



**ΔΙΕΘΝΕΣ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΕΛΛΑΔΑΣ  
ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΚΗΣ**

**ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΚΗΣ, ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ & ΤΗΛΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΩΝ**

**Πρόγραμμα Μεταπτυχιακών Σπουδών  
Τηλεπικοινωνίες & Δίκτυα Η/Υ**

**ΜΕΛΕΤΗ ΚΑΙ ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΑΙΣΘΗΤΗΡΩΝ  
ΟΠΤΙΚΩΝ ΙΝΩΝ ΒΑΣΙΣΜΕΝΩΝ ΣΤΑ ΦΡΑΓΜΑΤΑ BRAGG (FBGs)**

**ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ**

**Νικόλαου Πούλιου**

**A.M: 35**

**Τριμελής Εξεταστική Επιτροπή:**

**Επιβλέπων:     Δήμητρα Κετζάκη**

**Χρήστος Αναστασίου**

**Αναστάσιος Παπατσώρης**

**Σέρρες, Φεβρουάριος 2024**

## ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Η παρούσα διπλωματική εργασία εκπονήθηκε στα πλαίσια του Μεταπτυχιακού Προγράμματος Σπουδών «Τηλεπικοινωνίες & Δίκτυα Η/Υ» του Τμήματος Μηχανικών Πληροφορικής, Υπολογιστών & Τηλεπικοινωνιών, υπό την επίβλεψη της καθηγήτριας Δήμητρας Κετζάκη. Θα ήθελα να ευχαριστήσω την κ. Κετζάκη για την πολύτιμη βοήθεια, αλλά και την συμπαράσταση της ώστε να ολοκληρωθεί με επιτυχία η παρούσα διπλωματική εργασία. Επίσης θα ήθελα να ευχαριστήσω τον κ. Αναστάσιο Παπατσώρη και τον κ. Χρήστο Αναστασίου καθώς και τον Διευθυντή του προγράμματος κ. Δημήτριο Ευσταθίου, που ήταν πάντα δίπλα σε όλους τους φοιτητές του μεταπτυχιακού προγράμματος και μας φιλοξένησε με τον καλύτερο δυνατό τρόπο, ώστε να εξελιχθεί ομαλά η ολοκλήρωση του προγράμματος χωρίς να αντιμετωπίσουμε απολύτως κανένα πρόβλημα. Τέλος θέλω να ευχαριστήσω όλους τους καθηγητές του Μεταπτυχιακού Προγράμματος, που με την εμπειρία τους και τις γνώσεις τους, μας έδωσαν όλα εκείνα τα εφόδια ώστε να αποκτήσουμε σημαντικές γνώσεις πάνω στον τομέα των Τηλεπικοινωνιών, καθώς και των Δικτύων Ηλεκτρονικών Υπολογιστών. Ιδιαίτερες ευχαριστίες όμως θέλω να εκφράσω στους γονείς μου και στον αδερφό μου, που όλα αυτά τα χρόνια είναι δίπλα μου και με στηρίζουν σε κάθε προσπάθεια και επιλογή που κάνω.

## ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Στόχος της μεταπτυχιακής διπλωματικής εργασίας είναι η ανάλυση, μελέτη και μοντελοποίηση συστημάτων αισθητήρων οπτικών ινών βασισμένων στα φράγματα Bragg (FiberBraggGratings-FBGs). Τα FBGs χρησιμοποιούνται για την ανίχνευση και την παρακολούθηση ποικίλων φυσικών παραμέτρων όπως η πίεση, η θερμοκρασία και η καταπόνηση (strain) σε πλήθος εφαρμογών που εκτείνονται από τις κατασκευές και τη βιομηχανία έως την αεροπλοΐα, την βιοϊατρική κ.α. Πιο συγκεκριμένα, στα πλαίσια της εργασίας θα μελετηθεί και θα μοντελοποιηθεί ένα σύστημα αισθητήρων οπτικών ινών με βάση τα φράγματα Bragg. Η ανάλυση αυτού του συστήματος θα πραγματοποιηθεί τόσο θεωρητικά (με βάση τη βιβλιογραφία) όσο και υπολογιστικά με τη βοήθεια των προγραμμάτων OptiSystem, OptiGrating&Matlab, ενώ θα περιγραφούν και τα αναμενόμενα χαρακτηριστικά του υπό μελέτη συστήματος αισθητήρων.

## **ABSTRACT**

The aim of this master thesis is the analysis, study and modeling of fiber optic sensor systems based on Fiber Bragg Gratings (FBGs). FBGs are used to detect and monitor various physical parameters, such as pressure, temperature and strain, in a plethora of applications ranging from constructions and industry to aviation, biomedicine, etc. More specifically, within the framework of this thesis, a fiber optic sensor system based on Bragg barriers will be analyzed and modeled. The analysis of this system will be carried out both theoretically (based on the literature) and computationally with the help of OptiSystem, OptiGrating& Matlab programs, and will describe the expected characteristics of the sensor system under study.

## Περιεχόμενα

Ευχαριστίες.....	2
Περίληψη.....	3
Περιεχόμενα.....	5
Περιεχόμενα Εικόνων.....	6
Περιεχόμενα Πινάκων.....	7
<b>Κεφάλαιο 1<sup>ο</sup>. Οπτικές Ύφες</b> .....	8
1.1 Εισαγωγικές Έννοιες .....	8
1.2 Βασικές Αρχές Λειτουργίας Οπτικών Ινών .....	11
1.3 Κατηγορίες Οπτικών Ινών .....	13
1.4 Πλεονεκτήματα & Μειονεκτήματα Οπτικών Ινών .....	15
1.5 Εφαρμογές & Προοπτική Οπτικών Ινών ως Αισθητήρες.....	16
<b>Κεφάλαιο 2<sup>ο</sup>. Φράγματα Bragg (Bragg Gratings)</b> .....	17
2.1 Γενικά Χαρακτηριστικά & Τρόποι Λειτουργίας Φραγμάτων (Gratings) Bragg .....	17
2.2 Κατηγορίες Φραγμάτων Bragg .....	18
<b>Κεφάλαιο 3<sup>ο</sup>. Αισθητήρες Οπτικών Ινών Χρησιμοποιώντας Φράγματα Bragg</b> .....	20
3.1 Αισθητήρες Οπτικών Ινών .....	20
3.2 Πλεονεκτήματα & Μειονεκτήματα Αισθητήρων Οπτικών Ινών .....	23
3.3 Αρχές Λειτουργίας Αισθητήρων Οπτικών Ινών με Φράγματα Bragg .....	24
3.4 Εφαρμογές Αισθητήρων Οπτικών Ινών .....	26
<b>Κεφάλαιο 4<sup>ο</sup>. Μελέτη Αισθητήρων Οπτικών Ινών με Φράγματα Bragg</b> .....	27
4.1 Γενικοί Ορισμοί.....	27
4.2 Περιγραφή Σχεδιαστικού Κυκλώματος Uniform Grating (FBG) & πFBG.....	28
4.3 Περιγραφή Διαδικασίας Προσομοίωσης.....	31
4.3.1 Ανάλυση Απόδοσης Ομοιόμορφων FBG για Μεταβλητά L και $\Delta n_{ac}$ .....	33
4.3.2 Ανάλυση Απόδοσης FBG με Αποδίωξη για Βέλτιστα L και $\Delta n_{ac}$ .....	36
4.3.3 Ανάλυση Απόδοσης πFBG για Βέλτιστα L και $\Delta n_{ac}$ .....	38
4.3.4 Σύγκριση Απόδοσης FBG Ομοιόμορφου και Μετατοπισμένης Φάσης π FBG.....	39
4.3.5 Σύγκριση Απόδοσης των διάφορων τύπων FBG.....	39
4.3.6 Συσχέτιση Ανακλαστικότητας με Μήκος φράγματος & Μεταβολής διαμόρφωσης Δείκτη διάθλασης.....	40
4.3.7 Επίδραση της Μεταβολής Θερμοκρασίας στο Ομοιόμορφο FBG- Αισθητήρας Θερμοκρασίας.....	42
4.3.8 Επίδραση της Μεταβολής Θερμοκρασίας στο πFBG.....	44
4.3.9 Επίδραση της Μεταβολής Θερμοκρασίας στο πFBG Gaussian.....	46
4.4 Αναλύσεις και Συγκρίσεις.....	48
4.4.1 Ανάλυση Απόδοσης πFBG.....	48
4.4.2 Ανάλυση Απόδοσης πFBG Gaussian apodized.....	49
4.4.3 Επίδραση μεταβολής θερμοκρασίας στο ομοιόμορφο FBG, στο πFBG και στο πFBG Gaussian apodized.....	50
<b>Συμπεράσματα</b> .....	51
<b>Βιβλιογραφία</b> .....	53
<b>Παραρτήματα</b> .....	55
Π.1 Προγράμματα.....	55
Π.1.1 Πρόγραμμα OptiSystem.7.....	55
Π.1.2 Πρόγραμμα OptiGrating.....	58
Π.1.3 Πρόγραμμα Matlab.....	61
Π.2 Πίνακες.....	63
Π.2.1 Συγκεντρωτικός πίνακας αποτελεσμάτων.....	63
Π.2.2 Συγκεντρωτικός πίνακας θερμοκρασιών.....	63

## Περιεχόμενα Εικόνων

Εικόνα. 1 :	Καλώδιο οπτικών ινών	9
Εικόνα. 2 :	Διάδοση δέσμης φωτός σε οπτική ίνα	9
Εικόνα. 3 :	Μέρη οπτικής ίνας	10
Εικόνα. 4 :	Εξασθένιση σε οπτικές	11
Εικόνα. 5 :	Μερική εσωτερική ανάκλαση κρίσιμη γωνία πρόσπτωσης $\phi_1 > \phi_c$ ολική ανάκλαση	12
Εικόνα. 6 :	Είδη οπτικών ινών	13
Εικόνα. 7 :	Διασπορά πολύτροπης ίνας βηματικού δείκτη	14
Εικόνα. 8 :	Ίνα διαβαθμισμένου δείκτη	15
Εικόνα. 9 :	Σχηματικό διάγραμμα ενός FBG	18
Εικόνα. 10 :	Κοινό φράγμα Bragg «Uniform Bragg Grating»	19
Εικόνα. 11 :	Chirped Bragg Grating	19
Εικόνα. 12 :	Tilted Bragg Grating	19
Εικόνα. 13 :	φράγμα Bragg υπερδομής «Superstructure Bragg Grating»	20
Εικόνα. 14 :	Τυπική διάταξη ενός αισθητήρα οπτικών ινών	21
Εικόνα. 15 :	Απεικόνιση εσωτερικού & εξωτερικού αισθητήρα	21
Εικόνα. 16 :	Διάφοροι τύποι αισθητήρων ανάλογα με μέγεθος και τη θέση του αισθητηρίου	22
Εικόνα. 17 :	Τρόπος λειτουργίας ενός αισθητήρα οπτικών ινών με φράγματα Bragg (1)	24
Εικόνα. 18 :	Τρόπος λειτουργίας ενός αισθητήρα οπτικών ινών με φράγματα Bragg (2)	25
Εικόνα. 19 :	Σχεδιαστικό κύκλωμα για uniform FBG	28
Εικόνα. 20 :	Σχηματική απεικόνιση ενός uniform FBG	29
Εικόνα. 21 :	Σχεδιαστικό κύκλωμα για πFBG	30
Εικόνα. 22 :	Σχηματική απεικόνιση πFBG	31
Εικόνα. 23 :	Διάγραμμα για Uniform FBG με $L=10.000_{\mu m}$ & $\Delta n = 0.5 * 10^{-4}$ έως $5 * 10^{-4}$	33
Εικόνα. 24 :	Διάγραμμα για Uniform FBG με $\Delta n_{ac}=0.0003$ & $L =$ από $10.000_{\mu m}$ έως $90.000_{\mu m}$	34
Εικόνα. 25 :	Διάγραμμα για Uniform FBGs με $\Delta n_{ac}=0.0003$ & $L =$ από $10.000_{\mu m}$ έως $90.000_{\mu m}$	35
Εικόνα. 26 :	Διάγραμμα διασποράς για UniformFBG	35
Εικόνα. 27 :	Διάγραμμα σύγκρισης(Gaussian vs tanh για $\Delta n_{ac}=0.0003$ )	37
Εικόνα. 28 :	Διάγραμμα σύγκρισης(Gaussian vs tanh για $\Delta n_{ac}=0.0004$	38
Εικόνα. 29 :	Διάγραμμα με βέλτιστα $L$ & $\Delta n_{ac}$ για πFBG	38
Εικόνα. 30 :	Διάγραμμα διασποράς για πFBG	39
Εικόνα. 31 :	Σύγκριση διάφορων τύπων FBG (Uniform, πFBG, Tanh apodization, Gaussian apodization)	40
Εικόνα. 32 :	Uniform FBGs μήκος πλέγματος vs ανακλαστικότητα	41
Εικόνα. 33 :	Μεταβολή διαμόρφωσης δείκτη διάθλασης ( $\Delta n_{ac}$ ) vs ανακλαστικότητα	41
Εικόνα. 34 :	Συστοίχια ομοιόμορφων αισθητήρων FBG σε διαφορετικές θερμοκρασίες (°C)	42
Εικόνα. 35 :	Σχέση μεταξύ θερμοκρασίας (°C) & Μήκος κύματος ( $\mu m$ ) για ομοιόμορφο FBG	43
Εικόνα. 36 :	Συστοίχια αισθητήρων πFBG σε διαφορετικές θερμοκρασίες (°C)	44
Εικόνα. 37 :	Μεγέθυνση εικόνας 36	44
Εικόνα. 38 :	Σχέση μεταξύ θερμοκρασίας (°C) & Μήκος κύματος ( $\mu m$ ) για πFBG	45
Εικόνα. 39 :	Συστοίχια αισθητήρων πFBG Gaussian σε διαφορετικές θερμοκρασίες (°C)	46
Εικόνα. 40 :	Μεγέθυνση εικόνας 39	46
Εικόνα. 41 :	Σχέση μεταξύ θερμοκρασίας (°C) & Μήκος κύματος ( $\mu m$ ) για πFBG Gaussian apodized	47
Εικόνα. 42 :	Διάγραμμα για πFBG με $L=10mm$ & $\Delta n_{ac}=3*10^{-4}$	48
Εικόνα. 43 :	Διάγραμμα για πFBG με $L=10mm$ & $\Delta n_{ac}=4*10^{-4}$	48
Εικόνα. 44 :	Διάγραμμα για πFBG με $L=10mm$ & $\Delta n_{ac}=7*10^{-4}$	49
Εικόνα. 45 :	Διάγραμμα για πFBG Gaussian apodized με $L=10mm$ & $\Delta n_{ac}=7*10^{-4}$	50
Εικόνα. 46 :	Συσχέτιση της θερμοκρασίας με το μήκος κύματος για κάθε περίπτωση FBG	51
Εικόνα. 47 :	Λογισμικό OptiSystem	55
Εικόνα. 48 :	Επιφάνεια εργασίας του λογισμικού OptiSystem	56
Εικόνα. 49 :	Βιβλιοθήκη οπτικών ινών	56

Εικόνα. 50 :	Παράθυρο ρυθμίσεων της οπτικής ίνας	57
Εικόνα. 51 :	Σχεδιαστικό κύκλωμα για Unifrom FBG	57
Εικόνα. 52 :	Πρόγραμμα OptiGrating	58
Εικόνα. 53 :	Επιφάνια εργασίας -Παράμετροι ινών	59
Εικόνα. 54 :	Παράμετροι πλέγματος	59
Εικόνα. 55 :	Παράμετροι λειτουργίας	60
Εικόνα. 56 :	Απεικόνιση του ρυθμού μονότροπης ίνας LP(0,1)	60
Εικόνα. 57 :	Πρόγραμμα Matlab	61
Εικόνα. 58 :	Ανάλυση & Επεξεργασία δεδομένων	61
Εικόνα. 59 :	Γράφημα Uniform FBG,s για $L= 10000 \mu\text{m}$ & $\Delta n_{ac}=0.5 * 10^{-4}$ έως $5 * 10^{-4}$	62

## Περιεχόμενα Πινάκων

Πίνακας. 1:	Τύποι Οπτικών Ινών	14
Πίνακας. 2:	Ανάλυση Απόδοσης Ομοιόμορφων FBG για Μεταβλητά $\Delta n_{ac}$	33
Πίνακας. 3:	Ανάλυση Απόδοσης Ομοιόμορφων FBG για Μεταβλητά $L$	34
Πίνακας. 4:	Ανάλυση Απόδοσης Ομοιόμορφων FBG για Μεταβλητά $L$ και $\Delta n_{ac}=4*10^{-4}$	36
Πίνακας. 5:	Ανάλυση Απόδοσης FBG με Αποδίωση για Βέλτιστα $L$ και $\Delta n_{ac}$	37
Πίνακας. 6:	Ανάλυση Απόδοσης πFBG για Βέλτιστα $L$ και $\Delta n_{ac}$	39
Πίνακας. 7:	Σύγκριση Απόδοσης FBG Ομοιόμορφου και Μετατοπισμένης φάσης πFBG	39
Πίνακας. 8:	Σύγκριση Απόδοσης FBG ομοιόμορφου με Αποδίωση και Μετατοπισμένης φάσης π	40
Πίνακας. 9 :	Σχέση μεταξύ θερμοκρασίας (°C) & κεντρικού Μήκος κύματος $\lambda$ (nm) για ομοιόμορφο FBG	43
Πίνακας. 10 :	Σχέση μεταξύ θερμοκρασίας (°C) & Κεντρικού Μήκος κύματος $\lambda$ (nm) για πFBG	45
Πίνακας. 11 :	Σχέση μεταξύ θερμοκρασίας (°C) & Κεντρικού Μήκος κύματος $\lambda$ (nm) για πFBG Gaussian	47
Πίνακας. 12 :	Συγκεντρωτικός πίνακας αποτελεσμάτων	63
Πίνακας. 13 :	Συγκεντρωτικός πίνακας θερμοκρασιών	63

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1<sup>ο</sup>. Οπτικές Ύνες

### 1.1 Εισαγωγικές Έννοιες

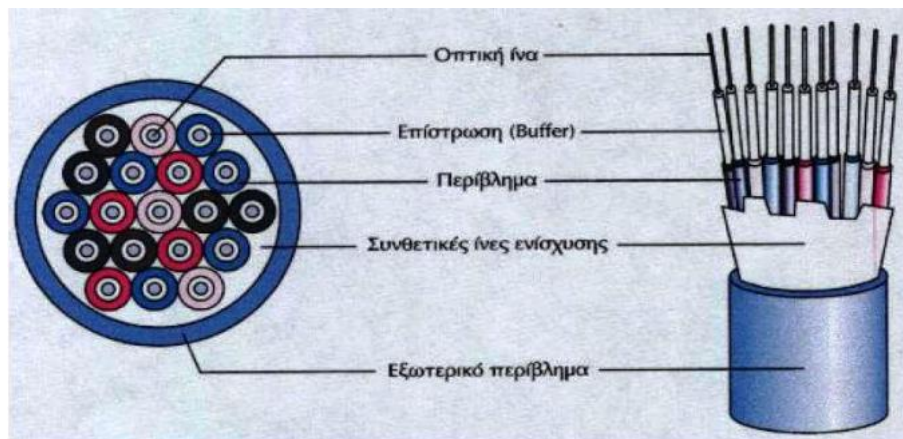
Οι οπτικές ίνες είναι εκείνα τα συστήματα που επιτυγχάνουν την αξιόπιστη μεταφορά του φωτός σε μεγάλες αποστάσεις, παρέχοντας παράλληλα την δυνατότητα μετάδοσης μεγάλου όγκου πληροφοριών. Το 1966 ήταν η χρονιά κατά την οποία διαπιστώθηκε ότι οι οπτικές ίνες κατασκευασμένες από γυαλί ήταν οι κατάλληλοι κυματοδηγοί του φωτός. Έτσι, η βιομηχανία των οπτικών ινών, έδωσε τεράστια ώθηση στις βιομηχανίες των τηλεπικοινωνιών, προσφέροντας μεγαλύτερης απόδοσης και αξιοπιστίας δίκτυα τηλεπικοινωνιών με ολοένα και μικρότερο κόστος. Το 1970 παρήχθη η πρώτη οπτική ίνα για πρακτικές εφαρμογές. Έκτοτε οι οπτικές ίνες εξελίχθηκαν ακολουθώντας την εξέλιξη της επιστήμης των υλικών στοχεύοντας κυρίως στην ελαχιστοποίηση των απωλειών διάδοσης του φωτός που τις διαρρέει, προσφέροντας στους χρήστες τα οφέλη του μεγάλου όγκου παραγωγής, αλλά και της ταχύτατης μετάδοσης πληροφοριών. Σήμερα μία οπτική ίνα, θεωρείται ικανή να εξυπηρετήσει χιλιάδες τηλεφωνικά –και όχι μόνο- κυκλώματα, ισοδυναμώντας με εκατοντάδες χάλκινους αγωγούς υπερτερώντας στην ποιότητα μετάδοσης των σημάτων πληροφορίας.[1]

Οι οπτικές ίνες, σε ό,τι αφορά την δομή τους, αποτελούνται από πολύ λεπτά «νήματα»-αγωγούς κατασκευασμένα από γυαλί ή πλαστικό, με διάμετρο μικρότερη των 8μm. Μέσω αυτών των «νημάτων» μεταδίδονται ταχύτατα και αξιόπιστα ψηφιακά δεδομένα με τη μορφή του φωτός. Τα φωτεινά σήματα που μεταδίδονται μέσω οπτικών ινών μπορούν να διαδοθούν σε μεγάλες αποστάσεις με σχεδόν μηδενικές απώλειες καθώς η ταχύτητα μετάδοσης τους είναι πολύ κοντά σε αυτή με την οποία διαδίδεται το φως στον αέρα. Σχεδόν σε όλες τις πρακτικές εφαρμογές, τις συναντάμε συγκεντρωμένες σε δέσμες, σχηματίζοντας κατ' αυτόν τον τρόπο τα λεγόμενα οπτικά καλώδια. Ένα τέτοιο καλώδιο οπτικών ινών, εμπεριέχει δεκάδες ή εκατοντάδες πολύ λεπτές οπτικές ίνες, διαμέτρου μικρότερης απ' αυτή μιας ανθρώπινης τρίχας. Επιπρόσθετα χρησιμοποιώντας την τεχνολογία ακτινών laser, ένα οπτικό σήμα μπορεί να μεταδοθεί δια μέσου των οπτικών ινών ακόμη και σε απόσταση μεγαλύτερη από αυτή των 50 χλμ.[2]

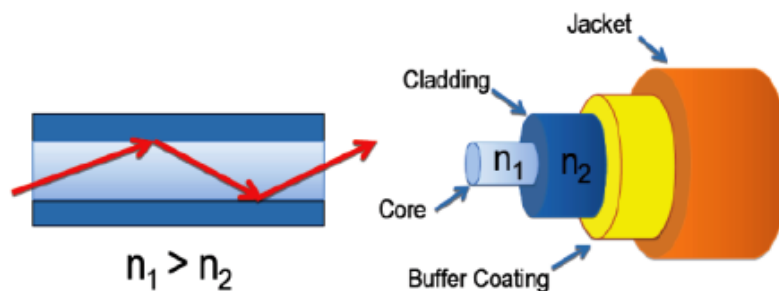
Τις τελευταίες δεκαετίες η χρήση των οπτικών ινών σε δίκτυα επικοινωνιών έχει εδραιωθεί, καθώς επιτρέπουν τη μετάδοση φωτεινών σημάτων σε μεγάλες αποστάσεις με υψηλό εύρος ζώνης συγκριτικά με άλλες διατάξεις οδήγησης, οι χάλκινοι αγωγοί, ενώ παράλληλα η ταχύτητα μετάδοσης, όπως αναφέρθηκε και παραπάνω, πλησιάζει αυτήν της διάδοσης του φωτός. Επιπρόσθετα οι οπτικές ίνες χρησιμοποιούνται αντί των μεταλλικών καλωδίων καθώς επιτρέπουν την διάδοση των σημάτων χωρίς να επηρεάζονται σχεδόν καθόλου από ηλεκτρομαγνητικές παρεμβολές.



Μία οπτική ίνα αποτελείται από δύο διηλεκτρικά υλικά σε κυλινδρικό σχηματισμό: Τον **πυρήνα** (core), ο οποίος βρίσκεται στο εσωτερικό της και έστω ότι αποτελείται από υλικό με δείκτη διάθλασης  $n_1$  και τον **μανδύα** (cladding) ο οποίος περιβάλλει το υλικό του πυρήνα και έστω ότι αποτελείται από υλικό με δείκτη διάθλασης  $n_2$  (Εικόνα 1). Η διαφορά μεταξύ των δεικτών διάθλασης των δύο υλικών θα πρέπει να είναι πολύ μικρή-με τον δείκτη  $n_2$  οριακά μικρότερο από τον δείκτη  $n_1$  ( $n_1 > n_2$ )- μια συνθήκη που διασφαλίζει τη δυνατότητα συνεχόμενων ολικών εσωτερικών ανακλάσεων του οπτικού κύματος, εντός της οπτικής ίνας, και κατ' επέκταση της οδήγησής του (Εικόνα 2). Τα δύο αυτά διηλεκτρικά υλικά, για λόγους μηχανικής αντοχής, τα καλύπτει ένα προστατευτικό περίβλημα.[3]

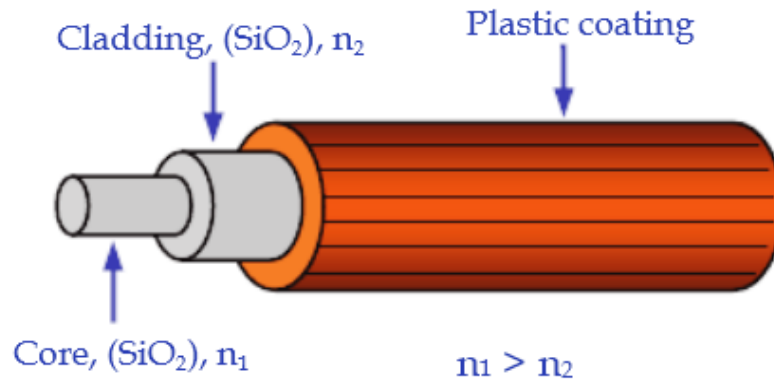


Εικόνα 1. Καλώδιο οπτικών ινών [3]



Εικόνα 2. Διάδοση δέσμης φωτός σε οπτική ίνα (αριστερά) και το εσωτερικό της οπτικής ίνας (δεξιά) [4]

Τέλος, στο σύστημα της γυάλινης ίνας, τοποθετείται ένα περίβλημα, το οποίο την προστατεύει και την κάνει ανθεκτικότερη στις οποιοσδήποτε μηχανικές καταπονήσεις. Επομένως, η κάθε ίνα αποτελείται από τρία ξεχωριστά μέρη (Εικόνα 3):



Εικόνα 3. Μέρη οπτικής ίνας.[5]

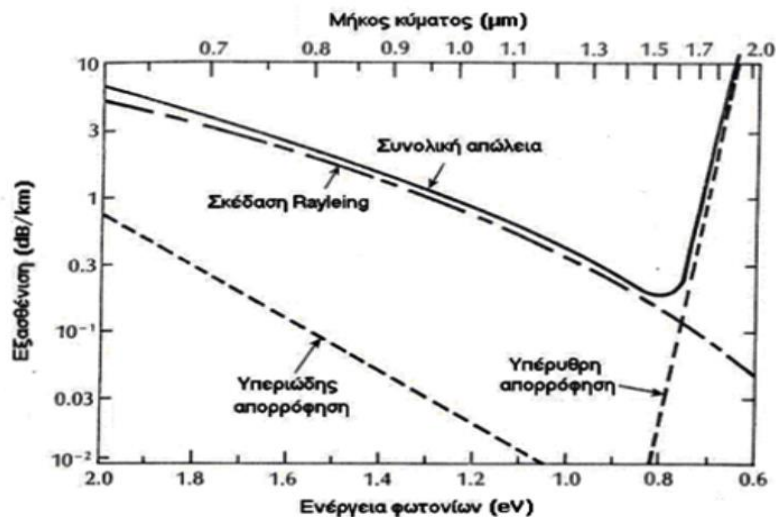
1. Την κεντρική γυάλινη κυλινδρική περιοχή, που ονομάζεται πυρήνας (core) και αποτελεί το τμήμα όπου διαδίδεται κατά κύριο λόγο το φως.
2. Τον μανδύα (cladding), που έχει μικρότερο δείκτη διάθλασης από τον πυρήνα, ώστε να υπόκειται το φως σε συνεχείς ολικές ανακλάσεις προς τον πυρήνα και
3. το περίβλημα (Coating) που λειτουργεί ως προστατευτική επικάλυψη.

Όπως αναφέραμε, ο πυρήνας, είναι το μέσον στο οποίο διαδίδεται το φως. Στις περισσότερες κατασκευαστικές εφαρμογές αποτελείται από εμπλουτισμένο διοξείδιο του πυριτίου (doped silica), ώστε να του προσδώσει μεγαλύτερο δείκτη διαθλάσεως ( $n=1,48$ ). Το περίβλημα που περιβάλλει τον πυρήνα αποτελείται συνήθως από καθαρό διοξείδιο του πυριτίου, ενώ έχει χαμηλότερο δείκτη διάθλασης από τον πυρήνα ( $n=1,46$ ). Η διαφορά αυτή που υπάρχει στον δείκτη διαθλάσεως του συστήματος core/cladding, είναι και ο λόγος για την όδευση του φωτός εντός του πυρήνα κατά μήκος του οπτικού καλωδίου. Επιπλέον, η διαχωριστική επιφάνεια μεταξύ των δύο μέσων είναι εντελώς λεία και έχει μεγαλύτερο δείκτη διαθλάσεως προς την μέσα πλευρά (προς τον πυρήνα), προκαλείται ολική ανάκλαση του φωτός στρέφοντας τις ακτίνες του φωτός που πέφτουν επάνω στην περιφέρεια του πυρήνα και πάλι προς το εσωτερικό του πυρήνα. Το εξωτερικό περίβλημα (coating), αποτελείται συνήθως από δύο στρώσεις ακρυλικού υλικού και αποτελεί την προστατευτική επικάλυψη της ίνας στην φάση της κατεργασίας της για την κατασκευή των καλωδίων οπτικών ινών, καθώς επίσης και στην φάση της εγκαταστάσεως του δικτύου, ενώσεων, τερματισμού κλπ. Ο αυστηρός ποιοτικός έλεγχος κατά τη διάρκεια της κατασκευής μιας οπτικής ίνας, εξασφαλίζει την σταθερότητα των ιδιοτήτων της, καθ' όλο το μήκος της. Οι ίνες έχουν μεγάλη αντοχή, αλλά είναι ταυτόχρονα και εύκαμπτες.

Μια σημαντική παράμετρος για την αξιολόγηση της απόδοσης των οπτικών ινών ως κυματοδηγών είναι η απώλεια της ισχύος κατά την διάδοση του οπτικού σήματος μέσα στην ίνα. Εάν  $P_0$  είναι η ισχύς εισόδου σε μία ίνα μήκους  $L$ , τότε η ισχύς που εξέρχεται από αυτήν,  $P_T$ , δίνεται από τον τύπο:

$$P_T = P_0 e^{-\alpha L} \quad (1)$$

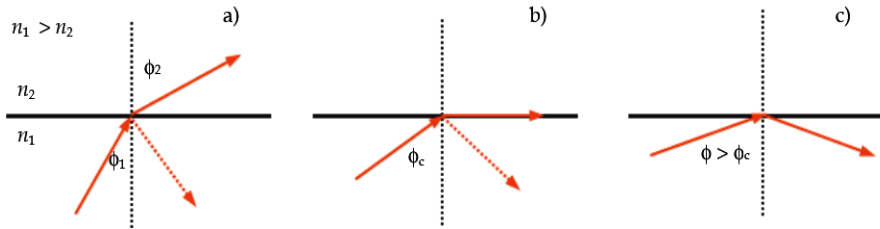
όπου  $\alpha$  είναι η σταθερά εξασθένησης, όπου αναφέρεται και σαν απώλεια της ίνας. Η απώλεια της ίνας συνήθως εκφράζεται σε μονάδες dB/km. και εξαρτάται από το μήκος κύματος του διαδιδόμενου φωτός. Η Εικόνα 4 δείχνει το φάσμα των απωλειών μιας μονότροπης οπτικής ίνας τελευταίας γενεάς. Όπως παρατηρείται, η ίνα παρουσιάζει ένα ελάχιστο απωλειών, περίπου 0,2 dB/km κοντά στα 1,55  $\mu\text{m}$ . Παράλληλα, οι απώλειες είναι αξιοσημείωτα υψηλότερες για μικρότερα μήκη κύματος και πλησιάζουν ένα επίπεδο της τάξεως 1-10 dB/km στην ορατή περιοχή του ηλεκτρομαγνητικού φάσματος [6].



