



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΔΥΤΙΚΗΣ ΑΤΤΙΚΗΣ

ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

ΤΜΗΜΑ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ & ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΩΝ

ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

Διπλωματική Εργασία

Οπτικές ίνες νοθευμένες με ιόντα Ερβίου και η εφαρμογή τους στους οπτικούς ενισχυτές



Φοιτητής: ΓΙΟΛΛΑΣΗΣ ΠΑΝΑΓΙΩΤΗΣ

ΑΜ: 50346100

Επιβλέπων Καθηγητής

Ν. Σταθόπουλος (Καθ.)

ΑΘΗΝΑ-ΑΙΓΑΛΕΩ, (Φεβρουάριος) (2021)



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

Diploma Thesis

Erbium doped fibers and their application in optical amplification



Student: GIOLDASIS PANAGIOTIS
Registration Number: 50346100

Supervisor

N. Stathopoulos
Professor

ATHENS-EGALEO, (February) (2021)

Μέλη Εξεταστικής Επιτροπής

Νικόλαος Σταθόπουλος (Καθ)	
Ηρακλής Σίμος (Αν.Καθ)	
Στυλιανός Σαββαΐδης (Καθ)	

ΔΗΛΩΣΗ ΣΥΓΓΡΑΦΕΑ ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ

Ο κάτωθι υπογεγραμμένος ΓΙΟΛΔΑΣΗΣ ΠΑΝΑΓΙΩΤΗΣ του ΚΩΝΣΤΑΝΤΙΝΟΥ, με αριθμό μητρώου 50346100, φοιτητής του Πανεπιστημίου Δυτικής Αττικής της Σχολής Μηχανικών του Τμήματος Ηλεκτρολόγων και Ηλεκτρονικών Μηχανικών, δηλώνω υπεύθυνα ότι:

«Είμαι συγγραφέας αυτής της πτυχιακής/διπλωματικής εργασίας και ότι κάθε βοήθεια την οποία είχα για την προετοιμασία της είναι πλήρως αναγνωρισμένη και αναφέρεται στην εργασία. Επίσης, οι όποιες πηγές από τις οποίες έκανα χρήση δεδομένων, ιδεών ή λέξεων, είτε ακριβώς είτε παραφρασμένες, αναφέρονται στο σύνολό τους, με πλήρη αναφορά στους συγγραφείς, τον εκδοτικό οίκο ή το περιοδικό, συμπεριλαμβανομένων και των πηγών που ενδεχομένως χρησιμοποιήθηκαν από το διαδίκτυο. Επίσης, βεβαιώνω ότι αυτή η εργασία έχει συγγραφεί από μένα αποκλειστικά και αποτελεί προϊόν πνευματικής ιδιοκτησίας τόσο δικής μου, όσο και του Ιδρύματος.

Παράβαση της ανωτέρω ακαδημαϊκής μου ευθύνης αποτελεί ουσιώδη λόγο για την ανάκληση του πτυχίου μου».

Ο Δηλών



Η εκπαίδευση από τα πρώτα μαθητικά χρόνια φαντάζει σαν μία δύσκολη ανηφόρα στο κάθε παιδί. Πρώτα η θέληση από τους γονείς, ώστε το παιδί τους να αγαπήσει τη μάθηση, είναι αυτή που βάζει τη βάση για τη συνέχεια. Μετά η αγάπη για μάθηση του κάθε ανθρώπου φέρνει το επιθυμητό αποτέλεσμα. Έτσι λοιπόν θα ήθελα να εκφράσω την ευγνωμοσύνη μου στους γονείς και στην οικογένεια μου για την προσφορά τους στη μέχρι τώρα ζωή μου, η οποία περιλάμβανε και όλη την εκπαιδευτική διαδικασία μέχρι την ολοκλήρωση αυτής της Διπλωματικής εργασίας.

Όλους τους καθηγητές μου μαζί αλλά και τον καθένα προσωπικά ευχαριστώ, γιατί έχτισαν πέτρα πέτρα στο οικοδόμημα της γνώσης την κατάρτιση μου. Ιδιαίτερη αναφορά, όχι από επιβολή και συνήθεια σε τέτοιες καταγραφές Διπλωματικών εργασιών, αλλά από πεποίθηση, ευγνωμοσύνη και σεβασμό οφείλω στον καθηγητή μου κ. Νίκο Σταθόπουλο. Το "ευχαριστώ" ακούγεται φτωχό για να εκφράσει την αναγνώριση των όσων έπραξε για μένα. Δυνατός, στο να σε εμπνεύσει να μάθεις ότι εκείνος κατέχει όπως λίγοι. Έτοιμος, κάθε στιγμή να απαντήσει στις απορίες και στα ερωτήματα και να σου δώσει στήριγμα για να συνεχίσεις την ανάβαση. Σίγουρος, ότι η αυστηρότητα για τον φοιτητή είναι αγάπη. Με τα σύγχρονα μέσα τεχνολογίας στην επικοινωνία, κάθε φορά που του έστελνα μία ερώτηση, μία απορία, μία παράκληση για διευκρίνηση, μου απάνταγε την ίδια μέρα και με διόρθωνε άμεσα. Πριν βεβαιωθώ ότι έγινε η αποστολή του αιτήματός μου, ήταν εκεί με την απάντησή του. Όπου τα πράγματα φάνταζαν για μένα δυσνόητα, ήταν εκεί για να με εμπνεύσει και να με ωθήσει να ακολουθήσω τις ράγες της μάθησης δίνοντας μου χέρι βοήθειας κάθε φορά που προέκυπτε μία δυσκολία. "Ρώταμε να στο εξηγήσω" έλεγε συνέχεια, αν και η μεθοδικότητα του, ο προγραμματισμός και η μεταδοτικότητα του δεν άφηνε πολλά περιθώρια για να μην κατανοήσεις τα προσφερόμενα στην εκπαίδευση.

Εν τέλει, ευχαριστώ και τους συμφοιτητές μου, που αγωνιστήκαμε μαζί αυτά τα χρόνια, αλλά και τους φίλους μου, που μου συμπαραστάθηκαν με κάθε τρόπο. Κλείνοντας αυτήν την αναφορά ευελπιστώ, μέσα στους δύσκολους καιρούς που διανύουμε, να είμαστε όλοι καλά.

Περίληψη

Στη παρούσα Διπλωματική Εργασία αναλύονται πειραματικά τα χαρακτηριστικά απορρόφησης μιας ίνας ερβίου με υψηλή νόθευση. Εξετάζεται πειραματικά η σχέση της ισχύος και του εύρους ζώνης των πηγών με τις οποίες κάνουμε τις μετρήσεις, με τη φασματική απορρόφηση των ινών αυτών.

Λέξεις - Κλειδιά

Ίνες ερβίου, οπτικοί ενισχυτές, ενισχυτές ίνας ερβίου, οπτικός αναλυτής φάσματος, πηγή, εξασθενητής, μετρήσεις απορρόφησης σε ίνες ερβίου, Fiber Bragg Grating

Abstract

In the present Thesis, the absorption characteristics of a heavily erbium doped fiber are experimentally analyzed. The relationship between the power and the bandwidth of the sources that are used for the measurements, versus the spectral absorption of these fibers, is examined in detail.

Keywords

Erbium doped fibers, optical amplifiers, erbium fiber amplifier, optical spectrum analyzer, source, attenuator, erbium fiber absorption, Fiber Bragg Grating

Περιεχόμενα

Κατάλογος Πινάκων	9
Κατάλογος Εικόνων.....	9
Αλφαβητικό Ευρετήριο	13
ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	14
1 Θεωρητικό Μέρος.....	15
1.1 Οπτική ίνα.....	15
1.2 Ίνες νοθευμένες με σπάνιες γαιές.....	17
1.2.1 Ίνες σπανίων γαιών	17
1.2.2 Ίνες Ερβίου και χαρακτηριστικά	20
1.3 Τύποι ενισχυτών σπάνια γη.....	20
1.3.1 Thulium Fiber Amplifiers.....	20
1.3.2 Praseodymium Fiber Amplifiers.....	20
1.3.3 Neodymium και Ytternium Fiber Amplifiers	22
1.4 Ενισχυτής ίνας ερβίου	23
1.4.1 Stark splitting.....	25
1.4.2 Καμπύλη κέρδους ενισχυτών EDFA.....	26
1.5 Άλλοι τύποι Οπτικών Ενισχυτών.....	28
1.5.1 Τύποι οπτικών ενισχυτών.....	29
1.5.2 Συνδεσμολογία οπτικών Ενισχυτών	30
1.6 Laser με βάση νοθευμένες οπτικές ίνες.....	31
2 Εργαστηριακός Εξοπλισμός.....	33
2.1 Διαδικασία για την συγκόλληση ινών	33
2.2 Οπτικός Αναλυτής Φάσματος (Optical Spectrum Analyzer)	36
2.3 Πηγή Laser και οι αντίστοιχοι Controllers	37
2.4 SLD (Semiconductor Laser Diode).....	38
2.5 BBS (Broadband Source)	38
2.6 Ίνα Ερβίου.....	39
3 Πειραματικές Μέρος: Μετρήσεις απορρόφησης σε ίνες ερβίου.....	40
3.1 Για την πηγή BBS.....	40
3.2 Για την πηγή SLD	44
3.3 Για την πηγή BBS με εξασθενητή 5dB	48
3.4 Για την πηγή BBS με εξασθενητή 10dB	52
3.5 Για την πηγή BBS με εξασθενητή 15dB	56
3.6 Συγκεντρωτικά αποτελέσματα	60
3.7 Σχόλια – Παρατηρήσεις και Συμπεράσματα.....	65
3.8 Μετρήσεις απορρόφησης σε ίνες ερβίου με μονοχρωματική πηγή.....	67
3.8.1 Μέτρηση της μονοχρωματικής πηγής μέσω BBS και FBG1.53μm.....	67
3.8.2 Συγκεντρωτικά αποτελέσματα.....	72
3.8.3 Μεταβολή FBG λόγω καταπόνησης	73
4 Μέρος : Συμπεράσματα.....	75
4.1 Σχετικά με τις μετρήσεις απορρόφησης σε ίνες ερβίου	75
4.2 Σχετικά με τις μετρήσεις απορρόφησης σε ίνες ερβίου με μονοχρωματική πηγή.....	76
4.3 Μελλοντικές επεκτάσεις και συνέχεια	76
Βιβλιογραφία – Αναφορές - Διαδικτυακές Πηγές.....	78

Κατάλογος Πινάκων

Πίνακας 3.1: Μέγιστη εξασθένιση κάθε πηγής για κάθε ίνα ερβίου ξεχωριστά στα 1530nm.....	60
Πίνακας 3.2: Μέγιστη εξασθένιση κάθε πηγής για κάθε ίνα ερβίου ξεχωριστά στα 1530nm.....	72
Πίνακας 3.3: Η ισχύς πριν και μετά την καταπόνηση.....	74

Κατάλογος Εικόνων – Σχημάτων

Εικόνα 1.1: Δομή οπτικής ίνας.....	15
Εικόνα 1.2: Τρόποι μετάδοσης των οπτικών ακτινών εντός της οπτικής ίνας.....	16
Εικόνα1.3: Περιοδικός Πίνακας (Πηγή: https://el.wikipedia.org/wiki/%CE%A0%CE%B5%CF%81%CE%B9%CE%BF%CE%B4%CE%B9%CE%BA%CF%8C%CF%82%CF%80%CE%AF%CE%BD%CE%B1%CE%BA%CE%B1%CF%82%CF%84%CF%89%CE%BD%CF%87%CE%B7%CE%BC%CE%B9%CE%BA%CF%8E%CE%BD%CF%83%CF%84%CE%BF%CE%B9%CF%87%CE%B5%CE%AF%CF%89%CE%BD).....	18
Εικόνα1.4: Νοθευμένες οπτικές ίνες (Πηγή: https://www.fiberoptics4sale.com/blogs/archive-posts/95044294-what-are-rare-earth-doped-fibers).....	19
Εικόνα1.5: Διάγραμμα εκπομπής και απορρόφησης ερβίου (Πηγή : http://www.photonics.ntua.gr/Diafaneies_Fwtonikhhs/Energa_Stoixeia_Enisxytes_Inas_Erbiou.pdf).....	20
Εικόνα1.6: PDFΑ (Πηγή: https://www.fiberlabs.com/glossary/praseodymium-doped-fiber-amplifier/).....	21
Εικόνα1.7: Οπτικές ζώνες οπτικών τηλεπικοινωνιών (το PDFΑ λειτουργεί στη ζώνη 0) (Πηγή: https://www.fiberlabs.com/glossary/praseodymium-doped-fiber-amplifier/).....	21
Εικόνα 1.8: Απλοποιημένο ενεργειακό διάγραμμα του Pr και ενεργειακές μεταβάσεις σε κρύσταλλο πυριτίου (αριστερά) και κρύσταλλο φθορίου (δεξιά) (Πηγή: https://www.fiberlabs.com/glossary/praseodymium-doped-fiber-amplifier/).....	22
Εικόνα1.9: Δομή επιπέδου ενέργειας του ιόντος νεοδυμίου (Πηγή: https://www.rp-photonics.com/neodymium_doped_gain_media.html).....	22
Εικόνα1.10: Ενεργειακά επίπεδα ιόντων Yb και οι συνήθεις μεταβάσεις της άντλησης και του λείζερ (Πηγή: https://www.rp-photonics.com/ytterbium_doped_gain_media.html).....	23
Εικόνα 1.11: Βασική δομή EDFA.....	23

Σχήμα 1.12: Ενεργειακό διάγραμμα ίνας με προσμίξεις ερβίου (Πηγή: https://www.fiberlabs.com/glossary/erbium-doped-fiber-amplifier/).....	24
Σχήμα 1.13: Stark splitting.....	25
Σχήμα 1.14: Κέρδος ενός EDFA με βάση το μήκος κύματος.....	27
Σχήμα 1.15: Κέρδος συναρτήσει της ισχύος του σήματος εισόδου για EDFA.....	28
Εικόνα 1.16: Τοποθέτηση ενισχυτή.....	30
Σχήμα 1.17: Σχηματική περιγραφή laser.....	31
Σχήμα 1.18: Διάταξη ευθείας κοιλότητας.....	32
Σχήμα 1.19: ring fiber Laser.....	32
Εικόνα 2.1: Εξοπλισμός συγκόλλησης ιών του εργαστηρίου.....	33
Σχήμα 2.2: Μόνιμη συνένωση με συγκόλληση splice.....	34
Εικόνα 2.3: Η συγκόλληση ιών μπορεί να επηρεαστεί από διάφορες παραμέτρους όπως γωνία κοπής και κακή ευθυγράμμιση	35
Εικόνα 2.4: Optical Spectrum Analyzer.....	36
Εικόνα 2.5: Controllers ρεύματος και θερμοκρασίας Laser ημιαγωγού	37
Εικόνα 2.6: Laser για άντληση στα 980nm (αριστερά) και 1550nm (δεξιά).....	37
Εικόνα 2.7: Πηγή SLD (Semiconductor Laser Diode).....	38
Εικόνα 2.8: Πηγή BBS (Broadband source).....	38
Εικόνα 2.9: EDF.....	39
Σχήμα 3.1: Συνδεσμολογία μέτρησης της BBS.....	40
Σχήμα 3.2: Φασματική ισχύς της BBS στο εύρος ζώνης (1480nm-1600nm).....	40
Σχήμα 3.3: Συνδεσμολογία (BBS με EDF10cm).....	41
Σχήμα 3.4: Φασματική ισχύς BBS-EDF10cm (1500nm-1560nm).....	41
Σχήμα 3.5: Φασματική απορρόφηση της EDF10cm μέσω της BBS (1500nm-1560nm).....	41
Σχήμα 3.6: Συνδεσμολογία (BBS με EDF 21cm).....	42
Σχήμα 3.7: Φασματική ισχύς BBS-EDF21cm (1500nm-1560nm).....	42
Σχήμα 3.8 Φασματική απορρόφηση της EDF21cm μέσω της BBS(1500nm-1560nm).....	42
Σχήμα 3.9 Συνδεσμολογία (BBS με EDF 31cm).....	43

Σχήμα 3.10 Φασματική ισχύς BBS-EDF(10+21)cm (1480nm-1600nm).....	43
Σχήμα 3.11 Φασματική απορρόφηση EDF(10+21)cm μέσω της BBS (1480nm-1600nm).....	43
Σχήμα 3.12 Συνδεσμολογία μέτρησης της SLD.....	44
Σχήμα 3.13 Φασματική ισχύς της SLD στο εύρος ζώνης (1480nm-1600nm).....	44
Σχήμα 3.14 Συνδεσμολογία (SLD με EDF 10cm).....	45
Σχήμα 3.15 Φασματική ισχύς SLD – EDF10cm (1480nm-1600nm).....	45
Σχήμα 3.16 Φασματική απορρόφηση της EDF10cm μέσω της SLD (1480nm-1600nm).....	45
Σχήμα 3.17 Συνδεσμολογία (SLD με EDF 21cm).....	46
Σχήμα 3.18 Φασματική ισχύς SLD-EDF21cm (1480nm-1600nm).....	46
Σχήμα 3.19 Φασματική απορρόφηση της EDF21cm μέσω της SLD (1480nm-1600nm).....	46
Σχήμα 3.20 Συνδεσμολογία (SLD με EDF 31cm).....	47
Σχήμα 3.21 Φασματική ισχύς SLD-EDF(10+21)cm (1480nm-1600nm).....	47
Σχήμα 3.22 Φασματική απορρόφηση της EDF(10+21)cm μέσω της SLD(1480nm-1600nm).....	47
Σχήμα 3.23 Μέτρηση BBS με εξασθενητή 5dB.....	48
Σχήμα 3.24 Φασματική ισχύς της BBS5AT στο εύρος ζώνης (1480nm-1600nm).....	48
Σχήμα 3.25 Συνδεσμολογία (BBS 5AT με EDF10cm).....	49
Σχήμα 3.26 Φασματική ισχύς BBS5AT - EDF10cm (1480nm-1600nm).....	49
Σχήμα 3.27 Φασματική απορρόφηση της EDF10cm μέσω της BBS5AT (1480nm-1600nm).....	49
Σχήμα 3.28 Συνδεσμολογία (BBS 5AT με EDF 21cm).....	50
Σχήμα 3.29 Φασματική ισχύς BBS5AT – EDF21cm (1480nm-1600nm).....	50
Σχήμα 3.30 Φασματική απορρόφηση της EDF21cm μέσω της BBS5AT (1480nm-1600nm).....	50
Σχήμα 3.31 Συνδεσμολογία (BBS 5AT με EDF 31cm).....	51
Σχήμα 3.32 Φασματική ισχύς BBS5AT – EDF(10+21)cm (1480nm-1600nm).....	51
Σχήμα 3.33 Φασματική απορρόφηση της EDF(10+21)cm μέσω της BBS5AT (1480nm-1600nm).....	51
Σχήμα 3.34 Μέτρηση BBS με εξασθενητή 10dB.....	52
Σχήμα 3.35 Φασματική ισχύς της BBS10T στο εύρος ζώνης (1480nm-1600nm).....	52
Σχήμα 3.36 Συνδεσμολογία (BBS 10AT με EDF 10cm).....	53

Σχήμα 3.37 Φασματική ισχύς BBS10AT - EDF10cm (1480nm-1600nm).....	53
Σχήμα 3.38 Φασματική απορρόφηση της EDF10cm μέσω της BBS10AT (1480nm-1600nm).....	53
Σχήμα 3.39 Συνδεσμολογία (BBS10AT με EDF 21cm).....	54
Σχήμα 3.40 Φασματική ισχύς BBS10AT – EDF21cm (1480nm-1600nm).....	54
Σχήμα 3.41 Φασματική απορρόφηση της EDF21cm μέσω της BBS10AT (1480nm-1600nm).....	54
Σχήμα 3.42 Συνδεσμολογία (BBS10AT με EDF 31cm).....	55
Σχήμα 3.43 Φασματική ισχύς BBS10AT – EDF(10+21)cm (1480nm-1600nm).....	55
Σχήμα3.44 Φασματική απορρόφηση της EDF(10+21)cm μέσω της BBS 10AT (1480nm-1600nm).....	55
Σχήμα 3.45 Μέτρηση BBS με εξασθενητή 15dB.....	56
Σχήμα 3.46 : Φασματική ισχύς της BBS15AT στο εύρος ζώνης (1480nm-1600nm).....	56
Σχήμα 3.47 Συνδεσμολογία (BBS 15AT με EDF 10cm).....	57
Σχήμα 3.48 Φασματική ισχύς BBS15AT - EDF10cm (1480nm-1600nm).....	57
Σχήμα 3.49 Φασματική απορρόφηση της EDF10cm μέσω της BBS15AT (1480nm-1600nm).....	57
Σχήμα 3.50 Συνδεσμολογία (BBS 15AT με EDF 21cm).....	58
Σχήμα 3.51 Φασματική ισχύς BBS15AT – EDF21cm (1480nm-1600nm).....	58
Σχήμα 3.52 Φασματική απορρόφηση της EDF21cm μέσω της BBS15AT (1480nm-1600nm).....	58
Σχήμα 3.53 Συνδεσμολογία (BBS 15AT με EDF 31cm).....	59
Σχήμα 3.54 Φασματική ισχύς BBS15AT – EDF(10+21)cm (1480nm-1600nm).....	59
Σχήμα 3.55 Φασματική απορρόφηση της EDF(10+21)cm μέσω της BBS15AT (1480nm-1600nm).....	59
Σχήμα 3.56 Φασματική ισχύς (1480nm-1600nm) των πέντε πηγών.....	60
Σχήμα 3.57 Φασματική καμπύλη απόσβεσης για τις πέντε πηγές.....	61
Σχήμα 3.58 Φασματική καμπύλη απόσβεσης για τις πέντε πηγές.....	61
Σχήμα 3.59 Φασματική καμπύλη απόσβεσης για τις πέντε πηγές στα (1480nm-1600nm).....	61
Σχήμα 3.60 Συμπεριφορά των πέντε πηγών στα 1530nm για κάθε μήκος ίνας ξεχωριστά.....	62
Σχήμα 3.61 Φασματική καμπύλη απόσβεσης για τις τρεις EDF.....	63
Σχήμα 3.62 Φασματική καμπύλη απόσβεσης για τις τρεις EDF.....	63

Σχήμα 3.63 Φασματική καμπύλη απόσβεσης για τις τρεις EDF.....	63
Σχήμα 3.64 Φασματική καμπύλη απόσβεσης για τις τρεις EDF.....	64
Σχήμα 3.65 Φασματική καμπύλη απόσβεσης για τις τρεις EDF.....	64
Σχήμα 3.66 Συνδεσμολογία μέτρησης της BBS με FBG.....	67
Σχήμα 3.67 Φασματική ισχύ της BBS στο εύρος ζώνης στο 1530.....	68
Σχήμα 3.68 Συνδεσμολογία (BBS με EDF10cm).....	69
Σχήμα 3.69 Φασματική ισχύς BBS - EDF10cm στο 1530.....	69
Σχήμα 3.70 Φασματική απορρόφηση της EDF10cm μέσω της BBS στο 1530.....	69
Σχήμα 3.71 Συνδεσμολογία (BBS με την EDF 21cm).....	70
Σχήμα 3.72 Φασματική ισχύς BBS – EDF21cm στο 1530.....	70
Σχήμα 3.73 Φασματική απορρόφηση της EDF21cm μέσω της BBS στο 1530.....	70
Σχήμα 3.74 Συνδεσμολογία (BBS με EDF 31cm).....	71
Σχήμα 3.75 Φασματική ισχύς BBS – EDF31cm στο 1530.....	71
Σχήμα 3.76 Φασματική απορρόφηση της EDF31cm μέσω της BBS στο 1530.....	71
Σχήμα 3.77 Συμπεριφορά των δύο πηγών στα 1530nm για κάθε μήκος ίνας ξεχωριστά.....	72
Σχήμα 3.78 Συνδεσμολογία (BBS με την EDF 21cm) λόγω καταπόνησης.....	73
Σχήμα 3.79 Φασματική ισχύς στα 1531 nm.....	73
Σχήμα 3.80 Μετατόπιση απόκρισης ανακλαστικότητας εξαιτίας καταπόνησης του FBG.....	74
Σχήμα 4.1: Συμπεριφορά των πέντε πηγών στα 1530nm για κάθε μήκος ίνας ξεχωριστά.....	75

Αλφαβητικό Ευρετήριο

EDF – Erbium Doped Fiber
DFA – Doped Fiber Amplifier
EDFA – Erbium Doped Fiber Amplifier
OSA – Optical Spectrum Analyzer
BBS – Broadband Source
SLD – Semicondutor Laser Diode
FBG – Fiber Bragg Grating

Εισαγωγή

Σκοπός της εργασίας είναι να χαρακτηρίσουμε την απόσβεση την οποία εμφανίζουν οι ίνες ερβίου βαριάς νόθευσης που έχουμε στο εργαστήριο, χωρίς την εφαρμογή πηγής άντλησης. Η δομή της διπλωματικής εργασίας είναι η εξής: Στο πρώτο κεφάλαιο γίνεται περιληπτική παρουσίαση των θεωρητικών θεμάτων που αντιστοιχούν στις ίνες ερβίου (γενικά στις νοθευμένες ίνες), με εφαρμογές στους οπτικούς ενισχυτές και τα laser. Στο δεύτερο κεφάλαιο, γίνεται η παρουσίαση του εργαστηριακού εξοπλισμού που θα χρησιμοποιήσουμε στο πειραματικό μέρος της εργασίας. Στο τρίτο κεφάλαιο, γίνεται ανάλυση όλων των πειραμάτων που κάναμε και όλων των αποτελεσμάτων που βγάλαμε. Μέσα σ' αυτό το πλαίσιο μελετήσαμε δυο πηγές, εξετάσαμε το θέμα της ισχύος τόσο για πηγές ευρείας ζώνης, όσο και για πηγές στενού εύρους ζώνης μηκών κύματος (σχεδόν μονοχρωματικές). Καταλήξαμε σε συμπεράσματα και σε πιθανές επεκτάσεις.

1 Θεωρητικό Μέρος

1.1 Οπτική ίνα

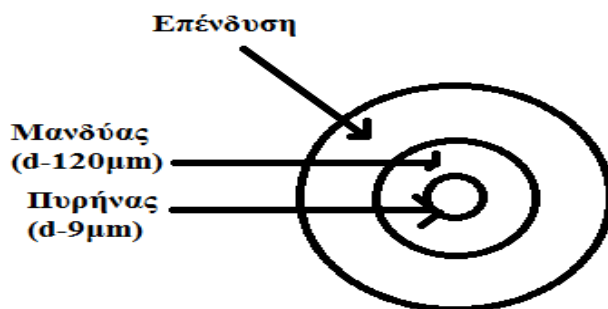
Οι οπτικές ίνες είναι μικρές αμελητέου πάχους γυάλινες ίνες που μεταφέρουν σήματα σε μεγάλες αποστάσεις με μικρή όμως απώλεια. Υπερέχουν των συμβατικών χάλκινων καλωδίων εξαιτίας του μεγάλου εύρους ζώνης που μπορούν να υποστηρίξουν, καθώς κατασκευάζεται από την πιο φθηνή και άφθονη πρώτη ύλη. Το φως μέσα στην ίνα διαδίδεται μέσω του φαινομένου της ολικής ανάκλασης, με πολλές ολικές ανακλάσεις μεταξύ του πυρήνα και περιβλήματος. Υπάρχει ποικιλία οπτικών ινών που κατασκευάζονται από διαφορετικά υλικά και με διαφορετικές λειτουργίες. Οι οπτικές ίνες βρίσκουν εφαρμογή στην ιατρική, στις τηλεπικοινωνίες, στις βιομηχανίες και σε στρατιωτικές εφαρμογές.[1]

Η κατηγοριοποίηση των οπτικών ινών (μονότροπες, πολύτροπες ίνες) γίνεται ανάλογα με το υλικό της ίνας (γυαλί, πλαστικό) και με το δείκτη διάθλασης.

Διαχωρίζουμε τις οπτικές ίνες λοιπόν σε 2 κατηγορίες βάση της διάμετρο τους:

- Οι πολύτροπες ίνες που έχουν διαστάσεις από 50-100 μm , όμως εξαιτίας της μεγάλης διαμέτρου έχουν μεγάλο αριθμητικό άνοιγμα NA επιτρέποντας έτσι αρκετές φωτεινές ακτίνες να μετακινούνται μέσα στο πυρήνα. Όσο μεγαλύτερη είναι η γωνία υποδοχής, τόσο μεγαλύτερο και το πλήθος των διαφορετικών διαδρομών, τότε αυτή η ίνα ονομάζεται πολυτροπική. Όμως το κύριο μειονέκτημα τους είναι το περιορισμένο εύρος ζώνης.
- Οι μονοτροπικές ίνες που έχουν διαστάσεις έως 10 μm , εξαιτίας αυτής της μικρής διαμέτρου του πυρήνα επιτρέπεται η διέλευση σε περιορισμένο πλήθος ακτινών και διαθέτουν μεγαλύτερο εύρος ζώνης σε σύγκριση με τις πολύτροπες. [1]

Η γεωμετρική τους δομή αποτελείται από δύο ομοαξονικά διαφανή υλικά, που αποτελούν το εσωτερικό και εξωτερικό τμήμα της. Δηλαδή τον πυρήνα (core) και εξωτερικά τον μανδύα (cladding), ο οποίος περιβάλλει τον πυρήνα και γύρω από το μανδύα υπάρχει πλαστική επένδυση η οποία δεν συμμετέχει στην διάδοση του σήματος αλλά στην προστασία της οπτικής ίνας από περιβαλλοντικές συνθήκες. [2]



Εικόνα 1.1: Δομή οπτικής ίνας

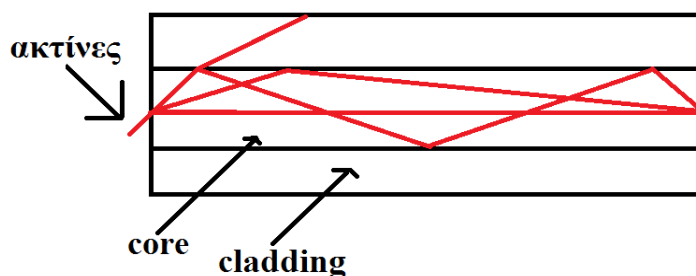
Η κυματοδήγηση του οπτικού σήματος γίνεται κυρίως στον πυρήνα της ίνας για αυτό θα πρέπει ο δείκτης διάθλασης του πυρήνα να είναι μεγαλύτερος από το δείκτη διάθλασης του μανδύα

Οπτικές ίνες νοθευμένες με ιόντα Ερβίου και η εφαρμογή τους στους οπτικούς ενισχυτές

($n_{core} > n_{cladding}$), με αποτέλεσμα να μην έχουμε διαρροές από το πυρήνα στον μανδύα και χάνουμε ισχύ σήματος.

Αρχικά, το κεντρικό κομμάτι της ίνας που μεταφέρει το φως είναι φτιαγμένο από ένα διαφανές υλικό, με δείκτη διάθλασης n_1 και ονομάζεται πυρήνας ή 'core'.

Η διάδοση του φωτός μέσα στην οπτική ίνα εξαρτάται από την γωνία με την οποία η ακτίνα εισέρχεται στην διαχωριστική επιφάνεια πυρήνα – περιβλήματος. Αν αυτή είναι κάτω από μια συγκεκριμένη γωνία την $\theta_{critical}$ ανακλάται πλήρως και έτσι διαδίδεται.



Εικόνα 1.2: Τρόποι μετάδοσης των οπτικών ακτινών εντός της οπτικής ίνας

Στο σχήμα φαίνεται η διάδοση του φωτός μέσα στην οπτική ίνα που έχουμε ολική εσωτερική ανάκλαση. Το φως που εκπέμπεται μέσω της οπτικής ίνας παγιδεύεται μέσα στο πυρήνα λόγω του φαινομένου εσωτερικής ανάκλασης. Η συνολική εσωτερική ανάκλαση συμβαίνει όταν το φως μέσα στο πυρήνα της ίνας προσπίπτει σε γωνία μεγαλύτερη από την κρίσιμη γωνία και επιστρέφει στον πυρήνα χωρίς απώλειες ώστε να γίνεται η διάδοση του φωτός κατά μήκος της ίνας.

Η διάδοση του φωτός μέσα στην ίνα παρουσιάζει ελάχιστες απώλειες. Οι παράμετροι που επηρεάζουν την διάδοση των οπτικών σημάτων μέσα από μια οπτική ίνα είναι η εξασθένηση (η απόσβεση της οπτικής ισχύος κατά μήκος της ίνας) και η διασπορά ενός παλμού που διαδίδεται μέσα στην ίνα (μεταβολή της διάρκειας του παλμού) [1]. Η εξασθένηση (attenuation) εκδηλώνεται ως μείωση της οπτικής ισχύος κατά μήκος της ίνας και εξαρτάται από το μήκος κύματος και από το υλικό με το οποίο η οπτική ίνα έχει κατασκευαστεί. Τα κύρια αίτια που προκαλούν την εξασθένηση είναι:

- Σκέδαση λόγω ανομοιογένειας υλικού
- Απορρόφηση ισχύος (είτε από το ίδιο υλικό της ίνας είτε από προσμίξεις που εισχώρησαν σε αυτό) και εξαρτάται από το μήκος κύματος.
- Άλλα φαινόμενα όπως γήρανση, κύρτωσης της ίνας, εισχώρηση υγρασίας, απώλειες λόγω συγκολλήσεων.

Τέλος, ο συντελεστής εξασθένησης (dB/km) αποτελεί σημαντικό παράγοντα για την εξασθένηση του σήματος. [2]

1.2 Ίνες νοθευμένες με σπάνιες γαίες

Ακολουθώντας, θα παρουσιάσουμε τις οπτικές ίνες νόθευσης σπανίων γαιών και θα αναφέρουμε τις σπάνιες γαίες ως στοιχεία του περιοδικού πίνακα που όταν τοποθετηθούν στις οπτικές ίνες τροποποιούν τις ιδιότητες τους.

1.2.1 Ίνες σπανίων γαιών

Οι σπάνιες γαίες είναι 17 χημικά στοιχεία και συγκεκριμένα οξειδία μετάλλων και βρίσκονται μέσα σε άλλα ορυκτά. Εξαιτίας της χαμηλής συγκέντρωσης τους μέσα σε άλλα ορυκτά (που έχουν γαιώδη μορφή) λέγονται σπάνιες, καθώς και για τον τρόπο εξόρυξής τους ο οποίος είναι επικίνδυνος για την προστασία τους περιβάλλοντος, όμως κατά την εξόρυξη τους και επεξεργασία τους παρουσιάζεται ραδιενέργεια που προκαλεί καρκίνο στον άνθρωπο. Τις συναντάμε και σε υποθαλάσσιο χώρο που σημαίνει ότι σχετίζονται άμεσα με τις Αποκλειστικές Οικονομικές Ζώνες των κρατών. Η ζήτηση των σπανίων γαιών αυξάνεται συνεχώς, αφού αποτελούν βασικά συστατικά για τις χρήσεις προϊόντων όπως σε (στρατιωτικό εξοπλισμό, κινητά τηλέφωνα). [9] Οι σπάνιες γαίες στη χημεία ονομάζονται Λανθανίδες, διότι το πρώτο στοιχείο της κατηγορίας αυτής που ανακαλύφθηκε και καταχωρήθηκε στον Περιοδικό Πίνακα Στοιχείων του Μεντελέγιεφ είναι το Λανθάνιο.

Οι σπάνιες γαίες απαρτίζονται από τα ακόλουθα βασικά στοιχεία :

Το έρβιο (Er) εντάσσεται στην κατηγορία λανθανίδες και συγκεκριμένα στην 3η Υποομάδα. Το συναντάμε στα ορυκτά (γαδολινίτης , ξενότιμο , ευξενίτης και φεργκιουσονίτης) .

Το Πρασεοδύμιο (Pr) βρίσκεται στα άλατα του διδύμιου.

Το Νεοδύμιο (Nd) βρίσκεται σε μορφή αλάτων.

Το Θούλιο (Tm) βρίσκεται στον ορυκτό μοναζίτη και είναι το πιο σπάνιο από αυτά τα στοιχεία.

Το Δημήτριο (Ce) χρησιμοποιείται στην επεξεργασία γυαλιού μέχρι και για την παραγωγή ατομικής ενέργειας.

Σαμάριο (Sm) σε μαγνήτες, σε ναρκωτικές ουσίες, στους πυρηνικούς αντιδραστήρες.

Το Ύτριο (Y) είναι βασικό για τις ακτινοβολίες σε ασθενείς με καρκινικούς όγκους , αλλά και σε femtosecond laser για οφθαλμικές επεμβάσεις. [7]

Περιοδικός Πίνακας Χημικών Στοιχείων

	IA	IIA	IIIB	IVB	VB	VIB	VIB	VIII	VIII	VIII	IB	IIB	IIIA	IVA	VA	VIA	VIA	0																													
Ομάδα →	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18																													
Περίοδος ↓																																															
1	1 H																	2 He																													
2	3 Li	4 Be											5 B	6 C	7 N	8 O	9 F	10 Ne																													
3	11 Na	12 Mg											13 Al	14 Si	15 P	16 S	17 Cl	18 Ar																													
4	19 K	20 Ca	21 Sc	22 Ti	23 V	24 Cr	25 Mn	26 Fe	27 Co	28 Ni	29 Cu	30 Zn	31 Ga	32 Ge	33 As	34 Se	35 Br	36 Kr																													
5	37 Rb	38 Sr	39 Y	40 Zr	41 Nb	42 Mo	43 Tc	44 Ru	45 Rh	46 Pd	47 Ag	48 Cd	49 In	50 Sn	51 Sb	52 Te	53 I	54 Xe																													
6	55 Cs	56 Ba	57 La	72 Hf	73 Ta	74 W	75 Re	76 Os	77 Ir	78 Pt	79 Au	80 Hg	81 Tl	82 Pb	83 Bi	84 Po	85 At	86 Rn																													
7	87 Fr	88 Ra	89 Ac	104 Rf	105 Db	106 Sg	107 Bh	108 Hs	109 Mt	110 Ds	111 Rg	112 Cn	113 Nh	114 Fl	115 Mc	116 Lv	117 Ts	118 Og																													
			<table border="1" style="width: 100%; text-align: center;"> <tr> <td>Λανθανίδες</td> <td>58 Ce</td> <td>59 Pr</td> <td>60 Nd</td> <td>61 Pm</td> <td>62 Sm</td> <td>63 Eu</td> <td>64 Gd</td> <td>65 Tb</td> <td>66 Dy</td> <td>67 Ho</td> <td>68 Er</td> <td>69 Tm</td> <td>70 Yb</td> <td>71 Lu</td> </tr> <tr> <td>Ακτινίδες</td> <td>90 Th</td> <td>91 Pa</td> <td>92 U</td> <td>93 Np</td> <td>94 Pu</td> <td>95 Am</td> <td>96 Cm</td> <td>97 Bk</td> <td>98 Cf</td> <td>99 Es</td> <td>100 Fm</td> <td>101 Md</td> <td>102 No</td> <td>103 Lr</td> </tr> </table>															Λανθανίδες	58 Ce	59 Pr	60 Nd	61 Pm	62 Sm	63 Eu	64 Gd	65 Tb	66 Dy	67 Ho	68 Er	69 Tm	70 Yb	71 Lu	Ακτινίδες	90 Th	91 Pa	92 U	93 Np	94 Pu	95 Am	96 Cm	97 Bk	98 Cf	99 Es	100 Fm	101 Md	102 No	103 Lr
Λανθανίδες	58 Ce	59 Pr	60 Nd	61 Pm	62 Sm	63 Eu	64 Gd	65 Tb	66 Dy	67 Ho	68 Er	69 Tm	70 Yb	71 Lu																																	
Ακτινίδες	90 Th	91 Pa	92 U	93 Np	94 Pu	95 Am	96 Cm	97 Bk	98 Cf	99 Es	100 Fm	101 Md	102 No	103 Lr																																	
Σειρές του περιοδικού πίνακα																																															
Αλκαλιμέταλλα			Αλκαλικές γαίες			Λανθανίδες			Ακτινίδες			Στοιχεία μετάπτωσης																																			
Φτωχά μέταλλα			Μεταλλοειδή			Αμέταλλα			Αλογόνα			Ευγενή Αέρια																																			

Εικόνα 1.3 : Περιοδικός Πίνακας [8]

Στην κατηγορία αυτή τα χημικά στοιχεία υποδιαιρούνται σε τρεις υποομάδες για λόγους ευκολίας, καθώς παρουσιάζουν τις ίδιες φυσικές και χημικές ιδιότητες.[8]

Στα laser και τους ενισχυτές οπτικών ινών που θα αναλύσουμε παρακάτω το ενεργό μέσο αποτελείται από μια οπτική ίνα νοθευμένη με ιόντα σπανίων γαιών όπως το έρβιο (Er 3+), το νεοδύμιο (Nd 3+), το υττέρβιο (Yb 3+), το θούλιο (Tm 3+), το πρασεοδύμιο (Pr 3+).

