



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ

ΤΟΜΕΑΣ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΜΕΤΑΔΟΣΗΣ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΑΣ ΚΑΙ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ

ΥΛΙΚΩΝ

**ΜΕΛΕΤΗ ΦΙΛΤΡΩΝ BRAGG GRATING ΚΑΙ Η ΕΠΙΔΡΑΣΗ
ΤΩΝ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΩΝ ΤΟΥΣ ΣΕ LASER ΕΞΩΤΕΡΙΚΗΣ
ΚΟΙΛΟΤΗΤΑΣ**

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΕΡΜΙΟΝΗ Α. ΜΑΜΟΥΝΑ

Επιβλέπων: Ηρακλής Αβραμόπουλος

Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Αθήνα, Δεκέμβριος 2013



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ

ΤΟΜΕΑΣ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΜΕΤΑΔΟΣΗΣ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΑΣ ΚΑΙ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ

ΥΛΙΚΩΝ

**ΜΕΛΕΤΗ ΦΙΑΤΡΩΝ BRAGG GRATING ΚΑΙ Η ΕΠΙΔΡΑΣΗ
ΤΩΝ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΩΝ ΤΟΥΣ ΣΕ LASER ΕΞΩΤΕΡΙΚΗΣ
ΚΟΙΛΟΤΗΤΑΣ**

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΕΡΜΙΟΝΗ Α. ΜΑΜΟΥΝΑ

Επιβλέπων: Ηρακλής Αβραμόπουλος
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Εγκρίθηκε από την τριμελή επιτροπή την 16^η Δεκεμβρίου 2013

.....
Η. Αβραμόπουλος
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

.....
Ν. Ουζούνογλου
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

.....
Χ. Καυάλης
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Αθήνα, Δεκέμβριος 2013

.....
Ερμιόνη Α. Μαμούνα

Διπλωματούχος Ηλεκτρολόγος Μηχανικός και Μηχανικός Υπολογιστών Ε.Μ.Π.

Copyright© Ερμιόνη Α. Μαμούνα, 2013

Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος, All rights reserved.

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

Οι απόψεις και τα συμπεράσματα που περιέχονται σε αυτό το έγγραφο εκφράζουν το συγγραφέα και δεν πρέπει να ερμηνευθεί ότι αντιπροσωπεύουν τις επίσημες θέσεις του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου.

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Σκοπός της παρούσας μελέτης είναι να παρουσιάσει στον αναγνώστη τα σημαντικότερα χαρακτηριστικά των φίλτρων Bragg gratings και τον τρόπο που αυτά επηρεάζουν τη λειτουργία και τα χαρακτηριστικά των lasers εξωτερικής κοιλότητας. Πιο συγκεκριμένα, η παρούσα εργασία επικεντρώνεται στις επιδράσεις που ασκούν τα φράγματα Bragg όταν παίζουν το ρόλο του καθρέπτη στην κοιλότητα ενός laser.

Το πρώτο κεφάλαιο αναφέρεται γενικά στα lasers και περιέχει μία σύντομη εισαγωγή της οποίας έπεται μία ιστορική αναδρομή.

Το δεύτερο κεφάλαιο αναλύει τα χαρακτηριστικά της λειτουργίας ενός laser εξωτερικής κοιλότητας. Αρχικά, παρουσιάζεται ο μηχανισμός ενίσχυσης του laser. Στη συνέχεια, παρουσιάζεται διεξοδικά η διαδικασία της άντλησης και της αναστροφής πληθυσμών. Ένα μεγάλο μέρος του κεφαλαίου αφιερώνεται στους καθρέπτες του laser. Στο συγκεκριμένο κομμάτι παρουσιάζεται λεπτομερώς η απλή διηλεκτρική επιφάνεια και τα χαρακτηριστικά της, οι διηλεκτρικοί καθρέπτες πολλαπλών επιπέδων και οι βασικές ιδιότητες τους και ο τρόπος ορισμού των επιπέδων αναφοράς των καθρεπτών. Το σημαντικότερο τμήμα του δεύτερου κεφαλαίου είναι αυτό που αναφέρεται στις κοιλότητες του laser. Αρχικά, παρουσιάζονται διεξοδικά οι σταθερές κοιλότητες ενός laser και στη συνέχεια παρουσιάζονται οι ασταθείς κοιλότητες ενός laser. Ιδιαίτερη αναφορά πραγματοποιείται στο εύρος ζώνης, τη διακριτική ικανότητα και τη λεπτότητα του laser. Το κεφάλαιο ολοκληρώνεται με αναλυτική παρουσίαση του τρόπου συντονισμού της οπτικής κοιλότητας.

Το τρίτο κεφάλαιο αναφέρεται στα φράγματα Bragg. Αρχικά, παρουσιάζεται ο τρόπος μοντελοποίησης της λειτουργίας ενός φράγματος Bragg. Κατόπιν παρουσιάζεται διεξοδικά ο τρόπος σύνθεσης ενός φράγματος Bragg, χρησιμοποιώντας τον αλγόριθμο Layer Peeling. Το μεγαλύτερο μέρος του κεφαλαίου αναλώνεται στην παρουσίαση των τεχνικών με βάση τις οποίες κατασκευάζονται τα φράγματα Bragg. Αρχικά, παρουσιάζεται αναλυτικά η διαδικασία κατασκευής ενός φράγματος Bragg πολυμερούς κυματοδηγού με χρήση μαλακής φωτολιθογραφίας. Στη συνέχεια, παρουσιάζεται διεξοδικά η τεχνική κατασκευής που βασίζεται στη χρήση μάσκας φάσης. Το κεφάλαιο ολοκληρώνεται με την παρουσίαση διαφόρων τεχνικών κατασκευής συνεχούς φράγματος.

Το τέταρτο κεφάλαιο είναι το πιο σημαντικό τμήμα της παρούσας μελέτης. Αρχικά, παρουσιάζεται με κάθε λεπτομέρεια η μοντελοποίηση, ο τρόπος λειτουργίας, οι βασικές

παράμετροι και τα σημαντικότερα χαρακτηριστικά ενός φράγματος Bragg που παίζει το ρόλο του καθρέπτη. Κατόπιν, παρουσιάζονται οι διάφοροι τύποι καθρεπτών Bragg. Το κεφάλαιο ολοκληρώνεται με την πραγματοποίηση μίας προσομοίωσης που μελετά την επίδραση ενός Bragg grating φίλτρου στη λειτουργία ενός laser εξωτερικής κοιλότητας. Το κομμάτι αυτό είναι το σημαντικότερο της παρούσας εργασίας και πραγματοποιείται κάνοντας χρήση ενός προγράμματος προσομοίωσης.

Το πέμπτο και τελευταίο κεφάλαιο της μελέτης περιέχει τα συμπεράσματα που προέκυψαν καθώς και μερικές προτάσεις για μελλοντική έρευνα.

Λέξεις κλειδιά:

Laser εξωτερικής κοιλότητας, καθρέπτες laser, κοιλότητες laser, φράγμα Bragg, ανάκλαση, διάθλαση.

SUMMARY

The purpose of this thesis is to present to the reader the specifications of Bragg grating filters and the way they affect the operation and the characteristics of external cavity lasers. More specifically, the present study focuses on the influence of Bragg grating when they act as the mirror in the cavity of a laser.

The first chapter refers generally to lasers and contains a brief introduction followed by a historical overview.

The second chapter analyzes the operational characteristics of an external cavity laser. Initially, is presented the amplification mechanism of the laser. Following is presented in detail the pumping process and the population inversion. A large part of this chapter is spent to laser mirrors. In this part, is presented in detail the simple dielectric surface and its characteristics, the multi-level dielectric mirrors and their basic properties and the way to define reference levels for the mirrors. The major section of the second chapter refers to laser cavities. Initially are presented thoroughly the fixed cavities of a laser and then are presented the unstable cavities of a laser. A particular reference is made to the bandwidth, the resolving power and the sensitivity of a laser. The chapter concludes with a detailed presentation of the resonant mode of an optical cavity.

The third chapter deals with Bragg gratings. Initially, is presented the way of modeling the operation of a Bragg grating. Then presented in detail the composition process of a Bragg grating with the using the Layer Peeling algorithm. The main part of this chapter is spent in presenting techniques for the construction of Bragg gratings. Initially, is presented the manufacturing process of a polymer waveguide Bragg grating using soft photolithography. Then is made reference to the manufacturing technique based on the use of a phase mask. The chapter concludes with the presentation of various manufacturing techniques for continuous Bragg gratings.

The fourth chapter is the most important chapter of this thesis. Initially are presented in detail the modeling, the operation modes, the parameters and the major features of a Bragg grating that acts as the mirror of an external cavity laser. Following are presented the various types of Bragg mirrors. The chapter concludes by performing a simulation in order to study the

effect of a Bragg grating filter in the function of an external cavity laser. This part is the most important of this thesis and it is performed using a simulation program.

The fifth and final chapter of this study contains the conclusions and some suggestions for future research.

Keywords:

External cavity laser, laser mirrors, laser cavities, Bragg grating, reflection, diffraction.

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Η παρούσα διπλωματική εργασία εκπονήθηκε κατά το ακαδημαϊκό έτος 2012-2013 υπό την επίβλεψη του κ. Ηρακλή Αβραμόπουλου, καθηγητή της σχολής Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών του Ε.Μ.Π., στον οποίο οφείλω ιδιαίτερες ευχαριστίες για την ανάθεσή της. Επίσης, θα ήθελα να ευχαριστήσω τον Πάνο Γκρούμα, υποψήφιο διδάκτορα της σχολής για τη συνεχή βοήθεια και την καθοδήγησή του. Τέλος, θα ήθελα να ευχαριστήσω τους γονείς μου για τη στήριξη που μου παρείχαν καθ' όλη τη διάρκεια των σπουδών μου.

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

Περίληψη	5
Summary.....	7
Ευχαριστίες.....	9
Περιεχόμενα.....	10
Ευρετήριο Εικόνων.....	12
Ευρετήριο Πινάκων	16
1^ο - Κεφάλαιο “Γενικά για τα Laser”	17
1.1 Εισαγωγή	17
1.2 Ιστορική Αναδρομή	18
2^ο – Κεφάλαιο “Χαρακτηριστικά Λειτουργίας ενός Laser Εξωτερικής Κοιλότητας” ...	21
2.1 Εισαγωγή	21
2.2 Ενίσχυση Laser	22
2.3 Άντληση Laser και Αναστροφή Πληθυσμών	26
2.4 Καθρέπτες Laser	29
2.4.1 Απλή Διηλεκτρική Επιφάνεια	29
2.4.2 Διηλεκτρικοί Καθρέπτες Πολλαπλών Επιπέδων.....	32
2.4.3 Επίπεδα Αναφοράς Καθρεπτών	33
2.5 Κοιλότητες Laser	34
2.5.1 Σταθερές Κοιλότητες Laser.....	35
2.5.2 Ασταθείς Κοιλότητες Laser	37
2.5.3 Εύρος Ζώνης, Διακριτική Ικανότητα, Λεπτότητα.....	38
2.5.4 Συντονισμός Οπτικής Κοιλότητας	41
3^ο - Κεφάλαιο “Φράγματα (Gratings) Bragg”.....	43
3.1 Εισαγωγή	43
3.1.1 Φράγματα Bragg σε Ίνα.....	43
3.1.2 Ολοκληρωμένα Φράγματα Bragg	45
3.2 Μοντελοποίηση Φραγμάτων Bragg.....	46
3.3 Σύνθεση Φραγμάτων Bragg (Αλγόριθμος Layer Peeling)	49
3.4 Τεχνικές Κατασκευής Φραγμάτων Bragg	52
3.4.1 Φράγμα Bragg Πολυμερούς Κυματοδηγού με Χρήση Μαλακής Φωτολιθογραφίας	52
3.4.2 Μάσκα Φάσης.....	55
3.4.3 Τεχνικές Κατασκευής Συνεχούς Φράγματος	57
3.4.4 Λιθογραφία Πολλαπλών Επιπέδων: Κυματοδηγοί με Φράγματα (Ολοκληρωμένα Φράγματα Bragg).....	60

4° - Κεφάλαιο “Επίδραση των Φραγμάτων (Gratings) Bragg στα Laser Εξωτερικής Κοιλότητας”	64
4.1 Τα Φράγματα (Gratings) Bragg στο Ρόλο του Καθρέπτη	64
4.1.1 Τύποι Καθρεπτών Bragg	68
4.2 Τοποθέτηση ενός Bragg Grating Φίλτρου σε ένα Laser Εξωτερικής Κοιλότητας..	69
4.2.1 Μεθοδολογικό Εργαλείο Εξέτασης.....	69
4.2.2 Παράμετροι	71
4.2.3 Αποτελέσματα προσομοίωσης για $\Lambda=2.343 \mu\text{m}$	73
4.2.4 Αποτελέσματα προσομοίωσης για $\Lambda=2.366 \mu\text{m}$	82
4.2.5 Συγκριτική Θεώρηση για διαφορετικές περιόδους	88
5° - Κεφάλαιο “Συμπεράσματα”	91
5.1 Συμπεράσματα	91
5.2 Προτάσεις για Μελλοντική Έρευνα	93
Αναφορές – Βιβλιογραφία	95
Παράρτημα	97
Παρουσίαση Γραφικών Αποτελεσμάτων.	97

ΕΥΡΕΤΗΡΙΟ ΕΙΚΟΝΩΝ

Εικόνα 1 – Μία τυπική συσκευή laser και τα επιμέρους εξαρτήματα της. Laser beam: δέσμη laser, optical resonator or cavity: οπτικό αντηχείο ή κοιλότητα, amplifying medium: μέσο ενίσχυσης, pumping source: πηγή άντλησης, partially transmitting mirror: καθρέπτης μερικής μετάδοσης, fully reflecting mirror: καθρέπτης πλήρους ανάκλασης [1].	17
Εικόνα 2 – Το πρώτο laser που υλοποιήθηκε ποτέ βασισμένο σε ένα κρύσταλλο από ρουβίνιο (ruby) [2].	19
Εικόνα 3 – Δίοδος laser εξωτερικής κοιλότητας. Το chip του ημιαγωγού διαθέτει αντί-ανακλαστική επίστρωση (antireflection (AR) coating) στη μία πλευρά. Ο καθρέπτης σύζευξης της εξόδου (output coupler) παίζει το ρόλο του αντηχείου [5].	21
Εικόνα 4 – Διέλευση ακτινοβολίας μέσω πλήθους απορροφητικών ατόμων [6].	23
Εικόνα 5 – Καμπύλη συντονισμού με πεπερασμένο εύρος γραμμής $\Delta\omega_a$ (εύρος ζώνης) στην οποία απεικονίζεται η εξασθένηση της έντασης και της ισχύος ανά μονάδα επιφάνειας [6].	23
Εικόνα 6 – Η ολίσθηση φάσης που υφίσταται η ακτινοβολία κατά τη διέλευση της μέσω του απορροφητικού υλικού ενός laser [6].	24
Εικόνα 7 – Η ενίσχυση της ακτινοβολίας που διέρχεται από ένα αντεστραμμένο πλήθος ατόμων [6].	25
Εικόνα 8 – Καμπύλη συντονισμού με πεπερασμένο εύρος γραμμής $\Delta\omega_a$ (εύρος ζώνης) στην οποία απεικονίζεται η ενίσχυση της έντασης και της ισχύος ανά μονάδα επιφάνειας [6].	25
Εικόνα 9 – Η ολίσθηση φάσης της διερχόμενης μέσω του αντεστραμμένου πλήθους ατόμων ακτινοβολίας, έχει υποστεί και αυτή αναστροφή [6].	26
Εικόνα 10 – Μοντέλο ατόμων με τέσσερις διαφορετικές ενεργειακές στάθμες για την ερμηνεία της λειτουργίας άντλησης που δημιουργεί την απαραίτητη αναστροφή πληθυσμών προκειμένου το laser να λειτουργεί ενισχυτικά [6].	27
Εικόνα 11 – Ανάκλαση και διάδοση οπτικών κυμάτων σε μία διηλεκτρική επιφάνεια [6].	30
Εικόνα 12 – Ανάκλαση και διάδοση οπτικών κυμάτων μέσω ενός διηλεκτρικού καθρέπτη πολλαπλών επιπέδων [6].	32
Εικόνα 13 – Τα επίπεδα αναφοράς των προσπιπτόντων και των ανακλώμενων κυμάτων δεν είναι απαραίτητο να βρίσκονται στην ίδια θέση [6].	34
Εικόνα 14 – Η κοιλότητα (cavity) ενός laser [7].	34

Εικόνα 15 – Οι πιθανές διαμορφώσεις της κοιλότητας ενός laser. (a) παράλληλα-επίπεδα (plane-parallel), (b) καθρέπτες μεγάλης ακτίνας (large-radius mirrors), (c) ομοεστιακή κοιλότητα (confocal cavity), (d) ημι-ομοεστιακή κοιλότητα (semi-confocal cavity), (e) κοίλη-κυρτή κοιλότητα (concave-convex cavity), (f) ημισφαιρική κοιλότητα (hemispherical cavity), (g) σφαιρική κοιλότητα (spherical cavity) [1].	36
Εικόνα 16 – Μπλοκ διάγραμμα ασταθούς κοιλότητας, κοίλος καθρέπτης (concave mirror), κυρτός καθρέπτης (convex mirror) [1].	38
Εικόνα 17 – Ομοιόμορφο φράγμα Bragg. Σήμα εισόδου (input signal), φράγμα Bragg (Bragg grating), πυρήνας οπτικής ίνας (fiber core), περίβλημα οπτικής ίνας (fiber cladding), σήμα εξόδου (output signal) [8].	45
Εικόνα 18 – Η πιο απλή μορφή ενός ολοκληρωμένου φράγματος Bragg [16].	46
Εικόνα 19 – Τα κύματα που διαδίδονται σε ένα φράγμα Bragg. E_a : κύμα που διαδίδεται προς τα πίσω, E_b : κύμα που διαδίδεται προς τα εμπρός, L : μήκος φράγματος Bragg, Λ : χωρική περιοδικότητα [11].	47
Εικόνα 20 – Οι πιθανές διαδρομές στο εσωτερικό ενός φράγματος Bragg. Ο $u(\xi, z)$ είναι ένας προς τα εμπρός διαδιδόμενος παλμός ενώ ο $v(\xi, z)$ είναι ένας παλμός που διαδίδεται προς τα πίσω. Στο επίπεδο $z=0$ το φράγμα ανιχνεύεται με μία συνάρτηση δέλτα και την αντίστοιχη παλμική απόκριση που σχετίζεται με το συντελεστή ανάκλασης $r(\delta, 0)$ [10].	50
Εικόνα 21 – Διάδοση του φάσματος ανάκλασης κατά μήκος του φράγματος Bragg αφού έχει προσδιοριστεί το πρώτο επίπεδο. Ο $r(\delta, z)$ είναι ο τοπικός συντελεστής ανάκλασης του φράγματος. Μία αποτελεσματική παλμική απόκριση $\tilde{v}(\xi, z)$ είναι εφικτό να συσχετιστεί με το συντελεστή ανάκλασης $r(\delta, z)$ και το συντελεστή σύζευξης $q(z)$ που λαμβάνεται από την παλμική απόκριση $\tilde{v}(\xi, 0)$ [10].	51
Εικόνα 22 – Σχηματικό διάγραμμα της μεταφοράς της δομής του φράγματος στην επιφάνεια πολυμερούς υλικού. α) Περιστροφή του προ-πολυμερούς (pre-polymer) επί του πλακιδίου b) Τοποθέτηση της PDMS σφραγίδας σε προπολυμερή επίστρωση και έκθεση της σε υπεριώδη ακτινοβολία. c) Απομάκρυνση της ελαστομερούς σφραγίδας από το πλακίδιο. d) Εικόνα οπτικού μικροσκοπίου από τη σχεδιαζόμενη περιοχή. e) AFM εικόνα της δομής του φράγματος. f) SEM εικόνα της δομής του φράγματος στην οποία φαίνεται η επίστρωση που απομένει [13].	53
Εικόνα 23 – Εγκάρσια διατομή φράγματος Bragg πολυμερούς κυματοδηγού. Η δομή του φράγματος αναπτύσσεται σε θερμικό οξειδίο πάχους 7 mm, ο πυρήνας του κυματοδηγού είναι από BCB και το άνω περίβλημα είναι από PMGI. Οι διαστάσεις που απεικονίζονται στο σχήμα είναι σε mm [13].	55

Εικόνα 24 – Μέθοδος σχηματισμού ολοκληρωμένων φραγμάτων Bragg σε κυματοδηγούς από silica. Πρώτα σχηματίζονται τα φράγματα και στο τέλος χαράζονται [16].	61
Εικόνα 25 – Μέθοδος σχηματισμού ολοκληρωμένων φραγμάτων Bragg σε SOI (Silicon on Insulator) κυματοδηγούς κορυφογραμμής (ridge waveguides) [16].	62
Εικόνα 26 – Η δομή του στρώματος που χρησιμοποιείται για το σχηματισμό φραγμάτων Bragg σε πυρίτιο χρησιμοποιώντας λιθογραφία. Το ανώτερο στρώμα ρετινών χρησιμοποιείται για την καταγραφή του σχήματος των στάσιμων κυμάτων. Το λεπτό ενδιάμεσο στρώμα χρησιμοποιείται ως μάσκα για τη μεταφορά του σχήματος για τη μεταφορά της αντιανακλαστικής επίστρωσης. Η αντιανακλαστική επίστρωση σχεδιάζεται με στόχο να ελαχιστοποιήσει τις ανακλάσεις από υπόστρωμα και το ανώτερο στρώμα οξειδίου σχηματίζει τη μάσκα για τη χάραξη του πυριτίου [16].	63
Εικόνα 27 – Παράμετροι σχεδίασης ενός διαπερατού (πάνω) και ενός ανακλαστικού (κάτω) φράγματος Bragg. Το k_i είναι το διάνυσμα κατεύθυνσης της προσπίπτουσας δέσμης και k_d το διάνυσμα κατεύθυνσης της διαθλώμενης δέσμης.	65
Εικόνα 28 – Η διείσδυση του πεδίου σε ένα καθρέπτη Bragg [15].	67
Εικόνα 29 – Ανακλαστικότητα (μαύρη καμπύλη) και χρωματική διασπορά (μπλε καμπύλη) του καθρέπτη Bragg της εικόνας 24 σε συνάρτηση με το μήκος κύματος [15].	67
Εικόνα 30 – Η διείσδυση του οπτικού πεδίου στο εσωτερικό ενός καθρέπτη Bragg ως συνάρτηση του μήκους κύματος. Όσο πιο έντονα είναι τα χρώματα τόσο πιο έντονη είναι η ένταση στο εσωτερικό του καθρέπτη [15].	68
Εικόνα 31 α) Το προφίλ του κυματοδηγού σχετικά με τον δείκτη διάθλασης καθώς και ο θεμελιώδης ρυθμός β) Κάτοψη της δομής του φράγματος που μελετήθηκε.	55
Εικόνα 32 Το προφίλ του θεμελιώδη ρυθμού καθώς και η τιμή του ενεργού δείκτη διάθλασης.	71
Εικόνα 33 - Σενάρια εξέτασης	72
Εικόνα 34 Παράδειγμα αποτελέσματος στο οποίο φαίνονται πού αντιστοιχούν οι τιμές που συμπληρώσαμε στον παρακάτω πίνακα.	73
Εικόνα 35 Γραφική παράσταση του σημείου της μέγιστης απολαβής σε συνάρτηση με το Modwidth.	75
Εικόνα 36 - Γραφική παράσταση της του πλάτους συντονισμού σε συνάρτηση με τον αριθμό των περιόδων.	75
Εικόνα 37 - Γραφική παράσταση της του πλάτους συντονισμού σε συνάρτηση με το Modwidth.	76
Εικόνα 38 - Γραφική παράσταση καμπύλης ($\Lambda=2.343$, $M=1200$, $\text{Modwidth}=2.00$).	77

Εικόνα 39 - Γραφική παράσταση του δεξιού πλευρικού λοβού σε συνάρτηση με το πλήθος των περιόδων.	77
Εικόνα 40 - Γραφική παράσταση του αριστερού πλευρικού λοβού σε συνάρτηση με το πλήθος των περιόδων.	78
Εικόνα 41 - Γραφική παράσταση του λόγου (σε dB) amplitude/lobe σε συνάρτηση με το πλήθος των περιόδων.....	79
Εικόνα 42 - Γραφική παράσταση του FWHM σε συνάρτηση με το πλήθος των περιόδων. ..	80
Εικόνα 43 - Γραφική παράσταση Stop Band σε συνάρτηση με το πλήθος των περιόδων.....	81
Εικόνα 44 - Γραφική παράσταση FWHM/Stop Band σε συνάρτηση με το πλήθος των περιόδων.	81
Εικόνα 45 - Γραφική παράσταση σημείου μέγιστης απολαβής σε συνάρτηση με το Modwidth.	82
Εικόνα 46 - Γραφική παράσταση της μέγιστης απολαβής σε συνάρτηση με το πλήθος των περιόδων.	83
Εικόνα 47 - Γραφική παράσταση της μέγιστης απολαβής σε συνάρτηση με το Modwidth. ..	83
Εικόνα 48 - Γραφική παράσταση του αριστερού πλευρικού λοβού σε συνάρτηση με το πλήθος των περιόδων.	84
Εικόνα 49 - Γραφική παράσταση του δεξιού πλευρικού λοβού σε συνάρτηση με το πλήθος των περιόδων.	84
Εικόνα 50 - Γραφική παράσταση λόγου (σε dB) Peak Amplitude/Lobe σε συνάρτηση με το πλήθος των περιόδων.....	85
Εικόνα 51 - Γραφική παράσταση FWHM σε συνάρτηση με το πλήθος των περιόδων.	86
Εικόνα 52 - Γραφική παράσταση Stop Band σε συνάρτηση με το πλήθος των περιόδων.....	86
Εικόνα 53 - Συγκριτική γραφική παράσταση της μέγιστης απολαβής σε συνάρτηση με το πλήθος των περιόδων για $\Lambda=2.343 \mu\text{m}$ και $\Lambda=2.366 \mu\text{m}$	88
Εικόνα 54 - Συγκριτική γραφική παράσταση της μέγιστης απολαβής σε συνάρτηση με το Modwidth για $\Lambda=2.343 \mu\text{m}$ και $\Lambda=2.366 \mu\text{m}$	89
Εικόνα 55 - Συγκριτική γραφική παράσταση του FWHM σε συνάρτηση με το πλήθος των περιόδων για $\Lambda=2.343 \mu\text{m}$ και $\Lambda=2.366 \mu\text{m}$	90

ΕΥΡΕΤΗΡΙΟ ΠΙΝΑΚΩΝ

Πίνακας 1 Εξεταζόμενα σενάρια.....	73
Πίνακας 2. Συγκεντρωτικά αποτελέσματα προσομοίωσης για $\Lambda=2.343 \mu\text{m}$	75
Πίνακας 3 Συγκεντρωτικά αποτελέσματα για $\Lambda=2.366 \mu\text{m}$	88

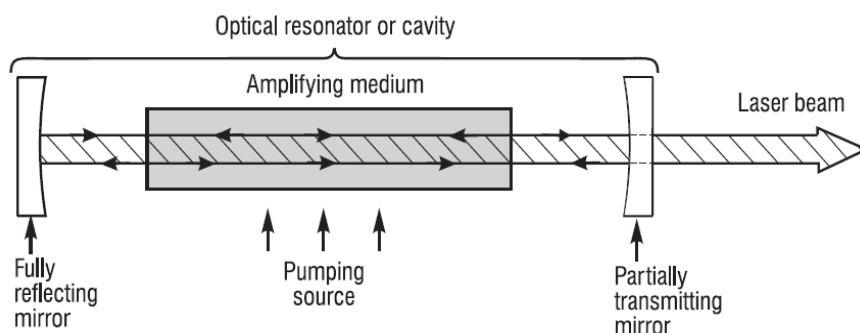
1^ο – ΚΕΦΑΛΑΙΟ

“ΓΕΝΙΚΑ ΓΙΑ ΤΑ LASER”

1.1 Εισαγωγή

Η λέξη laser προέρχεται από τα αρχικά των λέξεων Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation, δηλαδή ενίσχυση φωτός μέσω εξαναγκασμένης εκπομπής ακτινοβολίας. Η εξαναγκασμένη εκπομπή ακτινοβολίας είναι μία φυσική διαδικασία η οποία προσδιορίστηκε για πρώτη φορά από τον Αϊνστάιν και λαμβάνει χώρα όταν μία φωτεινή δέσμη διέρχεται μέσα από ένα κατάλληλο μέσο στο οποίο έχουν διεγερθεί με κατάλληλο τρόπο τα άτομα που υπάρχουν στο εσωτερικό του προκειμένου το μέσο αυτό να εκπέμψει φωτεινή ακτινοβολία. Η εκπεμπόμενη φωτεινή δέσμη έχει την ίδια κατεύθυνση και το ίδιο ακριβώς μήκος κύματος με την προσπίπτουσα φωτεινή δέσμη [1].

Μία τυπική συσκευή laser αποτελείται από ένα μέσο ενίσχυσης ή απολαβής, από μία πηγή άντλησης η οποία διοχετεύει ενέργεια στο εσωτερικό της συσκευής και από μία οπτική κοιλότητα ή διάταξη καθρεπτών, η οποία ανακλά τη φωτεινή δέσμη και την αναγκάζει να διέλθει προς τα πίσω και προς τα εμπρός, διασχίζοντας με αντίθετες κατευθύνσεις το μέσο απολαβής, με στόχο να υποστεί πρόσθετη ενίσχυση [1].



Εικόνα 1 – Μία τυπική συσκευή laser και τα επιμέρους εξαρτήματά της. Laser beam: δέσμη laser, optical resonator or cavity: οπτικό αντηχείο ή κοιλότητα, amplifying medium: μέσο ενίσχυσης, pumping source: πηγή άντλησης, partially transmitting mirror: καθρέπτης μερικής μετάδοσης, fully reflecting mirror: καθρέπτης πλήρους ανάκλασης [1].

Τα lasers είναι συσκευές που ενισχύουν την ένταση του φωτός και παράγουν στην έξοδο τους μία φωτεινή δέσμη, η οποία χαρακτηρίζεται από υψηλή κατευθυντικότητα, υψηλή ένταση, συγκεκριμένη συχνότητα (ή συγκεκριμένο μήκος κύματος). Η ισχύς που δίνει στην έξοδο του ένα laser κυμαίνεται από μερικά nWatts (10^{-9} Watts) μέχρι και 10^{21} Watts για εξαιρετικά μικρές

φωτεινές ριπές. Αντίστοιχα, τα μήκη κύματος ή οι συχνότητες που δίνει στην έξοδο του ένα laser κυμαίνονται από τη μικροκυματική και την υπέρυθη φασματική περιοχή ως την ορατή, την υπεριώδη, την υπεριώδη του κενού και τη φασματική περιοχή των ακτινών X. Επίσης, οι φωτεινές ριπές που παράγει ένα laser χαρακτηρίζονται από εξαιρετικά μικρή χρονική διάρκεια η οποία μπορεί να φτάσει ακόμα και τα $5 \cdot 10^{-15}$ δευτερόλεπτα [1].

Τα lasers αποτελούν βασικότατο εξάρτημα των σύγχρονων συστημάτων επικοινωνιών. Επιπρόσθετα χρησιμοποιούνται στα compact disk players για την ανίχνευση και την παραγωγή ηχητικών σημάτων. Επίσης χρησιμοποιούνται για την κοπή, τη θερμική επεξεργασία, τον καθαρισμό και την απομάκρυνση υλικών τόσο σε βιομηχανικές όσο και σε ιατρικές εφαρμογές. Εκτός των άλλων, τα lasers χρησιμοποιούνται ως μέσο στόχευσης βομβών καθοδηγούμενων από laser (laser-guided), ως οπτικές πηγές στα scanners ολοκλήρωσης της παραγγελίας στα σούπερ μάρκετ και στα εργαλεία παραγωγής και εκτύπωσης των microchip.

Λόγω του ξεχωριστού τρόπου διέγερσης μίας laser φωτεινής πηγής και της διάταξης που χρησιμοποιείται για την παραγωγή φωτός, τα lasers δεν είναι τόσο φτηνά όσο άλλες φωτεινές πηγές που δίνουν στην έξοδο τους φως με τιμές ισχύος συγκρίσιμες με αυτές που δίνει στην έξοδο του ένα laser. Τα lasers δεν παράγουν στην έξοδο τους λευκό φως. Αντίθετα παράγουν συγκεκριμένα «χρώματα» ή μήκη κύματος που καθορίζονται από τα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά του εκάστοτε laser [1].

1.2 Ιστορική Αναδρομή

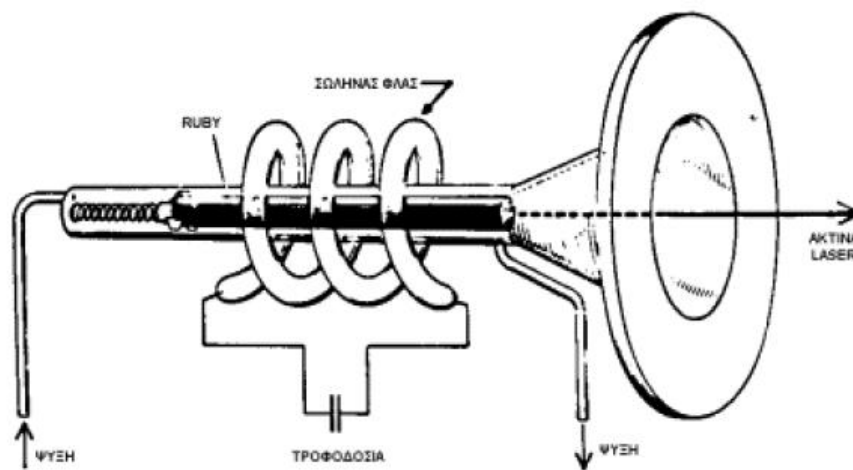
Ο Άλμπερτ Αϊνστάιν ήταν αυτός που εξήγησε πρώτος τη θεωρία της εξαναγκασμένης εκπομπής το 1917, η οποία αποτέλεσε τη βάση για τη λειτουργία των lasers. Η διατύπωση του Αϊνστάιν βασίστηκε στην υπόθεση ότι όταν λαμβάνει χώρα αναστροφή πληθυσμών μεταξύ των ανώτερων και των κατώτερων επιπέδων ενός συστήματος ατόμων, είναι πιθανό να παρατηρηθεί ενισχυμένη εξαναγκασμένη εκπομπή. Η αναστροφή πληθυσμών πραγματοποιείται έπειτα από κατάλληλη διέγερση των ατόμων (συνήθως πρόσπτωση ακτινοβολίας) και μάλιστα η δέσμη που εκπέμπεται έχει συχνότητα και φάση οι οποίες είναι ίδιες με τη συχνότητα και τη φάση του μέσου διέγερσης (συνήθως προσπίπτουσα ακτινοβολία) [3].

Από το 1920 μέχρι και το 1950 οι ερευνητές του επιστημονικού πεδίου αυτού είχαν στρέψει το ενδιαφέρον τους σε άλλους τομείς της επιστήμης, με αποτέλεσμα να μείνει αρκετά πίσω η προσπάθεια για τη σχεδίαση και την κατασκευή ενός laser, παρόλο που ήταν είδη

γνωστά τόσο η αρχή στην οποία βασίζονταν η λειτουργία όσο και τα απλουστευμένα τεχνολογικά και κατασκευαστικά του χαρακτηριστικά [2].

Στα τέλη ενός δεκαετίας του 1950 μία ομάδα από εξειδικευμένους επιστήμονες, έπειτα από πλήθος μελετών, οδηγήθηκε στο συμπέρασμα ότι υπάρχει μία πρακτικά υλοποιήσιμη συσκευή, η λειτουργία της οποίας βασίζεται στη θεωρία της εξαναγκασμένης εκπομπής. Η ομάδα αυτή αποτελούνταν από τους Charles Townes, Joseph Weber, Alexander Prokhorov και Nikolai Basov [3].

Το 1960 έλαβε χώρα στα εργαστήρια του Hughes Aircraft Corporation στην Καλιφόρνια ένα πείραμα, το οποίο οδήγησε στην κατασκευή του πρώτου laser. Το πείραμα αυτό υλοποιήθηκε από τον Theodore Maiman, ήταν σχετικά απλό και βασίζονταν στην ύπαρξη ενός κρύσταλλου από ρουβίνιο (ruby) [2], [3].



Εικόνα 2 – Το πρώτο laser που υλοποιήθηκε ποτέ βασισμένο σε ένα κρύσταλλο από ρουβίνιο (ruby) [2].

Ο κρύσταλλος είχε μήκος 2 cm και διάμετρο 9 mm. Οι δύο έδρες του ruby κρυστάλλου ήταν γυαλισμένες και είχαν πάνω τους μια λεπτή επίστρωση από άργυρο. Ο κρύσταλλος τοποθετήθηκε στο εσωτερικό ενός ελικοειδούς σωλήνα. Στο εσωτερικό του σωλήνα αυτού υπήρχε κατάλληλο φλας. Μόλις ενεργοποιούταν η λειτουργία του φλας, ο κρύσταλλος δεχόταν πολυχρωματικό φως και εξέπεμπε από το ένα του άκρο μία ιδιαίτερα λεπτή κόκκινη μονοχρωματική φωτεινή ακτίνα. Αυτή ακριβώς η διαδικασία εκπομπής αποτέλεσε την πρώτη επιτυχημένη λειτουργία μιας συσκευής laser [2].

Το 1961 ιδρύθηκε η Trion Instruments η οποία ήταν η πρώτη εμπορική εταιρία με laser. Το 1962 ο Robert Hall και ο Nick Holonyak ανακάλυψαν το πρώτο ημιαγωγικό laser στα εργαστήρια της General Electric. Τη δεκαετία του 1970 κατασκευάστηκαν lasers που

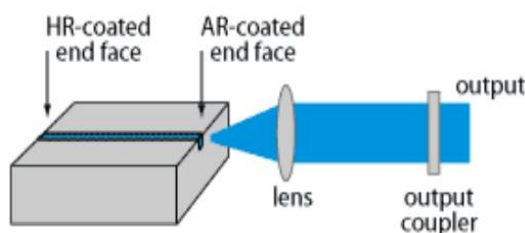
βασίζονταν σε διάφορα πολυμερή υλικά. Τα lasers αυτά αξιοποιήθηκαν σε πολλαπλές ιατρικές εφαρμογές (πχ χειρουργικές επεμβάσεις στα μάτια). Τη δεκαετία του 1980 σημειώθηκαν περαιτέρω εξελίξεις στην τεχνολογία των lasers με κυριότερη εξέλιξη τη δημιουργία laser ακτινών Χ. Κατά τις δεκαετίες που ακολούθησαν τα lasers παρουσίασαν ιδιαίτερο επιστημονικό ενδιαφέρον. Τη δεκαετία του 1990 δημιουργήθηκαν τα πρώτα κβαντικά lasers και το 2006 το πρώτο laser πυριτίου από τον John Bowers [4].

2^ο – ΚΕΦΑΛΑΙΟ

“ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ ΕΝΟΣ LASER ΕΞΩΤΕΡΙΚΗΣ ΚΟΙΛΟΤΗΤΑΣ”

2.1 Εισαγωγή

Τα lasers εξωτερικής κοιλότητας βασίζονται σε ένα ολοκληρωμένο κύκλωμα (chip) διόδου laser, το οποίο έχει συνήθως ένα άκρο με αντί-ανακλαστική επίστρωση και ένα αντηχείο που αποτελείται από ένα φακό εστίασης και ένα εξωτερικό καθρέπτη. Εναλλακτικά, το αντηχείο ενδέχεται να αποτελείται από μία οπτική ίνα. Έτσι, χρησιμοποιώντας ένα φράγμα Bragg οπτικής ίνας, είναι εφικτό να επιτευχθεί οπτική ανάδραση στενής ζώνης (narrowband) [5].



Εικόνα 3 – Δίοδος laser εξωτερικής κοιλότητας. Το chip του ημιαγωγού διαθέτει αντί-ανακλαστική επίστρωση (antireflection (AR) coating) στη μία πλευρά. Ο καθρέπτης σύζευξης της εξόδου (output coupler) παίζει το ρόλο του αντηχείου [5].

Το αντηχείο ενός laser εξωτερικής κοιλότητας εισάγει πλειάδα δυνατοτήτων και επιλογών, οι σημαντικότερες εκ των οποίων είναι:

- Όσο μακρύτερο είναι το αντηχείο τόσο αυξάνεται ο χρόνος απόσβεσης του φωτός στο εσωτερικό της κοιλότητας με αποτέλεσμα να μειώνεται ο θόρυβος φάσης και το φασματικό εύρος εκπομπής όταν το laser βρίσκεται σε λειτουργία μονής συχνότητας. Σε περίπτωση που χρησιμοποιηθεί κατάλληλο φίλτρο στο εσωτερικό της κοιλότητας (πχ φράγμα περίθλασης), τότε είναι εφικτή η περαιτέρω μείωση του φασματικού εύρους εκπομπής. Συνήθως, το φασματικό εύρος ενός laser εξωτερικής κοιλότητας είναι της τάξεως του 1 MHz.
- Η ρύθμιση του μήκους κύματος είναι εφικτή χρησιμοποιώντας ένα ρυθμιζόμενο οπτικό φίλτρο ως στοιχείο συντονισμού. Συνήθως το στοιχείο συντονισμού είναι ένα φράγμα περίθλασης [5].

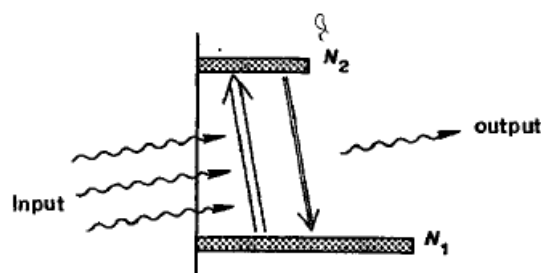
Επιπρόσθετα, τα lasers εξωτερικής κοιλότητας παρουσιάζουν μερικά ιδιαίτερα ενδιαφέροντα χαρακτηριστικά όσον αφορά το κλείδωμα του τρόπου λειτουργίας (mode locking):

- Είναι εφικτή η χρήση πρόσθετων οπτικών στοιχείων (πχ κορέσιμος απορροφητής – saturable absorber ή οπτική ίνα) στο αντηχείο του laser για το κλείδωμα του παθητικού τρόπου λειτουργίας (passive mode locking).
- Όσο μακρύτερο είναι το αντηχείο ενός laser εξωτερικής κοιλότητας τόσο μικρότερος είναι ο ρυθμός επανάληψης των παλμών (συνήθως είναι λίγο πάνω από 1 GHz). Επίσης ο ρυθμός επανάληψης των παλμών είναι εφικτό να τροποποιηθεί αλλάζοντας το μήκος του αντηχείου.
- Ακόμα και για υψηλούς ρυθμούς επανάληψης της τάξεως μερικών δεκάδων GHz, τα lasers εξωτερικής κοιλότητας λειτουργούν με αρμονικό τρόπο κλειδώματος διότι παρουσιάζουν μικρότερο θόρυβο (πχ διακύμανση χρονισμού – timing jitter).

Τα ρυθμιζόμενα lasers εξωτερικής κοιλότητας χρησιμοποιούν συνήθως ένα φράγμα περίθλασης στο εξωτερικό αντηχείο το οποίο λειτουργεί ως στοιχείο επιλογής του μήκους κύματος. Για το λόγο αυτό καλούνται και lasers σταθεροποιούμενα με φράγμα (grating-stabilized). Τα mode locked lasers εξωτερικής κοιλότητας χρησιμοποιούνται συνήθως για την αναμετάδοση δεδομένων στις οπτικές επικοινωνίες. Οι ρυθμιζόμενες συσκευές χρησιμοποιούνται ευρέως στη φασματοσκοπία [5].

2.2 Ενίσχυση Laser

Προκειμένου να ερμηνευθεί η λειτουργία ενίσχυσης ενός laser, αρχικά πραγματοποιείται η υπόθεση ότι διοχετεύεται ακτινοβολία μέσω ενός συνόλου απορροφητικών ατόμων με συχνότητα ω , η οποία έχει τιμή πολύ κοντινή στη συχνότητα μετάβασης ω_{21} μεταξύ δύο ενεργειακών σταθμών E_1 και E_2 των ατόμων αυτών. Έστω ότι το πλήθος των ατόμων ανά μονάδα όγκου, σε κάθε μία από τις δύο αυτές ενεργειακές στάθμες, είναι N_1 και N_2 αντίστοιχα.



Εικόνα 4 – Διέλευση ακτινοβολίας μέσω πλήθους απορροφητικών ατόμων [6].

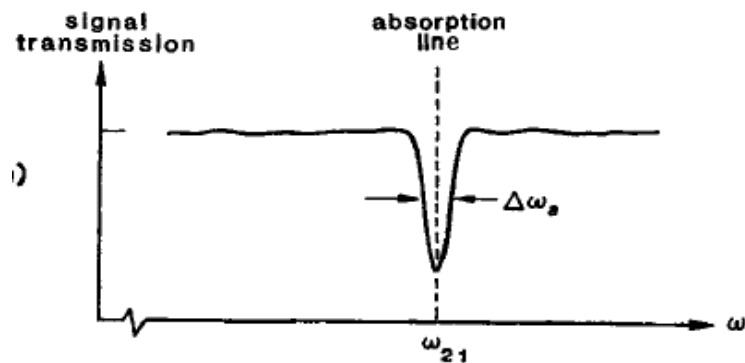
Η ένταση της μεταδιδόμενης ακτινοβολίας θα μεταβάλλεται ή θα εξασθενεί, καθώς διέρχεται μέσα από το πλήθος των απορροφητικών ατόμων, σύμφωνα με τη σχέση:

$$E(z) = E_0 \exp[-\alpha(\omega)z] \quad (2.1)$$

όπου z η απόσταση στην οποία διαδίδεται η ακτινοβολία, $E(z)$ η τιμή της έντασης της μεταδιδόμενης ακτινοβολίας σε απόσταση z , E_0 η αρχική τιμή της έντασης της μεταδιδόμενης ακτινοβολίας και $\alpha(\omega)$ ο συντελεστής εξασθένισης [6]. Ο συντελεστής εξασθένισης δίνεται από τη σχέση:

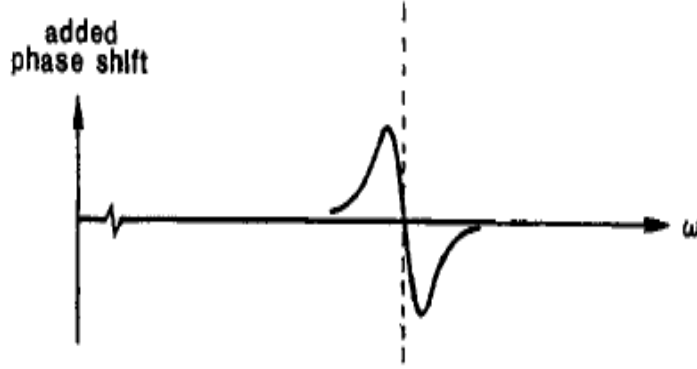
$$\alpha(\omega) = \frac{\lambda^2 \gamma_{rad}}{4 \pi \Delta\omega_\alpha} \frac{N_1 - N_2}{1 + \left[\frac{2(\omega - \omega_{21})}{\Delta\omega_\alpha} \right]^2} \quad (2.2)$$

όπου λ το μήκος κύματος μετάβασης στο υλικό του laser, γ_{rad} ο ρυθμός απόσβεσης κατά τη μετάβαση, $N_1 - N_2$ η διαφορά του πλήθους των ατόμων ανά μονάδα όγκου μεταξύ των ενεργειακών σταθμών E_1 και E_2 , ω η συχνότητα της μεταδιδόμενης ακτινοβολίας, ω_{21} η συχνότητα μετάβασης μεταξύ των ενεργειακών σταθμών E_1 και E_2 και $\Delta\omega_\alpha$ το φασματικό εύρος μετάδοσης.



Εικόνα 5 – Καμπύλη συντονισμού με πεπερασμένο εύρος γραμμής $\Delta\omega_\alpha$ (εύρος ζώνης) στην οποία απεικονίζεται η εξασθένιση της έντασης και της ισχύος ανά μονάδα επιφάνειας [6].

Στο σημείο αυτό είναι άξιο αναφοράς το γεγονός ότι κατά τη διάδοση ακτινοβολίας μέσω του απορροφητικού υλικού ενός laser, η ακτινοβολία υφίσταται ολίσθηση φάσης (η οποία εξαρτάται από τη συχνότητα) εξαιτίας των απορροφητικών ατόμων [6].



Εικόνα 6 – Η ολίσθηση φάσης που υφίσταται η ακτινοβολία κατά τη διέλευση της μέσω του απορροφητικού υλικού ενός laser [6].

Η ροή ισχύος ανά μονάδα επιφάνειας της μεταδιδόμενης μέσω των απορροφητικών ατόμων ακτινοβολίας, δίνεται από τη σχέση:

$$I(z) = |E(z)|^2 = I_0 \exp[-2\alpha(\omega)z] \quad (2.3)$$

όπου z η απόσταση στην οποία διαδίδεται η ακτινοβολία, $I(z)$ η τιμή της ισχύος ανά μονάδα επιφάνειας της μεταδιδόμενης ακτινοβολίας σε απόσταση z , I_0 η αρχική τιμή της ισχύος ανά μονάδα επιφάνειας της μεταδιδόμενης ακτινοβολίας και $\alpha(\omega)$ ο συντελεστής εξασθένησης.

