19
Σχήμα 5: Διάγραμμα λειτουργίας ενός οπτικού ενισχυτή (EDFA).....	20
Σχήμα 6: Βασική δομή ενός Laser.....	21
Σχήμα 7: Βασική δομή ενός ταλαντωτή.....	21
Σχήμα 8: Βασική δομή ενός EDFL.....	22
Σχήμα 9: Σχηματική απεικόνιση τοπολογίας κοιλότητας.....	23
Σχήμα 10: Φασματική απόκριση ανακλαστικότητας FBG1(εξωτερική καμπύλη) μεγάλου εύρους ζώνης ~ 1.2nm και FBG2 (εσωτερική καμπύλη) μικρού εύρους ζώνης.....	24
Σχήμα 11: Φάσμα εξόδου EDFL σε τοπολογία κοιλότητας.....	24
Σχήμα 12: Σχηματική απεικόνιση πρώτης παραλλαγής της τοπολογίας κοιλότητας.....	24
Σχήμα 13: Εκτιμώμενο Φάσμα εξόδου EDFL σε τοπολογία κοιλότητας.....	25
Σχήμα 14: Σχηματική απεικόνιση δεύτερης παραλλαγής της τοπολογίας κοιλότητας.....	25
Σχήμα 15: Σχηματική απεικόνιση τρίτης παραλλαγής της τοπολογίας κοιλότητας.....	26
Σχήμα 16: Σχηματική απεικόνιση τοπολογίας δακτυλίου.....	27
Σχήμα 17: Φάσμα εξόδου EDFL με τοπολογία σε τοπολογία δακτυλίου.....	27
Εικόνα 1: Εσωτερική δομή Laser άντλησης στα 980 nm.....	28
Εικόνα 2: Controller θερμοκρασίας [7].....	29
Εικόνα 3: Controller ρεύματος [7].....	29
Εικόνα 4: coupler 50:50.....	29
Εικόνα 5: WDM coupler 1550 nm & 980nm [7].....	30
Εικόνα 6: Οπτικός κυκλοφορητής [7].....	30
Εικόνα 7: Optical power meter [7].....	30
Εικόνα 8: Optical spectrum analyzer [8].....	31
Εικόνα 9: Καμπύλη ισχύος εξόδου της BBS.....	31
Σχήμα 18: Διάταξη μέτρησης φασματικής απόκρισης των FBG του εργαστηρίου.....	32

Εικόνα 10: Στιγμιότυπο από τον OSA της φασματικής ισχύος ανάκλασης των FBG 1,2&3.....	32
Σχήμα 19: Συγκεντρωτική απεικόνιση των καμπυλών ανακλαστικότητας των FBG 1, 2 & 3.....	32
Σχήμα 20: Καμπύλη ισχύος του FBG 4.....	33
Εικόνα 11: Τεχνικά χαρακτηριστικά της ίνας Ερβίου [7].....	33
Σχήμα 22: Διάταξη τοπολογίας cavity με coupler εξόδου και χρήση δύο διαφορετικών FGB.....	34
Εικόνα 12: Εργαστηριακή διάταξη τοπολογίας cavity με coupler εξόδου και χρήση δύο διαφορετικών FGB.....	35
Σχήμα 23: Διάταξη μέτρησης θορύβου ASE.....	35
Σχήμα 24: Στο παραπάνω διάγραμμα απεικονίζεται ο παραγόμενος θόρυβος της ίνας Ερβίου μήκους 54cm, χρησιμοποιώντας ισχύ άντλησης 75 mW.....	36
Σχήμα 25: Διάταξη μέτρησης θορύβου ASE με χρήση του FBG2 και ίνας Ερβίου μήκους 10cm.....	36
Σχήμα 26: Στο παραπάνω διάγραμμα απεικονίζεται η καμπύλη εξόδου της τοπολογίας cavity εμπεριέχοντας FBG2 και ίνα Ερβίου μήκους 10cm, χρησιμοποιώντας ισχύ άντλησης 75 mW.....	36
Σχήμα 27: Διάταξη μέτρησης θορύβου ASE με χρήση του FBG2.....	37
Σχήμα 28: Στο παραπάνω διάγραμμα απεικονίζεται η καμπύλη εξόδου της τοπολογίας cavity εμπεριέχοντας FBG2 και ίνα Ερβίου μήκους 54cm, χρησιμοποιώντας ισχύ άντλησης 75 mW.....	37
Σχήμα 29: Διάταξη τοπολογίας cavity με coupler εξόδου και χρήση FGB3 & FBG2.....	38
Σχήμα 30: Καμπύλη εξόδου της τοπολογίας cavity με coupler εξόδου και χρήση ίνας Ερβίου 10cm χρησιμοποιώντας ισχύ άντλησης 75 mW.....	38
Σχήμα 31: Διάταξη τοπολογίας cavity με coupler εξόδου και χρήση FGB3 & FBG2.....	39
Σχήμα 32: Συγκεντρωτική καμπύλη εξόδου της τοπολογίας cavity με coupler εξόδου και χρήση ίνας Ερβίου 21cm.....	40
Σχήμα 33: Καμπύλη ισχύος εξόδου συναρτήσει της ισχύος άντλησης του laser.....	40
Σχήμα 34: Διάταξη τοπολογίας cavity με coupler εξόδου και χρήση FGB3 & FBG2.....	41
Σχήμα 35: Συγκεντρωτική καμπύλη εξόδου της τοπολογίας cavity με coupler εξόδου και χρήση ίνας Ερβίου 54cm.....	41
Σχήμα 36: Καμπύλη ισχύος εξόδου συναρτήσει της ισχύος άντλησης του laser.....	42
Σχήμα 37: Διάταξη τοπολογίας cavity με coupler εξόδου και χρήση FGB1 & FBG2.....	42
Σχήμα 38: Συγκεντρωτική καμπύλη εξόδου της τοπολογίας cavity με coupler εξόδου και χρήση ίνας Ερβίου 54cm.....	43
Σχήμα 39: Καμπύλη ισχύος εξόδου συναρτήσει της ισχύος άντλησης του laser.....	43
Σχήμα 40: Διάταξη τοπολογίας ring cavity.....	45
Εικόνα 13: Εργαστηριακή διάταξη τοπολογίας ring cavity.....	46
Σχήμα 41: Διάταξη τοπολογίας ring cavity με χρήση του FBG1.....	46

<i>Ανάπτυξη και πειραματικός χαρακτηρισμός fiber laser</i>	
Σχήμα 42: Συγκεντρωτική καμπύλη εξόδου της τοπολογίας ring cavity.....	47
Σχήμα 43: Καμπύλη ισχύος εξόδου συναρτήσει της ισχύος άντλησης του laser.....	48
Εικόνα 14: Απεικόνιση της απορρόφησης ισχύος κατά μήκος της ίνας EDF.....	48
Σχήμα 44: Διάταξη τοπολογίας ring cavity με χρήση του FBG4.....	48
Σχήμα 45: Συγκεντρωτική καμπύλη εξόδου της τοπολογίας ring cavity.....	50
Σχήμα 46: Καμπύλη ισχύος εξόδου συναρτήσει της ισχύος άντλησης του laser.....	50
Σχήμα 47: Διάταξη τοπολογίας ring cavity με χρήση του FBG5.....	51
Σχήμα 48: Στο διάγραμμα απεικονίζεται η συγκεντρωτική καμπύλη εξόδου όλων των επιπέδων ισχύος άντλησης της τοπολογίας ring cavity.....	52
Σχήμα 49: Καμπύλη ισχύος εξόδου συναρτήσει της ισχύος άντλησης του laser.....	52
Σχήμα 50: Διάταξη τοπολογίας cavity με χρήση loop mirror.....	53
Εικόνα 15: Εργαστηριακή διάταξη τοπολογίας loop mirror.....	53
Σχήμα 51: Διάταξη τοπολογίας loop mirror με χρήση του FBG6.....	54
Σχήμα 52: Συγκεντρωτική καμπύλη εξόδου της τοπολογίας loop mirror	55
Σχήμα 53: Καμπύλη ισχύος εξόδου συναρτήσει της ισχύος άντλησης του laser.....	55

Αλφαβητικό Ευρετήριο

EDF: Erbium Doped Fiber

OSA: Optical Spectrum Analyzer

OPM: Optical Power Meter

EDFA: Erbium Doped Fiber Amplifier

EDFL: Erbium Doped Fiber Laser

LASER: Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation

Er: Erbium

1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Τα fiber laser είναι ειδικός τύπος laser στον οποίο η δέσμη φωτός καθώς και η κοιλότητα του laser υλοποιούνται μέσω μίας οπτικής ίνας κατάλληλα νοθευμένης με σπάνιες γαίες κυρίως για εκπομπή στην περιοχή του υπέρυθρου. Στα fiber laser η δέσμη φωτός παράγεται εντός της οπτικής ίνας, εν αντιθέσει με τα συμβατικά laser όπου η δέσμη φωτός παράγεται εκτός του συστήματος. Το τμήμα του laser το οποίο είναι υπεύθυνο για την οπτική ενίσχυση χρησιμοποιείται κατά κόρον στα οπτικά δίκτυα μεγάλου μήκους και είναι ευρέως γνωστό ως ενισχυτής οπτικών ινών. Γενικότερα, τα fiber laser διαθέτουν πληθώρα πλεονεκτημάτων εν αντιθέσει με τα υπόλοιπα laser. Συγκεκριμένα, μπορούν να αποδώσουν υψηλή ισχύ όταν συνδυασθεί κατάλληλα δέσμη φωτός η οποία θα παραχθεί μέσω πολλαπλών συστημάτων εκπομπής, ενώ παράλληλα είναι αρκετά σταθερά και αξιόπιστα. Βασικό μειονέκτημα ενός fiber laser είναι η παραγωγή ανεπιθύμητων μη γραμμικών οπτικών φαινομένων, όπως για παράδειγμα ο θόρυβος (ASE). Είναι χρήσιμο να αναφερθεί, ότι τα fiber laser παράγουν συνεχείς CW δέσμες φωτός υψηλής ισχύος, μηχανισμός ο οποίος καθίσταται ιδιαίτερα χρήσιμος σε πολλές βιομηχανικές εφαρμογές όπως συγκόλληση ή/και κοπή υλικών. Επίσης, έχουν μεγάλη εφαρμογή στην αυτοκινητοβιομηχανία, την ιατρική, τις τηλεπικοινωνίες και τη φασματοσκοπία κλπ.[9]. Σκοπός της εργασίας αυτής είναι να αναπτύξουμε πειραματικά και να αναλύσουμε την λειτουργία της δομής ενός laser οπτικών ινών με χρήση ίνας Erbium για εκπομπή στο υπέρυθρο και εν γένει στο φάσμα εκπομπής του Erbium, όταν διεγερθεί οπτικά από μία πηγή laser στα 980nm. Κίνητρο αποτέλεσε η δυνατότητα ανάπτυξης πολλαπλών τοπολογιών για την υλοποίηση ενός fiber laser [5], οπότε η εργασία στοχεύει στην συγκριτική πειραματική μελέτη των διαφόρων τοπολογιών για την ανάδειξη πλεονεκτημάτων και μειονεκτημάτων. Με δεδομένο ότι στον εξοπλισμό του εργαστηρίου είναι διαθέσιμα χαμηλής ισχύος εξαρτήματα και όργανα περιορισθήκαμε στην λειτουργία χαμηλής ισχύος, η οποία ωστόσο θα μπορούσε να αξιοποιηθεί για την υλοποίηση αντίστοιχων εφαρμογών, όπως τα αισθητήρια οπτικών ινών. Η δομή της διπλωματικής εργασίας έχει ως εξής: Στο πρώτο κεφάλαιο πραγματοποιείται ενδελεχής θεωρητική ανάλυση της ίνας Erbium (EDF) και των φαινομένων που την χαρακτηρίζουν. Εν συνέχεια, στο δεύτερο κεφάλαιο πραγματοποιείται θεωρητική ανάλυση όλων των τοπολογιών με χρήση ίνας EDF, οι οποίες χρήζουν εφαρμογής σε οπτικούς ενισχυτές και fiber laser. Στο τρίτο κεφάλαιο, παρουσιάζεται ο εργαστηριακός εξοπλισμός που θα χρησιμοποιηθεί στο πειραματικό μέρος της παρούσας εργασίας. Στη συνέχεια, αναλύονται όλες οι πειραματικές μετρήσεις και τα αποτελέσματα που λάβαμε, μελετώντας την συμπεριφορά διαφορών μηκών ίνας EDF και χρησιμοποιώντας FBG με διαφορετικές ανακλαστικότητες σε κάθε τοπολογία μέτρησης. Τέλος, καταλήξαμε σε συμπεράσματα και σε πιθανές επεκτάσεις της παρούσας διπλωματικής εργασίας.

2 Ίνες ιόντων Ερβίου

Στις ζεύξεις οπτικών ινών μεγάλων αποστάσεων, οι οποίες χαρακτηρίζονται από υψηλούς ρυθμούς μετάδοσης πληροφορίας, παρουσιάζονται φαινόμενα εξασθένησης και διασποράς. Ειδικότερα, τα τυπικά επίπεδα εξασθένησης των μονορυθμικών οπτικών ινών είναι περίπου 0.2 dB/km. Αυτό σημαίνει ότι σε ένα αμιγώς οπτικό δίκτυο με μήκος ζεύξης 100 km το σήμα θα φθάσει στον δέκτη εξασθενημένο κατά 20 dB. Εν γένει, σε υποθαλάσσιες ή υπερατλαντικές ζεύξεις γεννιέται η ανάγκη ενίσχυσης του σήματος εκπομπής λόγω του μεγάλου μήκους της οπτικής ίνας, από το οποίο προκύπτει μεγαλύτερο επίπεδο εξασθένησης. Οι τεχνικές οι οποίες χρησιμοποιήθηκαν στο παρελθόν ήταν αρχικά οι αναγεννητές σήματος ενώ αργότερα οι οπτικοί ενισχυτές σήματος ημιαγωγού *semiconductor optical amplifiers* (SOA). Τα μειονεκτήματα των SOA οδήγησαν στην ανάπτυξη και ευρεία χρήση της τεχνολογίας των ενισχυτών οπτικής ίνας νοθευμένης με ιόντα ερβίου (*Erbium-doped fibers - EDF*). Ένα εκ των βασικότερων πλεονεκτημάτων της ίνας με πρόσμιξη ερβίου είναι ότι το ιόντα ερβίου είναι ικανά να απορροφούν φως σε ένα μήκος κύματος και να εκπέμπουν σε ένα διαφορετικό. Στη συγκεκριμένη ιδιότητα είναι βασισμένη και η κατασκευή των οπτικών ενισχυτών ιόντων ερβίου – EDFA. Επίσης ο συγκεκριμένος τύπος οπτικού ενισχυτή έχει το πλεονέκτημα ότι δεν διακόπτει την συνέχεια της ίνας η οποία μεταφέρει το οπτικό σήμα πληροφορίας, σε αντίθεση με τις παλαιότερες τεχνολογίες. Ωστόσο απαιτείται μία πηγή άντλησης η οποία υλοποιείται μέσω της χρήσης ενός laser ημιαγωγού. Είναι σημαντικό να τονισθεί ότι το κυρίαρχο μειονέκτημα των EDFA είναι η εισαγωγή θορύβου αυθόρμητης εκπομπής (*amplified spontaneous emission - ASE*) στα συγκεκριμένα συστήματα ζεύξεων και εξαιτίας αυτού του λόγου προκύπτει η ανάγκη για τοποθέτηση ενισχυτών σε συγκεκριμένες αποστάσεις και με συγκεκριμένο κέρδος. Στο κεφάλαιο αυτό θα εστιάσουμε στους οπτικούς ενισχυτές ιόντων ερβίου - EDFA, διότι είναι δομικό και αναπόσπαστο στοιχείο των fiber laser. Αναλυτικότερα, το fiber laser αντιστοιχεί στην δομή ενός ηλεκτρικού ταλαντωτή και απόρροια αυτού είναι η απαίτηση χρήσης ενός στοιχείου ενίσχυσης το οποίο για τα συστήματα fiber laser είναι ο EDFA. Η δομή του κεφαλαίου είναι η εξής: Αρχικά, θα αναφερθούμε στις σπάνιες γαίες, τις ιδιότητες τους και τη χρησιμότητα τους στην οπτική ενίσχυση, ειδικότερα θα αναλύσουμε τις ενεργειακές στάθμες του ερβίου και θα σταθούμε στο φαινόμενο *stark splitting* στο οποίο βασίζεται το εύρος ζώνης των EDFA. Εν συνεχεία, θα περιγράψουμε τα φαινόμενα της εξαναγκασμένης εκπομπής φωτονίων και της αναστροφής πληθυσμών και τέλος θα μελετήσουμε τον θόρυβο (ASE).

2.1 Σπάνιες Γαίες

Σπάνιες γαίες χαρακτηρίζονται τα μέταλλα ή αλλιώς χημικά στοιχεία τα οποία είναι γαιώδους μορφής και ονομάστηκαν έτσι λόγω της σπανιότητάς τους. Τα συγκεκριμένα μέταλλα, εξαιρουμένων του ύττριου και του σκάνδιου, ονομάζονται και λανθανίδες και εμφανίζουν σχεδόν τις ίδιες ιδιότητες. Τα χημικά στοιχεία χωρίζονται σε τρεις ομάδες με βάση τα ορυκτά από τα οποία προέρχονται:

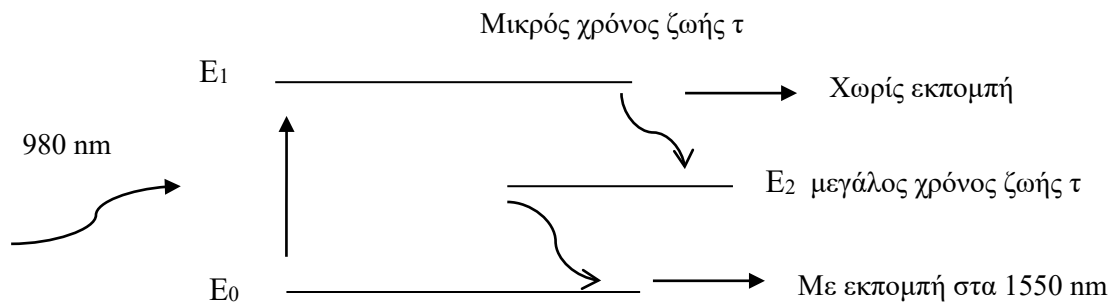
1. Ομάδα πρώτη: λανθάνιο, δημήτριο, πρασεοδύμιο, νεοδύμιο, προμήθειο και σαμάριο με κύρια πηγή τα ορυκτά *μανοζίτη*, *τσερίτη* και *αλλανίτη*.
1. Ομάδα δεύτερη: ευρώπιο, γαδολίνιο και τέρβιο με κύρια πηγή το ορυκτό *σαμαρσκήτη*.
2. Ομάδα τρίτη: δυσπρόσιο, όλμιο, ύτριο, έρβιο, θούλιο, υτέρβιο και λουτέτιο με κύρια πηγή τα ορυκτά *γαδολινίτη*, *ξενότιμο*, *ευξενίτη* και *φεργκιουσονίτη*.

Τα προαναφερόμενα ορυκτά, εντοπίζονται κυρίως στις ΗΠΑ, την Κίνα, την Νορβηγία, τη Βραζιλία, την Ινδία και την Αυστραλία [1]. Οι σπάνιες γαίες διερευνήθηκαν τόσο φασματικά όσο και δομικά, ώστε να χρησιμοποιηθούν εκτενώς στην δημιουργία οπτικών ενισχυτών, οι οποίοι με

την σειρά τους ενσωματώθηκαν σε τηλεπικοινωνιακά δίκτυα. Κατά τη διαδικασία κατασκευής ενισχυτών οπτικών ινών χρησιμοποιούνται στοιχεία σπανίων γαιών ως ενεργό μέσο απολαβής. Η εμφύτευσή τους γίνεται απευθείας στο εσωτερικό του πυρήνα της οπτικής ίνας. Η κατασκευή οπτικών ινών με προσμίξεις βασίζεται σε μία από τις ακόλουθες τεχνολογίες : MCDV (Modified Chemical Vapor Deposition), ODV (Outside Chemical Deposition) και VAD (Vapor Axial Deposition). Θα αναφερθούμε στην διαδικασία MCVD η οποία χρησιμοποιείται κυρίως από τους κατασκευαστές για τις νοθευμένες ίνες σπανίων γαιών. Κατά την διαδικασία MCVD ένας σωλήνας γυαλιού πυριτίου (preform) θερμαίνεται στους 1900 °C. Χημικά αντιδραστήρια αποτελούμενα από τετραχλωριούχο πυρίτιο (SiCl_4) και οξυγόνο μαζί με στοιχεία προσμίξεων αντιδρούν και σχηματίζουν μόρια διοξειδίου του πυριτίου δημιουργώντας ένα συμπαγές γυαλί. Εν συνεχεία ο σωλήνας θερμαίνεται στους 2300°C, με αποτέλεσμα να συσπειρωθεί σε μία στερεά ράβδο. Τελευταίο στάδιο είναι η χρήση μίας τεχνικής μέσω της οποίας θα επιτευχθεί η ενσωμάτωση των μορίων του Ερβίου εντός του πυρήνα της ίνας [2]. Οι οπτικές ίνες με προσμίξεις έχουν ήδη μελετηθεί από την δεκαετία του 1970, ενώ η εφαρμογή τους έλαβε χώρα αρκετά χρόνια αργότερα. Πολλά και διαφορετικά ιόντα σπάνιων γαιών, με πρωταγωνιστές το Έρβιο, το Νεοδύμιο, το Σαμάριο και το Υτέρβιο είναι εφικτό να χρησιμοποιηθούν, ώστε να δημιουργήσουν οπτικούς ενισχυτές, οι οποίοι θα λειτουργούν σε διάφορα μήκη κύματος καλύπτοντας ένα μεγάλο εύρος περιοχών μηκών κύματος. Η επιλογή του στοιχείου πρόσμιξης της οπτικής ίνας κατέχει πρωταρχικό ρόλο στη δημιουργία ενός οπτικού ενισχυτή, διότι καθορίζει βασικά χαρακτηριστικά του, όπως το μήκος κύματος και το εύρος ζώνης λειτουργίας του. Βασιζόμενοι στην μελέτη συνεμφύτευσης μπορούμε να παρατηρήσουμε μέσω γραφικής απεικόνισης το φάσμα εκπομπής της κάθε σπάνιας γαίας. Το Υτέρβιο (Yb^{3+}) εκπέμπει γύρω από την περιοχή των 1.00 μm , το Νεοδύμιο (Nd^{3+}) γύρω από τα 1,05 μm , το Πρασεοδύμιο (Pr^{3+}) γύρω από τα 1,3 μm , το Δημήτριο (Dy^{3+}) γύρω από τα 1,35 μm , το Θύμιο (Tm^{3+}) γύρω από τα 1,45 μm και τέλος το Έρβιο γύρω από τα 1,55 μm [2]. Οι σπάνιες γαίες χαρακτηρίζονται από τρία επίπεδα ενεργειακών σταθμών, όπου η διέγερση από την βασική στην πρώτη στάθμη πραγματοποιείται μέσω της άντλησης και μας ενδιαφέρει να επιτυγχάνεται σε ένα μήκος κύματος όπου υπάρχει πηγή ημιαγωγικού laser, το οποίο μπορεί να προσφέρει την ισχύ που απαιτείται, ώστε να δημιουργηθεί άντληση. Δεύτερο χαρακτηριστικό είναι η ενεργειακή στάθμη στην οποία υπάρχει μεγάλος χρόνος ζωής και αναμένουμε να εξετάσουμε εάν πράγματι χαρακτηρίζεται από μεγάλο χρόνο ζωής, έτσι ώστε να είναι εφικτή η ύπαρξη του φαινομένου της αναστροφής πληθυσμών. Τρίτο και τελευταίο χαρακτηριστικό είναι κατά την αποδιέγερση των ατόμων από την μεσαία μέχρι την βασική στάθμη και εάν θα αποδοθεί μήκος κύματος στην περιοχή που μας ενδιαφέρει. Έπειτα από συνεχείς μελέτες έχει αποδειχθεί ότι οι σπάνιες γαίες που πληρούν το προαναφερόμενο κριτήριο, μπορούν να εμφυτευτούν εντός του πυρήνα της οπτικής ίνας και να αποδώσουν το συγκεκριμένο χαρακτηριστικό που αναζητούμε. Κατά την πάροδο του χρόνου έλαβαν χώρα πολλές δοκιμές χρήσης σπάνιων γαιών, με αποτέλεσμα να καταλήξουμε στην ευρύτερη χρήση των οπτικών ινών νοθευμένων με Έρβιο, διότι πληρούν το συγκεκριμένο χαρακτηριστικό εκπομπής σε μια ευρεία περιοχή μήκους κύματος γύρω από τα 1.55 μm , ενώ ταυτόχρονα προσφέρουν πολλές δυνατότητες σε έναν οπτικό ενισχυτή και μία εξ' αυτών είναι η σχετικά χαμηλή εξασθένιση εν αντιθέσει με άλλα είδη ενισχυτών.

2.2 Ενεργειακές Στάθμες Ερβίου

Για τις εφαρμογές των Laser οπτικών ινών επιλέγουμε ως σπάνια γαία το Έρβιο, διότι εκπέμπει εντός του τηλεπικοινωνιακού παραθύρου και μας εξυπηρετεί στην δημιουργία οπτικού ενισχυτή, απαραίτητου για την υλοποίηση των laser οπτικών ινών. Στους ενισχυτές οπτικής ίνας, η οποία είναι νοθευμένη με τρισθενή ιόντα Ερβίου (Er^{3+}), τα ηλεκτρόνια των εξωτερικών στιβάδων, είναι ουσιαστικά εκείνα τα οποία καθορίζουν τις διαδικασίες άντλησης και εκπομπής της ακτινοβολίας, μέσω των μεταβολών που υφίσταται η ενέργεια τους. Στην συγκεκριμένη περίπτωση, το τρισθενές ιόν Ερβίου (Er^{3+}), είναι ένα άτομο Ερβίου το οποίο έχει χάσει τρία από τα ηλεκτρόνια της εξωτερικής στιβάδας του. Εκμεταλλευόμενοι τις ιδιότητες του ιόντος τρισθενούς ερβίου, ώστε να πετύχουμε την δημιουργία ενός laser, ακολουθούμε συγκεκριμένα στάδια. Αρχικά, ωθούμε τα ηλεκτρόνια σε υψηλότερες ενεργειακές στάθμες με την τεχνική της οπτικής άντλησης. Για να πετύχουμε άντληση χρησιμοποιούμε μία πηγή η οποία παράγει ενέργεια στα 980nm ή στα 1490nm. Στην παρούσα εργασία θα κάνουμε χρήση πηγής με εκπομπή στα 980nm και ένας λόγος είναι ότι το μήκος κύματος άντλησης πρέπει να είναι αρκετά απομακρυσμένο σε σχέση με το μήκος κύματος λειτουργίας. Επίσης, στο εργαστήριο διαθέτουμε μόνο μία πηγή η οποία εκπέμπει στα 980nm, οπότε αυτή θα χρησιμοποιηθεί στο πειραματικό μέρος. Ο καθορισμός του μήκους κύματος εκπομπής στα 980nm, προκύπτει λόγω της ενεργειακής διαφοράς που έχει η στάθμη E_0 με την στάθμη E_1 , η οποία αντιστοιχεί στο συγκεκριμένο μήκος κύματος. Κατά την οπτική άντληση, τα άτομα απορροφούν ενέργεια και μεταπηδούν από την χαμηλότερη ενεργειακή στάθμη (E_0) στην υψηλότερη ενεργειακή στάθμη (E_1). Έτσι, τα ιόντα ερβίου μόλις ανυψωθούν μέσω της διέγερσης, κάποια από αυτά θα μεταπηδήσουν στην μεσαία στιβάδα (E_2) χωρίς εκπομπή, δημιουργώντας συσσώρευση πολλών διεγερμένων ηλεκτρονίων. Κατά την αποδιέγερση από την ενεργειακή στάθμη E_2 στην ενεργειακή στάθμη E_0 παράγεται ενέργεια, η οποία εκπέμπεται μέσω φωτονίων με μήκος κύματος στην περιοχή των 1550nm (Σχήμα 1). Η αποδιέγερση πραγματοποιείται μέσω αυθόρμητης ή εξαναγκασμένης εκπομπής φωτός. Με στόχο την επικράτηση της εξαναγκασμένης εκπομπής, είναι απαραίτητο να δημιουργηθεί αναστροφή πληθυσμών όπως θα φανεί παρακάτω.