Η παρακάτω εικόνα παρουσιάζει τις πιο δημοφιλείς νοθευμένες οπτικές ίνες καθώς και τυπικές περιοχές μήκους κύματος εκπομπής:

Ion	Common host glasses	Important emission wavelengths
neodymium (Nd ³⁺)	silicate and phosphate glasses	1.03–1.1 μm, 0.9–0.95 μm, 1.32–1.35 μm
ytterbium (Yb ³⁺)	silicate glass	1.0–1.1 μm
erbium (Er ³⁺)	silicate and phosphate glasses, fluoride glasses	1.5–1.6 μm, 2.7 μm, 0.55 μm
thulium (Tm ³⁺)	silicate and germanate glasses, fluoride glasses	1.7–2.1 μm, 1.45–1.53 μm, 0.48 μm, 0.8 μm
praseodymium (Pr ³⁺)	silicate and fluoride glasses	1.3 μm, 0.635 μm, 0.6 μm, 0.52 μm, 0.49 μm
holmium (Ho ³⁺)	silicate glasses, fluorozirconate glasses	2.1 μm, 2.9 μm

Εικόνα 1.4 : Νοθευμένες οπτικές ίνες [10]

Οι οπτικές ίνες οι οποίες έχουν νοθευτεί με χημικά στοιχεία (ιόντα) όπως αναφέραμε παραπάνω χρησιμοποιούνται στα οπτικά συστήματα (πηγές laser, οπτικοί ενισχυτές) που θα παρουσιάσουμε παρακάτω.

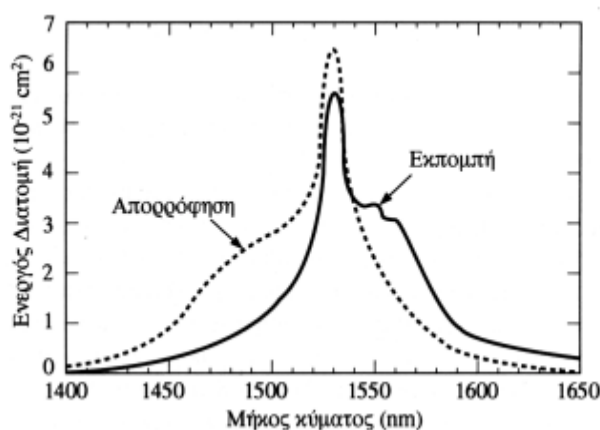
Μια πολύ υψηλή συγκέντρωση των ιόντων σπανίων γαιών έχει ως συνέπεια την απορρόφηση ισχύος άντλησης σε σχετικά μικρό μήκος της νοθευμένης ίνας.

Οι καμπύλες απορρόφησης και εκπομπής είναι συναρτήσεις του μήκους κύματος όπου θα δούμε παρακάτω. [10]

1.2.2 Ίνες Ερβίου και χαρακτηριστικά

Οι οπτικές ίνες σπανίων γαιών είναι μια οπτική ίνα στην οποία έχουν εμφυτευθεί ιόντα στοιχείου σπανίων γαιών όπως το Έρβιο στο πλέγμα γυάλινου πυρήνα. Το έρβιο έχει σημαντικές ιδιότητες και είναι μια άριστη επιλογή για έναν οπτικό ενισχυτή. Απαιτούνται αποτελεσματικές διατομές απορρόφησης και εκπομπής που εξαρτώνται από το μήκος κύματος. [11]

Απαιτείται εκπομπή μήκους κύματος που να χρησιμοποιείται ευρέως στις οπτικές επικοινωνίες



Εικόνα 1.5 : Διάγραμμα εκπομπής και απορρόφησης ερβίου [11]

Παρατηρούμε ότι στα 1530nm έχουμε μέγιστη απορρόφηση και εκπομπή αλλά και αντίστοιχα σε μεγαλύτερο εύρος στο παράθυρο 1550nm.

Απορρόφηση είναι όταν από τη στάθμη ελάχιστης ενέργειας, δίνουμε ενέργεια στα ηλεκτρόνια ώστε να διεγερθούν σε ανώτερες ενεργειακές καταστάσεις (στάθμες).

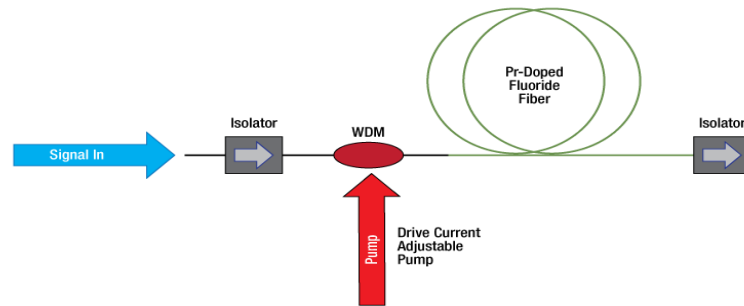
1.3 Τύποι ενισχυτών ιών σπάνια γη

1.3.1 Thulium Fiber Amplifiers

Ένας αποτελεσματικός ενισχυτής ιών είναι ο TDFA που βασίζονται στο θούλιο. Το εύρος ζώνης ενίσχυσης του TDFA επικεντρώνεται στα 1470nm.

1.3.2 Praseodymium Fiber Amplifiers

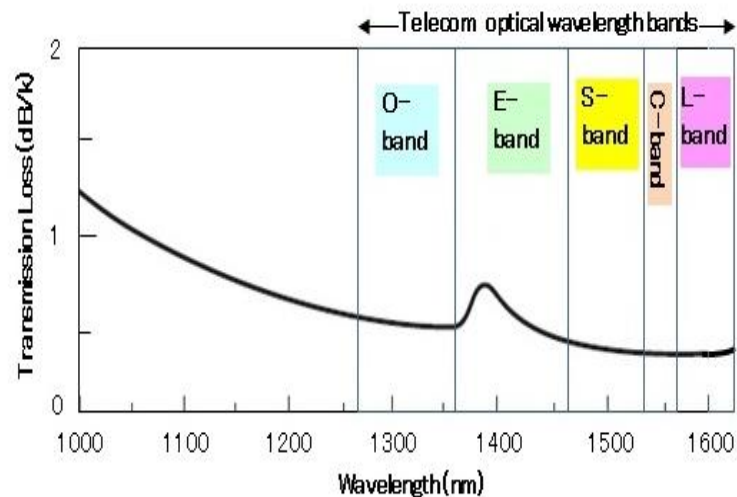
Ενισχυτής οπτικών ιών νοθευμένο με πρασεοδύμιο ως ενεργό υλικό. Μέχρι σήμερα δεν έχουν σημαντική εμπορική χρήση. Μπορούν να βασίζονται σε ίνες φθορίου με πρόσμιξη το πρασεοδύμιο (PDFA= ενισχυτής με πρασεοδύμιο), οι οποίες αντλούνται γύρω στα 1020 nm (σχετικά μη ευνοϊκό μήκος κύματος) λόγω πρασεοδυμίου. Χρησιμοποιούνται στο παράθυρο 1260-1360nm.



Εικόνα 1.6: PDFA [13]

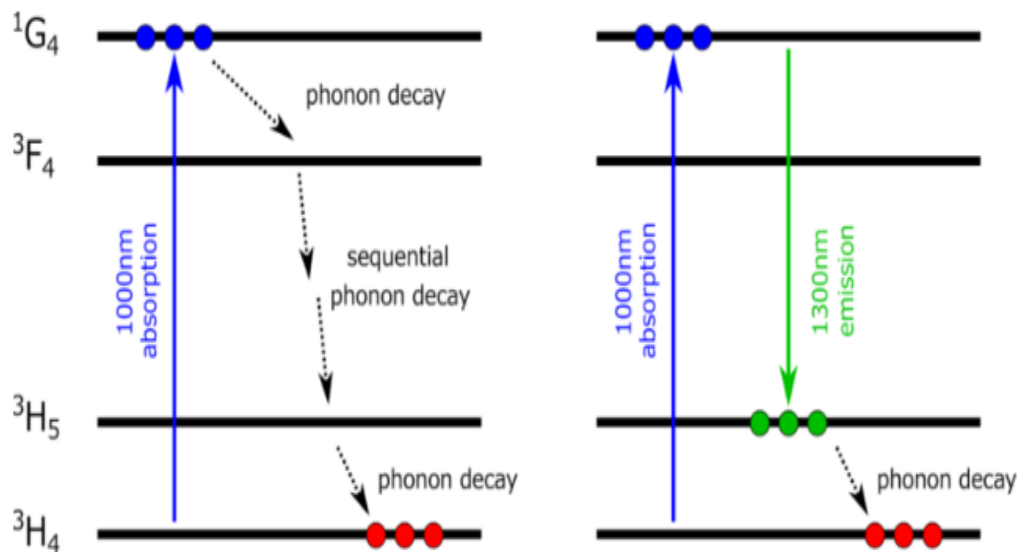
Όπως φαίνεται στο σχήμα τα κύρια στοιχεία του PDFA περιλαμβάνουν έναν συζεύκτη (WDM) , απομονωτές εισόδου και εξόδου και ένα PDF. Οι απομονωτές επιτρέπουν το φως να ταξιδεύει προς μόνο μια κατεύθυνση.

Ο ενισχυτής ίνας με πρασεοδύμιο (PDFA) είναι τύπος ενισχυτών ινών σπάνιων γαιών ,ο οποίος λειτουργεί στην ζώνη 0 [1,2,3]. Έχει ενδιαφέρον για το παράθυρο 1.31μm όπου έχουμε μικρή χρωματική διασπορά στις ίνες.



Εικόνα 1.7 : Οπτικές ζώνες οπτικών τηλεπικοινωνιών (το PDFA λειτουργεί στη ζώνη 0) [13]

[13]

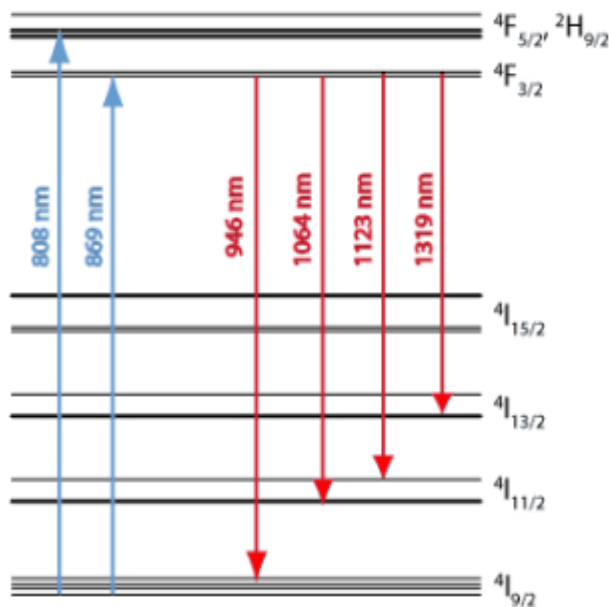


Εικόνα 1.8 : Απλοποιημένο ενεργειακό διάγραμμα του Pr και ενεργειακές μεταβάσεις σε κρύσταλλο πυριτίου (αριστερά) και κρύσταλλο φθορίου (δεξιά). [13]

[13]

1.3.3 Neodymium και Ytterbium Fiber Amplifiers

Το Νεοδύμιο (Nd) ανήκει στις σπάνιες γαίες. Το ενεργό μέσο είναι συνήθως κρύσταλλος YAG (Yttrium Aluminum Garnet). Οι κύριες ζώνες άντλησης παρουσιάζονται στα 808nm. [4]

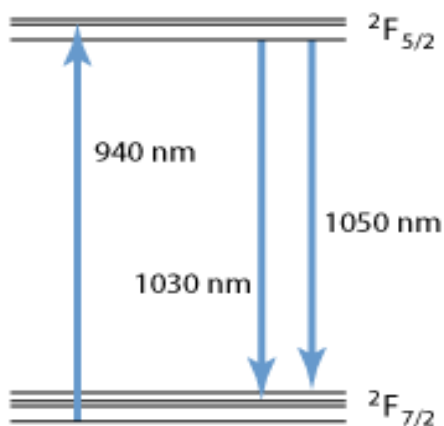


Εικόνα 1.9: Δομή επιπέδου ενέργειας του ιόντος νεοδυμίου [14]

[14]

Υπάρχουν ενισχυτές που βασίζονται στο υτέρβιο με μεγάλες ενισχύσεις στο παράθυρο 1.03μm – 1.1μm. Το Ytterbium (Yb) είναι ένα χημικό στοιχείο που ανήκει στις σπάνιες γαίες. Η ΠΑΔΑ, Τμήμα Η&ΜΜ, Διπλωματική Εργασία, ΓΙΟΛΔΑΣΗΣ ΠΑΝΑΓΙΩΤΗΣ

αποτελεσματική άντληση είναι δυνατή σε μήκος κύματος κοντά στα 975nm. Χρησιμοποιείται για λέιζερ υψηλής ισχύος.

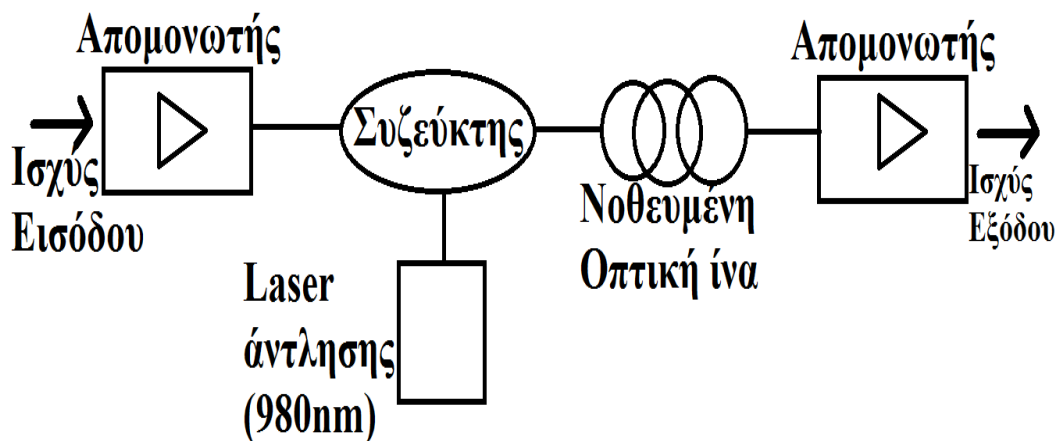


Εικόνα 1.10 : Ενεργειακά επίπεδα ιόντων Yb και οι συνήθειες μεταβάσεις της άντλησης και του λέιζερ [15]

[15]

1.4 Ενισχυτής ίνας ερβίου

Ιστορικά από το 1987 επιδεικνύονται ενισχυτές ίνας ερβίου (EDFA), ενώ και από το 1990 γίνονται εμπορικά διαθέσιμοι. Χρησιμοποιούνται ευρέως στα οπτικά δίκτυα μεγάλων αποστάσεων. Ιδιαίτερη έμφαση δίνεται στον οπτικό ενισχυτή με πρόσμειξη ερβίου. Ο EDFA είναι ο πιο συχνά χρησιμοποιούμενος τύπος οπτικού ενισχυτή στα οπτικά συστήματα επικοινωνιών. Οι τεχνολογικά σημαντικότερες ίνες σπανίων γαιών είναι με έρβιο. Το κύριο στοιχείο του EDFA είναι μια οπτική ίνα, της οποίας ο πυρήνας είναι νοθευμένος με ιόντα ερβίου. Το μήκος της ίνας που θα χρησιμοποιηθεί εξαρτάται και από την συγκέντρωση των προσμίξεων. Οι EDFA λειτουργούν κυρίως στην C-band (1530nm-1565nm). Γενικά, για τον υπολογισμό του βέλτιστου μήκους της ίνας Ερβίου, πρέπει να συνυπολογιστούν πολλές παράμετροι, όπως η ισχύς και το μήκος κύματος του σήματος άντλησης αλλά και η επιθυμητή στάθμη του σήματος εξόδου. [3]



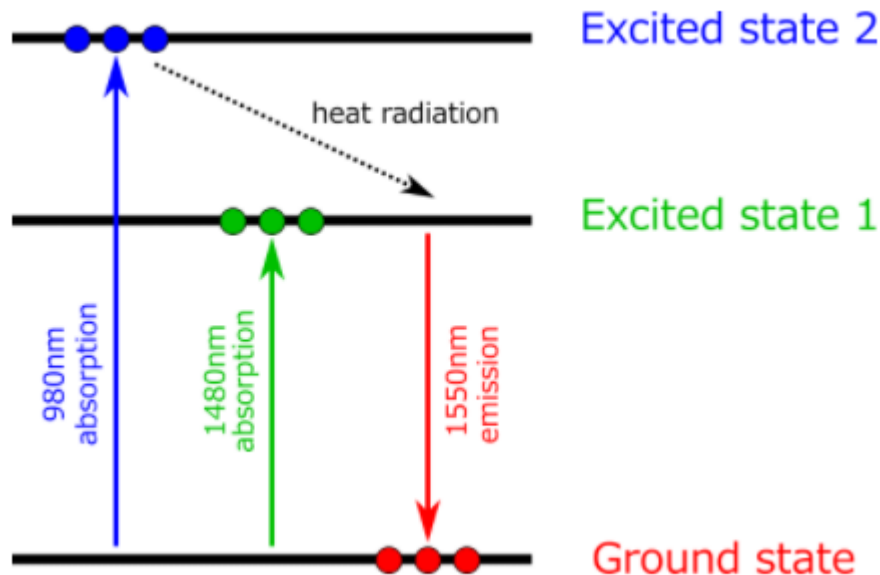
Σχήμα 1.11: Βασική δόμη EDFA

Στο Σχήμα 1.11 οι απομονωτές χρησιμοποιούνται για να αποκλείουν τις ανακλάσεις. Το pump laser που απαιτεί το έρβιο για να γίνει η διέγερση και η αναστροφή πληθυσμών πρέπει να είναι στα 980nm ή στα 1480nm μήκη κύματος. Η άντληση στα 1480nm δεν έχει μεγάλη απόδοση εξαιτίας του ότι βρίσκεται κοντά στο παράθυρο των 1530nm όπου εμφανίζεται και η μέγιστη εξασθένηση.

Η διάμετρος της ίνας Ερβίου πρέπει να είναι μονότροπη κυρίως για το σήμα άντλησης. Όσο μεγαλύτερο μήκος ίνας έχουμε τόσο χαμηλότερη συγκέντρωση ιόντων πρέπει να έχουμε.

Στους EDFA μια πηγή άντλησης που είναι στα 980nm ή στα 1480nm, διεγείρει τα ιόντα ερβίου σε υψηλότερες ενεργειακές στάθμες. Πολλά από αυτά μεταπίπτουν στην μετασταθή κατάσταση, που αντιστοιχεί σε μήκος κύματος στην περιοχή 1550nm. Ο χρόνος ζωής στην στάθμη διέγερσης είναι πολύ μικρότερος από ότι στη στάθμη αποδιέγερσης με αποτέλεσμα την αναστροφή πληθυσμών. Εξ' αιτίας του φαινομένου Stark splitting οι στάθμες του Ερβίου μέσα στο γυαλί του πυρήνα δημιουργούν μεγάλο εύρος σταθμών με αποτέλεσμα το μεγάλο εύρος ζώνης εκπομπής.

Άντληση γίνεται για την διέγερση των ιόντων του ερβίου στις κατάλληλες στάθμες για την εκπομπή (εξαναγκασμένη ή αυθόρμητη) στη περιοχή των 1550nm. Με την άντληση γίνεται απορρόφηση από τα ιόντα του ερβίου των οποίων ένα μεγάλο ποσοστό θα μεταφερθεί στη στάθμη 2 (Σχήμα 1.12). Συνήθως από τη στάθμη 2 στη στάθμη 1 γίνεται γρήγορη αποδιέγερση χωρίς να έχουμε εκπομπή φωτονίων. Στη στάθμη 1 ο χρόνος ζωής είναι πολύ μεγαλύτερος από την στάθμη 2.



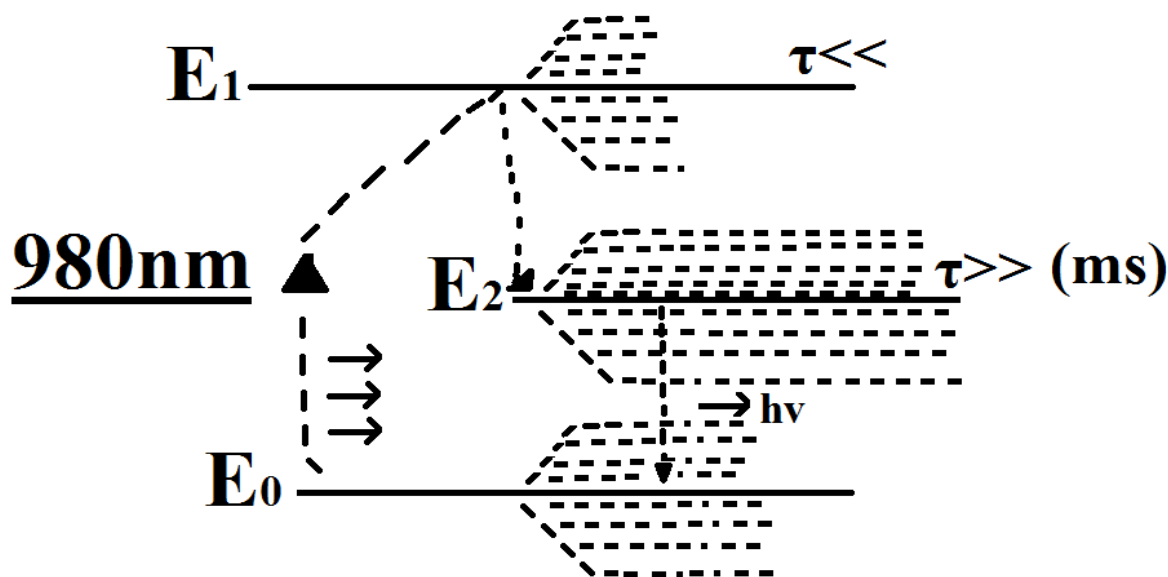
Σχήμα 1.12: Ενεργειακό διάγραμμα ίνας με προσμίξεις ερβίου [17]

Από την διεγερμένη στάθμη 1 με αυθόρμητη αποδιέγερση χωρίς καμία εξωτερική παρέμβαση τότε έχουμε το φαινόμενο της αυθόρμητης εκπομπής γνωστή και ως θόρυβο αυθόρμητης εκπομπής (Amplified Spontaneous Emission-ASE).

Από την άλλη αν τα ιόντα που βρίσκονται στη διεγερμένη στάθμη 1 αποδιεγερθούν λόγω κάποιας εξωτερικής αλληλεπίδρασης (δηλαδή να περάσουν φωτόνια αντίστοιχου μήκους κύματος) τότε θα προκαλέσουν αποδιέγερση και θα έχουμε φωτόνια μέσω εξαναγκασμένης εκπομπής.

1.4.1 Stark splitting

Το μοντέλο των 3 ενεργειακών σταθμών του Σχήματος 1.12 προβλέπει την άντληση και εκπομπή σε συγκεκριμένα μήκη κύματος και είναι βασικό για να καταλάβουμε τον μηχανισμό άντλησης και εκπομπής. Ωστόσο ειδικά για το Έρβιο εμφανίζεται ένα φαινόμενο το οποίο δικαιολογεί το μεγάλο εύρος μηκών κύματος εκπομπής του.



Σχήμα 1.13: Stark splitting

Στο Σχήμα 1.13 φαίνονται οι 3 στάθμες του ερβίου (E_0 , E_1 , E_2) που μας ενδιαφέρουν. Με μια πηγή στα 980nm από την E_0 πάμε στην E_1 , όπου στην E_1 ο χρόνος ζωής τ είναι μικρός, ενώ στην E_0 είναι μεγάλος. Με τη διέγερση που κάνουμε στα ιόντα ερβίου, ανεβαίνουν από την E_0 στην E_1 , μένουν για λίγο χρόνο και μετά μεταπίπτουν στην E_2 , όπου στην E_2 έχουν μεγάλο χρόνο ζωής. Άρα έχουμε αναστροφή πληθυσμών διότι έχουμε συσσώρευση πολλών διεγερμένων καταστάσεων για αρκετά μεγάλο χρονικό διάστημα. Όταν γίνεται η μετάπτωση από την E_2 πάλι στην E_0 αυτό γίνεται με εκπομπή φωτονίου. Επειδή όμως τα ιόντα ερβίου εμφυτεύονται στο πλέγμα του silicon based πυρήνα της ίνας τότε οι ηλεκτροστατικές δυνάμεις που ασκούνται μεταξύ των ιόντων του ερβίου και του γυαλιού διοξειδίου πυριτίου δημιουργούν διάσπαση των σταθμών σε μεγάλο πλήθος ενδιάμεσων σταθμών φαινόμενο γνωστό ως Stark splitting, με αποτέλεσμα να μην είναι ένα το μήκος κύματος το οποίο αποδιεγείρεται κάθε φορά, αλλά διαφορετικές στάθμες διεγείρονται στην E_1 , διαφορετικές στάθμες διεγείρονται στην E_2 , με αποτέλεσμα να μην είναι ένα το μήκος κύματος που εκπέμπεται.

Αν δεν αντλήσουμε το Έρβιο και αν εμείς στείλουμε φωτόνια τα οποία είναι στο φάσμα του 1550nm (1480nm-1560nm) τότε απορροφούνται όλα τα φωτόνια που βρίσκονται μέσα σε αυτό το φάσμα με διαφορετικό τρόπο κάθε φορά, εξ' αιτίας του stark splitting. Οπότε αντί να βλέπουμε μια

απορρόφηση σε ένα μήκος κύματος, έχουμε μια απορρόφηση με μεγάλο εύρος ζώνης μηκών κύματος $\Delta\lambda$ όπου υπάρχει απορρόφηση του φωτός το οποίο εμείς στέλνουμε.

Επομένως, όταν εμείς στέλνουμε πάρα πολλά φωτόνια για όλο το φάσμα των μηκών κύματος τότε είναι προφανές ότι διεγείρω πάρα πολλές καταστάσεις (σχεδόν όλες ταυτόχρονα). Γι' αυτό και η μεγάλου εύρους φασματική πηγή που έχουμε στο εργαστήριο μας (BBS) μεγάλης ισχύος στέλνει σε όλο αυτό το φάσμα φωτόνια αντίστοιχα σε όλες τις καταστάσεις, οπότε αντίστοιχα απορροφούν οπτική ισχύ. Άρα με την μεγάλη ισχύ της πηγής BBS αποδιεγειρόμενες οι καταστάσεις «σηκώνουν» την καμπύλη απορρόφησης και έτσι θα έχω μια λιγότερο απορροφητική καμπύλη (φαινόμενο που θα φανεί πειραματικά στο πειραματικό μέρος της εργασίας).

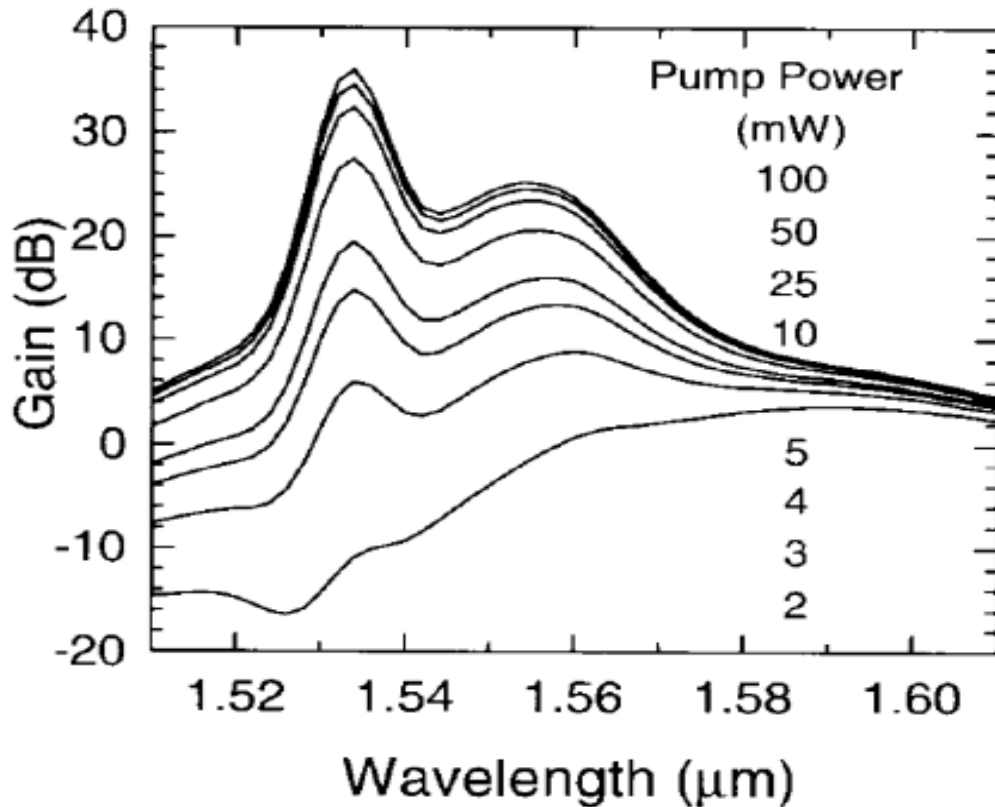
Αντίθετα αν στείλω ένα μόνο μήκος κύματος (δηλαδή μονοχρωματικό που θα εξετάσουμε με μια πηγή μονοχρωματική) ή με την πηγή SLD που χρησιμοποιήσαμε και είναι χαμηλότερης ισχύος, τότε με αυτή τη πηγή επειδή είναι πιο ασθενής δεν μπορεί να διεγείρει πολύ μεγάλο εύρος μηκών κύματος αυτού του υλικού, με αποτέλεσμα να είμαστε πιο κοντά στο θεωρητικό φάσμα απορρόφησης (θα προσπαθήσουμε να το δείξουμε πειραματικά στο πειραματικό μέρος της εργασίας).

1.4.2 Καμπύλη κέρδους ενισχυτών EDFA

Το κέρδος ενός οπτικού ενισχυτή υπολογίζεται

$$G = \frac{P_{out}}{P_{in}}$$

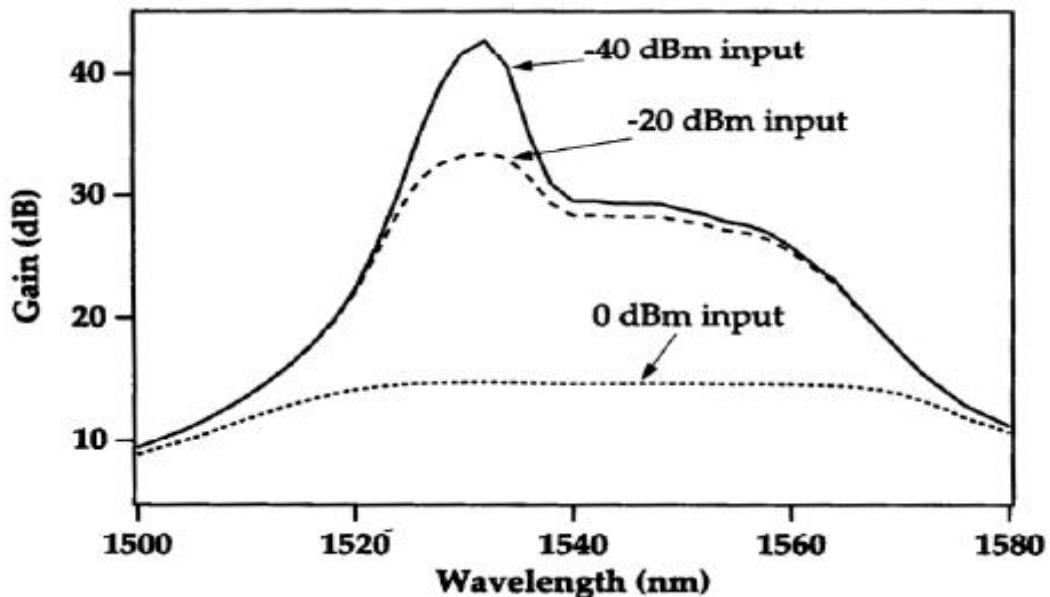
Όπου P_{in} η ισχύς του σήματος εισόδου και P_{out} η ισχύς του σήματος εξόδου του ενισχυτή



Σχήμα 1.14: Κέρδος ενός EDFA με βάση το μήκος κύματος [21]

Παρατηρούμε στο Σχήμα 1.14 την τυπική καμπύλη κέρδους ενός EDFA με βάση το μήκος κύματος, με EDF μήκους 30m, με διάφορα επίπεδα ισχύος laser άντλησης στα 1480nm και ισχύ εισόδου -30dBm

Στα 1530nm παρουσιάζει μέγιστη απορρόφηση. Η ισχύς του laser άντλησης πρέπει να είναι περίπου ανάμεσα στα 20mW με 100mW ώστε να έχουμε σημαντικό κέρδος. Τέλος, το εύρος ενίσχυσης είναι περίπου 30nm με 40nm.



Σχήμα 1.15: Κέρδος συναρτήσει της ισχύος του σήματος εισόδου για EDFA [21]

Αντίστοιχα στο Σχήμα 1.15 παρατηρούμε το κέρδος του EDFA συναρτήσει του σήματος εισόδου με ίνα EDF μήκους 10m και laser άντλησης 980nm ισχύος 50mW

Όσο αυξάνεται η ισχύς του σήματος εισόδου τότε σε κάποιο σημείο τότε το κέρδος του ενισχυτή σε κάποιο σημείο θα μειώνεται. Αυτό ονομάζεται κορεσμός κέρδους και εξηγείται από την αδυναμία των διεγερμένων καταστάσεων να μην μπορούν να δώσουν περισσότερα φωτόνια εξαιτίας της πεπερασμένης νόθευσης με ιόντα Ερβίου. [21]

1.5 Άλλοι τύποι Οπτικών Ενισχυτών

Στη συνέχεια, θα παρουσιάσουμε ότι μέσω των νοθευμένων οπτικών ιών μπορούν να αναπτυχθούν και άλλοι τύποι οπτικών ενισχυτών. Τα οπτικά σήματα που διαδίδονται μέσα από την οπτική ίνα εξασθενούν και είναι απαραίτητη η χρήση οπτικών ενισχυτών. Οι οπτικοί ενισχυτές είναι συσκευές οι οποίες ενισχύουν άμεσα τα οπτικά σήματα. Το κύριο πλεονέκτημα είναι ότι έχουν ελάχιστες απαιτήσεις σε ηλεκτρική ισχύ. Εμφανίζουν αμελητέες εσωτερικές απώλειες ενώ καθιστούν δυνατή την εκπομπή οπτικών σημάτων σε μεγάλες αποστάσεις.

Τα χαρακτηριστικά του ενισχυτή (για παράδειγμα μήκος κύματος λειτουργίας) καθορίζονται από το είδος των προσμίξεων που εμφυτεύονται στον πυρήνα της ίνας.

1.5.1 Τύποι οπτικών ενισχυτών.

Τα είδη των οπτικών ενισχυτών είναι

- Ενισχυτές νοθευμένης ίνας (Doped-Fiber Amplifiers-DFA)
- Ενισχυτές διόδου laser(Semiconductor Optical Amplifier ,SOA)

Ο τρόπος με τον οποίο γίνεται η ενίσχυση στους ενισχυτές (και στα δύο είδη) είναι η εξαναγκασμένη εκπομπή. Ο οπτικός ενισχυτής μπορεί να ενισχύσει τα μήκη κύματος τηλεπικοινωνιών σε μια ίνα. Ο μηχανισμός ενίσχυσης των οπτικών ενισχυτών ντοπαρισμένης ίνας μπορούμε να το εξηγήσουμε με την βοήθεια ενός απλού ενεργειακού μοντέλου το οποίο κάνει χρήση των ενεργειακών επιπέδων των ατόμων, των μεταβάσεων μεταξύ των επιπέδων αυτών και της αλληλεπίδρασης των ατόμων με το φως (Σχήμα 1.12). Ανάλογα με το στοιχείο της σπάνιας γαίας που χρησιμοποιείται σε μια ντοπαρισμένη ίνα, το μοντέλο μπορεί να προβλέπει διαφορετικό αριθμό ενεργειακών επιπέδων. Η τεχνολογία των ενισχυτών οπτικών ινών προσφέρει βασικά πλεονεκτήματα σε σχέση με τους οπτικούς ενισχυτές ημιαγωγών (SOA) όταν χρησιμοποιούνται για την ενίσχυση σημάτων επικοινωνίας όπως το ότι εμφανίζουν ελεγχόμενο κέρδος.

