



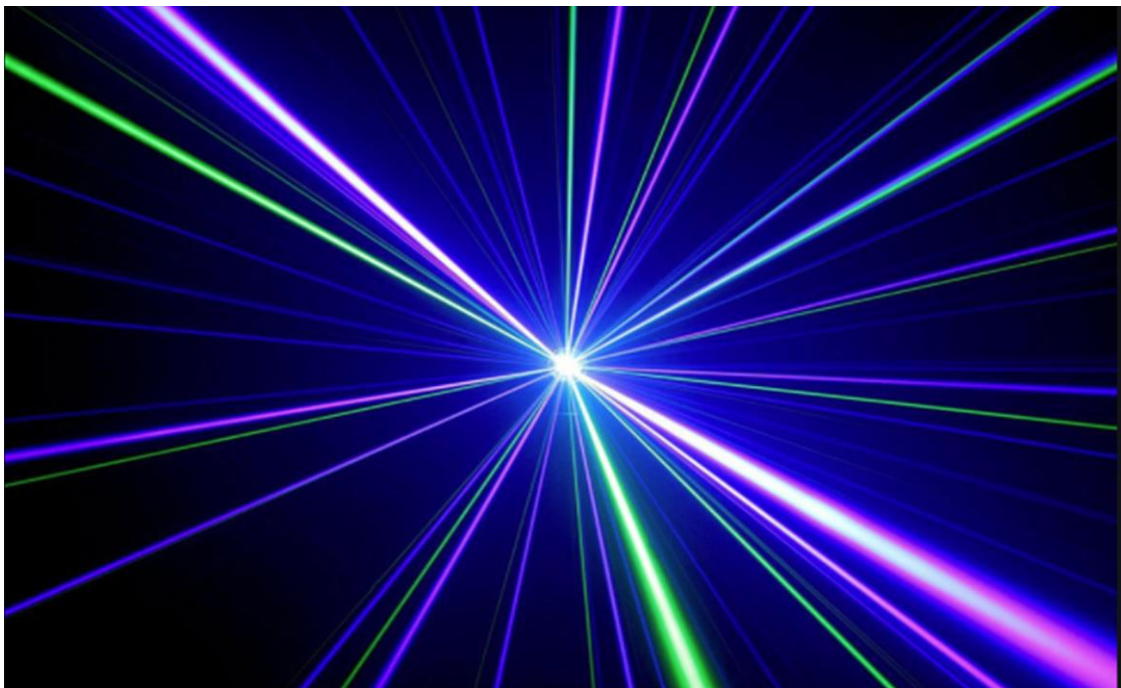
ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΔΥΤΙΚΗΣ ΑΤΤΙΚΗΣ

ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

ΤΜΗΜΑ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ & ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

Διπλωματική Εργασία

**Προσομοίωση και ανάλυση λειτουργίας πηγών laser οπτικών ινών
νοθευμένων με Έρβιο**



Φοιτητής: Λαζάκης Χρήστος
ΑΜ: 50346201

Επιβλέπων Καθηγητής

Ηρακλής Σίμος
Επίκουρος Καθηγητής

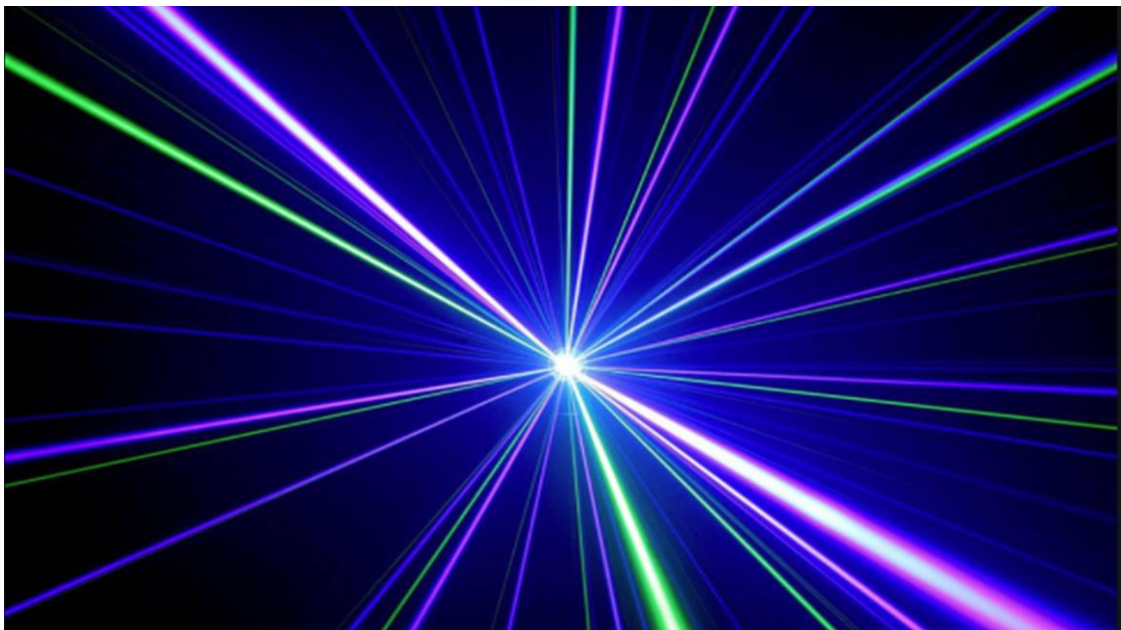
ΑΘΗΝΑ-ΑΙΓΑΛΕΩ, Νοέμβριος 2020



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

Diploma Thesis

Simulation and analysis of Erbium-doped fiber lasers



Student: Lazakis Christos
Registration Number: 50346201

Supervisor

Iraklis Simos
Assistant professor

ATHENS-EGALEO, November 2020

Μέλη Εξεταστικής Επιτροπής

Ηρακλής Σίμος, Επίκουρος Καθηγητής	
Νικόλαος Σταθόπουλος, Καθηγητής	
Στυλιανός Σαββαΐδης, Καθηγητής	

ΔΗΛΩΣΗ ΣΥΓΓΡΑΦΕΑ ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ

Ο κάτωθι υπογεγραμμένος ΛΑΖΑΚΗΣ ΧΡΗΣΤΟΣ του ΚΥΡΙΑΚΟΥ, με αριθμό μητρώου 50346201, φοιτητής του Πανεπιστημίου Δυτικής Αττικής της Σχολής Μηχανικών του Τμήματος Ηλεκτρολόγων και Ηλεκτρονικών Μηχανικών, δηλώνω υπεύθυνα ότι:

«Είμαι ο συγγραφέας αυτής της διπλωματικής εργασίας και 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 τίτλου μου».

Ο Δηλών

Χρήστος Λαζάκης

Περίληψη

Στην παρούσα διπλωματική εργασία γίνεται η προσομοίωση και ανάλυση πηγών laser που βασίζονται σε νοθευμένες ίνες με ιόντα Ερβίου μέσω ενός προσομοιωτικού προγράμματος της εταιρείας Optiwave , το Optisystem το οποίο δίνει την δυνατότητα να δημιουργηθεί ένα εικονικό εργαστήριο οπτικών . Αρχικά θα προσομοιωθεί και θα αναλυθεί το φάσμα του Ερβίου έπειτα θα γίνει μετάβαση στους ενισχυτές οπτικής ίνας ερβίου (EDFA) και τέλος θα εξεταστούν διάφορες τοπολογίες πηγών laser.

Λέξεις – κλειδιά

Έρβιο, οπτική ίνα , σπάνιες γαίες , νόθευση , οπτικός ενισχυτής , προσομοίωση , laser , ισχύς άντλησης , ισχύς εξόδου

Περιεχόμενα

Στυλιανός Σαββαΐδης, Καθηγητής	3
Κατάλογος Εικόνων - Κατάλογος Πινάκων.....	7
Αλφαβητικό Ευρετήριο	10
1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ	11
2 Οπτικές ίνες και νόθευση με σπάνιες γαίες	12
2.1 Γενικές πληροφορίες για τις Οπτικές ίνες.....	12
2.1.1 Τι είναι η οπτική ίνα και κριτήρια διαφοροποίησης μεταξύ των οπτικών ινών.....	12
2.1.2 Εξασθένιση και Διασπορά δυο κυρίαρχα φαινόμενα στις οπτικές ίνες.....	14
2.2 Σπανιες Γαίες.....	18
2.2.1 Το Έρβιο.....	18
2.2.2 Νοθευμένες οπτικές ίνες με σπάνιες γαίες	19
3 Οπτικοί Ενισχυτές και laser με βάση νοθευμένες οπτικές ίνες.....	22
3.1 Οπτικοί ενισχυτές.....	22
3.2 Laser βασισμένα σε νοθευμένες οπτικές ίνες.....	25
4 Προσομοίωση Οπτικού ενισχυτή.....	28
4.1 Χαρακτηρισμός του ενεργού υλικού - Έρβιου	28
4.2 Προσομοίωση οπτικού ενισχυτή με νοθευμένη οπτική ίνα Έρβιου(EDFA).....	32
4.2.1 Το πρώτο σενάριο για τον EDFA	32
4.2.2 Το δεύτερο σενάριο για τον EDFA.....	35
5 Προσομοίωση τοπολογιών Laser με νοθευμένες οπτικές ίνες Έρβιου.....	38
5.1 Laser δακτυλίου (Ring Laser).....	38
5.2 Τοπολογία laser με συνδυασμό Ring και FBG.....	47
5.3 Fiber Loop Mirrors.....	51
5.4 Τοπολογίες Ευθείας κοιλότητας	54
6 Συμπεράσματα – Περίληψη.....	68
Βιβλιογραφία – Αναφορές - Διαδικτυακές Πηγές.....	71

Κατάλογος Εικόνων - Κατάλογος Πινάκων

Εικόνα 1. Απεικόνιση του Εσωτερικού της οπτικής ίνας [11].....	13
Εικόνα 2. Τρόποι διάδοσης εντός της οπτικής ίνας [13].	14
Εικόνα 3.Σχηματική απεικόνιση του προβλήματος της διασυμβολικής παρεμβολής	16
Εικόνα 4.Περιοδικός πίνακας χημικών στοιχείων με επισήμανση του Ερβίου	18
Εικόνα 5. Ενεργειακές καταστάσεις του Ερβίου	18
Εικόνα 6.Νεοδύμιο [16].....	20
Εικόνα 7.Υτέρβιο[17]	20
Εικόνα 8. Έρβιο[18]	21
Εικόνα 9.Θούλιο[19]	21
Εικόνα 10. 3 Ενεργειακές καταστάσεις	22
Εικόνα 11.Κέρδος VS Ισχύς εισόδου	24
Εικόνα 12.Δομή οπτικού ενισχυτή	24
Εικόνα 13. Σχηματική αναπαράσταση κοιλότητας Fabry Perrot[8]	26
Εικόνα 14. Σχηματική αναπαράσταση για την κυκλική κοιλότητα[21].....	26
Εικόνα 15. Απεικόνιση δράσης FBG[22]	27
Εικόνα 16. Τρόποι κατασκευής FBG[22].....	27
Εικόνα 17.Κύλωμα στο Optiwave για χαρακτηρισμό Ερβίου.....	28
Εικόνα 18.Φάσμα Ερβίου	29
Εικόνα 19 Ισχύς ολικού φάσματος.....	30
Εικόνα 20. Μέτρηση ισχύος συγκεκριμένου μήκους κύματος 1550nm.....	30
Εικόνα 21. Μέτρηση ισχύος ολικού φάσματος.....	31
Εικόνα 22. Ισχύς στα 1550nm.....	32
Εικόνα 23. Τοπολογία 1 ^{ου} σεναρίου EDFA	33
Εικόνα 24 .Κέρδος σε συνάρτηση με τη ισχύς άντλησης Er110	33
Εικόνα 25. Κέρδος σε συνάρτηση με τη ισχύς άντλησης Er30	34
Εικόνα 26.Κερδος σε συνάρτηση με την ισχύ άντλησης για τα 0.20m ,Er110	34
Εικόνα 27.Αποτελέσματα ενισχυτή με Er110.....	35

Εικόνα 28. Αποτελέσματα ενισχυτή με Er30.....	36
Εικόνα 29.Κερδος σε συνάρτηση με τις τιμές ισχύος εισόδου για την ίνα 0.20m.....	37
Εικόνα 30.Τοπολογία ring laser	38
Εικόνα 31. Τοπολογία χωρίς απομονωτή και φίλτρο	39
Εικόνα 32. Ισχύς φάσματος.....	39
Εικόνα 33.Ισχύς στα 1550nm.....	40
Εικόνα 34. Ισχύς στα 1553nm.....	40
Εικόνα 35.Τοπολογία έπειτα από την προσθήκη του απομονωτή.	41
Εικόνα 36. Ισχύς φάσματος.....	41
Εικόνα 37.Τελικό κυκλωμα ring laser όπως δίνεται από την Optiwave	42
Εικόνα 38. Ισχύς φάσματος.....	42
Εικόνα 39.Ισχύς στα 1550nm.....	43
Εικόνα 40. Φασμα ring laser στα 1550nm.....	44
Εικόνα 41.Περιοχή έναυσης του ring laser	44
Εικόνα 42.Ισχύς φάσματος στην γραμμική κλίμακα.....	45
Εικόνα 43.Ισχύς στα 1550nm με διαφορετικό BW	46
Εικόνα 44.Τοπολογία Ring+FBG (hybrid)	47
Εικόνα 45. Απεικόνιση φάσματος του Ring + FBG(hybrid)	48
Εικόνα 46. Ισχύς ολικού φάσματος του Ring+FBG(hybrid)	48
Εικόνα 47.Ισχύς στα 1550nm.....	49
Εικόνα 48.Περιοχή έναυσης του FBG+RING	49
Εικόνα 49.Περιοχή έναυσης FBG+Ring 0.20m.....	50
Εικόνα 50.Fiber loop mirrors	51
Εικόνα 51. Απεικόνιση φάσματος Fiber loop mirrors.....	51
Εικόνα 52.Συνολική ισχύς φάσματος Fiber loop mirrors	52
Εικόνα 53. Η ισχύς στα 1550 nm του Fiber Mirror Loops	52
Εικόνα 54.Περιοχή Έναυσης Fiber Loop Mirrors.....	53
Εικόνα 55.Ευθεια κοιλότητα με 2 FBG (A1).....	54

Εικόνα 56.Απεικονιση φασματος A1	54
Εικόνα 57.Συνολικη ισχύς φάσματος Ευθείας κοιλότητας με 2 FBG.....	55
Εικόνα 58.Η Ισχυς στα 1550nm.....	55
Εικόνα 59.Περιοχή έναυσης A1	56
Εικόνα 60. Ευθεια κοιλότητα με fiber mirror loop στο τέλος (A2)	57
Εικόνα 61.Απεικονιση φασματος OSA A2.....	57
Εικόνα 62. Ισχύς ολικού φάσματος (A2).....	58
Εικόνα 63.Ισχυς στα 1550nm(A2)	58
Εικόνα 64.Περιοχή έναυσης τοπολογίας A2	59
Εικόνα 65.Ευθεια κοιλότητα με 2 FBG στα άκρα (B)	60
Εικόνα 66.Απεικονιση του φασματος B	60
Εικόνα 67.Ισχύς φάσματος (B)	61
Εικόνα 68.Ισχυς στα 1550nm (B).....	61
Εικόνα 69.Περιοχή Έναυσης τοπολογίας B.....	62
Εικόνα 70.Ευθεια κοιλότητα με FBG και fiber loop mirror(Γ)	63
Εικόνα 71. Απεικόνιση του φάσματος Γ	63
Εικόνα 72. Απεικονιση των 980nm.....	64
Εικόνα 73. Συνολική ισχύς φάσματος (Γ)	64
Εικόνα 74. Η ισχύς στα 1550nm	65
Εικόνα 75. Περιοχή έναυσης τοπολογίας Γ.....	65
Εικόνα 76. Ισχύς φάσματος και των 6 τοπολογιών.....	66
Εικόνα 77. Η ισχύς στα 1550nm των 6 τοπολογιών	66
Εικόνα 78. Ευθεια κοιλότητα (B).....	70

Πίνακας 1. Ενδεικτικά νούμερα για τις διαστάσεις των μερών της ίνας.....	12
Πίνακας 2. Σπάνιες γαίες που νοθεύονται στις οπτικές ίνες καθώς και μήκη κύματος εκπομπής.....	18
Πίνακας 3. Οι οροί των εξισώσεων	22
Πίνακας 4. Στοιχεία νοθευμένης ίνας Er110.....	28
Πίνακας 5. Στοιχεία νοθευμένης ίνας Er 30	30

Αλφαβητικό Ευρετήριο

EDF: Erbium Doped Fiber

OSA: Optical Spectrum Analyzer

OPM: Optical Power Meter

EDFA: Erbium Doped Fiber Amplifier

LASER: Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation

Er: Erbium

1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Αρχικά θα μελετήσουμε για το πώς είναι δομημένη η οπτική ίνα καθώς και φαινόμενα που την διέπουν κατά την χρήση της (μεταφορά φωτός) εν συνεχεία θα έρθουμε σε επαφή με τις σπάνιες γαίες οι οποίες όταν νοθευτούν εντός των οπτικών ινών γίνεται προτίμηση συγκεκριμένων μηκών κύματος τα όποια ορίζουν οι σπάνιες γαίες μέσω των ενεργειών σταθμών τους και οι εφαρμογές όπου οι οπτικές ίνες θα λάβουν μέρος. Εμείς θα επικεντρωθούμε στην νόθευση οπτικών ινών με Έρβιο (σπάνια γαία) του οποίου φάσμα θα γίνει από τις πρώτες προσομοιώσεις . Ακολούθως, θα εισάγουμε την έννοια του οπτικού ενισχυτή (EDFA) καθώς και τοπολογίες πηγών laser. Η προσομοίωση όλων των πειραμάτων θα γίνει με ένα λογισμικό της Optiwave , το Optisystem.

2 Οπτικές ίνες και νόθευση με σπάνιες γαίες

Στο παρόν κεφάλαιο θα γίνει ανάλυση των οπτικών ινών και θα αναφερθούν σημεία για τις σπάνιες γαίες ως στοιχειά του περιοδικού πίνακα, οι οποίες όταν τοποθετηθούν στις οπτικές ίνες τροποποιούν τις ιδιότητες των κλασσικών οπτικών ινών κάνοντας τις περιζήτητες σε διαφορές εφαρμογές από την ιατρική έως στις τηλεπικοινωνίες.

2.1 Γενικές πληροφορίες για τις Οπτικές ίνες

Οι οπτικές ίνες πλέον έχουν γίνει ευρέως γνώστες στον χώρο των τηλεπικοινωνιών, ήδη από 1910 είχαν ξεκινήσει θεωρητικές εργασίες πάνω στις οπτικές ίνες σαν διαφανείς διηλεκτρικές ράβδοι (Χονδρος Debye, Schriever) με αφορμή αυτές τις εργασίες κατασκευάστηκαν οι πρώτες ίνες, οι οποίες χρησιμοποιήθηκαν για μεταφορά σήματος μικρών αποστάσεων και σε ιατρικά εργαλεία. Έπειτα το 1966 οι C. Kao και C. Hockman μέσω της εργασίας τους έδειξαν ότι αν μειωθεί ο συντελεστής εξασθένησης στα 20dB/km τότε θα είναι χρήσιμη για μεταφορά σημάτων. Η εξέλιξη αυτής της τεχνολογίας πάνω στις οπτικές ίνες καθιστά σήμερα την οπτική ίνα να έχει συντελεστή εξασθένησης 0.2 dB/km. Για να γίνεται όλη αυτή η προσπάθεια θα υπάρχουν πλεονεκτήματα που καθιστούν τις ινοοπτικές συνδέσεις προτιμητέες σε σχέση με τις τυπικές καλωδιακές συνδέσεις καθώς και με τις ραδιοζεύξεις. [11]

-Οι οπτικές ίνες παρέχουν τεράστιο εύρος ζώνης. Αν μια οπτική ίνα (π.χ Ερβίου) λειτουργεί στην περιοχή των 1550nm (1525 nm – 1565 nm) (μήκη κύματος) τότε έχουμε εύρος συχνοτήτων της τάξης 5Mhz. Με τις σημερινές ίνες μπορεί να γίνει μεταφορά σήματος με ρυθμό 2,5 Gbit/s σε αρκετά μεγάλες αποστάσεις

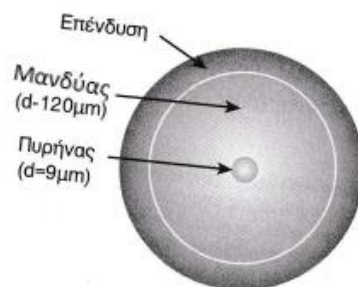
-Λόγω της χαμηλής εξασθένησης δεν χρειάζεται η τοποθέτηση συστημάτων αναζωογόνησης του σήματος για πάνω από 100km

-Αναισθησία στις ηλεκτρομαγνητικές παρεμβολές

-Ασφαλής μεταφορά σήματος καθώς το σήμα κινείται εσωτερικά της ίνας και είναι αρκετά δύσκολο να επέμβει κάποιο κακόβουλο σύστημα. Έστω ότι συμβεί αυτό τότε η πτώση της οπτικής ισχύος θα γίνει άμεσα αντιληπτή από τον δεκτή.[11]

2.1.1 Τι είναι η οπτική ίνα και κριτήρια διαφοροποίησης μεταξύ των οπτικών ινών

Σε αυτό το σημείο θα πρέπει να δούμε τι είναι η οπτική ίνα. Είναι διηλεκτρικοί κυματοδηγοί κυκλικής επί των πλείστων φύσης και κατασκευάζονται από γυαλί και πλαστικό. Αποτελούνται από δυο βασικά μέρη τον πυρήνα (core) και τον μανδύα (cladding) ο οποίος περιβάλλει τον πυρήνα και γύρω από τον μανδύα υπάρχει πλαστική επένδυση η οποία δεν συμμετέχει στην διάδοση του σήματος αλλά χρησιμεύει στην προστασία της οπτικής ίνας από τις περιβαλλοντικές συνθήκες.[11]



Εικόνα 1. Απεικόνιση του Εσωτερικού της οπτικής ίνας [11]

Η κυματοδηγηση 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 ($n_{core} > n_{cladding}$) ώστε να μην έχουμε ισχυρές διαρροές από τον πυρήνα στον μανδύα και χάνουμε ισχύ σήματος

Οι οπτικές ίνες μπορούν να κατηγοριοποιηθούν με βάση τα παρακάτω κριτήρια

- Αριθμός κυματοδηγούμενων τρόπων
- Υλικό της ίνας
- Δείκτης διάθλασης

Στο πρώτο κριτήριο υπάρχουν οι μονότροπες και οι πολύτροπες οπτικές ίνες το αν είναι μονότροπες ή πολύτροπες συνδέεται άρρηκτα με το μέγεθος του πυρήνα

	Μονότροπη	Πολύτροπη
Διάμετρος πυρήνα	8-10μm	50 , 62.5 , 80μm
Διάμετρος μανδύα	125μm	125μm
Δείκτης διάθλασης πυρήνα	1,5	1.5

Πίνακας 6. Ενδεικτικά νούμερα για τις διαστάσεις των μερών της ίνας

Είναι φανερό πως όσο μικρότερη είναι η διάμετρος του πυρήνα τόσο πιο λίγοι τρόποι συντηρούνται έτσι λοιπόν όταν ο πυρήνας είναι 9μm τότε έχουμε μονότροπη οπτική ίνα δηλαδή συντηρείται ένας τρόπος, ο αξονικός. Τα μήκη κύματος που επωφελούνται από τις μονοτροπικές ίνες είναι από 1,5 μm έως 1,6 μm εκεί παρουσιάζεται μικρότερη εξασθένιση . Για αυτό η περιοχή των 1,5 μm χρησιμοποιείται για τις τηλεπικοινωνίες για μεγάλες αποστάσεις . Λόγω του μικρού μεγέθους της ίνας είναι δύσκολες οι συνδέσεις με τους πομπούς-δέκτες. [11]

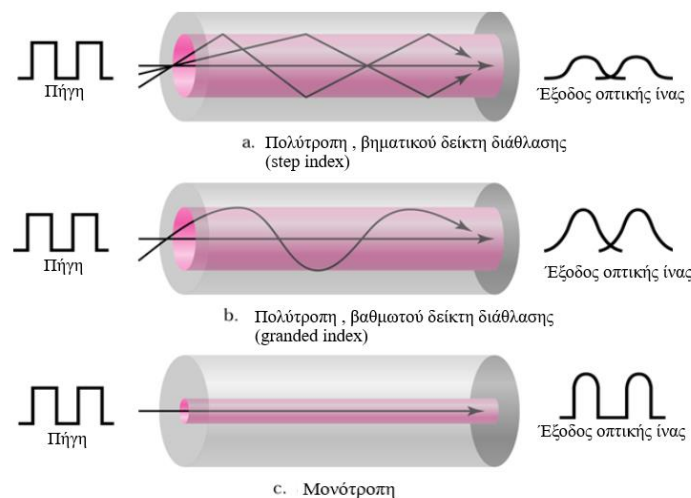
Όσο αναφορά τις πολύτροπες οπτικές ίνες συμβαίνει το αντίθετο από τις μονότροπες δηλαδή εφόσον αυξάνεται η διάμετρος του πυρήνα έχουμε την συντήρηση περισσότερων τρόπων μετάδοσης , όμως εφόσον έχουμε εισαγωγή των φωτεινών ακτινών του ίδιου

σήματος στην ίνα με διαφορετική γωνία ακολούθουν και διαφορετικό δρόμο μέσα στην ίνα με αποτέλεσμα να έχουμε παραμόρφωση του σήματος , επίσης κάποιες ακτίνες μπορεί να μην υποστούν ολική ανάκλαση έτσι θα έχουμε και εξασθένηση του σήματος.[11]

Για το δεύτερο κριτήριο που έχουμε το υλικό της οπτικής ίνας εκεί διαφοροποιούνται σε πλαστικές και γυάλινες. Οι γυάλινες αποτελούνται από καθαρό συνθετικό γυαλί και από προσμίξεις διοξειδίου του πυριτίου (SiO_2). Προκειμένου να διαμορφωθούν σωστά οι δείκτες διάθλασης πυρήνα-μανδύα, στον πυρήνα έχουμε νόθευση με προσμίξεις Ge(Γερμάνιο) , P(Φώσφορος) για να αυξηθεί ο δείκτης διάθλασης και στον μανδύα έχουμε νόθευση με προσμίξεις B (Βόριο) , F(Φθόριο) ώστε να έχουμε μείωση του δείκτη διάθλασης.

Οι πλαστικές ίνες δημιουργούνται από πλαστικά υλικά και όπως είναι αναμενόμενο έχουν πολύ κατώτερες επιδόσεις σε σχέση με τις γυάλινες . Μεγάλη εξασθένηση , μικρότεροι ρυθμοί διάδοσης , ευαισθησία σε περιβαλλοντικές επιδράσεις. Βεβαία το κόστος είναι υπέρ της πλαστικής οπτικής ίνας.

Το τρίτο κριτήριο που χαρακτηρίζει τις οπτικές είναι είναι ο δείκτης διάθλασης και χωρίζονται σε ίνες βηματικού δείκτη διάθλασης (step index fibers) και του βαθμωτού δείκτη διάθλασης (graded index fibers). Στις step index fibers έχουμε διακριτές τιμές του δείκτη διάθλασης ($n_{\text{core}} > n_{\text{cladding}}$) , ενώ στις graded index fibers έχουμε βαθμιαία αλλαγή του δείκτη διάθλασης του πυρήνα. Στην πράξη κυριαρχούν γυάλινες μονότροπες ίνες με βηματικό δείκτη διάθλασης και πλαστικές πολύτροπες με βαθμωτό δείκτη διάθλασης.



Εικόνα 2. Τρόποι διάδοσης εντός της οπτικής ίνας [13].

2.1.2 Εξασθένηση και Διασπορά δυο κυρίαρχα φαινόμενα στις οπτικές ίνες

Οι οπτικές ίνες παρά το πλήθος των πλεονεκτημάτων που προσφέρουν , υπάρχουν κάποια σημεία που θέλουν προσοχή , τα δυο κυρία φαινόμενα που εμφανίζονται και χρήζουν αντιμετώπιση είναι η εξασθένηση και η διασπορά. Με την εξασθένηση καθορίζεται το ποσό

ισχύος που μειώνεται κατά μήκος της ίνας ,έτσι λοιπόν αυτομάτως τίθεται ένα άνω όριο του μήκους της οπτικής ίνας .

Παράγοντες που οδηγούν στην εξασθένηση είναι :

- Η σκέδαση
- Η απορρόφηση ισχύος
- Αποτελέσματα γήρανσης και φθορές

Όσο αναφορά την σκέδαση υπάρχουν διάφοροι τύποι σκέδασης γραμμικοί και μη γραμμικοί . Οι γραμμικές σκεδάσεις είναι η σκέδαση Rayleigh που οφείλεται σε ανομοιογένεια του υλικού της οπτικής ίνας και η σκέδαση Mie που περιγράφει την μη ιδανική επαφή μεταξύ πυρήνα και μανδύα. Οι μη γραμμικές σκεδάσεις είναι η σκέδαση Brillouin και η σκέδαση Raman που αποκτούν υπόσταση όταν η ισχύ του κυματοδηγούμενου σήματος κυμαίνεται άνω των 100 mW και κυρίως εμφανίζονται όταν υπάρχει ταυτόχρονη μετάδοση περισσότερων του ενός οπτικού σήματος (WDM)[11]. Από όλες τις σκεδάσεις αξιoσημείωτη είναι η σκέδαση Rayleigh η όποια εκφράζεται με τον παρακάτω συντελεστή

$$a_R = \frac{K_R}{\lambda^4} \text{ (dB/km)}$$

K_R : κυμαίνεται από 0,8 έως 1,0 (dB/km)*(μm)⁴ και συσχετίζει τους δείκτες διαθλάσεις πυρήνα μανδύα , τη διάμετρο του πυρήνα και τα υλικά νόθευσης της ίνας . Μέσω της σκέδασης Rayleigh προκύπτει το κάτω όριο του συντελεστή εξασθένησης της οπτικής ίνας.