Εικόνα 4. Εξασθένηση σε οπτικές ίνες [6].

## 1.2 Βασικές Αρχές Λειτουργίας Οπτικών Ινών

Η λειτουργία των συγκεκριμένων οπτικών μέσων, εστιάζει στη δυνατότητα που έχουν να μεταδίδουν το φως από ένα καθορισμένο σημείο σε ένα άλλο. Η δυσκολία που συναντά το φως κατά τη διάδοσή του σε ένα οπτικό μέσο καθορίζεται από τον δείκτη διάθλασης του υλικού του μέσου αυτού [7]. Σε μία γενικότερη προσέγγιση ερμηνείας των φαινομένων της διάδοσης με την βοήθεια ακτινών, μπορεί κανείς να διαπιστώσει ότι η διάδοση του φωτός από ένα μέσο σε ένα άλλο διέπεται από τον νόμο του Snell, ο οποίος οριοθετεί τις γωνίες πρόσπτωσης/ανάκλασης  $\phi_1$  και διάθλασης  $\phi_2$ , με βάση τον λόγο των δεικτών διάθλασης των υλικών των δύο μέσων (βλ. τύπο 2)). Ο συγκεκριμένος νόμος αναφέρει, πως στην περίπτωση κατά την οποία το φως διαδίδεται από ένα υλικό, με υψηλό δείκτη διάθλασης προς ένα υλικό χαμηλότερου δείκτη και η γωνία πρόσπτωσης είναι μεγαλύτερη από την οριακή (κρίσιμη) γωνία της διεπιφάνειας των δύο υλικών, δεν θα παρατηρηθεί διάθλαση του φωτός στο μέσο με χαμηλότερο δείκτη αλλά ολική ανάκλαση προς το αρχικό μέσο διάδοσης (βλ. Εικόνα 5) [8].



**Εικόνα 5.** Μερική εσωτερική ανάκλαση κρίσιμη γωνία πρόσπτωσης  $\phi_1 > \phi_c$  ολική εσωτερική ανάκλαση [5]

$$\frac{\sin\phi_1}{\sin\phi_2} = \frac{n_2}{n_1} \quad (2)$$

Η χαρακτηριστική γωνία πρόσπτωσης, μετά από την οποία υφίσταται η παραπάνω κατάσταση, καλείται *οριακή ή κρίσιμη γωνία*. Το φαινόμενο της ολικής εσωτερικής ανάκλασης έχει σαν βασικότερη συνέπεια την διαρκή διάδοση του φωτός στο υλικό του πυρήνα και αποτελεί την βασική αρχή λειτουργίας των οπτικών ινών. Πιο συγκεκριμένα, το φως διαδίδεται μέσα στις ίνες εξαιτίας των διαρκών εσωτερικών ανακλάσεων που υφίσταται κατά την πρόσπτωση στην διεπιφάνεια πυρήνα-μανδύα. Η γωνία που προαναφέρθηκε καθορίζεται από το δείκτη διάθλασης και των δυο υλικών και μπορεί να προκύψει ως εξής [3],[8]:

$$n_1 \sin\phi_1 = n_2 \sin\phi_2 = 90^\circ \Rightarrow \sin\phi_c = \frac{n_2}{n_1} \quad (3)$$

Δύο παράμετροι οι οποίες χαρακτηρίζουν την οπτική ίνα ως προς την λειτουργία της είναι οι εξής:

- Η σχετική διαφορά των δεικτών διάθλασης πυρήνα - μανδύα που ορίζεται ως:

$$\Delta = \frac{n_1^2 - n_2^2}{2n_1^2} \quad (4)$$

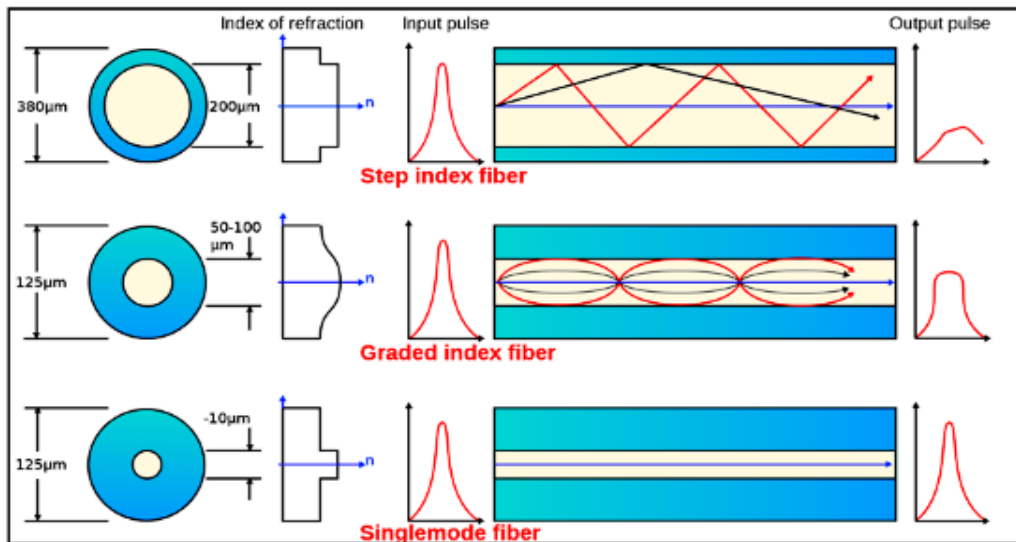
- και η κανονικοποιημένη συχνότητα που ορίζεται ως:

$$V = k\rho \left( \sqrt{n_1^2 + n_2^2} \right) \quad (5)$$

όπου  $k = 2\pi/\lambda$  είναι ο κυματικός αριθμός,  $\rho$  είναι η ακτίνα του πυρήνα και  $\lambda$  το μήκος κύματος του διαδιδόμενου φωτός. Η παράμετρος  $V$  είναι αυτή που προσδιορίζει τον αριθμό των ρυθμών που μπορούν να διαδοθούν στην οπτική ίνα. Μία οπτική ίνα με βαθμωτό δείκτη διάθλασης, διαδίδει έναν και μόνο ρυθμό εάν ισχύει η σχέση  $V < 2,405$ . Οι ίνες που ικανοποιούν αυτήν την συνθήκη ονομάζονται μονόρρυθμες ίνες. Η κύρια διαφορά μεταξύ μονόρρυθμων και των πολύρρυθμων ινών είναι το μέγεθος του πυρήνα τους [4].

### 1.3 Κατηγορίες Οπτικών Ινών

Στην σύγχρονη εποχή, η εκπομπή των σημάτων μέσα σε μια ίνα πραγματοποιείται από καθορισμένες πηγές, όπως είναι για παράδειγμα οι δίοδοι LED και τα laser. Τα μήκη κύματος του παραγόμενου φωτός ανέρχονται από 800nm έως και 1550nm[3]. Η κυριότερη κατηγοριοποίηση των οπτικών ινών, σχετίζεται με την δυνατότητα τους να υποστηρίζουν έναν ή περισσότερους ρυθμούς και έτσι μπορούν να είναι πολύρρυθμες (multimode) και μονόρρυθμες (singlemode). (βλ. Εικόνα6).



Εικόνα 6. Είδη οπτικών ινών [2].

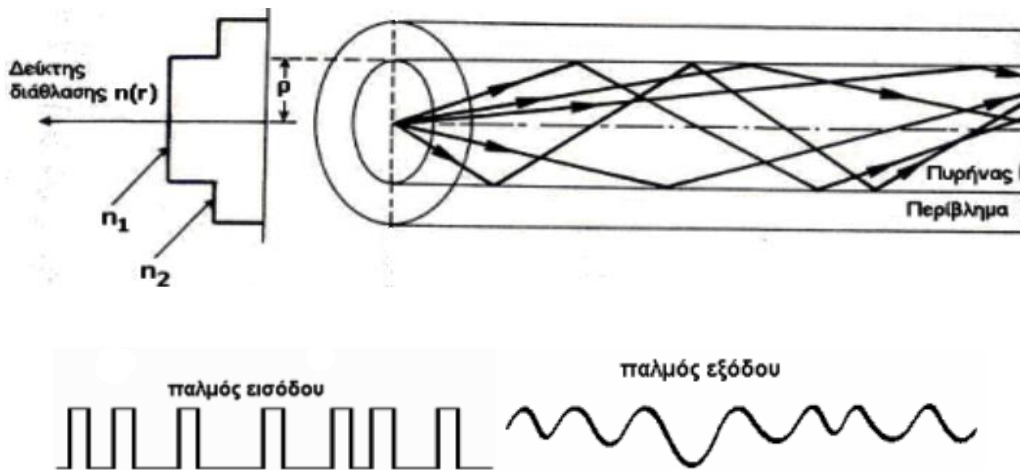
Πιο συγκεκριμένα, οι ίνες με πολύ μικρό πάχος πυρήνα (5 έως 10 μm), επιτρέπουν να μεταδίδεται το φως, μέσω ενός ρυθμού (single mode), το οποίο επιτυγχάνουμε μέσω της Εξίσωσης (5) για την οριακή τιμή 2,405. Αντίθετα, οι ίνες με μεγαλύτερο πάχος πυρήνα, μπορούν να διαδίδουν το φως μέσω περισσότερων ρυθμών (multimode) ανάλογα με το προφίλ μεταβολής του δείκτη διάθλασης στην διατομή τους(βλ. Πίνακα 1). Ανάλογα με τον τρόπο που μεταβάλλεται ο δείκτης διάθλασης στην διατομή μιας ίνας, αυτές διακρίνονται σε ίνες βηματικού δείκτη διάθλασης ή διαβαθμισμένου δείκτη διάθλασης [10].

Στην πρώτη κατηγορία εντοπίζεται απότομη μεταβολή των δεικτών διάθλασης κατά την μετάβαση από τον πυρήνα της ίνας στο υλικό της επίστρωσης. Από την άλλη μεριά, στη δεύτερη κατηγορία η μεταβολή του δείκτη διάθλασης εντός της διατομής της ίνας είναι σταδιακή. Έτσι, όσο περισσότερο αυξάνεται η απόσταση από το κέντρο προς την εξωτερική επιφάνεια του υλικού, τόσο περισσότερο παρατηρείται σταδιακή ελάττωση του δείκτη διάθλασης [7].

Πίνακας 1. Τύποι Οπτικών Ινών.

	Πολύτροπες με βηματική μεταβολή του δείκτη διάθλασης	Πολύτροπες με βαθμιαία μεταβολή του δείκτη διάθλασης	Μονότροπες με βηματικό δείκτη
Διάμετρος πυρήνα	200 μm	50 μm - 100 μm	5 μm - 10 μm
Διάμετρος cladding	380 μm	125 μm	125 μm
Διασπορά	Μεγάλη	Μεγάλη	Μικρή

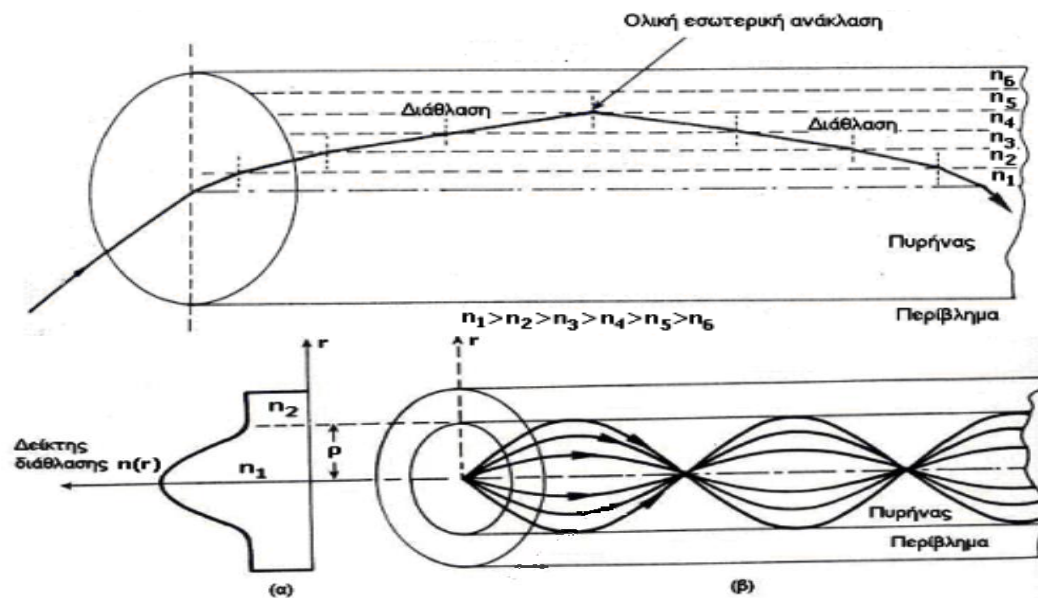
Είναι σημαντικό να αναφερθεί ότι υπάρχει ένα μειονέκτημα στις πολύρρυθμες οπτικές ίνες βηματικού δείκτη διάθλασης και αυτό είναι η διασπορά. Με τον όρο διασπορά εννοούμε τη διάδοση φωτεινού παλμού σε οπτική ίνα, όπου παρατηρείται στην έξοδο μείωση στην έντασή του (εξ αιτίας της απορρόφησης) καθώς και αλλοίωση της μορφή του παλμού (παλμοδιεύρυνση). (βλ. Εικόνα7).



Εικόνα 7. Διασπορά πολύρρυθμης ίνας βηματικού δείκτη [6].

Ανάλογα με τη γωνία πρόσπτωσης, υπάρχουν εκατοντάδες ή χιλιάδες διαφορετικοί τρόποι (ή ρυθμοί) με τους οποίους μπορεί το φως να διαδοθεί μέσα στον πυρήνα. Κάθε διαφορετικός ρυθμός αντιστοιχεί και σε ελαφρώς διαφορετική πορεία με διαφορετικό χρόνο διάδοσης. Για να περιοριστεί το φαινόμενο της διασποράς, χρησιμοποιούνται ίνες βαθμιαίου δείκτη διαθλάσεως (βλ. Εικόνα 8). Με αυτό τον τρόπο, λόγω της βαθμιαίας (σταδιακής) μεταβολής του δείκτη διαθλάσεως από τον πυρήνα προς το περίβλημα, οι φωτεινές δέσμες διανύουν διαφορετικές αποστάσεις με διαφορετικές ταχύτητες, έτσι ώστε

να εξέρχονται με την ίδια καθυστέρηση και να εξισορροπούνται τα φαινόμενα διασποράς [6].



Εικόνα 8. Ίνα διαβαθμισμένου δείκτη.[6]

#### 1.4 Πλεονεκτήματα & Μειονεκτήματα Οπτικών Ινών

Στη σημερινή εποχή, οι οπτικές ίνες ως μέσα επικοινωνίας, θεωρούνται ως η καταλληλότερη επιλογή τεχνολογιών μετάδοσης. Ένα από τα μεγαλύτερα οφέλη που προσφέρουν, είναι το γεγονός πως έχουν τη δυνατότητα μετάδοσης σε τεράστιο εύρος ζώνης, πετυχαίνοντας με αυτόν τον τρόπο υψηλότερους ρυθμούς μετάδοσης και παρέχοντας τη δυνατότητα άμεσης μεταφοράς τεράστιου όγκου ψηφιακών πληροφοριών [3].

Παρακάτω συνοψίζονται τα πλεονεκτήματα των οπτικών ινών [8][11]:

- Ελάχιστη εξασθένηση σήματος και κάλυψη τεράστιων αποστάσεων χωρίς να χρησιμοποιήσουν αναμεταδότη.
- Μικρό μέγεθος και βάρος.
- Το εύρος ζώνης των χάλκινων ομοαξονικών καλωδίων δεν ξεπερνά τα 500MHz συγκρινόμενο με τα 100GHz του φέροντος οπτικής ίνας.
- Δεν έχουν περιορισμούς από ηλεκτρομαγνητικές παρεμβολές, καθώς δεν μεταφέρουν ηλεκτρικά σήματα, άρα δεν χρειάζεται ηλεκτρομαγνητική θωράκιση.
- Παρέχουν μεγάλη ασφάλεια εξαλείφοντας τον κίνδυνο υποκλοπής, δεδομένου ότι το οπτικό σήμα περιορίζεται αυστηρά μέσα στον πυρήνα της οπτικής ίνας, εκτός κι αν υπάρχει πρόσβαση στον πυρήνα. Παρέχουν αξιοπιστία και ευκολία συντήρησης. Η προσδοκώμενη διάρκεια ζωής ορίζεται στα 20 με 30 χρόνια.

Παρά τα παραπάνω αδιαμφισβήτητα πλεονεκτήματα, η τεχνολογία των οπτικών ινών παρουσιάζει και κάποια μειονεκτήματα. Τα κυριότερα από αυτά είναι τα εξής [11] :

- Υπάρχει δυσκολία δημιουργίας συνδέσεων και διακλαδώσεων, καθώς απαιτείται βέλτιστη προσαρμογή και ευθυγράμμιση, έτσι ώστε να μην υπάρχει διασπορά και να ελαχιστοποιηθούν οι απώλειες.
- Είναι ιδιαίτερα εύκαμπτες και σε περίπτωση που λυγίσουν, μπορεί να οδηγήσουν σε απώλεια των μεταδιδόμενων πληροφοριών.

### 1.5 Εφαρμογές & Προοπτική Οπτικών Ινών ως Αισθητήρες

Οι αισθητήρες οπτικών ινών είναι εξαρτήματα που αντιλαμβάνονται τις αλλαγές του περιβάλλοντος και μπορούν να τις μετρήσουν. Είναι δηλαδή διατάξεις που μπορούν να αλλάζουν τις ιδιότητες ενός ένα μετρήσιμου σήματος φωτός ανάλογα με την εκάστοτε περιβαλλοντική κατάσταση. Η βασική λειτουργία του αισθητήρα οπτικών ινών είναι να οδηγήσει την προσπίπτουσα δέσμη του φωτός από την πηγή αυτού (πχ. laser) προς κάποιοι διαμορφωτή, δια μέσου της οπτικής ίνας, όπου και να αλληλεπιδράσει με τις εξωτερικές μετρήσιμες παραμέτρους του διαμορφωτή ώστε να τροποποιήσει τις οπτικές ιδιότητες του φωτός (μήκος κύματος, ένταση φωτός, φάση, συχνότητα, κατάσταση πόλωσης, κλπ). Έπειτα, μετατρέπεται και γίνεται διαμορφωμένο οπτικό σήμα, το οποίο οδηγείται σε κάποια οπτοηλεκτρονική συσκευή δια μέσου της οπτικής ίνας και η παράμετρος που μετράται μπορεί και αποτιμάται. Σε όλη αυτή τη διεργασία, η δέσμη φωτός εισέρχεται δια μέσου της οπτικής ίνας και στη συνέχεια εκπέμπεται, αφότου περάσει από τον διαμορφωτή. Έτσι, η λειτουργία της οπτικής ίνας είναι αρχικά η μετάδοση της φωτεινής δέσμης και έπειτα η λειτουργία της ως οπτικός διαμορφωτής[12].

Οι αισθητήρες εξελίσσονται προς την κατεύθυνση της μεγιστοποίησης της ευαισθησίας τους, της προσαρμοστικότητας τους, της ακρίβειας και της ευφυΐας τους. Στην παρούσα χρονική περίοδο, οι αισθητήρες οπτικών ινών είναι πολύ δημοφιλείς, διότι είναι ένα νέο μέλος της ομάδας των αισθητήρων και οι οπτικές ίνες διαθέτουν πολλές και εξαιρετικές ιδιότητες, όπως: η αποφυγή παρεμβολών της ηλεκτρομαγνητικής και ατομικής ακτινοβολίας, η μικρή διάμετρος, οι μηχανικές τους ιδιότητες. Παράλληλα, αντέχουν στο νερό, στις υψηλές θερμοκρασίες, στη διάβρωση κ.λπ. Για όλους του παραπάνω λόγους, μπορούν να παίξουν το ρόλο των ανθρώπινων αισθήσεων σε μέρη που είναι αδύνατον να φτάσουν οι άνθρωποι, όπως για παράδειγμα οι περιοχές υψηλής θερμοκρασίας ή οι περιοχές που είναι επιβλαβείς για τον άνθρωπο, όπως αυτές της πυρηνικής ακτινοβολίας ενώ μπορούν επίσης να ξεπεράσουν τα φυσιολογικά ανθρώπινα όρια αισθήσεις [3].



## Κεφάλαιο 2<sup>ο</sup>. Φράγματα Bragg (Bragg Gratings)

### 2.1 Γενικά Χαρακτηριστικά & Τρόποι Λειτουργίας Φραγμάτων (Gratings) Bragg

Τα φράγματα Bragg (Bragg gratings) χρησιμοποιούνται ευρέως σε οπτικά συστήματα ως ζωνοπερατά φίλτρα, μέσα αντιστάθμισης της διασποράς σε αισθητήρες οπτικών ινών, σε lasers φράγματος ίνας (fiber grating lasers), καθώς και σε οπτικούς ενισχυτές. Η λειτουργία ενός φράγματος Bragg, βασίζεται στη διαμόρφωση των οπτικών ιδιοτήτων του πυρήνα της οπτικής ίνας κατά μήκος του άξονα αυτής, προσδίδοντας μία περιοδική διαμόρφωση στο δείκτη διάθλασης του πυρήνα. Η μεταβολή της τιμής του δείκτη διάθλασης, επιτυγχάνεται μέσω υπέρυθρης ακτινοβολίας εκμεταλλευόμενη τον φωτοευαίσθητο πυρήνα της διάταξης. Ως επί των πλείστων, αυτή η φωτοευαίσθησία των οπτικών ινών που επιτρέπει τη διαμόρφωση του δείκτη διάθλασης κατά επιθυμητό τρόπο, οφείλεται στην ύπαρξη προσμίξεων Γερμανίου (Ge) στον πυρήνα τους [8]. Αφού διαμορφωθούν, τα φράγματα (gratings) εντός της ίνας αποτελούν διατάξεις, οι οποίες μπορούν να τροποποιήσουν τη φάση ή και την ένταση των κυμάτων που μεταδίδονται μέσω αυτής. Πιο συγκεκριμένα:

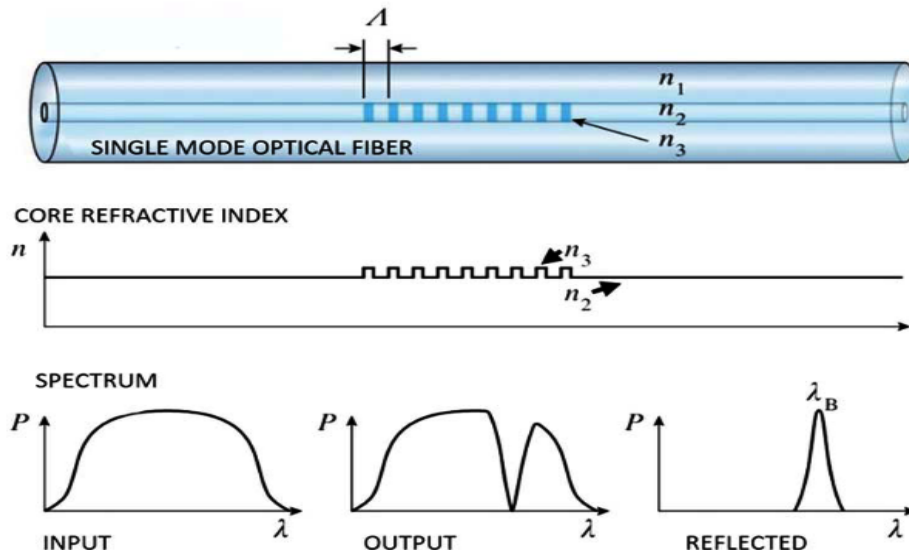
- Το διαδιδόμενο κύμα ανακλάται από ένα φράγμα Bragg, εφόσον το μήκος κύματος του είναι ίσο με το μήκος κύματος συντονισμού Bragg,  $\lambda_B$ .
- Το διαδιδόμενο κύμα μεταδίδεται μέσα από το φράγμα Bragg, εφόσον το μήκος κύματος του είναι διαφορετικό από το μήκος κύματος συντονισμού Bragg,  $\lambda_B$ .

Το φως το οποίο διαδίδεται στον πυρήνα της ίνας θα σκεδαστεί σε κάθε «κελί» (περιοχή όπου το υλικό της ίνας αλλάζει ιδιότητες) του φράγματος Bragg και οι ακτίνες του σκεδαζόμενου φωτός θα συμβάλουν, είτε εποικοδομητικά, ώστε να ισχύει η συνθήκη ανάκλασης Bragg και άρα το αποτέλεσμα που προκύπτει, είναι μια ανακλώμενη δέσμη από το φράγμα, με κεντρικό μήκος κύματος χαρακτηριστικό του φράγματος, είτε οι ανακλώμενες ακτίνες θα συμβάλουν αναιρετικά και η ανακλώμενη δέσμη σταδιακά εξασθενεί. Η συνθήκη Bragg ουσιαστικά προκύπτει από τη διατήρηση της ενέργειας και της ορμής και μας δίνει το κεντρικό μήκος κύματος της ανακλώμενης δέσμης από το φράγμα σύμφωνα με τη σχέση :

$$\lambda_B = 2n_{eff}\Lambda \quad (6)$$

Στην παραπάνω σχέση η τιμή  $n_{eff}$ , ονομάζεται ενεργός δείκτης διάθλασης και εκφράζει τον τρόπο μετάδοσης του ρυθμού διάδοσης εντός της ίνας. Η παράμετρος  $\Lambda$  ορίζεται ως η απόσταση μεταξύ των διαδοχικών σχισμών του φράγματος Bragg ή αλλιώς η περίοδος του φράγματος ενώ  $\lambda_B$  είναι το μήκος κύματος της ανακλώμενης ακτινοβολίας στο κενό [13].

Στην Εικόνα 9 παρουσιάζεται η γεωμετρία και ο τρόπος λειτουργίας μιας ίνας με φράγμα Bragg, στην οποία μπορούμε να διακρίνουμε το φάσμα της ισχύος εισόδου στην οπτική ίνα, το φάσμα της ισχύος διάδοσης που έχει το χαρακτηριστικό βύθισμα και το φάσμα της ισχύος ανάκλασης το οποίο έχει την χαρακτηριστική κορυφή.



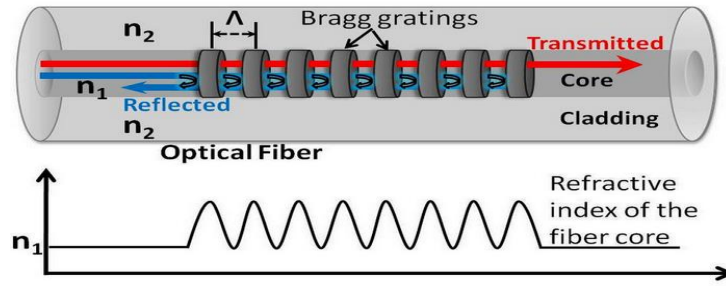
Εικόνα 9. Σχηματικό διάγραμμα ενός FBG[14]

Η κορυφή του φάσματος ανάκλασης παρατηρείται σε ένα συγκεκριμένο μήκος κύματος, η τιμή του οποίου είναι ίδια με την τιμή του μήκους κύματος που δίνεται από το βύθισμα του φάσματος διάδοσης. Αθροίζοντας τα φάσματα ανάκλασης και διάδοσης παίρνουμε το φάσμα της ισχύος εισόδου [13]. Επίσης, άξιο αναφοράς αποτελεί το ότι τα φράγματα Bragg από την κατασκευή τους είναι ζωνοπερατά φίλτρα, που σημαίνει ότι για δεδομένες συνθήκες ανακλούν μονάχα συγκεκριμένες συχνότητες, άρα και συγκεκριμένα μήκη κύματος [14].

## 2.2 Κατηγορίες Φραγμάτων Bragg

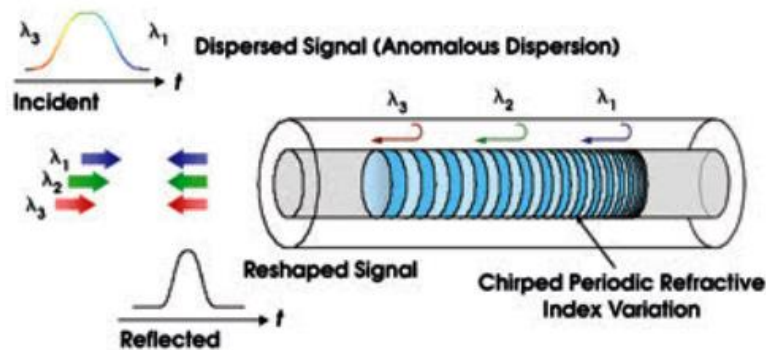
Η δομή των φραγμάτων Bragg μπορεί να διαφέρει στον τρόπο διαμόρφωσης της περιοδικής μεταβολής του δείκτη διάθλασης εντός του πυρήνα της ίνας. Έτσι, η περίοδος του φράγματος μπορεί να είναι ομοιόμορφη, περιοδικά διαβαθμισμένη ή κατανεμημένη σε μια υπερδομή (superstructure). Κατά αυτό τον τρόπο, τα διάφορα είδη φραγμάτων Bragg που υπάρχουν παρουσιάζονται παρακάτω:

- Το **ομοιόμορφο φράγμα Bragg (Uniform Bragg grating)**, στο οποίο η διαμόρφωση του δείκτη διάθλασης είναι ομοιόμορφη και κάθετη ως προς τη διεύθυνση του πυρήνα της ίνας (Εικόνα 10).
- Το φράγμα Bragg, στο οποίο η τιμή  $\Lambda$  της περιόδου του φράγματος δεν είναι σταθερή στο διάστημα μεταξύ των σχισμών (**Chirped Bragg Grating**) (Εικόνα 11).
- Το φράγμα Bragg, στο οποίο η διαμόρφωση του δείκτη διάθλασης σχηματίζει γωνία με τον πυρήνα μικρότερη από  $90^\circ$  (**Tilted Bragg grating**) (Εικόνα 12) [15].
- Το **φράγμα Bragg υπερδομής**, έχει περιοδική διαμόρφωση του δείκτη διάθλασης του πυρήνα, κατά συγκεκριμένα διαστήματα, και του δίνει τη δυνατότητα να ανακλά προς τα πίσω σειρές από συγκεκριμένα μήκη κύματος (**Super structure Bragg grating**) (Εικόνα 13) [16-18].



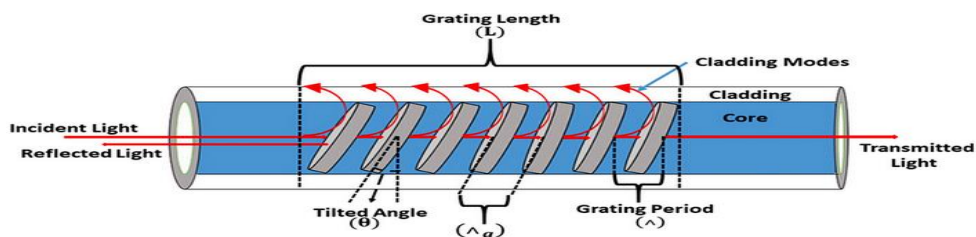
Εικόνα 10. Κοινό φράγμα Bragg «Uniform Bragg Grating» [20]

Στην Εικόνα 10 βλέπουμε ένα κοινό φράγμα Bragg, στο οποίο η διαμόρφωση του δείκτη διάθλασης είναι κάθετη ως προς την διεύθυνση του πυρήνα της ίνας.



