

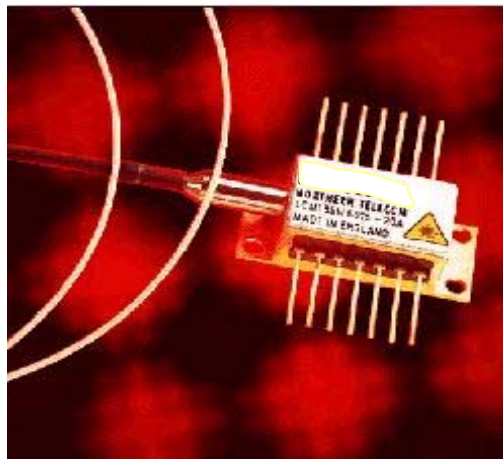


ΕΘΝΙΚΟ ΚΑΙ ΚΑΠΟΔΙΣΤΡΙΑΚΟ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΑΘΗΝΩΝ
ΤΜΗΜΑ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΚΗΣ ΚΑΙ ΤΗΛΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΩΝ

ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΟΠΤΙΚΩΝ ΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΩΝ

**ΜΑΘΗΜΑ: ΟΠΤΙΚΕΣ ΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΕΣ ΚΑΙ ΟΠΤΙΚΑ ΔΙΚΤΥΑ -
ΔΙΟΔΟΙ LASER**

ΥΠ. ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ: ΔΗΜΗΤΡΗΣ ΣΥΒΡΙΔΗΣ

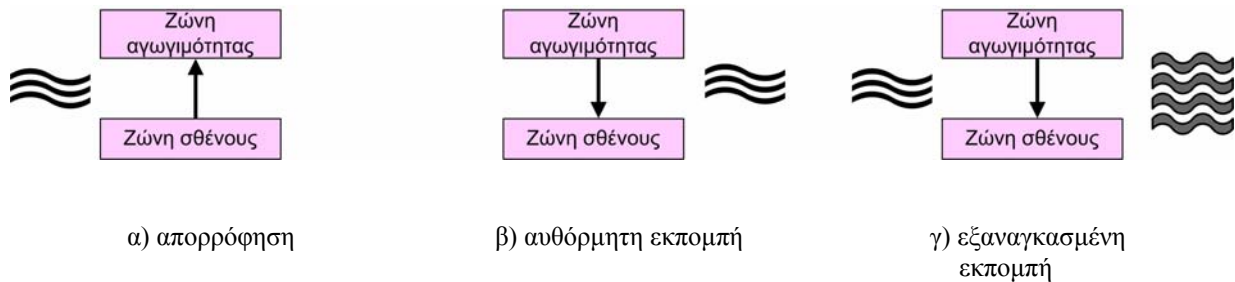


**ΑΘΗΝΑ,
ΔΕΚΕΜΒΡΙΟΣ 2004**

A. ΘΕΩΡΙΑ-ΒΑΣΙΚΕΣ ΕΝΝΟΙΕΣ

Το laser (Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation) πρακτικά είναι ένας οπτικός ταλαντωτής. Η λειτουργία της συσκευής μπορεί να περιγραφεί από την δημιουργία ενός στάσιμου ηλεκτρομαγνητικού κύματος μέσα στην οπτική κοιλότητα του laser η οποία έχει σαν έξοδο μια μονοχρωματική, σύμφωνη ακτινοβολία. Βασικές έννοιες για την κατανόηση της λειτουργίας ενός ημιαγωγικού laser είναι:

a) Απορρόφηση και εκπομπή ακτινοβολίας



Σχήμα 1.

Η θεμελιώδης φυσική διεργασία στην οποία στηρίζεται η λειτουργία των φωτοπηγών είναι η αλληλεπίδραση μεταξύ των ηλεκτρονίων που ανήκουν ενεργειακά στη ζώνη αγωγιμότητας ή στη ζώνη σθένους συγκεκριμένων ημιαγωγών και οπτικής ακτινοβολίας. Τα φωτόνια χαρακτηρίζονται από την ενέργεια τους $E_{\phi} = h\nu$, όπου ν η συχνότητα της φωτεινής ακτινοβολίας και h η σταθερά του Planck. Υπάρχουν τρεις μηχανισμοί αλληλεπίδρασης που φαίνονται παραστατικά στο Σχήμα 1.