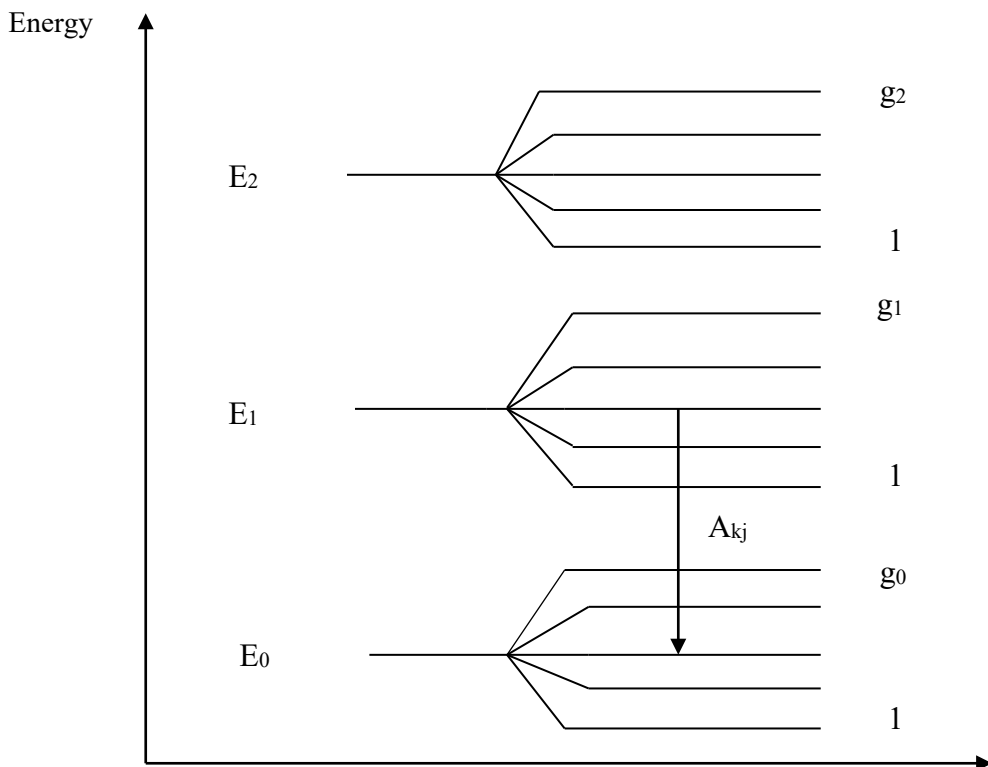
Σχήμα 1: Σχηματική απεικόνιση διέγερσης και αποδιέγερσης μεταξύ των ενεργειακών σταθμών του Ερβίου.

2.3 Φαινόμενο Stark Splitting

Με βάση τα προαναφερόμενα αναμένεται εκπομπή του Ερβίου σε ένα πολύ στενό εύρος ζώνης το οποίο καθορίζεται από την ενεργειακή διαφορά μεταξύ των αντίστοιχων ενεργειακών σταθμών. Μέσω της πειραματικής ανάλυσης του Ερβίου, έχει διαπιστωθεί ότι εκπέμπει σε ένα συνεχές ευρύ φάσμα μηκών κύματος. Εφόσον η ενεργειακή διαφορά της καθεμιάς στάθμης από την στάθμη E_0 αντιστοιχεί στο συγκεκριμένο μήκος κύματος, τίθεται ως ερώτημα πώς προκύπτει το ευρύτερο φάσμα εκπομπής. Η απάντηση είναι ότι η ύπαρξή του οφείλεται στο φαινόμενο stark splitting.

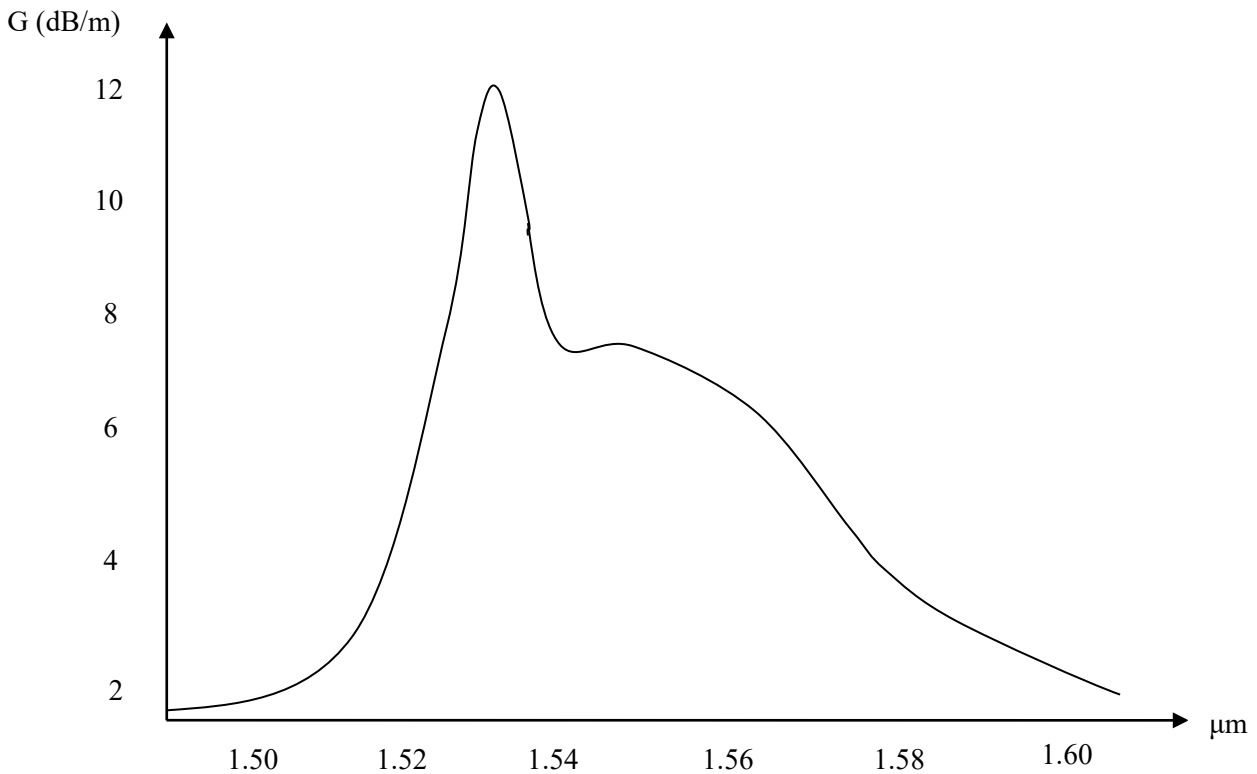
Ανάπτυξη και πειραματικός χαρακτηρισμός fiber laser

Ως φαινόμενο stark splitting χαρακτηρίζεται ο διαχωρισμός και η μετατόπιση των φασματικών γραμμών ενός ατόμου, λόγω της ύπαρξης στατικού ηλεκτρικού πεδίου λόγω της εμφύτευσης των ιόντων Ερβίου στο πλέγμα του γυαλιού. Κατά την έγχυση ιόντων Ερβίου στον πυρήνα του γυαλιού, το κρυσταλλικό πλέγμα του γυαλιού σε συνάρτηση με τα ιόντα Ερβίου δημιουργούν ηλεκτροστατικές δυνάμεις. Λόγω αυτής της επίδρασης, αλλάζει η μορφή της κάθε ενεργειακής στάθμης των ιόντων Ερβίου διασπώμενη σε πολλές μεγάλου εύρους τιμών. Λόγω της τροποποίησης που υφίσταται το πλέγμα του κρυστάλλου κάθε στάθμη έχει διαφορετική ενέργεια και διαφορετικό πλάτος [3]. Απόρροια αυτής της αλλαγής που δημιουργείται στις τρεις ενεργειακές στάθμες του Ερβίου, είναι η παραγωγή ενός ευρύτερου φάσματος μηκών κύματος γύρω από την περιοχή των 1550nm, λόγω των αποδιεγέρσεων που λαμβάνουν χώρα μεταξύ πολλών και διαφορετικών συνδυασμών που προκύπτουν από τις επιμέρους στάθμες (Σχήμα 2).



Σχήμα 2: Η διάσπαση των ενεργειακών σταθμών του Ερβίου σε πολλά επίπεδα, λόγω της ύπαρξης του φαινομένου stark splitting.

Το αποτέλεσμα της εκπομπής του Ερβίου το οποίο βρίσκεται εμφυτευμένο στον πυρήνα μίας ίνας εξαιτίας του φαινομένου stark splitting φαίνεται στο Σχήμα 3.



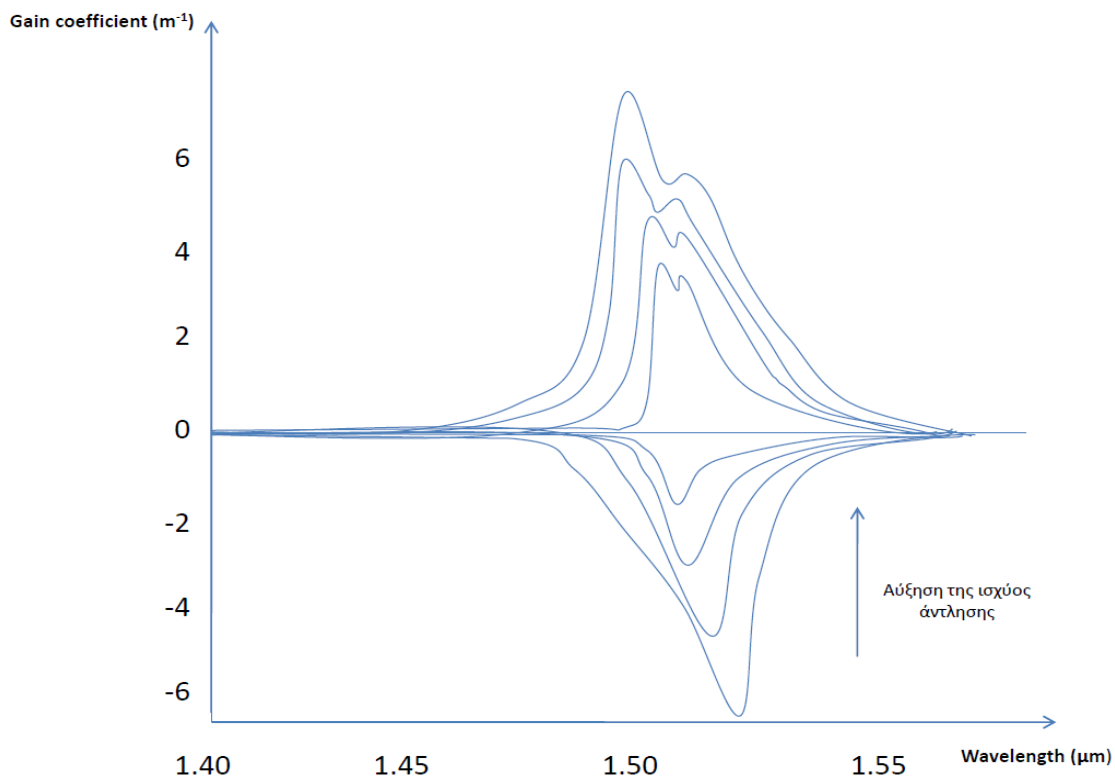
Σχήμα 3: Το φάσμα εκπομπής ίνας νοθευμένης με ιόντα Ερβίου.

2.4 Εξαναγκασμένη εκπομπή

Μέσω του φαινομένου της άντλησης μπορεί να επιτευχθεί αναστροφή πληθυσμών, δηλαδή η ύπαρξη των διεγερμένων ατόμων να είναι μεγαλύτερη από εκείνη των μη διεγερμένων. Η αναστροφή πληθυσμών μπορεί να οδηγήσει στην επικράτηση της εξαναγκασμένης εκπομπής αντί για αυθόρμητη εκπομπή φωτονίων από την ενεργειακή στάθμη E_2 προς την ενεργειακή στάθμη E_0 . Αυτό είναι απόρροια του μικρού χρόνου ζωής των διεγερμένων ατόμων κατά την διάρκεια παραμονής τους στην ενεργειακή στάθμη E_1 , εν αντιθέσει με την μετάπτωση τους στην ενεργειακή στάθμη E_2 , όπου ο χρόνος ζωής τους είναι πολύ μεγαλύτερος. Κατά αυτό τον τρόπο τα άτομα είναι διεγερμένα και συσσωρευμένα στη στάθμη E_2 . Η αποδιέγερση τους δημιουργεί εκπομπή στη ζώνη των 1550nm. Κάποια από τα αυθόρμητα εκπεμπόμενα φωτόνια αποδιεγείρουν μέσω της εξαναγκασμένης εκπομπής άλλα άτομα με αποτέλεσμα να αυξάνεται η ισχύς εκπομπής. Σε περίπτωση όπου ένα οπτικό σήμα στην είσοδο της ίνας είναι χαμηλής ισχύος, μέσω της εξαναγκασμένης εκπομπής είναι εφικτό να αυξήσει την ισχύ του με αποτέλεσμα την οπτική ενίσχυση. Στην οπτική ενίσχυση το φαινόμενο της αυθόρμητης εκπομπής που συνυπάρχει αποτελεί θόρυβο για το ενισχυμένο σήμα, ο οποίος είναι ευρέως γνωστός ως θόρυβος ASE (Amplified Spontaneous Emission).

2.5 Επίδραση επιπέδου ισχύος άντλησης

Αρχικά, για να κατασκευαστεί ένας οπτικός ενισχυτής, θα πρέπει το επιλεγόμενο μήκος κύματος της άντλησης, να είναι διαθέσιμο από τις ήδη υπάρχουσες διόδους laser ημιαγωγών, οι οποίες είναι: 650,800,980 και 1490nm. Εν γένει, η περιοχή των 650nm δεν χρησιμοποιείται, λόγω του ότι στο συγκεκριμένο μήκος κύματος δεν προσφέρονται διόδοι laser υψηλής ισχύος, ενώ η περιοχή των 800nm δεν χρησιμοποιείται εξαιτίας της χαμηλής απορρόφησης που παρουσιάζει. Απόρροια των ανωτέρω, είναι ότι τα διαθέσιμα μήκη που απομένουν περιορίζονται στα 980 και 1490nm. Η περιοχή των 1490nm παρουσιάζει μία ιδιαιτερότητα, διότι η τιμή της περιοχής αυτής, βρίσκεται πολύ κοντά στη ζώνη των 1525-1560nm, την οποία καλούμαστε να ενισχύσουμε. Στην περιοχή των 980nm υπάρχουν δύο πλεονεκτήματα σε σχέση με την περιοχή των 1490nm. Αρχικά, ο θόρυβος που προκαλείται στην έξοδο των 980nm, είναι πολύ μικρότερος από εκείνον που προκαλείται στην περιοχή των 1490nm. Παράλληλα, υπάρχει μεγάλη απόσταση από την περιοχή που καλούμαστε να ενισχύσουμε και πρακτικά η σχεδίαση του συζεύκτη θα είναι απλούστερη στα 980nm. Μέσω του σχήματος 4 παρατηρούμε ότι για χαμηλά επίπεδα ισχύος οπτικής άντλησης το εισερχόμενο σήμα απορροφάται. Αντίθετα, με την σταδιακή αύξηση του επιπέδου ισχύος της οπτικής άντλησης επιτυγχάνεται ενίσχυση του εισερχόμενου σήματος. Μέσω αυτού προκύπτει ο λόγος αλληλεξάρτησης του επιπέδου ισχύος της οπτικής άντλησης συγκριτικά με το κέρδος απολαβής της ενίσχυσης. Ακολουθώντας την συγκεκριμένη διαδικασία, ώστε να προωθήσουμε ένα φωτόνιο προς την έξοδο και χρησιμοποιώντας μία πηγή η οποία παράγει ενέργεια στα 980nm, λόγω του ότι η διαφορά της ενεργειακής στάθμης E_0 με την ενεργειακή στάθμη E_2 αντιστοιχεί στα 1550nm, θα έχει ως αποτέλεσμα την έξοδο του φωτονίου και κατ' επέκταση την δημιουργία fiber laser.

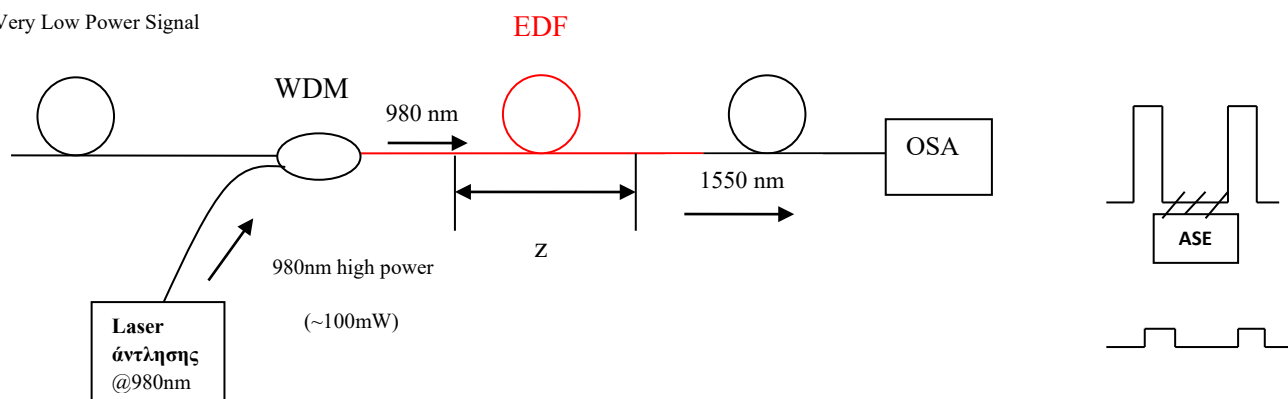


Σχήμα 4: Γραφική απεικόνιση της απολαβής ή απορρόφησης του Ερβίου σε συνάρτηση με την ισχύ άντλησης [5].

2.6 Οπτική ενίσχυση

Οι οπτικοί ενισχυτές αποτελούν μία νέα αν και ώριμη πλέον τεχνολογία. Πριν την εφαρμογή τους, για την αναγέννηση και την ενίσχυση ενός εξασθενημένου σήματος χρησιμοποιούνταν RF διατάξεις. Λόγω αυτού, γεννήθηκε η ανάγκη ενίσχυσης ενός εξασθενημένου σήματος στο οπτικό φάσμα, δηλαδή χωρίς να καθίσταται αναγκαία η μετατροπή του σήματος σε ηλεκτρικό. Απόρροια αυτού, ήταν και η αύξηση της χωρητικότητας των ζεύξεων, συμπεριλαμβανομένων και των πλεονεκτημάτων που διαθέτει ένα αμιγώς οπτικό δίκτυο. Εν προκειμένω, αμιγώς οπτικό δίκτυο ονομάζουμε το δίκτυο στο οποίο καθίσταται αναγκαία η χρήση δύο μετατροπών ανάμεσα στον πομπό και στον δέκτη. Το πλεονέκτημα που διαθέτουν οι συγκεκριμένοι μετατροπείς είναι, ότι χρησιμοποιούνται για την διακίνηση της πληροφορίας μόνο εντός ενός συγκεκριμένου κόμβου. Επίσης, ένας ακόμη σημαντικός παράγοντας για την δημιουργία οπτικών ενισχυτών, ήταν η ανάγκη να αποστέλλονται ταυτόχρονα πολλές ροές με bit (bitstream) ανά μήκος κύματος. Επακόλουθο αυτού, ήταν η δημιουργία οπτικών ενισχυτών ευρείας ζώνης. Είναι σημαντικό να αναφέρουμε, ότι οι οπτικοί ενισχυτές χωρίζονται σε δύο κατηγορίες: στους ενισχυτές διόδου laser και στους ενισχυτές προσμίξεων. Η διαδικασία ενίσχυσης ενός εξασθενημένου τηλεπικοινωνιακού σήματος μέσω ενός οπτικού ενισχυτή EDFA απεικονίζεται αναλυτικά στο σχήμα 5. Αρχικά, το εξασθενημένο σήμα χαμηλής ισχύος των 1550nm εισέρχεται στην οπτική ίνα. Εν συνεχεία, βρίσκεται τοποθετημένος ένας coupler WDM κατά μήκος της οπτικής ίνας, ο οποίος είναι συνδεδεμένος μέσω ενός laser άντλησης με εκπομπή στα 980nm και χαρακτηρίζεται από υψηλή ισχύ της τάξης των 100 mW. Να τονισθεί ότι ο συγκεκριμένος coupler είναι ιδιαίτερος, διότι αποτελείται από δύο διαφορετικές ίνες (στα 1550nm και στα 980nm), ενώ ένας τυπικός coupler αποτελείται από δύο όμοιες ίνες (π.χ. στα 1550nm). Αυτό έχει ως αποτέλεσμα στην έξοδο του coupler να εμφανίζονται δύο διαφορετικά μήκη κύματος. Το τμήμα της νοθευμένης ίνας (EDF) χρησιμοποιείται, ώστε να αντλήσει τα ιόντα Ερβίου που βρίσκονται εντός της ίνας με τον μηχανισμό που αναφέραμε παραπάνω, με σκοπό να τα διεγείρει. Το μήκος κύματος των 1550nm αποτελείται από λίγα φωτόνια, τα οποία μόλις εισέλθουν στο ντοπαρισμένο τμήμα της ίνας συναντούν πολλούς διεγερμένους φορείς. Με την σειρά τους οι διεγερμένοι φορείς εξαναγκάζονται σε αποδιέγερση από τα εισερχόμενα φωτόνια, με αποτέλεσμα τα τελευταία να πολλαπλασιάζονται. Είναι σημαντικό να αναφερθεί ότι σε περίπτωση που δεν υπάρχει φως, μέσω της αυθόρμητης εκπομπής παράγεται θόρυβος (ASE), με αποτέλεσμα στην έξοδο να λαμβάνουμε ένα ευρύ φάσμα οπτικής ισχύος [6].

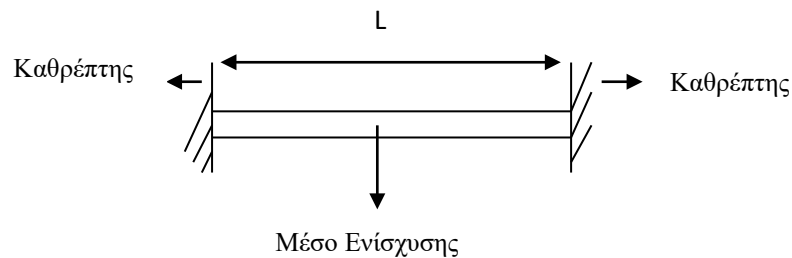
Very Low Power Signal



Σχήμα 5: Διάγραμμα λειτουργίας ενός οπτικού ενισχυτή (EDFA).

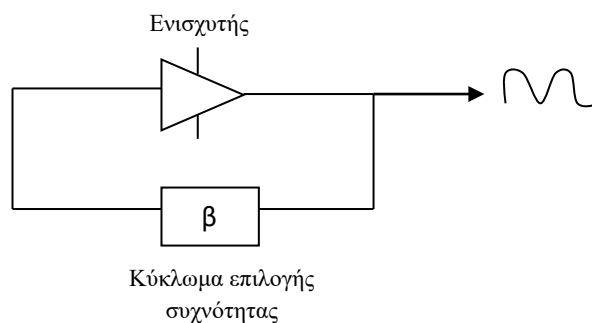
3 Ανάλυση και τοπολογίες EDFL

Τα θεμελιώδη στοιχεία της δομής ενός Laser είναι το μέσο ενίσχυσης και η κοιλότητα. Το κλασικό Laser αποτελείται από δύο καθρέπτες, οι οποίοι απέχουν μεταξύ τους απόσταση $L = \frac{\lambda}{2n} * i$, όπου $i=1,2,..$ και n ο δείκτης διάθλασης του μέσου, ενώ βασικό στοιχείο της δομής είναι το μέσο ενίσχυσης. Απαραίτητη προϋπόθεση για την επίτευξη της ενίσχυσης είναι η ύπαρξη άντλησης και αναστροφή πληθυσμών στο τμήμα του μέσου ενίσχυσης. Στην πράξη για την δημιουργία ενός Laser χρειαζόμαστε μία κοιλότητα και δύο κάτοπτρα τοποθετημένα στις δύο πλευρές της κοιλότητας, ώστε να εγκλωβιστεί το φως στο εσωτερικό της κοιλότητας πραγματοποιώντας συνεχείς διαδρομές. Αποτέλεσμα αυτής της διαδικασίας είναι η συνεχής συλλογή φωτονίων, λόγω της οποίας αυξάνεται εκθετικά το επίπεδο ισχύος του Laser. Το κέρδος που προκύπτει μέσω της εξαναγκασμένης εκπομπής φωτονίων μεταξύ των δύο κατόπτρων είναι: $g = a + \frac{1}{2L} * \ln \frac{1}{r_1 r_2}$, όπου a είναι η μέση απόσβεση/cm, L το μήκος μεταξύ των δύο κατόπτρων και r οι ανακλαστικότητες των κατόπτρων.



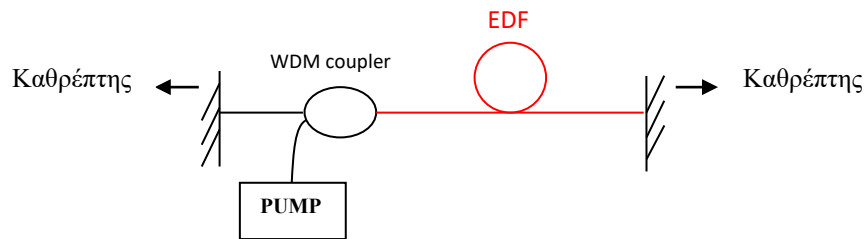
Σχήμα 6: Βασική δομή ενός Laser

Η βασική δομή λειτουργίας ενός EDFL ταυτίζεται με την αρχή λειτουργίας ενός ταλαντωτή. Εν γένει στην βασική δομή ενός ταλαντωτή ανήκει ένας ενισχυτής και ένα κύκλωμα επιλογής συχνότητας. Είναι σημαντικό να αναφερθεί ότι το συγκεκριμένο κύκλωμα διαθέτει μόνο έξοδο και όχι είσοδο. Παραλληλίζεται άμεσα με την βασική δομή ενός EDFL, διότι το pump είναι η τροφοδοσία του κυκλώματος, όπως ακριβώς στη βασική δομή του ταλαντωτή, όπου ο ενισχυτής λαμβάνει τροφοδοσία. Κατά την έξοδο του ενισχυτή λαμβάνουμε ένα ημιτονοειδές σήμα, το οποίο καθορίζεται από το κύκλωμα επιλογής συχνότητας (β). Παράλληλα ως κύκλωμα επιλογής συχνότητας σε έναν ενισχυτή EDFL μπορεί να χαρακτηριστεί η απόσταση που απέχουν τα δύο κάτοπτρα μεταξύ τους.



Σχήμα 7: Βασική δομή ενός ταλαντωτή

Βασικό μέρος της παρούσας εργασίας όπου χρήζει ανάλυσης είναι η δομή ενός EDFL. Το βασικό ενεργό υλικό ενός Laser περιλαμβάνει πάντοτε μία ίνα νοθευμένη με σπάνιες γαίες. Στο πειραματικό μέρος της εργασίας θα χρησιμοποιήσουμε οπτική ίνα νοθευμένη με Έρβιο (110 dB/m). Πρώτο μέρος της προαναφερόμενης δομής είναι η ίνα Ερβίου (EDF) την οποία αντλούμε συνδέοντας στο ένα άκρο της ίνας έναν συζεύκτη (coupler) και μία πηγή άντλησης καταλήγοντας σε ένα κάτοπτρο και στο άλλο άκρο της τοποθετούμε το δεύτερο κάτοπτρο. Για να πετύχουμε παραγωγή φωτός στην έξοδο θα πρέπει ο καθρέπτης εξόδου να έχει μικρότερη ανακλαστικότητα από αυτή του καθρέπτη εισόδου, δηλαδή $R_2 < R_1$. Αυτό συνεπάγεται ότι εάν ο καθρέπτης που έχουμε επιλέξει να τοποθετήσουμε στην είσοδο έχει ανακλαστικότητα 100%, τότε ο καθρέπτης που θα τοποθετήσουμε στην έξοδο θα πρέπει να έχει ανακλαστικότητα π.χ. 25 ή 50%.



Σχήμα 8: Βασική δομή ενός EDFL

Τέλος, είναι σημαντικό να αναφέρουμε ότι στην παρούσα εργασία μας απασχολεί η μελέτη η υλοποίηση EDFL χαμηλής ισχύος. Διαφοροποιούνται αρκετά από τα EDFL υψηλής ισχύος (της τάξεως των KW και MW) και βρίσκουν εφαρμογή σε βιομηχανικό και πρόσφατα αμυντικό επίπεδο. Σημαντική διαφορά είναι ότι η άντληση στην περίπτωση των EDFL υψηλής ισχύος δεν πραγματοποιείται μέσα από τον πυρήνα, αλλά μέσα από το cladding της ίνας και είναι αρκετά περίπλοκη διαδικασία. Αυτό συμβαίνει, διότι ο πυρήνας της ίνας (~ 10 μm) δεν αντέχει τόσο υψηλά επίπεδα ισχύος, ενώ το cladding της ίνας έχει μεγαλύτερη διάμετρο (~ 125 μm) εν αντιθέσει με τον πυρήνα της ίνας, οπότε διαθέτει μεγαλύτερη αντοχή. Λόγω αυτού είναι εφικτή η αύξηση της ισχύος σε ένα μεγάλο ποσοστό, χρησιμοποιώντας υψηλότερα επίπεδα άντλησης με αποτέλεσμα το κέρδος που παράγεται να είναι μεγαλύτερο. Τέλος, είναι σημαντικό να αναφέρουμε ότι στα fiber laser υψηλής ισχύος χρησιμοποιούνται πολυπύρηνες νοθευμένες ίνες.