Εικόνα 11. Chirped Bragg Grating [21]

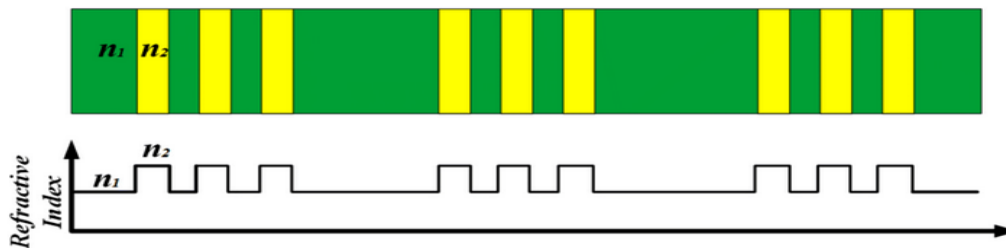
Στα chirped φράγματα Bragg (Εικόνα 11) το προφίλ του δείκτη διάθλασης διαμορφώνεται με μια γραμμική απόκλιση στην περίοδο του φράγματος. Αυτή η γραμμική απόκλιση ονομάζεται chirp. Καθώς το ανακλώμενο μήκος κύματος αλλάζει με την περίοδο του φράγματος, το ανακλώμενο φάσμα διευρύνεται. Αυτού του είδους οι διατάξεις χρησιμοποιούνται ως επί το πλείστον για την διόρθωση της διασποράς και για τη σταθεροποίηση μονοχρωματικών πηγών laser [20].



Εικόνα 12. Tilted Bragg Grating [22]

Τα Tilted φράγματα Bragg (Εικόνα 12) έχουν την ικανότητα να αλλάζουν το ανακλώμενο φάσμα αλλά και το εύρος ζώνης (bandwidth) αυτών. Είναι φράγματα που έχουν υποστεί διαμόρφωση όχι κατά μήκος του πυρήνα, αλλά υπό γωνία του οπτικού άξονα της ίνας. Τα

φράγματα αυτά, χρησιμοποιούνται για την σταθεροποίηση του φάσματος ενισχυτών ερβίου (Erbium Doped Fiber Amplifiers, EDFA) καθώς και για την διεύρυνση του φάσματος ενίσχυσής τους [19].



Εικόνα 13. Φράγμα Bragg υπερδομής «Superstructure Bragg Grating» [23]

Τα Superstructured φράγματα Bragg (Εικόνα 13) ανήκουν στην οικογένεια φραγμάτων μεγάλης περιόδου (Long-period Fiber Grating-based sensors gratings), όπου οι περιοχές διαμόρφωσης του δείκτη διάθλασης έχουν πολύ μεγαλύτερες περιόδους μεταξύ τους απ' ό τι στις υπόλοιπες κατηγορίες (της τάξης από 100μm μέχρι μερικά mm) ενώ έχουν τυπικά ίδιο μέγεθος με ένα φράγμα Bragg [16-18].

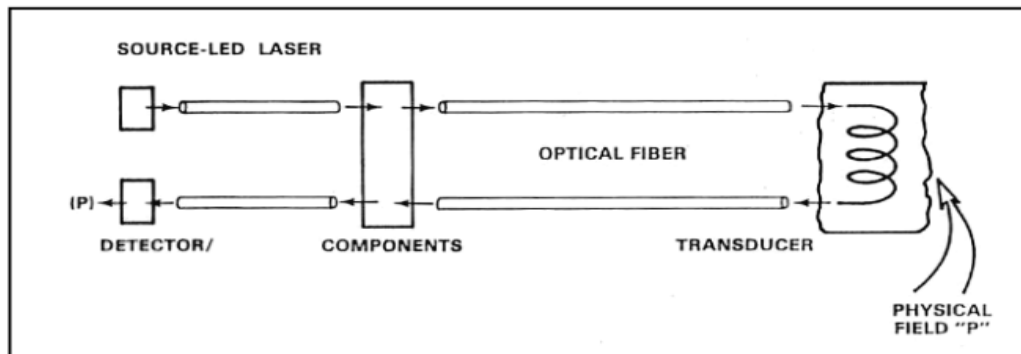
## Κεφάλαιο 3. Αισθητήρες οπτικών ινών χρησιμοποιώντας Φράγματα Bragg

### 3.1 Αισθητήρες οπτικών ινών

Η τεχνολογία των αισθητήρων που υλοποιούνται με την βοήθεια των οπτικών ινών έχει συνδεθεί άμεσα με τις εξελίξεις στις εφαρμογές της οπτικό-ηλεκτρονικής και των επικοινωνιών. Καθώς η τεχνολογία αυτή εξελίσσεται και οι τιμές των εξαρτημάτων μειώνεται ενώ βελτιώνεται και η απόδοσή τους, η ικανότητα των αισθητήρων οπτικών ινών να αντικαταστήσουν τους παραδοσιακούς αισθητήρες για μέτρηση θερμοκρασίας, πίεσης, υγρασίας, περιστροφής και επιτάχυνσης, αλλά και άλλων παραμέτρων, γίνεται ολοένα και πιο αισθητή. Τα εγγενή πλεονεκτήματα των αισθητήρων οπτικών ινών είναι το μικρό βάρος και μέγεθος, η χαμηλή κατανάλωση ισχύος, η “αναισθησία” στις ηλεκτρομαγνητικές παρεμβολές, η ανθεκτικότητά και ευαισθησία τους στις περιβαλλοντικές συνθήκες. Ουσιαστικά, η λειτουργία ενός αισθητήρα οπτικής ίνας βασίζεται στην μεταβολή μίας ή περισσότερων ιδιοτήτων του φωτός που διαδίδεται μέσα στην ίνα. Οι ιδιότητες αυτές μπορεί να είναι η συχνότητα, η ένταση, η φάση καθώς και η πόλωση του φωτός, οι οποίες μεταβάλλονται ανάλογα με τις περιβαλλοντικές παραμέτρους που μετριοούνται σε κάθε περίπτωση [15].

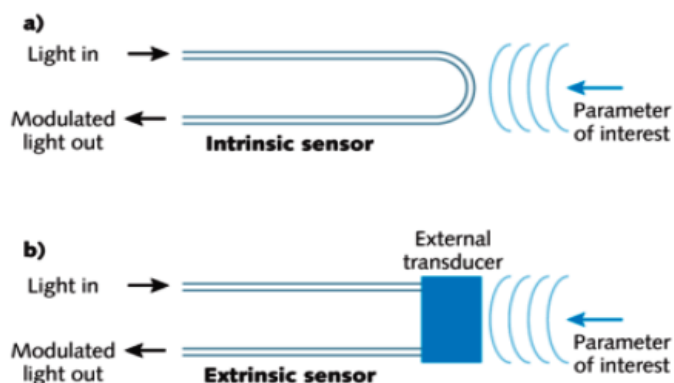
Στην πιο απλή μορφή του, ένας αισθητήρας οπτικών ινών αποτελείται από μια οπτική ίνα, μια πηγή φωτός, ένα στοιχείο αισθητήρα, το οποίο μετατρέπει τη μεταβολή της μετρούμενης ποσότητας σε οπτικό σήμα, και έναν οπτικό ανιχνευτή, ο οποίος μπορεί να

είναι ένας παλμογράφος ή ένας οπτικός αναλυτής φάσματος, όπως παρουσιάζεται και στην Εικόνα 14.



Εικόνα 14. Τυπική διάταξη ενός αισθητήρα οπτικών ινών [24]

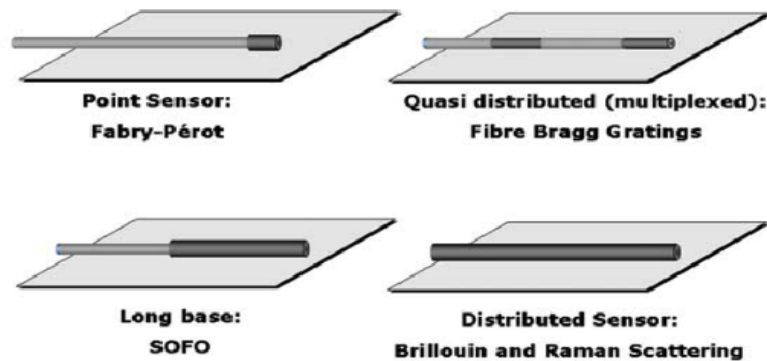
Στη γενική περίπτωση, οι αισθητήρες οπτικών ινών διακρίνονται σε ενδογενείς (intrinsic) ή εξωγενείς (extrinsic) [5]. Οι ενδογενείς αισθητήρες χρησιμοποιούν ένα μέρος της ίδιας της οπτικής ίνας ως στοιχείο αισθητήρα. Οποιαδήποτε μεταβολή του περιβάλλοντος μπορεί να αλλάξει τις ιδιότητες της φωτεινής δέσμης που περνάει μέσα από την ίνα. Οι αλλαγές αυτές μπορεί να αφορούν την ένταση, τη φάση ή την πόλωση. Με αυτόν τον τρόπο, κάθε επίδραση του περιβάλλοντος μπορεί να μετατρέπεται σε ένα οπτικό σήμα που μπορεί να ερμηνευθεί. Η ερμηνεία αυτή μπορεί να γίνει από πολλά διαφορετικά είδη ενδογενών αισθητήρων οπτικών ινών. Το σημαντικό όμως είναι ο σχεδιασμός κάθε φορά του κατάλληλου αισθητήρα για την μέτρηση της επιθυμητής παραμέτρου. Αντίθετα, οι εξωγενείς αισθητήρες, χρησιμοποιούν την οπτική ίνα μόνο ως μέσο μεταφοράς του φωτός, η οποία το διανέμει το φως προς μια αισθητήριο κεφαλή στο τέλος της ίνας (βλ. Εικόνα 15). Η αισθητήριο κεφαλή μπορεί να περιέχει καθρέπτες, κάποιο αέριο ή υγρό αλλά και πολλούς άλλους μηχανισμούς που μπορούν να δημιουργήσουν, να διαμορφώσουν ή να διαφοροποιήσουν μια ακτίνα φωτός.



Εικόνα 15. Απεικόνιση συστημάτων ενδογενών & εξωγενών αισθητήρων [4].

Επίσης, ανάλογα με τη θέση και το μέγεθος του στοιχείου αισθητήρα, οι αισθητήρες οπτικών ινών ταξινομούνται σε τέσσερις κατηγορίες:

- 1) **Σημειακοί αισθητήρες** (point-sensors): Μοιάζουν με τους περισσότερους ηλεκτρικούς αισθητήρες, γιατί έχουν ένα σημειακό στοιχείο αισθητήρα στο τέλος της οπτικής ίνας. Σε αυτή την κατηγορία ανήκουν οι αισθητήρες τύπου Fabry-Perot.
- 2) **Αισθητήρες πολυπλεξίας** (multiplexed sensors): Επιτρέπουν τις μετρήσεις σε πολλά σημεία κατά μήκος μίας οπτικής ίνας, γιατί διαθέτουν αρκετά σημεία ανίχνευσης αισθητήρα. Στην κατηγορία αυτή ανήκουν οι αισθητήρες τύπου Fiber Bragg Grating (FBG).
- 3) **Αισθητήρες μεγάλου μήκους** (Long-Period Fiber Grating sensors): Κατατάσσουν τις μετρήσεις σε αισθητήρες μεγαλύτερου μήκους. Στην κατηγορία αυτή ανήκουν οι αισθητήρες τύπου SOFO.
- 4) **Κατανεμημένοι αισθητήρες** (distributed sensors): Οι συγκεκριμένοι αισθητήρες μπορούν να «αντιλαμβάνονται» και να ανιχνεύουν τις αλλαγές σε οποιοδήποτε σημείο κατά μήκος μιας οπτικής ίνας. Στην συγκεκριμένη κατηγορία, ανήκουν οι αισθητήρες τύπου Brillouin και Raman Scattering [16].



Εικόνα 16. Διάφοροι τύποι αισθητήρων ανάλογα με μέγεθος και τη θέση του αισθητηρίου [25]

Οι ιδιότητες του φωτός που μπορούν να χρησιμοποιηθούν από τους αισθητήρες οπτικών ινών για την ανίχνευση ενός φυσικού φαινομένου μπορούν να είναι:

- Η ένταση του φωτός (intensity).
- Η πόλωση του φωτός (polarimetric).
- Η σκέδαση του φωτός
- Η φασματική συμβολή (spectral interference).

Επιπλέον, οι αισθητήρες οπτικών ινών, μπορούν να κατηγοριοποιηθούν με βάση τις εφαρμογές στις οποίες χρησιμοποιούνται. Μια βασική κατηγορία είναι οι φυσικοί αισθητήρες, που χρησιμοποιούνται για την μέτρηση φυσικών παραμέτρων, όπως η πίεση, η θερμοκρασία κ.α. Μία άλλη κατηγορία είναι οι χημικοί αισθητήρες που χρησιμοποιούνται για τη μέτρηση του pH, την ανάλυση αερίων κ.α. και τέλος, οι βιοϊατρικοί αισθητήρες είναι

εκείνοι που αξιοποιούνται στη βιολογία και την ιατρική για την μέτρηση της ροής του αίματος, καθώς και τη σύσταση της γλυκόζης κ.α. [17].

### 3.2 Πλεονεκτήματα & Μειονεκτήματα Αισθητήρων Οπτικών Ινών.

Τα πλεονεκτήματα των αισθητήρων που βασίζονται σε οπτικές ίνες συνοψίζονται παρακάτω:

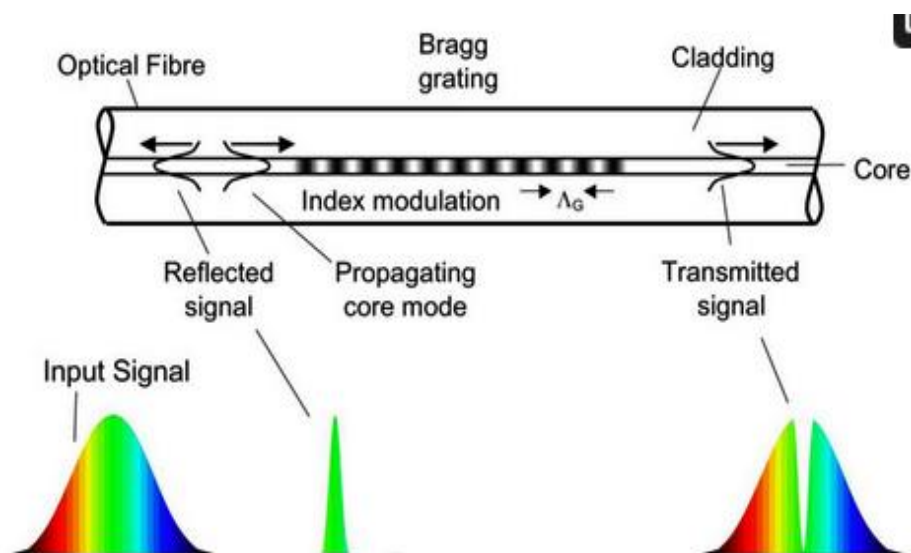
- Η χαμηλή απώλεια μετάδοσης στις οπτικές ίνες, που επιτρέπει την παρακολούθηση ενός φαινομένου εξ' αποστάσεως από δεκάδες χιλιόμετρα μακριά.
- Η παρακολούθηση σε πραγματικό χρόνο, η οποία επιτυγχάνεται με τη σύνδεση του αισθητήρα απευθείας πάνω στον εξοπλισμό μέτρησης.
- Είναι φιλικό προς το περιβάλλον.
- Έχουν αντοχή στη διάβρωση.
- Έχουν την δυνατότητα να πραγματοποιούν μετρήσεις σε σημεία που είναι αδύνατο να μετρηθούν με τους συμβατικούς αισθητήρες π.χ. στην ιατρική υπάρχει η δυνατότητα μεταφοράς της φωτεινής δέσμης λέιζερ από την πηγή μέχρι τη λαβή του γιατρού, καθώς χρησιμοποιούνται ευρύτατα σε ενδοσκοπήσεις, δίνοντας έτσι εικόνα από τον περιορισμένο χώρο των εσωτερικών οργάνων του ανθρώπινου σώματος.
- Η μεγάλη ταχύτητα λήψης των μετρήσεων και η δυνατότητα τους να επαναλαμβάνουν μετρήσεις κατά την διάρκεια εξέλιξης ενός φαινομένου (σεισμός, άνεμοι, πλημμύρες κλπ.)
- Το μειωμένο κόστος συντήρησης.
- Το μικρό τους μέγεθος, το οποίο παρέχει τη δυνατότητα να ενσωματωθούν μέσα σε μια σύνθετη κατασκευή χωρίς να μειώσουν σημαντικά την αντοχή της. Μπορούν, επίσης, να χρησιμοποιηθούν για μετρήσεις σε περιορισμένους χώρους.
- Οι αισθητήρες οπτικών μέσων είναι ανεπηρέαστοι από οποιονδήποτε εξωτερική ηλεκτρομαγνητική παρεμβολή και μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε περιβάλλον υψηλών ηλεκτρομαγνητικών παρεμβολών.
- Έχουν μεγάλη διάρκεια ζωής.

Σημαντικό είναι ωστόσο να αναφέρουμε και τα μειονεκτήματα των αισθητήρων των οπτικών ινών. Αυτά είναι τα παρακάτω:

- Η ευαισθησία του αισθητήριου αλλά και ολόκληρου του συστήματος ενός αισθητήρα μπορεί να επηρεαστεί και από άλλες μεταβλητές εκτός από την επιθυμητή μεταβλητή που μετρείται κάθε φορά.
- Το κόστος των οπτικών αισθητήρων, το οποίο είναι προς το παρόν στην πλειοψηφία των περιπτώσεων μεγαλύτερο από αυτών που κατασκευάζονται με τις έως τώρα εδραιωμένες τεχνολογίες. Αυτό συμβαίνει, λόγω του υψηλού κόστους των εξαρτημάτων και κυρίως των οργάνων ανίχνευσης.

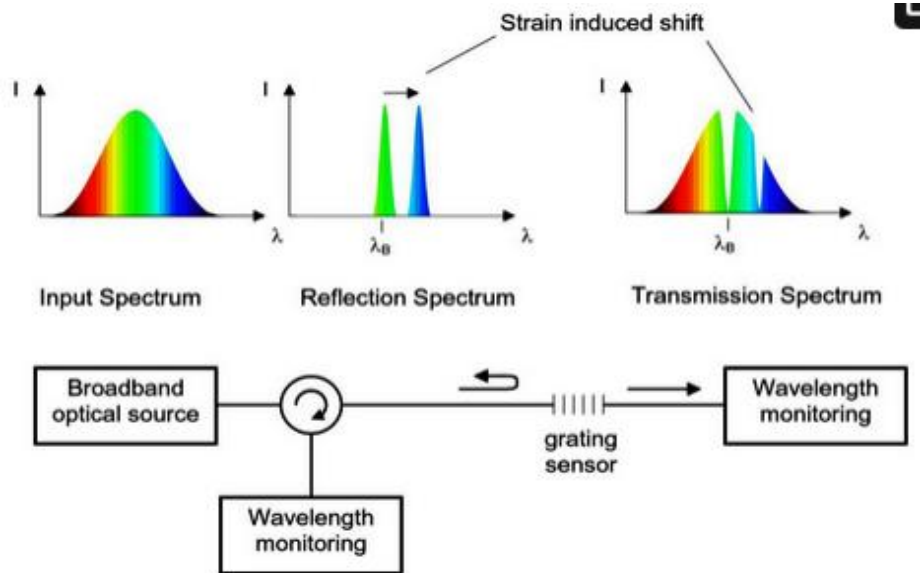
### 3.3 Αρχές λειτουργίας Αισθητήρων Οπτικών Ινών με φράγματα Bragg

Στην ενότητα αυτή θα αναλύσουμε τον τρόπο λειτουργίας ενός αισθητήρα που βασίζεται στις οπτικές ίνες με ενσωματωμένα φράγματα Bragg. Σε αυτού του τύπου τους αισθητήρες έχουν δημιουργηθεί φράγματα περίθλασης (Bragg gratings) που είναι, όπως έχει σημειωθεί σε προηγούμενη παράγραφο, περιοδικές μεταβολές του δείκτη διάθλασης κατά μήκος της ίνας σε κλίμακα αντίστοιχη του μήκους κύματος του διαδιδόμενου φωτός. Αν ένα οπτικό κύμα (φως) με μήκος κύματος ίδιας τάξης μεγέθους με την περίοδο του φράγματος διαδοθεί μέσω μιας τέτοιας διάταξης τότε θα ανακλαστεί έντονα. Το φαινόμενο αυτό είναι εμφανές και στις Εικόνες 17 και 18, όπου μπορούμε να διακρίνουμε το «πράσινο» φως, με χαρακτηριστικό μήκος κύματος  $\lambda_B$ , να ανακλάται προς τα πίσω όπου και λαμβάνουμε το φάσμα ανάκλασης με την χαρακτηριστική κορυφή στην φασματική περιοχή του πράσινου φωτός. Αντίστοιχα στο φάσμα του διαδιδόμενου σήματος μπορεί κανείς να διακρίνει το βύθισμα στην περιοχή συντονισμού του φράγματος Bragg.



Εικόνα 17. Τρόπος λειτουργίας ενός αισθητήρα οπτικών ινών με φράγματα Bragg[26]





Εικόνα 18. Τρόπος λειτουργίας ενός αισθητήρα οπτικών ινών με φράγματα Bragg[26]

Όπως ήδη αναφέρθηκε, οι αισθητήρες οπτικών ινών έχουν πολύ καλή προσαρμοστικότητα στις περιβαλλοντικές συνθήκες. Έτσι, μπορούν να χρησιμοποιηθούν για μετρήσεις διαφόρων μεγεθών, παρέχοντας ακόμη και την δυνατότητα να μετρηθούν ταυτόχρονα δύο παράμετροι όπως για παράδειγμα η τάση και η θερμοκρασία από τον ίδιο αισθητήρα. Η δυνατότητα λειτουργίας των φραγμάτων Bragg ως αισθητήρες οφείλεται στο γεγονός ότι το μήκος κύματος Bragg ( $\lambda_B$ ) αλλάζει γραμμικά με τη θερμοκρασία και την τάση. Η αιτία αυτής της μεταβολής είναι ότι όταν μεταβάλλεται η θερμοκρασία και η τάση μεταβάλλεται και ο δείκτης διάθλασης των υποκείμενων υλικών. Η Εξίσωση (7), μας δίνει τη μεταβολή του μήκους κύματος του φράγματος Bragg έπειτα από μεταβολές στη θερμοκρασία και την τάση.

$$\Delta\lambda_B = 2 \left( \Lambda \frac{\partial n_{eff}}{\partial l} + n_{eff} \frac{\partial \Lambda}{\partial l} \right) \Delta l + 2 \left( \Lambda \frac{\partial n_{eff}}{\partial T} + n_{eff} \frac{\partial \Lambda}{\partial T} \right) \Delta T \quad (7)$$

Το  $\Delta\lambda_B$  είναι η μετατόπιση του μήκους κύματος. Ο πρώτος όρος της συνάρτησης, εκφράζει την εξάρτηση από την παραμόρφωση, ενώ ο δεύτερος δείχνει την εξάρτηση της συχνότητας ανάκλασης Bragg από την θερμοκρασία. Στην πραγματικότητα, η εξάρτηση της συχνότητας ανάκλασης από δύο μεγέθη ταυτόχρονα, την τάση και τη θερμοκρασία στην προκειμένη περίπτωση, είναι ανεπιθύμητο χαρακτηριστικό για έναν αισθητήρα. Μια απλή μέθοδος για την εξάλειψη αυτού του μη επιθυμητού αποτελέσματος είναι η τοποθέτηση δυο φραγμάτων σε κάθε σημείο ανίχνευσης. Το ένα σε μηχανική και θερμική επαφή με το περιβάλλον, ενώ το άλλο μόνο σε θερμική επαφή. Από το φράγμα, το οποίο δε δέχεται μηχανικές επιδράσεις μπορεί να εξαχθεί η θερμοκρασία, ενώ απομονώνοντας αυτό το αποτέλεσμα μπορεί να προσδιοριστεί και η μηχανική παραμόρφωση [18].

### 3.4 Εφαρμογές Αισθητήρων Οπτικών Ινών

Οι οπτικές ίνες βρίσκουν πολλές εφαρμογές, όπως έχει ήδη αναφερθεί. Κι αυτό επειδή χρησιμοποιώντας μια οπτική ίνα δίνεται η δυνατότητα να μεταφέρουμε ταυτόχρονα και χωρίς αλλοίωση, χιλιάδες τηλεφωνήματα, δεκάδες προβολές εκπομπών τηλεοπτικών καναλιών, καθώς και συνδέσεις τηλεπικοινωνιακών συστημάτων, επίγειες ή υποθαλάσσιες μακρινών αποστάσεων υποκαθιστώντας τα ομοαξονικά καλώδια [18].

Σε ό,τι αφορά τη χρησιμοποίηση των οπτικών ινών ως αισθητήρες κάποιες από τις εφαρμογές στις οποίες έχουν ήδη ενταχθεί είναι:

- **Ιατρική:** Χρησιμοποιούνται ευρύτατα σε ενδοσκοπήσεις δίνοντας εικόνα από τον περιορισμένο χώρο των εσωτερικών οργάνων του ανθρώπινου σώματος. Οι γιατροί έχουν τη δυνατότητα να βλέπουν την εσωτερική επιφάνεια των οργάνων κάνοντας χρήση ζεύγους οπτικών ινών [19].
- **Ασφάλεια κι επιτήρηση:** Η περιμετρική ασφάλεια ενός χώρου, η παρακολούθηση στις σήραγγες των εθνικών οδών, η αεροπορική ασφάλεια και ο έλεγχος εισόδου χρησιμοποιούν την τεχνολογία των οπτικών ινών με άριστα αποτελέσματα. Στις αρχές της δεκαετίας του '90, υπήρξε έντονη η απαίτηση για αεροπορική ασφάλεια, για το λόγο αυτό, λοιπόν, έγιναν πιο αυστηρές, χρησιμοποιώντας συστήματα προσπέλασης με κάρτες-κλειδιά, ώστε να προβάλλεται η είσοδος όλου του εργαζόμενου προσωπικού στον συγκεκριμένο χώρο.

Τα συστήματα αυτά ικανοποιούν την οπτική παρακολούθηση και την προσπέλαση δεδομένων σε όλες τις πύλες. Για παράδειγμα, η κάρτα ενός εργαζόμενου θα ήταν ικανή να προσπελάσει μια πύλη, μόνο στην περίπτωση όπου η οπτική εικόνα που μεταβιβάζεται από αυτή την πύλη σε ένα κέντρο ελέγχου, συμπίπτει με την εικόνα των αποθηκευμένων δεδομένων σε έναν υπολογιστή. Οι αποστάσεις, οι οποίες είναι περιπλεγμένες, ειδικά σε μεγαλύτερης έκτασης αεροδρόμια, κάνουν τις οπτικές ίνες την καλύτερη επιλογή για τέτοιου είδους συστήματα [19].

- **Συστήματα ελέγχου βιομηχανίας:** Παραδείγματος χάρη, σε μονάδες χημικής βιομηχανίας η μεταβίβαση μέσω οπτικών ινών ανιχνεύει τις φυσικές και χημικές παραμέτρους οι οποίες αλλάζουν κατά τη διάρκεια μιας χημικής επεξεργασίας και ενεργοποιεί τους αντίστοιχους μηχανισμούς ελέγχου. Έτσι, επειδή οι οπτικοί ανιχνευτές είναι μικροί και επίσης ανεπηρέαστοι σε πολλά δυσμενή περιβάλλοντα, έχουν την ευελιξία να τοποθετηθούν σε παραπάνω από μια τοποθεσίες, καθώς και να συνδεθούν σε σειρά, ώστε να παρέχουν σταθερή παρακολούθηση για όσο διαρκεί η χημική επεξεργασία. Στις αεροδιαστημικές εφαρμογές, το μικρό βάρος των οπτικών ινών σε συνδυασμό με την «αναισθησία» τους σε ηλεκτρομαγνητικές παρεμβολές ραδιοσυχνότητας (EMI/RFI), μπορεί να αντικαταστήσει τα βαριά καλώδια χαλκού, τα οποία είναι ευαίσθητα σε ηλεκτρομαγνητικές παρεμβολές [19].
- **Στρατιωτικές επικοινωνίες:** Η χρήση των οπτικών ινών στις επικοινωνίες του στρατού συναντάται σε ευρεία κλίμακα. Έτσι, οι οπτικές ίνες χρησιμοποιούνται τόσο σε

τηλεπικοινωνιακά συστήματα, όσο και σε οπτικά συστήματα, σε αισθητήρες RADAR, καθώς και σε μη επανδρωμένα οχήματα.

- **Φαρμακευτική:** Χρησιμοποιούνται στην ανίχνευση και στον έλεγχο της ποιότητας των φαρμάκων.
- **Αυτοκινητοβιομηχανία - Κατασκευή κτιρίων:** Χρήση στον έλεγχο της ποιότητας των κατασκευών.

## Κεφάλαιο 4<sup>ο</sup>. Μελέτη Αισθητήρων Οπτικών Ινών με Φράγματα Bragg

Σε αυτό το κεφάλαιο περιγράφεται η ανάλυση, μελέτη και προσομοίωση συστημάτων αισθητήρων οπτικών ινών βασισμένων στα φράγματα Bragg (Fiber Bragg Gratings-FBGs). Η ανάλυση του υπό μελέτη συστήματος θα πραγματοποιηθεί τόσο θεωρητικά (με βάση την βιβλιογραφία) όσο και υπολογιστικά με την βοήθεια των παρακάτω λογισμικών: OptiSystem, OptiGrating&Matlab.

### 4.1 Γενικοί Ορισμοί

#### Μεταδοτικότητα (Transmittivity) και Ανακλαστικότητα (Reflectivity)

Ως μεταδοτικότητα ορίζεται η αποτελεσματικότητα στη μετάδοση ακτινοβολούμενης ενέργειας και σχετίζεται με την απώλεια ενέργειας μέσω απορρόφησης, σκέδασης, ανάκλασης κ.α.. Για μια δεδομένη θέση, η μεταδοτικότητα προκύπτει από το λόγο της μεταδιδόμενης ισχύος προς την ισχύ εισόδου  $T = P_{tr}/P_{in}$ . Αντίστοιχα, ανακλαστικότητα είναι η αποτελεσματικότητα στην ανάκλαση ακτινοβολούμενης ενέργειας και υπολογίζεται από το λόγο της ανακλώμενης ισχύος προς την ισχύ εισόδου  $R = P_r/P_{in}$ .

#### Αποδίωση (Apodization)

Η αποδίωση είναι η τροποποίηση του σχήματος μιας μαθηματικής συνάρτησης που περιγράφει ένα ηλεκτρικό σήμα, μια οπτική μετάδοση ή μια μηχανική δομή. Η αποδίωση συνήθως επιτυγχάνεται με μια ανάγλυφη εγγραφή του πλέγματος για να μειωθεί η μεταβολή του δείκτη διάθλασης προς τα άκρα του πλέγματος και είναι η πιο αποτελεσματική μέθοδος για την εξάλειψη των πλευρικών λοβών ενός ομοιόμορφου φράγματος FBG.

#### Διασκεδασμός (Dispersion)

Διασκεδασμός, ειδικά για την παρούσα εργασία, ορίζεται ως η πρώτη παράγωγος της καθυστέρησης ομάδας σε σχέση με το μήκος κύματος. Πιο απλά, διασκεδασμός είναι η καθυστέρηση ομάδας ανά μονάδα μήκους, με μονάδες μέτρησης [χρόνος/απόσταση].