Οι SOAs είναι οπτικοί ενισχυτές όπου κατά βάση έχουν τη λογική του ημιαγωγικού laser. Η άντληση γίνεται με την εφαρμογή τάσης σε μια δίοδο pn. Όμως εισάγουν υψηλό θόρυβο στο οπτικό σήμα και έχουν μεγάλο κόστος. Μπορεί να θεωρηθεί ως ένα ασθενές laser, που χρησιμοποιεί χαμηλή ανακλαστικότητα στα κάτοπτρα του. Η αρχή λειτουργίας του βασίζεται στο συμβολόμετρο Fabry-Perot [2]. Διακρίνονται σε ενισχυτές Fabry Perot και σε ενισχυτές οδεύοντος κύματος (traveling wave amplifiers). Οι SOAs έχουν πιο πολύ θόρυβο από τους EDFAs [2],[19]

Οι οπτικοί ενισχυτές ενισχύουν το οπτικό σήμα εισόδου αλλά προσθέτουν τον θόρυβο αυθόρμητης εκπομπής ASE. Σε ένα οπτικό σύστημα επικοινωνιών, με τον όρο θόρυβο εννοούμε το σύνολο των ανεπιθύμητων σημάτων που δυσκολεύουν την ανίχνευση του πραγματικού σήματος. Παράγεται σε όλα τα σημεία του ενεργού μέσου αλλά περισσότερο στο σημείο εκείνο που υποβιβάζεται περισσότερο οι επιδόσεις της διάταξης είναι κοντά στην είσοδο του ενισχυτή διότι εκεί το σήμα είναι πιο ασθενές.[3]

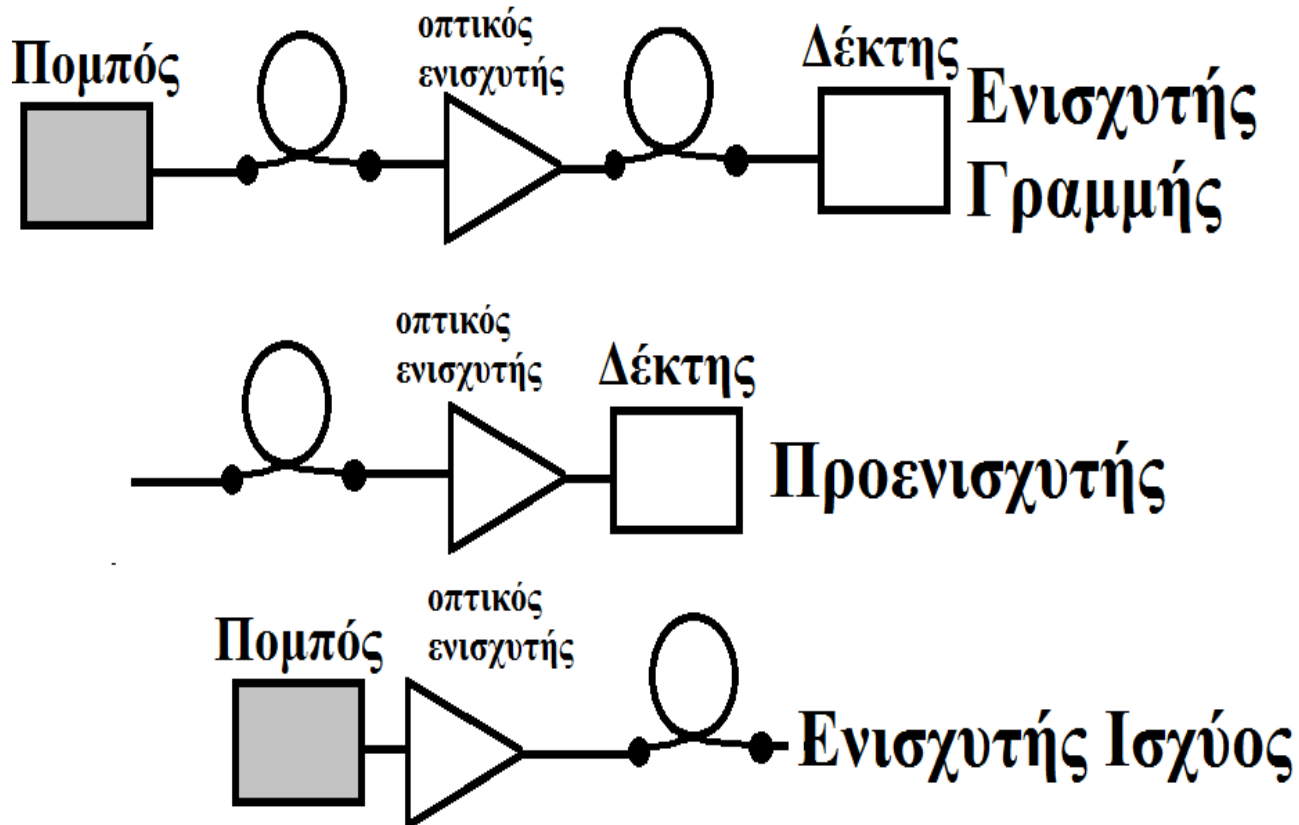
Η παραγωγή θορύβου από τους οπτικούς ενισχυτές και η υποβάθμιση του λόγου SNR δίνεται μέσω της εικόνας θορύβου από την σχέση

$$F_n = \frac{(SNR)_{in}}{(SNR)_{out}}$$

[19]

1.5.2 Συνδεσμολογία οπτικών ενισχυτών [20]

Οι δυνατές συνδεσμολογίες ενός ενισχυτή είναι οι εξής:



Εικόνα 1.16: Τοποθέτηση ενισχυτή

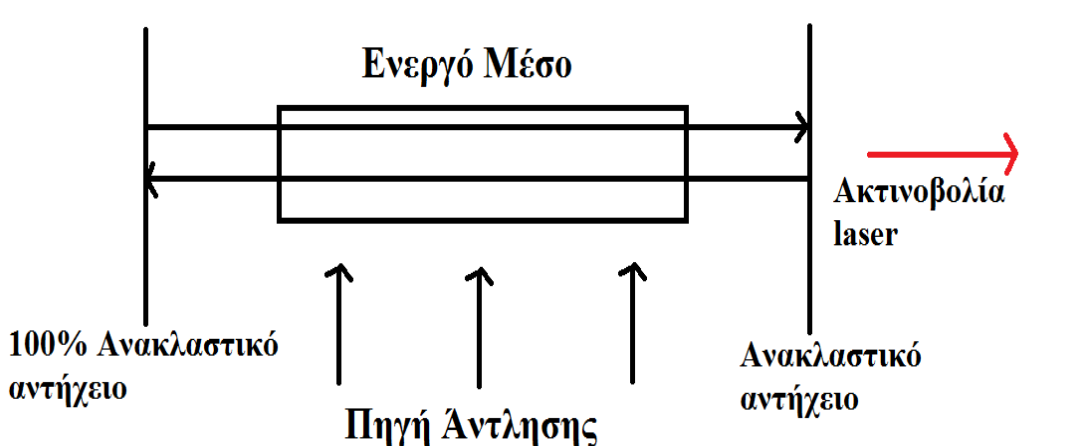
- Ενισχυτές γραμμής (In-line amplifier): Ενισχύει το οπτικό σήμα σε ενδιάμεσες αποστάσεις της οπτικής ζεύξης.
- Προενισχυτής (Preamplifier): Τοποθετείται πριν την είσοδο του οπτικού δέκτη για να αποκτήσει το οπτικό σήμα επαρκή ισχύ με πολύ χαμηλό θόρυβο. Θα πρέπει όμως καθώς ενισχύεται το σήμα να μην ενισχύεται και ο θόρυβος που το συνοδεύει. Τα χαρακτηριστικά του είναι ότι απαιτεί υψηλό κέρδος άρα και υψηλό θόρυβο.
- Ενισχυτής ισχύος (Power amplifier): Τοποθετείται αμέσως μετά τον πομπό (laser εκπομπής) για να πετύχουμε την μέγιστη δυνατή ισχύς εκπομπής.

1.6 Laser με βάση νοθευμένες οπτικές ίνες

Αξιοποιώντας τους ενισχυτές μπορούμε να φτιάξουμε laser τοποθετώντας τους σε μια δομή οπτικής κοιλότητας.

Στην διαμόρφωση των οπτικών συστημάτων (πηγές Laser, οπτικοί ενισχυτές) χρησιμοποιούνται οπτικές ίνες οι οποίες έχουν νοθευτεί με χημικά στοιχεία, τα οποία αναφέραμε στις προηγούμενες ενότητες.[4]

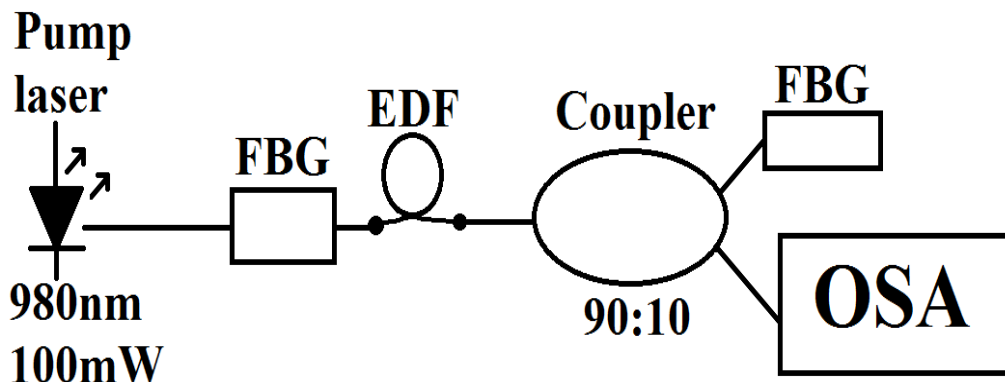
Τα κριτήρια για την δημιουργία Laser είναι η άντληση, η κοιλότητα και η ύπαρξη ενεργού υλικού. Αρχικά το ενεργό υλικό (σπάνιες γαίες όπως το έρβιο για παράδειγμα) του οποίου οι ιδιότητες επιτρέπουν την εκπομπή φωτονίων. Στη συνέχεια η οπτική κοιλότητα δημιουργείται με την τοποθέτηση διηλεκτρικών κατόπτρων στις τερματικές επιφάνειες της ίνας (Σχήμα 1.17). Ακολούθως η άντληση είναι ο εξωτερικός μηχανισμός παροχής ενέργειας για την επίτευξη της αναστροφής πληθυσμών κατά την οποία διεγείρονται τα ηλεκτρόνια του ενεργού υλικού σε ανώτερες ενεργειακές στάθμες για να δημιουργηθεί η αναστροφή πληθυσμών ώστε με την αυθόρμητη και την εξαναγκασμένη εκπομπή να παραχθεί η επιθυμητή ακτινοβολία.



Σχήμα 1.17: Σχηματική περιγραφή laser

Στη περίπτωση του laser πετυχαίνουμε ανάδραση βάζοντας το ενεργό υλικό μεταξύ δύο κατόπτρων, όπου το οπτικό κύμα διαδιδόμενο σε διεύθυνση κάθετη στα κάτοπτρα, θα πηγαινοέρχεται μεταξύ των δύο κατόπτρων και θα ενισχύεται σε κάθε διέλευση του από το ενεργό υλικό. [20]

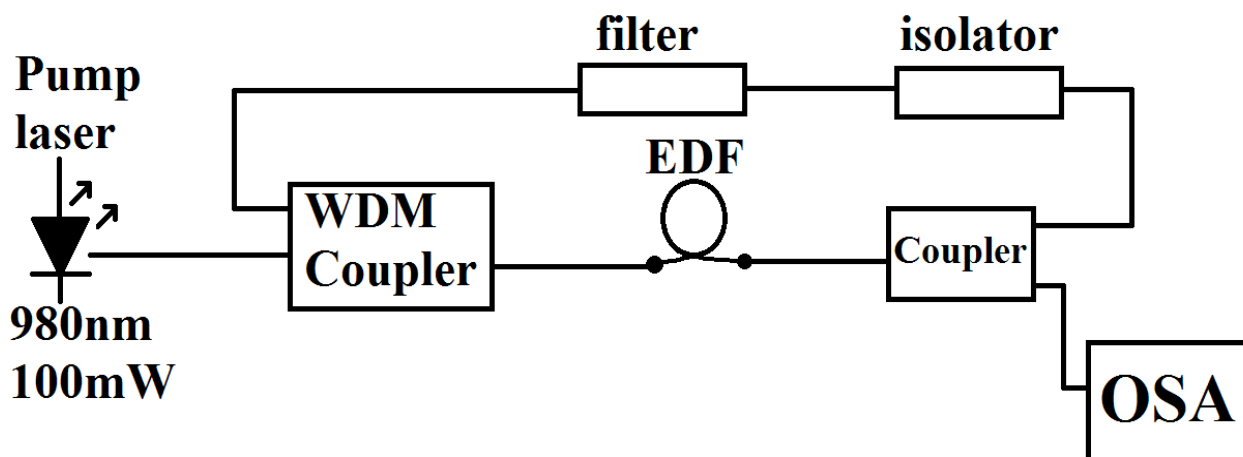
Στη συνέχεια παραθέτουμε κάποια παραδείγματα εφαρμογής των ιών ερβίου για τη δημιουργία fiber laser.



Σχήμα 1.18: Διάταξη ευθείας κοιλότητας

Στο Σχήμα 1.18 έχουμε άντληση στα 980nm μέσω πηγής laser ημιαγωγού. Ακολουθώντας, υπάρχει κοιλότητα με δυο καθρέφτες οπτικής ίνας οπτικού φάσματος (Fiber Bragg Grating – FBG) όπου παράγεται φως μήκους κύματος το οποίο καθορίζεται από τα FBG και μπορεί να ρυθμισθεί στα 1550nm. Επιπλέον, το ενεργό υλικό που είναι ίνα νοθευμένη με έρβιο όπου γίνεται η συντήρηση και ενίσχυση του μήκους κύματος που υποστηρίζει η κοιλότητα, θα πρέπει το μήκος κύματος να ανήκει στο φάσμα του ερβίου. Ο coupler (90:10) αφήνει το μεγαλύτερο ποσοστό ισχύος να πηγαινοέρχεται (90%), τον χρησιμοποιώ για να πάρω έξοδο στον οπτικό φασματικό αναλυτή (OSA).

Μια άλλη συνδεσμολογία για τη δημιουργία fiber laser είναι αυτή του Σχήματος 1.19 γνωστή ως τοπολογία δακτυλίου.



Σχήμα 1.19: ring fiber Laser

Επιτρέπει την μονόδρομη πορεία του φωτός και με το φίλτρο περιορίζουμε το φάσμα που βγάζει στην έξοδο. Αν δεν συμπεριλάβουμε το φίλτρο τότε αυτή η τοπολογία παράγει όλο το φάσμα του ASE.

2 Εργαστηριακός Εξοπλισμός

Στη συνέχεια θα παρουσιάσουμε τον εργαστηριακό εξοπλισμό τον οποίο χρειαζόμαστε για να μπορέσουμε να χαρακτηρίσουμε τις ίνες ιόντων ερβίου και ειδικότερα για τη περίπτωση μόνο της απορρόφησης χωρίς άντληση. Συγκεκριμένα θα περιγράψουμε την διαδικασία για τη συγκόλληση ινών διότι σε κάποια σημεία χρειάστηκε να συγκολλήσουμε ίνες, ενώ συγκολλήσαμε και ίνες με κονέκτορα (pig tail). Χρειαζόμαστε τον οπτικό φασματικό αναλυτή για να πάρουμε όλες τις μετρήσεις στο φάσμα του 1550nm που απορροφάει το έρβιο. Αναφέρουμε και τη πηγή laser σε περίπτωση που χρησιμοποιήσουμε τη πηγή των 980nm για άντληση. Ακολούθως, περιγράφουμε την πηγή Broadband την οποία χρειαζόμαστε για να δούμε πόσο απορροφάει η ίνα ερβίου από αυτό το φάσμα που εκπέμπει η BBS (Broadband source). Παρουσιάζουμε την SLD (Semiconductor Laser Diode) η οποία είναι και αυτή μια Broadband πηγή γύρω από τα 1550nm ώστε να μπορέσουμε να δούμε και με αυτή τη πηγή που είναι χαμηλότερης ισχύος πόσο απορροφάει η ίνα ερβίου.

2.1 Διαδικασία για την συγκόλληση ινών

Πρέπει να σημειωθεί ότι ο όρος οπτική ίνα (optical fiber) είναι γενικός και περιλαμβάνει πολλούς τύπους οπτικών ινών, που κατασκευάζονται από διαφορετικά υλικά (γυαλί, πλαστικό) και για διαφορετικές εφαρμογές.

Ο απαραίτητος εξοπλισμός που πρέπει να διαθέτουμε για την συγκόλληση ινών είναι ένας απογυμνωτής οπτικών ινών, μαντηλάκι και οινόπνευμα για να καθαρίσουμε την ίνα καθώς και το εργαλείο τομής που κόβει την οπτική ίνα σε γωνία 90^0 πριν την βάλουμε στον συγκολλητή splicer χωρίς να δημιουργεί μικρό ατέλειες.

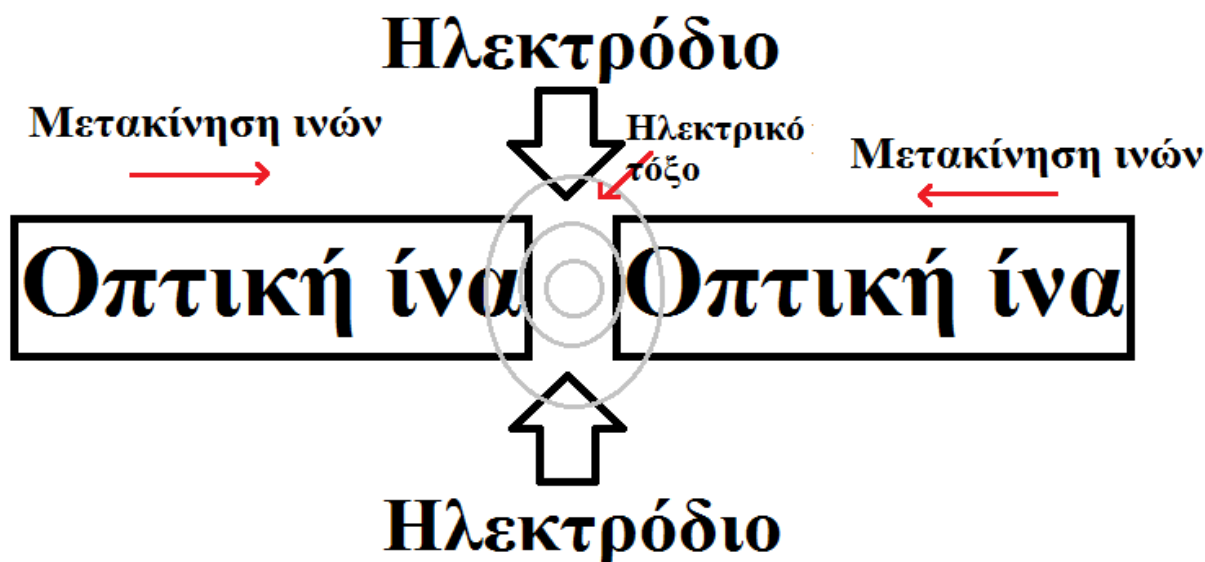


Εικόνα 2.1: Εξοπλισμός συγκόλλησης ινών του εργαστηρίου

Αρχικά, μια ίνα για να συγκολληθεί πρέπει πρώτα να την προετοιμάσουμε κατάλληλα. Στην αρχή, αφαιρούμε κάθε πρωτεύον επίστρωμα με ειδικά εργαλεία γύμνωσης. Ακολούθως, η ίνα καθαρίζεται με οινόπνευμα και κόβεται. Το τελείωμα της ίνας πρέπει να σχηματίζει γωνία 90^0 με το κεντρικό άξονα. Οι ίνες συναντώνται από άκρο σε άκρο με πολύ μεγάλη ακρίβεια και πρέπει να εξασφαλίζουν ότι είναι ορθά ευθυγραμμισμένες.

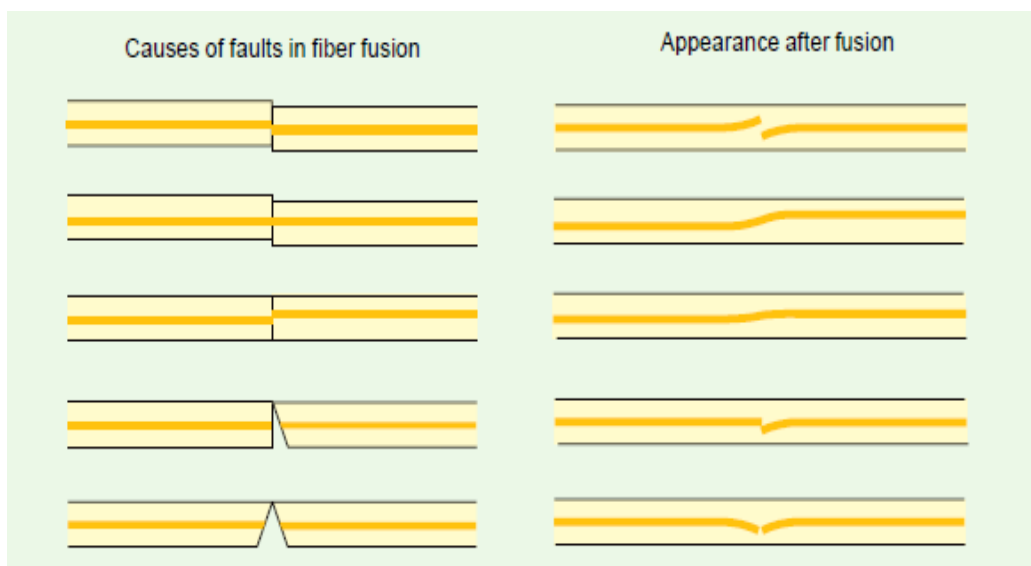
Αξίζει να τονιστεί ότι για την συγκόλληση οπτικών ιών χρησιμοποιούμε τον εξοπλισμό (splicer) που έχει ενσωματωμένο σύστημα για τη μέτρηση της γωνίας κοπής, με αυτόματη ευθυγράμμιση πυρήνα και δύο ακίδες τόξου για γρήγορη και αξιόπιστη συγκόλληση. Χρησιμοποιεί επεξεργασία έγχρωμης εικόνας υψηλής ταχύτητας και ειδική τεχνολογία ακριβούς προσανατολισμού έτσι ώστε όλη η διαδικασία της σύντηξης της ίνας να μπορεί να ολοκληρωθεί σε μερικά δευτερόλεπτα. Τα άκρα των ιών θερμαίνονται στο σημείο τήξης τους από ένα ηλεκτρικό σπινθήρα με ένα ηλεκτρικό τόξο μεταξύ δύο σημειακών ηλεκτροδίων και στην συνέχεια προσεγγίζονται για να σχηματίσουν μια ομοιογενή ίνα. Στη διαδικασία σύντηξης, από την ηλεκτρονική ανάλυση εικόνας παρατηρούμε ότι όταν θερμαίνεται η ίνα, ο πυρήνας των ιών γίνεται ορατός, έτσι μπορεί ο χειριστής να κάνει μια οπτική εκτίμηση της ποιότητας της συγκόλλησης.

Στο Σχήμα 2.2 βλέπουμε την σχηματική αναπαράσταση κατά την κόλληση των ιών μέσα στον Splicer. Όπου οι οπτικές ίνες είναι τοποθετημένες και ευθυγραμμισμένες μεταξύ των δύο ηλεκτροδίων στη μηχανή συγκόλλησης.



Σχήμα 2.2: Μόνιμη σύνδεση με συγκόλληση splice

Στη παρακάτω εικόνα παρατηρούμε περιπτώσεις απόρριψης συγκόλλησης οπτικών ινών [25]



Εικόνα 2.3: Η συγκόλληση ινών μπορεί να επηρεαστεί από διάφορες παραμέτρους όπως γωνία κοπής και κακή ευθυγράμμιση [25]

Η σύνδεση μεταξύ δύο οπτικών ινών επιτυγχάνεται είτε μέσω θερμικής συγκόλλησης των άκρων όπως αναφέραμε παραπάνω είτε μέσω μηχανικού εξαρτήματος. Οι συγκολλήσεις και οι συνδετήρες είναι ένα σημαντικό κομμάτι για τις ζεύξεις οπτικών ινών που αναπόφευκτα απορροφούν μέρος της ισχύος του συστήματος.

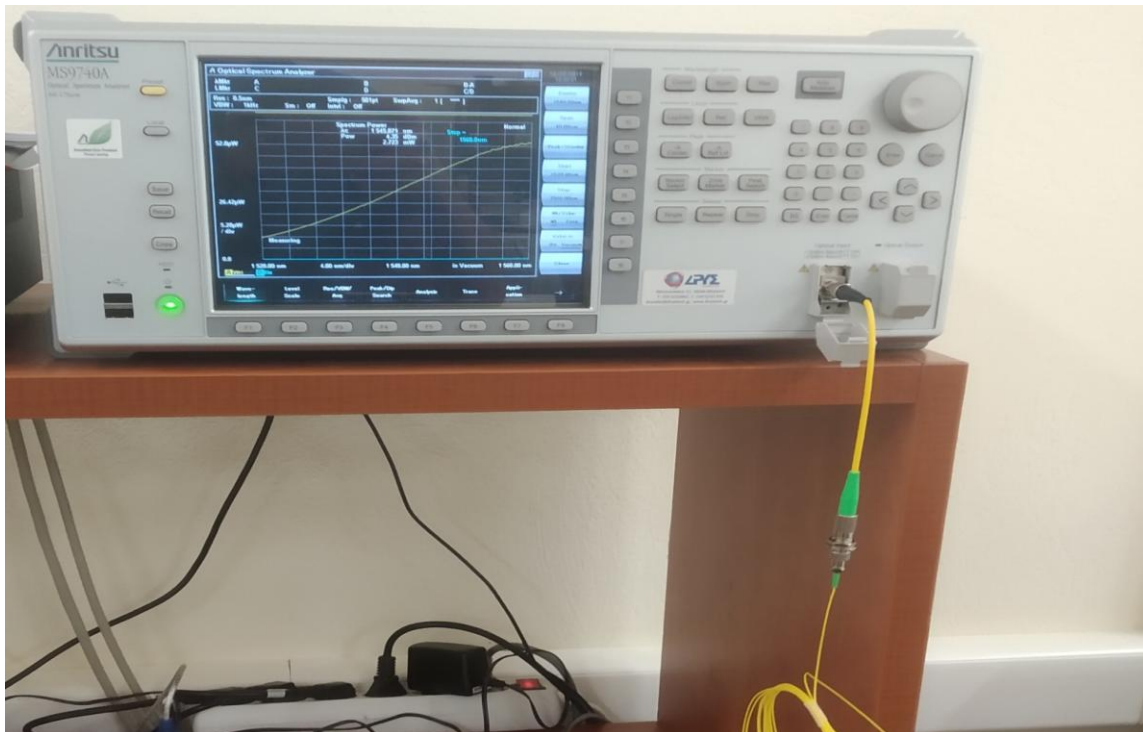
Η διαδικασία συγκόλλησης όπως εξηγήσαμε γίνεται με τη χρήση ειδικών συσκευών συγκόλλησης (splicers) και παρέχει απώλεια ισχύος μικρότερη από 0.1dB.

Οι συνδετήρες είναι μηχανικά εξαρτήματα που συνδέουν με γρήγορο και εύκολο και όχι μόνο τρόπο τις οπτικές ίνες μεταξύ τους. Ανάλογα με το τύπο της οπτικής ίνας διακρίνουμε τους συνδετήρες σε συνδετήρες πολύτροπης και μονότροπης οπτικής ίνας. Οι κατασκευαστές κάθε φορά μας δίνουν ένα γράφημα με τις μετρημένες απώλειες του εκάστοτε συνδετήρα. [6]

Η απώλεια συγκόλλησης μπορεί να επηρεαστεί από διάφορες παραμέτρους, όπως γωνία κοπής, κακή ευθυγράμμιση ή πυκνότητα πυρήνα. Οι απώλειες μέσω των συνδετήρων είναι πολύ μεγαλύτερες γιατί οι ίνες πλησιάζουν χωρίς να συγκολλούνται (physical contact – PC). Συνεπώς, μεσολαβεί αέρας μεταξύ των πυρήνων των δύο ινών με αποτέλεσμα την αύξηση των απωλειών. Οι απώλειες αυτές οφείλονται κυρίως στις ανακλάσεις λόγω του διαφορετικού δείκτη διάθλασης του πυρήνα της ίνας και του αέρα που μεσολαβεί. Πρακτικά το φαινόμενο που προκύπτει μοιάζει με το φαινόμενο Fabry-Perot. Για να περιορίσουμε αυτό το φαινόμενο χρησιμοποιούμε συνδετήρες με πλάγια κοπή στο άκρο ώστε να δημιουργήσουμε γωνίες Brewster και να μειώσουμε πολύ τις ανακλάσεις. Οι συνδετήρες αυτοί λέγονται APC (angled physical contact).

2.2 Οπτικός Αναλυτής Φάσματος (Optical Spectrum Analyzer)

Ο οπτικός αναλυτής φάσματος αναπαριστά την κατανομή της ισχύος ενός οπτικού σήματος στα διάφορα μήκη κύματος. [16]



Εικόνα 2.4 : Optical Spectrum Analyzer

Το Optical spectrum analyzer είναι ένα όργανο που είναι γνωστό ως αναλυτής φάσματος οπτικών σημάτων σχεδιασμένο να μετρά και να εμφανίζει την κατανομή ισχύος μιας οπτικής πηγής σε ένα συγκεκριμένο εύρος μηκών κύματος. Στην κάθετη κλίμακα εμφανίζει ισχύ ενώ στην οριζόντια μήκος κύματος. Επιπλέον, εντός της πλήρους περιοχής μηκών κύματος του οργάνου, μετρά το πλάτος ισχύος ενός σήματος εισόδου. Σε έναν τυπικό αναλυτή φάσματος υπάρχουν επιλογές για ρύθμιση της αρχής και τέλους ή του κεντρικού μήκους κύματος του εύρους σάρωσης. Η ρύθμιση Span (εύρος) καθορίζει την περιοχή σάρωσης μηκών κύματος, είναι δηλαδή η παράμετρος που μας δείχνει ποιο εύρος μετράμε. Το Resolution Bandwidth καθορίζει και είναι το στοιχειώδες εύρος ζώνης που το έχουμε ρυθμίσει στα 0.03nm (σχεδόν σε όλες τις μετρήσεις μας και είναι το μικρότερο που διαθέτει το όργανο) και καθορίζει το εύρος ζώνης μηκών κύματος στο οποίο μετράμε την ισχύ που αντιστοιχεί σε κάθε σημείο της καμπύλης του φάσματος. Όσο μικρότερο είναι τόσο υψηλότερη είναι η φασματική ανάλυση και επιτρέπει να βελτιωθεί η διακριτικότητα του μετρηθέντος φάσματος. Οι παράμετροι λειτουργίας του γίνονται με χειριστήρια στην πρόσοψη του οργάνου. Η κλίμακα ισχύος μπορεί να αλλάξει σε γραμμική ή λογαριθμική. Όταν έχει ρυθμιστεί η γραμμική κλίμακα το κάτω μέρος του κάθετου άξονα γίνεται 0W και δεν μπορεί να αλλάξει. Οι μονάδες του κατακόρυφου άξονα είναι είτε σε W είτε σε dBm. Για ρυθμίσεις στο κατακόρυφο άξονα γίνεται με το πλήκτρο F8. Επιπρόσθετα, υπάρχει η επιλογή αποθήκευσης των ρυθμίσεων συσκευής, προκειμένου να τις ανακτήσουμε με ένα μόνο κουμπί.

Ο OSA μπορεί να συνδεθεί με υπολογιστή, μέσω σύνδεσης ethernet και μπορεί να δέχεται αντίστοιχες εντολές. Ακολούθως, μπορεί κανείς να αυτοματοποιήσει τις μετρήσεις μέσω ενός

Οπτικές ίνες νοθευμένες με ιόντα Ερβίου και η εφαρμογή τους στους οπτικούς ενισχυτές

υπολογιστή που μπορεί επίσης να ελέγχει και άλλες συσκευές. Συνεπώς, μπορούμε να μεταφέρουμε τα μετρηθέντα φάσματα στον υπολογιστή για επεξεργασία.

2.3 Πηγή Laser και οι αντίστοιχοι Controllers



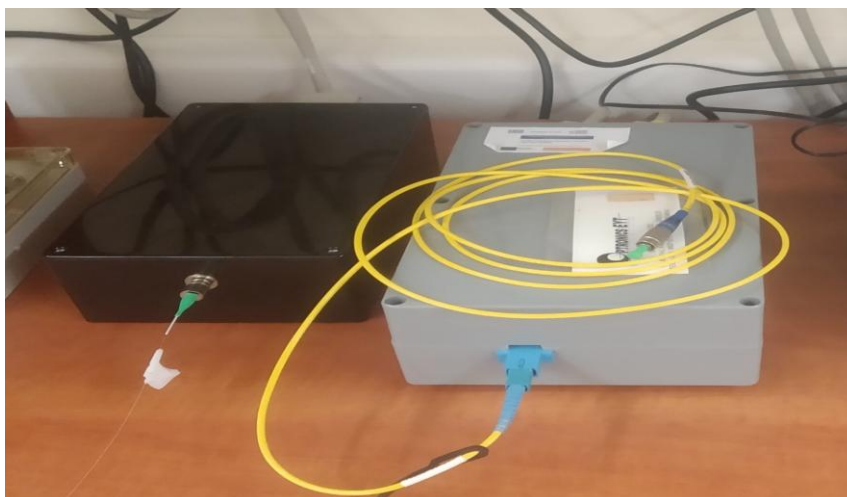
Εικόνα 2.5: Controllers ρεύματος και θερμοκρασίας Laser ημιαγωγού

Τα ημιαγωγικά Lasers του εργαστηρίου απαιτούν σταθερή ηλεκτρική τροφοδοσία και έλεγχο θερμοκρασίας. Στο εργαστήριο είναι διαθέσιμα δύο παρόμοια σετ ελεγκτών. [23]

Στην εικόνα 2.5 φαίνεται το πρώτο σετ όπου ο 'κάτω' είναι ο ελεγκτής θερμοκρασίας temperature controller και ο 'πάνω' είναι ο ελεγκτής ρεύματος current controller ο οποίος καθορίζει και την τελική ισχύ εκπομπής του Laser.

Αν και δεν τους χρησιμοποιήσαμε διότι δεν χρειάστηκε να βάλουμε το laser άντλησης ώστε να κάνουμε pumping είναι απαραίτητο να τους αναφέρουμε για να περιγράψουμε τον εξοπλισμό του εργαστηρίου που είναι απαραίτητος για τον ολοκληρωμένο χαρακτηρισμό των ινών ερβίου.

Στο εργαστήριο έχουμε τις πηγές ημιαγωγών laser για άντληση στα 980nm και 1550nm όπως φαίνεται στην Εικόνα 2.6.



Εικόνα 2.6: Laser για άντληση στα 980nm (αριστερά) και 1550nm (δεξιά)

2.4 SLD (Semiconductor Laser Diode)

Στο εργαστήριο είναι διαθέσιμη και πηγή SLD (super luminescent diode) ευρείας ζώνης και χαμηλής ισχύος στην περιοχή των 1550nm (Εικόνα 2.7). Οι πηγές SLD που συνδέονται με ίνες έχουν ενσωματωμένη δίοδο και ελεγκτή. Η ισχύς εξόδου κυμαίνεται από μερικά έως κάποια δεκάδες mW. Ένα SLD είναι ένας οπτικός ενισχυτής ημιαγωγών (Semiconductor Optical Amplifier). [22]



Εικόνα 2.7 Πηγή SLD (Semiconductor Laser Diode)

2.5 BBS (Broadband source)

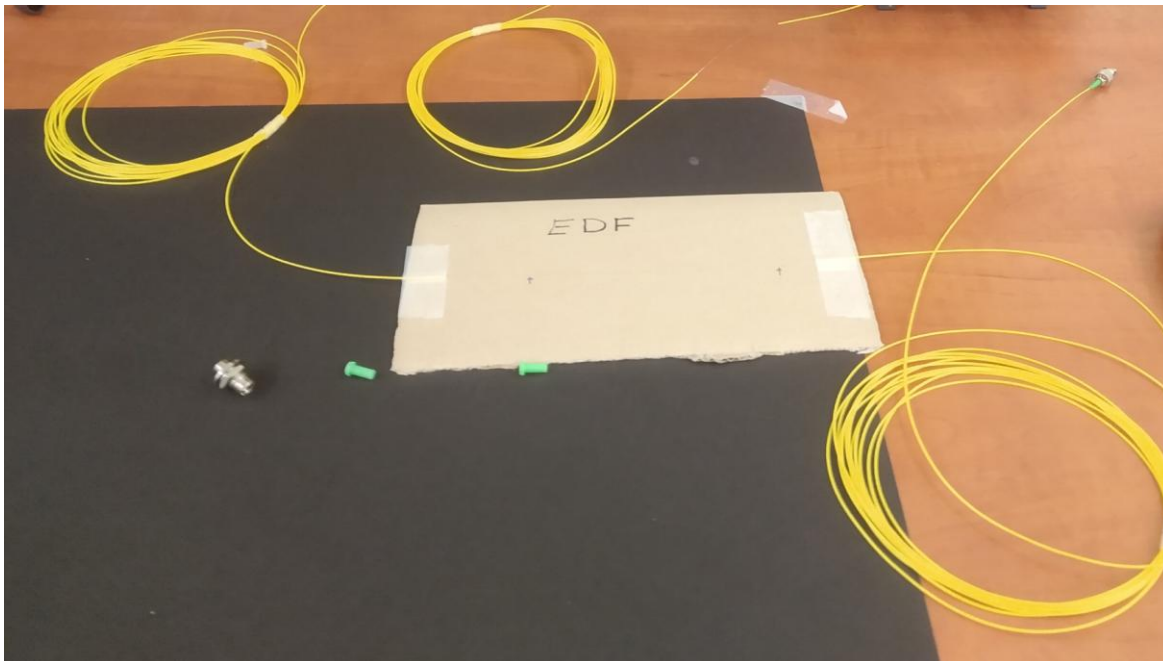
Στο εργαστήριο διαθέτουμε και μια δεύτερη πηγή ευρέως φάσματος μεγαλύτερης ισχύος η οποία βασίζεται σε ένα ερβίου (Εικόνα 2.8). Έχει αντισταθμισμένο φάσμα ώστε να παρέχει σχεδόν σταθερή ισχύ στην περιοχή των 1550nm. Χρησιμοποιείται ως πηγή για την «ανάγνωση» αισθητήρων FBG μέτρησης μηχανικών καταπονήσεων. Στα πειράματα μας θα χρησιμοποιηθεί ως πηγή μεγάλου εύρους μηκών κύματος και σχετικά υψηλής ισχύος.