α. Απορρόφηση: Ένα φωτόνιο που προσπίπτει στον ημιαγωγό απορροφάται και μετατρέπει ένα δέσμιο ηλεκτρόνιο σε ελεύθερο (ή διεγερμένο – ζώνη αγωγιμότητας) αφήνοντας στη θέση του μια οπή.

β. Αυθόρμητη εκπομπή: Μετά την απορρόφηση ενέργειας, το άτομο του ημιαγωγού βρίσκεται σε διεγερμένη κατάσταση στην οποία όμως δεν παραμένει για πολύ. Τα ελεύθερα ηλεκτρόνια αρχίζουν να καταλαμβάνουν σποραδικά ελεύθερες θέσεις οπών. Η διαδικασία αυτή λέγεται επανασύνδεση ηλεκτρονίων-οπών και ο ρυθμός της είναι ανάλογος της πυκνότητας τους. Οι επανασυνδέσεις συνοδεύονται με εκπομπή ασύμφωνης φωτεινής ακτινοβολίας δηλαδή σε τυχαίες χρονικές στιγμές, σε τυχαίες διευθύνσεις και με τυχαία φάση. Το μήκος κύματος λ εξαρτάται από το υλικό του χρησιμοποιούμενου ημιαγωγού.

γ. Εξαναγκασμένη εκπομπή και δράση Laser. Τα λόγω απορρόφησης διεγερμένα ηλεκτρόνια είναι δυνατόν να εξαναγκαστούν σε αποδιέγερση με πρόσπτωση πρόσθετης φωτεινής ακτινοβολίας κατάλληλης συχνότητας. Από τις επανασυνδέσεις που ακολουθούν, τα άτομα του ημιαγωγού εκπέμπουν σύμφωνη φωτεινή ακτινοβολία, δηλαδή με το ίδιο μήκος κύματος και φάση με τη φωτεινή ακτινοβολία, που εξανάγκασε την εκπομπή.

Σε συνθήκες θερμοδυναμικής ισορροπίας ο πληθυσμός n_0 της ζώνης σθένους είναι μεγαλύτερος από τον πληθυσμό n_a της υψηλότερης ενεργειακά ζώνης αγωγιμότητας. Έτσι αν

ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία με συχνότητα $f > E_g/h$ προσπέσει στο υλικό επικρατεί ο μηχανισμός της απορρόφησης. Αν με κάποιο τρόπο (οπτική ή ηλεκτρική διέγερση) δημιουργηθεί κατάσταση **αναστροφής πληθυσμών** ($n_a > n_s$), ο ρυθμός εξαναγκασμένης εκπομπής γίνεται μεγαλύτερος από το ρυθμό της απορρόφησης και της αυθόρμητης εκπομπής. Συνεπώς τα παραγόμενα φωτόνια προκαλούν την έναρξη μιας αλυσιδωτής σειράς επανασυνδέσεων που έχει σαν αποτέλεσμα την παραγωγή φωτεινής ακτινοβολίας μεγάλης ισχύος που προστίθεται στην αρχική διέγερση. Αυτή είναι ουσιαστικά μια διαδικασία οπτικής ενίσχυσης και αποτελεί τη δράση **LASER** (Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation - Ενίσχυση Φωτός με Εξαναγκασμένη Εκπομπή Ακτινοβολίας).