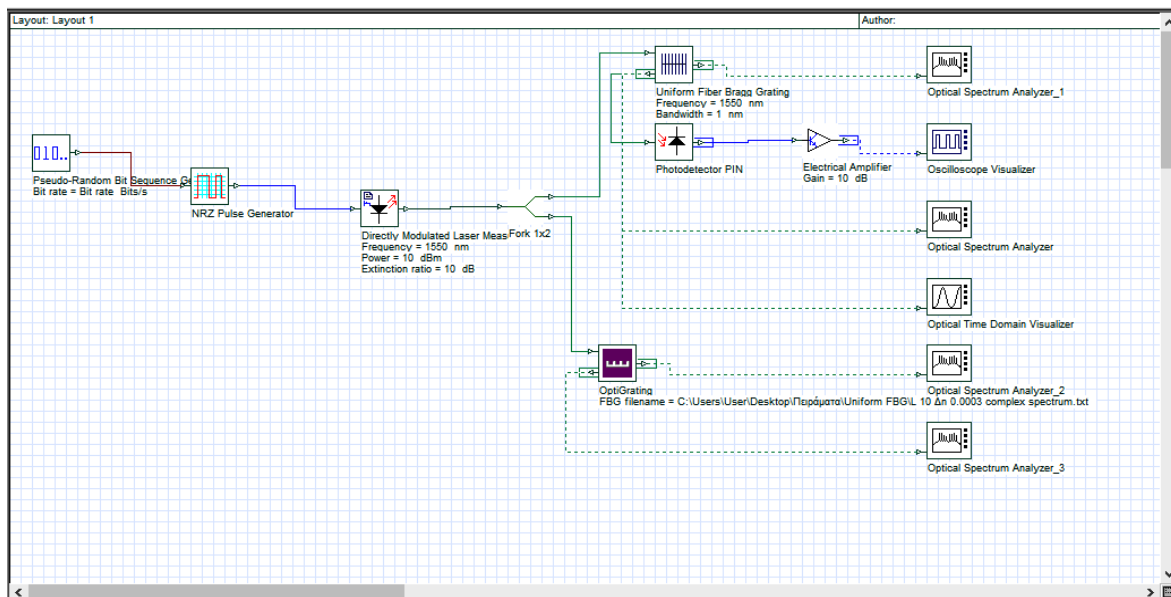
Καθυστέρηση ομάδας είναι η πρώτη παράγωγος της αθροιστικής φάσης σε σχέση με τη γωνιακή συχνότητα, ενώ αθροιστική φάση είναι η αλλαγή φάσης του ηλεκτρομαγνητικού πεδίου που συσσωρεύεται για ένα δεδομένο μήκος κύματος.

### Καθυστέρηση φάσης (Phase delay)

Η καθυστέρηση φάσης δείχνει τη χρονική καθυστέρηση σε δείγματα του σήματος εξόδου σε σχέση με το αρχικό σήμα εισόδου.

### 4.2 Περιγραφή Σχεδιαστικού Κυκλώματος Uniform Grating (FBG) & πFBG

Η ανάλυση που πραγματοποιήθηκε σε αυτό το κεφάλαιο είναι βασισμένη σε δημοσιευμένη εργασία [27].



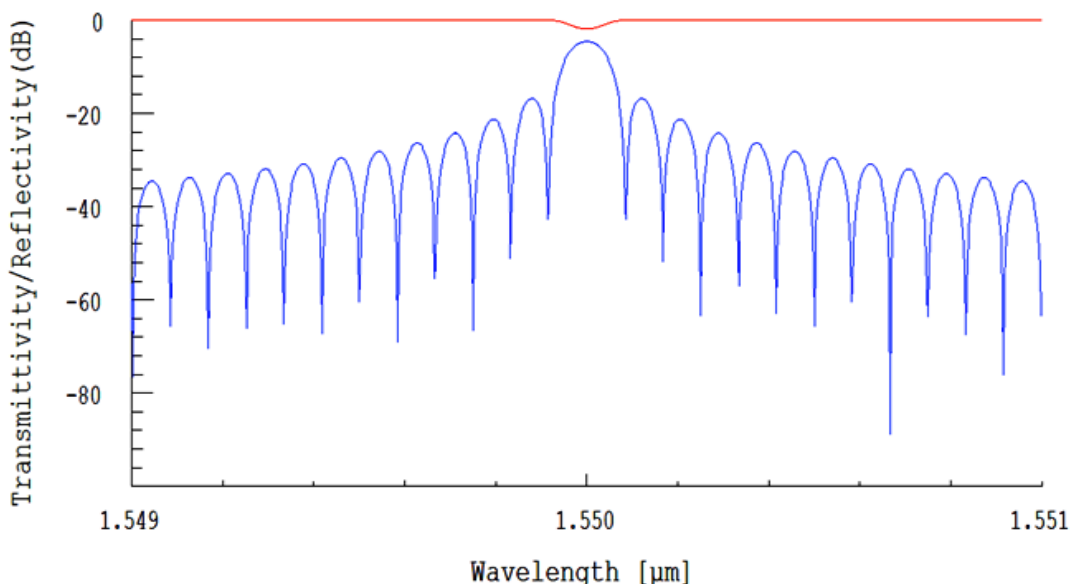
Εικόνα 19. Σχεδιαστικό κύκλωμα για uniform FBG

Στην Εικόνα 19 απεικονίζεται το μπλοκ διάγραμμα μιας απλής πειραματικής διάταξης συστήματος αισθητήρα θερμοκρασίας με χρήση ενός ομοιόμορφου FBG (η προσομοίωση αυτή έγινε με τη χρήση OptiSystem Software, έκδοση 7). Το σύστημα αποτελείται από τα εξής υλικά:

1. Γεννήτρια ψευδοτυχαίας ακολουθίας bit (Pseudo-Random Bit): παράγει τυχαία ακολουθία bit με ρυθμό = 1 Gb/s.

2. Γεννήτρια παλμών NRZ(μη επιστροφή στο μηδέν): παράγει ορθογώνια παλμικά σήματα από ψευδοτυχαία ακολουθία.
3. Άμεσα διαμορφωμένο λέιζερ μέτρησης (Directly Modulated Laser Measured): ένας μετατροπέας, ο οποίος μετατρέπει τα παλμικά σήματα από το ηλεκτρικό στο οπτικό πεδίο. Πρόκειται για μια στενού εύρους γραμμής πηγή λέιζερ η οποία παράγει μια δέσμη λέιζερ από το παλμικό σήμα με μήκος κύματος = 1550 nm και ισχύ = 1dBm.
4. Ομοιόμορφο FBG: στοιχείο αισθητήρα θερμοκρασίας βασισμένος σε οπτική ίνα.
5. Αναλυτής οπτικού φάσματος (Optical Spectrum Analyzer): εμφανίζει το οπτικό σήμα ισχύος στο πεδίο της συχνότητας (Ισχύς συναρτήσει της συχνότητας (Hz) ή μήκος κύματος (m)).
6. Οπτικός απεικονιστής στο πεδίου χρόνου Optical Time Domain Visualizer): εμφανίζει την ισχύ του σήματος στο πεδίο του χρόνου (Ισχύς έναντι χρόνου (s)).
7. ΦωτοανιχνευτήςPIN: μετατρέπει το σήμα από το οπτικό πεδίο σε ηλεκτρικό πεδίο.
8. Ηλεκτρικός ενισχυτής Electrical Amplifier: ενισχύει το ηλεκτρικό σήμα.
9. Οπτικοποιητής παλμογράφου(Oscilloscope Visualizer): εμφανίζει το πλάτος του σήματος στο ηλεκτρικό πεδίο (Amplitude (a.u.) vs Time (s))

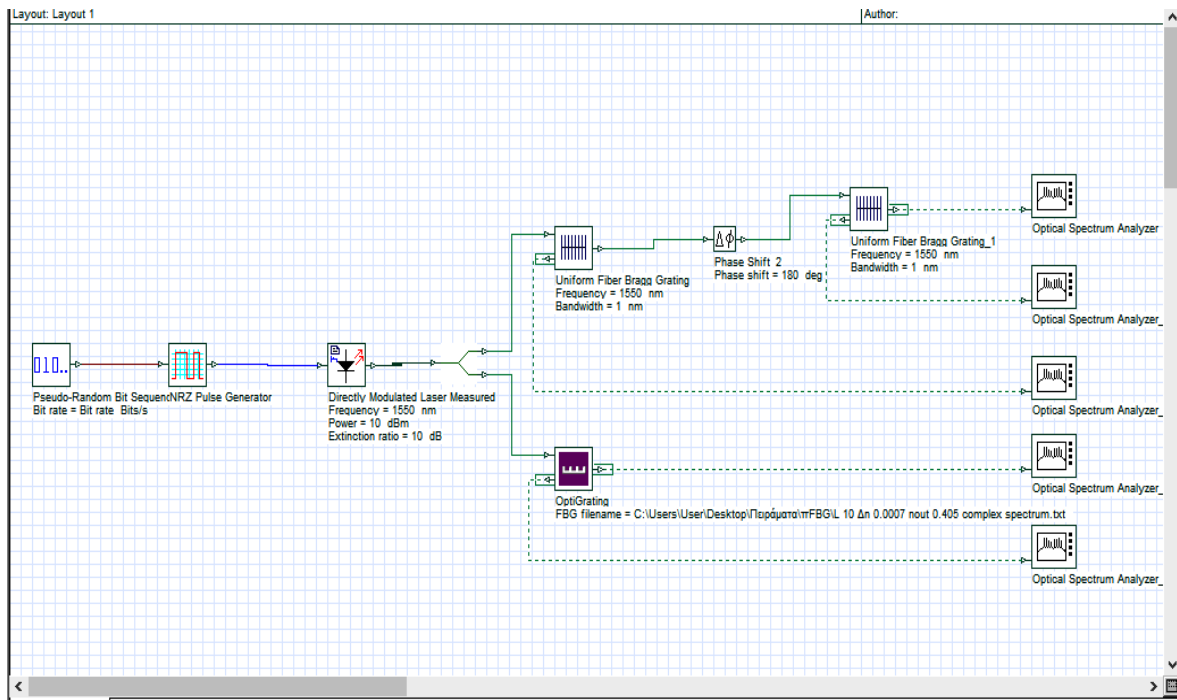
Το αποτέλεσμα που προέκυψε από την ανάλυση του παραπάνω μοντέλου (βλ. Εικόνα 19) ως προς την φασματική απόκριση του συστήματος είναι το παρακάτω.



Εικόνα 20. Σχηματική απεικόνιση ενός uniform FBG

Στην Εικόνα 20 παρουσιάζεται η εκπομπή και η ανάκλαση φάσματος ενός ομοιόμορφου FBG για μήκος  $L=10000\mu\text{m}$  και  $\Delta n_{ac}=3*10^{-4}$  (Σχέση μεταξύ διαπερατότητας/ανακλαστικότητας σε dB και του μήκους κύματος σε  $\mu\text{m}$ ), όπου η κόκκινη

γραμμή συμβολίζει το ανακλώμενο σήμα και η μπλε καμπύλη συμβολίζει το μεταδιδόμενο σήμα.

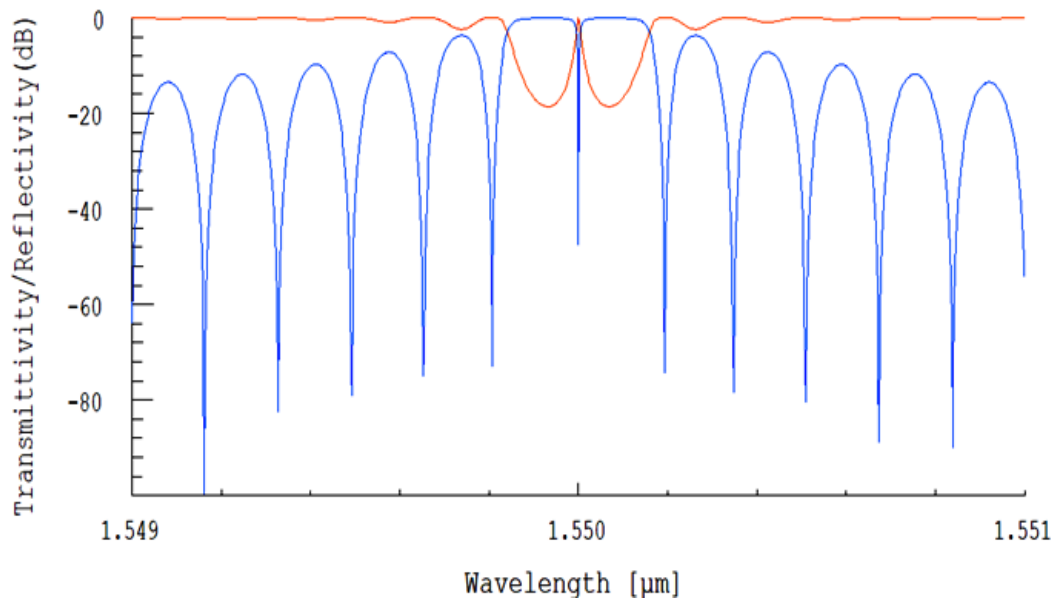


Εικόνα 21. Σχεδιαστικό κύκλωμα για pFBG

Στην Εικόνα 21 απεικονίζεται το μπλοκ διάγραμμα μιας απλής πειραματικής διάταξης συστήματος αισθητήρα θερμοκρασίας με χρήση ενός pFBG (η προσομοίωση αυτή έγινε με τη χρήση OptiSystem Software, έκδοση 7). Το σύστημα αποτελείται από τα εξής υλικά:

1. Γεννήτρια ψευδοτυχαίας ακολουθίας bit (Pseudo-Random Bit): παράγει τυχαία ακολουθία bit με ρυθμό = 1 Gb/s.
2. Γεννήτρια παλμών NRZ(μη επιστροφή στο μηδέν): παράγει ορθογώνια παλμικά σήματα από ψευδοτυχαία ακολουθία.
3. Άμεσα διαμορφωμένο λέιζερ μέτρησης (Directly Modulated Laser Measured): ένας μετατροπέας, ο οποίος μετατρέπει τα παλμικά σήματα από το ηλεκτρικό στο οπτικό πεδίο.
4. 2 Ομοιόμορφα FBGs: αισθητήρες θερμοκρασίας.
5. Phase Shift ( $\Delta\phi$ ): Ο ταλαντωτής μετατόπισης φάσης είναι ένα γραμμικό ηλεκτρονικό κύκλωμα ταλαντωτή που παράγει ένα ημιτονοειδές κύμα εξόδου. Η διαφορά φάσης του συγκεκριμένου υλικού είναι ρυθμισμένη για την τιμή 180 deg.
6. Αναλυτής οπτικού φάσματος (Optical Spectrum Analyzer): εμφανίζει το οπτικό σήμα ισχύος στο πεδίο της συχνότητας (Ισχύς συναρτήσεως της συχνότητας (Hz) ή μήκος κύματος (m)).

Το αποτέλεσμα που περιμένουμε να πάρουμε μετά την συνδεσμολογία που κάναμε (βλ. εικόνα 21) είναι και αυτό που προέκυψε από την ανάλυση του κυκλώματος όπως φαίνεται παρακάτω.



Εικόνα 22. Σχηματική απεικόνιση πFBG

Στην Εικόνα 22 παρουσιάζεται η εκπομπή και η ανάκλαση φάσματος ενός πFBG για μήκος grating  $L=10000\mu\text{m}$  και  $\Delta n_{ac}=3 \cdot 10^{-4}$ , όπου η κόκκινη γραμμή συμβολίζει το ανακλώμενο σήμα και το μπλε γράφημα συμβολίζει το μεταδιδόμενο σήμα. Αυτό το οποίο μπορεί να παρατηρηθεί είναι ότι τώρα διαχωρίσαμε το FBG σε δύο ξεχωριστά μικρότερα FBG, όπου ενδιάμεσα τους έχουμε εισάγει το υλικό Phase Shift ( $\Delta\Phi$ ) και με αυτό τον τρόπο έχουμε την δυνατότητα να βελτιώσουμε την ευαισθησία και να μειώσουμε το εύρος ζώνης. Επίσης, όταν συγκρίνουμε το ομοιόμορφο FBG υπό τις ίδιες παραμέτρους, παρατηρούμε ότι η ανακλαστικότητα αυξήθηκε (πλησιάζοντας τα 0 dB) και οι πλευρικοί λοβοί μειώνονται σημαντικά. Βέβαια στα επόμενα κεφάλαια που θα ακολουθήσουν, έχει γίνει εκτενής ανάλυση των αποτελεσμάτων που εξήχθησαν, καθώς και τις διαφορές που υπάρχουν αλλά και τα συμπεράσματα που βγήκαν από αυτήν την σύγκριση.

### 4.3 Περιγραφή Διαδικασίας Προσομοίωσης

Για την ανάλυση της απόδοσής τους, στα πλαίσια αυτής της εργασίας, συγκρίθηκαν οι ακόλουθοι τύποι FBG: Ομοιόμορφα (uniform FBG), μετατοπισμένα κατά φάση  $\pi$  (πFBG), και αποδιωμένα κατά συναρτήσεις Gaussian και υπερβολικής εφαπτομένης (Gaussian apodized FBG και tanh apodized FBG αντίστοιχα), με απώτερο στόχο την εύρεση του καταλληλότερου τύπου για χρήση ως αισθητήρα θερμοκρασίας.

Η αξιολόγησή τους βασίστηκε στις ακόλουθες παραμέτρους:

- Συντελεστής μετάδοσης ή μεταδοτικότητα: Ο λόγος της μεταδιδόμενης ισχύος προς την ισχύ εισόδου  $T = P_{tr}/P_{in}$ . Η μέτρησή της έγινε στην έξοδο της συσκευής.
- Συντελεστής ανάκλασης ή ανακλαστικότητα: Ο λόγος της ανακλώμενης ισχύος προς την ισχύ εισόδου  $R = P_r/P_{in}$ . Η μέτρησή της έγινε στην είσοδο της συσκευής.
- Εύρος δέσμης μισής ισχύος (FWHM): Το φασματικό εύρος του σήματος στο 50% του μέγιστου πλάτους ισχύος.
- Διαφορά του πλάτους ισχύος μεταξύ κύριου και πρώτου πλευρικού λοβού (ΔΚΠΛ): όπου ΙΚΛ η ισχύς του κύριου λοβού του σήματος που εμφανίζεται στο επιθυμητό κεντρικό μήκος κύματος  $\lambda_B$ , ΙΠΛ η ισχύς του αριστερού ή δεξιού πλευρικού λοβού, που εμφανίζονται εκατέρωθεν του κύριου λοβού σε μήκη κύματος διαφορετικά από το  $\lambda_B$ . Σημειώνεται πως για λόγους συντομίας και ύπαρξης συμμετρίας, θεωρείται πως οι δεξιοί λοβοί έχουν (σχεδόν) ίση ισχύ με τους αριστερούς. Ως εκ τούτου, στους πίνακες παρουσιάζονται αποτελέσματα μετρήσεων μόνο για πλευρικούς λοβούς εξ αριστερών του κύριου.
- Πλήθος πλευρικών λοβών, μετρημένων και για τις δύο πλευρές του κύριου λοβού.
- Λόγος καταστολής πλευρικών λοβών (SLSR): Ο λόγος πλάτους μεταξύ του πρώτου και του τελευταίου πλευρικού λοβού που υποδεικνύει την κλίση με την οποία οι πλευρικοί λοβοί καταστέλλονται.

Από τις παραπάνω παραμέτρους αξιολόγησης, για τη βέλτιστη ανίχνευση θερμοκρασίας είναι επιθυμητή η μέγιστη ανακλαστικότητα, ο μέγιστος λόγος καταστολής πλευρικών λοβών, το ελάχιστο πλήθος πλευρικών λοβών και το ελάχιστο FWHM. Οι προσομοιώσεις έγιναν μέσω του προγράμματος OptiGrating, όπου τα FBG σχεδιάστηκαν με χρήση οπτικής ίνας απλού ρυθμού και βηματικού δείκτη διάθλασης, παραμετροποιήθηκαν και, τέλος, εξήχθησαν οι μετρήσεις για το φάσμα μετάδοσης και ανάκλασής τους. Εν συνεχεία, οι μετρήσεις εισήχθησαν στο MATLAB ώστε να επεξεργαστούν για τη λήψη συγκρίσεων και των αντίστοιχων διαγραμμάτων τους.

Στις προσομοιώσεις όλα τα FBG είχαν κοινά τα παρακάτω χαρακτηριστικά τους:

- Ακτίνα πυρήνα της ίνας:  $r_{core}=2 \mu m$
- Ακτίνα περιβλήματος της ίνας:  $r_{clad}=8 \mu m$
- Δείκτης διάθλασης πυρήνα της ίνας:  $n_{core}=1.447$
- Δείκτης διάθλασης περιβλήματος της ίνας:  $n_{clad}=1.444$
- Κεντρικό μήκος κύματος:  $\lambda_B=1.55 \mu m$

Οι συγκρίσεις πραγματοποιήθηκαν αλλάζοντας τιμές στο μήκος  $L$  των FBG και στη μεταβολή διαμόρφωσης του δείκτη διάθλασης  $\Delta n_{oc}$ . Επιπρόσθετα, ειδικά για την περίπτωση των πFBG, προστέθηκε ακόμη μία εξωτερική στρώση/μανδύα στην οπτική ίνα με δείκτη διάθλασης  $r_{cloak}=0.405$ .

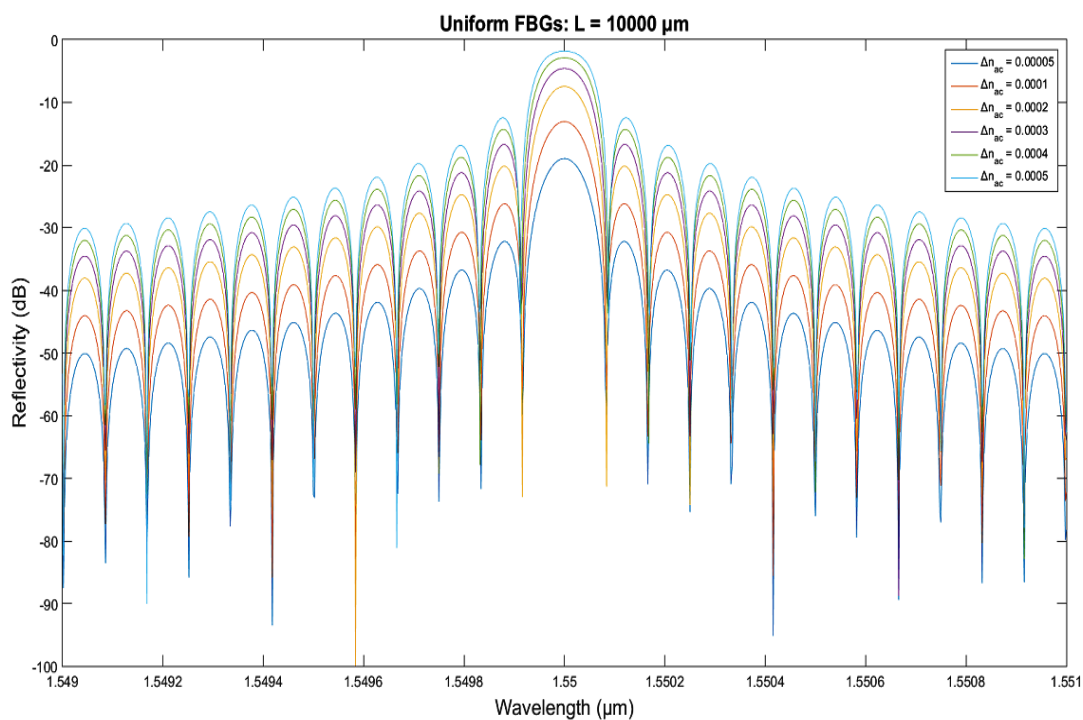


### 4.3.1 Ανάλυση Απόδοσης Ομοιόμορφων FBG για Μεταβλητά $L$ και $\Delta n_{ac}$

Αρχικά επιχειρήθηκε σύγκριση για τους ομοιόμορφα FBG με δύο προσεγγίσεις. Η πρώτη αφορά FBG σταθερού μήκους  $L=10000 \mu\text{m}$ , αλλάζοντας μόνο τη μεταβολή της διαμόρφωσης δείκτη διάθλασης από  $\Delta n_{ac}=0.5 \cdot 10^{-4}$  έως  $5 \cdot 10^{-4}$  (Εικόνα 23 και Πίνακας 2), ενώ η δεύτερη με διαφορετικά  $L=10000$  έως  $90000 \mu\text{m}$  με  $\Delta n_{ac}=3 \cdot 10^{-4}$  (Εικόνα 24-25 και Πίνακας 3) και  $\Delta n_{ac}=4 \cdot 10^{-4}$  (Πίνακας 4).

Πίνακας 2. Ανάλυση Απόδοσης Ομοιόμορφων FBG για Μεταβλητά  $\Delta n_{ac}$

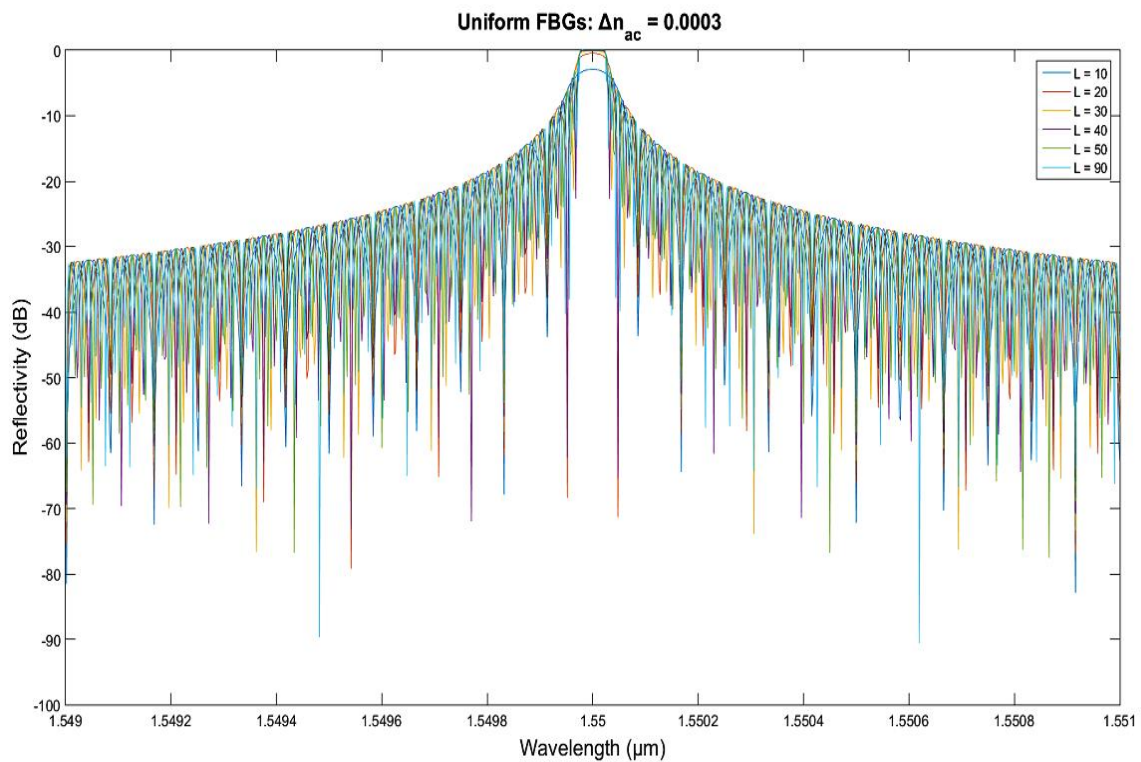
L (mm)	$\Delta n_{ac}$	IKL (dB)	Μέγιστη ΙΠΛ (dB)	Ελάχιστη ΙΠΛ (dB)	ΔΚΠΛ (dB)	SLSR (%)	Πλήθος πλευρ. λοβών	FWHM ( $\mu\text{m}$ )
10	5.00E-05	-18.9732	-32.2057	-50.0872	<b>13.2325</b>	<b>64.30</b>	22	<b>7.20E-05</b>
10	1.00E-04	-13.0619	-26.1917	-44.0667	13.1298	59.44	22	<b>7.20E-05</b>
10	2.00E-04	-7.4602	-20.1987	-38.0461	12.7385	53.09	22	7.60E-05
10	3.00E-04	-4.5782	-16.7280	-34.5245	12.1498	48.45	22	8.40E-05
10	4.00E-04	-2.8733	-14.3023	-32.0263	11.4289	44.66	22	9.20E-05
10	5.00E-04	<b>-1.8184</b>	-12.4543	-30.0890	10.6359	41.39	22	1.04E-04



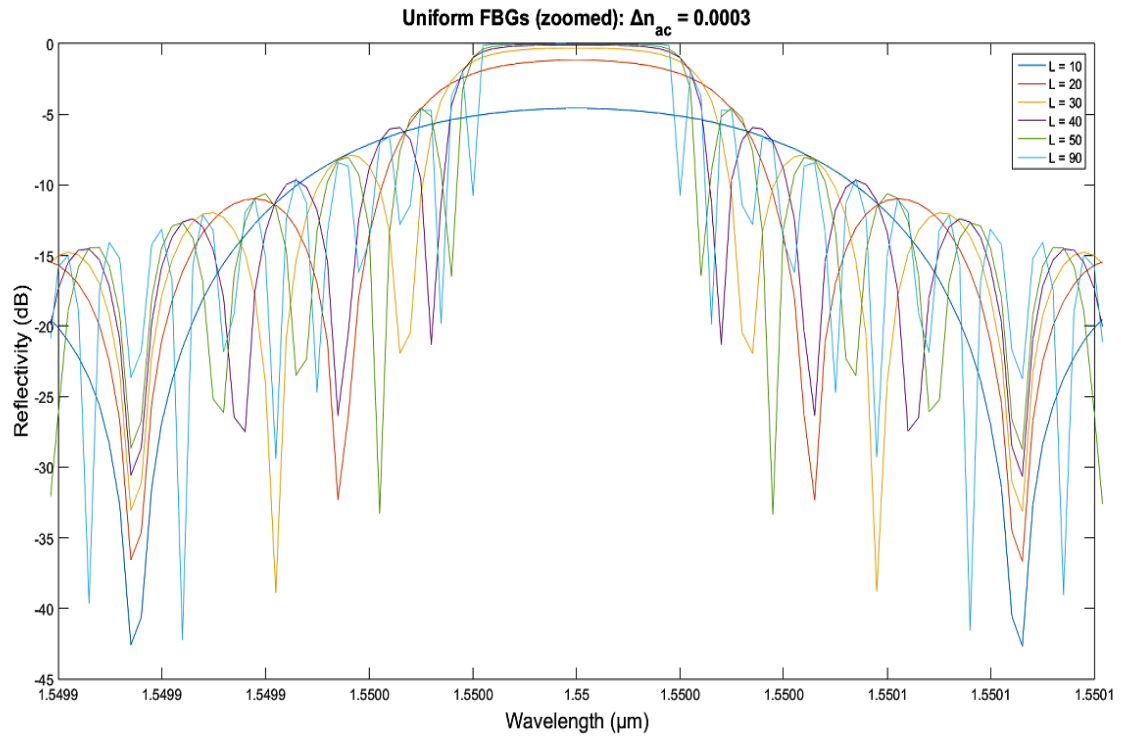
Εικόνα 23. Διάγραμμα για Uniform FBG με  $L=10.000\mu\text{m}$  &  $\Delta n=0.5 \cdot 10^{-4}$  έως  $5 \cdot 10^{-4}$

**Πίνακας 3.** Ανάλυση Απόδοσης Ομοιόμορφων FBG για Μεταβλητά  $L$

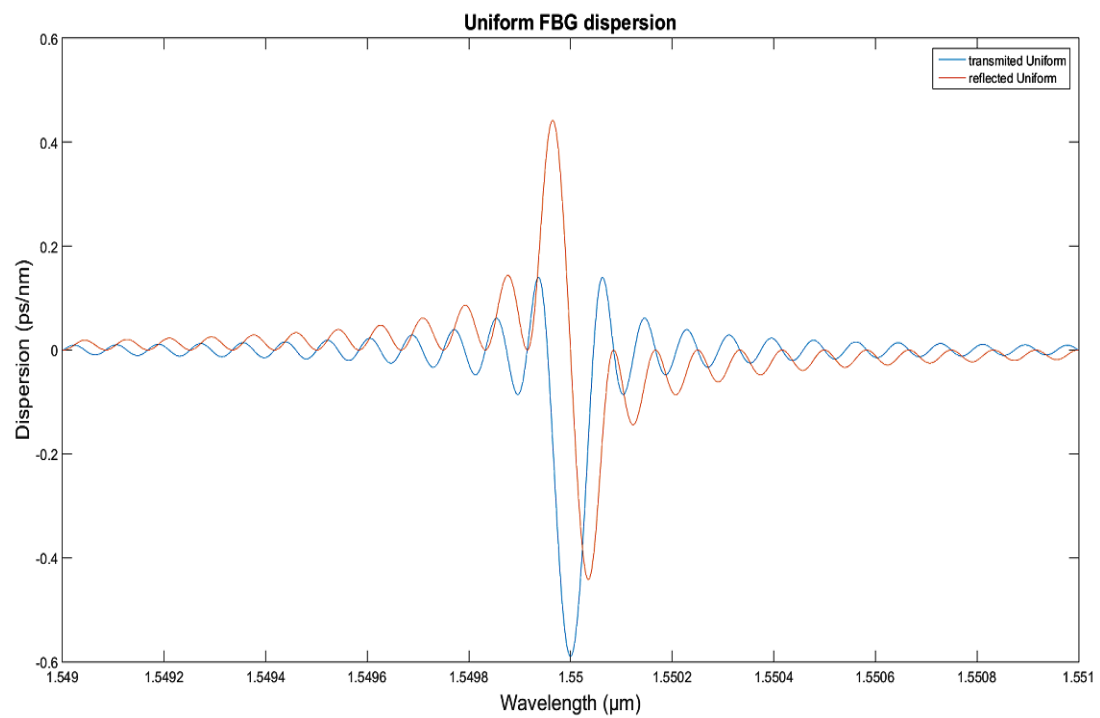
$L$ (mm)	$\Delta n_{ac}$	IKL (dB)	Μέγιστη ΙΠΛ (dB)	Ελάχιστη ΙΠΛ (dB)	ΔΚΠΛ (dB)	SLSR (%)	Πλήθος πλευρ. λοβών	FWHM ( $\mu\text{m}$ )
10	3.00E-04	-4.5782	-16.7280	-34.5245	<b>12.1498</b>	<b>48.45</b>	<b>22</b>	8.40E-05
20	3.00E-04	-1.1545	-10.9759	-34.7296	9.8214	31.60	46	5.60E-05
30	3.00E-04	-0.2970	-7.8790	-34.7751	7.5820	22.66	70	4.80E-05
40	3.00E-04	-0.0765	-5.9456	-34.8463	5.8691	17.06	94	4.40E-05
50	3.00E-04	-0.0197	-4.5432	-34.8707	4.5235	13.03	118	<b>4.00E-05</b>
90	3.00E-04	<b>-0.0001</b>	-2.0053	-35.2175	2.0052	5.69	214	4.40E-05



**Εικόνα 24.** Διάγραμμα για UniformFBG με  $\Delta n_{ac}=0.0003$  &  $L =$  από  $10.000\mu\text{m}$  έως  $90.000\mu\text{m}$



Εικόνα 25. Διάγραμμα για Uniform FBGs με  $\Delta n_{ac}=0.0003$  &  $L =$  από 10.000  $\mu\text{m}$  έως 90.000  $\mu\text{m}$



Εικόνα 26. Διάγραμμα διασποράς για UniformFBG.