Από την τελευταία σχέση γίνεται αντιληπτό ότι η ισχύς ανά μονάδα επιφάνειας εξασθενεί καθώς μεταβάλλεται η απόσταση διάδοσης με ρυθμό $\frac{dI(z)}{dz} = -2\alpha(\omega)I(z)$. Αν υποθεθεί ότι η διαφορά του πλήθους των ατόμων ανά μονάδα όγκου μεταξύ των ενεργειακών σταθμών E_1 και E_2 δύναται να αλλάξει πρόσημο μέσω κατάλληλης διαδικασίας άντλησης, τότε πραγματοποιείται αναστροφή πληθυσμών. Στην περίπτωση αυτή ο συντελεστής απορρόφησης αλλάζει πρόσημο και μετατρέπεται σε συντελεστή ενίσχυσης:

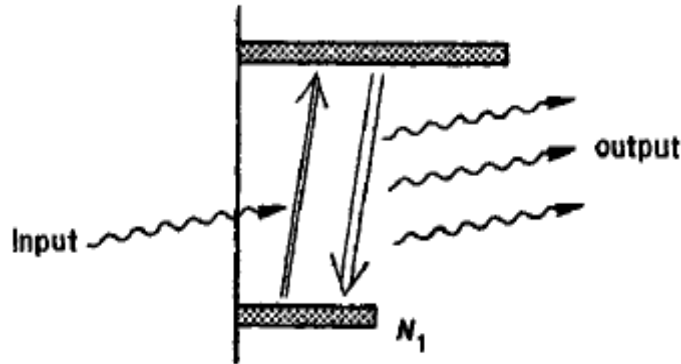
$$-\alpha(\omega) \equiv \alpha_m(\omega) = \frac{\lambda^2 \gamma_{rad}}{4 \pi \Delta\omega_\alpha} \frac{N_2 - N_1}{1 + \left[\frac{2(\omega - \omega_{21})}{\Delta\omega_\alpha} \right]^2} \quad (2.4)$$

όπου $\alpha_m(\omega)$ ο συντελεστής ενίσχυσης του laser [6].

Στην περίπτωση αυτή, τόσο το πλάτος όσο και η ισχύς ανά μονάδα επιφάνειας της μεταδιδόμενης ακτινοβολίας, θα αυξάνονται με την αύξηση της απόστασης διάδοσης, σύμφωνα με τις παρακάτω εξισώσεις:

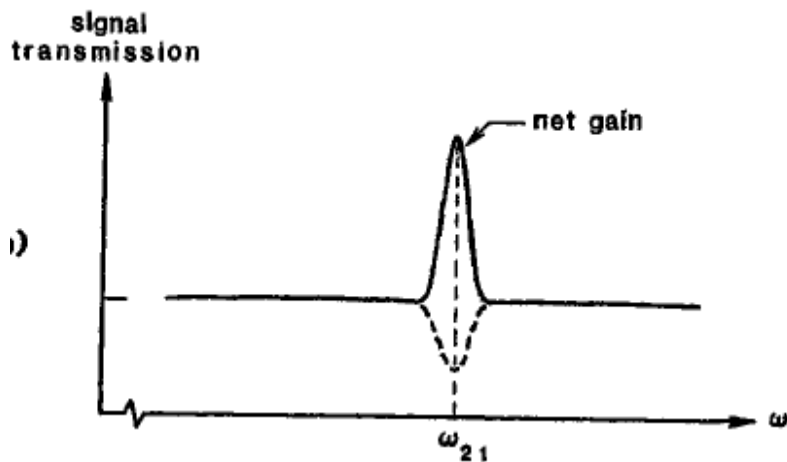
$$E(z) = E_0 \exp[+\alpha_m(\omega)z] \quad (2.5)$$

$$I(z) = |E(z)|^2 = I_0 \exp[+2\alpha_m(\omega)z] \quad (2.6)$$



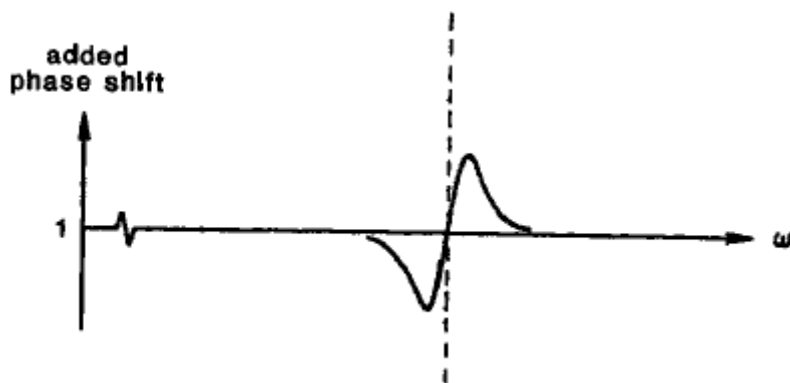
Εικόνα 7 – Η ενίσχυση της ακτινοβολίας που διέρχεται από ένα αντεστραμμένο πλήθος ατόμων [6].

Η ενέργεια για την ενίσχυση της έντασης και της ισχύος ανά μονάδα επιφάνειας προέρχεται από τα αντεστραμμένα άτομα (N_2) τα οποία βρίσκονται στο άνω ενεργειακό επίπεδο (E_2). Βέβαια τα άτομα (N_1) του κατώτερου ενεργειακού επιπέδου (E_1) απορροφούν ενέργεια, όμως υπερिशύει η ενέργεια που προσφέρουν τα άτομα (N_2) του ανώτερου ενεργειακού επιπέδου (E_2) τα οποία είναι περισσότερα σε πλήθος.



Εικόνα 8 – Καμπύλη συντονισμού με πεπερασμένο εύρος γραμμής $\Delta\omega_a$ (εύρος ζώνης) στην οποία απεικονίζεται η ενίσχυση της έντασης και της ισχύος ανά μονάδα επιφάνειας [6].

Αξίζει να αναφερθεί ότι ο συντελεστής ενίσχυσης $a_m(\omega)$ έχει το ίδιο ακριβώς σχήμα γραμμής και τις ίδιες ιδιότητες με το συντελεστή απορρόφησης $a(\omega)$. Η μόνη διαφορά μεταξύ της διεγερμένης απορρόφησης και της διεγερμένης εκπομπής είναι το πρόσημο της διαφοράς του πλήθους των ατόμων. Η ολίσθηση φάσης αλλάζει πρόσημο καθώς αλλάζει πρόσημο η διαφορά του πλήθους των ατόμων μεταπίπτοντας από διαφορά απορρόφησης σε διαφορά ενίσχυσης [6].



Εικόνα 9 – Η ολίσθηση φάσης της διερχόμενης μέσω του αντεστραμμένου πλήθους ατόμων ακτινοβολίας, έχει υποστεί και αυτή αναστροφή [6].

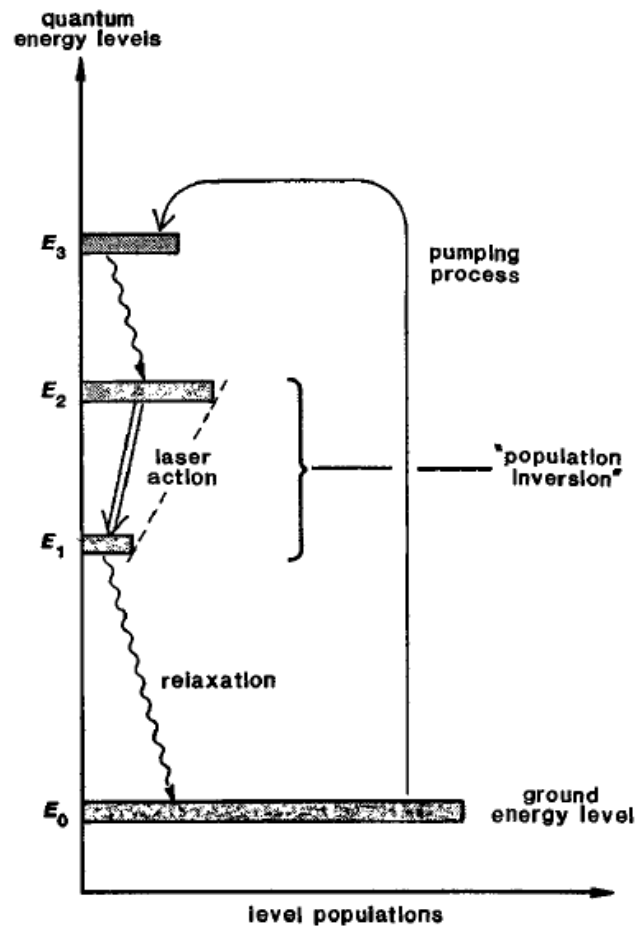
2.3 Άντληση Laser και Αναστροφή Πληθυσμών

Στην παρούσα παράγραφο παρουσιάζεται και ερμηνεύεται η διαδικασία άντλησης η οποία δημιουργεί την απαραίτητη αναστροφή πληθυσμών προκειμένου ένα laser να λειτουργεί ενισχυτικά. Για το σκοπό αυτό χρησιμοποιείται ένα απλοποιημένο ρεαλιστικό μοντέλο ατόμων με τέσσερις διαφορετικές ενεργειακές στάθμες. Η ερμηνεία βασίζεται στην υπόθεση ότι υπάρχει μία ενεργειακή στάθμη η οποία έχει τη μικρότερη ενέργεια (ενεργειακή στάθμη αναφοράς – ground energy level) E_0 και δύο αμέσως υψηλότερες ενεργειακές στάθμες E_1 και E_2 μεταξύ των οποίων λειτουργεί το laser. Επιπρόσθετα υπάρχει μία ομάδα από υψηλότερες ενεργειακές στάθμες στις οποίες λαμβάνει χώρα αποτελεσματική άντληση (effective pumping) από την ενεργειακή στάθμη αναφοράς E_0 . Προς χάρη της απλότητας, η ομάδα αυτή των ενεργειακών σταθμών αναπαρίσταται από την άνω ενεργειακή στάθμη άντλησης E_3 . Στην κατάσταση θερμικής ισορροπίας (σχέση Boltzmann) τα άτομα βρίσκονται στην ενεργειακή στάθμη αναφοράς E_0 .

Έστω ότι ο ρυθμός άντλησης από την ενεργειακή στάθμη αναφοράς E_0 προς την ανώτερη ενεργειακή στάθμη E_3 είναι R_{p0} άτομα ανά δευτερόλεπτο. Σε αρκετά όμως lasers, ένα κλάσμα n_p των διεγερμένων ατόμων αποδιεγείρονται από την ανώτερη ενεργειακή στάθμη E_3 προς τα κάτω (ενεργειακή στάθμη E_2 ή E_1 ή E_0). Έτσι στην ανώτερη ενεργειακή στάθμη E_3 , φτάνουν άτομα με ρυθμό R_p (άτομα ανά δευτερόλεπτο). Συνεπώς το κλάσμα n_p χαρακτηρίζεται ως η απόδοση άντλησης του laser και δίνεται από τη σχέση:

$$n(p) = \frac{R_p}{R_{p0}} \quad (2.7)$$

Οι τιμές που παίρνει η απόδοση άντλησης η_p είναι απειροστά μεγαλύτερες του μηδενός έως απειροστά μικρότερες του ένα [6].



Εικόνα 10 – Μοντέλο ατόμων με τέσσερις διαφορετικές ενεργειακές στάθμες για την ερμηνεία της λειτουργίας άντλησης που δημιουργεί την απαραίτητη αναστροφή πληθυσμών προκειμένου το laser να λειτουργεί ενισχυτικά [6].

Έστω ότι τα άτομα της ενεργειακής στάθμης E_2 αποδιεγείρονται προς την ενεργειακή στάθμη E_1 με ρυθμό αποδιέγερσης γ_{21} και από την ενεργειακή στάθμη E_1 προς την ενεργειακή στάθμη E_0 με ρυθμό αποδιέγερσης γ_{10} . Σε αρκετά lasers το κλάσμα των ατόμων που διεγείρονται από την ενεργειακή στάθμη αναφοράς E_0 προς τις ανώτερες ενεργειακές στάθμες είναι αρκετά μικρό με αποτέλεσμα το πλήθος των ατόμων που παραμένουν στην ενεργειακή στάθμη E_0 να παραμένει πρακτικά αμετάβλητο είτε πραγματοποιείται η διαδικασία άντλησης είτε όχι. Έτσι η ροή των ατόμων μεταξύ των ενεργειακών σταθμών υπό την επίδραση των διαδικασιών άντλησης και αποδιέγερσης είναι εφικτό να περιγραφεί χρησιμοποιώντας τις εξισώσεις:

$$\frac{dN_2}{dt} \approx R_p - \gamma_{21}N_2 \quad (2.8)$$

$$\frac{dN_1}{dt} \approx \gamma_{21}N_2 - \gamma_{10}N_1 \quad (2.9)$$

όπου $\frac{dN_2}{dt}$ ο ρυθμός μεταβολής των ατόμων ανά μονάδα όγκου στην ενεργειακή στάθμη E_2 , $\frac{dN_1}{dt}$ ο ρυθμός μεταβολής των ατόμων ανά μονάδα όγκου στην ενεργειακή στάθμη E_1 , γ_{21} ο ρυθμός αποδιέγερσης των ατόμων από την ενεργειακή στάθμη E_2 προς την ενεργειακή στάθμη E_1 , γ_{10} ο ρυθμός αποδιέγερσης των ατόμων από την ενεργειακή στάθμη E_1 προς την ενεργειακή στάθμη E_0 και R_p ο ρυθμός με τον οποίο διεγείρονται τα άτομα προς μία ανώτερη ενεργειακή στάθμη [6].

Όπως γίνεται αντιληπτό οι δύο παραπάνω εξισώσεις εμπεριέχουν το ρυθμό άντλησης προς ανώτερη ενεργειακή στάθμη και το ρυθμό αποδιέγερσης προς κατώτερη ενεργειακή στάθμη, εστιάζοντας στις ενεργειακές στάθμες E_1 και E_2 . Σε περίπτωση που η διαδικασία άντλησης εφαρμόζεται με συνεχή τρόπο και το σύστημα φτάσει σε μία σταθερή κατάσταση (steady state) ισορροπίας στην οποία ισχύει $\frac{dN_1}{dt} = \frac{dN_2}{dt} \equiv 0$, τότε οι δύο τελευταίες εξισώσεις θα έχουν λύσεις:

$$N_{2,ss} = \frac{R_p}{\gamma_{21}} \quad (2.10)$$

$$N_{1,ss} = \left(\frac{\gamma_{21}}{\gamma_{10}} \right) N_{2,ss} \quad (2.11)$$

$$(N_2 - N_1)_{ss} = \frac{R_p (\gamma_{10} - \gamma_{21})}{\gamma_{10} \gamma_{21}} = R_p \tau_{21} x \left(1 - \frac{\tau_{10}}{\tau_{21}} \right) \quad (2.12)$$

όπου $\tau_{21} = \frac{1}{\gamma_{21}}$ και $\tau_{10} = \frac{1}{\gamma_{10}}$ (χρόνοι ζωής ανώτερων ενεργειακών επιπέδων) και $(N_2 - N_1)_{ss}$ η διαφορά του πλήθους των ατόμων ανά μονάδα όγκου μεταξύ των ενεργειακών σταθμών E_2 και E_1 .

Η τελευταία σχέση δείχνει ότι αν ο ρυθμός αποδιέγερσης γ_{10} είναι μεγαλύτερος από το ρυθμό αποδιέγερσης γ_{21} ($\gamma_{10} > \gamma_{21}$), ώστε να ισχύει $\tau_{10} < \tau_{21}$, τότε θα υπάρξει αναπόφευκτα μία αναστροφή πληθυσμών κατά τη μετάβαση του laser από τη στάθμη 2 προς τη στάθμη 1 η οποία θα οφείλεται στη διαδικασία άντλησης. Η τελευταία σχέση είναι η απαραίτητη προϋπόθεση για την ύπαρξη αναστροφής πληθυσμών. Το αν η αναστροφή πληθυσμών είναι αρκετά μεγάλη προκειμένου να καταστεί εφικτή η συνεχόμενη ενισχυτική λειτουργία του laser, εξαρτάται από την απόδοση και την ισχύ της πραγματοποιούμενης άντλησης [6].

Προκειμένου η αναστροφή πληθυσμών να είναι συνεχόμενη θα πρέπει τα άτομα να αποδιεγείρονται από την ενεργειακή στάθμη E_1 προς την ενεργειακή στάθμη E_0 με ρυθμό μεγαλύτερο από αυτόν που αποδιεγείρονται από την ενεργειακή στάθμη E_2 προς την ενεργειακή στάθμη E_1 . Επίσης το εύρος της αναστροφής πληθυσμών εξαρτάται από το μέγεθος του ρυθμού άντλησης R_p και από τον παράγοντα $\tau_{21} \equiv \frac{1}{\gamma_{21}}$ (χρόνος ζωής ανώτερου ενεργειακού επιπέδου).

Οι δύο ευρύτερα χρησιμοποιούμενες διαδικασίες άντλησης σε ένα laser είναι οι εκκενώσεις αερίων και η οπτική άντληση.

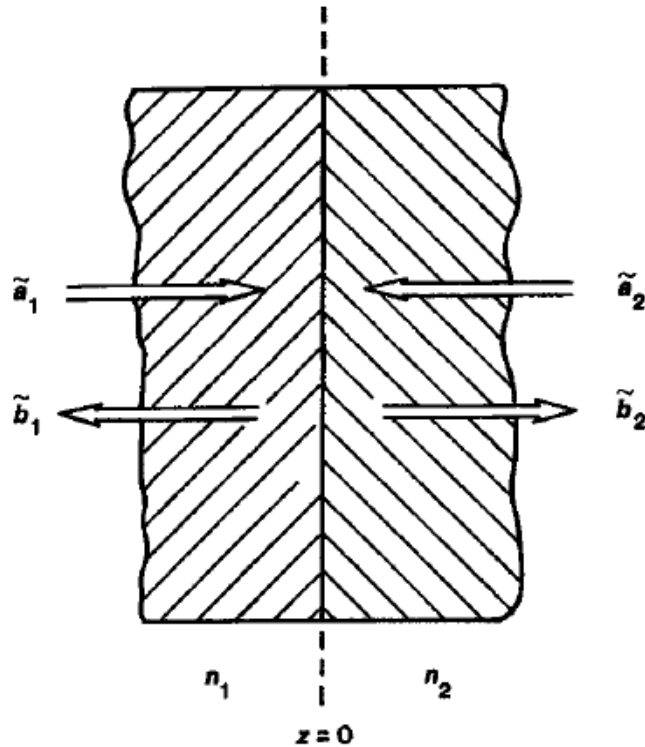
- Οι εκκενώσεις αερίων μπορεί να είναι συνεχείς (σε αέρια χαμηλής πίεσης) ή παλμικές (σε αέρια υψηλής πίεσης). Η άμεση αλληλεπίδραση ηλεκτρονίων με άτομα ή ιόντα και η μεταφορά ενέργειας λόγω συγκρούσεων μεταξύ διαφορετικών ατόμων είναι οι δύο βασικοί μηχανισμοί που υποβοηθούν τη διαδικασία της άντλησης κατά την εκκένωση ενός αερίου.
- Οι τεχνικές οπτικής άντλησης ενδέχεται να είναι επίσης συνεχείς ή παλμικές. Οι πηγές του φωτός άντλησης μπορεί να είναι λαμπτήρες συνεχούς ηλεκτρικού τόξου, παλμικοί λαμπτήρες στιγμιαίου φωτός (flashlamps), κατάλληλα εστιασμένο ηλιακό φως ή κάποιο άλλο laser. Επίσης, είναι εφικτό να πραγματοποιηθεί οπτική άντληση χρησιμοποιώντας δέσμες ηλεκτρονίων υψηλής τάσης ή με άμεση έγχυση ρεύματος κατά μήκος της επαφής ενός ημιαγωγικού laser [6].

2.4 Καθρέπτες Laser

Οι καθρέπτες και οι διαχωριστές δέσμης ενός laser εμφανίζουν μερικές θεμελιώδεις ιδιότητες, οι οποίες είναι άξιο να παρουσιαστούν προκειμένου να είναι πιο εύκολο να αναλυθεί ο τρόπος χρήσης των καθρεπτών στην κοιλότητα ενός laser. Στις παραγράφους που ακολουθούν παρουσιάζονται μερικοί σημαντικοί τύποι καθρεπτών και οι ιδιότητες που τους συνοδεύουν.

2.4.1 Απλή Διηλεκτρική Επιφάνεια

Η απλή διηλεκτρική επιφάνεια αποτελεί το απλούστερο παράδειγμα τμηματικού διηλεκτρικού καθρέπτη ή διαχωριστή δέσμης. Πρόκειται για την επιφάνεια μεταξύ δύο διηλεκτρικών μέσων.



Εικόνα 11 – Ανάκλαση και διάδοση οπτικών κυμάτων σε μία διηλεκτρική επιφάνεια [6].

Τα κανονικοποιημένα πεδία για τα προσπίπτοντα και τα ανακλώμενα κύματα στις δύο πλευρές της διηλεκτρικής επιφάνειας (που επισημαίνονται με τους δείκτες $i=1,2$) δίνονται από τη σχέση:

$$E_i(z, t) = \text{Re}\{\tilde{a}_i \exp[j(\omega t \mp \beta_i z)] + \tilde{b}_i \exp[j(\omega t \pm \beta_i z)]\} \text{ με } i=1,2 \quad (2.13)$$

όπου β_i η σταθερά διάδοσης στο διηλεκτρικό μέσο που βρίσκεται στην αριστερή πλευρά της διηλεκτρικής επιφάνειας, \tilde{a}_1 είναι το κανονικοποιημένο πλάτος του προσπίπτοντος κύματος στην αριστερή πλευρά της διηλεκτρικής επιφάνειας και \tilde{b}_1 είναι το κανονικοποιημένο πλάτος του ανακλώμενου κύματος στην αριστερή πλευρά της διηλεκτρικής επιφάνειας. Τα αντίστοιχα μεγέθη ($\beta_2, \tilde{a}_2, \tilde{b}_2$) για τη δεξιά πλευρά της διηλεκτρικής επιφάνειας λαμβάνονται θέτοντας στην τελευταία εξίσωση $i=2$. Επίσης, E_i είναι το πλάτος του πεδίου το οποίο ικανοποιείται έτσι ώστε το $|E_i|^2$ να δίνει την ένταση ή τη ροή της ισχύος στο μέσο σε κάθε μία από τις δύο πλευρές της επαφής.

Η παραπάνω σχέση γίνεται $E_i(z, t) = \text{Re}\{\tilde{a}_1 \exp[j(\omega t - \beta_1 z)] + \tilde{b}_1 \exp[j(\omega t + \beta_1 z)]\}$ όταν υπάρχει αναφορά στην αριστερή πλευρά της διηλεκτρικής επιφάνειας έτσι ώστε το \tilde{a}_1 να αναπαριστά το πλάτος του προσπίπτοντος κύματος που διαδίδεται προς τα δεξιά (προς τον άξονα $+z$) και το \tilde{b}_1 να αναπαριστά το πλάτος του ανακλώμενου κύματος που διαδίδεται προς τα αριστερά (προς τον άξονα $-z$).

Αντίστοιχα, η παραπάνω σχέση λαμβάνει την εξής μορφή $E_i(z, t) = \text{Re}\{\tilde{a}_2 \exp[j(\omega t + \beta_i z)] + \tilde{b}_2 \exp[j(\omega t - \beta_i z)]\}$ όταν υπάρχει αναφορά στη δεξιά πλευρά της διηλεκτρικής επιφάνειας, έτσι ώστε το \tilde{a}_2 να αναπαριστά το πλάτος του προσπίπτοντος κύματος που διαδίδεται προς τα αριστερά και το \tilde{b}_2 να αναπαριστά το πλάτος του ανακλώμενου κύματος που διαδίδεται προς τα δεξιά.

Οι ιδιότητες ανάκλασης και διάδοσης για μία απλή διηλεκτρική επιφάνεια για κάθετη πρόσπτωση δίνονται από τις σχέσεις:

$$\tilde{b}_1 = r\tilde{a}_1 + t\tilde{a}_2 \quad (2.14)$$

$$\tilde{b}_2 = t\tilde{a}_1 - r\tilde{a}_2 \quad (2.15)$$

όπου ο συντελεστής ανάκλασης r και ο συντελεστής διάδοσης t , δίνονται από τις παρακάτω σχέσεις:

$$r = \frac{n_1 - n_2}{n_1 + n_2} \quad (2.16)$$

$$t = \frac{2\sqrt{n_1 n_2}}{n_1 + n_2} \quad (2.17)$$

όπου n_1 ο δείκτης διάθλασης στο μέσο που βρίσκεται αριστερά της επιφάνειας και n_2 ο δείκτης διάθλασης στο μέσο που βρίσκεται δεξιά της επιφάνειας.

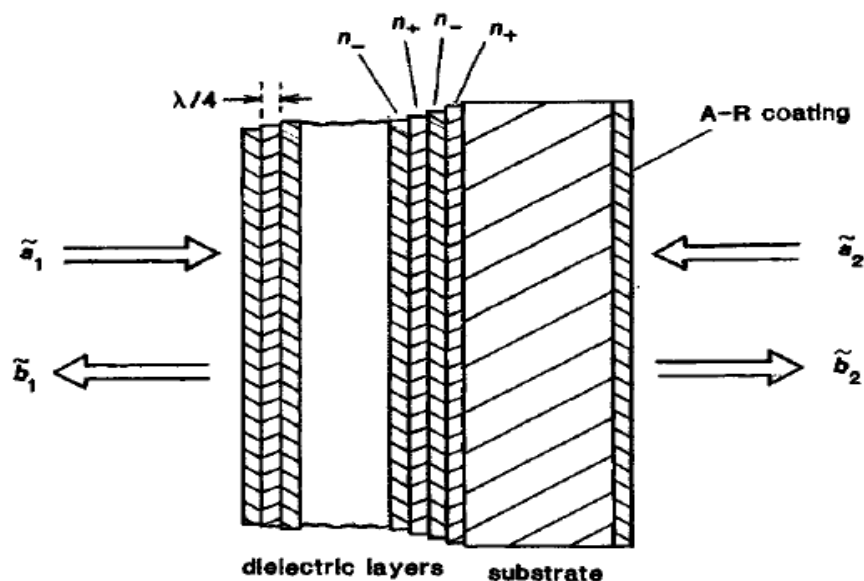
Η σχέση $r^2 + t^2 = 1$ προσδιορίζει την άνευ απωλειών φύση (lossless nature) της διηλεκτρικής επιφάνειας. Επίσης, είναι άξιο αναφοράς ότι όλες οι παραπάνω σχέσεις γράφτηκαν θεωρώντας ως επίπεδο αναφοράς τη διηλεκτρική επιφάνεια ($z=0$). Έτσι, οι συντελεστές \tilde{a}_i και \tilde{b}_i εκφράζουν τα πλάτη των σύνθετων κυμάτων ακριβώς στην επιφάνεια μεταξύ των δύο διηλεκτρικών [6].

Για τη συγκεκριμένη επιφάνεια και τον ορισμό της ως επίπεδο αναφοράς ($z=0$), οι συντελεστές r και t λαμβάνουν μόνο πραγματικές τιμές. Το πρόσημο του συντελεστή ανάκλασης καθορίζεται από την κατεύθυνση προς την οποία το κύμα προσεγγίζει την επιφάνεια. Η αλλαγή πρόσημου έχει φυσικό νόημα διότι ένα μέσο με πολύ υψηλό δείκτη διάθλασης δρα ως μεταλλική επιφάνεια ή ως πολύ μεγάλος πυκνωτής διακλάδωσης κατά μήκος μίας γραμμής μεταφοράς. Η μετάβαση από ένα μέσο με χαμηλό δείκτη διάθλασης σε ένα μέσο με υψηλό δείκτη διάθλασης ($n_2 > n_1$) μοιάζει με την ανάκλαση από το άκρο μίας βραχυκυκλωμένης γραμμής μεταφοράς με ολίσθηση φάσης κατά 180° ($r < 0$). Αντίστοιχα, η μετάβαση από ένα μέσο με υψηλό δείκτη διάθλασης σε ένα μέσο με χαμηλό δείκτη διάθλασης

($n_2 < n_1$) μοιάζει με την ανάκλαση από το άκρο μίας γραμμής μεταφοράς που συμπεριφέρεται ως ανοιχτό κύκλωμα και έχει συντελεστή ανάκλασης $r > 0$ [6].

2.4.2 Διηλεκτρικοί Καθρέπτες Πολλαπλών Επιπέδων

Στην εικόνα που ακολουθεί παρουσιάζεται η δομή ενός τυπικού διηλεκτρικού καθρέπτη πολλαπλών επιπέδων που χρησιμοποιείται συνήθως σε ένα laser εξωτερικής κοιλότητας. Ένας τέτοιος καθρέπτης ενδέχεται να αποτελείται από 20 ή παραπάνω διηλεκτρικά επίπεδα (πάχους $\lambda/4$ όπου λ το μήκος κύματος της προσπίπτουσας οπτικής ακτινοβολίας) μεταξύ των οποίων παρατηρείται εναλλαγή του δείκτη διάθλασης από χαμηλές σε υψηλές τιμές. Τα διηλεκτρικά επίπεδα τοποθετούνται πάνω σε κατάλληλο διαφανές υπόστρωμα. Η άλλη πλευρά του υποστρώματος διαθέτει αντανακλαστική επίστρωση υψηλής ποιότητας. Οι δύο πλευρές του υποστρώματος αποκλίνουν κατά μερικές μοίρες μεταξύ τους προκειμένου να αποφευχθούν οι τύπου etalon (συμβολόμετρο Fabry-Perot κατασκευασμένο από δύο διάφανες πλάκες με ανακλαστικές επιστρώσεις) επιδράσεις που οφείλονται σε οπισθοανάκλαση [6].



Εικόνα 12 – Ανάκλαση και διάδοση οπτικών κυμάτων μέσω ενός διηλεκτρικού καθρέπτη πολλαπλών επιπέδων [6].

Στα απλά παραδείγματα καθρεπτών που παρουσιάστηκαν, οι ανακλαστικές επιφάνειες βρίσκονται ακριβώς στις φυσικές επιφάνειες των διηλεκτρικών. Στην παράγραφο που ακολουθεί αναλύεται το που πρέπει να βρίσκεται η ενεργός επιφάνεια του καθρέπτη, δηλαδή το επίπεδο αναφοράς ($z=0$) [6].

2.4.3 Επίπεδα Αναφοράς Καθρέπτων

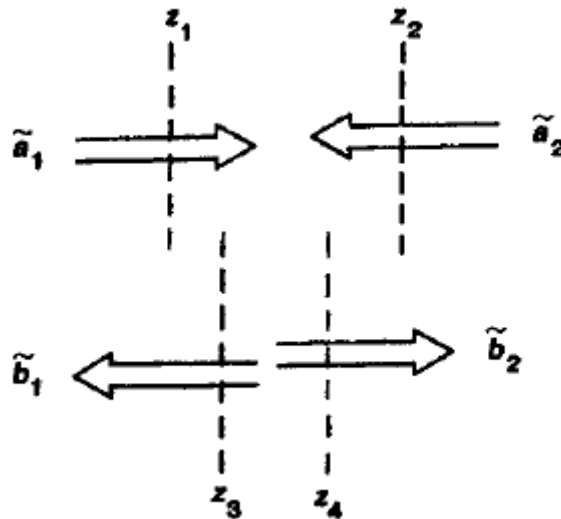
Στους διηλεκτρικούς καθρέπτες πολλαπλών επιπέδων δεν υπάρχει κάποιο συγκεκριμένο επίπεδο το οποίο να πρέπει να οριστεί ως επίπεδο αναφοράς ($z=0$). Η συνολική ανάκλαση από τον καθρέπτη, όπως φαίνεται έξω από τα στρώματα επικάλυψης (σε κάθε πλευρά), αναπτύσσεται σταδιακά μέσω της ακολουθίας των στρωμάτων τα οποία ενδέχεται να έχουν συνολικό πάχος της τάξεως μερικών μηκών κύματος.

Η επιλογή του επιπέδου αναφοράς στους διηλεκτρικούς καθρέπτες πολλαπλών επιπέδων είναι εντελώς αυθαίρετη. Έτσι, είναι εφικτό να επιλεγεί οποιοδήποτε λογικό επίπεδο αναφοράς ακόμα και εκτός του καθρέπτη πολλαπλών επιπέδων. Από φυσικής άποψης, η επιλογή του επιπέδου αναφοράς είναι στην ουσία η επιλογή του αρχικού σημείου ($z=0$) για τη μέτρηση των ηλεκτρικών πεδίων $E(z,t)$ έξω από τον καθρέπτη, υποθέτοντας ότι η κατανομή των πεδίων στο χώρο περιγράφεται από την εξίσωση (2.13).

Στην περίπτωση μίας απλής διηλεκτρικής επιφάνειας, δεν είναι απαραίτητη η επιλογή του επιπέδου αναφοράς του καθρέπτη ακριβώς στη φυσική επιφάνεια μεταξύ των δύο διηλεκτρικών, δεδομένου ότι είναι ιδιαίτερα σπάνια η τοποθέτηση οποιουδήποτε καθρέπτη ή οποιουδήποτε οπτικού στοιχείου με απόλυτη ακρίβεια θέσης μεγαλύτερη από μερικά οπτικά μήκη κύματος.

Από τη στιγμή που η μελέτη επικεντρώνεται μόνο στα πλάτη και στις φάσεις των κυμάτων, σε μεγάλες αποστάσεις (μεγαλύτερες από μερικά μήκη κύματος) από την ανακλαστική επιφάνεια, είναι εφικτό να επιλεγεί το επίπεδο αναφοράς οπουδήποτε κοντά στην ανακλαστική επιφάνεια. Η ολίσθηση του επιπέδου αναφοράς από μία αξονική θέση σε μία άλλη θέση που απέχει Δz , οδηγεί σε περιστροφή των γωνιών φάσης των πλατών α_i και \tilde{b}_i του σύνθετου κύματος κατά $\exp(\pm j\beta_i \Delta z)$, χωρίς όμως να μεταβληθούν τα πλάτη αυτά. Αυτή ακριβώς η περιστροφή των γωνιών φάσης των \tilde{a}_i και \tilde{b}_i προσδίδει διαφορετικές γωνίες φάσης σε κάθε ένα από τους συντελεστές σκέδασης \tilde{S}_{ij} .

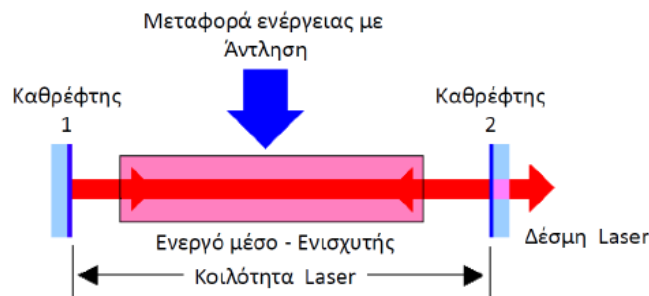
Επίσης είναι άξιο να τονιστεί ότι είναι εφικτή η επιλογή διαφορετικών επιπέδων αναφοράς για τη μέτρηση των σύνθετων εισερχόμενων και διαφορετικών για τη μέτρηση των σύνθετων εξερχόμενων κυμάτων σε κάθε βραχίονα [6].



Εικόνα 13 – Τα επίπεδα αναφοράς των προσπιπτόντων και των ανακλώμενων κυμάτων δεν είναι απαραίτητο να βρίσκονται στην ίδια θέση [6].

2.5 Κοιλότητες Laser

Για τη δημιουργία μίας δέσμης laser είναι απαραίτητη η χρήση κατάλληλου σχήματος θετικής ανάδρασης. Η διάταξη που παρέχει τη θετική ανάδραση ονομάζεται ταλαντωτής (oscillator). Η δημιουργία της διάταξης αυτής βασίζεται στην τοποθέτηση του ενεργού μέσου μεταξύ δύο καθρεπτών, οι οποίοι χαρακτηρίζονται από υψηλή ανακλαστικότητα. Η συνολική διάταξη που σχηματίζεται με τον τρόπο αυτό καλείται κοιλότητα laser (laser cavity).



Εικόνα 14 – Η κοιλότητα (cavity) ενός laser [7].

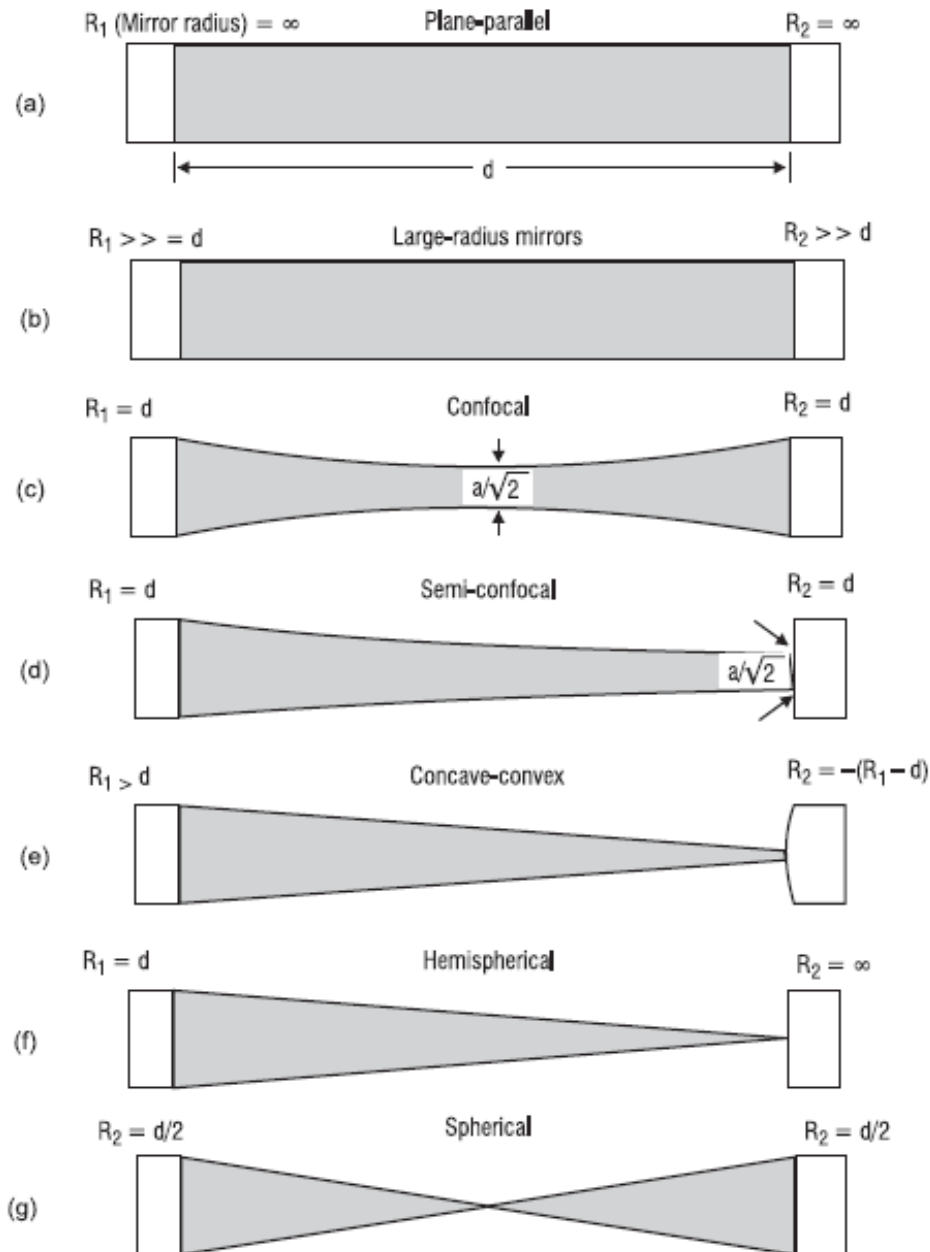
Καθώς το κύμα διαδίδεται κατά μήκος της διεύθυνσης των δύο καθρεπτών, υφίσταται διαδοχικές ανακλάσεις προς τα εμπρός και προς τα πίσω (μεταξύ των δύο καθρεπτών), με αποτέλεσμα να ενισχύεται κάθε φορά που περνάει από το ενεργό μέσο. Αν κατασκευαστεί ο ένας από τους δύο καθρέπτες μερικώς διαπερατός στη συχνότητα του διαδιδόμενου κύματος, τότε είναι εφικτή η λήψη της δέσμης του laser στην έξοδο του καθρέπτη αυτού.

Προκειμένου να συντηρείται η παραπάνω διαδικασία και το laser να λειτουργεί κανονικά, πρέπει να εκπληρώνεται μία κατάλληλη συνθήκη κατωφλίου (threshold condition) σύμφωνα με την οποία το ενεργό μέσο πρέπει να παρέχει ενίσχυση αντισταθμίζοντας τις απώλειες που παρατηρούνται στο εσωτερικό της κοιλότητας. Στην περίπτωση που εκπληρώνεται η συνθήκη κατωφλίου, το laser συνεχίζει να ταλαντώνεται κανονικά μέσω της εξαναγκασμένης εκπομπής. Έτσι, τα φωτόνια που οφείλονται στην εξαναγκασμένη εκπομπή θα είναι υπεύθυνα για την πραγματοποίηση της διαδικασίας ενίσχυσης, δηλαδή για τη σωστή λειτουργία του laser [7].

Η κοιλότητα ενός laser πρέπει να είναι άκαμπτη, δηλαδή να παραμένει σταθερή στην επιθυμητή θέση χωρίς την παραμικρή απόκλιση προκειμένου να διατηρείται ευθυγραμμισμένη η δέσμη του laser εντός της περιοχής ενίσχυσης του laser. Σε περίπτωση που υπάρξει απόκλιση της δέσμης, τότε παρατηρείται μείωση της ισχύος της. Στα μικρά lasers οι καθρέπτες διατηρούνται σταθερά ευθυγραμμισμένοι χάρη στην ύπαρξη μίας γυάλινης δομής πάνω στην οποία στερεώνονται. Στα μεγαλύτερα lasers χρησιμοποιείται μία εξωτερική μηχανική κοιλότητα προκειμένου να διατηρούνται οι καθρέπτες σταθερά ευθυγραμμισμένοι. Η κοιλότητα αυτή αποτελείται από κατάλληλες ράβδους οι οποίες είναι κατασκευασμένες από ιδιαίτερα ανθεκτικό μέταλλο με πολύ μικρό συντελεστή θερμικής διαστολής, εκτείνονται σε όλο το μήκος του laser και είναι προσαρμοσμένες στις βάσεις των καθρεπτών [1].

2.5.1 Σταθερές Κοιλότητες Laser

Για την κατασκευή της κοιλότητας ενός laser υπάρχει μεγάλη ποικιλία όσον αφορά τον τρόπο διεύθυνσης των καθρεπτών, όπως φαίνεται στην εικόνα που ακολουθεί. Στην εικόνα αυτή, οι ακτίνες καμπυλότητας των καθρεπτών ορίζονται με βάση την απόσταση διαχωρισμού d μεταξύ των καθρεπτών. Ωστόσο, δεν καθίσταται εφικτή σε όλες αυτές τις κοιλότητες η σταθερή λειτουργία του laser. Η σταθερότητα επιτυγχάνεται στην περίπτωση που ανακλάται προς τα πίσω η δέσμη του laser προς τον άξονα του ενεργού μέσου, χωρίς να αποκλίνει έπειτα από την ανάκλαση σε κάθε καθρέπτη. Από τις κοιλότητες που παρουσιάζονται παρακάτω, οι σταθερές είναι οι καθρέπτες μεγάλης ακτίνας (large radius mirrors – εικόνα 14b), η ομοεστιακή κοιλότητα (confocal cavity – εικόνα 14c), η ημι-ομοεστιακή κοιλότητα (semi-confocal cavity – εικόνα 14d) και η κοίλη-κυρτή κοιλότητα (concave-convex cavity – εικόνα 14e).



Εικόνα 15 – Οι πιθανές διαμορφώσεις της κοιλότητας ενός laser. (a) παράλληλα-επίπεδα (plane-parallel), (b) καθρέπτες μεγάλης ακτίνας (large-radius mirrors), (c) ομοεστιακή κοιλότητα (confocal cavity), (d) ημι-ομοεστιακή κοιλότητα (semi-confocal cavity), (e) κοίλη-κυρτή κοιλότητα (concave-convex cavity), (f) ημισφαιρική κοιλότητα (hemispherical cavity), (g) σφαιρική κοιλότητα (spherical cavity) [1].

Στην περίπτωση που χρησιμοποιούνται κυρτοί καθρέπτες, μία σταθερή κοιλότητα προσδιορίζεται γενικά χρησιμοποιώντας μία από τις δύο παρακάτω διατάξεις:

- **Χρησιμοποιούνται δύο κοίλοι καθρέπτες.** Είτε το κέντρο καμυλότητας του κάθε καθρέπτη βρίσκεται πέρα από τον άλλο καθρέπτη ή το κέντρο καμυλότητας του

κάθε καθρέπτη βρίσκεται μεταξύ του άλλου καθρέπτη και του κέντρου καμπυλότητας του άλλου καθρέπτη.

- **Ο ένας καθρέπτης είναι κυρτός και ο άλλος καθρέπτης είναι κοίλος.** Το κέντρο καμπυλότητας του κοίλου καθρέπτη βρίσκεται μεταξύ του κυρτού καθρέπτη και του κέντρου καμπυλότητας του κυρτού καθρέπτη.

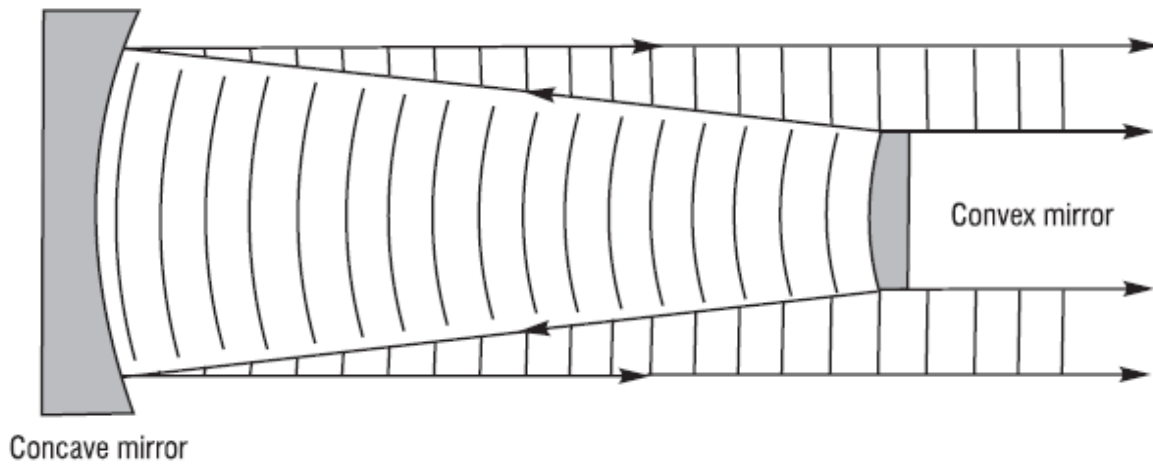
Η διάταξη κοινής κοιλότητας χρησιμοποιείται προκειμένου να ληφθεί η μικρότερη δυνατή διάμετρος δέσμης στην έξοδο του laser. Μία τέτοια διάταξη είναι η ημι-ομοεστιακή κοιλότητα (semi-confocal cavity) που απεικονίζεται στην εικόνα 14d. Η κοιλότητα αυτή σχηματίζεται από ένα καμπύλο και ένα επίπεδο καθρέπτη. Ο επίπεδος καθρέπτης χρησιμοποιείται ως καθρέπτης εξόδου. Η διάταξη αυτή είναι ισοδύναμη με μία σταθερή κοιλότητα, η οποία αποτελείται από δυο καθρέπτες με ίση ακτίνα καμπυλότητας, στην οποία έχει αντικατασταθεί ο ένας από τους δύο καθρέπτες με ένα επίπεδο καθρέπτη που απέχει το μισό (σε σχέση με την αρχική απόσταση μεταξύ των δύο καμπύλων καθρεπτών) από τον άλλο καμπύλο καθρέπτη. Σε αυτή τη διάταξη, η ελάχιστη διάμετρος της δέσμης εμφανίζεται στον επίπεδο καθρέπτη [1].

2.5.2 Ασταθείς Κοιλότητες Laser

Ένα laser το οποίο λειτουργεί στον τρόπο TEM₀₀ χαρακτηρίζεται από μία ιδιαίτερα στενή δέσμη στο εσωτερικό της κοιλότητας του. Έτσι, δεν μπορεί να αξιοποιήσει τη σχετικά μεγάλη περιοχή κέρδους που ενδέχεται να είναι διαθέσιμη εντός της ενεργού περιοχής του laser. Η πρόσβαση σε μία ευρεία περιοχή κέρδους μπορεί να προσθέσει αρκετή ενέργεια στη δέσμη εξόδου του laser συγκριτικά με την ενέργεια που προσθέτει ο τρόπος TEM₀₀. Προκειμένου να υπάρξει όφελος από μία τέτοια ευρεία περιοχή κέρδους, χρησιμοποιείται ένας ειδικός τύπος κοιλότητας η οποία καλείται ασταθής κοιλότητα laser. Στην εικόνα που ακολουθεί παρουσιάζεται μία ασταθής κοιλότητα laser με την περιοχή κέρδους να βρίσκεται μεταξύ ενός κοίλου και ενός κυρτού καθρέπτη. Το μέγεθος της διαμέτρου του μεγαλύτερου καθρέπτη, δηλαδή του κοίλου καθρέπτη, παρουσιάζει μία εγκάρσια διάσταση.

Μία ασταθής κοιλότητα laser λειτουργεί παλμικά και απαιτεί ένα laser με ενεργό μέσο το οποίο να δίνει μία αρκετά υψηλή τιμή απολαβής (της τάξεως του 10 ή μεγαλύτερη σε κάθε πέρασμα). Στη συγκεκριμένη διάταξη ασταθούς κοιλότητας, η δέσμη αναπτύσσεται αρχικά κατά μήκος του διαμήκους άξονα μεταξύ των δύο καθρεπτών και στη συνέχεια διευρύνεται προς τον κυρτό καθρέπτη, ανακλάται και διευρύνεται περαιτέρω στο μεγαλύτερο (κοίλο)

καθρέπτη και στη συνέχεια διαδίδεται ευθύγραμμα έξω από την κοιλότητα πέρα από τον μικρότερο (κυρτό) καθρέπτη [1].