Εν συνεχεία, η απορρόφηση οφείλεται κυρίως στο γεγονός ότι τα άτομα του υλικού της ίνας απορροφούν μέρος της οπτικής ισχύος και την μετατρέπουν σε θερμότητα (ενδογενής απορρόφηση) επίσης αυτό μπορεί να συμβεί και από τα ξένα στοιχειά-άτομα τα όποια παρευρίσκονται στην ίνα κατά την διαδικασία κατασκευής της (εξωγενής απορρόφηση) . Πρέπει να σημειωθεί πως ιδιαίτερα σημαντική είναι η απορρόφηση (εξωγενής) που οφείλεται στην ρίζα OH⁻ η όποια έχει μήκος κύματος συντονισμού στα 2720 nm και έχει μέγιστα στις αρμόνικες 2720/(ν+1) nm όπως στα (1360 , 930 , 680) nm.

Τελευταίος παράγοντας της εξασθένησης, η γήρανση και οι λοιπές φθορές από αυτές ξεχωρίζουν η κάμψη της ίνας και η υγρασία . Για το κομμάτι της κάμψης της ίνας υπάρχει ένας κανόνας που λέει ότι πρέπει η ακτίνα καμπυλότητας της ίνας να είναι μεγαλύτερη από μια κρίσιμη τιμή που εξαρτάται από το μήκος κύματος διάδοσης εντός της ίνας . Με τα σημερινά δεδομένα $R > 30\text{mm}$. Η γήρανση η όποια είναι αναπόφευκτη όπως είναι αντιληπτό γίνεται αισθητή από την στιγμή που η εξασθένηση γίνει αρκετά μεγαλύτερη από ότι αναγράφει ο κατασκευαστής της . Γενικά η αντοχή των οπτικών καλωδίων όσο αναφορά την γήρανση περιορίζεται στα 25 χρόνια περίπου.[11]

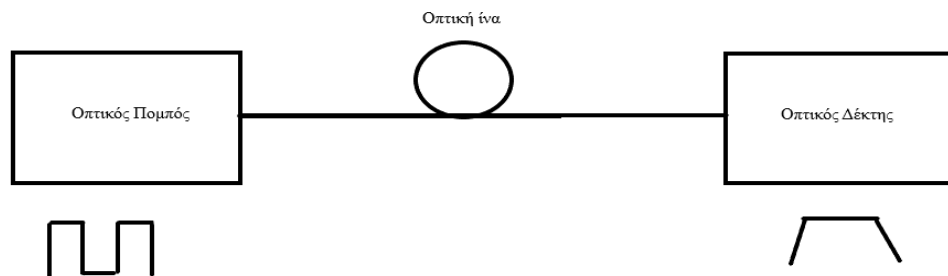
Ο συνδυασμός των παραπάνω παραγόντων (σκέδαση απορρόφηση και γήρανση –λοιπές φθορές) οδηγούν στην εξαγωγή ενός συντελεστή εξασθένησης της οπτικής ίνας . Άρα ο συντελεστής εξασθένησης α ισούται :

$$\alpha = \frac{K_R}{\lambda^4} + K_a(\lambda) + K_m \text{ (dB/km)}$$

Ο 1^{ος} Όρος εκφράζει την σκέδαση Rayleigh ,ο 2^{ος} την απορρόφηση , ο 3^{ος} λοιπές απώλειες λόγω γήρανσης κλπ

Στις μονότροπες οπτικές ίνες ο συντελεστής εξασθένισης λαμβάνει τιμές περί τα 2,5dB/km @ 850nm , 0,35 dB/km @1310nm , 0,20 dB/km @ 1550nm.Στις σημερινές εφαρμογές προτιμώνται τα 1310 nm και 1550nm.[11]

Ακολουθεί το επόμενο φαινόμενο το οποίο είναι αυτό της διασποράς το οποίο γίνεται εμφανές μέσω του απλώματος του σήματος στο χρόνο καθώς αυτό διαδίδεται μέσα στην ίνα αυτό συμβαίνει καθώς μέρη του σήματος ταξιδεύουν με διαφορετική ταχύτητα έτσι λοιπόν με αποτέλεσμα στην έξοδο να έχουμε απλωμένους παλμούς σχετικά με τους ίδιους παλμούς που σταλήθηκαν στην είσοδο. Αυτό είναι πρόβλημα και αποτρέπει την διάδοση σε υψηλούς ρυθμούς καθώς δημιουργείται διασυμβολική παρεμβολή καθώς επικαλύβεται ο ένας παλμός με τον ακόλουθο του στην έξοδο.[11]



Εικόνα 3.Σχηματική απεικόνιση του προβλήματος της διασυμβολικής παρεμβολής

Στην Εικόνα 3 φαίνεται σχεδιαστικά το φαινόμενο της διασποράς , καθώς ο πομπός στέλνει διακριτούς παλμούς , ενώ ο δεκτής λαμβάνει ένα διαφορετικό σήμα που δεν είναι σε καμία περίπτωση αυτό που έστειλε ο πομπός.

Υπάρχουν 2 είδη διασποράς η διατροπική και η ενδοτροπική (ή χρωματική). Η διατροπική διασπορά οφείλεται στην διαφορά στην ταχύτητα μετάδοσης μεταξύ των τρόπων που διαδίδονται μέσα στην ίνα και προφανώς ισχύει μόνο για πολύτροπες ίνες , η ενδοτροπική διασπορά οφείλεται στην εξάρτηση των παραμέτρων κυματοδήγησης των σημάτων από το μήκος κύματος μετάδοσης και υπάρχει και στις μονότροπες και στις πολύτροπες ίνες εδώ πρέπει να σημειώσουμε ότι το μήκος κύματος που εξάγεται από την πηγή και είναι έτοιμο να διαδοθεί δεν είναι απόλυτα καθορισμένο δηλαδή υπάρχει μια στενή ζώνη γύρω από το κεντρικό μήκος κύματος που θα διαδοθεί. Πιο συγκεκριμένα η ενδοτροπική διασπορά αποτελείται από δυο επιμέρους διασπορές , την διασπορά υλικού που οφείλεται στην σχέση δείκτη διάθλασης με το μήκος κύματος διάδοσης και στην κυματοδηγική διασπορά η οποία απορρέει από την διάφορα στους δείκτες διάθλασης μεταξύ πυρήνα και μανδύα.

Διατροπική διασπορά όπως προαναφέρθηκε εμφανίζεται μόνο στις πολύτροπες ίνες , όπου το σήμα εξόδου συντίθεται από τους διαφορετικούς τρόπους που μεταδίδονται στην ίνα . Οι τρόποι αυτοί έχουν διαφορετική φασική ταχύτητα , κάθε τρόπος ακολουθεί διαφορετική διαδρομή εντός της ίνας με συνέπεια η έξοδος να έχει μεγαλύτερη χρονική διάρκεια. Η διατροπική διασπορά δίνεται από τον παρακάτω τύπο[11]

$$D_{\delta} = \tau_{\delta} * L \text{ (ps)}$$

Όπου τ_{δ} είναι συντελεστής διατροπικής διασποράς και L το μήκος της ζεύξης.

Προχωρώντας στην ενδοτροπική διασπορά η οποία εμφανίζεται και στις πολύτροπες και στις μονότροπες ίνες προκειμένου να ποσοτικοποιηθεί η ενδοτροπική διασπορά λαμβάνεται υπόψη ο συντελεστής ενδοτροπικής διασποράς τ_e που εκφράζει το άπλωμα του παλμού ανά μονάδα μήκους κύματος και μήκους ζεύξης και αυτός ο συντελεστής είναι άθροισμα δυο επιμέρους συντελεστών τ_{ev} και τ_{ek} ο πρώτος αφορά την διασπορά υλικού και ο δεύτερος την διασπορά κυματοδηγησης.[11]

Έτσι λοιπόν προκύπτει $\tau_e = \tau_{ev} + \tau_{ek}$ (ps/nm*km) ο οποίος συντελεστής συμμετέχει στην εύρεση της ενδοτροπικής διασποράς $D_e = \tau_e * \Delta\lambda * L$ (ps).

Η διασπορά είναι ανάλογη του φάσματος της πηγής και του μήκους της ζεύξης για αυτό για να την περιορίσουμε πρέπει όσο το δυνατόν η πηγή μας να έχει στενό φασματικό εύρος, ιδανικά $\Delta\lambda=0$ δηλαδή να δίνει μόνο ένα μήκος κύματος στην έξοδο της η πηγή

Σε αυτό το σημείο βγαίνει το εξής συμπέρασμα ότι η διασπορά για συμβατικές ίνες (μετάδοσης μη νοθευμένες) έχουμε μηδενισμό της διασποράς στα 1310nm και ελάχιστη εξασθένηση έχουμε στα 1550nm για αυτό αυτά τα δυο μήκη κύματος υπερτερούν έναντι των άλλων για τις μεταδόσεις σήματος.

Η ύπαρξη της διασποράς δημιουργεί διασυμβολική παρεμβολή και δεν επιτρέπεται υψηλός ρυθμός μετάδοσης για αυτό το λόγο υπάρχουν κάποιοι περιορισμοί όσο αναφορά το μήκος της ζεύξης και του ρυθμού μετάδοσης μέσω κάποιων εμπειρικών κανόνων ένας από αυτούς καθορίζει προσεγγιστικά τον μέγιστο ρυθμό μετάδοσης

$$R_{\max} \sim 0,2/D \text{ (bit/s)}$$

Με τις μονότροπες ίνες μπορεί να επιτευχθεί αρκετά υψηλός ρυθμός μετάδοσης καθώς σε αυτές έχουμε την εμφάνιση μόνο της ενδοτροπικής διασποράς.

Η ανάγκη μηδενικής διασποράς στα 1550 nm που υπάρχει ελάχιστη εξασθένηση έχει οδήγηση στην δημιουργία ινών μετατοπισμένης διασποράς (DSF) στις οποίες το μήκος κύματος μηδενικής διασποράς είναι τα 1550 nm αντί τα 1310 nm αυτό επιτυγχάνεται διαμορφώνοντας τον δείκτη διάθλασης, επειδή ο απόλυτος μηδενισμός της διασποράς στα 1550nm ευνοεί μη γραμμικά φαινόμενα ιδιαίτερα στην τεχνική WDM (μετάδοση περισσότερων σημάτων με διαφορετικό μήκος κύματος για κάθε σήμα) για αυτό έχουν κατασκευαστεί ίνες που κρατούν πολύ χαμηλά την διασπορά στα 1550 nm NZ-DSF. Τέλος υπάρχουν και οι ίνες επίπεδης διασποράς όπου σε αυτές υπάρχει μηδενισμός διασποράς σε 2 μήκη κύματος έτσι δημιουργείται μια φασματική περιοχή μεταξύ αυτών των δυο μηκών κύματος που υπάρχει σταθερός συντελεστής ενδοτροπικής διασποράς

Τυποποίηση μονότροπων ινών.[11]

- Σύσταση G.652 : μηδενισμός διασποράς στα 1310nm
- Σύσταση G.653: DSF με μηδενισμό διασποράς στα 1550 nm
- Σύσταση G.655: NZ-DSF στα 1550 με $\tau_e = 2\text{ps/nm*km}$

2.2 Σπάνιες Γαίες

Οι σπάνιες γαίες ή λανθανίδες εξάγονται από το έδαφος και συνήθως βρίσκονται μαζί με άλλα μέταλλα και έχουν πάρει το όνομα σπάνιες γαίες λόγω της εξαιρετικής σπανιότητάς τους. Οι σπάνιες γαίες αλλιώς λανθανίδες χωρίζονται σε 3 υποομάδες .

Εικόνα 4.Περιοδικός πίνακας χημικών στοιχείων με επισήμανση του Ερβίου

Στην πρώτη ομάδα του περιοδικού πίνακα των χημικών στοιχείων συμπεριλαμβάνονται το λανθάνιο, δημήτριο, πρασεοδύμιο, νεοδύμιο, προμήθειο και σαμάριο. Κύριες πηγές εξαγωγής τους είναι ο αλλανίτης , μοζανίτης , τσερίτης.

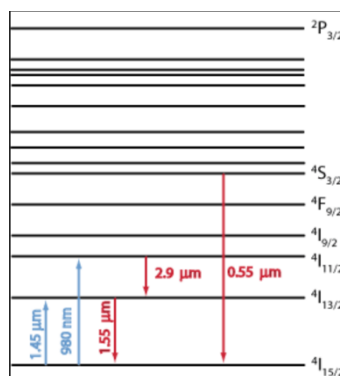
Στην δεύτερη ομάδα ανήκουν το ευρώπιο , γαδολίνιο , τέρβιο πηγές εξαγωγής τους είναι ο σαμαρσκήτης

Στην τρίτη ομάδα ανήκουν το δυσπρόσιο ,όλμιο ,ύττριο , έρβιο, θούλιο, υτέρβιο λουτέτσιο και πηγές εξόρυξης τους είναι ο γαδονίτης , ευξενίτης, φεργκιουσονίτης [14]

2.2.1 Το Έρβιο

Ιδιαίτερης σημασίας σπάνια γαία είναι το έρβιο όπου αρκετές εφαρμογές έχουν αναπτυχθεί γύρω από αυτό .Το έρβιο ανακαλύφθηκε το 1843 από τον Σουηδό χημικό Carl Gustaf Mosander. Το έρβιο είναι ένα χημικό στοιχείο το οποίο ανήκει στις σπάνιες γαίες ή λανθανίδες το σύμβολο του είναι το Er και ο ατομικός αριθμός του είναι 68.

Το Er(ιδιαίτερα τα τρισθενή ιόντα ερβίου Er^{+3}) μαζί με άλλες λανθανίδες χρησιμοποιούνται ευρέως στα οπτικά συστήματα (οπτικοί ενισχυτές , laser κλπ) . Ένα από τα στοιχεία που κάνει το έρβιο περιζήτητο στις οπτικές εφαρμογές είναι η δομή των ενεργειακών του σταθμών.



Εικόνα 5. Ενεργειακές καταστάσεις του Ερβίου

Παρατηρείται ότι χρειάζεται άντληση (οπτική) στα 980nm ή 1450nm και δίνει εκπομπή στα 1550nm , μήκος κύματος το οποίο είναι δημοφιλές στο χώρο των οπτικών επικοινωνιών και εφαρμογών λόγω της χαμηλής εξασθένησης που παρουσιάζει στις τυπικές οπτικές ίνες. Επίσης είναι σημαντικό και στον χώρο ιατρικών εφαρμογών καθώς η δυνατότητα εκπομπής στα 2940nm βοηθάει στις χειρουργικές επεμβάσεις καθώς απομακρύνει το νερό από τους ιστούς.[15]

2.2.2 Νοθευμένες οπτικές ίνες με σπάνιες γαίες

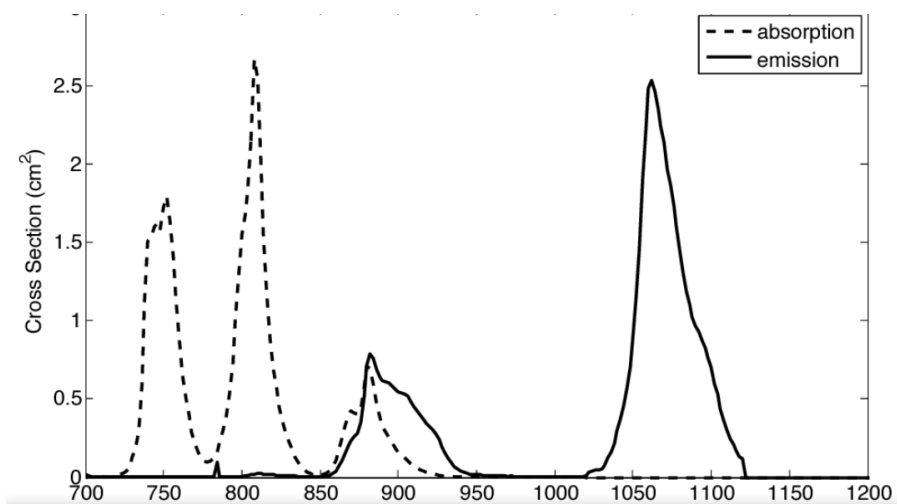
Στην διαμόρφωση των επιμέρους στοιχείων των οπτικών συστημάτων (πηγές laser, οπτικοί ενισχυτές κλπ) χρησιμοποιούνται οπτικές ίνες οι οποίες έχουν νοθευτεί (νόθευση πυρήνα) με χημικά στοιχεία και παράγωγα αυτών (ιόντα κλπ) τα οποία όπως έχουν αναφερθεί σε προηγούμενη ενότητα ονομάζονται σπάνιες γαίες , κυρίως ιόντα σπανίων γαιών. Η προτίμηση των ιόντων δεν είναι τυχαία καθώς τα μήκη κύματος που εκπέμπονται και απορροφούνται δεν επηρεάζονται από το υλικό (το υλικό του πυρήνα) που νοθεύονται τα ιόντα. Επίσης η διάρκεια ζωής των ηλεκτρονίων σε ανώτερες ενεργειακές καταστάσεις είναι αρκετά μεγάλη ώστε όταν αυτά αποδιεγερθούν είτε αυθόρμητα είτε εξαναγκασμένα θα δώσουν φωτόνια. [3,5]

Ακολουθούν οι πιο δημοφιλείς νοθευμένες οπτικές ίνες

Ιόντα σπανίων γαιών	Μήκος κύματος εκπομπής
Νεοδύμιο (Nd^{3+})	1.03–1.1 μm 0.9–0.95 μm ,1.32–1.35 μm
Υττέρβιο (Yb^{3+})	1 μm – 1.1 μm
Έρβιο (Er^{3+})	1.5 μm -1.6 μm , 2.7 μm , 0.55 μm
Θούλιο (Tm^{3+})	1.7–2.1 μm , 1.45–1.53 μm , 0.48 μm , 0.8 μm
Πρασεοδύμιο (Pr^{3+})	1.3 μm , 0.635 μm , 0.6 μm , 0.52 μm , 0.49 μm
Όλμιο (Ho^{3+})	2.1 μm , 2.9 μm

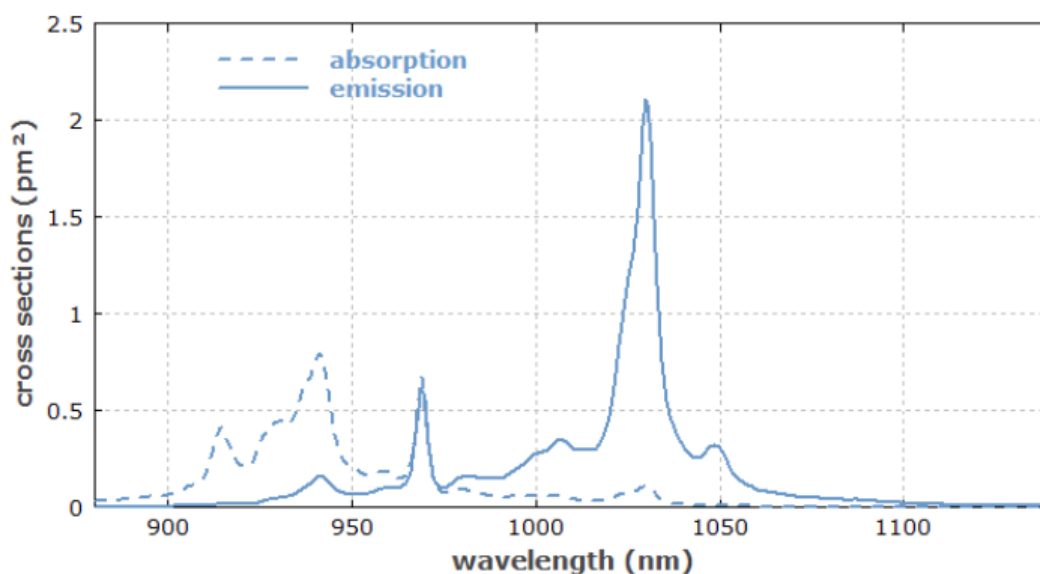
Πίνακας 7. Σπάνιες γαίες που νοθεύονται στις οπτικές ίνες καθώς και μήκη κύματος εκπομπής [3,5]

Οι νοθευμένες οπτικές ίνες εκτός από τα χαρακτηριστικά που έχουν οι συμβατικές οπτικές ίνες διάδοσης (περιοχή μηκών κύματος λειτουργίας , απώλειες κάμψης , γωνίες διάδοσης). Επιπλέον χαρακτηριστικά των νοθευμένων ινών είναι : η συγκέντρωση των ιόντων σπανίων γαιών η οποία συνήθως εκφράζεται σε ppm wt (parts per million κατά βάρος). Μια πολύ υψηλή συγκέντρωση έχει ως συνέπεια την απορρόφηση της ισχύος άντλησης σε μικρό μήκος της νοθευμένης ίνας. Επίσης πρέπει να γίνει μελέτη των καμπυλών απορρόφησης και εκπομπής οι οποίες είναι συναρτήσεις του μήκους κύματος, με αυτές τις καμπύλες υπάρχει εικόνα για την εκπομπή της ισχύος (σε ποιο μήκος κύματος). [3,5]



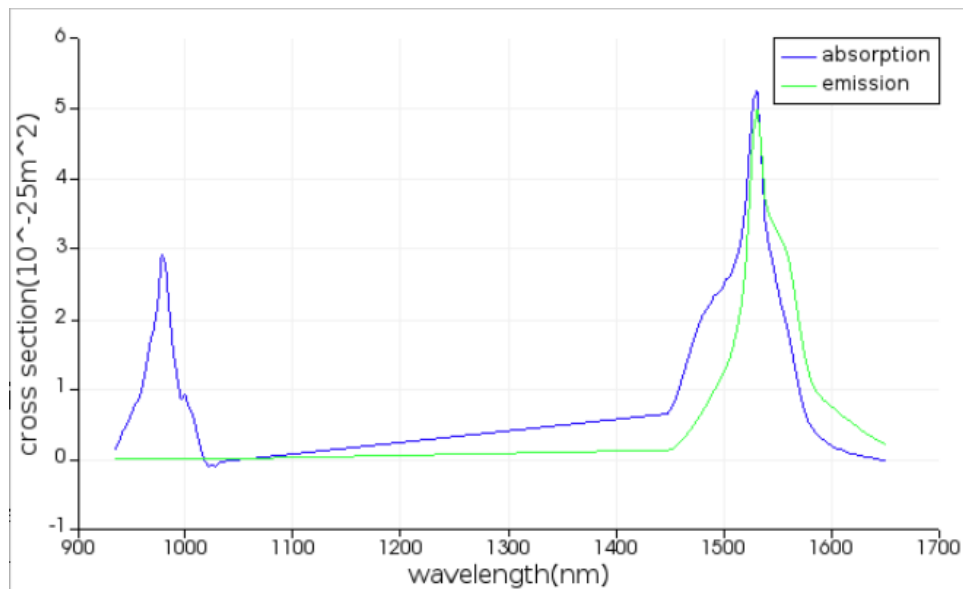
Εικόνα 6.Νεοδύμιο [16]

Στην Εικόνα 6 εμφανίζονται οι καμπύλες απορρόφησης και εκπομπής του Νεοδυμίου, στον οριζόντιο άξονα είναι τα μήκη κύματος σε nm. Εφαρμογές στις οποίες είναι χρήσιμη η συμμετοχή του νεοδυμίου μαζί με το ύτριο το γρανάτη και το αργίλιο (Nd-YAG laser) είναι στην βιομηχανία συγκόλληση – διάνοιξη οπών, στην ιατρική στα χειρουργεία κυρίως καυτηριάσεις, σε στρατιωτικές εφαρμογές για μετρήσεις μεγάλων αποστάσεων[12].



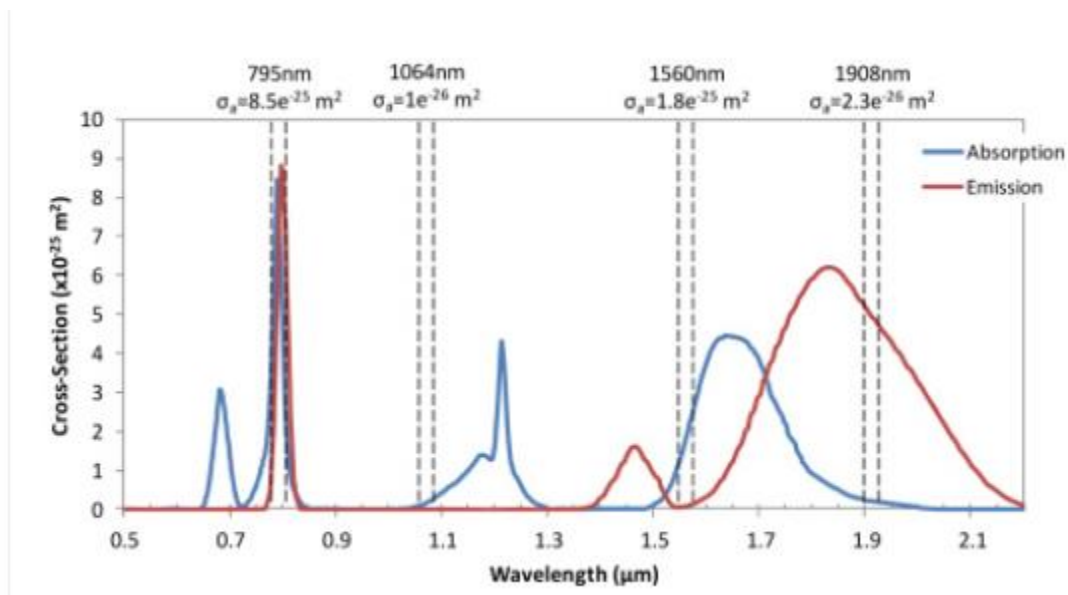
Εικόνα 7.Υτέρβιο[17]

Στην Εικόνα 7 εμφανίζονται οι καμπύλες απορρόφησης και εκπομπής του Υτέρβιου. Τα laser που εμπεριέχουν υτερβιο έχουν την ικανότητα να βγάζουν μεγάλα ποσά ισχύος. Περιζήτητα είναι σε εφαρμογές τηλε-επικοινωνιών ελευθέρου χώρου, σε βιοιατρικές διαγνώσεις.[7]



Εικόνα 8. Έρβιο[18]

Στην Εικόνα 8 εμφανίζονται οι καμπύλες απορρόφησης και εκπομπής του Ερβίου . Τα laser ερβίου χρησιμοποιούνται αρκετά στον τομέα των τηλεπικοινωνιών επίσης βρίσκουν εφαρμογή και σε ορθοδοντικές επεμβάσεις.[10]



Εικόνα 9.Θούλιο[19]

Στην Εικόνα 9 εμφανίζονται οι καμπύλες απορρόφησης και εκπομπής του Θούλιου . Τα laser με βάση το Θούλιο χρησιμοποιούνται στην ιατρική, σε οπτική άντληση, για την μελέτη μη γραμμικών φαινομένων καθώς και σε αμυντικά συστήματα . Τα laser Θουλίου βγάζουν αρκετή ισχύ (30W στην έξοδο).[4]

3 Οπτικοί Ενισχυτές και laser με βάση νοθευμένες οπτικές ίνες

Σε αυτό το κεφάλαιο παρουσιάζεται το πώς αξιοποιούνται οι νοθευμένες οπτικές ίνες , έτσι ώστε να γεννηθούν συστήματα όπως είναι οι ενισχυτές και laser. Επίσης επισημάνεται η διαφορά τους όταν χρησιμοποιείται διαφορετικό στοιχείο νόθευσης στις οπτικές ίνες γεγονός που οδηγεί αυτά τα συστήματα στο να είναι ευπροσάρμοστα σε διαφορές εφαρμογές. Κυρίως όμως το έρβιο είναι αυτό που θα επικρατήσει .

3.1 Οπτικοί ενισχυτές

Στις αρχές της δεκαετίας του 1990 προκειμένου να επιτευχθούν μεταδόσεις σε μεγάλες αποστάσεις χρησιμοποιούνταν ηλεκτροπτικούς αναγεννητές , δηλαδή αυτά τα συστήματα αντλούσαν το οπτικό σήμα μέσω ενός οπτικού δεκτή το έκαναν ηλεκτρικό το ενίσχυαν (ηλεκτρικά) και στην συνέχεια το διαμόρφωναν με laser ώστε να ξαναγίνει οπτικό το σήμα. Αυτό το υβριδικό σύστημα έχει πολύ υψηλό κόστος και είναι δύσκολη η εγκατάσταση του και επίσης δρα σαν τροχοπέδη στις δυνατότητες της ίνας κυρίως όταν έχουμε διάδοση πολλαπλών μηκών κύματος διάδοσης. Η λύση στα παραπάνω προβλήματα δόθηκε και ήταν καθαρά οπτική λύση που ακούει στο όνομα οπτικός ενισχυτής . Ο οπτικός ενισχυτής ήρθε ώστε να ρίξει το κόστος της ζεύξης και να εκμεταλλευτεί στο έπακρον τις δυνατότητες της οπτικής ίνας και φυσικά πιο εύκολη εγκατάσταση.