**Πίνακας 4.** Ανάλυση Απόδοσης Ομοιόμορφων FBG για Μεταβλητά  $L$  και  $\Delta n_{ac}=4*10^{-4}$ 

L (mm)	$\Delta n_{ac}$	IKL (dB)	Μέγιστη ΙΠΛ (dB)	Ελάχιστη ΙΠΛ (dB)	ΔΚΠΛ (dB)	SLSR (%)	Πλήθος πλευρ. λοβών	FWHM ( $\mu\text{m}$ )
10	4.00E-04	-2.8733	-14.3023	-32.0263	<b>11.4289</b>	<b>44.66</b>	<b>22</b>	9.20E-05
20	4.00E-04	-0.4668	-8.7388	-32.2377	8.2720	27.11	46	6.80E-05
30	4.00E-04	-0.0765	-5.8940	-32.2764	5.8175	18.26	70	6.00E-05
40	4.00E-04	-0.0125	-4.1861	-32.3339	4.1736	12.95	94	5.60E-05
50	4.00E-04	-0.0021	-3.0984	-32.3537	3.0963	9.58	118	<b>5.20E-05</b>
90	4.00E-04	<b>-1.48E-06</b>	-1.4181	-32.6185	1.4181	4.35	214	5.60E-05

Από τα παραπάνω αποτελέσματα συμπεραίνεται ότι:

1. Η αύξηση του  $\Delta n_{ac}$  επιφέρει αύξηση των ΙΚΛ και FWHM, μείωση των ΔΚΠΛ και SLSR, ενώ το πλήθος πλευρικών λοβών παραμένει σταθερό
2. Η αύξηση του μήκους  $L$  οδηγεί σε αύξηση της ΙΚΛ και του πλήθους πλευρικών λοβών, με ταυτόχρονη μείωση των ΔΚΠΛ, SLSR και FWHM
3. Δεν υπάρχει συνδυασμός  $L$  και  $\Delta n_{ac}$  που να έχει όλες τις παραμέτρους αξιολόγησης σε επιθυμητές τιμές
4. Μέσω των παραμέτρων αξιολόγησης, οι βέλτιστες τιμές μήκους και μεταβολής διαμόρφωσης δείκτη διάθλασης είναι  $L=10 \text{ mm}$  και  $\Delta n_{ac}$  από  $3*10^{-4}$  έως  $4*10^{-4}$  αντίστοιχα.

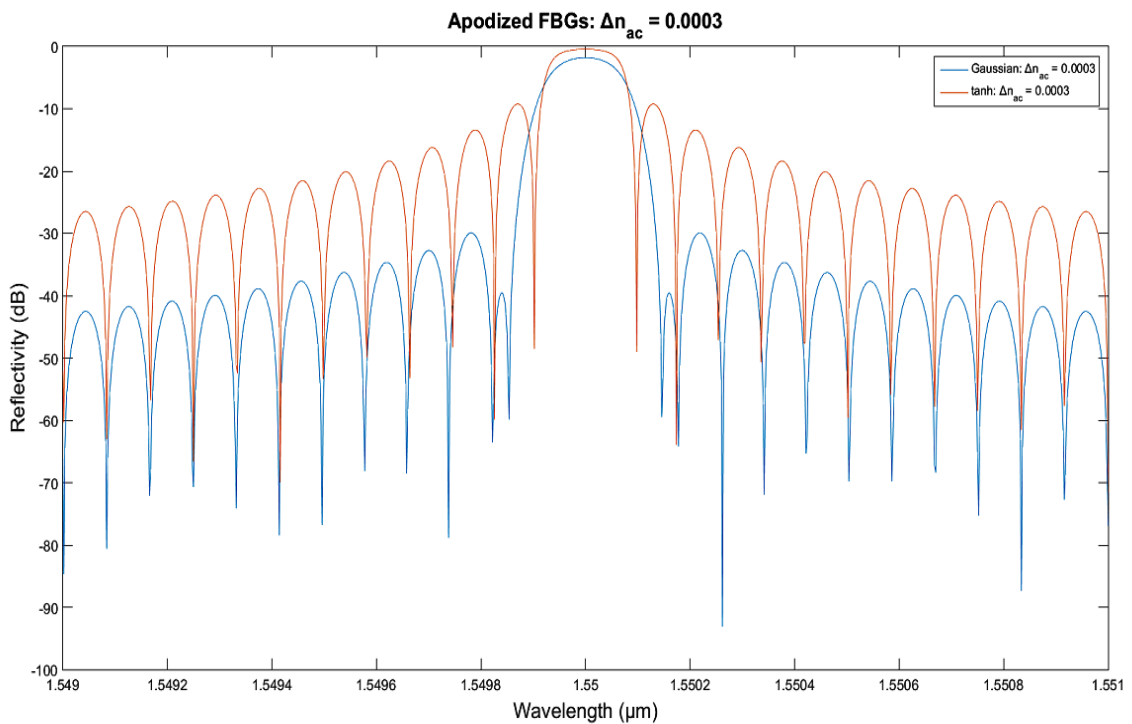
#### 4.3.2 Ανάλυση Απόδοσης FBG με Αποδίωση για Βέλτιστα $L$ και $\Delta n_{ac}$

Επόμενη ανάλυση έγινε σε FBG με δύο τύπους αποδίωσης (apodization): Γκαουσιανής (Gaussian) και υπερβολικής εφαπτομένης (tanh). Το μήκος του FBG ορίστηκε  $L=10 \text{ mm}$ , ενώ η μεταβολή διαμόρφωσης δείκτη διάθλασης  $\Delta n_{ac}=3*10^{-4}$  (Εικόνα 27) και  $4*10^{-4}$  (Εικόνα 28) όπως βρέθηκαν να είναι οι ιδανικές τιμές τους στην ανάλυση απόδοσης των ομοιόμορφων

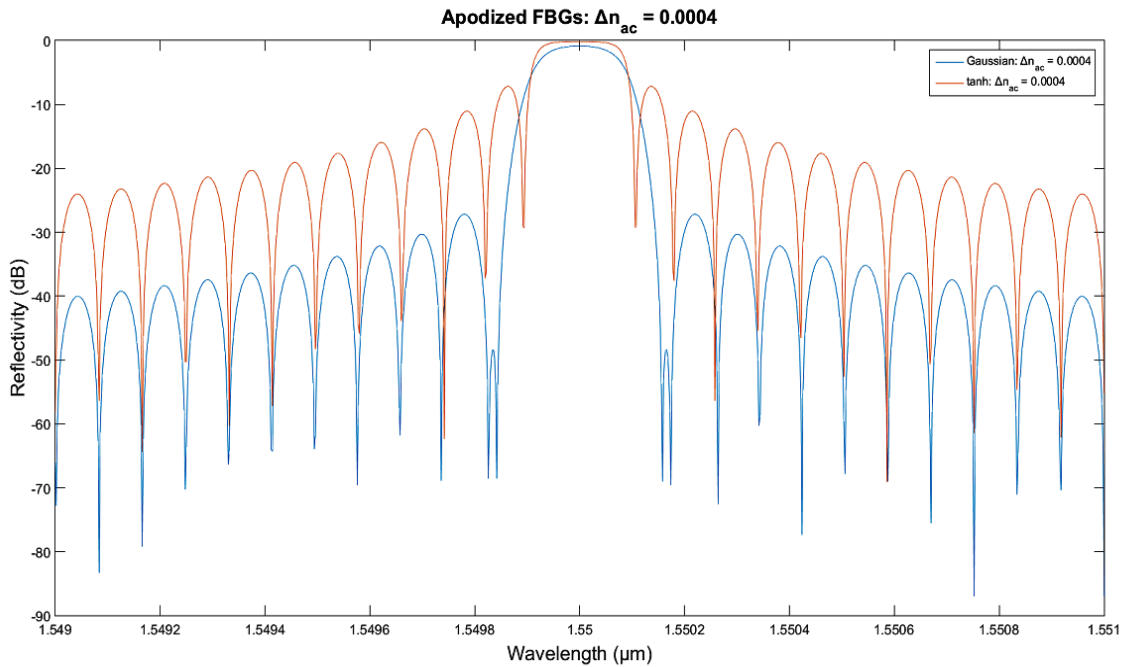
FBG. Τα συγκεντρωτικά αποτελέσματά τους παρουσιάζονται στον Πίνακα 5. Είναι φανερό η υπεροχή της απόδοσης των FBG με Γκαουσιανή αποδίωση, αφού δίνουν το μικρότερο FWHM, πολύ μεγαλύτερη ΔΚΠΛ και SLSR, έχοντας όμως λίγο χαμηλότερη ΙΚΛ.

**Πίνακας 5.** Ανάλυση Απόδοσης FBG με Αποδίωση για Βέλτιστα  $L$  και  $\Delta n_{ac}$

Αποδίωση	$\Delta n_{ac}$	ΙΚΛ (dB)	Μέγιστη ΙΠΛ (dB)	Ελάχιστη ΙΠΛ (dB)	ΔΚΠΛ (dB)	SLSR (%)	Πλήθος πλευρ. λοβών	FWHM ( $\mu\text{m}$ )
Gaussian	3.00E-04	-1.7950	-29.9330	-42.5105	<b>28.1380</b>	<b>70.41</b>	22	<b>1.36E-04</b>
Gaussian	4.00E-04	-0.8390	-27.1622	-40.0183	26.3232	67.87	22	1.64E-04
tanh	3.00E-04	-0.4576	-9.2321	-26.4815	8.7746	34.86	22	1.40E-04
tanh	4.00E-04	<b>-0.1361</b>	-7.1742	-23.9935	7.0381	29.90	22	1.72E-04



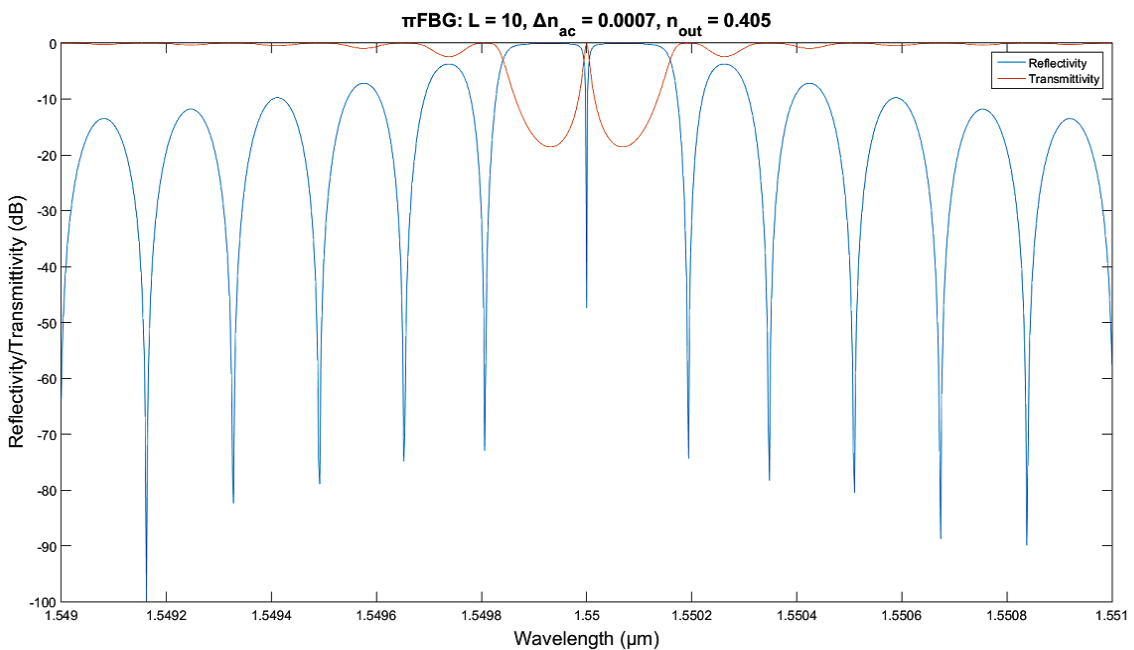
**Εικόνα 27.** Διάγραμμα σύγκρισης Gaussian vs tanh για  $\Delta n_{ac}=0.0003$ .



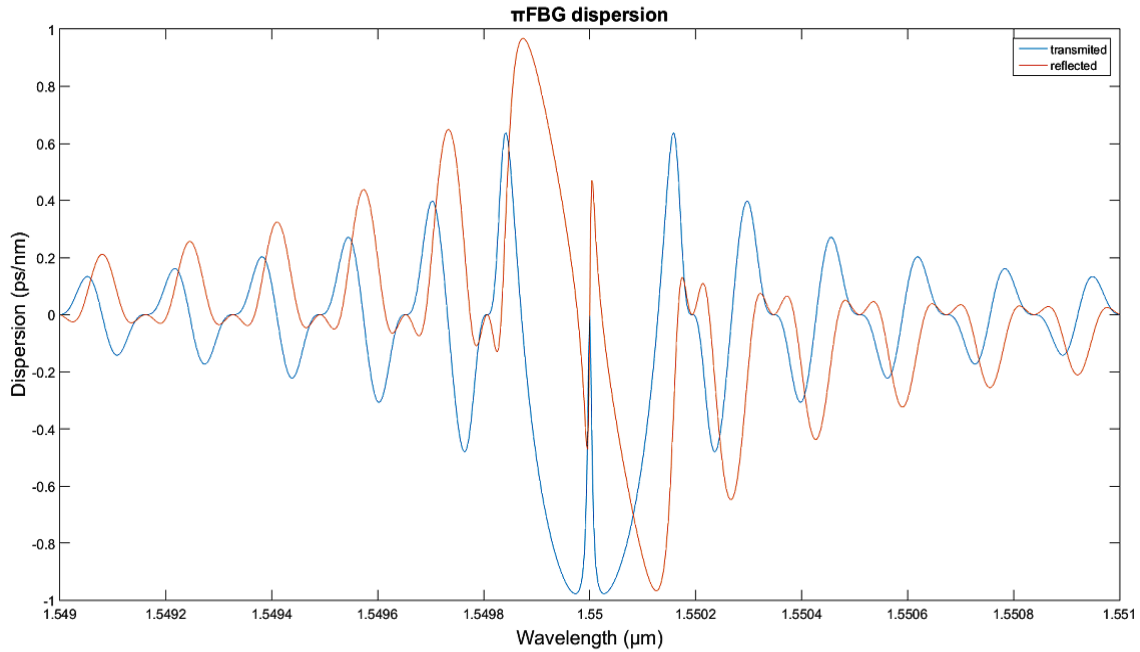
Εικόνα 28. Διάγραμμα σύγκρισης Gaussian vs tanh για  $\Delta n_{ac}=0.0004$ .

### 4.3.3 Ανάλυση Απόδοσης πFBG για Βέλτιστα $L$ και $\Delta n_{ac}$

Ακολούθως σχεδιάστηκαν και αναλύθηκαν πFBG με μήκος  $L=10\text{ mm}$ , με παράλληλη προσθήκη ενός εξωτερικού μανδύα στην οπτική ίνα με δείκτη διάθλασης  $n_{cloak}=0.405$ . Η μεταβολή διαμόρφωσης δείκτη διάθλασης τέθηκε, κατόπιν δοκιμών για υψηλή ΙΚΛ, σε  $\Delta n_{ac}=7 \cdot 10^{-4}$ .



Εικόνα 29. Διάγραμμα με βέλτιστα  $L$  &  $\Delta n_{ac}$  για πFBG



Εικόνα 30. Διάγραμμα διασποράς για πFBG

Πίνακας 6. Ανάλυση Απόδοσης πFBG για Βέλτιστα  $L$  και  $\Delta n_{ac}$

$L$ (mm)	$\Delta n_{ac}$	$r_{cloak}$	ΙΚΛ (dB)	Μέγιστη ΙΠΛ (dB)	Ελάχιστη ΙΠΛ (dB)	ΔΚΠΛ (dB)	SLSR (%)	Πλήθος πλευρ. λοβών	FWHM (μm)
10	7.00E-04	0.405	-0.0605	-3.7076	-13.4815	3.6472	27.50	10	3.16E-04

#### 4.3.4 Σύγκριση Απόδοσης FBG Ομοιόμορφου και Μετατοπισμένης φάσης πFBG

Για την αμεσότερη σύγκριση ενός ομοιόμορφου με ένα πFBG, επιλέχθηκε η χρήση κοινών χαρακτηριστικών τους, ήτοι  $L=20\text{ mm}$  και  $\Delta n_{ac}=4 \cdot 10^{-4}$ , με μόνη διαφορά τους ότι το πFBG είχε εξωτερικό μανδύα στην οπτική ίνα του με δείκτη διάθλασης  $r_{cloak}=0.405$ .

Πίνακας 7. Σύγκριση Απόδοσης FBG Ομοιόμορφου και Μετατοπισμένης φάσης πFBG

Τύπος FBG	ΙΚΛ (dB)	Μέγιστη ΙΠΛ (dB)	Ελάχιστη ΙΠΛ (dB)	ΔΚΠΛ (dB)	SLSR (%)	Πλήθος πλευρ. λοβών	FWHM (μm)
Ομοιόμορφο	-0.4668	-8.7388	-32.2377	<b>8.2720</b>	<b>27.11</b>	46	<b>6.80E-05</b>
πFBG	<b>-0.0259</b>	-3.0735	-19.1093	3.0476	16.08	<b>22</b>	1.66E-04

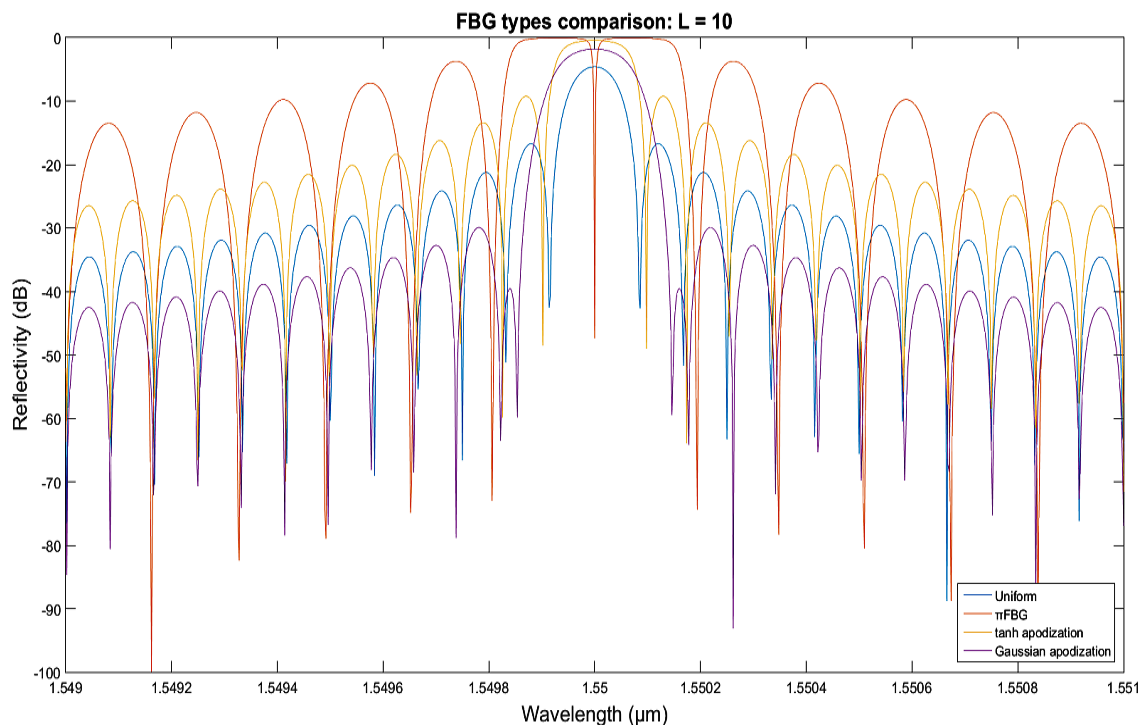
#### 4.3.5 Σύγκριση Απόδοσης των διάφορων τύπων FBG

Ολοκληρώνοντας τις συγκρίσεις των διαφόρων τύπων FBG, σχεδιάστηκε το ανάλογο διάγραμμα με τις ισχύεις της ανακλαστικότητάς τους (Εικόνα 31). Το  $L=10\text{ mm}$  για όλες τις

περιπτώσεις. Το  $\Delta n_{ac}$  ορίστηκε ίσο με  $3 \cdot 10^{-4}$  για το ομοιόμορφο και τα αποδιωμένα FBG, ενώ για το πFBG ίσο με  $7 \cdot 10^{-4}$  με ταυτόχρονη χρήση του  $r_{cloak}=0.405$ .

**Πίνακας 8.** Σύγκριση Απόδοσης FBG ομοιόμορφου με Αποδίωση και Μετατοπισμένης φάσης  $\pi$

Τύπος FBG	IKL (dB)	Μέγιστη ΙΠΛ (dB)	Ελάχιστη ΙΠΛ (dB)	ΔΚΠΛ (dB)	SLSR (%)	Πλήθος πλευρ. λοβών	FWHM ( $\mu\text{m}$ )
Ομοιόμορφο	-4.5782	-16.7280	-34.5245	12.1498	48.45	22	8.40E-05
πFBG	<b>-0.0605</b>	-3.7076	-13.4815	3.6472	27.50	<b>10</b>	3.16E-04
Αποδίωση Gaussian	-1.7950	-29.9330	-42.5105	<b>28.1380</b>	<b>70.41</b>	22	1.36E-04
Αποδίωση tanh	-0.4576	-9.2321	-26.4815	8.7746	34.86	22	1.40E-04

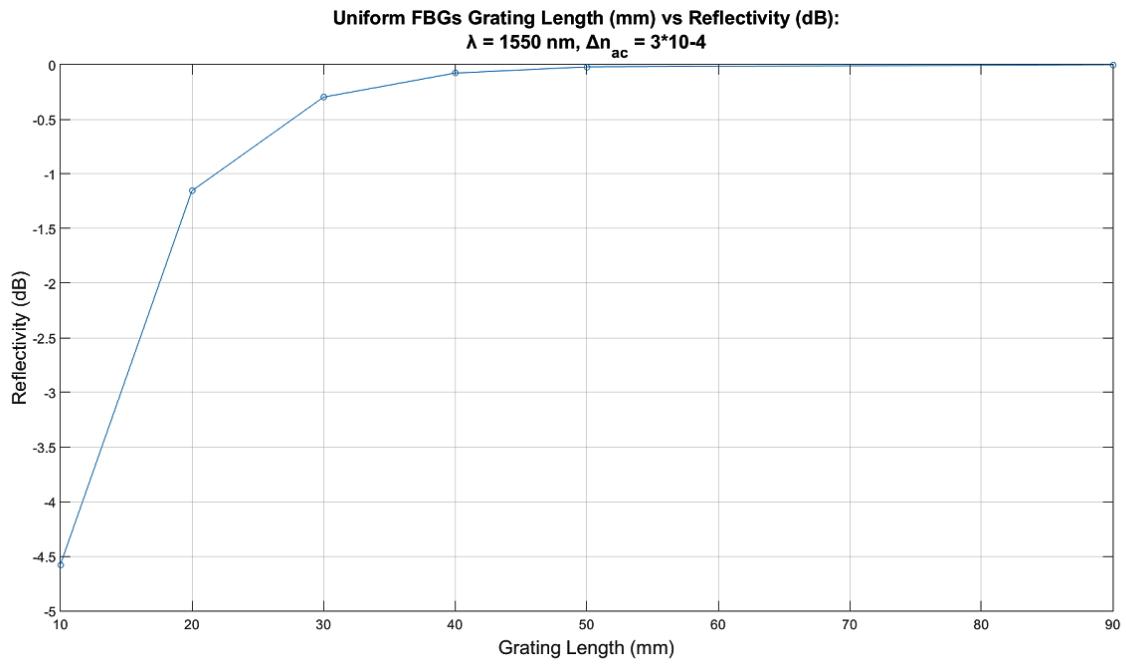


**Εικόνα 31.** Σύγκριση διάφορων τύπων FBG (Uniform, πFBG, Tanh apodization, Gaussian apodization)

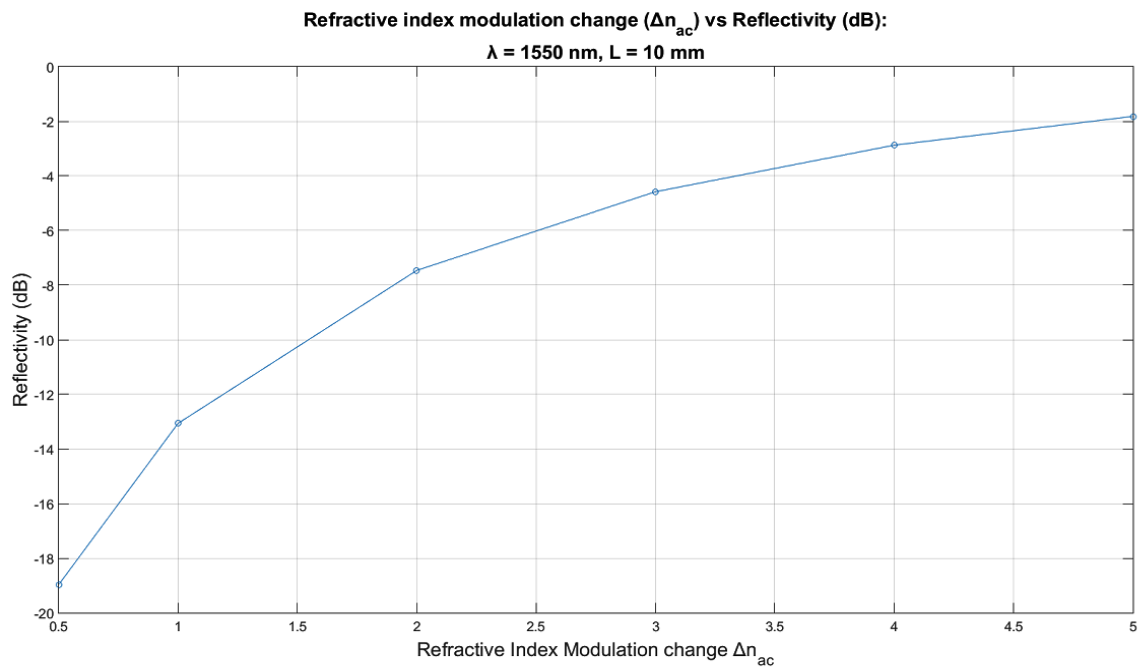
#### 4.3.6 Συσχέτιση Ανακλαστικότητας με Μήκος φράγματος και Μεταβολή διαμόρφωσης Δείκτη διάθλασης

Για την οπτικοποίηση της συσχέτισης της ανακλαστικότητας με το μήκος  $L$  και με τη μεταβολή διαμόρφωσης δείκτη διάθλασης  $\Delta n_{ac}$ , σχεδιάστηκαν και παρουσιάζονται τα αντίστοιχα διαγράμματα (Εικόνες 32-33), με χρήση του ομοιόμορφου FBG. Σε αυτά είναι φανερό πως με την αύξηση του  $L$  και του  $\Delta n_{ac}$  αυξάνεται και η ισχύς της ανακλαστικότητας για το κεντρικό μήκος κύματος  $\lambda_B$ .





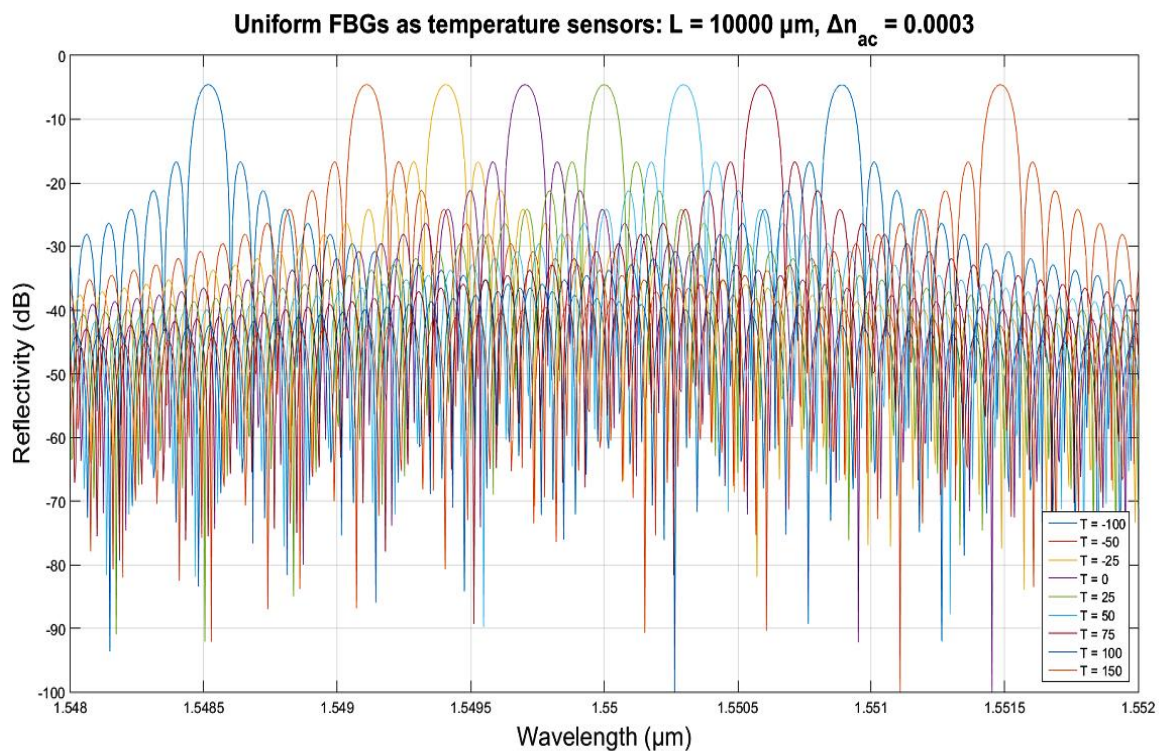
**Εικόνα 32.** Uniform FBGs μήκος πλέγματος vs ανακλαστικότητα



**Εικόνα 33.** Μεταβολή διαμόρφωσης δείκτη διάθλασης ( $\Delta n_{ac}$ ) vs ανακλαστικότητα

#### 4.3.7 Επίδραση της Μεταβολής Θερμοκρασίας στο Ομοιόμορφο FBG – Αισθητήρας Θερμοκρασίας

Τέλος, πραγματοποιήθηκε ανάλυση για την εύρεση της επίδρασης της μεταβολής της θερμοκρασίας στο ομοιόμορφο FBG. Το αποτέλεσμα για το φάσμα της ανακλαστικότητας δείχνεται στην Εικόνα 34, και στην Εικόνα 35 δίνεται η συσχέτιση της θερμοκρασίας με το μήκος κύματος της μέγιστης ανακλαστικότητας.