Εικόνα 2.8: BBS (Broadband source)

2.6 Ίνα Ερβίου

Στο εργαστήριο είναι διαθέσιμη η ίνα ερβίου με βαριά νόθευση (Εικόνα 2.9) και με τα παρακάτω χαρακτηριστικά.



Εικόνα 2.9: EDF

Erbium concentration => $8 \cdot 10^{25}$ συγκέντρωση ιόντων ερβίου για την EDF 110dB/m. Όσο μεγαλύτερη συγκέντρωση φορτίου τόσο μεγαλύτερη απορρόφηση.

10nm διάμετρος πυρήνα της EDF

Core NA => Numerical aperture 0.21 (καθαρός αριθμός) χαρακτηρίζει τις γωνίες από τις οποίες η οπτική ίνα μπορεί να εισάγει φως. Το αριθμητικό άνοιγμα καθορίζει το ανώτερο όριο γωνίας με την οποία μια ακτίνα μπορεί να εισέλθει στην οπτική ίνα. [2]

$$NA = n_0 \sin \theta_a = \sqrt{n_1^2 - n_2^2}$$

Όπου

- NA: αριθμητικό άνοιγμα
- n_0 : δείκτης διάθλασης (αέρα)
- θ_a : γωνία πρόσπτωσης
- n_1 : δείκτης διάθλασης (πυρήνα της ίνας)
- n_2 : δείκτης διάθλασης (μανδύα της ίνας)

[24]

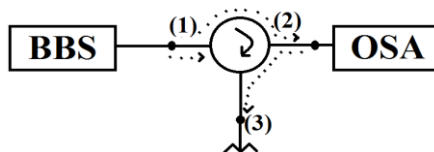
3 Πειραματικό Μέρος: Μετρήσεις απορρόφησης σε ίνες ερβίου

Στο κεφάλαιο αυτό θα κάνουμε μετρήσεις για να μελετήσουμε την απορρόφηση των ιόντων ερβίου με ίνα ερβίου 110dB/m που έχουμε στο εργαστήριο που είναι της εταιρείας nLight. Για τον σκοπό αυτό θα χρησιμοποιήσουμε τις δύο πηγές του εργαστηρίου BBS (broadband source) και την SLD.

3.1 Για την πηγή BBS

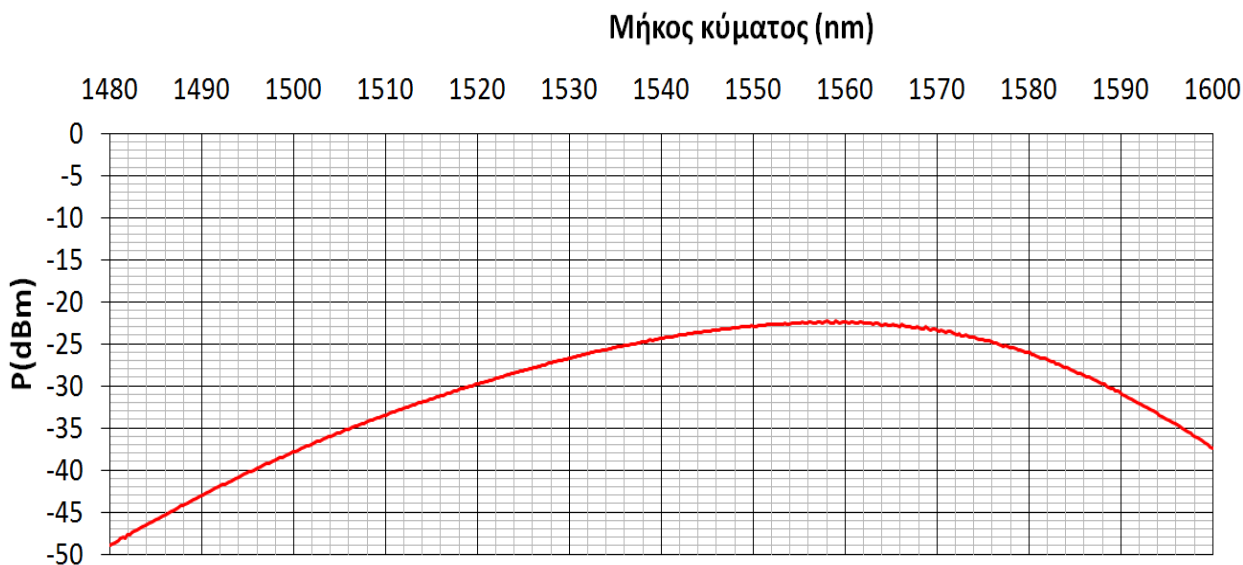
Αρχικά συνδέουμε την πηγή BBS με τον κυκλοφορητή στον οποίο έχουμε μια πόρτα (1) μια πόρτα (2) και μια πόρτα (3), όπου η οπτική ισχύς περνάει από την πόρτα (1) και βγαίνει από την πόρτα (2). Αν υπάρχει μια ανάκλαση στην πόρτα (2) αντί να πάει η οπτική ισχύς πίσω στη πηγή, πηγαίνει στην ελεύθερη ίνα πόρτα (3). Έχει συγκεκριμένη φορά για το φως, τα βελάκια μας δείχνουν από ποια πόρτα μπαίνει και σε ποια θα βγει η οπτική ισχύ, επιτρέπει δηλαδή την ισχύ να περάσει μόνο στην μια κατεύθυνση. Τον χρησιμοποιούμε για να προστατεύσουμε την πηγή από τα ανακλώμενα και ειδικότερα για την εκπομπή από την νοθευμένη ίνα η οποία εκπέμπει προς τις δύο κατευθύνσεις. Στην συνέχεια συνδέουμε την πόρτα (2) κατευθείαν στον Optical Spectrum Analyzer (OSA).

Το Resolution Bandwidth καθορίζει και είναι το στοιχειώδες εύρος ζώνης που το έχουμε ρυθμίσει στα 0.03nm και μετράει την ισχύ το όργανο μας. Όσο μικρότερο είναι τόσο υψηλότερη είναι η φασματική ανάλυση.



Σχήμα 3.1: Συνδεσμολογία μέτρησης της BBS

Με την συνδεσμολογία του Σχήματος 3.1 λαμβάνουμε στον OSA το ακόλουθο φάσμα ισχύος.

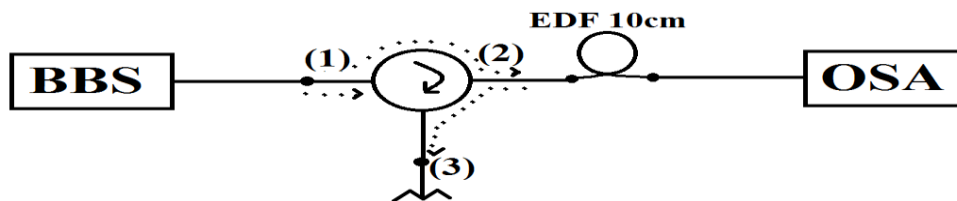


Σχήμα 3.2: Φασματική ισχύς της BBS στο εύρος ζώνης (1480nm-1600nm)

Παρατηρούμε ότι δεν έχουμε την ίδια ισχύ σε όλα τα μήκη κύματος με μέγιστη περιοχή ισχύος γύρω από τα 1550nm.

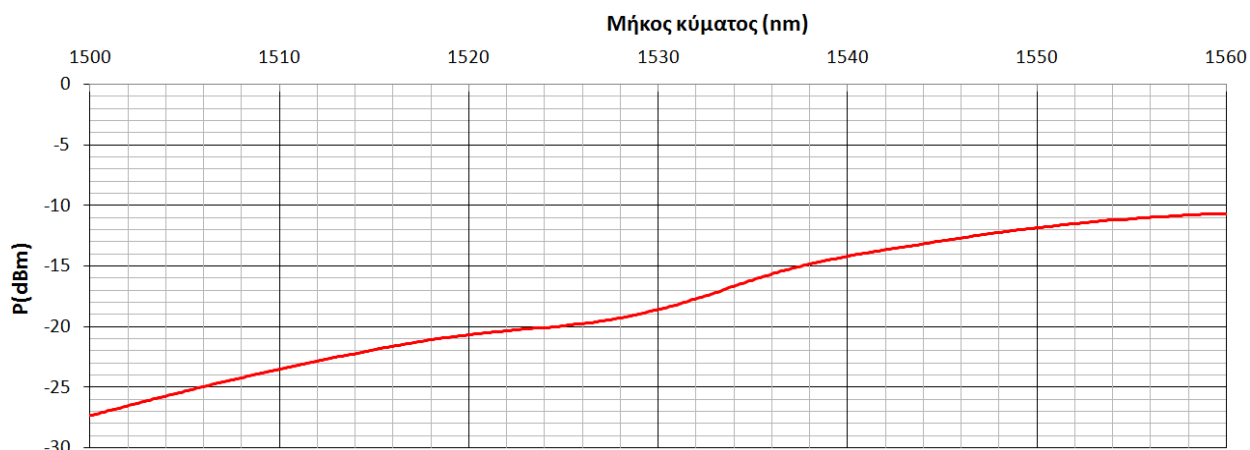
Οπτικές ίνες νοθευμένες με ιόντα Ερβίου και η εφαρμογή τους στους οπτικούς ενισχυτές

Ακολουθώς, παρεμβάλουμε την ίνα EDF μήκους 10cm μεταξύ της πηγής BBS και του OSA.



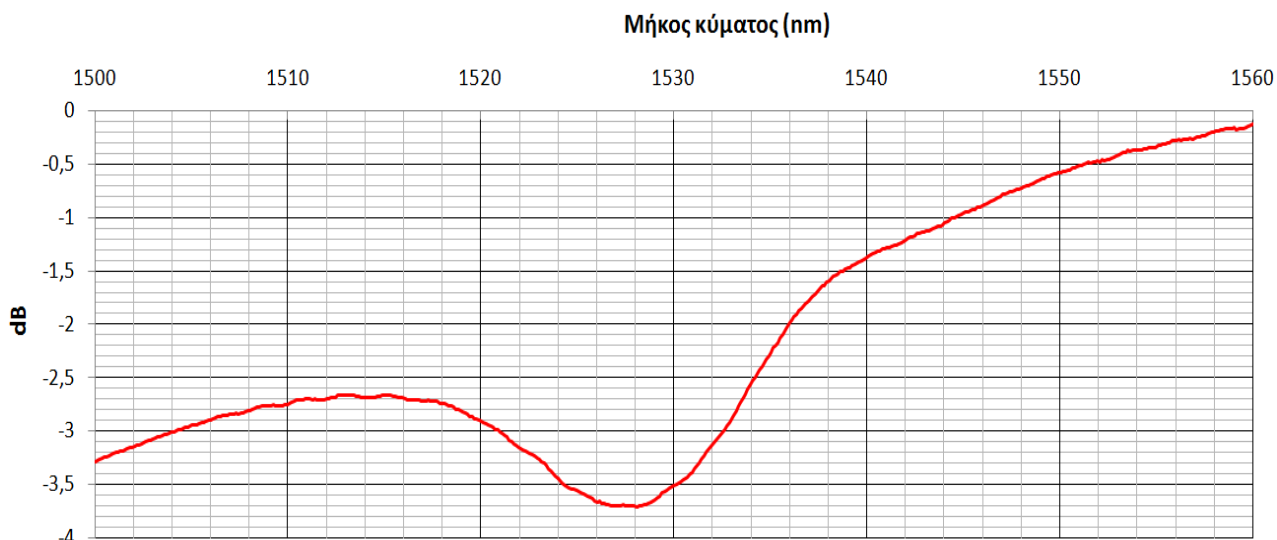
Σχήμα 3.3: Συνδεσμολογία (BBS με EDF10cm)

Με την συνδεσμολογία του Σχήματος 3.3 λαμβάνουμε στον OSA το ακόλουθο φάσμα ισχύος:



Σχήμα 3.4: Φασματική ισχύς BBS-EDF10cm (1500nm-1560nm)

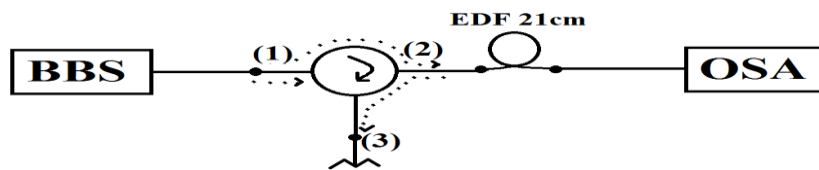
Με τη διαφορά ισχύος πριν και μετά την παρεμβολή της ίνας EDF 10cm προκύπτει το ακόλουθο φάσμα απορρόφησης της EDF 10cm



Σχήμα 3.5: Φασματική απορρόφηση της EDF10cm μέσω της BBS (1500nm-1560nm)

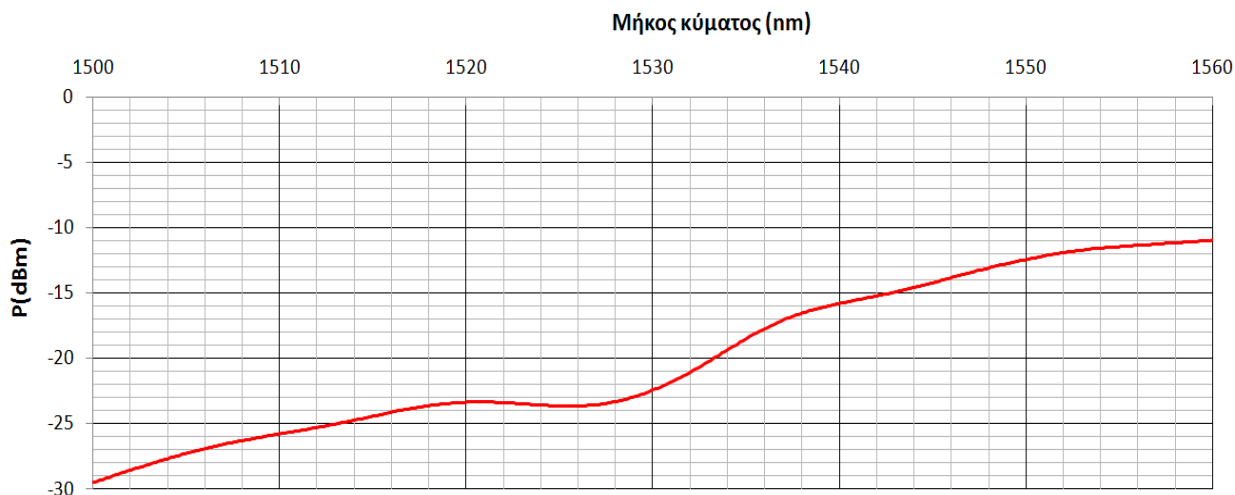
Η μέγιστη εξασθένιση στα 1530nm είναι 3.5dB. Οπότε με αναγωγή στο 1m: $3.5dB * 10 = 35dB/m$. Επομένως η εξασθένιση της EDF 10cm αποκλίνει σημαντικά από την ονομαστική της τιμή που είναι τα 110dB/m.

Στη συνέχεια αφαιρώ την EDF 10cm και την αντικαθιστούμε με την EDF 21cm



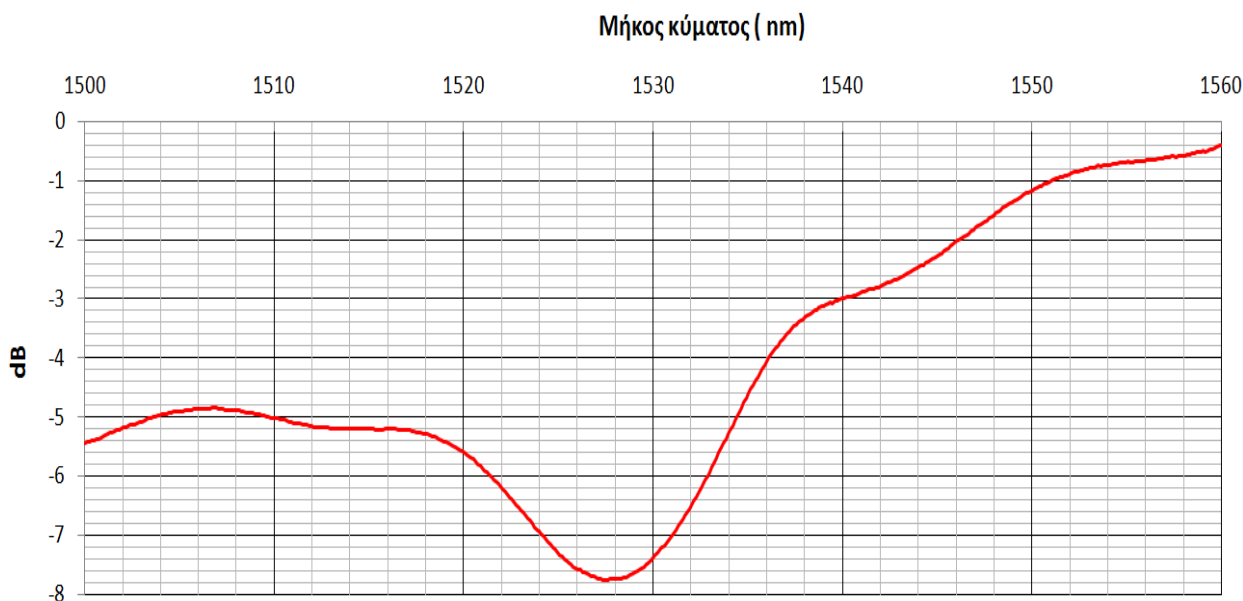
Σχήμα 3.6: Συνδεσμολογία (BBS με EDF 21cm)

Με την συνδεσμολογία του Σχήματος 3.6 λαμβάνουμε στον OSA το ακόλουθο φάσμα ισχύος:



Σχήμα 3.7: Φασματική ισχύς BBS-EDF21cm (1500nm-1560nm)

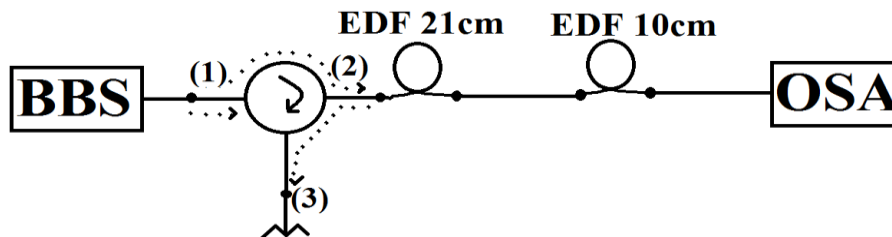
Με τη διαφορά ισχύος πριν και μετά την παρεμβολή της ίνας EDF 21cm προκύπτει το ακόλουθο φάσμα απορρόφησης της EDF 21cm



Σχήμα 3.8:Φασματική απορρόφηση της EDF21cm μέσω της BBS(1500nm-1560nm)

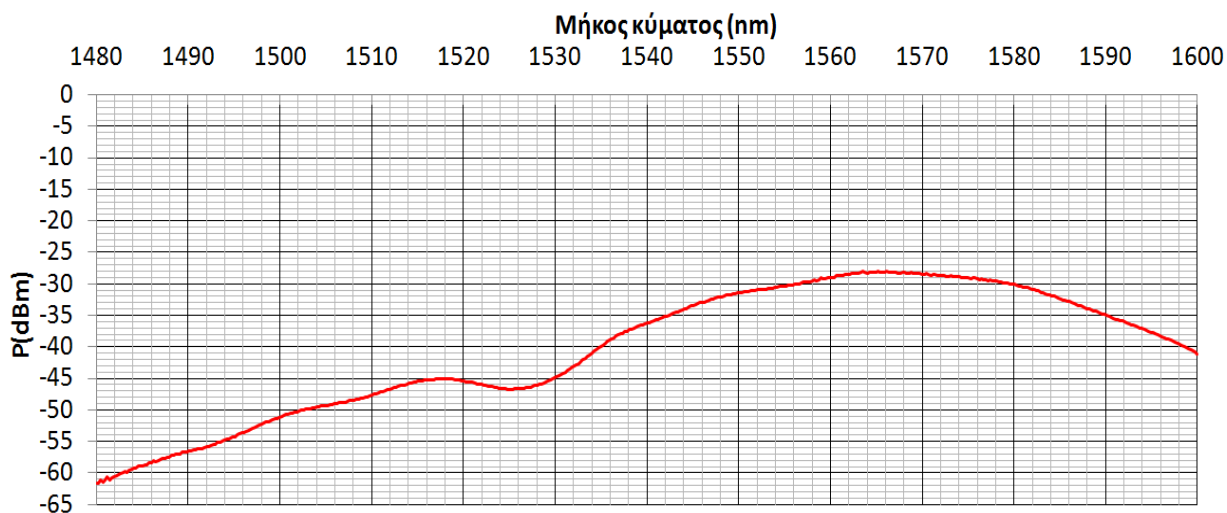
Η μέγιστη εξασθένιση στα 1530nm είναι 7.3dB. Επομένως η εξασθένιση της EDF 21cm είναι $7.3 \cdot 5 = 36.5 \text{ dB/m}$ και αποκλίνει σημαντικά από την ονομαστική της τιμή.

Ακολουθώς συνδέουμε και τις δύο EDF μαζί (21+10)cm



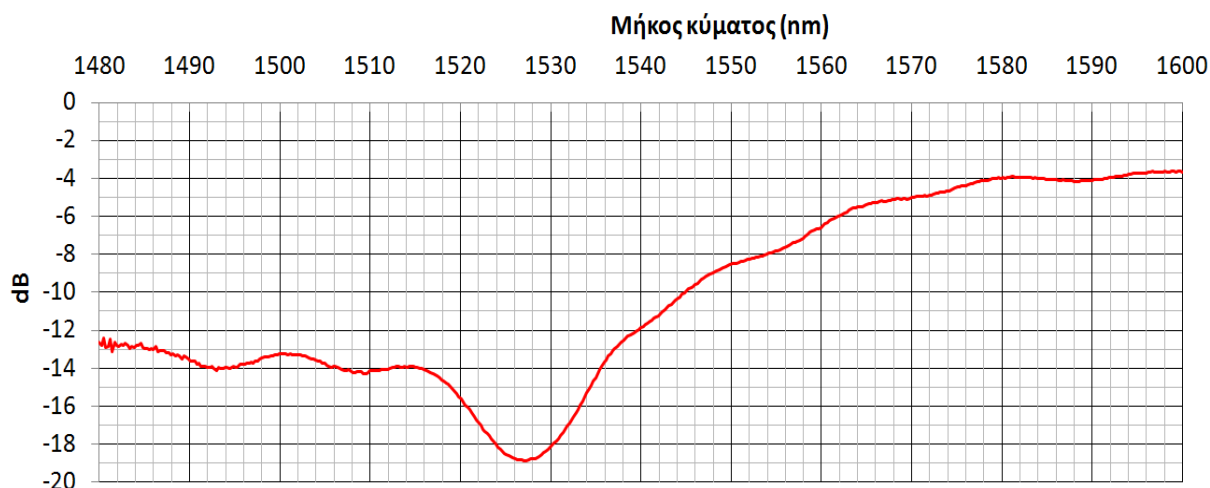
Σχήμα 3.9: Συνδεσμολογία (BBS με EDF 31cm)

Με την συνδεσμολογία του Σχήματος 3.9 λαμβάνουμε στον OSA το ακόλουθο φάσμα ισχύος:



Σχήμα 3.10: Φασματική ισχύς BBS-EDF(10+21)cm (1480nm-1600nm)

Με τη διαφορά ισχύος πριν και μετά την παρεμβολή της ίνας EDF (10+21)cm προκύπτει το ακόλουθο φάσμα απορρόφησης της EDF (10+21)cm

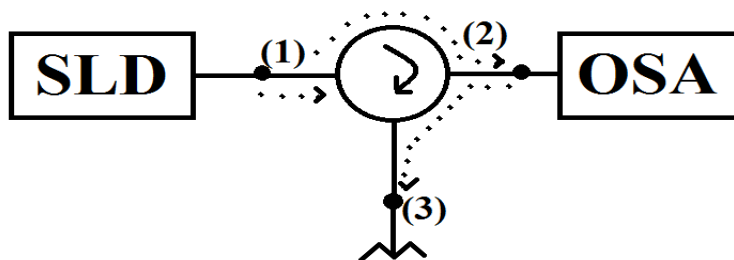


Σχήμα 3.11: Φασματική απορρόφηση EDF(10+21)cm μέσω της BBS (1480nm-1600nm)

Η μέγιστη εξασθένιση στα 1530nm είναι 18dB οπότε με αναγωγή στο 1m είναι $18 \cdot 3.3 = 59.4 \text{ dB/m}$. Επομένως η εξασθένιση της EDF 31cm έχει μεγάλη απόκλιση από την προβλεπόμενη δηλαδή την ονομαστική τιμή.

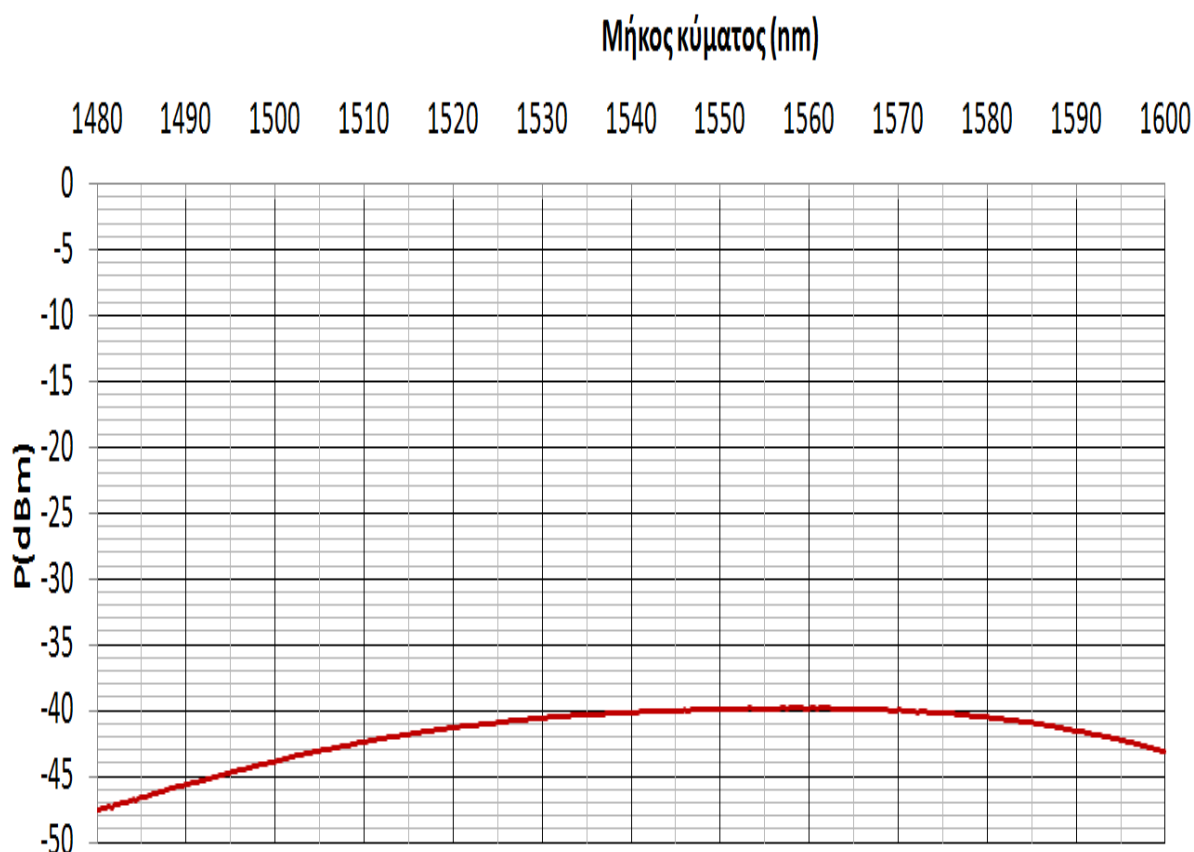
Πιθανή αιτία είναι το επίπεδο ισχύος της πηγής BBS. Για να εξετάσουμε την επίδραση της ισχύος στη μέτρηση της εξασθένισης δοκιμάζουμε την δεύτερη πηγή SLD, η οποία παρέχει μικρότερα επίπεδα ισχύος.

3.2 Για την πηγή SLD



Σχήμα 3.12: Συνδεσμολογία μέτρησης της SLD

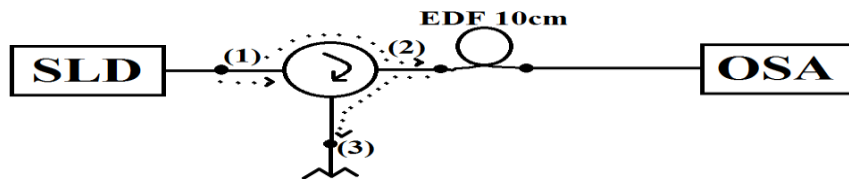
Με την συνδεσμολογία του Σχήματος 3.12 μετρώ την πηγή μου και λαμβάνουμε στον OSA το ακόλουθο φάσμα ισχύος:



Σχήμα 3.13: Φασματική ισχύς της SLD στο εύρος ζώνης (1480nm-1600nm)

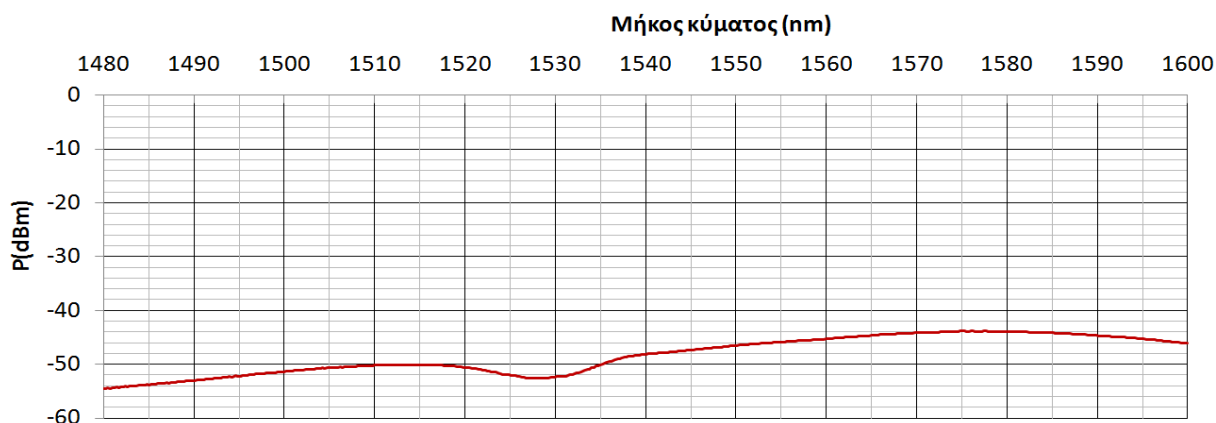
Παρατηρούμε ότι δεν έχουμε την ίδια ισχύ σε όλα τα μήκη κύματος με μέγιστη περιοχή ισχύος γύρω από τα 1550nm. Γενικά η SLD συμπεριφέρεται περισσότερο ομοιόμορφα σε όλα τα μήκη κύματος, ενώ η BBS έχει μεγαλύτερη ισχύ στην περιοχή (1530nm – 1560nm).

Ακολουθως, συνδέουμε την μια άκρη της EDF 10cm με την πόρτα (2) του κυκλοφορητή και την άλλη με τον OSA μέσω συνδετήρων και όχι με συγκόλληση.



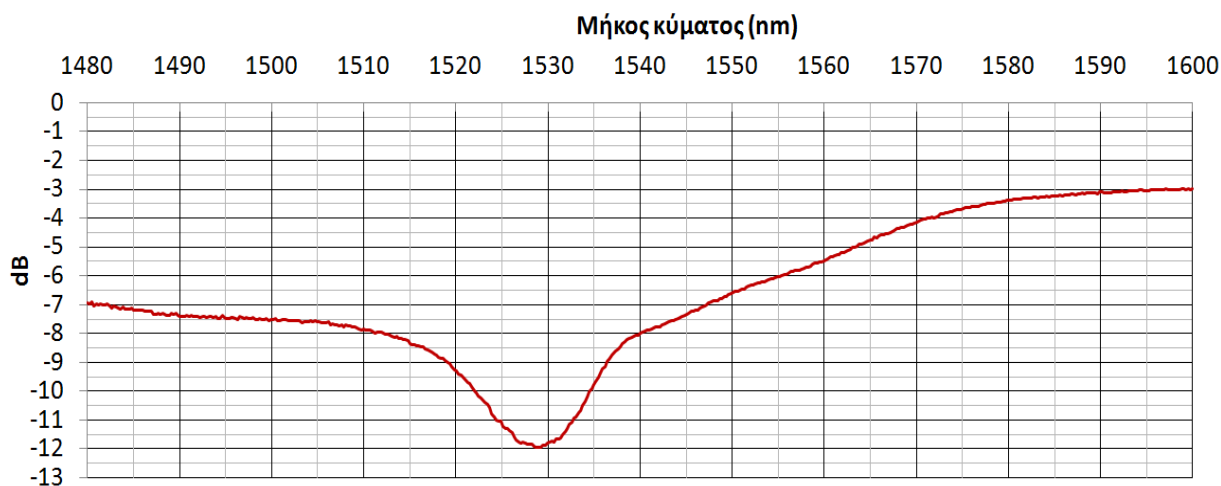
Σχήμα 3.14: Συνδεσμολογία (SLD με EDF 10cm)

Με την συνδεσμολογία του Σχήματος 3.14 λαμβάνουμε στον OSA το ακόλουθο φάσμα ισχύος:



Σχήμα 3.15: Φασματική ισχύς SLD – EDF10cm (1480nm-1600nm)

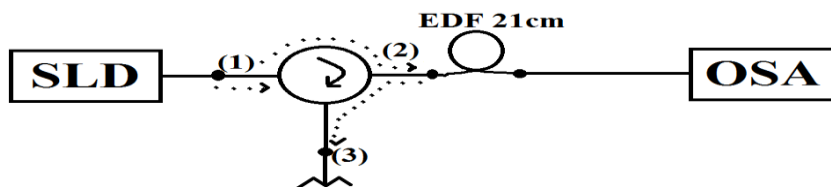
Επειδή η ίνα προκαλεί εξασθένιση παρατηρούμε μείωση της εξερχόμενης ισχύος. Στα 1530nm διακρίνουμε μεγαλύτερη εξασθένιση με ισχύ -52 dBm και μέγιστη περιοχή ισχύος γύρω από τα (1570nm-1580nm). Με τη διαφορά ισχύος πριν και μετά την παρεμβολή της ίνας EDF10cm προκύπτει το ακόλουθο φάσμα απορρόφησης της EDF10cm



Σχήμα 3.16: Φασματική απορρόφηση της EDF10cm μέσω της SLD (1480nm-1600nm)

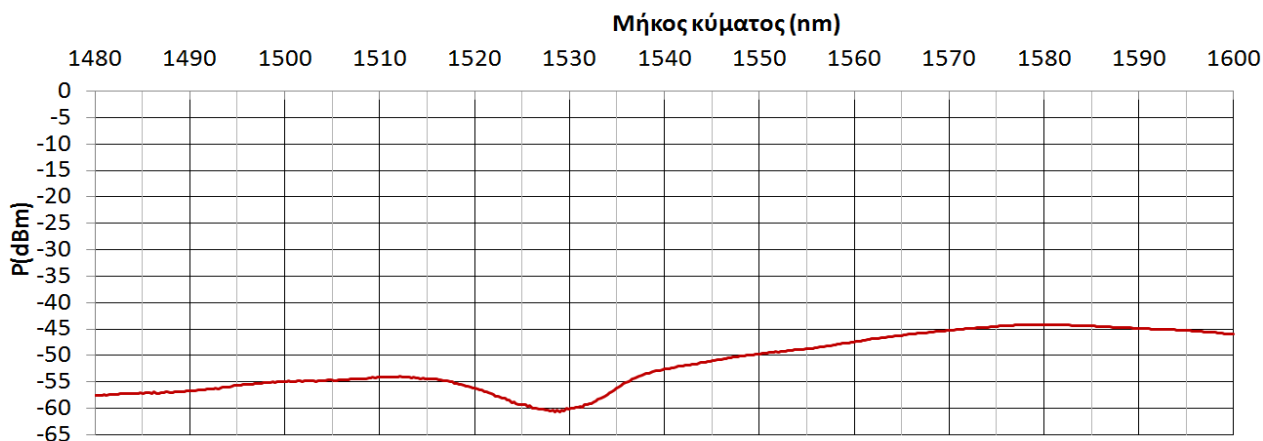
Η μέγιστη εξασθένιση στα 1530nm είναι 11.7dB, οπότε με αναγωγή στο 1m: $11.7dB * 10 = 117dB/m$. Επομένως η εξασθένιση της EDF 10cm πλησιάζει αρκετά την ονομαστική της τιμή που είναι τα 110dB/m

Στη συνέχεια αφαιρώ την EDF 10cm και την αντικαθιστούμε με την EDF 21cm.



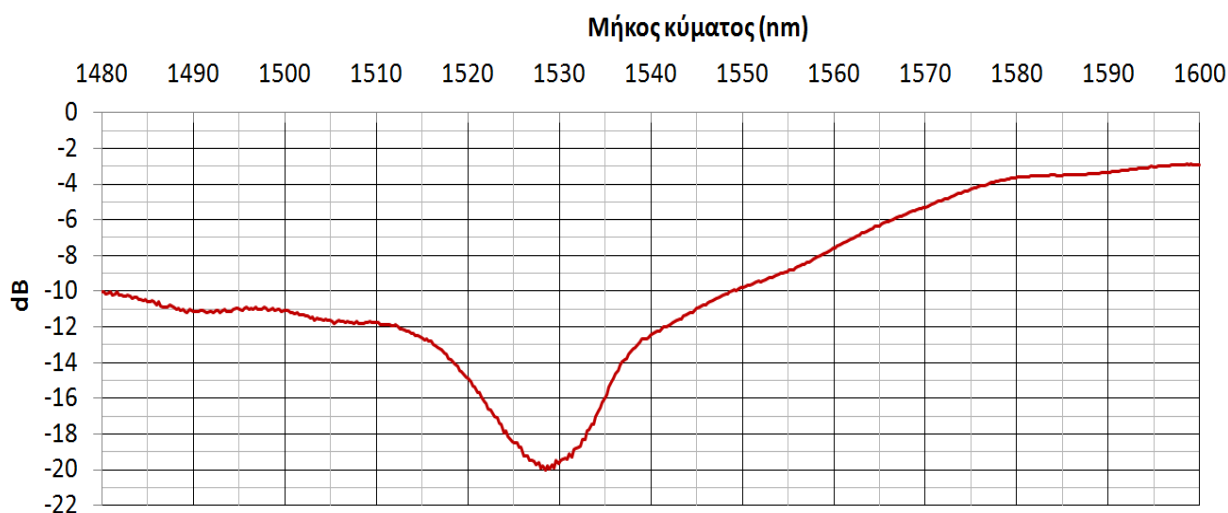
Σχήμα 3.17: Συνδεσμολογία (SLD με EDF 21cm)

Με την συνδεσμολογία του Σχήματος 3.17 λαμβάνουμε στον OSA το ακόλουθο φάσμα ισχύος:



Σχήμα 3.18: Φασματική ισχύς SLD-EDF21cm (1480nm-1600nm)

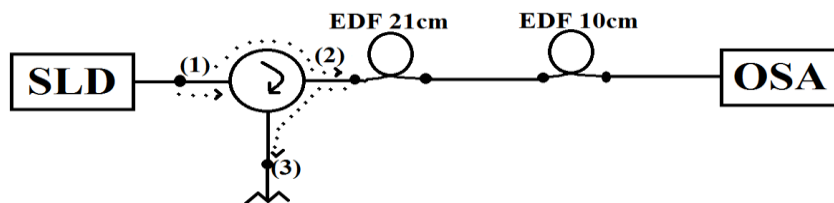
Στα χαμηλότερα μήκη κύματος παρατηρούμε μεγαλύτερη εξασθένιση. Επιπλέον, Παρατηρούμε μεγαλύτερη εξασθένιση από την προηγούμενη ίνα εξαιτίας του μεγαλύτερου μήκους της. Στα 1530nm παρατηρούμε ισχύ -60dBm και μέγιστη περιοχή ισχύος γύρω από τα (1570nm-1580nm). Με τη διαφορά ισχύος πριν και μετά την παρεμβολή της ίνας EDF21cm προκύπτει το ακόλουθο φάσμα απορρόφησης της EDF21cm



Σχήμα 3.19: Φασματική απορρόφηση της EDF21cm μέσω της SLD (1480nm-1600nm)

Η μέγιστη εξασθένιση στα 1530nm είναι 19.5dB οπότε με αναγωγή στο 1m $19.5 \cdot 5 = 97.5 \text{ dB/m}$. Επομένως, η εξασθένιση της EDF 21cm αποκλίνει από την ονομαστική της τιμή.