Οι οπτικοί ενισχυτές που χρησιμοποιούνται σήμερα είναι κυρίως ενισχυτές ίνας ερβίου (EDFA) και λειτουργούν κυρίως στο παράθυρο των 1550nm για σκοπούς οπτικών επικοινωνιών. Το βασικό στοιχείο του ενισχυτή είναι η οπτική ίνα (ορισμένου μήκους),η οποία είναι νοθευμένη με ιόντα ερβίου. Εφόσον η ίνα τροφοδοτηθεί με δέσμη laser άντλησης (pump laser) ξεκινάει μια διαδικασία γνωστή ως ανάστροφη πληθυσμών δηλαδή έχουμε συσσώρευση ηλεκτρονίων στις ανώτερες ενεργειακές καταστάσεις και έπειτα μέσω της εξαναγκασμένης αποδιέγερσης (η οποία προκαλείται από τα φωτόνια του σήματος προς ενίσχυση) προκύπτει η ενίσχυση του οπτικού σήματος στην περιοχή 1525-1565 nm, καθώς μιλάμε για ενισχυτή ερβίου. Αν θέλαμε να δούμε κάποιες μαθηματικές σχέσεις που περιγράφουν την αναστροφή των πληθυσμών σε συστήματα όπως οι οπτικοί ενισχυτές θα ήταν οι εξής , (θεωρούμε ότι το ενεργό μέσο έχει 3 ενεργειακές καταστάσεις).[1,8,9]



Εικόνα 10. 3 Ενεργειακές καταστάσεις

Σε κάθε ενεργειακή κατάσταση έχουμε τους αντίστοιχους πληθυσμούς ηλεκτρονίων , δίχως καμία διέγερση τα ηλεκτρόνια έχουν την τάση να βρίσκονται σε χαμηλότερες στοιβάδες (ελαχίστης ενεργείας).

$$\frac{\partial N_1}{\partial t} = A_{21}N_2 + W_{21}N_2 - W_{12}N_1 - RN_1 + R'N_3 \quad (1)$$

$$\frac{\partial N_2}{\partial t} = A_{32}N_3 - A_{21}N_2 - W_{21}N_2 + W_{12} + N_1 \quad (2)$$

$$\frac{\partial N_3}{\partial t} = A_{32}N_3 - A_{21}N_2 - W_{21}N_2 + W_{12} + N_1 \quad (3)$$

$$N_T = N_1 + N_2 + N_3 \quad (4)$$

N1	Πληθυσμός στην Ε.Κ 1
N2	Πληθυσμός στην Ε.Κ 2
N3	Πληθυσμός στην Ε.Κ 3
A	Αυθόρμητη εκπομπή , μη ακτινοβολούσα μετάβαση
W	Εξαναγκασμένη Αυτοδιέγερση από το σήμα διέλευσης
R	Απορρόφηση από την άντληση
Nt	Συνολικός πληθυσμός

Πίνακας 8. Οι οροί των εξισώσεων

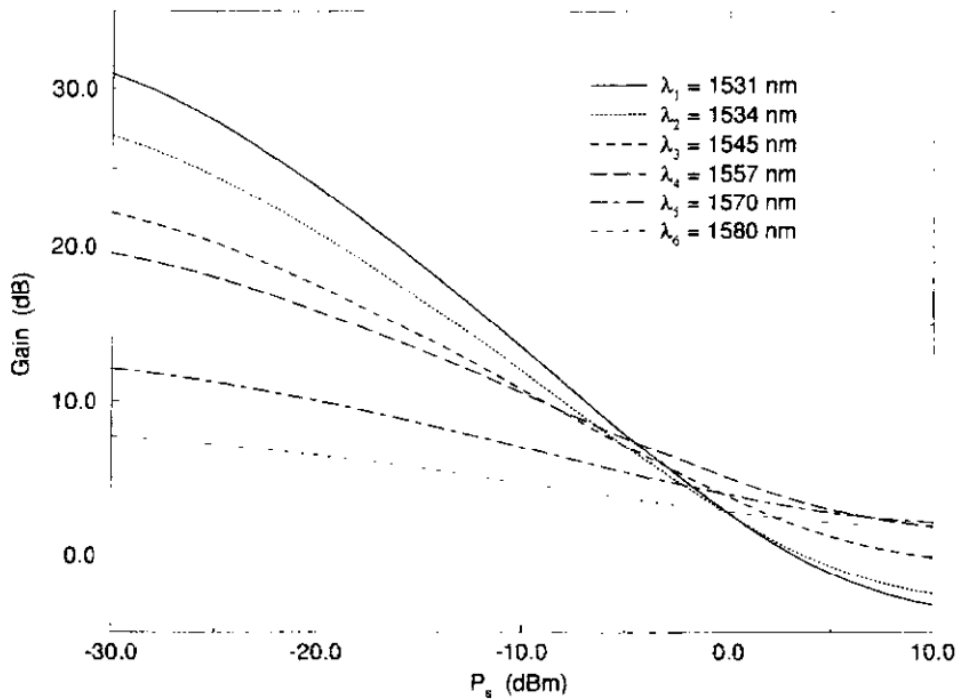
Όσο αναφορά την ισχύ ισχύουν οι παρακάτω εξισώσεις.

$$\frac{dP_p(z)}{dz} = \gamma_p(z)P_p(z) \quad (5)$$

$$\frac{dP_s(z)}{dz} = [\gamma_{21}(z) - \gamma_{12}(z)]P_s(z) \quad (6)$$

$$\frac{dP_{ASE}(z)}{dz} = [\gamma_{21}(z) - \gamma_{12}(z)]P_{ASE}(z) + m * h * f * \Delta f * \gamma_{21}(z) \quad (7)$$

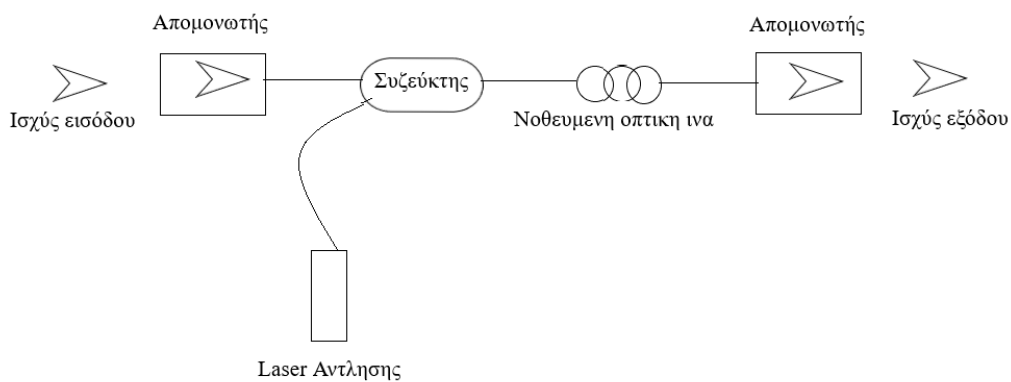
Στις παραπάνω εξισώσεις (5,6,7) περιγράφεται η ισχύς συνάρτηση της διάδοσης μέσα στην οπτική ίνα P_p :ισχύς άντλησης , P_s : ισχύς σήματος , P_{ase} : ισχύς κόρου . Το γ αναπαριστά συντελεστές απορρόφησης και εκπομπής της άντλησης και του σήματος. Στην εξίσωση 7 το Δf είναι το εύρος εξέτασης γύρω από κάθε συχνότητα με κεντρική συχνότητα f , το m δείχνει τον αριθμό των τρόπων που κυματοδηγούνται , το h είναι η σταθερά του πλανκ.[1,8,9]



Εικόνα 11.Κέρδος VS Ισχύς εισόδου

Στην εικόνα 11 παρουσιάζεται το κέρδος κάθε μήκους κύματος σε ένα 5.4 μέτρα. Προφανώς υπάρχουν και ενισχυτές που χρησιμοποιούν άλλες σπάνιες γαίες και απευθύνονται σε άλλου είδους εφαρμογές καθώς έχουν διάφορο παράθυρο δράσης μηκών κύματος.[1,8,9]

Η βασική δομή του οπτικού ενισχυτή μπορεί να είναι η εξής:



Εικόνα 12.Δομή οπτικού ενισχυτή

Οι απομόνωνες χρησιμοποιούνται ώστε να αποκλειστούν τυχόν ανακλάσεις δημιουργώντας προσθήκες θορύβου. Το rump laser βρίσκεται κυρίως στα 980 nm ή στα 1480 nm αυτά τα μήκη κύματος άντλησης τα απαιτεί το έρβιο ώστε να γίνει η ανάστροφη των πληθυσμών. Υπάρχουν και άλλες τοπολογίες που παίζουν με το κέρδος και τον θόρυβο.

Ο πυρήνας της ίνας πρέπει να είναι σε μέγεθος τέτοιο ώστε να είναι μονότροπη. Το μήκος της ίνας είναι άρρηκτα συνδεδεμένο με τις προσμίξεις ιόντων , άμα έχουμε χαμηλή συγκέντρωση θέλουμε μεγαλύτερο μήκος ίνας , ενώ άμα έχουμε υψηλή συγκέντρωση θέλουμε μικρότερο μήκος ίνας για να επιτύχουμε το ίδιο κέρδος.

Στα πλεονεκτήματα του οπτικού ενισχυτή εισάγεται το γεγονός ότι ενισχύεται ότι εισέρχεται δηλαδή ο ενισχυτής είναι αδιάφορος ως προς τον αριθμό , τον ρυθμό μετάδοσης των σημάτων.

Μεγάλο εύρος ζώνης , στο παράθυρο των 1550 nm(1525-1565nm) δηλαδή σε μια ζώνη 40 nm που μεταφράζεται σε 5028GHz.

Στα μειονεκτήματα μπορούν να εισαχθούν η ανομοιομορφία στο κέρδος και η δημιουργία θορύβου εξαιτίας της αυθόρμητης εκπομπής.

Υπάρχουν ενισχυτές όπου η νόθευση που χρησιμοποιείται στην οπτική ίνα είναι το πρασεοδύμιο και ονομάζονται PDFA. Αυτοί οι ενισχυτές λαμβάνουν χωρά στο παράθυρο 1260-1360 nm. Σε αυτήν την περιοχή αναπτύσσονται εφαρμογές που αφορούν κέντρα δεδομένων (υψηλή ταχύτητα Ethernet), δίκτυο του μετρό, και για δίκτυα όπου οι αποστάσεις είναι μικρότερες των 100km. Αυτοί οι ενισχυτές χρειάζονται άντληση στα 1020nm ή 1047nm (λόγω πρασεοδυμίου)

Εν συνεχεία υπάρχουν ενισχυτές που βασίζονται στο υτέρβιο (YDFA) που υπόσχονται μεγάλες επιδόσεις στο παράθυρο 1.03μ-1.1μm και άντληση στα 975 nm μπορεί η ισχύς εξόδου να φτάσει και kW.

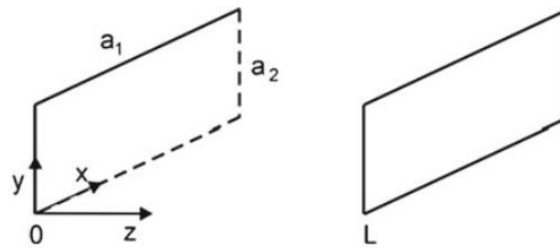
Ακολουθούν οι ενισχυτές που βασίζονται στο θόλιο (TDFA) με άντληση στα 1047nm ή 1400nm και χρησιμοποιούνται για τις τηλεπικοινωνίες στο παράθυρο 1460–1530 nm [1,2,8,9]

3.2 Laser βασισμένα σε νοθευμένες οπτικές ίνες

Προκειμένου να δημιουργηθεί ένα laser γενικά χρειάζονται 3 βασικά στοιχεία. Το πρώτο είναι το ενεργό υλικό (σπάνιες γαίες κατά κύριο λόγο Er κλπ.) , τέτοιο υλικό του οποίου οι ιδιότητες επιτρέπουν την εκπομπή φωτονίων , ακολουθεί η κοιλότητα η οποία είναι υπεύθυνη για την σύμφωνη δεσμίδα φωτός καθώς και για το μήκος κύματος εκπομπής του laser (σε συνδυασμό με το ενεργό υλικό), και έπεται η άντληση κατά την οποία διεγείρονται τα ηλεκτρόνια του ενεργού υλικού σε ανώτερες στοιβάδες και να δημιουργηθεί η ανάστροφη των πληθυσμών ώστε με την αυτοδιέγερση (αρχικά αυθόρμητη και εν συνεχεία εξαναγκασμένη) τους να προσδώσουν φωτόνια που θα συνθέσουν την δέσμη φωτός.[20]

Κοιλότητες

Η κοιλότητα Fabry-Perrot αποτελείται από δυο ορθογωνίους καθρέπτες οι όποιοι είναι παράλληλοι μεταξύ τους και σε συγκεκριμένη απόσταση μεταξύ τους



Εικόνα 13. Σχηματική αναπαράσταση κοιλότητας Fabry Perrot[8]

Ιδανικά οι καθρέπτες θα πρέπει να έχουν 100% ανακλαστικότητα (ίσως ο δεύτερος να έχει λίγο λιγότερο ώστε να έχουμε έξοδο). Για τον καθορισμό του μήκους κύματος εξόδου κύριο ρολό παίζει η απόσταση των καθρεπτών και δίνεται από την σχέση

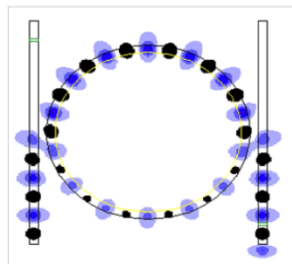
$$f_l = l * \frac{c}{2L}$$

f_l : συχνότητα (Hz) , l : ακέραιος αριθμος που δειχνει την σειρα που εχουμε συντονισμο , c : ταχύτητα του φωτός ,σταθερά (m/s). L : απόσταση των καθρεπτών (m) [8]

Η κοιλότητα του δακτυλίου (ring resonator) , η λογική σε αυτήν την κοιλότητα είναι όταν το φως εισέρθει μέσα στην κυκλική κοιλότητα και να κυματοδηγηθεί ώστε να βγει ενισχυμένο στην έξοδο μέσω των πολλαπλών περιφορών εντός της κοιλότητας. Σε κάθε περιφορά θα έχουμε συνδυασμό του φωτός που έρχεται από την είσοδο του δακτυλίου με το ήδη υπάρχων μέσα στο δακτύλιο , έτσι προκύπτει η ενίσχυση στην έξοδο του δακτυλίου , βεβαία ο δακτύλιος θα επιτρέψει ποια μήκη κύματος θα συντηρηθούν και ποια θα αποκοπούν , ουσιαστικά θα μπορούσαμε να πούμε ότι δρα σαν φίλτρο. Η βασική σχέση που καθορίζει τα μήκη κύματος που θα συντηρηθούν και θα βγουν ενισχυμένα στην έξοδο είναι η εξής :

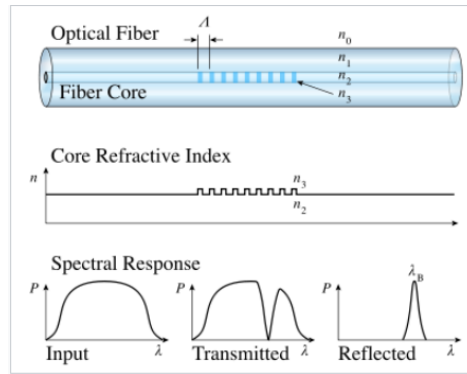
$$2\pi Rn = m * \lambda_m$$

R : ακτίνα δακτυλίου(m) , m : ακέραιος που δείχνει την σειρά συντονισμού , λ : το μήκος κύματος που συντηρείται(m) n : δείκτης διάθλασης .[21]



Εικόνα 14. Σχηματική αναπαράσταση για την κυκλική κοιλότητα[21]

Ακολουθεί μια τεχνική που ονομάζεται Fiber Brag Grading (FBG) κατά την οποία επηρεάζεται ο δείκτης διάθλασης του πυρήνα της οπτικής ίνας έτσι ώστε να έχουμε ανάκλαση κάποιου μήκους και την αγνόηση των υπολοίπων επομένως θα μπορούσε να διαμορφωθεί laser αξιοποιώντας δυο FBG ώστε να δημιουργηθεί κάποιου είδους ευθείας κοιλότητας.

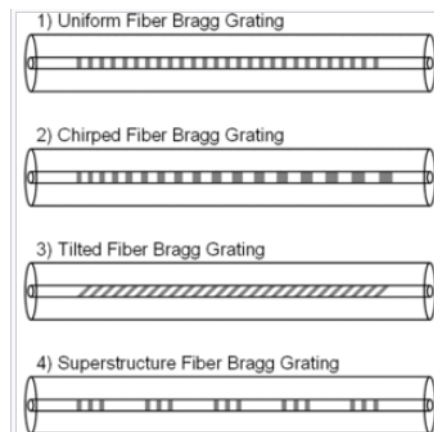


Εικόνα 15. Απεικόνιση δράσης FBG[22]

Όπως και οι προηγούμενες κοιλότητες έτσι και αυτή χαρακτηρίζεται από κάποια σχέση. Το μήκος κύματος που θα ανακλαστεί πάνω στο fbg δίνεται από την εξής σχέση

$$\lambda = 2n\Lambda$$

λ : μήκος κύματος που αποκόπτεται , n : μέσος δείκτης διάθλασης , Λ : η περιodicότητα της εναλλαγής του δείκτη διάθλασης του πυρήνα κατά μήκος της ίνας [22]



Εικόνα 16. Τρόποι κατασκευής FBG[22]

Άντληση

Υπάρχουν διάφορα είδη άντλησης τα όποια είναι σε άμεση συνάρτηση με την φυσική υπόσταση του laser (αερίου, ημιαγωγού, οπτικής ίνας κλπ) . Στην περίπτωση του laser με οπτική ίνα η άντληση πρέπει να γίνει οπτικά , δηλαδή μέσω ενός άλλου laser σε συγκεκριμένο μήκος κύματος . Κάποια είδη οπτικής άντλησης είναι τα εξής

Άντληση φακός (flashlight): Σε αυτήν την άντληση εκπέμπεται ευρύ φάσμα φωτός με συνέπεια την σπάταλη ενεργείας με την μορφή θερμότητας στο ενεργό μέσο.

Arc lamp pumping: Βασίζονται στην εκτόνωση ευγενών αερίων (ξενο , αργο, νεον, ηλιο) , χρησιμοποιείται κυρίως για άντληση laser που έχουν εφαρμογή κοντά στο υπέρυθρο .

Εξωτερικό laser : Προκειμένου να είναι ένα laser για χρήση άντληση , πρέπει το φάσμα του να είναι εξαιρετικά στενό και κεντραρισμένο στο μήκος κύματος που απαιτείται από το ενεργό υλικό.[23]

4 Προσομοίωση Οπτικού ενισχυτή

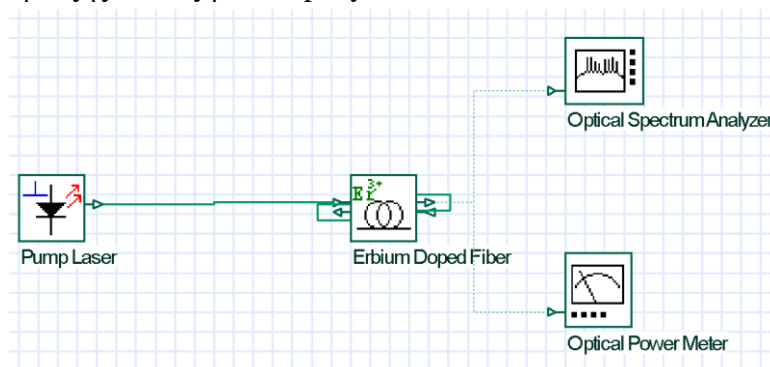
Το πρόγραμμα προσομοίωσης που χρησιμοποιήσαμε για τα πειράματά μας (προσομοιώσεις) το έχει δημιουργήσει η Opt wave Systems Inc. Το Optisystem χρησιμοποιείται ευρέως από επιστήμονες, μηχανικούς και φοιτητές οι οποίοι ασχολούνται με τις τεχνολογίες διάδοσης, διαμόρφωσης του φωτός καθώς η διαχείριση του φωτός είναι μια περιπλοκή διαδικασία που περιλαμβάνει επίπονες διαδικασίες με βαριές μαθηματικές εξισώσεις, μέσω αυτού του προγράμματος επιτρέπεται η “άγνοια” των περίπλοκων αυτών υπολογισμών ώστε να μεταβούμε στην ουσία του αντικείμενου των οπτικών επικοινωνιών-τεχνολογιών.

Το Opti system μας δίνει την δυνατότητα να επέμβουμε σε οποιοδήποτε σημείο του συστήματος που έχουμε δημιουργήσει και να κάνουμε τροποποιήσεις. (πχ αλλαγή μήκους οπτικής ίνας, τοποθέτηση μετρικού οργάνου σε κάποιο σκοτεινό σημείο που δεν έχουμε δεδομένα κλπ.)

Εμπεριέχει global ρυθμίσεις που επηρεάζουν τις προσομοιώσεις έτσι ώστε να μπορέσουμε να πλαισιώσουμε το πρόγραμμα προσομοίωσης όσο πιο κοντά γίνεται με τα πραγματικά εργαλεία που έχουμε στο εργαστήριο (OSA, πηγές laser κλπ). Επίσης μέσω αυτών των ρυθμίσεων μπορούμε να προσδιορίσουμε και την ακρίβεια των πειραμάτων δηλαδή ποσό κοντά στην πραγματικότητα θέλουμε να είμαστε, βεβαία αυτό κοστίζει σε χρόνο και σε υπολογιστική ισχύς. Μας δίνει την δυνατότητα να μελετήσουμε το σύστημα μας και σε χρόνο και σε συχνότητα. Απαραίτητο να σημειωθεί είναι ότι γενικά είναι εύχρηστο με μεγάλη επιείκεια θα μπορούσαμε να πούμε ότι είναι Drag and Drop πρόγραμμα δηλαδή δεν είναι απαραίτητη η σύνθεση κώδικα προκειμένου να στήσουμε ένα πείραμα. [6]

4.1 Χαρακτηρισμός του ενεργού υλικού - Έρβιου

Προκειμένου να χαρακτηρίσουμε τις οπτικές ίνες οι οποίες είναι νοθευμένες με Έρβιο δημιουργήσαμε την εξής διάταξη στο Optisystem.



Εικόνα 17.Κύκλωμα στο Optiwave για χαρακτηρισμό Έρβιου

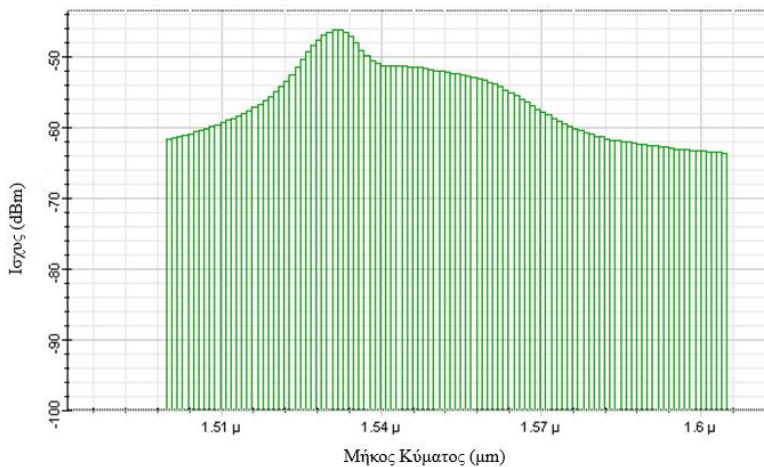
Αυτό το κύκλωμα αποτελείται από:

Το Pump laser το οποίο έχουμε βάλει στα 980nm να βγάζει την ισχύ του.

Την οπτική ίνα νοθευμένη με Έρβιο (Erbium doped fiber)

Τα μετρητικά μας όργανα (OSA, OPM)

Προτού προχωρήσουμε στις οπτικές ίνες παρακάτω φαίνεται το φάσμα του Ερβίου , δηλαδή η αυθόρμητη εκπομπή.



Εικόνα 18.Φάσμα Ερβίου

Ο χαρακτηρισμός έγινε σε δυο ειδών EDF κατά κύριο λόγο, όπου ο διαχωρισμός έγινε με βάση την νόθευση τους επίσης κάναμε μεταβολές και στα μήκη των EDF.

Έτσι λοιπόν έχουμε την Er 110 4/125 και την Er 30 4/125 της εταιρίας Liekki.

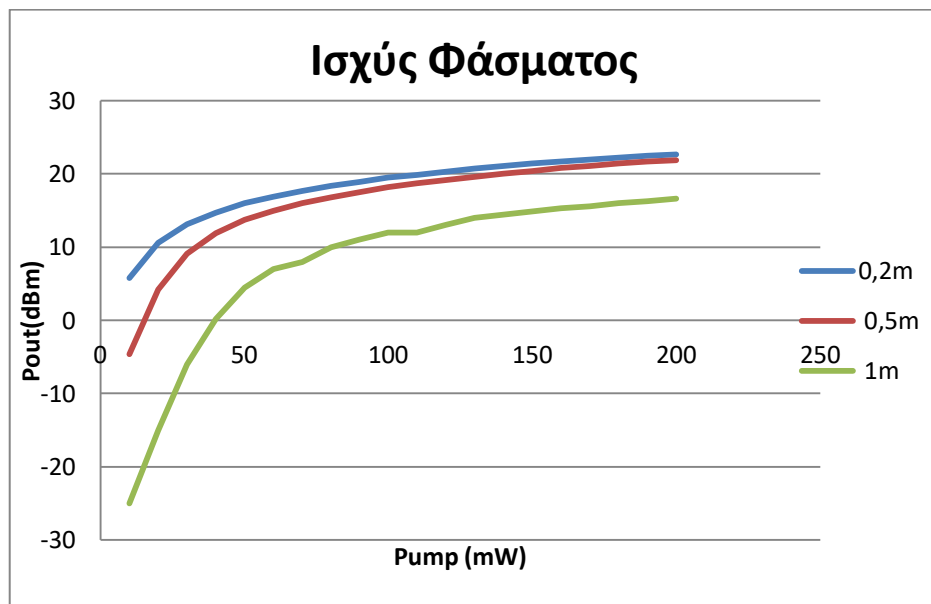
Ας ξεκινήσουμε με την Er 110, της οποίας τα στοιχεία είναι τα εξής

Μήκος EDF(m)	Ακτίνα πυρήνα (um)	Έκταση νόθευσης πυρήνα(um)	Πυκνότητα ιόντων Ερβίου (νόθευση)(ppm)	Numerical aperture	Er metastable lifetime(ms)
0.2, 0.5, 1	4	4	5028	0.24	9

Πίνακας 9. Στοιχεία νοθευμένης ίνας Er 110

Η ισχύς του pump ξεκάνει από τα 10 mW έως 200 mW. Τα αποτελέσματα που πήραμε είναι τα εξής:

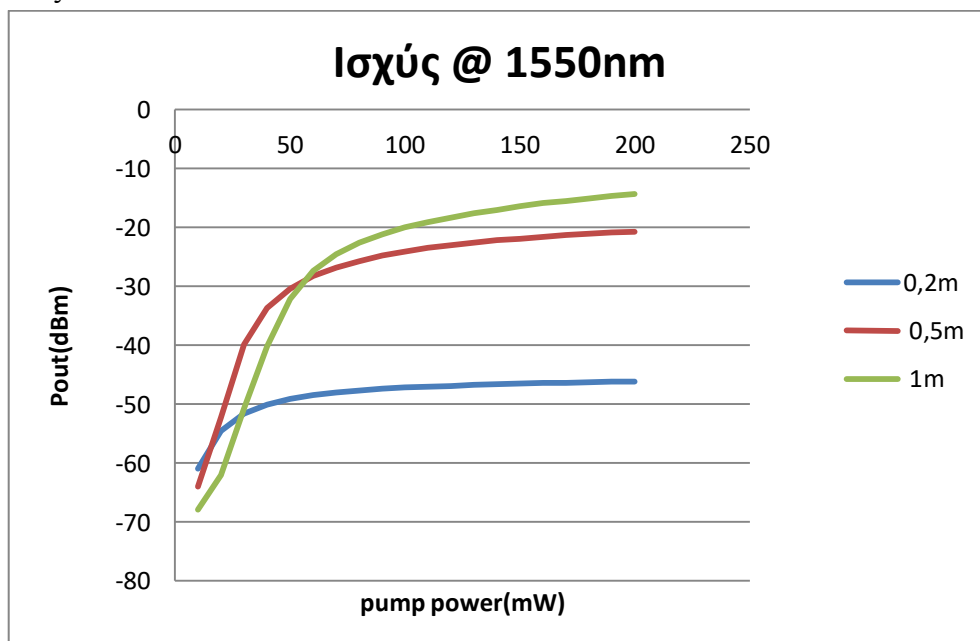
Οι καμπύλες που ακολουθούν είναι οι μετρήσεις του Optical Power Meter



Εικόνα 19 Ισχύς ολικού φάσματος

Παρατηρούμε πως η ίνα με το μικρότερο μήκος βγάζει στην έξοδο της μεγαλύτερη ισχύ σε σχέση με τις υπόλοιπες που έχουν μεγαλύτερο μήκος, το γεγονός αυτό μπορεί να οφείλεται στο ότι έχουμε 110 db/m (στα 1530nm έχει μέγιστη απορρόφηση) απώλειες άρα όσο αυξάνεται το μήκος έχουμε περισσότερες απώλειες.