3.1 Τοπολογίες EDFL

Οι τοπολογίες των EDFL ουσιαστικά υλοποιούν την βασική δομή με ποικίλους τρόπους. Αρχικά, η βασική τοπολογία στην οποία θα αναφερθούμε είναι η τοπολογία οπτικής κοιλότητας (cavity). Εν συνεχεία, θα περιγράψουμε εκτενώς τρεις παραλλαγές της προαναφερθείσας τοπολογίας και θα κλείσουμε το παρών κεφάλαιο με την περιγραφή της τοπολογίας δακτυλίου (ring).

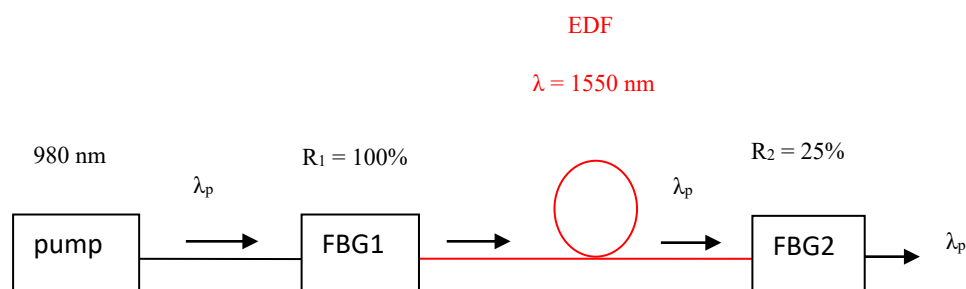
3.1.1 Τοπολογία οπτικής κοιλότητας (cavity)

Η πρώτη και βασική τοπολογία που θα περιγράψουμε είναι η τοπολογία κοιλότητας. Στη συγκεκριμένη περίπτωση θα χρησιμοποιήσουμε FBG αντί για καθρέπτες (Σχήμα 10). Αρχικά, τοποθετούμε μία πηγή άντλησης (980 nm), έπειτα συνδέουμε το πρώτο FBG το οποίο χαρακτηρίζεται με 100% ανακλαστικότητα (σχήμα 10) και βρίσκεται σε σειρά συνδεδεμένο με την ίνα Ερβίου (EDF) και τέλος τοποθετούμε το δεύτερο FBG το οποίο χαρακτηρίζεται με 25% ανακλαστικότητα (σχήμα 10). Μέσω της καμπύλης χαρακτηρισμού του FBG παρατηρούμε ότι το

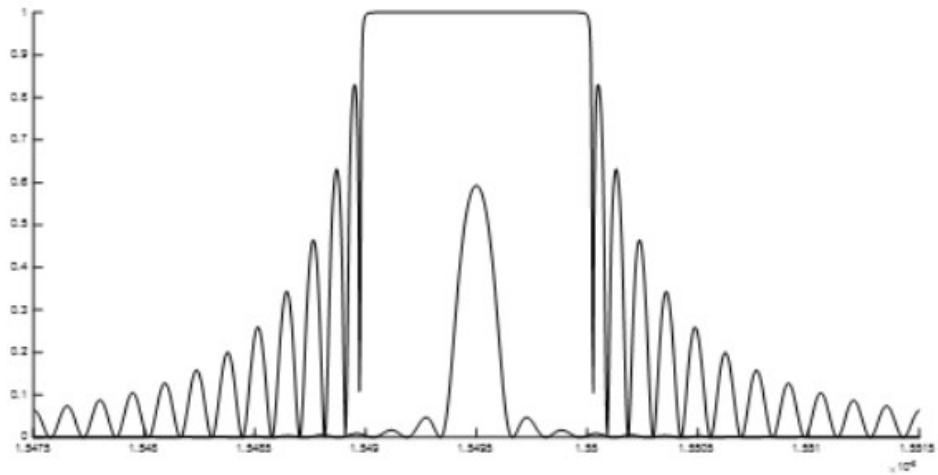
κεντρικό μήκος κύματος (λ_0) βρίσκεται γύρω από τα 1550 nm και έχει εύρος ζώνης μικρότερο του 1 nm.

Πρακτικά, το FBG ανακλά μία πολύ στενή περιοχή γύρω από τα 1550 nm, με αποτέλεσμα να επιτρέπει το πέρασμα των 980 nm χωρίς να τα ανακλά προς τα πίσω. Αναλυτικότερα, το φως που εισέρχεται από την πηγή άντλησης με μήκος κύματος λ_p περνά μέσα από το πρώτο FBG, εν συνεχεία ακολουθεί την διαδρομή διαμέσου της ίνας Έρβιου και τέλος εισέρχεται στο δεύτερο FBG από όπου θα εξέλθει (Σχήμα 9).

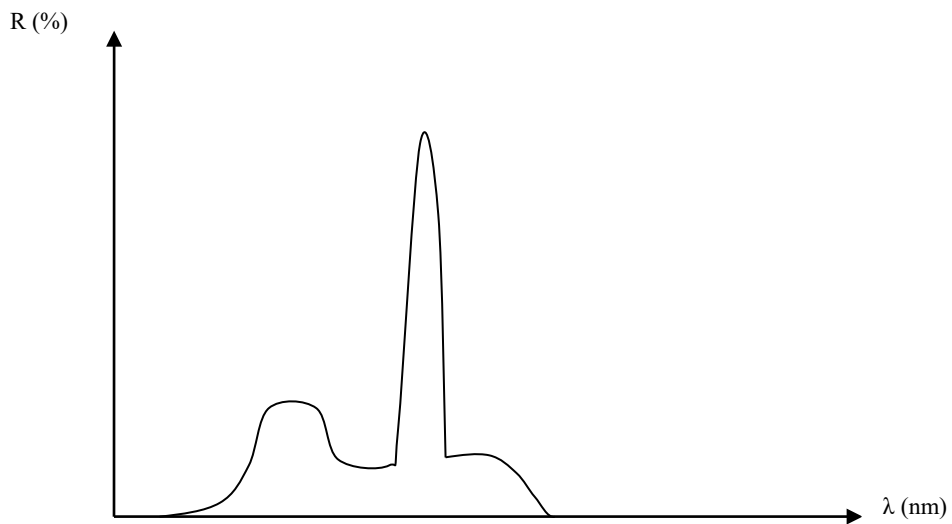
Μέσω της ίνας Έρβιου παράγεται το μήκος κύματος το οποίο καθορίζεται από τα gratings, παρόλο που στην αρχή εξέρχεται όλο το φάσμα του θορύβου (ASE). Εν συνεχεία λόγω της συνεχούς ενίσχυσης των φωτονίων μεταξύ των δύο FBG και της ίνας EDF, ενισχύεται μόνο το ανακλώμενο τμήμα όπου αντιστοιχεί στα 1550 nm. Απόρροια των προαναφερόμενων, είναι η λήψη όλου του φάσματος σε χαμηλή ισχύ εκτός από το τμήμα που βρίσκονται τα δύο gratings το οποίο διαφοροποιείται, λαμβάνοντας ένα πολύ μεγάλο και λεπτό peak μεγάλης ισχύος στην έξοδο (Σχήμα 11). Είναι γεγονός ότι το μήκος κύματος λ_p δεν περιορίζει την ταυτόχρονη συνύπαρξή του με το μήκος κύματος που μας αφορά. Χωρίς να είναι απαραίτητο, η απομόνωση του καθίσταται εφικτή χρησιμοποιώντας έναν coupler ή έναν κυκλοφορητή. Η ισχύς που θα λάβουμε στην έξοδο εξαρτάται από το ποσοστό ανακλαστικότητας το οποίο εισέρχεται στην κοιλότητα. Εν το προκειμένω το FBG1 επιστρέφει εντός της κοιλότητας ποσοστό ισχύος 100%, ενώ το FBG2 επιστρέφει ποσοστό 25% επιτρέποντας το 75% του συνολικού ποσοστού της ισχύος να εξέλθει από την κοιλότητα. Εν γένει, το FBG2 είναι στενού εύρους ζώνης (narrow), ενώ το FBG1 είναι μεγάλου εύρους ζώνης (broad). Πρακτικά, όσο πιο στενό εύρος ζώνης διαθέτει το FBG2, τόσο πιο στενό θα είναι και το peak που θα λάβουμε στην έξοδο. Είναι γεγονός ότι η μεγάλη ευαισθησία των FBG καθιστά ανέφικτη την δημιουργία ενός πολύ στενού και με μεγάλη ανακλαστικότητα FBG στην μία πλευρά, διότι μπορεί εύκολα να μετατοπιστεί είτε προς την αριστερή είτε προς την δεξιά πλευρά. Γι' αυτό το λόγο επιλέγουμε κατά κανόνα να τοποθετήσουμε στην αρχή έναν ανακλαστήρα μεγάλου εύρους ζώνης, διότι προσφέρει ανακλαστικότητα 100%. Παράλληλα, μας προσφέρει σταθερότητα στην λήψη του στενού εύρους ζώνης κατά την έξοδο, σε περίπτωση που μετατοπιστεί εξαιτίας της υψηλής ευαισθησίας του δεύτερου ανακλαστήρα. Εάν καταφέρουμε να διατηρήσουμε το εύρος ζώνης του FBG2 εντός της ζώνης του FBG1, στην έξοδο θα λάβουμε το εύρος ζώνης του FBG2.



Σχήμα 9: Σχηματική απεικόνιση τοπολογίας κοιλότητας



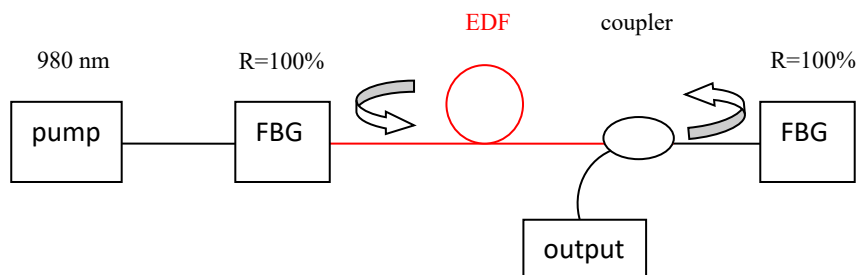
Σχήμα 10: Φασματική απόκριση ανακλαστικότητας FBG1 (εξωτερική καμπύλη) μεγάλου εύρους ζώνης ~ 1.2nm και FBG2 (εσωτερική καμπύλη) μικρού εύρους ζώνης.



Σχήμα 11: Φάσμα εξόδου EDFL σε τοπολογία κοιλότητας.

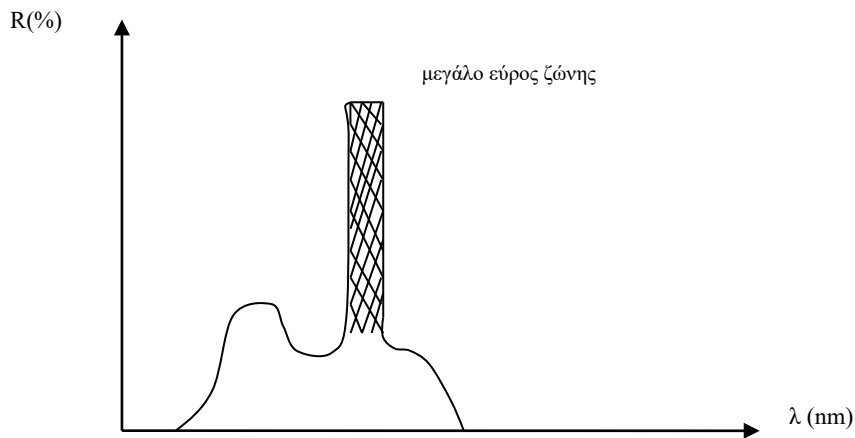
3.1.2 Πρώτη εκδοχή τοπολογίας οπτικής κοιλότητας

Στην περίπτωση που διαθέτουμε δύο πανομοιότυπα FBG τύπου 1 (R= 100%) βασιζόμαστε στην ακόλουθη τοπολογία (σχήμα 12):



Σχήμα 12: Σχηματική απεικόνιση πρώτης παραλλαγής της τοπολογίας κοιλότητας.

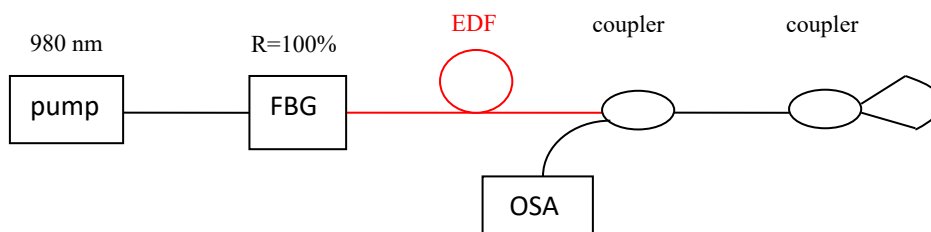
Σε περίπτωση που χρησιμοποιήσουμε τα δύο FBG με ανακλαστικότητα 100% σε σειρά, δεν θα λάβουμε σήμα στην έξοδο, διότι ότι στείλουμε θα επιστρέψει πίσω στην κοιλότητα. Για αυτό το λόγο είναι αναγκαία η τοποθέτηση ενός συζεύκτη (coupler) μέσα στην κοιλότητα και πριν από το FBG της εξόδου. Η χρήση του coupler αποφέρει στο κύκλωμα δύο πλεονεκτήματα. Πρώτο και βασικό πλεονέκτημα σε περίπτωση που επιλέξουμε συζεύκτη 50-50, είναι η επιστροφή του μισού ποσοστού ισχύος εντός της κοιλότητας, ενώ το υπόλοιπο ποσοστό ισχύος εκπέμπεται στην έξοδο. Δεύτερο και εξίσου βασικό πλεονέκτημα είναι η προστασία της πηγής από τα ανακλώμενα σήματα. Στην περίπτωση που επιλέξουμε συζεύκτη 90-10, το 90% της ισχύος θα κυκλοφορεί εντός της κοιλότητας, ενώ στην έξοδο θα λάβουμε μόνο το 10% της συνολικής ισχύος. Η επιλογή του coupler εξαρτάται άμεσα από την χρήση της τοπολογίας EDFL. Σε περίπτωση όπου η τοπολογία θα χρησιμοποιηθεί εργαστηριακά και αφορά την μελέτη του φάσματος που θα λάβουμε στην έξοδο του EDFL, η επιλογή του coupler 90-10 μας επιτρέπει να δούμε την έξοδο στον OSA. Αντίθετα, στην περίπτωση όπου θέλουμε να χρησιμοποιήσουμε σε ένα τηλεπικοινωνιακό δίκτυο την συγκεκριμένη τοπολογία, θα πρέπει μέσω υπολογισμών να επιλέξουμε ποιος συζεύκτης μας εξυπηρετεί. Πρακτικά, το εύρος ζώνης που περιμένουμε να λάβουμε στην έξοδο θα είναι τόσο μεγάλο όσο και το εύρος του FBG (σχήμα 14). Είναι σημαντικό να αναφέρουμε ότι εξαιτίας του coupler προκύπτει απώλεια ισχύος της τάξης των -3 dB. Αυτό συνεπάγεται ότι σε περίπτωση που η ίνα EDF δεν έχει κέρδος τουλάχιστον 3 dB, ο EDFL δεν θα είναι λειτουργικός. Η συγκεκριμένη τοπολογία αντικαθιστά το FBG χαμηλής ισχύος της πρώτης τοπολογίας (σχήμα 9).



Σχήμα 13: Εκτιμώμενο Φάσμα εξόδου EDFL σε τοπολογία κοιλότητας.

3.1.3 Δεύτερη εκδοχή τοπολογίας οπτικής κοιλότητας

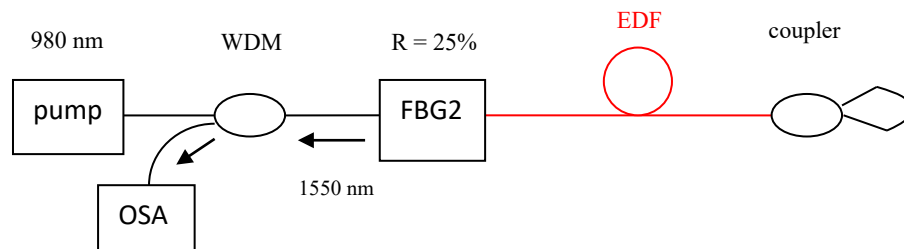
Στην συγκεκριμένη περίπτωση αφαιρούμε τον ανακλαστήρα της εξόδου και στη θέση του τοποθετούμε έναν συζεύκτη του οποίου τα άκρα της εξόδου του είναι βραχυκυκλωμένα (loop mirror) (σχήμα 14). Στην έξοδο περιμένουμε φασματική απόκριση ίση με τη φασματική απόκριση της πρώτης παραλλαγής (σχήμα 13).



Σχήμα 14: Σχηματική απεικόνιση δεύτερης παραλλαγής της τοπολογίας κοιλότητας.

3.1.4 Τρίτη εκδοχή τοπολογίας οπτικής κοιλότητας

Η δομή της συγκεκριμένης τοπολογίας διαφοροποιείται αρκετά συγκριτικά με τις τοπολογίες που αναλύσαμε στις δύο προηγούμενες παραλλαγές της τοπολογίας κοιλότητας. Αναλυτικότερα, σε σειρά με την πηγή άντλησης τοποθετούμε έναν συζεύκτη, εν συνεχεία έναν ανακλαστήρα στενού εύρους ζώνης ($R=25\%$) συνδεδεμένο σε σειρά με την ίνα Ερβίου και τέλος καταλήγουμε σε ένα loop mirror. Η έξοδος θα ληφθεί μέσω του coupler, ο οποίος θα είναι συνδεδεμένος με τον φασματικό αναλυτή (OSA) (σχήμα 15). Όπως και στην προαναφερθείσα τοπολογία, παρατηρούνται και εδώ απώλειες ισχύος. Η βασικότερη απώλεια ισχύος δημιουργείται εξαιτίας του ποσοστού της ανακλαστικότητας του FBG και ανέρχεται συνολικά στα -6 dB. Οπότε και σε αυτή την περίπτωση χρήζει ιδιαίτερης σημασίας το κέρδος του EDF. Ο loop mirror στη συγκεκριμένη τοπολογία λειτουργεί ως 100% ανακλαστήρας και κάνοντας χρήση ενός FBG, λαμβάνουμε σήμα στην έξοδο και ταυτόχρονα με την χρήση του WDM προστατεύουμε την πηγή από τυχόν ανακλάσεις. Βασικό πλεονέκτημα είναι η χρήση οποιουδήποτε FBG, χωρίς να επηρεάζει την προστασία της πηγής. Η συγκεκριμένη τοπολογία ταυτίζεται με την τοπολογία που περιγράψαμε στην υποπαράγραφο 3.1.1.1.



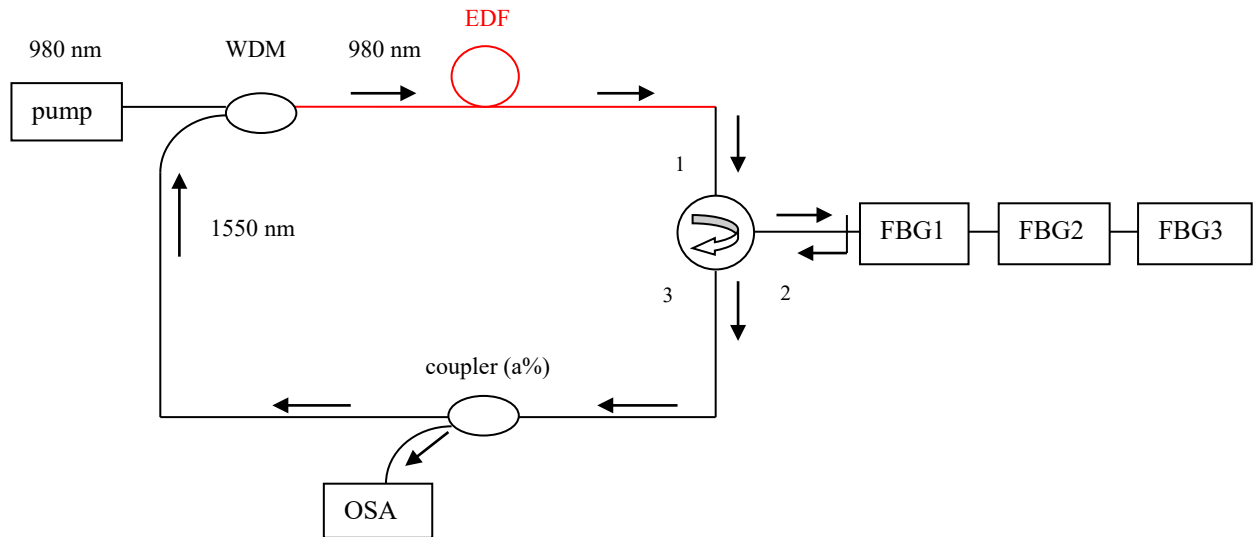
Σχήμα 15: Σχηματική απεικόνιση τρίτης παραλλαγής της τοπολογίας κοιλότητας.

3.1.5 Τοπολογία δακτυλίου (ring)

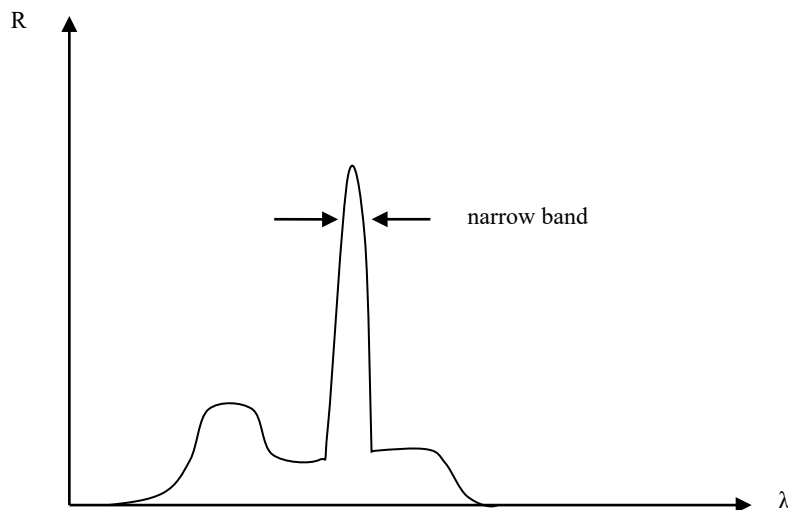
Η δεύτερη τοπολογία που θα περιγράψουμε είναι η τοπολογία δακτυλίου (ring). Η συγκεκριμένη δομή παρουσιάζει αρκετές ιδιαιτερότητες συγκριτικά με την τοπολογία κοιλότητας. Αρχικά, τοποθετούμε μια πηγή άντλησης σε σειρά συνδεδεμένη με τον coupler WDM. Εν συνεχεία, βρίσκεται σε σειρά συνδεδεμένη στο ένα άκρο με τον συζεύκτη και στο άλλο άκρο με έναν κυκλοφορητή, ο οποίος διαθέτει τρεις πόρτες. Στην δεύτερη πόρτα του κυκλοφορητή συνδέουμε ένα FBG, όπου στη συγκεκριμένη τοπολογία μπορεί να είναι οποιασδήποτε ανακλαστικότητας. Στην έξοδο του WDM συνδέουμε έναν coupler (-3 dB), ο οποίος καταλήγει σε σειρά συνδεδεμένος με την τρίτη πόρτα του κυκλοφορητή. Η ισχύς εξόδου λαμβάνεται από την έξοδο του προαναφερόμενου coupler και η φασματική απόκριση του EDFL απεικονίζεται στο σχήμα 17. Είναι σημαντικό να αναφέρουμε ότι λαμβάνοντας η ίνα Ερβίου τα 980 nm, μέσω της άντλησης διεγείρει τα ιόντα Ερβίου. Με τη σειρά τους τα αποδιεγερμένα ιόντα Ερβίου δημιουργούν το ευρύ φάσμα των ιόντων Ερβίου γύρω από τα 1550 nm, το οποίο αναλύσαμε εκτενώς στο προηγούμενο κεφάλαιο. Εν συνεχεία, λαμβάνοντας ο κυκλοφορητής από την πόρτα 1 το σήμα των 1550 nm, προωθεί το σήμα προς το FBG μέσω της πόρτας 2. Το FBG με την σειρά του ανακλά ένα συγκεκριμένο μήκος κύματος πίσω προς τον κυκλοφορητή το οποίο εισέρχεται από την πόρτα 2 και εξέρχεται από την πόρτα 3. Ένα μέρος του σήματος καταλήγει στην έξοδο του coupler, ενώ το υπόλοιπο εισέρχεται στον WDM ώστε να ενισχυθεί εκ νέου. Πραγματοποιώντας συνεχώς την προαναφερθείσα κυκλική πορεία, συλλέγει συνεχώς φως εξαιτίας του διεγερμένου EDF (σχήμα 16). Εν αντιθέσει με τις προηγούμενες τοπολογίες, στη συγκεκριμένη τοπολογία προκύπτουν αρκετές απώλειες ισχύος. Συγκεκριμένα, παρατηρείται απώλεια εξαιτίας της ανακλαστικότητας του

Ανάπτυξη και πειραματικός χαρακτηρισμός fiber laser

FBG ($R \leq 100\%$), του συζεύκτη εξόδου (-3dB), ενώ παράλληλα προκύπτει και μία τρίτη απώλεια λόγω της ύπαρξης του δεύτερου coupler. Αυτό συνεπάγεται ότι οι συνολικές απώλειες του συστήματος ανέρχονται τυπικά στα -6 dB και σε περίπτωση όπου το κέρδος της ίνας EDF δεν είναι μεγαλύτερο από 6 dB, ο EDFL θα είναι μη λειτουργικός (δεν ανάβει). Σε περίπτωση που επιλεγθεί FBG με ανακλαστικότητα 25% προστίθενται στις συνολικές απώλειες συν 6 dB, με αποτέλεσμα ο συνολικός αριθμός απωλειών να αυξάνεται σε -12 dB. Τέλος, είναι σημαντικό να αναφέρουμε ότι σε περίπτωση που θέλουμε να λάβουμε στην έξοδο τρία διαφορετικά μήκη κύματος, μπορούμε να το επιτύχουμε χρησιμοποιώντας τρία διαφορετικά FBG σε σειρά, όπως απεικονίζεται στο σχήμα 16.



Σχήμα 16: Σχηματική απεικόνιση τοπολογίας δακτυλίου.



Σχήμα 17: Φάσμα εξόδου EDFL με τοπολογία σε τοπολογία δακτυλίου.

4 Πειραματική ανάπτυξη και χαρακτηρισμός EDFL

4.1 Εισαγωγή

Σκοπός αυτού του κεφαλαίου είναι η εργαστηριακή ανάπτυξη και ο χαρακτηρισμός των τοπολογιών που αναφέραμε στο προηγούμενο κεφάλαιο. Αρχικά, θα μελετήσουμε την τοπολογία cavity για την δημιουργία EDFL χρησιμοποιώντας έναν εσωτερικό coupler. Εν συνεχεία, θα αναπτύξουμε μία παραλλαγή της πρώτης τοπολογίας, χρησιμοποιώντας δύο coupler, εκ των οποίων ο εξωτερικός coupler θα βραχυκυκλωθεί, δημιουργώντας κατ' αυτό τον τρόπο έναν loop mirror. Προχωρώντας στην ανάπτυξη της επόμενης τοπολογίας θα αφαιρέσουμε τον εσωτερικό coupler, διατηρώντας την ύπαρξη του loop mirror, αλλά τοποθετώντας εκτός της κοιλότητας έναν WDM coupler. Τέλος, θα μελετήσουμε την τοπολογία δακτυλίου, χρησιμοποιώντας ως βασικό στοιχείο ένα κυκλοφορητή, ο οποίος διαθέτει τρεις πόρτες, έναν coupler στο μέσο της διάταξης και έναν WDM coupler στο τέλος αυτής.

4.2 Επιλογή και παρουσίαση οργάνων και εξαρτημάτων για την πειραματική διάταξη

Σε αυτή την παράγραφο θα περιγράψουμε αναλυτικά τα όργανα αλλά και τα δομικά στοιχεία των διατάξεων που μελετήσαμε στο εργαστήριο.