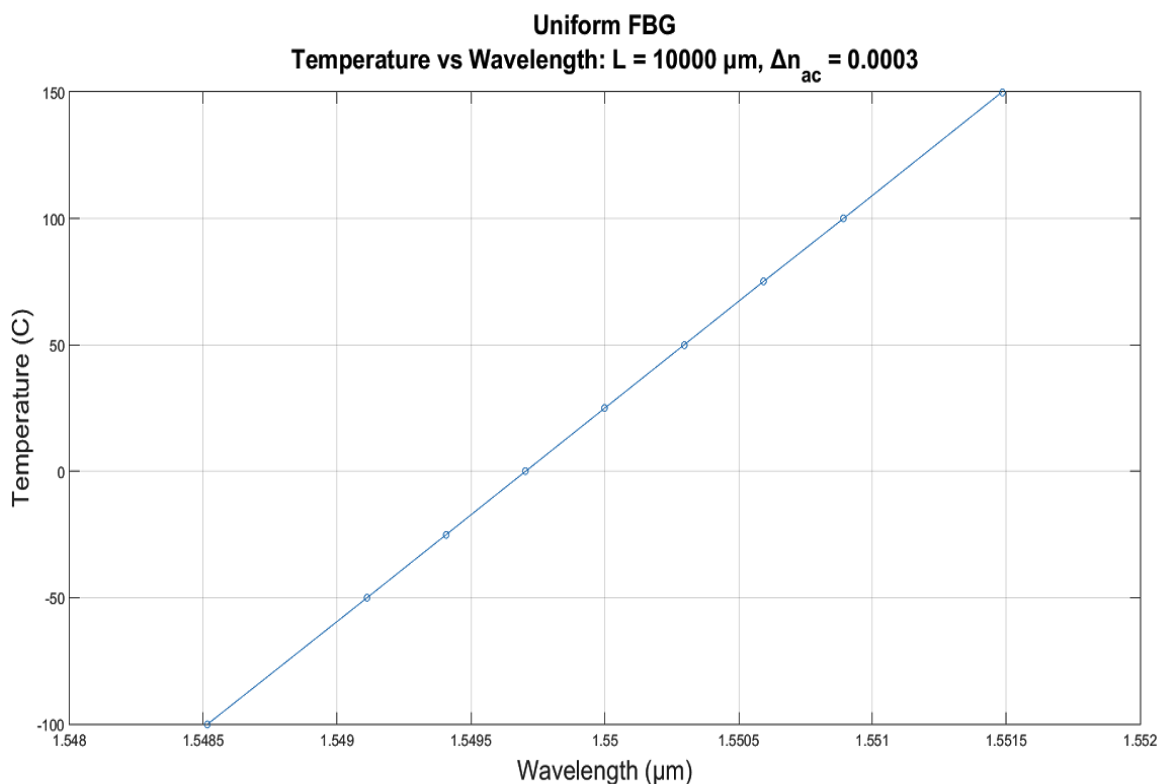
**Εικόνα 34.** Συστοιχία ομοιόμορφων αισθητήρων FBG σε διαφορετικές θερμοκρασίες (°C) που κυμαίνονται από -100 έως 150 °C και με σταθερό  $L = 10000 \mu\text{m}$  και  $\Delta n_{ac} = 3 \cdot 10^{-4}$ .

Στην Εικόνα 34 παρουσιάζεται το φάσμα ανάκλασης ενός ομοιόμορφου FBG, για  $L=10000\mu\text{m}$ ,  $\Delta n_{ac}=3 \cdot 10^{-4}$  και  $T=25^\circ\text{C}$  (θερμοκρασία δωματίου) όπου είναι η θερμοκρασία αναφοράς. Στο λογισμικό OptiGrating έχουμε την δυνατότητα, πατώντας το κουμπί Mode Parameters και πηγαίνοντας στην επιλογή Temperature Sensor, να αλλάξουμε την θερμοκρασία από  $0^\circ\text{C}$ ,  $25^\circ\text{C}$ ,  $50^\circ\text{C}$ ,  $75^\circ\text{C}$ ,  $100^\circ\text{C}$ , σε  $150^\circ\text{C}$  καθώς και να βάλουμε τις αντίστοιχες αρνητικές θερμοκρασίες από  $0^\circ\text{C}$  μέχρι  $-100^\circ\text{C}$  βαθμούς. Με αυτόν τον τρόπο μπορούμε να παρατηρήσουμε τις μετατοπίσεις του μήκους κύματος που προκαλούνται από αυτές τις αλλαγές θερμοκρασίας (στον Πίνακα 9 συνοψίζονται τα εν λόγω αποτελέσματα).

**Πίνακας 9.** Σχέση μεταξύ θερμοκρασίας (°C) & κέντρου Μήκος κύματος  $\lambda$  (nm) για ομοιόμορφο FBG σε σταθερό  $L = 10 \text{ mm}$  και  $\Delta n_{ac} = 3 \cdot 10^{-4}$ .

Temperature (°C)	Center Wavelength (nm)
-100	1548.516
-50	1549.112
-25	1549.408
0	1549.704
<b>25 (Reference)</b>	1550
50	1550.296
75	1550.592
100	1550.892
150	1551.484

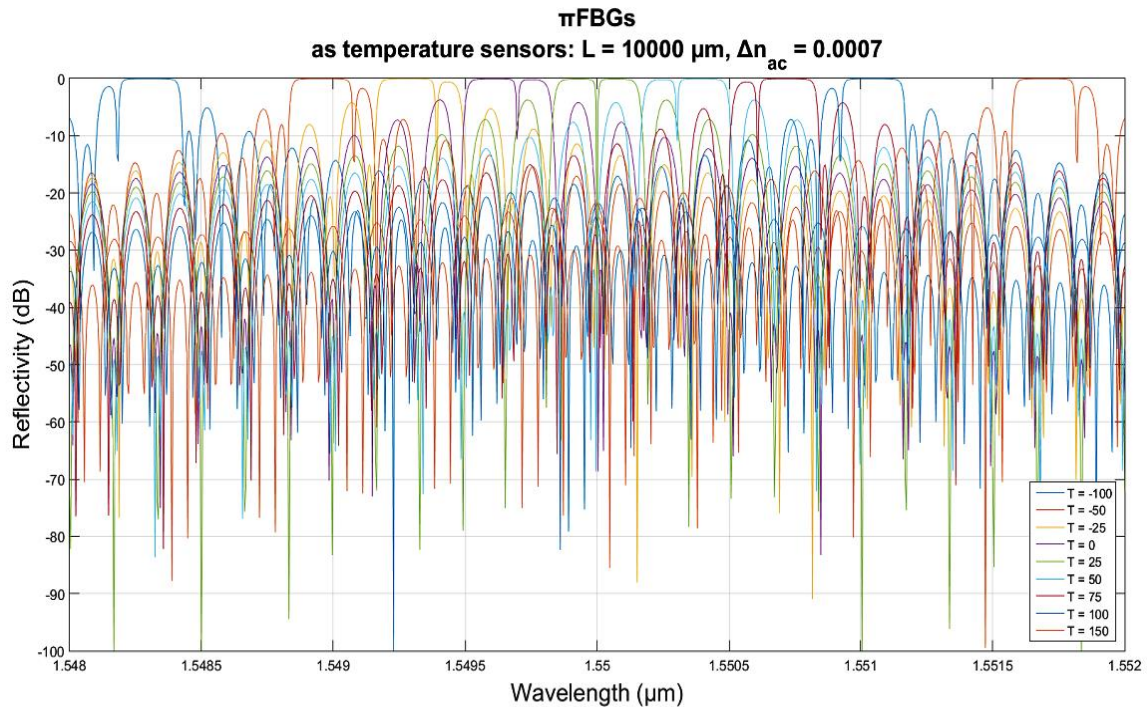
Στην Εικόνα 35 βλέπουμε τη σχέση μεταξύ της θερμοκρασίας και το μήκος κύματος για ομοιόμορφο FBG με σταθερό  $L=10000\mu\text{m}$  και  $\Delta n_{ac} = 3 \cdot 10^{-4}$ . Παρατηρούμε ότι όσο αυξάνεται η θερμοκρασία, αυξάνεται και το μήκος κύματος. Αυτό φαίνεται ξεκάθαρα και από τον πίνακα 9 και οδηγούμαστε στο συμπέρασμα ότι υπάρχει γραμμική σχέση ανάμεσα στο μήκος κύματος και στην θερμοκρασία.



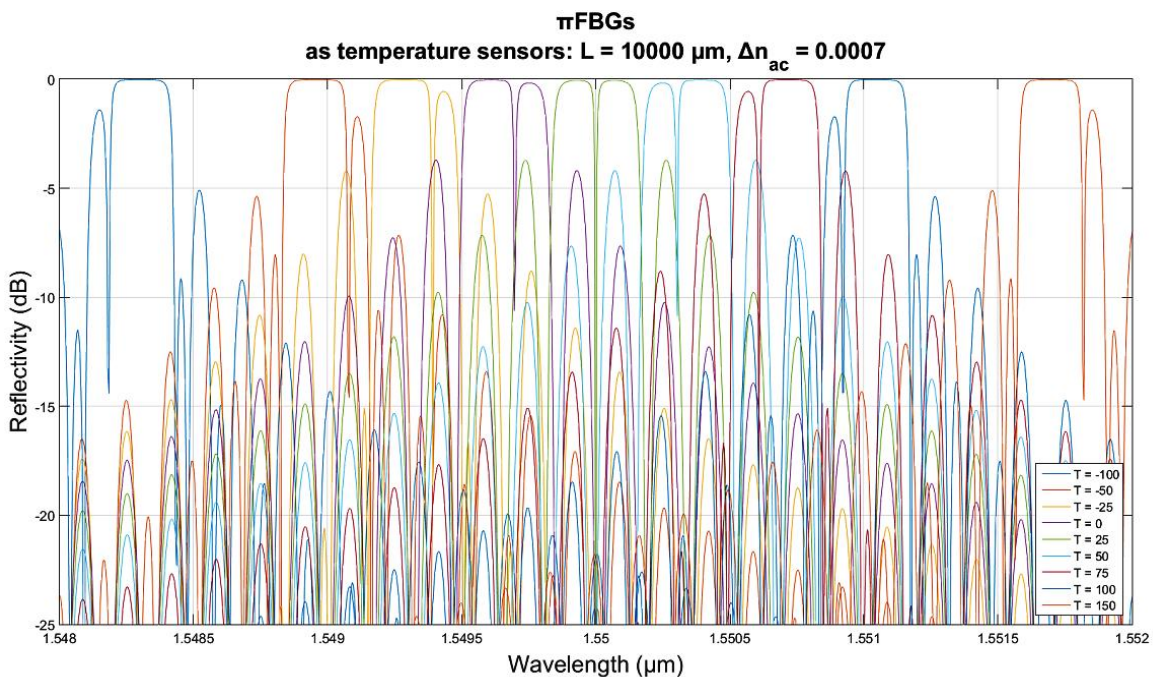
**Εικόνα 35.** Σχέση μεταξύ θερμοκρασίας (°C) & Μήκος κύματος ( $\mu\text{m}$ ) για ομοιόμορφο FBG σε σταθερό  $L = 10000 \mu\text{m}$  και  $\Delta n_{ac} = 3 \cdot 10^{-4}$ .

### 4.3.8 Επίδραση της Μεταβολής Θερμοκρασίας στο πFBG

Στη συγκεκριμένη ενότητα πραγματοποιήθηκε ανάλυση για την εύρεση της επίδρασης της μεταβολής της θερμοκρασίας στο πFBG. Το αποτέλεσμα για το φάσμα της ανακλαστικότητας δείχνεται στις Εικόνες 36-37 και στην Εικόνα 38 δίνεται η συσχέτιση της θερμοκρασίας με το μήκος κύματος της μέγιστης ανακλαστικότητας.



**Εικόνα 36.** Συστοιχία αισθητήρων πFBG σε διαφορετικές θερμοκρασίες (°C) που κυμαίνονται από -100 έως 150 °C και με σταθερό  $L = 10000 \mu\text{m}$  και  $\Delta n_{ac} = 7 \cdot 10^{-4}$ .



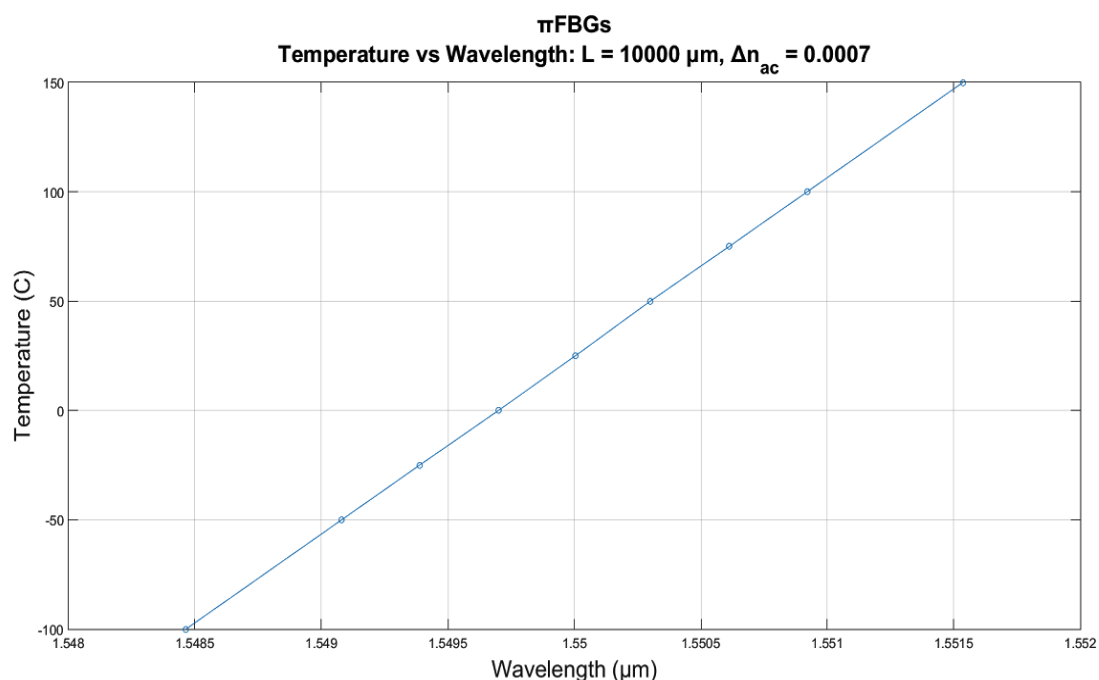
**Εικόνα 37.** Μεγέθυνση εικόνας 36

Στην Εικόνα 36 παρουσιάζεται το φάσμα ανάκλασης ενός πFBG, για  $L=10000 \mu\text{m}$ ,  $\Delta n_{ac}=7*10^{-4}$  και  $T= 25^{\circ}\text{C}$  (θερμοκρασία δωματίου) όπου είναι η θερμοκρασία αναφοράς. Στο λογισμικό OptiGrating έχουμε την δυνατότητα, πατώντας το κουμπί Mode Parameters και πηγαίνοντας στην επιλογή Temperature Sensor, να αλλάξουμε την θερμοκρασία από  $0^{\circ}\text{C}$ ,  $25^{\circ}\text{C}$ ,  $50^{\circ}\text{C}$ ,  $100^{\circ}\text{C}$ , σε  $150^{\circ}\text{C}$  καθώς και να βάλουμε τις αντίστοιχες αρνητικές θερμοκρασίες από  $0^{\circ}\text{C}$  μέχρι  $-100^{\circ}\text{C}$  βαθμούς. Με αυτόν τον τρόπο μπορούμε να παρατηρήσουμε τις μετατοπίσεις του μήκους κύματος που προκαλούνται από αυτές τις αλλαγές θερμοκρασίας (στον πίνακα 10 συνοψίζονται τα εν λόγω αποτελέσματα).

**Πίνακας 10.** Σχέση μεταξύ θερμοκρασίας ( $^{\circ}\text{C}$ ) & Κεντρικού Μήκους κύματος  $\lambda$  (nm) για πFBG σε σταθερό  $L = 10000 \mu\text{m}$  και  $\Delta n_{ac}=7*10^{-4}$ .

Temperature ( $^{\circ}\text{C}$ )	Center Wavelength (nm)
-100	1548.464
-50	1549.080
-25	1549.388
0	1549.700
<b>25 (Reference)</b>	<b>1550</b>
50	1550.300
75	1550.612
100	1550.920
150	1551.536

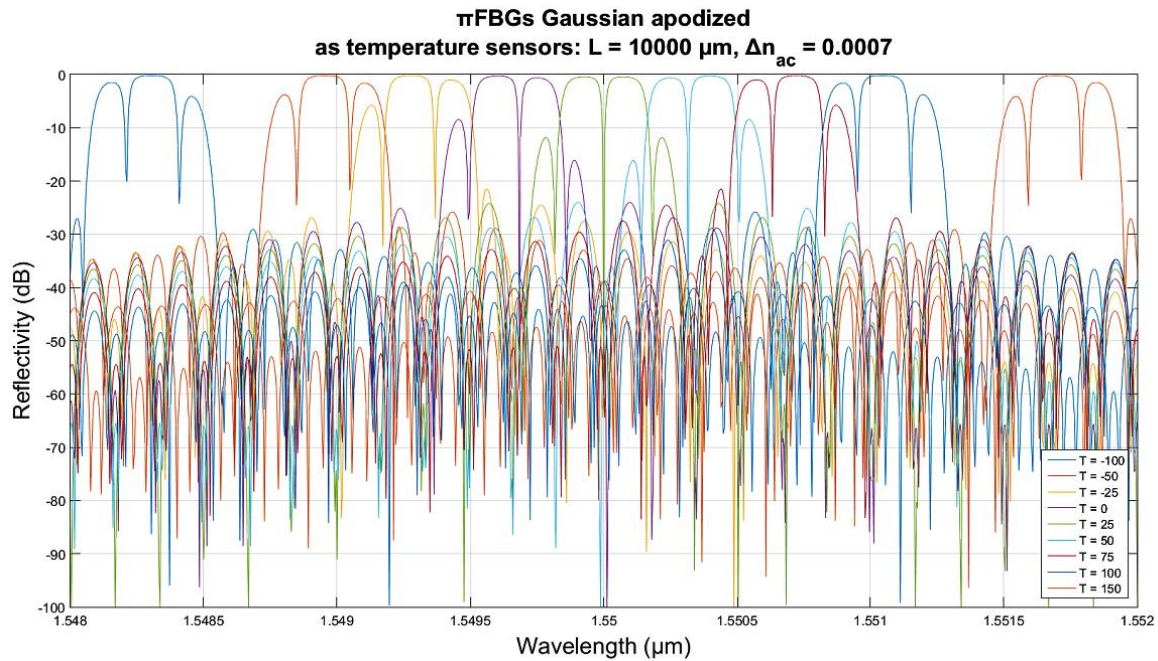
Στην Εικόνα 38 παρατηρούμε ότι όσο αυξάνεται η θερμοκρασία, αυξάνεται και το μήκος κύματος. Αυτό φαίνεται ξεκάθαρα και από τον πίνακα 10 και οδηγούμαστε στο συμπέρασμα ότι υπάρχει γραμμική σχέση ανάμεσα στο μήκος κύματος και στην θερμοκρασία.



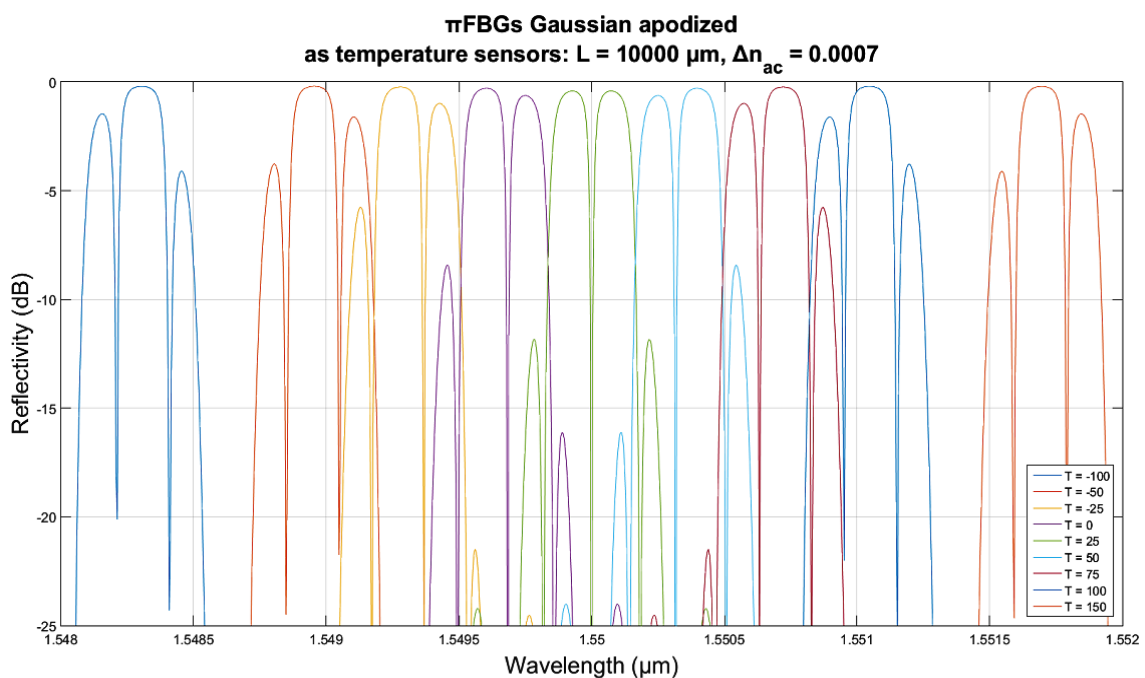
**Εικόνα 38.** Σχέση μεταξύ θερμοκρασίας ( $^{\circ}\text{C}$ ) & Μήκους κύματος ( $\mu\text{m}$ ) για πFBG.

### 4.3.9 Επίδραση της Μεταβολής Θερμοκρασίας στο πFBG Gaussian

Στη συγκεκριμένη ενότητα, πραγματοποιήθηκε ανάλυση για την εύρεση της επίδρασης της μεταβολής της θερμοκρασίας στο πFBG Gaussian apodized. Το αποτέλεσμα για το φάσμα της ανακλαστικότητας δείχνεται στις Εικόνες 39-40, και στην Εικόνα 41 δίνεται η συσχέτιση της θερμοκρασίας με το μήκος κύματος της μέγιστης ανακλαστικότητας.



**Εικόνα 39.** Συστοιχία αισθητήρων πFBG Gaussian σε διαφορετικές θερμοκρασίες (°C) που κυμαίνονται από -100 έως 150 °C και με σταθερό  $L = 10000 \mu\text{m}$  και  $\Delta n_{ac} = 7 \cdot 10^{-4}$ .



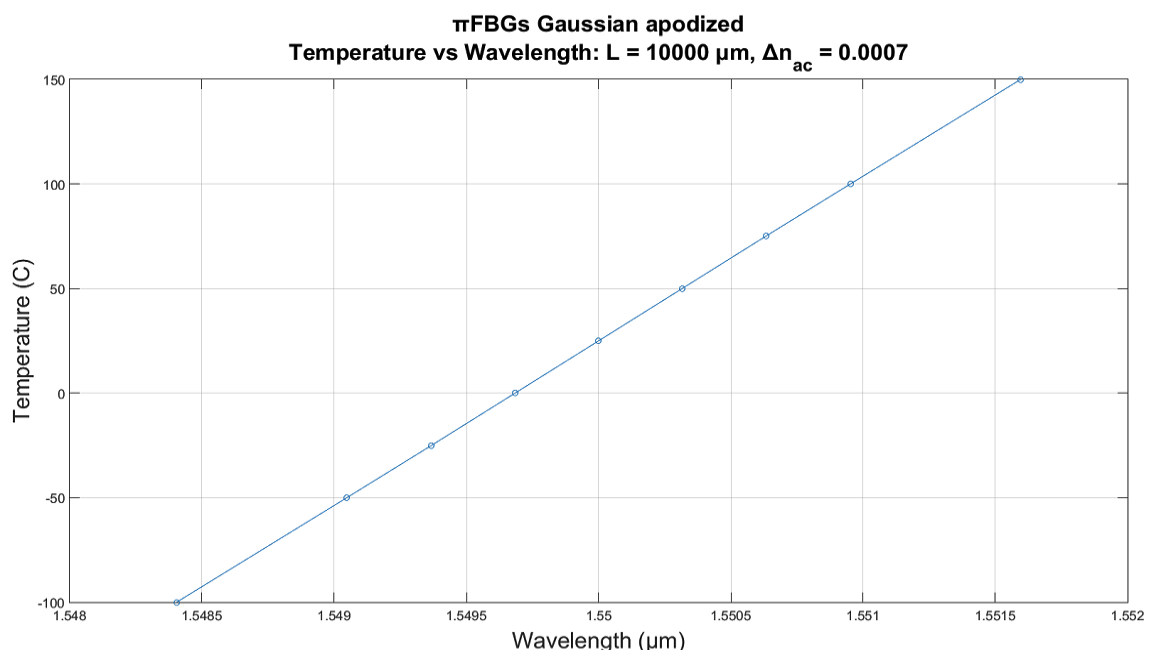
**Εικόνα 40.** Μεγέθυνση εικόνας 39

Στην Εικόνα 39 παρουσιάζεται το φάσμα ανάκλασης ενός πFBG Gaussian apodized, για  $L=10000\mu\text{m}$ ,  $\Delta n_{ac}=7*10^{-4}$  και  $T=25^{\circ}\text{C}$  (θερμοκρασία δωματίου) όπου είναι η θερμοκρασία αναφοράς. Στο λογισμικό OptiGrating έχουμε την δυνατότητα, πατώντας το κουμπί Mode Parameters και πηγαίνοντας στην επιλογή Temperature Sensor, να αλλάξουμε την θερμοκρασία από  $0^{\circ}\text{C}$ ,  $25^{\circ}\text{C}$ ,  $50^{\circ}\text{C}$ ,  $100^{\circ}\text{C}$ , σε  $150^{\circ}\text{C}$  καθώς και να βάλουμε τις αντίστοιχες αρνητικές θερμοκρασίες από  $0^{\circ}\text{C}$  μέχρι  $-100^{\circ}\text{C}$  βαθμούς. Με αυτόν τον τρόπο μπορούμε να παρατηρήσουμε τις μετατοπίσεις του μήκους κύματος που προκαλούνται από αυτές τις αλλαγές θερμοκρασίας (στον πίνακα 11 συνοψίζονται τα εν λόγω αποτελέσματα)

**Πίνακας 11.** Σχέση μεταξύ θερμοκρασίας ( $^{\circ}\text{C}$ ) & Κεντρικού Μήκους κύματος  $\lambda$  (nm) για πFBG Gaussian σε σταθερό  $L=10000\mu\text{m}$  και  $\Delta n_{ac}=7*10^{-4}$ .

Temperature ( $^{\circ}\text{C}$ )	Center Wavelength (nm)
-100	1548.404
-50	1549.048
-25	1549.368
0	1549.684
<b>25 (Reference)</b>	1550
50	1550.316
75	1550.632
100	1550.952
150	1551.596

Παρατηρούμε στην Εικόνα 41 ότι όσο αυξάνεται η θερμοκρασία, αυξάνεται και το μήκος κύματος και οδηγούμαστε στο συμπέρασμα ότι υπάρχει γραμμική σχέση ανάμεσα στο μήκος κύματος και στην θερμοκρασία.

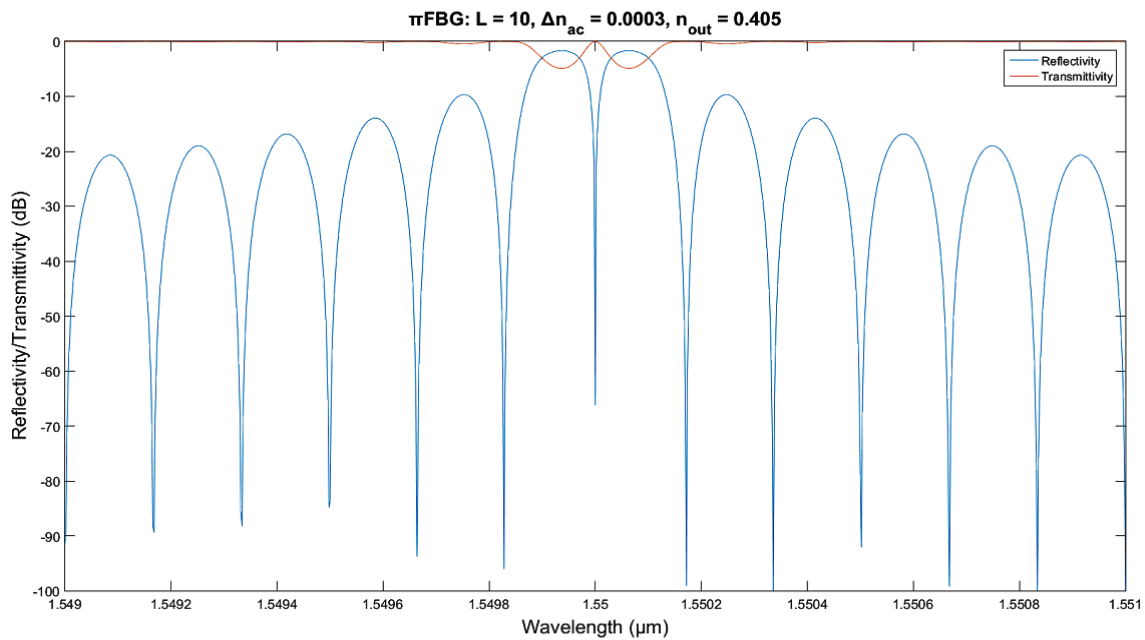


**Εικόνα 41.** Σχέση μεταξύ θερμοκρασίας ( $^{\circ}\text{C}$ ) & Μήκους κύματος ( $\mu\text{m}$ ) για πFBG Gaussian apodized

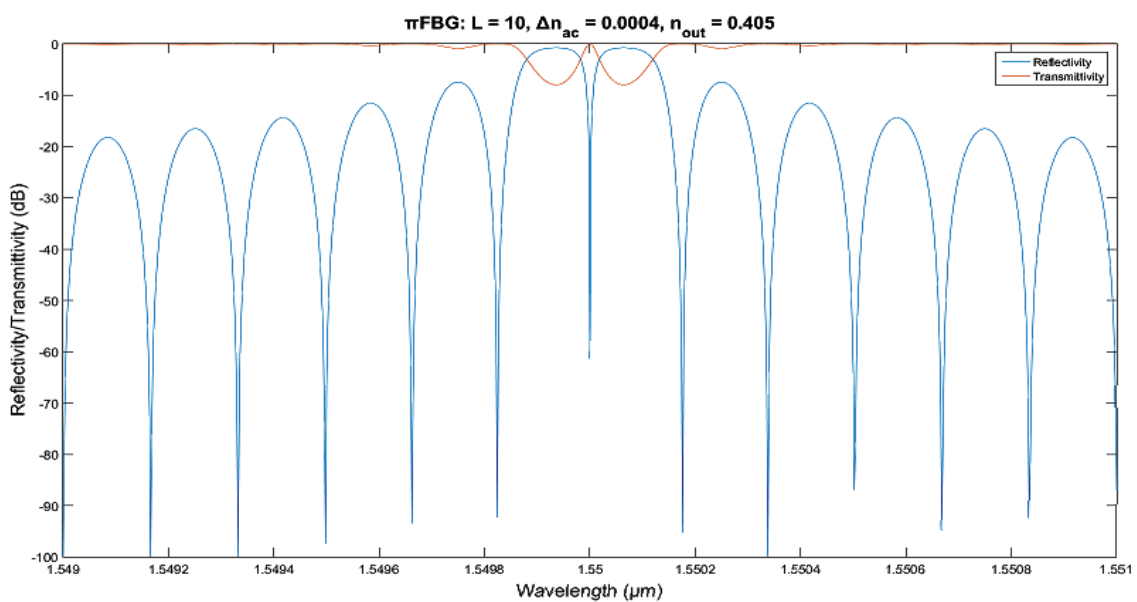
## 4.4 Αναλύσεις και Συγκρίσεις

### 4.4.1 Ανάλυση απόδοσης πFBG

Ακολουθώς σχεδιάστηκαν και αναλύθηκαν πFBG με μήκος  $L=10\text{ mm}$ , με παράλληλη προσθήκη ενός εξωτερικού μανδύα στην οπτική ίνα με δείκτη διάθλασης  $n_{\text{clad}}=0.405$ . Η μεταβολή διαμόρφωσης δείκτη διάθλασης τέθηκε αρχικά στις ίδιες τιμές με τις προαναφερθείσες περιπτώσεις, δηλαδή  $\Delta n_{\text{ac}}=3 \cdot 10^{-4}$  και  $\Delta n_{\text{ac}}=4 \cdot 10^{-4}$  (Εικόνες 42-43).