Έπειτα ακολουθούν τα αποτελέσματα του Optical Spectrum Analyzer, όπου εκεί βλέπουμε ένα συγκεκριμένο μήκος κύματος τα 1550 nm, το οποίο είναι χρήσιμο για τις οπτικές επικοινωνίες.



Εικόνα 20. Μέτρηση ισχύος συγκεκριμένου μήκους κύματος 1550nm

Παρατηρούμε ότι αντιστράφηκαν οι ρόλοι και έχουμε την ίνα με το μεγαλύτερο μήκος να βγάζει περισσότερη ισχύ στα 1550nm από τις υπόλοιπες ίνες, αυτό το γεγονός μπορεί να οφείλεται στο ότι αφού έχουμε μεγαλύτερο μήκος ίνας έχουμε και περισσότερα ηλεκτρόνια στις ακτινοβολούσες καταστάσεις (ενεργειακές στάθμες) που περιμένουν να αποδιεγερθούν και να δώσουν φωτόνια.

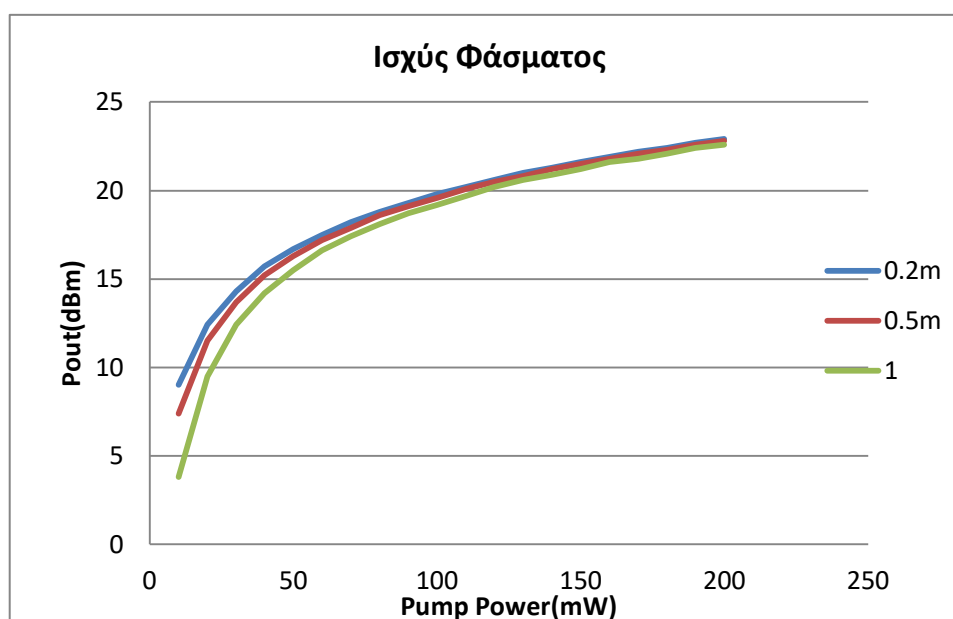
Ακολουθούν οι ίδιες διαδικασίες με αντικατάσταση της EDF Er110 με την Er 30, τα στοιχεία της είναι ίδια με της προηγούμενης εκτός από τη νόθευση.

Μήκος EDF(m)	Ακτίνα πυρήνα (um)	Έκταση νόθευσης πυρήνα(um)	Πυκνότητα ιόντων Ερβίου (νόθευση)(ppm)	Numerical aperture	Er metastable lifetime(ms)
0.2, 0.5, 1	4	4	1371	0.24	9

Πίνακας 10. Στοιχεία νοθευμένης ίνας Er 30

Η ισχύς που pump ξεκάνει από τα 10 mW έως 200 mW, τα αποτελέσματα που πήραμε είναι τα εξής:

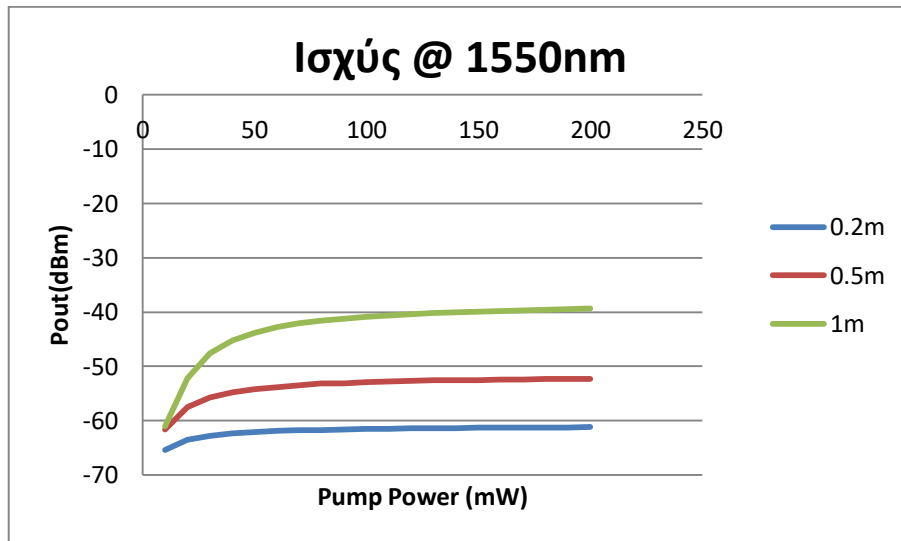
Οι καμπύλες που ακολουθούν είναι οι μετρήσεις του Optical Power Meter



Εικόνα 21. Μέτρηση ισχύος ολικού φάσματος

Εδώ παρατηρούμε ότι συγκλίνουν και τα τρία μήκη ίνας, γεγονός που μπορεί να οφείλεται ότι λόγω της χαμηλής νόθευσης δεν έχουμε μεγάλη απορρόφηση (30db/m)

Έπειτα ακολουθούν τα αποτελέσματα του Optical Spectrum Analyzer στα 1550nm



Εικόνα 22. Ισχύς στα 1550nm

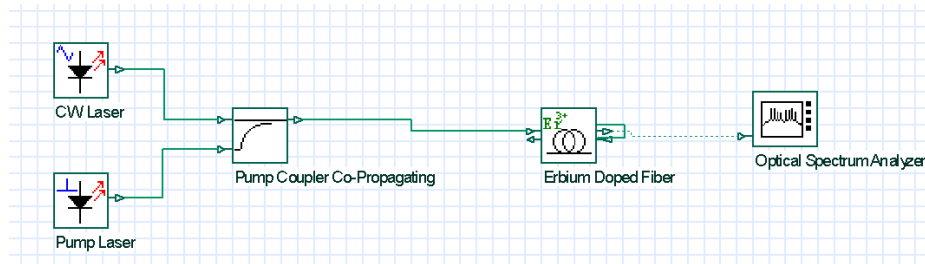
Επαληθεύεται και πάλι το γεγονός ότι η μεγαλύτερη ίνα βγάζει μεγαλύτερη ισχύ από τις υπόλοιπες μικρότερες, όμως με πολύ μικρότερη ισχύ σε σχέση με την Er 110. Αυτό είναι σαν αποτέλεσμα της μεγάλης διαφοράς στην νόθευση.

4.2 Προσομοίωση οπτικού ενισχυτή με νοθευμένη οπτική ίνα Ερβίου(EDFA)

Για τον χαρακτηρισμό του EDFA πραγματοποιήσαμε δυο σενάρια για τις οπτικές ίνες EDF 110, 30, το πρώτο αφορά την εναλλαγή τιμών ισχύος της άντλησης κρατώντας σταθερή την τιμή ισχύος του σήματος εισόδου και στο δεύτερο αντιστρόφως κρατήσαμε σταθερή την τιμή ισχύος στην άντληση και κάναμε εναλλαγές στις τιμές ισχύος της εισόδου.

4.2.1 Το πρώτο σενάριο για τον EDFA

Στην προσομοίωση που ακολουθεί θα εξετάσουμε την EDF Er 110, 30 ως προς τη δυνατότητα τους να ενισχύσουν ένα οπτικό σήμα με διαφορετικές τιμές ισχύος της άντλησης. Το παρακάτω κύκλωμα είναι αυτό που δημιουργήσαμε στο Optisystem



Εικόνα 23. Τοπολογία 1^ο σεναρίου EDFA

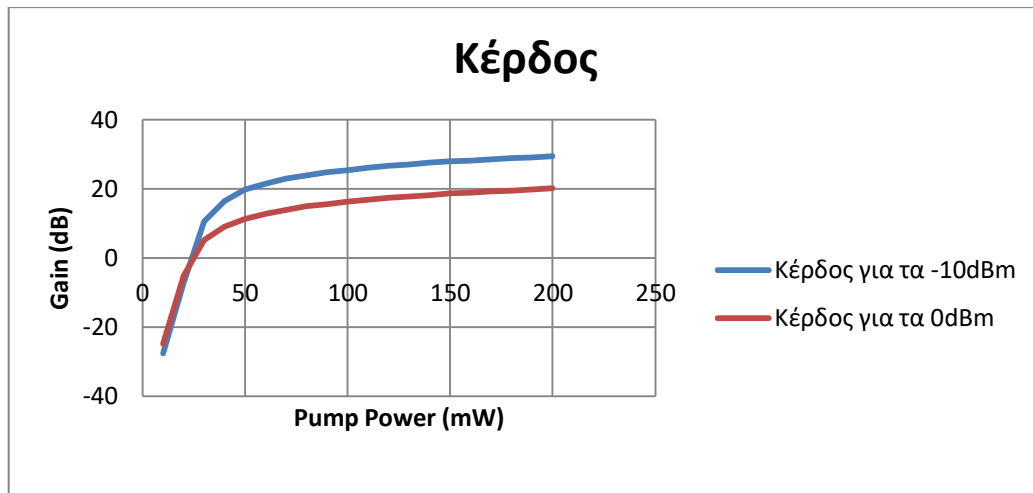
Έχουμε το CW laser το οποίο εξάγει το οπτικό μας σήμα στα 1550nm και ισχύες στα 0dbm και -10dbm.

Το Pump laser που κάνουμε την άντληση με ισχύες από 10mW έως 200 mW στα 980nm Τον οπτικό συζεύκτη (Pump coupler) ο οποίος συνδέει τα δυο μήκη κύματος (980nm και 1550nm)

Την νοθευμένη ίνα (EDF) , της οποίας επιλέξαμε το μήκος να είναι 1 μέτρο

Ο οπτικός αναλυτής φάσματος που παίρνουμε τις μετρήσεις μας.

Ακολουθούν οι καμπύλες κέρδους για την Er 110



Εικόνα 24 .Κέρδος σε συνάρτηση με τη ισχύς άντλησης Er110

Η κόκκινη καμπύλη αντιστοιχεί στην ισχύ εισόδου που ισούται με 0dbm

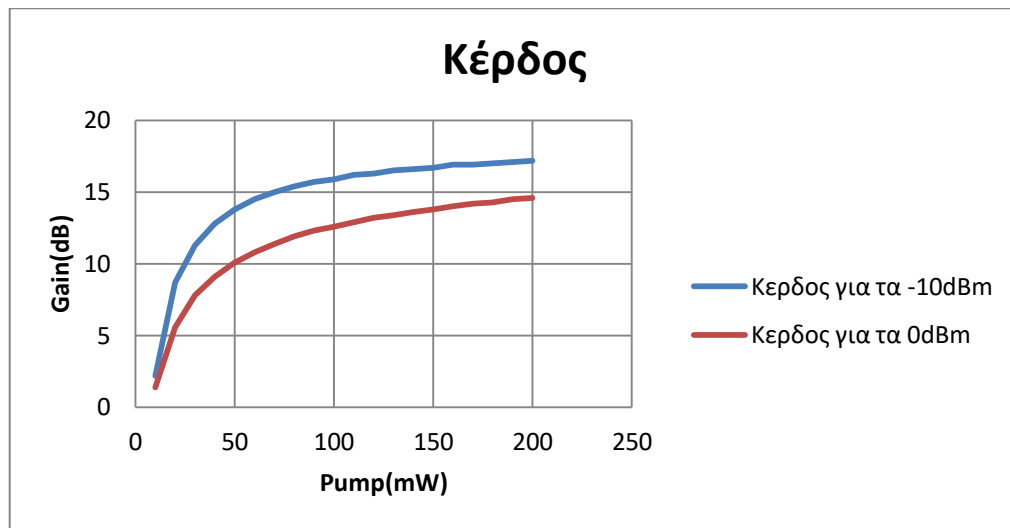
Η μπλε καμπύλη αντιστοιχεί στην ισχύ εισόδου που ισούται με -10dbm

Παρατηρούμε πως το κέρδος είναι μεγαλύτερο όταν τοποθετούμε το μικρότερο (σε ισχύ) σήμα προς ενίσχυση επίσης το κέρδος μετά από κάποιο σημείο (περίπου 150mW) σταθεροποιείται δηλαδή δεν έχουμε περαιτέρω αξιοσημείωτη αύξηση του όσο και να αυξήσουμε την ισχύ άντλησης.

Έπειτα θα δούμε και τα αποτελέσματα για την Er 30

Η κόκκινη καμπύλη αντιστοιχεί στην ισχύ εισόδου που ισούται με 0dbm

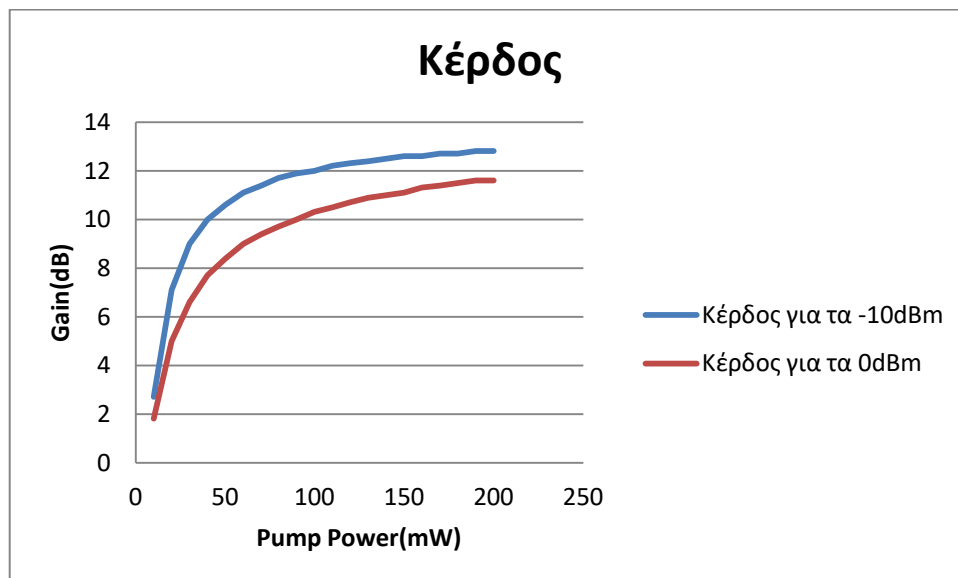
Η μπλε καμπύλη αντιστοιχεί στην ισχύ εισόδου που ισούται με -10dbm



Εικόνα 25. Κέρδος σε συνάρτηση με τη ισχύς άντλησης Er30

Ομοίως σε αυτήν την περίπτωση ισχύει η παραπάνω παρατήρηση. Αν συγκρίνουμε τα κέρδη των Er 110 , 30 θα δούμε ότι μεγαλύτερο είναι της Er 110 λόγω της υψηλότερης νόθευσης.

Στις παρακάτω τοπολογίες θα χρησιμοποιήσουμε την Er110 dB/m επομένως θα δούμε τι συμβαίνει και σε μικρότερο μήκος ίνας ,ουσιαστικά θα εξετάσουμε τις δύο οριακές τιμές μήκους ίνας του 1 μέτρου που είδαμε πιο πάνω κα των 0.20μετρων



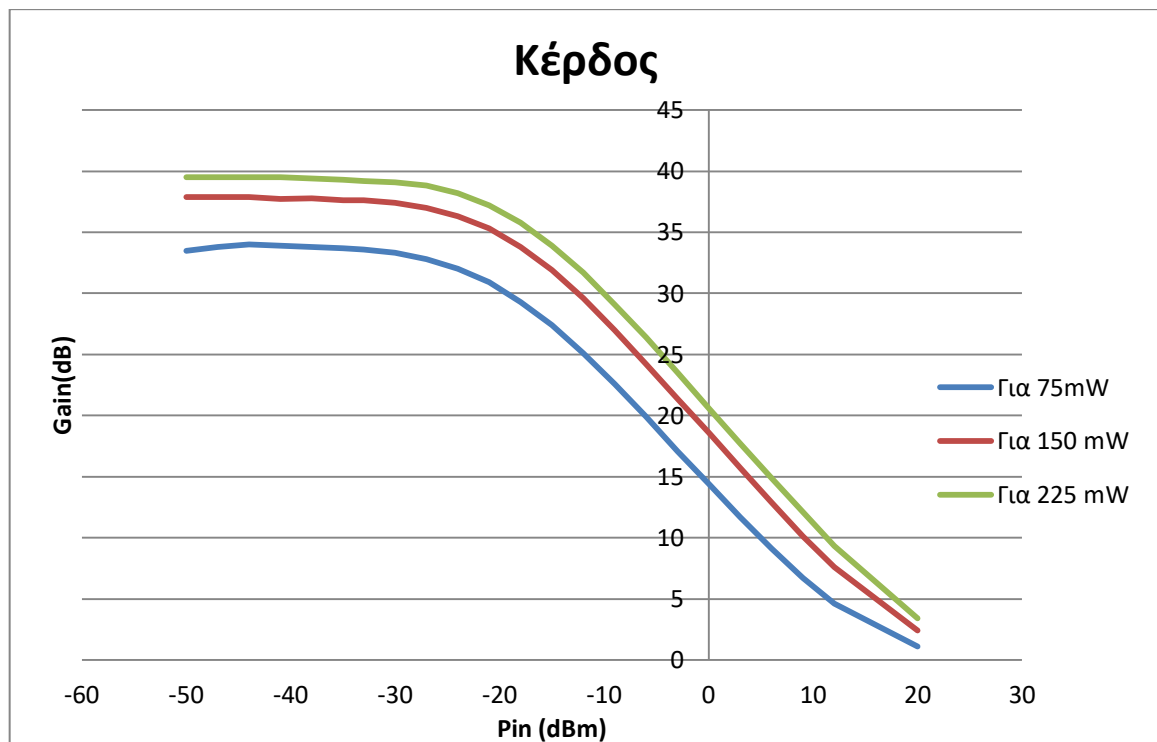
Εικόνα 26.Κερδος σε συνάρτηση με την ισχύ άντλησης για τα 0.20m ,Er110

Παρατηρούμε πως το κέρδος είναι αρκετά μειωμένο επομένως το μήκος της ίνας παίζει σημαντικό ρόλο στην επίτευξη υψηλού κέρδους

4.2.2 Το δεύτερο σενάριο για τον EDFA

Στην συνέχεια θα επισημάνουμε την ικανότητα των EDF Er110,30 ως προς την ενίσχυση αλλά με διαφορετικές τιμές ισχύος του οπτικού σήματος εισόδου και σταθερή την ισχύ άντλησης. Καθώς το κύκλωμα είναι το ίδιο όπως και στο (1) θα περάσουμε απευθείας στα αποτελέσματα.

Αρχικά θα εξετασουμε την Er110 της οποίας το μήκος βάλλαμε 1 μετρό. Οι τιμές ισχύος του σήματος εισόδου κυμαίνονται από -50dbm έως 20dbm και κάναμε την προσομοίωση για τρεις τιμές ισχύος άντλησης (75mW,150mW,225mW).



Εικόνα 27.Αποτελέσματα ενισχυτή με Er110

Η μπλε καμπύλη αφορά την τιμή ισχύος άντλησης 75 mW.

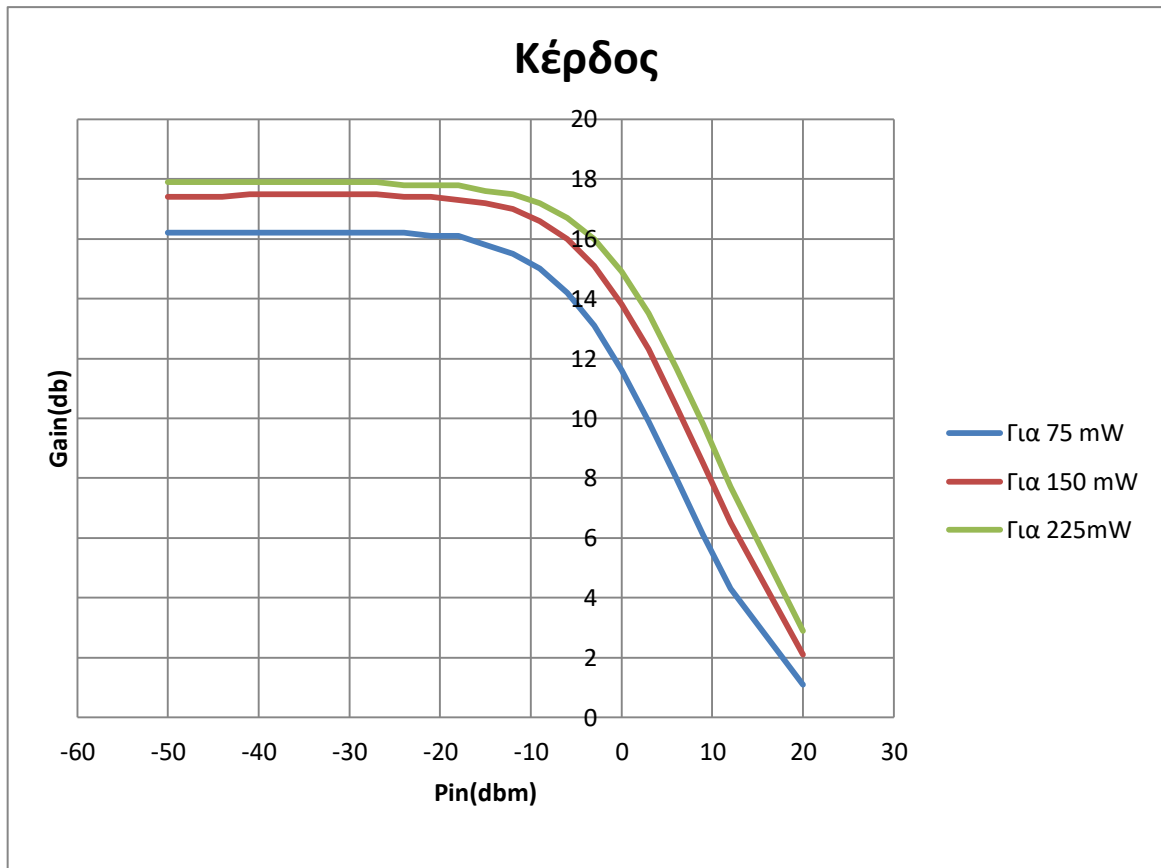
Η κόκκινη καμπύλη αφορά την τιμή ισχύος άντλησης 150 mW.

Η πράσινη καμπύλη αφορά την τιμή ισχύος άντλησης 225 mW.

Παρατηρούμε αρχικά ότι οι χαμηλότερες τιμές ισχύος εισόδου ενισχύονται περισσότερο σε σχέση με μεγαλύτερες τιμές ισχύος. Έπειτα βλέπουμε ότι για τις μεγαλύτερες τιμές ισχύος άντλησης έχουμε υψηλότερο κέρδος όμως σε κάποιο σημείο (από κάποια τιμή ισχύος της άντλησης) αυτό σταματά. Αυτό είναι εμφανές από την απόσταση που έχουν η πράσινη από την κόκκινη καμπύλη που αφορούν τα 200mW και 150mW αντίστοιχα. Αυτό συμβαίνει

καθώς έχουμε δώσει μέσω της άντλησης την ενέργεια ώστε να γίνει η αναστροφή πληθυσμών προκειμένου να έχουμε την εξαναγκασμένη αποδιέγερση.

Επίσης για την Er 30 έχουμε τα εξής αποτελέσματα που επαληθεύουν τις παραπάνω παρατηρήσεις.



Εικόνα 28. Αποτελέσματα ενισχυτή με Er30

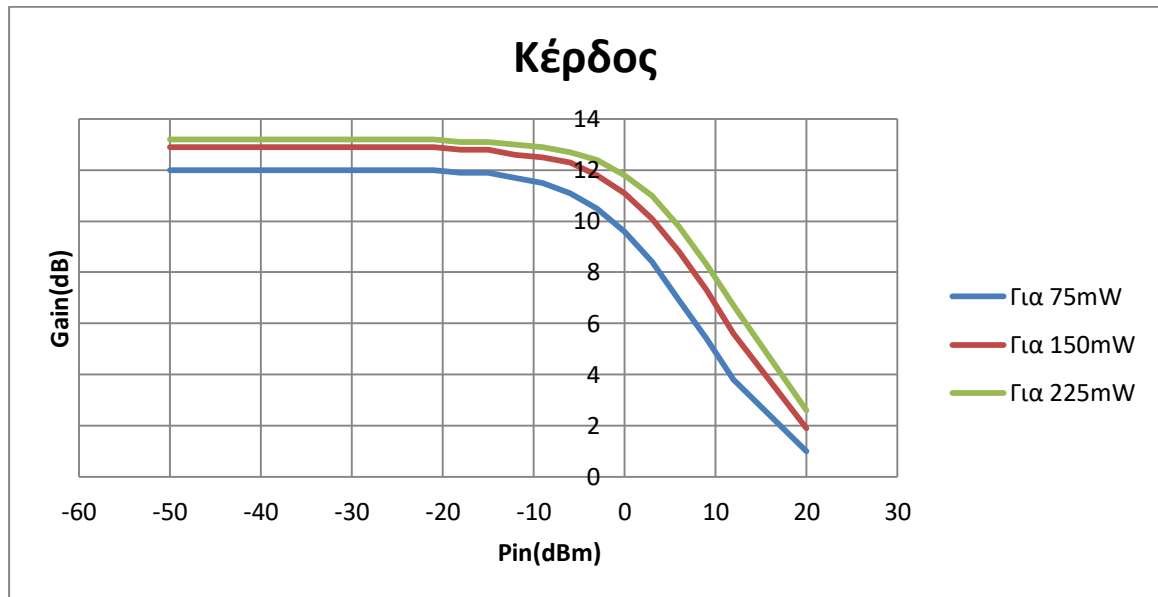
Η μπλε καμπύλη αφορά την τιμή ισχύος άντλησης 75 mW

Η κόκκινη καμπύλη αφορά την τιμή ισχύος άντλησης 150 mW

Η πράσινη καμπύλη αφορά την τιμή ισχύος άντλησης 225 mW

Παρατηρούμε ένα γενικό φαινόμενο που διέπει την φύση των ενισχυτών, ότι οι υψηλές τιμές ισχύος σήματος δεν ενισχύονται (δεν έχουν κοινό κέρδος) με τις χαμηλότερες αυτό συμβαίνει καθώς η πηγή άντλησης δεν είναι επαρκής να προσδώσει την ενέργεια έτσι ώστε ένα ήδη ισχυρό σήμα να το κάνει ακόμα πιο ισχυρό με το ίδιο κέρδος όπως τα πιο αδύναμα σήματα.. Επιπρόσθετα άλλο ένα γεγονός που δεν το επιτρέπει αυτό είναι η διαθεσιμότητα των θέσεων στις ενεργειακές στοιβάδες για τα ηλεκτρόνια που ανεβαίνουν εκεί μέσω της άντλησης (ανάστροφη πληθυσμών) ώστε να δώσουν φωτόνια κατά την αποδιέγερση τους.