4.2.1 Laser άντλησης στα 980 nm

Στην εικόνα 1 απεικονίζεται η εσωτερική δομή του Laser άντλησης στα 980 nm όπου θα χρησιμοποιήσουμε σε όλες τις βασικές διατάξεις της παρούσας εργασίας. Είναι σημαντικό να αναφέρουμε ότι το συγκεκριμένο laser είναι τύπου butterfly.



Εικόνα 1: Εσωτερική δομή Laser άντλησης στα 980 nm.

4.2.2 Controller θερμοκρασίας

Ο controller θερμοκρασίας που χρησιμοποιούμε έχει κατασκευασθεί από την εταιρεία thorlabs και το μοντέλο είναι TED200C (εικόνα 2). Ειδικότερα, η χρήση του controller είναι σημαντική, διότι μας βοηθά να ελέγχουμε την σταθερότητα της θερμοκρασίας του laser άντλησης, ώστε να μην μεταβάλλεται η ισχύς εξόδου όταν μεταβάλλεται η θερμοκρασία του. Τα τεχνικά χαρακτηριστικά του συγκεκριμένου controller θερμοκρασίας (αναφέρονται στο παράρτημα Α).



Εικόνα 2: Controller θερμοκρασίας [7].

4.2.3 Controller ρεύματος

Ο controller ρεύματος που χρησιμοποιούμε έχει κατασκευασθεί από την εταιρεία thorlabs και το μοντέλο είναι LDC210C (εικόνα 3). Ειδικότερα, το ρεύμα στο laser ημιαγωγού ελέγχεται χειροκίνητα και η εκπομπή του laser ξεκινά όταν ξεπεράσουμε το ρεύμα κατωφλίου (παράρτημα Α). Μέσω του ρεύματος ελέγχουμε την ισχύ εξόδου του Laser.



Εικόνα 3: Controller ρεύματος [7].

4.2.4 Coupler 50:50

Ο coupler 50:50 που χρησιμοποιούμε έχει κατασκευασθεί από την εταιρεία thorlabs (εικόνα 4). Ο συγκεκριμένος coupler χαρακτηρίζεται από απώλειες της τάξης των 3 dB και λειτουργεί με τρεις θύρες, ώστε να χαρακτηρίζεται ως combiner ή splitter.



Εικόνα 4: Coupler 50:50.

4.2.5 WDM coupler για σύζευξη 1550 nm & 980 nm

Ο WDM coupler που χρησιμοποιούμε έχει επίσης κατασκευασθεί από την εταιρεία thorlabs (εικόνα 5). Ο συγκεκριμένος τύπος coupler έχει ένα ιδιαίτερο χαρακτηριστικό, το οποίο χωρίζεται σε δύο διαφορετικές περιπτώσεις. Στην πρώτη περίπτωση εάν διοχετεύσουμε στην είσοδο δύο διαφορετικά μήκη κύματος, εν προκειμένω τα 980 nm και τα 1550 nm, στη μία έξοδο θα λάβουμε τα 980 nm, ενώ στη δεύτερη έξοδο θα λάβουμε τα 1550 nm. Στη δεύτερη περίπτωση χρησιμοποιούμε δύο διαφορετικές εισόδους (διπλοκατευθυντική ιδιότητα), όπου η κάθε μια λαμβάνει διαφορετικό

μήκος κύματος και διαθέτει μία έξοδο μέσω της οποίας διοχετεύονται και τα δύο μήκη κύματος μαζί.



Εικόνα 5: WDM coupler 1550 nm & 980nm [7].

4.2.6 Οπτικός κυκλοφορητής

Ένας οπτικός κυκλοφορητής-απομονωτής χρησιμοποιείται κατά κόρον σε ένα οπτικό σύστημα έτσι ώστε να αποφευχθούν τυχόν ανακλάσεις πίσω προς την πηγή, δημιουργώντας επιπλέον προσθήκες θορύβου στο παραγόμενο σήμα. Ο οπτικός κυκλοφορητής επιτρέπει στο φως να ταξιδέψει προς μία και μόνο κατεύθυνση. Ένα σήμα το οποίο θα εισαχθεί στο port 1 θα εξαχθεί από το port 2 με την ελάχιστη απώλεια, ενώ εν συνεχεία το σήμα που θα εισαχθεί στο port 2 θα εξαχθεί από το port 3, επίσης με την ελάχιστη απώλεια, ενώ αν εισέλθει στην πόρτα 3 να εξέλθει από την πόρτα 1. Ο οπτικός κυκλοφορητής που χρησιμοποιούμε έχει επίσης κατασκευασθεί από την εταιρεία thorlabs (εικόνα 6).



Εικόνα 6: Οπτικός κυκλοφορητής [7].

4.2.7 Optical power meter

Ένα από τα πλέον αναγκαία όργανα ελέγχου οπτικών συστημάτων είναι ο μετρητής οπτικής ισχύος (optical power meter – P.M.). Το P.M. εμπεριέχει στο εσωτερικό του μία φωτοδίοδο, η οποία ανιχνεύει φως γύρω από ένα συγκεκριμένο μήκος κύματος το οποίο ρυθμίζουμε χειροκίνητα. Το P.M. διαθέτει την επιλογή ανίχνευσης 4 διαφορετικών μηκών κύματος: 400nm, 1080nm, 1310nm, 1550nm και 1700nm, μέσω των οποίων καθορίζεται το εύρος ζώνης στο οποίο λαμβάνει ισχύ το όργανο. Στην πράξη χρησιμοποιείται για να ελέγχεται η ισχύς στην έξοδο της πηγής μετάδοσης ή η ισχύς στην έξοδο του δέκτη. Η οπτική ισχύς μετριέται με το P.M. συνδεδεμένο με την οπτική ίνα του συστήματος. Η ισχύς μπορεί να μετρηθεί σε mW ή dBm. Το P.M. που χρησιμοποιούμε έχει κατασκευασθεί από την εταιρεία thorlabs (εικόνα 7).



Εικόνα 7: Optical power meter [7]

4.2.8 Optical spectrum analyzer (OSA)

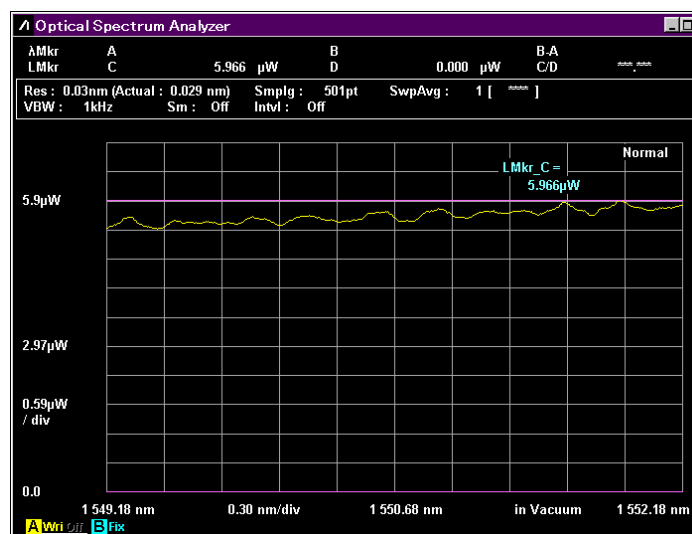
Ο οπτικός αναλυτής φάσματος έχει σχεδιαστεί, ώστε να μετρά την συνολική κατανομή ισχύος σε ένα οπτικό σύστημα. Συγκεκριμένα, στον άξονα y απεικονίζεται η ισχύς, ενώ στον άξονα x απεικονίζεται το μήκος κύματος. Με χρήση του πλήκτρου “Span” καθορίζουμε το εύρος σάρωσης των μηκών κύματος, ενώ με το πλήκτρο “Res” καθορίζουμε το resolution bandwidth, το οποίο αντιστοιχεί στο στοιχειώδες εύρος ζώνης και καθορίζει το εύρος ζώνης κάθε μήκους κύματος, το οποίο ανήκει στη φασματική καμπύλη απόκρισης του εκάστοτε οπτικού συστήματος. Όσο πιο μικρό ορίσουμε το resolution bandwidth τόσο ευκρινέστερη καθίσταται η μέτρηση του οπτικού φάσματος. Επίσης, καθίσταται εφικτή η αλλαγή της κλίμακας ισχύος από γραμμική σε λογαριθμική και το αντίστροφο. Ο οπτικός αναλυτής φάσματος που χρησιμοποιούμε στο εργαστήριο έχει κατασκευασθεί από την εταιρεία Anritsu, το μοντέλο είναι MS9740A (εικόνα 8) και διαθέτει εύρος ανάγνωσης σήματος από 600 nm έως 1750 nm. Είναι σημαντικό να αναφερθεί ότι διαθέτει υψηλής ταχύτητας σαρωτή κυματομορφών, ενώ η επεξεργασία της μέτρησης του φάσματος ανέρχεται στα 0.2 sec/ 5 nm. Επίσης, διαθέτει 8 διαφορετικά μενού ανάλυσης: LD-Module, DFB-LD, FP-LD, LED, PMD, WDM, Opt. Amp και Opt. Amp (Multi-channel). Τέλος, είναι εφικτή η μεταφορά των δεδομένων προς εξωτερική συσκευή η οποία διαθέτει θύρα usb.



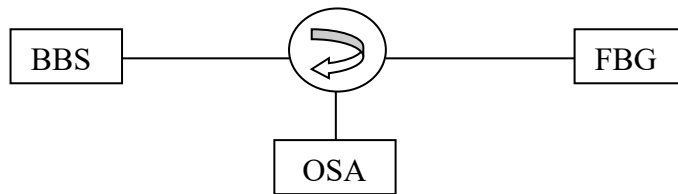
Εικόνα 8: Optical Spectrum Analyzer [8]

4.2.9 Χαρακτηρισμός των διαθέσιμων FBG

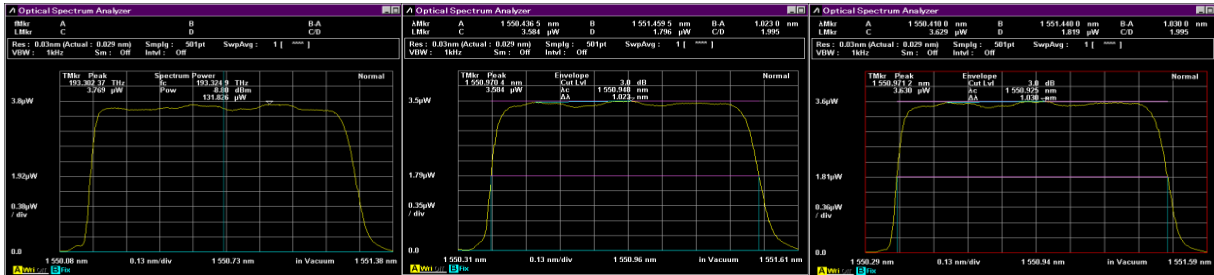
Χαρακτηρίσαμε τα τρία FBG που διαθέτουμε στο εργαστήριο, με την βοήθεια της διάταξης που απεικονίζεται στο σχήμα 18. Εν συνεχεία, η ισχύς που στείλαμε στα τρία gratings απεικονίζεται στη εικόνα 9, ενώ το reflection των τριών gratings απεικονίζεται στην εικόνα 10.



Εικόνα 9: Καμπύλη ισχύος εξόδου της BBS.

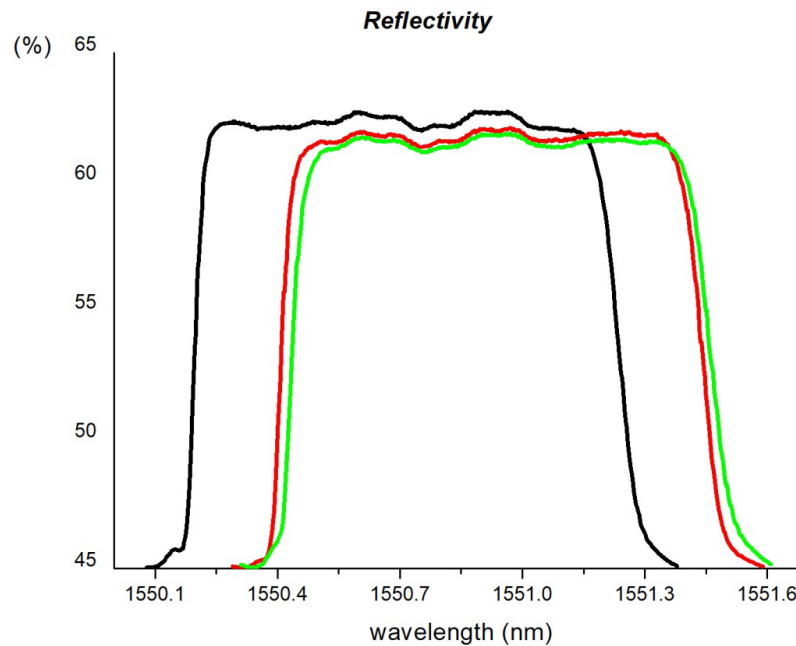


Σχήμα 18: Διάταξη μέτρησης φασματικής απόκρισης των FBG του εργαστηρίου.



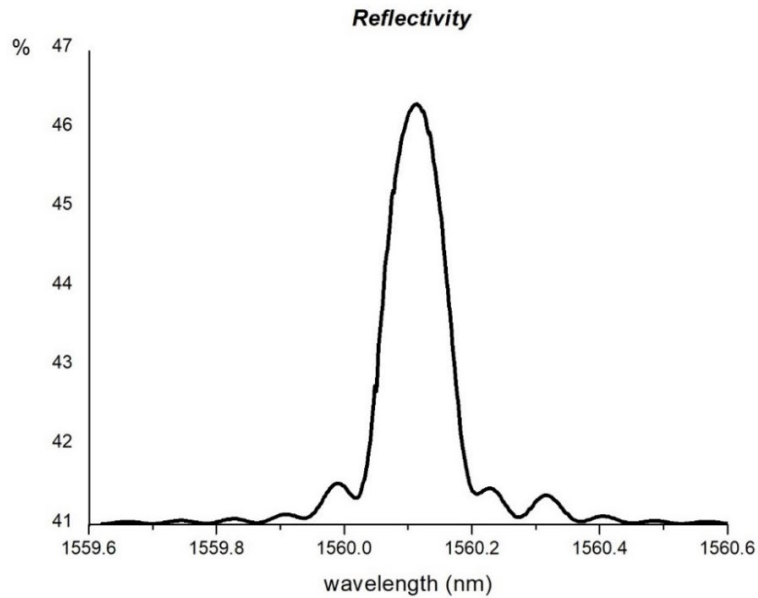
Εικόνα 10: Στιγμιότυπο από τον OSA της φασματικής ισχύος ανάκλασης των FBG 1,2 & 3.

Στο σχήμα 19 απεικονίζονται συγκεντρωτικά και οι καμπύλες της ανακλαστικότητας των τριών FBG, τα οποία προκύπτουν διαιρώντας την ισχύ την οποία λάβαμε, με την ισχύ την οποία στείλαμε. Αναλυτικότερα, οι καμπύλες αντιστοιχούν βάσει χρώματος σε κάθε FBG ως εξής: FBG1 (μαύρη καμπύλη), FBG2 (κόκκινη καμπύλη) και FBG3 (πράσινη καμπύλη). Παρατηρούμε ότι η καμπύλη ανακλαστικότητας του FBG2 και του FBG3 σχεδόν ταυτίζονται.



Σχήμα 19: Συγκεντρωτική απεικόνιση των καμπυλών ανακλαστικότητας των FBG 1, 2 & 3.

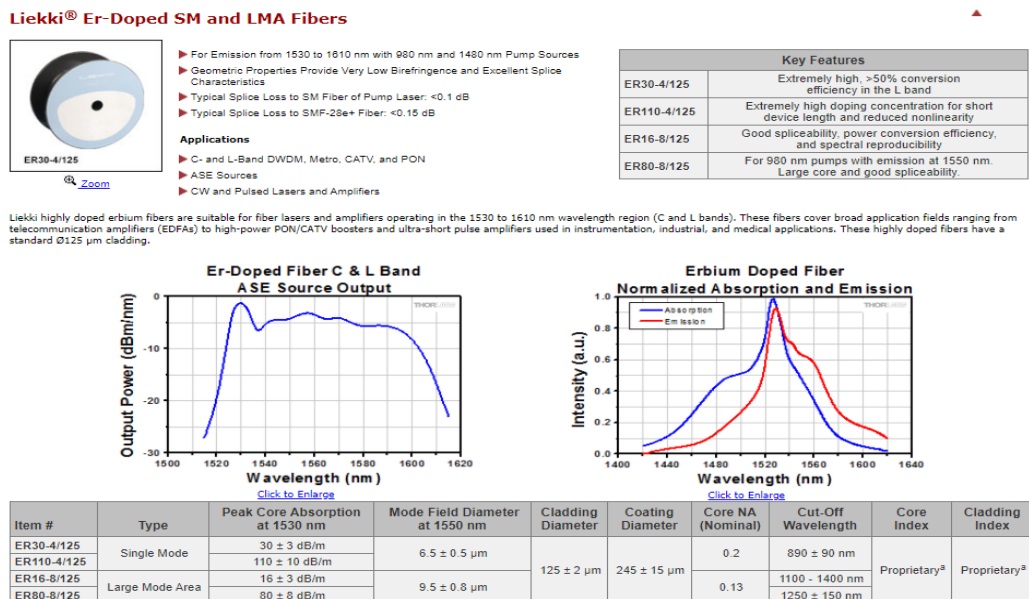
Ο χαρακτηρισμός ενός επιπλέον FBG στενού εύρους το οποίο διατίθεται στο εργαστήριο πραγματοποιήθηκε κάνοντας χρήση της διάταξης, η οποία απεικονίζεται στο σχήμα 18. Η ισχύς που στείλαμε στο grating, η μέτρηση της οποίας καταγράφηκε πριν τοποθετηθεί το FBG στην τοπολογία, απεικονίζεται στην εικόνα 9, ενώ η καμπύλη ανακλαστικότητας του προαναφερθέντος grating απεικονίζεται στο σχήμα 20.



Σχήμα 20: Καμπύλη ισχύος του FBG 4.

4.2.10 Ίνα Ερβίου

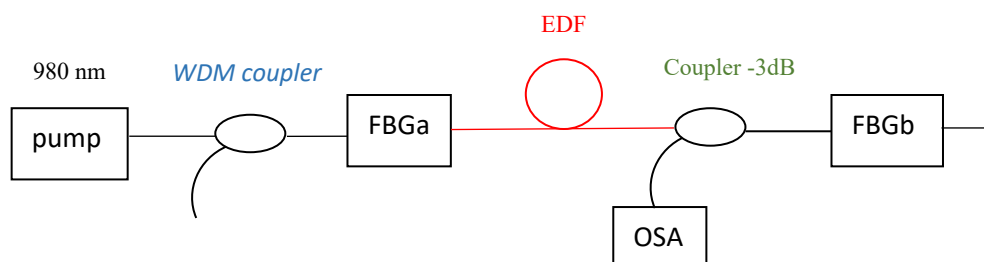
Η ίνα Ερβίου που χρησιμοποιούμε έχει κατασκευασθεί από την εταιρεία nLight, είναι βαριά νοθευμένη ίνα με ισοδύναμη απορρόφηση διέλευσης χωρίς άντληση 110 dB/m και τα τεχνικά χαρακτηριστικά της απεικονίζονται στη εικόνα 11.



Εικόνα 11: Τεχνικά χαρακτηριστικά της ίνας Ερβίου [7].

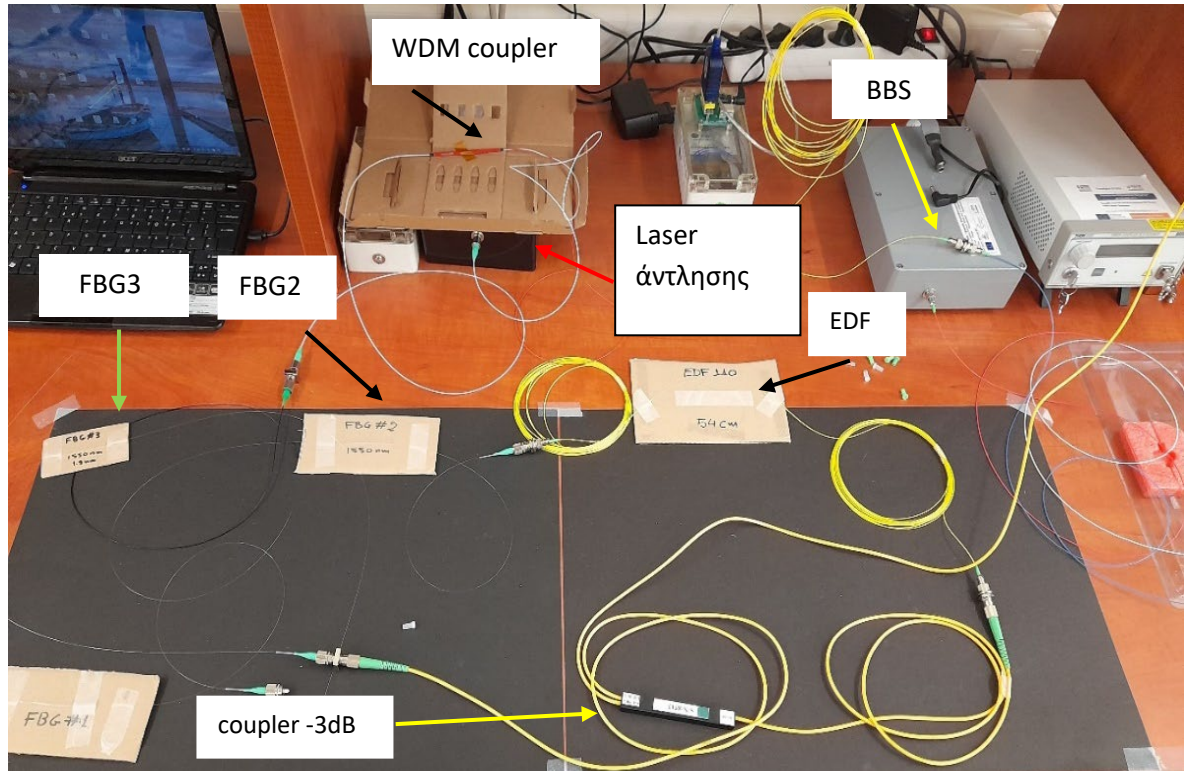
4.3 Τοπολογία με coupler εξόδου εντός του cavity

4.3.1 Περιγραφή συνδεσμολογίας της τοπολογίας



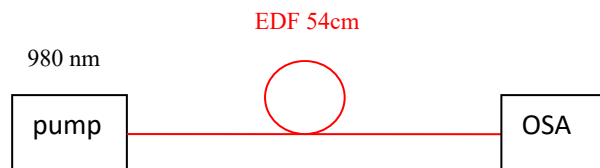
Σχήμα 22: Διάταξη τοπολογίας cavity με coupler εξόδου και χρήση δύο διαφορετικών FBG.

Στο σχήμα 22 απεικονίζεται η συνδεσμολογία την οποία υλοποιήσαμε στο εργαστήριο. Τα στοιχεία τα οποία χρησιμοποιήσαμε περιεγράφηκαν αναλυτικά στην προηγούμενη παράγραφο και η λειτουργία της τοπολογίας έχει ως εξής: ο WDM coupler λαμβάνει ισχύ άντλησης στα 980 nm από το pumping laser, ενώ η θύρα των 1550 nm μένει ελεύθερη, διότι μεταφέρει ισχύ χαμηλού επιπέδου η οποία δεν πρέπει να επιστρέφει πίσω προς το laser άντλησης (εικόνα 12). Εν τω προκειμένω, ο WDM coupler λειτουργεί ως στοιχείο προστασίας του laser από επιστρεφόμενη ισχύ. Επίσης, παραμένει ελεύθερο και το δεύτερο άκρο του FBGb, διότι δεν καθίσταται χρήσιμη η ισχύς διέλευσης από το συγκεκριμένο στοιχείο (είναι πολύ χαμηλή εξαιτίας της μεγάλης ανακλαστικότητας του FBG). Είναι χρήσιμο να επισημάνουμε, ότι θα έπρεπε να τερματίσουμε όλες τις ελεύθερες ίνες με τοποθέτηση ειδικών τερματισμών χωρίς προς τα πίσω ανάκλαση. Ωστόσο επειδή δεν υπάρχουν στο εργαστήριο παρόμοιοι τερματισμοί, αφήνουμε ελεύθερους τους FC/APC συνδετήρες θεωρώντας ότι η ανακλώμενη ισχύς είναι αμελητέα για το πείραμά μας. Όπως περιγράψαμε θεωρητικά στην παράγραφο 2, σχετικά με την λειτουργία της τοπολογίας περιμένουμε πρακτικά τα δύο FBG να δημιουργήσουν την αναμενόμενη κοιλότητα του fiber laser. Χρησιμοποιώντας διαφορετικά επίπεδα οπτικής ισχύος άντλησης αλλά και διαφορετικά μήκη ίνας EDF θα προσδιορίσουμε την συμπεριφορά της κάθε διάταξης, την ισχύ εξόδου, την ισχύ άντλησης, ώστε να επιτευχθεί έναυση του laser αλλά και την χρήση διαφορετικών FBG. Η ρύθμιση της ισχύος της πηγής άντλησης πραγματοποιείται μέσω του controller ρεύματος, διατηρώντας ταυτόχρονα σταθερή την θερμοκρασία με χρήση του controller θερμοκρασίας. Ως ισχύ άντλησης αναφέρουμε την ένδειξη του controller αν και η ισχύς στην ίνα είναι το 75% αυτής, όπως προκύπτει από τις προδιαγραφές του. Επίσης, το resolution bandwidth του OSA παραμένει καθ' όλη τη διάρκεια των μετρήσεων σταθερά ρυθμισμένο στα 0.3nm, ώστε η φασματική ανάλυση του οργάνου να είναι όσο το δυνατόν υψηλότερη. Στις επόμενες παραγράφους θα παρουσιάσουμε αποτελέσματα από διαφορετικά μήκη ινών EDF καθώς και για διαφορετικά ζεύγη FBG. Σε κάθε περίπτωση θα γίνει μελέτη της επίδρασης της ισχύος εξόδου σε σχέση με την ισχύ άντλησης που θα χρησιμοποιηθεί στην κάθε τοπολογία.



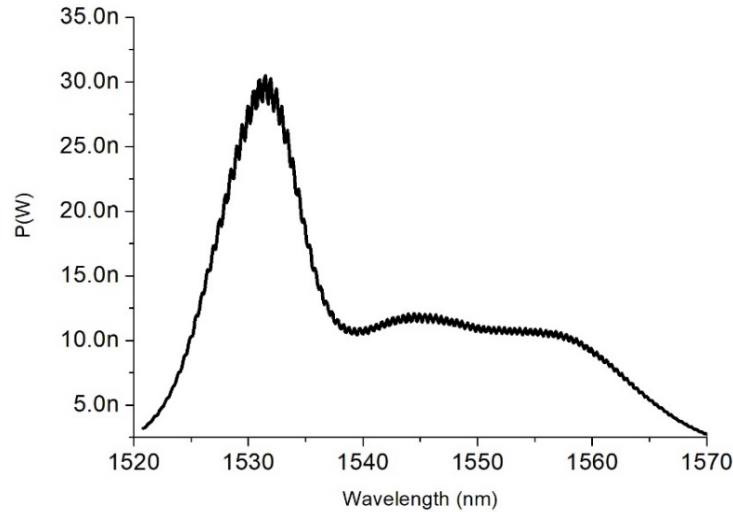
Εικόνα 12: Εργαστηριακή διάταξη τοπολογίας cavity με coupler εξόδου και χρήση δύο διαφορετικών FBG. Κάτω δεξιά στην φωτογραφία απεικονίζεται και το FBG1, το οποίο δεν χρησιμοποιείται στην παρούσα διάταξη.

4.3.2 Τοπολογία μέτρησης θορύβου ASE με χρήση ίνας EDF



Σχήμα 23: Διάταξη μέτρησης θορύβου ASE.

Η παρούσα μέτρηση πραγματοποιήθηκε, ώστε να εξετάσουμε την συμπεριφορά της ίνας Ερβίου ως αυτόνομη διάταξη εκπομπής, δηλαδή χωρίς την παρουσία κατόπτρου (σχήμα 23). Η ισχύς άντλησης στην ίνα EDF μήκους 54 cm ήταν 75 mW, ενώ η ισχύς εξόδου που παράγαγε η ίνα είναι της τάξης των 30 nW (σχήμα 24). Επίσης, μελετώντας την καμπύλη εξόδου, παρατηρούμε την διαμόρφωση του θορύβου (ASE) που παράγει η ίνα. Η συγκεκριμένη μέτρηση πραγματοποιήθηκε πρώτη, ώστε να εξετάσουμε τον παραγόμενο θόρυβο ASE πριν προβούμε στην τοποθέτηση κοιλότητας στην τοπολογία μέτρησης.