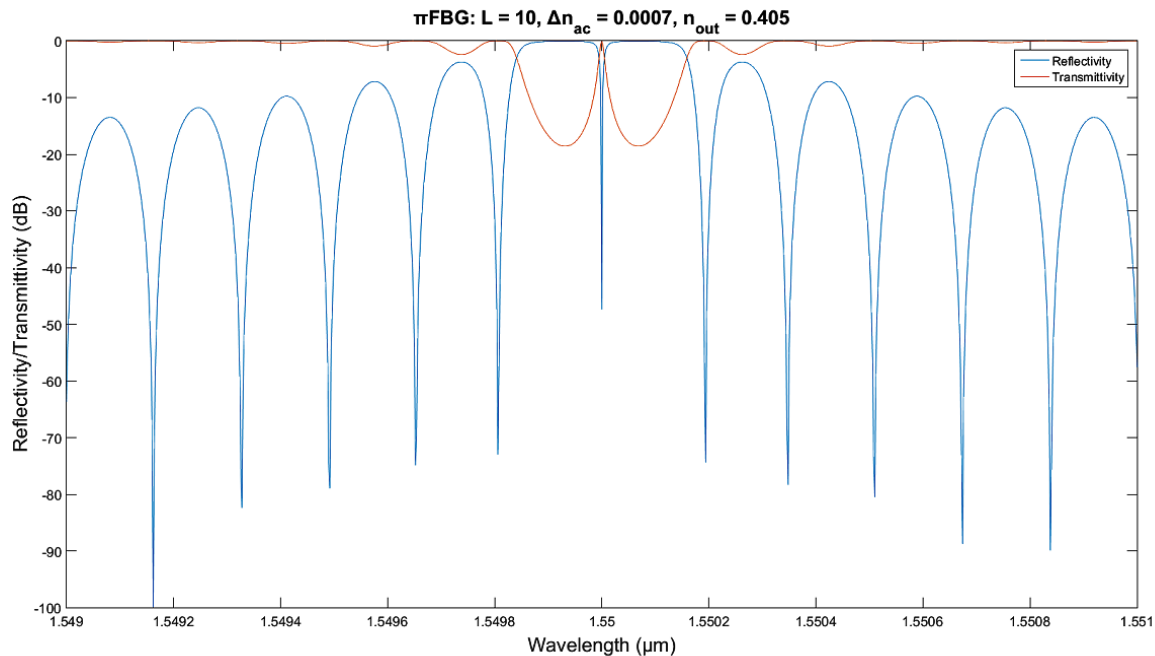
Εικόνα 42. Για πFBG με  $L=10\text{mm}$  &  $\Delta n_{\text{ac}}=3 \cdot 10^{-4}$



Εικόνα 43. Για πFBG με  $L=10\text{mm}$  &  $\Delta n_{\text{ac}}=4 \cdot 10^{-4}$



Επιπρόσθετα επιχειρήθηκε η εύρεση τιμής μεταβολής δείκτη διάθλασης η οποία δίνει τη μέγιστη ανακλαστικότητα στον διαιρεμένο κύριο λοβό ή, ταυτόχρονα, την ελάχιστη μεταδοτικότητα στα δύο μέρη του κύριου λοβού, ώστε η ανίχνευση των θερμοκρασιακών αλλαγών να είναι ευκολότερη (βλ. Κεφάλαιο 4.3.3). Μετά από πλήθος δοκιμών, βρέθηκε πως η κατάλληλη τιμή είναι  $\Delta n_{ac}=7*10^{-4}$  (Εικόνα 44).

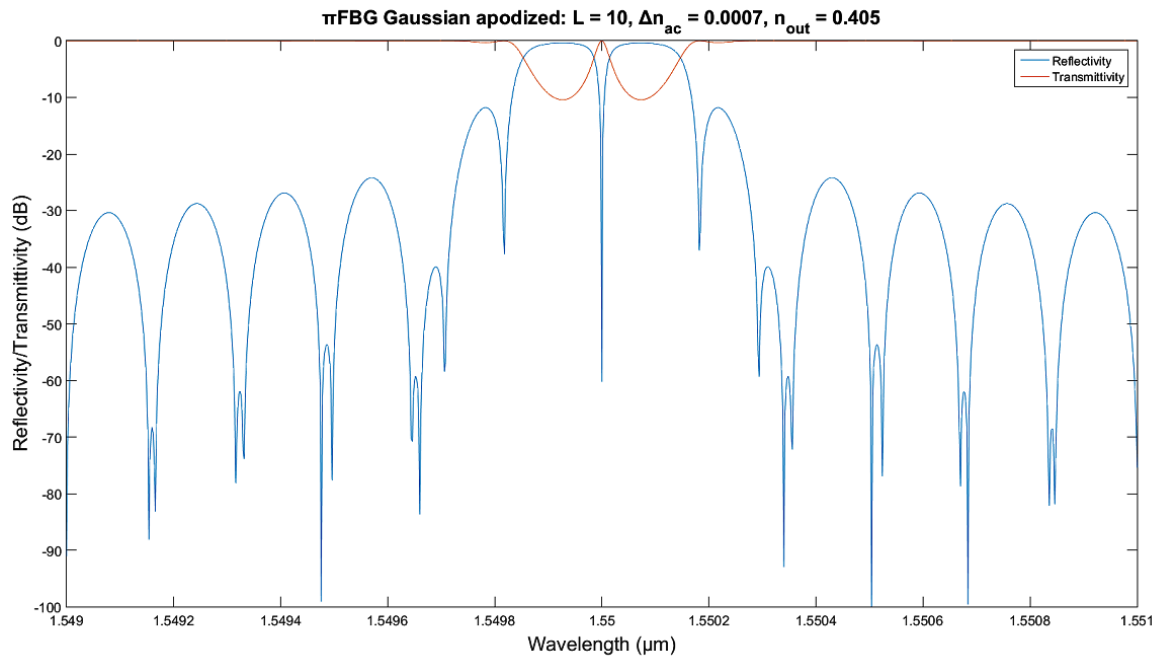


Εικόνα 44. Για πFBG με  $L=10\text{mm}$  &  $\Delta n_{ac}=7*10^{-4}$

Τα αριθμητικά αποτελέσματα των πFBG που μελετήθηκαν παρουσιάζονται στον Πίνακα 8, όπου παρατηρείται ότι υπάρχει αφενός επιθυμητή αύξηση της ανακλαστικότητας και μείωση πλήθους πλευρικών λοβών, αφετέρου όμως εμφανίζεται ανεπιθύμητη μείωση SLSR, ΔΚΠΛ και αύξηση του FWHM.

#### 4.4.2 Ανάλυση απόδοσης πFBG Gaussian apodized

Από τα δεδομένα και τα συμπεράσματα που εξήχθησαν για τις παραπάνω διαφορετικές περιπτώσεις FBG, χρησιμοποιώντας τα πλεονεκτήματά τους και προσπαθώντας να ελαχιστοποιηθεί η επίδραση των μειονεκτημάτων τους, μελετήθηκε η περίπτωση ενός πFBG Gaussian apodized, μήκους  $L=10000\ \mu\text{m}$ , μεταβολής διαμόρφωσης δείκτη διάθλασης  $\Delta n_{ac}=7*10^{-4}$  και δείκτη διάθλασης εξωτερικού μανδύα  $n_{cloak}=0.405$ . (Εικόνα 45)

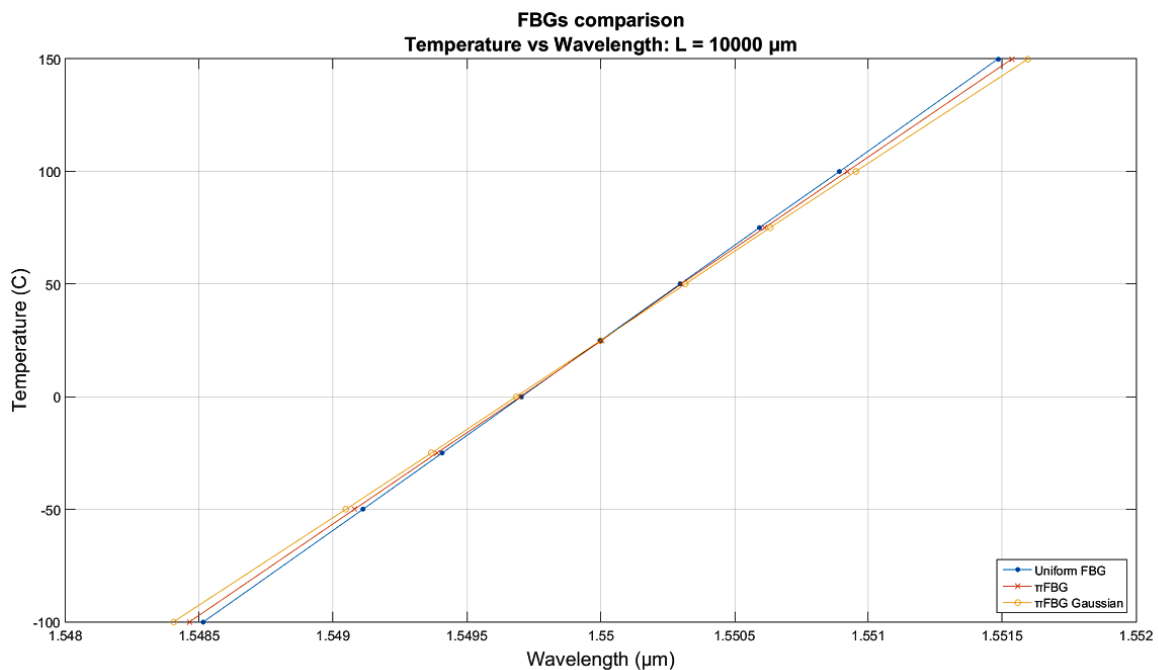


**Εικόνα 45.** Για πFBG Gaussian apodized με  $L=10\text{mm}$  &  $\Delta n_{ac}=7*10^{-4}$

Σε αυτή την πειραματική περίπτωση γίνεται δυνατό να υφίστανται ταυτόχρονα τα επιθυμητά μεγέθη των αυξημένων ΙΚΛ, ΔΚΠΛ και SLSR, και των μειωμένων FWHM και πλήθους πλευρικών λοβών.

#### 4.4.3 Επίδραση μεταβολής θερμοκρασίας στο ομοιόμορφο FBG, στο πFBG και στο πFBG Gaussian apodized

Τέλος, πραγματοποιήθηκε ανάλυση για την εύρεση της επίδρασης της μεταβολής της θερμοκρασίας στο ομοιόμορφο FBG, στο πFBG και στο πFBG Gaussian apodized. Το μήκος σε όλα ήταν  $L=10\text{ mm}$ , η μεταβολή διαμόρφωσης δείκτη διάθλασης για το ομοιόμορφο  $\Delta n_{ac}=4*10^{-4}$  και για τα πFBG  $\Delta n_{ac}=7*10^{-4}$ , ενώ ο δείκτης διάθλασης εξωτερικού μανδύα των πFBG  $n_{cloak}=0.405$ . Ως θερμοκρασία αναφοράς ορίστηκε αυτή των  $25^{\circ}\text{C}$  και ελήφθησαν μετρήσεις για  $-100^{\circ}\text{C}$ ,  $-50^{\circ}\text{C}$ ,  $-25^{\circ}\text{C}$ ,  $0^{\circ}\text{C}$ ,  $25^{\circ}\text{C}$ ,  $50^{\circ}\text{C}$ ,  $75^{\circ}\text{C}$ ,  $100^{\circ}\text{C}$  και  $150^{\circ}\text{C}$  (ή εναλλακτικά για  $25^{\circ}\text{C}$ ,  $25^{\circ}\text{C}\pm 25^{\circ}\text{C}$ ,  $25^{\circ}\text{C}\pm 50^{\circ}\text{C}$ ,  $25^{\circ}\text{C}\pm 75^{\circ}\text{C}$  και  $25^{\circ}\text{C}\pm 125^{\circ}\text{C}$ ). Τα αποτελέσματα για το φάσμα της ανακλαστικότητας καθενός, δείχνονται στις Εικόνες (34, 36 & 39). Είναι φανερό πως για το ομοιόμορφο FBG κάθε αλλαγή θερμοκρασίας δεν επιφέρει αλλαγή στην ομαλότητα της καμπύλης της ανακλαστικότητας, σε αντίθεση με τα πFBG. Η συσχέτιση της θερμοκρασίας με το μήκος κύματος στο οποίο αυτή ανιχνεύεται για κάθε περίπτωση FBG δίνεται στο κοινό διάγραμμα της Εικόνας 46.



**Εικόνα 46.** Συσχέτιση της θερμοκρασίας με το μήκος κύματος για κάθε περίπτωση FBG

Προκύπτει ότι η συσχέτιση είναι γραμμική για όλες, όμως η διαφορά του μήκους κύματος για τις μεταβαλλόμενες θερμοκρασίες είναι μικρότερη για το ομοιόμορφο FBG και μεγαλύτερη για το πFBG με Γκαουσιανή αποδίωξη.

## Συμπεράσματα

Στην παρούσα εργασία αναλύθηκε η απόδοση του ομοιόμορφου FBG, του πFBG μετατοπισμένης φάσης κατά  $\pi$  ( $\pi$ -φάσης) καθώς και διάφορα προφίλ apodized FBGs και συγκρίθηκε υπό τον έλεγχο της αλλαγής του μήκους πλέγματος ( $L$ ), αλλά και του δείκτη διάθλασης  $\Delta n_{ac}$  (δείκτης διάθλασης πλάτους διαμόρφωσης) με στόχο τον βέλτιστο τύπο FBG που μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως αισθητήρας θερμοκρασίας με βάση την απόδοσή του. Με βάση την ανάλυση που κάναμε και την εξαγωγή των αποτελεσμάτων, παρατηρούμε, σύμφωνα με τους **Πίνακες (2 έως 8)**, ότι αυξάνοντας το μήκος πλέγματος ( $L$ ) για κάθε τύπο FBG, οδηγούμαστε σε υψηλότερη μέγιστη ανακλαστικότητα καθώς και σε στενότερο εύρος ζώνης (FWHM), το οποίο είναι επιθυμητό. Ωστόσο, αυξάνοντας το μήκος πλέγματος ( $L$ ), αυξάνεται ο αριθμός των πλευρικών λοβών, η ισχύς των πλευρικών λοβών καθώς και η τιμή του SLSR που δεν είναι επιθυμητό. Από την άλλη πλευρά, καθώς αυξάνουμε το  $\Delta n_{ac}$  (δείκτης διάθλασης πλάτους διαμόρφωσης) παρατηρούμε ότι οδηγούμαστε σε υψηλότερη ανακλαστικότητα κορυφής με διατήρηση του αριθμού των

πλευρικών λοβών, πράγμα που είναι επιθυμητό, ενώ αυξάνεται η ισχύς των πλευρικών λοβών, του SLSR καθώς και το εύρος ζώνης που δεν είναι επιθυμητό.

Από την σύγκριση των διαφόρων τύπων FBGs ως στοιχεία αισθητήρα θερμοκρασίας παρατηρούμε ότι, διατηρώντας σταθερό  $L=10000\mu m$  και  $\Delta n_{sc}=3*10^{-4}$ , η πFBG παρουσίασε εξαιρετική απόδοση σε σύγκριση με την ομοιόμορφη FBG με υψηλότερη ανακλαστικότητα, λιγότερους πλευρικούς λοβούς και μικρότερο εύρος ζώνης FWHM που είναι επιθυμητό. Δεδομένου ότι ο καλός και αποτελεσματικός αισθητήρας θερμοκρασίας απαιτεί υψηλή ανακλαστικότητα, χαμηλά side lobes και στενό εύρος ζώνης FWHM (συνήθως 0,4  $\mu m$  wide) ώστε να επιτευχθεί υψηλή ευαισθησία, θα μπορούσαμε να πούμε ότι στην περίπτωση του πFBG Gaussian apodized (βλ. Εικόνα 45) γίνεται δυνατό να υφίστανται ταυτόχρονα όλα τα επιθυμητά μεγέθη των αυξημένων ΙΚΛ, ΔΚΠΛ και SLSR, και των μειωμένων FWHM και πλήθους πλευρικών λοβών.

## Βιβλιογραφία

- [1] Yin, S., Ruffin, P.B., & Yu, F.T.S. (Eds.). (2008). *Fiber Optic Sensors* (2nd ed.). CRC Press. <https://doi.org/10.1201/9781420053661>
- [2] Hecht, J. (2015). *Understanding fiber optics*. Jeff Hecht.
- [3] Αλεξανδρή, Α. (2010). *Επικοινωνιακά συστήματα με οπτικές ίνες*. Εκδόσεις Τζιόλα.
- [4] Udd, E., & Spillman Jr, W. B. (Eds.). (2011). *Fiber optic sensors: an introduction for engineers and scientists*. John Wiley & Sons.
- [5] Castellon-Urbe, J. (2012). *Optical fiber sensors: an overview* (pp. 1-26). London, UK: IntechOpen. <https://doi.org/10.5772/28529>
- [6] Anastassiou, H. T. (n.d.). *TB2: Δίκτυα οπτικών τηλεπικοινωνιών*. [Unpublished presentation]. Department of Informatics and Communications, International Hellenic University.
- [7] Αλεξόπουλος, Χ. (2013). *Παθητικά οπτικά δίκτυα τύπου wdm με εκτεταμένη προσιτότητα* (Master's thesis, University of Peloponnese). <http://amitos.library.uop.gr/xmlui/handle/123456789/2029>
- [8] Καρυπίδης, Π. Α. (2018). *Παθητικά Οπτικά Δίκτυα – Συγκριτική Ανάλυση και Μελλοντικές Τάσεις* (Doctor aldis sertation, Aristotle University of Thessaloniki). <https://doi.org/10.26262/heal.auth.ir.297261>
- [9] Udd, E., & Spillman Jr, W. B. (Eds.). (2011). *Fiber optic sensors: an introduction for engineers and scientists*. John Wiley & Sons.
- [10] Zlatanov, N. (2017). *Introduction to Fiber Optics Theory*. Research Gate. <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.29183.20641>
- [11] Ουζούνου, Ν. (1999). *Τηλεπικοινωνίες οπτικών ινών*. Εκδόσεις Συμμεών.
- [12] Chomycz, B. (2000). *Fiber optic installer's field manual*. McGraw-Hill, Inc.
- [13] Kashyap, R. (2009). *Fiber bragg gratings*. Academic press. <https://doi.org/10.1016/C2009-0-16830-7>
- [14] Wikipedia contributors. (2023, December 14). *Fiber Bragg grating*. In Wikipedia. [https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Fiber\\_Bragg\\_grating&oldid=1189800018](https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Fiber_Bragg_grating&oldid=1189800018)
- [15] Yin, S., Ruffin, P.B., & Yu, F.T.S. (Eds.). (2008). *Fiber Optic Sensors* (2nd ed.). CRC Press. <https://doi.org/10.1201/9781420053661>
- [16] Inaudi, D., & Del Grosso, A. (2008, October). Fiber optic sensors for structural control. In *Proc. 14th World Conf. Earthquake Engin.*
- [17] Dakin, J., & Culshaw, B. (1988). *Optical fiber sensors: Principles and components*. Volume 1. Artech House.

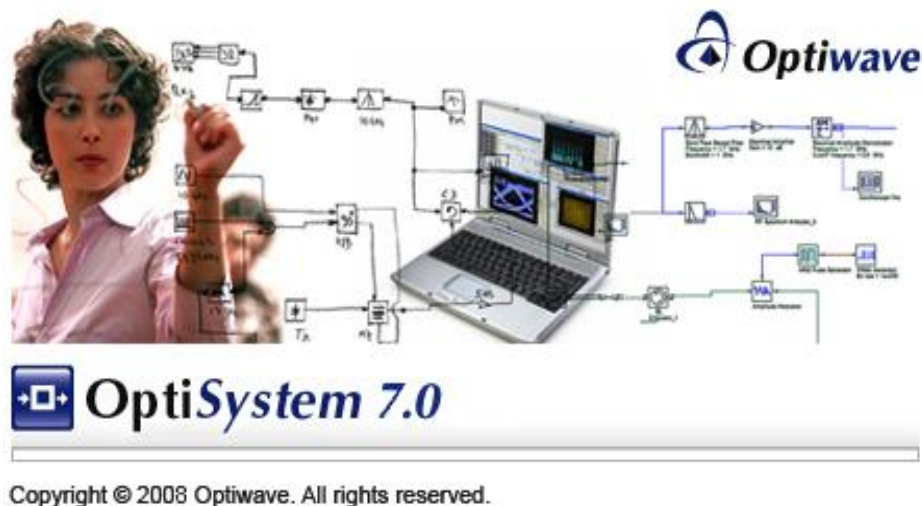
- [18] Meltz, G., & Morey, W. W. (1991, December). Bragg grating formation and germanosilicate fiber photosensitivity. In *International workshop on photo induced self-organization effects in optical fiber* (Vol. 1516, pp. 185-199). SPIE.
- [19] Hellenic Cable Networks. (n.d.). *Εφαρμογές των Οπτικών Ινών*. Hellenic Cable Networks. <https://www.hcn.gr/el/blog/efarmoges-ton-optikon-inon.html>
- [20] Mohammed, N. A., Ali, T. A., & Aly, M. H. (2014). Performance Evaluation of Fiber Bragg Grating Temperature Sensor: Apodized Fiber Bragg Grating, Design and Simulation. [https://www.researchgate.net/figure/fig3-2-3-Uniform-FBG-structure-and-refractive-index-profile-of-the-fiber-core\\_fig3\\_265384916](https://www.researchgate.net/figure/fig3-2-3-Uniform-FBG-structure-and-refractive-index-profile-of-the-fiber-core_fig3_265384916)
- [21] Guy M., & Painchaud Y.(n.d.). *Fiber Bragg Gratings: A Versatile Approach to Dispersion Compensation*. In *Photonics*. [https://www.photonics.com/Articles/Fiber\\_Bragg\\_Gratings\\_A\\_Versatile\\_Approach\\_to/a19690](https://www.photonics.com/Articles/Fiber_Bragg_Gratings_A_Versatile_Approach_to/a19690)
- [22] Singh, Y., Raghuwanshi, S. K., Prakash, O., & Saini, P. K. (2021). Design and development of tilted fiber Bragg grating (TFBG) chemical sensor with regression analysis of grating parameters for sensitivity optimization. *Optical and Quantum Electronics*, 53, 1-14. <https://doi.org/10.1007/s11082-021-03328-6>
- [23] Patel, S. K., Ladumor, M., Parmar, J., & Guo, T. (2019). Graphene-based tunable reflector superstructure grating. *Applied Physics A*, 125, 1-11. <https://doi.org/10.1007/s00339-019-2872-6>
- [24] Méndez, A., & Graver, T. (2007). Overview of Fiber Optic Sensors for NDT Applications. 4th Pan American Conference for NDT - October 2007 - Buenos Aires, Argentina. *e-Journal of Nondestructive Testing* Vol. 12(11). <https://www.ndt.net/?id=4697>
- [25] Peters, K., & Inaudi, D. (2022). Optical fiber sensors. In *Sensor Technologies for Civil Infrastructures* (pp. 113-147). Woodhead Publishing. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-102696-0.00005-1>
- [26] Mihailov, S. J. (2012). Fiber Bragg grating sensors for harsh environments. *Sensors*, 12(2), 1898-1918.
- [27] Hanan, M., Heba, F., Ahmed, A., Moustafa, H., *Performance analysis & comparative study of uniform, apodized and pi-phase shifted FBGs for array of high performance temperature sensors. September 2015. OPTOELECTRONICS AND ADVANCED MATERIALS-RAPID COMMUNICATIONS* 9(910):1251-1259. <https://www.researchgate.net/publication/283086114>

## ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ 1

### Π.1 Προγράμματα προσομοίωσης

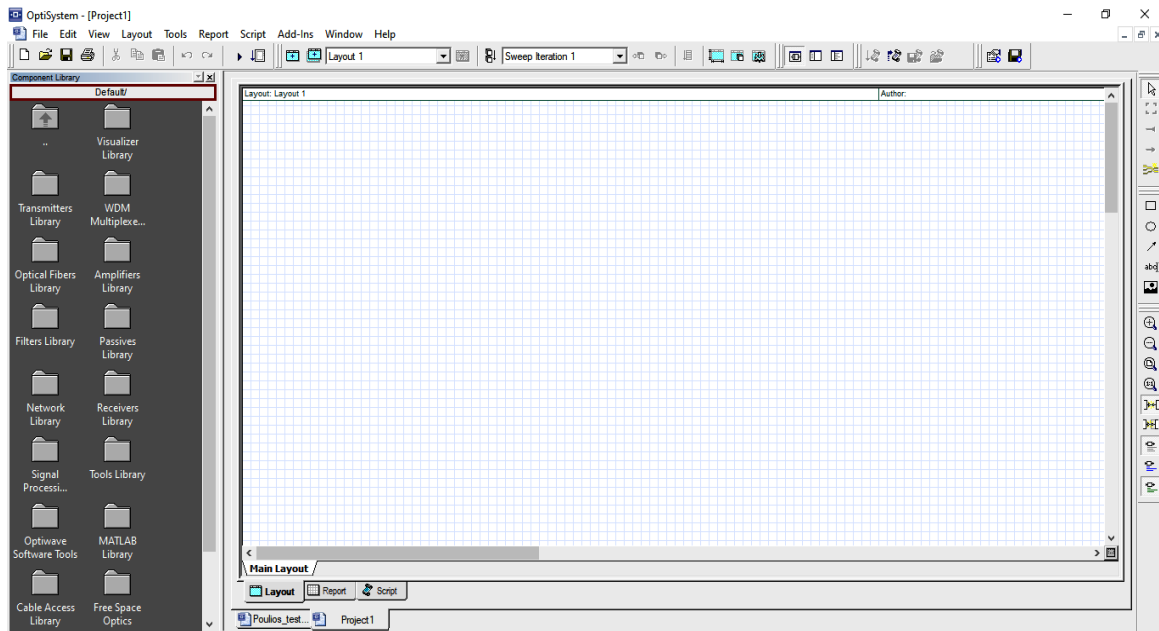
#### Π.1.1 Πρόγραμμα OptiSystem 7

Το πρώτο λογισμικό που χρησιμοποιήθηκε είναι το λογισμικό προσομοίωσης OptiSystem 7.0.



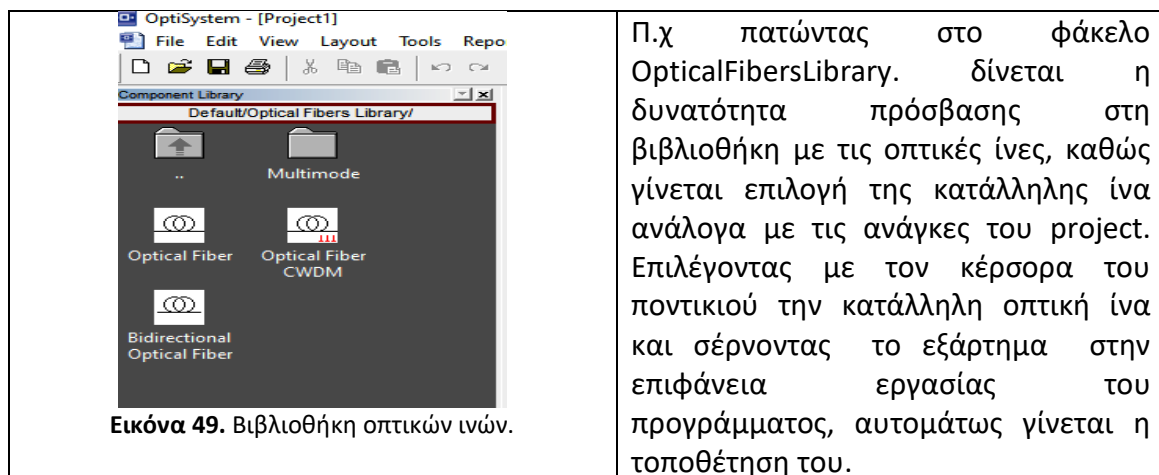
Εικόνα 47. Λογισμικό OptiSystem 7.0

Η εταιρεία στην οποία ανήκει το λογισμικό είναι η OPTIWAVESYSTEMINC και προσφέρει ένα ολοκληρωμένο σύνολο εργαλείων για την εργασία πάνω στην προσομοίωση οπτικών ινών, το οποίο περιλαμβάνει εργαλεία για την ανάλυση αποτελεσμάτων, κυματομορφών, μήκους κύματος, ενέργειας, θορύβου, φάσματος και διασποράς των σημάτων, ενώ μας δίνει την δυνατότητα σε οποιοδήποτε σημείο του συστήματος αυτού να μπορεί να αναλυθεί, έτσι ώστε να διαπιστωθούν όλες οι λεπτομέρειές του. Επίσης παρέχει τη δυνατότητα εκτέλεσης διαφόρων πειραμάτων, καθώς και την διεξαγωγή των αποτελεσμάτων αυτών. Ουσιαστικά είναι ένα ολοκληρωμένο πρόγραμμα που παρέχει μια πλατφόρμα για το σχεδιασμό, προσομοίωση και δοκιμή οπτικών δικτύων σε όλες τις ενώσεις τους. Στη συνέχεια θα παρουσιαστούν διάφορες εικόνες από την επιφάνεια εργασίας του προγράμματος, αλλά και μια σύντομη αναφορά στον τρόπο λειτουργίας και χρήσης του συγκεκριμένου λογισμικού. Στην παρακάτω εικόνα διακρίνεται ο χώρος εργασίας καθώς και οι διάφορες λειτουργίες - επιλογές που δίνει το πρόγραμμα για την εκτέλεση μιας προσομοίωσης.



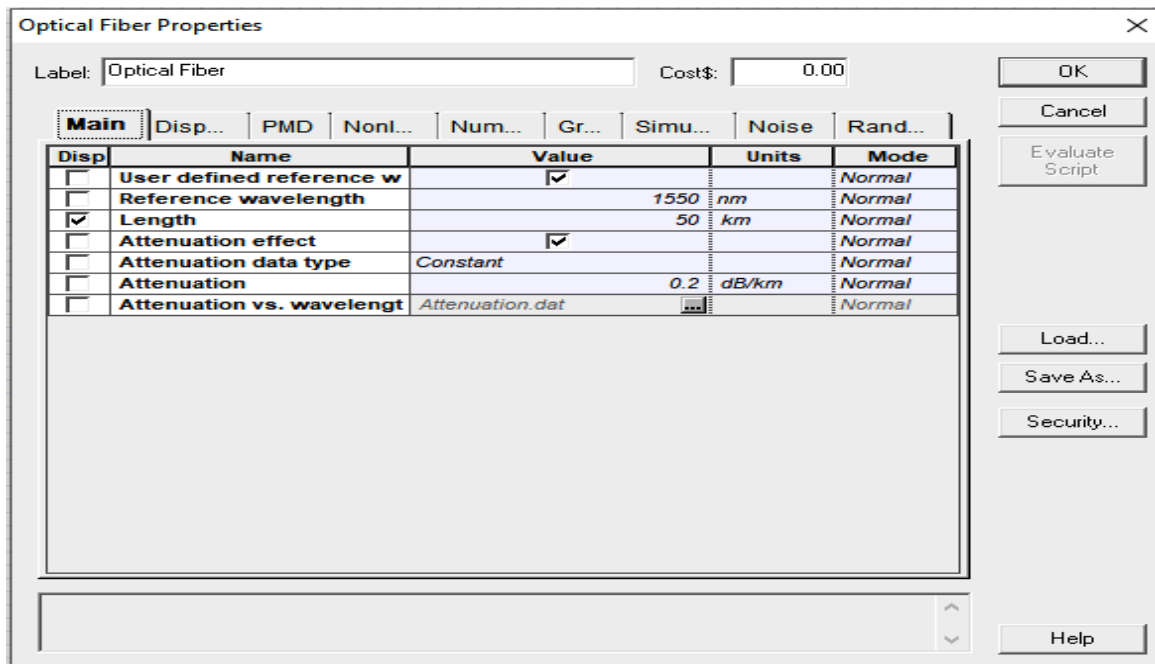
**Εικόνα 48.** Επιφάνεια εργασίας του λογισμικού OptiSystem 7.0

Στην αριστερή πλευρά της επιφάνειας εργασίας, διακρίνεται η βιβλιοθήκη με διάφορα εξαρτήματα που μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την δημιουργία, αλλά και για την εκτέλεση ενός project. Πατώντας διπλό κλικ πάνω σε κάθε φάκελο, ο χρήστης έχει την δυνατότητα να εισέλθει στα αντίστοιχα εξαρτήματα που επιθυμεί για την δημιουργία ενός Project.