Εικόνα 16 – Μπλοκ διάγραμμα ασταθούς κοιλότητας, κοίλος καθρέπτης (concave mirror), κυρτός καθρέπτης (convex mirror) [1].

Η δέσμη εξέρχεται από το laser έχοντας σχήμα δακτυλίου. Το κέντρο της δέσμης σκιάζεται από το μικρότερο καθρέπτη. Η παρατηρούμενη δέσμη του laser ακριβώς πίσω από τον καθρέπτη έχει μία οπή στο κέντρο όπως ήταν αναμενόμενο. Ωστόσο, πιο μακριά από το laser, η οπή καλύπτεται και προκύπτει μία σχετικά υψηλής ποιότητας δέσμη η οποία έχει περίπου Γκαουσιανή μορφή.

Είναι άξιο αναφοράς ότι η συγκεκριμένη διαμόρφωση της κοιλότητας ενός laser δύναται να οδηγήσει στην παραγωγή σημαντικών ποσών παλμικής ενέργειας, η οποία εξάγεται από την περιοχή κέρδους του laser με μία αρκετά καλής ποιότητας δέσμη laser [1].

2.5.3 Εύρος Ζώνης, Διακριτική Ικανότητα, Λεπτότητα

Η ισχυρή εξάρτηση από τη συχνότητα των κυμάτων που διαδίδονται σε μία συντονιζόμενη κοιλότητα απεικονίζεται στον παρονομαστή συντονισμού:

$$1 - \tilde{g}_{rt}(\omega) \equiv 1 - r_1 r_2 (r_3 \dots) \exp(-\alpha_0 p - j \frac{\omega p}{c}) \quad (2.18)$$

όπου p η περίμετρος της οπτικής κοιλότητας, α_0 ο συντελεστής εσωτερικών απωλειών, r_1 , r_2 , r_3 οι συντελεστές ανάκλασης των καθρεπτών, ω η συχνότητα, $\tilde{g}_{rt}(\omega)$ η απολαβή πλήρους διάδοσης (και προς τις δύο κατευθύνσεις) εντός της κοιλότητας, $\frac{\omega p}{c}$ η φάση μίας πλήρους περιστροφής εντός της κοιλότητας.

Τα πλάτη των $\frac{\tilde{E}_{circ}}{\tilde{E}_{inc}}$ (ένταση διαδιδόμενη προς ένταση προσπίπτουσας συνιστώσας) και $\frac{\tilde{E}_{trans}}{\tilde{E}_{inc}}$ (ένταση μεταδιδόμενη προς ένταση προσπίπτουσας συνιστώσας) θα ελαττωθούν κατά $\sqrt{2}$ ή οι μέγιστες τιμές των αντίστοιχων εντάσεων θα ελαττωθούν κατά το ήμισυ, στις συχνότητες για τις οποίες η ποσότητα $|1 - \tilde{g}_{rt}(\omega)|^2$ διπλασιάζεται σε σύγκριση με την αντίστοιχη τιμή της σε μία κορυφή συντονισμού. Με βάση το παραπάνω σκεπτικό, στις κορυφές συντονισμού το FWHM (Full Width at Half Maximum – Πλήρες Εύρος στο Ήμισυ του Μεγίστου) εύρος ζώνης θα δίνεται από τη σχέση:

$$\Delta\omega_{cav} \equiv \frac{4c}{p} \sin^{-1} \left[\frac{1 - g_{rt}}{2\sqrt{g_{rt}}} \right] \approx \frac{2\pi c}{p} x \left[\frac{1 - g_{rt}}{\pi\sqrt{g_{rt}}} \right] = \left[\frac{1 - g_{rt}}{\pi\sqrt{g_{rt}}} \right] x \Delta\omega_{ax} \quad (2.19)$$

όπου c το πλήθος των πλήρων περιστροφών εντός της κοιλότητας, p η περίμετρος της οπτικής κοιλότητας, $g_{rt}(\omega)$ η απολαβή πλήρους διάδοσης (και προς τις δύο κατευθύνσεις) εντός της κοιλότητας και $\Delta\omega_{ax}$ το εύρος της ελεύθερης φασματικής περιοχής ή το διάστημα του αξονικού τρόπου (axial-mode) μεταξύ των συντονισμών [6].

Στην τελευταία σχέση έχει πραγματοποιηθεί η υπόθεση ότι η απολαβή πλήρους διάδοσης (και προς τις δύο κατευθύνσεις) εντός της κοιλότητας $g_{rt} \equiv |\tilde{g}_{rt}(\omega)|$ δεν είναι πολύ μικρότερη από τη μονάδα. Το εύρος ζώνης συντονισμού είναι σε γενικές γραμμές ένα κλάσμα της απόστασης αξονικού τρόπου (axial-mode spacing) ή της ελεύθερης φασματικής περιοχής και μικραίνει (γίνεται στενότερο) όσο πιο κοντά στη μονάδα είναι η τιμή της απολαβής πλήρους διάδοσης (και προς τις δύο κατευθύνσεις) εντός της κοιλότητας.

Στην κλασσική οπτική η μετάδοση ισχύος μέσω ενός etalon ή ενός συμβολόμετρου δίνεται από τη σχέση:

$$\left| \frac{\tilde{E}_{trans}(\omega)}{\tilde{E}_{inc}(\omega)} \right|^2 = \frac{T_{max}}{1 + \left(\frac{2F}{\pi} \right)^2 \sin^2 \left(\frac{\pi \omega}{\Delta\omega_{ax}} \right)} \quad (2.20)$$

όπου T_{max} είναι η μέγιστη μετάδοση μέσω του etalon, $\Delta\omega_{ax} \equiv \frac{2\pi c}{p}$ είναι το εύρος της ελεύθερης φασματικής περιοχής ή το διάστημα του αξονικού τρόπου (axial-mode) μεταξύ των συντονισμών και F είναι η λεπτότητα (finesse) του συμβολόμετρου [6].

Η λεπτότητα ισούται με το λόγο του εύρους της ελεύθερης φασματικής περιοχής προς το εύρος ζώνης της κοιλότητας:

$$F \equiv \frac{\pi\sqrt{g_{rt}}}{1 - g_{rt}} \approx \frac{\Delta\omega_{ax}}{\Delta\omega_{cav}} \quad (2.21)$$

όπου $g_{rt}(\omega)$ είναι η απολαβή πλήρους διάδοσης (και προς τις δύο κατευθύνσεις) εντός της κοιλότητας, $\Delta\omega_{ax}$ το εύρος της ελεύθερης φασματικής περιοχής ή το διάστημα του αξονικού τρόπου (axial-mode) μεταξύ των συντονισμών και $\Delta\omega_{cav}$ το εύρος ζώνης συντονισμού.

Η λεπτότητα αντικατοπτρίζει τη διακριτική ικανότητα ενός etalon που χρησιμοποιείται ως φίλτρο μετάδοσης. Η διακριτική ικανότητα αυξάνεται όταν οι ανακλαστικότητες των καθρεπτών πλησιάζουν τη μονάδα ($r_1, r_2 \rightarrow 1$) και οι εσωτερικές απώλειες είναι ελάχιστες ($\alpha_{op} \rightarrow 0$). Πρακτικά μία τιμή λεπτότητας της τάξεως του 100 ($F \approx 100$) είναι αρκετά ικανοποιητική για ένα παθητικό συμβολόμετρο ή για μία παθητική οπτική κοιλότητα. Επίσης, είναι άξιο αναφοράς ότι μία λεπτότητα της τάξεως του 100 απαιτεί $1 - g_{rt} \leq 0.03$, δηλαδή απώλειες τάσης μικρότερες του 3% για μία πλήρη διάδοση (και προς τις δύο κατευθύνσεις) εντός της κοιλότητας [6].

Εναλλακτικά, η λεπτότητα μπορεί να δοθεί από τη σχέση (συμπεριλαμβάνει και την απολαβή και τις απώλειες της κοιλότητας):

$$F \equiv \frac{\pi\sqrt{g_{rt}}}{1 - g_{rt}} \approx \frac{2\pi}{\delta_c - \delta_m} \quad (2.22)$$

όπου $\delta_c \equiv \delta_1 + \delta_2 + \delta_0$ είναι η συνολική κλασματική απώλεια ισχύος για μία πλήρη διάδοση (και προς τις δύο κατευθύνσεις) εντός της κοιλότητας λαμβάνοντας υπόψη όλους τους μηχανισμούς απωλειών (ανακλαστικότητες καθρεπτών και εσωτερικές απώλειες) και δ_m η απολαβή του laser. Στη περίπτωση αυτή το εύρος ζώνης συντονισμού για τα διαδιδόμενα σήματα (συναρτήσει της λεπτότητας F) θα δίνεται από τη σχέση:

$$\Delta\omega_{cav} \approx \frac{\Delta\omega_{ax}}{F} = \frac{\delta_c - \delta_m}{2\pi} \times \Delta\omega_{ax} \quad (2.23)$$

όπου δ_c η συνολική κλασματική απώλεια ισχύος για μία πλήρη διάδοση (και προς τις δύο κατευθύνσεις) εντός της κοιλότητας λαμβάνοντας υπόψη όλους τους μηχανισμούς απωλειών (ανακλαστικότητες καθρεπτών και εσωτερικές απώλειες), δ_m η απολαβή του laser και $\Delta\omega_{ax}$ το εύρος της ελεύθερης φασματικής περιοχής ή το διάστημα του αξονικού τρόπου (axial-mode) μεταξύ των συντονισμών.

Είναι άξιο αναφοράς ότι με την προσθήκη της απολαβής του laser δ_m σε μία παθητική κοιλότητα με συνολικές απώλειες δ_c , η λεπτότητα F τείνει στο άπειρο και το εύρος ζώνης συντονισμού $\Delta\omega_{cav}$ τείνει στο μηδέν [6].

2.5.4 Συντονισμός Οπτικής Κοιλότητας

Οι μεταβολές του μήκους (ακόμα και οι πολύ μικρές) μίας οπτικής κοιλότητας χρησιμοποιούνται για τη ρύθμιση της συχνότητας συντονισμού της κοιλότητας. Με βάση τις διάφορες σχέσεις που δίνουν τη συχνότητα συντονισμού της οπτικής κοιλότητας και παρουσιάστηκαν σε προηγούμενες παραγράφους, γίνεται αντιληπτό ότι μία μικρή μεταβολή της περιμέτρου της κοιλότητας κατά δp (με σταθερό δείκτη αξονικού τρόπου q) είναι ικανή να τροποποιήσει κάθε συχνότητα συντονισμού του αξονικού τρόπου (axial-mode) κατά:

$$\frac{\delta\omega_q}{\omega_q} \approx -\frac{\delta p}{p} \approx -\frac{\delta L}{L} \quad (2.24)$$

όπου L το μήκος της οπτικής κοιλότητας, δL η τροποποίηση του μήκους της οπτικής κοιλότητας, ω_q η συχνότητα συντονισμού, $\delta\omega_q$ η τροποποίηση της συχνότητας συντονισμού. Η τελευταία σχέση μπορεί να γραφτεί ξανά υπό τη μορφή:

$$\delta\omega_q \approx -\frac{\delta p}{\lambda} \times \Delta\omega_{ax} \approx -\frac{\delta L}{\frac{\lambda}{2}} \times \Delta\omega_{ax} \quad (2.25)$$

όπου $\Delta\omega_{ax}$ το εύρος της ελεύθερης φασματικής περιοχής ή το διάστημα του αξονικού τρόπου (axial-mode) μεταξύ των συντονισμών, λ το μήκος κύματος, δp η τροποποίηση της περιμέτρου της οπτικής κοιλότητας και δL η τροποποίηση του μήκους της οπτικής κοιλότητας [6].

Όπως γίνεται αντιληπτό, η αλλαγή της τιμής της περιμέτρου p της οπτικής κοιλότητας κατά ένα μήκος κύματος λ ή του μήκους L της οπτικής κοιλότητας κατά μισό μήκος κύματος $\lambda/2$ μετατοπίζει κάθε έναν από τους αξονικούς τρόπους (axial-modes) κατά μία ποσότητα ίση με την απόσταση μεταξύ των αξονικών τρόπων (axial-modes). Η αλλαγή του μήκους πλήρους διάδοσης (και προς τις δύο κατευθύνσεις) στο εσωτερικό της κοιλότητας κατά ένα μήκος κύματος λ , συντονίζει τον τρόπο q στη συχνότητα που κατείχε προηγουμένως ο τρόπος $q\pm 1$ (ανάλογα από το αν το μήκος της κοιλότητας μικραίνει ή μεγαλώνει).

Οι οπτικές κοιλότητες συντονίζονται ή σταθεροποιούνται στην απόλυτη συχνότητα χρησιμοποιώντας θερμοκρασιακό συντονισμό σε συνδυασμό με την τοποθέτηση πιεζοηλεκτρικών υλικών στην κοιλότητα του καθρέπτη προκειμένου να είναι εφικτό να μετακινηθεί ο καθρέπτης προς τα εμπρός ή προς τα πίσω κατά μερικά οπτικά μήκη κύματος ψάχνοντας για την απόλυτη συχνότητα του αξονικού τρόπου σε ένα ορισμένο διάστημα συχνοτήτων [6].

Το εύρος στο οποίο είναι εφικτό να ρυθμιστεί η συχνότητα ($\Delta\omega_{ax}$) για μία αύξηση της περιμέτρου της οπτικής κοιλότητας κατά ένα μήκος κύματος είναι αντιστρόφως ανάλογο ως προς το μήκος της κοιλότητας. Δηλαδή το απόλυτο εύρος ρύθμισης της συχνότητας μπορεί να γίνει πολύ μεγάλο για κοιλότητες πολύ μικρού μήκους.

Επιπρόσθετα είναι άξιο αναφοράς ότι σε μία τυπική οπτική κοιλότητα μία μικρή μεταβολή της θερμοκρασίας δT , κατά μερικούς βαθμούς Κελσίου, δημιουργεί θερμική διαστολή στην κοιλότητα έτσι ώστε η περίμετρος της να μεταβληθεί κατά δr (κατά μισό μήκος κύματος $\lambda/2$ ή λίγο παραπάνω). Όπως γίνεται αντιληπτό, οι οπτικές κοιλότητες χαρακτηρίζονται από μεγάλο θερμικό εύρος ρύθμισης ή μεγάλο θερμικό ρυθμό εκτροπής (thermal drift) εκτός αν υπάρξει τρόπος προσεκτικής σταθεροποίησης της θερμοκρασίας τους.

Επίσης, αξίζει να αναφερθεί ότι ο ανεπιθύμητος συντονισμός και οι διακυμάνσεις της συχνότητας στα lasers που προκαλούνται είτε από μηχανικές δονήσεις είτε από ακουστικό θόρυβο, είναι ένα πολύ σοβαρό ζήτημα για κάθε laser στο οποίο απαιτείται υψηλή συχνοτική ευστάθεια. Στην περίπτωση αυτή είναι αρκετά πιθανό να απαιτείται πολύ προσεκτική και στιβαρή στερέωση για την αποφυγή των κραδασμών, καθώς και ακουστική απομόνωση προκειμένου να επιτευχθεί η επιθυμητή συχνοτική ευστάθεια [6].

3^ο - ΚΕΦΑΛΑΙΟ

“ΦΡΑΓΜΑΤΑ (GRATINGS) BRAGG”

3.1 Εισαγωγή

Τα φράγματα (gratings) Bragg χρησιμοποιούνται ευρέως σε πολλά οπτικά συστήματα ως ζωνοπερατά φίλτρα και ως μέσα αντιστάθμισης της διασποράς. Ως επί το πλείστον τα φράγματα Bragg χρησιμοποιούνται σε αισθητήρες οπτικών ινών ή σε lasers φράγματος ίνας (fiber grating lasers) και σε οπτικούς ενισχυτές.

3.1.1 Φράγματα Bragg σε Ίνα

Η λειτουργία ενός φράγματος ίνας βασίζεται στη διαμόρφωση του δείκτη διάθλασης του πυρήνα μίας οπτικής ίνας. Η διαμόρφωση πραγματοποιείται κατά μήκος του άξονα της ίνας, προσδίδοντας μία περιοδική μορφή στη μεταβολή n του δείκτη διάθλασης. Η μεταβολή της τιμής του δείκτη διάθλασης μπορεί να επιτευχθεί διοχετεύοντας υπέρυθη ακτινοβολία στον φωτοευαίσθητο πυρήνα της ίνας. Στις περισσότερες περιπτώσεις η φωτοευαισθησία των οπτικών ινών οφείλεται στην ύπαρξη προσμειξών Γερμανίου (Ge) στον πυρήνα τους [8].

Τα φράγματα (gratings) είναι συσκευές οι οποίες τροποποιούν περιοδικά τη φάση ή την ένταση των κυμάτων που ανακλούνται σε αυτά ή μεταδίδονται μέσω αυτών. Πιο συγκεκριμένα:

- Το διαδιδόμενο κύμα ανακλάται από το φράγμα Bragg εφόσον το μήκος κύματος του είναι ίσο με το Bragg μήκος κύματος συντονισμού λ_{Bragg} .
- Το διαδιδόμενο κύμα μεταδίδεται μέσα από το φράγμα Bragg εφόσον το μήκος κύματος του είναι διαφορετικό από το Bragg μήκος κύματος συντονισμού λ_{Bragg} .

Όταν ένα Bragg φράγμα ίνας χαρακτηρίζεται ως ομοιόμορφο, σημαίνει ότι η περίοδος του φράγματος Λ και η μεταβολή n του δείκτη διάθλασης έχουν σταθερή τιμή σε όλο το μήκος του φράγματος [8].

Η χωρική περιοδικότητα Λ ενός φράγματος Bragg και το μήκος κύματος συντονισμού του φράγματος λ_{Bragg} συνδέονται μέσω της σχέσης:

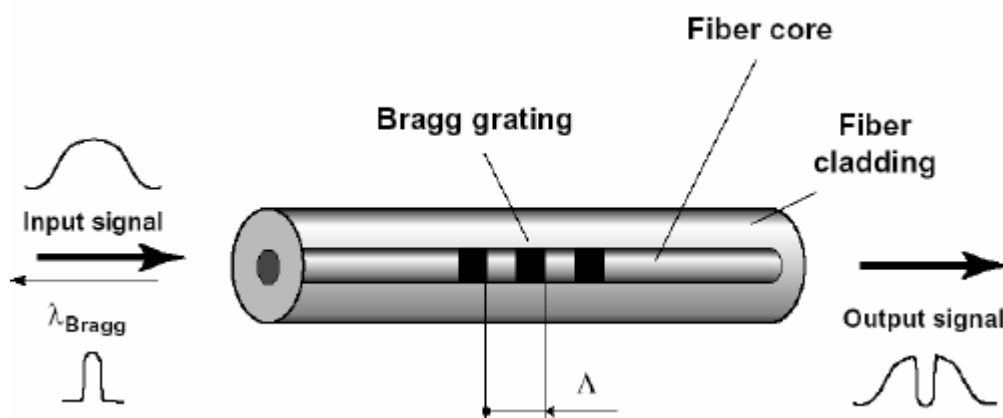
$$\frac{2\pi}{\Lambda} = 2 \frac{2\pi n_{eff}}{\lambda} \rightarrow \lambda_{Bragg} = 2n_{eff}\Lambda \quad (3.1)$$

όπου n_{eff} είναι ο ενεργός δείκτης διάθλασης (δηλαδή ο δείκτης διάθλασης που βλέπει ο ρυθμός λόγω γεωμετρίας του κυματοδηγού) του φωτός στην οπτική ίνα και λ το οπτικό μήκος κύματος.

Η τελευταία σχέση δείχνει ότι ο κυματαριθμός $k = \frac{2\pi}{\lambda}$ του φράγματος Bragg αντιστοιχεί στη διαφορά των κυματανυσμάτων του προσπίπτοντος και του ανακλώμενου κύματος τα οποία είναι αντίθετα μεταξύ τους. Τότε τα πλάτη που αντιστοιχούν στη συνεισφορά του ανακλώμενου πεδίου από διαφορετικές πλευρές του φράγματος, έχουν την ίδια φάση και μπορούν να προστεθούν αλγεβρικά μεταξύ τους. Αυτό είναι ένα είδος ταιριάσματος φάσης. Στην περίπτωση αυτή, ακόμα και ένας δείκτης διαμόρφωσης με πολύ μικρή τιμή (της τάξεως του 10^{-4}) θα είναι αρκετός προκειμένου να καταστεί εφικτή η επίτευξη σχεδόν ολικής ανάκλασης, αρκεί το μήκος του φράγματος να είναι επαρκές (πρέπει να είναι της τάξεως μερικών χιλιοστών) [8], [9].

Το εύρος ζώνης ανάκλασης ενός φράγματος ίνας, το οποίο είναι συνήθως αρκετά μικρότερο από 1 nm, εξαρτάται τόσο από το εύρος όσο και από την ένταση της διαμόρφωσης του δείκτη διάθλασης. Οι πιο μικρές τιμές εύρους ζώνης οι οποίες είναι επιθυμητές για την κατασκευή laser ίνας μονής συχνότητας, λαμβάνονται όταν τα φράγματα έχουν μεγάλο μήκος και η διαμόρφωση του δείκτη διάθλασης είναι ασθενής. Αντίστοιχα οι μεγάλες τιμές εύρους ζώνης λαμβάνονται όταν τα φράγματα έχουν μικρό μήκος και απεριοδικό τρόπο σχεδίασης. Το μήκος κύματος στο οποίο είναι εφικτό να επιτευχθεί η μέγιστη τιμή ανακλαστικότητας εξαρτάται από την περίοδο του φράγματος Bragg, τη θερμοκρασία και τις μηχανικές καταπονήσεις [9].

Η τυπική δομή ενός ομοιόμορφου φράγματος ίνας Bragg παρουσιάζεται στην εικόνα που ακολουθεί. Στην εικόνα αυτή παρουσιάζονται επίσης τα σήματα εισόδου και εξόδου.



Εικόνα 17 – Ομοιόμορφο φράγμα Bragg. Σήμα εισόδου (input signal), φράγμα Bragg (Bragg grating), πυρήνας οπτικής ίνας (fiber core), περίβλημα οπτικής ίνας (fiber cladding), σήμα εξόδου (output signal) [8].

Επίσης είναι άξιο αναφοράς ότι τα χαρακτηριστικά της απόκρισης ενός φράγματος Bragg μπορούν να περιγραφούν πλήρως με τη βοήθεια ενός συνόλου παραμέτρων:

- Μήκος κύματος συντονισμού του φράγματος Bragg λ_{Bragg} .
- Μέγιστη ανακλαστικότητα R_{max} του φράγματος Bragg, η οποία παρατηρείται στο μήκος κύματος συντονισμού του φράγματος.
- Φυσικό μήκος φράγματος Bragg L .
- Δείκτης διάθλασης n του πυρήνα της οπτικής ίνας.
- Εύρος μεταβολής του δείκτη διάθλασης Δn [11].

3.1.2 Ολοκληρωμένα Φράγματα Bragg

Τα ολοκληρωμένα φράγματα Bragg (integrated Bragg gratings) παρουσιάζουν αρκετά πλεονεκτήματα σε σύγκριση με τα αντίστοιχα φράγματα ίνας. Τα πιο σημαντικά από αυτά είναι:

- Σχηματίζονται με τη φυσική δημιουργία αυλακώσεων σε ένα κυματοδηγό με αποτέλεσμα να μη βασίζεται η λειτουργία τους στη μεταβολή του δείκτη διάθλασης. Έτσι καθίσταται εφικτή η κατασκευή φραγμάτων Bragg σε υλικά τα οποία δεν είναι φωτοδιαθλαστικά (πχ πυρίτιο) με αποτέλεσμα να είναι εφικτή η κατασκευή φραγμάτων που παρουσιάζουν μεγαλύτερη ανθεκτικότητα.
- Τα ολοκληρωμένα φράγματα Bragg είναι εφικτό να έχουν πολύ μικρότερο μέγεθος και να τοποθετούνται πολύ κοντά μεταξύ τους σε σύγκριση με τις αντίστοιχες συσκευές ίνας.
- Η επίπεδη διαδικασία κατασκευής προσφέρει τη δυνατότητα για καλύτερο έλεγχο των διαστάσεων της συσκευής. Για παράδειγμα η αρχή και το τέλος ενός φράγματος Bragg είναι εφικτό να οροθετηθεί με μεγάλη ακρίβεια σε επίπεδο κάθετο στη διεύθυνση διάδοσης. Οι απότομες μετατοπίσεις φάσης είναι εφικτό να εισαχθούν σε οποιοδήποτε σημείο του φράγματος. Ο ακριβής έλεγχος της περιόδου είναι εφικτός αφού τα ολοκληρωμένα φράγματα Bragg (integrated Bragg gratings) είναι εφικτό να κατασκευαστούν δόντι προς δόντι.

- Είναι εφικτός ο συνδυασμός λιθογραφίας πολλαπλών επιπέδων, με ακριβή νάνο-ευθυγράμμιση μεταξύ αυτών, καθιστώντας εφικτή την ενσωμάτωση των φραγμάτων Bragg σε συζεύκτες (couplers), διαχωριστές και άλλα ηλεκτρονικά ή οπτικά εξαρτήματα [16].

Στην εικόνα που ακολουθεί απεικονίζεται η απλούστερη μορφή ενός ολοκληρωμένου φράγματος Bragg. Σε αυτή τη δομή, το φιλτραρισμένο σήμα ανακλάται πίσω στη θύρα εισόδου της συσκευής [16].



Εικόνα 18 – Η πιο απλή μορφή ενός ολοκληρωμένου φράγματος Bragg [16].

3.2 Μοντελοποίηση Φραγμάτων Bragg

Η μοντελοποίηση των φραγμάτων Bragg που παρουσιάζεται σε αυτή την παράγραφο βασίζεται στην επίλυση των εξισώσεων συζευγμένου τρόπου χρησιμοποιώντας τη μέθοδο του πίνακα μεταφοράς (transfer matrix method). Έστω ένα φράγμα Bragg με μήκος L και χωρική περιοδικότητα Λ . Η διάδοση ενός κύματος προς τα πίσω περιγράφεται χρησιμοποιώντας την εξίσωση:

$$E_a(z, t) = A(z) \exp[i(\omega t - \beta z)] \quad (3.2)$$

Αντίστοιχα ένα κύμα που διαδίδεται προς τα εμπρός περιγράφεται χρησιμοποιώντας την εξίσωση:

$$E_b(z, t) = B(z) \exp[i(\omega t + \beta z)] \quad (3.3)$$

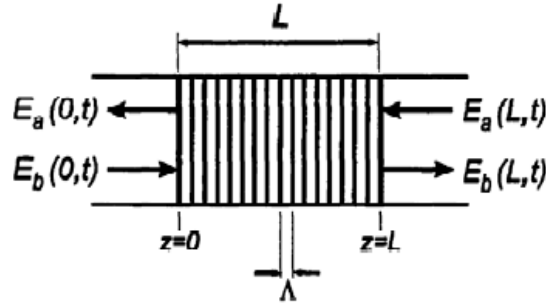
Στις δύο τελευταίες σχέσεις, τα $A(z)$ και $B(z)$ είναι αντίστοιχα τα πλάτη των κυμάτων που διαδίδονται προς τα πίσω και προς τα εμπρός, $\beta = \frac{2\pi}{\lambda} n_{eff}$ είναι η σταθερά διάδοσης στον πυρήνα της οπτικής ίνας, ($k = \frac{2\pi}{\lambda}$) είναι ο κυματαριθμός του φράγματος Bragg και λ το οπτικό μήκος κύματος [11].

Τα πλάτη $A(z)$ και $B(z)$ κατά μήκος του άξονα z περιγράφονται από τις εξισώσεις συζευγμένου τρόπου οι οποίες αποτελούν ένα εργαλείο μοντελοποίησης της αλληλεπίδρασης μεταξύ των δύο πεδίων:

$$\frac{dA(z)}{dz} = i\kappa B(z) \exp[-2i(\Delta\beta)z] \quad (3.4)$$

$$\frac{dB(z)}{dz} = -i\kappa * A(z) \exp[+2i(\Delta\beta)z] \quad (3.5)$$

με $0 \leq z \leq L$.



Εικόνα 19 – Τα κύματα που διαδίδονται σε ένα φράγμα Bragg. E_a : κύμα που διαδίδεται προς τα πίσω, E_b : κύμα που διαδίδεται προς τα εμπρός, L : μήκος φράγματος Bragg, Λ : χωρική περιοδικότητα [11].

Στις δύο παραπάνω εξισώσεις $\kappa = \pi \frac{\Delta n}{\lambda}$ είναι η σταθερά σύζευξης και Δn το εύρος της μεταβολής του δείκτη διάθλασης. Επίσης $\Delta\beta = \beta - \frac{\pi}{\Lambda}$ είναι η παράμετρος αποσυντονισμού του κυματανύσματος.

Υποθέτοντας ότι τα κύματα που διαδίδονται προς τα εμπρός και προς τα πίσω εισέρχονται στην κοιλότητα και θεωρώντας συνοριακές συνθήκες:

$$B(0) = B_0 \quad (3.6)$$

$$A(L) = A_L \quad (3.7)$$

Αντικαθιστώντας τις συνοριακές συνθήκες 3.6 και 3.7 στις εξισώσεις 3.4 και 3.5, λαμβάνονται οι λύσεις κλειστής μορφής (closed form) των παραπάνω εξισώσεων σε συνάρτηση με την απόσταση z :

$$a(z) = A(z) \exp(-i\beta z) \quad (3.8)$$

$$b(z) = B(z) \exp(+i\beta z) \quad (3.9)$$

Οι παραπάνω λύσεις κλειστής μορφής είναι εφικτές μόνο για ομοιόμορφα φράγματα Bragg. Για απεριοδικές ή πεπερασμένες δομές απαιτούνται πρόσθετοι αριθμητικοί υπολογισμοί [10], [11].

Το ανακλώμενο $a(L)$ όσο και το μεταδιδόμενο κύμα $b(0)$, μπορούν να εκφραστούν με τη βοήθεια ενός πίνακα σκέδασης:

$$\begin{bmatrix} a(0) \\ b(L) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} S_{11} & S_{12} \\ S_{21} & S_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a(L) \\ b(0) \end{bmatrix} \quad (3.10)$$

Αντικαθιστώντας τα $a(L)$ και $b(0)$ από τις σχέσεις 3.7 και 3.8 στην εξίσωση 3.9, λαμβάνονται για τα στοιχεία του πίνακα σκέδασης οι σχέσεις:

$$S_{11} = S_{22} = \frac{i S \exp(-i\beta_0 L)}{-\Delta\beta \sinh(SL) + i S \cosh(SL)} \quad (3.11)$$

$$S_{12} = \frac{\kappa}{\kappa^*} S_{21} \exp(2i\beta_0 L) = \frac{\kappa \sinh(SL)}{-\Delta\beta \sinh(SL) + i S \cosh(SL)} \quad (3.12)$$

Συνδυάζοντας τις σχέσεις 3.10, 3.11 και 3.12 προκύπτει ο πίνακας μεταφοράς (transfer matrix):

$$\begin{bmatrix} a(0) \\ b(0) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} T_{11} & T_{12} \\ T_{21} & T_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a(L) \\ b(L) \end{bmatrix} \quad (3.13)$$

όπου τα στοιχεία του πίνακα μεταφοράς δίνονται από τις σχέσεις:

$$T_{11} = T_{22}^* = \frac{\Delta\beta \sinh(SL) + i S \cosh(SL)}{i S} \exp(-i\beta_0 L) \quad (3.14)$$

$$T_{12} = T_{21}^* = \frac{\kappa \sinh(SL)}{i S} \exp(-i\beta_0 L) \quad (3.15)$$

Η τελευταία προσέγγιση κάνοντας χρήση ενός πίνακα μεταφοράς μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την αντιμετώπιση ενός μεμονωμένου φράγματος ως μία ακολουθία ξεχωριστών φραγμάτων κάθε ένα εκ των οποίων έχει μειωμένο συνολικό μήκος L , μειωμένη χωρική περιοδικότητα Λ και περιγράφεται από το δικό του πίνακα μεταφοράς (transfer matrix). Αν συνδυαστούν όλοι οι επιμέρους πίνακες μεταφοράς, προκύπτουν οι ιδιότητες του αρχικού φράγματος. Το σύστημα των πινάκων που προκύπτει, είναι εφικτό να θεωρηθεί ως ένας μεμονωμένος πίνακας [11]:

$$[T_L] = [T_1][T_2] \dots [T_M] \quad (3.16)$$

Η διέλευση του φωτός μέσα από μία ακολουθία διαδοχικών οπτικών στοιχείων, είναι εφικτό να υπολογιστεί με τη βοήθεια μίας ακολουθίας πινάκων:

$$\begin{bmatrix} a(0) \\ b(0) \end{bmatrix} = [T_M][T_{M-1}] \dots [T_1] \begin{bmatrix} a(L) \\ b(L) \end{bmatrix} \quad (3.17)$$

Για ένα φράγμα Bragg με ομοιόμορφη διαμόρφωση του δείκτη διάθλασης και σταθερή περίοδο, η ανακλαστικότητα σε συνάρτηση με το μήκος του φράγματος και το μήκος κύματος, θα δίνεται από τη σχέση:

$$R(L, \lambda) = \frac{\kappa^2 \sinh^2(SL)}{\Delta\beta^2 \sinh^2(SL) + \kappa^2 \cosh^2(SL)} \quad (3.18)$$

όπου L το συνολικό μήκος του φράγματος, $\kappa = \pi \frac{\Delta n}{\lambda}$ η σταθερά σύζευξης, $\Delta\beta = \beta - \frac{\pi}{\lambda}$ είναι η παράμετρος αποσυντονισμού του κυματανύσματος, $\beta = \frac{2\pi}{\lambda} n_{\text{eff}}$ είναι η σταθερά διάδοσης στον πυρήνα της οπτικής ίνας. Όταν το φως έχει μήκος κύματος ίσο με το Bragg μήκος κύματος συντονισμού λ_{Bragg} , δεν παρατηρείται αποσυντονισμός του κυματανύσματος ($\Delta\beta = 0$). Έτσι η σχέση που δίνει την ανακλαστικότητα γίνεται [11]:

$$R(L, \lambda) = \tanh^2(SL) \quad (3.19)$$

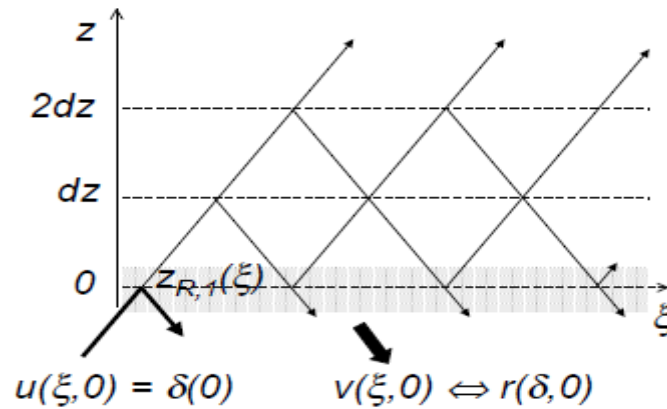
3.3 Σύνθεση Φραγμάτων Bragg (Αλγόριθμος Layer Peeling)

Για τη σύνθεση ενός φράγματος Bragg είναι εφικτό να χρησιμοποιηθεί ένας κατάλληλος αλγόριθμος αντίστροφης σκέδασης. Ο πιο διαδεδομένος αλγόριθμος είναι ο επαναληπτικός αλγόριθμος layer-peeling (Layer Peeling Algorithm – LPA) ο οποίος καθιστά εφικτή τη σύνθεση ενός φράγματος Bragg για δεδομένο φάσμα και μπορεί να χρησιμοποιηθεί τόσο για την ανακατασκευή όσο και για το σχεδιασμό κάθε φράγματος Bragg οπτικής ίνας. Πρόκειται για ένα ιδιαίτερα αποτελεσματικό και ακριβή αλγόριθμο. Ωστόσο οι λύσεις που προκύπτουν από τον LPA αλγόριθμο για τα περισσότερα φράγματα Bragg παρουσιάζουν ένα μη συμμετρικό προφίλ, εμπεριέχουν τη συνάρτηση sinc καθώς και αρκετές ολισθήσεις φάσης κατά π , με αποτέλεσμα να παρουσιάζονται αρκετές δυσκολίες κατά την κατασκευή των φραγμάτων [12].

Όπως φαίνεται στην εικόνα που ακολουθεί, το φράγμα διεγείρεται από ένα παλμό που διαδίδεται προς τα εμπρός $u(\xi, 0) = \delta(\xi)$ όπου ξ είναι ο χρόνος και $z=0$ είναι το πρώτο επίπεδο του φράγματος που πρέπει να προσδιοριστεί. Η παλμική απόκριση $v(\xi, 0)$ του οπτικού συστήματος για $\xi=0$ σχετίζεται μόνο με το συντελεστή σύζευξης του φράγματος στο σημείο $z=0$.

Παρά το γεγονός ότι για $\xi>0$ είναι διαθέσιμος ένας πολύ μεγάλος αριθμός πιθανών διαφορετικών διαδρομών εξαιτίας του φαινομένου της πολλαπλής σκέδασης, η μόνη διαδρομή που συνεισφέρει στο ανακλώμενο πεδίο όταν $\xi=0$ είναι η $z_{R,1}(\xi)$ (σχετίζεται με το συντελεστή

σκέδασης στο σημείο $z=0$) και αυτό συμβαίνει διότι το φως δεν προλαβαίνει να διαδοθεί βαθύτερα στο εσωτερικό του φράγματος Bragg και στη συνέχεια να σκεδαστεί προς τα πίσω. Έτσι, γνωρίζοντας το συντελεστή ανάκλασης $r(\delta,0)$ του φράγματος μέσω της ανακλαστικότητα R και της χρονικής καθυστέρησης τ_R , μπορεί να υπολογιστεί η παλμική απόκριση και να καθοριστεί μονοσήμαντα ο μιγαδικός συντελεστής σύζευξης $q(z)$ στο σημείο $z=0$ [10].



Εικόνα 20 – Οι πιθανές διαδρομές στο εσωτερικό ενός φράγματος Bragg. Ο $u(\xi,z)$ είναι ένας προς τα εμπρός διαδιδόμενος παλμός ενώ ο $v(\xi,z)$ είναι ένας παλμός που διαδίδεται προς τα πίσω. Στο επίπεδο $z=0$ το φράγμα ανιχνεύεται με μία συνάρτηση δέλτα και την αντίστοιχη παλμική απόκριση που σχετίζεται με το συντελεστή ανάκλασης $r(\delta,0)$ [10].

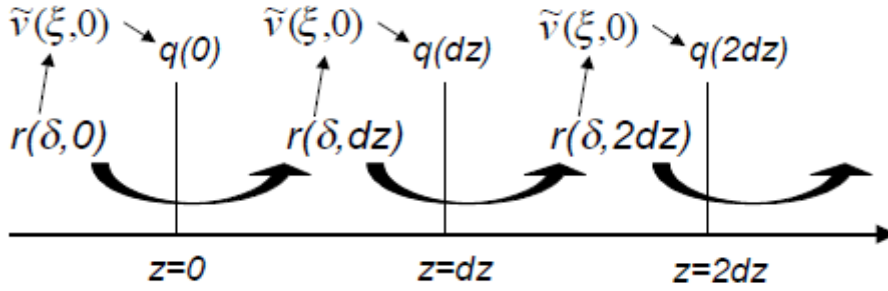
Έτσι τα κύματα διαδίδονται μέσω του πρώτου γνωστού επιπέδου υποθέτοντας ένα απειροελάχιστο βήμα διάδοσης dz , όπως φαίνεται στην εικόνα που ακολουθεί. Αυτό αντιστοιχεί στον υπολογισμό του τοπικού συντελεστή ανάκλασης του φράγματος στο σημείο $z=dz$:

$$r(\delta, z) = \frac{E_a(\delta, z)}{E_b(\delta, z)} \quad (3.20)$$

όπου $E_a(\delta,z)$ είναι ένα κύμα που διαδίδεται προς τα πίσω και $E_b(\delta,z)$ είναι ένα κύμα που διαδίδεται προς τα εμπρός.

Επίσης, αυτό μπορεί να ερμηνευθεί ως ο προσδιορισμός ενός νέου συντελεστή ανάκλασης που αντιστοιχεί σε ένα νέο επίπεδο που μπορεί να συνδεθεί με το αρχικό. Στη συνέχεια παύει να λαμβάνεται υπόψη η επίδραση του πρώτου επιπέδου και επαναλαμβάνεται η ίδια διαδικασία από την αρχή. Έτσι θα υπολογιστεί μία νέα παλμική απόκριση $\tilde{v}(\xi, 0)$ και θα καθοριστεί ένα νέος συντελεστής σύζευξης $q(dz)$. Οι αλληπάλληλες επαναλήψεις της διαδικασίας συνεχίζονται μέχρι να μηδενιστεί το διαθέσιμο φάσμα (μέχρι να μην υπάρχουν άλλα διαθέσιμα φωτόνια προς ανάκλαση ώστε να ληφθεί η επιθυμητή τιμή

ανακλαστικότητα). Έτσι, το επιθυμητό προφίλ σύζευξης του φράγματος Bragg μπορεί να κατασκευαστεί επίπεδο προς επίπεδο [10].



Εικόνα 21 – Διάδοση του φάσματος ανάκλασης κατά μήκος του φράγματος Bragg αφού έχει προσδιοριστεί το πρώτο επίπεδο. Ο $r(\delta, z)$ είναι ο τοπικός συντελεστής ανάκλασης του φράγματος. Μία αποτελεσματική παλμική απόκριση $\tilde{v}(\xi, z)$ είναι εφικτό να συσχετιστεί με το συντελεστή ανάκλασης $r(\delta, z)$ και το συντελεστή σύζευξης $q(z)$ που λαμβάνεται από την παλμική απόκριση $\tilde{v}(\xi, 0)$ [10].

Πιο συγκεκριμένα, ο αλγόριθμος layer-peeling βασίζεται στο γεγονός ότι ένα φράγμα Bragg είναι εφικτό να μοντελοποιηθεί ως μία στοίβα διακριτών τοπικών ανακλαστών ρ_i που βρίσκονται στις θέσεις $z_i = i \Delta$ και διαχωρίζονται μεταξύ τους από περιοχές διάδοσης ελεύθερου χώρου μήκους Δ [10].

Επίσης, είναι άξιο αναφοράς ότι ένα μεμονωμένο συμβάν σκέδασης χαρακτηρίζεται από άπειρο εύρος ζώνης αφού σχετίζεται με ένα σημείο ατέλειας. Η επιλεκτικότητα μήκους κύματος του φράγματος υπολογίζεται χρησιμοποιώντας κατάλληλους πίνακες μεταφοράς και λαμβάνοντας υπόψη το πάχος Δ του επιπέδου. Λαμβάνοντας υπόψη τον προσδιορισμό ενός συμβάντος σκέδασης στη θέση $z = z_i$ θα ισχύει:

$$\tilde{v}(0, z_i) = \rho_i \tilde{u}(0, z_i) = \rho_i \rightarrow \rho_i = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} r(\delta, z_i) \exp(-j\delta\xi) d\delta|_{\xi=0} \quad (3.21)$$

όπου $\tilde{u}(\xi, z_i) = \delta(0)$ είναι η χρονική απόκριση του νέου φράγματος στο σημείο $z=z_i$ που διαδίδεται προς τα εμπρός και $\tilde{v}(\xi, z_i)$ είναι η χρονική απόκριση του νέου φράγματος στο σημείο $z=z_i$ που διαδίδεται προς τα πίσω.

Ο συντελεστής ανάκλασης σε ένα σημείο z_i και σε κάθε σημείο $z_i+\Delta$ θα δίνεται από τη σχέση:

$$r(\delta, z_i) = \frac{E_a(z_i)}{E_b(z_i)} \rightarrow r(\delta, z_i + \Delta) = \frac{E_a(z_i + \Delta)}{E_b(z_i + \Delta)} = \frac{-\rho_i + r(\delta, z_i)}{1 - \rho_i^* + r(\delta, z_i)} \exp(-j2\beta_i\Delta) \quad (3.22)$$

Οι διαδοχικές επαναλήψεις των σχέσεων 3.21 και 3.22 οδηγούν στον πλήρη προσδιορισμό του φράγματος σε όλο το μήκος του L. Η διαδικασία ολοκληρώνεται όταν μηδενιστεί το διαθέσιμο φάσμα [10].

3.4 Τεχνικές Κατασκευής Φραγμάτων Bragg

Για την κατασκευή φραγμάτων Bragg είναι εφικτό να χρησιμοποιηθεί πλειάδα διαφορετικών τεχνικών. Στις παραγράφους ακολουθούν παρουσιάζονται τα κυριότερα χαρακτηριστικά των πιο βασικών τεχνικών που χρησιμοποιούνται για την κατασκευή φραγμάτων Bragg [10].

3.4.1 Φράγμα Bragg Πολυμερούς Κυματοδηγού με Χρήση Μαλακής Φωτολιθογραφίας

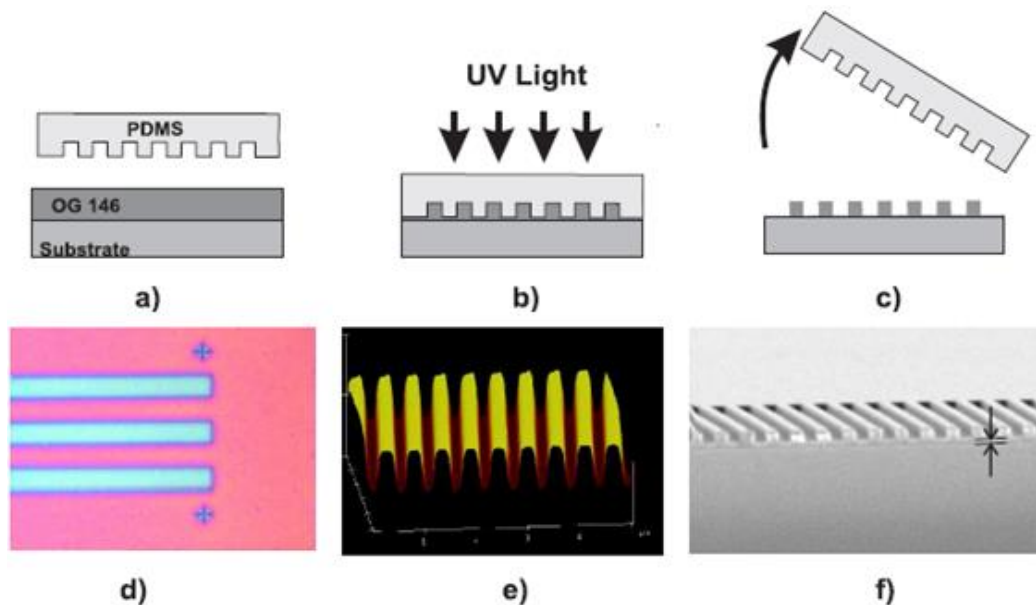
Η μέθοδος βασίζεται στη χρήση μίας μαλακής ελαστομερούς σφραγίδας (soft elastomeric stamp) με στόχο τη μεταφορά του σχεδίου του φράγματος στην επιφάνεια ενός πολυμερούς και περιγράφεται στην εργασία των (Kocabas A., et al.) Η διαδικασία κατασκευής που απαιτείται για τη μεταφορά του φράγματος σε μία πολυμερική επιφάνεια παρουσιάζεται στην εικόνα που ακολουθεί. Η κύρια δομή που περιλαμβάνει το σχέδιο του φράγματος εγγράφεται με λιθογραφία ηλεκτρονικής δέσμης σε ένα πλακίδιο από πυρίτιο και στη συνέχεια το σχέδιο του φράγματος μεταφέρεται πάνω στο πλακίδιο πυριτίου με διαβρωτική χάραξη δραστικών ιόντων (Reactive Ion Etching-RIE). Οι αυλακώσεις του φράγματος έχουν τα εξής χαρακτηριστικά:

- Περιοδικότητα 515 nm.
- Βάθος 200 nm.
- Πλάτος 100 μm.
- Μήκος 2 cm.
- Κύκλος λειτουργίας (duty cycle) 0.5.

Η ελαστομερής σφραγίδα κατασκευάζεται με κατάλληλη διαδικασία αντιγραφής χρησιμοποιώντας πολυ-διμεθυλοσιλοξάνη (poly-dimethylsiloxane – PDMS). Πιο συγκεκριμένα, η υγρή πολυ-διμεθυλοσιλοξάνη χύνεται πάνω στο φράγμα και αφήνεται να ωριμάσει (μέχρι να αποκτήσει τη μορφή πάστας) για 2 ώρες υπό θερμοκρασία 75 °C. Μετά την ολοκλήρωση της διαδικασίας αυτής, το ελαστομερές καλούπι απομακρύνεται (ξεφλουδίζεται) από το φράγμα. Επειδή η πολυ-διμεθυλοσιλοξάνη χαρακτηρίζεται από

χαμηλό μέτρο ελαστικότητας Young, τα μεγέθη των σχημάτων που είναι εφικτό να ληφθούν πάνω σε αυτή είναι περιορισμένα. Για το σκοπό της συγκεκριμένης διαδικασίας είναι αρκετό ένα μεμονωμένο στρώμα πολυ-διμεθυλοσιλοξάνης πάχους 5 μm προκειμένου να αναπαραχθεί το φράγμα. Προκειμένου να βελτιωθεί περαιτέρω η ποιότητα του σχεδίου είναι εφικτό να χρησιμοποιηθούν κατάλληλες σύνθετες σφραγίδες [13].