δ. Συνθήκη κατωφλίου. Για την επίτευξη της δράσης laser είναι απαραίτητο να συγκεντρωθούν φωτόνια στο μέσο (medium) του laser και να διατηρηθούν οι συνθήκες συμφωνίας. Αυτό επιτυγχάνεται τοποθετώντας ή διαμορφώνοντας κάτοπτρα σε κάθε μια από τις άκρες του μέσου ενίσχυσης. Η οπτική κοιλότητα που σχηματίζεται προσφέρει θετική ανατροφοδότηση (feedback) των φωτονίων λόγω ανάκλασης στα κάτοπτρα της κοιλότητας. Η συνθήκη κατωφλίου πληρείται όταν υπάρχει ακριβώς αρκετή εσωτερική απολαβή ανά μονάδα μήκους g ώστε να αντισταθμίσει τις εσωτερικές απώλειες a ανά μονάδα μήκους καθώς και τις διαφυγές ωφέλιμου φωτός από τα δυο κάτοπτρα, που το καθένα θεωρείται ότι έχει ανακλαστικότητα R . Όταν έχει υπάρχει ικανή αναστροφή πληθυσμού στο ενεργό υλικό η ακτινοβολία αυξάνεται και σχηματίζεται στάσιμο κύμα ανάμεσα στα κάτοπτρα. Τα στάσιμα κύματα δημιουργούνται μόνο σε συχνότητες για τις οποίες η απόσταση μεταξύ των κατόπτρων είναι ακέραιος αριθμός μισού μήκους κύματος. Έτσι όταν η απόσταση μεταξύ των κατόπτρων είναι L η συνθήκη συμφωνίας κατά μήκος της του άξονα της κοιλότητας δίνεται από την σχέση: $L = \lambda q / 2n$, όπου λ είναι το μήκος κύματος εκπομπής, n ο δείκτης διάθλασης του ενεργού υλικού και q ένας ακέραιος. Από την παραπάνω σχέση δίνεται ότι οι διακριτές συχνότητες εκπομπής δίνονται από $f = qc / 2nL$. Οι διαφορετικές συχνότητες ταλάντωσης μέσα στην κοιλότητα του laser καθορίζονται από τις διάφορες τιμές του ακεραίου q και κάθε μια είναι ένας *τρόπος*.

ε. Η καμπύλη P-I. Ένας πολύ διαφωτιστικός τρόπος για τον ρόλο που παίζουν η αυθόρμητη και εξαναγκασμένη εκπομπή σε ένα laser είναι κοιτάζοντας μια τυπική καμπύλη P-I. P είναι η φωτεινή ισχύς εξόδου από το ένα άκρο της διάταξης και I είναι το ρεύμα άντλησης. Καθώς το ρεύμα αυξάνεται από το μηδέν, υπάρχει ένα μικρό ποσό αυθόρμητης εκπομπής του οποίου η στάθμη ισχύος αυξάνει αργά γραμμικά με το ρεύμα I . Στην περιοχή αυτή, η διάταξη λειτουργεί αυστηρά σαν μια LED, εκπέμποντας *ασύμφωνη ακτινοβολία* της οποίας το φάσμα ισχύος είναι μια ευρεία καμπύλη, το φάσμα φθορισμού του υλικού. Σε κάποιο σημείο, υπάρχει αρκετό ρεύμα άντλησης ώστε το ποσό του φωτός που εκπέμπεται να ισούται με το ποσό που απορροφάται, οπότε λέμε ότι έχουμε *διαφάνεια*. Τελικά το ρεύμα φτάνει το *ρεύμα κατωφλίου* I_{th} οπότε έχουμε έναυση της εξαναγκασμένης εκπομπής και η φωτεινή ισχύς εξόδου P αυξάνει ταχύτατα με την παραπέρα αύξηση του I . Ταυτόχρονα ο χαρακτήρας του ακτινοβολουμένου φάσματος μεταβάλλεται από μια πλατειά άτακτη καμπύλη σε μια σειρά από γραμμές, τις γραμμές συντονισμού της κοιλότητας.

δ. Καταστολή πλευρικών τρόπων (side-mode suppression) Καθώς το ρεύμα άντλησης συνεχίζει να αυξάνεται πάνω από το κατώφλι, η περιβάλλουσα των γραμμών γίνεται ολο και στενότερη από την αρχική καμπύλη απολαβής λόγω φαινομένων που σχετίζονται με την καταστολή των πλευρικών-τρόπων ενώ ταυτόχρονα ο βασικός τρόπος μετατοπίζεται προς μικρότερα μήκη κύματος. Μπορεί κανείς να ορίσει το λόγο καταστολής των τρόπων (mode suppression ratio, MRS) ως