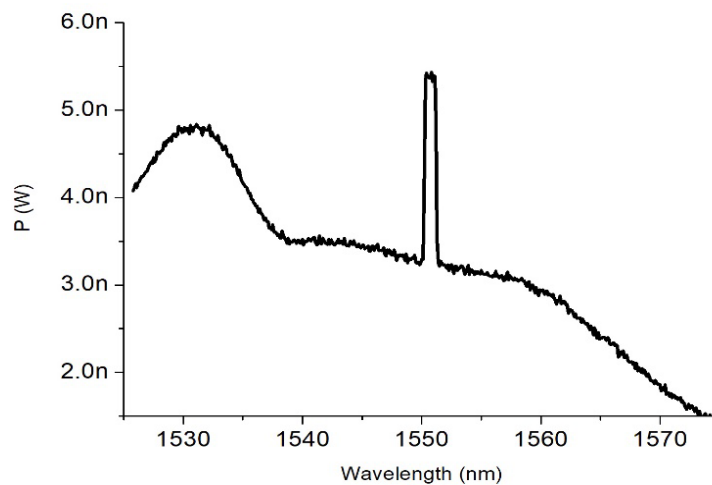
Σχήμα 24: Στο παραπάνω διάγραμμα απεικονίζεται ο παραγόμενος θόρυβος της ίνας Ερβίου μήκους 54cm, χρησιμοποιώντας ισχύ άντλησης 75 mW.

4.3.3 Τοπολογία μέτρησης θορύβου ASE με χρήση FBG2 και ίνας EDF μήκους 10cm



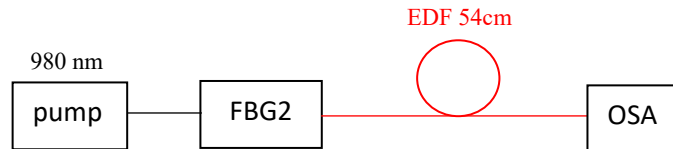
Σχήμα 25: Διάταξη μέτρησης θορύβου ASE με χρήση του FBG2 και ίνας Ερβίου μήκους 10cm.

Υλοποιώντας την συγκεκριμένη τοπολογία, μελετήσαμε την συμπεριφορά της ίνας Ερβίου μήκους 10cm, τοποθετώντας ένα grating (σχήμα 25). Η ισχύς άντλησης της ίνας ήταν 75 mW, ενώ η ισχύς εξόδου που παράγαγε η ίνα είναι της τάξης των 5.5 nW. Παρατηρούμε ότι η συγκεκριμένη τοπολογία δεν μπορεί να αποδώσει μεγάλη ισχύ εξόδου, διότι διαθέτει μόνο ένα κάτοπτρο (σχήμα 26). Ωστόσο παρατηρούμε ότι το φάσμα ανάκλασης του FBG παρέχει πολύ υψηλότερα επίπεδα ισχύος, λόγω της διπλής διέλευσης που πραγματοποιείται μέσα από την ίνα EDF και κατά συνέπεια λαμβάνουμε αυξημένη ισχύ στην έξοδο μέσω της εξαναγκασμένης εκπομπής.



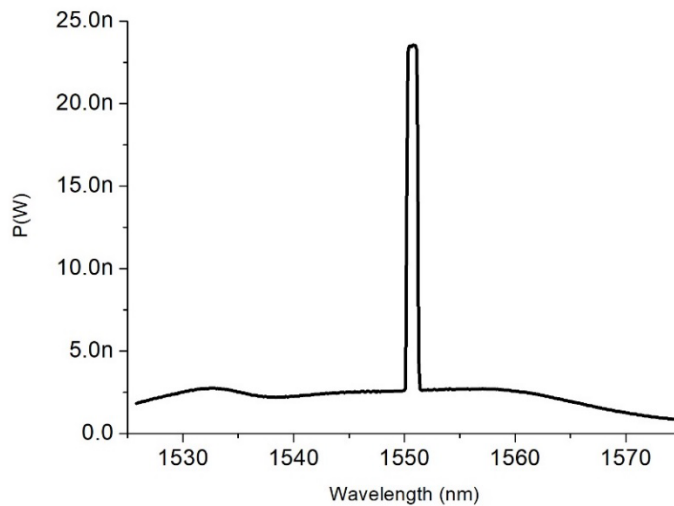
Σχήμα 26: Στο παραπάνω διάγραμμα απεικονίζεται η καμπύλη εξόδου της τοπολογίας cavity εμπεριέχοντας FBG2 και ίνα Ερβίου μήκους 10cm, χρησιμοποιώντας ισχύ άντλησης 75 mW.

4.3.4 Τοπολογία μέτρησης θορύβου ASE με χρήση FBG2 και ίνας EDF μήκους 54cm



Σχήμα 27: Διάταξη μέτρησης θορύβου ASE με χρήση του FBG2.

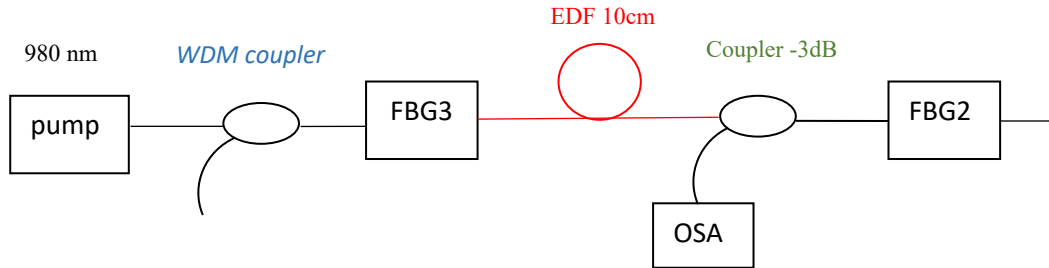
Υλοποιώντας την συγκεκριμένη τοπολογία, μελετήσαμε την συμπεριφορά της ίνας Ερβίου μήκους 54cm, χρησιμοποιώντας το ίδιο grating της προηγούμενης τοπολογίας (σχήμα 27). Χρησιμοποιώντας μεγαλύτερου μήκους ίνα Ερβίου, εν αντιθέσει με την προηγούμενη τοπολογία (σχήμα 25) αναμένουμε ότι η ισχύς εξόδου να αυξηθεί αισθητά. Η ισχύς που απαιτήθηκε ώστε να αντλήσουμε την ίνα είναι 75 mW, ενώ η ισχύς εξόδου που παράγαγε η ίνα είναι της τάξης των 24 nW (σχήμα 28). Συμπεραίνουμε, ότι ούτε η συγκεκριμένη τοπολογία είναι εφικτό να αποδώσει μεγάλη ισχύ εξόδου, διότι επίσης διαθέτει μόνο ένα κάτοπτρο. Ωστόσο η ισχύς εξόδου αυξήθηκε σε σχέση με την προηγούμενη (περίπου 5πλάσια) τιμή η οποία δικαιολογείται από τον πενταπλασιασμό του μήκους της ίνας Ερβίου.



Σχήμα 28: Στο παραπάνω διάγραμμα απεικονίζεται η καμπύλη εξόδου της τοπολογίας cavity εμπεριέχοντας FBG2 και ίνα Ερβίου μήκους 54cm, χρησιμοποιώντας ισχύ άντλησης 75 mW.

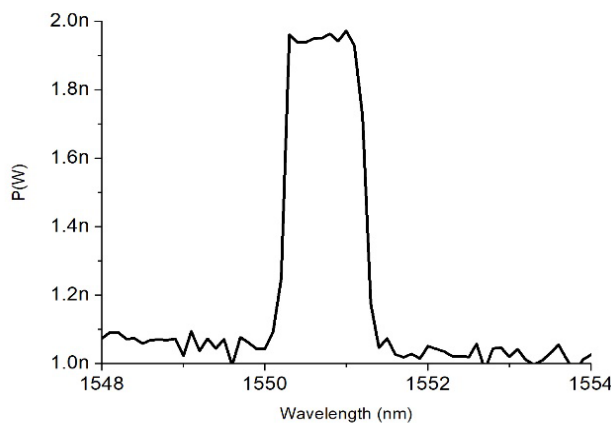
Είναι σημαντικό να τονίσουμε ότι το φως που παράγεται εντός της ίνας Ερβίου πηγαίνει προς δύο κατευθύνσεις, δηλαδή προς τον OSA αλλά και προς το FBG. Συνεπώς, τα φωτόνια που παράγονται μέσω της ίνας Ερβίου και βρίσκονται εντός του φάσματος του FBG ανακλώνται και εν συνεχεία κατευθύνονται εκ νέου προς την ίνα Ερβίου. Τέλος, τα φωτόνια που επιστρέφουν «μαζεύουν» με την σειρά τους καινούργια φωτόνια, κάτι το οποίο παρατηρούμε επιλεκτικά στο φάσμα ανακλαστικότητας του FBG2. Εν κατακλείδι, στις επόμενες τοπολογίες όπου θα τοποθετηθούν δύο κάτοπτρα αναμένεται ότι η ισχύς εξόδου θα αυξηθεί, διότι θα υπάρχει συνεχής παλινδρόμηση φωτονίων εντός της κοιλότητας, εν αντιθέσει με τις προαναφερθείσες τοπολογίες στις οποίες τοποθετήθηκε ένα κάτοπτρο και δεν υπήρχε συνεχής παλινδρόμηση με αποτέλεσμα να συλλεχθούν λιγότερα φωτόνια.

4.3.5 Τοπολογία μέτρησης με χρήση του FBG3 στην είσοδο του cavity και του FBG2 στην έξοδο και με μήκος ίνας 10cm

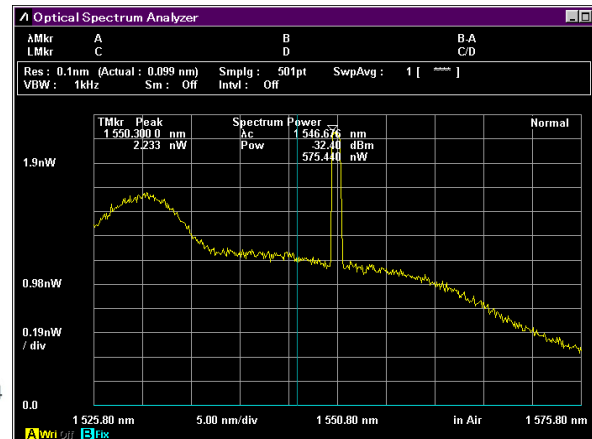


Σχήμα 29: Διάταξη τοπολογίας cavity με coupler εξόδου και χρήση FGB3 & FBG2.

Υλοποιώντας την συγκεκριμένη τοπολογία, μελετήσαμε την συμπεριφορά της ίνας Ερβίου μήκους 10cm, τοποθετώντας δύο gratings σχεδόν ίδιας ανακλαστικότητας (σχήμα 29). Η ισχύς που απαιτήθηκε ώστε να αντλήσουμε την ίνα ήταν της τάξης των 75 mW, ενώ η ισχύς εξόδου που παρήγαγε η ίνα είναι της τάξης των 2 nW (σχήμα 30). Στο αριστερό διάγραμμα του σχήματος 30 απεικονίζεται η καμπύλη εξόδου την οποία λάβαμε έπειτα από επεξεργασία των δεδομένων της μέτρησης, ενώ στο δεξί διάγραμμα απεικονίζεται το στιγμιότυπο που αποθηκεύσαμε από τον OSA κατά τη διάρκεια του πειράματος.



(α)

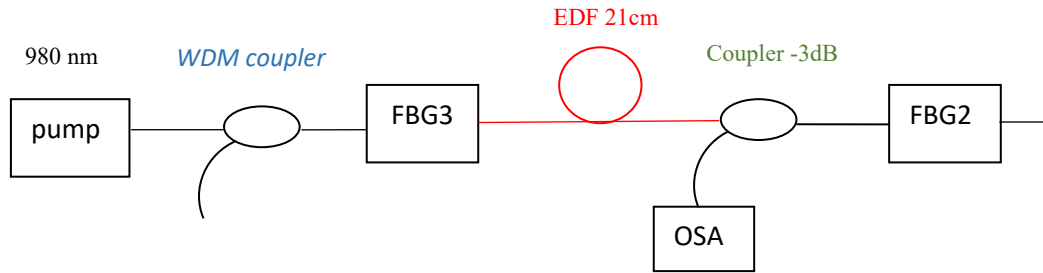


(β)

Σχήμα 30: (α) Στο αριστερό διάγραμμα απεικονίζεται η καμπύλη εξόδου της τοπολογίας cavity με coupler εξόδου και χρήση ίνας Ερβίου 10cm με ισχύ άντλησης 75 mW, ενώ στο δεξί διάγραμμα (β) απεικονίζεται το στιγμιότυπο από τον OSA.

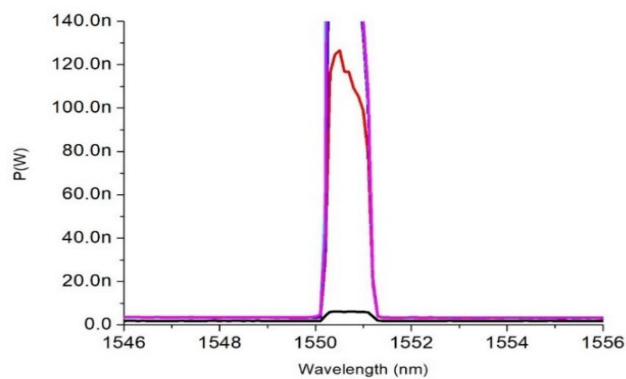
Συμπεραίνουμε ότι η ισχύς εξόδου της παρούσας τοπολογίας δεν είναι επαρκώς αυξημένη παρόλο που τοποθετήθηκαν δύο gratings, συγκριτικά με την τοπολογία 4.3.3 η οποία εμπεριείχε μόνο ένα grating. Αυτό συνέβη εξαιτίας της απώλειας των 3dB που προκύπτει, λόγω της τοποθέτησης του coupler.

4.3.6 Τοπολογία μέτρησης με χρήση του FBG3 στην είσοδο του cavity και του FBG2 στην έξοδο και με μήκος ίνας 21cm

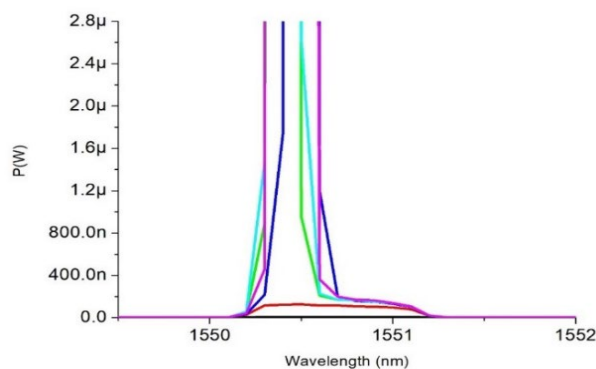


Σχήμα 31: Διάταξη τοπολογίας cavity με coupler εξόδου και χρήση FGB3 & FBG2.

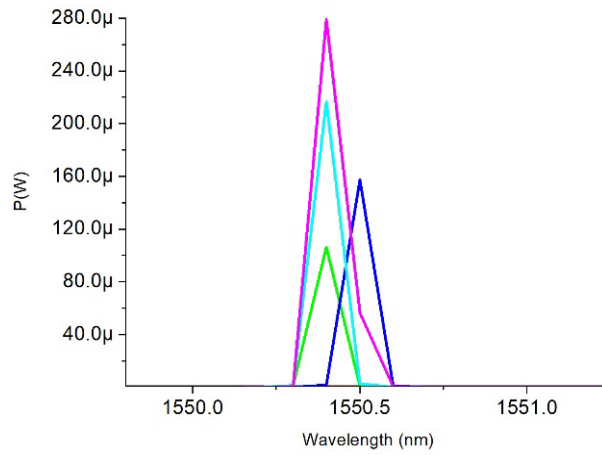
Υλοποιώντας την συγκεκριμένη τοπολογία, μελετήσαμε την συμπεριφορά της ίνας Ερβίου μήκους 21cm, τοποθετώντας εκ νέου τα δύο gratings ίδιας ανακλαστικότητας (σχήμα 31). Χρησιμοποιώντας διπλάσιο μήκος ίνας Ερβίου, εν αντιθέσει με την προηγούμενη τοπολογία (σχήμα 29) αναμένουμε η ισχύς εξόδου να αυξηθεί αισθητά. Πραγματοποιήσαμε μετρήσεις αυξάνοντας σταδιακά την ισχύ άντλησης ξεκινώντας από τα 30 mW (μαύρη καμπύλη), συνεχίζοντας στα 55 mW (κόκκινη καμπύλη), 60 mW (πράσινη καμπύλη), 65 mW (μπλέ καμπύλη), 70 mW (τιρκουάζ καμπύλη) και φτάνοντας στα 75 mW (μώβ καμπύλη). Στα παρακάτω διαγράμματα απεικονίζονται συγκεντρωτικά οι καμπύλες εξόδου ανά επίπεδο ισχύος άντλησης, δίνοντας έμφαση στα χαμηλά επίπεδα ισχύος άντλησης στο πρώτο διάγραμμα (α), ενώ στο δεύτερο διάγραμμα (β) και (γ) παρουσιάζονται ευκρινέστερα οι καμπύλες των υψηλότερων επιπέδων ισχύος άντλησης (σχήμα 32). Εν τέλει, παρατηρούμε ότι επαληθεύεται η αρχική εκτίμηση για αύξηση της ισχύος εξόδου, διότι το υψηλότερο επίπεδο ισχύος εξόδου που λάβαμε πραγματοποιώντας την παρούσα τοπολογία είναι της τάξης των 2.8 μ W, εν αντιθέσει με τα 2 nW ισχύς εξόδου που λάβαμε στην προηγούμενη μέτρηση.



(α)



(β)

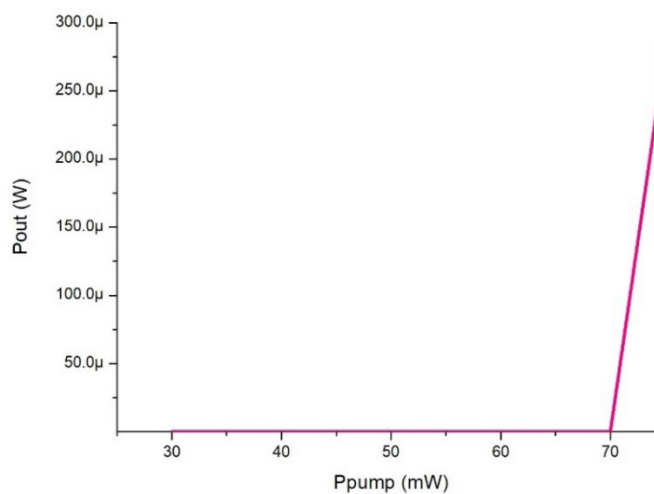


(γ)

Σχήμα 32: (α) Στο αριστερό σχήμα απεικονίζεται η συγκεντρωτική καμπύλη εξόδου για τα χαμηλά επίπεδα ισχύος άντλησης 30mW-55mW της τοπολογίας cavity με coupler εξόδου και χρήση ίνας Ερβίου 21cm, στο (β) δεξί σχήμα απεικονίζεται η συγκεντρωτική καμπύλη εξόδου από το επίπεδο ισχύος άντλησης των 55mW και άνω, ενώ στο (γ) σχήμα απεικονίζεται ευκρινώς το μέγιστο επίπεδο της ισχύος εξόδου.

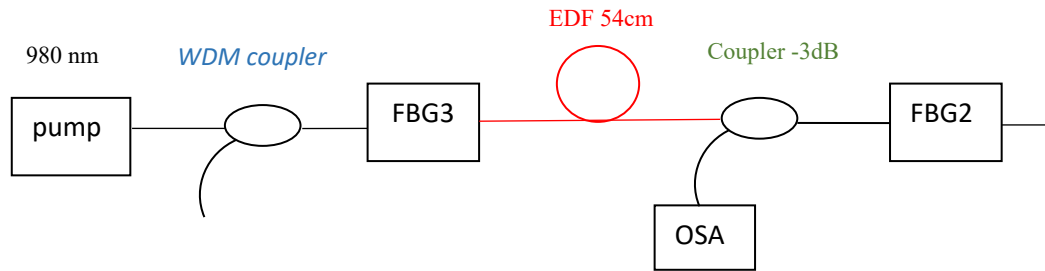
Στην εικόνα (α) και (β) του σχήματος 32 παρατηρούμε ολόκληρο το φάσμα ανάκλασης των δύο FBG, ενώ στην περιοχή των 1550nm δημιουργούνται «μύτες», η ισχύς των οποίων αυξάνεται απότομα και απεικονίζεται με λεπτομέρεια στην εικόνα (γ) του σχήματος 32. Λόγω του μεγάλου φασματικού εύρους ανακλαστικότητας των δύο gratings δημιουργείται κυμάτωση στις καμπύλες εξόδου, ενώ παράλληλα όποια από τις κορυφές κυμάτωσης βρεθεί κοντά και ξεπεράσει το κατώφλι έναυσης (threshold) τη συγκεκριμένη χρονική στιγμή, θα είναι εκείνη η οποία θα καταστήσει εφικτή την έναυση του laser, σε ένα συγκεκριμένο μήκος κύματος. Στην συγκεκριμένη μέτρηση επετεύχθη η έναυση του laser από το επίπεδο ισχύος άντλησης των 60 mW έως και την μέγιστη ισχύ άντλησης 75 mW.

Εν συνεχεία, στο σχήμα 33 απεικονίζεται η ισχύς εξόδου σε συνάρτηση με την ισχύ άντλησης του laser. Παρατηρούμε ότι η ισχύς εξόδου της τοπολογίας αυξάνεται απότομα από τα 70 mW ισχύος άντλησης και άνω. Συνεπώς καθορίζεται πειραματικά το επίπεδο ισχύος άντλησης για έναυση. Η κλίση της καμπύλης είναι 56 $\mu\text{W}/\text{mW}$.



Σχήμα 33: Καμπύλη ισχύος εξόδου συναρτήσεως της ισχύος άντλησης του laser.

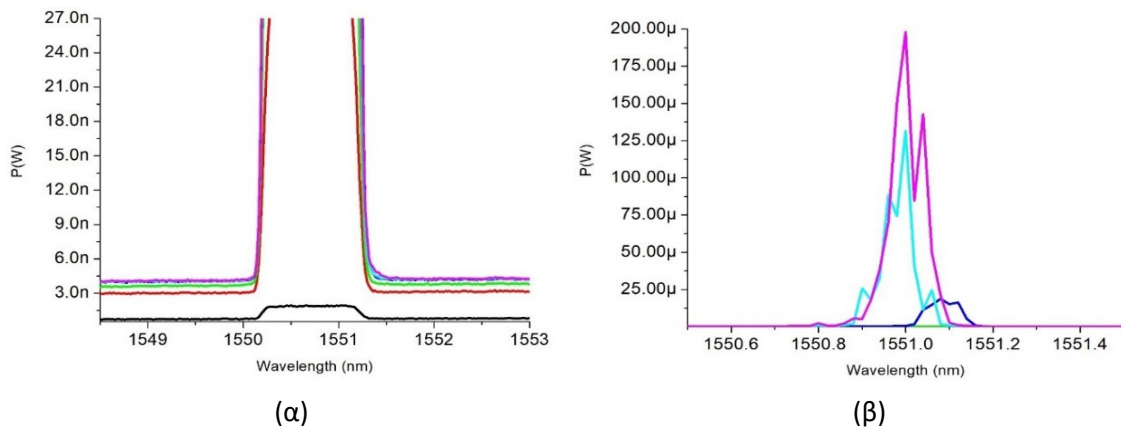
4.3.7 Τοπολογία μέτρησης με χρήση του FBG3 στην είσοδο του cavity και του FBG2 στην έξοδο και με μήκος ίνας 54cm



Σχήμα 34: Διάταξη τοπολογίας cavity με coupler εξόδου και χρήση FGB3 & FBG2.

Υλοποιώντας την συγκεκριμένη τοπολογία, μελετήσαμε την συμπεριφορά της ίνας Ερβίου μήκους 54cm, τοποθετώντας ξανά τα δύο gratings ίδιας ανακλαστικότητας (σχήμα 34). Χρησιμοποιώντας μεγαλύτερου μήκους ίνα Ερβίου, αναμένουμε η ισχύς εξόδου να κυμανθεί εκ νέου σε υψηλά επίπεδα. Πραγματοποιήσαμε μετρήσεις αυξάνοντας σταδιακά την ισχύ άντλησης ξεκινώντας από τα 30 mW (μαύρη καμπύλη), συνεχίζοντας στα 55 mW (κόκκινη καμπύλη), 60 mW (πράσινη καμπύλη), 65 mW (μπλέ καμπύλη), 70 mW (τιρκουάζ καμπύλη) και φτάνοντας στα 75 mW (μώβ καμπύλη) (σχήμα 34). Στα παρακάτω διαγράμματα απεικονίζονται συγκεντρωτικά οι καμπύλες εξόδου ανά επίπεδο ισχύος άντλησης, δίνοντας έμφαση στα χαμηλά επίπεδα ισχύος άντλησης στο πρώτο διάγραμμα (α), ενώ στο δεύτερο διάγραμμα (β) παρουσιάζονται ευκρινέστερα οι καμπύλες των υψηλότερων επιπέδων ισχύος άντλησης, από όπου ξεκινάει και η έναυση του laser (σχήμα 35).

Εν τέλει, παρατηρούμε ότι επαληθεύεται η αρχική εκτίμηση για την τάξη της ισχύος εξόδου, διότι το υψηλότερο επίπεδο ισχύος εξόδου που λάβαμε πραγματοποιώντας την παρούσα τοπολογία είναι της τάξης των 200 μ W.

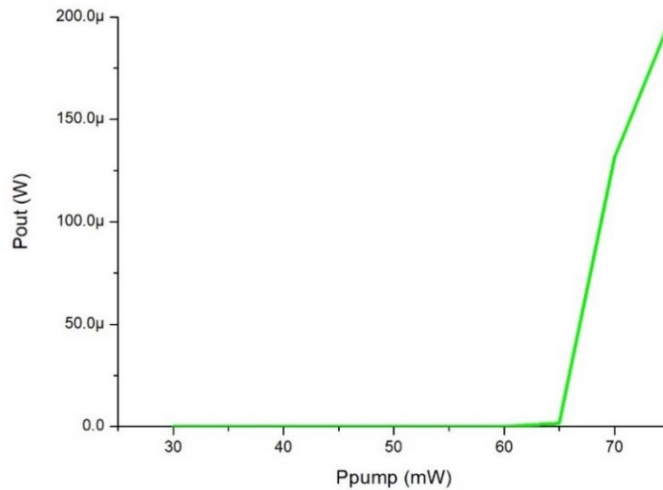


Σχήμα 35: (α) Στο αριστερό σχήμα απεικονίζεται η συγκεντρωτική καμπύλη εξόδου των χαμηλών επιπέδων ισχύος άντλησης της τοπολογίας cavity με coupler εξόδου και χρήση ίνας Ερβίου 54cm μέχρι 27 nW ισχύς εξόδου, ενώ στο (β) δεξί σχήμα απεικονίζεται η συγκεντρωτική καμπύλη εξόδου από το επίπεδο ισχύος άντλησης των 65mW και άνω.

Στην εικόνα (α) του σχήματος 35 παρατηρούμε ολόκληρο το φάσμα ανάκλασης των δύο FBG, ενώ στην περιοχή των 1550nm δημιουργούνται «μύτες», η ισχύς των οποίων αυξάνεται απότομα και απεικονίζεται με λεπτομέρεια στη εικόνα (β) του σχήματος 35. Λόγω του μεγάλου φασματικού εύρους ανακλαστικότητας των δύο gratings δημιουργείται κυμάτωση στις καμπύλες εξόδου, ενώ παράλληλα όποια από τις κορυφές κυμάτωσης βρεθεί κοντά και ξεπεράσει το κατώφλι έναυσης τη συγκεκριμένη χρονική στιγμή, θα είναι εκείνη η οποία θα καταστήσει εφικτή την έναυση του laser,

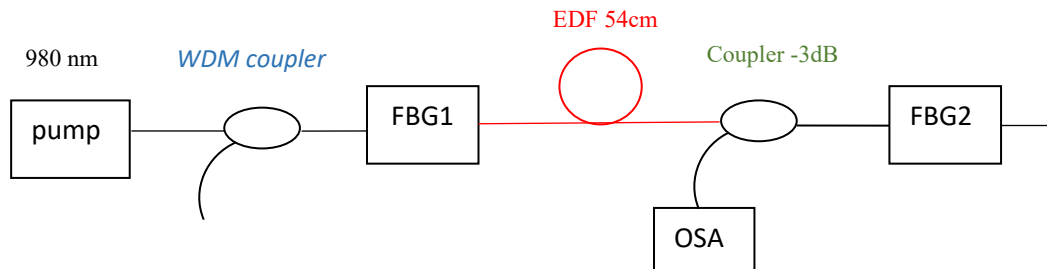
σε ένα συγκεκριμένο μήκος κύματος. Στην συγκεκριμένη μέτρηση επετεύχθη η έναυση του laser χρησιμοποιώντας ισχύ άντλησης 75 mW.