Η ελαστομερής σφραγίδα που έχει ένα φράγμα στην επιφάνεια του χρησιμοποιείται για τη μεταφορά του σχεδίου του φράγματος πάνω σε κατάλληλο προ-πολυμερές (pre-polymer) χαμηλού ιξώδους (περίπου 40 cps). Αρχικά το προ-πολυμερές (πριν ωριμάσει) επικαλύπτεται δια περιστροφής πάνω στο πλακίδιο πυριτίου με κατάλληλο θερμικό οξειδίο πάχους 7 μm το οποίο τοποθετείται στην επιφάνεια του. Το αρχικό πάχος του προ-πολυμερούς ήταν 1 μm. Στη συνέχεια η σφραγίδα πολυ-διμεθυλοσιλοξάνης τοποθετείται στο προ-πολυμερές χωρίς να εφαρμοστεί πίεση. Λόγω όμως της σύμμορφης επαφής που αναπτύσσεται, η σφραγίδα πολυ-διμεθυλοσιλοξάνης επισυνάπτεται τελικά στην επιφάνεια του προ-πολυμερούς. Κατόπιν το προ-πολυμερές συμπληρώνει τις αυλακώσεις της σφραγίδας πολυ-διμεθυλοσιλοξάνης (τριχοειδής δράση) σε χρόνο μόλις λίγων δευτερολέπτων. Η σφραγίδα διατηρείται σε επαφή και το ταυτόχρονα το δείγμα φωτίζεται με υπεριώδες φως για ένα χρονικό διάστημα της τάξεως των 5 λεπτών. Ο φωτισμός αυτός προκαλεί την ωρίμανση του προ-πολυμερούς. Αφού το προ-πολυμερές ωριμάσει, η πολυ-διμεθυλοσιλοξάνη απομακρύνεται μηχανικά αφήνοντας στη θέση της τη δομή ενός στερεού πολυμερούς φράγματος.



Εικόνα 22 – Σχηματικό διάγραμμα της μεταφοράς της δομής του φράγματος στην επιφάνεια πολυμερούς υλικού. α) Περιστροφή του προ-πολυμερούς (pre-polymer) επί του πλακιδίου β) Τοποθέτηση της PDMS σφραγίδας σε προπολυμερή επίστρωση και έκθεση

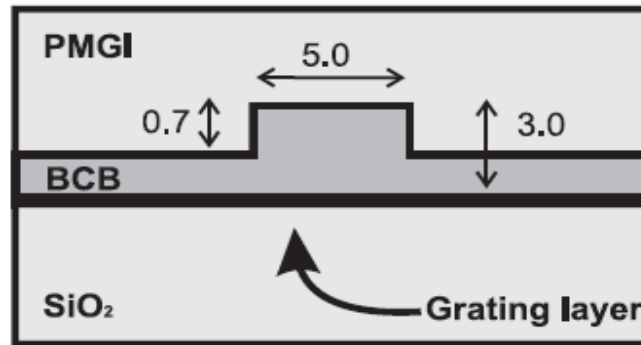
της σε υπεριώδη ακτινοβολία. c) Απομάκρυνση της ελαστομερούς σφραγίδας από το πλακίδιο. d) Εικόνα οπτικού μικροσκοπίου από τη σχεδιαζόμενη περιοχή. e) AFM εικόνα της δομής του φράγματος. f) SEM εικόνα της δομής του φράγματος στην οποία φαίνεται η επίστρωση που απομένει [13].

Προκειμένου να προσδιοριστεί η ομοιομορφία και να μετρηθεί το πάχος του στρώματος που έχει απομείνει (εξαρτάται από το αρχικό πάχος του στρώματος του προπολυμερούς), η δομή του φράγματος μεταφέρεται πάνω στο πλακίδιο πυριτίου. Στην εικόνα 22d) παρουσιάζεται ένα στιγμιότυπο (προερχόμενο από ένα οπτικό μικροσκόπιο) του σχεδίου του φράγματος που έχει μεταφερθεί. Στην εικόνα αυτή φαίνεται ότι η δομή του φράγματος παρουσιάζει υψηλή ομοιομορφία. Στην εικόνα 22f) παρουσιάζεται ένα SEM (Scanning Electron Microscope – Ηλεκτρονικό Μικροσκόπιο Σάρωσης) στιγμιότυπο της εγκάρσιας διατομής του φράγματος [13].

Στην εικόνα 22e) παρουσιάζεται ένα AFM (Atomic Force Microscopy – Μικροσκοπία Ατομικής Δύναμης) στιγμιότυπο του σχεδίου του πολυμερούς φράγματος που μεταφέρθηκε. Εξαιτίας της θερμικής συστολής που υφίσταται η πολυ-διμεθυλοσιλοξάνη κατά τη διάρκεια της διαδικασίας ωρίμανσης, παρατηρείται μείωση της τάξεως του 1% έως 3% στην περιοδικότητα του φράγματος. Αυτή η ελάττωση εξαρτάται από τη θερμοκρασία στην οποία πραγματοποιείται η διαδικασία ωρίμανσης και είναι εφικτό να ελεγχθεί. Το χαρακτηριστικό αυτό μπορεί να αποδειχθεί ιδιαίτερα χρήσιμο στη ρύθμιση της περιοδικότητας (γύρω στα -10 nm) και του μήκους κύματος συντονισμού του φράγματος Bragg (γύρω στα -30 nm) στις επιθυμητές τους τιμές [13].

Στην εικόνα που ακολουθεί παρουσιάζεται η δομή της εγκάρσιας διατομής του κυματοδηγού. Ο πυρήνας του κυματοδηγού κατασκευάζεται χρησιμοποιώντας ένα BCB (BisbenzoCycloButene – Δι-Βενζο-Κυκλοβουτένιο) πολυμερές. Το στρώμα του BCB που έχει πάχος 3 μm (το οποίο δεν έχει ακόμα ωριμάσει) επιστρώνεται δια περιστροφής επί του πλακιδίου το οποίο έχει το στρώμα ενός φράγματος στην κορυφή του. Στη συνέχεια, το BCB στρώμα αφήνεται να ωριμάσει για τρεις ώρες στους 250 °C. Κατά τη διάρκεια αυτής της διαδικασίας η δομή του φράγματος διατηρεί το σχήμα της. Στη συνέχεια, με τη χρήση συμβατικής φωτολιθογραφίας, ορίζεται στο πολυμερές ο μονότροπος κυματοδηγός και μεταφέρεται στο BCB κάνοντας χρήση διαβρωτικής χάραξης δραστικών ιόντων. Στη συνέχεια επιστρώνεται δια περιστροφής ένα στρώμα PMGI (Polymethylglutarimide – Πολυμεθυλικό Γλουταριμίδιο) (πάχους 3 μm) στη δομή του κυματοδηγού ως ένα άνω περίβλημα. Οι άκρες

του κυματοδηγού μήκους 1,5 cm αποκόπτονται προκειμένου να υπάρχει η δυνατότητα σύζευξης του φωτός [13].



Εικόνα 23 – Εγκάρσια διατομή φράγματος Bragg πολυμερούς κυματοδηγού. Η δομή του φράγματος αναπτύσσεται σε θερμικό οξείδιο πάχους 7 μm, ο πυρήνας του κυματοδηγού είναι από BCB και το άνω περίβλημα είναι από PMGI. Οι διαστάσεις που απεικονίζονται στο σχήμα είναι σε μm [13].

3.4.2 Μάσκα Φάσης

Η μάσκα φάσης είναι μία μονοδιάστατα δομημένη ανάγλυφη επιφάνεια με χωρική περιοδικότητα $\Lambda_{M\Phi}$ η οποία είναι εγγεγραμμένη σε μία πλάκα διοξειδίου του πυριτίου (silica) που είναι διαφανής στην υπεριώδη ακτινοβολία. Η εγγραφή πραγματοποιείται χρησιμοποιώντας ολογραφικές μεθόδους ή λιθογραφία δέσμης ηλεκτρονίων. Το προφίλ του περιοδικού ανάγλυφου του φράγματος επιλέγεται έτσι ώστε η μέγιστη απόδοση περίθλασης (για τις τάξεις ± 1) να λαμβάνεται στο υπεριώδες μήκος κύματος εγγραφής και η μηδενική τάξη να καταστέλλεται σε πολύ μεγάλο βαθμό.

Η κάθετη πρόπτωση μίας υπεριώδους δέσμης παρεμβάλλοντας τις τάξεις +1 και -1, οδηγεί στο μοντέλο ενός κοντινού πεδίου (near field) με περιοδικότητα $\Lambda = \frac{\Lambda_{M\Phi}}{2}$. Το πεδίο αυτό είναι εφικτό να αποτυπωθεί στον πυρήνα της ίνας, τοποθετώντας την ίνα σε στενή επαφή με τη μάσκα φάσης. Η απλότητα της χρήσης μεμονωμένων οπτικών στοιχείων οδηγεί σε μία εκ φύσεως σταθερή μέθοδο για την κατασκευή φραγμάτων Bragg. Επίσης, αξίζει να τονιστεί ότι με τη μέθοδο αυτή ελαχιστοποιείται η ευαισθησία στους μηχανικούς κραδασμούς και ότι η χαμηλή χρονική συνεκτικότητα της πηγής laser δεν επηρεάζει την ικανότητα εγγραφής εξαιτίας της ισορροπημένης γεωμετρίας που παρουσιάζει το σύστημα. Ένα ακόμα πλεονέκτημα άξιο αναφοράς είναι η δυνατότητα σάρωσης της υπεριώδους δέσμης μέσω της

μάσκας φάσης και η εγγραφή φραγμάτων των οποίων το μήκος δεν περιορίζεται από το μέγεθος του σχεδίου της μάσκας [10].

Η τεχνική της μάσκας φάσης μπορεί να οδηγήσει στην υλοποίηση τόσο *apodised* όσο και *chirped* φραγμάτων Bragg και χαρακτηρίζεται από αρκετά μεγάλη πολυπλοκότητα. Για ένα *apodised* φράγμα πρέπει να χρησιμοποιηθεί μία μάσκα φάσης και μία μάσκα πλάτους. Για ένα *chirped* φράγμα απαιτείται αρχικά η εγγραφή ενός ομοιόμορφου φράγματος και έπειτα η γραμμική μεταβολή του δείκτη υποβάθρου (*background index*) της ίνας. Σε κάθε περίπτωση η ποιότητα του φράγματος καθορίζεται από την ποιότητα της μάσκας φάσης.

Οι μάσκες που κατασκευάζονται χρησιμοποιώντας μία δέσμη ηλεκτρονίων αποτελούνται από μικρές περιοχές συραμμένες μεταξύ τους, γεγονός που καθιστά εφικτή την αποτύπωση ιδιαίτερα σύνθετων δομών απευθείας στη μάσκα. Σε περίπτωση που παρουσιαστούν σφάλματα στη συνέχεια της φάσης της μάσκας (σφάλματα συρραφής), αυτά προκαλούν διάφορες δυσλειτουργίες στο φράγμα με αποτέλεσμα να υποβαθμίζεται τελικά η ποιότητα της συσκευής, ιδιαίτερα κατά τη χρήση μασκών μεγάλου μεγέθους. Οι ολογραφικές μάσκες χαρακτηρίζονται από υψηλότερη ποιότητα αλλά παρουσιάζουν ανεπαρκή χαρακτηριστικά προς την άκρη της μάσκας. Βέβαια τα τελευταία χρόνια έχουν παρουσιαστεί αρκετά σημαντικές βελτιώσεις όσον αφορά τις δύο αυτές τεχνικές (ολογραφική μέθοδος και μέθοδος με χρήση δέσμης ηλεκτρονίων) με αποτέλεσμα να είναι εφικτή η δημιουργία ακόμα και πολύ σύνθετων προφίλ τόσο *apodised* όσο και *chirped* φραγμάτων Bragg. Η ολογραφική μέθοδος είναι περισσότερο κατάλληλη για τη μαζική παραγωγή σχετικά μικρών φραγμάτων αν και οι τεχνικές κατασκευής της μάσκας φάσης επιδέχονται περαιτέρω βελτίωση προκειμένου να είναι περισσότερο ανταγωνιστικές (όσον αφορά την ποιότητα των φραγμάτων) σε σύγκριση με τις τεχνικές συνεχούς εγγραφής [10].

Σε περίπτωση που είναι επιθυμητή η αύξηση του μήκους του φράγματος πέρα από τη φυσική διάσταση της μάσκας, αυτό μπορεί να καταστεί εφικτό εφόσον εγγραφούν πολλαπλά φράγματα ξεχωριστά σε μία μόνο ίνα. Η φάση μεταξύ των επιμέρους κομματιών ελέγχεται με υπεριώδη επεξεργασία του δείκτη διάθλασης των κομματιών που ενώνονται. Ο στόχος της υπεριώδους επεξεργασίας είναι να διατηρηθεί η συνοχή της φάσης στο εσωτερικό της συνολικής κατασκευής. Δυστυχώς όμως οι ατέλειες στη διαδικασία της συρραφής και ο διαφορετικός ρυθμός γήρανσης των επιμέρους κομματιών μπορεί να οδηγήσει σε σοβαρό περιορισμό των επιδόσεων της συνολικής κατασκευής.

Ένα ακόμα μειονέκτημα της τεχνικής της μάσκας φάσης είναι η εγγενής έλλειψη ευελιξίας. Το μήκος κύματος Bragg του φράγματος λ_{Bragg} προσδιορίζεται από τη χωρική

περιοδικότητα της μάσκας Λ_{MF} αφού δεν υπάρχει δυνατότητα αλλαγής της γωνίας τομής των δύο διαθλώμενων δεσμών. Επίσης είναι άξιο αναφοράς ότι η δυνατότητα συντονισμού είναι περιορισμένη και αποκτάται μόνο από το φυσικό τέντωμα της ίνας είτε κατά τη διάρκεια είτε μετά τη διαδικασία εγγραφής [10].

3.4.3 Τεχνικές Κατασκευής Συνεχούς Φράγματος

Μία πιο κομψή λύση για την κατασκευή μεγάλων και πολύπλοκων φραγμάτων είναι να πραγματοποιηθεί σύνθεση της δομής με πολλά μικρά ανοίγματα τα οποία χωρίζονται από μία ή περισσότερες περιόδους φράγματος.

Σαν μία πρώτη λύση το επίπεδο κάθε φράγματος είναι εφικτό να κατασκευαστεί ξεχωριστά χρησιμοποιώντας έναν εστιασμένο παλμό ενός laser διεγερμένου διατομικού μορίου. Στην περίπτωση που είναι εφικτό να οριστεί η περιοδική δομή του φράγματος σημείο προς σημείο, μπορεί να επιτευχθεί η απόλυτη δυνατή ευελιξία κατά το σχεδιασμό του φράγματος. Βέβαια, η διαδικασία διαρκεί αρκετό χρόνο και είναι πιθανό να προκύψουν αρκετά σφάλμα που σχετίζονται με την απόσταση και τα οποία οφείλονται είτε σε θερμικές επιδράσεις είτε σε διακυμάνσεις του στελέχους. Το γεγονός αυτό περιορίζει τα φράγματα που παράγονται στο να έχουν σχετικά μικρό μήκος. Επιπρόσθετα, τα φράγματα που χρησιμοποιούνται σε εφαρμογές στα 1550 nm είναι εφικτό να κατασκευαστούν χρησιμοποιώντας μόνο σκέδαση Bragg δεύτερης ή τρίτης τάξης αφού είναι αδύνατη η εστίαση της υπεριώδους ακτινοβολίας σε περιοχές μερικών εκατοντάδων νανομέτρων [10].

Μία περισσότερο αποτελεσματική προσέγγιση είναι η εγγραφή μικρών (στο μέγεθος της διαμέτρου της δέσμης) υποφραγμάτων τα οποία να μπορούν να επικαλυφθούν. Στην περίπτωση αυτή αντιστρέφεται η παραδοσιακή ιδέα των φραγμάτων Bragg ίνας που βασίζονται στη μάσκα φάσης. Η υπεριώδης δέσμη δε σαρώνει τη μάσκα και αποτυπώνει το σχέδιο της σε μία στατική ίνα. Προκειμένου να δημιουργηθεί ένα διαμορφωμένο σχέδιο και όχι μία ομοιόμορφη αύξηση του δείκτη διάθλασης, μία υπεριώδης δέσμη (συνεχές κύμα) διαμορφώνεται έτσι ώστε τα διαδοχικά ανοίγματα να διαχωρίζονται από ένα μόνο κυματισμό φράγματος (ή από ένα κλάσμα του κυματισμού). Πράγματι οι apodisation, οι chirp και οι διακριτές ολισθήσεις φάσης εισάγονται απλά ελέγχοντας τοπικά τις σχετικές φάσεις των ανοιγμάτων.

Η τεχνική συνεχούς γραφής παρουσιάζει αρκετά πλεονεκτήματα σε σύγκριση με τις άλλες τεχνικές κατασκευής. Τα πιο σημαντικά από αυτά τα πλεονεκτήματα είναι τα εξής:

- Τα φράγματα είναι εφικτό να έχουν πολύ μεγαλύτερο μήκος από τις διαθέσιμες μάσκες φάσης και περιορίζονται μόνο από το χρησιμοποιούμενο μήκος του σταδίου μετάφρασης.
- Τα χαρακτηριστικά και τα σχέδια των φραγμάτων δεν περιορίζονται από τις διαθέσιμες μάσκες φάσης δεδομένου ότι είναι εφικτή η δημιουργία μίας μεγάλης ποικιλίας δομών χωρίς να πρέπει να γίνουν απαραίτητως πολύπλοκες οπτικές ρυθμίσεις.
- Η ποιότητα των φραγμάτων δεν περιορίζεται από την ποιότητα της μάσκας φάσης.
- Τα φράγματα παρουσιάζουν συνεχή χαρακτηριστικά και είναι απαλλαγμένα από μεγάλες δυσλειτουργίες φάσης.
- Μία διαμορφωμένη πηγή συνεχούς κύματος μπορεί να αποτρέψει οποιοδήποτε πρόβλημα ή ζημιά που είναι πιθανό να προκληθεί στην ίνα (ή στη μάσκα). Επίσης, μπορεί να αποτρέψει και το θόρυβο έντασης που σχετίζεται με τα παλμικά lasers υψηλής ενέργειας [10].

Ένα ακόμα βασικό στοιχείο αυτής της τεχνικής είναι η εγγενής μείωση των σφαλμάτων κατά τη διάρκεια της διαδικασίας κατασκευής. Η ακριβής θέση των πολλαπλών ανοιγμάτων που ορίζουν το φράγμα είναι πολύ σημαντική για τον καθορισμό της ποιότητας της τελικής κατασκευής. Βέβαια, ο ακριβής προσδιορισμός της θέσης παρουσιάζει προβλήματα που οφείλονται στην κβάντιση και στο θόρυβο καθότι απαιτείται ακρίβεια της τάξεως μερικών νανομέτρων ή ακόμα και υπο-νανομέτρων. Αν το μέγεθος της δέσμης D_{beam} που χρησιμοποιείται για την εγγραφή του φράγματος αποτελείται από πολλούς κυματισμούς φράγματος $\frac{D_{beam}}{\lambda}$, το Κεντρικό Οριακό Θεώρημα (ΚΟΘ) της στατιστικής πιστοποιεί ότι η αβεβαιότητα της θέσης στην προκύπτουσα δομή του φράγματος μειώνεται κατά ένα παράγοντα $\sqrt{\frac{D_{beam}}{\lambda}}$, δηλαδή κατά μία τάξη μεγέθους ή παραπάνω για μεγέθη δέσμης της τάξεως των 55 μm ή μεγαλύτερα.

Ο έλεγχος της φάσης (θέσης) των επιμέρους ανοιγμάτων είναι θεμελιώδους σημασίας για τη συγκεκριμένη τεχνική διότι:

- Τα μεμονωμένα άλματα φάσης οδηγούν σε τοπικές ολισθήσεις φάσης.
- Μία μεταβολή του μήκους κύματος οδηγεί σε μία γραμμική απώλεια φάσης των διαδοχικών ανοιγμάτων.

- Το γραμμικό chirp εισάγεται χρησιμοποιώντας μία τετραγωνική αλλαγή φάσης (αντιστοιχεί στη σχετική κίνηση μάσκας και ίνας που περιγράφηκε στο προηγούμενο εδάφιο).

Τα apodised χαρακτηριστικά λαμβάνονται θεωρώντας ότι το φράγμα σχηματίζεται από συνδεδεμένα ζεύγη υποφραγμάτων μονού ανοίγματος. Η συνολική μεταβολή του δείκτη διάθλασης που προκαλείται από αυτά τα ζεύγη ισούται με το διανυσματικό άθροισμα των δύο ανοιγμάτων με τρόπο που να επιτυγχάνεται μέγιστη ορατότητα όταν τα ανοίγματα είναι σε φάση και καμία διαφοροποίηση όταν παρουσιάζουν διαφορά φάσης κατά $\pi(\pm\pi/2)$ ανάλογα με την ονομαστική θέση. Σε κάθε κομμάτι της ίνας αποδίδεται η ίδια υπεριώδης ροή έτσι ώστε να επιτυγχάνεται η σταθερή διακύμανση του δείκτη υποβάθρου και να αποτρέπεται η εμφάνιση επιπτώσεων λόγω chirping [10].

Στους τρόπους κατασκευής που παρουσιάστηκαν παραπάνω, χρησιμοποιήθηκε συμβολομετρικός έλεγχος της σχετικής θέσης της μάσκας και της οπτικής ίνας προκειμένου να ενεργοποιηθεί ένας ακουστο-οπτικός διαμορφωτής ο οποίος χρησιμοποιείται ως on-off διάφραγμα όταν επιτυγχάνονται οι προκαθορισμένες θέσεις. Ακόμα χρησιμοποιείται ένα είδος ψηφιακής κωδικοποίησης των χαρακτηριστικών του φράγματος και ένα πηνίο ίνας το οποίο παρέχει τη δυνατότητα επέκτασης του θεωρητικού μήκους των φραγμάτων ίνας στα 10 περίπου μέτρα. Επίσης είναι άξιο αναφοράς ότι η υπεριώδης δέσμη εγγραφής υφίσταται αναλογική διαμόρφωση παρόμοια με το πρότυπο εγγραφής μαγνητικής ταινίας. Η ονομαστική συχνότητα ω που αντιστοιχεί στη χωρική περιοδικότητα της μάσκας φάσης $\Lambda_{\text{MΦ}}$, είναι εφικτό να υπολογιστεί εφόσον είναι γνωστή η (σταθερή) ταχύτητα της ίνας. Οι διακυμάνσεις της συχνότητας οδηγούν σε αποσυντονισμό του μήκους κύματος, ενώ η apodised λειτουργία λαμβάνεται μεταβάλλοντας την ορατότητα του σήματος ελέγχου και κρατώντας τη μέση τιμή σταθερή προκειμένου να αποφευχθεί το chirping. Παρά τα θεωρητικά πλεονεκτήματα της συγκεκριμένης προσέγγισης, η ποιότητα των φραγμάτων που προκύπτουν δεν είναι πλήρως ικανοποιητική [10].

Τα τελευταία χρόνια έχουν αναδειχθεί και άλλες τεχνικές κατασκευής συνεχούς φράγματος. Ο Varming έδειξε ότι για την εγγραφή apodised φραγμάτων απαιτούνται τρία βήματα:

- Διαχωρισμός των δύο πολώσεων μίας υπεριώδους δέσμης εγγραφής.
- Μετατόπιση των πολώσεων κατά π (αποτελεσματική ολίσθηση φάσης). Οι π ολισθήσεις φάσεις εισάγονται από τη σάρωση μίας απλής μάσκας φάσης.
- Έλεγχος της σχετικής έντασης των πολώσεων.

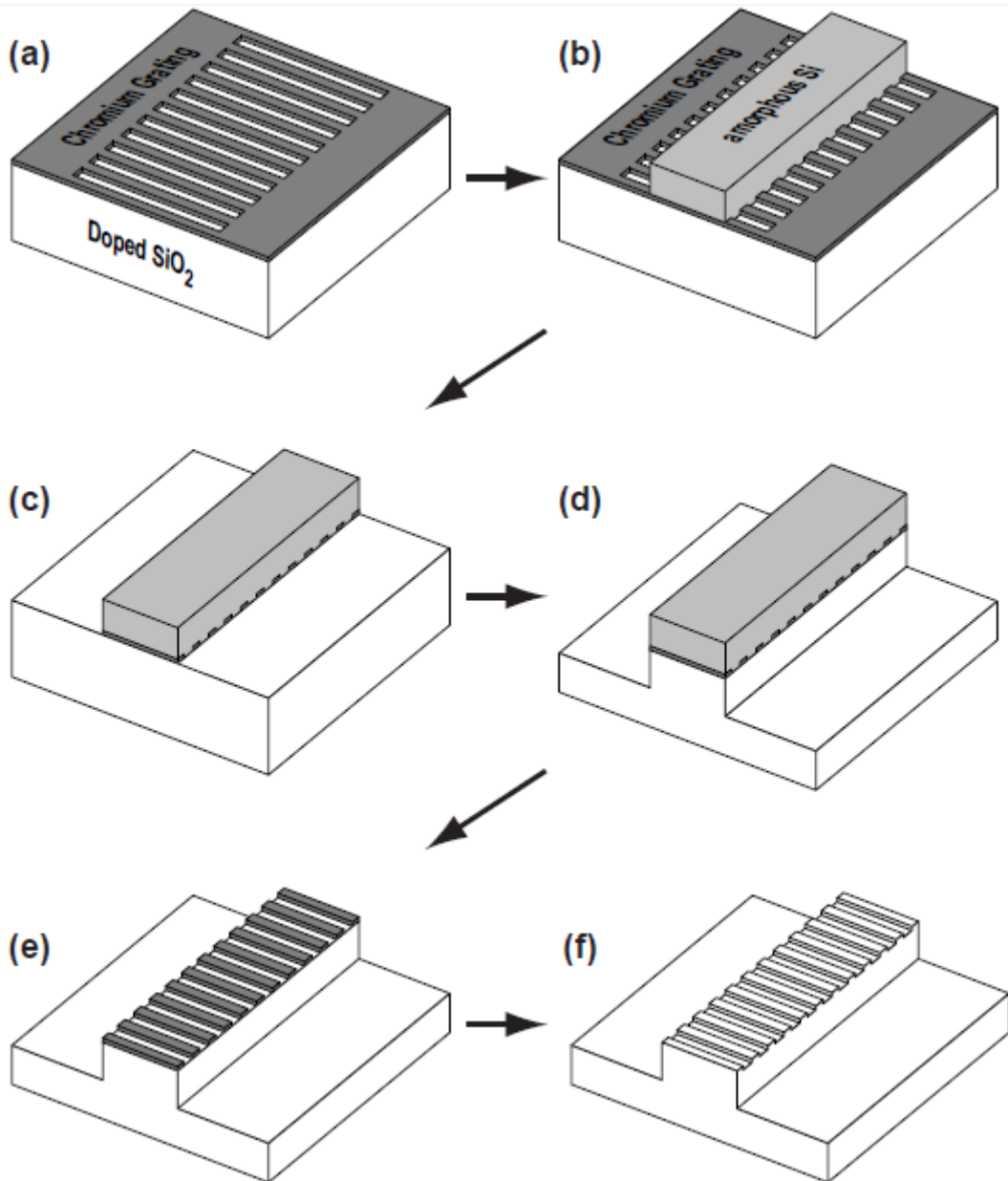
Η μέθοδος αυτή βασίζεται στη χρήση μίας ομοιόμορφης μάσκας, ενώ η θέση τόσο της ίνας όσο και της μάσκας ελέγχονται με ακρίβεια μερικών νανόμετρων. Το μέγιστο μήκος του φράγματος περιορίζεται από το μέγεθος της μάσκας φάσης. Με τη μέθοδο αυτή δεν είναι εφικτή η κατασκευή chirped φραγμάτων, όμως η απλότητα που τη χαρακτηρίζει την κάνει ελκυστική για την παραγωγή τυπικών φραγμάτων Bragg ίνας.

Τέλος οι Knothe και Brinkmeyer συνδύασαν την ιδέα της συνεχούς εγγραφής με την προβολή της μάσκας φάσης χρησιμοποιώντας ένα συμβολόμετρο Sagnac. Το chirp λαμβάνεται ρυθμίζοντας τη γωνία τομής των δύο δεσμών, ενώ τα apodised χαρακτηριστικά ελέγχονται από ένα ολισθητή φάσης (phase shifter) που τοποθετείται στο εσωτερικό του πολωτικά ευαίσθητου συμβολόμετρου. Με τη μέθοδο αυτή είναι εφικτή η δημιουργία αυθαίρετων δομών, όμως το μήκος του φράγματος είναι καθορισμένο δεδομένου ότι δεν υπάρχει σχετική κίνηση της ίνας και της μάσκας [10].

3.4.4 Λιθογραφία Πολλαπλών Επιπέδων: Κυματοδηγοί με Φράγματα (Ολοκληρωμένα Φράγματα Bragg)

Ακολούθως παρατίθεται σχηματικά η διαδικασία σχηματισμού φραγμάτων Bragg σε κυματοδηγό από silica. Η διαδικασία αυτή καλείται διπλή σκληρή μάσκα (dual hard mask) και επιλύει αποτελεσματικά το πρόβλημα σχηματισμού φραγμάτων σε κυματοδηγούς με σχετικά έντονα χαρακτηριστικά.

Αρχικά, χρησιμοποιείται ένα οπτικό υπόστρωμα, που αποτελείται από ένα χαμηλότερο επίπεδο, το οποίο είναι το στρώμα του περιβλήματος και του πυρήνα. Στον πυρήνα σχεδιάζονται τα φράγματα Bragg, χρησιμοποιώντας διάφορες τεχνικές λιθογραφίας. Τα φράγματα δε χαράζονται εξαρχής στο εσωτερικό του πυρήνα αλλά σχεδιάζονται σε ένα λεπτό μεταλλικό στρώμα κάλυψης (masking layer), που βρίσκεται στην κορυφή του στρώματος του πυρήνα. Το δεύτερο στρώμα κάλυψης που ορίζει τους κυματοδηγούς σχηματίζεται στην κορυφή των φραγμάτων, χρησιμοποιώντας επιλεκτική χάραξη δραστικών ιόντων (reactive-ion etching). Αφού σχεδιαστεί η σκληρή μάσκα του κυματοδηγού, η συσκευή σχηματίζεται έπειτα από μία ακολουθία βημάτων χάραξης. Αρχικά, το φράγμα που περισσεύει απομακρύνεται από τις περιοχές που βρίσκονται εκτός των κυματοδηγών. Κατόπιν οι κυματοδηγοί χαράσσονται στο επιθυμητό βάθος και αφαιρείται η σκληρή μάσκα του κυματοδηγού, ώστε να απομείνει η υποκείμενη μάσκα του φράγματος. Τέλος, τα φράγματα χαράζονται και αφαιρείται η μάσκα του φράγματος. Η δημιουργία της συσκευής ολοκληρώνεται με τη σύμμορφη εναπόθεση ενός άνω στρώματος επί της δομής που έχει προκύψει, το οποίο λειτουργεί ως περίβλημα [16].

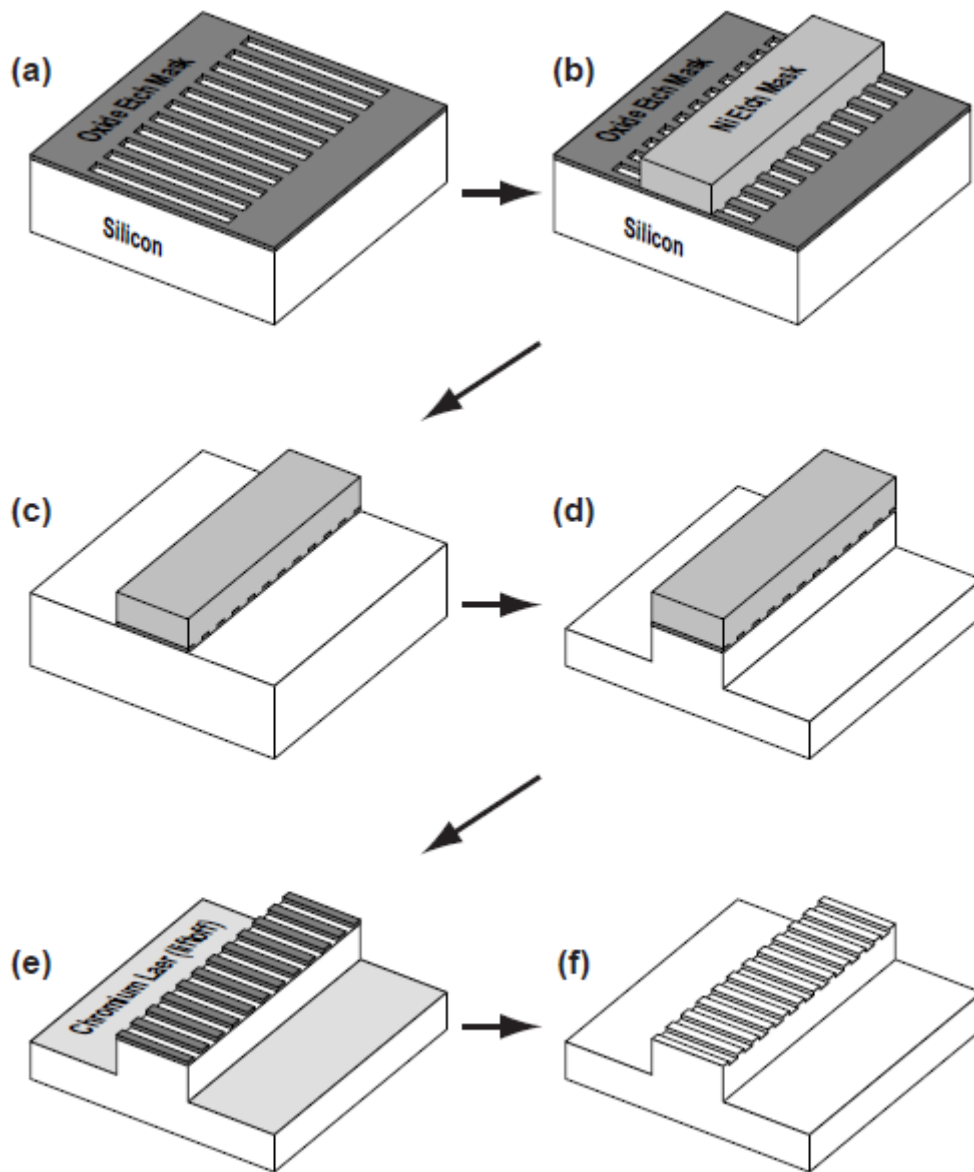


Εικόνα 24 – Μέθοδος σχηματισμού ολοκληρωμένων φραγμάτων Bragg σε κυματοδηγούς από silica. Πρώτα σχηματίζονται τα φράγματα και στο τέλος χαράζονται [16].

Η διαδικασία της διπλής σκληρής μάσκας (dual hard mask) που παρουσιάστηκε ανωτέρω δύναται να προσαρμοστεί κατάλληλα, ώστε να χρησιμοποιηθεί σε SOI (Silicon on Insulator) κυματοδηγούς κορυφογραμμής (ridge waveguides). Τα υλικά του στρώματος κάλυψης πρέπει να τροποποιηθούν κατάλληλα, ώστε να δημιουργήσουν τις μάσκες για τη χάραξη του πυριτίου [16].

Στην εικόνα που ακολουθεί παρουσιάζεται η ελαφρώς τροποποιημένη διαδικασία που εφαρμόζεται για τους SOI κυματοδηγούς κορυφογραμμής. Τα επιμέρους βήματα της

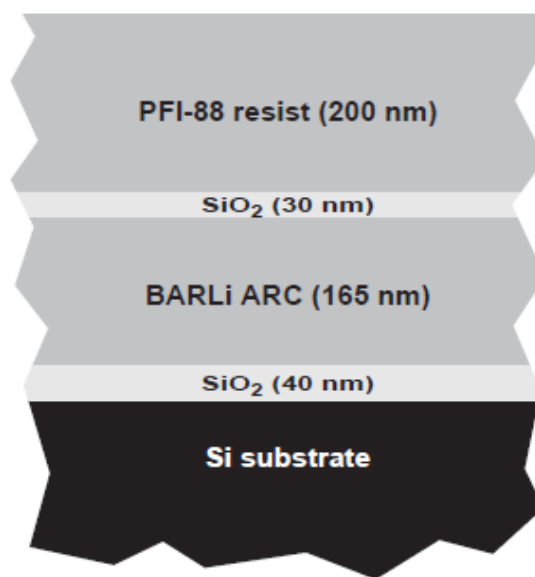
λιθογραφίας πραγματοποιούνται σε σχεδόν επίπεδη επιφάνεια όπως και στη διαδικασία που περιγράφηκε πριν στους silica κυματοδηγούς.



Εικόνα 25 – Μέθοδος σχηματισμού ολοκληρωμένων φραγμάτων Bragg σε SOI (Silicon on Insulator) κυματοδηγούς κορυφογραμμής (ridge waveguides) [16].

Τα φράγματα σχεδιάζονται σε ένα λεπτό στρώμα (40 nm) οξειδίου, χρησιμοποιώντας λιθογραφία και χάραξη δραστικών ιόντων. Τα δείγματα επικαλύπτονται αρχικά με ένα ομοιόμορφο στρώμα (πάχους 40 nm) οξειδίου του πυριτίου (SiO_x) χρησιμοποιώντας εξάτμιση ηλεκτρονικής δέσμης (e-beam evaporation). Στη συνέχεια, στροβιλίζεται ένα υποκείμενο στρώμα από αντανάκλαστική επίστρωση (Antireflective Coating - ARC) πάχους 165 nm με στόχο την εξάλειψη της οπισθοανάκλασης.

Ένα δεύτερο στρώμα οξειδίου με πάχος 30 nm υφίσταται εξάτμιση ηλεκτρονικής δέσμης στην κορυφή της αντιανακλαστικής επίστρωσης. Τέλος, στροβιλίζεται ένα στρώμα ρετινών (photoresists) μέχρι να αποκτήσει πάχος της τάξεως των 200 nm. Στην εικόνα που ακολουθεί απεικονίζεται η πλήρης δομή του στρώματος πριν την έκθεση στην ηλεκτρονική δέσμη. Το ανώτερο στρώμα είναι αυτό στο οποίο εκτίθεται το μοντέλο του φράγματος. Το πάχος της αντιανακλαστικής επίστρωσης επιλέγεται πολύ προσεχτικά με στόχο την ελαχιστοποίηση της οπισθοανάκλασης. Το ανώτερο στρώμα οξειδίου χρησιμοποιείται ως μάσκα για τη μεταφορά του φράγματος στην αντιανακλαστική επίστρωση. Το κατώτερο στρώμα οξειδίου χρησιμοποιείται ως μάσκα για τη μεταφορά του φράγματος στο πυρίτιο [16].



Εικόνα 26 – Η δομή του στρώματος που χρησιμοποιείται για το σχηματισμό φραγμάτων Bragg σε πυρίτιο χρησιμοποιώντας λιθογραφία. Το ανώτερο στρώμα ρετινών χρησιμοποιείται για την καταγραφή του σχήματος των στάσιμων κυμάτων. Το λεπτό ενδιάμεσο στρώμα χρησιμοποιείται ως μάσκα για τη μεταφορά του σχήματος για τη μεταφορά της αντιανακλαστικής επίστρωσης. Η αντιανακλαστική επίστρωση σχεδιάζεται με στόχο να ελαχιστοποιήσει τις ανακλάσεις από υπόστρωμα και το ανώτερο στρώμα οξειδίου σχηματίζει τη μάσκα για τη χάραξη του πυριτίου [16].

4^ο - ΚΕΦΑΛΑΙΟ

“ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΤΩΝ ΦΡΑΓΜΑΤΩΝ (GRATINGS) BRAGG ΣΤΑ LASER ΕΞΩΤΕΡΙΚΗΣ ΚΟΙΛΟΤΗΤΑΣ”

4.1 Τα Φράγματα (Gratings) Bragg στο Ρόλο του Καθρέπτη

Ένας καθρέπτης Bragg (ή κατανεμημένος ανακλαστήρας Bragg) είναι μια δομή καθρέπτη η οποία αποτελείται από μία εναλλασσόμενη ακολουθία επιπέδων το κάθε ένα εκ των οποίων κατασκευάζεται από δύο διαφορετικά οπτικά υλικά. Η συχνότερα χρησιμοποιούμενη σχεδίαση είναι αυτή του καθρέπτη ενός τέταρτου μήκους κύματος ($\frac{\lambda}{4}$) στην οποία το πάχος κάθε οπτικού στρώματος αντιστοιχεί στο ένα τέταρτο του μήκους κύματος για το οποίο έχει σχεδιαστεί ο καθρέπτης. Η τελευταία αντιστοιχία αφορά σε κάθετη πρόσπτωση. Αν όμως ο καθρέπτης είναι σχεδιασμένος για μεγαλύτερες γωνίες πρόσπτωσης, τα επιμέρους οπτικά στρώματα θα έχουν μεγαλύτερο πάχος [15].

Τα φράγματα Bragg χρησιμοποιούνται σε απλές διαμορφώσεις της εξωτερικής κοιλότητας για το κλείδωμα του μήκους κύματος και για το φασματικό περιορισμό της εκπομπής μίας δίοδου laser (τόσο για μεμονωμένες εκπομπές όσο και για συστοιχίες εκπομπών). Λόγω της εγγενούς γωνιακής επιλεκτικότητας ενός φράγματος Bragg, η χρήση του φράγματος στο εσωτερικό μίας εξωτερικής κοιλότητας μπορεί να τροποποιήσει τη διάδοση της δέσμης και να ελαττώσει το συντελεστή αποτελεσματικής σύζευξης. Ένα φράγμα Bragg μπορεί να είναι διαπερατό (transmissive) ή ανακλαστικό (reflective) ανάλογα με τον αν επιτρέπει η όχι τη διέλευση φωτός μέσα από το εσωτερικό του. Οι σχεδιαστικές παράμετροι ενός φράγματος Bragg ορίζονται με τη βοήθεια της εικόνας 27 που ακολουθεί στην επόμενη σελίδα.

Προκειμένου να μοντελοποιηθούν οι επιπτώσεις ενός φράγματος Bragg στην τροπική (modal) επιλεκτικότητα μίας εξωτερικής κοιλότητας, πρέπει να ληφθούν σοβαρά υπόψη η ειδική ανακλαστικότητα και η δυνατότητα μετάδοσης του φράγματος Bragg. Η μοντελοποίηση βασίζεται στη θεώρηση φραγμάτων με ανοίγματα κάθετα (αντιστοίχως παράλληλα) στον οπτικό άξονα ενός ανακλαστικού (αντιστοίχως διαπερατού) φράγματος Bragg.

Με βάση αυτή την υπόθεση, το πλάτος της ανακλαστικότητας ενός ανακλαστικού (reflective) φράγματος Bragg δίνεται από τη σχέση:

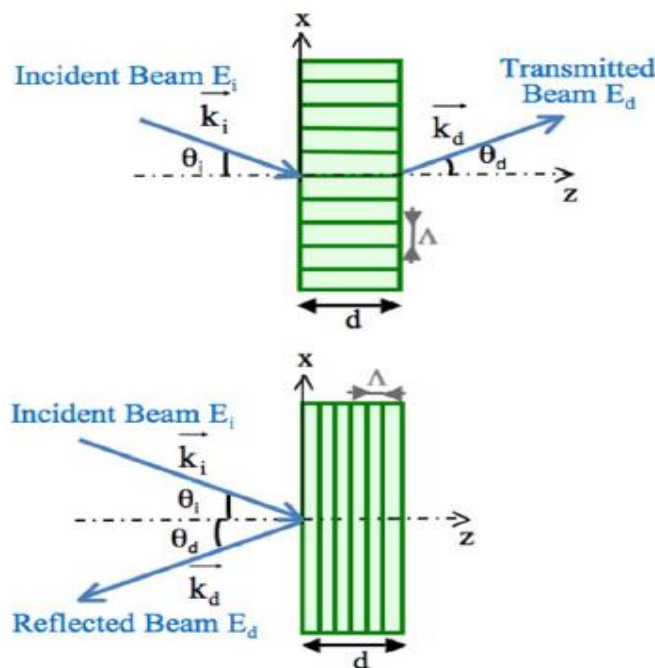
$$r_{RBG}(\lambda, \theta_i) = \frac{i}{\frac{\xi_R}{v} + \sqrt{1 + \left(\frac{\xi_R}{v}\right)^2} x \cot(\sqrt{v^2 + \xi_R^2})} \quad (4.1)$$

όπου ξ_R παράμετρος που χαρακτηρίζει την αναντιστοιχία που παρουσιάζει ένα ανακλαστικό φράγμα ως προς τη συνθήκη Bragg και v παράμετρος που ορίζει τη μέγιστη απόδοση διάθλασης [14].

Το απλοποιημένο πλάτος μετάδοσης ενός διαπερατού (transmissive) φράγματος Bragg δίνεται από τη σχέση:

$$t_{TBG}(\lambda, \theta_i) = -i \frac{\exp(-i \xi_T) x \sin(\sqrt{v^2 - \xi_T^2})}{\sqrt{1 - \left(\frac{\xi_T}{v}\right)^2}} \quad (4.2)$$

όπου ξ_T παράμετρος που χαρακτηρίζει την αναντιστοιχία που παρουσιάζει ένα διαπερατό φράγμα ως προς τη συνθήκη Bragg και v παράμετρος που ορίζει τη μέγιστη απόδοση διάθλασης.



Εικόνα 27 – Παράμετροι σχεδίασης ενός διαπερατού (πάνω) και ενός ανακλαστικού (κάτω) φράγματος Bragg. Το k_i είναι το διάνυσμα κατεύθυνσης της προσπίπτουσας δέσμης και k_d το διάνυσμα κατεύθυνσης της διαθλώμενης δέσμης.

Οι παράμετροι ξ_R και ξ_T δίνονται από τις σχέσεις:

$$\xi_R = \frac{\left(\frac{2\pi}{\Lambda} \cos\theta_i - \frac{\pi}{n_o \lambda}\right) d}{2 \cos\theta_i} \quad (4.3)$$

$$\xi_T = \xi_R - \frac{\pi d}{\lambda} (\tan\theta_i + 1) \quad (4.4)$$

όπου Λ η χωρική περιοδικότητα του φράγματος Bragg, θ_i η γωνία πρόσπτωσης, λ το μήκος κύματος, n_o ο δείκτης διάθλασης του υλικού, n_1 το πλάτος διαμόρφωσης του δείκτη διάθλασης, d το πάχος του φράγματος Bragg.

Η παράμετρος ν δίνεται από τη σχέση:

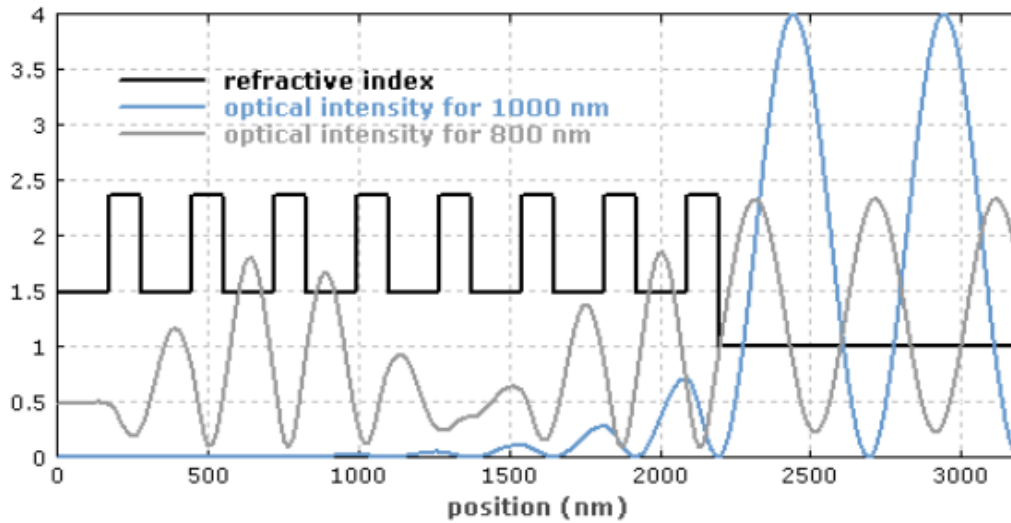
$$\nu = \frac{\pi n_1 d}{\lambda \cos\theta_i} \quad (4.5)$$

όπου n_1 το πλάτος διαμόρφωσης του δείκτη διάθλασης, d το πάχος του φράγματος Bragg, λ το μήκος κύματος και θ_i η γωνία πρόσπτωσης [14].

Η αρχή λειτουργίας ενός καθρέπτη Bragg είναι η ακόλουθη. Κάθε διεπαφή (interface) μεταξύ των δύο διαφορετικών οπτικών υλικών (από τα οποία κατασκευάζεται κάθε επιμέρους επίπεδο) συνεισφέρει σε μία ανάκλαση Fresnel. Για το μήκος κύματος σχεδίασης, η διαφορά του μήκους της οπτικής διαδρομής μεταξύ ανακλάσεων από διαδοχικές διεπαφές ισούται με μισό μήκος κύματος $\left(\frac{\lambda}{2}\right)$. Επιπρόσθετα, οι συντελεστές του πλάτους ανάκλασης των διεπαφών έχουν εναλλασσόμενα πρόσημα. Έτσι, όλες οι ανακλώμενες συνιστώσες από τις διεπαφές συμβάλλουν ενισχυτικά με αποτέλεσμα η προκύπτουσα ανάκλαση να είναι ιδιαίτερα ισχυρή. Η συνολική ανακλαστικότητα καθορίζεται από το πλήθος των επιμέρους επιπέδων και από τη διαφορά που παρουσιάζει η τιμή του δείκτη διάθλασης μεταξύ των δύο διαφορετικών υλικών από τα οποία κατασκευάζεται το κάθε επιμέρους επίπεδο. Ειδικότερα, το εύρος ζώνης της ανάκλασης προσδιορίζεται ως επί το πλείστον από τη διαφορά στην τιμή του δείκτη διάθλασης.