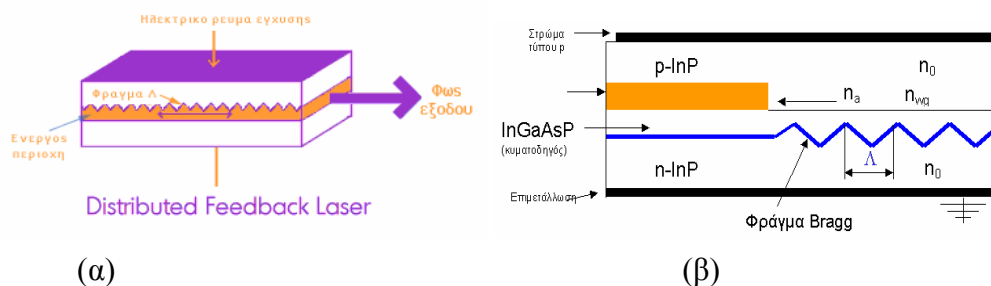
$MRS = \text{Ισχύς στον βασικό τρόπο} / \text{Ισχύς στον ισχυρότερο πλευρικό τρόπο.}$

b) Laser Fabry – Pérot (LD FP)

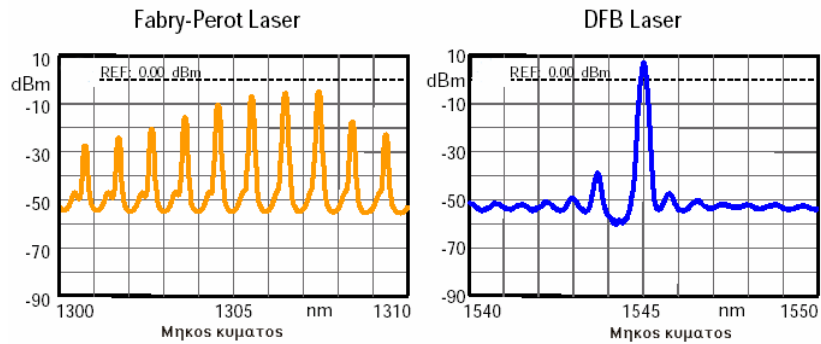
Ο απλούστερος τρόπος υλοποίησης της οπτικής ανατροφοδότηση είναι με τοποθέτηση ενός ζεύγους κατόπτρων στα άκρα του ενεργού στρώματος της LD και το σχηματισμό έτσι μιας κοιλότητας, ενός οπτικού αντηχείου. Τα κάτοπτρα φτιάχνονται στην εμπρός και πίσω πλευρά της επαφής με γυάλισμα και προκαλούν πολλαπλές ανακλάσεις των παραγομένων φωτονίων (σχήμα 2α). Μειονέκτημα αυτής της δομής είναι ότι επιτρέπει την ταυτόχρονη ταλάντωση σε πολλές συχνότητες (ή τρόπους, που καθορίζονται από τις διαστάσεις του στοιχειώδους οπτικού αντηχείου) και έτσι το εκπεμπόμενο φάσμα αποτελείται από πλήθος γραμμών (πολύτροπη λειτουργία) όπως φαίνεται στο σχήμα 3α. Ένα laser FP δεν είναι αυστηρά μονοχρωματικό και το εύρος γραμμής εκπομπής κυμαίνεται από 3 έως 20 nm. Η επικρατέστερη λύση σε αυτό το πρόβλημα δόθηκε με την ενσωμάτωση στη δομή, ενός φράγματος περίθλασης Bragg. Έτσι δημιουργείται επιλεκτική ανατροφοδότηση κατά το διαμήκη άξονα και εξασφαλίζεται μονότροπη λειτουργία, δηλαδή εκπομπή σε μια μόνο φασματικά στενή περιοχή.

c) Laser κατανεμημένης ανατροφοδότησης (LD DFB)

Στα Laser αυτού του τύπου το φράγμα (οπτικό φίλτρο) ενσωματώνεται στη δομή συνήθως πάνω και κατά μήκος της ενεργού περιοχής (κατανεμημένη ανατροφοδότηση – Distributed Feed Back) όπως φαίνεται στο Σχήμα 2β. Η περίοδος του φράγματος Λ είναι τέτοια ώστε να εξασφαλίζεται η ενισχυτική συμβολή της οπισθοσκεδαζόμενης οπτικής ακτινοβολίας στο επιθυμητό μήκος κύματος. Το εύρος γραμμής στις Laser DFB κυμαίνεται από 0.08 έως 0.8 nm, δηλαδή μια τέτοια φωτεινή πηγή μπορεί να θεωρηθεί μονοχρωματική (σχήμα 3β).