Όπως και στο πρώτο σενάριο έτσι και εδώ όσο αναφορά την E_r 110 dB/m θα πρέπει να εξετάσουμε το κάτω όριο της , αναφερόμενοι στο μήκος της ίνας δηλαδή στα 0.20m



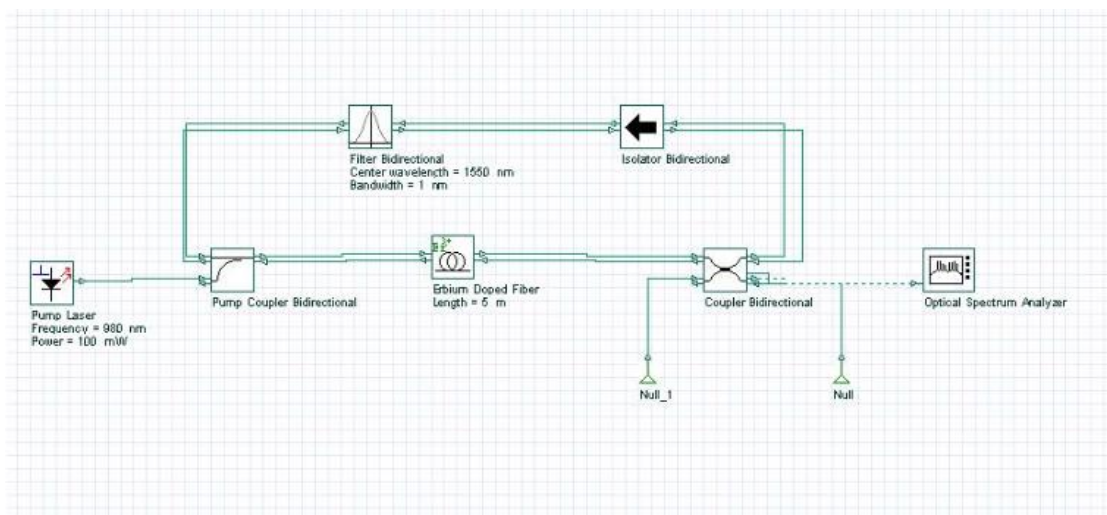
Εικόνα 29.Κέρδος σε συνάρτηση με τις τιμές ισχύος εισόδου για την ίνα 0.20m

5 Προσομοίωση τοπολογιών Laser με νοθευμένες οπτικές ίνες Ερβίου

Στο συγκεκριμένο κεφάλαιο θα εξετάσουμε τοπολογίες laser οι οποίες ως ενεργό υλικό έχουν οπτική ίνα η οποία είναι νοθευμένη με ιόντα ερβίου. Από τις εν συνεχεία τοπολογίες θα εξετάσουμε την ισχύ εξόδου ολικού φάσματος καθώς και την ισχύ σε συγκεκριμένο μήκος κύματος (1550nm) σε συνάρτηση με την ισχύ άντλησης pump. Στο ring laser ακολουθήσαμε μια λογική σύγκρισης δυο οπτικών ινών οι οποίες διαφέρουν σε νόθευση (EDF 110 dB/m και EDF 30dB/m)

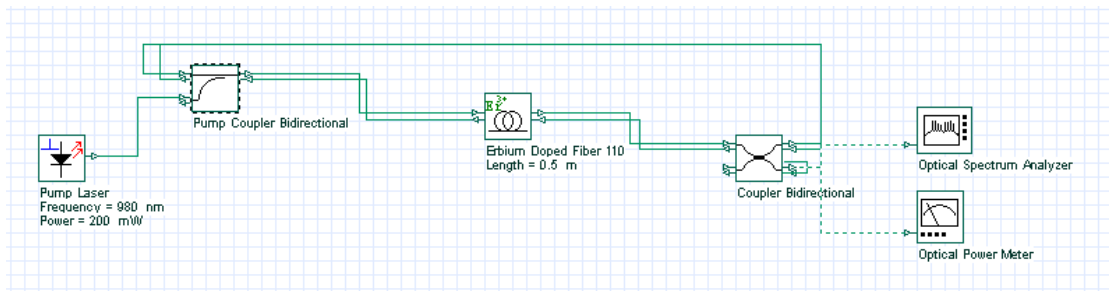
5.1 Laser δακτυλίου (Ring Laser)

Ακολουθώντας θα εξετάσουμε την τοπολογία του ring laser, όπως αυτή μας δίνεται από την Optiwave και σε αυτήν την τοπολογία εφαρμόσαμε τρία σενάρια ‘‘χτίζοντας’’ το κύκλωμα. Οι προσομοιώσεις που πήραν μέρος και τα αποτελέσματα που συλλέχτηκαν έγιναν με βάση το τελικό για το ring laser κύκλωμα της Optiwave το οποίο είναι το εξής:



Εικόνα 30. Τοπολογία ring laser

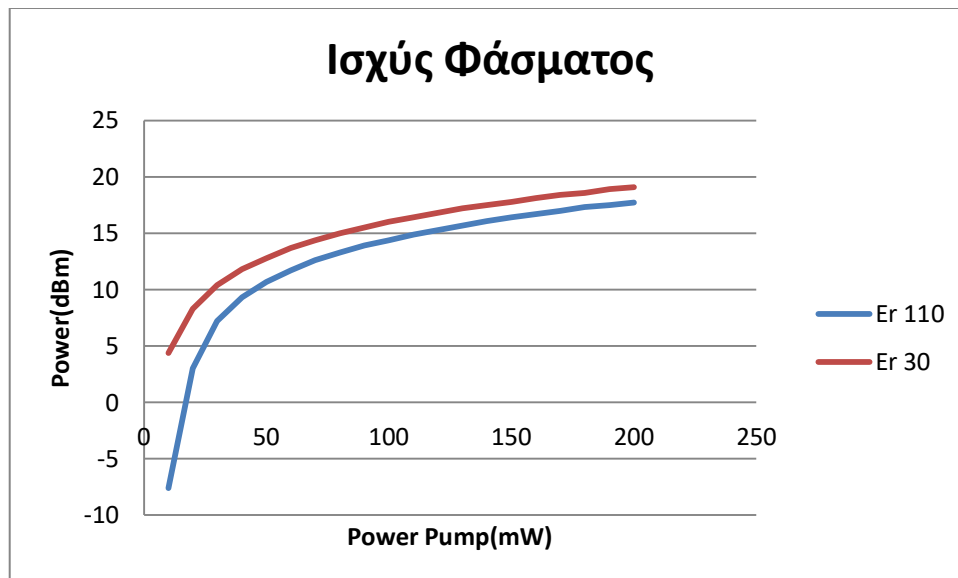
Πριν φτάσουμε στο τελικό κύκλωμα ξεκινήσαμε από πιο απλά κυκλώματα. Στο πρώτο βήμα βάλλαμε απλά μια ανάδραση από τον οπτικό συζεύκτη της εξόδου.



Εικόνα 31. Τοπολογία χωρίς απομονωτή και φίλτρο

Όπου έχουμε το Pump laser (10mW-200mW στα 980nm), τον οπτικό συζεύκτη για την άντληση, την οπτική μας ίνα νοθευμένη με Έρβιο (χρησιμοποιήσαμε δυο ειδών ίνες Έρβιου την 110 και την 30, μήκος 0.5m), τον οπτικό συζευκτη στην έξοδο ο οποίος έχει συντελεστή σύζευξης $\alpha=0.5$ και τα οπτικά όργανα μέτρησης Optical Spectrum Analyzer και Optical Power Meter. Οι ρυθμίσεις αυτές παραμένουν σταθερές και για τα υπόλοιπα κυκλώματα.

Εκτελώντας την προσομοίωση του παραπάνω κυκλώματος παίρνουμε τα εξής αποτελέσματα

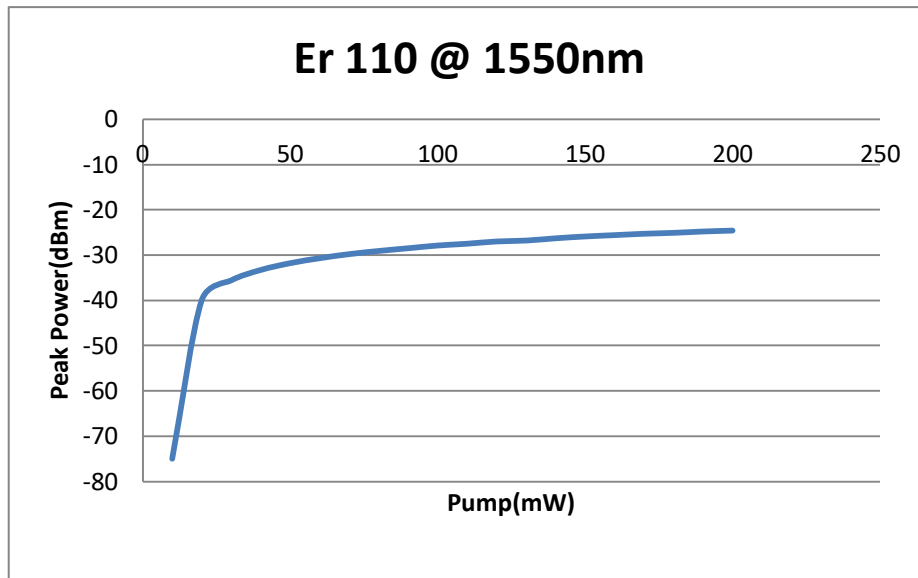


Εικόνα 32. Ισχύς φάσματος

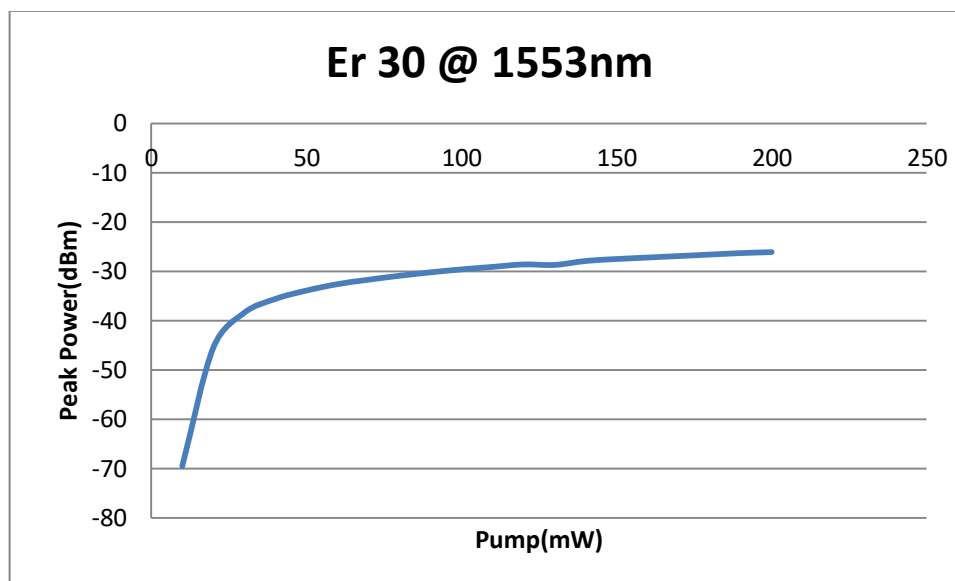
Παρατηρούμε ότι η προσομοίωση με την Er 30 βγάζει 2dB(από τα 50mW) περισσότερη ισχύς σε όλο το φάσμα από ότι η Er 110, αυτό μπορεί να οφείλεται στο γεγονός ότι η Er 110

έχει μεγαλύτερη νόθευση από την Er 30 και να χρειάζεται περισσότερη άντληση , επίσης για χαμηλές τιμές ισχύος της άντλησης η διάφορα τους είναι αρκετά πιο μεγάλη.

Επιπρόσθετα καταγράψαμε το μήκος κύματος που υπάρχει η μέγιστη ισχύς. Η Er 110 την παρουσίασε στα 1.55 μm και η Er30 στα 1.53 μm



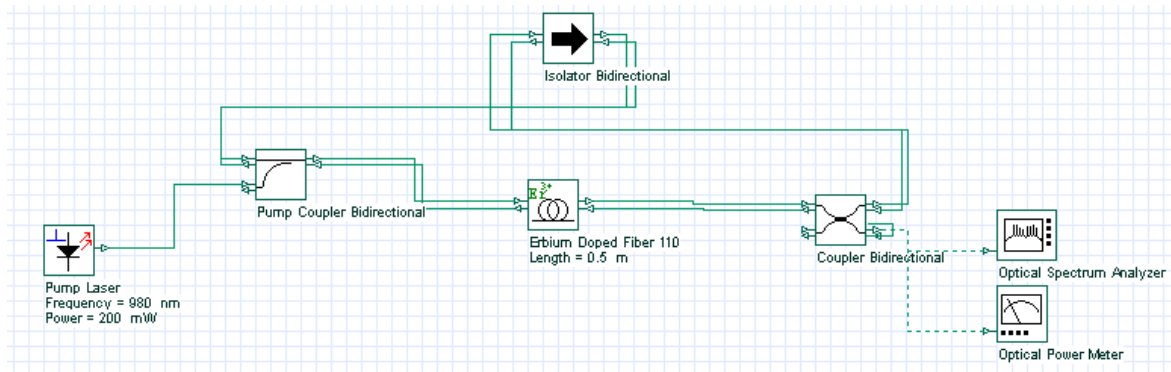
Εικόνα 33.Ισχύς στα 1550nm



Εικόνα 34. Ισχύς στα 1553nm

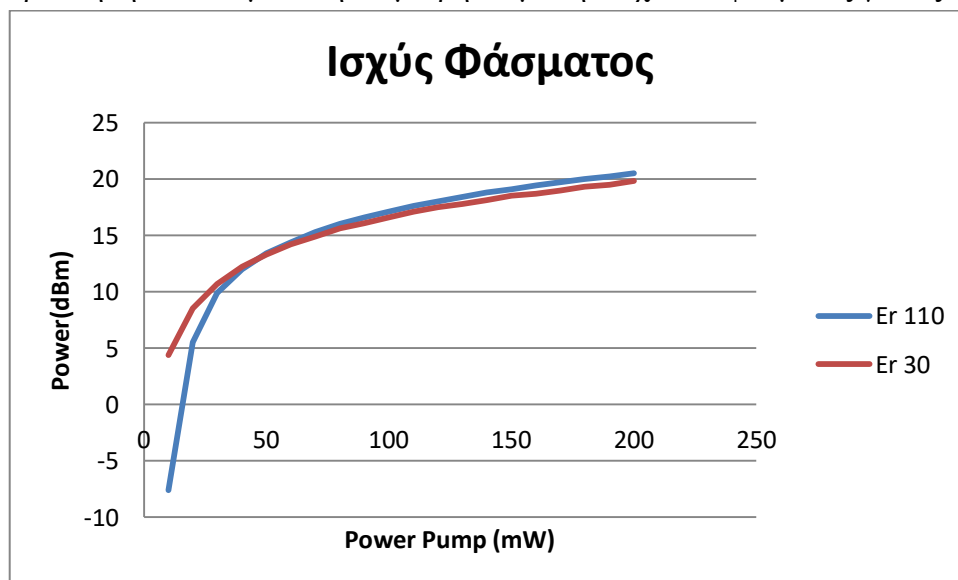
Η Er 110 βγάζει πιο υψηλή ισχύ στο μήκος κύματος (1.55 μm) της από ότι η Er 30 (1.53 μm) περίπου στα 2 dB η διαφορά τους. Λόγω του ότι δεν έχουμε δημιουργήσει συνθήκες laser ακόμη υπάρχει διαφορετικό μήκος κύματος που έχουμε μέγιστη ισχύς.

Προχωρώντας , θα προσθέσουμε στο κύκλωμα μας έναν οπτικό απομονωτή , ουσιαστικά αυτό το αντικείμενο θα επιβάλλει μόνο μια φορά του φωτός στο κύκλωμα και θα εξασθενεί την αντίθετη.



Εικόνα 35. Τοπολογία έπειτα από την προσθήκη του απομονωτή.

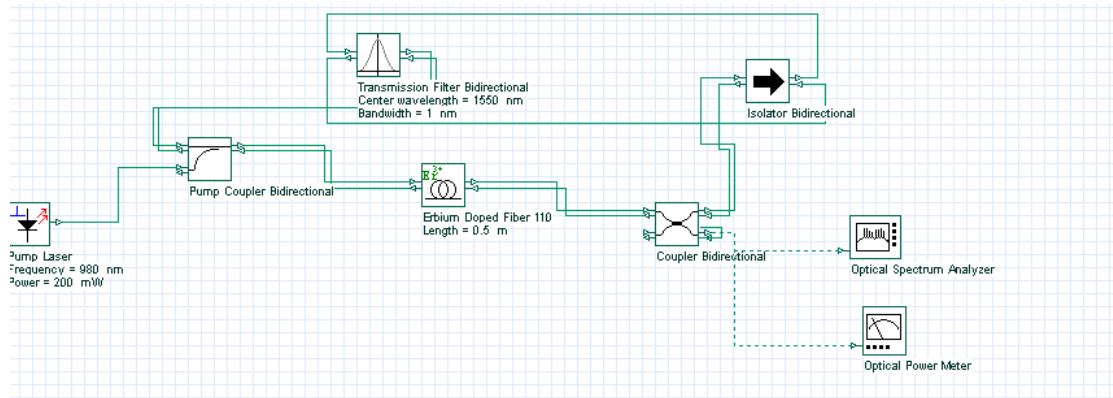
Με την προσθήκη του απομονωτή θα μετρήσουμε την ισχύ του φάσματος για τις δυο ίνες.



Εικόνα 36. Ισχύς φάσματος

Με την προσθήκη του απομονωτή έχουμε αύξηση ισχύος και στις δυο οπτικές ίνες , άρα αυτό μας δείχνει ότι χωρίς τον απομονωτή 'χάναμε' φως, δηλαδή δεν ακολουθούσε το φως την διαδρομή που εμείς επιθυμούσαμε.

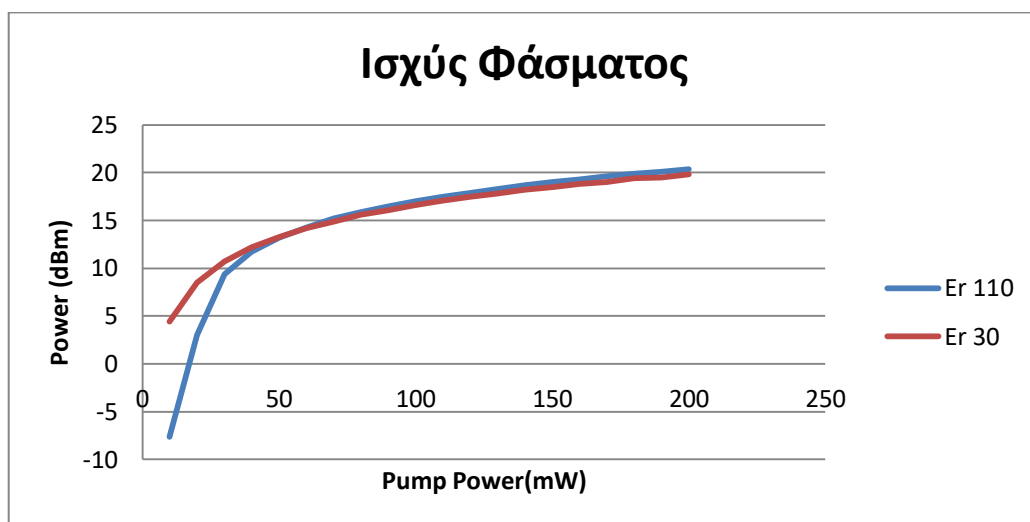
Εν κατακλείδι , φαίνεται το κύκλωμα που κάναμε αναφορά στην αρχή , προσθέτουμε ένα οπτικό φίλτρο στην ανάδραση.



Εικόνα 37. Τελικό κυκλωμα ring laser όπως δίνεται από την Optiwave

Όσο αναφορά το φίλτρο , έχει κεντρικό μήκος κύματος 1550nm και εύρος γύρω από αυτό 1 nm

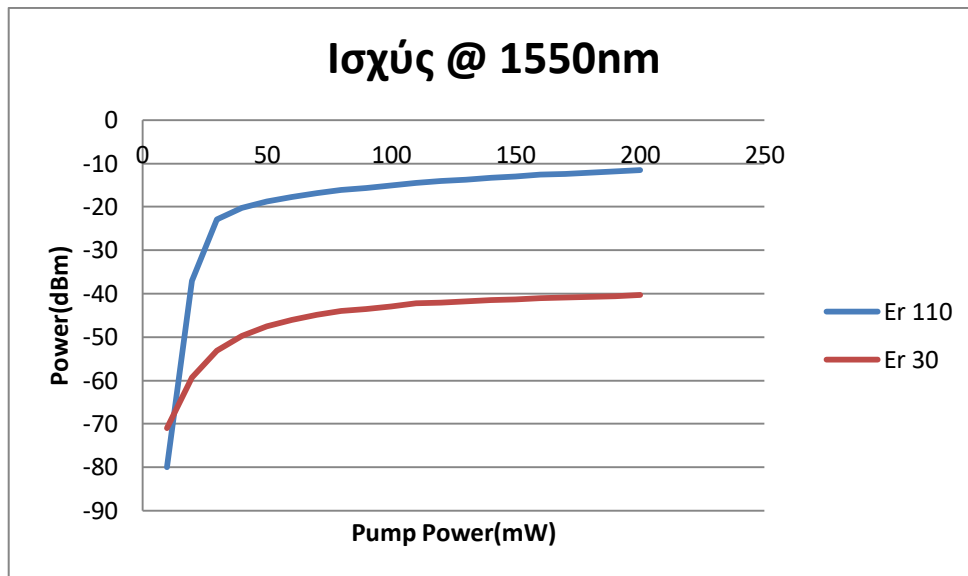
Τα αποτελέσματα με την προσθήκη του οπτικού φίλτρου.



Εικόνα 38. Ισχύς φάσματος

Όσο αναφορά την ισχύ φάσματος δεν έχουμε μεγάλες αποκλίσεις από τις παραπάνω τοπολογίες.

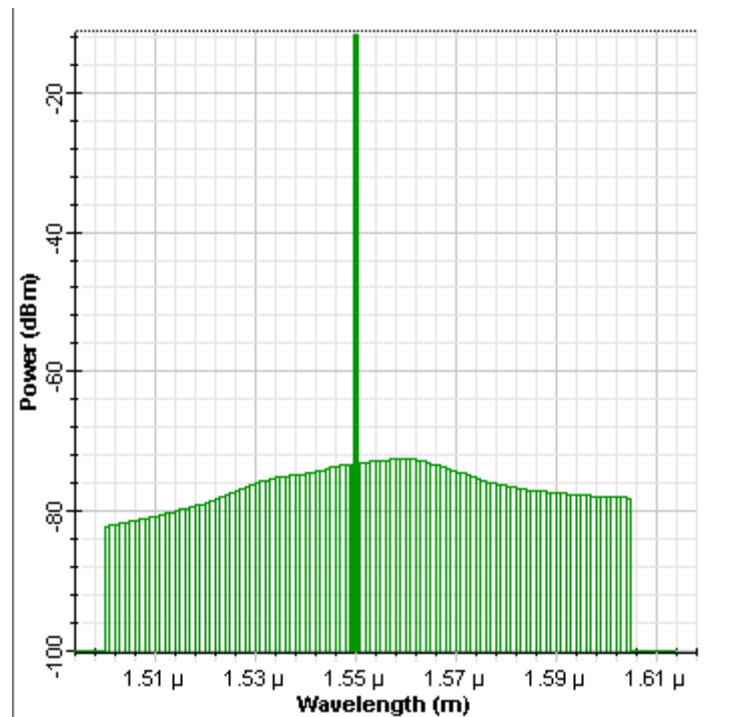
Ακολουθούν οι καμπύλες που μας δείχνουν την ισχύ στα 1,55μm και στις δυο ίνες.



Εικόνα 39.Ισχύς στα 1550nm

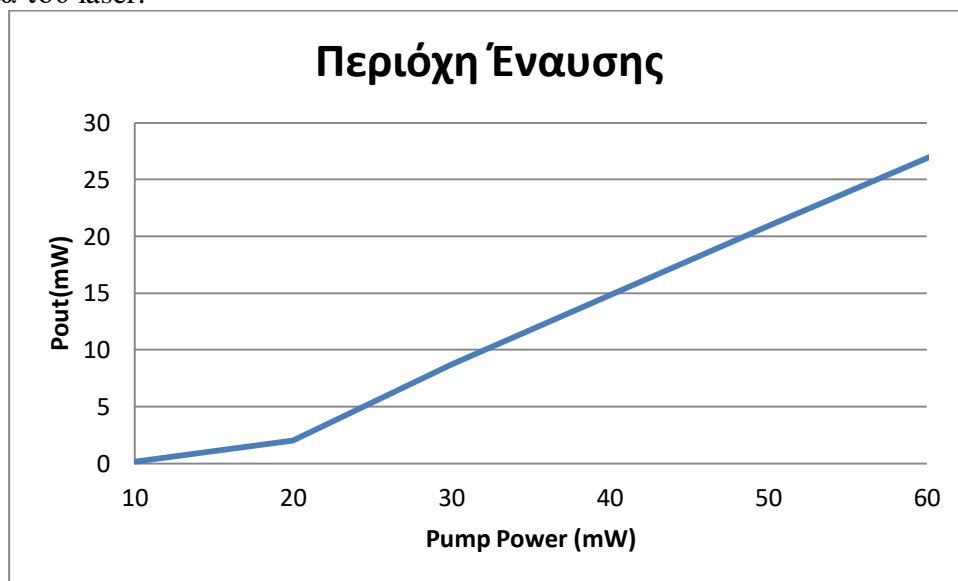
Είναι μεγάλη η διάφορα που έχουν οι δυο ίνες γύρω στα 30dB ενώ στην ισχύ φάσματος είναι αρκετά κοντά οι δυο ίνες.

Τέλος, το εικονικό αποτέλεσμα από τον οπτικό αναλυτή, στο οποίο παρατηρούμε ότι στα 1550nm έχουμε συγκεντρωμένη ισχύ και το υπόλοιπο φάσμα αρκετές δεκάδες dB πιο κάτω, γεγονός που μας οδηγεί στο συμπέρασμα ότι αυτή η τοπολογία προσομοιωτικά μπορεί να αντιπροσωπεύσει ένα laser στα 1550nm.



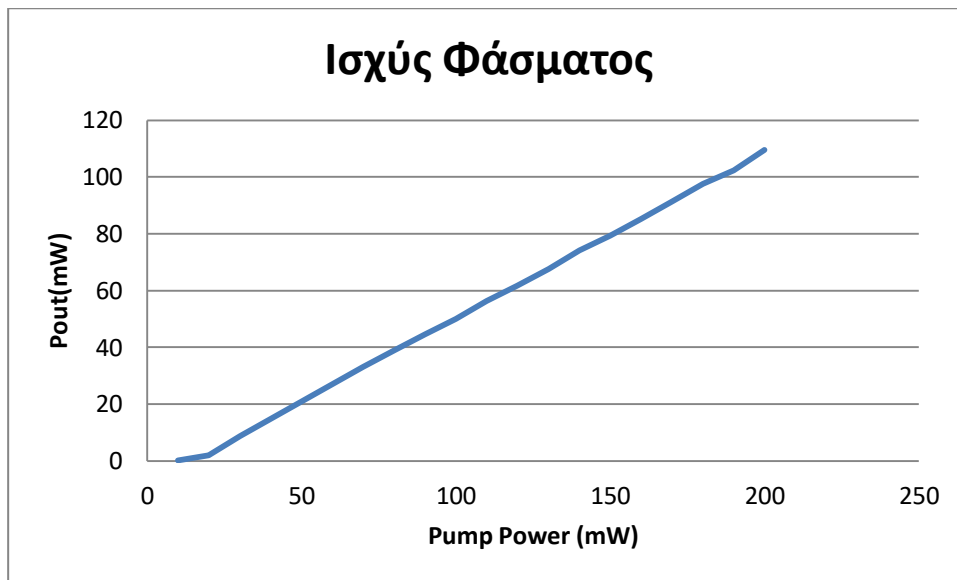
Εικόνα 40. Φασμα ring laser στα 1550nm

Το laser δακτυλίου (Ring laser) με την Er110db/m έχει ως έξοδο μεγαλύτερη ισχύ στα 1550nm , έτσι λοιπόν θα εξετάσουμε το ring laser με πυρήνα την Er 110. Ξεκινώντας με την περιοχή έναυσης ,στην οποία οι τιμές ισχύος της άντλησης είναι ικανές να ξεκινήσουν τη λειτουργία του laser.



Εικόνα 41.Περιοχή έναυσης του ring laser

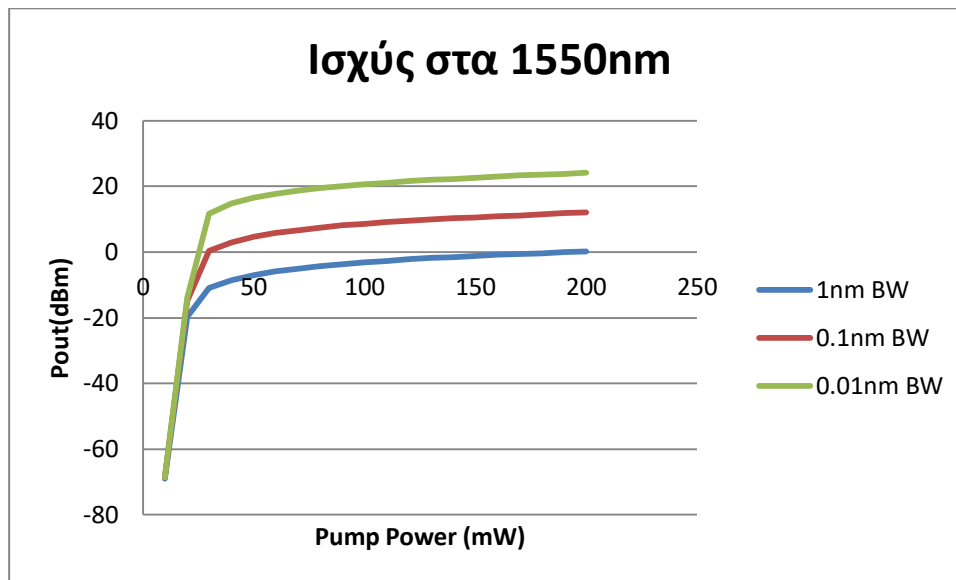
Στην γραφική , η περιοχή έναυσης είναι η περιοχή στην οποία η καμπύλη ισχύος εξόδου συνάρτηση της ισχύος άντλησης αλλάζει κλίση (κοντά στα 20mW)και έχουμε αύξηση της ισχύος εντός της κοιλότητας.