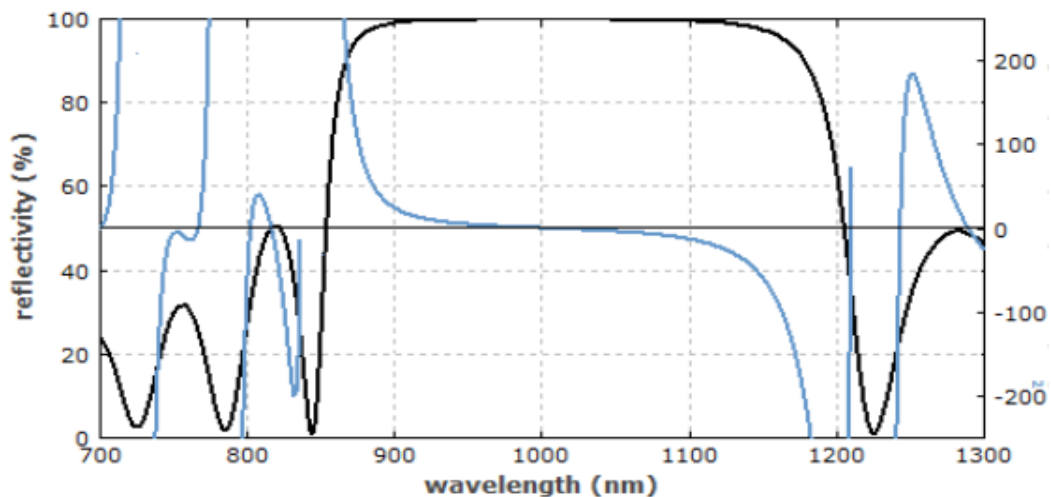
Στην εικόνα 24 που ακολουθεί στην επόμενη σελίδα παρουσιάζεται η διείσδυση του πεδίου σε ένα καθρέπτη Bragg κατασκευασμένο από 8 επίπεδα το κάθε ένα εκ των οποίων είναι κατασκευασμένο από διοξείδιο του τιτανίου (TiO_2) και διοξείδιο του πυριτίου (SiO_2). Η μπλε καμπύλη απεικονίζει την κατανομή της έντασης ενός κύματος που προσπίπτει από τη δεξιά πλευρά για μήκος κύματος σχεδίασης της τάξεως των 1000 nm. Είναι άξιο αναφοράς ότι η ένταση εκτελεί ταλάντωση έξω από τον καθρέπτη λόγω της συμβολής των δύο αντίθετα διαδιδόμενων κυμάτων. Η γκρι καμπύλη απεικονίζει την κατανομή της έντασης του κύματος

για μήκος κύματος σχεδίασης της τάξεως των 800 nm όπου ένα μεγάλο μέρος του φωτός μπορεί να διέλθει μέσα από την επίστρωση του καθρέπτη [15].



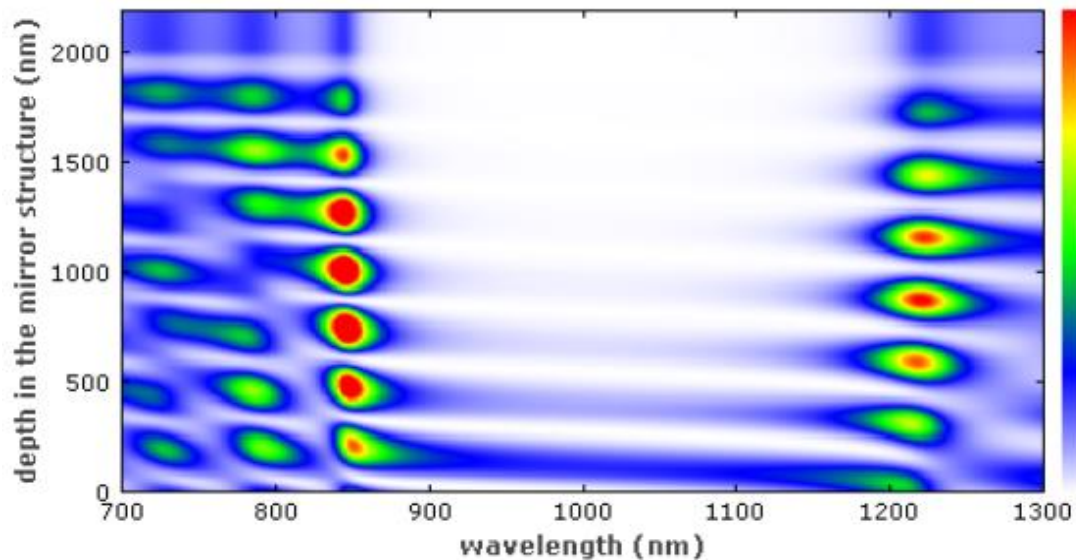
Εικόνα 28 – Η διεύθυνση του πεδίου σε ένα καθρέπτη Bragg [15].

Στην εικόνα που ακολουθεί παρουσιάζεται η ανακλαστικότητα και η χρωματική διασπορά (διασπορά καθυστέρησης ομάδας) ως συνάρτηση του μήκους κύματος. Η ανακλαστικότητα παρουσιάζει υψηλή τιμή πάνω από ένα ορισμένο οπτικό εύρος ζώνης το οποίο καθορίζεται από τη διαφορά του δείκτη διάθλασης μεταξύ των υλικών που χρησιμοποιούνται και από το πλήθος των επιμέρους επιπέδων. Η διασπορά υπολογίζεται από τη δεύτερη παράγωγο της φάσης ανάκλασης ως προς την οπτική συχνότητα. Η τιμή της είναι μικρή κοντά στο κέντρο της ζώνης ανάκλασης και μεγαλώνει απότομα κοντά στα άκρα [15].



Εικόνα 29 – Ανακλαστικότητα (μαύρη καμπύλη) και χρωματική διασπορά (μπλε καμπύλη) του καθρέπτη Bragg της εικόνας 24 σε συνάρτηση με το μήκος κύματος [15].

Στην εικόνα που έπεται παρουσιάζεται, με τη βοήθεια κατάλληλης χρωματικής κλίμακας, ο τρόπος που το οπτικό πεδίο διεισδύει στο εσωτερικό του καθρέπτη Bragg. Από την εικόνα φαίνεται ότι η διείσδυση του οπτικού πεδίου στο εσωτερικό της ζώνης ανάκλασης είναι μικρή [15].



Εικόνα 30 – Η διείσδυση του οπτικού πεδίου στο εσωτερικό ενός καθρέπτη Bragg ως συνάρτηση του μήκους κύματος. Όσο πιο έντονα είναι τα χρώματα τόσο πιο έντονη είναι η ένταση στο εσωτερικό του καθρέπτη [15].

4.1.1 Τύποι Καθρεπτών Bragg

Στην παράγραφο αυτή παρουσιάζονται οι κυριότεροι τύποι καθρεπτών Bragg. Η διάκριση πραγματοποιείται με βάση τον τρόπο κατασκευής:

- **Διηλεκτρικοί καθρέπτες.** Πρόκειται για καθρέπτες που βασίζονται στην τεχνολογία επίστρωσης λεπτής μεμβράνης (thin film coating). Πιο συγκεκριμένα οι διηλεκτρικοί καθρέπτες κατασκευάζονται με εξάτμιση ηλεκτρονικής δέσμης ή με ψεκασμό δέσμης ιόντων και χρησιμοποιούνται ως επί το πλείστον στα lasers στερεάς κατάστασης (solid state lasers). Η δομή του καθρέπτη αποτελείται από ένα σύνολο άμορφων υλικών.
- **Φράγματα Bragg οπτικής ίνας.** Στα φράγματα αυτά συμπεριλαμβάνονται φράγματα ίνας μακράς περιόδου τα οποία χρησιμοποιούνται συνήθως στα lasers ίνας και σε άλλες συσκευές οπτικών ινών. Τα φράγματα αυτά κατασκευάζονται ακτινοβολώντας μία οπτική ίνα με χωρικά διαμορφωμένο υπεριώδες φως.

Αντίστοιχα τα φράγματα Bragg είναι εφικτό να κατασκευαστούν σε φωτοευαίσθητο υαλώδες υλικό [15].

- **Ημιαγώγιοι καθρέπτες Bragg.** Οι καθρέπτες αυτοί παράγονται με λιθογραφικές μεθόδους. Συνήθως χρησιμοποιούνται σε διόδους laser και ιδιαίτερα σε lasers επιφάνειας εκπομπής φωτός (surface emitting lasers).
- **Άλλοι τύποι ανακλαστήρων (reflectors) Bragg.** Διάφοροι άλλοι τύποι ανακλαστήρων Bragg χρησιμοποιούνται σε κυματοδηγούς (με αυλακωτή δομή) οι οποίοι είναι εφικτό να κατασκευαστούν χρησιμοποιώντας λιθογραφία σε διάφορες πλατφόρμες υλικών (πχ SOI, πολυμερές). Τέτοιου είδους φράγματα χρησιμοποιούνται στα lasers κατανεμημένου ανακλαστήρα Bragg (Distributed Bragg Reflector – DBR), στα lasers κατανεμημένης ανατροφοδότησης (Distributed Feedback – DFB) και στα lasers εξωτερικής κοιλότητας (external cavity lasers).

Επίσης είναι άξιο αναφοράς ότι υπάρχουν και άλλα σχέδια καθρεπτών πολλαπλών επιπέδων τα οποία αποκλίνουν από την απλή σχεδίαση του ενός τετάρτου μήκους κύματος. Οι καθρέπτες αυτοί παρουσιάζουν χαμηλότερη ανακλαστικότητα για τον ίδιο αριθμό επιπέδων και είναι εφικτό να υποστούν περεταίρω βελτιώσεις (πχ ως διχρωικοί καθρέπτες ή ως chirped καθρέπτες για την εξασθένιση της διασποράς) [15].

4.2 Τοποθέτηση ενός Bragg Grating Φίλτρου σε ένα Laser Εξωτερικής Κοιλότητας

Η τεχνική με την οποία κατασκευάστηκαν τα υπό προσομοίωση φράγματα είναι η εξής:

- Αρχικά κατασκευάστηκε η μάσκα με λιθογραφία ηλεκτρονικής δέσμης.
- Στη συνέχεια, γράφτηκαν οι δομές πάνω στην πολυμερική πλατφόρμα, εφαρμόζοντας τη μάσκα με υπεριώδη οπτική λιθογραφία.
- Υπήρξαν μερικά ενδιάμεσα στάδια εφαρμογής ρητινών (photoresists).
- Τέλος, πραγματοποιήθηκε ανάπτυξη με χάραξη δραστικών ιόντων (reactive ion etching).

4.2.1 Μεθοδολογικό Εργαλείο Εξέτασης

Αφού ολοκληρώθηκε η παρουσίαση (σε θεωρητικό επίπεδο) του ρόλου που παίζει ένα φίλτρο Bragg και του τρόπου με τον οποίο επιδρά σε ένα laser εξωτερικής κοιλότητας,

εξετάζεται σε πειραματικό επίπεδο μια συγκεκριμένη μελέτη περίπτωσης (case study). Ο στόχος της πειραματικής εξέτασης είναι η πρακτική αποτύπωση των αποτελεσμάτων που παρουσιάζει η βιβλιογραφία. Πριν την αναλυτική περιγραφή του case study, παρουσιάζεται το μεθοδολογικό εργαλείο που πρόκειται να χρησιμοποιηθεί.

Το περιβάλλον είναι ένα πρόγραμμα που επιτρέπει στους ερευνητές και τους μηχανικούς να δημιουργήσουν συστήματα που αφορούν σχέδιο των κυματοδηγών και οι οποίοι χρησιμοποιούνται στα διάφορα οπτικά κυκλώματα, καθώς και άλλων φωτονικών συσκευών. Το πρόγραμμα αυτό λειτουργεί ως πρόγραμμα ελέγχου για συσκευές και καθορίζει τις υλικές ιδιότητες και τη δομική γεωμετρία της εκάστοτε υπό μελέτη συσκευής [17].

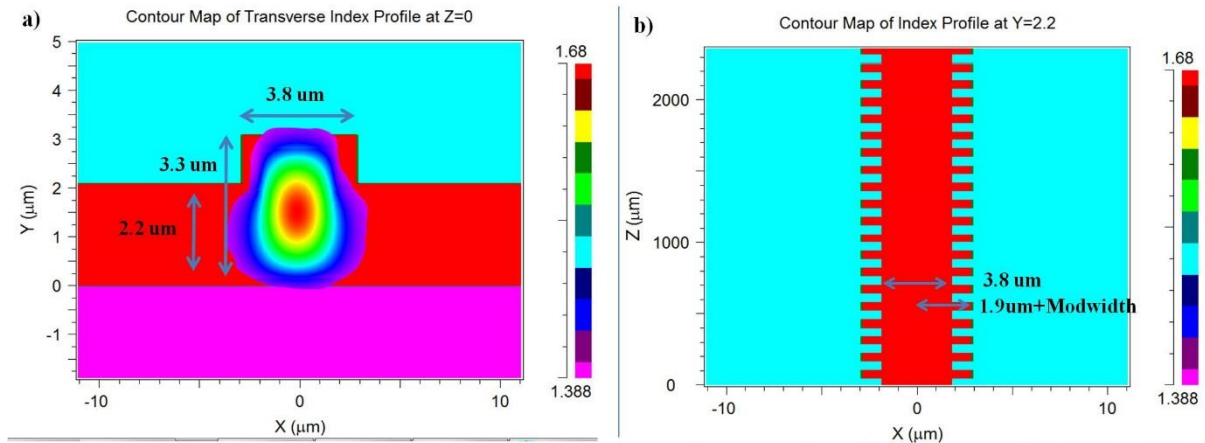
Μια κατάλληλη μέθοδος αριθμητικής επίλυσης για φράγματα περίθλασης Bragg επιλέγεται ως ένα εργαλείο λογισμικού που επικεντρώνεται στο σχεδιασμό συσκευών και προσομοιώνει τις οπτικές, ηλεκτρονικές και θερμικές ιδιότητες των grating κυματοδηγών και άλλων παρόμοιων ενεργών συσκευών. Η μέθοδος αριθμητικής επίλυσης για φράγματα περίθλασης δύναται να προσομοιώσει πολλαπλούς τύπους grating προφίλ συμπεριλαμβανομένων του ημιτονικού προφίλ και του ορθογώνιου προφίλ. Επιπλέον, το πακέτο περιλαμβάνει πολλούς ακόμα τύπους (πχ συνημίτονο, υπερβολικό-συνημίτονο, υπερβολική εφαπτόμενη κλπ). Επιπρόσθετα, είναι άξιο αναφοράς ότι στο πρόγραμμα αυτό ενσωματώνεται ένα ισχυρό εργαλείο για τη σύνθεση των χρησιμοποιούμενων παραμέτρων, το οποίο μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την ανακατασκευή του σχεδίου ενός πλέγματος από το μετρούμενο φάσμα ανακλάσεως, ακόμη και αν είναι διαθέσιμο μόνο το πλάτος του φάσματος.

Το εργαλείο αποτελεί την βάση της παρούσας προσομοίωσης. Τα βήματα της διαδικασίας είναι τα εξής:

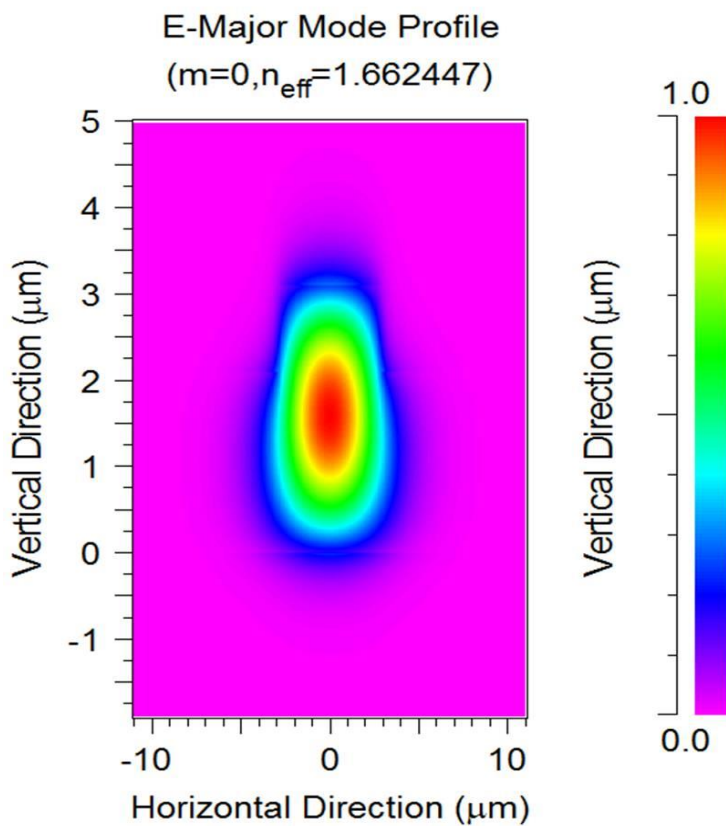
- Δημιουργία μιας νέας μεθόδου αριθμητικής επίλυσης για φράγματα περίθλασης σχεδιασμού.
- Κατάρτιση του κυματοδηγού και καθορισμός των παραμέτρων του κυματοδηγού.
- Καθορισμός της Grating Perturbation παραμέτρου.
- Έλεγχος του προφίλ του δείκτη.
- Καθορισμός των παραμέτρων της ανάλυσης.
- Καθορισμός των ρυθμίσεων που πρέπει να χρησιμοποιηθούν.
- Ενεργοποίηση σε όλα τα ειδικά χαρακτηριστικά (τύποι δεδομένων εξόδου) και δημιουργία ενός επιθυμητού φασματικού πλαισίου εξέτασης.
- Εκκίνηση της προσομοίωσης.

4.2.2 Παράμετροι

Η δομή που παρουσιάζεται είναι ένας ridge κυματοδηγός, στον οποίο τροποποιείται το πλάτος του (side grating). Η δομή φαίνεται στην πιο κάτω εικόνα.



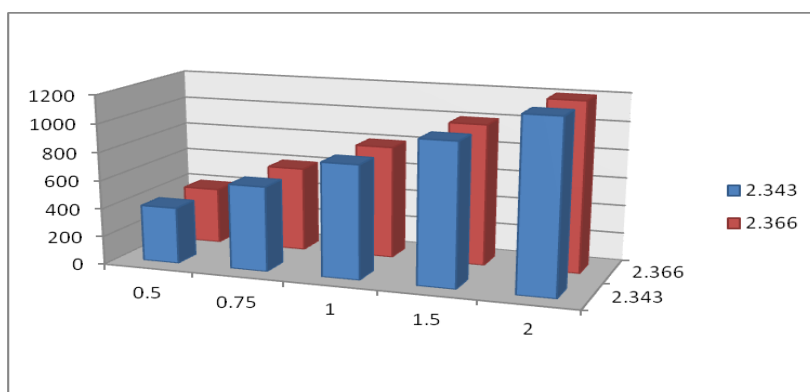
Εικόνα 31 α) Το προφίλ του κυματοδηγού σχετικά με τον δείκτη διάθλασης καθώς και ο θεμελιώδης ρυθμός β) Κάτοψη της δομής του φράγματος που μελετήθηκε



Εικόνα 32 Το προφίλ του θεμελιώδη ρυθμού καθώς και η τιμή του ενεργού δείκτη διάθλασης.

Στο πλαίσιο της προσομοίωσης επιλέγεται Fix Period και η τάξη του grating ορίζεται ίση με 5. Επίσης, επιλέγονται δυο τιμές περιόδου με μήκος κύματος 2.343 μm και 2.366 μm . Η πρώτη τιμή δίνει ανάκλαση στα 1.550 μm περίπου και η άλλη στα 1.567 μm περίπου. Η ανάκλαση επιλέγεται στο μεγαλύτερο μήκος κύματος (1.567) διότι όταν αλλάζει το μήκος κύματος με θερμικό συντονισμό του φράγματος, αυτό μετακινείται προς τις μικρότερες τιμές αφού έχει αρνητικό συντελεστή dn/dT το υλικό που χρησιμοποιείται). Στο ειδικό πεδίο ρυθμίσεων των παραμέτρων εξέτασης επιλέγονται τα FWHM, Peak Amplitude, Stop Band, Left side lobe, Right side lobe που αποτελούν τα χαρακτηριστικά μεγέθη τα οποία ερμηνεύουν τη μορφή του σήματος εξόδου.

Οι παράμετροι που ελέγχονται και αποτελούν εισαγωγικά στοιχεία για το πρόγραμμα είναι ο αριθμός περιόδων M (400, 600, 800, 1000, 1200) και το μέγεθος των δοντιών (Modwidth) (0.5, 0.75, 1, 1.25, 1.5, 2). Η τελευταία παράμετρος σχετίζεται με το μήκος των δοντιών του φράγματος και ασκεί σημαντική επίδραση στα τελικά αποτελέσματα. Τα διάφορα σενάρια απεικονίζονται στο επόμενο σχήμα:



Εικόνα 33 - Σενάρια εξέτασης

Τα εξεταζόμενα σενάρια αποτυπώνονται και στον πίνακα που ακολουθεί:

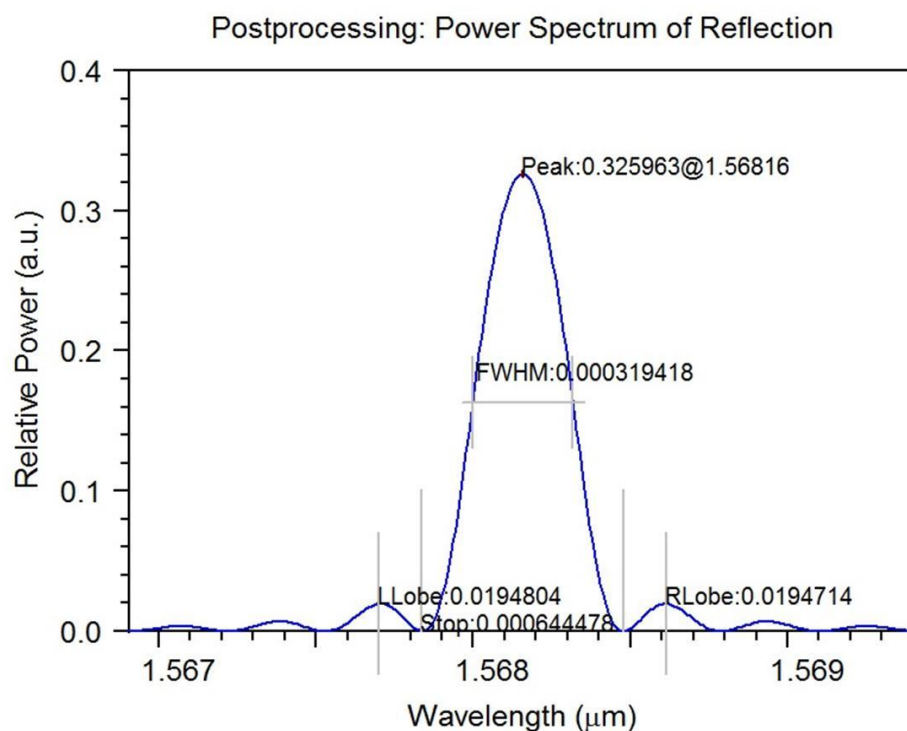
Modwidth (μm) (πλάτος διακύμανσης ‘δοντιού’)	0.5	0.75	1	1.5	2
M (Αριθμός περιόδων)	400	600	800	1000	1200
Period (μm)	2.343			2.366	

Πίνακας 1 Εξεταζόμενα σενάρια.

Η περιγραφή των εξεταζόμενων σεναρίων αποτελεί το ενδιάμεσο βήμα πριν την παρουσίαση των αποτελεσμάτων. Στο πλαίσιο αυτό μελετάται η αναλυτική περιγραφή των αποτελεσμάτων της προσομοίωσης.

4.2.3 Αποτελέσματα προσομοίωσης για $\Lambda=2.343 \mu\text{m}$

Η εκτέλεση της πειραματικής διαδικασίας πραγματοποιείται σε δυο στάδια. Ο Πίνακας 2 συνοψίζει τα αποτελέσματα για το σύνολο των προσομοιώσεων, λαμβάνοντας ως περίοδο την $\Lambda=2.343 \mu\text{m}$. Με δεδομένη την τιμή της παραμέτρου Λ , εξετάζεται περαιτέρω η επίδραση των επιμέρους χαρακτηριστικών. Από τα δεδομένα γίνεται αντιληπτό ότι το σημείο της μέγιστης απολαβής παραμένει ίδιο και δεν εξαρτάται από τις τιμές των παραμέτρων M και Modwidth . Είναι άξιο αναφοράς ότι παρατηρείται μια μικρή μετατόπιση καθώς μεταβάλλεται η τιμή του ModWidth αλλά η επίδραση που ασκείται είναι αμελητέα. Το μήκος κύματος Bragg ισούται με $1,55$ και θεωρείται σταθερό για το εξεταζόμενο χρονικό διάστημα.

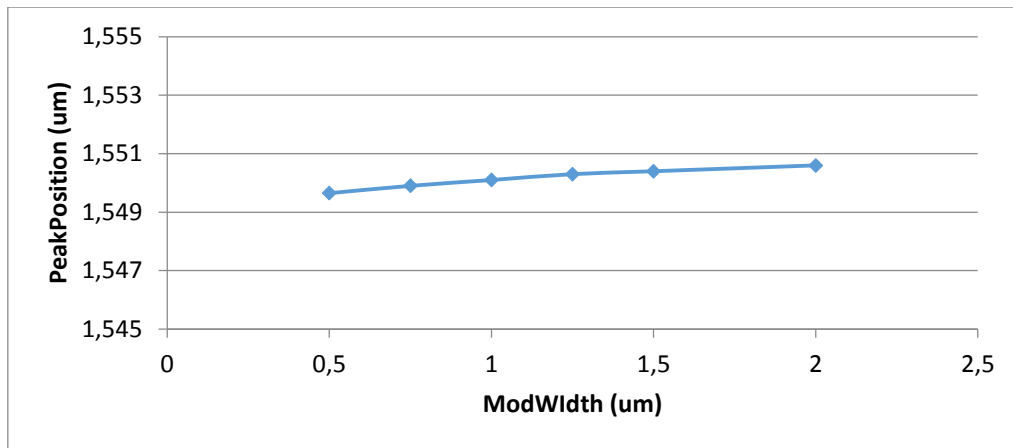


Εικόνα 34 Παράδειγμα αποτελέσματος στο οποίο φαίνονται πού αντιστοιχούν οι τιμές που συμπληρώσαμε στον παρακάτω πίνακα.

Period $\Lambda=2.343 \mu\text{m}$						
Modwidth $0.5 \mu\text{m}$ (Πλάτος δοντιού $4.8 \mu\text{m}$)						
M	FWHM (nm)	Peak Amplitude (Normalized)	Peak Position (μm)	Stop Band (nm)	Left Side Lobe amplitude (Norm)	Right Side Lobe amplitude (Norm)
400	0.69647	0.0376013	1.54965	1.55446	0.00182057	0.00181534

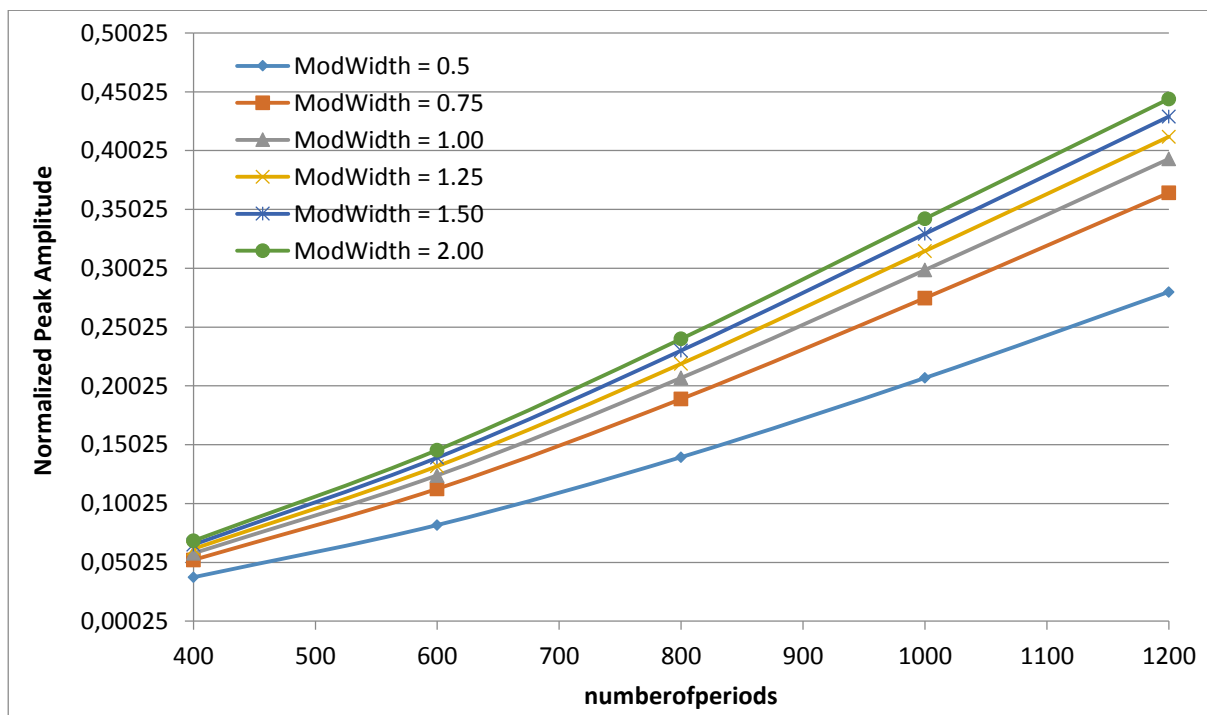
600	0.47236	0.0820027	1.54965	1.03599	0.00408483	0.00407689
800	0.362619	0.139705	1.54965	0.776668	0.00723541	0.00722482
1000	0.298566	0.207037	1.54965	0.621	0.0112512	0.0112384
1200	0.257264	0.280188	1.54965	0.530962	0.0161105	0.0160942
Modwidth 0.75 μm (Πλάτος δοντιού 5.3 μm)						
400	0.700523	0.0523556	1.5499	1.55455	0.00255012	0.0025517
600	0.478271	0.112796	1.5499	1.03593	0.00573617	0.00572471
800	0.370356	0.189109	1.5499	0.77649	0.0101448	0.010129
1000	0.308	0.274973	1.5499	0.637285	0.0157424	0.0157268
1200	0.2682	0.364371	1.5499	0.53	0.0225395	0.0225194
Modwidth 1 μm (Πλάτος δοντιού 5.8 μm)						
400	0.7021	0.0579313	1.5501	1.55	0.002841	0.002833
600	0.481	0.124235	1.5501	1.0335	0.006367	0.006354
800	0.3733	0.207049	1.5501	0.776	0.0112547	0.0112363
1000	0.3115	0.298787	1.5501	0.637	0.0174626	0.0174466
1200	0.2724	0.3932	1.5501	0.530503	0.0249897	0.024959
Modwidth 1.25 μm (Πλάτος δοντιού 6.3 μm)						
M	FWHM (nm)	Peak Amplitude (Normalized)	Peak Position (μm)	Stop Band (nm)	Left Side Lobe amplitude (Norm)	Right Side Lobe amplitude (Norm)
400	0.70324	0.0617485	1.5503	1.554	0.00303672	0.00302783
600	0.48215	0.132005	1.5503	1.03603	0.00680225	0.00678817
800	0.375	0.219108	1.5503	0.7764	0.012017	0.0119974
1000	0.314	0.314909	1.5503	0.637	0.0186447	0.0186287
1200	0.2752	0.412078	1.5503	0.53	0.0266553	0.0266
Modwidth 1.5 μm (Πλάτος δοντιού 6.8 μm)						
400	0.704	0.0653411	1.5504	1.55493	0.00322095	0.00321149
600	0.483643	0.139273	1.5504	1.03607	0.00721309	0.00719794
800	0.377279	0.230295	1.5504	0.776483	0.0127387	0.012716
1000	0.31637	0.329549	1.5504	0.637163	0.0197609	0.0197442
1200	0.27794	0.429236	1.5504	0.5304	0.0282337	0.02821
Modwidth 2 μm (Πλάτος δοντιού 7.8 μm)						
400	0.7052	0.0685784	1.5506	1.555	0.003387	0.003377
600	0.485	0.145784	1.5506	1.036	0.007584	0.007568
800	0.379	0.240243	1.5506	0.7868	0.01339	0.01336
1000	0.3284	0.342452	1.5506	0.6371	0.02076	0.020755
1200	0.28	0.44421	1.5506	0.53	0.02965	0.029629

Πίνακας 2. Συγκεντρωτικά αποτελέσματα προσομοίωσης για $\Lambda=2.343 \mu\text{m}$.

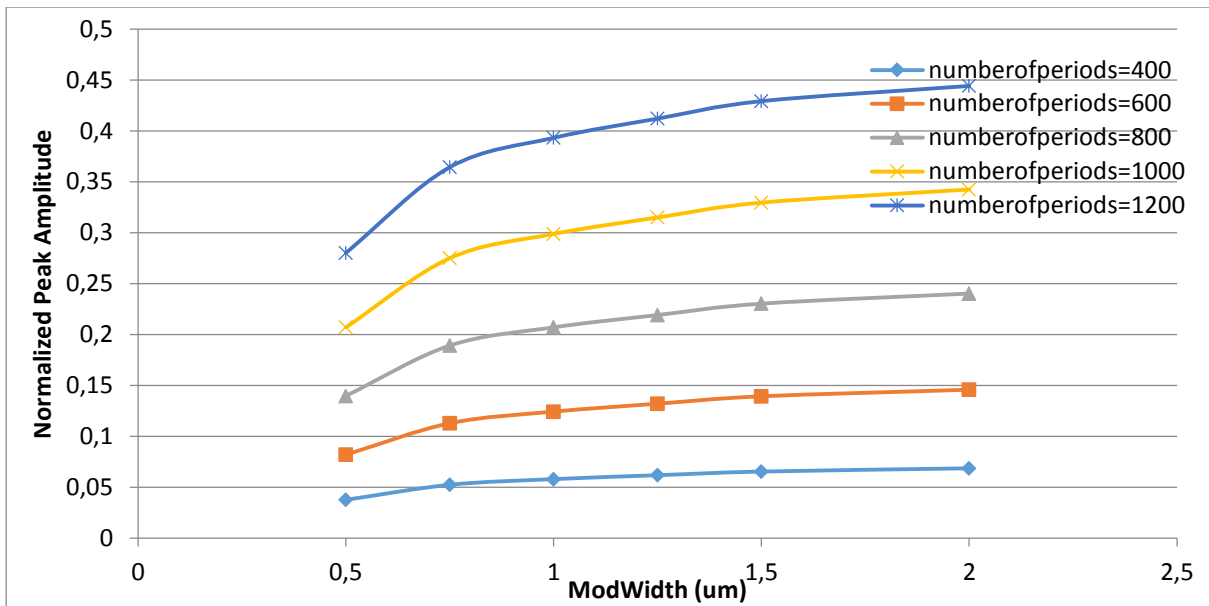


Εικόνα 35 Γραφική παράσταση του σημείου της μέγιστης απολαβής σε συνάρτηση με το *Modwidth*.

Σε αντίθεση με το μήκος κύματος Bragg, το πλάτος του συντονισμού είναι άμεσα εξαρτώμενο από τις τιμές των παραμέτρων M και $Modwidth$. Στα σχήματα που ακολουθούν παρουσιάζεται αναλυτικά αυτή η διακύμανση, λαμβάνοντας υπόψη την μεταβολή των παραμέτρων εισόδου.



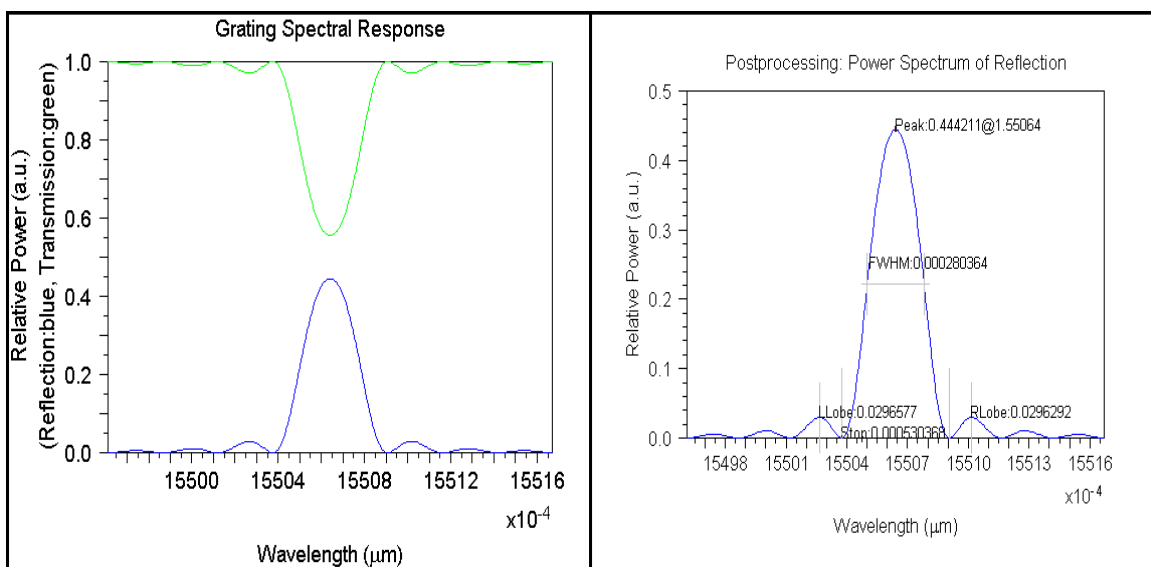
Εικόνα 36 - Γραφική παράσταση της του πλάτους συντονισμού σε συνάρτηση με τον αριθμό των περιόδων.



Εικόνα 37 - Γραφική παράσταση της του πλάτους συντονισμού σε συνάρτηση με το Modwidth.

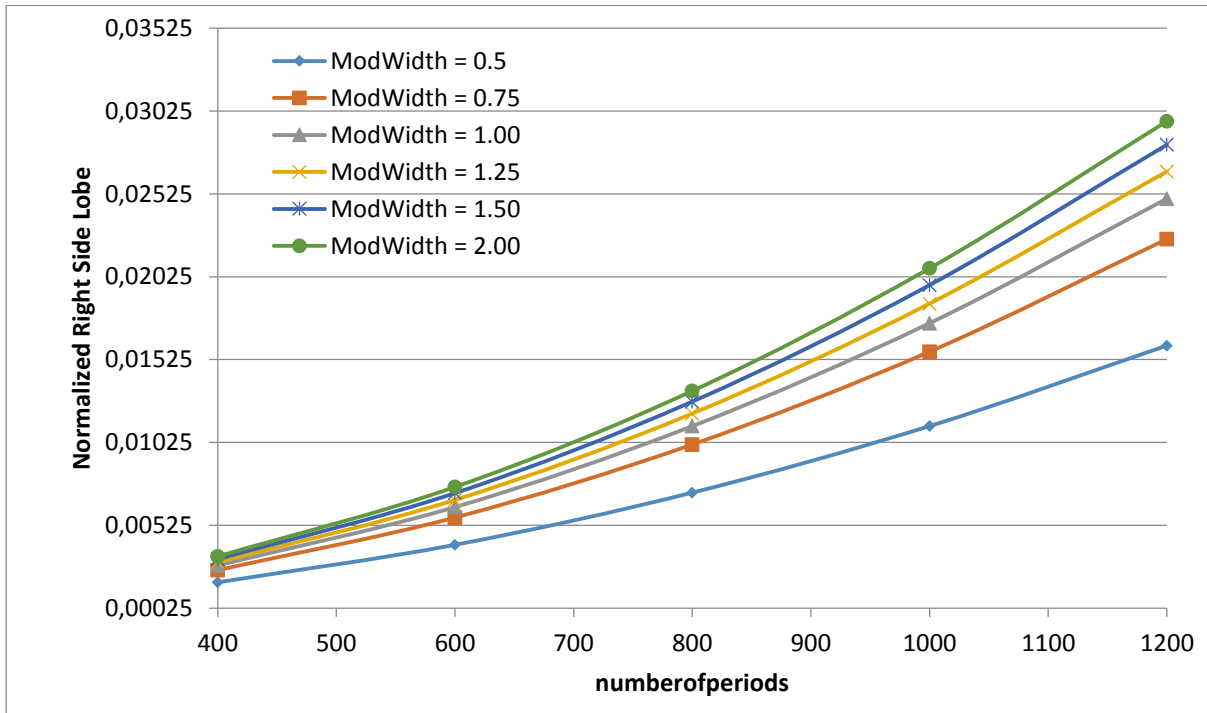
Από τα παραπάνω σχήματα γίνεται αντιληπτό ότι καθώς αυξάνεται η τιμή του ModWidth και του αριθμού των περιόδων, αυξάνεται το μέγιστο πλάτος της κατανομής. Αξίζει να αναφερθεί ότι η αύξηση αυτή δεν είναι αναλογική για κάθε μια από τις παραμέτρους εξέτασης. Αντίθετα, ο αριθμός των περιόδων ασκεί σημαντική επίδραση στο μέγιστο πλάτος, ενώ το μέγεθος των δοντιών (Modwidth) μπορεί να ασκήσει επιρροή υπό προϋποθέσεις (μεγάλος αριθμός περιόδων).

Η επίδραση του πλήθους των περιόδων ομοιάζει με εκθετική κατανομή ενώ το μήκος των δοντιών στον κυματοδηγό (grating) μοιάζει με λογαριθμική. Η επίδραση του grating φίλτρου παρουσιάζεται για μία συγκεκριμένη κατάσταση (state) $\langle M, \text{Modwidth} \rangle$:

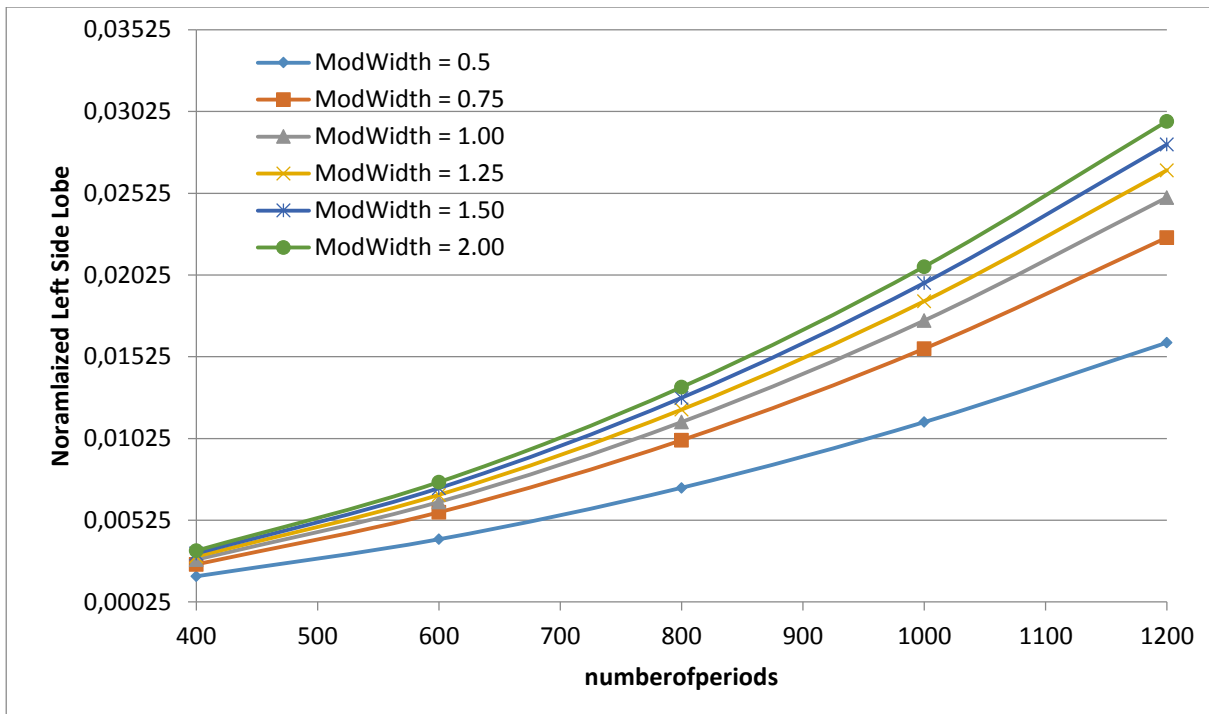


Εικόνα 38 - Γραφική παράσταση καμπύλης ($A=2.343$, $M=1200$, $Modwidth=2.00$).

Από το παραπάνω σχήμα γίνεται αντιληπτή η σημαντική επίδραση που ασκεί η θέση και η τιμή του μέγιστου σημείου της κατανομής. Ωστόσο, υπάρχουν και αλλά σημαντικά μεγέθη που περιγράφουν πλήρως την σύνθετη κατανομή που παρουσιάζεται. Από τα μεγέθη αυτά ιδιαίτερο ενδιαφέρον παρουσιάζει η προς τα δεξιά και προς τα αριστερά εμφάνιση ενός λοβού στην καμπύλη.

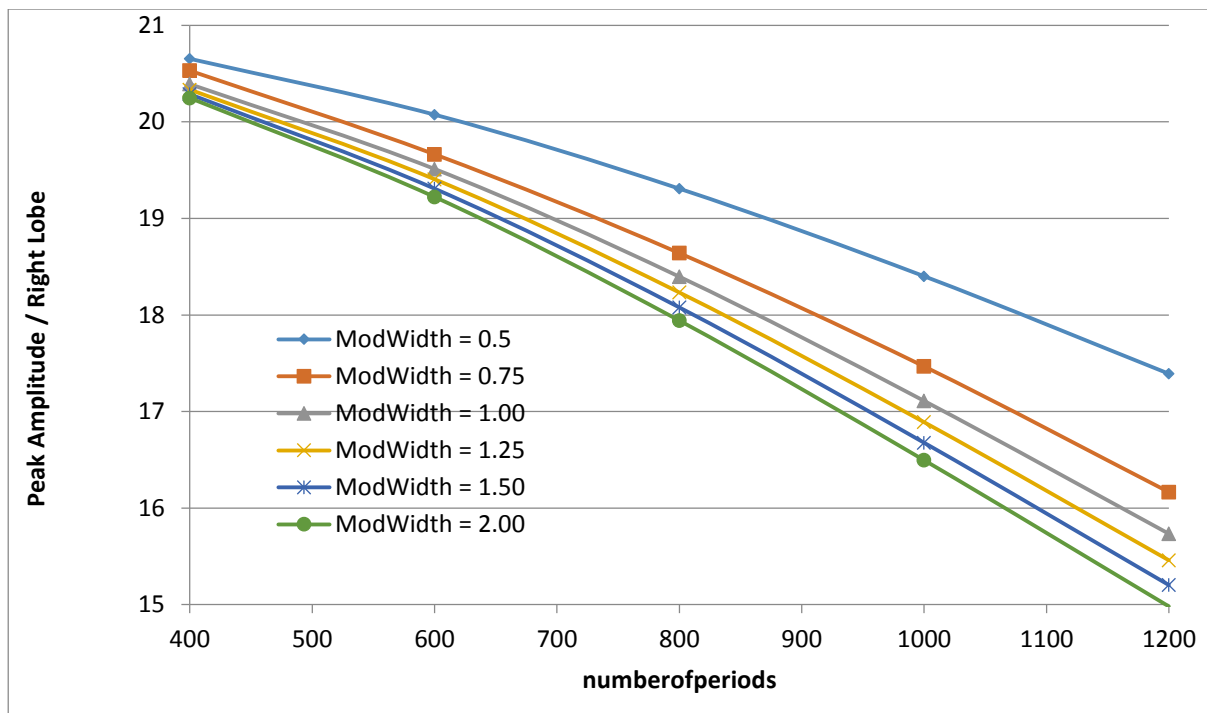


Εικόνα 39 - Γραφική παράσταση του δεξιού πλευρικού λοβού σε συνάρτηση με το πλήθος των περιόδων.



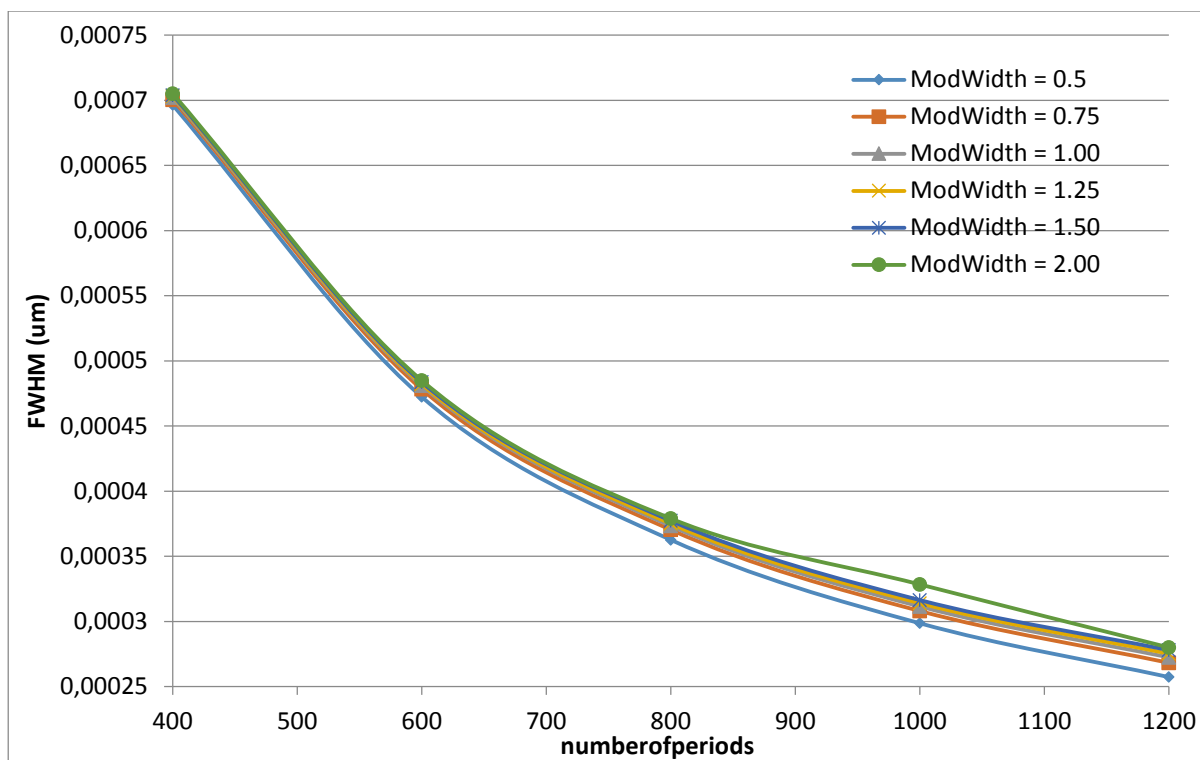
Εικόνα 40 - Γραφική παράσταση του αριστερού πλευρικού λοβού σε συνάρτηση με το πλήθος των περιόδων.