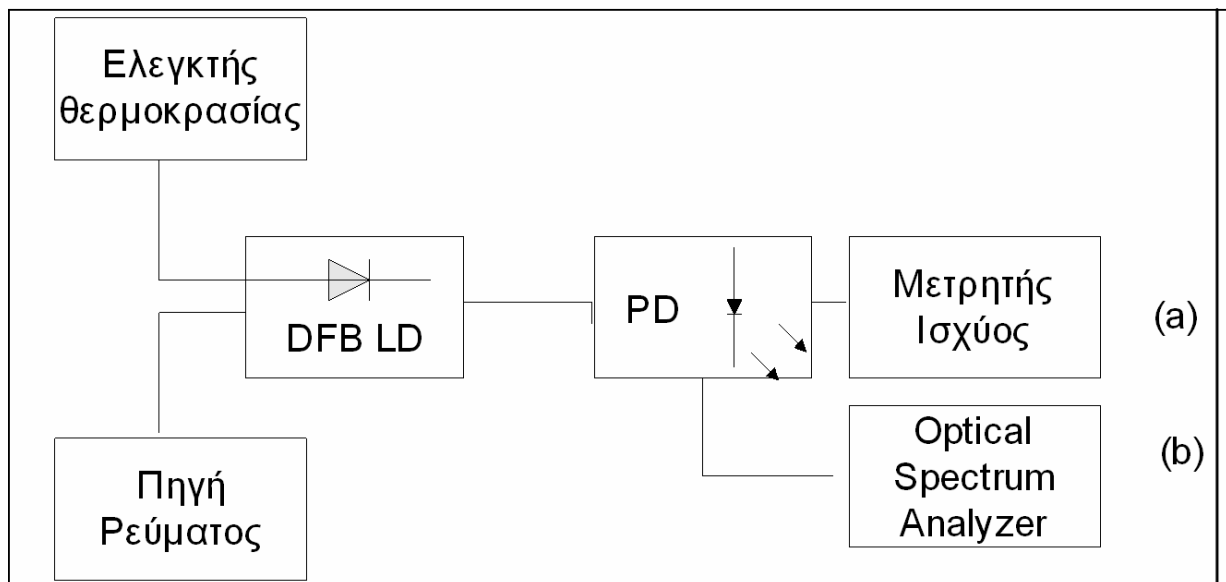
Σχήμα 2. Η δομή Laser α) DFB και β) DBR (διατομή)



Σχήμα 3. Το φάσμα εκπομπής μιας Laser FP και μιας Laser DFB

B. ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ

Πραγματοποιείτε το κύκλωμα του σχήματος:



Μετά από σύντομη εξοικείωση με τις συσκευές ελέγχου της διόδου laser

- Πραγματοποιείτε μετρήσεις της οπτικής ισχύος εξόδου (σε mW) του laser σε συνάρτηση με την ένταση του ρεύματος πόλωσης για τέσσερις διαφορετικές τιμές θερμοκρασίας (17°C , 19°C , 20°C , 22°C).

ΠΡΟΣΟΧΗ!!! Η ένταση του ρεύματος τροφοδοσίας του laser δεν πρέπει σε καμία περίπτωση να ξεπεράσει τα 25 mA.