Ακολουθώς συνδέουμε και τις 2 EDF μαζί (21+10)cm



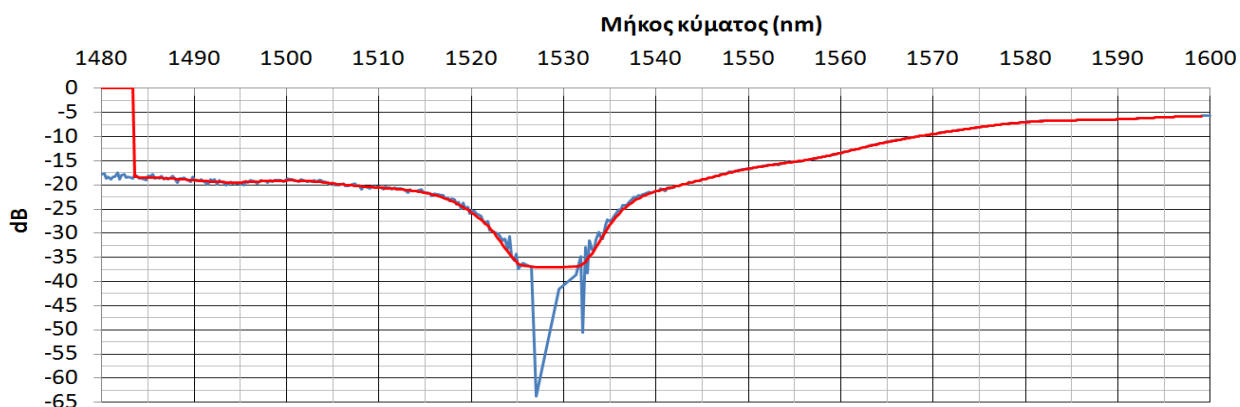
Σχήμα 3.20: Συνδεσμολογία (SLD με EDF 31cm)

Με την συνδεσμολογία του Σχήματος 3.20 λαμβάνουμε στον OSA το ακόλουθο φάσμα ισχύος:



Σχήμα 3.21: Φασματική ισχύς SLD-EDF(10+21)cm (1480nm-1600nm)

Η απόκριση έχει θόρυβο εξαιτίας του πολύ χαμηλού επιπέδου ισχύος για το λόγο αυτό κάνουμε εξομάλυνση της καμπύλης (smoothing), για να έχουμε μια μέση εκτίμηση. Με τη διαφορά ισχύος πριν και μετά την παρεμβολή της ίνας EDF(10+21)cm προκύπτει το ακόλουθο φάσμα απορρόφησης της EDF(10+21)cm



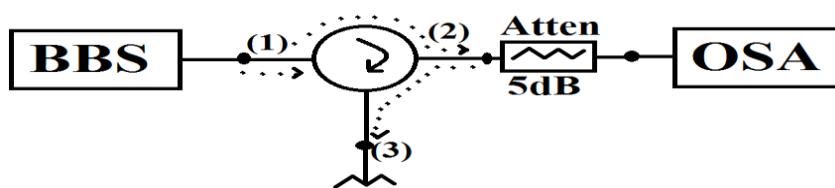
Σχήμα 3.22: Φασματική απορρόφηση της EDF(10+21)cm μέσω της SLD(1480nm-1600nm)

Παρατηρούμε ότι η φασματική εξασθένιση βελτιώθηκε με την εξομάλυνση. Η μέγιστη εξασθένιση στα 1530nm είναι 36.8dB οπότε με αναγωγή στο 1m: $36.8 \times 3.3 = 121.4 \text{ dB/m}$. Επομένως η εξασθένιση της EDF 31cm έχει μεγάλη απόκλιση από την προβλεπόμενη δηλαδή την ονομαστική τιμή.

Παρατηρούμε με την SLD βελτίωση των αποτελεσμάτων μας, συνεπώς επιβεβαιώνεται η αρχική μας θεώρηση ότι η ισχύς της πηγής είναι η αιτία απόκλισης από την ονομαστική εξασθένιση. Στη συνέχεια θα διερευνήσουμε την επίδραση της ισχύος της πηγής στην εξασθένιση, μέσω της BBS, με χρήση εξασθενητών ώστε να πετύχουμε διάφορα επίπεδα ισχύος. Για το σκοπό αυτό θα χρησιμοποιήσουμε τους εξασθενητές 5 και 10dB και 15dB που είναι διαθέσιμοι στο εργαστήριο.

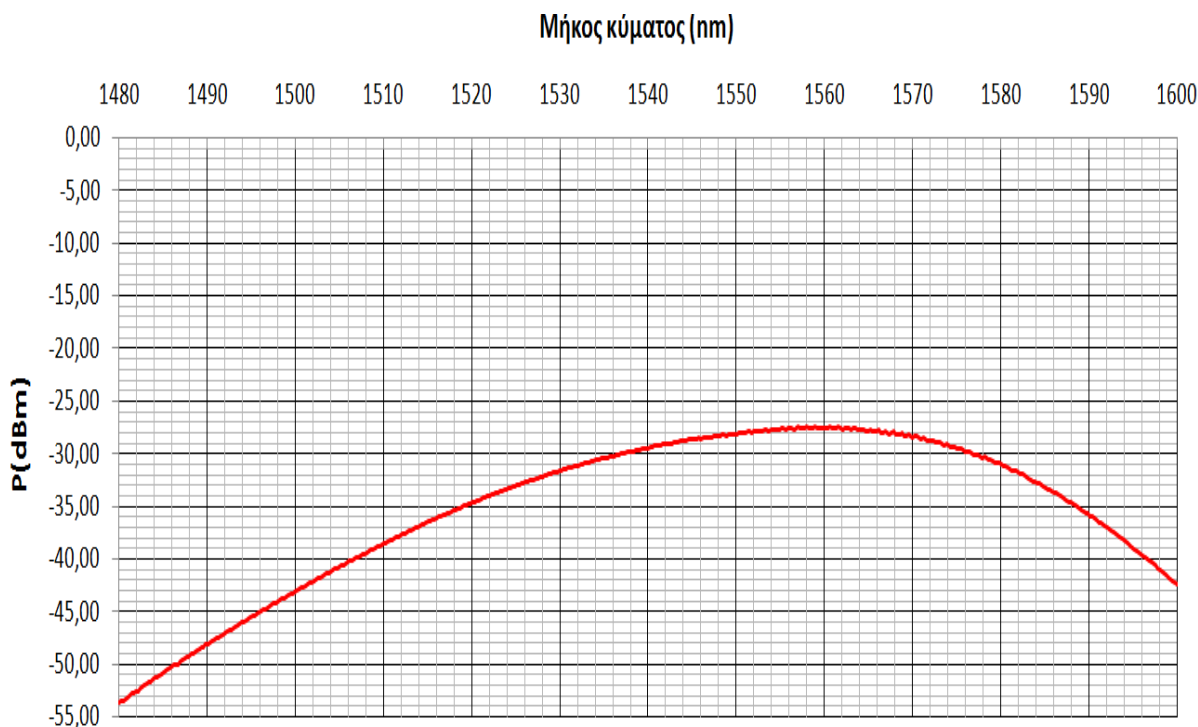
3.3 Για την πηγή BBS με εξασθενητή 5dB

Αρχικά, συνδέσαμε την πηγή με την πόρτα (1) του κυκλοφορητή και την πόρτα (2) του κυκλοφορητή με τον εξασθενητή 5dB. Βάλαμε εξασθενητή για να μειώσουμε την ισχύ της πηγής. Ο εξασθενητής είναι παθητική διάταξη που εισάγει ελεγχόμενη (σταθερή ή μεταβλητή) εξασθένιση στην εισερχόμενη οπτική ισχύ. Ακολούθως, συνδέσαμε τον εξασθενητή με τον OSA.



Σχήμα 3.23: Μέτρηση BBS με εξασθενητή 5dB

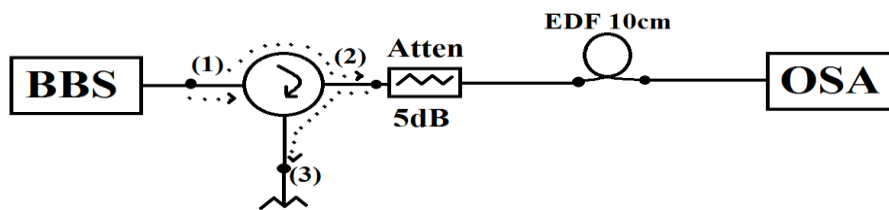
Με την συνδεσμολογία του Σχήματος 3.23 λαμβάνουμε στον OSA το ακόλουθο φάσμα ισχύος:



Σχήμα 3.24: Φασματική ισχύς της BBS5AT στο εύρος ζώνης (1480nm-1600nm)

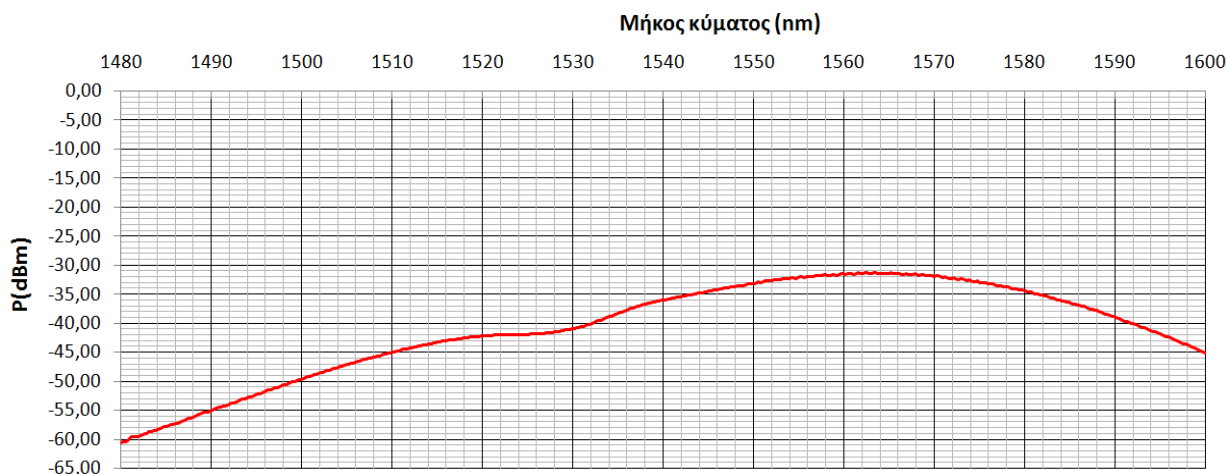
Παρατηρούμε με τον εξασθενητή μείωση της ισχύος στα 1530nm. Η BBS με εξασθενητή 5dB σε σύγκριση με την SLD έχει μεγαλύτερη ισχύ γιατί η μέγιστη ισχύ στην BBS με εξασθενητή 5dB είναι -28dBm ενώ στην SLD είναι -37dBm. Στα 1520nm με 1580nm παρατηρούμε ότι δίνει περισσότερη ισχύ.

Στη συνέχεια συνδέουμε στον εξασθενητή την EDF 10cm και από εκεί στον OSA



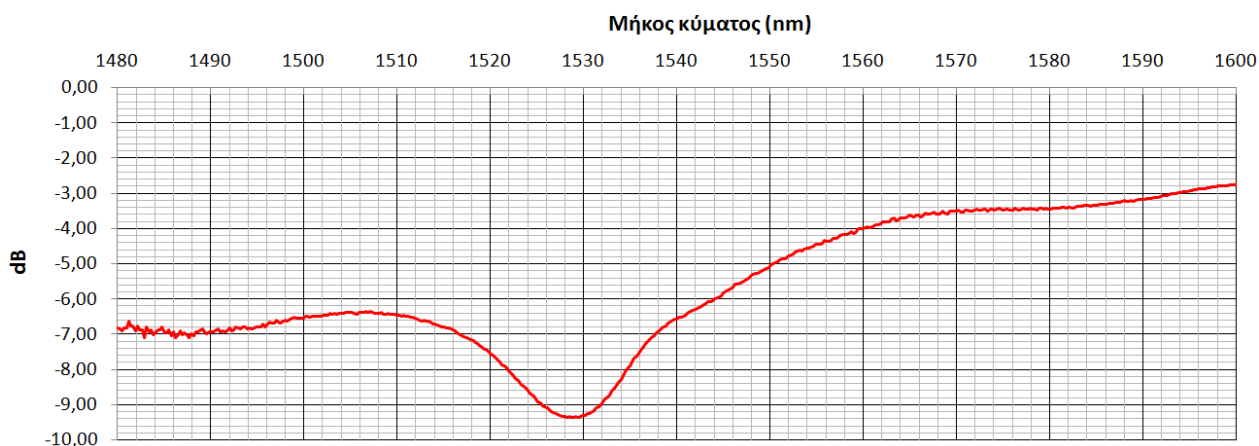
Σχήμα 3.25: Συνδεσμολογία (BBS 5AT με EDF10cm)

Με την συνδεσμολογία του Σχήματος 3.25 λαμβάνουμε στον OSA το ακόλουθο φάσμα ισχύος:



Σχήμα 3.26: Φασματική ισχύς BBS5AT - EDF10cm (1480nm-1600nm)

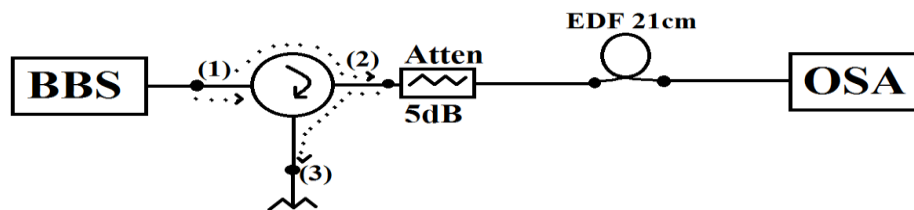
Παρατηρούμε στα 1530nm εξασθένιση που οφείλεται στην EDF. Στα 1530nm παρατηρούμε ισχύ -42dBm και μέγιστη περιοχή ισχύος γύρω από τα (1560nm-1570nm). Με τη διαφορά ισχύος πριν και μετά την παρεμβολή της ίνας EDF10cm προκύπτει το ακόλουθο φάσμα απορρόφησης της EDF10cm



Σχήμα 3.27: Φασματική απορρόφηση της EDF10cm μέσω της BBS5AT (1480nm-1600nm)

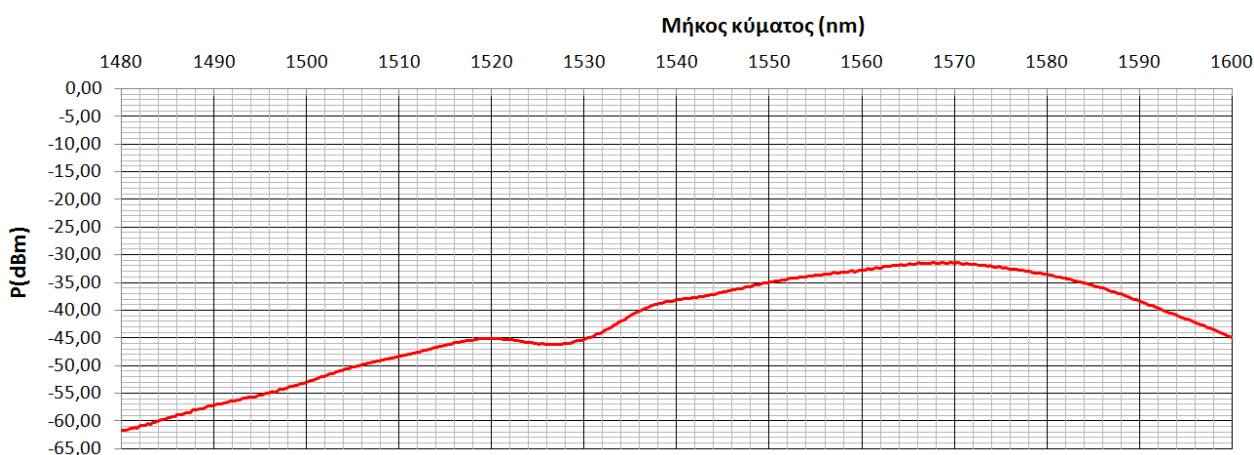
Η μέγιστη εξασθένιση στα 1530nm είναι 9.2dB. Οπότε με αναγωγή στο 1 μέτρο: $9.2 * 10 = 92dB/m$. Η εξασθένιση της EDF 10cm είναι μικρότερη από την προβλεπόμενη δηλαδή την ονομαστική τιμή.

Στη συνέχεια αφαιρούμε την EDF 10cm και την αντικαθιστούμε με την EDF 21cm



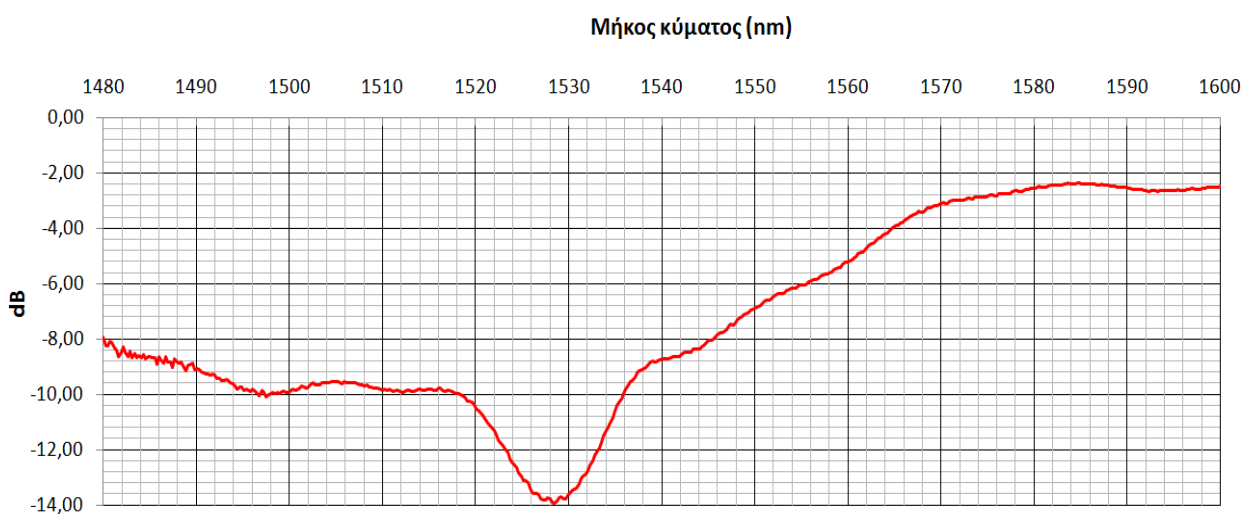
Σχήμα 3.28: Συνδεσμολογία (BBS 5AT με EDF 21cm)

Με την συνδεσμολογία του Σχήματος 3.28 λαμβάνουμε στον OSA το ακόλουθο φάσμα ισχύος:



Σχήμα 3.29: Φασματική ισχύς BBS5AT – EDF21cm (1480nm-1600nm)

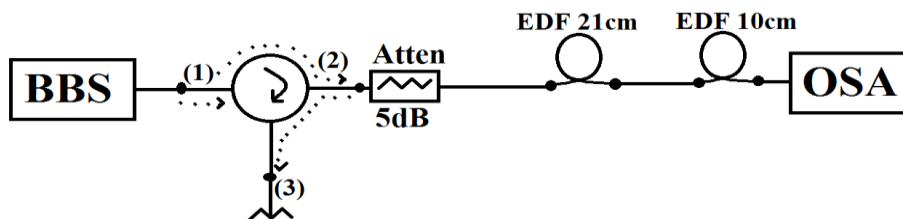
Λόγω αύξησης του μήκους της ίνας αυξάνεται και η εξασθένιση στα 1530nm. Στα 1530nm παρατηρούμε ισχύ -45dBm και μέγιστη περιοχή ισχύος γύρω από τα (1565nm-1570nm). Με τη διαφορά ισχύος πριν και μετά την παρεμβολή της ίνας EDF21cm προκύπτει το ακόλουθο φάσμα απορρόφησης της EDF21cm.



Σχήμα 3.30: Φασματική απορρόφηση της EDF21cm μέσω της BBS5AT (1480nm-1600nm)

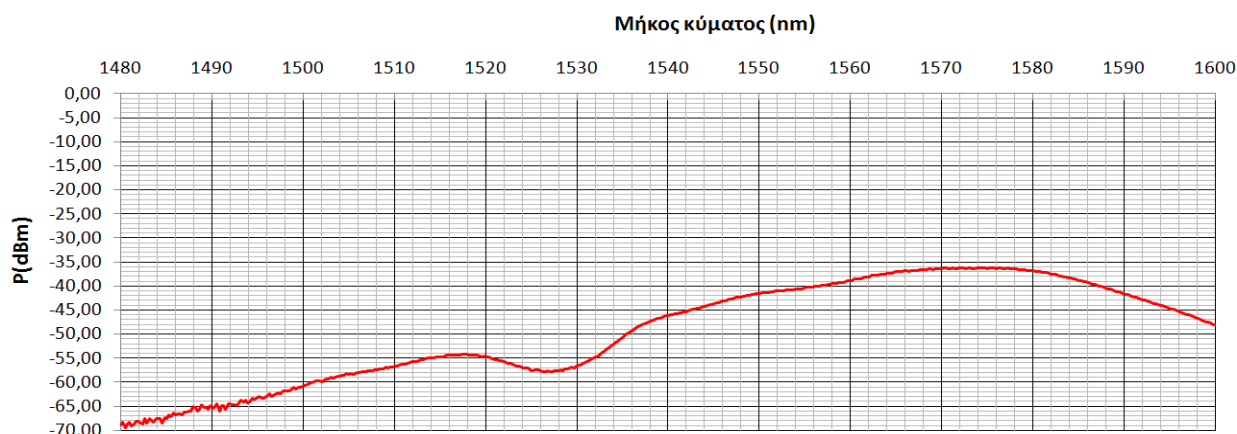
Η μέγιστη εξασθένιση στα 1530nm είναι 14dB. Επομένως η εξασθένιση της EDF 21cm στο 1m είναι αναλογικά $14 \cdot 5 = 70\text{dB/m}$ και αποκλίνει σημαντικά από την ονομαστική της τιμή.

Ακολουθώς συνδέουμε και τις 2 EDF μαζί (21+10)cm



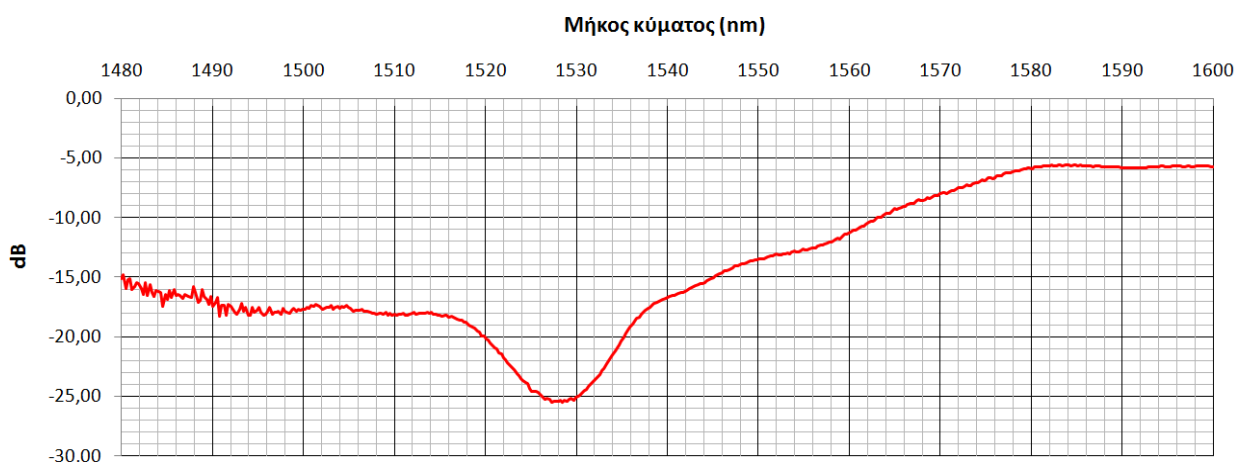
Σχήμα 3.31: Συνδεσμολογία (BBS 5AT με EDF 31cm)

Με την συνδεσμολογία του Σχήματος 3.31 λαμβάνουμε στον OSA το ακόλουθο φάσμα ισχύος:



Σχήμα 3.32: Φασματική ισχύς BBS5AT – EDF(10+21)cm (1480nm-1600nm)

Παρατηρούμε ότι η μέγιστη τιμή ισχύος είναι τα -38dBm στα 1565nm με 1575nm. Στα 1530nm παρατηρούμε ισχύ -58dBm και μέγιστη περιοχή ισχύος γύρω από τα (1570nm-1580nm). Με τη διαφορά ισχύος πριν και μετά την παρεμβολή της ίνας EDF(10+21)cm προκύπτει το ακόλουθο φάσμα απορρόφησης της EDF(10+21)cm



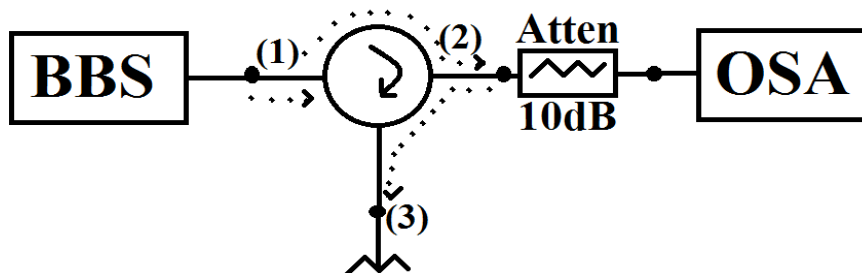
Σχήμα 3.33: Φασματική απορρόφηση της EDF(10+21)cm μέσω της BBS5AT (1480nm-1600nm)

Η μέγιστη εξασθένιση στα 1530nm είναι 25dB οπότε με αναγωγή στο 1m: $25 \times 3.3 = 84.15 \text{ dB/m}$. Επομένως η εξασθένιση της EDF(10+21)cm έχει σημαντική απόκλιση από την προβλεπόμενη δηλαδή την ονομαστική τιμή.

Σε σύγκριση με την περίπτωση της πηγής BBS χωρίς εξασθενητή υπάρχει βελτίωση οπότε δοκιμάζουμε με μεγαλύτερη εξασθένιση 10 dB ώστε να μειώσουμε περισσότερο την ισχύ της πηγής.

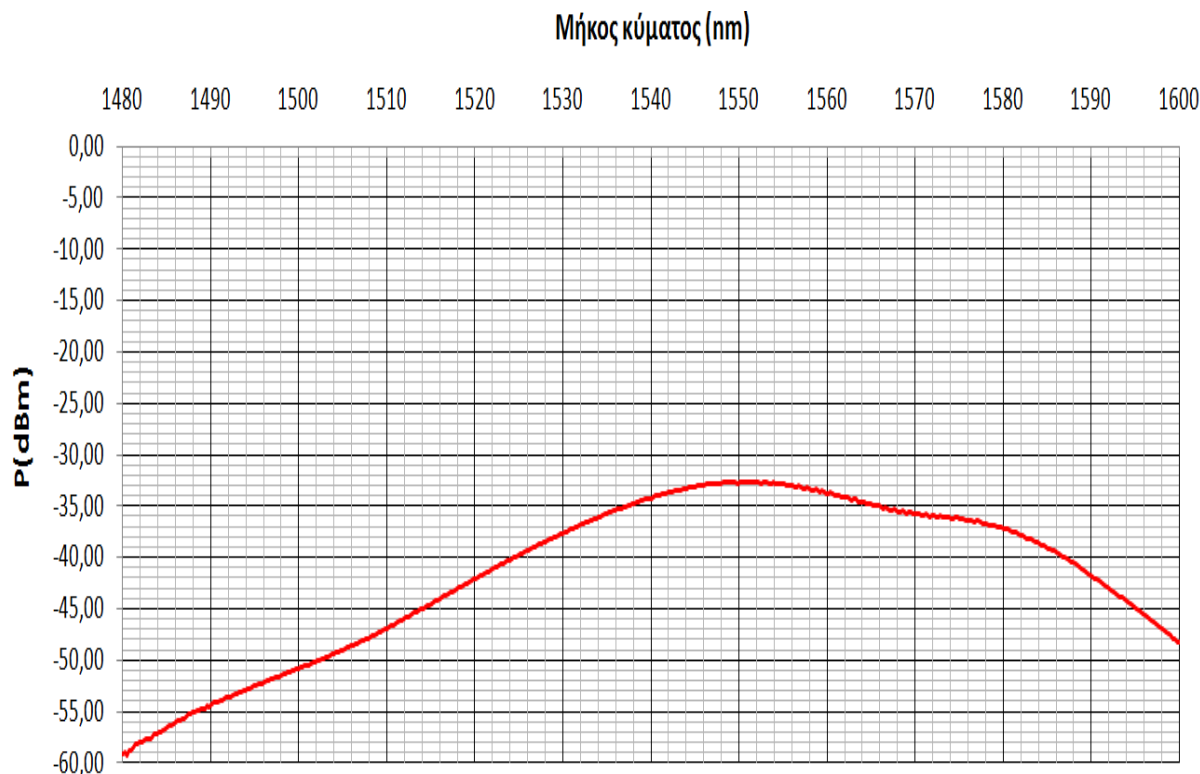
3.4 Για την πηγή BBS με εξασθενητή 10dB

Αρχικά, συνδέσαμε την πηγή με την πόρτα (1) του κυκλοφορητή και την πόρτα (2) του κυκλοφορητή με τον εξασθενητή 10dB. Ακολούθως, συνδέσαμε τον εξασθενητή με τον OSA.



Σχήμα 3.34: Μέτρηση BBS με εξασθενητή 10dB

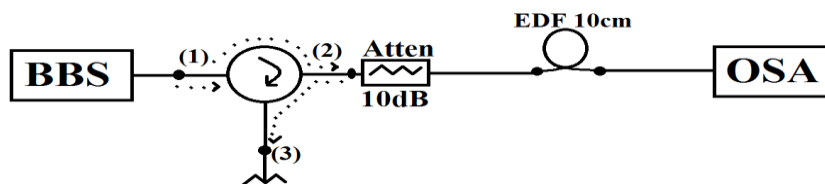
Με την συνδεσμολογία του Σχήματος 3.34 λαμβάνουμε στον OSA το ακόλουθο φάσμα ισχύος:



Σχήμα 3.35: Φασματική ισχύς της BBS10T στο εύρος ζώνης (1480nm-1600nm)

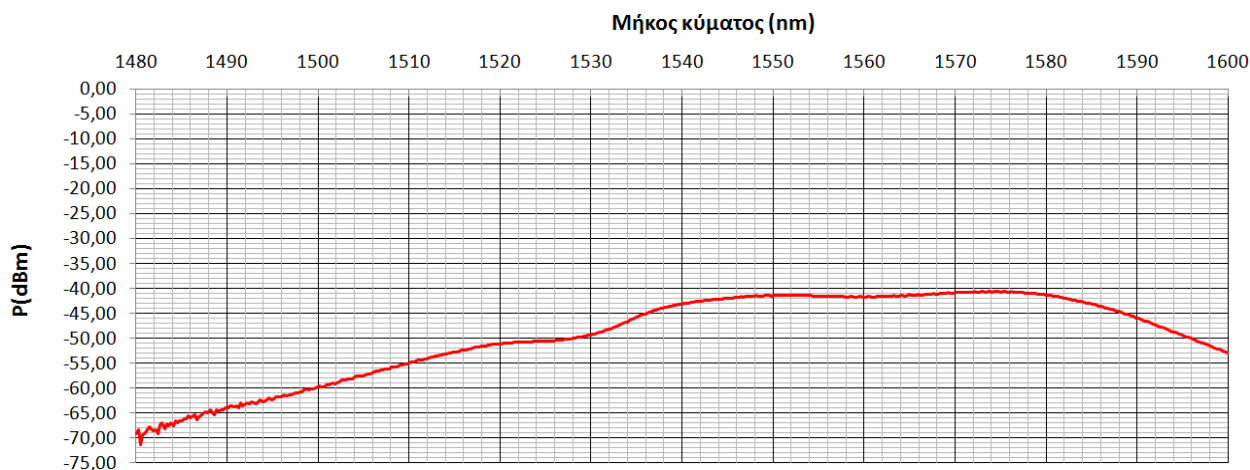
Παρατηρούμε όπως είναι αναμενόμενο με τον εξασθενητή 10dB η ισχύς είναι μικρότερη σε σχέση με τον εξασθενητή 5dB. Η BBS με εξασθενητή 10dB σε σύγκριση με την SLD φαίνεται ότι έχει χαμηλότερη ισχύ στα 1480nm και γύρω από τα 1600nm. Για παράδειγμα η BBS με εξασθενητή 10dB στα 1480nm έχει ισχύ -60dBm, ενώ η SLD στα 1480nm έχει -45dBm.

Στη συνέχεια συνδέουμε στον εξασθενητή την EDF 10cm και από εκεί στον OSA



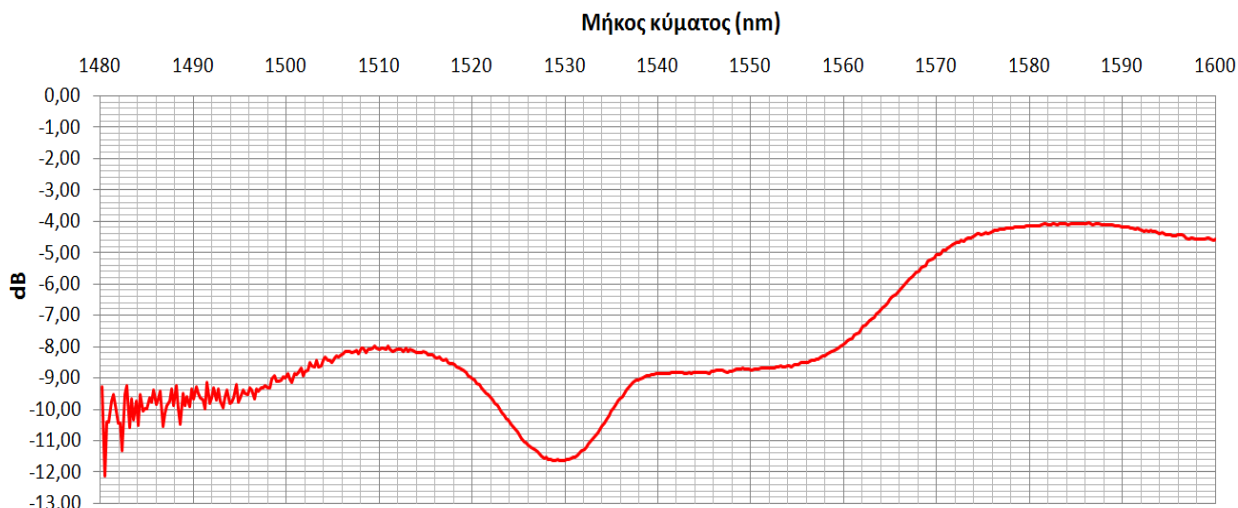
Σχήμα 3.36: Συνδεσμολογία (BBS 10AT με EDF 10cm)

Με την συνδεσμολογία του Σχήματος 3.36 λαμβάνουμε στον OSA το ακόλουθο φάσμα ισχύος:



Σχήμα 3.37: Φασματική ισχύς BBS10AT - EDF10cm (1480nm-1600nm)

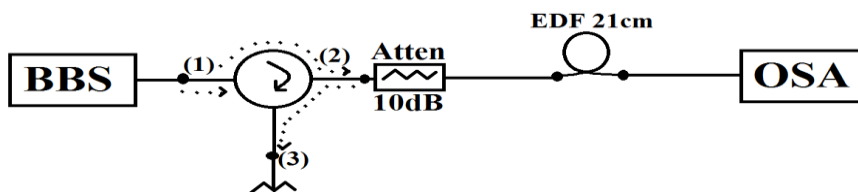
Στα 1520nm με 1530 υπάρχει μεγαλύτερη εξασθένιση. Στα 1530nm παρατηρούμε ισχύ -49dBm και μέγιστη περιοχή ισχύος γύρω από τα (1545nm-1580nm). Με τη διαφορά ισχύος πριν και μετά την παρεμβολή της ίνας EDF10cm προκύπτει το ακόλουθο φάσμα απορρόφησης της EDF10cm



Σχήμα 3.38: Φασματική απορρόφηση της EDF10cm μέσω της BBS10AT (1480nm-1600nm)

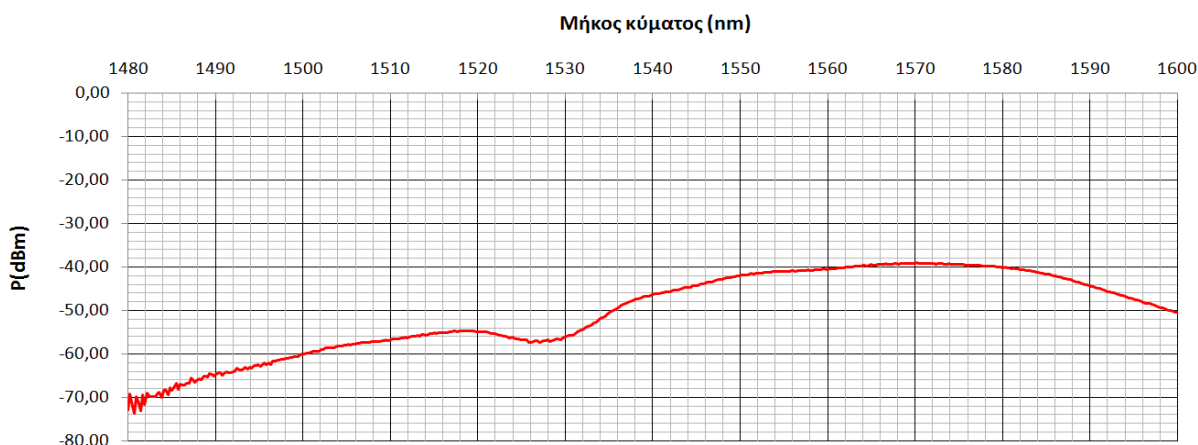
Η μέγιστη εξασθένιση στα 1530nm είναι 11.5dB. Επομένως η εξασθένιση της EDF 10cm στο 1m είναι $11.5 \times 10 = 115\text{dB/m}$ με μικρή απόκλιση από την προβλεπόμενη δηλαδή την ονομαστική τιμή.