Τα δυο αυτά διαγράμματα παρουσιάζουν σε πλήρη αναλογία την επίδραση του αριθμού των περιόδων και του μήκους των εσοχών στο μέγεθος του λοβού στην καμπύλη (δεξιά και αριστερή κατανομή). Όπως και στην περίπτωση της κεντρικής διασποράς έτσι και για τις διαδοχικές καμπύλες παρουσιάζεται αύξηση της τιμής του ύψους με την αύξηση του πλήθους των περιόδων και του Modwidth. Αυτό που πρέπει να τονιστεί είναι ότι το μέγεθος του πλήθους των περιόδων ασκεί και στην περίπτωση αυτή ισχυρότερη επίδραση από ότι το Modwidth. Ένα ακόμη σημείο που χρήζει εξέτασης είναι η διαφοροποίηση μεταξύ της δεξιάς και αριστερής καμπύλης σε σχέση με το peak amplitude. Αυτό θα έδινε περισσότερη πληροφορία καθώς οι λοβοί και ο συντονισμός εμφανίζονται μαζί. Το παρακάτω γράφημα παρουσιάζει την αλληλεξάρτηση αυτή.



Εικόνα 41 - Γραφική παράσταση του λόγου (σε dB) *amplitude/lobe* σε συνάρτηση με το πλήθος των περιόδων.

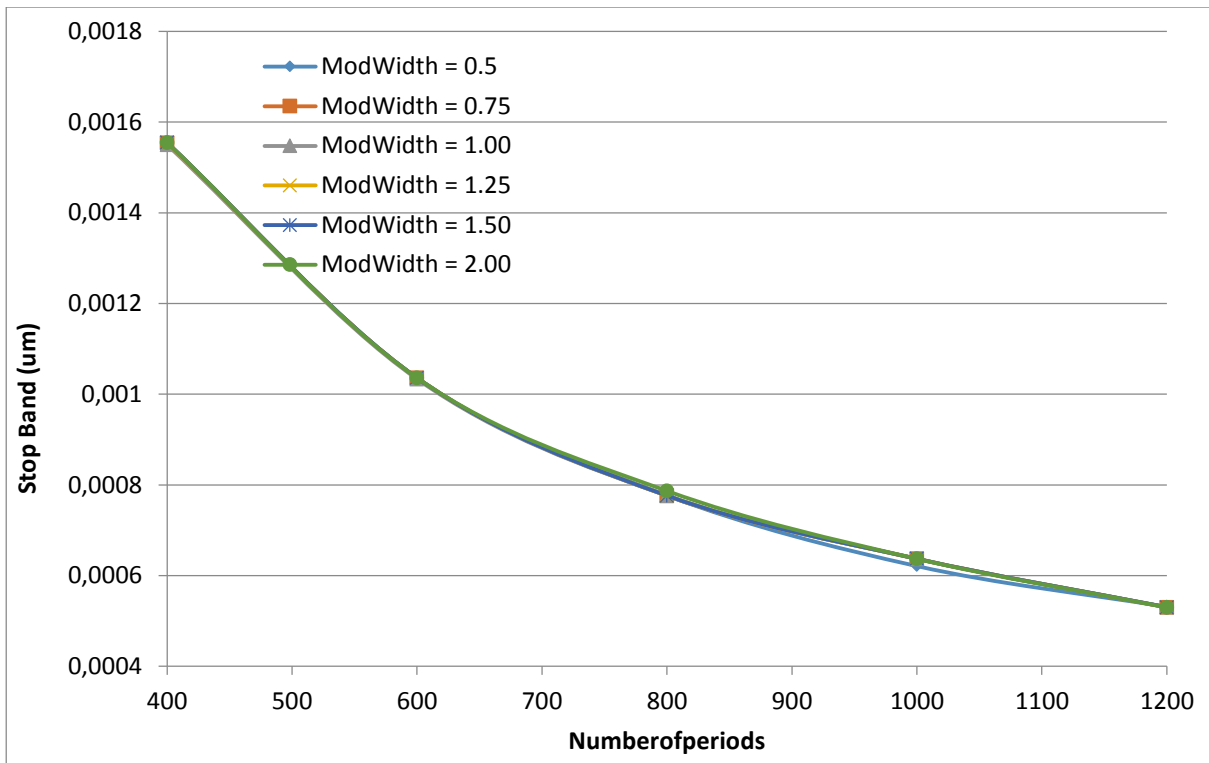
Πέρα όμως από τις βασικές παραμέτρους που συνθέτουν τη μελέτη της κατανομής, απαιτείται περαιτέρω ανάλυση για ορισμένες από τις δευτερεύουσες παραμέτρους. Μια από αυτές είναι το ενδιάμεσο πλάτος της κεντρικής διακύμανσης που επισημαίνεται στο διάγραμμα με την παράμετρο, FWHM. Λαμβάνοντας υπόψη την μεταβολή των παραμέτρων εισόδου, προκύπτει η γραφική παράσταση:



Εικόνα 42 - Γραφική παράσταση του FWHM σε συνάρτηση με το πλήθος των περιόδων.

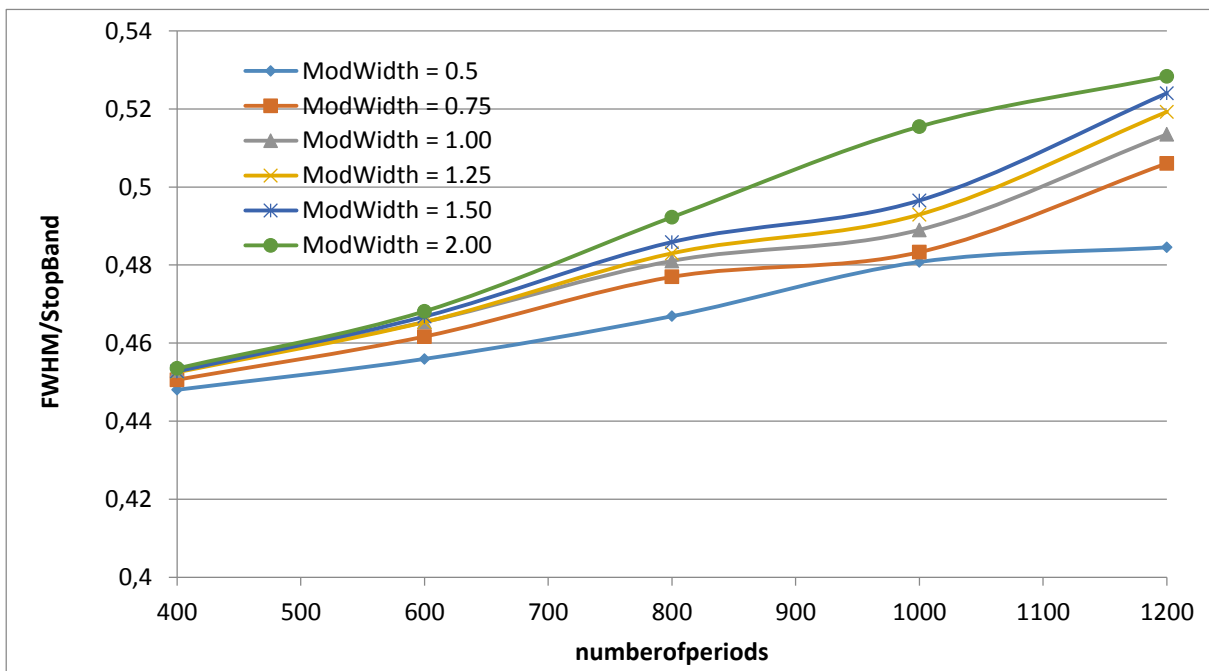
Από το παραπάνω σχήμα γίνεται αντιληπτό ότι μονό ο αριθμός των περιόδων ασκεί επίδραση στην μεταβολή της παραμέτρου FWHM ενώ αντίθετα το Modwidth δεν επιδρά στην μεταβολή της παραμέτρου. Έτσι το FWHM μειώνεται καθώς αυξάνεται ο αριθμός των περιόδων. Στην γραφική παράσταση αυτό υποδηλώνεται από το γεγονός ότι το ύψος της κατανομής αυξάνεται με εντονότερο ρυθμό σε σύγκριση με το πλάτος γεγονός που αποτυπώνεται στην τιμή του μεγέθους FWHM.

Η τελική εξεταζόμενη παράμετρος είναι το συνολικό εύρος της κατανομής μεταξύ του κεντρικού σημείου και των λοβών από όπου γίνεται αντιληπτό ότι η περίοδος της κατανομής γίνεται μικρότερη όσο αυξάνεται ο αριθμός των περιόδων. Αντίθετα, το μέγεθος των δοντιών στον κυματοδηγό δεν επιδρά στο συνολικό εύρος της κατανομής. Στο διάγραμμα που ακολουθεί παρουσιάζεται αναλυτικά η επίδραση αυτή.



Εικόνα 43 - Γραφική παράσταση Stop Band σε συνάρτηση με το πλήθος των περιόδων.

Επιπλέον, ο λόγος του FWHM σε σχέση με το μέγεθος StopBand παρουσιάζει μεγάλο ενδιαφέρον και για τον λόγο αυτό έχουμε την διαγραμματική αναπαράσταση:



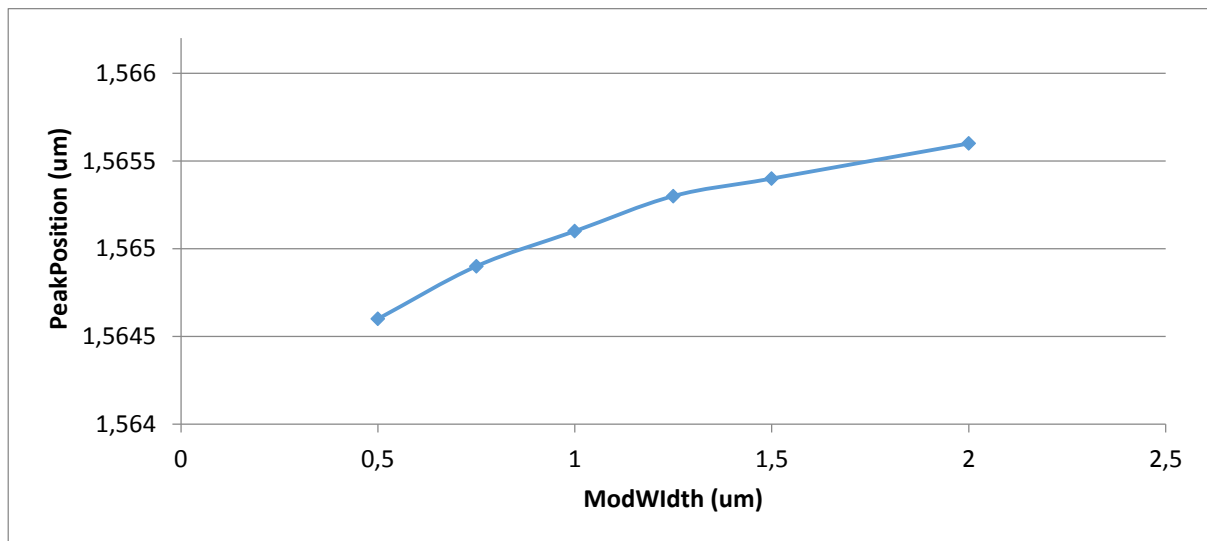
Εικόνα 44 - Γραφική παράσταση FWHM/Stop Band σε συνάρτηση με το πλήθος των περιόδων.

Η κατανομή του οδηγού για ένα σήμα με συγκεκριμένο εύρος ορίζει μια σύνθετη συνάρτηση και για τον λόγο αυτό η εξέταση της απαιτεί την εξέταση πλήθους παραμέτρων. Για τον λόγο αυτό η ανάλυση που προηγήθηκε παρουσιάζει συγκεκριμένα μεγέθη. Η γραφική αναπαράσταση των καμπύλων δεν θεωρείται αναγκαία στο σημείο αυτό και παρουσιάζεται για το σύνολο των προσομοιώσεων στο παράρτημα της παρούσας εργασίας.

4.2.4 Αποτελέσματα προσομοίωσης για $\Lambda=2.366 \mu\text{m}$

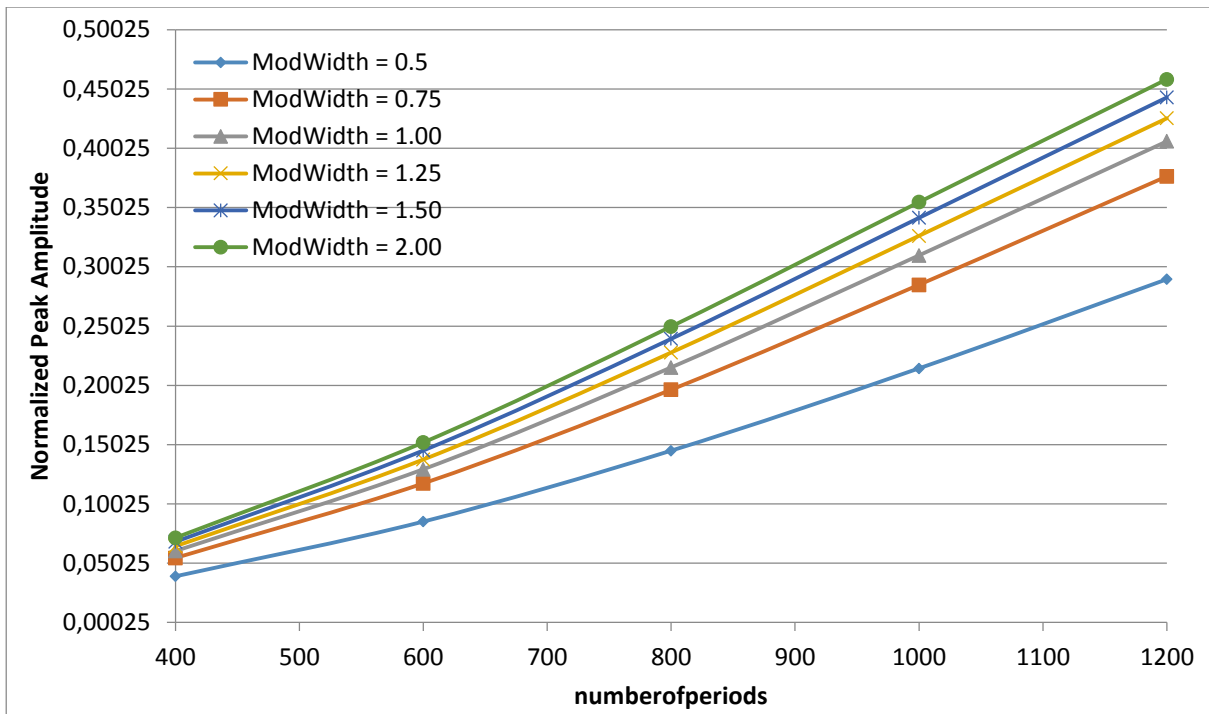
Στη συνέχεια πραγματοποιείται μία παρόμοια διαδικασία για $\Lambda=2.366 \mu\text{m}$. Αρχικά, εξετάζονται οι παράμετροι στο peak σημείο εξέτασης, κατόπιν γίνεται αναφορά στο δεξιό και αριστερό λοβό της καμπύλης και στο τέλος γίνεται αναφορά στις δευτερεύουσες παραμέτρους που συνθέτουν την τελική κατανομή. Είναι άξιο αναφοράς ότι το σύνολο των καταστάσεων (sum of states) που εξετάζεται είναι το ίδιο με το προηγούμενο σενάριο ώστε να υιοθετηθεί ένα κοινό μέτρο σύγκρισης.

Στην περίπτωση αυτή το ακρότατο σημείο παρατηρείται περίπου στο σημείο 1,565. Το αντίστοιχο διάγραμμα παρουσιάζεται στο σχήμα που ακολουθεί, λαμβάνοντας σαν παράμετρο βάσης το μέγεθος του ModWidth.

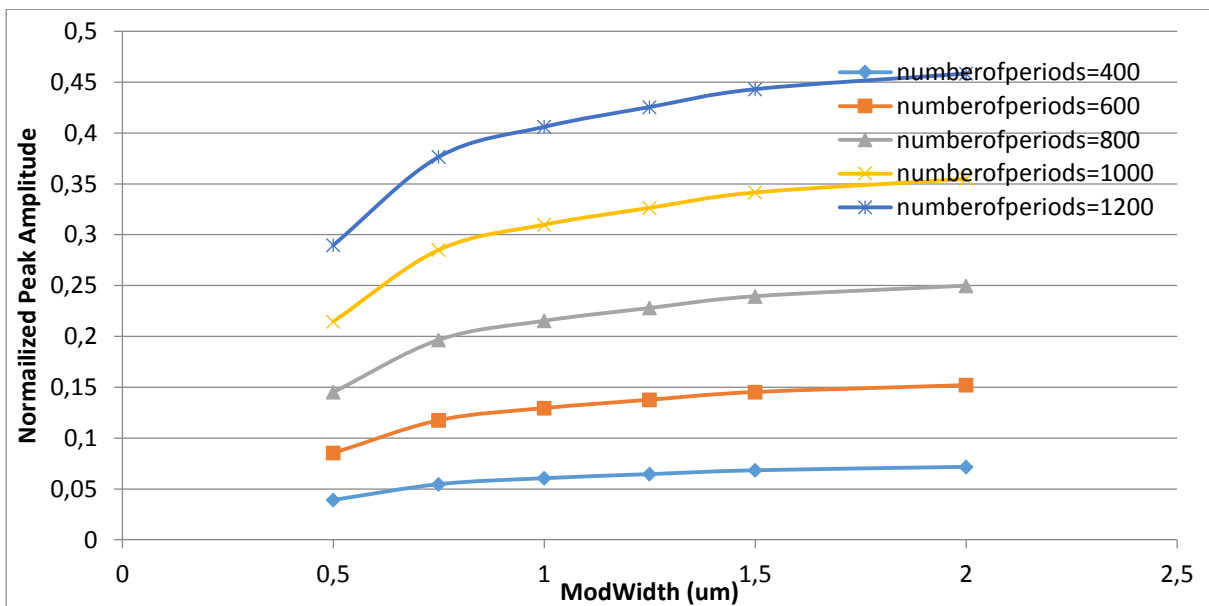


Εικόνα 45 - Γραφική παράσταση σημείου μέγιστης απολαβής σε συνάρτηση με το Modwidth.

Κατόπιν εξετάζεται το πλάτος του συντονισμού και λαμβάνεται η κατανομή:

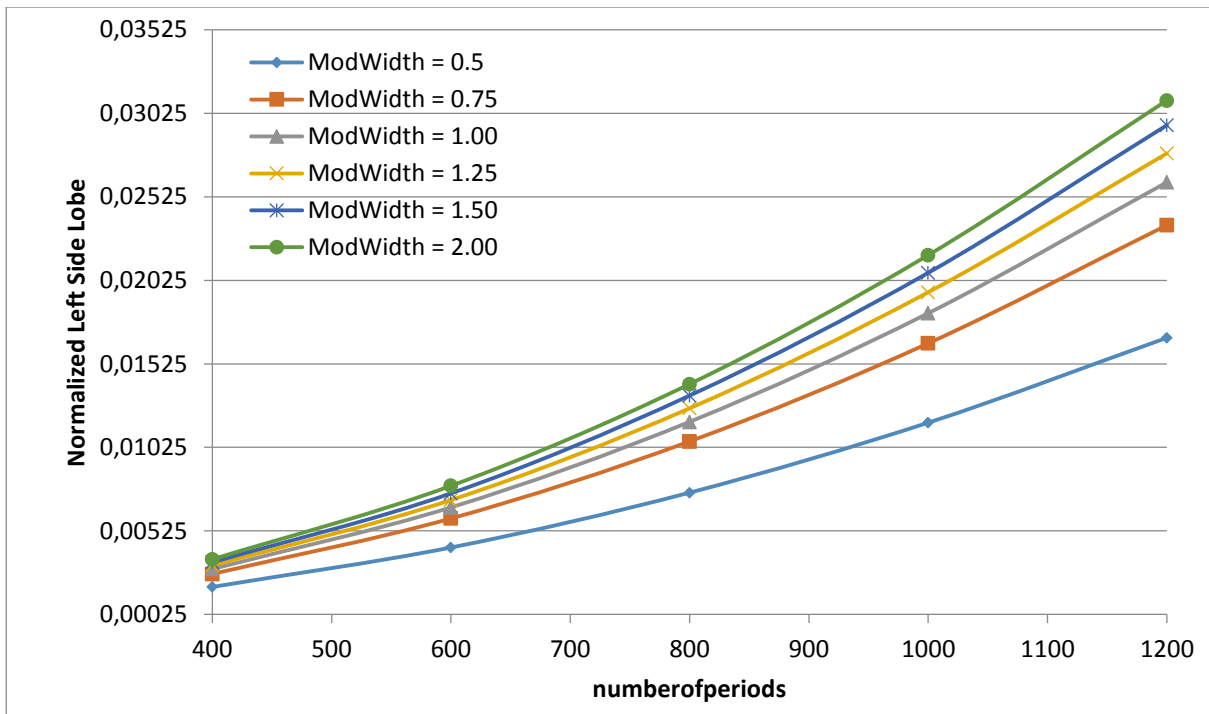


Εικόνα 46 - Γραφική παράσταση της μέγιστης απολαβής σε συνάρτηση με το πλήθος των περιόδων.

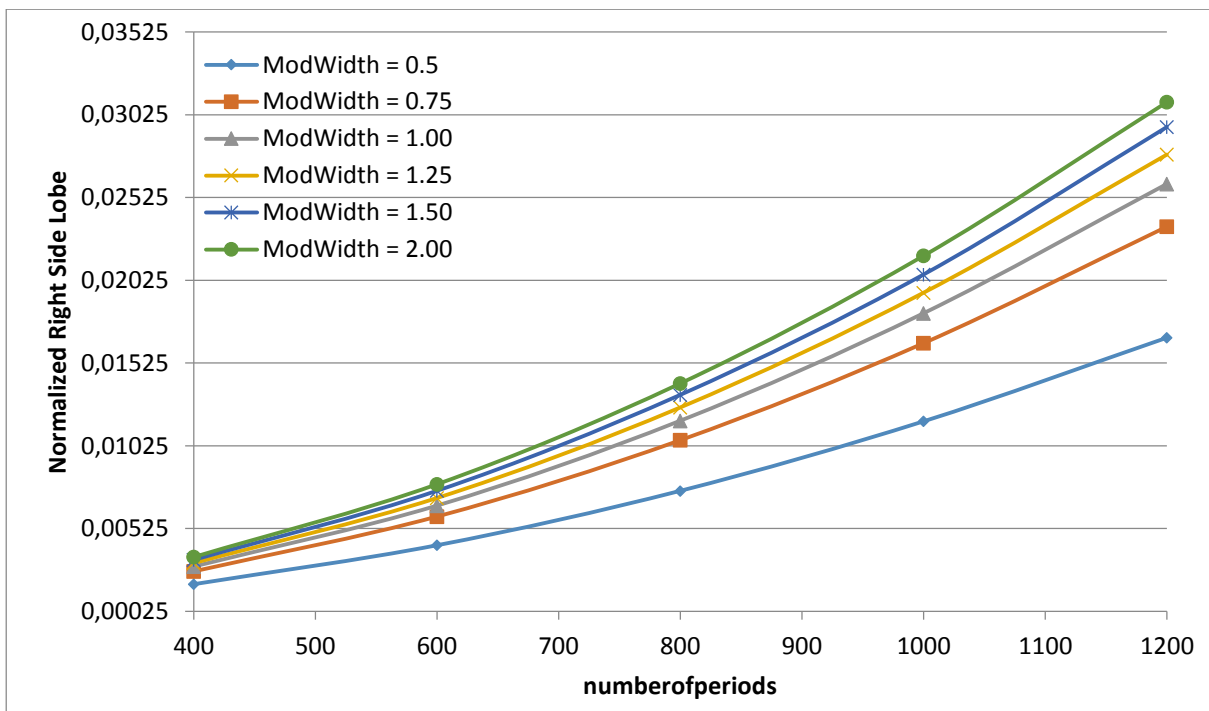


Εικόνα 47 - Γραφική παράσταση της μέγιστης απολαβής σε συνάρτηση με το Modwidth.

Στα αποτελέσματα που ακολουθούν παρουσιάζεται εκθετική αύξηση του ύψους της καμπύλης καθώς αυξάνεται το πλήθος των περιόδων και λογαριθμική αύξηση καθώς αυξάνεται το μέγεθος των δοντιών. Σε επόμενο βήμα της διαδικασίας παρουσιάζονται τα αποτελέσματα για την δεξιά και αριστερή απεικόνιση της καμπύλης.



Εικόνα 48 - Γραφική παράσταση του αριστερού πλευρικού λοβού σε συνάρτηση με το πλήθος των περιόδων.

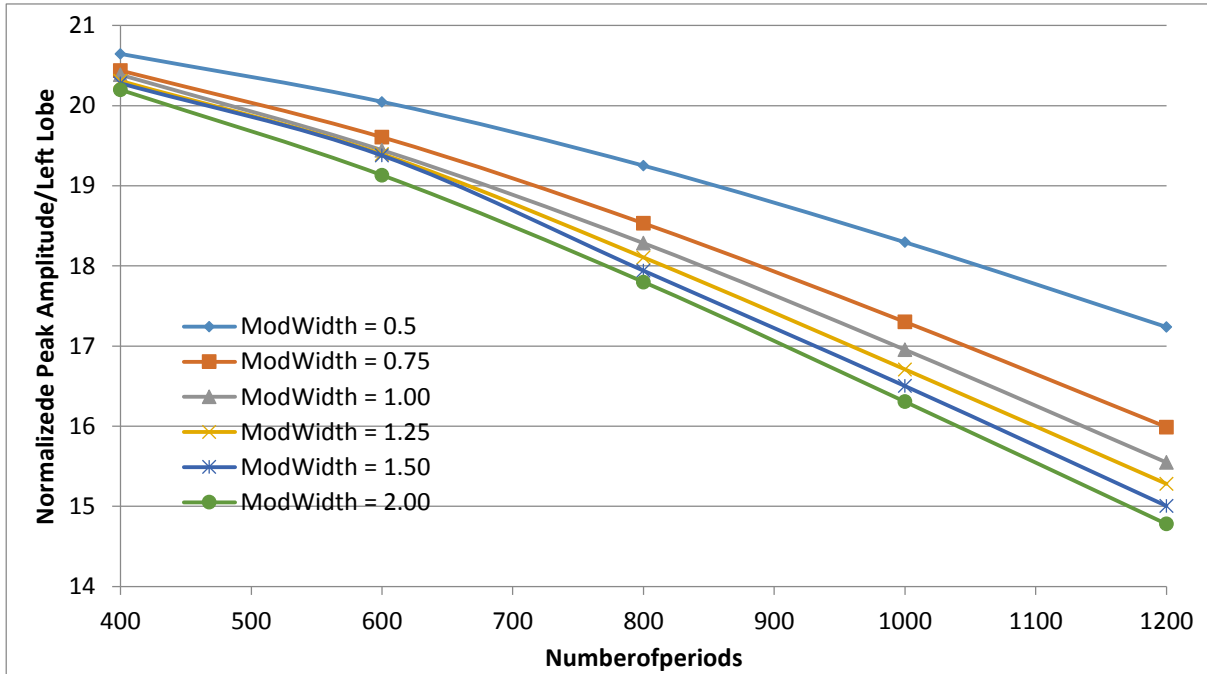


Εικόνα 49 - Γραφική παράσταση του δεξιού πλευρικού λοβού σε συνάρτηση με το πλήθος των περιόδων.

Όπως και στην προηγούμενη περίπτωση η καμπύλη αυξάνεται καθώς αυξάνεται το πλήθος των περιόδων και το Modwidth τόσο στην αριστερή όσο και στην δεξιά απεικόνιση.

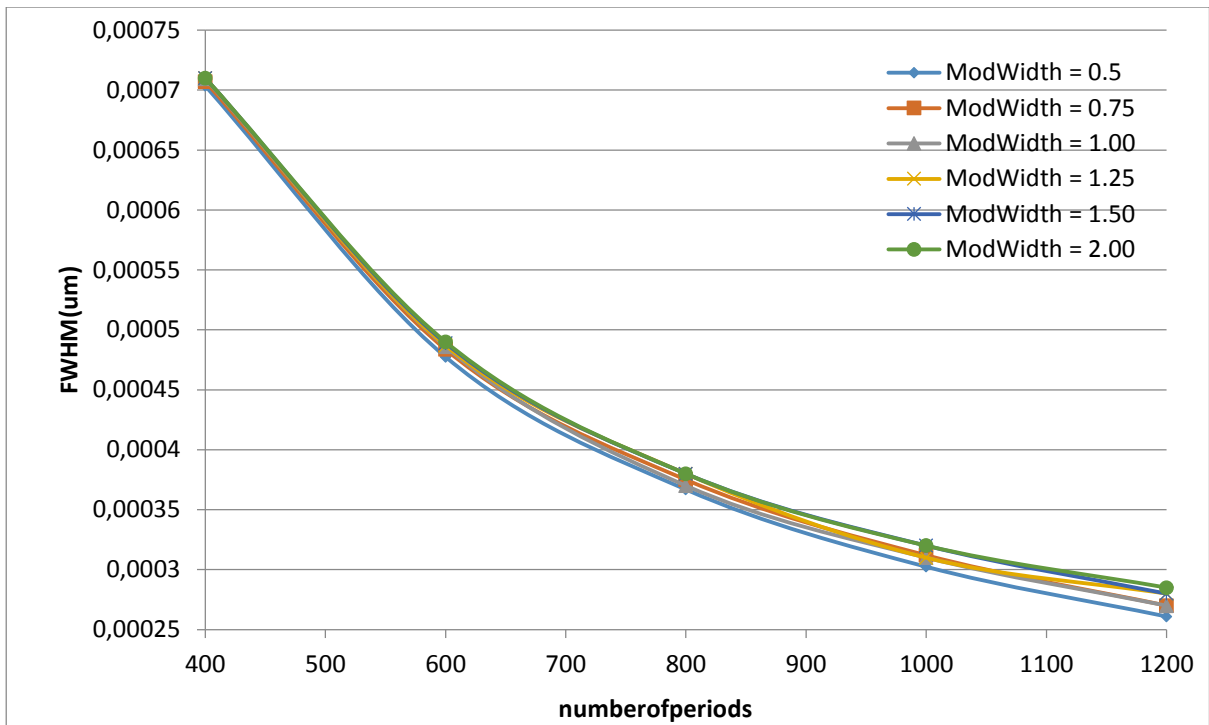
Επιπρόσθετα, δεν παρατηρείται σημαντική διαφοροποίηση μεταξύ των δυο γραφικών παραστάσεων.

Κατά αντιστοιχία παρουσιάζεται και το διάγραμμα συντονισμού/λοβου σε σχέση με τον αριθμό των περιόδων για κάθε μήκος εξέτασης ModWidth.

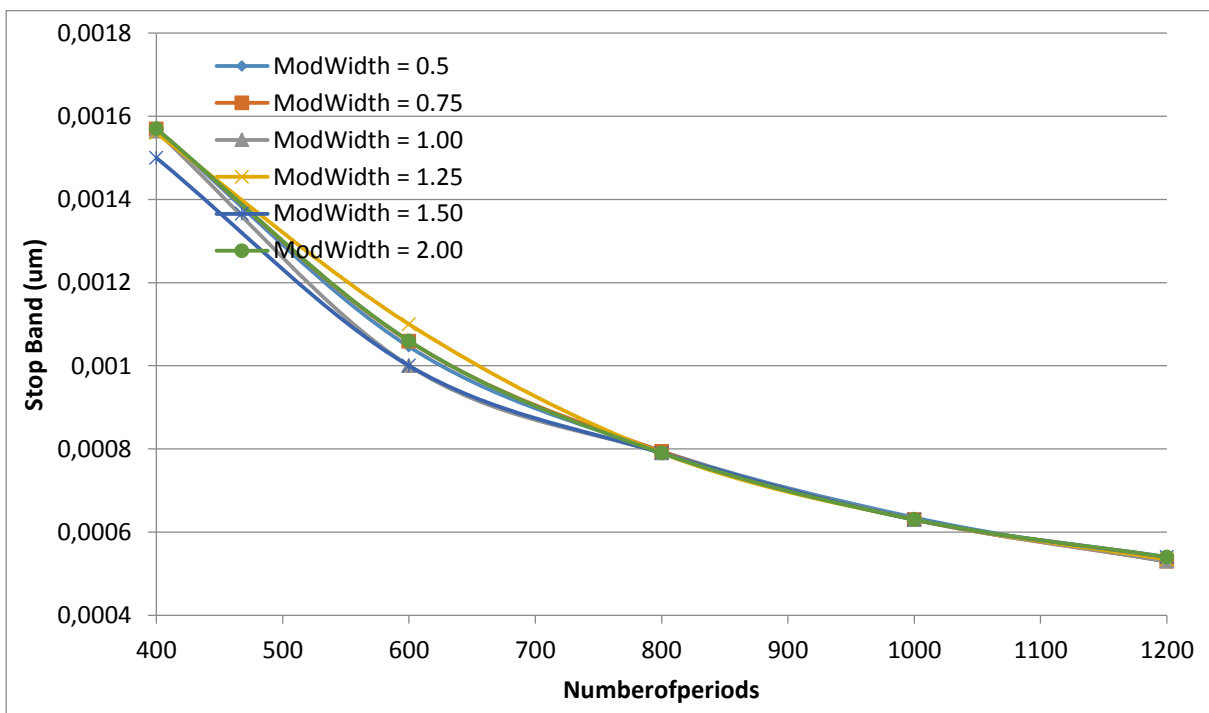


Εικόνα 50 - Γραφική παράσταση λόγου (σε dB) Peak Amplitude/Lobe σε συνάρτηση με το πλήθος των περιόδων.

Στο τελευταίο στάδιο της διαδικασίας απεικονίζονται τα αποτελέσματα που αφορούν την κεντρική κατανομή (FWSM) και το εύρος της κατανομής.



Εικόνα 51 - Γραφική παράσταση FWHM σε συνάρτηση με το πλήθος των περιόδων.



Εικόνα 52 - Γραφική παράσταση Stop Band σε συνάρτηση με το πλήθος των περιόδων.

Στις παραμέτρους αυτές η βασική συνιστώσα είναι ο αριθμός των περιόδων και όχι το Modwidth. Η γραφική παράσταση ακολουθεί την προσέγγιση της περίπτωσης με $\Lambda=2.344$ οπότε και τα συμπεράσματα είναι παρόμοια με όσα αναφέρθηκαν στην προηγούμενη ενότητα.

Για λόγους πληρότητας παρουσιάζονται και τα συγκεντρωτικά αποτελέσματα της διαδικασίας προσομοίωσης για $\Lambda=2.366 \mu\text{m}$.

Period $\Lambda=2.366 \mu\text{m}$						
Modwidth $0.5 \mu\text{m}$ (Πλάτος δοντιού $4.8 \mu\text{m}$)						
M	FWHM (μm)	Peak Amplitude (Normalized)	Peak Position (μm)	Stop Band (μm)	Left Side Lobe amplitude (Norm)	Right Side Lobe amplitude (Norm)
400	0.000704	0.039178	1.5646	0.001569	0.001898	0.001892
600	0.000477	0.085343	1.5646	0.001046	0.004257	0.004244
800	0.000367	0.145173	1.5646	0.000795	0.007541	0.007531
1000	0.000302	0.2146	1.5646	0.000635	0.01173	0.01173
1200	0.000261	0.289765	1.5646	0.000529	0.01681	0.01678
Modwidth $0.75 \mu\text{m}$ (Πλάτος δοντιού $5.3 \mu\text{m}$)						
400	0.000707	0.05467	1.5649	0.00157	0.002675	0.002666
600	0.000484	0.117558	1.5649	0.001059	0.005996	0.005978
800	0.000375	0.1966	1.5649	0.000794	0.010609	0.01059
1000	0.000312	0.2851	1.5649	0.00063	0.016479	0.01645
1200	0.00027	0.376543	1.5649	0.00053	0.02355	0.02349
Modwidth $1 \mu\text{m}$ (Πλάτος δοντιού $5.8 \mu\text{m}$)						
400	0.00071	0.060541	1.565	0.001564	0.00297	0.00296
600	0.000486	0.1295	1.565	0.001	0.00666	0.00664
800	0.00037	0.215381	1.565	0.00079	0.01178	0.011767
1000	0.00031	0.30991	1.565	0.00063	0.01828	0.01826
1200	0.00027	0.4061	1.565	0.00053	0.02612	0.02607
Modwidth $1.25 \mu\text{m}$ (Πλάτος δοντιού $6.3 \mu\text{m}$)						
M	FWHM (μm)	Peak Amplitude (Normalized)	Peak Position (μm)	Stop Band (μm)	Left Side Lobe amplitude (Norm)	Right Side Lobe amplitude (Norm)
400	0.00071	0.06456	1.5652	0.00156	0.003179	0.003168
600	0.000487	0.1377	1.5652	0.0011	0.0071	0.0071
800	0.00038	0.227949	1.5652	0.00079	0.01259	0.01257
1000	0.00031	0.3264	1.5652	0.00063	0.019535	0.0195
1200	0.00028	0.425559	1.5652	0.000535	0.02785	0.027844
Modwidth $1.5 \mu\text{m}$ (Πλάτος δοντιού $6.8 \mu\text{m}$)						
400	0.00071	0.06834	1.5654	0.0015	0.00337	0.00336
600	0.000489	0.14533	1.5654	0.001	0.0075	0.007536
800	0.00038	0.2395	1.5654	0.00079	0.01335	0.01333
1000	0.00032	0.34157	1.5654	0.00063	0.0207	0.0206
1200	0.00028	0.443145	1.5654	0.00054	0.029534	0.02951
Modwidth $2 \mu\text{m}$ (Πλάτος δοντιού $7.8 \mu\text{m}$)						
400	0.00071	0.0717	1.5656	0.00157	0.00355	0.00353
600	0.00049	0.1521	1.5656	0.00106	0.00795	0.00793
800	0.00038	0.2499	1.5656	0.00079	0.01404	0.01402

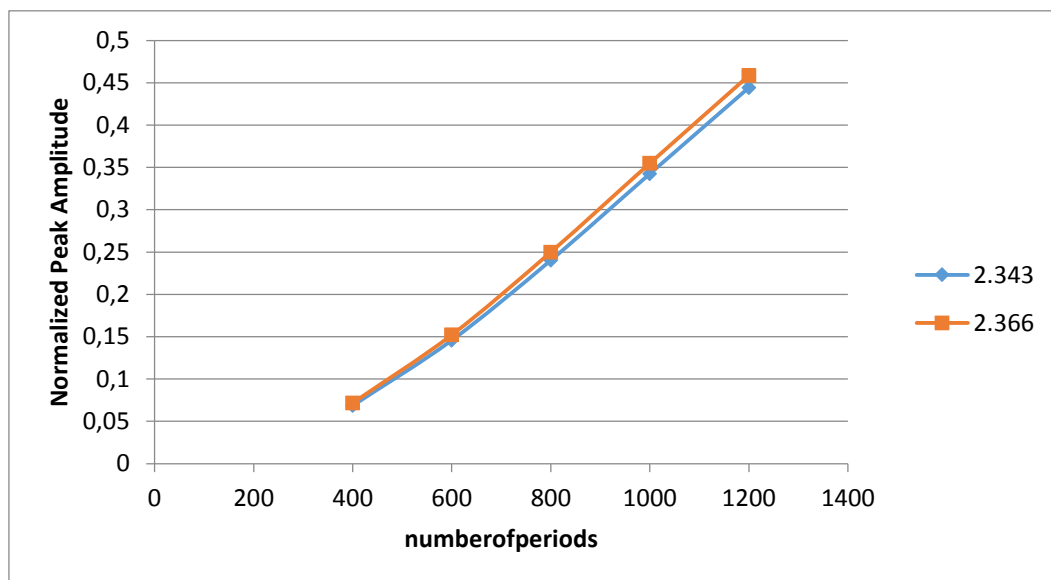
1000	0.00032	0.3548	1.5656	0.00063	0.02176	0.02173
1200	0.000285	0.45846	1.5656	0.00054	0.03102	0.03101

Πίνακας 3. Συγκεντρωτικά αποτελέσματα για $\Lambda=2.366 \mu\text{m}$.

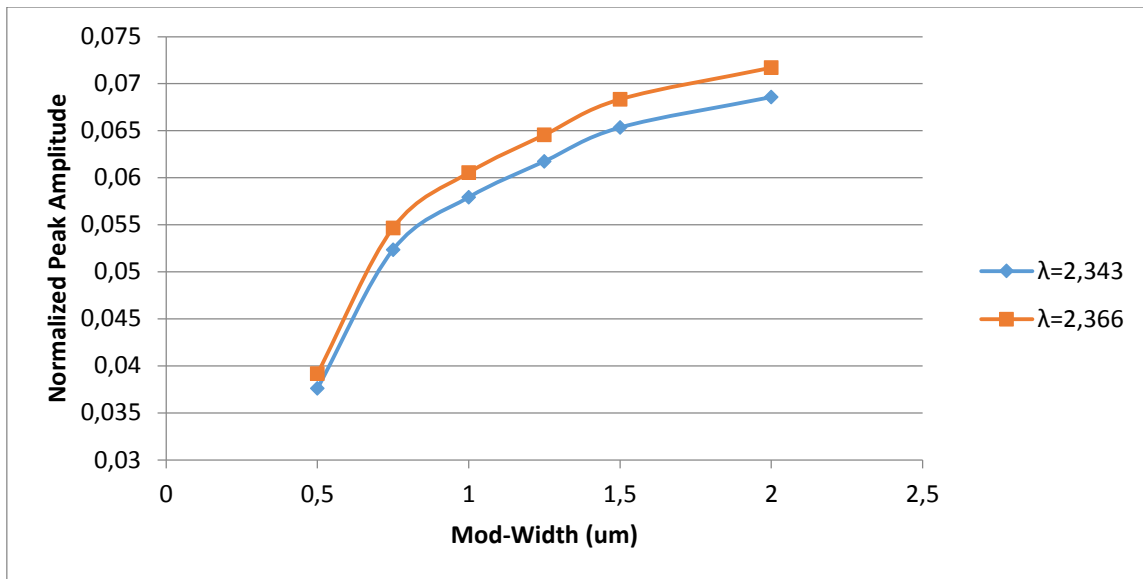
Συνοψίζοντας τα αποτελέσματα για τα δυο μήκη κύματος που εξετάστηκαν παρουσιάζουν ομοιόμορφη προσέγγιση τόσο όσον αφορά τη γραφική ανασκόπηση όσο και τη συνολική υπολογιστική θεώρηση. Συνεπώς το βασικό συμπέρασμα που εξάγεται είναι ότι η προσομοίωση πραγματοποιήθηκε ορθώς αφού δεν παρατηρούνται μη αναμενόμενες καταστάσεις κατά την μοντελοποίηση. Επίσης υπάρχει η δυνατότητα σύγκρισης των διαφορετικών καταστάσεων σε κοινή βάση και αποτελεί το αντικείμενο της επόμενης ενότητας.

4.2.5 Συγκριτική Θεώρηση για διαφορετικές περιόδους

Το τελικό στάδιο της διαδικασίας σχετίζεται με τη σύγκριση των επιμέρους καταστάσεων προσομοίωσης. Η ως τώρα ανάλυση περιορίστηκε στη θεώρηση των καταστάσεων για το μήκος της περιόδου. Με την εξαγωγή των κοινών προτύπων, εξετάζεται μια ολιστική σύγκριση των σεναρίων. Η βασική σύγκριση επικεντρώνεται στο μέγεθος του ανώτερου σημείου της καμπύλης και λαμβάνει υπόψη τόσο τον αριθμό των περιόδων όσο και το Modwidth. Οι γραφικές παραστάσεις της μελέτης παρουσιάζονται θεωρώντας όλες τις άλλες παραμέτρους σταθερές.



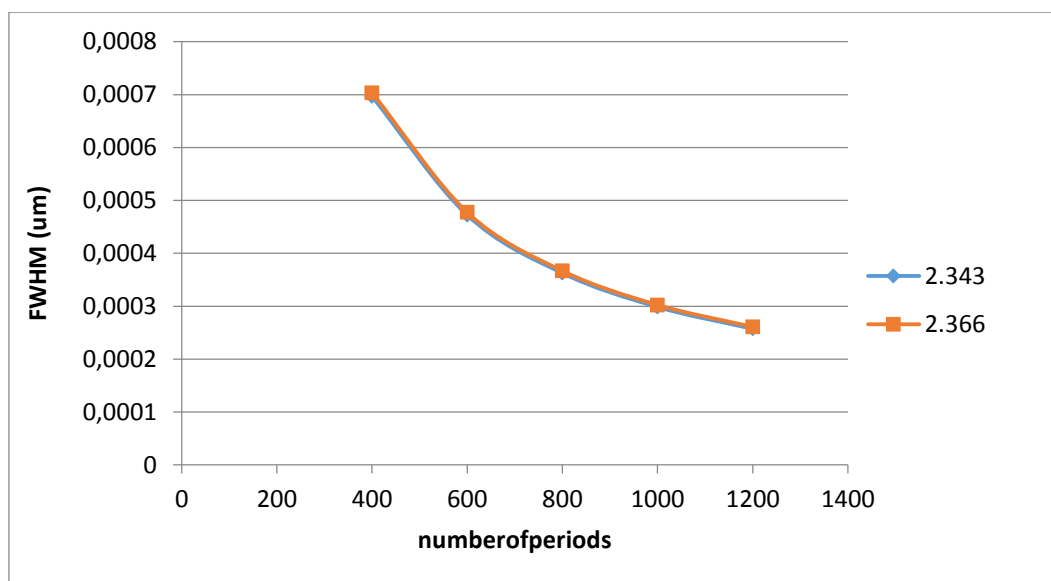
Εικόνα 53 - Συγκριτική γραφική παράσταση της μέγιστης απολαβής σε συνάρτηση με το πλήθος των περιόδων για $\Lambda=2.343 \mu\text{m}$ και $\Lambda=2.366 \mu\text{m}$.



Εικόνα 54 - Συγκριτική γραφική παράσταση της μέγιστης απολαβής σε συνάρτηση με το Modwidth για $\lambda=2.343 \mu\text{m}$ και $\lambda=2.366 \mu\text{m}$.

Από τις γραφικές παραστάσεις γίνεται αντιληπτό ότι όσο αυξάνεται το μήκος κύματος τόσο αυξάνεται και το πλάτος της μέγιστης απολαβής (Peak Amplitude). Αυτό συμβαίνει για κάθε τιμή των παραμέτρων M και Modwidth. Επιπρόσθετα (όπως εξετάστηκε σε κάθε σενάριο ξεχωριστά) τόσο οι δεξιά όσο και οι αριστερά καμπύλες ακολουθούν την ίδια προσέγγιση. Το ίδιο παρατηρείται και για το αρχικό σενάριο εξέτασης οπότε το πλάτος των δεξιά και αριστερά καμπύλων λαμβάνεται υψηλότερο καθώς αυξάνεται το μήκος κύματος.

Οι υπόλοιπες παράμετροι ασκούν μικρή επίδραση και για το λόγο αυτό το μήκος της περιόδου δεν επιδρά σημαντικά στην τελική αναπαράσταση. Χαρακτηριστικό παράδειγμα τέτοιας παραμέτρου είναι και το FWHM που παρουσιάζεται στη συνέχεια.



Εικόνα 55 - Συγκριτική γραφική παράσταση του FWHM σε συνάρτηση με το πλήθος των περιόδων για $\Lambda=2.343 \mu\text{m}$ και $\Lambda=2.366 \mu\text{m}$.

Τα αποτελέσματα καταδεικνύουν την επίδραση του μήκους της περιόδου στο grating που κατασκευάζεται. Αυτό διαφαίνεται και από την αυτόνομη εξέταση όπως παρουσιάστηκε, αν και η γραφική απεικόνιση που προηγήθηκε καθιστά πιο εμφανή την επίδραση του μήκους κύματος στην ολιστική προσέγγιση.