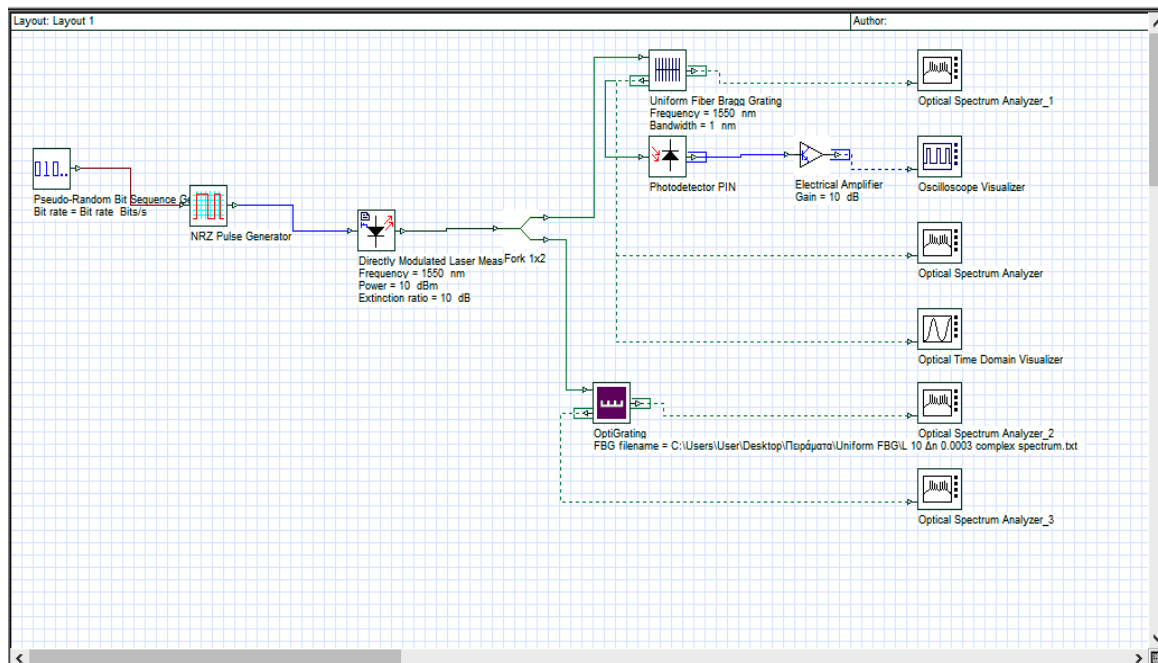
Από την στιγμή που τοποθετήθηκε το εξάρτημα στο workspace, το πρόγραμμα δίνει την δυνατότητα στον χρήστη να ρυθμίσει (παραμετροποιήσει) το υλικό, καθώς και να συνδεθεί με άλλα εξαρτήματα. Πατώντας διπλό κλικ πάνω στην οπτική ίνα, εμφανίζεται το παράθυρο ρυθμίσεων .





Εικόνα 50. Παράθυρο ρυθμίσεων της οπτικής ίνας.

Σε αυτό το σημείο μπορεί να επιλεγθεί το μήκος της οπτικής ίνας που επιθυμεί ο χρήστης, το μήκος κύματός της (wavelength), η εξασθένιση αλλά και πολλών άλλων παραμέτρων που δίνει το συγκεκριμένο πρόγραμμα.



Εικόνα 51. Σχεδιαστικό κύκλωμα για UniformFBG.

### Π.1.2 Πρόγραμμα OptiGrating

Το δεύτερο λογισμικό πρόγραμμα που χρησιμοποιήθηκε είναι το Optiwave OptiGrating.



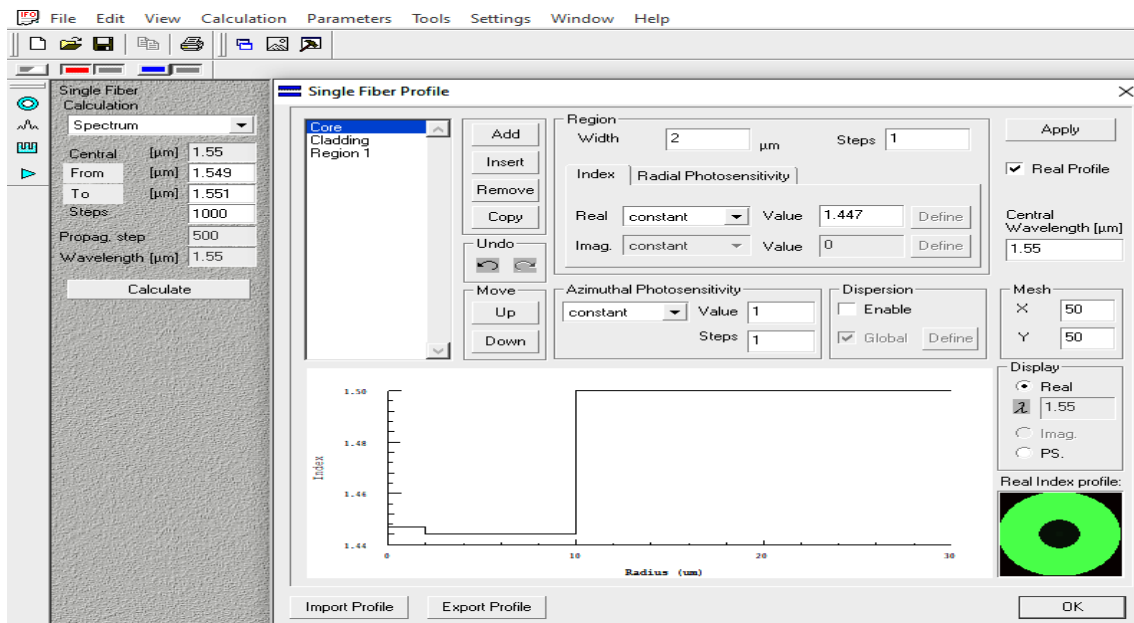
Εικόνα 52. Πρόγραμμα OptiGrating.

Το OptiGrating είναι ένα λογισμικό σχεδιασμού για τη μοντελοποίηση ολοκληρωμένων συσκευών και συσκευών οπτικών ινών που ενσωματώνουν οπτικά πλέγματα (FiberBraggGratings). Το OptiGrating χρησιμοποιεί τη θεωρία συζευγμένων τρόπων λειτουργίας για τη μοντελοποίηση του φωτός και την ανάλυση και σύνθεση των πλεγμάτων. Αυτό παρέχει στον σχεδιαστή τις πληροφορίες που απαιτούνται για τη δοκιμή και τη βελτιστοποίηση των σχεδίων πλέγματος.

Το συγκριμένο λογισμικό πρόγραμμα μπορεί να χρησιμοποιηθεί :

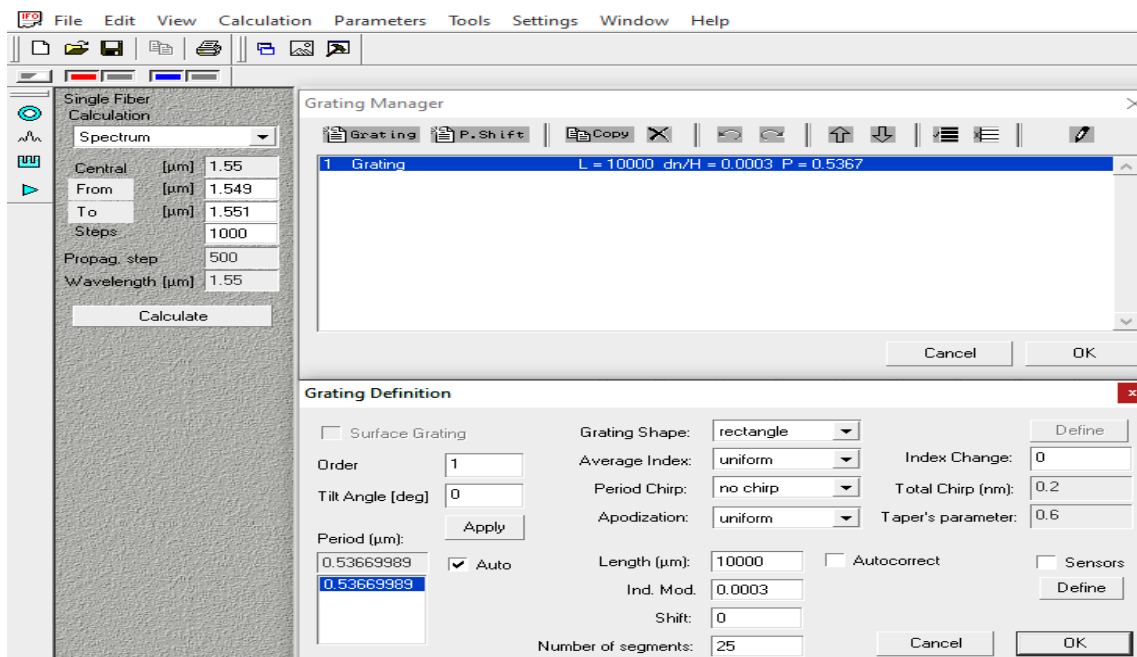
- Ανακλαστήρες Bragg ινών
- Στοιχεία εξομάλυνσης κέρδους EDFA
- Αντισταθμιστές διασποράς για επικοινωνίες οπτικών ινών
- WDM add/drop, στενά και ευρυζωνικά φίλτρα ινών και κυματοδηγών
- Αισθητήρες ινών και κυματοδηγών

Σημαντικό σε αυτό το σημείο είναι να αναφερθεί ότι η συγκεκριμένη έκδοση του OptiGrating είναι δοκιμαστική και επιτρέπεται η χρήση του για 30 μέρες, χωρίς να δίνει τη δυνατότητα στον χρήστη να αξιοποιήσει 100/100 τις δυνατότητες του λογισμικού, καθώς η αγορά του κανονικού – πλήρους λογισμικού είναι ακριβή. Η επιφάνεια εργασίας του προγράμματος φαίνεται στην εικόνα χ. Πατώντας το κουμπί Fiber/Wave-guide Parameters ανοίγει το παράθυρο με τις γενικές ρυθμίσεις της οπτικής ίνας (Εικόνα 53).

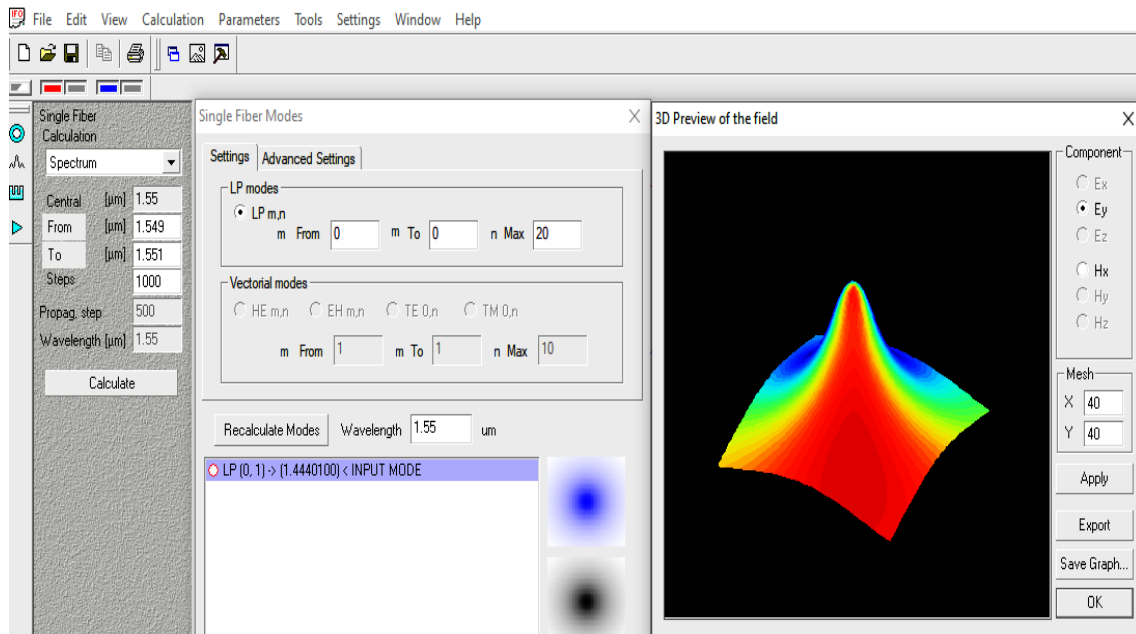


Εικόνα 53. Επιφάνεια εργασίας -Παράμετροι ινών.

Στη συγκεκριμένη επιφάνεια, ο χρήστης κάνει την παραμετροποίηση της οπτικής ίνας με φράγματα Bragg. Μπορεί να επιλέξει με ακρίβεια το μέγεθος της οπτικής ίνας, το δείκτη διάθλασης του πυρήνα, το δείκτη διάθλασης του μανδύα καθώς και του περιβλήματος, που είναι εξαιρετικά χρήσιμο για τη δημιουργία ενός Fiber Bragg Grating, κάτι που δεν είναι δυνατό στο πρόγραμμα OptiSystem 7.0 Επίσης υπάρχει η δυνατότητα εισαγωγής της τιμής του κεντρικού μήκους κύματος.

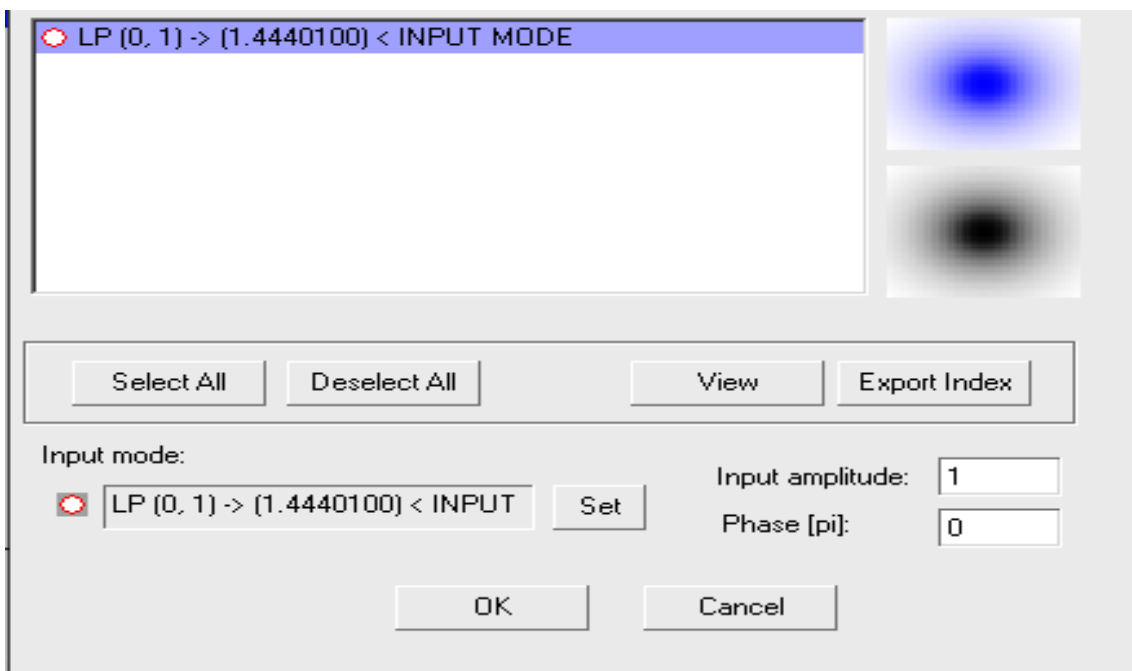


Εικόνα 54. Παράμετροι πλέγματος



Εικόνα 55. Παράμετροι λειτουργίας.

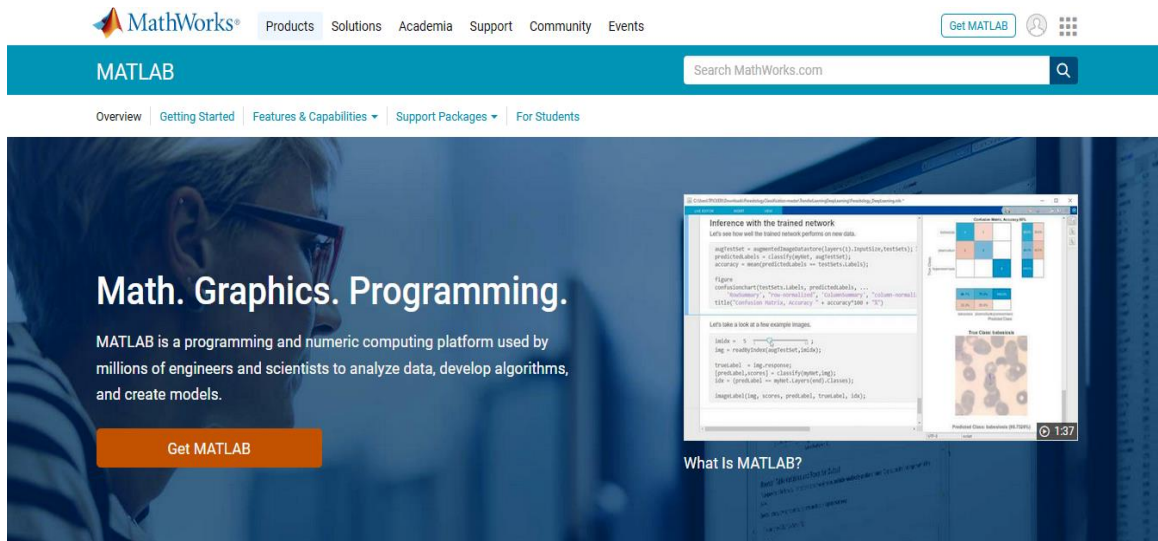
Πατώντας το κουμπί Mode Parameters, το λογισμικό πρόγραμμα δίνει τη δυνατότητα στο χρήστη να απεικονίσει με τρισδιάστατη εικόνα το ρυθμό ή τους ρυθμούς που περνούν μέσα από την οπτική ίνα(βλ. εικόνα 55). Στην Εικόνα 56 παρατηρούμε ότι είναι μια ίνα μονότροπη ή μονής κατάστασης (Single Mode) γιατί περνάει μόνο ένας ρυθμός και αυτός καταγράφεται στην επιφάνεια εργασίας και είναι ο εξής:



Εικόνα 56. Απεικόνιση του ρυθμού μονότροπης ίνας LP(0,1)

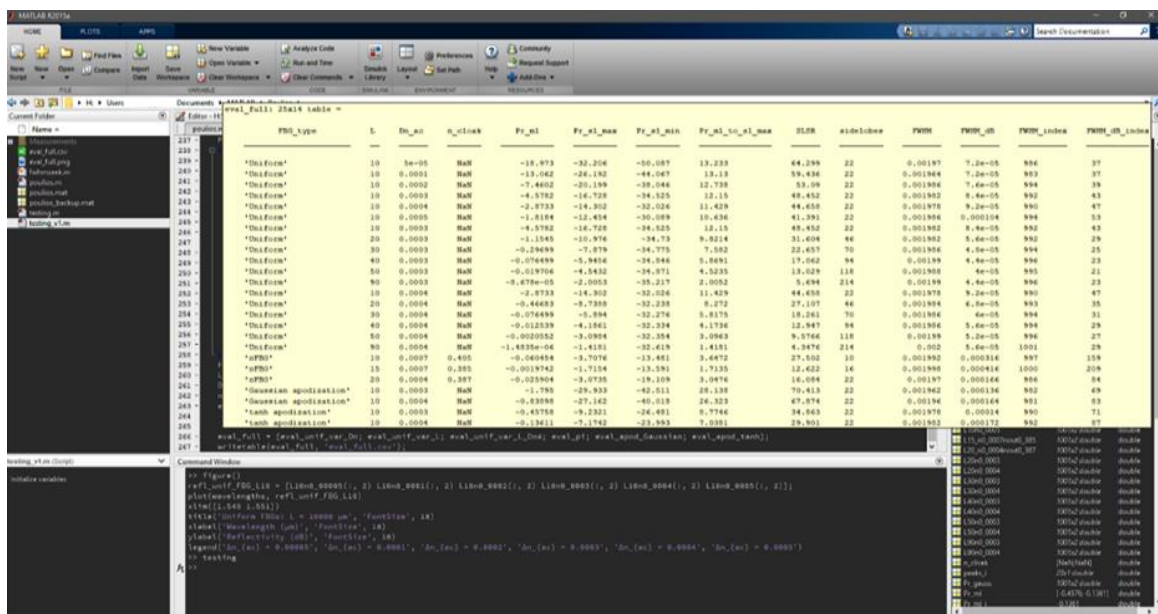
### Π.1.3 Πρόγραμμα Matlab

## MATLAB



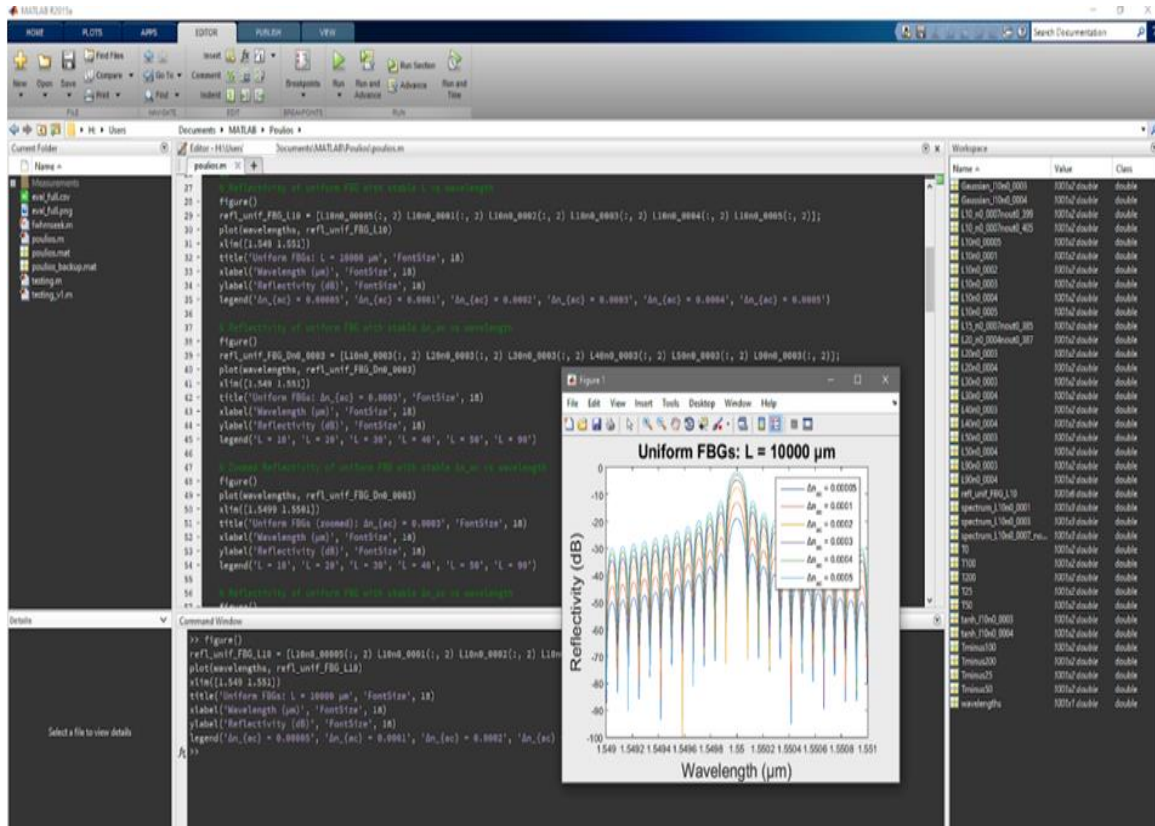
Εικόνα 57. Πρόγραμμα Matlab. [\[Πηγή\]](#)

Το MATLAB (MATrixLABoratory - Εργαστήριο Πινάκων) είναι ένα ολοκληρωμένο μαθηματικό λογισμικό πακέτο, όντας ταυτόχρονα μία γλώσσα προγραμματισμού και ένα περιβάλλον αριθμητικής υπολογιστικής. Επιπλέον, με χρήση προαιρετικών πρόσθετων εργαλείοι, καθιστά δυνατή την εκτέλεση συμβολικών υπολογισμών, τη γραφική προσομοίωση και το σχεδιασμό δυναμικών και ενσωματωμένων συστημάτων, τη μηχανική μάθηση (machinelearning), την ανάλυση δεδομένων, κ.α.



Εικόνα 58. Ανάλυση & Επεξεργασία δεδομένων.

Μετά την ανάλυση και επεξεργασία των δεδομένων, που έχουν γίνει εξαγωγή από το πρόγραμμα OptiGrating, στην παρακάτω Εικόνα 59 βλέπουμε την γραφική παράσταση μιας UniformFBG,s για  $L= 10000 \mu\text{m}$  και για διάφορα  $\Delta n_{ac}$  (δείκτης διάθλασης) από  $0.5 * 10^{-4}$  έως  $5 * 10^{-4}$ .



Εικόνα 59. Γράφημα UniformFBG,s για  $L= 10000 \mu\text{m}$  &  $\Delta n_{ac}=0.5 * 10^{-4}$  έως  $5 * 10^{-4}$ .

**ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ 2**

**Π.2.1**

**Πίνακας 12.** Συγκεντρωτικός πίνακας αποτελεσμάτων

FBG_type	L	Dn_ac	n_cloak	Pr_ml	Pr_sl_max	Pr_sl_min	Pr_ml_to_sl_max	SLSR	sidelobes	FWHM_dB
Uniform	10	0.0005	NaN	-18.9731861675873	-32.2057197352877	-50.0872409893612	13.2325335677003	64.2992488688453	22	7.2000000000072e-05
Uniform	10	0.0001	NaN	-13.0619213140216	-26.1916722158724	-44.0666566292714	13.1297509018509	59.4364860402742	22	7.2000000000072e-05
Uniform	10	0.0002	NaN	-7.46021878984681	-20.1987044039275	-38.0461434160314	12.7384856140807	53.0900180421872	22	7.5999999999965e-05
Uniform	10	0.0003	NaN	-4.57816683075117	-16.7279781522999	-34.5245498069039	12.1498112215487	48.4524150086231	22	8.3999999999973e-05
Uniform	10	0.0004	NaN	-2.87331503797147	-14.3022543072294	-32.0262820850408	11.4289392692579	44.6578665274102	22	9.1999999999981e-05
Uniform	10	0.0005	NaN	-1.8183643096548	-12.4542553262173	-30.0890469930852	10.6358910165625	41.3913253187427	22	0.00010399999999982
Uniform	10	0.0003	NaN	-4.57816683075117	-16.7279781522999	-34.5245498069039	12.1498112215487	48.4524150086231	22	8.3999999999973e-05
Uniform	20	0.0003	NaN	-1.15448537174312	-10.9758667589371	-34.7295554095587	9.82138138719394	31.6038216714866	46	5.6000000000056e-05
Uniform	30	0.0003	NaN	-0.29699199498694	-7.87895037560878	-34.775146816296	7.58195838062184	22.656842880435	70	4.8000000000048e-05
Uniform	40	0.0003	NaN	-0.0764993865290443	-5.94560026286245	-34.8463014821121	5.86910087633341	17.0623567207399	94	4.3999999999933e-05
Uniform	50	0.0003	NaN	-0.0197064339506318	-4.54324365988207	-34.87074817978	4.52353722593144	13.0288103841618	118	4.000000000004e-05
Uniform	90	0.0003	NaN	-8.67798106701127e-05	-2.00527865856607	-35.217492581633	2.0051897787454	5.69397879166982	214	4.3999999999933e-05
Uniform	10	0.0004	NaN	-2.87331503797147	-14.3022543072294	-32.0262820850408	11.4289392692579	44.6578665274102	22	9.1999999999981e-05
Uniform	20	0.0004	NaN	-0.466827094404781	-8.73877848297083	-32.2376631267174	8.27195138856605	27.1073571574376	46	6.7999999999957e-05
Uniform	30	0.0004	NaN	-0.0764993865290458	-5.89395120591552	-32.276368179715	5.81745181938647	18.2608872630835	70	5.9999999999949e-05
Uniform	40	0.0004	NaN	-0.0125388825587854	-4.1861227687084	-32.3338952133476	4.17358388614961	12.9465464679936	94	5.6000000000056e-05
Uniform	50	0.0004	NaN	-0.00205523920366282	-3.09839433882672	-32.3537307386264	3.09633909962305	9.57662151501931	118	5.1999999999941e-05
Uniform	90	0.0004	NaN	-1.48346337818785e-06	-1.41812188991175	-32.6185228154544	1.41812040644837	4.34759690969162	214	5.6000000000056e-05
πFBG	10	0.0003	405	-1.68737699748189	-9.68276791438424	-20.7184234349853	7.99539091690236	46.7350614044978	10	0.00022400000000002
πFBG	10	0.0004	405	-0.753930996834197	-7.45199996575475	-18.2422080356373	6.6980689592055	40.8503178025203	10	0.000248000000000026
πFBG	10	0.0007	405	-0.060454080810092	-3.7076134979681	-13.4814804640484	3.64715941715801	27.5015307692308	10	0.000315999999999983
πFBG	10	0.0007	405	-0.060454080810092	-3.7076134979681	-13.4814804640484	3.64715941715801	27.5015307692308	10	0.000315999999999983
πFBG	15	0.0007	385	-0.00197417099325215	-1.71542664739776	-13.5911261595376	1.7134524764045	12.6216667203398	16	0.000415999999999972
πFBG	20	0.0004	387	-0.0259040513070456	-3.07354553935471	-19.1092630170799	3.04764148804767	16.0840610996226	22	0.000166000000000111
Gaussian apodization	10	0.0003	NaN	-1.79499784085873	-29.9329879909598	-42.5105201428605	28.137990150101	70.4131304212868	22	0.000135999999999914
Gaussian apodization	10	0.0004	NaN	-0.83898122650678	-27.1622157143693	-40.0183077485074	26.3232344878625	67.8744735695123	22	0.000164000000000053
tanh apodization	10	0.0003	NaN	-0.457581651183943	-9.23214043187806	-26.4814708428914	8.77455878069412	34.862642209907	22	0.000140000000000029
tanh apodization	10	0.0004	NaN	-0.136108428839415	-7.17420349852122	-23.9934571937663	7.03809506968181	29.9006660048355	22	0.000172000000000061
πFBG Gaussian apodization	10	0.0007	405	-0.413196323367528	-11.8274432391634	-30.3684147018091	11.4142469157959	38.9465283430117	12	0.000296000000000074

**Π.2.2**

**Πίνακας 13.** Συγκεντρωτικός πίνακας μεταξύ θερμοκρασιών (°C) & Κεντρικών Μηκών κυμάτων λ (nm)

Temperature	Uniform_FBG_wavelength	πiFBG_wavelength	πiFBG_Gaussian_wavelength
-100	1.548516	1.548464	1.548404
-50	1.549112	1.54908	1.549048
-25	1.549408	1.549388	1.549368
0	1.549704	1.5497	1.549684
25	1.55	1.550004	1.55
50	1.550296	1.5503	1.550316
75	1.550592	1.550612	1.550632
100	1.550892	1.55092	1.550952
150	1.551484	1.551536	1.551596