Στη συνέχεια βγάζουμε την EDF 10cm και την αντικαθιστούμε με την EDF 21cm



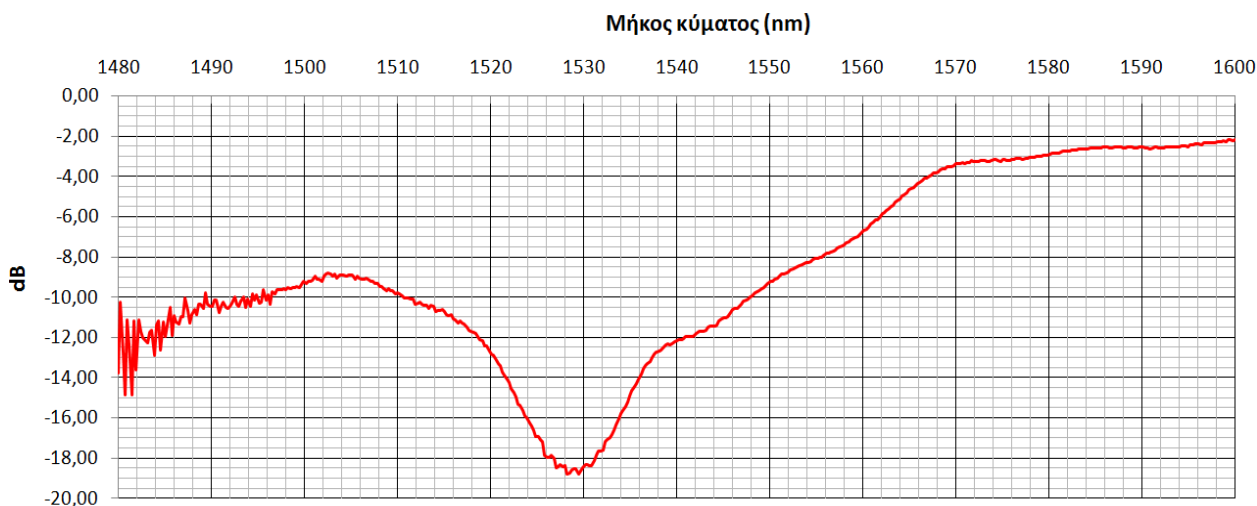
Σχήμα 3.39: Συνδεσμολογία (BBS10AT με EDF 21cm)

Με την συνδεσμολογία του Σχήματος 3.39 λαμβάνουμε στον OSA το ακόλουθο φάσμα ισχύος:



Σχήμα 3.40: Φασματική ισχύς BBS10AT – EDF21cm (1480nm-1600nm)

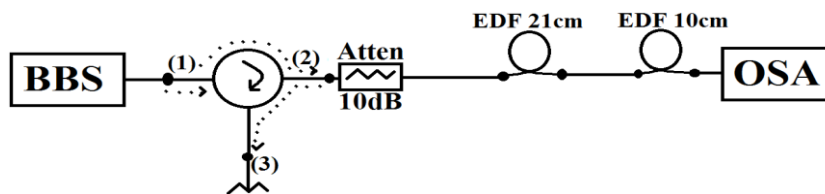
Λόγω της EDF 21cm στα 1520nm με 1530nm υπάρχει μεγαλύτερη εξασθένιση. Στην ίνα EDF (21cm) παρατηρούμε μεγαλύτερη εξασθένιση από αυτήν την EDF (10cm) , εξαιτίας του μεγαλύτερου μήκους της. Με τη διαφορά ισχύος πριν και μετά την παρεμβολή της ίνας EDF21cm προκύπτει το ακόλουθο φάσμα απορρόφησης της EDF21cm



Σχήμα 3.41: Φασματική απορρόφηση της EDF21cm μέσω της BBS10AT (1480nm-1600nm)

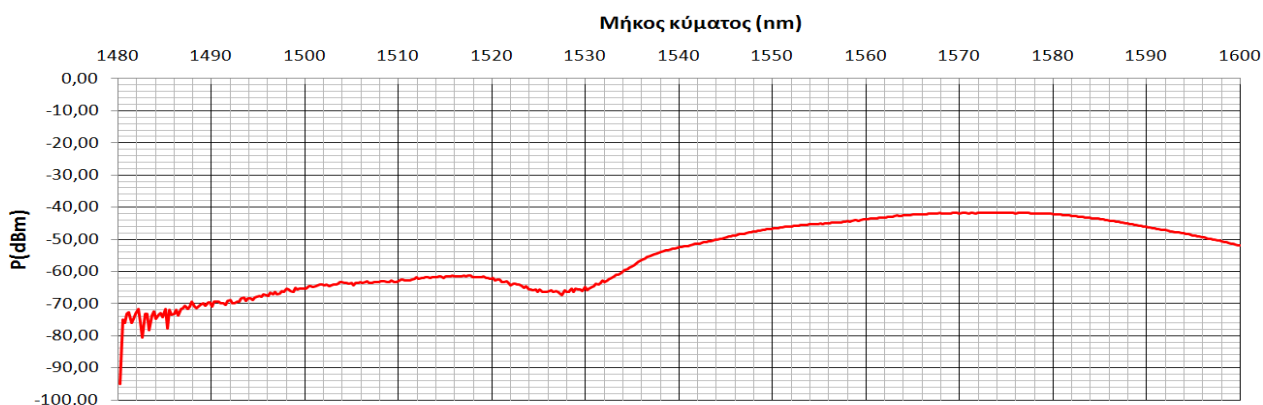
Η μέγιστη εξασθένιση στα 1530nm είναι 18.5dB οπότε με αναγωγή στο 1m: $5 \cdot 18.5 = 92.5 \text{ dB/m}$ Επομένως η εξασθένιση της EDF 21cm αποκλίνει από την ονομαστική της τιμή όμως σε σύγκριση με την BBS είναι πιο κοντά.

Ακολουθως συνδέουμε και τις δύο EDF (21+10)cm



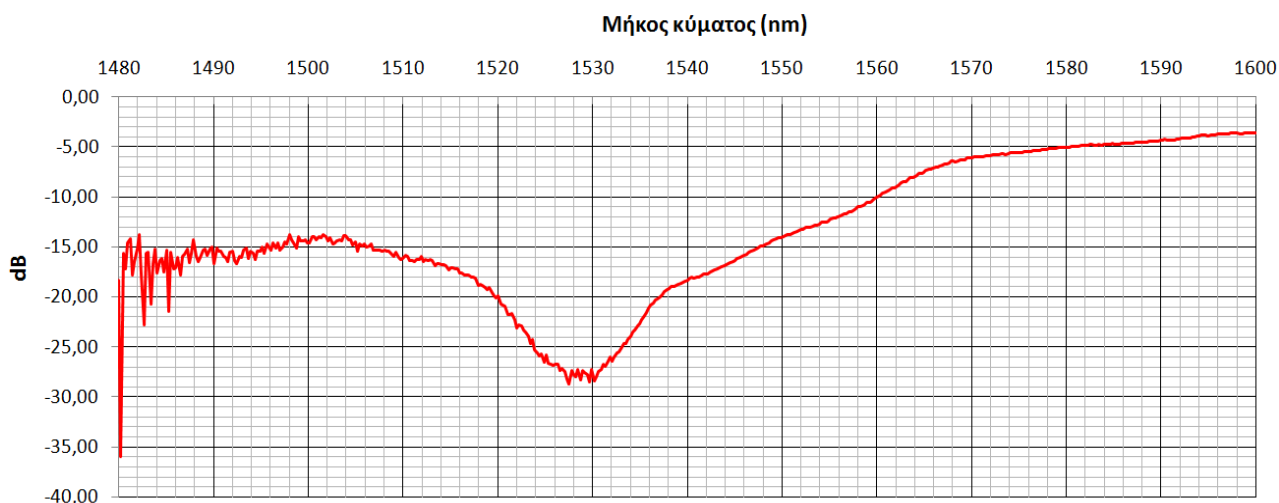
Σχήμα 3.42: Συνδεσμολογία (BBS10AT με EDF 31cm)

Με την συνδεσμολογία του Σχήματος 3.42 λαμβάνουμε στον OSA το ακόλουθο φάσμα ισχύος:



Σχήμα 3.43: Φασματική ισχύς BBS10AT – EDF(10+21)cm (1480nm-1600nm)

Παρατηρούμε ότι τα -95 dBm είναι θόρυβος εξαιτίας της πολύ μικρής ισχύος του σήματος. Στα 1530nm παρατηρούμε ισχύ -65 dBm και μέγιστη περιοχή ισχύος γύρω από τα (1570nm-1580nm). Με τη διαφορά ισχύος πριν και μετά την παρεμβολή της ίνας EDF(10+21)cm προκύπτει το ακόλουθο φάσμα απορρόφησης της EDF(10+21)cm



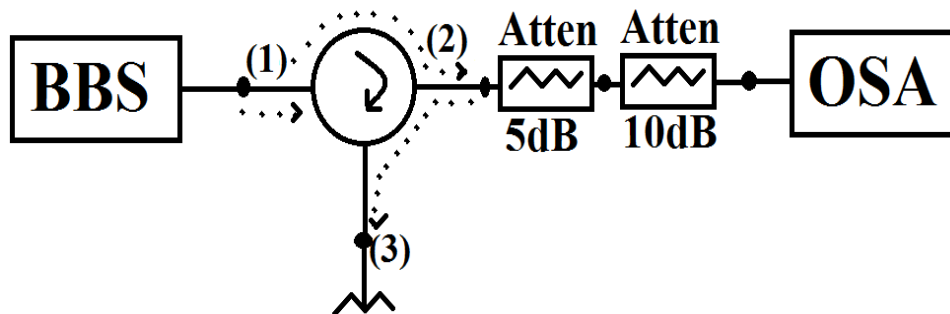
Σχήμα 3.44: Φασματική απορρόφηση της EDF(10+21)cm μέσω της BBS 10AT (1480nm-1600nm)

Η μέγιστη εξασθένιση στα 1530nm είναι 28dB οπότε με αναγωγή στο 1m: $28 \cdot 3.3 = 92.4 \text{ dB/m}$. Επομένως η εξασθένιση της EDF 31cm αποκλίνει από την προβλεπόμενη δηλαδή την ονομαστική τιμή.

Σε σύγκριση με την περίπτωση της πηγής BBS με εξασθενητή 5dB υπάρχει βελτίωση οπότε δοκιμάζουμε με μεγαλύτερη εξασθένιση 15 dB ώστε να μειώσουμε περισσότερο την ισχύ της πηγής.

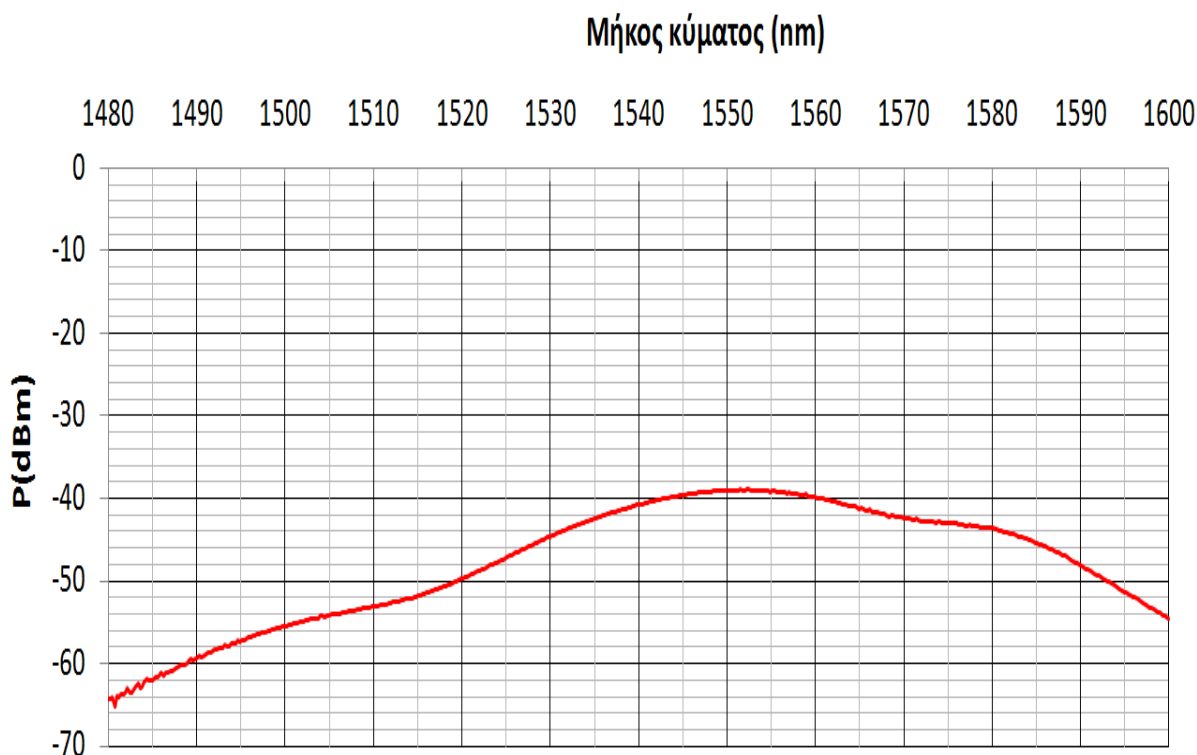
3.5 Για την πηγή BBS με εξασθενητή 15dB

Αρχικά, συνδέσαμε την πηγή με την πόρτα (1) του κυκλοφορητή και την πόρτα (2) του κυκλοφορητή με τον εξασθενητή 5dB και σε σειρά με τον εξασθενητή 10dB. Ακολούθως, συνδέσαμε τον εξασθενητή 10dB με τον OSA.



Σχήμα 3.45: Μέτρηση BBS με εξασθενητή 15dB

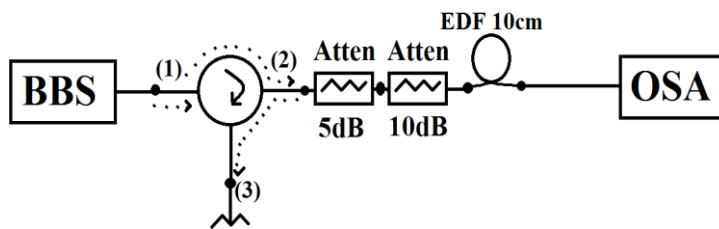
Με την συνδεσμολογία του Σχήματος 3.45 λαμβάνουμε στον OSA το ακόλουθο φάσμα ισχύος:



Σχήμα 3.46: Φασματική ισχύς της BBS15AT στο εύρος ζώνης (1480nm-1600nm)

Παρατηρούμε όπως είναι αναμενόμενο με τον εξασθενητή 15dB η ισχύς είναι μικρότερη σε σχέση με τον εξασθενητή 10dB. Η BBS με εξασθενητή 15dB σε σύγκριση με την SLD φαίνεται ότι έχει χαμηλότερη ισχύ.

Στη συνέχεια συνδέουμε στον εξασθενητή την EDF 10cm και από εκεί στον OSA



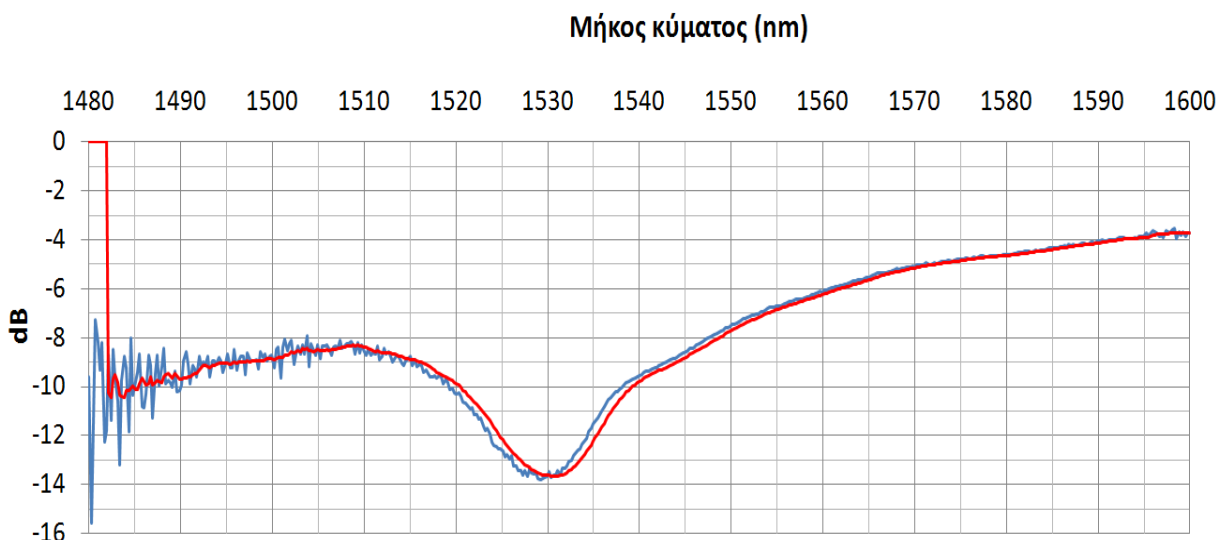
Σχήμα 3.47: Συνδεσμολογία (BBS 15AT με EDF 10cm)

Με την συνδεσμολογία του Σχήματος 3.47 λαμβάνουμε στον OSA το ακόλουθο φάσμα ισχύος:



Σχήμα 3.48: Φασματική ισχύς BBS15AT - EDF10cm (1480nm-1600nm)

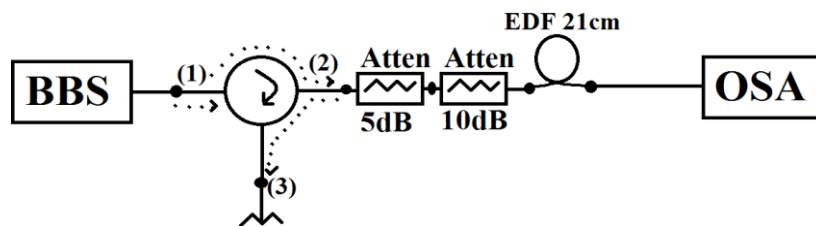
Στα 1530 υπάρχει μεγαλύτερη εξασθένιση όπου παρατηρούμε ισχύ -60dBm και μέγιστη περιοχή ισχύος γύρω από τα (1540nm-1560nm) . Με τη διαφορά ισχύος πριν και μετά την παρεμβολή της ίνας EDF10cm προκύπτει το ακόλουθο φάσμα απορρόφησης της EDF10cm



Σχήμα 3.49: Φασματική απορρόφηση της EDF10cm μέσω της BBS15AT (1480nm-1600nm)

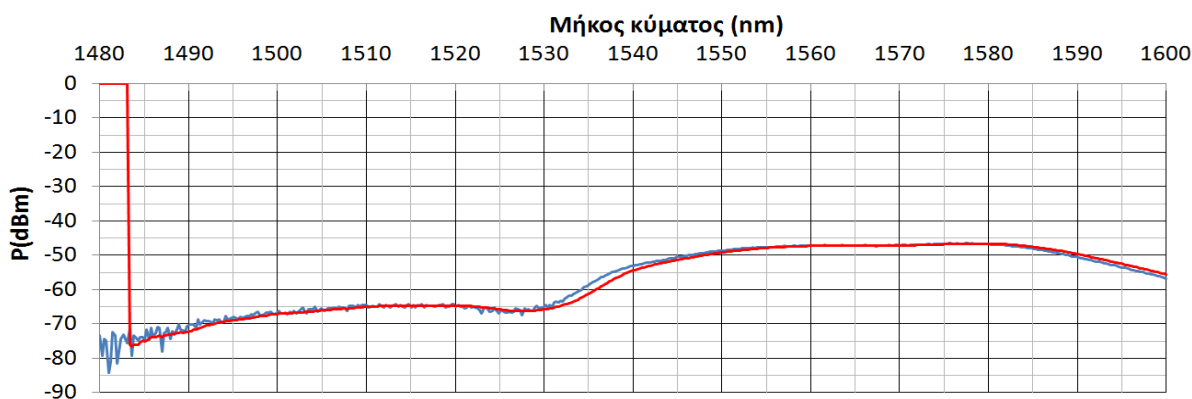
Η μέγιστη εξασθένιση στα 1530nm είναι 13.6dB. Επομένως η εξασθένιση της EDF 10cm στο 1m είναι $13.6 \cdot 10 = 136\text{dB/m}$ και αποκλίνει σημαντικά από την προβλεπόμενη δηλαδή την ονομαστική τιμή.

Στη συνέχεια βγάζουμε την EDF 10cm και την αντικαθιστούμε με την EDF 21cm



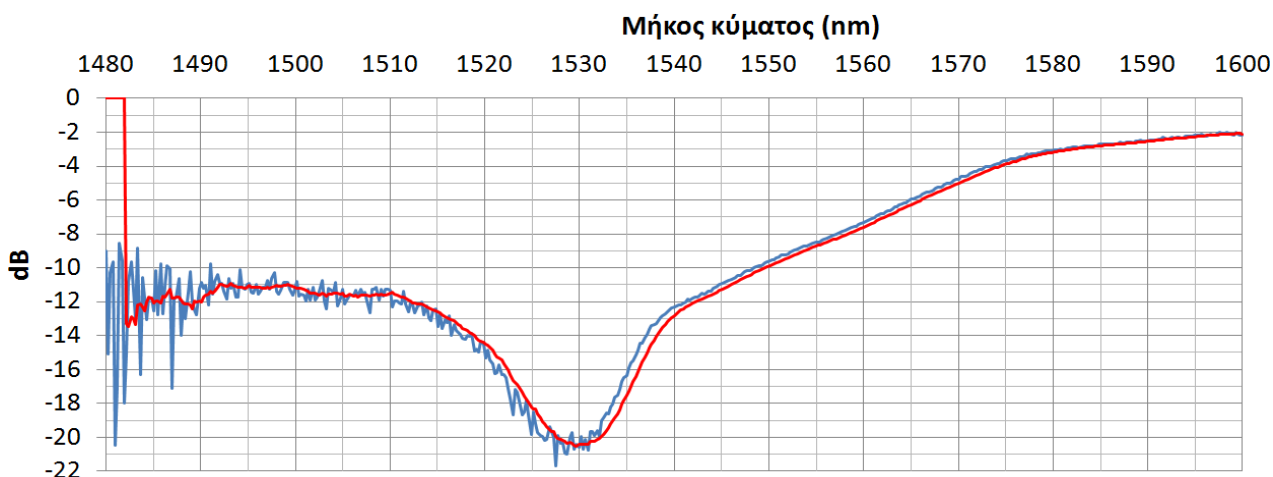
Σχήμα 3.50: Συνδεσμολογία (BBS 15AT με EDF 21cm)

Με την συνδεσμολογία του Σχήματος 3.50 λαμβάνουμε στον OSA το ακόλουθο φάσμα ισχύος:



Σχήμα 3.51: Φασματική ισχύς BBS15AT – EDF21cm (1480nm-1600nm)

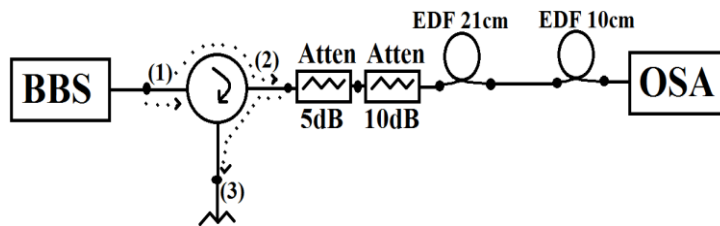
Η απόκριση έχει θόρυβο εξαιτίας του πολύ χαμηλού επιπέδου ισχύος για το λόγο αυτό κάνουμε εξομάλυνση της καμπύλης (smoothing), για να έχουμε μια μέση εκτίμηση. Με τη διαφορά ισχύος πριν και μετά την παρεμβολή της ίνας EDF21cm προκύπτει το ακόλουθο φάσμα απορρόφησης της EDF21cm



Σχήμα 3.52: Φασματική απορρόφηση της EDF21cm μέσω της BBS15AT (1480nm-1600nm)

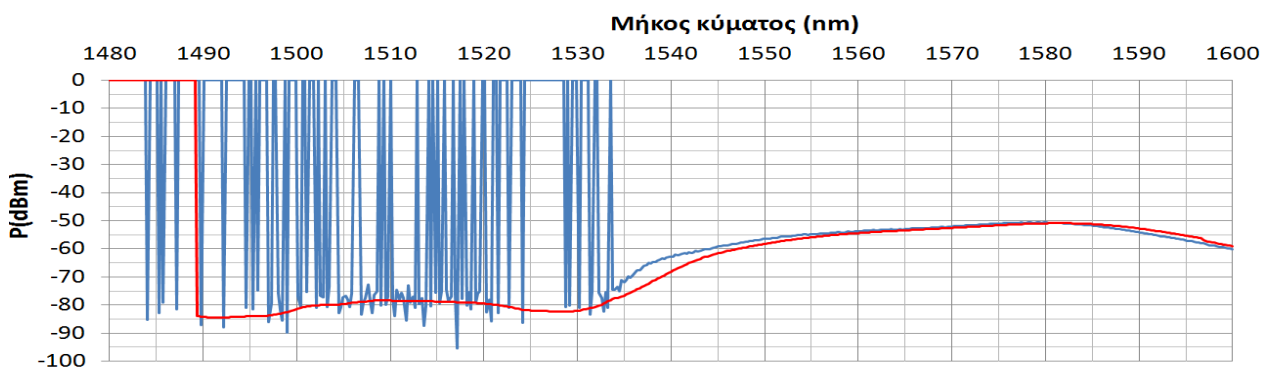
Παρατηρούμε ότι η φασματική εξασθένιση βελτιώθηκε με την εξομάλυνση. Η μέγιστη εξασθένιση στα 1530nm είναι 20.5dB οπότε με αναγωγή στο 1m: $20.5 \cdot 5 = 102.5 \text{ dB/m}$. Επομένως η εξασθένιση της EDF 21cm έχει μεγάλη απόκλιση από την προβλεπόμενη δηλαδή την ονομαστική τιμή.

Ακολουθως συνδέουμε και τις δύο EDF (21+10)cm



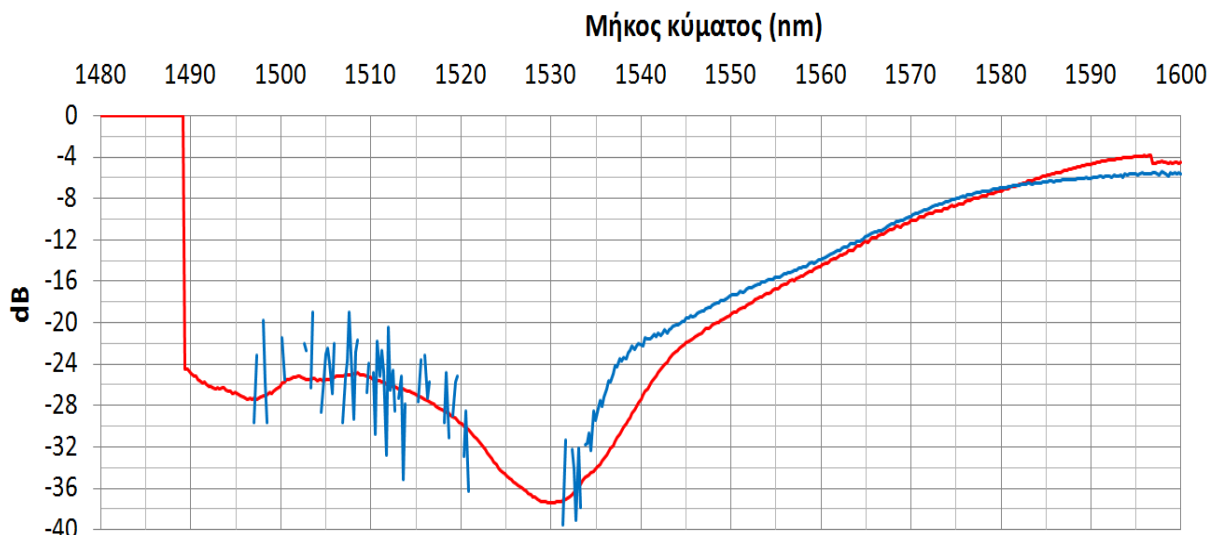
Σχήμα 3.53: Συνδεσμολογία (BBS 15AT με EDF 31cm)

Με την συνδεσμολογία του Σχήματος 3.53 λαμβάνουμε στον OSA το ακόλουθο φάσμα ισχύος:



Σχήμα 3.54: Φασματική ισχύς BBS15AT – EDF(10+21)cm (1480nm-1600nm)

Η απόκριση έχει θόρυβο εξαιτίας του πολύ χαμηλού επιπέδου ισχύος για το λόγο αυτό κάνουμε εξομάλυνση της καμπύλης (smoothing),για να έχουμε μια μέση εκτίμηση. Με τη διαφορά ισχύος πριν και μετά την παρεμβολή της ίνας EDF(10+21)cm προκύπτει το ακόλουθο φάσμα απορρόφησης της EDF(10+21)cm



Σχήμα 3.55: Φασματική απορρόφηση της EDF(10+21)cm μέσω της BBS15AT (1480nm-1600nm)

Η μέγιστη εξασθένιση στα 1530nm είναι 37.7dB οπότε με αναγωγή στο 1m: $37.7 \cdot 3.3 = 124.4 \text{ dB/m}$. Επομένως η εξασθένιση της EDF 31cm αποκλίνει από την προβλεπόμενη δηλαδή την ονομαστική τιμή.

3.6 Συγκεντρωτικά αποτελέσματα

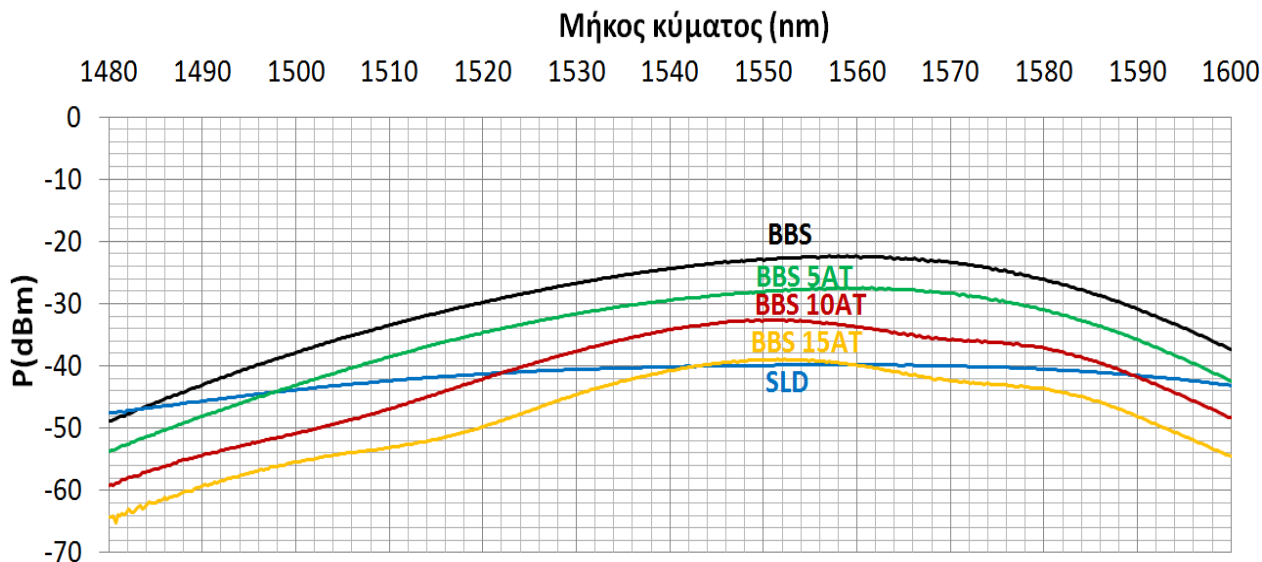
Παρατηρούμε ότι έπειτα από την προσθήκη των εξασθενητών η πηγή BBS τείνει να ομοιάσει με την πηγή SLD, δηλαδή όσο προσθέτουμε εξασθένιση στην BBS τείνει να ομοιάσει το φάσμα απορρόφησης με την SLD. Επομένως, η ισχύς παίζει σημαντικό ρόλο. Στο παρακάτω πίνακα παρουσιάζονται ξεχωριστά οι εξασθενίσεις για κάθε πηγή και για κάθε ίνα ερβίου στα 1530nm

Πίνακας 1: Μέγιστη εξασθένιση κάθε πηγής για κάθε ίνα ερβίου ξεχωριστά στα 1530nm

Πηγές/ίνες ερβίου	EDF 10cm	EDF 21cm	EDF 31cm
BBS	3.5dB	7.3dB	18dB
SLD	11.7dB	19.5dB	36.8dB
BBS 5AT	9.2dB	14dB	25dB
BBS 10AT	11.5dB	18.5dB	28dB
BBS 15AT	13.6dB	20.5dB	37.7dB
Προδιαγραφή	11dB	23.1dB	34.1dB

Από το πίνακα 1 φαίνεται ότι η EDF 10cm με την πηγή BBS10AT πλησιάζει περισσότερο στην ονομαστική της τιμή τα 110dB/m.

Ακολουθώς, εμφανίζουμε τη φασματική καμπύλη ισχύος των πέντε πηγών (BBS,SLD,BBS5AT, BBS10AT,BBS15AT) στο ίδιο διάγραμμα.



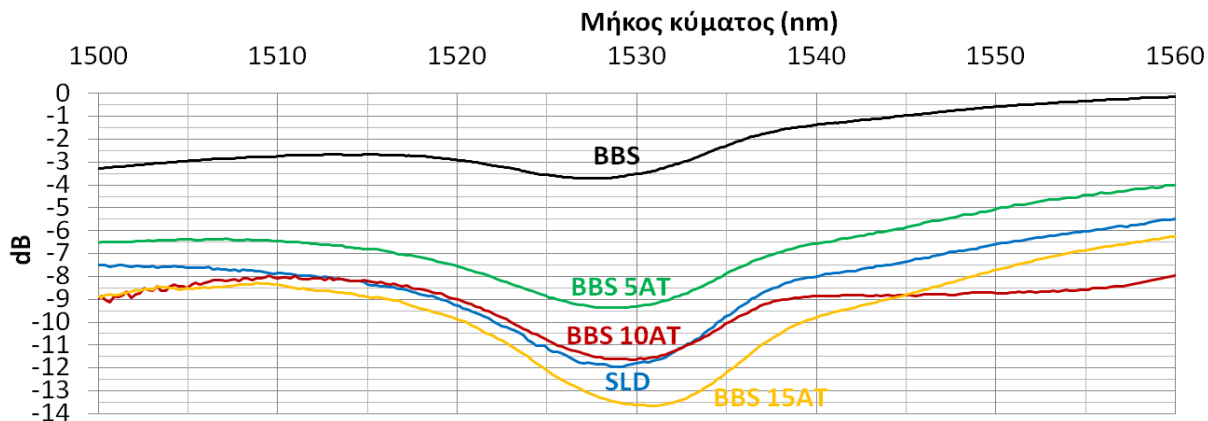
Σχήμα 3.56: Φασματική ισχύς (1480nm-1600nm) των πέντε πηγών

Παρατηρούμε ότι προσθέτοντας εξασθένιση στην BBS το παράθυρο μηκών κύματος (1530nm-1570nm) τείνει να συμπέσει με το φάσμα ισχύος της SLD στο αντίστοιχο παράθυρο ενώ η BBS15AT εμφανίζει μικρότερη ισχύ από την SLD στα 1530nm.

Οπτικές ίνες νοθευμένες με ιόντα Ερβίου και η εφαρμογή τους στους οπτικούς ενισχυτές

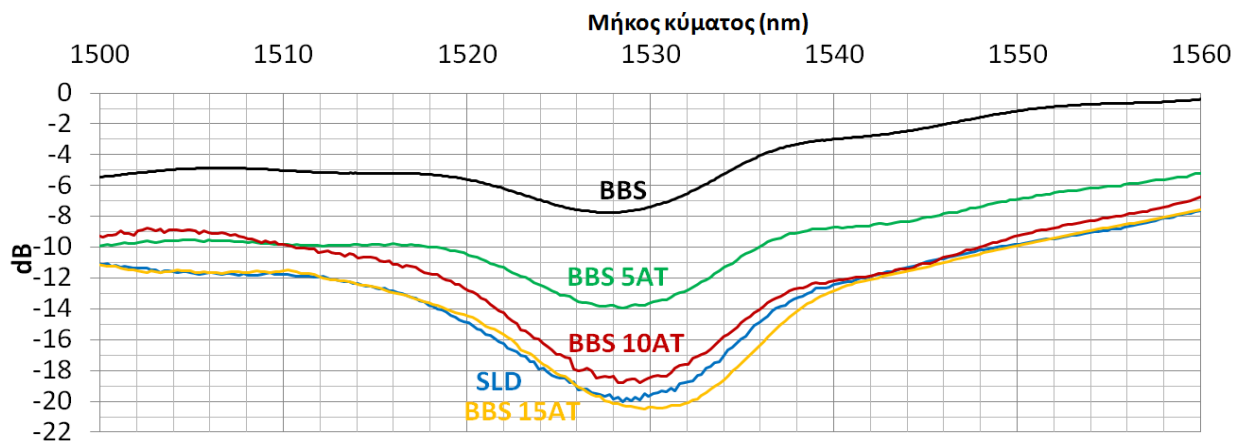
Ακολουθώς παρατηρούμε τις καμπύλες απόσβεσης των πέντε πηγών (BBS,SLD, BBS5AT,BBS10AT,BBS15AT) για κάθε ίνα ξεχωριστά.