Εικόνα 42.Ισχύς φάσματος στην γραμμική κλίμακα

Αυτή είναι απεικόνιση του φάσματος που είναι ακριβώς το ίδιο με την εικόνα 36 (Er 110) απλά υπέστη μετατροπή στην γραμμική κλίμακα καθώς είναι καλύτερα διασαφηνισμένη η περιοχή έναυσης

Στην ανάδραση που είναι τοποθετημένο ένα φίλτρο που είναι υπεύθυνο για την συντήρηση των 1550nm είναι ενδιαφέρον να εναλλάξουμε το Bandwidth του φίλτρου δηλαδή το εύρος ζώνης γύρω από τα 1550nm που επιτρέπει το φίλτρο να περάσει (μαζί με το κεντρικό μήκος κύματος). Οι τιμές που εξετάσαμε για το BW του φίλτρου είναι 1nm ,0.1nm και 0.01nm

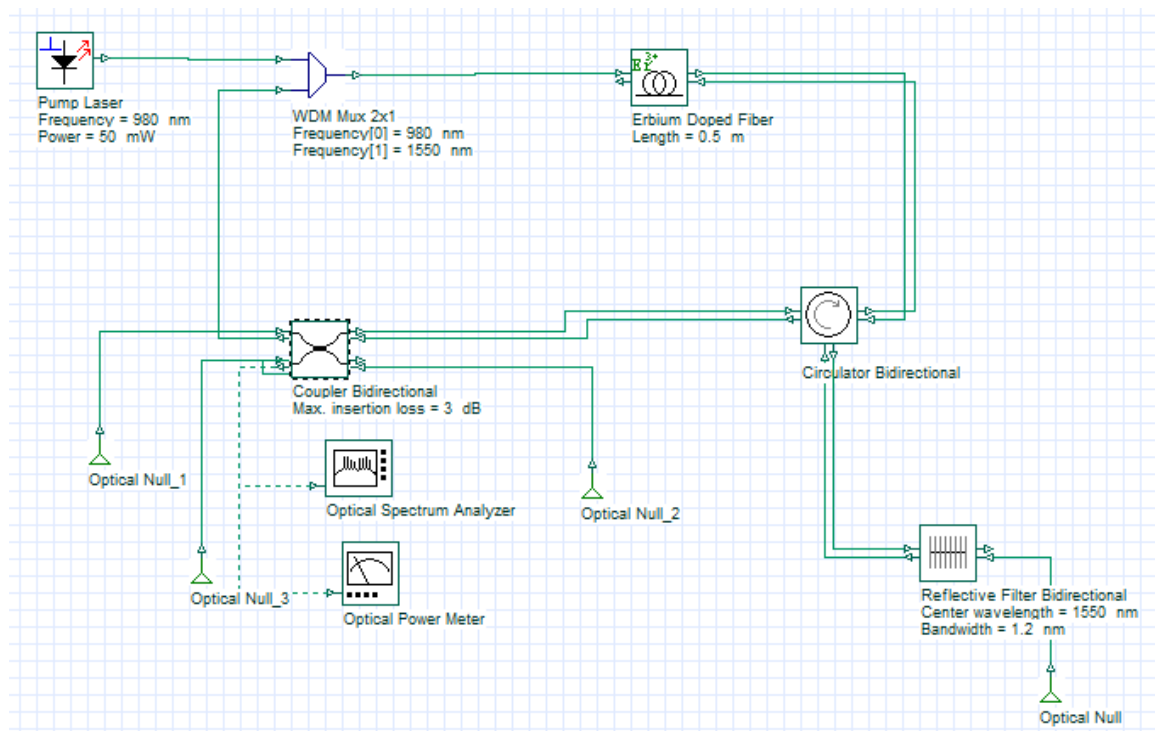


Εικόνα 43.Ισχύς στα 1550nm με διαφορετικό BW

Παρατηρούμε ότι όσο πιο μικρό το BW του φίλτρου ,όσο πιο στενή είναι η ζώνη διέλευσης έχουμε αύξηση ισχύος στο κεντρικό μήκος κύματος , αυτό συμβαίνει καθώς δεν υπάρχει σπάταλη ισχύος σε γειτονικά μήκη κύματος τα οποία στην εφαρμογή του laser που προσομοιώνουμε είναι αχρείαστα, με συνέπεια να συγκεντρώνεται όλο και περισσότερη ισχύς στα 1550nm. Σε αυτό το σημείο να τονίσουμε πως η κατασκευή φίλτρων με πολύ στενή ζώνη διέλευσης είναι αρκετά δύσκολη υπόθεση.

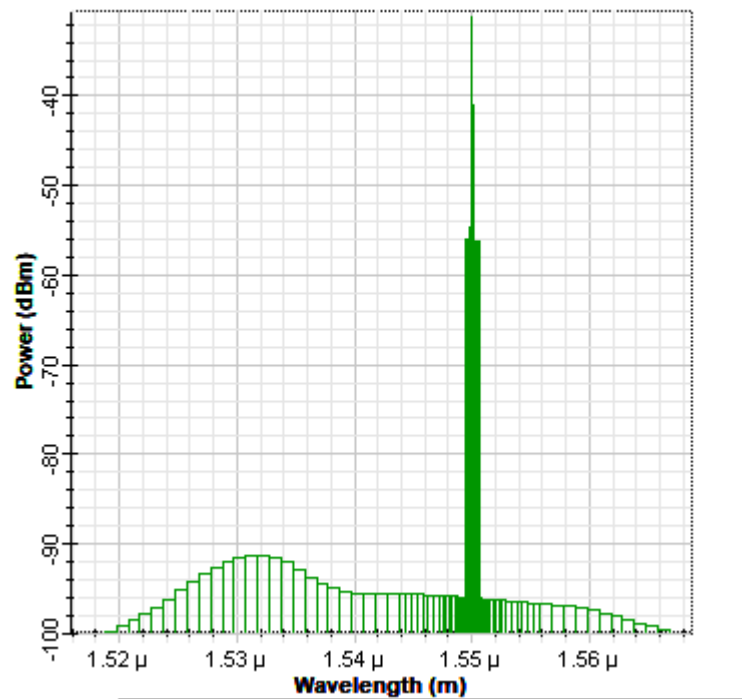
5.2 Τοπολογία laser με συνδυασμό Ring και FBG

Σε αυτό το σημείο πρέπει επισημανθεί το εξής ότι από την επομένη τοπολογία έως την τελευταία έχει υιοθετηθεί διαφορετική λογική από πριν δηλαδή κρατήσαμε την EDF 110 μόνο και την βάλουμε στα 0,5 m γεγονός που εξυπηρετεί την ικανοποιητική ισχύς εξόδου σύμφωνα με τα αποτελέσματα των ενισχυτών παραπάνω και πληροί το κριτήριο έναυσης του laser(κέρδος μεγαλύτερο των απωλειών). Η τοπολογία που έπεται αφορά ένα συνδυασμό τεχνικών laser η μια είναι του laser δακτυλίου (ring) και η δεύτερη του FBG. Για αυτόν το λόγο μπορούμε να ονομάσουμε την τοπολογία Ring + FBG (hybrid) και είναι η εξής:



Εικόνα 44. Τοπολογία Ring+FBG (hybrid)

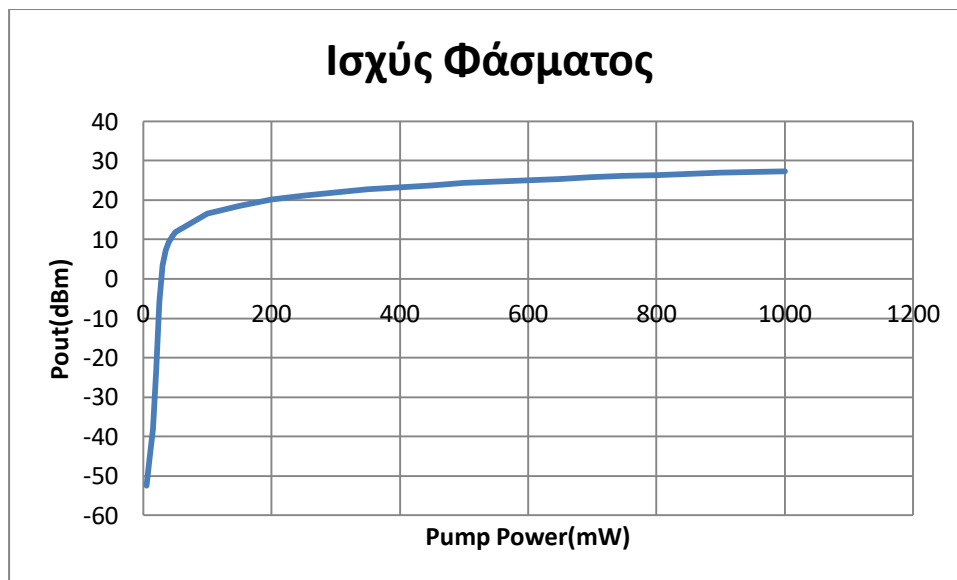
Σε αυτήν την τοπολογία πιο αναλυτικά έχουμε το Pump laser το οποίο είναι ρυθμισμένο έτσι ώστε να μας δίνει εύρος ισχύος άντλησης από 50 mW έως 1000mW, συνεχίζοντας προς τα δεξιά βλέπουμε έναν WDM συζεύκτη , ο οποίος μπορεί να συνδυάσει μήκη κύματος με αρκετή απόκλιση στην περίπτωση μας είναι τα 980nm της άντλησης και τα 1550nm του σήματος που επιθυμούμε. Εν συνεχεία έχουμε την EDF(100dB/m) η οποία είναι υπεύθυνη να ενισχύσει τα 1550nm , έπειτα οδηγούμαστε στον κυκλοφορητή που επιβάλλει την πορεία του φωτός εντός της τοπολογίας. Το FBG θα αφήσει να περάσει όλο το φάσμα της αυθόρμητης εκπομπής του ερβίου εκτός το μήκος κύματος των 1550nm το οποίο θα το επιστρέψει πίσω στον κυκλοφορητή και τέλος θα οδηγηθεί στον άξευκτη από τον οποίο παίρνουμε και έξοδο στον OSA , OPM . Ταυτόχρονα όμως θα δημιουργήσουμε το βρόχο συνδέοντας την άλλη έξοδο του συζεύκτη στον WDM. Έτσι λοιπόν γίνεται φανερή υβριδική φύση αυτής της τοπολογίας.



Εικόνα 45. Απεικόνιση φάσματος του Ring + FBG(hybrid)

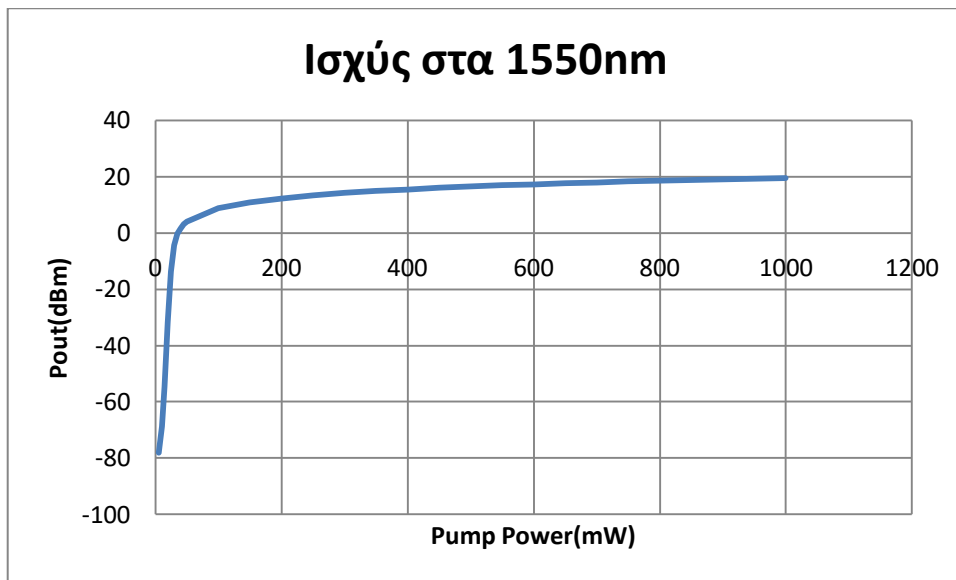
Από την Εικόνα 40 είναι ευδιάκριτο ότι το μήκος κύματος των 1550nm είναι πιο ισχυρό έναντι των υπολοίπων.

Εξάγουμε τις μετρήσεις ισχύος ολικού φάσματος καθώς και την ισχύ στα 1550nm.



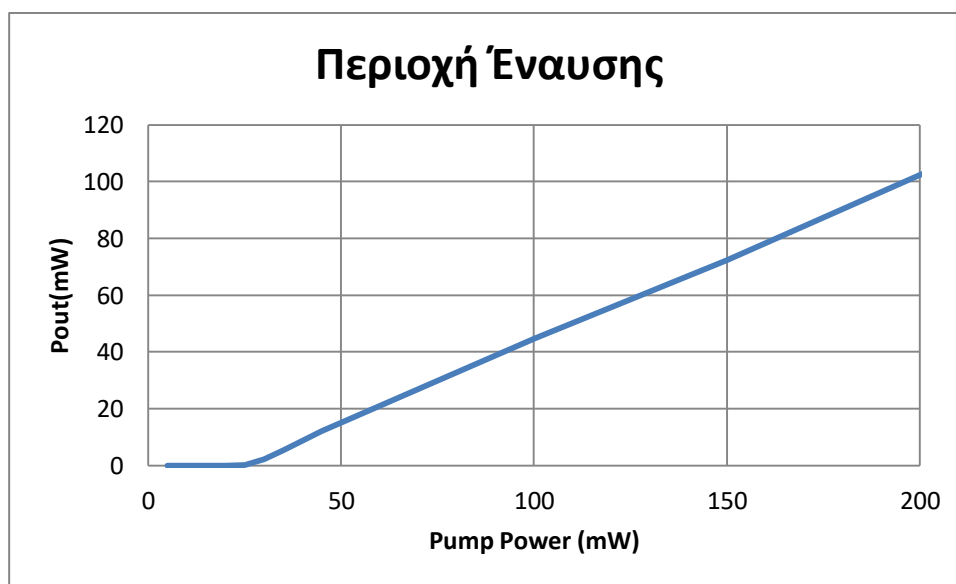
Εικόνα 46. Ισχύς ολικού φάσματος του Ring+FBG(hybrid)

Παρατηρούμε ότι καθώς έχουμε αύξηση της ισχύς άντλησης έχουμε απότομη αύξηση ισχύς εξόδου στο διάστημα (50mW-200mW) ενώ από κει και έπειτα είναι πιο ομαλή η αύξηση η ισχύς εξόδου.



Εικόνα 47.Ισχύς στα 1550nm

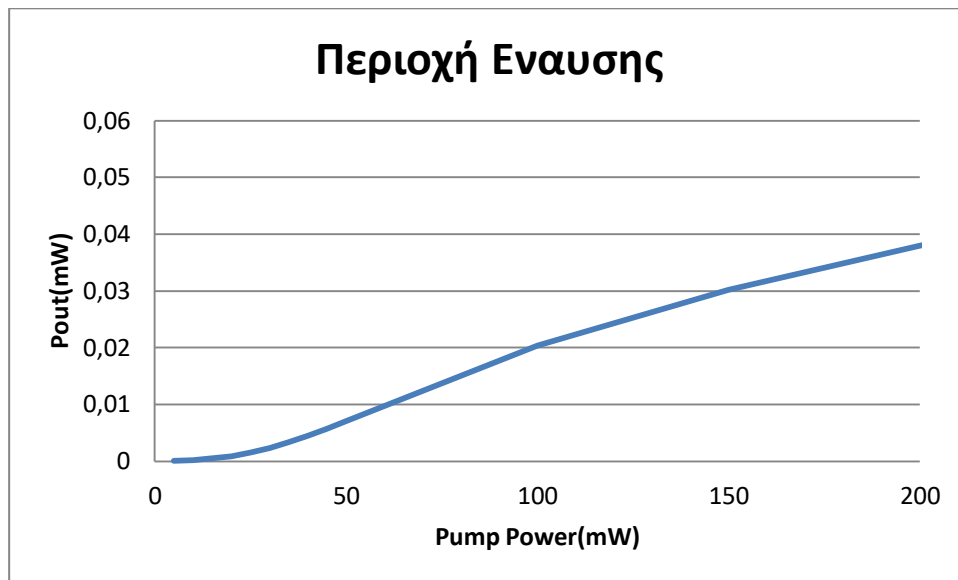
Η ισχύς του μήκους κύματος των 1550nm μετά τα 200 mW ισχύος άντλησης είναι σχεδόν σταθερή.



Εικόνα 48.Περιοχή έναυσης του FBG+RING

Από τα 25 mW και έπειτα παρατηρούμε αλλαγή κλίσης της καμπύλης.

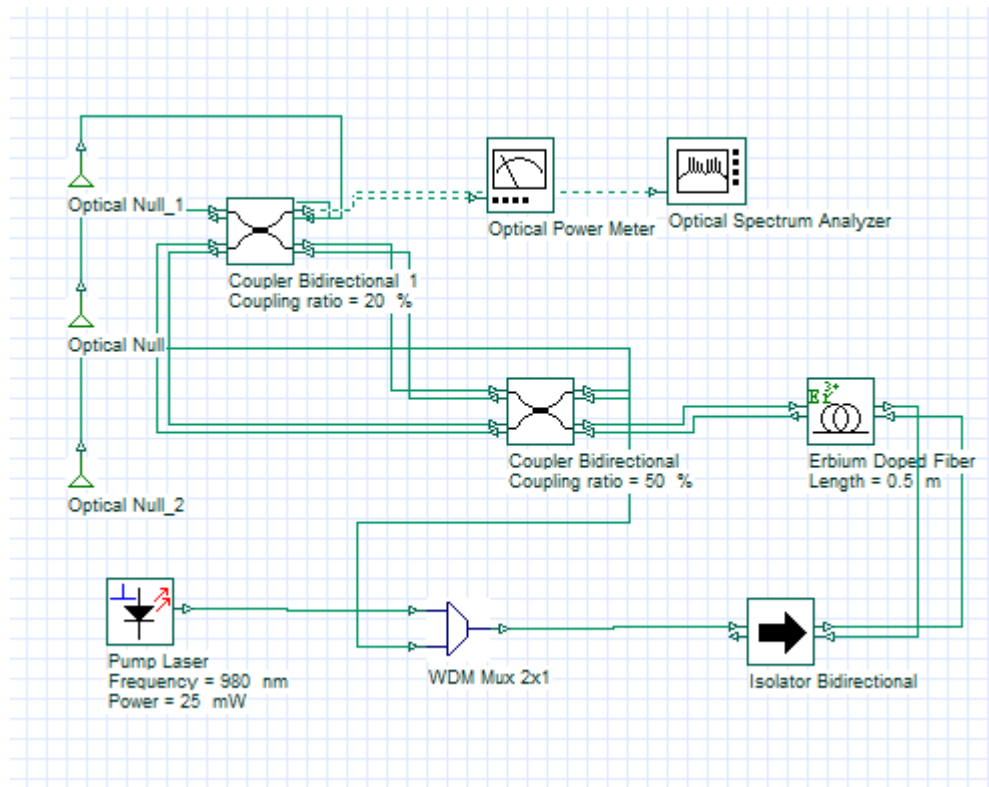
Πρώτου ,προχωρήσουμε στην επομένη τοπολογία θα δείξουμε γιατί δεν έγινε επιλογή των 0.20m. Δεν ικανοποιούταν η συνθήκη του laser δηλαδή το κέρδος να είναι μεγαλύτερο από τις απώλειες , οι συζεύκτες δίνουν -3dB (ο κάθε συζεύκτης) και το κέρδος που προσφέρει η ίνα στα 0.20m είναι μικρό.



Εικόνα 49.Περιοχή έναυσης FBG+Ring 0.20m

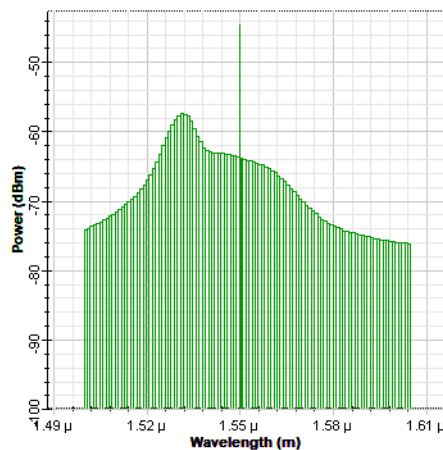
Βλέπουμε ότι έχουμε σχεδόν ανύπαρκτη ισχύ ώστε να δημιουργηθεί laser.

5.3 Fiber Loop Mirrors



Εικόνα 50. Fiber loop mirrors

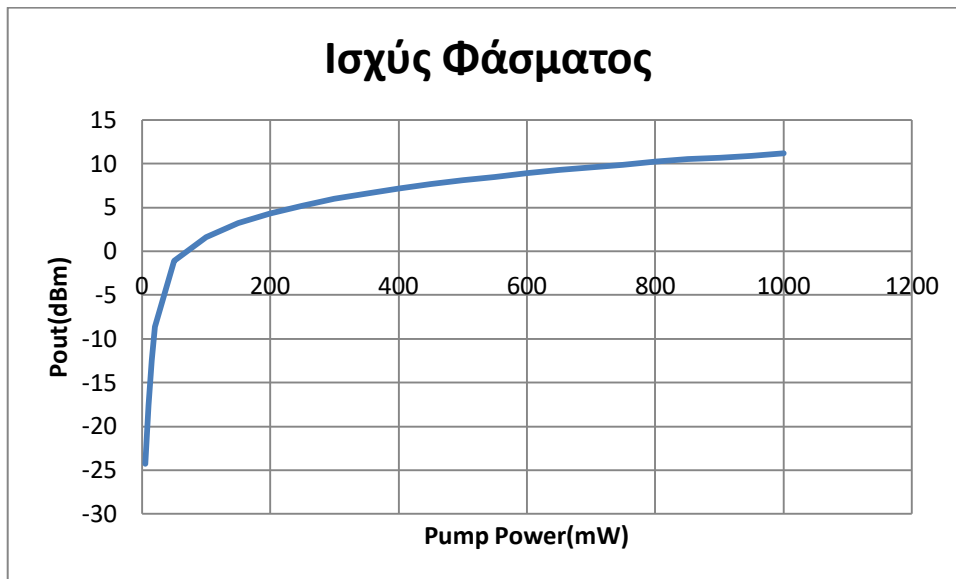
Το σημείο που ξεχωρίζει σε αυτήν την τοπολογία είναι το fiber loop mirror που βρίσκεται στον μεσαίο coupler ουσιαστικά επιστέφει ότι παίρνει ως είσοδο (ο πάνω coupler απλά χρησιμοποιείται για να πάρουμε έξοδο στον OSA , OPM), επιστρέφοντας το στον WDM όπου συνδυάζεται με τα 980nm της άντλησης και περνούν ως κοινό σήμα μέσα από την EDF όπου γίνεται η ενίσχυση των 1550nm όμως και γενικά όλου του φάσματος της αυθόρμητης εκπομπής της EDF.



Εικόνα 51. Απεικόνιση φάσματος Fiber loop mirrors

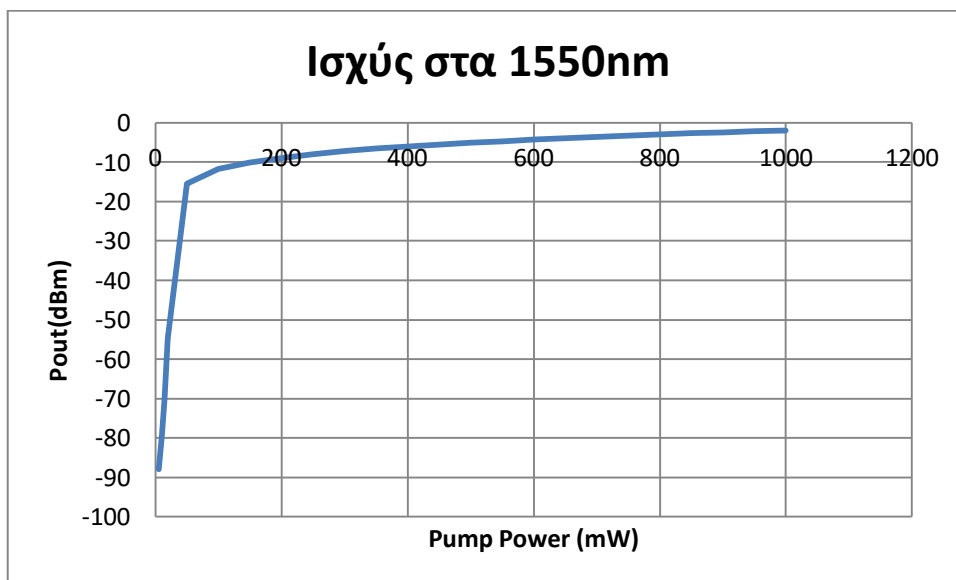
Στην εικόνα 48 παρατηρούμε να ξεχωρίζουν τα 1550nm με αρκετή διάφορα ισχύος από το υπόλοιπο φάσμα , καθώς και η αυθόρμητη εκπομπή του Ερβίου.

Τα διαγράμματα ισχύος.



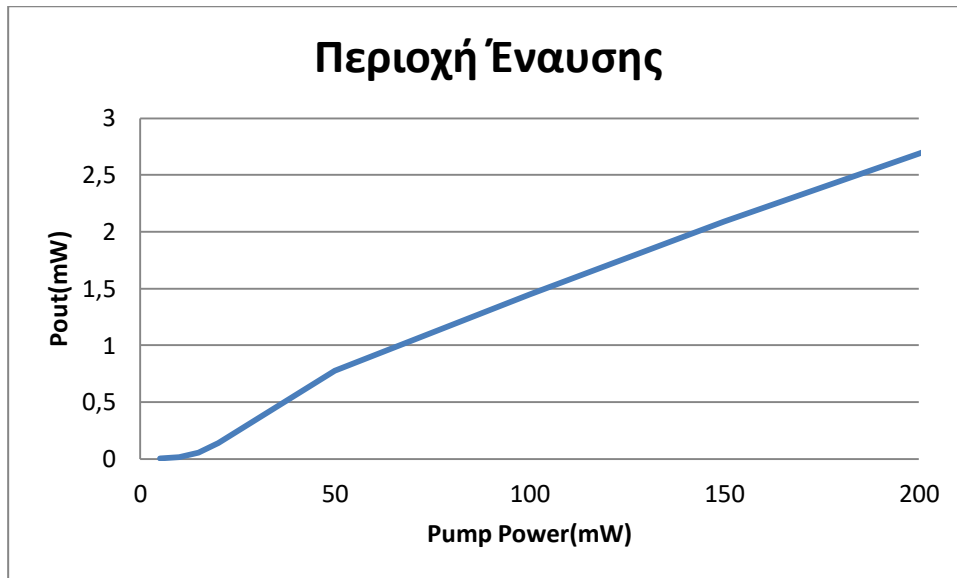
Εικόνα 52.Συνολική ισχύς φάσματος Fiber loop mirrors

Σε αυτό το διάγραμμα που βλέπουμε ότι η ισχύς εξόδου έχει την τάση να ακολουθεί αισθητή ανοδική πορεία καθώς αυξάνεται η ισχύς άντλησης, γεγονός που οφείλεται στο ότι έχουμε αύξηση ισχύος σε όλο το φάσμα ισχύος της αυθόρμητης εκπομπής της EDF.



Εικόνα 53. Η ισχύς στα 1550 nm του Fiber Mirror Loops

Το μήκος κύματος των 1550nm παρατηρούμε ότι μετά τα 150 mW ισχύος άντλησης έχουμε μια σταθερή ισχύ εξόδου (κορεσμός).

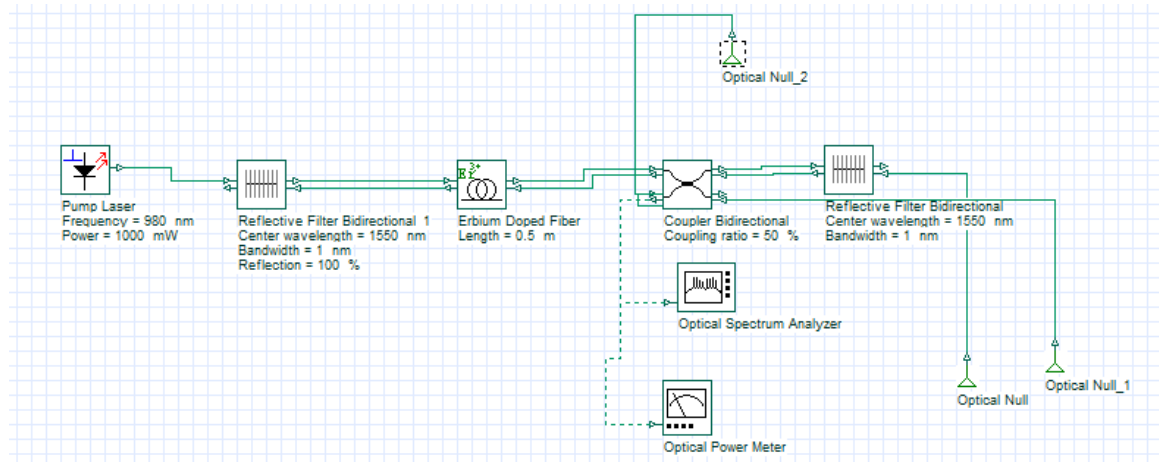


Εικόνα 54.Περιοχή Έναυσης Fiber Loop Mirrors

Λίγο πριν τα 10mW ξεκάνει η λειτουργία του laser.