Εν συνεχεία, στο σχήμα 36 απεικονίζεται η ισχύς εξόδου σε συνάρτηση με την ισχύ άντλησης του laser. Παρατηρούμε ότι η ισχύς εξόδου της τοπολογίας αυξάνεται απότομα από τα 65 mW ισχύος άντλησης και άνω. Συνεπώς καθορίζεται πειραματικά το επίπεδο ισχύος άντλησης για έναυση. Η κλίση της καμπύλης είναι 20 $\mu\text{W}/\text{mW}$.



Σχήμα 36: Καμπύλη ισχύος εξόδου συναρτήσει της ισχύος άντλησης του laser.

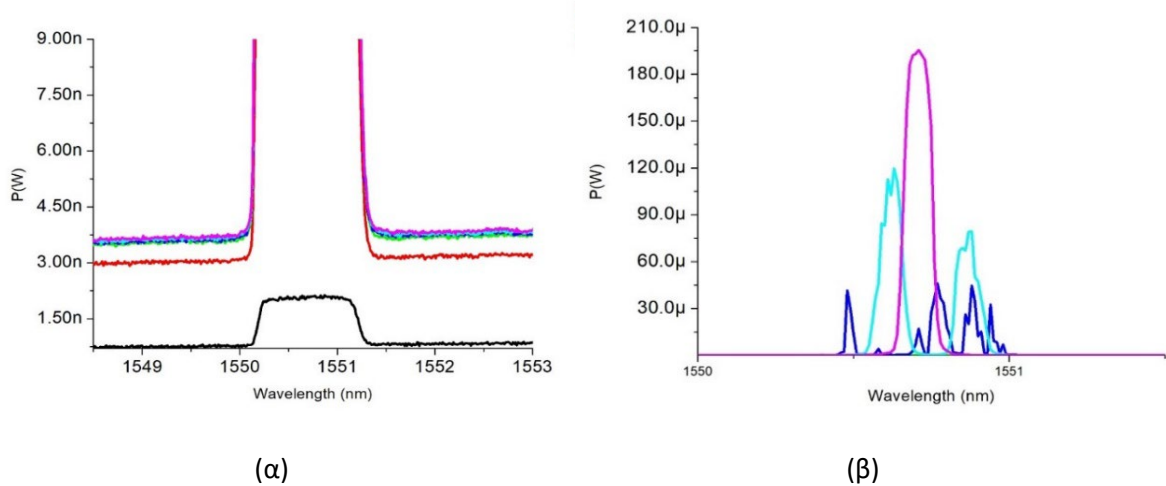
4.3.8 Τοπολογία μέτρησης με χρήση του FBG1 στην είσοδο του cavity και του FBG2 στην έξοδο και με μήκος ίνας 54cm



Σχήμα 37: Διάταξη τοπολογίας cavity με coupler εξόδου και χρήση FBG1 & FBG2.

Υλοποιώντας την συγκεκριμένη τοπολογία, μελετήσαμε την συμπεριφορά της ίνας Ερβίου μήκους 54cm, τοποθετώντας ένα νέο grating στην είσοδο της ίνας EDF (σχήμα 34). Εξαιτίας της μεγαλύτερης ανακλαστικότητας που παρουσιάζει το FBG1, συγκριτικά με το FBG3 το οποίο είχε τοποθετηθεί στην προηγούμενη τοπολογία και χαρακτηρίζεται με μικρότερη ανακλαστικότητα (σχήμα 31), αναμένουμε ότι η ισχύς εξόδου θα αυξηθεί αισθητά. Πραγματοποιήσαμε μετρήσεις αυξάνοντας σταδιακά την ισχύ άντλησης ξεκινώντας από τα 30 mW (μαύρη καμπύλη), συνεχίζοντας στα 55 mW (κόκκινη καμπύλη), 60 mW (πράσινη καμπύλη), 65 mW (μπλέ καμπύλη), 70 mW (τιρκουάζ καμπύλη) και φτάνοντας στα 75 mW (μώβ καμπύλη) (σχήμα 37). Στα παρακάτω διαγράμματα απεικονίζονται συγκεντρωτικά οι καμπύλες εξόδου ανά επίπεδο ισχύος άντλησης, δίνοντας έμφαση στα χαμηλά επίπεδα ισχύος άντλησης στο διάγραμμα (α), ενώ στο διάγραμμα (β) παρουσιάζονται ευκρινέστερα οι καμπύλες των υψηλότερων επιπέδων ισχύος άντλησης, από όπου ξεκινάει και η έναυση του laser (σχήμα 38). Εν τέλει, παρατηρούμε ότι δεν επαληθεύεται η αρχική εκτίμηση για αύξηση της ισχύος εξόδου, διότι το υψηλότερο επίπεδο ισχύος εξόδου που λάβαμε

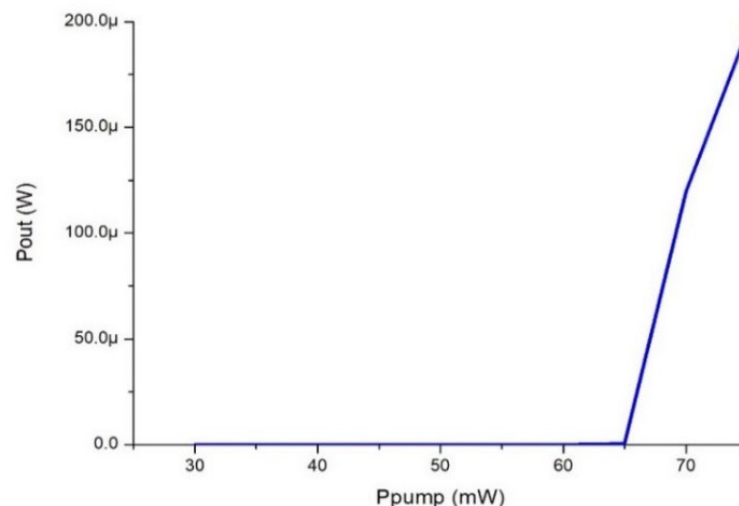
πραγματοποιώντας την παρούσα τοπολογία είναι της τάξης των 200 μW και ταυτίζεται με την ισχύ εξόδου που λάβαμε στην προηγούμενη τοπολογία.



Σχήμα 38: (α) Στο αριστερό σχήμα απεικονίζεται η συγκεντρωτική καμπύλη εξόδου από τα χαμηλά επίπεδα ισχύος άντλησης της τοπολογίας cavity με coupler εξόδου και χρήση ίνας Erβίου 54cm, ενώ στο (β) δεξί σχήμα απεικονίζεται η συγκεντρωτική καμπύλη εξόδου από το επίπεδο ισχύος άντλησης των 65mW και άνω.

Αρχικά, στην εικόνα (α) του σχήματος 38 παρατηρούμε ολόκληρο το φάσμα ανάκλασης των δύο FBG. Εν συνεχεία, στην εικόνα (β) του ίδιου σχήματος παρατηρούμε ότι στην περιοχή των 1550nm δημιουργούνται πολλαπλές καμπύλες, όπου στην καθεμία εμφανίζονται πολλαπλές «μύτες», λόγω της διαφορετικής ανακλαστικότητας που παρουσιάζουν τα δύο gratings. Η κορυφή κυμάτωσης της καμπύλης των 75 mW ισχύος άντλησης, βρέθηκε πιο κοντά στο κατώφλι έναυσης τη συγκεκριμένη χρονική στιγμή και κατέστησε εφικτή την έναυση του laser στα 1550,7 nm.

Εν συνεχεία, στο σχήμα 39 απεικονίζεται η ισχύς εξόδου σε συνάρτηση με την ισχύ άντλησης του laser. Παρατηρούμε ότι η ισχύς εξόδου της τοπολογίας αυξάνεται απότομα από τα 65 mW ισχύος άντλησης και άνω. Η κλίση της καμπύλης είναι 20 $\mu\text{W}/\text{mW}$.



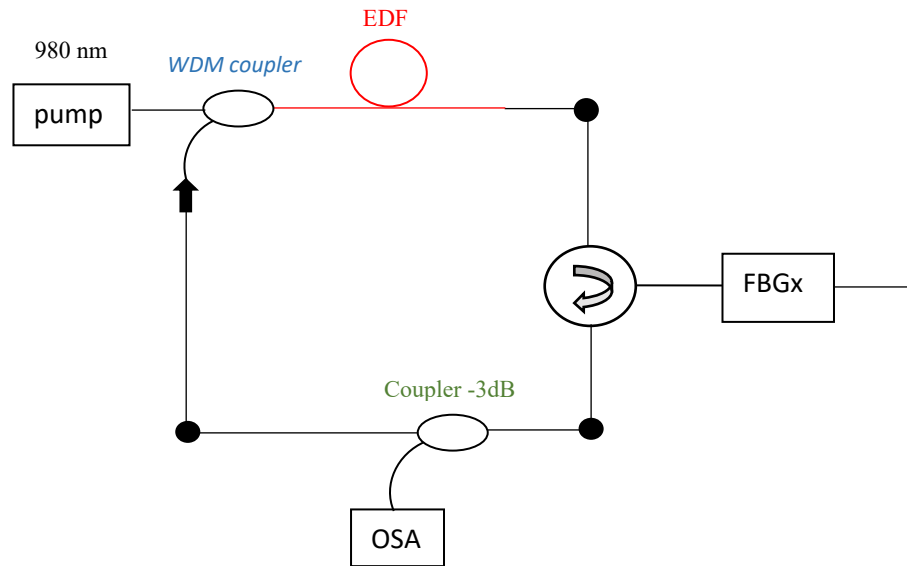
Σχήμα 39: Καμπύλη ισχύος εξόδου συναρτήσει της ισχύος άντλησης του laser.

Συμπεράσματα

Εν γένει, παρατηρούμε ότι κατά την χρήση της ίνας EDF μήκους 10cm δεν ανάβει το laser, διότι δεν επιτυγχάνεται αναστροφή πληθυσμών. Αυτό συμβαίνει, γιατί δεν είναι επαρκές το μήκος της ίνας, ώστε να προσφέρει μεγάλη ισχύ εξόδου και συνεπώς μεγάλο κέρδος, ώστε να επιτύχουμε το κριτήριο έναυσης του laser. Εν συνεχεία, παρατηρούμε ότι κατά την χρήση της ίνας EDF μήκους 21 cm και 54cm το laser ανάβει. Περίπου στα 60 mW ισχύος άντλησης επιτυγχάνουμε το κριτήριο της έναυσης και εστιάζουμε στο γεγονός ότι καθώς αυξανόταν γραμμικά η ισχύς μέχρι το συγκεκριμένο σημείο, από εκεί και έπειτα αυξάνεται απότομα. Όσο πιο μεγάλη είναι η κλίση της καμπύλης εξόδου, τόσο πιο απότομη είναι η αύξηση της ισχύος. Στο σημείο εκείνο από το οποίο ξεκινά να ανάβει το laser, συμπεραίνουμε ότι το κέρδος που προσφέρει η ίνα Erbium ξεπερνάει την απώλεια των 3dB που προκύπτει λόγω της ύπαρξης του coupler και την απώλεια από την ανακλαστικότητα των FBG στην εκάστοτε διάταξη μέτρησης.

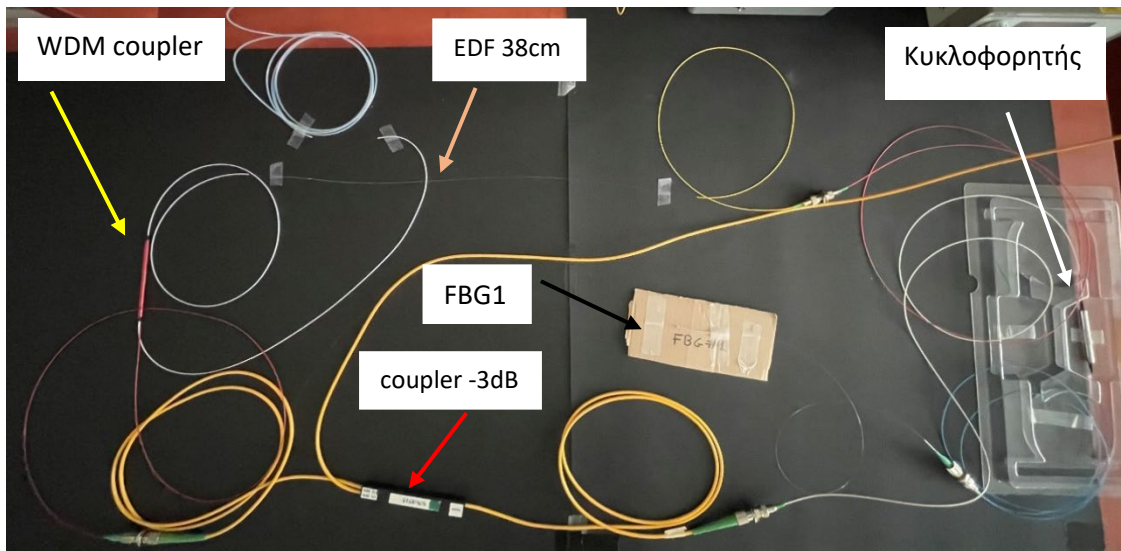
4.4 Τοπολογία Ring Cavity

4.4.1 Περιγραφή συνδεσμολογίας της τοπολογίας



Σχήμα 40: Διάταξη τοπολογίας ring cavity.

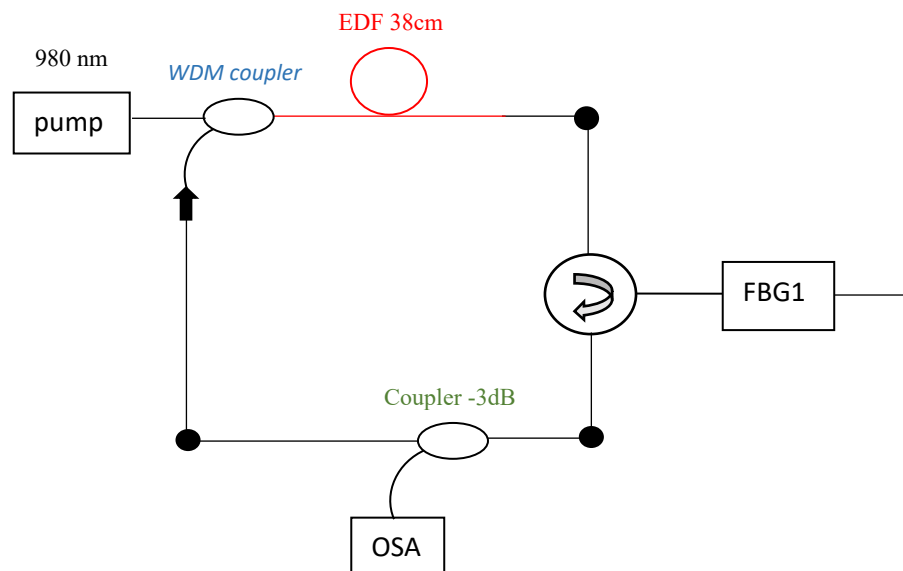
Στο σχήμα 40 απεικονίζεται η συνδεσμολογία την οποία υλοποιήσαμε στο εργαστήριο. Τα στοιχεία τα οποία χρησιμοποιήσαμε περιεγράφηκαν αναλυτικά στην παράγραφο 4.1 και η λειτουργία της τοπολογίας έχει ως εξής: ο WDM coupler λαμβάνει ισχύ άντλησης στα 980 nm από το pumping laser, ενώ η θύρα των 1550 nm λαμβάνει το σήμα το οποίο προκύπτει από την ανάκλαση του grating, σύμφωνα με την κυκλική διαδρομή την οποία επιβάλει ο κυκλοφορητής και αφού διήλθε μέσω του coupler, και έκλεισε ο βρόχος του laser. Το δεύτερο άκρο του FBGx παραμένει ελεύθερο, διότι δεν καθίσταται απαραίτητη η ισχύς διέλευσης από το συγκεκριμένο στοιχείο (εικόνα 13). Όπως περιγράψαμε θεωρητικά στην παράγραφο 2, σχετικά με την λειτουργία της παρούσας τοπολογίας περιμένουμε πρακτικά το FBG σε συνδυασμό με τον κυκλοφορητή και τους δύο couplers να δημιουργήσουν τον αναμενόμενο δακτύλιο του fiber laser. Εφαρμόζοντας διαφορετικά επίπεδα οπτικής ισχύος άντλησης αλλά και FBG με διαφορετικές ανακλαστικότητες, θα προσδιορίσουμε την συμπεριφορά της κάθε διάταξης, την ισχύ εξόδου και την ισχύ άντλησης, ώστε να επιτευχθεί έναυση του laser. Η ρύθμιση της ισχύος της πηγής άντλησης πραγματοποιείται μέσω του controller ρεύματος, διατηρώντας ταυτόχρονα σταθερή την θερμοκρασία με χρήση του controller θερμοκρασίας. Ως ισχύ άντλησης αναφέρουμε την ένδειξη του controller αν και η ισχύς στην ίνα είναι το 75% αυτής. Επίσης, το resolution bandwidth του OSA παραμένει καθ' όλη τη διάρκεια των μετρήσεων σταθερά ρυθμισμένο στα 0.3nm, ώστε η φασματική ανάλυση του οργάνου να είναι όσο το δυνατόν υψηλότερη. Στις επόμενες παραγράφους θα παρουσιάσουμε αποτελέσματα κάνοντας χρήση διαφορετικών FBG. Σε κάθε περίπτωση θα γίνει μελέτη της επίδρασης της ισχύος εξόδου σε σχέση με την ισχύ άντλησης που θα χρησιμοποιηθεί στην εκάστοτε τοπολογία.



Εικόνα 13: Εργαστηριακή διάταξη τοπολογίας ring cavity.

Είναι σημαντικό να αναφέρουμε ότι η βασική διαφοροποίηση των μετρήσεων της συγκεκριμένης τοπολογίας σε σχέση με τις προηγούμενες είναι η αφαίρεση των connectors. Η προαναφερθείσα επιλογή αποτέλεσε βασικό παράγοντα στην αύξηση της παραχθείσας ισχύος, λόγω του ότι δεν υπήρξαν σημαντικές απώλειες εξαιτίας των περιττών συνδέσεων. Για το λόγο αυτό κρατήσαμε το μήκος της ίνας Ερβίου σταθερό στα 38cm.

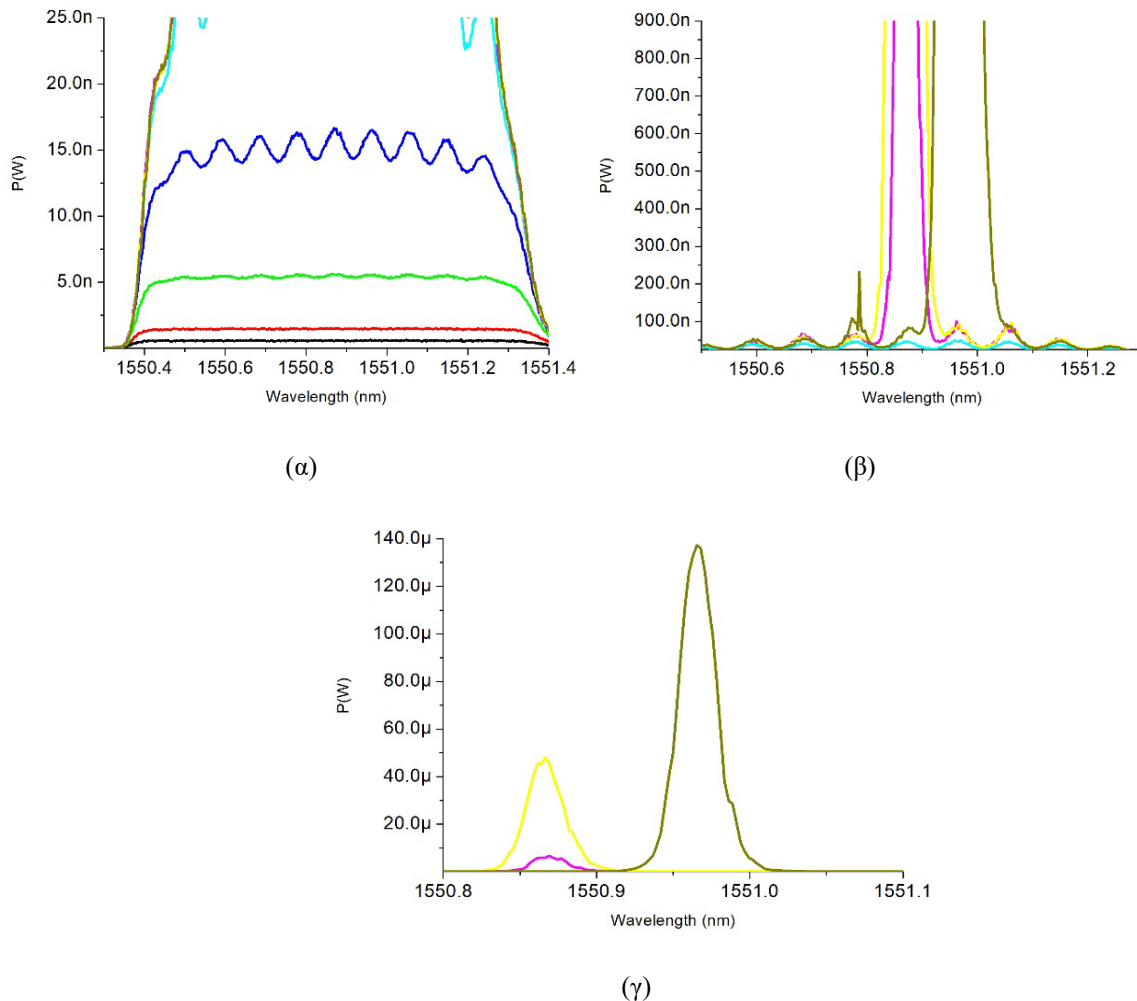
4.4.2 Τοπολογία μέτρησης ring cavity με χρήση του FBG1



Σχήμα 41: Διάταξη τοπολογίας ring cavity με χρήση του FBG1.

Υλοποιώντας την συγκεκριμένη τοπολογία, μελετήσαμε την συμπεριφορά της ίνας Ερβίου μήκους 38cm, χρησιμοποιώντας το FBG1 (σχήμα 41). Το FBG που χρησιμοποιήσαμε στην παρούσα μέτρηση διαθέτει ανακλαστικότητα 64%. Αναμένουμε ότι η συγκεκριμένη τοπολογία μέτρησης θα αποδώσει την υψηλότερη ισχύ εξόδου, εξαιτίας της υψηλής ανακλαστικότητας του FBG. Πραγματοποιήσαμε μετρήσεις εξόδου της τοπολογίας αυξάνοντας σταδιακά την ισχύ άντλησης ξεκινώντας από τα 40 mW (μαύρη καμπύλη), συνεχίζοντας στα 50 mW (κόκκινη καμπύλη), 53 mW (πράσινη καμπύλη), 54 mW (μπλέ καμπύλη), 55 mW (τιρκουάζ καμπύλη), 60 mW (ρόζ καμπύλη), 70 mW (μαύρη καμπύλη). ΠΑΔΑ, Τμήμα Η&ΗΜ, Διπλωματική Εργασία, Ζήνα Κουλοτούκη

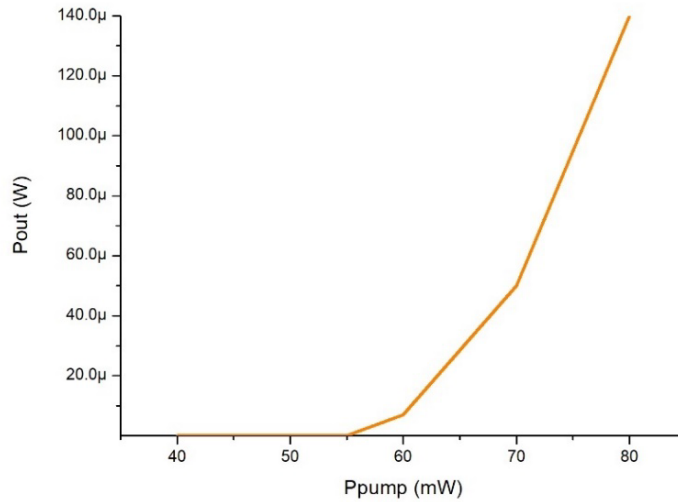
mW (κίτρινη καμπύλη) και φτάνοντας στα 80 mW (λαδί καμπύλη). Στα παρακάτω διαγράμματα απεικονίζονται συγκεντρωτικά οι καμπύλες εξόδου ανά επίπεδο ισχύος άντλησης, δίνοντας έμφαση στα χαμηλά επίπεδα ισχύος άντλησης στο πρώτο διάγραμμα (α), ενώ στο δεύτερο διάγραμμα (β) και (γ) παρουσιάζονται ευκρινέστερα οι καμπύλες των υψηλότερων επιπέδων ισχύος άντλησης (σχήμα 42).



Σχήμα 42: (α) Στο αριστερό σχήμα απεικονίζεται η συγκεντρωτική καμπύλη εξόδου για τα χαμηλά επίπεδα ισχύος άντλησης 40mW-54mW της τοπολογίας ring cavity, στο (β) δεξί σχήμα απεικονίζεται η συγκεντρωτική καμπύλη εξόδου από το επίπεδο ισχύος άντλησης των 55mW και άνω, ενώ στο (γ) σχήμα απεικονίζεται ευκρινώς το μέγιστο επίπεδο της ισχύος εξόδου.

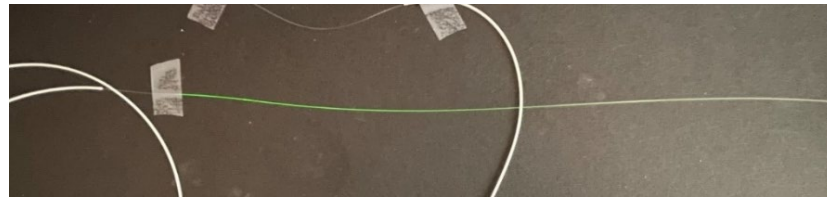
Στην εικόνα (α) του σχήματος 42 παρατηρούμε ολόκληρο το φάσμα ανάκλασης του FBG, ενώ στη εικόνα (β) απεικονίζεται η απότομη αύξηση της ισχύος από το επίπεδο άντλησης των 60 mW και άνω. Στο διάγραμμα (γ) του ίδιου σχήματος παρατηρούμε ότι μεταξύ του επιπέδου άντλησης των 60-80 mW εμφανίζονται δύο «μύτες» σε κάθε καμπύλη ισχύος. Τα δύο peaks που δημιουργούνται είναι απόρροια της κυμάτωσης σε συνδυασμό με τον παραγόμενο θόρυβο ASE. Ένα εκ των δύο peaks θα βρίσκεται σε μεγαλύτερη στάθμη στο κρίσιμο σημείο και είναι εκείνο που θα δημιουργήσει την έναυση του laser. Είναι σημαντικό να τονισθεί, ότι τα δύο peak δεν είναι σταθερά, αλλά εναλλάσσονται συνεχώς μεταξύ τους.

Εν συνεχεία, στο σχήμα 43 απεικονίζεται η ισχύς εξόδου σε συνάρτηση με την ισχύ άντλησης του laser. Παρατηρούμε ότι η ισχύς εξόδου της τοπολογίας αυξάνεται απότομα από τα 55 mW ισχύος άντλησης και άνω. Συνεπώς καθορίζεται πειραματικά το επίπεδο ισχύος άντλησης για έναυση.



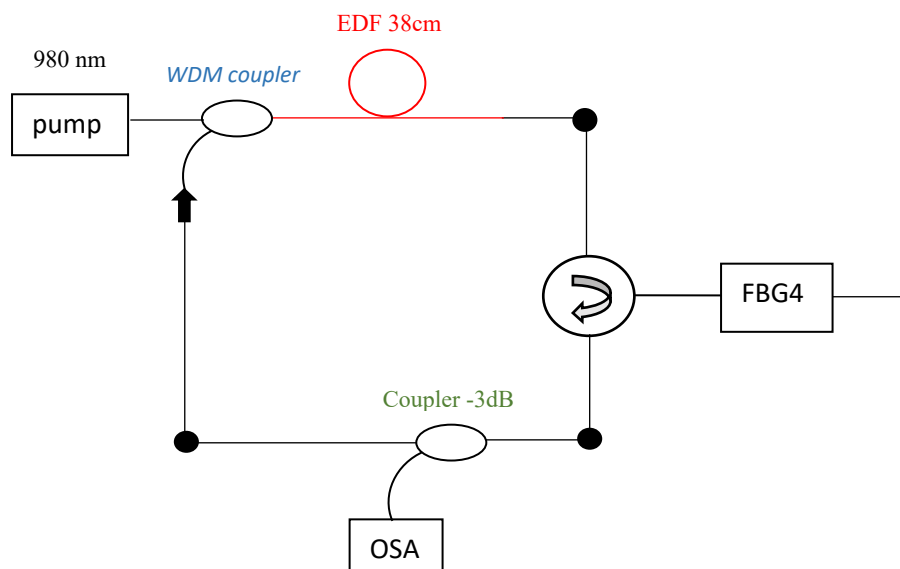
Σχήμα 43: Καμπύλη ισχύος εξόδου συναρτήσει της ισχύος άντλησης του laser.