Για την EDF 10cm



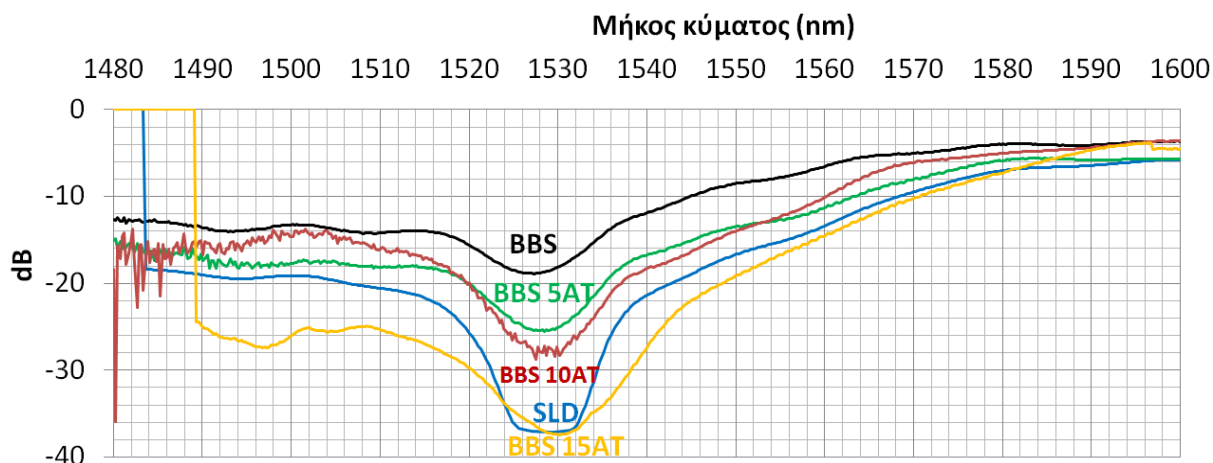
Σχήμα 3.57: Φασματική καμπύλη απόσβεσης για τις πέντε πηγές

Για την EDF 21cm



Σχήμα 3.58: Φασματική καμπύλη απόσβεσης για τις πέντε πηγές

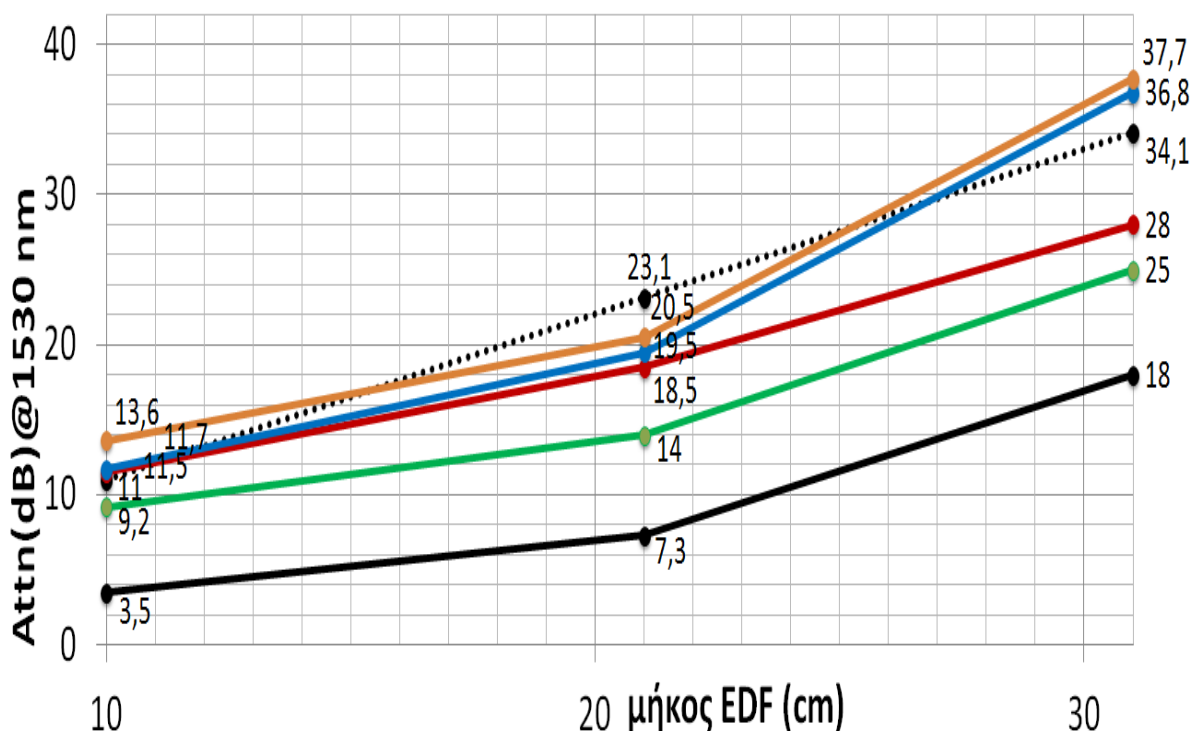
Για την EDF (21+10)cm



Σχήμα 3.59: Φασματική καμπύλη απόσβεσης για τις πέντε πηγές στα (1480nm-1600nm)

Παρατηρούμε μεγαλύτερη απόσβεση γύρω από τα 1530nm. Αφού η εξασθένιση της ίνας εξαρτάται από το μήκος κύματος και επειδή οι πέντε πηγές έχουν διαφορετική ισχύ στα διαφορετικά μήκη κύματος αυτό αποδεικνύει και την διαφορά στην μέγιστη τιμή εξασθένισης στα 1530nm. Παρατηρούμε ότι καθώς συνδέουμε την πηγή με οπτική ίνα η οποία είναι νοθευμένη με έρβιο και στο «παράθυρο» μηκών κύματος (1520nm μέχρι 1540nm) έχουμε απορρόφηση φωτονίων (κοιλιάδα) λόγω απορρόφησης του ερβίου. Στη χαμηλότερη ισχύ πηγής η εξασθένιση της ίνας που έχουμε βάλει πλησιάζει περισσότερο προς την ονομαστική της τιμή 110dB/m στα 1530nm όπου έχουμε την μέγιστη απορρόφηση. Επομένως, η ισχύς παίζει σημαντικό ρόλο. Συνεπώς, διαπιστώνουμε ότι αν προσθέσουμε εξασθένιση στην BBS να προσεγγίσουμε τα αποτελέσματα με την πηγή SLD.

Στο Σχήμα 3.60 βλέπουμε το διάγραμμα που δείχνει πόσο αποκλίνει η συμπεριφορά της εξασθένισης της ίνας από τις θεωρητικές προδιαγραφές ανάλογα με το μήκος και την ισχύ της πηγής η οποία την τροφοδοτεί.



Σχήμα 3.60: Συμπεριφορά των πέντε πηγών στα 1530nm για κάθε μήκος ίνας ξεχωριστά

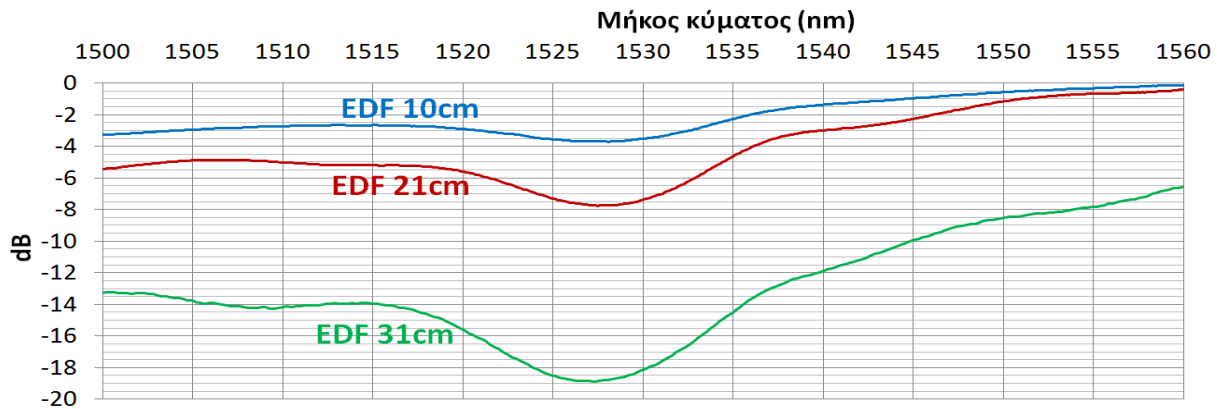
Η προδιαγραφή φαίνεται με την διακεκομμένη γραμμή αν είχαμε αναλογική εξασθένιση με το μήκος της ίνας ερβίου.

Στο Σχήμα 3.60 οι πηγές παρουσιάζονται με τα εξής χρώματα: (BBS μαύρο, SLD μπλε, BBS5AT πράσινο, BBS10AT κόκκινο, BBS15AT πορτοκαλί)

Η αιτία απόκλισης από την γραμμικότητα στα 1530nm, έπειτα έχουμε μεγάλη εξασθένιση για την πηγή BBS15AT διότι σε αυτό το μήκος κύματος η BBS15AT εμφανίζει την χαμηλότερη ισχύ από όλες τις άλλες πηγές. Επιπροσθέτως, μέχρι τα 21cm και στις 5 πηγές η απόσβεση τους είναι πιο χαμηλή από ότι ορίζει η προδιαγραφή. Τέλος, η προδιαγραφή ομοιάζει με την SLD και την BBS 10AT μέχρι EDF 10cm στην απόσβεση στα 1530nm.

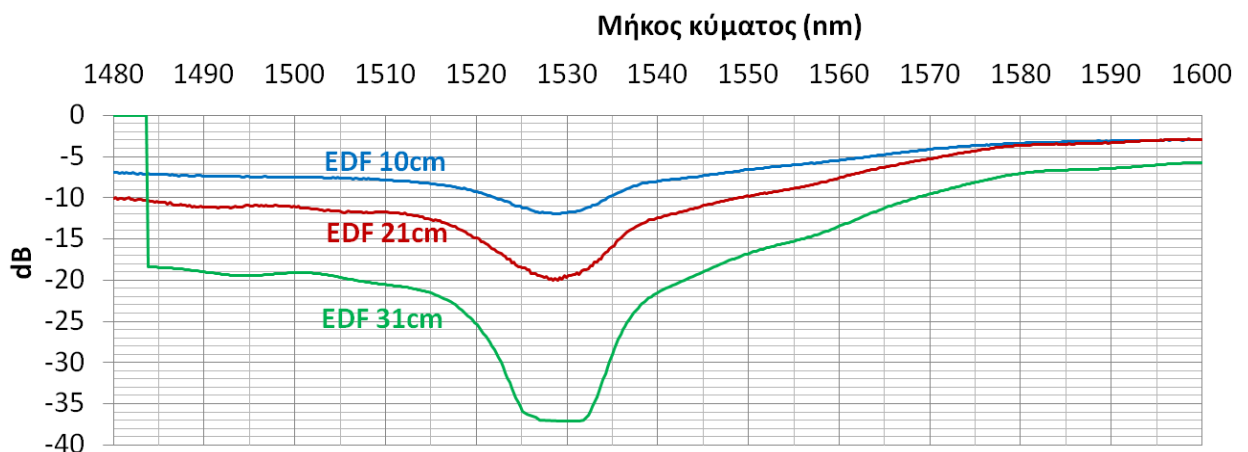
Ακολουθώς παρατηρούμε τις καμπύλες απόσβεσης των τριών ινών (EDF 10cm, EDF 21cm, EDF 31cm) για κάθε πηγή ξεχωριστά.

Για την BBS



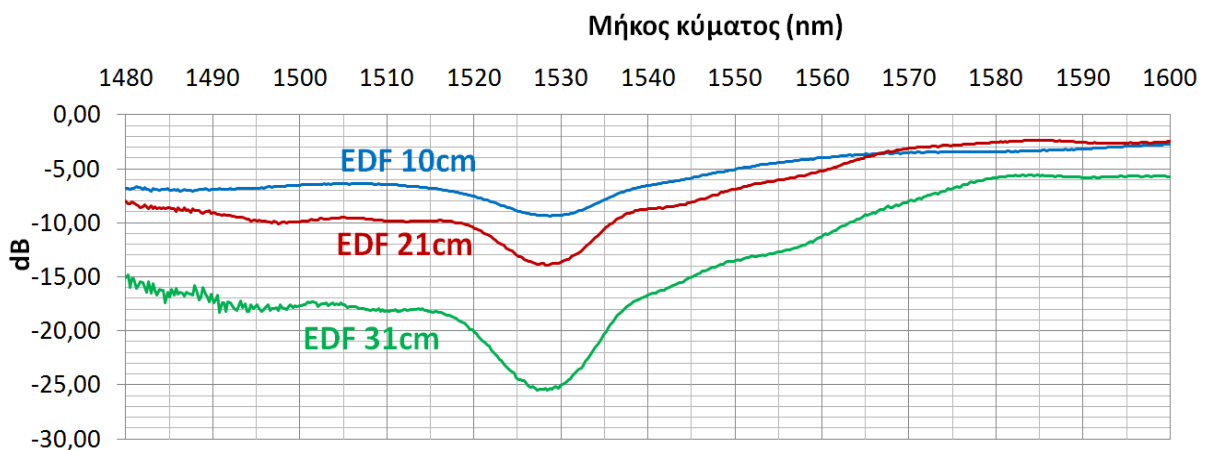
Σχήμα 3.61: Φασματική καμπύλη απόσβεσης για τις τρεις EDF

Για την SLD



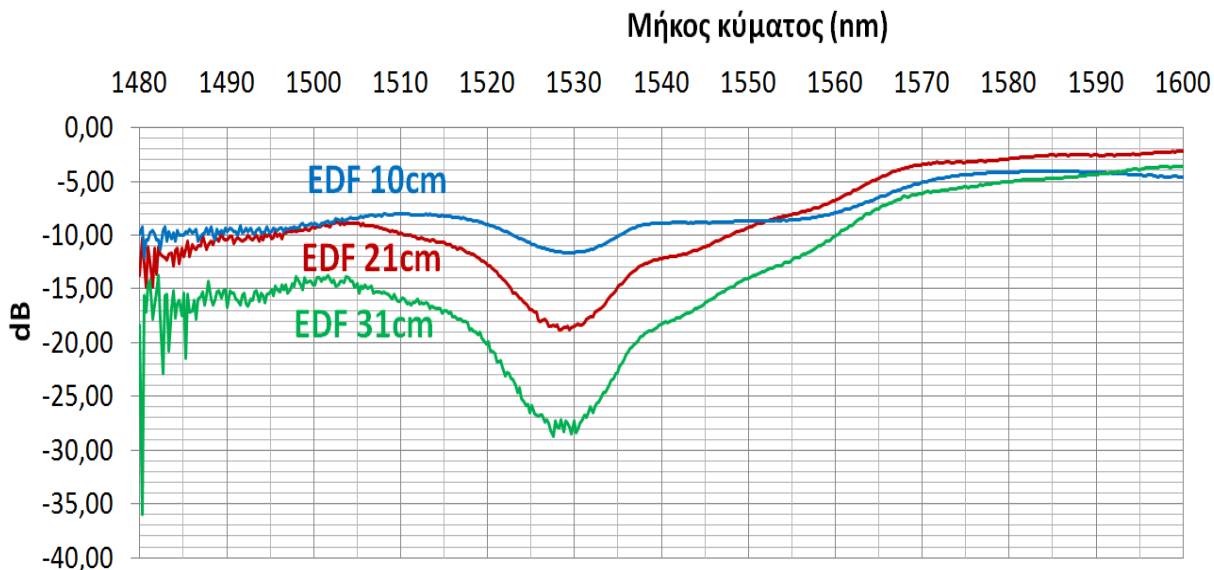
Σχήμα 3.62: Φασματική καμπύλη απόσβεσης για τις τρεις EDF

Για την BBS 5AT



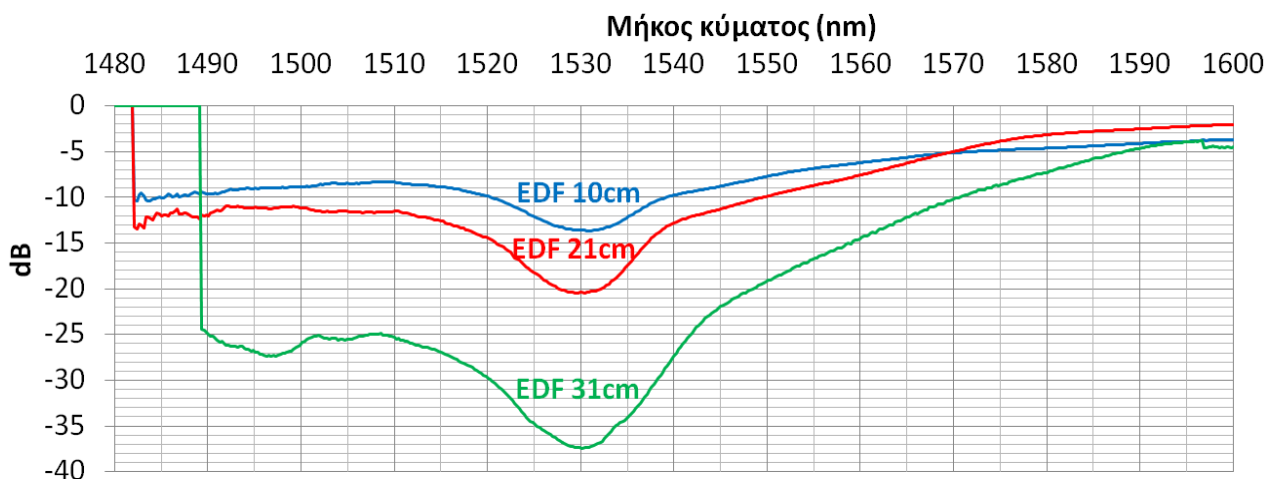
Σχήμα 3.63: Φασματική καμπύλη απόσβεσης για τις τρεις EDF

Για την BBS 10AT



Σχήμα 3.64: Φασματική καμπύλη απόσβεσης για τις τρεις EDF

Για την BBS 15AT (ύστερα από εξομαλύνσεις και για τις 3 ίνες)



Σχήμα 3.65: Φασματική καμπύλη απόσβεσης για τις τρεις EDF

Παρατηρούμε ότι στο κύριο παράθυρο (1520nm-1590nm) μέσα στο οποίο βλέπουμε την απορρόφηση της ίνας ερβίου, όλες οι πηγές υπερέχουν σε ισχύ της SLD. Συμπεραίνουμε ότι, όσο μεγαλύτερη είναι η ισχύ της πηγής τόσο μικρότερη εξασθένιση θα έχουμε.

3.7 Σχόλια – Παρατηρήσεις και Συμπεράσματα

- i. Όσον αφορά το Σχήμα 3.56 με την φασματική ισχύ των πηγών:
 - Διακρίνουμε διαφοροποίηση μεταξύ των πηγών διότι η ισχύς παίζει σημαντικό ρόλο. Για παράδειγμα όταν με την BBS βάζω μέσα στην ίνα ερβίου ισχύ -22dBm στο παράθυρο κοντά στα 1550nm διεγείρω την στάθμη εκείνη η οποία εκπέμπει στα 1550nm .
 - Το Σχήμα μας εξακριβώνει ότι σωστά η ισχύς της BBS μειώνεται τόσα dB ανάλογα με τον εξασθενητή που θα βάλουμε.
 - Στο παράθυρο ($1520\text{-}1590\text{nm}$) η ισχύς της BBS10AT υπερέρχει της SLD, ιδιαίτερα στο 1550nm απέχουν 8dB το οποίο αποδεικνύει ότι η SLD είναι λιγότερο ισχυρή από την BBS10AT. Στα υπόλοιπα όμως παράθυρα πριν από τα 1520nm φαίνεται η SLD πιο ισχυρή από όλες τις άλλες πηγές. Το κύριο παράθυρο μέσα στο οποίο βλέπουμε την απορρόφηση της ίνας ερβίου είναι το ($1520\text{-}1590\text{nm}$) στο οποίο όλες οι πηγές έχουν περισσότερο ισχύ από την SLD. Όμως η SLD έχει ομοιόμορφη και πολύ μικρότερη ισχύ από την BBS10AT και στα ($1540\text{-}1560\text{nm}$) τείνει να ομοιάσει με την BBS15AT. Η χαμηλότερη ισχύ στην είσοδο οδηγεί σε χαμηλότερη ισχύ στην έξοδο λόγω της απορρόφησης και επανεκπομπής των φωτονίων. Αυτό σημαίνει ότι η απόσταση όπου το σήμα μπορεί να απομονωθεί και να επεξεργαστεί από τα όργανα μειώνεται, καθώς η ισχύς αυτού πλησιάζει στα επίπεδα ευαισθησίας του οργάνου, όπου σε αυτό το σημείο επικρατεί ο θόρυβος.
- ii. Όσον αφορά το Σχήμα 3.60: Συμπεριφορά των 5 πηγών στα 1530nm για κάθε μήκος ίνας ξεχωριστά:
 - Διαπιστώνουμε ότι όσο κατεβάζουμε την ισχύ της πηγής, δηλαδή των αριθμό των φωτονίων, που περνάμε μέσα από την ίνα ερβίου τόσα περισσότερα απορροφούνται χωρίς να επανεκπέμπονται. Άρα σταδιακά μειώνοντας την ισχύ αρχίζω και προσεγγίζω την εξασθένιση προδιαγραφής. Αυτό το Παρατηρούμε στην περίπτωση της SLD όταν έχω δηλαδή πάρα πολύ μικρή ισχύ, δηλαδή στέλνω πάρα πολύ μικρή ποσότητα φωτονίων, οπότε έτσι φαίνεται να φτάνω κοντά στην ονομαστική απορρόφηση ή εξασθένιση 110dB/m . Επομένως, όταν έχω περίσσεια ισχύος δεν μπορώ να έχω 110dB/m άρα έχω μικρότερη απόσβεση.
 - Διαπιστώνουμε ότι η ίνα εξασθενεί παραπάνω στην SLD και στην BBS15AT γιατί είναι χαμηλότερη η ισχύ τους.
 - Παρατηρούμε πως, στα 10cm EDF η BBS10AT είναι αρκετά κοντά στην SLD. Από τα (21 μέχρι 31) cm , βλέπουμε στο Σχήμα 3.60 ότι έχουν διαφορετική κλίση στην ευθεία. Αυτό συμβαίνει διότι σε εκείνη την περιοχή είναι μεγαλύτερο το πλήθος ιόντων ερβίου στην ίνα. Στα 31cm EDF, η διαφορά μεταξύ των ευθειών έχει αυξηθεί κατά πολύ. Συμπεραίνουμε το πόσο σημαντική είναι η ισχύς στα 1550nm . Η διαφορά μεταξύ της SLD και της BBS10AT προκύπτει από το γεγονός ότι η SLD είναι 8dB πιο κάτω από την BBS10AT.
 - Η SLD και η BBS15AT αποδεικνύουν ότι είναι πολύ πιο ασθετικές σε σχέση με την BBS10AT οπότε γι' αυτό το λόγο βρίσκονται στο κατώφλι θορύβου του OSA με αποτέλεσμα να μην μπορεί να μετρήσει με ακρίβεια την ισχύ των πηγών. Αυτό που έχει ιδιαίτερο ενδιαφέρον να παρατηρήσουμε είναι όσον αφορά στα 31cm όπου η τιμή 36.8 της SLD είναι πιο κοντά στην εξασθένιση προδιαγραφής από τις υπόλοιπες τιμές. Στην

περίπτωση που αυτή ξεπεραστεί, μπορούμε να συμπεράνουμε ότι αυτό οφείλεται στην επιπλέον εξασθένιση που προκαλούν οι κονέκτορες ή οι ανακλάσεις από τις υπόλοιπες ίνες.

iii. Στα 10cm και στα 31cm έχουμε διαφορές εξαιτίας μήκους:

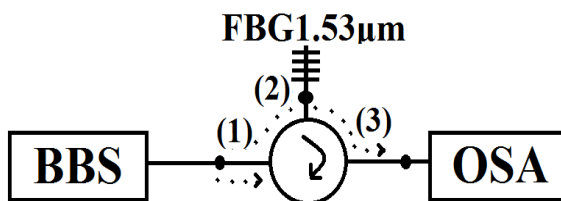
- Όσο αυξάνεται το μήκος της ίνας είναι λογικό να αυξάνεται και η εξασθένιση καθώς το οπτικό σήμα διανύει μεγαλύτερη διαδρομή εντός της ίνας.
- Όσο μικρότερο είναι το μήκος της EDF σημαίνει τόσο μικρότερο πλήθος ιόντων ερβίου. Για παράδειγμα αν από τα 10cm πάω στα 21cm τότε είναι μεγαλύτερο το πλήθος ιόντων ερβίου. Στην περίπτωση EDF 10cm επειδή έχω μικρό μήκος, το πλήθος των ιόντων ερβίου είναι μικρό, άρα η επανεκπομπή είναι σχετικά πολύ μικρή. Όσο αυξάνω το μήκος της EDF αυξάνεται το πλήθος των ιόντων ερβίου οπότε αυξάνεται και η εξαναγκασμένη εκπομπή. Γι αυτό το λόγο όταν φτάσω στην περίπτωση EDF 31cm αρχίζουμε και αποκλίνουμε πάρα πολύ
- Στις περιπτώσεις BBS15AT και SLD που έχουμε χαμηλές ισχύς, έχουμε και ακριβώς την απορρόφηση που θέλουμε επειδή δεν προλαβαίνει να γίνει επανεκπομπή σε μορφή εξαναγκασμένης εκπομπής. Συνεπώς, όσο πιο μικρή είναι η ισχύς σε αυτό το μήκος, η εξαναγκασμένη εκπομπή είναι πολύ μικρότερη και άρα επικρατεί η απορρόφηση που προβλέπεται θεωρητικά. Συμπεραίνουμε, ότι έχουμε το φαινόμενο εκπομπής – απορρόφησης – επανεκπομπής. Όσο πιο πολύ νοθευμένη είναι η ίνα με ιόντα ερβίου και αν υπάρχει περίσσεια φωτονίων από το σήμα με συνέπεια να γίνει μια μικρή ενίσχυση.

3.8 Μετρήσεις απορρόφησης σε ίνες ερβίου με μονοχρωματική πηγή

Στο εργαστήριο έχουμε FBG για τα 1.53 μm . Ο σκοπός που βάλαμε FBG είναι για να δούμε αν έχουν επίδραση τα υπόλοιπα μήκη κύματος ή αν είναι ζήτημα μόνο ενός μήκους κύματος στην απόσβεση των ιών. Είναι κατασκευασμένο σε ένα μικρό τμήμα οπτικών ιών που αντανakλά συγκεκριμένο μήκος κύματος. Αυτό γίνεται με τη περιοδική διακύμανση στο δείκτη διάθλασης κατά μήκος της εγγραφής στην ίνα. Η περιοδικότητα του FBG καθορίζει το συγκεκριμένο μήκος κύματος που ανακλάται επιτρέποντας στο υπόλοιπο φως να συνεχίσει τη πορεία του κανονικά μέσα στην ίνα. Επομένως, όταν το φως φεύγει από την πηγή μας εντός της ίνας τότε με την BBS στέλνουμε πολλά μήκη κύματος όμως με το FBG ένα συγκεκριμένο μήκος κύματος ανακλάται πίσω και πηγαίνει προς την θύρα (3).

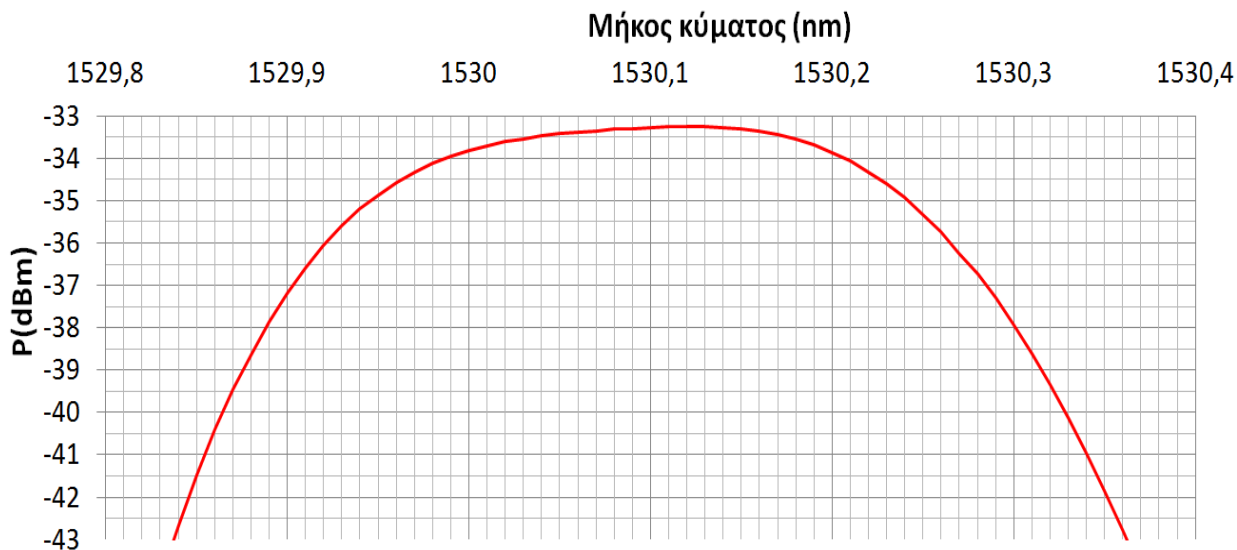
3.8.1 Μέτρηση της μονοχρωματικής πηγής μέσω BBS και FBG 1.53 μm

Αρχικά συνδέουμε την πηγή BBS με τον κυκλοφορητή στον οποίο έχουμε μια πόρτα (1) μια πόρτα (2) και μια πόρτα (3), όπου η οπτική ισχύς περνάει από την πόρτα (1) και βγαίνει στην πόρτα (2) όπου έχουμε τοποθετήσει το FBG. Εκεί το μήκος κύματος του FBG κατόπιν επανεισέρχεται τον κυκλοφορητή πόρτα (2) και οδηγείται στην πόρτα (3). Στη συνέχεια συνδέουμε την πόρτα (3) κατευθείαν στον Optical Spectrum Analyzer (OSA) ώστε να μετρήσουμε την φασματική ισχύ εκπομπής της μονοχρωματικής πηγής. Η έξοδος (επιστροφή) από το FBG στο σημείο (3) είναι μονοχρωματική, ανιχνεύει αυστηρά μονοχρωματικό φως.



Σχήμα 3.66: Συνδεσμολογία μέτρησης της BBS με FBG

Με την συνδεσμολογία του Σχήματος 3.66 λαμβάνουμε στον OSA το ακόλουθο φάσμα ισχύος της νέας πηγής.

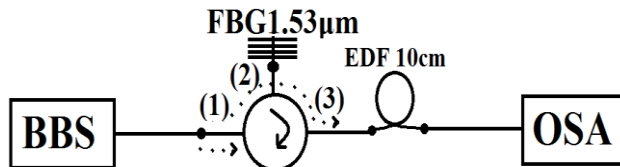


Σχήμα 3.67: Φασματική ισχύ της BBS στο εύρος ζώνης στο 1530

Έχουμε μια μονοχρωματική πηγή που έχει στενό εύρος συχνοτήτων και εκπέμπει μόνο σε ένα μήκος κύματος. Το φως ενός μήκους κύματος είναι μονοχρωματικό. Διαπιστώσαμε ότι η ισχύς της BBS στα 1530nm είναι -26.8dBm. Με την προσθήκη όμως του FBG η ισχύς της πηγής στο σημείο (3) έγινε -33.6dBm. Η διαφορά των δύο πηγών είναι 6.8dB που μειώνεται η ισχύς εξαιτίας της μειωμένης ανακλαστικότητας. Άρα το FBG έχει περίπου 25% ανακλαστικότητα. Επίσης, παρατηρούμε ότι τώρα η πηγή στην έξοδο (3) αφού έχει 6.8dB λιγότερα από την BBS τείνει να ομοιάσει σε επίπεδο ισχύος με την πηγή BBS5AT. Άρα έχω μια πηγή μονοχρωματική επειδή είναι πάρα πολύ στενή γύρω από το 1530 αφού στέλνουμε μόνο ένα μήκος κύματος και βγάζει στην έξοδο(3) μια ισχύ η οποία είναι μονοχρωματική. Παρατηρούμε ότι δεν έχουμε την ίδια ισχύ σε όλα τα μήκη κύματος με μέγιστη περιοχή ισχύος γύρω από τα (1529.95nm - 1530.23nm).

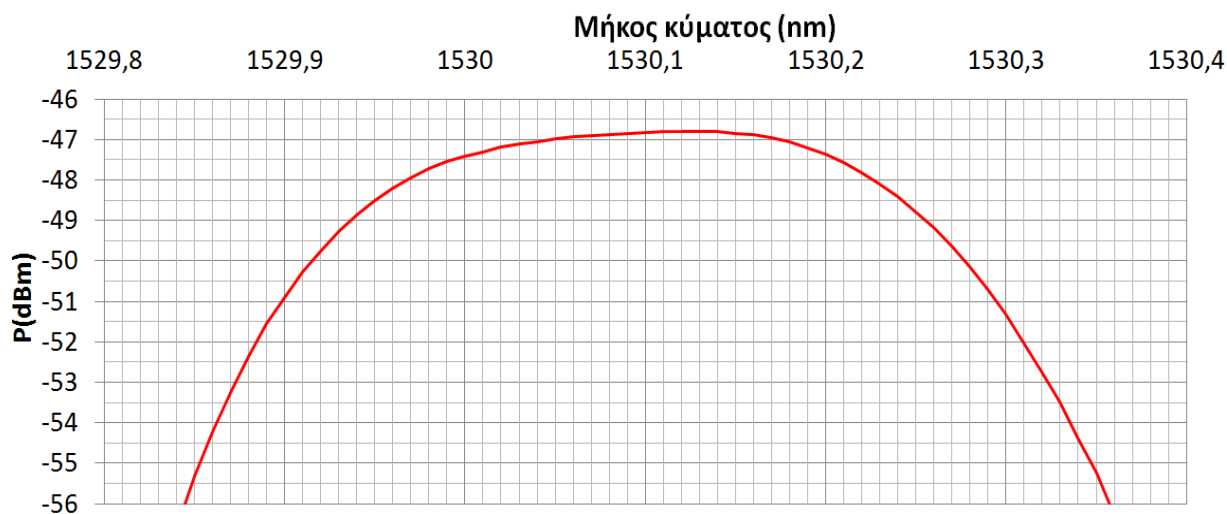
Οπτικές ίνες νοθευμένες με ιόντα Ερβίου και η εφαρμογή τους στους οπτικούς ενισχυτές

Ακολουθώς, παρεμβάλουμε στο σημείο (3) την ίνα EDF μήκους 10cm και εξετάζουμε την απορρόφηση την οποία εμφανίζει.



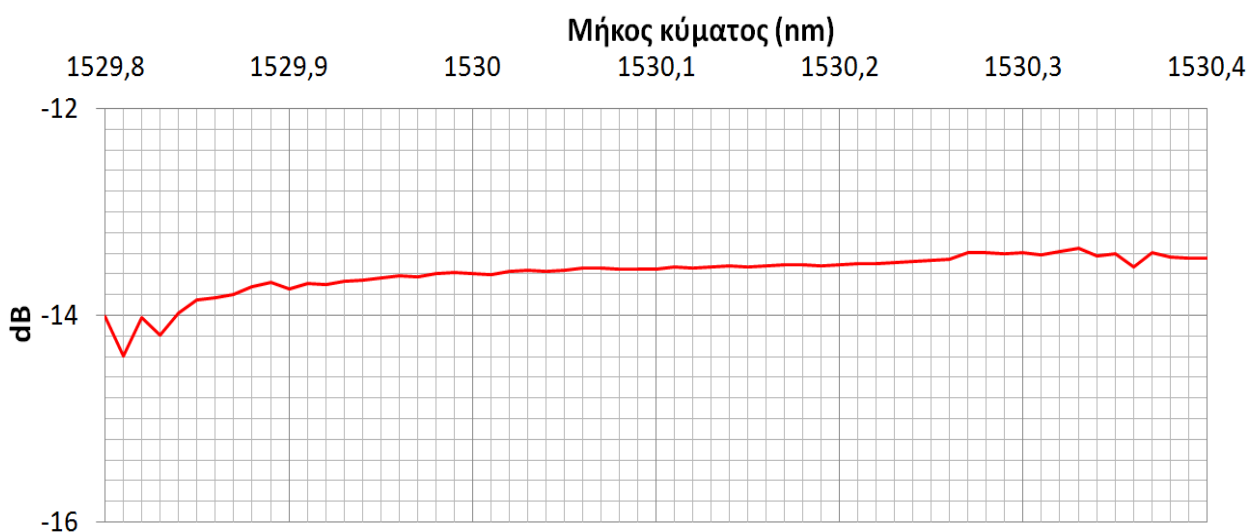
Σχήμα 3.68: Συνδεσμολογία (BBS με EDF10cm)

Με την συνδεσμολογία του Σχήματος 3.68 λαμβάνουμε στον OSA το ακόλουθο φάσμα ισχύος.