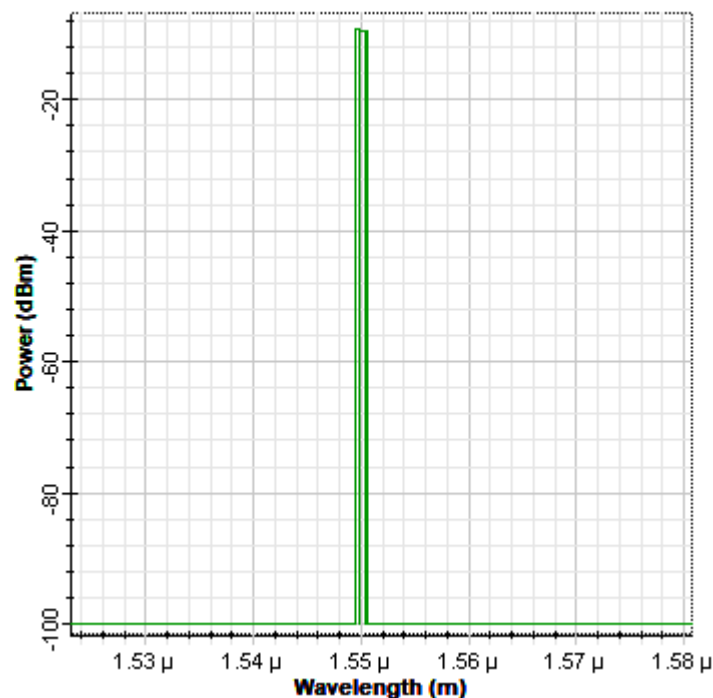
5.4 Τοπολογίες Ευθείας κοιλότητας

Σε αυτό το σημείο θα προχωρήσουμε σε μια λογική τοπολογιών που ονομάζεται Ευθεία κοιλότητα και θα εξετάσουμε 4 από αυτές . Ξεκινάμε με την πρώτη τοπολογία που είναι η παρακάτω



Εικόνα 55.Ευθεια κοιλότητα με 2 FBG (A1)

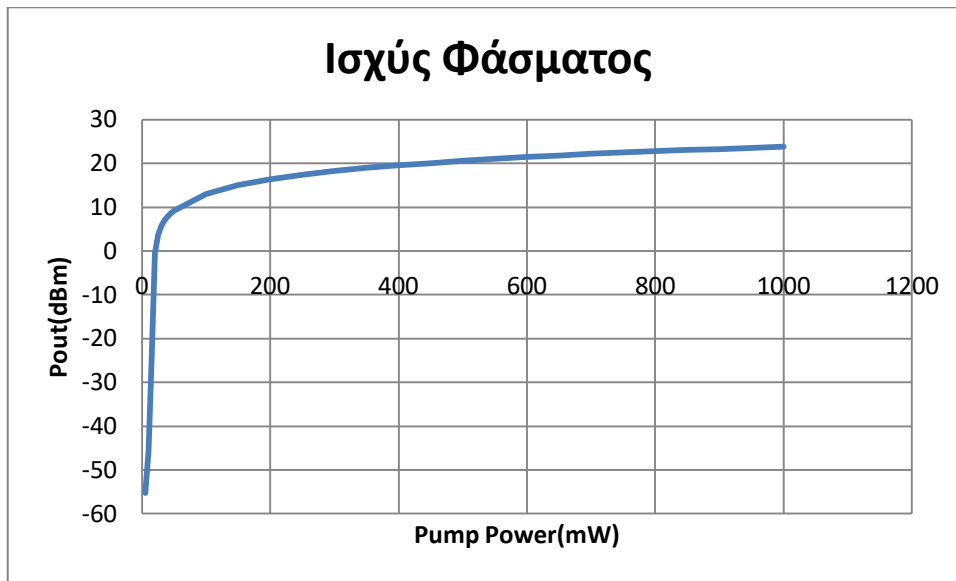
Σε αυτήν την τοπολογία κλείνουμε την EDF ανάμεσα σε δυο FBG τα όποια έχουν 100% ανακλαστικότητα των 1550nm με συνέπεια τα 1550nm να πηγαioέρχονται μέσα από την EDF και συνεχώς να ενισχύονται και παίρνουμε έξοδο από τον coupler.



Εικόνα 56.Απεικονιση φασματος A1

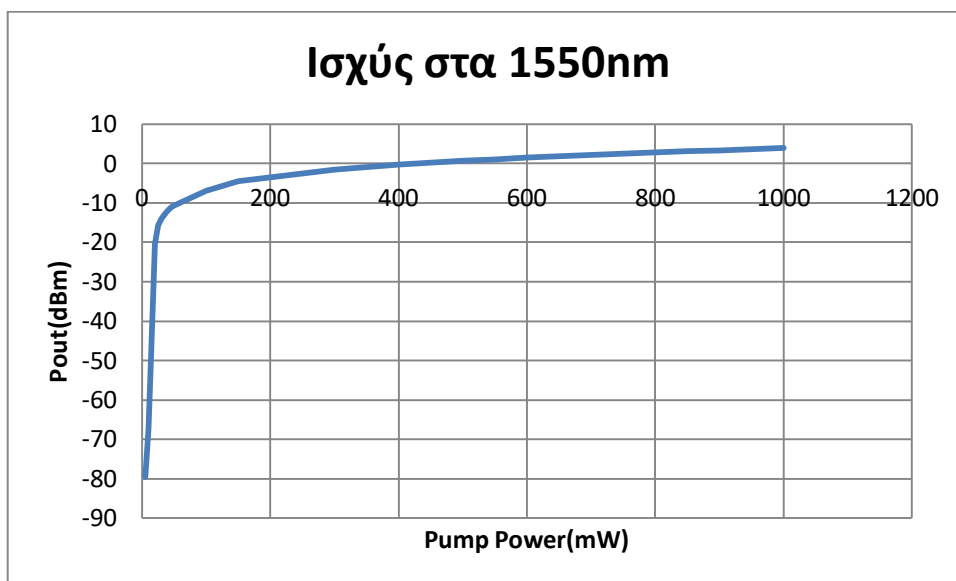
Εδώ γίνεται εμφανής η επίδραση των FBG τα όποια επιτρέπουν να περάσει όλο το φάσμα της EDF εκτός του μήκος κύματος των 1550nm το όποιο είναι το μοναδικό που συντηρείται εντός της ευθείας κοιλότητας.

Τα αντίστοιχα διαγράμματα ισχύος.



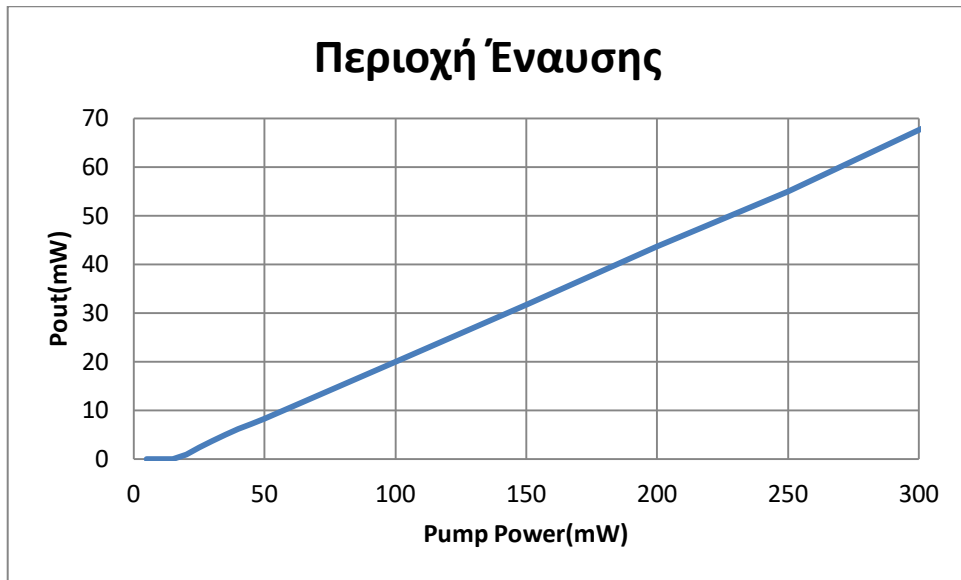
Εικόνα 57.Συνολική ισχύς φάσματος Ευθείας κοιλότητας με 2 FBG

Αρκετά υψηλή ισχύς φάσματος.



Εικόνα 58.Η Ισχύς στα 1550nm

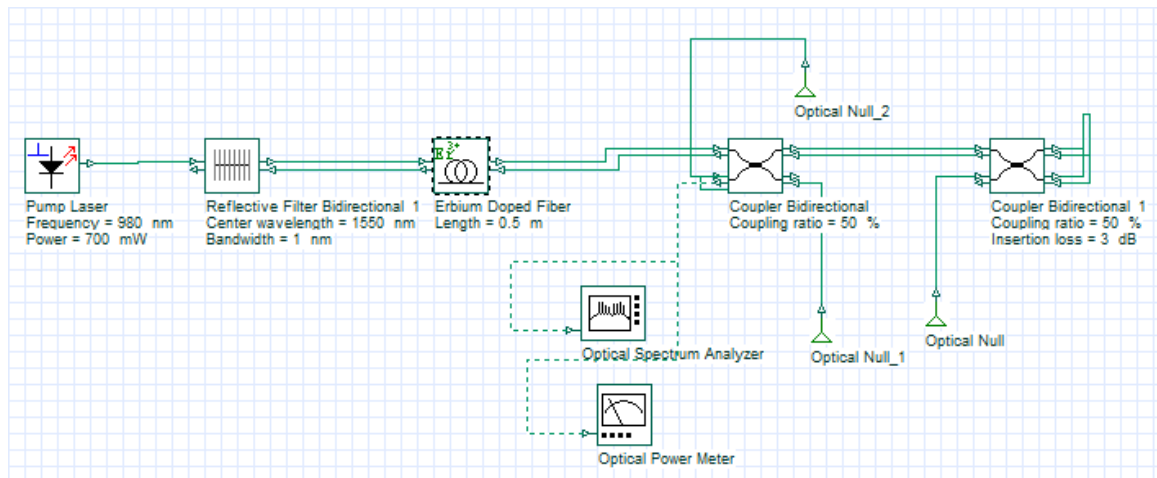
Η ισχύς στα 1550nm παρουσιάζει κορεσμό στα 400 nm.



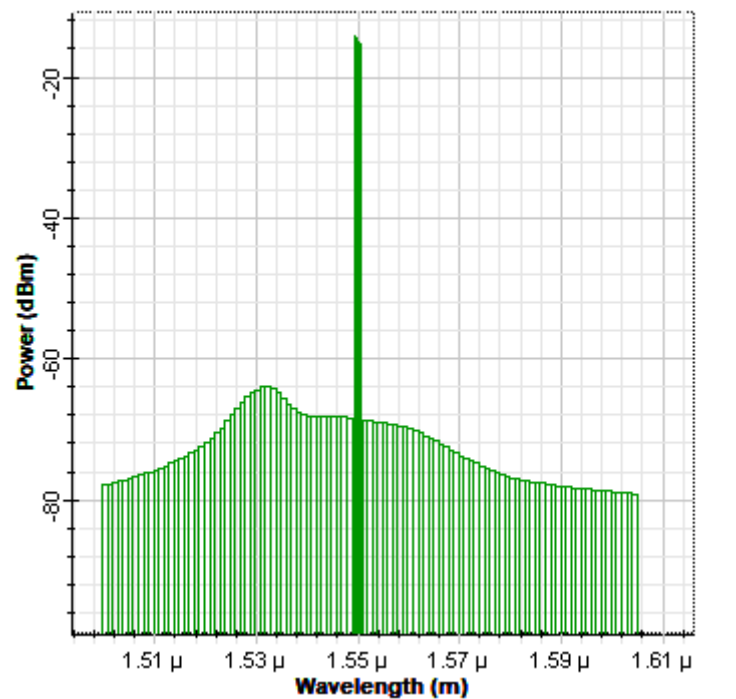
Εικόνα 59.Περιοχή έναυσης A1

Από τα 30mW είναι αισθητή η αλλαγή της κλίσης καμπύλης.

Η επομένη σε σειρά τοπολογία σε λογική ευθείας κοιλότητας είναι ακριβώς η ίδια με την αμέσως προηγούμενη με μια μικρή διαφοροποίηση. Έγινε αντικατάσταση του δεξιού FBG με ένα fiber loop mirror.



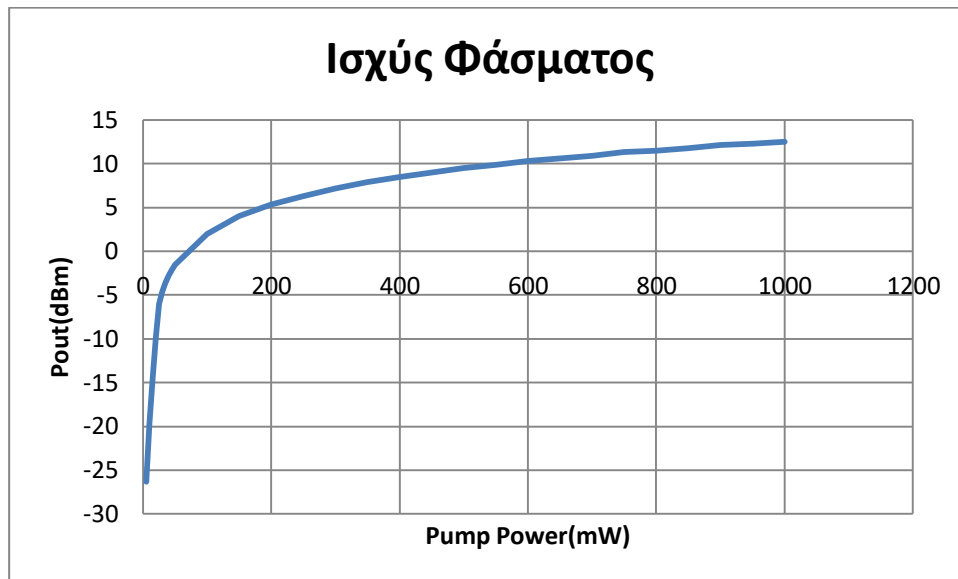
Εικόνα 60. Ευθεία κοιλότητα με fiber mirror loop στο τέλος (A2)



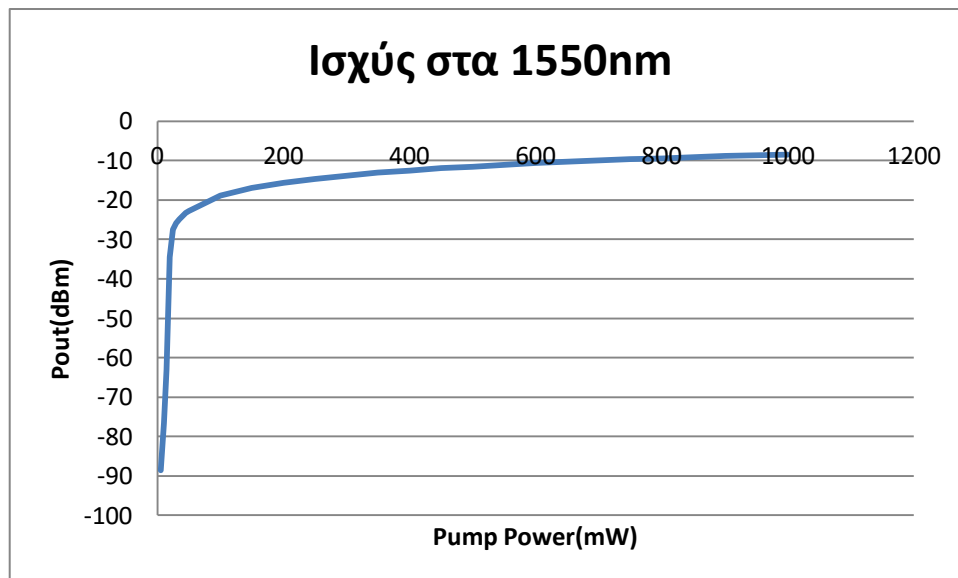
Εικόνα 61. Απεικόνιση φασματος OSA A2

Είναι εμφανές σε αυτήν την τοπολογία σε σχέση με την προηγούμενη ότι από την στιγμή που έγινε αντικατάσταση του fbg με fiber mirror loop ότι ενώ το fbg απέρριπτε όλο το φάσμα πλην των 1550nm το fiber loop mirror επιστρέφει πίσω ότι βλέπει στην είσοδο του συνεπώς και το υπόλοιπο φάσμα .

Αντιστοίχως έχουμε τα διαγράμματα ισχύος της τοπολογίας. Πρώτα την ισχύ ολικού φάσματος και έπειτα την ισχύ στα 1550 nm.

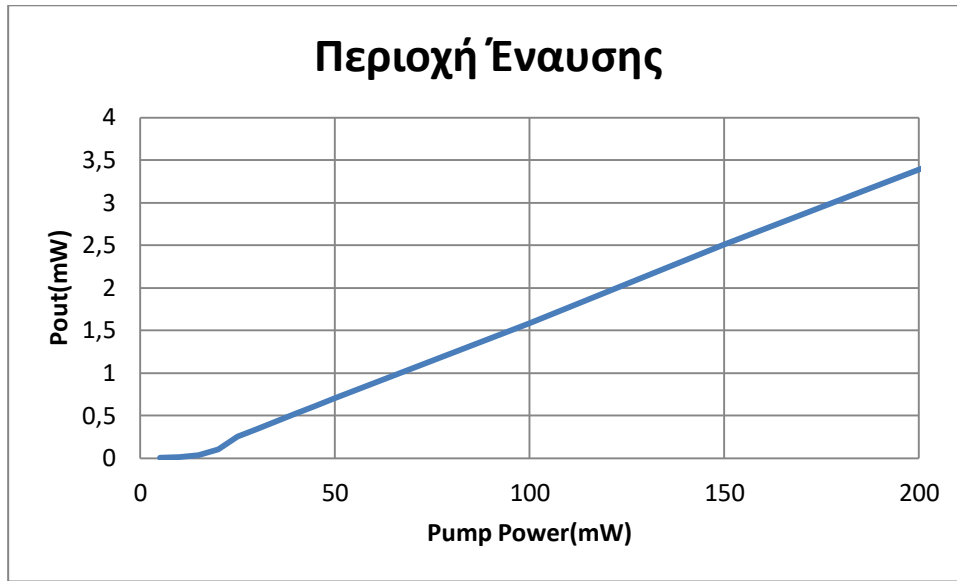


Εικόνα 62. Ισχύς ολικού φάσματος (A2)



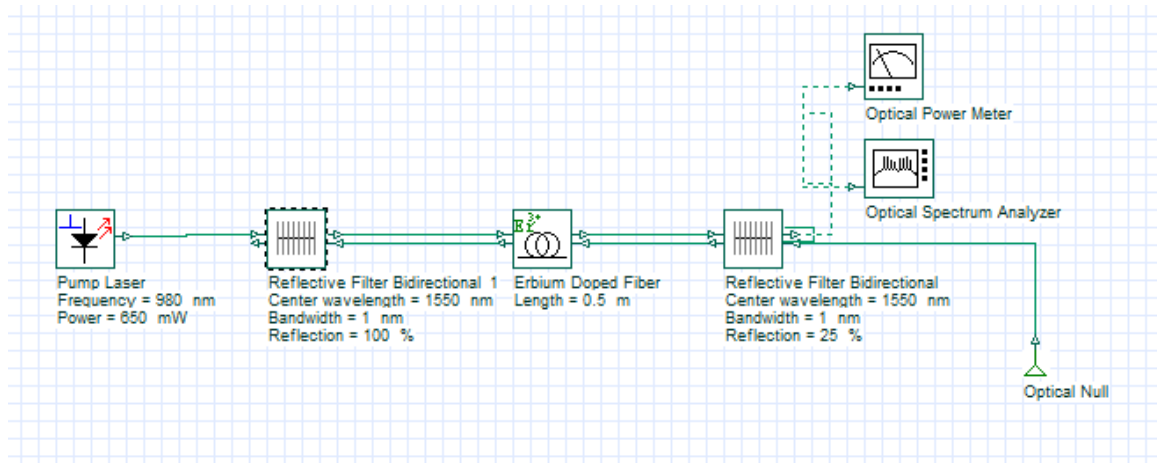
Εικόνα 63. Ισχύς στα 1550nm (A2)

Η συνολική ισχύς έχει την τάση να αυξηθεί περαιτέρω ενώ η ισχύ των 1550nm παρατηρούμε μια ομαλή απόκριση έπειτα από τα 200mW ισχύος άντλησης.

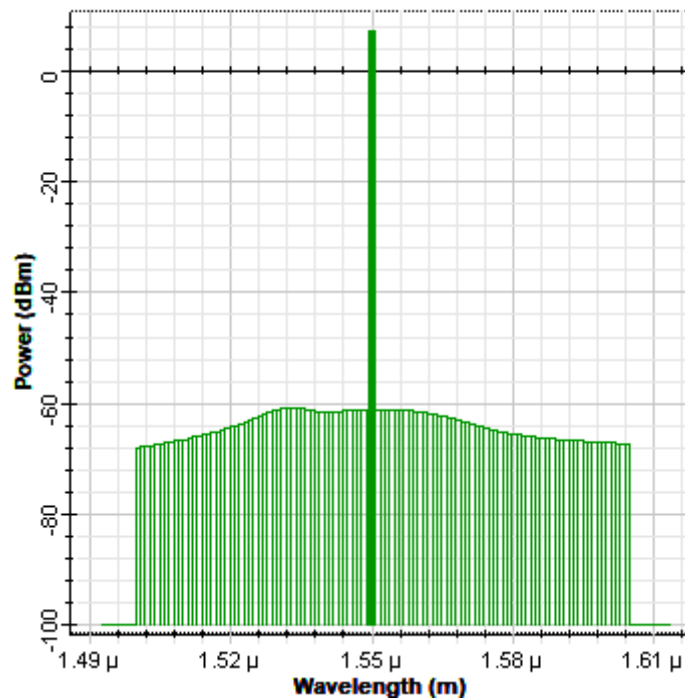


Εικόνα 64. Περιοχή έναυσης τοπολογίας A2

Εν συνεχεία η εξής τοπολογία



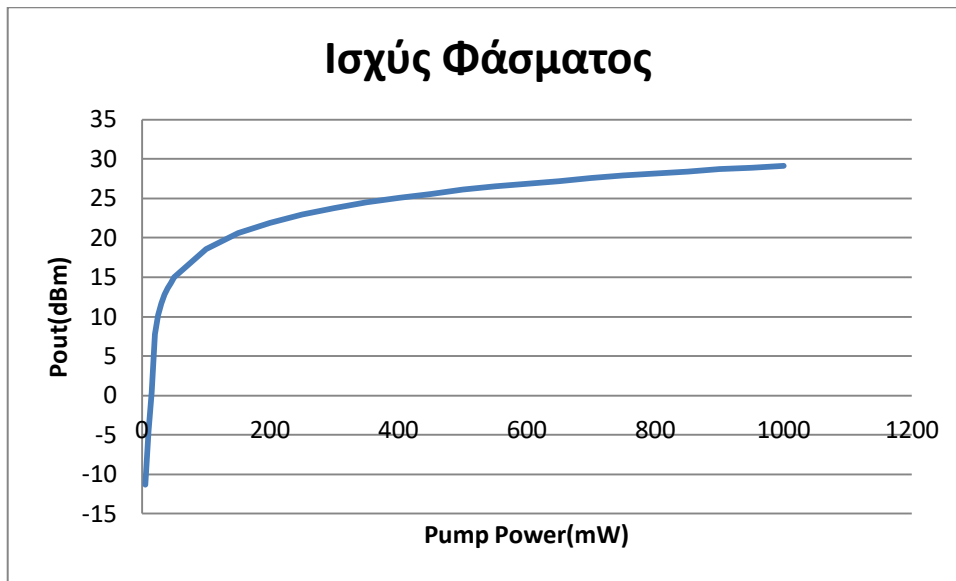
Εικόνα 65.Ευθεια κοιλότητα με 2 FBG στα άκρα (B)



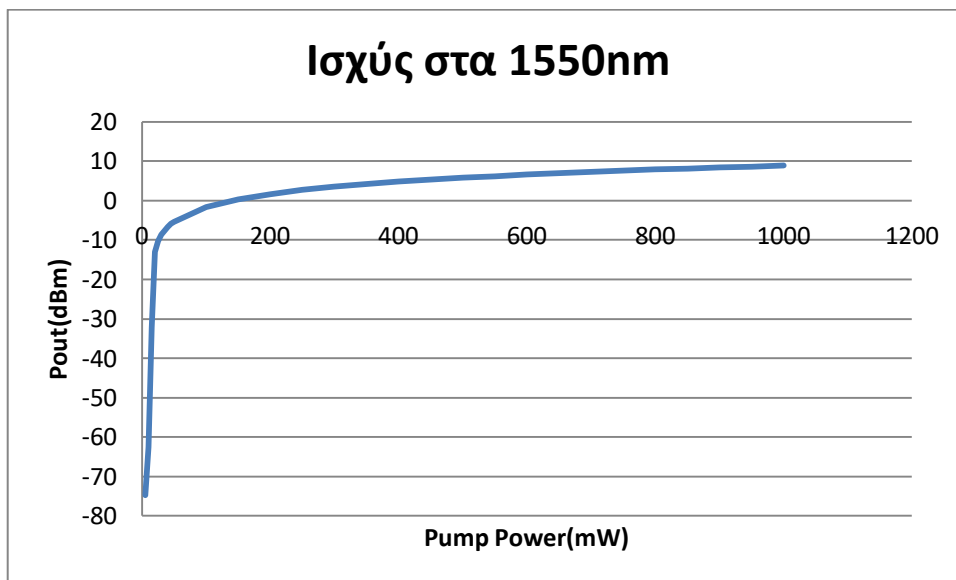
Εικόνα 66.Απεικονιση του φασματος B

Αυτή η τοπολογία ομοιάζει με την πρώτη από τις ευθείες κοιλότητες με τις εξής διαφορές . Πρώτη διάφορα είναι ότι το δεύτερο FBG έχει μικρότερη ανακλαστικότητα (25%) και δεύτερη διάφορα είναι ότι έξοδο παίρνουμε από το δεύτερο FBG επομένως περιμένουμε ως έξοδο τα 1550nm ενισχυμένα αλλά μαζί με αυτό και ένα μέρος του φάσματος της αυθόρμητης εκπομπής της EDF.

Διαγράμματα ισχύος φάσματος και στα 1550nm.

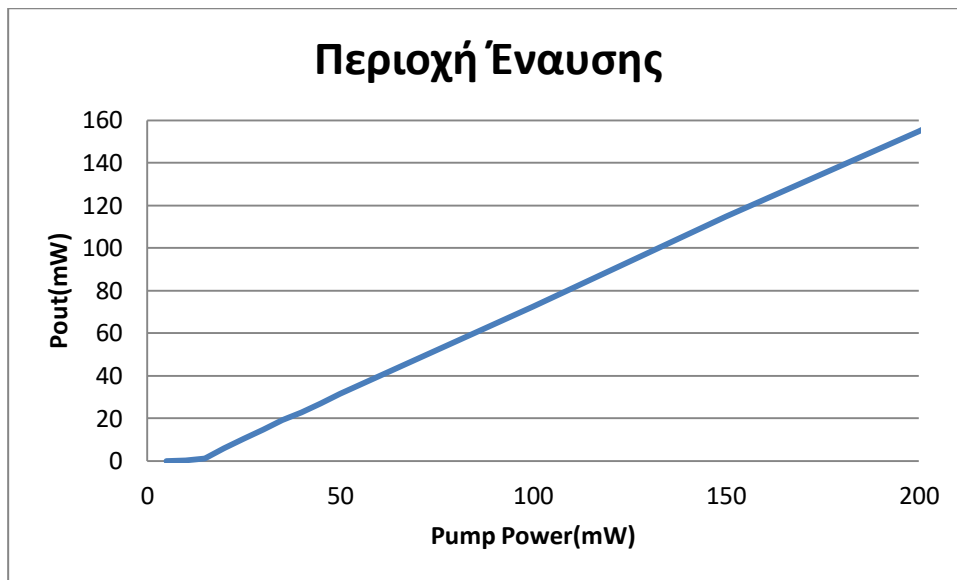


Εικόνα 67.Ισχύς φάσματος (B)



Εικόνα 68.Ισχυς στα 1550nm (B)

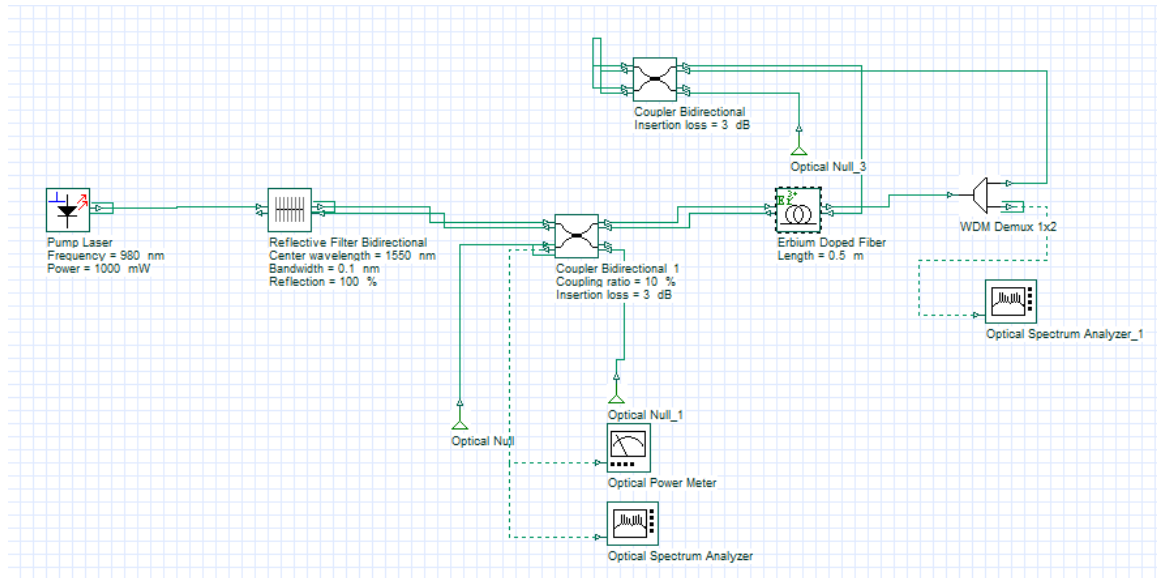
Παρατηρούμε αρκετή αύξηση της ισχύος και στο συνολικό φάσμα και στα 1550nm καθώς ανεβαίνει η ισχύς άντλησης.