5^ο - ΚΕΦΑΛΑΙΟ

“ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ”

5.1 Συμπεράσματα

Η παρούσα εργασία εστίασε στη μελέτη των χαρακτηριστικών των φίλτρων Bragg grating και στην επίδραση που αυτά ασκούν στα lasers εξωτερικής κοιλότητας. Από το θεωρητικό και το πρακτικό μέρος της παρούσας μελέτης έγινε κατανοητό ότι:

- Σε ένα laser εξωτερικής κοιλότητας, όσο πιο μεγάλο είναι το μήκος του καθρέπτη τόσο αυξάνεται ο χρόνος απόσβεσης του φωτός στο εσωτερικό της κοιλότητας με αποτέλεσμα να μειώνεται ο θόρυβος φάσης και το φασματικό εύρος εκπομπής.
- Σε ένα laser εξωτερικής κοιλότητας, όσο μεγαλύτερο είναι το μήκος του καθρέπτη τόσο μικρότερος είναι ο ρυθμός επανάληψης των παλμών.
- Σε ένα laser εξωτερικής κοιλότητας, όσο αυξάνεται ο ρυθμός επανάληψης των παλμών τόσο ελαττώνεται ο θόρυβος.
- Σε ένα laser εξωτερικής κοιλότητας, το μήκος κύματος είναι εφικτό να ρυθμιστεί χρησιμοποιώντας ένα φράγμα περίθλασης ως στοιχείο συντονισμού.
- Σε ένα laser εξωτερικής κοιλότητας, με την προσθήκη της απολαβής του laser δ_m σε μία παθητική κοιλότητα με συνολικές απώλειες δ_c , η λεπτότητα F τείνει στο άπειρο και το εύρος ζώνης συντονισμού $\Delta\omega_{cav}$ τείνει στο μηδέν
- Τα ολοκληρωμένα φράγματα Bragg σχηματίζονται με τη φυσική δημιουργία αυλακώσεων σε ένα κυματοδηγό. Έτσι η λειτουργία τους δε βασίζεται στη μεταβολή του δείκτη διάθλασης.
- Η επίπεδη διαδικασία κατασκευής ολοκληρωμένων φραγμάτων Bragg προσφέρει τη δυνατότητα για καλύτερο έλεγχο των διαστάσεων της συσκευής. Ο ακριβής έλεγχος της περιόδου είναι εφικτός διότι τα ολοκληρωμένα φράγματα Bragg κατασκευάζονται δόντι προς δόντι.
- Τα φράγματα Bragg χρησιμοποιούνται για το κλείδωμα του μήκους κύματος και για το φασματικό περιορισμό της εκπομπής μίας διόδου laser.

- Η χρήση φράγματος Bragg στο εσωτερικό μίας εξωτερικής κοιλότητας μπορεί να τροποποιήσει τη διάδοση της δέσμης και να ελαττώσει το συντελεστή αποτελεσματικής σύζευξης.
- Σε ένα καθρέπτη Bragg, η συνολική ανακλαστικότητα καθορίζεται από το πλήθος των επιμέρους επιπέδων και από τη διαφορά στην τιμή του δείκτη διάθλασης μεταξύ των δύο διαφορετικών υλικών από τα οποία κατασκευάζεται το κάθε επίπεδο. Το εύρος ζώνης της ανάκλασης προσδιορίζεται από τη διαφορά στην τιμή του δείκτη διάθλασης.
- Σε ένα καθρέπτη Bragg, η ανακλαστικότητα παρουσιάζει υψηλή τιμή πάνω από ένα ορισμένο οπτικό εύρος ζώνης που καθορίζεται από τη διαφορά του δείκτη διάθλασης μεταξύ των υλικών που χρησιμοποιούνται και από το πλήθος των επιμέρους επιπέδων.
- Σε ένα καθρέπτη Bragg, η διασπορά έχει μικρή τιμή κοντά στο κέντρο της ζώνης ανάκλασης και αρκετά μεγαλύτερη τιμή κοντά στα άκρα.
- Για τις τιμές μήκους των περιόδων που εξετάστηκαν, το μήκος κύματος Bragg παραμένει ίδιο και δεν εξαρτάται από τις τιμές των παραμέτρων M (πλήθος περιόδων) και Modwidth (μέγεθος δοντιών). Βέβαια παρατηρείται μια μικρή μετατόπιση καθώς μεταβάλλεται η τιμή του Modwidth. Η μεταβολή αυτή οφείλεται στην αλλαγή του ενεργού δείκτη διάθλασης διότι καθώς μεγαλώνει το δόντι αυξάνει ελάχιστα ο ενεργός δείκτης διάθλασης γι' αυτό προχωράει ο συντονισμός σε λίγο μεγαλύτερα μήκη κύματος.
- Για τις τιμές μήκους των περιόδων που εξετάστηκαν, το πλάτος του συντονισμού εξαρτάται από τις τιμές των παραμέτρων M και Modwidth. Καθώς αυξάνεται η τιμή του M και του ModWidth, αυξάνεται το μέγιστο πλάτος της κατανομής. Η επίδραση του M είναι ισχυρότερη από αυτή του Modwidth.
- Για τις τιμές μήκους των περιόδων που εξετάστηκαν, τα διαγράμματα του δεξιού και του αριστερού πλευρικού λοβού παρουσιάζουν πλήρη αναλογία όσον αφορά την επίδραση του αριθμού των περιόδων (M) και του μεγέθους των δοντιών (Modwidth) στο μέγεθος του λοβού. Πιο συγκεκριμένα παρουσιάζεται αύξηση της τιμής του πλάτους με την αύξηση του M και του Modwidth. Το M ασκεί και στην περίπτωση αυτή ισχυρότερη επίδραση από ότι το Modwidth.

- Για τις τιμές μήκους των περιόδων που εξετάστηκαν, ο αριθμός των περιόδων M ασκεί επίδραση στην μεταβολή της παραμέτρου FWHM αφού το FWHM μειώνεται καθώς αυξάνεται ο αριθμός των περιόδων. Αντίθετα το Modwidth δεν επιδρά στο FWHM. Η συνάρτηση μεταφοράς έχει τη μορφή της sinc συνάρτησης μεταφοράς με τους λοβούς. Η sinc συνάρτηση μεταφοράς είναι ο μετασχηματισμός Fourier της τετραγωνικής συνάρτησης όπως και το ομοιόμορφο Bragg grating που μελετήσαμε. Κατά συνέπεια μεταβάλλεται ο δείκτης διάθλασης απότομα και τελειώνει επίσης απότομα.
- Όσο αυξάνεται το μήκος της περιόδου τόσο ο συντονισμός μετατοπίζεται σε μεγαλύτερα μήκη κύματος (Peak Amplitude). Αυτό συμβαίνει για κάθε τιμή των παραμέτρων M και Modwidth.

5.2 Προτάσεις για Μελλοντική Έρευνα

Η ολοκληρωμένη οπτική (integrated optic) είναι ένα ιδιαίτερα σύνθετο και ενδιαφέρον ερευνητικό πεδίο και περιλαμβάνει πλήθος θεματικών ενοτήτων που θα ήταν χρήσιμο να εξεταστούν.

Στην ανάλυση συζευγμένου τρόπου πρέπει να δοθεί ιδιαίτερη έμφαση στον υπολογισμό του συντελεστή σύζευξης σε συστήματα που παρουσιάζουν μεγάλη διαφορά στην τιμή του δείκτη διάθλασης και είναι πιθανό να εξαρτάται ισχυρά η λειτουργία τους από την πόλωση.

Η οπτική λιθογραφία είναι ένα εξαιρετικά ισχυρό εργαλείο για τη δημιουργία ολοκληρωμένων φραγμάτων Bragg, αλλά χρειάζεται περισσότερη έρευνα προκειμένου να χαρακτηριστεί και να εξαλειφθεί η παραμόρφωση φάσης που παράγεται. Προκειμένου να κατασκευαστούν φίλτρα Bragg grating με μεγαλύτερο μήκος, είναι απαραίτητο να χρησιμοποιηθούν νέες λιθογραφικές μέθοδοι με στόχο την εξάλειψη του chirp.

Για τις συσκευές που έχουν ως βάση ένα κυματοδηγό από silica καλό θα ήταν να μελετηθεί κάποια τεχνική διατήρησης της δομής του φράγματος σε περίπτωση υπερβολικής ανάπτυξης του μανδύα.

Για τις SOI συσκευές καλό θα ήταν να μελετηθεί η επίδραση της διπλοθλαστικότητας (birefringence) και της πόλωσης στη λειτουργία ενός φράγματος Bragg.

Επίσης θα ήταν ενδιαφέρον να μελετηθεί η επίδραση που μπορεί να ασκήσει ένα ολοκληρωμένο φράγμα Bragg στη λειτουργία ενός ολοκληρωμένου συμβολόμετρου Mach-

Zender και πιο συγκεκριμένα στο διαχωρισμό του ανακλώμενου σήματος από το σήμα εισόδου.

Τέλος θα ήταν να πραγματοποιηθεί έρευνα με στόχο τη βελτιστοποίηση της φασματικής απόκρισης ενός φράγματος Bragg εισάγοντας με κατάλληλο τρόπο chirp και apodization.

ΑΝΑΦΟΡΕΣ – ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] Silfvast W. T.. *Lasers. Fundamentals of Photonics (course 1 of 8)*. University of Central Florida. Orlando, Florida.
- [2] Στασινοπούλου Β., Ταμπαθάνη Ν., Χριστογιάννη Μ., (2005). *Το Laser και οι Εφαρμογές του*. Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο.
- [3] *History of Lasers*.
<http://www.worldoflasers.com/laserhistory.htm>
Ημερομηνία Πρόσβασης: Ιούνιος 2013.
- [4] *A Brief History of Lasers*.
<http://www.kigre.com/files/historylasers.pdf>
Ημερομηνία Πρόσβασης: Ιούνιος 2013.
- [5] RP Photonics Encyclopedia. *External Cavity Diode Lasers*.
http://www.rp-photonics.com/external_cavity_diode_lasers.html
Ημερομηνία Πρόσβασης: Ιούνιος 2013.
- [6] Siegman A. E., (1986). *Lasers*. University Science Books. Mill Valley California. United States of America.
- [7] Μπενής Μ., (2012). *Η Φυσική των Laser*. Τμήμα Φυσικής. Πανεπιστήμιο Ιωαννίνων.
- [8] Frantisek U.. *Uniform Fiber Bragg Gratings Properties*. Department of Electrical Engineering and Communications, Brno, Czech Republic.
- [9] RP Photonics Encyclopedia. *Fiber Bragg Gratings*.
http://www.rp-photonics.com/fiber_bragg_gratings.html
Ημερομηνία Πρόσβασης: Ιούλιος 2013.
- [10] Ghiringhelli F., (2003). *Fundamental Properties of Bragg Gratings and their Application to the Design of Advanced Structures*. Faculty of Engineering, Science and Mathematics. Optoelectronics Research Centre. University of Southampton.
- [11] Ugale S., Mishra V., (2010). *Fiber Bragg Grating Modeling, Characterization and Optimization with Different Index Profiles*. S. V. National Institute of Technology, Ichchhanath, Surat, Gujarat, India.

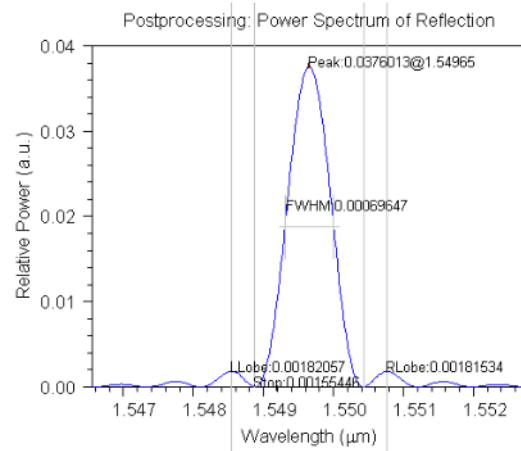
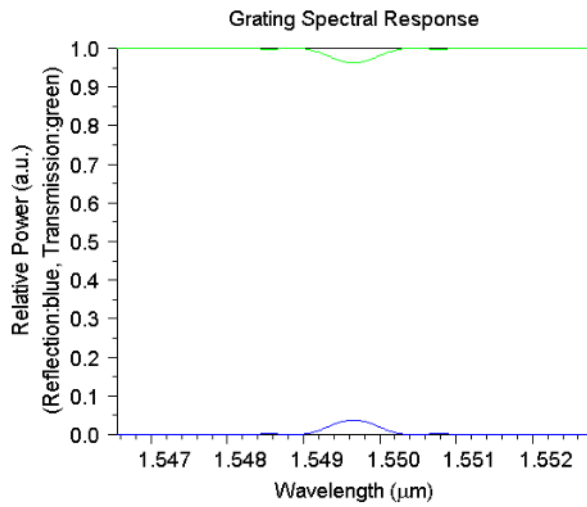
- [12] Yang Y. O., Sheng Y., (2004). *Design Fiber Bragg Grating Using Iterative Layer-Peeling Algorithm*. Center for Optics, Photonics and Lasers. Department of Physics, Physical Engineering and Optics, Laval University.
- [13] Kocabas A., Aydinli A. (2006). *Polymeric Waveguide Bragg Grating Filter using Soft Lithography*. Turk Telekom Bilkent Laboratory, Department of Physics, Bilkent University, Ankara, Turkey.
- [14] Paboeuf D., Vijayakumar D., Jensen O. B., Thestrup B., Lim J., Sujecki S., Larkins E., Lucas-Leclin G., Georges P., (2011). *Volume Bragg Grating External Cavities for the Passive Phase Locking of High-Brightness Diode Laser Arrays: Theoretical and Experimental Study*. Optical Society of America.
- [15] RP Photonics Encyclopedia. *Bragg Mirrors*.
http://www.rp-photonics.com/bragg_mirrors.html
Ημερομηνία Πρόσβασης: Ιούλιος 2013.
- [16] Murphy T. E., (2001). *Design, Fabrication and Measurement of Integrated Bragg Grating Optical Filters*. Massachusetts Institute of Technology.

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ

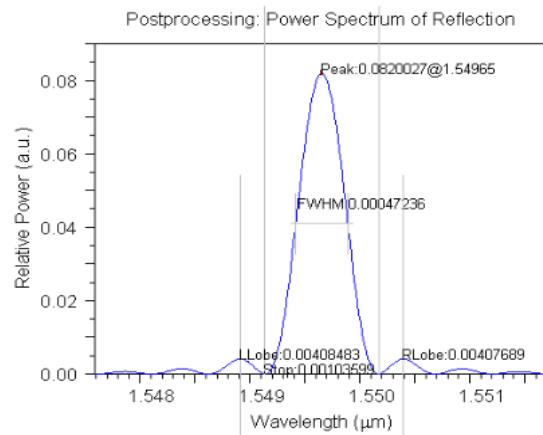
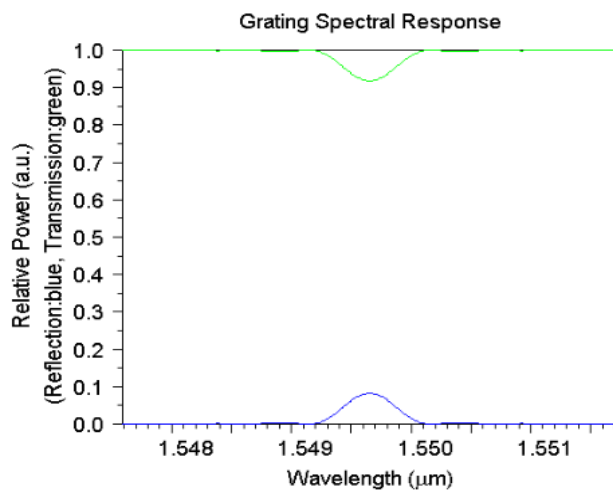
Παρουσίαση Γραφικών Αποτελεσμάτων.

Η παρουσίαση των γραφικών ακόλουθη τη μορφή $\langle \lambda, \text{Modwidth}, M \rangle$. Επομένως, έχουμε τα σενάρια εξέτασης

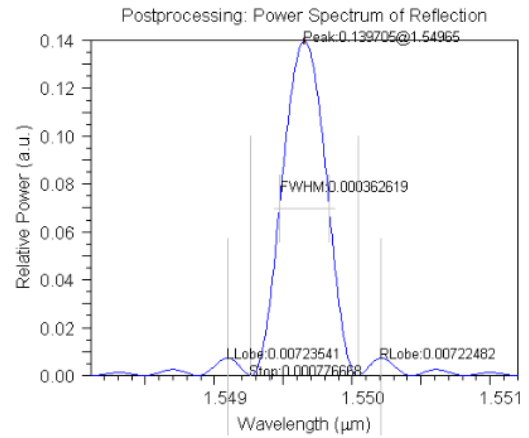
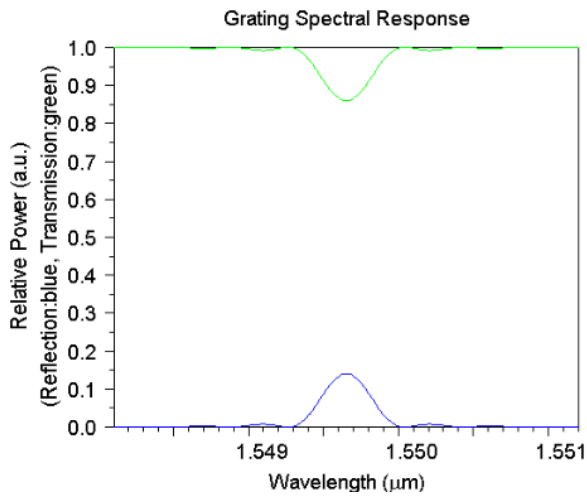
$\langle 2.343, 0.5, 400 \rangle$



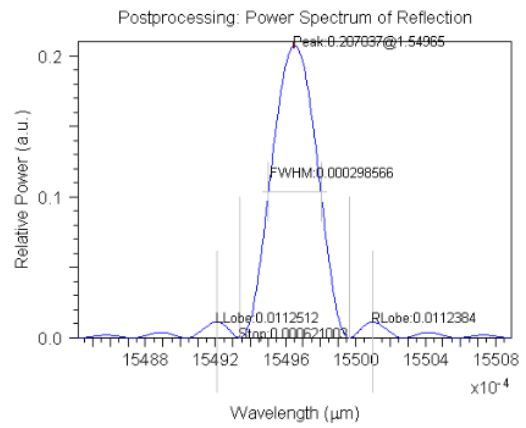
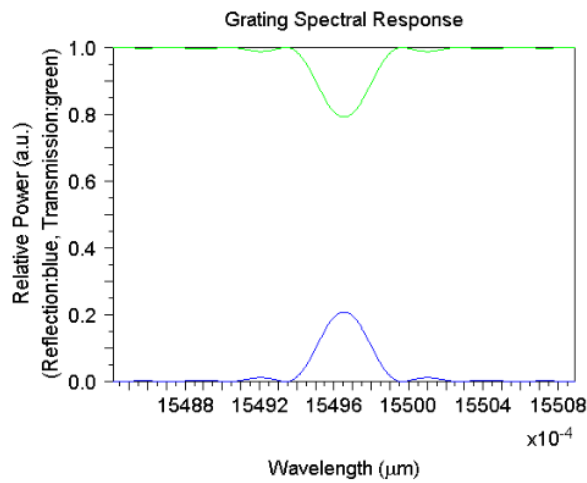
$\langle 2.343, 0.5, 600 \rangle$



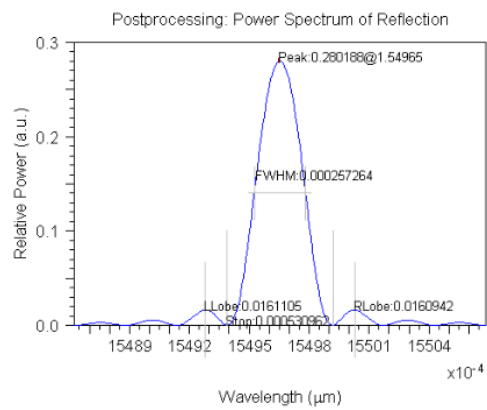
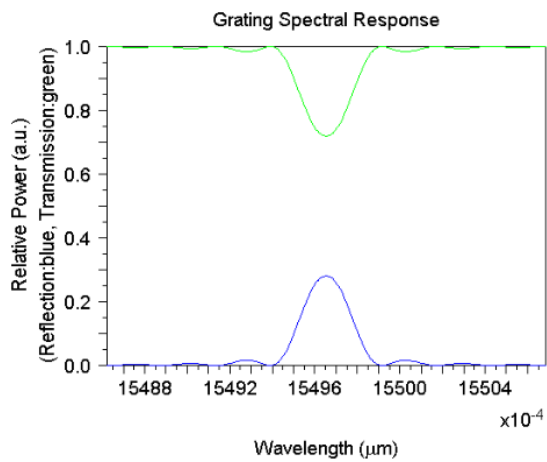
<2.343, 0.5,800>



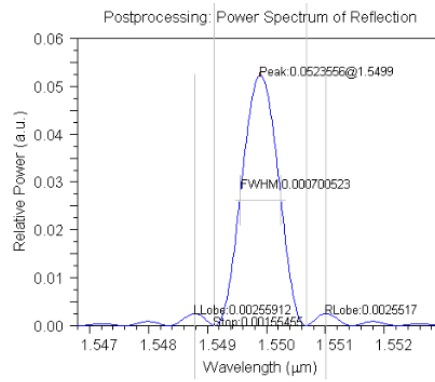
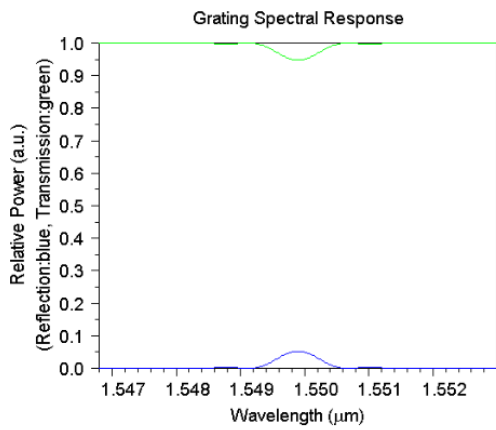
<2.343, 0.5,1000>



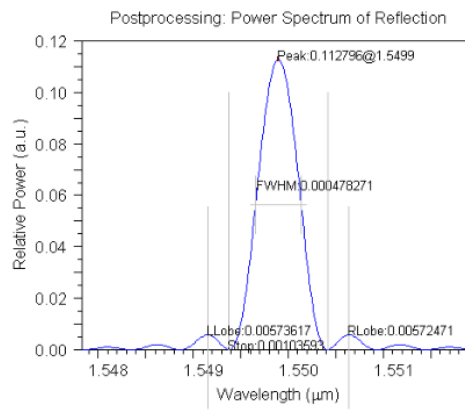
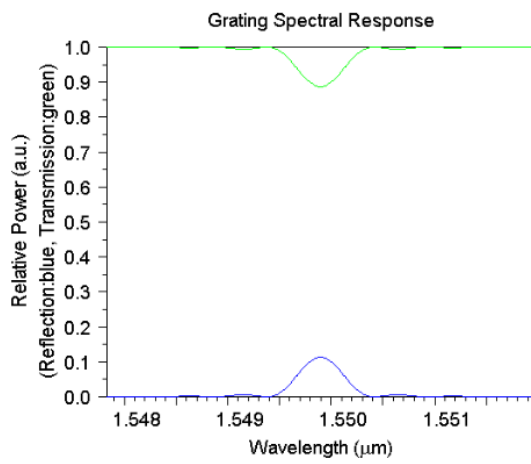
<2.343, 0.5,1200>



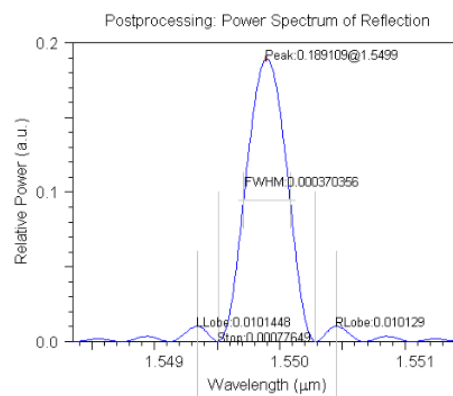
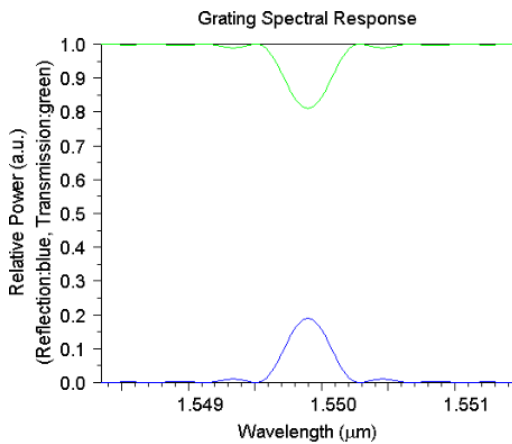
<2.343, 0.75,400>



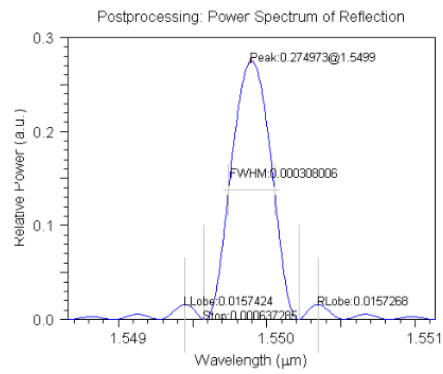
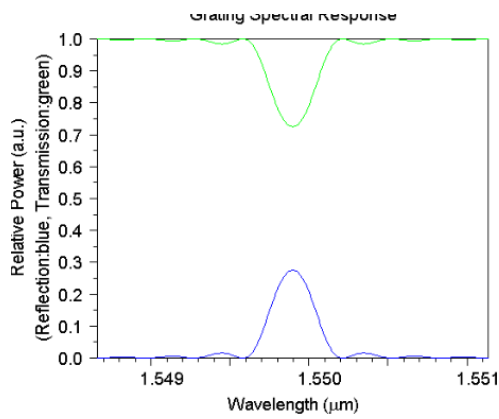
<2.343, 0.75,600>



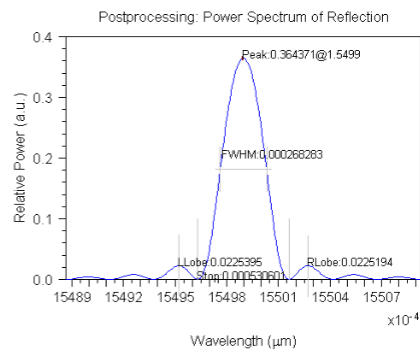
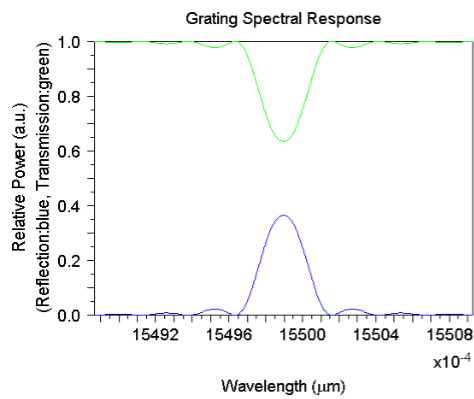
<2.343, 0.75,800>



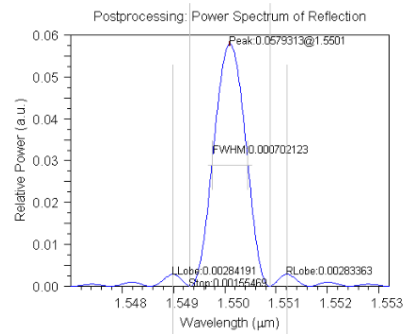
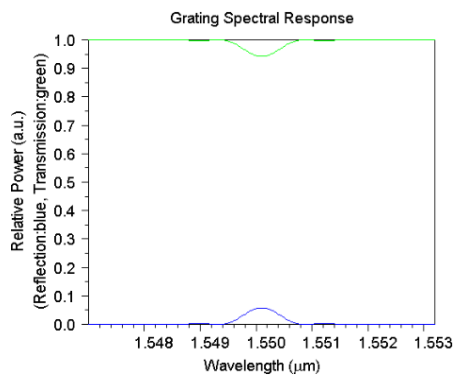
<2.343, 0.75,1000>



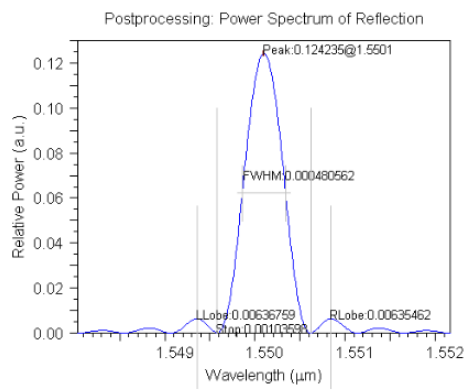
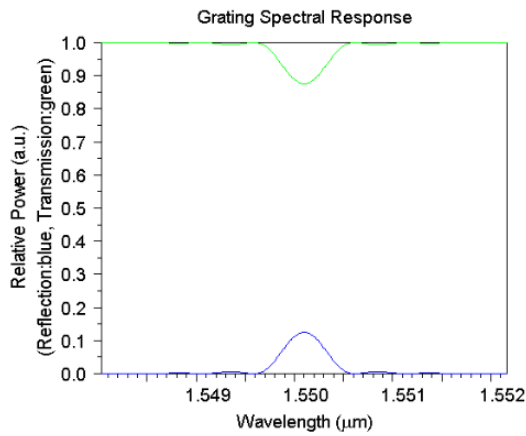
<2.343, 0.75,1200>



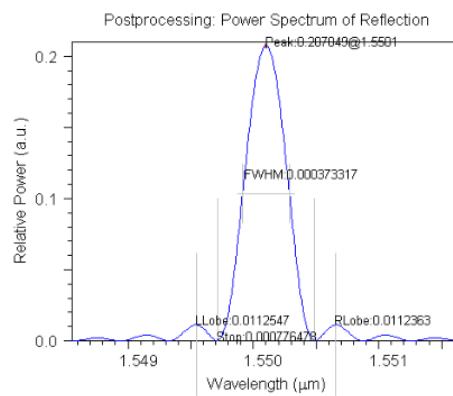
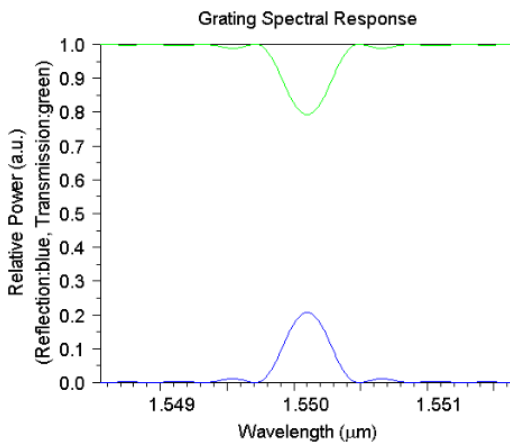
<2.343, 1.00,400>



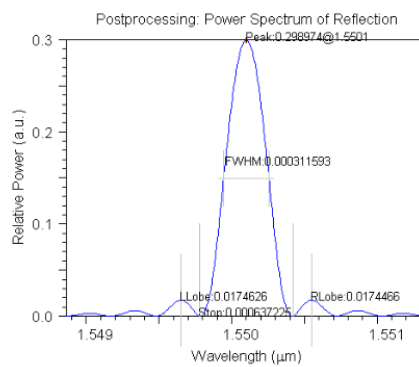
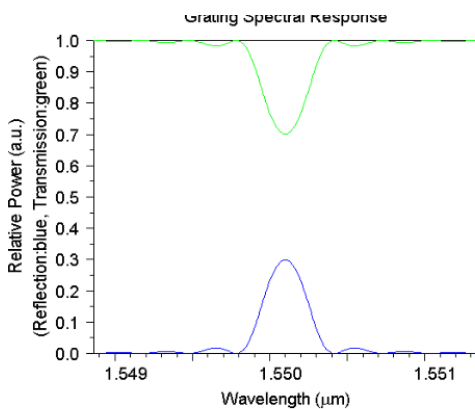
<2.343, 1.00,600>



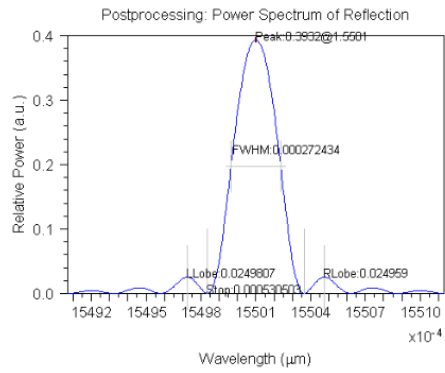
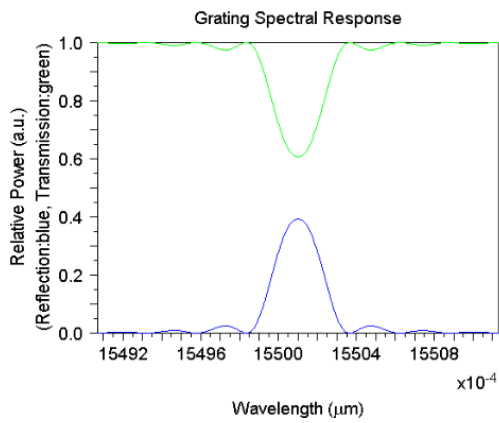
<2.343, 1.00,800>



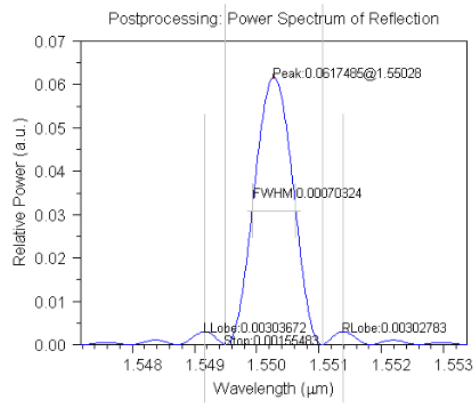
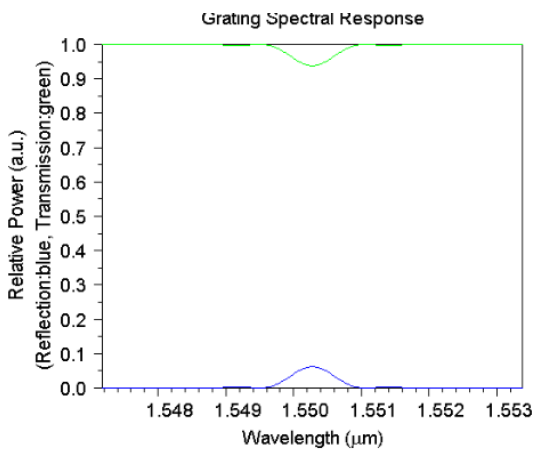
<2.343, 1.00,1000>



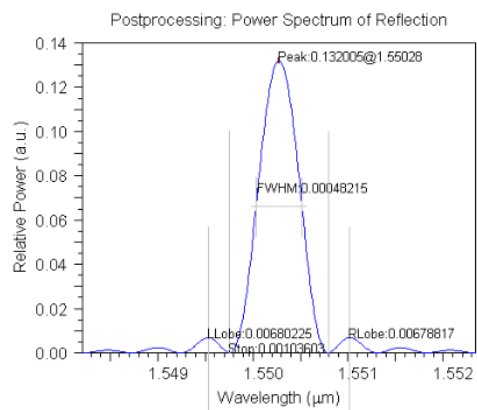
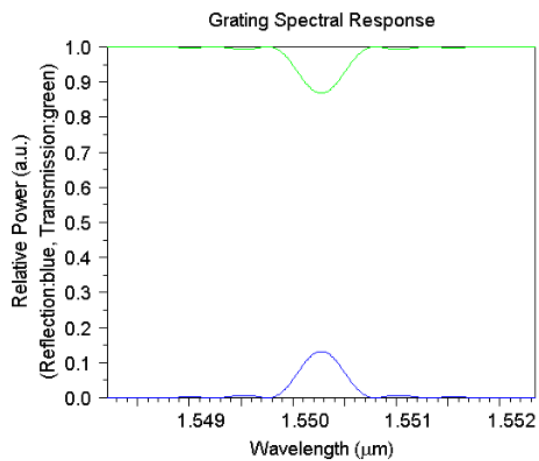
<2.343, 1.00,1200>



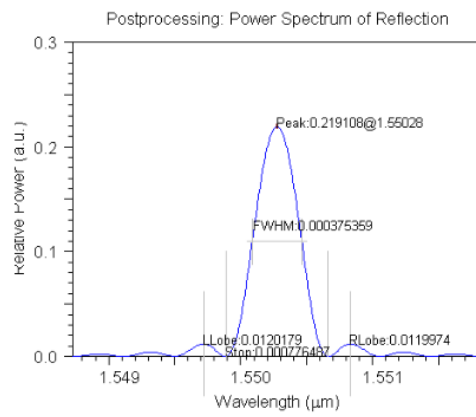
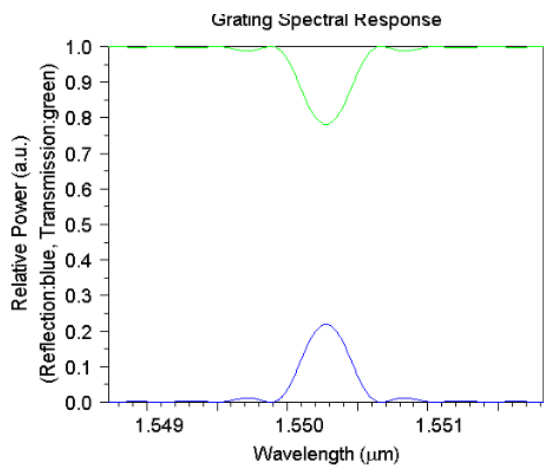
<2.343, 1.25,400>



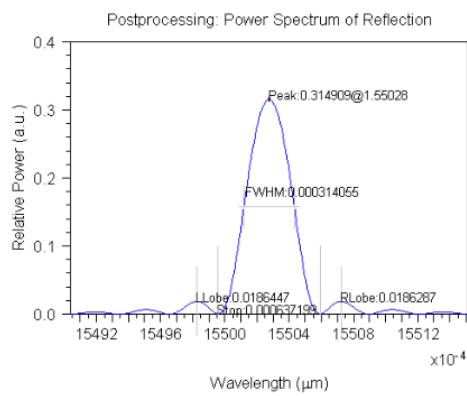
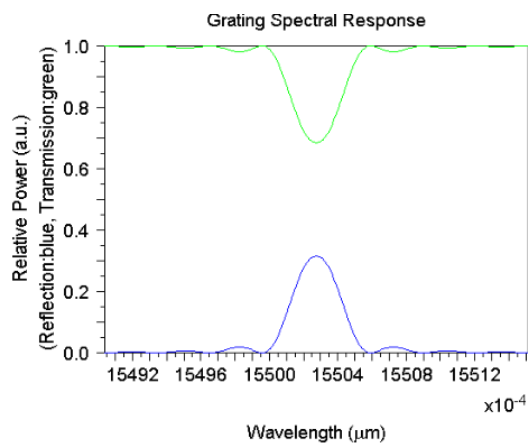
<2.343, 1.25,600>



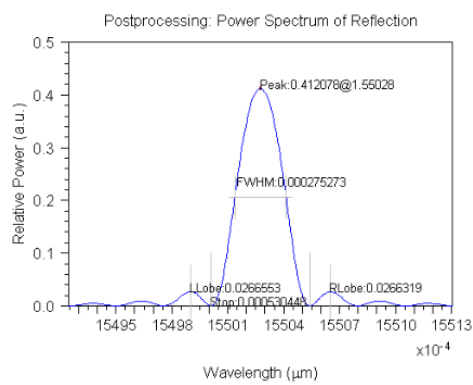
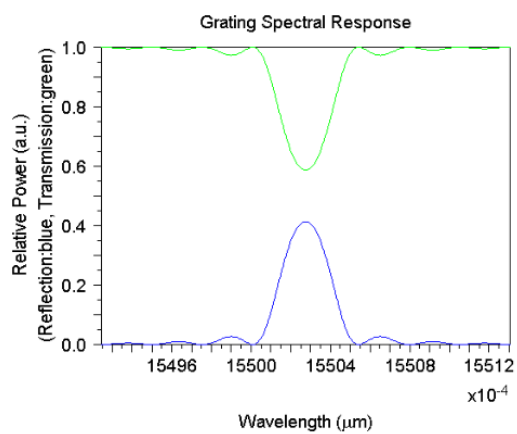
<2.343, 1.25,800>



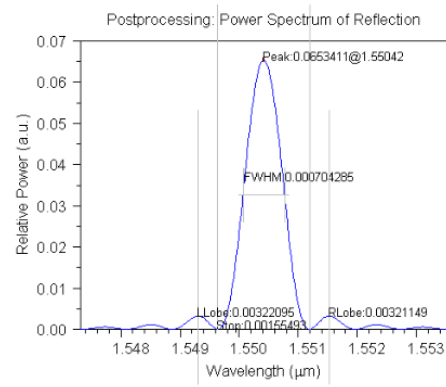
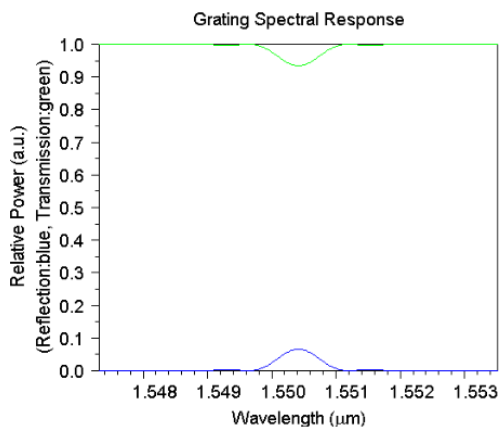
<2.343, 1.25,1000>



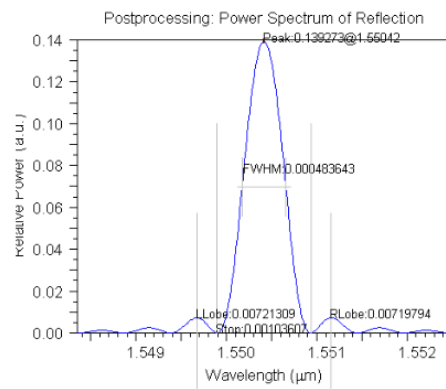
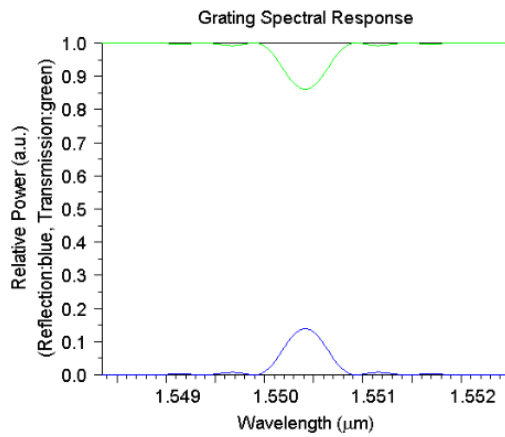
<2.343, 1.25,1200>



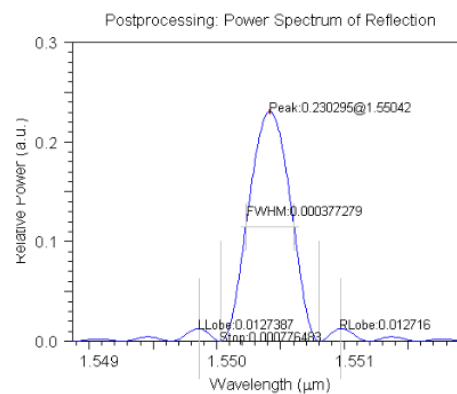
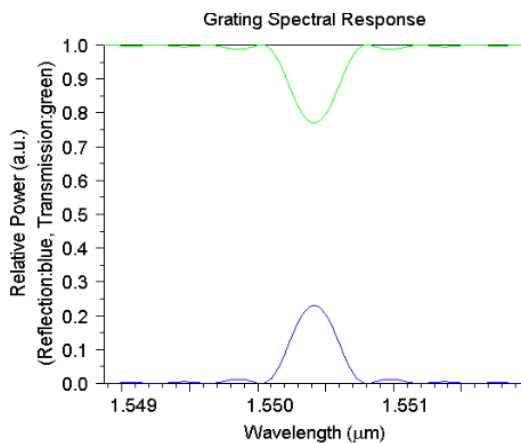
<2.343, 1.50,400>



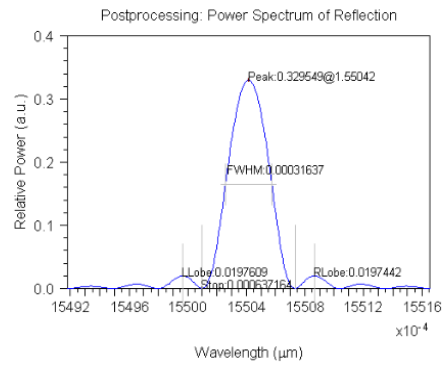
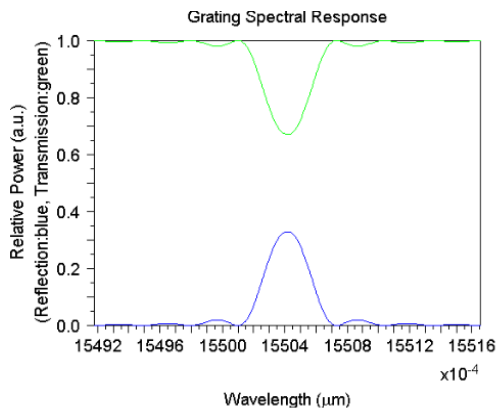
<2.343, 1.50,600>



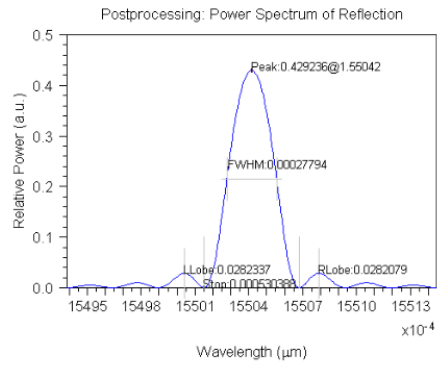
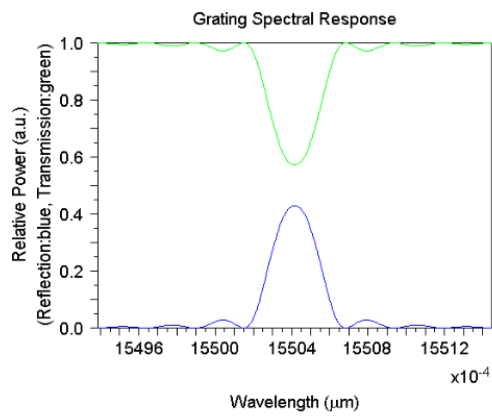
<2.343, 1.50,800>



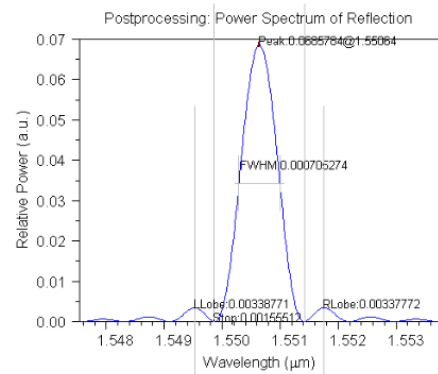
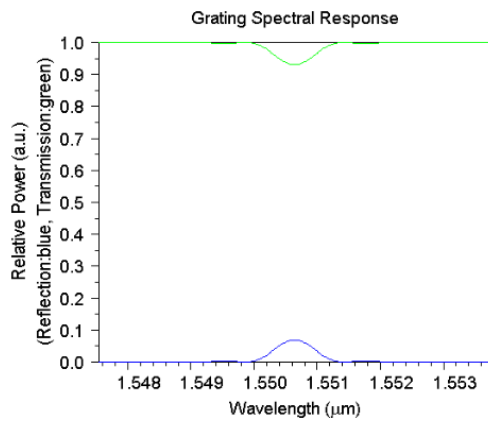
<2.343, 1.50,1000>



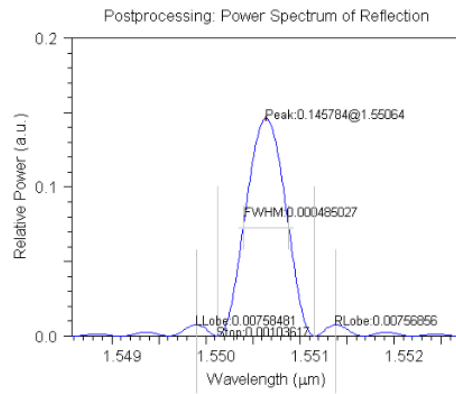
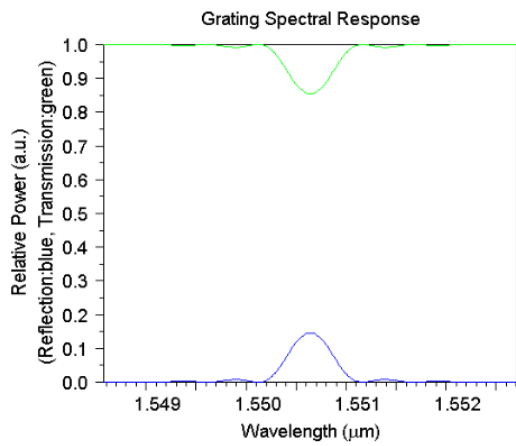
<2.343, 1.50,1200>



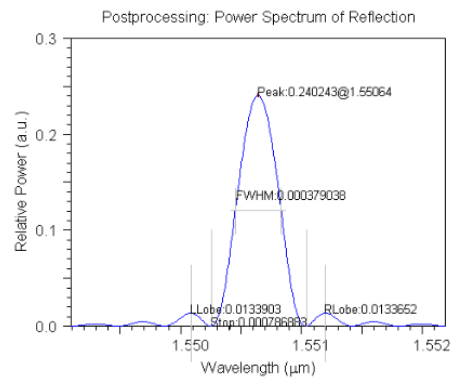
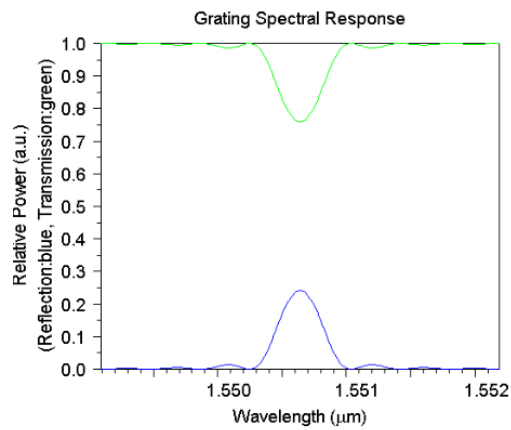
<2.343, 2.00,400>