Σχήμα 3.69: Φασματική ισχύς BBS - EDF10cm στο 1530

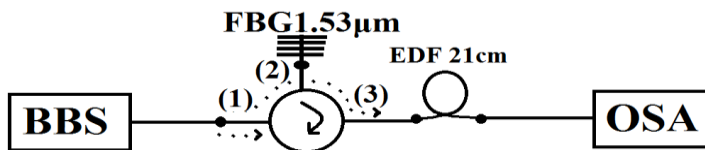
Παρατηρούμε ότι η ίνα απορροφά αυτό το μήκος κύματος. Με τη διαφορά ισχύος πριν και μετά την παρεμβολή της ίνας EDF 10cm προκύπτει το ακόλουθο φάσμα απορρόφησης της EDF 10cm



Σχήμα 3.70: Φασματική απορρόφηση της EDF10cm μέσω της BBS στο 1530

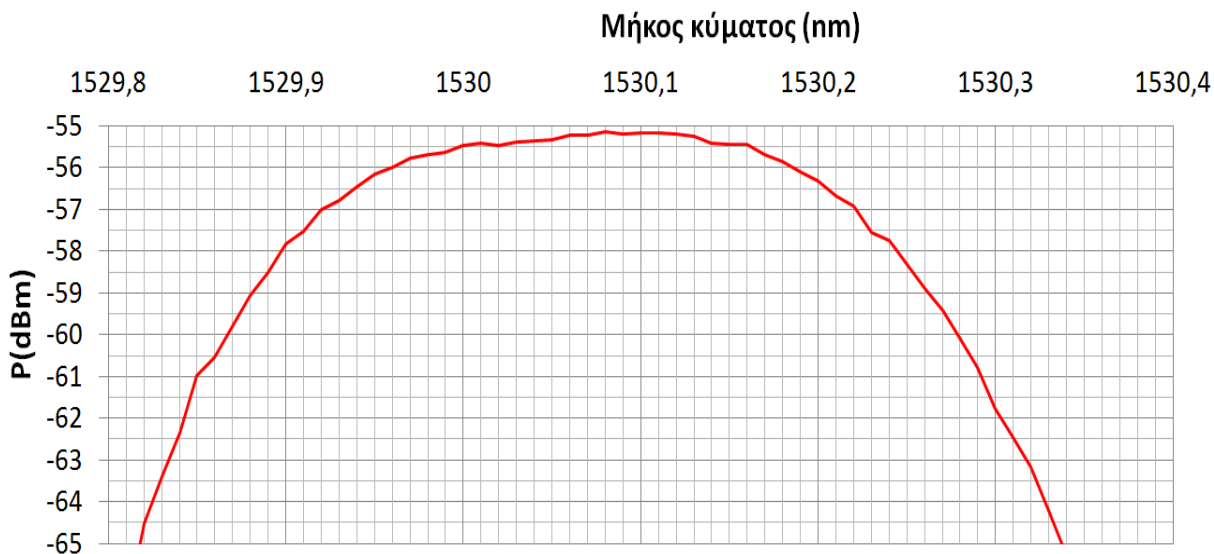
Η εξασθένιση κοντά στα 1530nm είναι 13.7dB. Οπότε με αναγωγή στο 1m: $13.7dB * 10 = 137dB/m$ και αποκλίνει σημαντικά από την ονομαστική της τιμή.

Στη συνέχεια αφαιρώ την EDF 10cm και την αντικαθιστώ με την EDF 21cm.



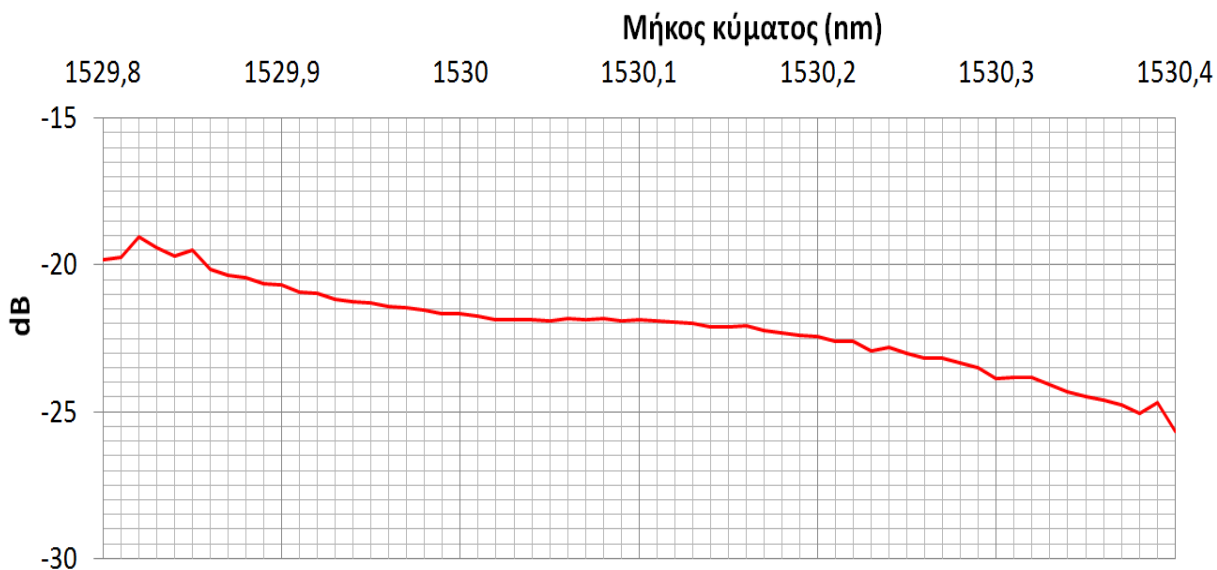
Σχήμα 3.71 : Συνδεσμολογία (BBS με την EDF 21cm)

Με την συνδεσμολογία του Σχήματος 3.71 λαμβάνουμε στον OSA το ακόλουθο φάσμα ισχύος.



Σχήμα 3.72: Φασματική ισχύς BBS – EDF21cm στο 1530

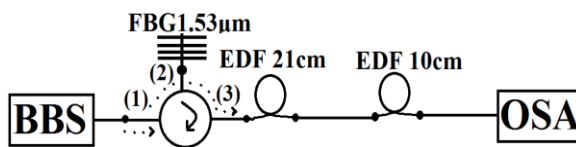
Με τη διαφορά ισχύος πριν και μετά την παρεμβολή της ίνας EDF 21cm προκύπτει το ακόλουθο φάσμα απορρόφησης της EDF 21cm.



Σχήμα 3.73: Φασματική απορρόφηση της EDF21cm μέσω της BBS στο 1530

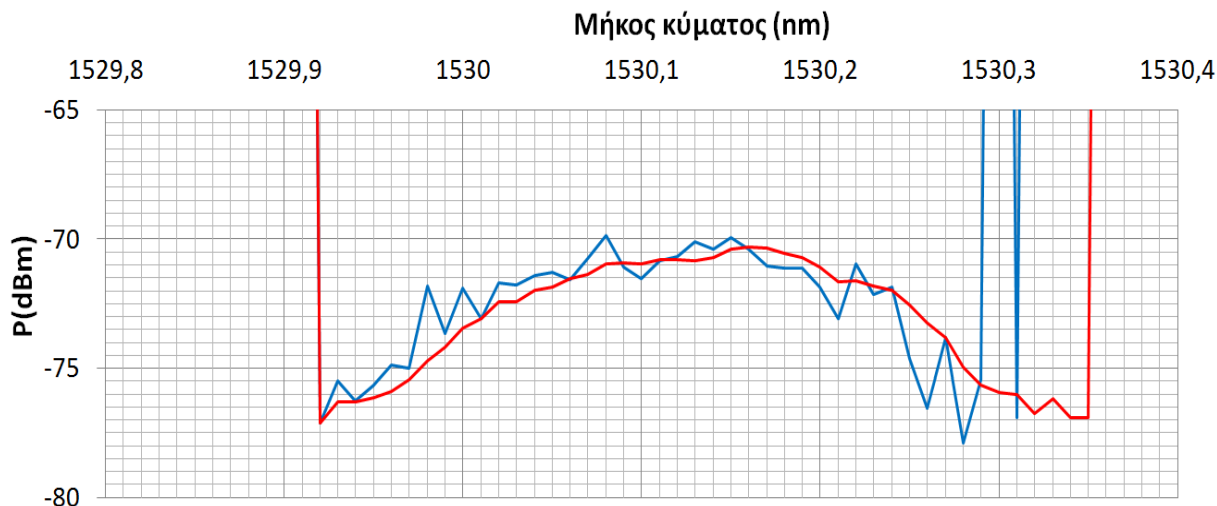
Η εξασθένιση κοντά στα 1530nm είναι 22.4dB. Οπότε με αναγωγή στο 1m: $22.4dB * 5 = 112dB/m$ και πλησιάζει αρκετά καλά την ονομαστική της τιμή.

Ακολουθώς συνδέουμε και τις δύο EDF μαζί (21+10)cm



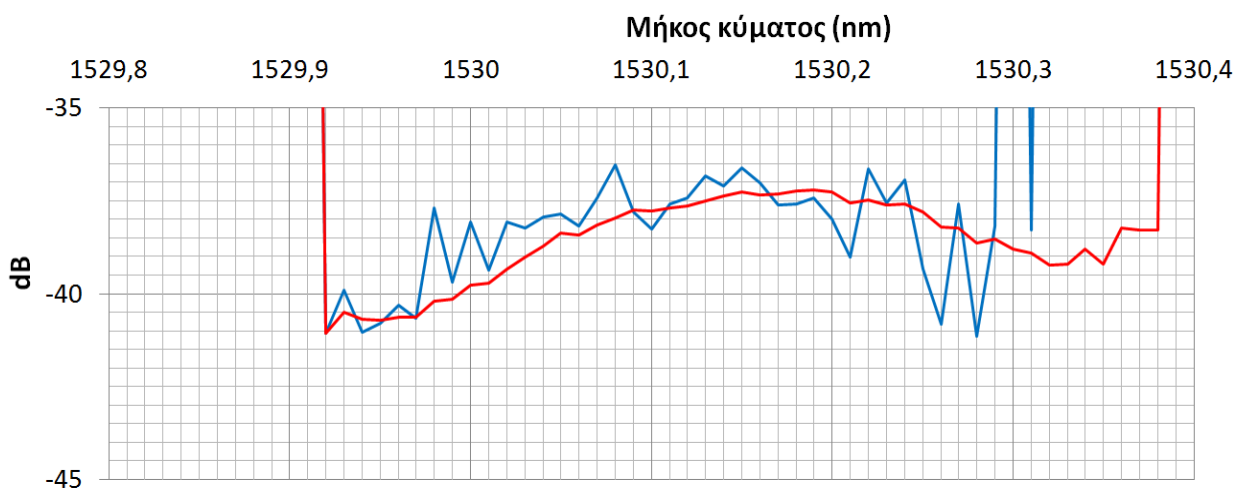
Σχήμα 3.74: Συνδεσμολογία (BBS με EDF 31cm)

Με την συνδεσμολογία του Σχήματος 3.74 λαμβάνουμε στον OSA το ακόλουθο φάσμα ισχύος.



Σχήμα 3.75: Φασματική ισχύς BBS – EDF31cm στο 1530

Η απόκριση έχει θόρυβο εξαιτίας του πολύ χαμηλού επιπέδου ισχύος για το λόγο αυτό κάνουμε εξομάλυνση της καμπύλης (smoothing), για να έχουμε μια μέση εκτίμηση. Με τη διαφορά ισχύος πριν και μετά την παρεμβολή της ίνας EDF 31cm προκύπτει το ακόλουθο φάσμα απορρόφησης της EDF 31cm



Σχήμα 3.76: Φασματική απορρόφηση της EDF31cm μέσω της BBS στο 1530

Η μέγιστη εξασθένιση στα 1530nm είναι 39.2dB. Οπότε με αναγωγή στο 1m $39.2dB * 3.3 = 129.4dB/m$ και αποκλίνει από την ονομαστική της τιμή. Λόγω της ύπαρξης του FBG που έχει επιλεκτικότητα τα 1530nm παρατηρούμε την ισχυρή απόσβεση στα 1530nm.

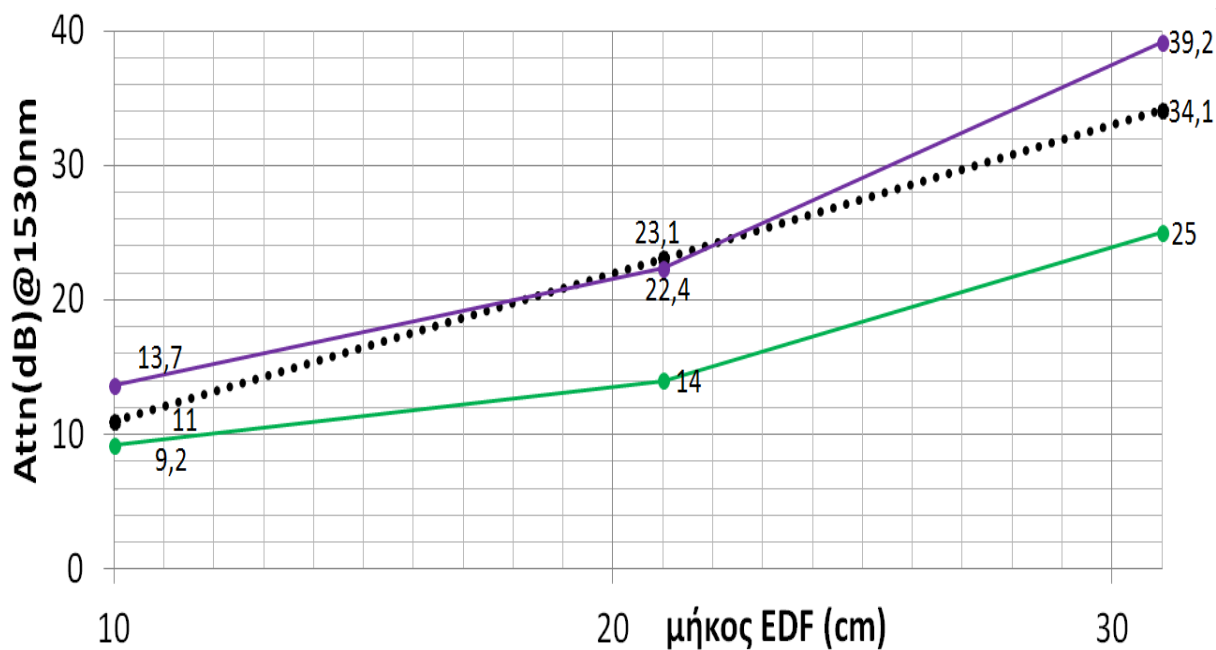
3.8.2 Συγκεντρωτικά αποτελέσματα

Στο παρακάτω πίνακα παρουσιάζονται ξεχωριστά οι εξασθενίσεις για κάθε πηγή και για κάθε ίνα ερβίου στα 1530nm

Πίνακας 2: Μέγιστη εξασθένιση κάθε πηγής για κάθε ίνα ερβίου ξεχωριστά στα 1530nm

Πηγές/ίνες ερβίου	EDF 10cm	EDF 21cm	EDF 31cm
BBS FBG	13.7dB	22.4dB	39.2dB
BBS 5AT	9.2dB	14dB	25dB
Προδιαγραφή	11dB	23.1dB	34.1dB

Στο Σχήμα 3.77 βλέπουμε το διάγραμμα που δείχνει πόσο αποκλίνει η συμπεριφορά της εξασθένισης της ίνας από τις θεωρητικές προδιαγραφές ανάλογα με το μήκος και την ισχύ της πηγής η οποία την τροφοδοτεί.



Σχήμα 3.77: Συμπεριφορά των δύο πηγών στα 1530nm για κάθε μήκος ίνας ξεχωριστά

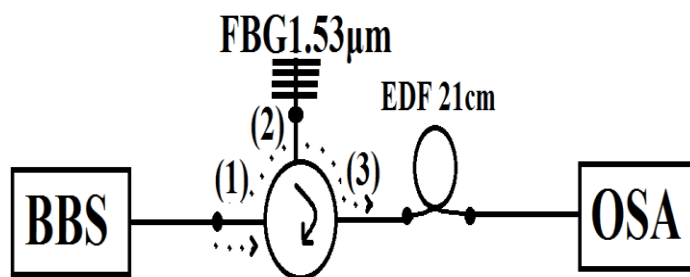
Η προδιαγραφή φαίνεται με την διακεκομμένη γραμμή αν είχαμε αναλογική εξασθένιση με το μήκος της ίνας ερβίου.

Στο Σχήμα 3.77 οι πηγές παρουσιάζονται με τα εξής χρώματα: (BBS FBG μωβ, BBS5AT πράσινο)

Παρατηρούμε ότι μεγαλώνει περισσότερο η απορρόφηση μας στη μωβ και πλησιάζει περισσότερο στην προδιαγραφή μας. Αυτή η διαφορά των καμπυλών (πράσινη - μωβ) οφείλεται στο γεγονός ότι με το FBG στέλνω μόνο ένα μήκος κύματος και όχι όλο το εύρος που στέλνω με την πηγή BBS5AT.

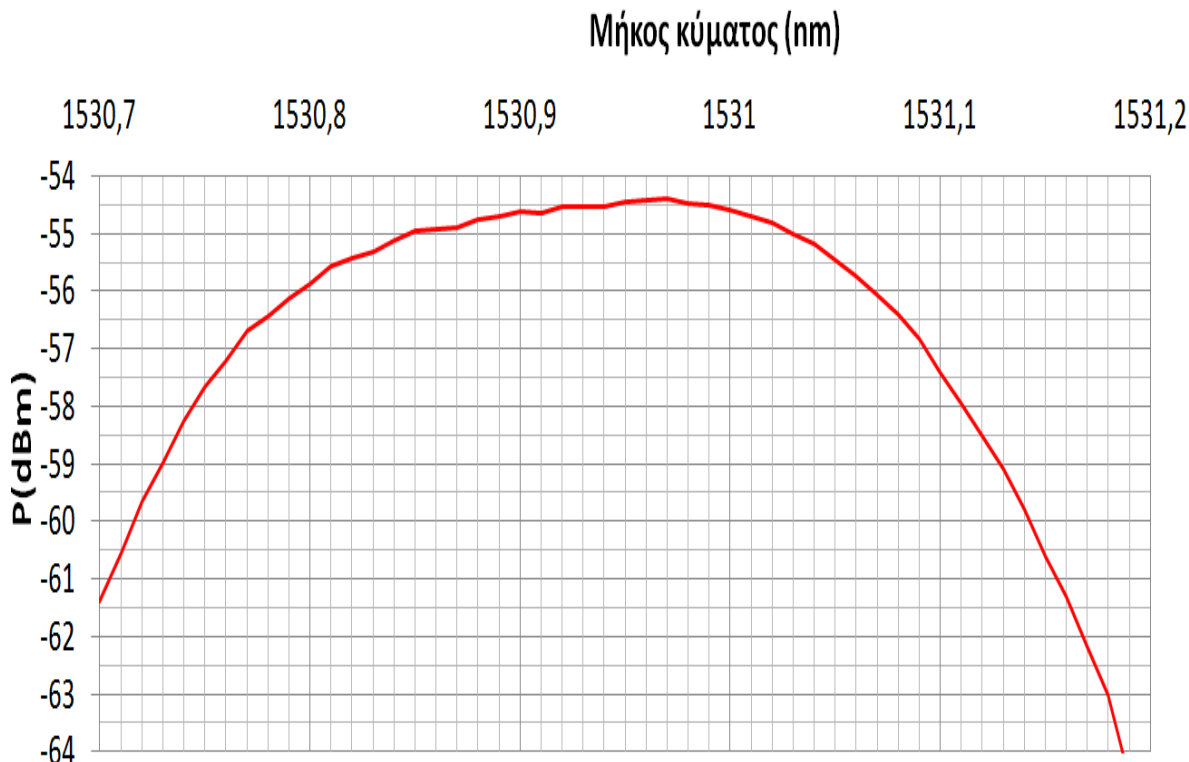
3.8.3 Μεταβολή FBG λόγω καταπόνησης

Δοκιμάσαμε την καταπόνηση στο FBG που προκαλείται μέσω τεντώματος και επηρεάζει την εγγραφή του δείκτη διάθλασης επομένως διαταράσσονται οι φασματικές ιδιότητες του FBG με αποτέλεσμα να μετατοπίζεται η απόκριση ανακλαστικότητας. Αυτή η αλλαγή έχει ως αποτέλεσμα μια μετατόπιση στο μήκος κύματος Bragg. Γνωρίζουμε τη σχέση $\lambda_{Bragg} = 2n\Lambda$ (1) όπου λ_{Bragg} μήκος Bragg, όπου n ο δείκτης διάθλασης και Λ περίοδος της εγγραφής του δείκτη διάθλασης του FBG. Από την σχέση αυτή μπορούμε να αξιολογήσουμε τη μετατόπιση του μήκους κύματος η οποία θα ναι $\Delta\lambda_B = 2 \left[\Lambda \frac{\partial n_{eff}}{\partial \epsilon} + n_{eff} \frac{\partial \Lambda}{\partial \epsilon} \right] \Delta l$, και αφορά την εφαρμαζόμενη παραμόρφωση.



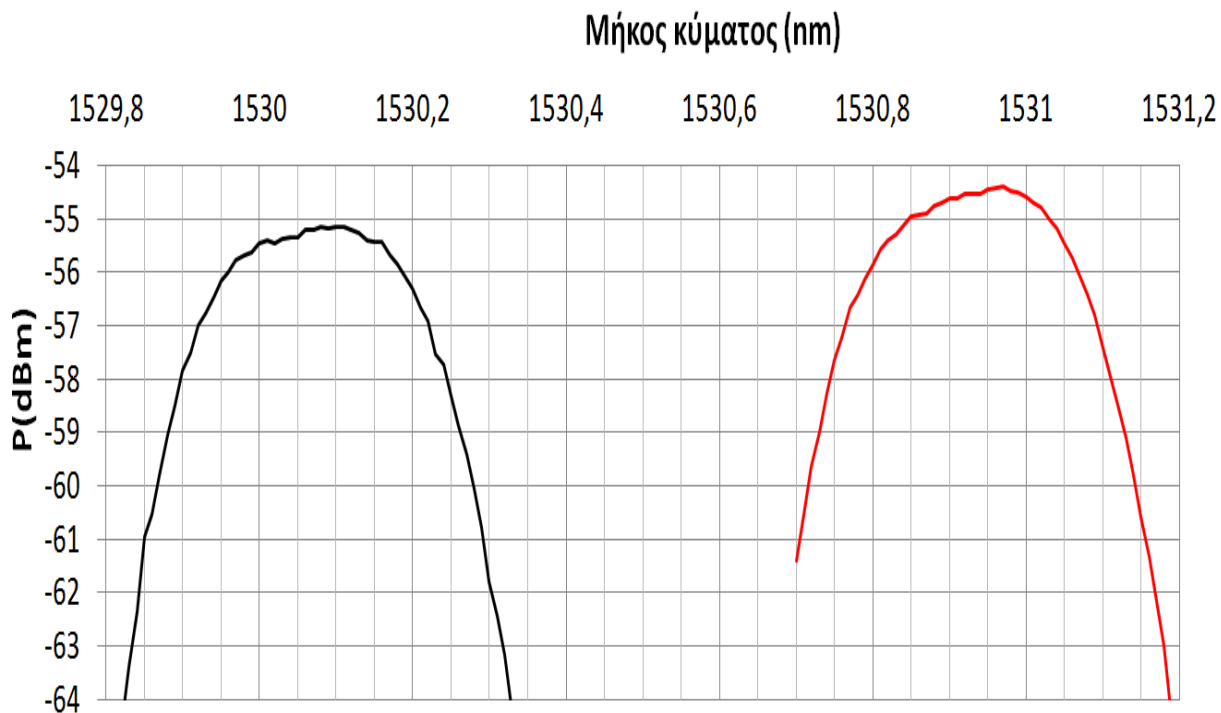
Εικόνα 3.78: Συνδεσμολογία (BBS με την EDF 21cm) λόγω καταπόνησης

Με την συνδεσμολογία του Σχήματος 3.78 λαμβάνουμε στον OSA το ακόλουθο φάσμα ισχύος.



Εικόνα 3.79: Φασματική ισχύς στα 1531 nm

Περιμέναμε να έχει μετατοπιστεί όλο το φάσμα προς τα μεγαλύτερα μήκη κύματος εξαιτίας της επιμήκυνσης διότι επηρεάζεται το μήκος κύματος Bragg, δηλαδή το μήκος κύματος ανακλαστικότητας λόγω της αλλαγής της περιόδου εγγραφής του grating.



Εικόνα 3.80: Μετατόπιση απόκρισης ανακλαστικότητα εξαιτίας καταπόνησης του FBG

Σε σύγκριση με την καταπόνηση ηρεμίας παρατηρούμε ότι μεταβάλλεται το μήκος κύματος (κόκκινο χρώμα) εξαιτίας της καταπόνησης αλλά παράλληλα υπάρχει και αύξηση της μέγιστης ισχύος ανάκλασης εξαιτίας της καμπύλης απορρόφησης του ερβίου κατά περίπου 1dB

Πίνακας 3: Η ισχύς πριν και μετά την καταπόνηση

$\lambda(\text{nm})/\text{ίνα}$	EDF 21cm	EDF 21cm+strain
1530.08	-55.15dBm	-
1530.94	-	-54.54dBm

Με καταπόνηση στο FBG αλλάζει η περιοδικότητα του ελαφρώς οδηγώντας σε μια συγκεκριμένη μετατόπιση του μήκους κύματος (0.86nm) και η απόλυτη ισχύς μεταβλήθηκε κατά 0.61dB. Συνεπώς, θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί η ίνα ερβίου ως τεχνική μετατροπής της μετατόπισης μήκους κύματος σε μεταβολή ισχύος με σκοπό την ανίχνευση ενός αισθητήρα καταπόνησης.

4 Μέρος Συμπεράσματα

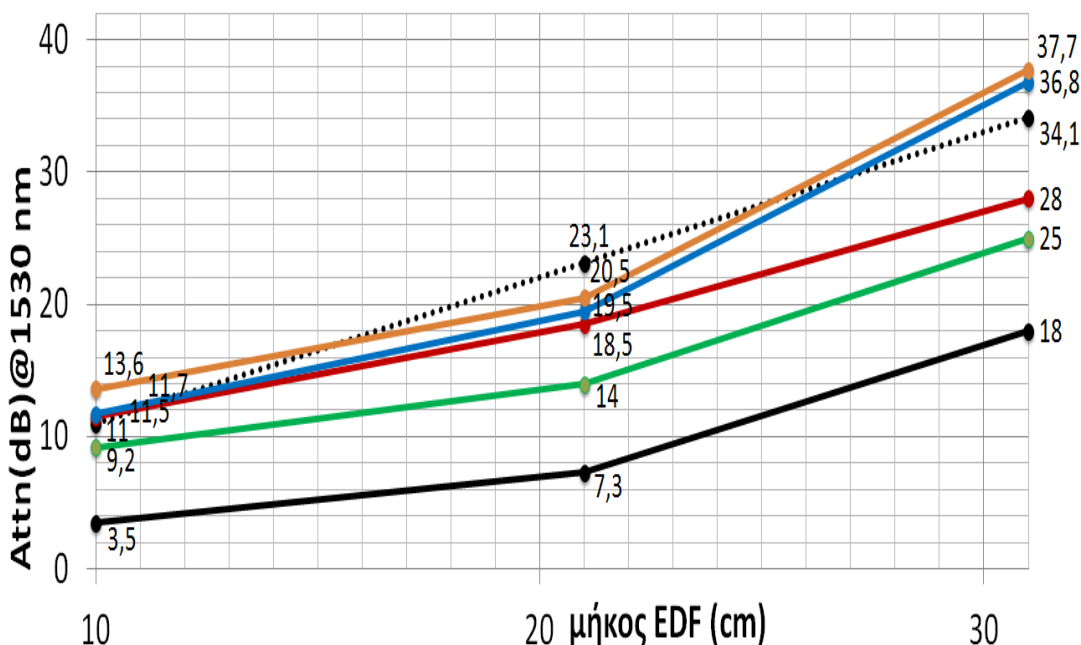
Έχοντας εξετάσει κάνοντας μετρήσεις απορρόφησης στην ίνα ερβίου με τις πηγές που έχουμε στο εργαστήριο (BBS και SLD) αλλά και μετρήσεις απορρόφησης σε ίνες ερβίου με μονοχρωματική πηγή (μέσω της BBS και FBG 1.53μm) καταλήγουμε στα παρακάτω συμπεράσματα.

4.1 Σχετικά με τις μετρήσεις απορρόφησης σε ίνες ερβίου

Αρχικά, χρησιμοποιώντας την πηγή BBS η εξασθένηση των ιών είχε μεγάλη απόκλιση από την ονομαστική τους τιμή. Η αιτία ήταν το επίπεδο ισχύος της BBS. Για αυτό το λόγο στη συνέχεια χρησιμοποιήσαμε δεύτερη πηγή, η οποία παρέχει μικρότερα επίπεδα ισχύος, την SLD που εξετάσαμε την επίδραση ισχύος στη μέτρηση της εξασθένησης.

Με την SLD διαπιστώσαμε βελτίωση των αποτελεσμάτων συμπεραίνοντας ότι η ισχύς της πηγής είναι η αιτία απόκλισης από την ονομαστική εξασθένηση.

Ακολουθώς, για να πετύχουμε διάφορα επίπεδα ισχύος με χρήση εξασθενητών (5dB,10dB,15dB) στην πηγή BBS, εξετάσαμε την επίδραση ισχύος στην εξασθένηση. Αξίζει να τονιστεί ιδιαίτερα ότι σε σύγκριση με την περίπτωση της πηγής BBS χωρίς εξασθενητή υπάρχει βελτίωση, οπότε κάθε φορά δοκιμάζουμε με μεγαλύτερη εξασθένηση ώστε να μειώσουμε περισσότερο την ισχύ της πηγής. Αξιοσημείωτο είναι ότι όσο προσθέταμε εξασθένηση στην BBS προσεγγίζαμε αποτελέσματα με την SLD. Άρα η ισχύς της πηγής παίζει σημαντικό ρόλο. Παρατηρούμε λοιπόν ότι με την SLD και την BBS15AT που έχουμε πάρα πολύ μικρή ισχύ φτάνουμε κοντά στην ονομαστική απορρόφηση ή εξασθένηση τα 110dB/m. Συνεπώς, όσο πιο μικρή είναι η ισχύς, η εξαναγκασμένη εκπομπή είναι πολύ μικρότερη και άρα επικρατεί η θεωρητική απορρόφηση.



Σχήμα 4.1: Συμπεριφορά των πέντε πηγών στα 1530nm για κάθε μήκος ίνας ξεχωριστά

Η EDF 10cm με την πηγή BBS10AT πλησιάζει περισσότερο την προδιαγραφή μας δηλαδή την ονομαστική της τιμή τα 110dB/m. Παρατηρούμε πως, στα 10cmEDF η BBS10AT είναι αρκετά κοντά στην SLD. Από τα (21 μέχρι 31)cm, βλέπουμε στο Σχήμα 4.1 ότι έχουν διαφορετική κλίση στην ευθεία. Αυτό συμβαίνει διότι σε εκείνη την περιοχή είναι μεγαλύτερο το πλήθος ιόντων ερβίου στην ίνα. Στα 31cmEDF, η διαφορά μεταξύ των ευθειών έχει αυξηθεί κατά πολύ. Συμπεραίνουμε το πόσο σημαντική είναι η ισχύς στα 1550nm όπου η διαφορά μεταξύ της SLD και της BBS10AT προκύπτει από το γεγονός ότι η SLD είναι 8dB πιο κάτω από την BBS10AT.

4.2 Σχετικά με τις μετρήσεις απορρόφησης σε ίνες ερβίου με μονοχρωματική πηγή

Δοκιμάσαμε μονοχρωματική πηγή που έχει στενό εύρος συχνοτήτων και εκπέμπει μόνο σε ένα μήκος κύματος και βγάζει στην έξοδο μια ισχύ που είναι μονοχρωματική. Διαπιστώσαμε ότι η πηγή τείνει να ομοιάσει σε επίπεδο ισχύος με την BBS5AT. Η διαφορά των δύο πηγών (μονοχρωματικής και BBS5AT) είναι 6.8dB που μειώνεται η ισχύς εξαιτίας της μειωμένης ανακλαστικότητας. Άρα το FBG έχει περίπου 25% ανακλαστικότητα.

Εξετάσαμε την συμπεριφορά των δυο πηγών στα 1530nm για κάθε μήκος ίνας ξεχωριστά όπου διαπιστώσαμε ότι η διαφορά τους οφείλεται στο γεγονός ότι με το FBG στέλνω μόνο ένα μήκος κύματος και όχι όλο το εύρος που στέλνω με την BBS5AT.

Παράλληλα δοκιμάσαμε την καταπόνηση στο FBG που προκαλείται μέσω τεντώματος και επηρεάζει την εγγραφή στο δείκτη διάθλασης. Αποδείξαμε ότι σε σύγκριση με την κατάσταση ηρεμίας μετατοπίζεται (0.86nm) όλο το φάσμα προς τα μεγαλύτερα μήκη κύματος εξαιτίας της αλλαγής περιόδου εγγραφής του grating αλλά ταυτόχρονα υπάρχει και αύξηση της μέγιστης ισχύος ανάκλασης εξαιτίας της καμπύλης απορρόφησης κατά 0.61dB.

4.3 Μελλοντικές επεκτάσεις και συνέχεια

Συνεπώς, πλέον, μετά το πέρας της μελέτης της η εργασία αυτή θα πρέπει να θεωρηθεί ως μια αφετηρία για περαιτέρω εμβάθυνση και σε άλλες διπλωματικές.

- Μια συνέχεια αυτής της Διπλωματικής είναι να χρησιμοποιήσουμε τη πηγή άντλησης του laser στα 980nm που διαθέτουμε στο εργαστήριο μας ώστε να αντλήσουμε την ίνα και ξανά κάνουμε όλα αυτά τα πειράματα από την αρχή αλλά με άντληση 980nm. Ακολουθώντας, θα μπορούσαμε να χρησιμοποιήσουμε διάφορα επίπεδα άντλησης για να βλέπουμε διαφορετικά αποτελέσματα.
- Μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε τις εκάστοτε ίνες EDF σε διατάξεις ενισχυτών. Μέσω μιας πηγής άντλησης με διάφορες τιμές ισχύος και να υπολογίζω το κέδρος.
- Μπορεί να γίνει προσομοίωση μέσω θεωρητικών μοντέλων ενός προγράμματος (κώδικα) με μοντέλα ώστε να δούμε πόσο ταιριάζουν οι θεωρητικές με τις πειραματικές μετρήσεις.

- Από τη παράγραφο 7.3 αποδείξαμε ότι η ίνα ερβίου (21cm) θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί ως τεχνική μετατροπής της μετατόπισης μήκους κύματος σε μεταβολή ισχύος με σκοπό την ανίχνευση ενός αισθητήρα.
- Μπορώ να χρησιμοποιήσω αυτές τις ίνες ως μέρος του laser (δηλαδή ως ενεργό στοιχείο)
- Το FBG μπορεί να μπει ως αισθητήριο σε κραδασμούς γέφυρας

Βιβλιογραφία – Αναφορές - Διαδικτυακές Πηγές

- [1] Σταθόπουλος Ν, «Εργαστήριο οπτικών επικοινωνιών», Αθήνα, (2018)
- [2] Σταθόπουλος Ν, «Οπτικές επικοινωνίες από τις παραδόσεις του μαθήματος», Αθήνα, (2007)
- [3] Γεράσιμος Κ. Παναγιώτης, «Ινοοπτικές επικοινωνίες», εκδόσεις Τζιόλα, Θεσσαλονίκη
- [4] O.Svelto, « APXES TON LASERS», Δεύτερη Έκδοση: Εκδόσεις Συμμετρία, Αθήνα, (1986)
- [5] M.Young, «Οπτική και λέιζερ», Πανεπιστημιακές εκδόσεις ΕΜΠ, (1986)
- [6] Δρ. Βασίλης Κώτσος, «Εργαστηριακές Ασκήσεις Οπτικών Επικοινωνιών», Εκδόσεις ΙΟΝ, Αθήνα, (2003)
- [7] Λυγερός, Ν, «Σπάνιες Γαίες, χαρακτηριστικά και δεδομένα» from: <http://lygeros.org/9681-gr/>
- [8] Wikipedia, Περιοδικός πίνακας των χημικών στοιχείων, URL: <https://el.wikipedia.org/wiki/%CE%A0%CE%B5%CF%81%CE%B9%CE%BF%CE%B4%CE%B9%CE%BA%CF%8C%CF%82%CF%80%CE%AF%CE%BD%CE%B1%CE%BA%CE%B1%CF%82%CF%84%CF%89%CE%BD%CF%87%CE%B7%CE%BC%CE%B9%CE%BA%CF%8E%CE%BD%CF%83%CF%84%CE%BF%CE%B9%CF%87%CE%B5%CE%AF%CF%89%CE%BD>
- [9] <https://aperopia.fr/09-2017/i-spanies-gaies-aitia-polemon-tou-2lou-aiona/>
- [10] <https://www.fiberoptics4sale.com/blogs/archive-posts/95044294-what-are-rare-earth-doped-fibers>
- [11] http://www.photonics.ntua.gr/Diafaneies_Fwtonikhhs/Energa_Stoixeia_Enisxytes_Inas_Erbiou.pdf
- [12] https://www.thorlabs.com/newgrouppage9.cfm?objectgroup_id=12403
- [13] <https://www.fiberlabs.com/glossary/praseodymium-doped-fiber-amplifier/>
- [14] https://www.rp-photonics.com/neodymium_doped_gain_media.html
- [15] https://www.rp-photonics.com/ytterbium_doped_gain_media.html
- [16] https://www.rp-photonics.com/optical_spectrum_analyzers.html?fbclid=IwAR3fsWQhMyollpWjzUE5uFJ8Iq_Wh1rJBGwVM8x6dGJ8j-Bu5Q4aegTT_M
- [17] <https://www.fiberlabs.com/glossary/erbium-doped-fiber-amplifier/>
- [18] Αρ. Τσίπουρας, “Μάθημα 7ο-8ο-9ο Φωτοεκπέμπουσες δίοδοι Laser – LD ΟΠΤΙΚΟΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΗ”
- [19] Επιστημονικός Υπεύθυνος: Δρ. Αντώνιος Χατζηγεωφραιμίδης ΕΡΕΥΝΗΤΙΚΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ: ΑΡΧΙΜΗΔΗΣ ΙΙΙ "Ενίσχυση Ερευνητικών Ομάδων ΤΕΙ" Τίτλος Παραδοτέου: «Σχεδίαση και ΠΑΔΑ, Τμήμα Η&ΗΜ, Διπλωματική Εργασία, ΠΙΟΛΔΑΣΗΣ ΠΑΝΑΓΙΩΤΗΣ

προσομοίωση οπτικών διατάξεων ενίσχυσης με εφαρμογή σε δυναμικά περιβάλλοντα επικοινωνίας μη επανδρωμένων α/φων»

[20]Στέλιος Κουρής, “Φυσική των λέιζερ”, ISBN 978-960-603-232-5, (2015)

[21]Introduction to Optical Amplifiers, CIAN, University of Arizona

[22][https://www.rp-](https://www.rp-photronics.com/superluminescent_diodes.html?fbclid=IwAR03IFkkZBVu-QZ-wUIVagb8SAvoMvFiUaZa4CXvtZqtINKNcuL9uCnqcG4)

[photronics.com/superluminescent_diodes.html?fbclid=IwAR03IFkkZBVu-QZ-wUIVagb8SAvoMvFiUaZa4CXvtZqtINKNcuL9uCnqcG4](https://www.rp-photronics.com/superluminescent_diodes.html?fbclid=IwAR03IFkkZBVu-QZ-wUIVagb8SAvoMvFiUaZa4CXvtZqtINKNcuL9uCnqcG4)

[23]https://www.thorlabs.com/NewGroupPage9_PF.cfm?ObjectGroup_ID=2437

[24]K.Thyagarajan, “Fundamentals of fiber waveguide modes”, Winter College on Fibre Optics, Fibre Lasers and Sensors 12 - 23 February 2007

[25]Stefan Nilsson-Gistvik, “Optical Fiber Theory for Communication Network”, second edition, 2002