Όπως διακρίνουμε στην εικόνα 14, η ίνα Ερβίου ακτινοβολεί στην περιοχή του πράσινου (3^η αρμονική) εντονότερα στην αρχή της ίνας, εξαιτίας της υψηλής απορρόφησης ισχύος που παρουσιάζεται στο βαθμιαία από την αρχή προς το τέλος της ίνας. Στην περιοχή του αρχικού τμήματος της ίνας EDF τα ιόντα Ερβίου απορροφούν το μεγαλύτερο μέρος της ισχύος, καθώς το ενεργό τμήμα της ίνας βρίσκεται από την αρχή έως το μέσον, ενώ προς το τέλος της φαίνεται να εξασθενεί. Επίσης, εξαιτίας της βαριάς νόθευσης που έχει η ίνα, η απορρόφηση είναι εμφανέστερη στην αρχή, διότι σταδιακά μειώνεται η ισχύς άντλησης συνεπώς μειώνεται και η αντίστοιχη απορροφούμενη ισχύς.



Εικόνα 14: Απεικόνιση της απορρόφησης ισχύος κατά μήκος της ίνας EDF.

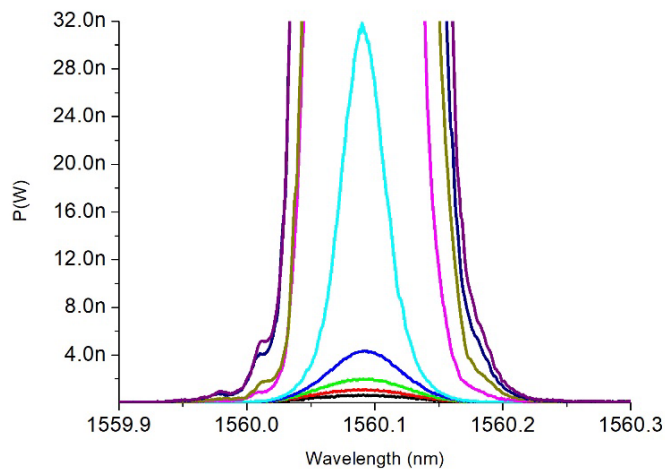
4.4.3 Τοπολογία μέτρησης ring cavity με χρήση του FBG4



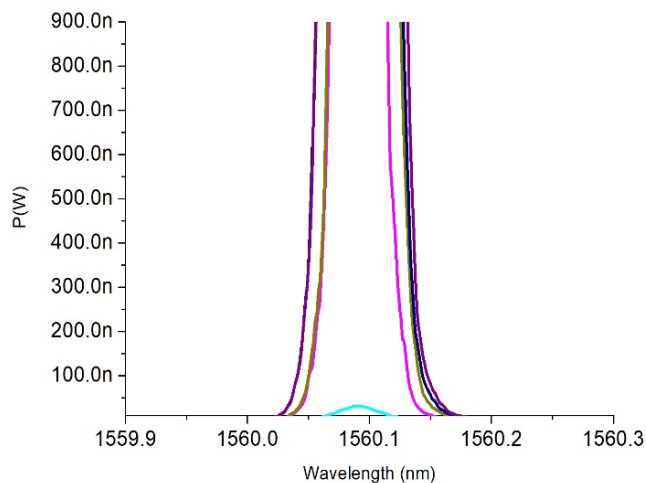
Σχήμα 44: Διάταξη τοπολογίας ring cavity με χρήση του FBG4.

Υλοποιώντας την συγκεκριμένη τοπολογία, μελετήσαμε την συμπεριφορά της ίνας Ερβίου μήκους 38cm, χρησιμοποιώντας το FBG4 (σχήμα 44). Χρησιμοποιώντας grating μικρότερης ανακλαστικότητας (47%), συγκριτικά με την ανακλαστικότητα του grating που τοποθετήσαμε στην προηγούμενη τοπολογία (σχήμα 41), αναμένουμε η ισχύς εξόδου να μειωθεί αισθητά. Πραγματοποιήσαμε μετρήσεις αυξάνοντας σταδιακά την ισχύ άντλησης ξεκινώντας από τα 40 mW (μαύρη καμπύλη), συνεχίζοντας στα 50 mW (κόκκινη καμπύλη), 60 mW (πράσινη καμπύλη), 70 mW (μπλέ καμπύλη), 80 mW (τιρκουάζ καμπύλη), 82 mW (ροζ καμπύλη), 84 mW (λαδί καμπύλη), 86 mW (μπλέ σκούρα καμπύλη) και φτάνοντας στα 90 mW (μώβ καμπύλη). Στα παρακάτω διαγράμματα απεικονίζονται συγκεντρωτικά οι καμπύλες εξόδου ανά επίπεδο ισχύος άντλησης, δίνοντας έμφαση στα χαμηλά επίπεδα ισχύος άντλησης στο διάγραμμα (α) και (β), ενώ στο διάγραμμα (γ) παρουσιάζονται ευκρινέστερα οι καμπύλες των υψηλότερων επιπέδων ισχύος άντλησης, από όπου ξεκινάει και η έναυση του laser (σχήμα 45).

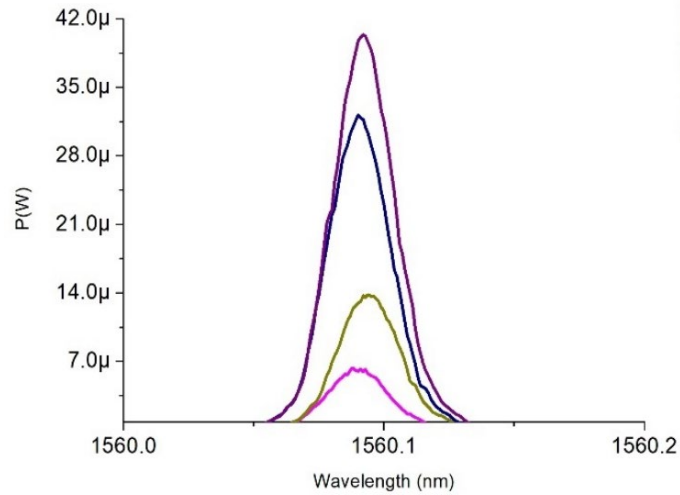
Παρατηρούμε ότι επαληθεύεται η αρχική εκτίμηση για την τάξη της ισχύος εξόδου, διότι το χαμηλότερο επίπεδο ισχύος εξόδου που λάβαμε πραγματοποιώντας την παρούσα τοπολογία είναι της τάξης των 42 μ W, εν αντιθέσει με την ισχύ εξόδου που λάβαμε στην προηγούμενη τοπολογία, η οποία ήταν της τάξης των 140 μ W. Αυτό συμβαίνει, διότι το συγκεκριμένο grating επιτρέπει την έξοδο της ισχύος σε ποσοστό 47%, εν αντιθέσει με το grating που χρησιμοποιήθηκε στην προηγούμενη τοπολογία 4.4.2 και επέτρεπε την έξοδο της ισχύος σε ποσοστό 64%.



(α)



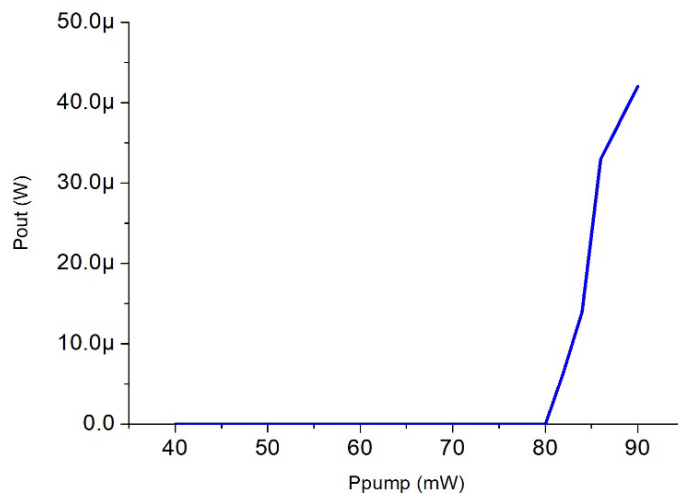
(β)



(γ)

Σχήμα 45: Στο σχήμα (α) απεικονίζεται η συγκεντρωτική καμπύλη εξόδου για τα χαμηλά επίπεδα ισχύος άντλησης 40mW-80mW της τοπολογίας ring cavity, στο σχήμα (β) απεικονίζεται η συγκεντρωτική καμπύλη εξόδου από το επίπεδο ισχύος άντλησης των 80mW και άνω, ενώ στο σχήμα (γ) απεικονίζεται ευκρινώς το μέγιστο επίπεδο της ισχύος εξόδου.

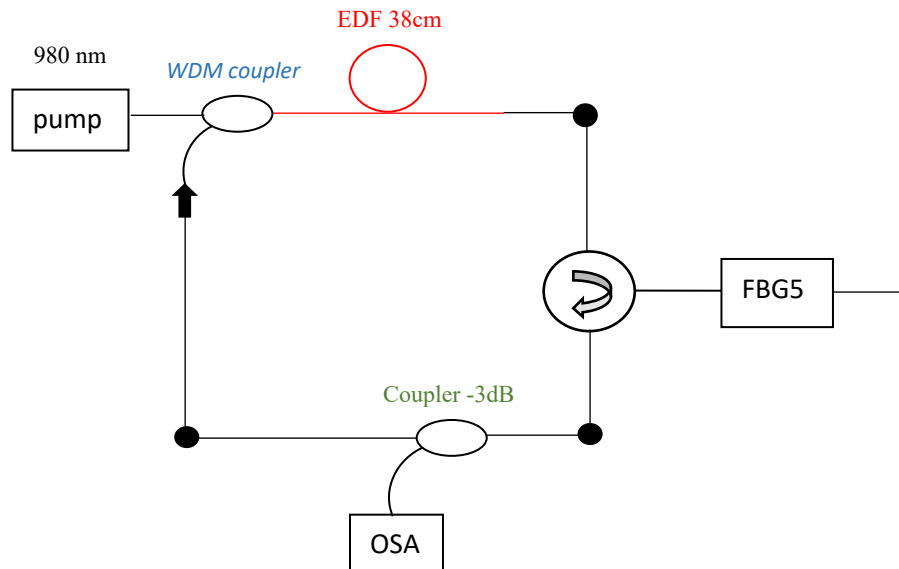
Εν συνεχεία, στο σχήμα 46 απεικονίζεται η ισχύς εξόδου σε συνάρτηση με την ισχύ άντλησης του laser. Παρατηρούμε ότι η ισχύς εξόδου της τοπολογίας αυξάνεται απότομα από τα 80 mW ισχύος άντλησης και άνω. Η κλίση της καμπύλης είναι 4.2 $\mu\text{W}/\text{mW}$.



Σχήμα 46: Καμπύλη ισχύος εξόδου συναρτήσει της ισχύος άντλησης του laser.

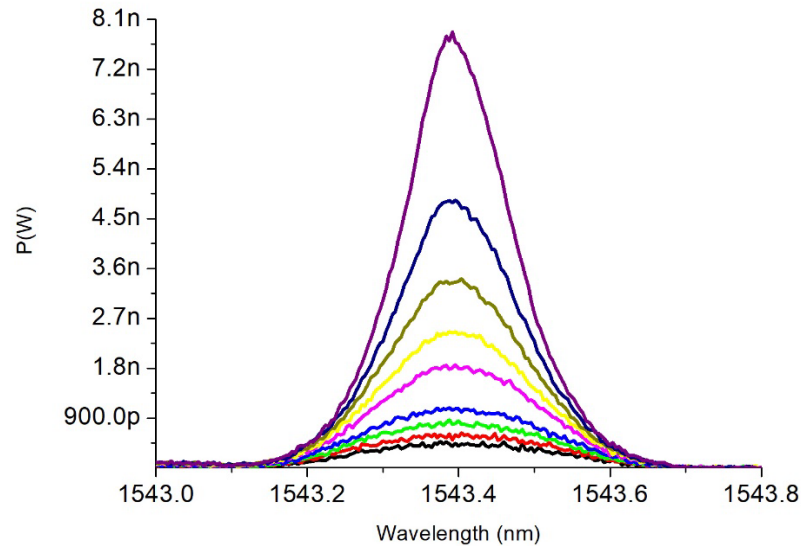
Παρατηρούμε ότι στην προαναφερθείσα μέτρηση δημιουργεί ένα peak. Αυτό συμβαίνει, διότι το συγκεκριμένο grating είναι πολύ στενό, οπότε δεν δημιουργεί ένα επαρκές περιθώριο μετακίνησης της καμπύλης ισχύος δεξιά-αριστερά, εμφανίζει δηλαδή ένα μέγιστο σημείο εξαιτίας του πολύ στενού εύρους ανακλαστικότητας του FBG.

4.4.4 Τοπολογία μέτρησης ring cavity με χρήση του FBG5



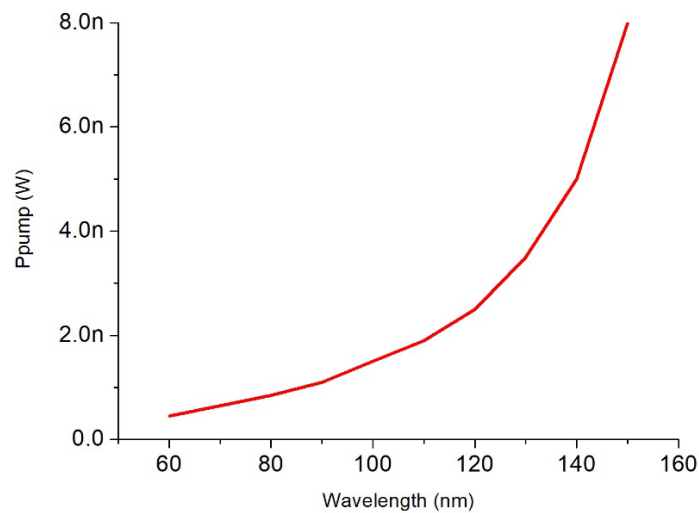
Σχήμα 47: Διάταξη τοπολογίας ring cavity με χρήση του FBG5.

Υλοποιώντας την συγκεκριμένη τοπολογία, μελετήσαμε την συμπεριφορά της ίνας Ερβίου μήκους 38cm, χρησιμοποιώντας το FBG5 (σχήμα 47). Χρησιμοποιώντας grating μικρότερης ανακλαστικότητας (20%), συγκριτικά με την ανακλαστικότητα του grating που τοποθετήσαμε στην προηγούμενη τοπολογία (σχήμα 44), αναμένουμε η ισχύς εξόδου να μειωθεί, ώστε να εξετάσουμε αν είναι εφικτή η έναυση του laser. Πραγματοποιήσαμε μετρήσεις αυξάνοντας σταδιακά την ισχύ άντλησης ξεκινώντας από τα 60 mW (μαύρη καμπύλη), συνεχίζοντας στα 70 mW (κόκκινη καμπύλη), 80 mW (πράσινη καμπύλη), 90 mW (μπλέ καμπύλη), 100 mW (τιρκουάζ καμπύλη), 110 mW (ροζ καμπύλη), 120 mW (λαδί καμπύλη), 130 mW (μπλέ σκούρα καμπύλη) και φτάνοντας στα 140 mW (μώβ καμπύλη). Στο παρακάτω διάγραμμα απεικονίζονται συγκεντρωτικά οι καμπύλες εξόδου ανά επίπεδο ισχύος άντλησης (σχήμα 48). Παρατηρούμε ότι επαληθεύεται η αρχική εκτίμηση για την τάξη της ισχύος εξόδου, διότι το υψηλότερο επίπεδο ισχύος εξόδου που λάβαμε πραγματοποιώντας την παρούσα τοπολογία είναι της τάξης των 8.1 nW, εν αντιθέσει με την ισχύ εξόδου που λάβαμε στην προηγούμενη τοπολογία, η οποία ήταν της τάξης των 42 μW. Τέλος, συμπεραίνουμε ότι το φάσμα που αντιστοιχεί στην ανακλαστικότητα του FGB5 ταυτίζεται με την ισχύ εξόδου του ring topology. Εξαιτίας αυτού του παράγοντα δεν επετεύχθη η έναυση του laser, παρά τα υψηλά επίπεδα ισχύος της άντλησης.



Σχήμα 48: Στο διάγραμμα απεικονίζεται η συγκεντρωτική καμπύλη εξόδου όλων των επιπέδων ισχύος άντλησης της τοπολογίας ring cavity.

Εν συνεχεία, στο σχήμα 49 απεικονίζεται η ισχύς εξόδου σε συνάρτηση με την ισχύ άντλησης του laser. Παρατηρούμε ότι η ισχύς εξόδου της τοπολογίας παρουσιάζει εκθετική αύξηση (χαρακτηριστικό του γονάτου πριν την έναυση), εν αντιθέσει με τις προηγούμενες τοπολογίες όπου η ισχύς εξόδου παρουσίαζε απότομη αύξηση, στο σημείο εκείνο που ξεκινούσε η έναυση του laser.

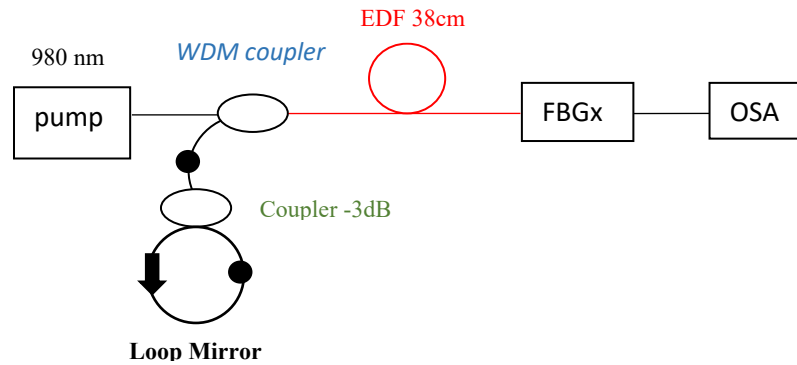


Σχήμα 49: Καμπύλη ισχύος εξόδου συναρτήσει της ισχύος άντλησης του laser.

Παρατηρούμε ότι κατά την χρήση του FBG5 (R=20%) δεν ανάβει το laser, διότι δεν επιτυγχάνεται αναστροφή πληθυσμών. Αυτό συμβαίνει, διότι δεν καθίσταται επαρκής η ανακλαστικότητα του grating σε συνδυασμό με το μήκος της ίνας Ερβίου, ώστε να παραχθεί μεγάλη ισχύς εξόδου και συνεπώς μεγάλο κέρδος για να επιτύχουμε το κριτήριο έναυσης του laser. Εν συνεχεία, παρατηρούμε ότι κατά την χρήση των FBG1 (R=64%) και FBG4 (R=47%) το laser ανάβει. Περίπου στα 60 mW ισχύος άντλησης επιτυγχάνουμε το κριτήριο της έναυσης, λόγω της επαρκούς ανακλαστικότητας του εκάστοτε grating και εστιάζουμε στο γεγονός ότι καθώς αυξανόταν γραμμικά η ισχύς μέχρι το συγκεκριμένο σημείο, από εκεί και έπειτα αυξάνεται απότομα. Στο σημείο εκείνο από το οποίο ξεκινά να ανάβει το laser, συμπεραίνουμε ότι το κέρδος που προσφέρει η ίνα Ερβίου ξεπερνάει την απώλεια των 3dB που προκύπτει λόγω της ύπαρξης του coupler και την απώλεια από την ανακλαστικότητα του FBG στην εκάστοτε διάταξη μέτρησης.

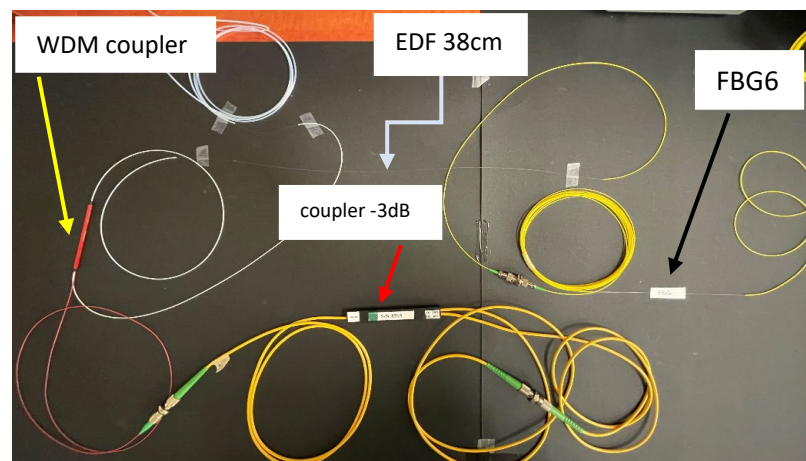
4.5 Τοπολογία cavity με χρήση Loop Mirror

4.5.1 Περιγραφή συνδεσμολογίας της τοπολογίας



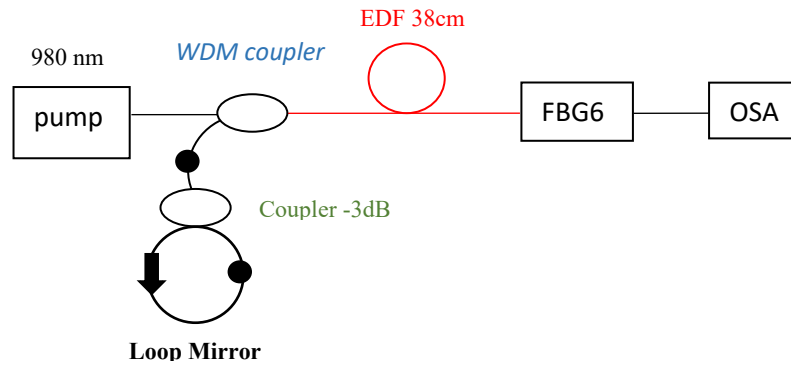
Σχήμα 50: Διάταξη τοπολογίας cavity με χρήση loop mirror.

Στο σχήμα 50 απεικονίζεται η συνδεσμολογία την οποία υλοποιήσαμε στο εργαστήριο. Τα στοιχεία τα οποία χρησιμοποιήσαμε περιεγράφηκαν αναλυτικά στην παράγραφο 4.1 και η λειτουργία της τοπολογίας έχει ως εξής: ο WDM coupler λαμβάνει ισχύ άντλησης στα 980 nm από το pumping laser, ενώ η θύρα των 1550 nm έχει συνδεθεί με τον coupler -3dB, σε μορφή loop mirror. Το loop mirror δημιουργήθηκε βραχυκυκλώνοντας τις δύο εξόδους του coupler -3 dB και λειτουργεί ως 100% ανακλαστήρας, προστατεύοντας ταυτόχρονα την πηγή από τυχόν ανακλάσεις (εικόνα 15). Όπως περιγράψαμε θεωρητικά στην παράγραφο 2, σχετικά με την λειτουργία της τοπολογίας περιμένουμε πρακτικά το FBGx σε συνδυασμό με τον ανακλαστήρα ευρέως φάσματος όπως αναμένεται από το loop mirror του fiber laser. Χρησιμοποιώντας διαφορετικά επίπεδα οπτικής ισχύος άντλησης, θα προσδιορίσουμε την συμπεριφορά της τοπολογίας, την ισχύ εξόδου και την ισχύ άντλησης, ώστε να επιτευχθεί έναυση του laser. Η ρύθμιση της ισχύος της πηγής άντλησης πραγματοποιείται μέσω του controller ρεύματος, διατηρώντας ταυτόχρονα σταθερή την θερμοκρασία με χρήση του controller θερμοκρασίας. Ως ισχύ άντλησης αναφέρουμε την ένδειξη του controller αν και η ισχύς στην ίνα είναι το 75% αυτής. Επίσης, το resolution bandwidth του OSA παραμένει καθ' όλη τη διάρκεια των μετρήσεων σταθερά ρυθμισμένο στα 0.3nm, ώστε η φασματική ανάλυση του οργάνου να είναι όσο το δυνατόν υψηλότερη. Στην επόμενη παράγραφο θα παρουσιάσουμε αποτελέσματα κάνοντας χρήση ενός FBG. Σε κάθε περίπτωση θα γίνει μελέτη της επίδρασης της ισχύος εξόδου σε σχέση με την ισχύ άντλησης που θα χρησιμοποιηθεί στην παρούσα τοπολογία.



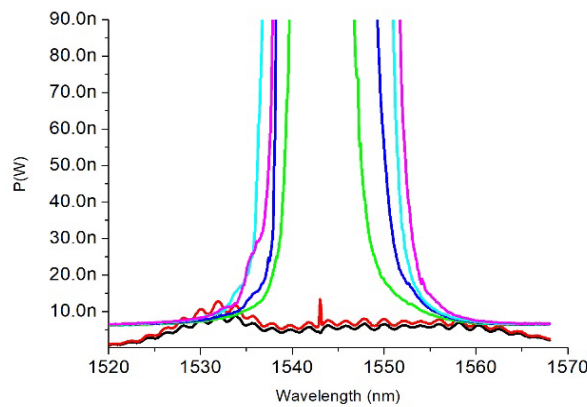
Εικόνα 15: Εργαστηριακή διάταξη τοπολογίας loop mirror.

4.5.2 Τοπολογία μέτρησης με χρήση του FBG6 στην έξοδο

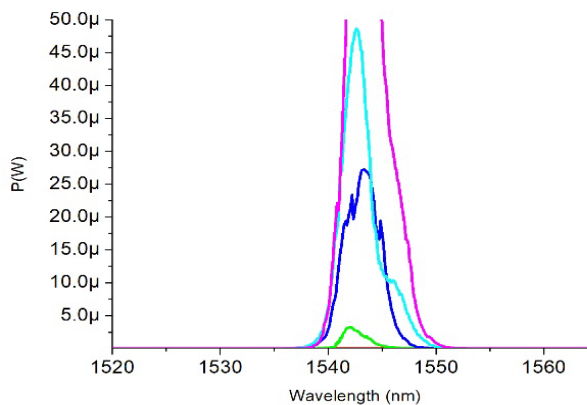


Σχήμα 51: Διάταξη τοπολογίας loop mirror με χρήση του FBG6.

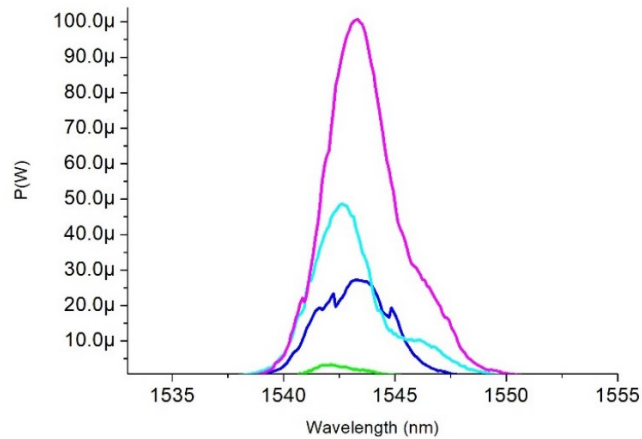
Υλοποιώντας την συγκεκριμένη τοπολογία, μελετήσαμε την συμπεριφορά της ίνας Ερβίου μήκους 38cm, χρησιμοποιώντας το FBG6 (σχήμα 51). Χρησιμοποιώντας grating μικρής ανακλαστικότητας (24%), αναμένουμε η ισχύς εξόδου να κινηθεί σε σχετικά μεσαία επίπεδα. Πραγματοποιήσαμε μετρήσεις αυξάνοντας σταδιακά την ισχύ άντλησης ξεκινώντας από τα 45 mW (μαύρη καμπύλη), συνεχίζοντας στα 48.3 mW (κόκκινη καμπύλη), 50.3 mW (πράσινη καμπύλη), 60 mW (μπλέ καμπύλη), 70 mW (τιρκουάζ καμπύλη) και φτάνοντας στα 90 mW (ροζ καμπύλη). Στο παρακάτω διάγραμμα απεικονίζονται συγκεντρωτικά οι καμπύλες εξόδου ανά επίπεδο ισχύος άντλησης (σχήμα 52). Παρατηρούμε ότι επαληθεύεται η αρχική εκτίμηση για την τάξη της ισχύος εξόδου, διότι το υψηλότερο επίπεδο ισχύος εξόδου που λάβαμε πραγματοποιώντας την παρούσα τοπολογία είναι της τάξης των 100 μ W.