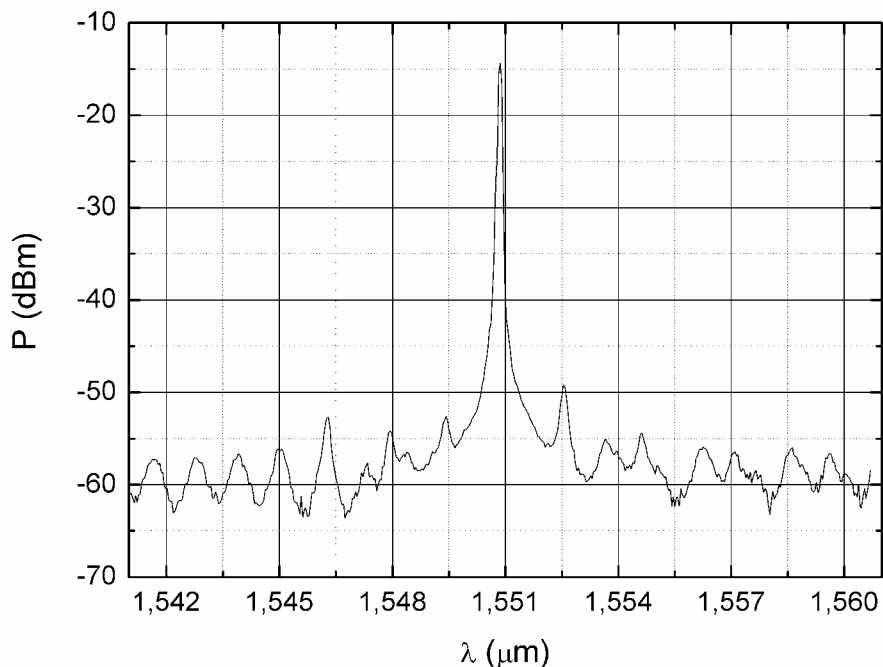
- Με βάση τις μετρήσεις σας σχεδιάστε σε κοινό διάγραμμα τις χαρακτηριστικές καμπύλες ισχύος εξόδου – έντασης ρεύματος (P-I) για τις διάφορες τιμές θερμοκρασίας. Βρείτε για κάθε μία από τις περιπτώσεις το ρεύμα κατωφλίου (I_{th}).
- Εξηγήστε τις διαφορές που παρατηρείτε και σχολιάστε τη λειτουργία του laser κάτω και πάνω από το κατώφλι ρεύματος. Σε ένα πραγματικό οπτικό τηλεπικοινωνιακό

σύστημα που χρησιμοποιείται άμεση διαμόρφωση υποδείξτε ένα κατάλληλο σημείο πώλωσης του laser. Αιτιολογήστε.

- Σχολιάστε την εξάρτηση της καμπύλης P-I από την θερμοκρασία. Γνωρίζοντας ότι για το συγκεκριμένο laser το T_0 είναι 55K υπολογίστε τον λόγο εξάρτησης της πυκνότητας ρεύματος από την θερμοκρασία.

b) Συνδέστε την έξοδο του laser με τον οπτικό αναλυτή φάσματος (OSA).

- Παρατηρήστε το οπτικό φάσμα κάτω και πάνω από το κατώφλι. Σχολιάστε τις διαφορές που ενδεχομένως έχει με το αντίστοιχο φάσμα μιας Fabry-Perot διόδου laser και αναφέρατε μειονεκτήματα, πλεονεκτήματα καθώς και τις αντίστοιχες εφαρμογές για κάθε μία από αυτές.
- Παρατηρείστε την καταστολή των πλευρικών τρόπων, πώς μεταβάλλεται με την αλλαγή του ρεύματος. Υπολογίστε το MRS για μια συγκεκριμένη θερμοκρασία
- Μεταβάλλετε τη θερμοκρασία του laser, τι παρατηρείτε στο μήκος κύματος του κεντρικού τρόπου? Ήταν αυτό που περιμένατε?
- Γνωρίζοντας ότι ο δείκτης διάθλασης του ημιαγωγού έχει μια μέση τιμή $n=3.5$, υπολογίστε κατά προσέγγιση το μήκος της κοιλότητας. Γνωρίζοντας το μήκος της κοιλότητας υπολογίστε τον αριθμό των τρόπων που υποστηρίζει η κοιλότητα του laser.



Σχήμα 4. Φάσμα εκπομπής DFB laser εργαστηρίου