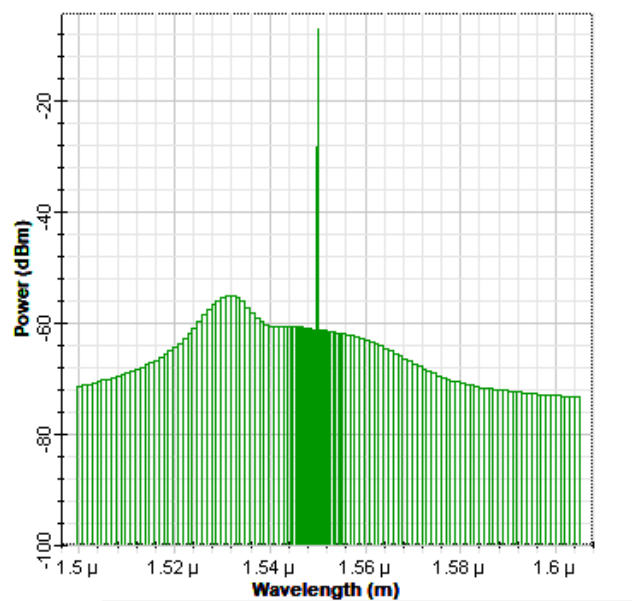
Εικόνα 69.Περιοχή Έναυσης τοπολογίας B

Παρατηρούμε ομοίως και εδώ μετά τα 20 mW έχουμε αλλαγή κλίσης στην καμπύλη ανεβαίνοντας απότομα σε μεγαλύτερες τιμές ισχύος εξόδου.

Φτάνοντας στην τελευταία προς εξέταση τοπολογία:

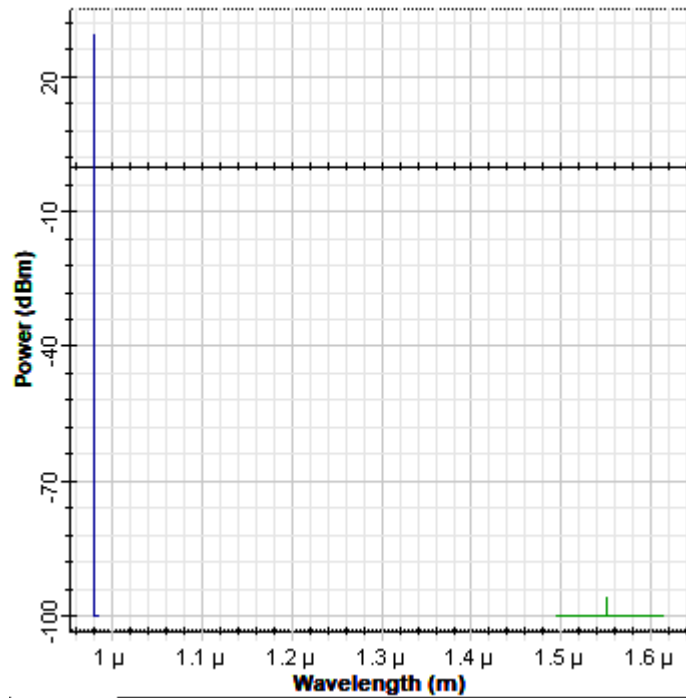


Εικόνα 70.Ευθεια κοιλότητα με FBG και fiber loop mirror(Γ)



Εικόνα 71. Απεικόνιση του φάσματος Γ

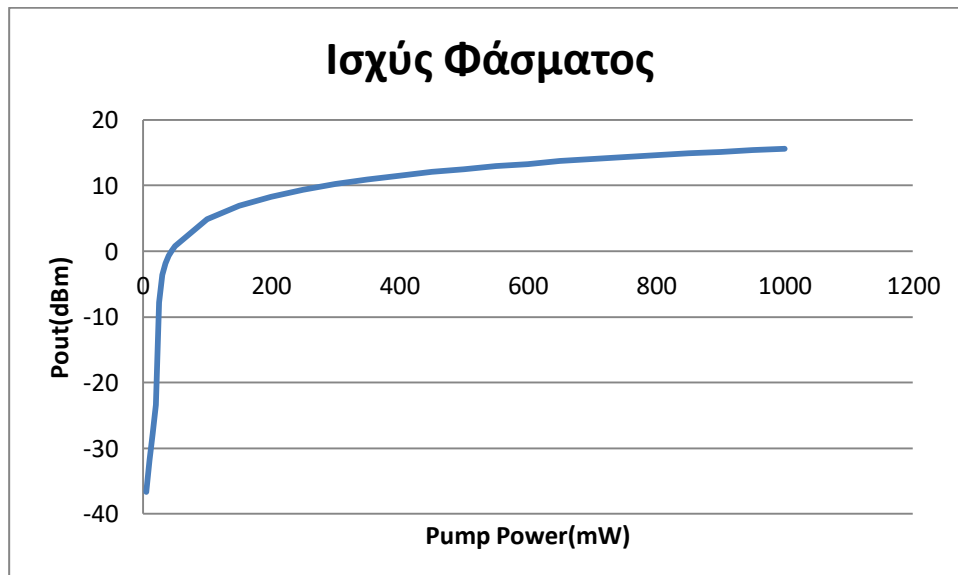
Στην συγκεκριμένη τοπολογία αριστερά από την EDF υπάρχει το FBG που ανακλά τα 1550nm από δεξιά υπάρχει ένας απόσυζεύκτης ο οποίος χωρίζει τα 980nm από τα 1550nm που στην είσοδο του τα δέχεται ως κοινό σήμα . Τα 980nm τα στέλνει στην κάτω έξοδο η οποία οδηγείται στον OSA και τα 1550 nm τα στέλνει σε ένα fiber loop mirror και από κει επιστρέφουν στην EDF με σκοπό την ενίσχυση τους .



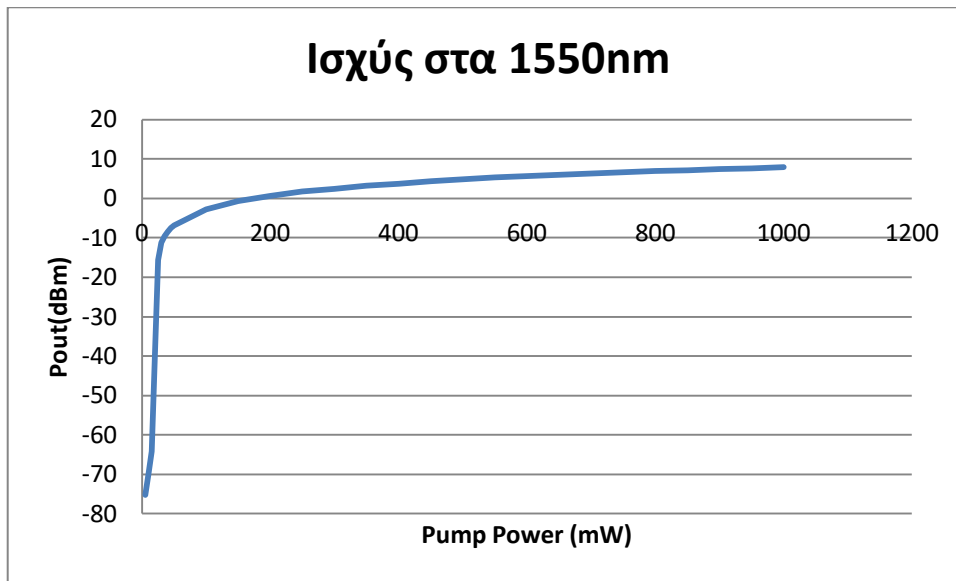
Εικόνα 72. Απεικόνιση των 980nm

Αυτή την εικόνα (69) την εξάγουμε από την κάτω έξοδο του αποσυζεύκτη .

Τα διαγράμματα ισχύος.

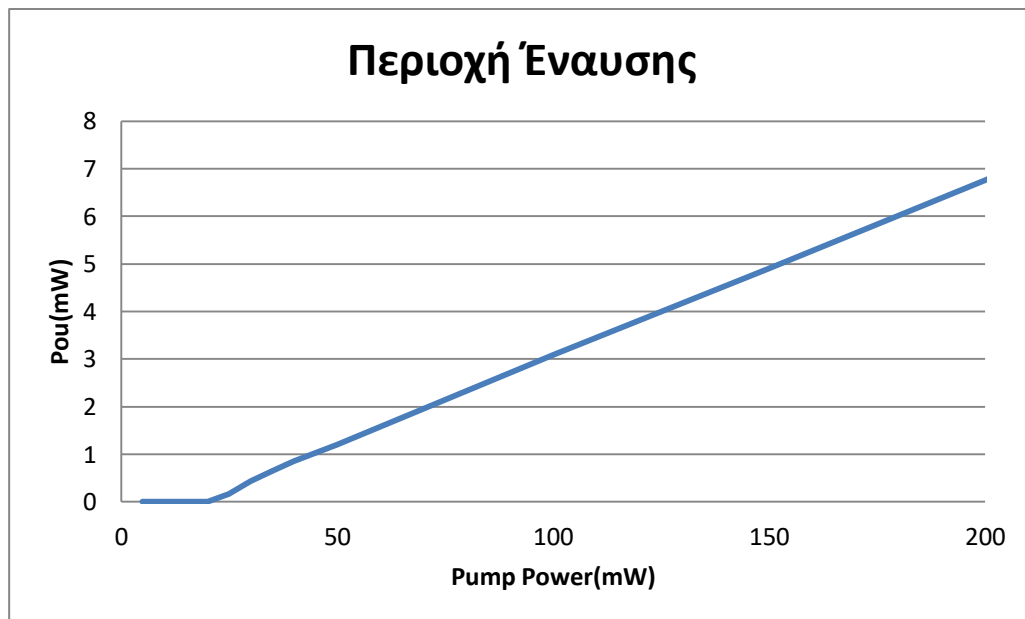


Εικόνα 73. Συνολική ισχύς φάσματος (Γ)



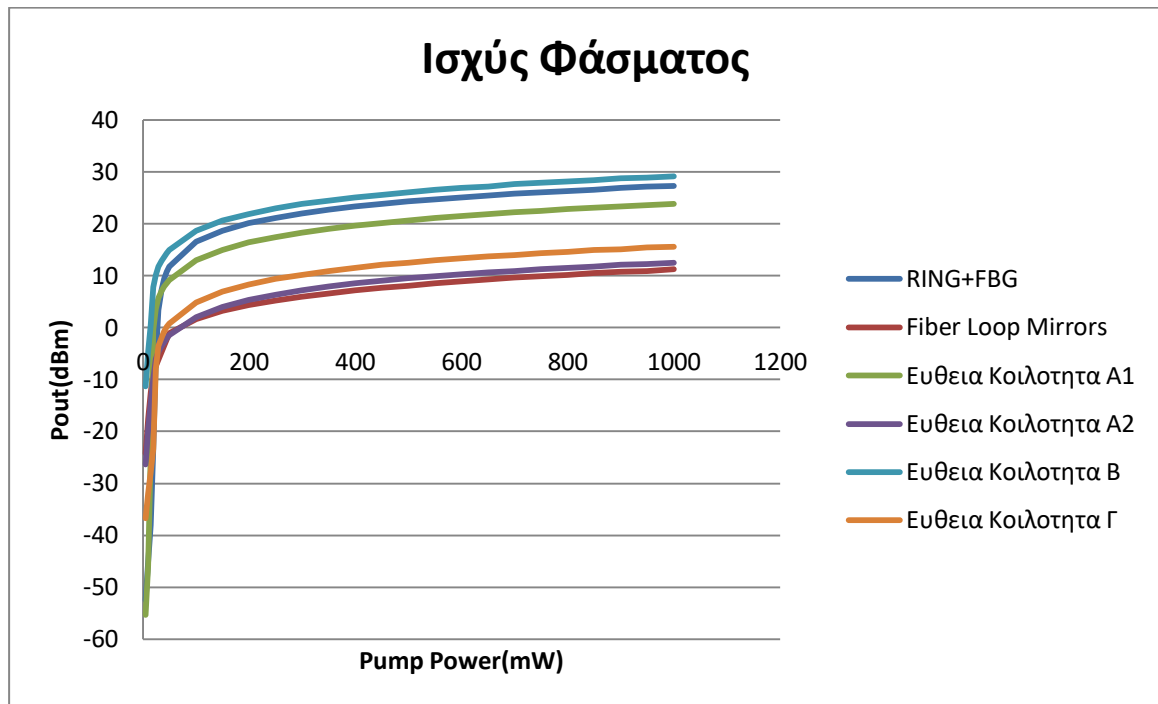
Εικόνα 74. Η ισχύς στα 1550nm

Στην εικόνα 71 παρουσιάζεται ο κορεσμός της ισχύος εξόδου μετά τα 300 mW ισχύος άντλησης.

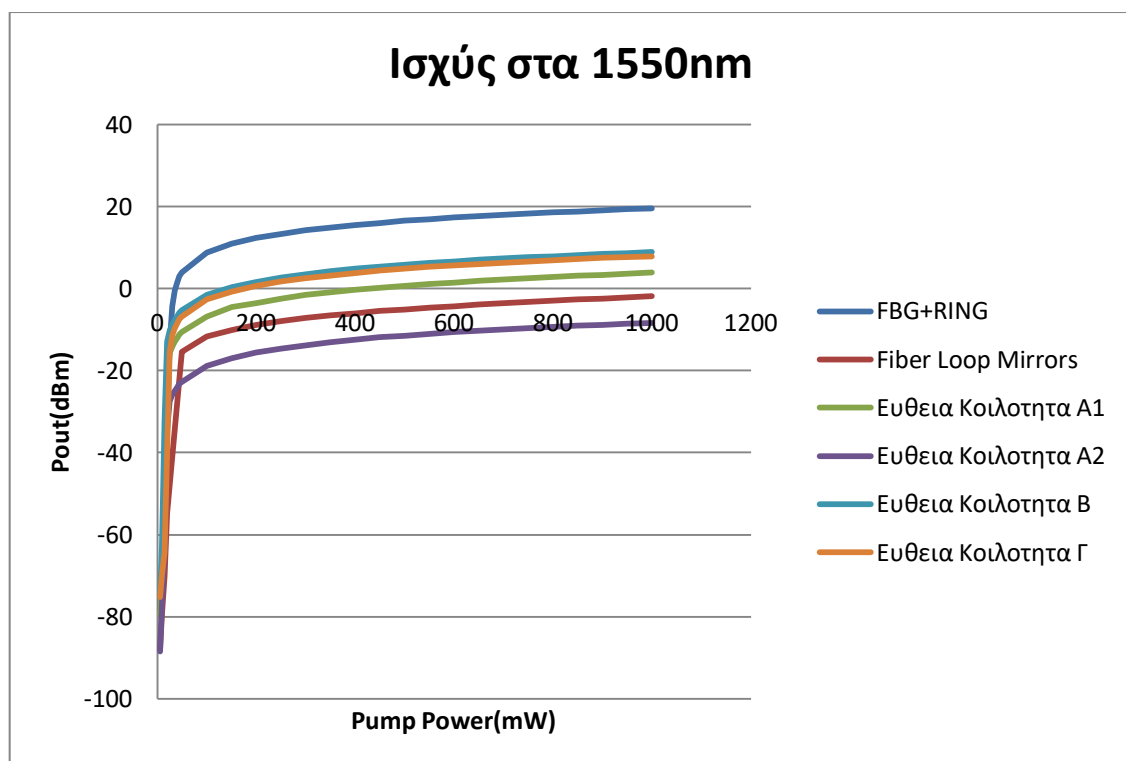


Εικόνα 75. Περιοχή έναυσης τοπολογίας Γ

Προκειμένου να βγάλουμε κάποια συμπεράσματα είναι επείγουσα η σύγκριση αυτών των τοπολογιών που εξετάσαμε.



Εικόνα 76. Ισχύς φάσματος και των 6 τοπολογιών



Εικόνα 77. Η ισχύς στα 1550nm των 6 τοπολογιών

Παρατηρούμε πως η πιο αποδοτική τοπολογία από άποψη ισχύος είναι η Ευθεία Κοιλότητα (B) η οποία είναι αμιγώς με FBG. Επίσης είναι αξιοσημείωτο και το γεγονός ότι η τοπολογία Ring+FBG είναι δεύτερη από άποψη ισχύος φάσματος, αλλά πιο αποδοτική στην ισχύ στα 1550nm.

6 Συμπεράσματα – Περίληψη

Σε αυτό το κεφάλαιο αναφέρονται τα πιο σημαντικά στοιχεία από την θεωρία της παρούσας διπλωματικής εργασίας και ακολουθούν τα συμπεράσματα που εξάγονται από τις προσομοιώσεις.

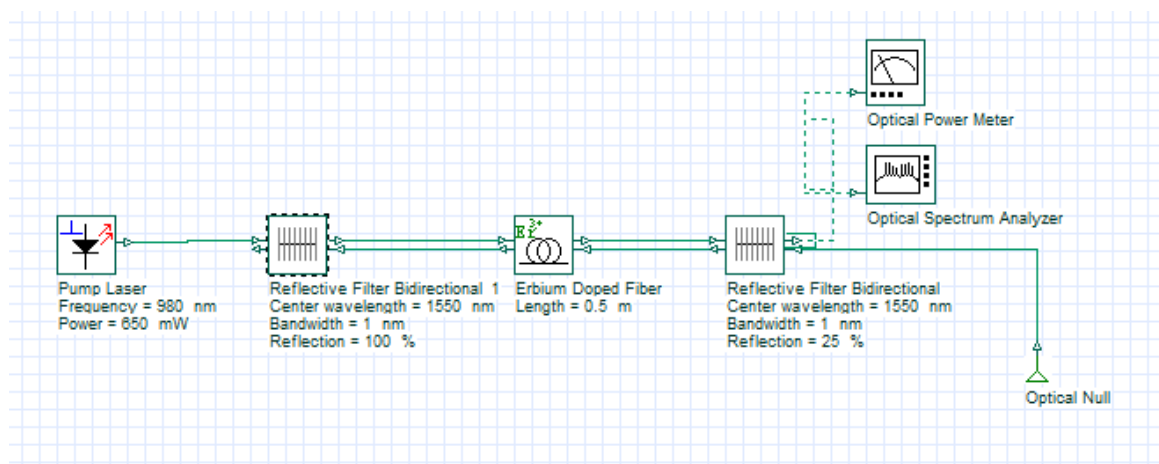
- Η οπτική ίνα είναι μια σύνθετη δομή κατασκευασμένη από γυαλί (κυρίως) η οποία αποτελείται από δυο βασικά μέρη , τον πυρήνα και τον μανδύα οι οποίοι έχουν διάφορα στον δείκτη διάθλασης ,μεγαλύτερο δείκτη διάθλασης έχει ο πυρήνας ,ώστε το φως να ταξιδεύει εντός του πυρήνα.
- Μέσω τριών κριτήριων μπορούν να κατηγοριοποιηθούν οι οπτικές ίνες:
 1. Αριθμός κυματοδηγούμενων τρόπων (Μονότροπες και Πολύτροπες)
 2. Υλικό της ίνας (Πλαστικές και Γυάλινες)
 3. Δείκτης διάθλασης (Βαθμωτού δείκτη διάθλασης ,Βηματικού δείκτη διάθλασης)
- Η εξασθένιση και η διασπορά είναι τα δυο φαινόμενα που πρωταγωνιστούν στα αρνητικά των οπτικών ινών. Η εξασθένιση οφείλεται στη σκέδαση , στην απορρόφηση ισχύος καθώς και στη γήρανσης και διαφορές φθορές. Στην διασπορά εμφανίζεται η ενδοτροπική διασπορά και η διατροπική διασπορά.
- Σπάνιες γαίες είναι τα χημικά στοιχεία του περιοδικού πίνακα τα όποια ονομάζονται και ως λανθανίδες και είναι δυσεύρετα στην φύση όμως πολύ σπουδαία στον τομέα της νόθευσης των οπτικών ινών καθώς μέσω αυτών καθορίζονται τα μήκη κύματος εκπομπής.
- Ο οπτικός ενισχυτής είναι ένα σύστημα το οποίο αποτελείται από δυο επιμέρους μέρη το ενεργό υλικό το οποίο είναι η νοθευμένη οπτική ίνα με κάποια σπάνια γαία και το σύστημα άντλησης (laser).
- Το laser αποτελείται από 3 βασικά σημεία το σύστημα άντλησης το ενεργό υλικό και την οπτική κοιλότητα.

Συμπεράσματα Προσομοιώσεων

Σε αυτό το σημείο παρουσιάζονται τα συμπεράσματα τα όποια προκύπτουν από τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων που πραγματοποιήσαμε στα προηγούμενα κεφάλαια , συνοψίζοντας , αρχικά χρησιμοποιήσαμε δύο ίνες διαφορετικής νόθευσης και μήκους με σκέτη άντληση, έπειτα τις τοποθετήσαμε ως πυρήνα σε ενισχυτικές διατάξεις και τέλος τοποθετήσαμε την Er110 dB/m , 0.5m στις τοπολογίες laser.

- Συγκρίναμε δύο διαφορετικές οπτικές ίνες ως προς τη νόθευση η μια ήταν Er 110 και η δεύτερη Er 30 , σε τρία διαφορετική μήκη 0.2m , 0.5m ,1m . Το μεγαλύτερο μήκος υπερτερεί στην μέτρηση ισχύος των 1550nm ενώ στη μέτρηση ισχύος φάσματος υπερτερεί το μικρότερο μήκος (ή συγκλίνει με τα λοιπά μήκη ίνας στην περίπτωση της Er 30)
- Στην προσομοίωση του ενισχυτή παρατηρούμε πως το σήμα με την χαμηλότερη ισχύ παρουσιάζει μεγαλύτερο κέρδος έναντι ισχυρών σημάτων τα οποία επιδέχονται μικρότερη ενίσχυση. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι δεν υπάρχουν φορείς (ηλεκτρόνια) ή δυνατότητα της άντλησης ώστε να ενισχυθεί εξίσου με ένα ανίσχυρο σήμα
- Στο κομμάτι της προσομοίωσης του Ring laser παρατηρούμε πως η νόθευση της ίνας παίζει πολύ σημαντικό ρολό στην ισχύ εξόδου του σήματος, καθώς και το BW στο φίλτρο της ανάδρασης
- Πραγματοποιήσαμε αρκετές τοπολογίες laser και η πιο αποδοτική από άποψη ισχύος φάσματος είναι η παρακάτω τοπολογία σε λογική ευθείας κοιλότητας (τοπολογία B)
- Από άποψη ισχύς στα 1550nm πιο αποδοτική είναι η τοπολογία με συνδυασμό FBG+RING.
- Η τοπολογία του FBG+RING έχει αρκετά πιο υποβαθμισμένη την αυθόρμητη εκπομπή του Ερβίου έναντι της τοπολογίας B
- Οι περιοχές έναυσης των laser ομοιάζουν και αυτό είναι χαρακτηριστικό του μήκους της νοθευμένης ίνας καθώς και της τοπολογίας (κοιλότητα).
- Το μήκος της νοθευμένης ίνας έχει σημαντική επιρροή στην δημιουργία του laser καθώς δημιουργεί τον "διάδρομο" που θα περάσει το φως ώστε να ενισχυθεί αν αυτός είναι πολύ μικρός τότε δεν θα βγει ικανοποιητική ισχύς στην έξοδο προκειμένου να λειτουργήσει ένα laser

Κλείνοντας , κάθε τοπολογία που εξετάσαμε παραπάνω μπορεί βελτιστοποιηθεί όσο αναφορά τις παραμέτρους των στοιχείων που λαμβάνουν μέρος (couplers , FBG κλπ). Μια μελέτη τοπολογίας εξαρτάται και κρίνεται από διάφορα κριτήρια μερικά από αυτά είναι η απόδοση σε θέματα ισχύος , η συνθετότητα δημιουργίας της με πραγματικά στοιχεία , οι οικονομικές ζημιές ώστε να παραχθεί . Οποιοδήποτε έργο έτσι και οι τοπολογίες παραπάνω πρέπει να εξυπηρετούν τα εκάστοτε κριτήρια που έχουν εφαρμοστεί. Για αυτό αν επιλέγαμε μια βέλτιστη τοπολογία, αυτή θα ήταν η τοπολογία ευθείας κοιλότητας (B). Διότι η συγκεκριμένη τοπολογία έχει τα πιο λίγα components επομένως και σε θέματα οικονομικής επιβάρυνσης αλλά και σε θέματα βελτιστοποίησης είναι πιο εύκολα διαχωρίσιμη , επίσης δεν εμπεριέχει στοιχεία που να καταναλώνουν άσκοπα ισχύ όπως είναι οι couplers γεγονός που θα οδηγούσε σε θέματα ισχύος και έπρεπε να ληφθούν υπόψη . Εν κατακλείδι είναι σχετικά εύκολα υλοποιήσιμη καθώς είναι μια ευθεία κοιλότητα (δίχως αναδράσεις , loop) και είναι μικρός ο αριθμός των components. Αν σε αυτήν την τοπολογία εφαρμόσουμε διάφορες βελτιστοποιήσεις όπως εναλλαγή της ανακλαστικότητας των FBG , του μήκους της ίνας , ίσως της νόθευσης τότε θα σχολιάζαμε μια εντελώς διαφορετική τοπολογία (από άποψη απόδοσης) όμως με τα ίδια components.



Εικόνα 78. Ευθεία κοιλότητα (B)

Βιβλιογραφία – Αναφορές - Διαδικτυακές Πηγές

1. A.Cucinotta, S. (1997). Modeling of erbium doped fiber ring laser. Parma,Italy.
2. FiberLabs Inc. (n.d.). *FiberLabs Inc.* Ανάκτηση από FiberLabs Inc: <https://www.fiberlabs.com/glossary/praseodymium-doped-fiber-amplifier/>
3. FOSCO. (n.d.). *FOSCO.* Ανάκτηση από FOSCO: <https://www.fiberoptics4sale.com/blogs/archive-posts/95044294-what-are-rare-earth-doped-fibers>
4. Keopsys. (2016). *Keopsys.* Ανάκτηση από Keopsys by Lumibird: <https://www.keopsys.com/portfolio/cw-thulium-fiber-laser-tera-series/>
5. M. Lezius, K. P. (2012). Radiation Induced Absorption in Rare Earth Doped Optical Fibers. 425-433. IEEE TRANSACTIONS ON NUCLEAR SCIENCE.
6. Optiwave Systems Inc. (n.d.). *Optiwave Systems Inc.* Ανάκτηση από Optiwave Photonic Software: <https://optiwave.com/optisystem-overview/>
7. Optromix. (2017). *Optromix.* Ανάκτηση από Optromix: <https://lasers4lab.com/wp/high-power-ytterbium-doped-fiber-lasers-for-biomedical-applications/>
8. Renk, K. (2017). *Basics of laser Physics.* Regensburg,Germany: Springer.
9. RP Photonics Encyclopedia. (n.d.). *RP Photonics Encyclopedia.* Ανάκτηση από RP Photonics Encyclopedia: https://www.rp-photonics.com/fiber_amplifiers.html
10. Wikipedia. (2020). *Wikipedia.* Ανάκτηση από Wikipedia: https://en.wikipedia.org/wiki/Er:YAG_laser
11. Γεράσιμος, Π. (2014). *Ινοοπτικές επικοινωνίες.* Θεσσαλονίκη: Τζιολα.
12. Μ.Μπενής, Ε. Κ. (2014). *Φυσική των Laser Ειδικά Συστήματα.* Ανάκτηση από Πανεπιστήμιο Ιωαννίνων: http://ecourse.uoi.gr/pluginfile.php/87959/mod_resource/content/7/LASER-CH9.pdf
13. <http://zulfaqars.blogspot.com/2013/11/optical-fiber.html>
14. https://el.wikipedia.org/wiki/%CE%A3%CF%80%CE%AC%CE%BD%CE%B9%CE%B5%CF%82_%CE%B3%CE%B1%CE%AF%CE%B5%CF%82
15. <https://en.wikipedia.org/wiki/Erbium>

16. <https://www.semanticscholar.org/paper/AMPLIFIED-SPONTANEOUS-EMISSIONS-IN-NEODYMIUM-DOPED-Geddes/90a1f7519729d507e333cb341d3c8723a5f823f5>
17. https://www.rp-photonics.com/ytterbium_doped_gain_media.html
18. <https://support.lumerical.com/hc/en-us/articles/360042819353-Erbium-doped-fiber-amplifier>
19. <https://www.osapublishing.org/oe/fulltext.cfm?uri=oe-22-23-29067&id=304660>
20. Indian Institute of Science (2014) ,Fiber Lasers: Fundamentals and Applications
21. https://en.wikipedia.org/wiki/Optical_ring_resonators
22. https://en.wikipedia.org/wiki/Fiber_Bragg_grating
23. https://en.wikipedia.org/wiki/Laser_pumping