(α)



(β)

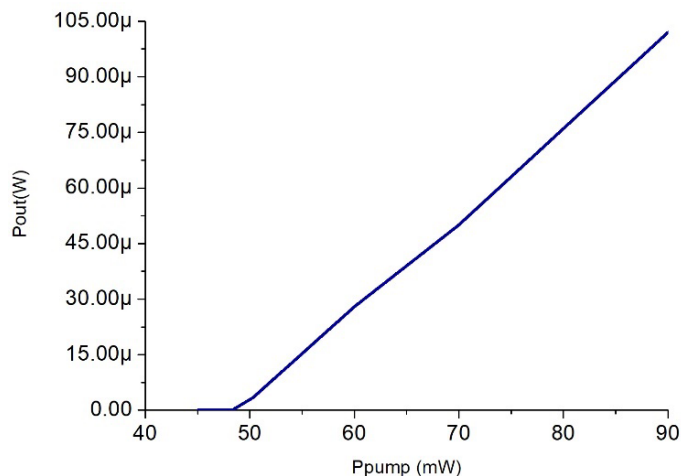


(γ)

Σχήμα 52: Στο σχήμα (α) απεικονίζεται η συγκεντρωτική καμπύλη εξόδου για τα χαμηλά επίπεδα ισχύος άντλησης 45mW-50.3mW της τοπολογίας loop mirror, στο σχήμα (β) απεικονίζεται η συγκεντρωτική καμπύλη εξόδου από το επίπεδο ισχύος άντλησης των 60mW και άνω, ενώ στο σχήμα (γ) απεικονίζεται ευκρινώς το μέγιστο επίπεδο της ισχύος εξόδου.

Παρατηρούμε ότι δεν δημιουργούνται διαφορετικά peaks σε κάθε καμπύλη εξόδου της τοπολογίας. Αυτό συμβαίνει, διότι το grating που χρησιμοποιήσαμε είναι πολύ στενό, με αποτέλεσμα να μην υπάρχει επαρκές περιθώριο μετακίνησης της καμπύλης ισχύος δεξιά-αριστερά.

Εν συνεχεία, στο σχήμα 53 απεικονίζεται η ισχύς εξόδου σε συνάρτηση με την ισχύ άντλησης του laser. Παρατηρούμε ότι η ισχύς εξόδου της τοπολογίας παρουσιάζει αλλαγή κλίσης και αύξηση από τα 50 mW ισχύος άντλησης και άνω, εν αντιθέσει με τις προηγούμενες τοπολογίες όπου η ισχύς εξόδου παρουσίαζε απότομη αύξηση, στο σημείο εκείνο που ξεκινούσε η έναυση του laser. Συνεπώς, στο σημείο εκείνο καθορίζεται πειραματικά το επίπεδο ισχύος άντλησης για έναυση. Η κλίση της καμπύλης είναι 2.39 $\mu\text{W}/\text{mW}$.



Σχήμα 53: Καμπύλη ισχύος εξόδου συναρτήσεως της ισχύος άντλησης του laser.

Συμπεράσματα

Εν γένει, στην παρούσα τοπολογία παρατηρούμε έντονη κυμάτωση κυρίως στα χαμηλά επίπεδα ισχύος άντλησης. Τοποθετώντας το FBG6 ($R=24\%$), συμπεραίνουμε ότι το laser ανάβει. Περίπου στα 50.3 mW ισχύος άντλησης επιτυγχάνουμε το κριτήριο της έναυσης, λόγω της επαρκούς ανακλαστικότητας του grating σε συνδυασμό με το επαρκές μήκος της ίνας Ερβίου και εστιάζουμε στο γεγονός ότι καθώς αυξανόταν γραμμικά η ισχύς μέχρι το συγκεκριμένο σημείο, από εκεί και έπειτα αυξάνεται απότομα. Το loop mirror λαμβάνει χώρα στην παρούσα τοπολογία ως 100% ανακλαστήρας, ενώ ταυτόχρονα προστατεύει την πηγή από τυχόν ανακλάσεις, αναστέλλοντας την προσθήκη επιπλέον θορύβου στο παραγόμενο σήμα. Στο σημείο εκείνο από το οποίο ξεκινά να ανάβει το laser, συμπεραίνουμε ότι το κέρδος που προσφέρει η ίνα Ερβίου ξεπερνάει την απώλεια των 3dB που προκύπτει λόγω της ύπαρξης του coupler και την απώλεια λόγω της ανακλαστικότητας του FBG.

5 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Έχοντας πραγματοποιήσει μετρήσεις για τρεις διαφορετικές τοπολογίες και χρησιμοποιώντας διαφορετικά μήκη ίνας Erbium αλλά και grating με διαφορετικές ανακλαστικότητες, καταλήγουμε στα παρακάτω συμπεράσματα.

5.1 Σχετικά με τις μετρήσεις χρησιμοποιώντας την τοπολογία εξόδου εντός του cavity

Αρχικά, χρησιμοποιώντας μόνο ένα grating στην είσοδο της ίνας Erbium, η ισχύς εξόδου παρέμεινε σε πολύ χαμηλά επίπεδα, διότι δεν ήταν εφικτή η συνεχής παλινδρόμηση (μικροκοιλότητα). Εν συνεχεία, όταν τοποθετήσαμε δύο grating η ισχύς εξόδου αυξήθηκε, διότι υπήρχε συνεχής παλινδρόμηση φωτονίων εντός της κοιλότητας, με αποτέλεσμα να συλλεχθούν περισσότερα φωτόνια. Επίσης, διαπιστώσαμε ότι κατά την χρήση της ίνας EDF μήκους 10cm δεν άναψε το laser. Αυτό συνέβη, διότι δεν ήταν επαρκές το μήκος της ίνας, ώστε να προσφέρει μεγάλη ισχύ εξόδου και συνεπώς μεγάλο κέρδος, ώστε να επιτύχουμε το κριτήριο έναυσης του laser. Το κριτήριο έναυσης επετεύχθη όταν τοποθετήσαμε την ίνα EDF μήκους 21 cm και 54cm. Παρατηρούμε λοιπόν, ότι η μεγαλύτερη ισχύς εξόδου επιτυγχάνεται σε συνδυασμό με το μεγάλο μήκος ίνας Erbium και την υψηλή ανακλαστικότητα των gratings που θα χρησιμοποιηθούν στην τοπολογία μέτρησης. Τέλος, αξίζει να σημειωθεί ότι η συγκεκριμένη τοπολογία είναι η πιο αποδοτική όσο αφορά τα επίπεδα ισχύος εξόδου.

5.2 Σχετικά με τις μετρήσεις χρησιμοποιώντας την τοπολογία ring cavity

Αρχικά, παρατηρήσαμε ότι κατά την χρήση του FBG με ανακλαστικότητα 20% δεν άναψε το laser. Αυτό συνέβη, διότι δεν ήταν επαρκής η ανακλαστικότητα του grating σε συνδυασμό με το μήκος της ίνας Erbium, ώστε να παραχθεί μεγάλη ισχύς εξόδου και συνεπώς μεγάλο κέρδος για να επιτύχουμε το κριτήριο έναυσης του laser. Εν συνεχεία, τοποθετώντας FBG με υψηλότερη ανακλαστικότητα ($R=47\%$ και 64%) το laser άναψε. Παρατηρούμε λοιπόν, ότι όσο μεγαλύτερη ανακλαστικότητα διαθέτει το grating που θα τοποθετήσουμε, τόσο μεγαλύτερη ισχύ θα λάβουμε στην έξοδο. Τέλος, αξίζει να σημειωθεί ότι η συγκεκριμένη τοπολογία θα ήταν θεωρητικά η πιο αποδοτική όσο αφορά την ισχύ εξόδου, εάν διαθέταμε grating πολύ υψηλότερης ανακλαστικότητας.

5.3 Σχετικά με τις μετρήσεις χρησιμοποιώντας την τοπολογία loop mirror

Στην παρούσα τοπολογία πραγματοποιήσαμε μία μέτρηση χρησιμοποιώντας FBG με ανακλαστικότητα 24% και διαπιστώσαμε ότι το laser άναψε, λόγω της επαρκούς ανακλαστικότητας του grating σε συνδυασμό με το επαρκές μήκος της ίνας Erbium και το loop mirror το οποίο χρησιμοποιήθηκε ως 100% ανακλαστήρας. Είναι γεγονός ότι θα μπορούσαμε να μελετήσουμε πιο συστηματικά το κέρδος της συγκεκριμένης τοπολογίας, εάν διαθέταμε στο εργαστήριο πολλά FBG με διαφορετικές ανακλαστικότητες, ούτως ώστε να καταλήξουμε σε εκείνο που θα προσφέρει το βέλτιστο κέρδος (gain). Θεωρητικά αναμένουμε ότι όσο μεγαλύτερη ανακλαστικότητα διαθέτει το grating το οποίο θα τοποθετηθεί στη διάταξη μέτρησης, τόσο μεγαλύτερο θα είναι το κέρδος άρα και η ισχύς που θα λάβουμε στην έξοδο. Τέλος, βασικά πλεονεκτήματα της παρούσας τοπολογίας είναι η τοποθέτηση οποιουδήποτε FBG στην έξοδο, με παράλληλη προστασία της πηγής, απλότητα στην υλοποίηση και μειωμένο κόστος παραγωγής.

5.4 Μελλοντικές επεκτάσεις και συνέχεια

Μετά το πέρας της μελέτης η εργασία αυτή μπορεί να θεωρηθεί εφαλτήριο για περαιτέρω εμβάθυνση και διερεύνηση σε μελλοντικές εργασίες.

- Μία εξέλιξη της παρούσας εργασίας είναι η χρήση μεγαλύτερων μηκών και διαφορετικών νοθεύσεων ίνας Ερβίου σε συνδυασμό με FBG όσο το δυνατόν υψηλότερης ανακλαστικότητας, υλοποιώντας εκ νέου όλες τις τοπολογίες, με στόχο την αύξηση του επιπέδου ισχύος στην έξοδο.
- Να πραγματοποιηθεί θεωρητική μελέτη των τοπολογιών, ώστε να καταλήξουμε στο βέλτιστο αποτέλεσμα με όσο το δυνατό μικρότερο κόστος.
- Εν δυνάμει όλες οι τοπολογίες θα μπορούσαν να χρησιμοποιηθούν για την αύξηση της ισχύος εξόδου με χρήση πολλαπλών μονάδων και χρήση οπτικών στοιχείων άθροισης των επί μέρους εξόδων.
- Εξετάζεται η χρήση τους ως ενεργοί αισθητήρες στα πλαίσια μετρήσεων μηχανικών καταπονήσεων ή /και θερμοκρασιών.

Βιβλιογραφία – Αναφορές - Διαδικτυακές Πηγές

[1] <https://www.oryktosploutos.net/2012/04/rees/#.WLKTpPmLTIU>

[2] Setsuhisa TANABE, “Development of Rare-Earth Doped Fiber Amplifiers for Broad Band Wavelength-Division-Multiplexing Telecommunication”, *Photonics Based on Wavelength Integration and Manipulation IPAP Books 2* (2005) pp. 101–112

[3] H. Steinkemper, “Stark level analysis of the spectral line shape of electronic transitions in rare earth ions embedded in host crystals”, *New Journal of Physics* (2013)

[4] Paul E. Green, *Δίκτυα Οπτικών Ινών*

[5] Emanuel Desurvire, *Erbium doped-fiber amplifiers principles and applications*, Wiley (2002)

[6] Govind P. Agrawal, *Συστήματα επικοινωνιών με οπτικές ίνες*, εκδόσεις Τζιόλα

[7] <https://www.thorlabs.com/>

[8] <https://drive.google.com/file/d/0BxUWVNXCOpNveFBPRWtHWnFmODQ/view?resourcekey=0-Y0lxxzXnuib6YA1LH5ZBaA>

[9] <https://www.techopedia.com/>

Παράρτημα Α

Model	TED200C
TEC Current Output	
Control Range	-2 A to 2 A
Compliance Voltage	>6 V
Maximum Output Power	12 W
Measurement Resolution	1 mA
Accuracy	±10 mA
Noise and Ripple (Typ.)	<1 mA
TEC Current Limit	
Setting Range	0 to >2 A
Measurement Resolution	1 mA
Accuracy	±20 mA
Thermistor Sensors*	
Control Range	10 Ω to 20 kΩ / 100 Ω to 200 kΩ (2 Ranges)
Setting Resolution (20 kΩ / 200 kΩ Range)	1 Ω / 10 Ω
Measurement Resolution (20 kΩ / 200 kΩ Range)	1 Ω / 10 Ω
Accuracy (20 kΩ / 200 kΩ Range)	±10 Ω / ±100 Ω
Temperature Stability (24 Hours) ^P (20 kΩ / 200 kΩ Range)	<0.5 Ω / <5 Ω
IC Sensors	
Supported Sensors	AD690, AD692, LM135, LM335
Control Range with AD690, LM135	-45 °C to 145 °C
Control Range with AD692	-25 °C to 105 °C
Control Range with LM335	-40 °C to 100 °C
Setting Resolution	0.01 °C
Measurement Resolution	0.01 °C
Accuracy (Except LM335)	±0.1 °C
Temperature Stability (24 Hours)	<0.002 °C
Temperature Control Input	
Input Resistance	10 kΩ
Control Voltage	-10 V to +10 V
Transmission Coefficient Thermistor (20 kΩ / 200 kΩ Range)	2 kΩ/V / 20 kΩ/V ± 5%
Transmission Coefficient IC-Sensors	20°C/V ± 5%
Temperature Control Output	
Load Resistance	>10 kΩ
Transmission Coefficient Thermistor (20 kΩ / 200 kΩ Range)	500 mV/kΩ / 50 mV/kΩ ± 5%
Transmission Coefficient IC-Sensors	50 mV/°C ± 5%
General Data	
Safety Features	TEC Current Limit, Short Circuit When TEC Off, No Sensor Protection, Open Circuit Detection, Over Temperature Protection
Display	LED, 5 Digits
Connector for Sensor, TE Cooler, TEC On Signal	15-Pin D-Sub Jack
Connectors for Control Input / Output	BNC
Chassis Ground Connector	4 mm Bananas Jack
Line Voltage	100 V, 115 V, 230 V +15%/-10% Each
Line Frequency	50 to 60 Hz
Maximum Power Consumption	60 W
Mains Supply Overvoltage	Category II (Cat II)
Operating Temperature	0 to 40 °C
Storage Temperature	-40 to 70 °C
Relative Humidity	Max. 80% Up to 31 °C, Decreasing to 50% at 40 °C
Pollution Degree (Indoor Use Only)	2
Operation Altitude	<2000 m
Warm-up Time for Rated Accuracy	10 min
Weight	<3.1 kg
Dimensions (W x H x D) without Operating Elements	146 mm x 66 mm x 290 mm
Dimensions (W x H x D) with Operating Elements	146 mm x 77 mm x 320 mm

Τεχνικά χαρακτηριστικά του controller θερμοκρασίας [7]

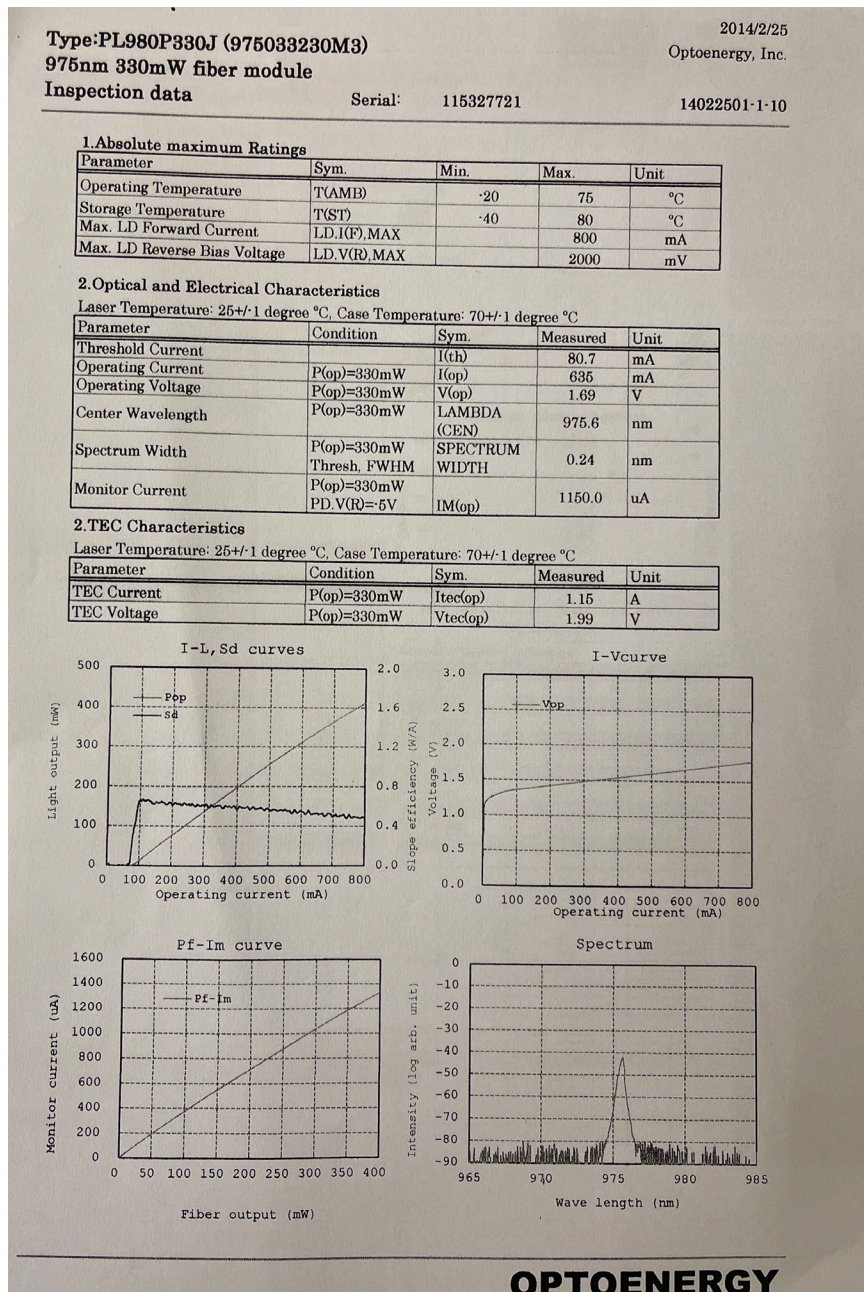
Ανάπτυξη και πειραματικός χαρακτηρισμός fiber laser

Item #	LDC200CV	LDC201CU	LDC202C	LDC205C	LDC210C	LDC220C	LDC240C
Current Control (Constant Current Mode)							
Control Range	0 to ±20 mA	0 to ±100 mA	0 to ±200 mA	0 to ±500 mA	0 to ±1 A	0 to ±2 A	0 to ±4 A
Compliance Voltage	>6 V	>5 V	>10 V	>10 V	>10 V	>4 V	>5 V
Resolution	1.0 µA	10 µA	10 µA	10 µA	100 µA	100 µA	100 µA
Accuracy	±20 µA	±50 µA	±100 µA	±50 mA	±1.0 mA	±2.0 mA	±4.0 mA
Noise Without Ripple ^a	<1.0 µA	<0.2 µA	<1.5 µA	<3 µA	<5 µA	<15 µA	<50 µA
Ripple ^b	<0.5 µA	<0.5 µA	<1.5 µA	<2 µA	<3 µA	<5 µA	<8 µA
Transients (typ.)	<10 µA	<10 µA	<0.2 mA	<0.5 mA	<1 mA	<2 mA	<4 mA
Drift, 24hours ^c	<1 µA	<2 µA	<3 µA	<10 µA	<20 µA	<100 µA	<200 µA
Temperature Coefficient	<50 ppm/°C						
Current Limit							
Setting Range	0 to >20 mA	0 to >100 mA	0 to >200 mA	0 to >500 mA	0 to >1 A	0 to >2 A	0 to >4 A
Resolution	1 µA	10 µA	10 µA	10 µA	100 µA	100 µA	100 µA
Accuracy	±50 µA	±200 µA	±500 µA	±1.5 mA	±2.5 mA	±5 mA	±10 mA
Power Control (Constant Power Mode)							
Photocurrent Control Range	5 µA to 2 mA	25 µA to 10 mA			50 µA to 20 mA		
Photocurrent Resolution	0.1 µA	1 µA			1 µA		
Photocurrent Accuracy	±2 µA	±10 µA			±20 µA		
Analog Modulation Input							
Input Resistance	10 kΩ						
Small Signal 3dB Bandwidth, CC Mode	DC to 100 kHz	DC to 0.2 kHz	DC to 250 kHz	DC to 150 kHz	DC to 100 kHz	DC to 50 kHz	DC to 30 kHz
Modulation Coefficient, CC Mode	2 mA/V ± 5%	10 mA/V ± 5%	20 mA/V ± 5%	50 mA/V ± 5%	100 mA/V ± 5%	200 mA/V ± 5%	400 mA/V ± 5%
Modulation Coefficient, CP Mode	0.2 mA/V ± 5%	1 mA/V ± 5%			2 mA/V ± 5%		
Laser Current Monitor Output							
Load Resistance	>10 kΩ						
Transmission Coefficient	500 V/A ± 5%	100 V/A ± 5%	50 V/A ± 5%	20 V/A ± 5%	10 V/A ± 5%	5 V/A ± 5%	2.5 V/A ± 5%
General data							
Safety Features	Interlock, Laser Current Limit, Soft Start, Short Circuit when Laser Off, Open Circuit Detection, Over Temperature Protection						
Display	LED, 5 Digits						
Connector for Laser, Photodiode, Interlock & Laser On Signal	9-pin D-Sub Jack						
Connectors for Control Input / Output	BNC						
Chassis Ground Connector	4 mm Banana Jack						
Line Voltage / Frequency	100 V, 115 V, 230 V +15% -10% each / 50 to 60 Hz						
Maximum Power Consumption	20 VA	20 VA	25 VA	30 VA	40 VA	60 VA	100 VA
Mains Supply Overvoltage	Category II (Cat II)						
Operating Temperature	0 to 40 °C						
Storage Temperature	-40 to 70 °C						
Relative Humidity	Max. 80% Up to 31 °C, Decreasing to 50% at 40 °C						
Pollution Degree (Indoor Use Only)	2						
Operation Altitude	<2000 m						
Warm-up Time for Rated Accuracy	10 min						
Weight	<3.1 kg			<3.3 kg			
Dimensions (W X H X D) without Operating Elements	146 x 66 x 290 mm ³						
Dimensions (W X H X D) with Operating Elements	146 x 77 x 320 mm ³						

Τεχνικά χαρακτηριστικά του controller ρεύματος [7]

MS9740A Optical Spectrum Analyzer	
Items	Specifications
Supported Optical Fiber	SM fiber (ITU-T G.652), 50 µm/125 µm GI fiber ^{a1}
Optical Connector	User replaceable: FC, SC, ST, DIN (All connectors are PC polished.)
Wavelength Measurement Range	600 nm to 1750 nm
Wavelength Accuracy ^{a2}	±20 pm (1520 nm to 1620 nm, Resolution: 0.03 nm to 0.2 nm), ±100 pm (1520 nm to 1620 nm, Resolution: 0.5 nm, 1.0 nm) ^{a3}
Wavelength Stability ^{a2}	±300 pm (600 nm to 1520 nm), ±200 pm (1520 nm to 1570 nm), ±300 pm (1570 nm to 1750 nm) ^{a4}
Wavelength Linearity ^{a2}	±4.5 pm
Setting Resolution	±20 pm (1520 nm to 1620 nm)
Resolution Accuracy ^{a2, a5}	0.03, 0.05, 0.07, 0.1, 0.2, 0.5, 1.0 nm (RBW: 3 dB optical filter: transmission bandwidth)
Measurement Range ^{a2}	±7% (Resolution: 0.1 nm), ±3% (Resolution: 0.2 nm), ±2.2% (Resolution: 0.5 nm) [1520 nm to 1620 nm] ±30% (Resolution: 0.1 nm), ±15% (Resolution: 0.2 nm), ±7% (Resolution: 0.5 nm) [600 nm to 1520 nm, 1620 nm to 1750 nm] -65 to +10 dBm (600 nm to 1000 nm), -85 to +10 dBm (1000 nm to 1250 nm), -90 to +10 dBm (1250 nm to 1600 nm), -85 to +10 dBm (1600 nm to 1650 nm), -65 to +10 dBm (1650 nm to 1700 nm), -55 to +10 dBm (1700 nm to 1750 nm) [5° to 30°C, VBW: 10 Hz, Sweep average: 10, Resolution: 0.07 nm to 1.0 nm, using SM fiber, Optical Att: Off] -60 to +10 dBm (600 nm to 1000 nm), -80 to +10 dBm (1000 nm to 1250 nm), -85 to +10 dBm (1250 nm to 1600 nm), -80 to +10 dBm (1600 nm to 1650 nm), -60 to +10 dBm (1650 nm to 1700 nm), -50 to +10 dBm (1700 nm to 1750 nm) [30° to 45°C, VBW: 10 Hz, Sweep average: 10, Resolution: 0.07 nm to 1.0 nm, using SM fiber, Optical Att: Off] -70 to +23 dBm (1100 nm to 1600 nm), [5° to 30°C, VBW: 10 Hz, Sweep average: 10, Resolution: 0.07 nm to 1.0 nm, using SM fiber, Optical Att: On] -65 to +23 dBm (1100 nm to 1600 nm), [30° to 45°C, VBW: 10 Hz, Sweep average: 10, Resolution: 0.07 nm to 1.0 nm, using SM fiber, Optical Att: On]
Level Accuracy ^{a2, a6}	±0.4 dB (Wavelength: 1310 nm, 1550 nm, Input: -10 dBm, Resolution: 0.1 nm to 1.0 nm)
Level Stability ^{a2}	±0.02 dB (1 min, Wavelength: 1550 nm, Input: -23 dBm, Resolution: 0.1 nm to 1.0 nm, no polarization fluctuation)
Level Linearity ^{a2}	±0.05 dB (Wavelength: 1550 nm, Input: -50 to 0 dBm, Optical Att: Off)
Level Flatness ^{a2, a7}	±0.05 dB (Wavelength: 1520 nm to 1620 nm, Resolution: 0.5 nm, Optical Att: Off)
Polarization Dependency ^{a2}	±0.05 dB (Wavelength: 1550 nm/1600 nm), ±0.1 dB (Wavelength: 1300 nm), [Resolution: 0.5 nm, 1.0 nm]
Dynamic Range ^{a2}	High dynamic range: 70 dB (1 nm from peak wavelength), 60 dB (0.4 nm from peak wavelength), 42 dB (0.2 nm from peak wavelength) Normal dynamic range: 62 dB (1 nm from peak wavelength), 58 dB (0.4 nm from peak wavelength), 42 dB (0.2 nm from peak wavelength) [Wavelength: 1550 nm, Resolution: 0.05 nm, Optical Att: Off, 20° to 30°C]
Optical Return Loss ^{a2}	±35 dB (1310 nm, 1550 nm)
Sweep	Sweep width: 0.2 nm to 1200 nm, 0 nm Sweep speed: ≤0.2 s (span: 5 nm, Resolution: 0.1 nm), ≤0.3 s (span: 500 nm) [VBW: 10 kHz, Normal dynamic range, center 1550 nm (span: 5 nm), 1200 nm (span: 500 nm), sweep start to stop, no optical input, sampling point: ≤501]
Sampling Point	51, 101, 251, 501, 1001, 2001, 5001, 10001, 20001, 50001
Display	800 × 600 dots, 8.4 inch SVGA color LCD
Function	Measurement functions: Auto Measure, Optical pulse measurement (External trigger), Power monitor Display functions: Normal, Normalize, Max hold, Min hold, Value in Air/Vacuum, Effective resolution, Multimode fiber, Overlap Analysis functions: Waveform difference function, Marker function, Waveform analysis (Threshold, n dB-Loss, Envelope, RMS, SMSR, Spectrum Power), Light source (FP-LD, DFB-LD, LED, LD-Module), Opt. Amp, PMD, WDM Calibration functions: Auto Align, Wavelength cal., Level offset, Wavelength offset Memory function: Display measurement data to memory A to J (10 waveforms) Interfaces: Ethernet, GPIB (Option) I/O: I/O: Save and read files to USB memory Input: External trigger terminal (0 to 0.8 V/2 V to 5 V, high impedance) Output: Measurement data text file, measurement screen file (BMP, PNG), VGA output terminal, keyboard, mouse
Operating Conditions	Operating temperature: +5° to +45°C, Storage temperature: -20° to +60°C, Relative humidity: 0 to 90% (no condensation)
Power Supply	100 V(ac) to 120 V(ac)/200 V(ac) to 240 V(ac), 50 Hz to 60 Hz, ≤75 VA
Dimensions and Mass	426 (W) × 177 (H) × 350 (D) mm (excluding projections), ≤15.0 kg (without options)
EMC	EN61326-1, EN61000-3-2
LVD	EN61010-1

Τεχνικά χαρακτηριστικά του OSA [7]



Τεχνικά χαρακτηριστικά του Laser άντλησης [9]