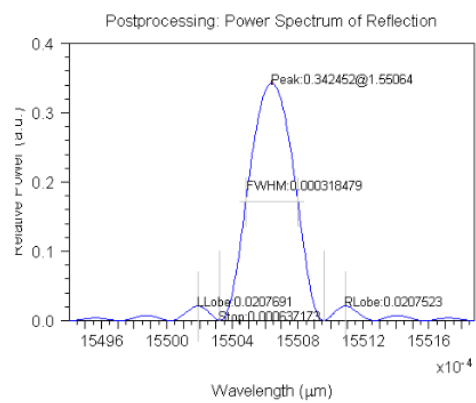
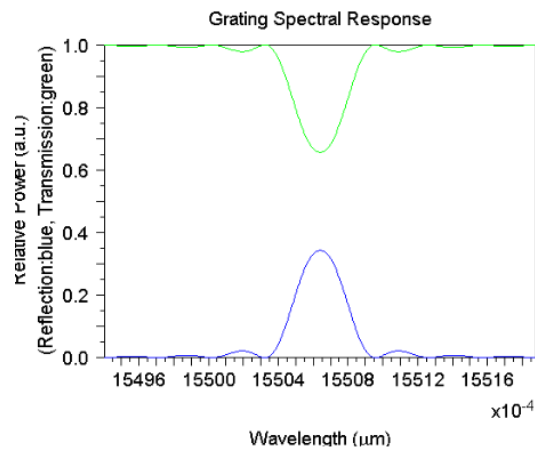
<2.343, 2.00,600>



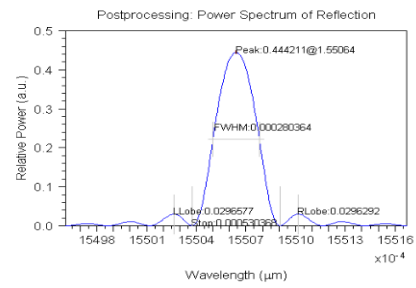
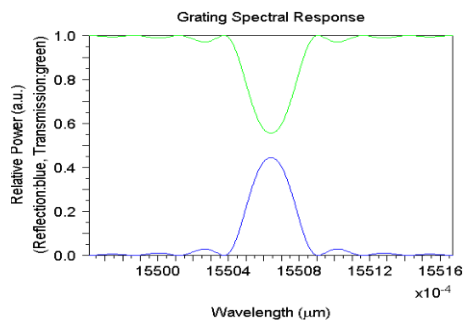
<2.343, 2.00,800>



<2.343, 2.00,1000>

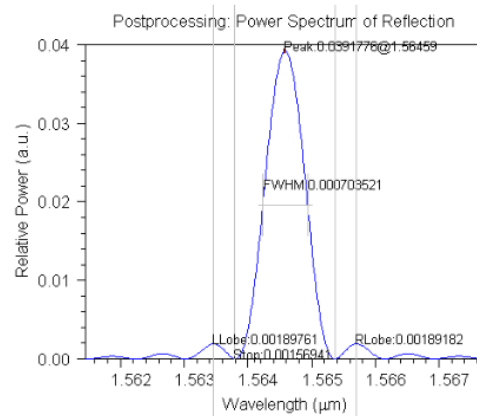
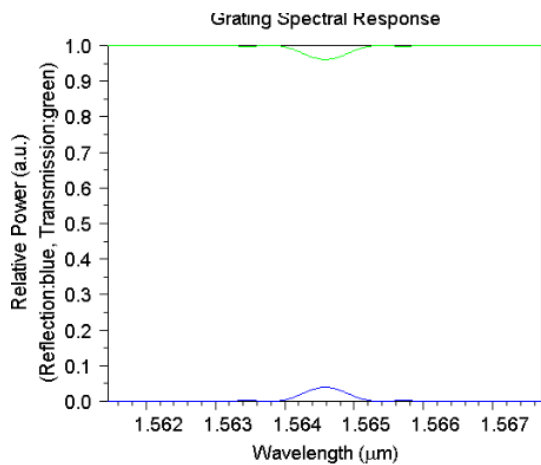


<2.343, 2.00,1200>

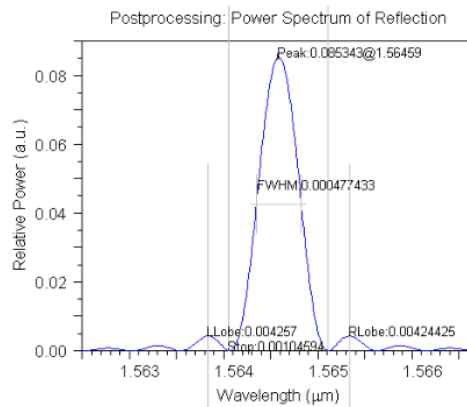
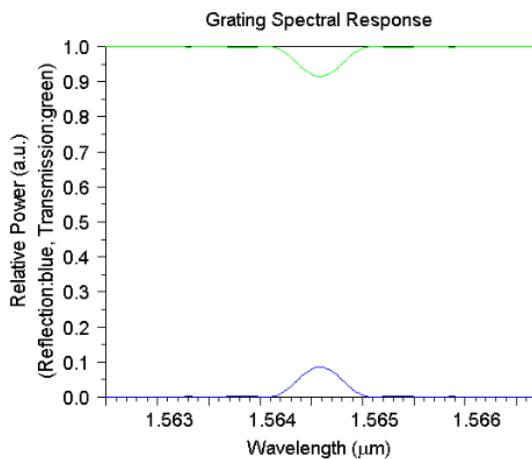


Κατόπιν ακολουθεί η αντίστοιχη παρουσίαση για $\lambda=2.366$

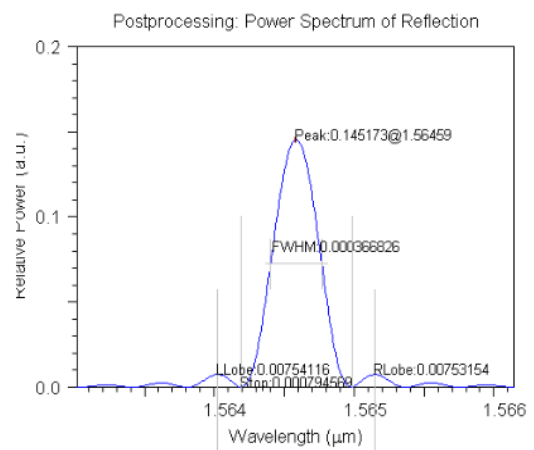
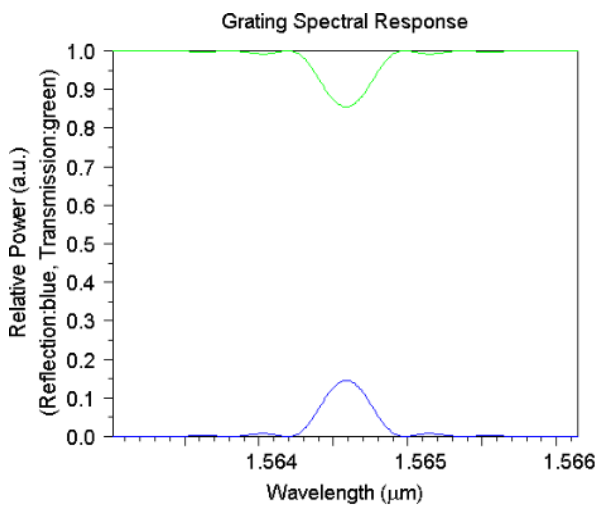
<2.366, 0.50,400>



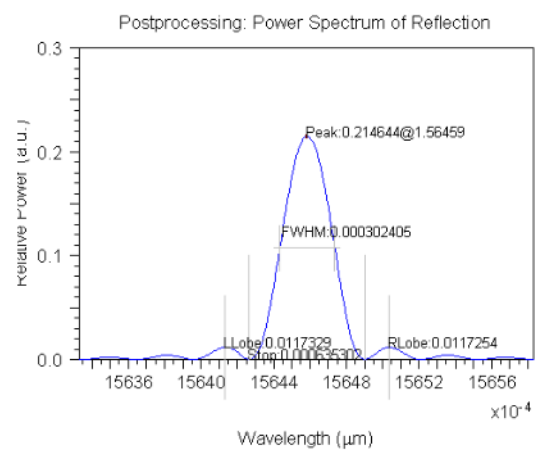
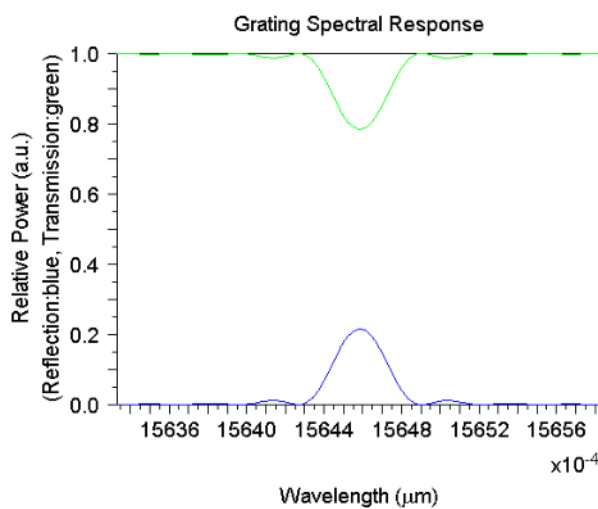
<2.366, 0.50,600>



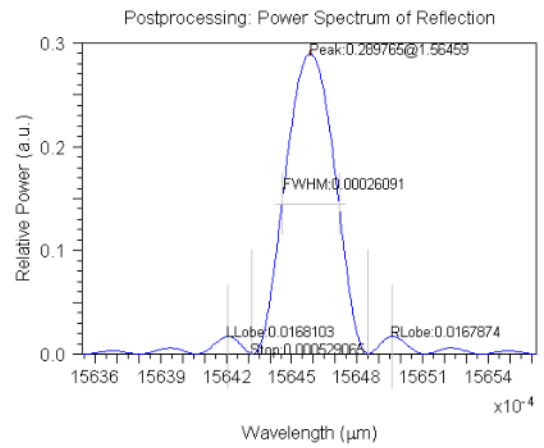
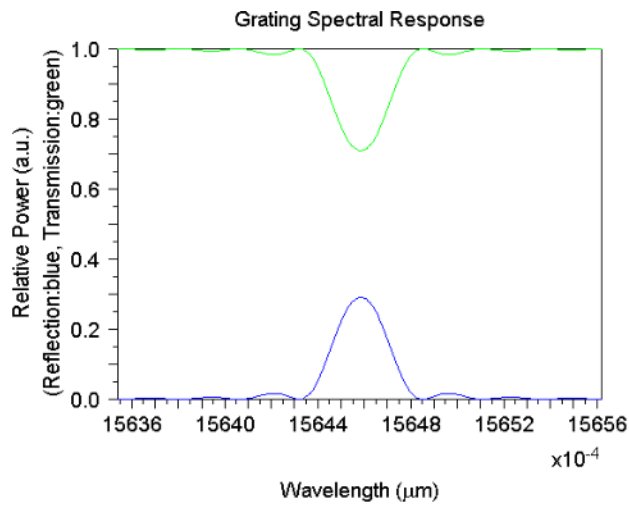
<2.366, 0.50,800>



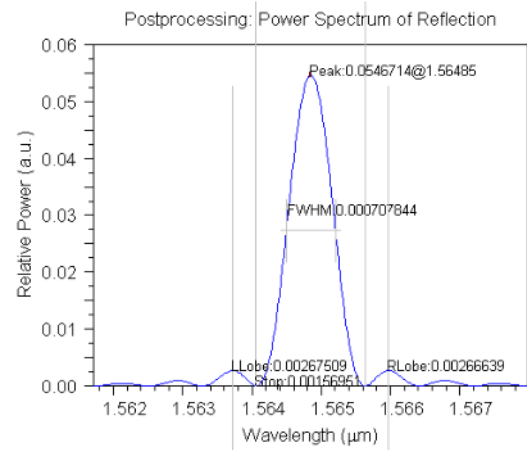
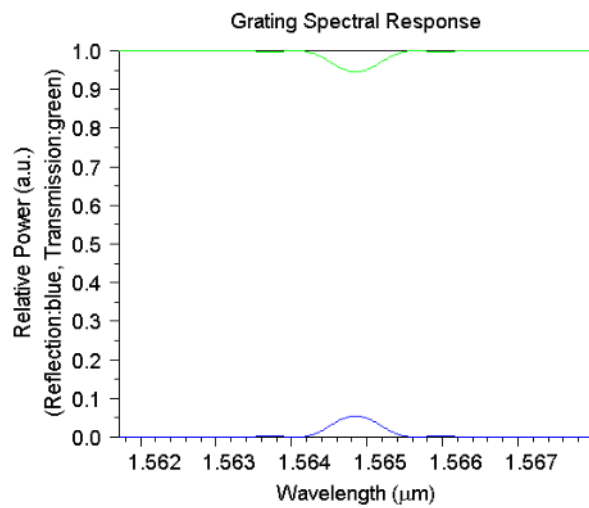
<2.366, 0.50,1000>



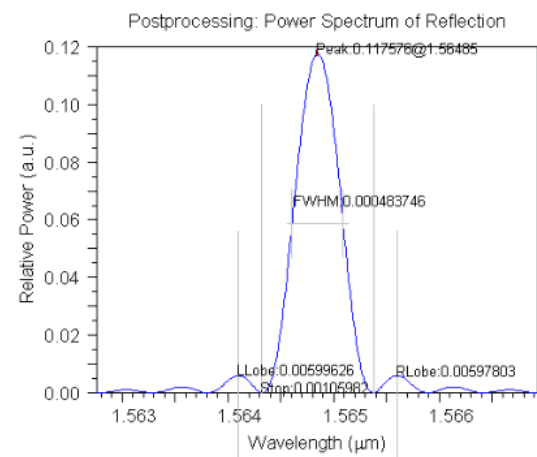
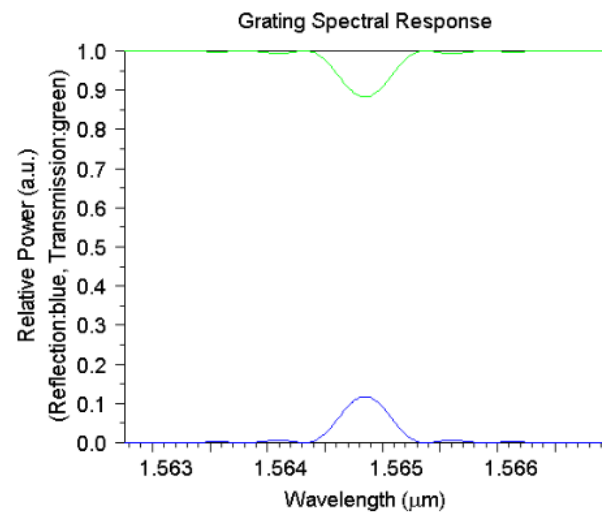
<2.366, 0.50,1200>



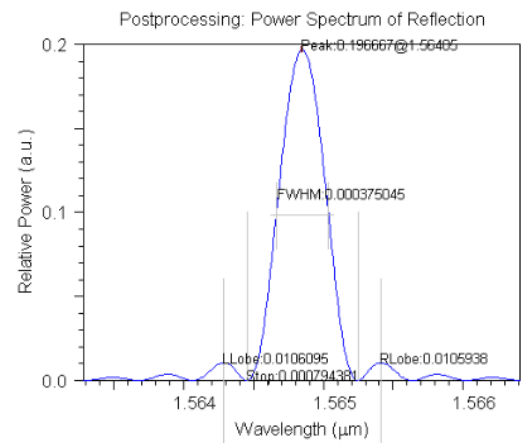
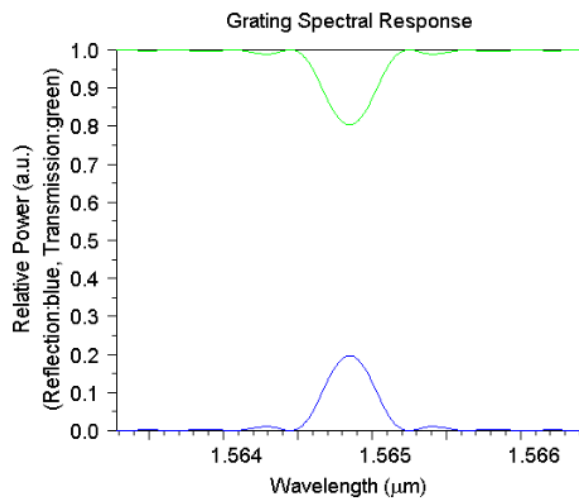
<2.366, 0.75,400>



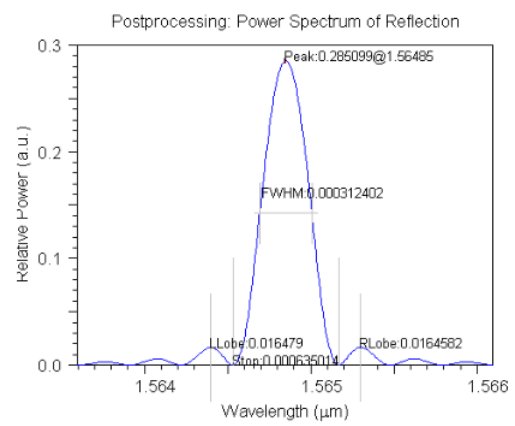
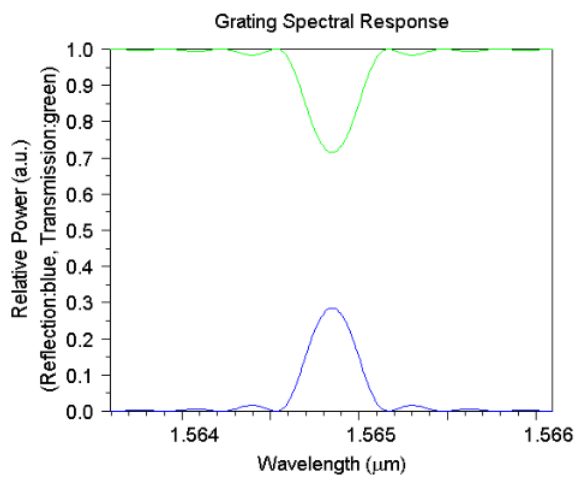
<2.366, 0.75,600>



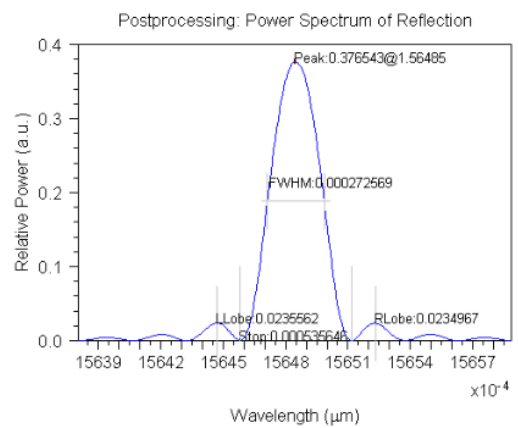
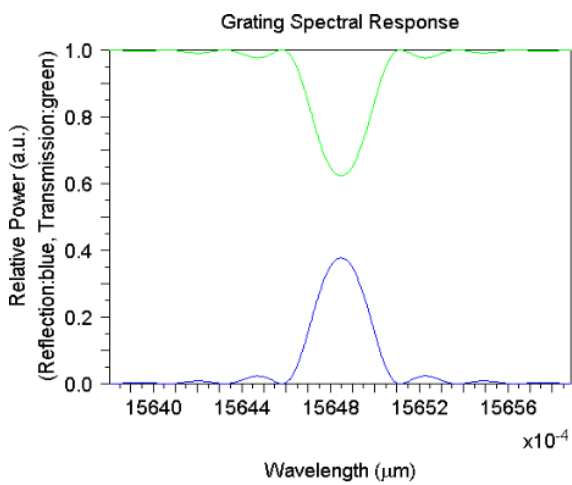
<2.366, 0.75,800>



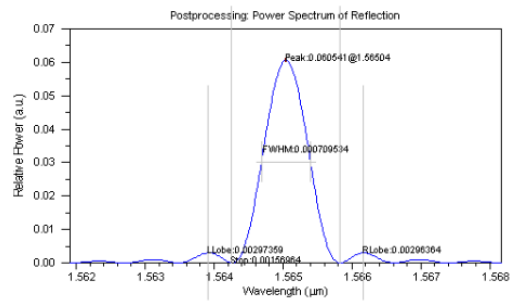
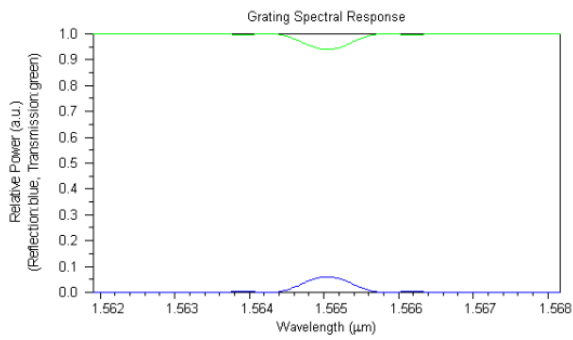
<2.366, 0.75,1000>



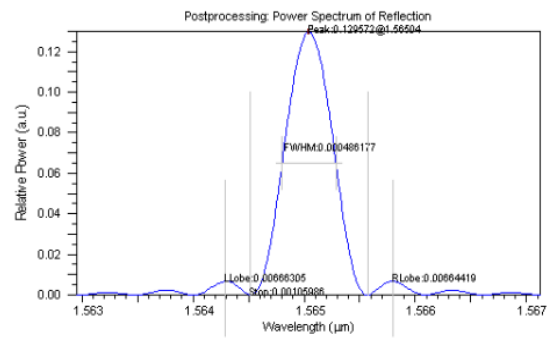
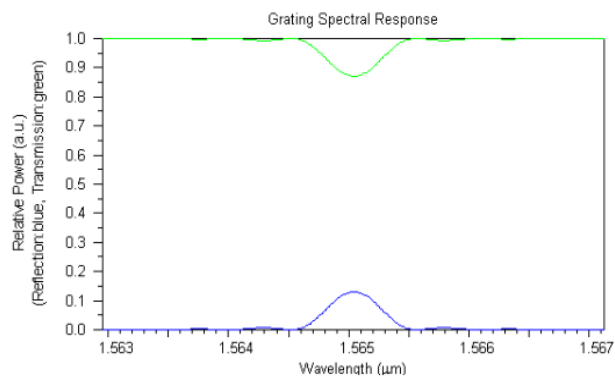
<2.366, 0.75,1200>



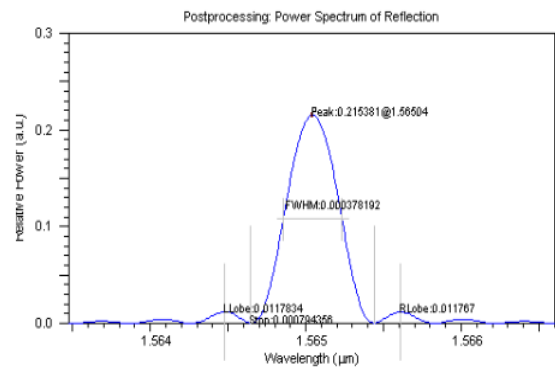
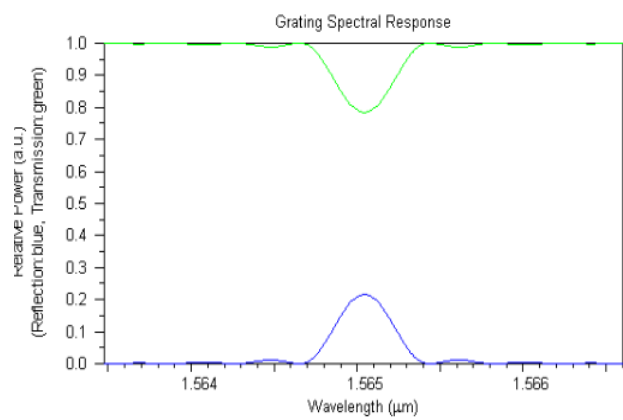
<2.366, 1.00,400>



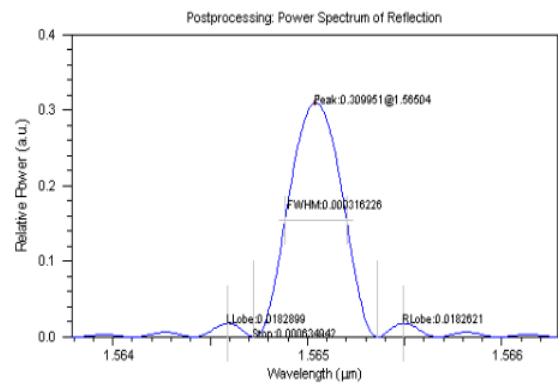
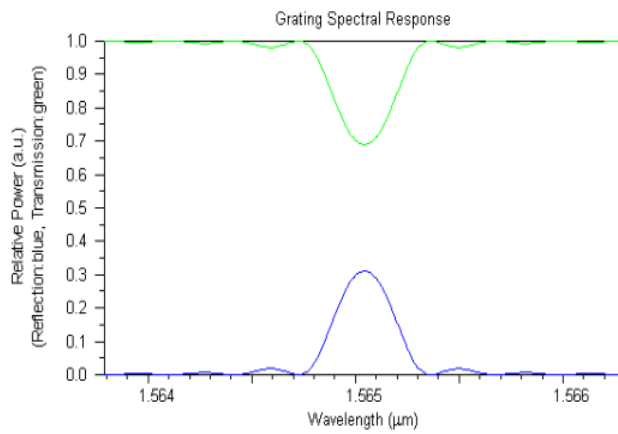
<2.366, 1.00,600>



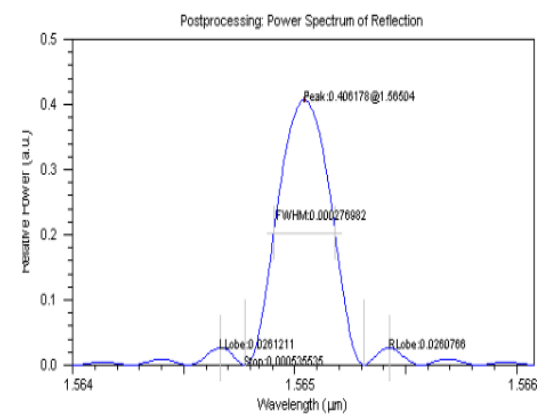
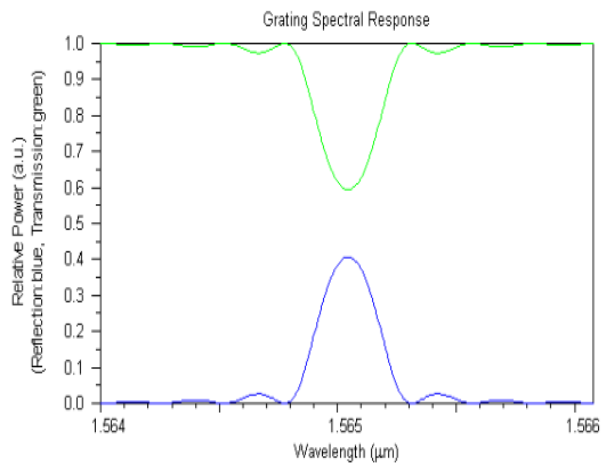
<2.366, 1.00,800>



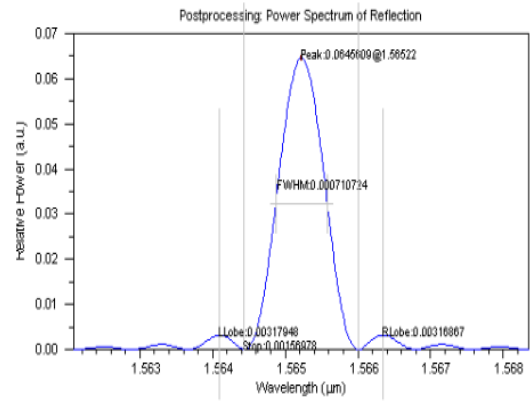
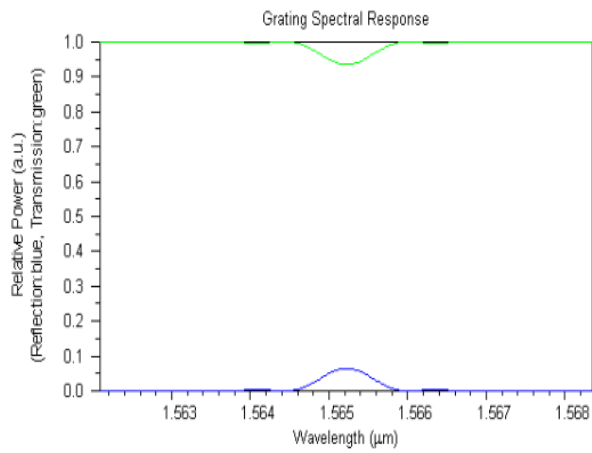
<2.366, 1.00,1000>



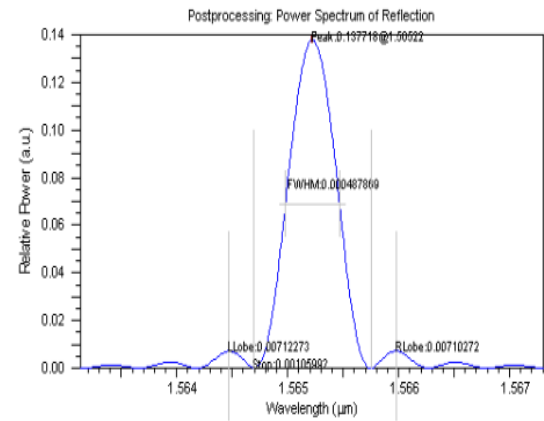
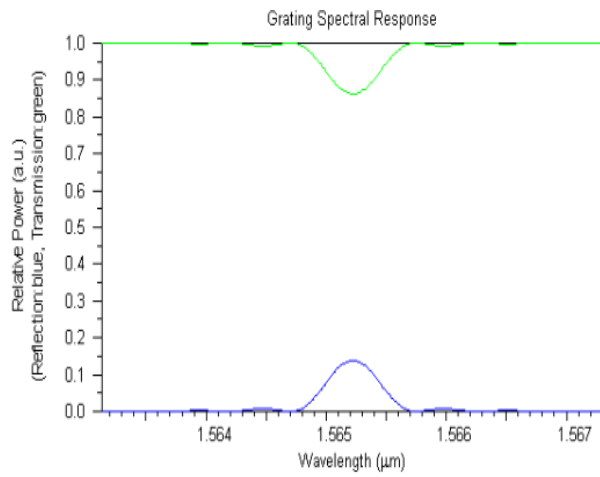
<2.366, 1.00,1200>



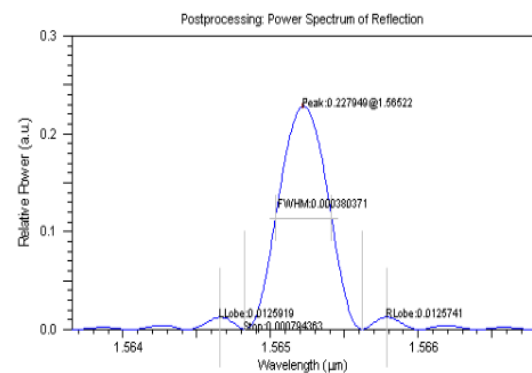
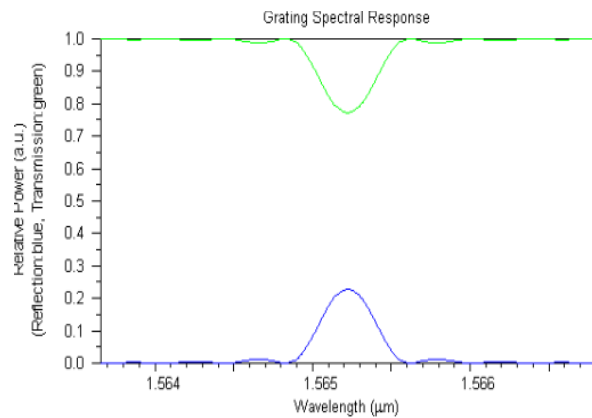
<2.366, 1.25,400>



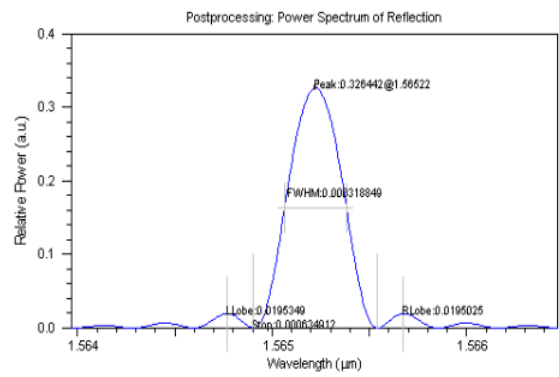
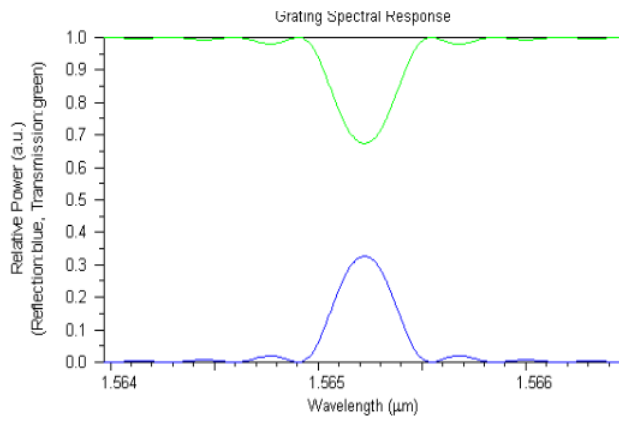
<2.366, 1.25,600>



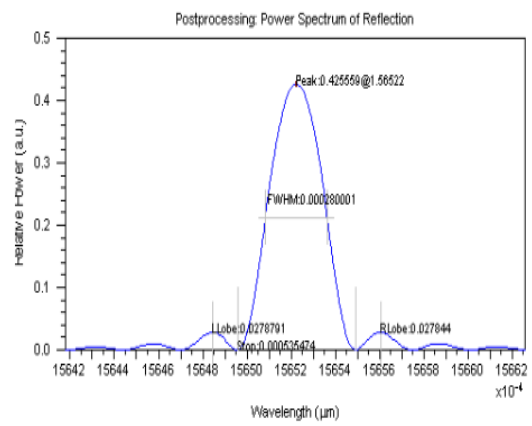
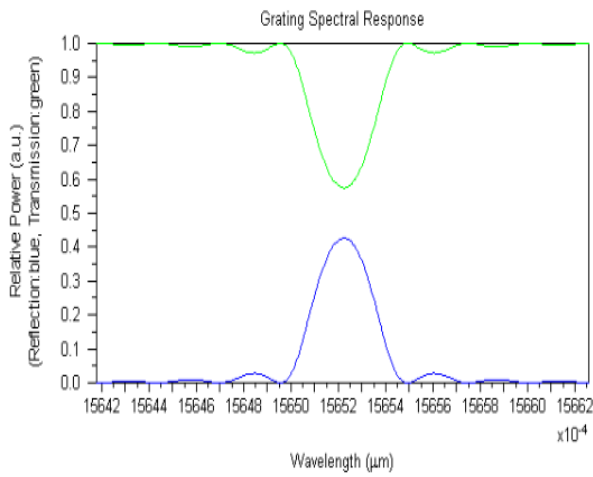
<2.366, 1.25,800>



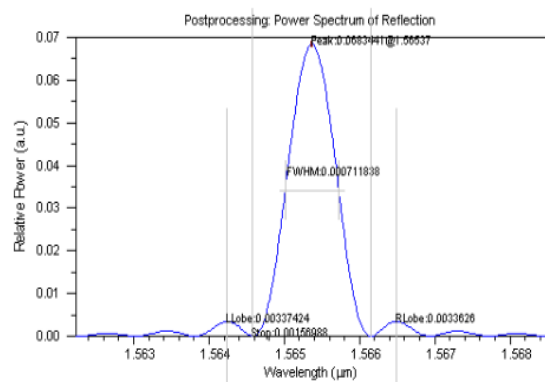
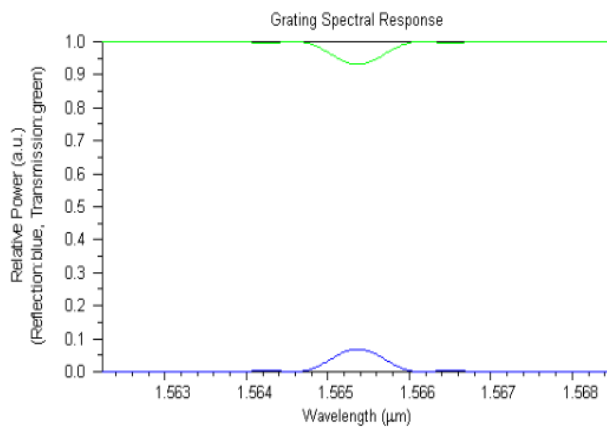
<2.366, 1.25,1000>



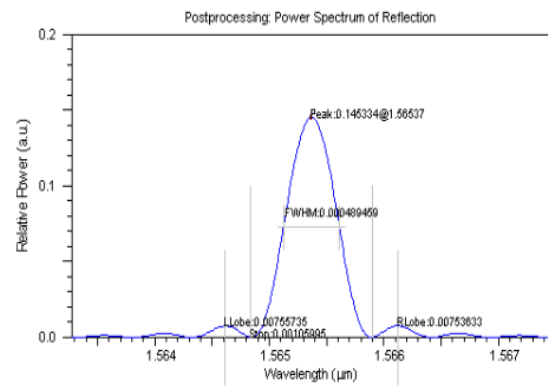
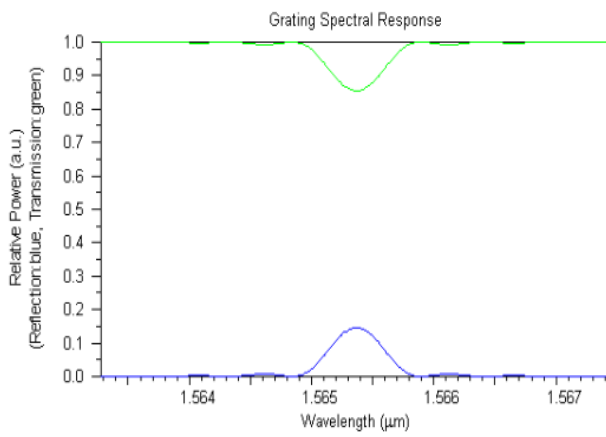
<2.366, 1.25,1200>



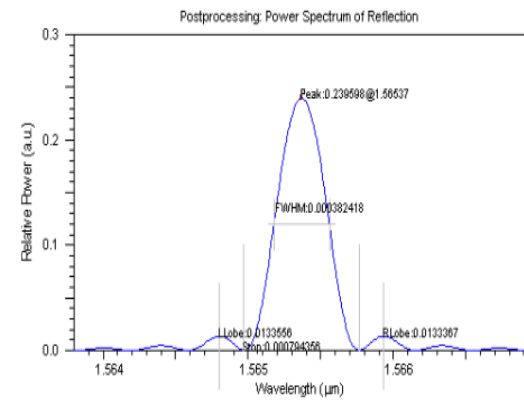
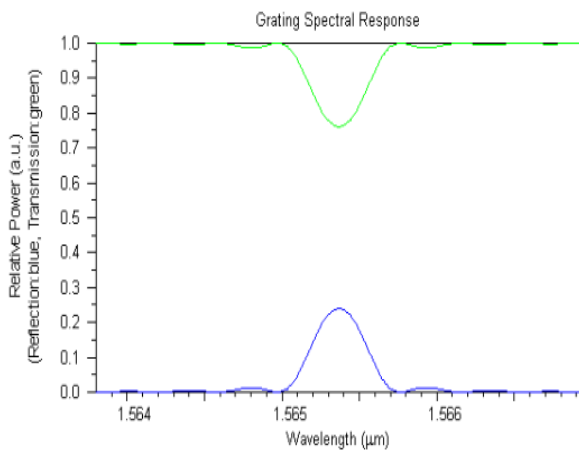
<2.366, 1.50,400>



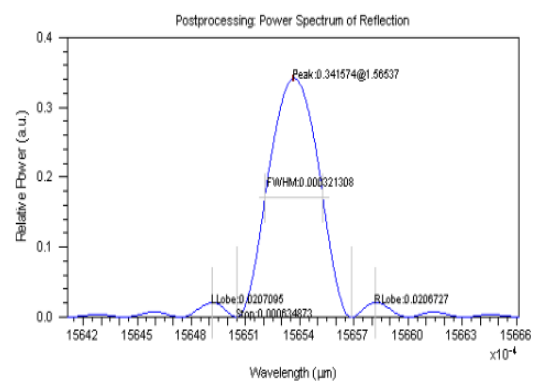
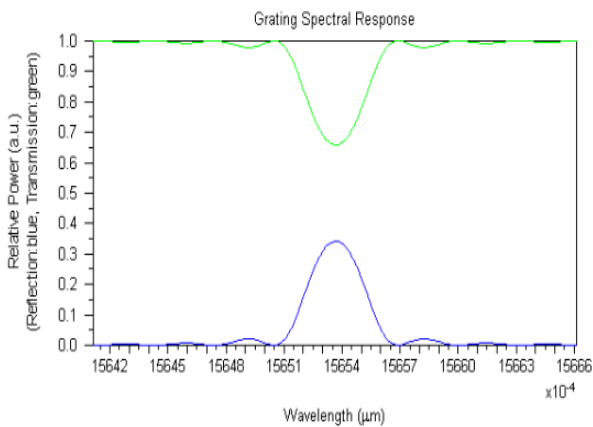
<2.366, 1.50,600>



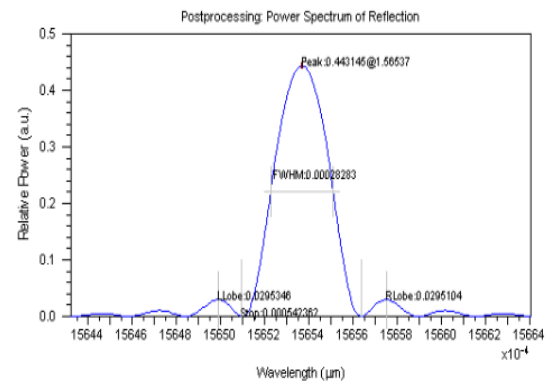
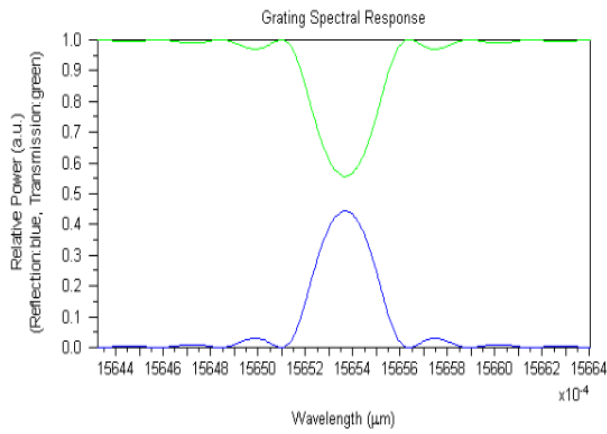
<2.366, 1.50,800>



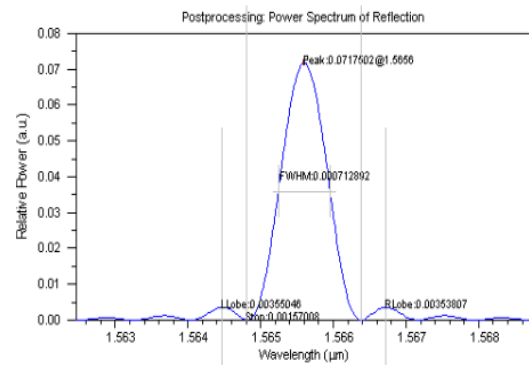
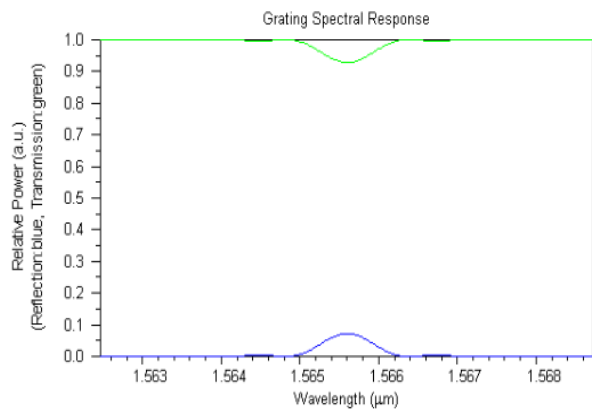
<2.366, 1.50,1000>



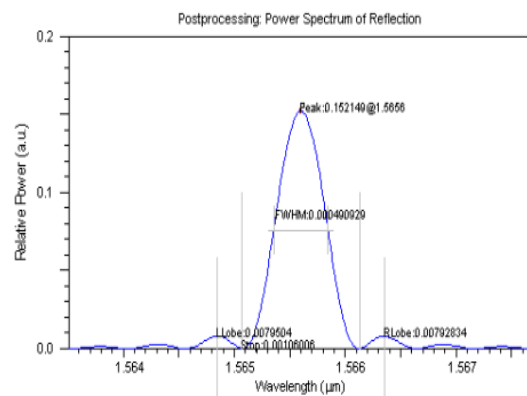
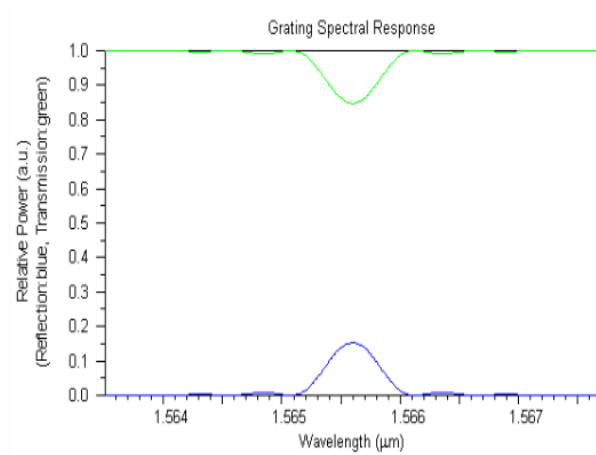
<2.366, 1.50,1200>



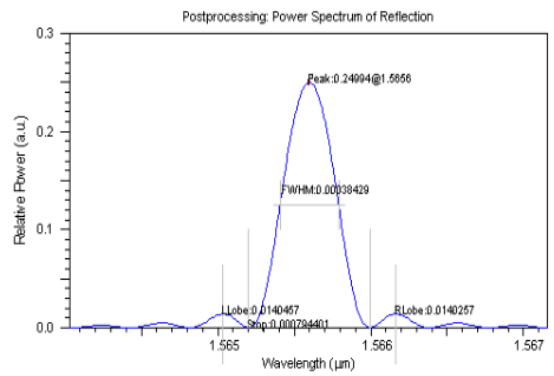
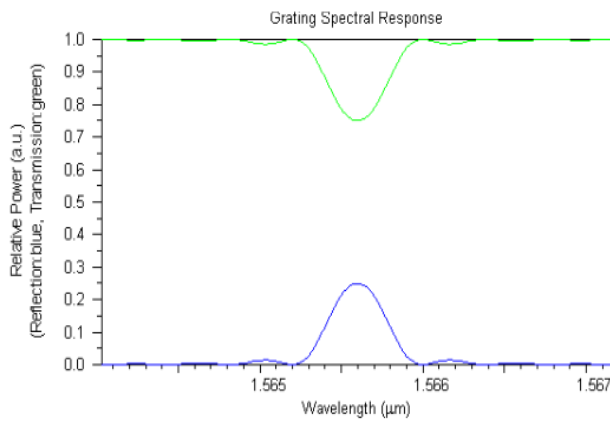
<2.366, 2.00,400>



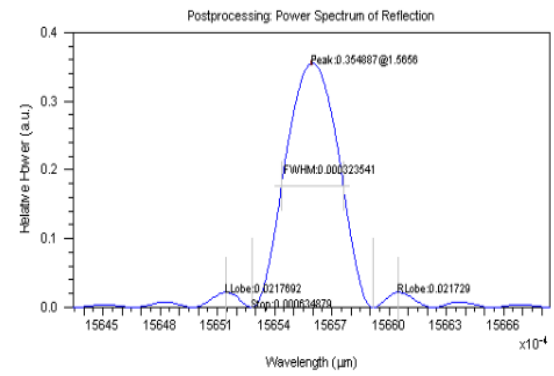
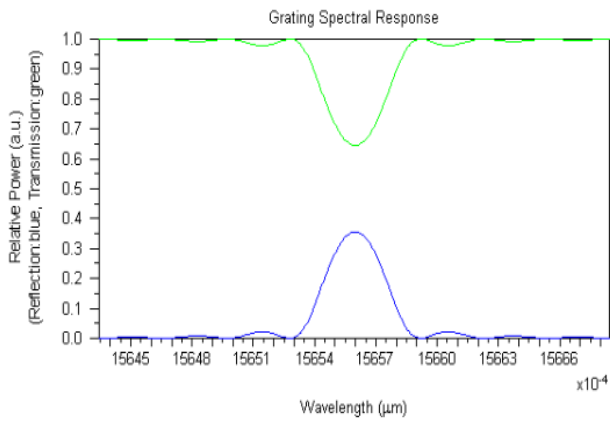
<2.366, 2.00,600>



<2.366, 2.00,800>



<2.366, 2.00,1000>



<2.366, 2.00,1200>

